creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

工學博士 學位論文

해양환경위해도 기반 해상방제장비 적정 배치모델 개발

Development of Optimum Deployment Model for Marine Spill Response Equipments based on Marine Environmental Hazard

指導敎授　尹 鍾 輝

2014年　2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋警察學科

河　民　才

本 論文을 河民才의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 李 殷 邦 印

委 員 崔 宰 赫 印

委 員 金 光 壽 印

委 員 李 文 鎭 印

委 員 尹 鍾 輝 印

2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목　　차

List of tables ·· iv
List of figures ··· viii
Abstract ·· x

제1장 서 론 ·· 1
1.1 연구의 배경 및 목적 ··· 2
1.2 연구방법 및 범위 ·· 5

제2장 해양오염 방제장비 분류 및 특성 ································ 9
2.1 해양오염 방제방법 ·· 10
2.1.1 해양오염 방제방법의 종류 ····································· 10
2.1.2 방제방법 종합 평가 ·· 18
2.2 해양오염 방제장비 ·· 21
2.2.1 해상방제장비의 분류 및 특징 ······························ 21
2.2.2 해안방제장비의 분류 및 특징 ······························ 25
2.3 해상방제장비 운용 사례 분석 ·· 27
2.3.1 Sea Prince호 오염사고 ·· 27
2.3.2 Hebei Spirit호 오염사고 ·· 28

제3장 해상 기름회수능력 설정 기준 분석 ······························ 31
3.1 해양선진국의 기준 ·· 32

dCollection

3.1.1 미국 ………………………………………………………………………………… 32
3.1.2 캐나다 ……………………………………………………………………………… 35
3.1.3 일본 ………………………………………………………………………………… 38
3.2 우리나라의 기준 ………………………………………………………………… 40
3.2.1 지역의 구분 ………………………………………………………………………… 40
3.2.2 지역별 최대 기름유출량 산정 ……………………………………………… 41
3.2.3 해상방제장비 소요량 산정 기준 …………………………………………… 43
3.3 국가별 기준 비교분석 ……………………………………………………………… 50
3.3.1 비교분석 …………………………………………………………………………… 50
3.3.2 시사점 ……………………………………………………………………………… 52

제4장 HBD(Hazard-Based Deployment) Model 설계 ……………… 54
4.1 이론적 배경 ……………………………………………………………………… 55
4.1.1 해양오염 위해요소 ……………………………………………………………… 55
4.1.2 계층분석과정(AHP) …………………………………………………………… 57
4.2 배치모델 설계방법 ……………………………………………………………… 61
4.2.1 적용구역 설정 …………………………………………………………………… 61
4.2.2 모델 구성 요소 및 항목 설정 ……………………………………………… 62
4.2.3 항목별 기초자료 통계 및 정규화 ………………………………………… 66
4.2.4 항목별 가중치 설정 …………………………………………………………… 66
4.2.5 지역별 해양환경위해도 도출 및 해상방제장비 배치량 산정 … 67
4.3 HBD Model 설계 ………………………………………………………………… 71
4.3.1 지역별 현황 분석 ……………………………………………………………… 71
4.3.2 항목별 가중치 ……………………………………………………………………… 80
4.3.3 HBD Model에 의한 지역별 배치량 ………………………………………… 81

Collection

제5장 HBD Model 적용 및 평가 ·· 86
5.1 HBD Model 적용 및 평가 방법 ·· 87
5.1.1 평가대상지역 ·· 87
5.1.2 평가방법 ··· 89
5.2 HBD Model 평가 ··· 93
5.2.1 권역내 기타지역에서 발생한 최대오염사고 대응 시뮬레이션 ···· 93
5.2.2 권역내 중심지역에서 발생한 최대오염사고 대응 시뮬레이션 ·· 103
5.2.3 Hebei Spirit호 오염사고 대응 시뮬레이션 ·························· 115

제6장 결 론 ··· 121

참고문헌 ·· 125

감사의 글

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

Collection

List of tables

Chapter 1

Table 1.1 Major marine oil spill accidents in Korea ······················ 3

Chapter 2

Table 2.1 Type of Shoreline Classification in Korea ····················· 15

Table 2.2 Shoreline cleanup methods ··· 16

Table 2.3 Advantages & disadvantages of oil spill response methods on water ·· 19

Table 2.4 Classification of oil fence depending on use ················ 22

Table 2.5 Classification of skimmer type ·· 23

Table 2.6 Equipments for Shoreline Cleanup ···································· 25

Chapter 3

Table 3.1 Removal capacity planning table ······································ 33

Table 3.2 Emulsification factors for petroleum oil cargo groups ··· 33

Table 3.3 On-water oil recovery resource mobilization factors ···· 34

Table 3.4 Discharge quantity & mobilization time according to Tier ·· 36

Table 3.5 Regional percentage of pollution response ····················· 36

Table 3.6 Area & region classification ·· 40

Table 3.7 Regional expected maximum quantity of spill ················ 42

Table 3.8 Estimated demand quantity of area oil recovery capacity on water ·· 47

Table 3.9 Regional demand quantity of oil recovery capacity ····· 48

Collection

Table 3.10 Regional demand quantity of oil fence and temporary oil storage tank ········ 49
Table 3.11 Comparison of oil recovery capacity criteria ········ 50

Chapter 4

Table 4.1 Items of Marine Environmental Hazard ········ 56
Table 4.2 Calculation procedure of AHP ········ 58
Table 4.3 Example of AHP survey(questionnaire) ········ 60
Table 4.4 Example of AHP scale ········ 60
Table 4.5 The Quantity of Oil Transported(2012) ········ 72
Table 4.6 The Regional State of Oil Storage Facility(2013) ········ 73
Table 4.7 The Number of Ship's Entry and Departure(2012) ········ 74
Table 4.8 The Amount of Spill of Past oil Spill Accident (2006~2011) ········ 75
Table 4.9 The State of Sea Farming(2010) ········ 76
Table 4.10 Area of Environmental Management Sea ········ 77
Table 4.11 The Number of Beach Users(2010) ········ 78
Table 4.12 Result of Normalization ········ 79
Table 4.13 Final weight for each item ········ 80
Table 4.14 Final degree of hazard in Area 1 ········ 82
Table 4.15 Final degree of hazard in Area 2 ········ 82
Table 4.16 Final degree of hazard in Area 3 ········ 83
Table 4.17 Final degree of hazard and oil recovery capacity ········ 84

Chapter 5

Table 5.1 Overview of simulation(Step 1 & 2) ········ 90
Table 5.2 Distance table between regions in Area 1 ········ 94

Collection

Table 5.3 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Incheon region(Area 1) ········ 94
Table 5.4 Accumulated actual oil recovery amount in Incheon region(Area 1) ········ 95
Table 5.5 Distance table between regions in Area 2 ········ 96
Table 5.6 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Yeosu region(Area 2) ········ 97
Table 5.7 Accumulated actual oil recovery amount in Mokpo region(Area 2) ········ 98
Table 5.8 Distance table between regions in Area 3 ········ 99
Table 5.9 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Busan region(Area 3) ········ 100
Table 5.10 Accumulated actual oil recovery amount in Busan region(Area 3) ········ 101
Table 5.11 Result of simulation of oil recovery capacity mobilization in area ········ 102
Table 5.12 Distance table between regions in Korea Coastal area ········ 103
Table 5.13 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Daesan region ········ 104
Table 5.14 Accumulated actual oil recovery amount in Daesan · Taean · Pyeongtaek region ········ 105
Table 5.15 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Yeosu region ········ 107
Table 5.16 Accumulated actual oil recovery amount in Yeosu region ········ 108

Collection

Table 5.17 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Ulsan region ······························ 110
Table 5.18 Accumulated actual oil recovery amount in Ulsan region ··· 111
Table 5.19 Result of simulation of mobilization for max. oil spill ··· 112
Table 5.20 Comparison of Oil Recovery Capacity for stockpile in 2007 and HBD Model in Daesan · Taean · Pyeongtaek ······ 116
Table 5.21 Actual oil recovery amount for Hebei Spirit accident in Taean ··· 116
Table 5.22 Accumulated actual oil recovery amount in Taean ······ 117

Collection

List of figures

Chapter 1

Fig. 1.1 Flowchart of the study ··· 8

Chapter 2

Fig. 2.1 Methods of Shoreline Cleanup ··· 16
Fig. 2.2 Common types of oil fence ··· 21
Fig. 2.3 Sea Prince oil spill accident in 1995 ··· 27
Fig. 2.4 Hebei Spirit oil spill accident and shoreline contamination ··· 28

Chapter 3

Fig. 3.1 Regional KCG stations and major ports in Korea ··· 41
Fig. 3.2 Example of calculation of demand quantity of oil fence ··· 45
Fig. 3.3 Mobilization system of marine pollution response resources for maximum marine pollution accident ··· 46
Fig. 3.4 Mobilization diagram of marine pollution response resources for maximum marine pollution accident (Daesan area) ··· 46

Chapter 4

Fig. 4.1 Division of area & region in Korea ··· 61
Fig. 4.2 Disaster Management Cycle ··· 62
Fig. 4.3 Hierarchy structure for calculating regional marine environmental degree of hazard ··· 65

Collection

Fig. 4.4 Flow chart of HBD Model ······ 69
Fig. 4.5 Comparison of regional oil recovery capacity ······ 85

Chapter 5

Fig. 5.1 The conventional definition of Tiered Preparedness and Response ······ 87
Fig. 5.2 Accumulated actual oil recovery amount in Incheon region(Area 1) ······ 96
Fig. 5.3 Accumulated actual oil recovery amount in Mokpo region(Area 2) ······ 99
Fig. 5.4 Accumulated actual oil recovery amount in Busan region(Area 3) ······ 102
Fig. 5.5 Accumulated actual oil recovery amount in Daesan · Taean · Pyeongtaek region ······ 106
Fig. 5.6 Accumulated actual oil recovery amount in Yeosu region ······ 109
Fig. 5.7 Accumulated actual oil recovery amount in Ulsan region ······ 112
Fig. 5.8 Accumulated actual oil recovery amount in Taean ······ 118
Fig. 5.9 Differences of actual oil recovery amount between stockpile in 2007 and HBD Model in Taean ······ 119

Collection

Development of Optimum Deployment Model for Marine Spill Response Equipments based on Marine Environmental Hazard

MINJAE HA

Department of Coast Guard Studies
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Regional oil recovery capacity in Korea is set to cover maximum marine oil spill accident. Current criterion for regional oil recovery capacity is designed based on regional maximum oil spill accident, which was set with probable max. spill amount, historical data, and mobilization time of response equipments to the scene of the spill. But there is the need to consider environmental impacts when setting up the criterion because the goal of response is to minimize the environmental damage and to recover the nature as soon as possible.

In this study, the need to consider environmental impacts after marine oil spill accident is suggested to respond rapidly in sensitive area & expected area of damage. The goal of this study is to develop the optimum deployment model for marine spill response equipments on the basis of regional degree of marine environmental hazard.

There are two kinds of oil spill response. One is oil recovery on water, the other is shoreline cleanup. Oil recovery on water is preferred to shoreline cleanup because of its low impact on the environment. Mechanical recovery, one of the methods of oil recovery on water, is now

Collection

the most effective method and widely used in the world. Although there are a few defects of mechanical recovery method, it is environmentally sound way to respond oil spill accident. For this reason, major marine developed countries, such as USA, Canada, Japan and Republic of Korea, adopt mechanical recovery method as their oil recovery capacity criterion.

The criteria for oil recovery capacity of USA, Canada, Japan and Republic of Korea are set by considering the factors about the causes of accident without consideration of factors about environmental impacts after accident occurred. So, the criteria need to be improved by applying the factors about environmental impacts to minimize damages from oil spill accident.

Optimum deployment model for marine spill response equipments (Hazard-Based Model ; HBD Model) is developed based on regional marine environmental degree of hazard. The development process of HBD Model is as follows. First of all, 7 marine environmental hazard items are established and regional states of 7 items are surveyed. And the results of surveys are normalized to be used for AHP calculation. The weighted values of 7 items are calculated by Analysis Hierarchy Process. Then regional degrees of hazard are calculated by mixing the normalization results and the weighted values of 7 items. Oil recovery capacity of 7,500kℓ, which is set for each area based on current criterion, is distributed and deployed depending on the regional degree of hazard. There are some differences between the regional amount of HBD model and the regional amount of current criterion for regional oil recovery capacity.

The simulations to mobilize regional marine spill response equipments are carried out to apply and evaluate HBD model. There are two kinds of

Collection

simulations. One is response simulation for maximum oil spill accident, the other is response simulation for Hebei Spirit oil spill accident. Response simulation for maximum oil spill accident is carried out to verify whether HBD Model satisfies current criterion or not. The evaluation by comparing the stockpile of oil spill response equipments in 2007 and HBD model is also carried out. As a result of the simulations, HBD Model meets the requirements for all situations. Therefore HBD Model is verified as practicable.

HBD Model is expected to contribute to the advancement of marine oil spill response field if it is reflected in the policy making process because HBD model can improve efficiency of restoration by minimizing environmental damages from oil spill accident. There is the need to upgrade HBD Model by reflecting additional items to HBD Model.

Collection

제1장 서 론

Collection

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라는 지속적인 경제발전으로 인하여 경제활동에 필요한 에너지의 소비가 꾸준히 증가하고 있고, 이에 따른 원유와 같은 석유제품의 해상운송량도 지속적으로 증가하고 있다. 현재 우리나라는 연간 1억 5,000만톤의 원유를 수입하는 국가로서 초대형 원유운반선(Very Large Crude Oil Carrier ; VLCC) 10여척이 상시로 국내 연안해역을 통항하거나 하역작업을 하고 있다(김, 2012). 이같이 해상 유류수송량이 증가함에 따라 대형 해양오염사고의 가능성이 높아지고 있으며, 실제로 1995년 Sea Prince호 오염사고와 2007년 Hebei Spirit호 오염사고를 비롯하여 크고 작은 유류오염사고가 지속적으로 발생하였다(Table 1.1).

특히, 1995년 발생한 Sea Prince호 대형 유류오염사고를 통하여 기름유출에 대한 피해의 심각성을 인식하였고, 이에 따라 해양경찰청, 해운항만청, 수산청, 지자체 등에 분산되어 있던 정부의 방제업무를 해양경찰청으로 일원화하는 계기가 되었다. 또한 대형 해양오염사고에 대비하기 위한 국가긴급방제계획(National Contingency Plan ; NCP)과 지역긴급방제실행계획(Regional Contingency Plan ; RCP)을 수립하였고, 해양오염방제조합(現 해양환경관리공단)을 설립하여 국가와 민간이 공동으로 해양오염사고에 대응할 수 있도록 하였으며, 우선적으로 부족한 방제장비를 단기간에 확보할 목적으로 국가방제능력이란 개념을 도입하게 되었다. 하지만 이러한 국가적 차원의 대비와 노력에도 불구하고 2007년 12월에 Hebei Spirit호 오염사고가 태안 앞바다에서 발생하였고, 이로 인해 대형 해양오염사고에 대한 국가대응능력 및 방제정책을 재검토하게 되었다.

Collection

Table 1.1 Major marine oil spill accidents in Korea

Pollutant	Type of ship	GRT	Date	Place	Spillage(kℓ)
Sea Prince	Tanker	144,567	1995.7.23.	Yeosu	Crude oil 4,155 B/C 879
No.1 Yuil-ho	Tanker	1,591	1995.9.21.	Busan	Bunker-C 2,392
Honam Sapire	Tanker	142,448	1995.11.17.	Yeosu	Crude oil 1,402
No.3 Osung	Tanker	786	1997.4.3.	Tongyeong	Bunker-C 1,699
Jungyang-ho	Tanker	4,061	2003.12.31.	Yeosu	Bunker-C 623.3
Hebei Spirit	Tanker	146,848	2007.12.7.	Taean	Crude oil 12,547

한편, 해양오염사고가 발생하면 적정 수량의 해상방제장비를 현장에 신속히 동원하여 대응해야 하기 때문에 해상방제장비를 지역별로 배치하고 있는데, 해상방제장비의 지역별 배치방법은 국가별로 자국의 실정과 지역 특성을 고려하여 설정하고 있다. 주요 해양선진국인 미국, 캐나다, 일본에서는 해양오염사고의 심각성 때문에 해양오염사고에 대비할 수 있는 방제장비 확보의 중요성을 강조하고 있는데, 해양선진국들의 기준은 공통적으로 해양오염사고로 인한 기름유출량을 회수하는데 필요한 방제장비를 거리에 따른 동원 시간에 근거하여 지역별로 필요한 수량을 규정하고 있다.

미국은 OPA 90과 33 CFR(Part 155)에 의해 선박소유자 또는 사용자가 계약 또는 기타 승인된 방법으로 자신의 운항중인 선박에서 오염사고가 발생하여 적재화물 전량이 유출되는 최악유출사고에 대비하기 위한 충분한

Collection

수량의 장비와 인력을 확보하도록 의무화하고 있다. 캐나다는 해운법(Canada Shipping Act)과 국가방제시스템에 의해 오염행위가 방제원칙에 따라 오염사고에 대비하여 필요한 대책을 마련해야 하고, 사고로 인한 환경피해에 대한 배상책임이 부과되어 있으며, 오염방제작업은 국가승인방제조합을 통해 수행하도록 하고 있다. 일본은 지역별 긴급방제실행계획(RCP)에 최대유출사고의 경우별 시나리오를 설정하여 유출량 전부를 회수하는 것을 목표로 이에 필요한 방제장비를 규정하고 있다.

우리나라의 경우, Sea Prince호 오염사고를 계기로 우선적으로 부족한 방제장비를 단기간 내에 확보할 목적으로 국가방제능력이라는 개념을 도입하게 되었다. 여기서 국가방제능력이란 방제장비 확보기준 설정과 관련하여 국가 방제정책목표를 계량화하기 위한 개념으로, 전국 차원의 유회수기의 해상기름회수용량을 기준으로 산정한 것을 말한다. 이러한 국가방제능력 설정 기준은 우리나라 연근해 통항선 및 입출항 선박 중 최대크기인 DWT 300,000톤급 유조선에서 해양사고 발생시 최대 60,000톤의 기름이 유출된다고 가정하고, 이때 유출된 기름의 ⅓인 20,000톤은 증발, ⅓인 20,000톤은 해안에 부착, 나머지 ⅓인 20,000톤은 해상에서 수거하여 처리하는 것을 목표로 설정되었다. 이는 국제석유산업환경보호협의회(IPIECA)의 권고사항, 즉, 과거 대형유조선 사고시의 유출량에 대한 통계분석 결과를 바탕으로 VLCC의 해양사고시 탱크 2개가 파손되며, 여기에 적재된 기름 전량이 유출된다고 가정하는 것을 근거로 설정한 결과이다(해양환경관리공단, 2011).

Hebei Spirit호 오염사고 후, 지역 차원의 해상방제장비 확보의 필요성이 제기됨에 따라 현재 운항중인 유조선의 구조적인 차이, 즉, 이중선체 유조선을 기준으로 MARPOL 계산방식(MARPOL Annex I Reg 24 & 25)을 적용

Collection

하여 예상 최대유출량을 45,000㎘로 가정하고 그 중 ⅓인 15,000㎘를 해상에서 수거하는 것을 목표로 하여 국가차원의 해상기름회수용량을 산정하게 되었다. 그리고 지역별로는 각 지역의 입출항 및 통항선박과 과거 해양오염사고를 기준으로 발생 가능한 지역 최대 해양오염사고에 대비하여 확보해야 하는 유회수기의 지역별 유효회수용량 뿐만 아니라 해상방제작업에 필요한 오일펜스와 임시저장용기의 용량도 함께 제시하고 있다.

주요 해양선진국과 우리나라의 기름회수능력은 예상 최대기름유출사고의 최대기름유출량과 거리에 따른 방제장비의 동원시간을 고려하여 설정된 것이다. 하지만 사고 후에 입을 수 있는 피해를 최소화하기 위해서는 사고로 인한 기름 유출량과 동원시간을 고려하여 설정된 현행 기준에 환경적인 요인들을 포함한 기준이 추가적으로 반영될 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 방제효율의 극대화 뿐만 아니라 환경피해 최소화를 위해 현행 지역별 기름회수능력 설정 기준에 환경위해적 요소를 추가로 반영한 지역별 해상방제장비 배치모델을 설계하고자 한다.

1.2 연구방법 및 범위

본 연구의 목적은 지역별 해상방제장비 배치모델을 설계하는 것이다. 이를 위하여 먼저 해양오염 방제방법의 조사를 통하여 해상방제의 중요성을 확인하고, 해상방제 방법 중 현행 기름회수능력 설정의 근거가 되는 기계적회수 방법에 대하여 알아본다. 또한, 주요 해양선진국의 기름회수능력 설정 기준과 현행 한국 지역별 기름회수능력 설정 기준을 알아보고, 현행 기준의 한계점을 도출하여 지역별 해상 기름회수능력 설정의 개선 필요성을 제시한다.

Collection

지역별 해상방제장비 배치모델은 권역에 배치되어야 하는 기름회수능력 7,500㎘(현행기준 적용)를 권역내 지역별 해양환경위해도에 따라 분산·배치하는 방식으로 설계한다. 지역별 해상방제 배치모델 설계를 위해 사고개연성과 사후 민감도 두 부문으로 나누어 7개의 위해도 항목을 설정하여 이에 대한 통계자료의 정규화된 값을 지역별 가중치 산정을 위한 자료로 활용한다. 그리고 해양오염분야 전문가 설문 및 계층분석과정(AHP)을 통하여 7개 위해도 항목의 가중치를 산정한다. 이 두 결과치를 바탕으로 지역별 최종 가중치를 산정하고, 산정된 최종 가중치를 해당 지역의 해양환경위해도로 보고 최종 가중치의 비율에 따라 해상방제장비 배치량을 설정한다.

설계된 지역별 해상방제장비 배치모델의 적용 및 평가를 위해 특정 지역의 사고를 가정하여 기름회수능력 동원 시뮬레이션을 실시한 결과가 현행 해상방제 목표량을 충족하는지를 살펴볼 것이고, 현행 기준에 따른 동원량과 본 연구에서 설계한 배치모델에 따른 동원량의 비교를 통해 평가할 것이다. 또한, 2007년 Hebei Spirit호 오염사고당시 실제 배치된 지역별 해상방제장비의 동원에 따른 기름회수능력과 본 연구에서 설계한 배치모델에 따른 동원 시뮬레이션을 비교하여 배치모델의 유효성을 평가할 것이다.

본 연구는 다음과 같이 전체 6개의 장으로 구성되어 있다.

먼저 제1장에서는 연구의 배경 및 목적을 설명하고 연구방법 및 범위에 대하여 서술하였다.

제2장에서는 해양오염 방제방법에 대하여 조사·분석하여 해상방제의 중요성에 대하여 알아보았고, 해상방제방법 중 현재 가장 광범위하게 이용되고 있는 기계적 회수 방법의 내용, 특징 및 제약조건에 대하여 조사·분석함으로써 현행 기름회수능력 설정의 대상인 유회수기, 오일펜스, 임시저장

Collection

탱크에 대하여 정리하였다. 또한, 우리나라에서 발생한 주요 해양오염사고인 Sea Prince호 오염사고, Hebei Spirit호 오염사고의 소개 및 이용된 방제방법에 대하여 정리하였다.

제3장에서는 주요 해양선진국의 기름회수능력의 설정 기준을 조사·분석하여 시사점을 도출하였다. 또한, 우리나라 현행 기름회수능력의 개념이 정립되기까지의 이력과 지역별 기름회수능력의 설정기준을 알아보고, 이를 바탕으로 현행 지역별 기름회수능력 설정 기준에 각 지역의 특성을 추가적으로 고려한 지역별 해상방제장비 배치모델 설계의 필요성을 도출하였다.

제4장에서는 우리나라의 지역별 해상방제장비 배치모델을 설계하기 위해 먼저 이론적 배경을 살펴보았고, 구체적인 배치모델 설계방법을 제시하였다. 제시된 설계방법에 따라 해양환경위해도 기반 해상방제장비 배치모델을 설계하여 제시하였다.

제5장은 제4장에서 제시한 해상방제장비 배치모델을 적용 및 평가하기 위한 장으로, 먼저 평가방법을 제시하였고, 제시된 평가방법에 따라 발생 가능한 오염사고를 가정하여 지역별 기름회수능력 동원 시뮬레이션을 실시하였다. 동원 시뮬레이션 결과를 바탕으로 본 연구에서 설계한 해상방제장비 배치모델을 평가하였다. 모델의 평가는 3가지의 경우를 가정하여 진행하였는데, 먼저 권역내 취약지역과 최대오염사고 발생이 가능한 지역의 최대오염사고 발생을 가정하여 대응하는 최대오염사고 대응 시뮬레이션과, 2007년 Hebei Spirit호 오염사고 당시 본 연구에서 제시한 모델에 따라 대응하는 시뮬레이션을 실시하여 모델을 평가하였다.

마지막으로 제6장에서는 결론으로 본 연구에서 제시한 지역별 해상방제장비 배치모델과 동원 시뮬레이션 결과를 재정리하였다. 또한, 지역별 특성을 고려한 지역별 해상방제장비 배치모델의 필요성과 시급함을 강조하

Collection

고, 향후 지역별 특성을 반영할 수 있는 위해도 항목을 모델에 추가로 적용하여 배치모델을 고도화할 필요성도 제시하였다.

본 연구에서의 전반적인 연구의 흐름은 Fig. 1.1과 같다.

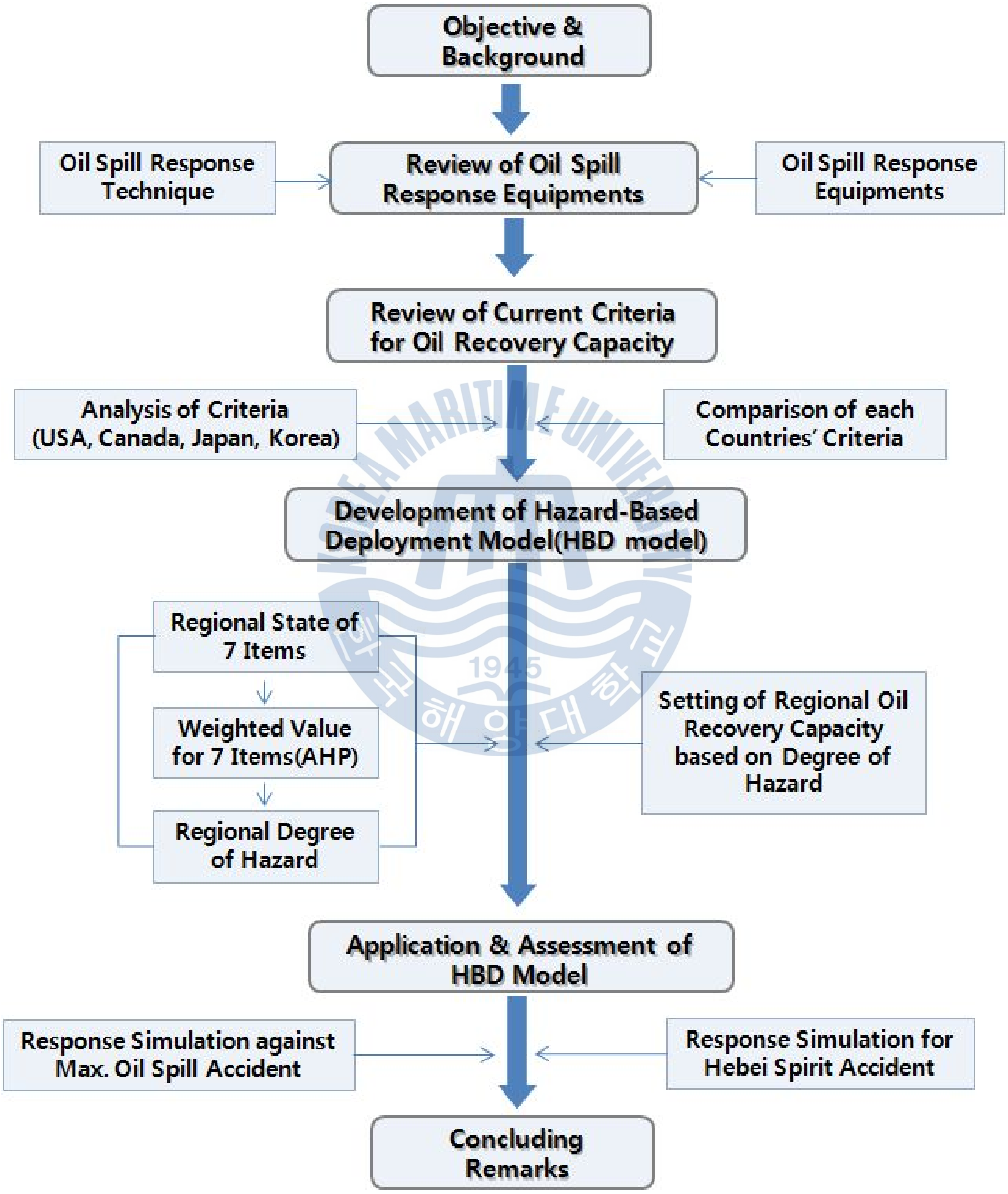

Fig. 1.1 Flowchart of the study

Collection

제2장 해양오염 방제장비 분류 및 특성

Collection

2.1 해양오염 방제방법

2.1.1 해양오염 방제방법의 종류

해양오염 방제방법은 크게 자연방산(Natural Recovery), 해상방제 및 해안방제로 나누어 생각할 수 있다. 자연방산은 방제작업이 불필요하거나 환경피해가 없는 것으로 예상되는 경우, 기름이 민감지역 또는 육지로 이동하지 않을 것으로 예상되는 경우, 기름이 자연적으로 제거 또는 분산되는 경우에 아무런 조치를 취하지 않고 그대로 두면서 모니터링하는 방식이므로 여기서는 다루지 않고, 해상방제방법과 해안방제방법에 한정하여 살펴보았다.

(1) 해상방제방법

1) 기계적 회수

기계적 회수(Mechanical Containment & Recovery) 해상방제방법은 해면상의 기름을 오일펜스로 포집한 후 유회수기로 회수하여 저장탱크로 이송하는 방제방법이다.

대부분의 국가에서는 해상에서 기름 유출사고가 발생하면 유출유를 기계적으로 회수하는 것을 우선시하고 있다. 이는 기계적 회수 방법은 기름의 상태 그대로 회수하기 때문에 기름으로 인한 환경피해를 최소화할 수 있기 때문이다. 특히 주요 해양선진국에서는 기계적 회수에 필요한 해상방제장비 수량을 규정하여 지역별로 보유하고 있도록 하고 있으며, 여기에는 유회수기 뿐만 아니라 기름회수작업에 필요한 오일펜스와 임시저장탱크의 필요 수량도 함께 규정하고 있다.

Collection

하지만, 기계적 회수 방법은 비용이 많이 들고 지속적인 물자지원이 필요하며, 해양과 기상상태에 따라 효율성이 크게 좌우되는 단점이 있다. 또한, 상황에 따라 기름의 포집율과 회수율을 조절해야 하며, 회수유의 처리도 기계적 회수 방법의 중요한 부분이다.

이러한 특징으로 인해 기계적 회수 방법을 채택하는 경우에는 오일펜스와 유회수기 운용에 필요한 충분한 선박과 기름저장탱크의 확보, 해양·기상상태 및 유출유의 물리적 상태에 대한 고려, 방제장비 운용에 필요한 전문인력 확보 등에 대한 충분한 고려가 이루어진 후에 방제작업이 수행되어야 한다.

2) 유흡착재를 이용한 방제방법

유흡착재를 이용한 해상방제방법은 해양에 유출된 오염물질을 물리적인 방법으로 흡착하여 수거하는 것이다. 유흡착재는 해상에 유출된 오염물질을 흡수 또는 흡착하여 회수하는 물질로서, 유출량이 적거나 좁은 지역으로 유회수기를 이용한 회수작업이 곤란한 경우와 양식장 및 산란지 등 민감해역에서 방제작업이 제한된 경우에 주로 사용한다. 이 방법은 방제작업의 마무리 단계에 주로 이용되는데, 우리나라를 포함한 일부 국가에서는 해양오염사고 초기 기계적 회수를 위한 설비를 설치하기 이전에 신속히 기름을 제거하기 위해 유흡착재를 자주 사용하기도 한다.

유흡착재의 사용은 오염물질의 특성, 해상상태, 해역의 특성 등을 감안해야 하고, 사용한 흡착재를 수거할 수 있는지 판단 후 사용여부를 결정한다. 해·조류가 빠른 외해에서의 사용은 자제해야 하고, 흡착이 가능한 오염물질의 최소한의 두께는 약 0.1mm 이상인 경우에 사용하며, 오염물질의 두께가 엷을 경우 흡착율 및 흡착속도가 낮아지므로 오일펜스로 포집하면

Collection

효율을 높일 수 있다. 오염물질을 흡착한 흡착재는 반드시 전량 수거해야 하며, 방치하여 2차오염이 발생하지 않도록 해야 한다. 고점도 오염물질(5,000cSt 이상)에는 흡착효과가 없으므로 사용을 제한해야 하며, 유처리제 살포작업과 병행하면 흡착성능이 저하되는 점을 유의해야 한다.

이러한 사용상 특성을 가진 유흡착재를 이용한 해상방제방법은 유회수기의 설치가 어려운 지역, 선박의 접근이 곤란한 해역, 환경민감해역 등과 같이 외부의 물리적 조건으로 인해 기계적 회수 방법을 적용하기 어려운 곳에서 이용 가능한 장점을 지니고 있다. 반면, 해상에서 사용한 유흡착재를 반드시 회수해야 하기 때문에 많은 인력이 필요하고, 많은 양의 폐기물이 발생하는 단점도 지니고 있다.

3) 유처리제를 이용한 방제방법

유처리제를 이용한 해상방제방법은 해상에서 발생하는 각종 유출사고시 물리적인 수거가 불가능한 경우 오염에 민감한 지역의 피해를 사전에 예방하기 위해 사용되는 방제방법으로, 유출사고로 인한 생태계의 피해와 각종 위험을 최소화하는 것이 목적이다.

유처리제에 의한 분산처리방법은 심미적, 생태적, 경제적 영향 및 오염방제의 비용 때문에 오래전부터 여러 국가에서 우선적 오염방제방법으로 사용되어 왔다. 하지만, 1967년 영국 연안에서 발생한 Torrey Canyon호 오염사고시 사용된 유처리제로 인한 생물군의 피해가 밝혀지면서 유처리제의 유독성에 대하여 인식하게 되었고, 이에 따라 많은 국가에서 유처리제의 사용을 금지하게 되었다. 이후 유처리제의 독성을 줄이고 분산 효율을 높이는 연구가 계속 이어졌고, 유처리제 살포시스템도 함께 개발되어 해양오염사고시 유처리제의 즉각적인 적용이 가능하게 되었다. 유처리제의 해양

Collection

환경 및 생물에 미치는 영향 때문에 미국, 캐나다, 유럽 등에서는 민감지역에서의 사용을 엄격하게 제한 또는 승인을 받도록 의무화하고 있다.

최근 유처리제는 유출초기에 신속하게 사용하는 것이 가장 효과적인 점을 감안하여 유처리제의 사용제한을 완화하는 추세이다. 우리나라에서도 지역에 따라 현장방제책임자 재량으로 유처리제를 살포할 수 있는 해역(ZONE 1), 주변 상황을 고려한 후 살포할 수 있는 해역(ZONE 2), 유처리제 사용을 가능한 제한해야 하는 해역(ZONE 3)의 세 구역으로 구분하여 방제정보지도에 표시함으로써 유처리제 사용에 대한 의사결정을 용이하게 하고 있다.

유처리제를 이용한 방제방법은 기계적 회수 방법과는 대조적으로 강한 조류와 높은 파도에서도 사용이 가능하고, 상당히 신속한 대응방법이다. 유처리제는 수면의 기름을 제거함으로써 바람에 의해 해안으로 접근하는 유층의 이동을 억제시키며, 조류와 포유류의 피해를 감소시킨다. 또한, 유출유의 에멀션을 억제시키며, 자연분해가 가능하도록 유류 표면적을 증가시키는 장점을 지니고 있다.

반면, 기름에 오염되지 않은 해양 생물체에게 부작용을 초래할 수 있으며, 해안에서 사용할 경우 퇴적물에 침투하기 쉽다. 또한, 유처리제는 모든 종류의 기름에 효과적인 것은 아니며, 사용 시간이 제한되어 있고, 해양환경에 부가물질을 발생시키는 단점을 지니고 있다.

4) 현장소각

현장소각이란 오염 해역의 수면상의 유출유를 현장에서 태우는 해상방제방법으로, 기름유출 초기에 해면상의 기름 제거를 통해 해안으로 부착되

Collection

는 기름의 양을 최소화하여 환경적으로 민감한 지역인 해안의 오염을 감소시키기 위한 해상방제방법의 하나이다.

현장소각 방법은 다른 해상방제방법에 비하여 환경에 미치는 영향이 적을 것으로 추정되어 해상방제수단으로서 관심이 높아지고 있다. 현장소각은 1989년에 발생한 미국의 Exxon Valdez호 오염사고때 최초로 시도되어 방제효과가 있는 것으로 나타났고, 이후 2010년에 발생한 Deep Water Horizon 폭발사고시 적용되어 유출사고 현장에서 광범위하게 사용되었으며 표면의 기름 제거에 유용하게 이용되었다.

현장소각 효율은 수온, 풍향·풍속, 파고, 유막두께, 풍화정도 및 에멀션 정도에 따라 결정되는데, 풍속은 풍력계급 5 이하, 파고는 1m 이하, 유출 초기의 신선한 기름, 유막 두께가 2mm 이상, 심하게 에멀션되지 않은 기름인 경우에 효율적으로 실행할 수 있다.

다른 헤싱방제방법에 대비한 현장소각의 장점은 기름 제거 비율이 높다는 점, 방제작업에 필요한 장비와 인원의 최소화 가능, 높은 비용효율, 다른 방제작업과 병행이용 가능, 환경피해의 최소화 등으로 요약할 수 있다. 반면, 현장소각 방법은 기름 상태의 조건, 바람과 해상상태에 대한 제약조건, 누유 확산차단의 필요성, 적용가능성 제한, 연기로 인한 시각적 피해, 화재발생 가능성, 국지적 대기오염, 찌꺼기 발생 등의 단점을 지니고 있다.

(2) 해안방제방법

해안방제는 해상에서 유출된 기름이 연안수역에 표착하게 되면 해안에서의 오염방지 및 기름제거를 위해 실시하게 되는 방제방법이다. 해안방제는 기본적으로 많은 인력과 시간을 필요로 하는 작업으로서, 신속하게 이

Collection

루어져야 하고 오염지역에 적합한 방제장비와 기술을 적용해야만 효율적인 수행이 가능하다.

해안방제방법은 해안의 종류, 저질구조, 생태·환경적인 특성과 해안의 사용목적에 따른 사회·경제적 활용 정도에 따라 결정되어야 하며, 방제 우선 지역을 선정해야 한다. 우리나라에서는 Table 2.1과 같이 해안선을 형태별로 10가지의 ESI(환경민감지수) 등급으로 분류하여 방제방법을 다르게 적용하고 있다.

Table 2.1 Type of Shoreline Classification in Korea

ESI No.	Shoreline Classification
1	• Exposed rocky cliffs • Exposed solid man-made structure • Exposed rocky banks
2	• Exposed bedrock • Boulder talus base • Exposed scraps and steep slopes in clay
3	• Fine-grained sand beaches • Scraps and steep slopes in sand
4	• Coarse-grained sand beaches
5	• Mixed sand and gravel beaches
6-A	• Gravel beaches • Gravel beaches(granules and pebbles)
6-B	• Permeable riprap
7	• Sheltered scrap in bedrock, mud or clay • Sheltered rocky shores
8-A	• Mud flat
8-B	• Salt marsh

Collection

해안방제 방법은 크게 물리적 방법과 화학·생물적 방법으로 나눌 수 있다(Fig. 2.1). 물리적 방법에는 수작업에 의한 제거, 진공흡입, 기계적 방법, 갈아엎기, 저온·고온세척 및 현장소각이 포함되고, 화학적 방법은 저독성 유처리제를 이용하여 기름을 분산시키는 방법이며, 생물적 방법은 기름분해 미생물을 이용하여 분해시키는 방법이다. 해안방제 방법별 특징은 Table 2.2와 같다.

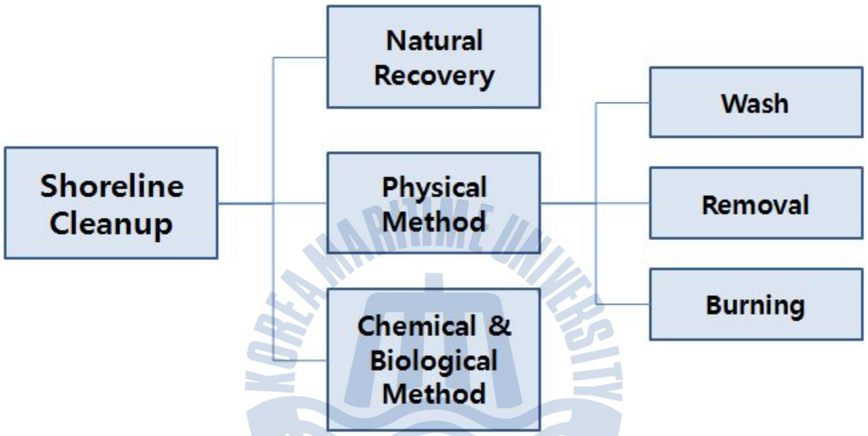

Fig. 2.1 Methods of Shoreline Cleanup

Table 2.2 Shoreline cleanup methods

Method	Objective and description	Applicable habitat types
Manual Recovery	- The most general shoreline cleanup method - Removal of surface oil using gloved hands, rakes, shovels, buckets, scrapers, sorbents, pitchforks, etc., and placing in containers	- All habitat types - Areas with difficult access with machine - Generate less waste and can focus only on contaminated areas
Natural recovery	No action is taken, although monitoring of contaminated areas may be required	All habitat types
Vacuum	Removing liquid oil stranded on coasts and inside riprap using vacuum units	- Small and portable unit(beach cleaners) - Vacuum trucks are appropriate to dispose oil collected and recovered

Collection

Table 2.2 Shoreline cleanup methods(Continued)

Method	Objective and description	Applicable habitat types
Mechanical Removal	Oil and oiled sediments are collected and removed using mechanical equipment not specifically designed for pollution response, such as backhoes, graders, bulldozers, dredges, draglines, etc.	- On land possible wherever surface sediments are both amenable to, and accessible by, heavy equipment - For submerged oil, used in sheltered areas where oil accumulates
Sediment reworking /Tilling	The oiled sediments are roto-tilled, disked, or otherwise mixed using mechanical equipment or manual tools Along beaches, oiled sediments may also be pushed to the water's edge to enhance natural cleanup by wave activity (surf washing).	On any sedimentary substrate that can support mechanical equipment or foot traffic and hand tilling
Low-pressure, ambient-water flushing	Ambient-temperature water is sprayed at low pressures(<10 psi), usually from hand-held hoses, to lift oil from the substrate and float it to the water's edge for recovery by skimmers, vacuum, or sorbents.	- On substrates, riprap, and solid, man-made structures, where the oil is still fluid. - In wetlands and along vegetated banks where oil is trapped in vegetation
High-pressure, ambient-water flushing	Similar to low-pressure flushing, except that water pressure is 100-1,000 psi.	On bedrock, man-made structures, and gravel substrates
Low-pressure, hot-water flushing	Hot water (32~77℃) is sprayed with hoses at low pressures to liquify and lift il from the substrate and float it to the water's edge for recovery by skimmers, vacuums, or sorbents.	On bedrock, and to gravel substrates, and man-made structures
High-pressure, hot-water flushing	Hot water is sprayed with hand-held wands at pressures greater than 100 psi.	Gravel substrates, bedrock, and man-made structures
Steam cleaning	Steam or very hot water is sprayed with hand-held wands at high pressures (>2,000 psi).	Man-made stuctures such as seawalls and riprap
Sand blasting	Use of sandblasting equipment to remove oil from the substrate.	On heavily oiled bedrock, artificial structures such as seawalls and riprap
Flushing	A perforated header pipe or hose is placed above the oiled shore or bank. Ambient-temperature water is pumped through the header pipe at low pressure and flows downslope to the water where any oil released is trapped by booms and recovered by skimmers or other suitable equipment.	All shoreline types where the equipment can be effectively deployed. Not effective in steep intertidal areas
Bioremediation	Formulations containing specific hydrocarbon -degrading microbes are added to the oiled area	Insufficient information on impacts or effectiveness of this method
In-Situ Burning	Oil is burned when it is on a combustible substrate such as vegetation, logs, and other debris	On most habitats, except dry, muddy substrates
Vegetation cutting/removal	Oiled vegetation is cut with weed trimmers, blades, etc., and picked or raked up and bagged for disposal	Habitats composed of vegetation, such as salt marsh, sea grass beds, and kelp beds, which contain emergent, herbaceous vegetation of floating, aquatic vegetation

해안방제는 해면상에 부유하고 있는 기름의 회수작업인 해상방제에 비하여 많은 인력, 시간 및 경비가 소요되며, 일부 해안에서는 물리적 제거작업이 자연방산에 의한 과정 보다 생태적으로 더 큰 피해를 발생시킬 수도 있다. 또한, 표착된 기름 뿐만 아니라 오염된 해안구성물질도 함께 이동되거나 제거됨으로써 생태계가 변하게 되는 결과로 이어지기도 한다.

2.1.2 방제방법 종합 평가

해양오염사고가 발생하면 사고선박, 유출유의 종류, 사고주변 환경 등 기름유출사고와 관련된 제반 정보를 입수하여 해양오염사고에 대하여 종합적으로 평가하고, 이를 바탕으로 최적의 방제방법을 선정하여 기름회수작업을 개시한다. 기름유출사고시 적용하는 방제방법은 크게 자연방산, 해상방제, 해안방제로 분류할 수 있다.

해안방제는 해상방제에 비해 많은 인력, 시간 및 경비가 소요되며, 해안의 추가적인 피해의 가능성이 높은 단점이 있다. 반면, 해상방제는 환경적인 피해를 최소화할 수 있고 회수효율이 높은 방제방법이다. 따라서 기름유출사고 발생시 먼저 해상에서 최단시간 내에 유출된 기름을 최대한 회수하여 해안에 기름이 표착되는 것을 최소화하는 것이 바람직하다. 이러한 이유 때문에 기름유출사고 대응시에는 해안방제 보다 해상방제를 우선적으로 고려하여 방제작업을 계획·수행해야 한다.

해상방제 방법에는 기계적 회수 방법, 유흡착재를 이용한 방제방법, 유처리제를 이용한 방제방법, 현장소각 방법이 있다. 유흡착재를 이용한 방제방법은 기계적 회수 방법을 적용하기 어려운 장소나 민감해역과 같은 장소에 적용할 수 있지만, 많은 인력이 필요하고 많은 양의 기름폐기물 생성시키는 단점이 있다. 유처리제를 이용한 방제방법은 신속하고 효율적인 방

Collection

제가 가능하지만 환경오염에 대한 우려가 단점으로 지적된다. 현장소각 방법은 높은 기름제거 비율, 높은 비용효율, 환경피해 최소화 등의 장점이 있는 반면, 기름상태와 기상·해상상태에 따라 적용이 제한되는 단점이 있다. 오일붐, 유회수기 및 저장탱크를 이용하는 기계적 회수 방법은 유출유를 기름상태로 회수하므로 기름이 남지 않아 환경오염측면에서 좋은 방제방법으로 볼 수 있고, 기름 회수율이 상대적으로 높다는 장점이 있다. 반면 기상·해상상태에 따른 이용상 제한, 부대 장비의 필요성 등이 단점으로 지적될 수 있다(Table 2.3).

Table 2.3 Advantages & disadvantages of oil spill response methods on water

Method	Advantage	Disadvantage
Mechanical Recovery	- Minimize environmental damage	- High cost - Variable efficiency
Sorbent	- Available for sensitive area	- Take a lot of manpower - Generate wastes
Dispersant	- Rapid response - Available under bad weather - Remove surface oil - Reduce emulsification - Increase area of oil surface for natural dissolution	- Easy to permeate sediment - Limited availability depending on oil type - Generate additional substance
In-Situ Burning	- High rate of oil removal - Minimum equipment & manpower - High cost-efficiency - Easy combination with other method - Minimize environmental damage	- Limited availability depending on oil state & weather condition - Possibility of fire - Local air contamination - Generate residue

Collection

기계적 회수 방법은 이러한 제약점에도 불구하고 다른 해상방제방법에 비하여 환경오염측면에서 가장 이상적인 방제방법으로 판단되어 주요 해양선진국에서는 기계적 회수에 필요한 방제장비의 필요 수량을 지역별로 규정하고 있다. 따라서 해상방제작업을 수행할 때에는 기계적 회수 방법을 최우선으로 고려하여 방제작업시 적용할 필요가 있다.

Collection

2.2 해양오염 방제장비

2.2.1 해상방제장비의 분류 및 특징

(1) 오일펜스(Oil fence)

오일펜스는 수면상에 부유하고 있는 기름의 이동 운동을 제한시키기 위한 기계적 울타리로, 해상에 유출된 오염물질의 확산을 방지하고 해양환경 민감해역을 보호하며 확산된 오염물질을 포집하는데 이용된다.

오일펜스는 형태에 따라 Fence type과 Curtain type으로 분류된다(Fig. 2.2). Fence type은 비교적 평평한 단면을 가지며, 내부 또는 외부에 부착된 부력재에 의해 수중에서 수직으로 지지된다. Curtain type은 연속된 고형식 또는 공기부양식 부력재에 의해 지지되는 형태이다. 공기부양식 오일펜스는 공기를 빼면 좁은 곳에 보관이 가능하며, 고형식 오일펜스는 파손과 저항에 강하지만 보관을 위한 넓은 장소가 필요하다.

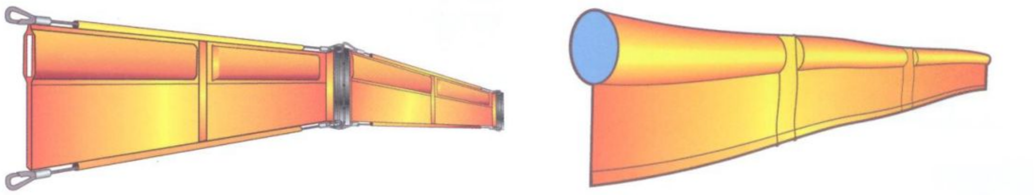

Fig. 2.2 Common types of oil fence(Left-Fence type, Right-Curtain type)

오일펜스는 용도에 따라 A, B, C형으로 분류(해양오염방제자재·약제의 성능시험 기준(해양경찰청 고시 제2008-4호))되는데, 이는 오일펜스의 크기

Collection

와 오일펜스를 설치하여 사용할 수 있는 장소에 따라 결정된다(Table 2.4).

Table 2.4 Classification of oil fence depending on use

Type	Body(cm)		Connection(cm)	Deployment place
	Height above water	Depth below water		
A	20~30	30~40	60~80	Port
B	30~60	40~90	80~150	Shore
C	more than 60	more than 90	more than 150	Ocean

오일펜스의 대표적인 사용상의 결점은 다음과 같다. 먼저 오일펜스는 이론상 해면상의 기름을 포집하는데 매우 유용하지만 실제로는 유속이 1.0knot 이상인 해면에서는 기름을 포집할 수 없다. 또한, 수심이 얕은 곳에 오일펜스를 설치하면 오일펜스의 수면하 면적이 커짐으로 인해 유속이 증가하게 되어 기름 포집이 어려워진다. 일반적으로 오일펜스는 스커트 깊이의 5배 이상의 충분한 수심이 확보된 곳에 설치가 가능하다. 그리고 오일펜스는 거친 해면이나 파장대 파고비가 큰 파에서는 효과가 없으며, 파의 운동에 추종할 수 있는 유연성 오일펜스의 사용이 필요하다는 점 등을 대표적인 사용상의 결점으로 들 수 있다.

오일펜스는 오염해역의 특징과 해양·기상 상태, 운송루트와 운송수단, 인력과 보조장비, 다른 방제장비와의 연결 필요성, 설치 용이성 등을 고려하여 당시의 환경에 적합한 오일펜스를 선택해야 한다(윤, 2013).

Collection

(2) 유회수기(Skimmer)

유회수기는 해상 또는 해안에 유출된 기름의 물리·화학적 특성을 변화시키지 않고 유출유를 회수할 수 있도록 고안된 기계장치이며, 물과 기름의 비중차, 기름의 점성 및 유동 특성을 이용하여 기름을 회수한다.

유회수기는 기름 회수방식과 회수부의 구조에 따라 친유성 표면 장치, 위어 장치, 진공 장치, 하이드로싸이클론 장치로 분류할 수 있다(Table 2.5).

Table 2.5 Classification of skimmer type

Type	Kind of skimmer
Oleophilic Surface Devices	Disc, Rope, Belt, Brush
Weir Devices	Weir/boom combination, Saucer weir, Self-levelling weir, Vortex weir
Vacuum Devices	Vacuum
Hydrocyclone Devices	Hydrocyclone

친유성 표면 장치(Oleophilic Surface Devices)는 회전하는 표면에 부착된 기름을 롤러, 그크레이프 또는 벨트로 짜서 저장통에 모으는 유회수기의 종류를 말한다. 친유성 표면 장치 유회수기에는 디스크, 로프, 벨트, 브러시 유회수기 등이 해당된다.

위어 장치(Weir Devices)는 위어(Weir), 기름저장통 및 이송관으로 구성되어 있으며, 해면상의 기름이 위어를 통해 기름저장통으로 흘러들어가도록 설계된 유회수기이다. 위어 장치 유회수기에는 위어/오일붐, 셀프레블링 위어, 소오서 위어, 보텍스 위어 유회수기 등이 해당된다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 한국해양대학교
dCollection

진공 장치(Vacuum Devices)는 최상부에 흡입헤드가 설치되어 수면상에 떠 있고, 헤드의 수면직하 부분에 설치된 다수의 흡입 튜브를 통해 유입되는 기름이 진공펌프에 의해 저장탱크로 이송되는 방식의 유회수기이다.

하이드로싸이클론 장치(Hydrocyclone Devices)는 원심력을 이용한 장치로, 먼저, 유회수기로 들어온 해수와 기름을 고속으로 회전시켜 원심력에 의해 물과 기름을 분리시킨다. 원심력에 의해 분리된 기름과 물은 각각 저장탱크와 장치 바깥으로 배출시키는 방식의 유회수기이다.

유회수기는 여러 가지 작동상 문제점을 지니고 있는데, 먼저 해면상의 기름만 회수할 수 있고, 기름유출 후 시간이 경과하면서 기름이 확산·증발하게 되면 유막은 얇아지고 점성이 증가하게 되어 기름을 회수하기가 어려워진다. 또한 회수한 기름은 저장탱크에 저장하는데 저장탱크의 용량이 기름회수작업의 지속 여부를 결정하게 되므로 작동상의 한계로 지적될 수 있다.

유회수기는 종류에 따라 그 특성이 다르므로 기름회수작업시에는 해양·기상상태, 기름의 점섬, 유막의 두께, 부유 찌꺼기의 유무 및 기름저장탱크의 용량 등을 고려하여 가장 적합한 종류의 유회수기를 선택해야 한다.

(3) 기름회수 보조장비

기름회수작업에 필요한 보조장비로는 이송펌프(Transfer pump)와 기름저장탱크를 들 수 있다.

이송펌프는 유회수기에 의해 회수된 기름을 저장탱크 또는 저장선박으로 이송할 때 쓰이는 이송장비이다. 이송펌프를 사용하고자 할 때에는 이송할 기름 및 유성 찌꺼기의 종류와 특성, 장치의 이송률, 운반 및 보수정비 편의성, 가격 등을 고려하여 적합한 종류를 선택해야 한다.

기름저장탱크는 유회수기로 회수된 기름을 기름회수작업이 진행되는 동

Collection

안 임시로 저장하는 용기를 말한다. 기름저장탱크의 용량이 충분히 확보되지 않은 경우에는 기름회수작업이 중단되므로 우리나라를 포함한 일부 국가에서는 해상 기름회수능력 산정시 임시저장탱크의 용량을 필수요소로 규정하고 있다.

임시 기름저장탱크의 종류는 해상용 저장탱크와 해안용 저장탱크가 있으며, 기름저장탱크의 선택시에는 저장용량, 저장할 기름의 종류, 저장 장소, 기간 등을 고려하여 적합한 임시 기름저장탱크를 선택해야 한다.

2.2.2 해안방제장비의 분류 및 특징

해안방제에 필요한 장비는 Table 2.6과 같이 크게 주요 기자재와 부자재로 분류할 수 있다.

Table 2.6 Equipments for Shoreline Cleanup

Classification	Equipments	Classification	Equipments
Major material	Sorbent	Subsidiary material	Working clothes
	Chemical dispersant		Shoes
	Heavy equipment		Mask
	Transfer pump		Glove
	Power carrier		Overshoes
	Beach cleaner		Scoop net
	High pressure cleaner		Hook
	Low pressure cleaner		Bowl
	Sand gravel cleaner		Bucket
	Vacuum vehicle		Cloth bag

Collection

해안방제 주요 기자재에는 유흡착재, 유처리제, 중장비, 이송펌프, 동력캐리어, 비치클리너, 고압세척기, 저압세척기, 모래자갈세척기, 진공차량 등이 있으며, 부자재로는 방제작업복, 장화, 마스크, 장갑, 덧신, 뜰채, 갈고리, 바가지, 양동이, 포대 등이 있다.

해상 기름회수에 필요한 해상방제와는 달리 해안방제는 해안 환경의 복잡성 때문에 다양한 종류의 기자재를 필요로 하고, 수작업에 의한 해안방제작업시 필요한 물품들과 주요 기자재의 활용시 함께 필요한 부자재로 이루어져 있다.

Collection

2.3 해상방제장비 운용 사례 분석

2.3.1 Sea Prince호 오염사고

Sea Prince호는 1995년 7월 23일, 여수항 내의 호남정유(現 GS칼텍스 정유) 터미널에서 중동지역 원유 266,850톤을 양하하던 중, 우리나라도 접근하고 있는 태풍 페이(Faye)의 영향으로 작업을 중단하고 대피하는 도중에 전남 여수시 남면 소리도 앞바다에서 좌초되어 기름 5,035㎘를 유출하게 되었다.

이 사고로 해상에 유출된 기름은 여수 해역 일대를 비롯하여 경남 남해, 거제, 부산, 울산, 포항까지 204㎞의 해상을 오염시키고 129개 지역 73.2㎞의 광범위한 해안에 표착되면서 총 3,826ha에 달하는 양식장에 피해를 입혔다.

Fig. 2.3 Sea Prince oil spill accident in 1995

사고후 오염범위가 빠르게 확대됨에 따라 해양경찰 보유 방제선과 유회수기를 최대로 동원하는 한편, 경비함정, 어선, 관공선도 동원을 확대시켜 나갔다. 해상방제작업은 방제대책본부에서 매일 헬기로 오염확산상황을

dCollection

파악하여 해도 상에 다수의 구역으로 나누어 동원된 방제세력을 배치하여 방제작업을 실시하였다.

기름회수작업을 위하여 해양경찰서에 보유 중이던 유회수기와 전국에서 동원된 유회수기를 이용하여 기름 1,390㎘를 회수하였고, 이밖에 유처리제에 의한 분산처리와 유흡착재에 의한 유출유 흡착수거 작업이 진행되었다.

Sea Prince호 오염사고는 우리나라 방제제도 및 방제능력의 취약성을 확인시켜주었으며, 국내에서도 외국과 같이 수만 톤 또는 수십만 톤의 초대형 유조선에 의한 재난적 해양오염사고가 발생될 가능성이 있다는 점과 유류유출사고 피해의 심각성을 인식하게 되는 계기가 되었다.

2.3.2 Hebei Spirit호 오염사고

2007년 12월 7일 태안군 원북면 신도 남서방 6마일 해상에서 투묘 중이던 Hebei Spirit호는 풍랑주의보 속에서 예인하던 삼성 T-5호의 예인줄이 끊어지면서 크레인 부선(삼성 1호)과 충돌하면서 탱크 3개소가 파공되어 Fig. 2.4와 같이 원유 12,547㎘을 해상에 유출시켰다.

Fig. 2.4 Hebei Spirit oil spill accident and shoreline contamination

Collection

유출된 기름은 서해안의 빠른 조류와 함께 강한 북서풍의 영향으로 빠르게 해안 쪽으로 유입되어 사고 발생 14시간 후에 태안군 소원면 의항리 구름포를 시작으로 만리포 해안에 밀려들었다. 유출된 기름은 다음날 원북면 방갈리 함암포, 소원면 모항리까지 17㎞ 해안과 3일째는 소원면 파도리까지 40㎞ 해안, 4일째 이원면 내리 만대 해안까지 총 70㎞ 해안으로 확산되었다. 또한 해안으로 유입되지 않은 일부 기름은 타르 상태로 변하여 사고 발생 11일째 군산 말도 해상까지 남하하였으며, 27일째에는 제주도 추자도 해안, 31일째에는 사고해역에서 380㎞ 떨어진 제주시 조천읍 다려도 해안까지 유입이 확인되었다.

유출된 기름은 충남지역 167㎞, 전라지역 113.3㎞의 해안에 영향을 주었으며, 충남지역 15,039㏊와 전라지역 19,017㏊의 양식장에 피해를 입히고 총 38,400가구에 영향을 준 것으로 나타났다.

유류유출사고 발생에 따라 태안해양경찰서에 해양경찰청장을 본부장으로 방제대책본부가 설치되고 충청남도, 태안군, 서산시, 보령시, 대산지방해양항만청, 육군 32사단, 해군 2함대사령부, 해양환경관리공단 등에서 파견된 인력이 상주하면서 사고에 대응하였다.

해상방제를 위해 전국의 유회수기, 오일펜스 등의 장비와 유흡착재, 유처리제 등의 자재를 총동원하였고, 유출유 확산예측프로그램을 이용하여 유출유 확산을 예측하고 이에 따라 방제전략을 수립하였다. 외해에 부유중인 유출유에 대하여 유처리제 살포지침 및 전문가 자문을 통해 수심 20m 이상, 연안에서 8km 이상 떨어진 해역에 유처리제 살포를 결정하여 수행하였다.

사고 해역은 3~4knot의 조류가 흐르는 곳으로 오일펜스의 효과를 기대하기 어려운 상황이었다. 따라서 환경민감해역에는 2~3중으로 오일펜스를

Collection

설치하여 유출유를 차단하려 하였고, 사용된 오일펜스의 누적길이는 약 47km에 이른다.

방제기간 동안 해양경찰, 해군, 해양수산청, 국립공원관리공단, 한국해양오염방제조합, 방제업체 소속의 활용 가능한 모든 선박이 동원되었고, 총 19,864척이 동원되었는데, 이 중 약 57.6%가 어선이었다. 동원된 선박은 오일펜스 설치, 해상 기름회수와 같은 방제작업 뿐만 아니라 유처리제에 의한 분산처리와 유흡착재에 의한 유출유 흡착수거 작업도 수행하였다.

Hebei Spirit호 오염사고는 이중선체 의무화 필요성, 해안방제의 중요성, 유출유 확산예측시스템 고도화 필요성, 국가방제능력 실행력 제고 필요성 등과 같이 우리나라 방제체제에 많은 시사점을 주는 계기가 되었다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 한국해양대학교 1945

Collection

제3장 해상 기름회수능력 설정 기준 분석

dCollection

3.1 해양선진국의 기준

해양선진국에서는 오염행위자 방제원칙(The Polluter Pays Principle)을 철저히 적용시켜 선박소유자 또는 기름취급업자에게 자신의 선박 또는 해양시설에서 발생할 수 있는 오염사고에 대비하여 충분한 수량의 방제자원을 확보하도록 법으로 의무화하고 있으며, 선박의 항행 구역별 기름회수능력을 방제능력의 의미로 사용하고 있다.

3.1.1 미국

미국에서는 해양오염방지법(OPA 90)과 연방법령집(33CFR Part 155)에서 선박소유자 또는 사용자가 계약 또는 기타 승인된 방법으로 자신이 운항중인 선박에서 오염사고가 발생하여 적재화물 전량이 유출되는 최악유출사고(Worst Case Discharge ; WCD)에 대비하기 위한 충분한 수량의 인적·물적 방제자원을 확보하도록 의무화하고 있다.

연방법령집(33CFR Part 155)의 부속서B에는 최악유출사고시의 최대유출량 산정방식에 대하여 구체적으로 제시하고 있다. 이에 따르면, 당해 해역을 운항중인 유조선을 대상으로 하고, 최대유출량은 사고선박에 적재된 화물의 전량이 유출된다고 가정한다. 해상에서의 기름회수 기간은 사고장소에 따라 3~10일로 정해지며, 1일 작업시간은 24시간 작업을 기준으로 한다.

Table 3.1(33CFR Part 155 Appendix B Table 3)은 오염장소별 작업일수와 기름종류별 방제방법 백분율을 나타낸 것으로, 해상방제계획량은 기름의 종류와 사고장소에 따라 다르게 설정된다. 최종 방제계획량은 Table 3.1에서 얻은 해상방제계획량에 Table 3.2(33CFR Part 155 Appendix B Table 4)의 에멀션계수를 곱한 결과치로 계산한다.

Collection

Table 3.1 Removal capacity planning table

Spill Location	Nearshore/Inland /Great Lakes			River			Open Ocean			Offshore		
Sustainability of on-water oil recovery	4 days			3 days			10 days			6 days		
Oil Group	% Natural Dissipa -tion	% Recovered Floating oil	% Oil on shore	% Natural Dissipa -tion	% Recovered Floating oil	% Oil on shore	% Natural Dissipa -tion	% Recovered Floating oil	% Oil on shore	% Natural Dissipa -tion	% Recovered Floating oil	% Oil on shore
Ⅰ Non-persistent oils	80	20	10	80	10	10	100	/	/	95	[5]*	/
Ⅱ Light crudes and fuels	50	50	30	40	15	45	90	10	/	75	25	5
Ⅲ Medium crudes and fuels	30	50	50	20	15	65	75	20	[5]*	60	40	20
Ⅳ Heavy crudes /residual fuels	10	50	70	5	20	75	50	20	[30]*	50	40	30

※ Note : Percentage may not sum to 100 ; reflects enhanced on-water recovery capacity
* Included in table for continuity ; no planning required.

Table 3.2 Emulsification factors for petroleum oil cargo groups

Oil type		Emulsification factor
Non-persistent oil	Group Ⅰ	1.0
Persistent oil	Group Ⅱ	1.8
	Group Ⅲ	2.0
	Group Ⅳ	1.4

Collection

미국에서는 유회수기에 의한 기름회수용량을 1일 유효기름회수용량 (EDRC ; Effective Daily Recovery Capacity)으로 표시하며, 다음의 식 (3.1) 또는 (3.2)에 의해 구할 수 있다.

$$EDRC = T \times 24 \times 0.2 \quad \cdots\cdots (3.1)$$

단, EDRC : 1일 유효기름회수용량(bbls/day)

T : 시간당 명목용량(rate on name plate)

24 : 1일 작업시간(hour)

0.2 : 효율(주간작업가능시간 날씨 해상상태, 에멀션 등 고려)

$$EDRC = D \times U \quad \cdots\cdots (3.2)$$

단, D : 평균기름회수용량(bbls/hr)

U : 1일 작업시간(hr) ⇒ 통상 10시간으로 함

Table 3.3은 단계별 방제장비 동원율을 나타낸 표로, 먼저 구한 해상방제량에 장비동원율을 곱하여 최종적인 WCD 단계별(Tier 1, 2, 3) 해상방제 1일 유효기름회수용량(EDRC)을 구한다.

Table 3.3 On-water oil recovery resource mobilization factors

Area	Tier 1	Tier 2	Tier 3
Rivers and Canals	0.30	0.40	0.60
Inland/Nearshore/ Great lakes	0.15	0.25	0.40
Offshore	0.10	0.165	0.21
Ocean	0.06	0.10	0.12

Collection

오일펜스의 소요수량에 관해서는 해당지역에 충분한 수량의 오일펜스를 배치하도록 규정하고 있으나 구체적인 산정방식은 제시하고 있지 않으며, 회수유 임시저장용기의 소요량은 1일 유효기름회수량(EDRC)의 2배로 하고 있다.

유처리제는 EDRC의 25%를 3일간 사용할 수 있는 양을 소요수량을 규정하고 있으며, 그밖에 유흡착재와 전문방제인력, 보조장치 등에 대하여는 구체적인 산정방식을 제시하지 않고 충분한 수량을 확보하도록 규정하고 있다.

3.1.2 캐나다

캐나다의 경우, 대체적으로 미국의 시스템과 유사한데, 해운법(CSA ; Canada Shipping Act)과 국가방제시스템에 근거한 오염행위자 방제원칙에 따라 선박소유자 및 사용자는 오염사고에 대비하여 필요한 대책을 마련해야 하고, 사고로 인해 발생하는 환경피해에 대한 배상책임이 부과되어 있다. 그리고 오염방제작업은 국가승인방제조합(Certified Response Organization)을 통해 수행하도록 하고 있다.

캐나다에서는 해양오염사고를 과거 오염사고에 대한 발생빈도, 발생장소 및 이동거리를 감안하여 단계별로 구분하고 있고, 그 중 Tier 4의 사고에 대비하고 있는데, 대상선박은 관할수역에서 운항중인 유조선이며, 최대유출량은 Tier 4에 해당하는 10,000톤이다. Table 3.4는 단계별 유출량 및 동원시간을 나타낸 표이다.

dCollection

Table 3.4 Discharge quantity & mobilization time according to Tier

Tier	Discharge quantity(ton)	Mobilization time(hr)
1	150	6
2	1,000	12
3	2,500	18
4	10,000	72

캐나다의 경우 미국 계산방식과 다른 부분은 유출유의 풍화과정은 고려하지 않고 유출된 기름을 해상과 해안방제로만 구분하고 있다는 것이다. Table 3.5는 지역별 오염방제 비율을 나타낸 표로, 해상방제와 해안방제의 비율은 지역별로 다르게 적용하고 있으며, 특히 해상방제는 지형특성에 따라 다시 차폐해역과 노출해역으로 구분하여 적용하고 있다.

Table 3.5 Regional percentage of pollution response

Pollution location	Onshore response(%)	On-water response(%)	
		Sheltered sea	Exposed sea
Point Tupper	40	40	20
Halifax	40	30	30
Quebec City	60	30	10
Vancouver	40	40	20
Montreal	70	30	0
Nanticoke	50	30	20
Holyrood	40	40	20

Collection

해상회수를 위한 작업 일수는 차폐해약과 노출해역 모두 동일하게 오염현장에 방제장비를 설치한 날로부터 10일 이내를 목표로 하고 있으며, 1일 작업시간은 24시간으로 하고 있으나 이 값 대신 실제 현장작업 시간을 적용할 수 있도록 하고 있다.

캐나다의 유회수기에 의한 유효기름회수용량은 다음의 식 (3.3)에 의해 구할 수 있다.

$$EDRC = T \times 24 \times 0.2 \quad \cdots\cdots (3.3)$$

단, EDRC : 유회수기 기름회수용량(ton/day)

T : 시간당 명목용량(rate on name plate)

24 : 1일 작동시간(hour)

0.2 : 효율(해상상태, 수온 방제자의 경험, 수분함유량 등 고려)

캐나다의 오일펜스 필요수량 산정은 경험적으로 해상에서 소해방식을 이용할 경우 500m 오일펜스에 포집된 기름의 두께가 1cm로 가정하면 총 200톤의 기름이 포집된다는 계산결과(200톤/500m)를 이용하여 오일펜스 필요수량을 산정한다. 해상에서 부유하고 있는 유출유를 차폐해역에서 포집할 경우 오일펜스의 필요수량은 식 (3.4)에 의해 구할 수 있고, 해안에서 포집하기 위한 필요수량은 해안이 기름을 포집하는 한 면으로 작용하는 점이 고려된 식 (3.5)에 의해 구할 수 있다.

$$B_f = 1.25 \times H_s \quad \cdots\cdots (3.4)$$

$$B_s = 0.625 \times H_s \quad \cdots\cdots (3.5)$$

단, B_f : 해상부유 유출유 포집 오일펜스 필요 수량(m)

B_s : 해안부근 유출유 포집 오일펜스 필요 수량(m)

H_s : 유출량(ton)

Collection

캐나다의 회수유 임시저장용기 용량 산정은 유회수기로 회수한 기름을 임시로 저장하기 위하여 24시간 계속 저장할 수 있는 충분한 용량의 1차 임시저장용기와 1차 임시저장용기의 2배 이상의 2차 임시저장용기를 확보하도록 요구하고 있다. 따라서 EDRC의 3배 이상에 해당하는 용량의 임시저장용기를 확보하도록 하고 있다.

3.1.3 일본

일본에서도 미국과 캐나다의 방제시스템과 같이 방제능력을 지역적으로 접근하고 있다. 일본의 지역별 긴급방제실행계획(RCP)에 최대유출사고의 경우별 시나리오를 설정하여, 이에 적합한 방제능력에 대하여 규정하고 있다.

동경만을 예로 들면, 항내 탱커 계류시설 부근에서 탱커와 다른 선박간의 충돌사고로 인한 유출사고를 최대유출사고 시나리오로 채택하고 있다. 동경만의 최대기름유출사고 및 처리기준은 DWT 260,000톤 원유를 적재한 유조선을 대상으로 하며, 터미널 부근해역에서 타선과 충돌사고로 인해 적재화물의 9%인 원유 23,000㎘를 유출한 것으로 가정하고 이를 최대유출량으로 한다. 일본의 해상회수량 계산방식은 유출유의 풍화과정, 해상·해안 방제의 구분 등을 고려하지 않고 단순히 최대유출량을 오염사고 발생으로부터 2~3일동안 해상에서 처리한다는 것을 원칙으로 하고 있다. 1일 작업시간은 12시간 기준이다.

일본의 오염방제방법은 유출량의 80%는 유회수기와 오일펜스에 의한 기계적 회수, 나머지 20%는 유처리제, 유흡착재 및 유겔화제로 처리하는 것을 목표로 하고 있다.

일본은 유회수기의 유효회수용량에 대한 별도의 산정식이 없고, 또한 효율이나 동원율 등을 고려하지 않고 있으므로 유회수기 명목회수용량을 그

Collection

대로 유효회수용량으로 간주하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 일본의 유회수기에 의한 기름회수용량은 다음의 식 (3.6)에 의해 구할 수 있다.

$$EDR = T \times 12 \quad \cdots\cdots (3.6)$$

단, EDR : 유회수기 유효기름회수용량(ton/day)

T : 시간당 명목용량(rate on name plate)

12 : 1일 작동시간(hour)

일본의 오일펜스 필요수량 산정은 앞서 제시한 최대유출량인 기름 23,000㎘를 포위전장하기 위해 유출량의 2배에 해당하는 오일펜스가 필요하다고 가정하여 식 (3.7)에 의해 소요수량을 산정한다.

$$B = Q \times 2 \quad \cdots\cdots (3.7)$$

단, B : 오일펜스 소요수량(m)

Q : 유출량

2 : 포위전장하기 위한 배수

일본의 경우 임시저장용기의 필요수량에 대해서는 규정하고 있지 않다.

Collection

3.2 우리나라의 기준

3.2.1 지역의 구분

우리나라의 기름회수능력 설정을 위한 지역구분은 지방 해양경찰서와 해양환경관리공단 지사의 위치를 고려하여 구분되어 있다. 해양경찰청은 해상치안, 수색구조, 해상경비 및 해양환경관리 등의 목적으로 현재 인천, 평택, 태안, 군산, 목포, 제주, 서귀포, 완도, 여수, 통영, 창원, 부산, 울산, 포항, 동해 및 속초에 16개 지방해양경찰서를 두고 있다. 민간방제세력인 해양환경관리공단은 12개의 지사, 즉, 인천, 평택, 대산, 군산, 목포, 제주, 여수, 마산, 부산, 울산, 포항 및 동해에 지사를 두고 있다. 이를 근거로 지방해양경찰서와 해양환경관리공단 지사를 먼저 최대오염사고의 발생 가능성이 높은 3개의 광역권, 즉, 대산, 여수, 울산권역으로 구분하고, 각 권역 중심지역의 해양경찰서를 중심으로 주변지역을 묶어 하나의 권역으로 편성하고 있다(Table 3.6).

Table 3.6 Area & region classification

Area	Region
Daesan	Incheon, Taean·Daesan·Pyeongtaek, Gunsan
Yeosu	Mokpo, Wando, Yeosu, Jeju·Seogwipo
Ulsan	Tongyeong·Masan, Busan, Ulsan, Pohang, Donghae·Sokcho

Collection

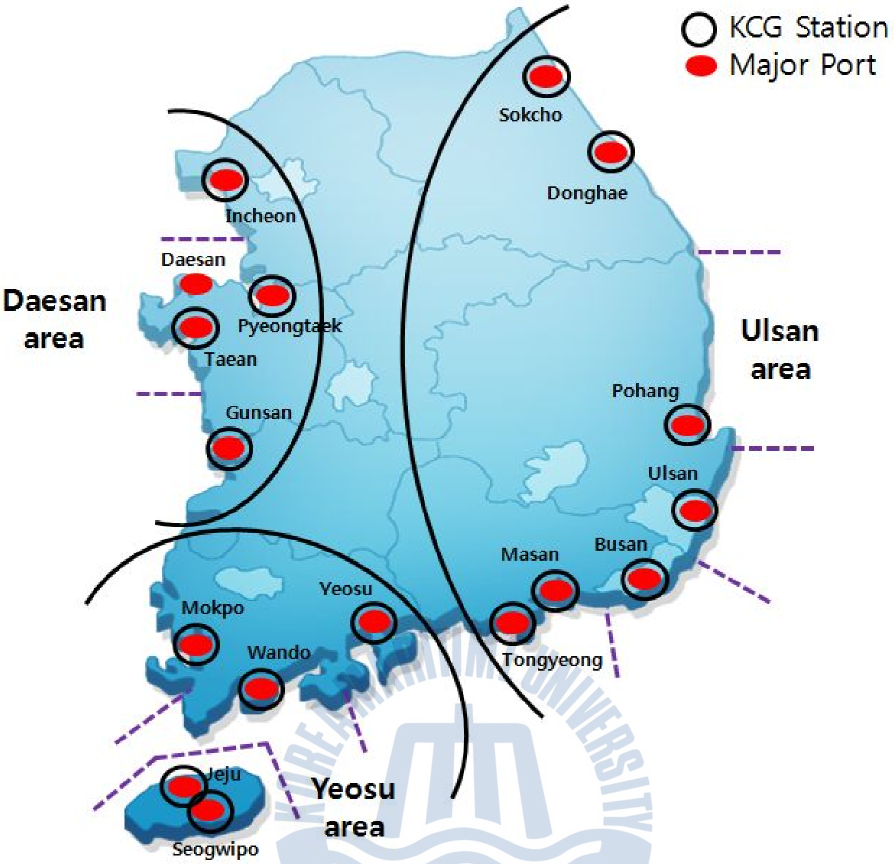

Fig. 3.1 Regional KCG stations and major ports in Korea

3.2.2 지역별 최대 기름유출량 산정

지역별 해상 기름회수능력은 최대오염사고에 대비한 유출유 회수용량으로, 이는 해당 지역에서 예상 최대유출량을 일정기간 내에 회수하기 위하여 보유해야 하는 해상방제장비의 양을 말한다. 최대오염사고는 해당 지역에 입출항 또는 통항하는 최대크기의 유조선·화물선의 충돌·좌초 등의 사고로 인한 최대유출사고를 가정한 것이다. 이에 근거하여 계산된 지역별 예상 최대유출량은 Table 3.7과 같다.

Table 3.7 Regional expected maximum quantity of spill

Region	Kind of spillage	Max. quantity of spillage(kℓ)
Incheon	Crude oil	8,500
Daesan·Taean·Pyeongtaek	Crude oil	45,000
Gunsan	Bunker-C	3,800
Mokpo	Crude oil	8,500
Wando	Bunker-C	600
Yeosu	Crude oil	45,000
Jeju·Seogwipo	Bunker-C	800
Tongyeong·Masan (past max. accident)	Crude oil	45,000 (1,700)
Busan	Bunker-C	10,000
Ulsan	Crude oil	45,000
Pohang	Bunker-C	800
Donghae·Sokcho	Bunker-C	500

※ Source : A Study on the method of calculation for Practical Oil Recovery Capacity(KCG, 2009)

통영·마산지역의 경우, 거제도에 DWT 300,000톤급 유조선이 입·출항하여 대형 오염사고의 가능성이 있지만, 해당 지역은 울산과 여수에서 약 60해리 떨어진 중간위치이므로 해양오염사고 발생시 남해권 및 동해권의 방제장비가 동시에 동원 가능하므로 별도의 권역으로 분리하지 않고 있으며, 예상 최대유출량은 원유 45,000kℓ지만 지역의 방제장비 배치수량 산정시에는 과거 최대유출량인 Bunker-C 1,700kℓ를 최대유출량으로 설정하고 있다.

Collection

3.2.3 해상방제장비 소요량 산정 기준

우리나라의 기름회수능력 설정 기준은 우리나라 연근해 통항선 및 입출항 선박 중 최대크기인 DWT 300,000톤급 유조선에서 해양사고 발생시 최대 45,000㎘의 기름이 유출된다고 가정하고, 이때 유출된 기름의 1/3인 15,000㎘는 증발, 1/3인 15,000㎘는 해안에 부착, 나머지 1/3인 15,000㎘는 해상에서 수거하여 처리하는 것을 목표로 설정되었다. Hebei Spirit호 오염사고 후 2012년부터 여러차례의 검토를 거친 후 신개념 방제능력 개념이 도입되면서 국가방제능력이라는 용어에서 기름회수능력이라는 용어로 변경되어 사용되기 시작했으며, 기름회수능력에는 해상에서 기름회수시 필요한 유회수기 뿐만 아니라 오일펜스와 임시저장용기의 확보 목표량까지 규정하게 되었다.

해상에서의 수거 목표량은 결국 유회수기의 기름회수능력이므로 유회수기의 유효회수용량을 산정하여 목표량을 결정하게 되고, 이때 고려되어야 하는 요소는 유회수기의 회수효율, 동원율을 들 수 있다.

유회수기의 회수효율은 해상에서 유회수기로 기름을 회수할 수 있는 능력을 말하고, 이는 기계적 효율을 의미한다. 기계적 효율은 해양기상요소, 운용자의 숙련도, 장치상의 특성 및 에멀션 정도 등을 종합한 효율이며, 유회수기 유효회수량 산정시에는 효율계수 0.2를 적용하고 있다.

유회수기의 동원율은 지역에 배치된 유회수기의 기계적 성능, 정비(수리) 여부, 유출된 기름에 적합한 종류 여부, 다른 오염사고에 대한 대비 등을 고려하여 ⅓만 동원되는 것을 가정한 것이다. 이는 유출유의 종류, 물리적 특성의 변화, 작동환경(장소, 해양기상조건 등), 선박에 설치 이용 여부, 전진용으로 이용가능 여부 등 유회수기 선택요소가 고려된 동원율이며, 유

Collection

회수기 유효회수량 산정시에는 장비동원율 0.33(33%)을 적용한다.

위의 회수효율과 동원율을 이용하여 유회수기의 유효회수량을 산정하는 식은 아래 식 (3.8)과 같다.

$$TRC = T \times 3 \times 8 \times 0.2 \times 0.33 \quad \cdots\cdots (3.8)$$

단, TRC : 유회수기 총 유효회수량(kℓ)

T : 유회수기 명목용량(kℓ/h)

3 : 해상방제일수(day)

8 : 1일 작업시간(hour)

0.2 : 효율계수

0.33 : 장비동원율

오일펜스는 해상방제시 유출된 기름을 해상에서 포위전장하기 위한 것으로 현행 기름회수능력의 한 부분이며, 소요수량 산정 기준이 제시되어 있다. 오일펜스의 소요수량 산정시에는 오염장소 및 해양기상상태에 적합한 오일펜스를 동원해야 하는 점을 고려하여 동원율 0.5가 적용된 아래 식 (3.9)에 의해 산정한다.

$$\text{오일펜스 소요량(m)} = (\text{해상방제량} \times 2.5) \div 0.5 \quad \cdots\cdots (3.9)$$

단, 2.5 : 해상에서 포위전장한 기름 1톤당 소요수량(m)
(유막 1cm 두께의 기름 가정)

0.5 : 오염장소(항내, 외해 등) 및 수심 등의 지형적 조건과 해상기상상태에 따라 적합한 오일펜스의 선정을 감안한 오일펜스 동원율

Collection

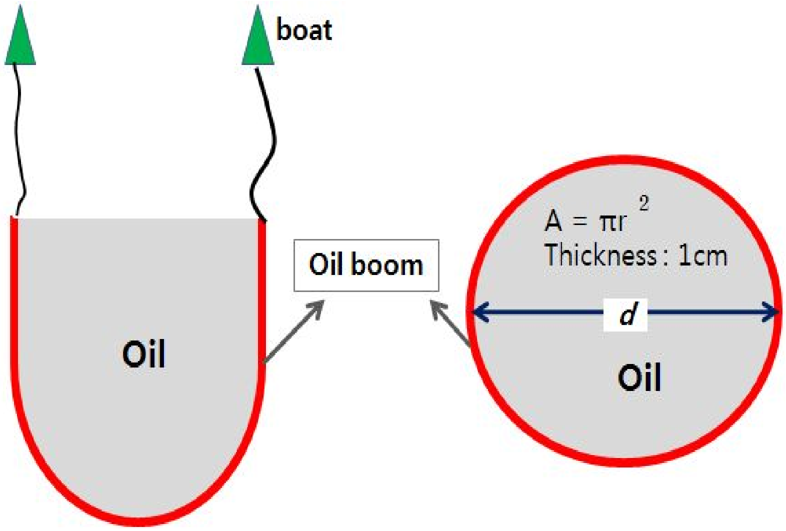

Fig. 3.2 Example of calculation of demand quantity of oil fence

회수유 임시저장용량은 1일 유효기름회수용량에 저장용량 최소배수인 2가 적용된 아래 식 (3.10)에 의해 산정한다.

임시저장용기 소요량(kℓ) = 1일 유효기름회수용량 × 2 ……… (3.10)

임의 지역에서 최대오염사고 발생시 전국의 장비를 동원하는 경우 전국적으로 확보해야 하는 총수량은 다음과 같은 방식으로 산정한다. 방제장비는 단계별로 동원하여 3일동안 해상방제작업을 수행하도록 계획하고 있는데, 1일차에는 사고발생 권역의 방제장비를 신속히 동원하여 3일 동안 방제작업을 수행하고, 2일차에는 사고발생지역 근거리에 있는 권역의 방제장비를 동원하여 2일 동안 방제작업을 수행하며, 3일차에는 사고지역 원거리에 있는 권역의 방제장비를 동원하여 1일 동안 방제작업을 수행하도록 하여 해상기름회수 목표량을 달성할 수 있도록 하고 있다(Fig. 3.3, 3.4).

Collection

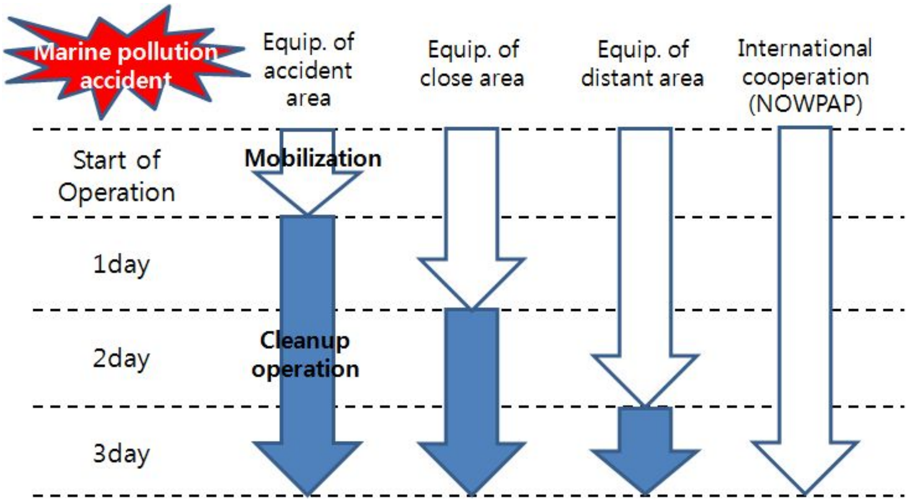

Fig. 3.3 Mobilization system of marine pollution response resources for maximum marine pollution accident

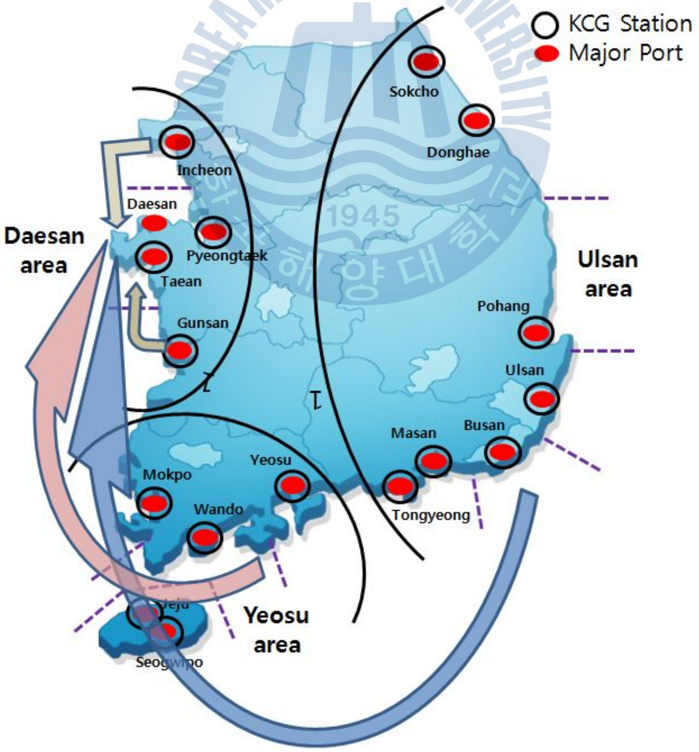

Fig. 3.4 Mobilization diagram of marine pollution response resources for maximum marine pollution accident(Daesan area)

Collection

각 권역내의 예상 최대기름유출량은 45,000㎘이고 이 중 해상방제량은 15,000㎘로 특정 권역에서 최대기름유출사고가 발생할 경우 상기 산정기준에 의해 계산하면 권역별로 7,500㎘씩 보유하는 것으로 설정하고 있다(Table 3.8).

Table 3.8 Estimated demand quantity of area oil recovery capacity on water

Area	Estimated max. Qty. of oil spill(①)	Qty. of oil recovery on water(①×⅓)	Demand quantity
Daesan area	45,000	15,000	7,500
Yeosu area	45,000	15,000	7,500
Ulsan area	45,000	15,000	7,500
Sum			22,500

따라서 우리나라 임의의 지점에서 최대오염사고 발생시 전국의 방제장비를 동원하여 해상방제량 15,000㎘를 1일 8시간 작업기준으로 3일동안 회수하는데 필요한 해상 기름회수용량은 22,500㎘가 된다.

지역별 해상기름회수능력 목표치를 산정하기 위해 권역내 지역을 2종류, 즉, 권역 중심지역(최대오염사고 발생가능지역)과 기타지역으로 분류하고, 먼저 기타지역에 그 지역의 예상 최대유출량의 해상회수목표량을 회수할 수 있는 유회수기를 배치한 후 나머지 유회수기를 권역중심지역에 배치하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이는 일차적으로 기타지역에서 오염사고 발생시 해당 지역의 장비만으로 기름회수가 가능하도록 하고, 권역중심지역에서 오염사고 발생시 권역내 장비를 동원하여 기름회수작업을 수행하도록 하기 위함이다. 권역내 지역간의 거리는 12시간 이내 도달할 수 있는 거리에 있어 장비의 동원은 거리상 지장이 없으므로 지역방제효율의 측면에서 유리하기 때문에 위와 같은 방식으로 배치하고 있다. 이러한 원칙에 따라

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945
Collection

지역별 해상 기름회수능력 목표량을 계산하면 Table 3.9와과 같은 결과를 얻게 되고, 이 값을 현행 지역별 기름회수능력으로 설정하고 있다.

Table 3.9 Regional demand quantity of oil recovery capacity

Region		Max. Qty. of spill	Qty. of Oil recovery on water	Regional demand Qty. of oil recovery
Daesan area	Incheon	8,500	2,833	2,833
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	45,000	15,000	3,400
	Gunsan	3,800	1,267	1,267
	Sum(Max)	45,000	15,000	7,500
Yeosu area	Mokpo	8,500	2,833	2,833
	Wando	600	200	200
	Yeosu	45,000	15,000	4,200
	Jeju·Seogwipo	800	267	267
	Sum(Max)	45,000	15,000	7,500
Ulsan area	Tongyeong·Masan	1,700	567	567
	Busan	10,000	3,333	3,333
	Ulsan	45,000	15,000	3,166
	Pohang	800	267	267
	Donghae·Sokcho	500	167	167
	Sum(Max)	45,000	15,000	7,500
Sum				22,500

신개념 방제능력 개념의 도입에 따른 권역내 오일펜스와 임시저장용기의 확보 목표량은 앞서 제시한 계산식 (3.9), (3.10)에 따라 계산하고, 계산된 목표량은 유회수기의 배치방식과 동일하게 지역에 분산·배치하는데, 이를 정리하면 Table 3.10과 같다.

Collection

Table 3.10 Regional demand quantity of oil fence and temporary oil storage tank

Yegion		Demand Qty. of oil boom	Demand Qty. of temporary oil storage tank
Daesan area	Incheon	14,165	1,888
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	54,500	2,268
	Gunsan	6,335	844
	Sum(Max)	75,000	5,000
Yeosu area	Mokpo	14,165	1,888
	Wando	1,000	134
	Yeosu	58,500	2,800
	Jeju·Seogwipo	1,335	178
	Sum(Max)	75,000	5,000
Ulsan area	Tongyeong·Masan	2,835	378
	Busan	16,665	2,222
	Ulsan	53,330	2,110
	Pohang	1,335	178
	Donghae·Sokcho	835	112
	Sum(Max)	75,000	5,000

오일펜스의 경우, 유출사고 초기부터 기름회수작업이 진행되는 동안 계속해서 설치해 두어야 하므로 다른 권역의 오일펜스 동원은 배제하고, 권역별로 해당 권역의 최대유출사고(15,000㎘)에 대응 가능한 양인 75,000m의 오일펜스를 확보하도록 하고 있다.

Collection

3.3 국가별 기준 비교분석

3.3.1 비교분석

전술한 미국, 캐나다, 일본 및 한국의 기름회수능력 설정 기준을 종합하여 요약하면 Table 3.11과 같다.

Table 3.11 Comparison of oil recovery capacity criteria

Nation	USA	Canada	Japan	Korea
Target vessel	Regional Max. oil carrier	Regional oil carrier	Regional Max. oil carrier	Regional Max. oil carrier
Max. Qty. of oil discharge	Entire quantity of cargo on board	10,000ton	23,000kℓ	45,000kℓ
Oil recovery capacity on water	Different according to kind of oil & region	Different according to region	23,000kℓ	15,000kℓ
Duration of cleanup on water	4~10days according to location	Within 10days	2~3days	3days
Working hours of 1 day	24hours※	24hours※	12hours	8hours
Related regulation	OPA90, 33 CFR 155	CSA	RCP	NCP
Oil boom requirement	Sufficient quantity	• On water : 2.5m/ton • On shore : (On water) x½	2.5m/ton	2.5m/ton÷0.5
Temporary oil storage tank requirement	EDRC x 2	EDRC x 3	N/A	EDRC x 2

※ 24hours/day in principle, but apply actual time if less than 24hours

Collection

미국은 선주 또는 사용자가 오염사고에 대비하여 방제자원을 확보하도록 의무화하고 있고, 사고장소, 기름종류에 따라 기름회수기간, 방제방법 등에 차이을 두고 있으며, 에멀션 계수 적용을 통하여 기름 종류별 풍화정도에 따라 회수목표량을 다르게 설정하도록 하고 있다. 또한, 유효기름회수용량 산정시 사고의 단계(Tier 1~3)에 따른 동원율을 적용하여 동원시 발생할 수 있는 기름회수용량의 감소를 감안하였다. 미국은 기계적 회수에 필요한 유회수기, 오일펜스, 임시저장용기 뿐만 아니라 유처리제, 유흡착재, 전문방제인력, 보조장치도 확보하도록 규정하고 있다.

캐나다는 미국과 동일하게 선주 또는 사용자가 오염사고에 대비하여 방제자원을 확보하도록 의무화하고 있고, 해양오염사고시 기름유출량과 동원시간을 기준으로 사고단계(Tier)를 구분하고 있으며, 사고지역(장소)에 따라 해상·해안방제의 비율을 결정하도록 하고 있다. 캐나다는 기계적 회수에 필요한 유회수기, 오일펜스, 임시저장용기의 확보량을 규정하고 있다.

일본은 지역방제실행계획(RCP)에 따라 기름회수능력을 규정하고 있고, 미국, 캐나다와 동일하게 유회수기와 오일펜스 확보량은 규정하고 있으나 임시저장용기의 확보량에 대하여는 규정하고 있지 않는 반면, 유처리제, 유흡착재, 유겔화제를 확보하도록 규정하고 있다. .

한국은 국가차원에서 방제능력을 규정하고 있는데, 최대오염사고를 대비하여 전국적으로 보유해야 하는 방제장비 목표량을 설정하여 이를 권역내 지역별로 분산·배치하도록 하고 있다. 유회수기의 기계적 효율과 지역간 동원율을 적용하고 있으며, 미국, 캐나다와 같이 유회수기 회수용량에 근거하여 오임붐과 임시저장용기의 확보량도 규정하고 있다.

Collection

3.3.2 시사점

주요 해양선진국의 기름회수능력 설정은 지역을 기반으로 한다는 점이 공통점으로 지적될 수 있다. 지리적 위치, 통항 유조선의 크기 등과 같은 지역의 특성과 시나리오에 따라 기름회수능력은 다르게 설정되고, 설정된 기름회수능력은 국가차원이 아닌 지역차원에서 확보하도록 규정하고 있다. 통항 유조선의 크기에 따라 기름회수능력을 설정한 것은 한국의 기준과 동일하지만 미국과 캐나다의 경우 지리적인 위치를 고려하는데, 이 부분은 우리나라의 지역별 기름회수능력 설정기준에 반영될 필요가 있다.

또한, 사고의 장소나 규모에 따라 단계를 설정하여 대응하도록 하고 있다. 이는 사고의 장소와 규모에 따라 대응의 규모를 결정하는 것으로, 효율적인 방제작업을 위한 것으로 볼 수 있다. 현재 우리나라의 설정기준에는 단계별 대응(Tiered response) 개념이 도입되어 지역방제실행계획에 대형, 중형, 소형오염사고로 분류하여 대응하도록 하고 있으나 미국, 캐나다와 같이 세분화하여 자세히 규정하고 있지는 않다. 따라서 사고의 장소나 규모에 따른 대응단계를 세분화하여 규정할 필요도 있다.

주요 해양선진국의 현행 기름회수능력은 예상되는 해양오염사고의 규모와 지역적 동원 시간에 따라 설정되어 있고, 우리나라도 이와 유사하게 각 지역에 입출항하는 최대 선박의 크기와 과거 해양오염사고시 해상으로 배출된 기름의 유출양을 기준으로 설정되어 있다. 주요 해양선진국과 우리나라의 기준은 모두 해양오염사고의 원인적인 측면만을 고려하여 설정한 것으로, 환경적인 측면이 고려되지 않은 상태이다. 해양오염사고의 환경적인 측면의 시각에서 환경피해의 최소화와 복구의 효율성을 고려한다면 현행 기름회수능력 기준은 수정될 필요가 있다.

Collection

또한, 우리나라의 현행 기준은 권역내에서 기타지역에 필요한 기름회수능력을 먼저 배치하고 나머지 기름회수능력을 중심지역에 배치하고 있는데, 이는 권역내에서는 중심지역에 대형 해양오염사고시 기타지역에 배치된 기름회수능력을 충분히 동원 가능한 것으로 판단하여 설정한 결과이다. 과거 사용한 국가방제능력이란 개념과 현행 기름회수능력은 중·소형 유류오염사고 보다는 대형 유류오염사고를 대비하기 위한 목적으로 만들어졌다는 것을 고려한다면 권역내 기름회수능력은 중심지역 중심으로 집중하는 형태로 수정되어 해양오염사고 초기 대응의 효율을 높일 필요도 존재한다.

Collection

제4장 HBD(Hazard-Based Deployment) Model 설계

Collection

4.1 이론적 배경

4.1.1 해양오염 위해요소

위해(Hazard)란 사람, 재산이나 환경 등에 손상을 초래할 가능성을 지닌 상황으로 정의될 수 있다. 해양오염과 관련된 위해요소는 크게 해역의 현황과 해역의 지리·환경적 조건으로 나누어 생각할 수 있는데, 해역의 현황에는 저유·계류시설, 유조선교통량·유류물동량, 해난·해양오염사고 및 항만운영시행세칙의 분석·적용이 해당되고, 해역의 지리·환경적 조건에는 항만, 항로, 묘박지, 기상, 해상상태, 어업, 수산업, 위락시설 등이 해당된다(국 등, 2001). 이들을 종합해보면 해양오염과 관련된 위해요소는 해양오염사고를 일으키는 원인이 될 수 있는 항목과 사고의 결과로 피해를 입을 수 있는 항목으로 구성된다고 볼 수 있다.

위해요소의 파악과 관련된 또 다른 근거로는 방제정보지도를 들 수 있는데, 한국의 방제정보지도의 경우, 해안선 형태(Shoreline Classification), 생물자원(Biological Resources), 사회·경제자원(Human Resources) 및 방제자원(Clean-up Resources)의 4가지로 분류하여 데이터베이스화 되어 있다. 해안선 형태는 파도와 조석 에너지의 강약, 해안의 경사, 해안의 기질 형태, 생물학적 생산력과 민감도 등에 의해 분류된 것으로 기름오염에 민감한 정도에 따라 등급이 구분되어 있다. 생물자원은 유류오염에 의한 피해를 받기 쉬운 연안지역의 야생동물을 조사하여 분류하였는데, 여기에는 조류, 어류, 포유류, 연체동물, 갑각류, 해조류, 염생식물과 기타 생물이 포함된다. 사회·경제자원은 연안자원 이용, 천수공간 이용, 항만시설, 천연자원 관리구역의 4가지로 분류되어 있다. 방제자원은 방제기관, 기자재의 위치와 종류를 나

Collection

타낸다. 이러한 환경민감도지도(ESI Map)와 관련된 각각의 항목들은 해양오염사고로 인한 피해에 취약한 부분을 반영하고 있다.

위의 해양오염 관련 위해요소와 방제정보지도의 항목들을 바탕으로 본 연구에서 이용할 해양환경 위해요소 항목을 도출하면 Table 4.1과 같이 11개의 항목으로 정리할 수 있다.

Table 4.1 Items of Marine Environmental Hazard

No.	Item	No.	Item
1	Oil Storage Facility	7	Amenity
2	Traffic Density of Vessel	8	Weather, Sea Condition
3	Oil Transportation	9	Historical Statistics
4	Fishing Ground	10	Shoreline Type
5	Aquaculture	11	Special Sea
6	Industries (water in-take)		

우리나라 현행 기름회수능력은 위의 위해요소 항목 중 선박통항량, 기름물동량, 과거 해양오염사고 유출량을 반영하여 설정되어 있는데, 이는 위의 항목들 중 일부만 반영된 것으로 더 많은 항목을 반영한 복합적인 설정기준으로 개선할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 위 11개의 항목들 중 관련 자료의 수집과 가중치 처리가 어려운 4개 항목을 제외한 7개 항목, 즉, 기름저장시설, 선박통항량, 기름물동량, 과거 해양오염사고, 양식어업, 위락시설, 환경관리해역을 해양환경위해요소의 항목으로 설정하였다.

Collection

4.1.2 계층분석과정(AHP)

(1) 개념 및 원리

계층분석과정(Analysis Hierarchy Process ; AHP)은 대안과 평가기준이 복수인 경우의 의사결정(Multiple Criteria Decision Making ; MCDM)을 지원하기 위해 개발된 평가기법의 하나로 1970년대 초 펜실배니아 대학의 Thomas Saaty교수가 개발한 기법이다(박·설, 2010). AHP 기법은 의사결정의 목표나 평가기준이 다수이며 복잡한 경우에 상호 관련성이 적은 배타적 대안들을 체계적으로 평가할 수 있는 기법으로 주어진 대안의 가치를 객관적이고 일관성 있게 판단하여 중요도 또는 가중치를 산출하는 방법으로 볼 수 있다(임, 2006). 이는 계량적인 경우 뿐만 아니라 비계량적 기준들을 평가할 때 좋은 결과를 나타내어 행정부문의 의사결정에 널리 쓰이고 있으며, 특히 공간계획이나 정책 수립시 합리적인 대안의 선택, 사업시행의 우선순위 결정, 각종 사업의 평가 등에도 활용되고 있다.

AHP 기법을 잘 활용하기 위해서는 네가지 핵심원리를 이해할 필요가 있는데, 첫 번째 원리는 복잡한 문제를 계층으로 구조화하는 것이다. 이는 문제를 구성하는 요인들을 주요요인과 세부요인으로 나누어 계층을 구분하는 것으로 계층분석과정의 시작으로 볼 수 있다.

두 번째 원리는 쌍대비교의 원리다. 대안의 수가 적은 경우에는 좋고 나쁨의 판단이 비교적 쉬우나 비교 대상이 많아지면 판단에 혼란이 올 수 있다. AHP 기법은 두 개의 대안을 비교하여 상대적으로 어느 쪽이 더 중요한지를 비교함으로써 다수의 대안을 한꺼번에 판단할 때 생길 수 있는 오류를 방지함과 동시에 판단을 쉽게 내릴 수 있도록 구조화한 것이다.

Collection

세 번째 원리는 인간의 평가적 사고방식을 채택한 것이다. 두 개의 대안에 대하여 더 중요하고 덜 선호할 수 있는 인간의 언어적 표현을 채택한 것으로, 이는 애매하고 불분명한 상황에서 여러 문제에 대하여 인간의 두뇌가 판단하는 방식을 수학적으로 접근한 퍼지이론을 도입한 것이다.

네 번째 원리는 복잡한 문제를 일관성 있게 판단하고 있는지를 모니터링하는 것이다. 이는 대안들의 쌍대비교 과정 중 판단의 일관성을 유지하였는지 검토하는 것으로, 일관성지수를 산출해서 전체 쌍대비교과정 중 의사결정자가 일관성을 유지한 합리적 판단을 했는지 점검하여 결과의 신뢰성을 확보하고 있다.

(2) 가중치 부여방식

AHP 기법은 문제를 계층구조로 만들어 각 계층의 쌍대비교를 통해 가중치를 설정하여 최하위 계층의 우선순위를 종합하는 분석절차로 진행된다.

Table 4.2 Calculation procedure of AHP

Criteria	Step 1				Step 2				Step 3
	1	2	…	n	1	2	…	n	Weight
1	a_{11}	a_{12}	…	a_{1n}	a_{11}/S_1	a_{12}/S_2	…	a_{1n}/S_n	T_1/n
2	a_{21}	a_{22}	…	a_{2n}	a_{21}/S_1	a_{22}/S_2	…	a_{2n}/S_n	T_2/n
.	.	.	…	.	.	.	…	.	.
.	.	.	…	.	.	.	…	.	.
n	a_{n1}	a_{n2}	…	a_{nn}	a_{n1}/S_1	a_{n2}/S_2	…	a_{nn}/S_n	T_n/n
Σ	S_1	S_2	…	S_n	1.0	1.0	…	1.0	1.0

※ T_n : Sum of rows(Step 2)

세부적인 절차는 다음과 같다. ① 원래의 쌍대비교 행렬의 첫 번째 열 중에서 첫 번째 기준에 대한 가중치를 곱하여 가중치가 부여된 합벡터를 결

Collection

정한다. ② 마지막 열까지 각 기준의 가중치를 곱하여 가중치가 부여된 행렬을 구한다. 이 행렬에서 행별로 합을 구한다. ③ 가중치가 부여된 합을 가중치로 나누어 일관성 벡터를 결정한다.

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1a_{11} + p_2a_{12} + \cdots + p_na_{1n} \\ p_1a_{21} + p_2a_{22} + \cdots + p_na_{2n} \\ \cdots \\ \cdots \\ p_1a_{n1} + p_2a_{n2} + \cdots + p_na_{nn} \end{bmatrix} \cdots\cdots(4.1)$$

여기서 p_n은 각 기준에 대한 가중치를 말하고, a_{nn}은 각 요소에 해당하는 선호 지수값이다.

AHP 기법은 정량적인 요소 뿐만 아니라 정성적인 요소도 동시에 평가가 가능하며, 평가자로 하여금 쌍대비교를 통해 한번에 둘씩 비교하게 함으로써 평가를 수월하게 할 수 있다. 또한 각 단계에서 언급된 선호만을 다루기 때문에 분석이 원활하게 이루어질 수 있고, 일관성 지수를 적용하여 평가자의 의견에 관한 일관성을 검증함으로써 평가자의 의견이 판단에 직접 적용가능한지에 대한 사전검증효과를 갖게 되며, 평가의 불일치가 있을 경우에는 피드백하여 평가의 일관성 및 평가자의 진실성을 보장할 수 있다. AHP 기법은 문제해결구조가 인간의 논리적인 문제해결구조와 유사하므로 인간의 판단을 어떻게 합리적으로 종합화할 것인가에 대한 답을 부여해준다고 볼 수 있다.

Collection

(3) AHP 설문구성의 예

AHP 설문구성은 먼저 평가기준에 대한 설문을 구성한 후에 세부 항목에 대한 설문을 구성한다. AHP 설문을 구성할 때 척도는 일반적으로 7점척도 또는 9점척도를 이용하지만 이에 대한 절대적인 기준은 없으며, 본 연구에서는 설문의 용이성을 위해 5점척도를 이용하였다. AHP 설문구성과 AHP 척도의 예는 아래의 Table 4.3, Table 4.4와 같다.

Table 4.3 Example of AHP survey(questionnaire)

Criteria	Strong impor -tance		Weak impor -tance		Equal		Weak impor -tance		Strong impor -tance	Criteria
Accident probability	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	Post accident sensitivity

Table 4.4 Example of AHP scale

Importance	Meaning of scale
①	Equal importance
③	Weak importance of one over another
⑤	Very strong or demonstrated importance
②,④	Intermediate value

Collection

4.2 배치모델 설계방법

4.2.1 적용구역 설정

지역별 방제자원 배치기준 적용을 위한 구역은 새롭게 편성하여 설정하는 것 보다는 타당한 근거에 따라 설정된 현행 기준의 지역구분을 그대로 이용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 따라서 현행 지역구분인 3권역, 12지역으로 구분하여 설정한다. 현행 권역인 대산권, 여수권, 울산권은 지역명과 중복되어 혼돈될 수 있으므로 본 연구에서는 대산권을 제1권역, 여수권을 제2권역, 울산권을 제3권역으로 지칭하고, 각 권역 중심지역의 해양경찰서를 중심으로 주변지역을 묶어 하나의 권역으로 편성한다(Fig. 4.1). 현행 기준에 따른 권역내 중심지역과 기타지역의 구분은 동일하게 적용한다.

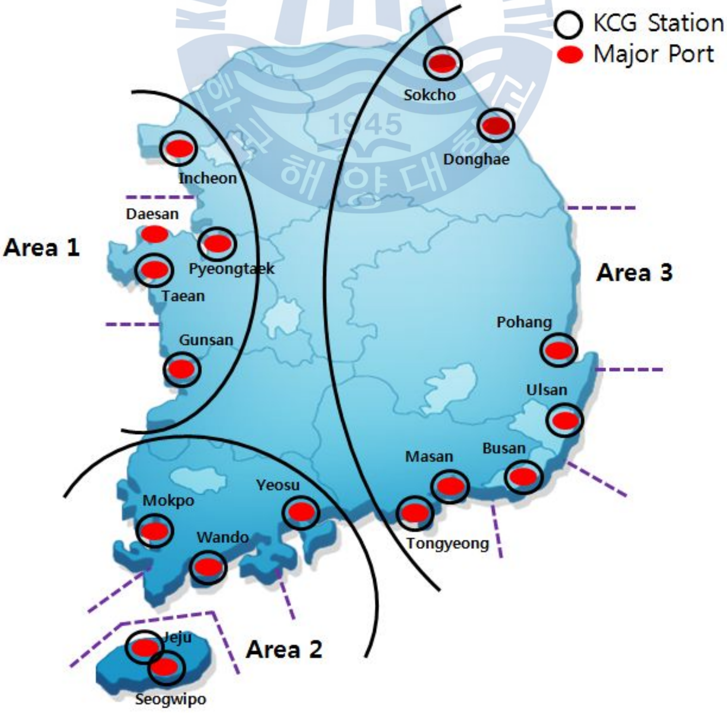

Fig. 4.1 Division of area & region in Korea

dCollection

4.2.2 모델 구성 요소 및 항목 설정

안전공학의 재해관리단계(Disaster Management Cycle)는 예방, 대비, 대응, 복구의 4단계로 이루어 지는데, 이는 재해의 원인을 예방하고 재해에 대비·대응하는 것 뿐만 아니라 재해로 인한 피해를 복구하는 부분도 중요한 부분이라는 것을 의미한다. 해양오염사고는 재해의 한 부분이므로 해양오염사고를 대비한 지역별 해상방제장비 배치모델 설계는 원인적인 요소의 고려 뿐만 아니라 사고후 영향을 받은 부분의 복구와 관련된 요소도 고려되어야 함을 알 수 있다.

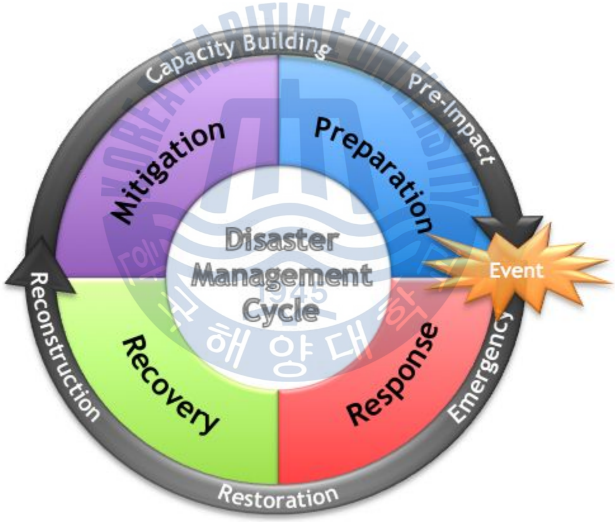

Fig. 4.2 Disaster Management Cycle

따라서 지역별 해상방제장비 배치모델 설계에 필요한 구성 요소는 4.1.1에서 살펴본 해양오염 위해요소들을 분석하여 크게 해양사고 개연성 요소와 해양사고 민감도 요소로 구분하여 7개의 해양환경위해도 항목으로 설정하였다. 설정된 항목의 적절성에 대한 전문가 자문은 AHP 설문조사시

Collection

구두로 병행하여 실시하였고, 2개 요소와 7개 항목의 설정이 적절하다는 모든 전문가들의 답변을 받을 수 있었다.

(1) 사고개연성 요소

사고개연성 요소는 해양오염사고를 일으킬 수 있는 연관성을 의미하고, 이는 사고의 원인적인 측면으로 볼 수 있다. 해양오염사고의 빈도와 규모를 예상함에 있어 해양오염사고 개연성을 살펴보기 위해 4.1.1에서 살펴본 해양오염과 관련된 위해요소 중 해역의 현황 요소를 근거로 해양사고 개연성 요소를 설정하였다. 해양사고 개연성 요소에는 기름물동량, 산업시설(저유소) 분포, 선박 입출항, 과거 해양오염사고가 해당된다.

첫 번째 항목은 기름물동량으로, 해당 지역에 대하여 1년간 수출입되는 기름의 양을 그 지역의 기름물동량으로 계산하고, 이를 근거로 지역별 가중치 계산에 이용한다. 여기에는 원유(역청유), 석유 뿐만 아니라 석유정제품도 포함하여 총 합계를 해당 지역의 기름물동량으로 간주하고, 단위는 톤(ton)이다.

두 번째 항목은 산업시설 분포로, 해당 지역에 분포되어 있는 기름저장시설, 저유소 등의 저장용량의 합을 기준으로 한다. 산업시설은 현재 해양환경관리공단에 방제분담금을 내는 업체를 중심으로 파악하였고, 여기에 포함되지 않는 일부 기름저장시설도 해양경찰청의 자료에 근거하여 포함시켜서 해당 지역의 산업시설 분포의 계산에 이용하였다. 단위는 킬로리터(kℓ)이다.

세 번째 항목은 선박 입출항척수로, 해당 지역의 1년간 입출항한 선박의 척수를 기준으로 파악하였다. 신고된 입출항 선박의 척수를 파악하였는데,

Collection

입항과 출항이라는 의미에서 본다면 수치가 중복되므로 입항을 기준으로 척수를 산정하였다.

네 번째 항목은 과거 해양오염사고로, 해당 지역에서 최근 6년간 발생한 해양오염사고의 기름유출량의 합을 기준으로 산정하였다. 지방 해양경찰서 기준으로 파악된 해양오염사고 통계를 이용하였으며, 소형 유출사고에서부터 Hebei Spirit호 오염사고와 같은 대형 유출사고까지 모든 기름유출사고의 유출량을 합하여 산정했으며, 단위는 킬로리터(㎘)이다.

(2) 사후민감도 요소

사후민감도 요소는 해양오염사고로 인하여 발생할 수 있는 환경오염피해에 대한 민감도를 의미하고, 이는 사고 후 환경복구의 측면으로 볼 수 있다. 해양오염사고로 인한 환경적 민감도를 살펴보기 위해 4.1.1에서 살펴본 해양오염과 관련된 위해요소 중 해역의 지리·환경적 조건과 방제정보지도를 근거로 해양오염사고로 인한 민감도 요소를 도출하였다. 사후 민감도 요소에는 양식어업, 환경관리해역, 위락시설(해수욕장)이 해당된다.

첫 번째 항목은 양식어업으로, 해당지역에 분포되어 있는 특정 연도의 양식어업 면적의 합을 기준으로 설정하였다. 해양오염사고시 직접적으로 경제적인 손해를 입을 수 있으므로 사후 민감도 요소로 분류하였고, 단위는 헥타르(ha)이다.

두 번째 항목은 환경관리해역으로, 해양환경관리법 제15조(환경관리해역의 지정·관리)에 따라 해당 지역의 관할하에 있는 환경보전해역과 특별관리해역을 기준으로 산정하였다. 해당 해역의 해양과 육지의 면적의 합을 해당 지역의 환경관리해역 면적으로 계산하였고, 단위는 평방킬로미터(㎢)이다.

Collection

세 번째 항목은 위락시설로, 지역의 대표적인 해양 위락시설인 해수욕장의 연간 이용객수를 기준으로 설정하였다. 해양오염사고는 해수욕장 이용을 감소시키고, 이는 지역 경제에 직접적인 손해를 입힐 수 있으므로 사후 민감도 요소로 분류하였다.

해양사고 개연성 요소의 4개 항목과 사후 민감도 요소의 3개 항목은 Fig. 4.2와 같이 지역별 위해도 계산시 계층분석과정(AHP)에 이용될 수 있도록 계층구조를 구축하였다.

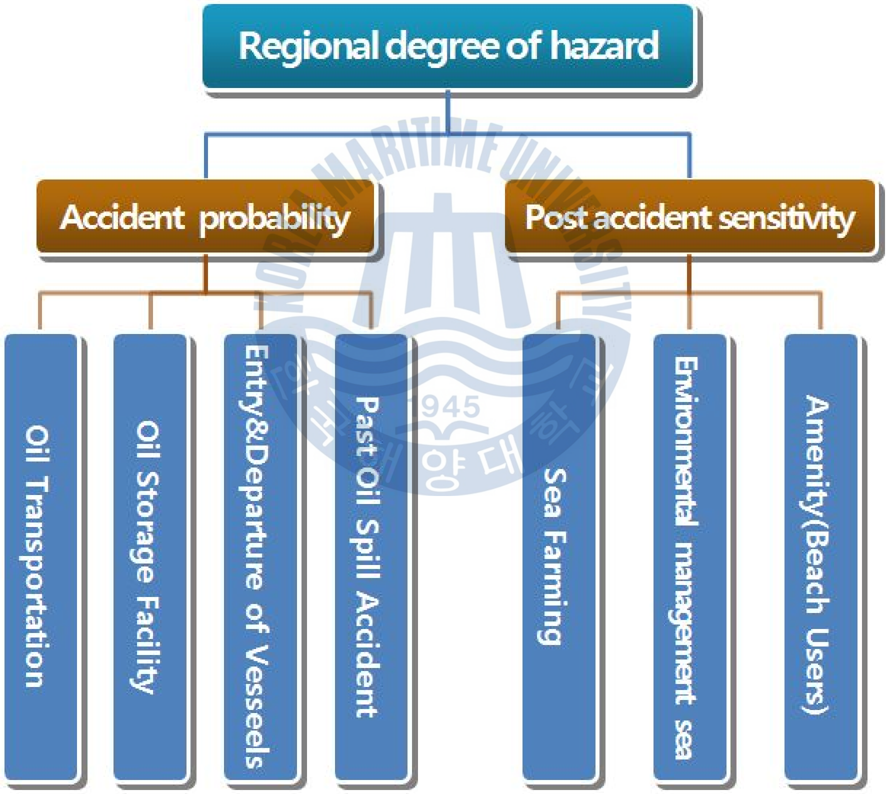

Fig. 4.3 Hierarchy structure for calculating regional marine environmental degree of hazard

dCollection

4.2.3 항목별 기초자료 통계 및 정규화

앞서 제시한 7가지 위해도 항목, 즉, 기름물동량, 산업시설(저유소) 분포, 선박 입출항, 과거 해양오염사고, 양식어업, 특별관리해역, 위락시설에 대하여 통계청, 해양경찰청, 해양환경관리공단, 한국관광공사 등의 자료와 해양환경관리법의 조문을 근거로 지역별 기초 통계자료를 작성하고, 지역별로 각 항목에 대한 점수치를 계산하는데 이용한다. 항목별 통계자료는 입수가능한 가장 최근의 것을 기준으로 한다.

다음으로 계층분석과정 기법에서 대안들의 상대적 중요도는 그 합이 1이 되어야 하므로, 각 항목별 해당 권역내 지역들의 값의 합으로 나누어 정규화(Normalization)한다. 정규화된 값은 각 지역들의 항목별 점수를 의미한다. 정규화는 각 권역내의 지역에 대하여 실시하는데, 이는 권역의 현행 기름회수능력인 7,500kℓ를 위해도에 따라 분산·배치하기 위함이다.

본 연구에서 권역의 현행 기름회수능력인 7,500kℓ를 그대로 이용하는 이유는 첫째, 해상방제장비 배치모델 설계를 지역적 차원에서 접근하기 위함이고, 둘째, 12시간 기준으로 인근 지역의 해상방제장비를 동원하면 비용 측면에서 효율적이기 때문이다. 원칙적으로는 권역별 최대 해양오염사고 유출량인 15,000kℓ를 회수할 수 있는 해상방제장비를 보유해야 하지만, 현행 기준에 따라 인근 권역의 해상방제장비 동원을 통한 대응은 비용 측면에서 효율적이므로 충분한 타당성을 지니고 있고, 따라서 해상방제장비 배치모델의 권역별 기준치인 7,500kℓ를 그대로 이용하였다.

4.2.4 항목별 가중치 설정

Collection

본 연구에서는 7개의 위해도 항목을 평가기준(Criteria)으로 보고, 도출되는 지역별 위해도를 반영한 각 지역을 대안(Alternative)으로 보면 의사결정 문제(Decision making problem)이므로 의사결정방법 중 하나인 계층분석방법을 이용하여 지역별 위해도를 도출하였다.

AHP를 이용하여 각 항목별 가중치를 구하기 위해서는 먼저 최종 목표를 바탕으로 계층구조를 구축하고, 각 항목에 대하여 쌍대비교를 실시해야 한다. 이를 위해 해양오염방제분야 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였는데, 설문조사는 해양경찰청, 해양환경관리공단, 연구기관, 민간방제업자 및 검정회사에 종사하고 있는 해양오염방제분야 전문가를 대상으로 진행하였다. AHP 설문은 해당 분야 소수의 최고 전문가를 대상으로 하는 조사로, 본 연구에서는 해양오염방제 전반에 대한 이해가 있는 사람으로서 현장지휘관(On-Scene Co-ordinator ; OSC)급 이상의 경험을 가진 해양오염 전문연구자, 기획자, 현장지휘 경험자 17명을 선정하여 실시하였다. 전문가가 아닌 다수를 대상으로 설문을 진행하면 오차의 개입 가능성이 커지기 때문에 소수의 전문가를 대상으로 실시하였다.

설문조사 기간은 2012년 7월 한달 동안이며 조사 방법은 방문 또는 E-mail을 이용하여 실시하였다.

AHP 설문을 통한 가중치를 도출하기 위해서 각 전문가의 설문결과를 바탕으로 일관성지수(Comsistenct Index : C.I.)가 0.1 이하인 전문가의 답변을 바탕으로 계산시 오차가 적은 기하평균을 이용하여 항목별 최종 가중치를 산정한다.

4.2.5 지역별 해양환경위해도 도출 및 해상방제장비 배치량 산정

각 항목에 대하여 지역별 기초자료 통계조사 및 정규화를 통하여 산정한

dCollection

위해도 점수와 계층분석과정 기법을 이용한 각 항목에 대한 가중치 계산 결과를 종합하여 단일값으로 제시하는데, 이 값이 해당 지역의 권역내에서의 최종적인 위해도를 의미한다. 계산된 위해도에 따라 권역내 지역별 해상방제장비 배치량을 산정한다.

권역내 지역별 위해도를 계산하기 위해 7개의 위해도 항목에 관한 지역별 통계자료와 AHP를 이용한 항목별 가중치를 이용하였고, 이용한 최종식은 아래 식 (4.2)와 같다.

$$H_j = \left[\sum_{i=1}^{7} \left(\frac{n_{ij}}{\sum_{a=1}^{m} n_{ia}} \times A_i \right) \right] \times Q \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ (4.2)$$

단, H : 지역별 해상방제장비 배치량(위해도 기반)

j : 1,2,⋯,m

n : 항목에 대한 지역의 점수치

i : 7개 항목(i=1,2,⋯,7)

a : 권역내 지역의 번호(a=1,2,⋯,m)

m : 권역내 지역의 수

A_i : 항목의 가중치(AHP 설문을 이용하여 도출)

Q : 전국 또는 권역 소요량(본 논문에서는 7,500㎘ 적용)

본 연구에서 설계하는 지역별 해상방제장비 배치모델은 위해도 기반 배치 모델(Hazard-Based Deployment Model)이므로 첫글자를 따서 “HBD Model”로 명명한다.

이상에서 설계된 HBD Modeling 과정을 종합적으로 설명하면 Fig. 4.4와 같다.

Collection

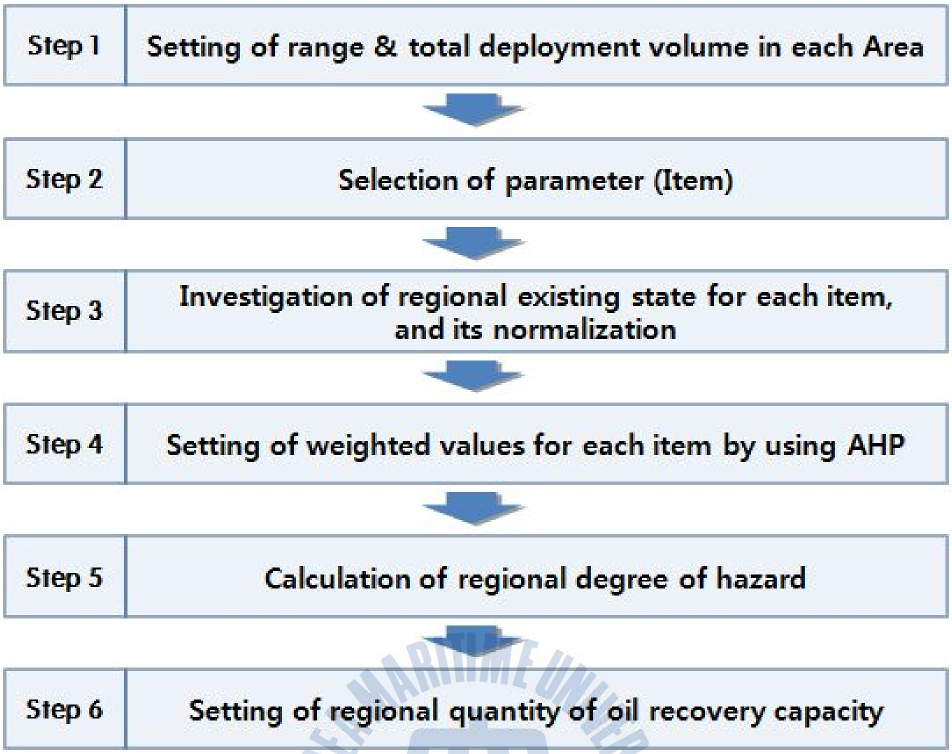

Fig. 4.4 Flow chart of HBD Model

HBD Model에서 변수는 총 4개로, 전국 또는 권역내 배치할 해상 기름회수능력 총량, 위해도 항목의 종류 및 개수, 지역의 위해도 항목별 현황, 위해도 항목별 가중치가 해당된다.

Step 1에서는 먼저 HBD Model의 적용을 위해 권역의 범위와 전국 또는 권역에 배치시킬 해상방제장비의 해상기름회수 총량을 설정한다. 권역의 범위 및 배치량 결정시 권역별 배치량을 다른 값으로 변경하는 경우에는 변경된 값을 입력치로 사용하는데, 본 연구에서는 현행 기준인 7,500㎘를 그대로 적용하였다.

Step 2에서는 모델 적용에 필요한 위해도 항목을 설정하는데, 위해도 항목의 종류 및 개수의 설정은 시간의 흐름에 따른 중요도 변화에 따라 변경하

Collection

여 설정할 수 있다.

Step 3에서는 각 항목의 지역별 현황을 조사하여 정규화한다. Step 2에서 설정된 위해도 항목에 따라 지역의 항목별 현황을 조사하기 때문에 지역별 현황 자료도 항목설정에 따라 달라질 수 있다.

Step 4에서는 계층분석과정(AHP) 이용에 필요한 설문조사를 실시하여 항목별 가중치를 도출한다. 위해도 항목별 가중치는 항목의 선택과 마찬가지로 시간이 흐름에 따라 전문가들의 의견이 달라질 수 있으므로 설문조사 결과에 따라 가중치 값은 달라질 수 있다.

Step 5에서는 Step 3에서 도출된 정규화 결과와 Step 4에서 도출된 항목별 가중치를 단일값으로 제시하여 이 값을 권역내 특정지역의 해양환경위해도로 간주한다.

Step 6에서는 Step 5에서 도출된 지역별 해양환경위해도 값에 권역내에 배치할 해상기름회수 총량을 곱하여 최종적인 지역 배치량을 산정한다.

Collection

4.3 HBD Model 설계

4.3.1 지역별 현황 분석

(1) 사고 개연성

1) 기름물동량

지역별 기름물동량을 알아보기 위해 해양수산부의 외내항 품목별 화물 입출항현황(2012)의 내용 중 원유와 석유정제품 두 품목의 지역별 운송량을 발췌하여 정리하였으며, 2012년 1월부터 12월까지 수입·수출된 양을 해당 지역의 기름물동량으로 간주하였다.

아래 Table 4.5에 따르면, 기름물동량은 대형 유류저장시설이 위치한 대산, 여수, 울산에서 압도적으로 많은 양이 수입·수출되고 있는데, 세 지역은 결과적으로 권역을 나누는 기준이 된다. 제1권역에서는 대산·태안·평택이 가장 많은 양을 수입·수출하고 있고, 인천지역의 석유정제품 수입·수출이 상당히 큰 비중을 차지하고 있다. 제2권역에서는 여수가 가장 많은 양을 수입·수출하고 있고, 목포와 제주·서귀포의 석유정제품 수입·수출의 양도 상당한 비중을 차지하고 있다. 제3권역에서는 울산이 가장 많은 양을 수입·수출하고 있고, 부산의 석유정제품 수입·수출의 양이 일부 비중을 차지하고 있으며, 나머지 지역은 다소 적은 양을 수입·수출하고 있는 것으로 나타났다.

각 권역의 기름물동량의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시한 결과도 Table 4.5에 함께 표시하였으며, 권역별로 정규화를 실시하였기 때문에 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 ‘1’이 된다.

Collection

Table 4.5 The Quantity of Oil Transported(2012)

Region		The Quantity of Oil Transported(ton)			Normalization
		Crude	Oil Product	Sum	
Area 1	Incheon	4,666,784	15,809,477	20,476,261	0.2809
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	21,224,637	29,422,490	50,647,127	0.6946
	Gunsan	0	1,788,402	1,788,402	0.0245
	Sum			72,911,790	1
Area 2	Mokpo	5,746	914,933	920,679	0.0091
	Wando	0	14,529	14,529	0.0001
	Yeosu	50,294,738	49,596,015	99,890,753	0.9851
	Jeju·Seogwipo	0	578,190	578,190	0.0057
	Sum			101,404,151	1
Area 3	Tongyeong·Masan	0	1,635,184	1,635,184	0.0113
	Busan	77,053	8,059,765	8,136,818	0.0560
	Ulsan	74,114,434	59,606,439	133,720,873	0.9210
	Pohang	0	713,676	713,676	0.0049
	Donghae·Sokcho	0	978,939	978,939	0.0068
	Sum			145,185,490	1

2) 산업시설(기름저장시설) 분포

산업시설은 해양오염에 직접적인 영향을 줄 수 있는 기름저장시설로 한정하여 파악하였으며, 해양환경관리공단과 해양경찰청의 기름저장시설 현황(2013)을 바탕으로 이용하였다. 기름저장시설로 한정하였기 때문에 HNS 저장시설은 제외하였다.

Table 4.6에 따르면, 기름저장시설 분포 현황은 기름물동량과 마찬가지로 대산, 여수, 울산이 권역내에서 가장 많은 용량의 시설을 가지고 있는 것으

Collection

로 나타났다. 석유정제품의 수입·수출이 많은 것으로 나타났던 인천과 통영 지역의 기름저장시설이 상당한 용량을 차지하는 것이 특징으로 지적된다.

각 권역의 기름저장시설 용량의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시한 결과도 Table 4.6에 함께 표시하였으며, 권역별로 정규화를 실시하였기 때문에 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 ‘1’이 된다.

Table 4.6 The Regional State of Oil Storage Facility(2013)

Region		Storage Capacity(kℓ)	Normalization
Area 1	Incheon	2,887,858	0.3240
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	5,604,962	0.6288
	Gunsan	421,169	0.0472
	Sum	8,913,989	1
Area 2	Mokpo	96,612	0.0056
	Wando	0	0.0000
	Yeosu	17,023,681	0.9868
	Jeju·Seogwipo	130,713	0.0076
	Sum	17,251,006	1
Area 3	Tongyeong·Masan	7,915,287	0.3366
	Busan	335,526	0.0143
	Ulsan	14,993,648	0.6377
	Pohang	36,039	0.0015
	Donghae·Sokcho	232,941	0.0099
	Sum	23,513,441	1

3) 입출항 선박 척수

입출항 선박 척수는 해양수산부의 선박입출항현황(2012)을 바탕으로 파악하였으며, 입항과 출항은 중복된 의미로 사용될 수 있으므로 지역별 입

Collection

항선박 척수를 기준으로 산정하였다.

아래 Table 4.7에 따르면, 연간 입항선박 현황은 인천, 부산, 울산과 같이 수출입 물량이 많은 대도시의 입항선박 척수가 많은 것으로 나타났다. 각 권역의 입항 선박 척수의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시한 결과도 Table 4.7에 함께 표시하였으며, 권역별로 정규화를 실시하였기 때문에 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 '1'이 된다.

Table 4.7 The Number of Ship's Entry and Departure(2012)

Region		No. of Ship's Entry	Normalization
Area 1	Incheon	17,879	0.4673
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	16,314	0.4264
	Gunsan	4,069	0.1063
	Sum	38,262	1
Area 2	Mokpo	9,180	0.4434
	Wando	2,897	0.1399
	Yeosu	5,581	0.2696
	Jeju·Seogwipo	3,044	0.1471
	Sum	20,702	1
Area 3	Tongyeong·Masan	10,277	0.1050
	Busan	50,437	0.5153
	Ulsan	25,183	0.2573
	Pohang	7,965	0.0814
	Donghae·Sokcho	4,015	0.0410
	Sum	97,877	1

4) 과거 해양오염사고 유출량

과거 해양오염사고 유출량은 해양경찰청에서 발행하는 해경백서의 통계

Collection

자료를 바탕으로 파악하였는데, 해양경찰청에서 지역별 해양오염사고 유출량이 정리되어 공개되기 시작한 2006년부터 2011년까지 6년간 지역별로 발생한 해양오염사고 유출량을 합산한 데이터를 정리하였다.

아래 Table 4.8에 따르면, 기름물동량이 많고 대형 기름저장시설이 위치한 대산, 여수, 울산에서 발생한 해양오염사고의 유출량이 많은 것으로 파악되는데, 특히, 2007년 여수에서 발생한 Hebei Spirit호 오염사고로 인한 유출량이 가장 많은 것으로 나타났다.

각 권역의 과거 해양오염사고의 유출량의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시한 결과도 Table 4.8에 함께 표시하였으며, 권역별로 정규화를 실시하였기 때문에 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 '1'이 된다.

Table 4.8 The Amount of Spill of Past oil Spill Accident(2006~2011)

Region		Spill(kℓ)							Normalization
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	Sum	
Area 1	Incheon	49,478	86,650	10,685	16,899	239,766	12,100	415,578	0.0317
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	1,112	12,549,956	1,194	47,056	7,522	57,800	12,664,640	0.9645
	Gunsan	42,066	960	1,632	1,496	1,994	2,100	50,248	0.0038
	Sum							13,130,466	1
Area 2	Mokpo	655	64,576	12,153	997	4,657	148,000	231,038	0.0963
	Wando	967	472	2,445	1,437	474	78,000	83,795	0.0349
	Yeosu	33,728	1,569,191	260,363	5,251	40,846	6,900	1,916,279	0.7985
	Jeju·Seogwipo	330	50,481	22,178	14,818	79,349	1,500	168,656	0.0703
	Sum							2,399,768	1
Area 3	Tongyeong·Masan	3,156	60,428	9,183	5,976	127,456	1,700	207,899	0.1140
	Busan	213,425	33,256	110,444	6,946	3,336	23,400	390,807	0.2142
	Ulsan	16,604	1,030,690	644	1,924	85,325	31,200	1,166,387	0.6392
	Pohang	1,696	278	4,206	6,884	3,730	29,600	46,394	0.0254
	Donghae·Sokcho	1,524	544	795	1,115	6,510	2,700	13,188	0.0072
	Sum							1,824,675	1

Collection

(2) 사후 민감도

1) 양식장 분포

전국의 양식장 분포 현황은 통계청의 양식방법별 사육수면적(2010)을 바탕으로 지역별 현황을 파악하였으며, 자료가 없는 지역은 '0'으로 처리하였다.

아래 Table 4.9에 따르면, 양식장 분포와 관련하여 수산업 중심의 지역들에 사육수 면적의 대부분이 분포되어 있음을 알 수 있다. 각 권역의 사육수 면적의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시한 결과도 Table 4.9에 함께 표시하였으며, 권역별로 정규화를 실시하였기 때문에 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 '1'이 된다.

Table 4.9 The State of Sea Farming(2010)

Region		Area of Farm(㎡)	Normalization
Area 1	Incheon	21,393	0.2004
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	85,334	0.7996
	Gunsan	0	0.0000
	Sum	106,727	1
Area 2	Mokpo	0	0.0000
	Wando	1,008,156	0.3971
	Yeosu	249,014	0.0981
	Jeju·Seogwipo	1,281,492	0.5048
	Sum	2,538,662	1
Area 3	Tongyeong·Masan	429,040	0.6074
	Busan	32,515	0.0460
	Ulsan	37,723	0.0534
	Pohang	198,225	0.2806
	Donghae·Sokcho	8,905	0.0126
	Sum	706,408	1

Collection

2) 환경관리해역

환경관리해역은 해양환경관리법 제15조(환경관리해역의 지정·관리)에 따라 해당 지역의 관할하에 있는 환경보전해역과 특별관리해역을 기준으로 하였다. 해당 지역 관할하에 있는 환경보전해역과 특별관리해역의 해양 및 육지 면적의 합을 해당 지역의 환경관리해역 면적으로 계산하였고, 단위는 평방킬로미터(㎢)이다. 해당 데이터가 없는 지역은 '0'으로 처리하였다.

아래 Table 4.10에 따르면, 환경관리해역은 환경보전해역이 있는 완도, 여수와 특별관리해역이 있는 인천, 통영·마산, 부산, 울산, 지역이 해당되는 것으로 나타났다. 각 권역의 환경관리해역 면적의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시하였고, 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 '1'이 된다.

Table 4.10 Area of Environmental Management Sea

Region		Area(㎢)			Normalization
		Environmental Preservation Sea	Environmental Management Sea	Sum	
Area 1	Incheon	0	1181.88(시화호)	1181.88	1.0000
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0	0	0	0.0000
	Gunsan	0	0	0	0.0000
	Sum			1,181.88	1
Area 2	Mokpo	0	0	0	0.0000
	Wando	769.98	0	769.98	0.5163
	Yeosu	255.29	465.93(광양만)	721.22	0.4837
	Jeju·Seogwipo	0	0	0	0.0000
	Sum			1,491.2	1
Area 3	Tongyeong·Masan	0	300.66(마산만)	300.66	0.2419
	Busan	0	741.5(부산연안)	741.5	0.5965
	Ulsan	0	200.85(울산연안)	200.85	0.1616
	Pohang	0	0	0	0.0000
	Donghae·Sokcho	0	0	0	0.0000
	Sum			1,243.01	1

Collection

3) 위락시설(해수욕장) 이용

위락시설 분포는 우리나라에서 해양이용의 가장 큰 부분을 차지하는 해수욕장의 이용객수를 기준으로 파악하였으며, 이를 위해 문화체육관광부의 2010년 관광지 방문객 보고통계(2011)를 바탕으로 산정하였다. 지역의 규모가 적은 해수욕장은 통계에 포함되어 있지 않아 이용객수가 없는 것으로 파악되는 지역은 '0'으로 처리하였다.

아래 Table 4.11에 따르면, 해수욕장 이용객수는 전국적으로 부산, 대산·태안·평택, 동해·속초 순으로 많은 것으로 나타났다. 각 권역의 해수욕장 이용객수의 합을 기준으로 지역별로 정규화를 실시하여 함께 표시하였고, 권역내 지역별 정규화 결과의 합은 '1'이 된다.

Table 4.11 The Number of Beach Users(2010)

Region		No. of Beach Vacationer	Normalization
Area 1	Incheon	2,390,247	0.1951
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	9,858,574	0.8049
	Gunsan	0	0.0000
	Sum	12,248,821	1
Area 2	Mokpo	0	0.0000
	Wando	1,687,006	0.7525
	Yeosu	554,879	0.2475
	Jeju·Seogwipo	0	0.0000
	Sum	2,241,885	1
Area 3	Tongyeong·Masan	29,658	0.0004
	Busan	41,271,105	0.6131
	Ulsan	2,455,893	0.0365
	Pohang	3,504,232	0.0520
	Donghae·Sokcho	20,059,533	0.2980
	Sum	67,320,421	1

Collection

(3) 정규화 결과

7가지 위해도 항목, 즉, 기름물동량, 산업시설(저유소) 분포, 선박 입출항, 과거 해양오염사고, 양식어업 분포, 특별관리해역, 위락시설에 대한 지역별 기초 통계자료를 작성하여 각 항목별로 해당 권역내 지역들의 값의 합으로 나누어 정규화(Normalization)한 값은 Table 4.12와 같다.

Table 4.12 Result of Normalization

Region		Accident probability				Post accident sensitivity		
		Oil transport	Oil storage	Vessel ent.&dep.	Oil spill accident	Sea farming	E.M. sea	Beach users
Area 1	Incheon	0.2809	0.3240	0.4673	0.0317	0.2004	1.0000	0.1951
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0.6946	0.6288	0.4264	0.9645	0.7996	0.0000	0.8049
	Gunsan	0.0245	0.0472	0.1063	0.0038	0.0000	0.0000	0.0000
Area 2	Mokpo	0.0091	0.0056	0.4434	0.0963	0.0000	0.0000	0.0000
	Wando	0.0001	0.0000	0.1399	0.0349	0.3971	0.5163	0.7525
	Yeosu	0.9851	0.9868	0.2696	0.7985	0.0981	0.4837	0.2475
	Jeju·Seogwipo	0.0057	0.0076	0.1471	0.0703	0.5048	0.0000	0.0000
Area 3	Tongyeong·Masan	0.0113	0.3366	0.1050	0.1140	0.6074	0.2419	0.0004
	Busan	0.0560	0.0143	0.5153	0.2142	0.0460	0.5965	0.6131
	Ulsan	0.9210	0.6377	0.2573	0.6392	0.0534	0.1616	0.0365
	Pohang	0.0049	0.0015	0.0814	0.0254	0.2806	0.0000	0.0520
	Donghae·Sokcho	0.0068	0.0099	0.0410	0.0072	0.0126	0.0000	0.2980

정규화 결과는 권역내 지역의 항목별 점수치를 의미하고, 이 점수치를 보면 지역이 특정 항목에 대한 해당 권역내에서 차지하는 비중을 대략적으로 알 수 있다.

Collection

4.3.2 항목별 가중치

4.2.2에서 제시된 바와 같이 2개 요소와 7개 항목으로 계층구조를 구축하고, 계층분석과정 기법을 이용하여 7개 위해도 항목의 가중치를 도출하였다. 설문은 해양오염방제 분야에 전문성을 지닌 정부, 공기업, 연구기관, 민간방제업에 종사하는 전문가 17명을 대상으로 조사를 실시하였다. 이 중 조사결과 일관성 지수를 충족하는 10명의 쌍대비교결과를 바탕으로 하위수준에서부터 단계별로 가중치를 구한 후 이를 곱하여 최종 가중치를 도출한다. 쌍대비교결과의 종합을 위해 오차가 적은 기하평균을 이용하여 설문의 각 질문에 대한 결과를 도출한다. 도출된 최종 가중치는 Table 4.13과 같다.

Table 4.13 Final weight for each item

Upper evaluation standard	Lower evaluation standard	Weight
Accident probability (0.682)	Oil transport(0.449)	0.31
	Oil storage facility(0.17)	0.12
	Vessel entry&departure(0.235)	0.16
	Oil spill accident(0.146)	0.10
Post accident sensitivity (0.318)	Sea farming(0.577)	0.18
	Environmental management sea(0.229)	0.07
	Beach users(0.195)	0.06

도출된 가중치는 사고개연성 요소의 항목인 기름물동량(0.31)이 가장 높게 나타났고, 양식장(0.18), 선박입출항(0.16), 기름저장시설(0.12), 과거 해양오염사고(0.10), 환경관리해역(0.07), 위락시설(0.06) 순으로 가중치가 도출되었다.

도출된 가중치를 분석해보면 현행 기름회수능력 설정에 이용된 3개 항목, 즉, 기름물동량, 선박입출항, 과거 해양오염사고의 가중치 합은 0.57로

Collection

나타나 현행 기준의 중요성을 다시 확인할 수 있었다. 또한, 현행 기준에는 포함되어 있지 않은 사후민감도 항목의 가중치 합은 0.31로 나타나 환경적인 부분의 중요성도 강조되고 있는 것으로 나타났다. 특히, 사후민감도 요소의 양식장 항목은 최종 가중치가 0.18로, 7개 위해도 항목 중 기름물동량 다음으로 높은 가중치를 나타내고 있는데, 이는 경제적인 부분의 중요성을 반영하는 결과로 볼 수 있다.

4.3.3 HBD Model에 의한 지역별 배치량

HBD Model 설계를 위해 지역별 위해도를 산출하는데, 이는 지역별로 7개 위해도 항목에 대한 통계분석 및 정규화 결과와 계층분석과정 기법을 이용하여 도출한 항목별 가중치를 종합한 단일값을 지역별 권역내 최종 위해도로 결정한다. 세부적으로 살펴보면, 권역내 지역별로 7개 항목에 대하여 산정한 위해도 점수치가 있고, 여기에 7개 항목의 가중치를 각각 곱하여 얻은 값들을 합하여 얻은 값을 해당 지역의 권역내 최종 위해도로 결정한다.

제1권역의 각 지역을 대상으로 위에 언급한 방법으로 산정한 최종 위해도는 Table 4.14와 같다. 각 항목에 대한 지역별 정규화를 실시한 값의 합이 ‘1’이고 계층분석과정 기법에 의한 가중치도 합이 ‘1’이므로 권역내 지역들의 최종 위해도 값의 합은 ‘1’이 된다.

중심지역인 대산·태안·평택 지역이 가장 높은 위해도를 나타내고 있는데 이는 기름물동량, 기름저장시설, 선박입출항, 과거 해양오염사고, 양식어업 및 위락시설분포 등의 항목에서 권역내에서 높은 비중을 차지하기 때문인 것으로 판단된다. 군산 지역의 경우 대부분 항목에서 낮은 비중을 차지하고 있고, 양식어업, 환경관리해역 및 위락시설 항목은 ‘0’으로 처리되어 결과적으로 위해도는 낮게 설정되었다.

Collection

Table 4.14 Final degree of hazard in Area 1

Region	Item(Weight)	Oil transport (0.31)	Oil storage (0.12)	Vessel ent&dep (0.16)	Oil spill accident (0.10)	Sea farming (0.18)	E.M. sea (0.07)	Beach users (0.06)	Final degree of hazard
Area 1	Incheon	0.2809	0.3240	0.4673	0.0317	0.2004	1.0000	0.1951	0.32
	Daesan·Taean ·Pyeongtaek	0.6946	0.6288	0.4264	0.9645	0.7996	0.0000	0.8049	0.65
	Gunsan	0.0245	0.0472	0.1063	0.0038	0.0000	0.0000	0.0000	0.03
Sum		1	1	1	1	1	1	1	1

제2권역의 각 지역을 대상으로 위에 언급한 방법으로 산정한 최종 위해도는 Table 4.15와 같다. 각 항목에 대한 지역별 정규화를 실시한 값의 합이 '1'이고 계층분석과정 기법에 의한 가중치도 합이 '1'이므로 권역내 지역들의 최종 위해도 값의 합은 '1'이 된다.

중심지역인 여수 지역이 가장 높은 위해도를 나타내고 있는데 이는 기름물동량, 기름저장시설, 과거 해양오염사고 등의 항목에서 권역내에서 높은 비중을 차지하기 때문인 것으로 판단된다. 권역내 기타지역의 경우 비슷한 정도의 위해도를 나타내고 있는데, 지역에 따라 항목별로 다른 분포를 보이고 있다.

Table 4.15 Final degree of hazard in Area 2

Region	Item(Weight)	Oil transport (0.31)	Oil storage (0.12)	Vessel ent&dep (0.16)	Oil spill accident (0.10)	Sea farming (0.18)	E.M. sea (0.07)	Beach users (0.06)	Final degree of hazard
Area 2	Mokpo	0.0091	0.0056	0.4434	0.0963	0.0000	0.0000	0.0000	0.08
	Wando	0.0001	0.0000	0.1399	0.0349	0.3971	0.5163	0.7525	0.18
	Yeosu	0.9851	0.9868	0.2696	0.7985	0.0981	0.4837	0.2475	0.61
	Jeju·Seogwipo	0.0057	0.0076	0.1471	0.0703	0.5048	0.0000	0.0000	0.13
Sum		1	1	1	1	1	1	1	1

Collection

제3권역의 각 지역을 대상으로 위에 언급한 방법으로 산정한 최종 위해도는 Table 4.16과 같다. 각 항목에 대한 지역별 정규화를 실시한 결과의 합이 '1'이고 계층분석과정 기법에 의한 가중치도 합이 '1'이므로 권역내 지역들의 최종 위해도 값의 합은 '1'이 된다.

중심지역인 울산 지역이 가장 높은 위해도를 나타내고 있는데 이는 기름 물동량, 기름저장시설, 과거 해양오염사고 등의 항목에서 권역내에서 높은 비중을 차지하기 때문인 것으로 판단된다. 권역내 기타지역 중 통영·마산 지역은 기름저장시설과 양식어업 항목의 비중이 높고, 부산의 경우 선박입출항, 환경관리해역, 위락시설의 비중이 높아 비교적 높은 정도의 위해도를 나타내고 있다. 포항과 동해·속초 지역은 권역내에서 전체적으로 낮은 비중을 나타내고 있다.

Table 4.16 Final degree of hazard in Area 3

Region \ Item(Weight)		Oil transport (0.31)	Oil storage (0.12)	Vessel ent&dep (0.16)	Oil spill accident (0.10)	Sea farming (0.18)	E.M. sea (0.07)	Beach users (0.06)	Final degree of hazard
Area 3	Tongyeong·Masan	0.0113	0.3366	0.1050	0.1140	0.6074	0.2419	0.0004	0.20
	Busan	0.0560	0.0143	0.5153	0.2142	0.0460	0.5965	0.6131	0.21
	Ulsan	0.9210	0.6377	0.2573	0.6392	0.0534	0.1616	0.0365	0.49
	Pohang	0.0049	0.0015	0.0814	0.0254	0.2806	0.0000	0.0520	0.07
	Donghae·Sokcho	0.0068	0.0099	0.0410	0.0072	0.0126	0.0000	0.2980	0.03
Sum		1	1	1	1	1	1	1	1

도출된 권역별 위해도를 정리하면 Table 4.17과 같다. 각 권역에 배치되어야 하는 해상방제장비 배치량은 7,500㎘이므로 도출된 권역내 지역별 위해도에 따라 7,500㎘를 분산·배치한다. 지역별 위해도는 권역내에서 차지하는 위해정도를 나타내며 권역내의 합은 '1'이므로, 각 지역의 위해도에

Collection

7,500을 곱한 값이 권역내 지역별 해상방제장비 배치량이 된다. 도출된 결과와 현행 기준에 따른 비교도 함께 표시하였다.

Table 4.17 Final degree of hazard and oil recovery capacity

Region		Final weight (①)	Oil recovery capacity (①x7,500)	Current standard	Difference
Area 1	Incheon	0.32	2,400	2,833	(-)433
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0.65	4,875	3,400	1,475
	Gunsan	0.03	225	1,267	(-)1,042
	Sum	1	7,500	7,500	0
Area 2	Mokpo	0.08	600	2833	(-)2,233
	Wando	0.18	1,350	200	1,150
	Yeosu	0.61	4,575	4,200	375
	Jeju·Seogwipo	0.13	975	267	708
	Sum	1	7,500	7,500	0
Area 3	Tongyeong·Masan	0.20	1500	533	967
	Busan	0.21	1,575	3,333	(-)1,758
	Ulsan	0.49	3,675	3,200	475
	Pohang	0.07	525	267	258
	Donghae·Sokcho	0.03	225	167	58
	Sum	1	7,500	7,500	0

제1권역의 경우, 인천과 군산의 기름회수능력이 대산·태안·평택으로 이동하게 되어 권역의 중심지역에 해상방제장비 배치량이 집중되는 결과를 보여준다. 제2권역의 경우, 과도하게 설정된 목포의 해상방제장비 배치량이 권역의 기타지역인 완도와 제주·서귀포지역으로 분산되는 결과를 보여준다. 제3권역의 경우, 과도하게 설정된 부산의 해상방제장비 배치량이 통영·마산, 포항, 동해·속초지역 등으로 분산되는 결과를 보여준다.

Collection

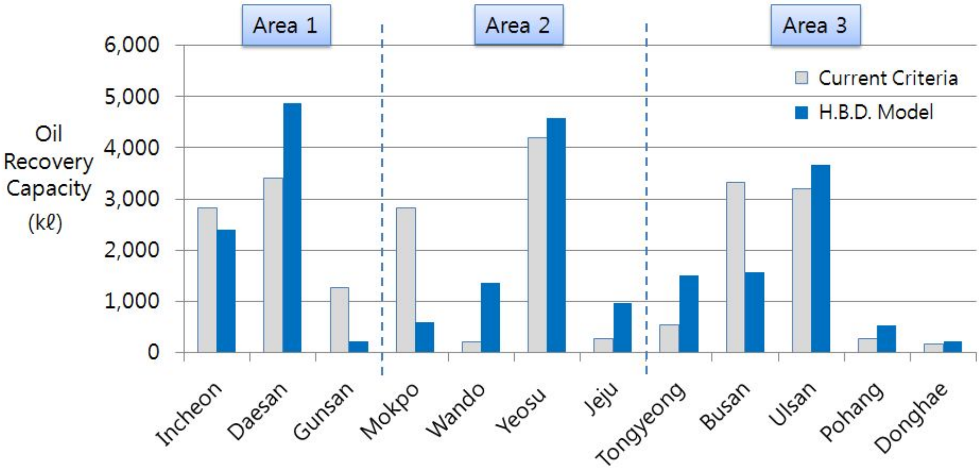

Fig. 4.5 Comparison of regional oil recovery capacity

이와같이 본 연구에서 설계한 HBD Model은 사고 개연성과 사후 민감도의 7개 해양환경위해도 항목 모두를 반영한 결과로, 현행 기준에 따른 지역별 기름회수능력과는 다소 차이를 보이고 있다.

Collection

제5장 HBD Model 적용 및 평가

Collection

5.1 HBD Model 적용 및 평가 방법

5.1.1 평가대상지역

해양오염방제 명령체계 및 조직과 관련하여 선진국에서는 국가대응체계에 단계별 대응(Tiered Response) 개념을 도입하여 적용하고 있다. IMO에서는 기름유출사고의 사전계획단계와 현장대응에서 오염사고 위치 및 유출량 등을 고려하여 Fig. 5.1과 같은 단계별 대응방법을 제시하고 있다.

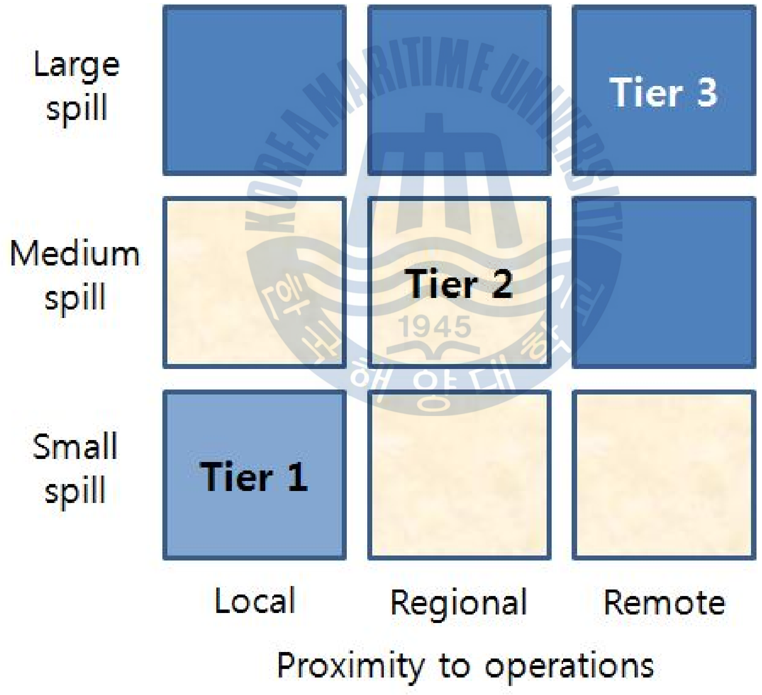

Fig. 5.1 The conventional definition of Tiered Preparedness and Response

제1단계(Tier 1)는 민간시설 또는 항만당국에서 처리할 수 있는 정도의 소량의 오염사고에 대한 대응이고, 제2단계(Tier 2)는 1개 이상의 민간시설

Collection

또는 항만당국의 장비와 인력을 동원해야 하는 오염사고에 대한 대응이며, 제3단계(Tier 3)는 전 국가적 방제자원, 경우에 따라서는 인근 국가를 포함하여 국제적 방제자원의 도움이 필요할 정도의 대규모 오염사고에 대한 대응을 의미한다. 우리나라는 지속성 기름의 유출사고의 경우 유출량 100㎘ 미만이면 소형오염사고, 100㎘ 이상 1,000㎘ 미만이면 중형오염사고, 1,000㎘ 이상이면 대형오염사고로 취급하고 있다. IMO는 위와 같이 단계별 대응구조를 기름유출량과 유출사고 발생장소를 고려하여 제시하고 있지만, 실제 대부분의 국가에서는 예상가능한 기름유출량을 기준으로 오염사고의 규모를 분류하여 이에 적합한 대응계획을 수립하고 있다(윤, 2013).

우리나라 현행 기름회수능력 설정기준에 따르면 각 권역내 기타지역의 기름회수능력 목표량은 해당 지역에서 발생 가능한 최대오염사고를 기준으로 설정되었으므로 각 지역은 최대오염사고에 대하여 자체적으로 대응가능한 것으로 볼 수 있다. 하지만 본 연구에서 제시한 HBD Model은 현행 기준에 환경적인 부분을 추가하여 설계하였으므로 권역내 각 지역간에 설정치의 변동이 생기는데, 특히 일부 기타지역의 해상방제장비의 확보 목표량이 지역 최대오염사고시 예상되는 최대유출량보다 적은 곳이 생기게 된다. 이러한 이유 때문에 권역내에서 해양오염사고로 기름유출량이 가장 많을 것으로 예상되는 지역(권역 중심지역) 뿐만 아니라 예상 최대오염사고 이외의 지역인 권역내 기타지역을 대상으로 하는 지역 최대오염사고 대비 방제자원 동원 시뮬레이션이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 Table 4.17을 참조하여 기타지역 중 HBD Model에 따른 배치량이 현행기준 대비 감소한 지역을 평가대상지역으로 선정한다. 그리고 IMO에서 제시하고 있는 단계별 대응구조와 우리나라 현행 기름회수능력 설정기준을 고려하여 예상 최대오염사고 발생지역을 평가대상지역

Collection

으로 선정하여 HBD Model을 평가한다. 또한, 사례연구로서 2007년에 발생한 Hebei Spirit호 오염사고 당시의 해상방제장비 배치현황과 HBD Model을 기준으로 방제장비 동원의 비교를 위해 태안을 평가대상지역으로 시뮬레이션을 실시하여 HBD Model을 평가한다.

5.1.2 평가방법

해상방제장비 배치모델의 평가는 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 통하여 실시한다. 동원 시뮬레이션은 유회수기, 오일펜스, 임시저장용기를 대상으로 실시하고, 유회수기와 임시저장용기는 함께 동원하는 것으로 한다. 따라서 유회수기의 배치량 설정 검증은 결과적으로 임시저장용기의 검증과 동일한 것으로 볼 수 있으므로 임시저장용기의 검증은 생략한다. 오일펜스는 유출사고 후 시간의 경과와 함께 확산·이동됨으로 인해 점차 유막의 포집이 어려워지므로 유출 초기에 전량 포집할 수 있도록 해당 권역내에 최대오염사고에 대비한 소요량을 배치하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이에 따라 오일펜스는 사고 규모에 관계없이 다른 권역으로부터 동원할 필요가 없으므로 본 논문에서는 이에 대한 적용 및 평가는 생략한다.

최대오염사고를 가정한 해상방제장비 동원 시뮬레이션은 2단계로 나누어 실시하는데, 1단계는 권역내 기타지역에서의 지역 최대오염사고가 발생한다고 가정하여 3일간 권역내의 해상방제장비를 동원하여 방제작업을 할 수 있는 양을 누적 계산하는 것이고, 2단계는 각 권역에서 발생 가능한 최대오염사고가 발생한다고 가정하여 3일간 전국의 해상방제장비를 동원하여 방제작업을 할 수 있는 양을 누적 계산하는 것이다.

1단계 동원 시뮬레이션인 권역내 기타지역에서의 지역 최대오염사고 대응

Collection

시뮬레이션은 해당 지역의 예상 최대오염사고시 지역 자체적으로 지역 최대오염사고에 대응할 수 없으므로 유출되는 기름유출량 대응을 위해 권역내에 배치된 해상방제장비를 3일동안 동원하여 회수가능한 기름의 용량을 산정하는 시뮬레이션이다. HBD Model에 따라 배치된 권역내 지역별 해상방제장비를 동원하여 현행 기준 지역별 예상 최대유출량의 해상회수 목표량을 회수할 수 있는지를 확인하여 HBD Model의 유효성을 평가한다. 권역내 기타지역 중 HBD Model에 따른 배치량이 현행기준 배치량보다 적고 해양오염사고가 빈번히 발생할 것으로 예상되는 지역인 제1권역의 인천지역, 제2권역의 목포지역, 제3권역의 부산지역을 대상으로 한다.

2단계 동원 시뮬레이션인 각 권역에서 발생 가능한 최대오염사고 대응 시뮬레이션은 현행 방제장비 배치기준 설정시 이용한 45,000kℓ가 유출된 것으로 가정하고, 이의 ⅓인 15,000kℓ를 해상에서 회수하기 위해 사고지역(권역 중심지역)의 해상방제장비와 전국의 해상방제장비를 동원하여 3일 동안 회수가능한 기름의 용량을 산정하는 시뮬레이션이다. HBD Model에 따른 시뮬레이션 결과가 해상방제목표량을 충족시키는지를 확인하고, 현행기준에 따른 결과와 직접 비교하여 HBD Model의 유효성을 평가한다.

Table 5.1 Overview of simulation(Step 1 & 2)

Area	Step of Simulation	Region	Spill Quantity(kℓ)
Area 1	1	Incheon	8,500
	2	Daesan·Taean·Pyeongtaek	45,000
Area 2	1	Mokpo	8,500
	2	Yeosu	45,000
Area 3	1	Busan	10,000
	2	Ulsan	45,000

Collection

최대오염사고를 가정한 해상방제장비 동원 시뮬레이션에 추가하여 우리나라 최대 해양오염사고인 Hebei Spirit호 오염사고 사례를 통해 HBD Model을 평가하였다. Hebei Spirit호 오염사고 사례를 통한 평가는 2007년 Hebei Spirit호 오염사고 당시 해상방제장비 배치현황과 HBD Model의 배치량을 기준으로 Hebei Spirit호 오염사고 대응을 가정하여 3일간 방제작업을 할 수 있는 양을 직접 비교하는 것이다. Hebei Spirit호 오염사고시 배출된 기름의 양을 시뮬레이션 유출량으로 가정하여 2007년 당시 전국의 해상방제장비 배치현황에 대비한 HBD Model 배치의 효율성을 알아보기 위한 시뮬레이션이다.

해상방제장비 동원 시뮬레이션은 시간의 흐름에 따라 유출사고지역에 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수량의 누적량을 계산한다. 지역에서 동원되는 해상방제장비는 육로나 항공을 이용하지 않고 해상으로만 이동하는 것으로 가정하고, 해상방제장비는 동시에 수송되며, 해상방제장비 동원에 필요한 선박(부대장비의 동원에 필요한 비방제선 포함)의 속력은 10knot로 가정한다. 사고지역에서의 사고지점은 따로 지정하지 않고 지역 관할수역에서 발생한 것으로 가정하여 해상방제장비 동원에 따른 지역내에서의 시간차이는 두지 않으며, 해상방제장비 동원에 필요한 지역간 거리는 국립해양조사원에서 발행한 해상거리표에 따른다. 해상·기상상태는 기름회수작업에 양호한 상태로 가정한다.

사고현장에서의 방제작업은 주간시간(0800~1800)에만 실시하는 것을 원칙으로 하고, 사고장소에 동원된 각 지역별 회수장비의 작업시간은 사고지역의 장비를 동원하여 작업 개시하는 시각을 작업개시점, 실제 작업시간이 24시간이 되는 시각을 종료시점으로 한다. 반면, 사고지역 이외의 지역에서 동원된 장비는 사고현장에 도착한 시점부터 작업을 시작하여 종료시점

Collection

까지 작업하는 것으로 한다. 이때 도착시각이 주간시간 내에 도착하면 그 시각을 작업개시시점, 야간에 도착하면 익일 주간시간 시작시각(오전 8시)을 작업개시시점으로 한다.

그리고 지역별 방제장비에 의해 작업시간동안 회수된 기름총량 계산은 사고지역의 경우 그 지역의 기름회수능력을 3일동안 회수한 양으로 간주한다. 반면, 기타 지역의 경우 지역배치량에 각 지역에서 출발하여 사고지역까지 가는데 걸리는 시간을 감안한 실제작업시간과 24시간(3일 작업시간)의 비율을 곱하여 산정한다.

각 지역에서 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량 계산은 먼저, 산정된 지역별 동원량을 사고지역에서의 실제작업시간으로 나누어 시간당 기름회수량을 계산하고, 도착 후 매 시간마다 시간당 작업량만큼 회수하는 것으로 가정한다. 이러한 방식으로 각 지역별로 동원되는 해상방제장비에 의한 기름회수량을 누적·합산하여 최종적인 해상방제장비의 동원에 따른 해상 기름회수량을 산정한다.

- 해상·기상상태 : 양호
- 이동시 방제선 속력 : 10knot
- 작업시간 : 방제요원의 피로도를 감안하여 1일 주간시간(0800~1800) 동안 8시간만 작업하는 것을 원칙으로 함. 사고지역 이외의 지역에서 동원된 장비는 사고지점 도착즉시 작업을 개시하고, 야간에 도착할 경우, 익일 오전 8시부터 작업 개시하는 것으로 함
- 지역별 유회수장비에 의한 회수량(kℓ) :

$$\text{지역기름회수능력} \times \frac{(\text{3일간실제작업시간})}{24}$$

Collection

5.2 HBD Model 평가

5.2.1 권역내 기타지역에서 발생한 최대오염사고 대응 시뮬레이션

1단계 최대오염사고 시뮬레이션은 권역내 기타지역 중 HBD Model에 따른 배치량이 현행기준 대비 감소한 지역에서 유출사고가 발생한 것으로 가정하고, 현행 기준에 따른 지역별 최대유출량이 해상에서 유출된 것으로 설정하여 이 중 ⅓을 해상에서 회수하기 위해 권역내에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 대응하는 시뮬레이션을 실시한다. 권역내 기타지역 중 제1권역은 인천지역, 제2권역은 제주·서귀포, 목포지역, 제3권역은 부산지역을 대상으로 한다. 제2권역의 제주·서귀포지역은 지역에 설정된 해상방제장비 배치량이 현행기준 지역의 최대오염사고 유출량보다 많으므로 제주·서귀포지역의 동원 시뮬레이션은 생략한다.

1단계 시뮬레이션은 HBD Model에 따라 배치된 해상방제장비의 동원에 의한 해상 기름회수량이 현행기준 최대유출량에 따른 해상회수 목표량을 회수할 수 있는지를 알아보기 위한 것으로, 각 지역별 해상방제장비 동원을 위한 준비시간과 기타 다른 변수들은 지역별로 차이없이 동일한 것으로 간주하였다.

(1) 제1권역 해상방제장비 동원 시뮬레이션

아래 Table 5.2는 해상거리표에 따라 제1권역 내 지역간의 거리(해리)를 나타낸 표이다. 제1권역에서는 인천지역에서 최대유출사고를 가정하여 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 실시한다.

Collection

Table 5.2 Distance table between regions in Area 1

Area 1	Incheon (n.mile)	Daesan·Taean·Pyeongtaek (n.mile)	Gunsan (n.mile)
Incheon	0	38	122
Daesan·Taean·Pyeongtaek	38	0	96
Gunsan	122	96	0

아래 Table 5.3은 인천지역에서 최대오염사고(8,500kℓ) 가정시 제1권역 각 지역에서 동원가능한 해상방제장비에 의한 기름회수능력 총량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 권역내 사고 가정 지역인 인천의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력에 해당하는 양의 기름을 3일간 모두 회수할 수 있고, 대산·태안·평택과 군산의 해상방제장비는 인천과의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

Table 5.3 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Incheon region(Area 1)

Region		**Distance from Incheon(n.mile)**	**Oil Recovery Capacity(kℓ)**	**Actual Recovery Amount(kℓ)**
Area 1	Incheon	0	2,400	2,400
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	38	4,875	4,469
	Gunsan	122	225	187

Collection

인천과 권역내 지역간의 거리를 기준으로 지역별로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.4와 같다. 제1권역내에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 7,056kℓ로 목표량(2,833kℓ)을 충족시키는 것으로 나타났다.

Table 5.4 Accumulated actual oil recovery amount in Incheon region(Area 1)

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)
Incheon	1st day	1	100
		2	200
		3	300
		4	1,006
		5	1,319
		6	1,631
		7	1,944
		8	2,256
	2nd day	1	2,569
		2	2,881
		3	3,194
		4	3,506
		5	3,819
		6	4,131
		7	4,444
		8	4,756
	3rd day	1	5,069
		2	5,381
		3	5,694
		4	6,006
		5	6,319
		6	6,631
		7	6,844
		8	7,056

Collection

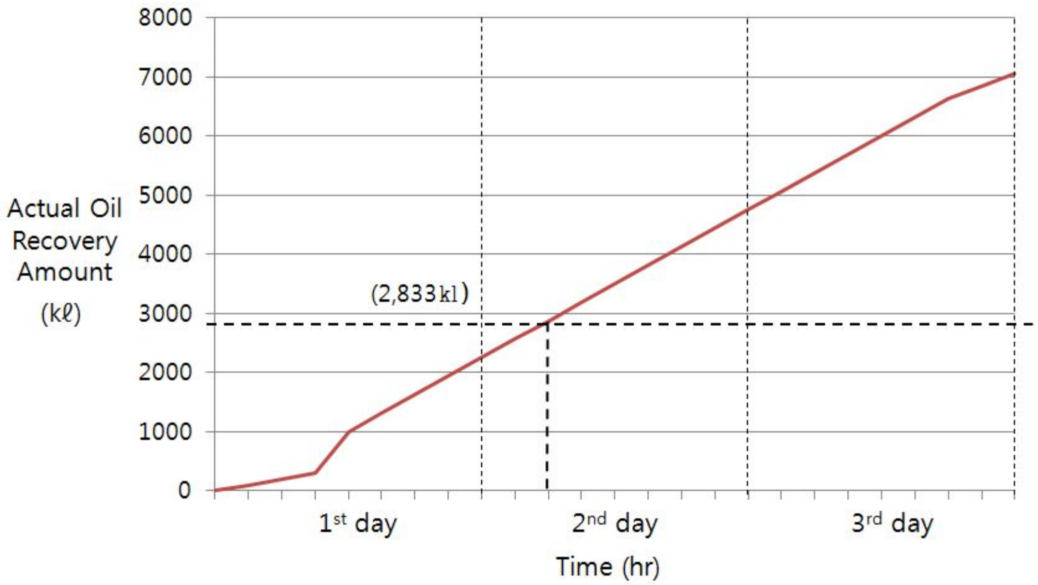

Fig. 5.2 Accumulated actual oil recovery amount in Incheon region(Area 1)

(2) 제2권역 해상방제장비 동원 시뮬레이션

아래 Table 5.5는 해상거리표에 따라 제2권역 내 지역간의 거리를 나타낸 표이다. 제2권역은 권역내 기타지역 중 현행 기준 대비 배치량이 감소한 목포지역에 최대오염사고를 가정하여 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 실시한다.

Table 5.5 Distance table between regions in Area 2

Yeosu area	Mokpo (n.mile)	Wando (n.mile)	Yeosu (n.mile)	Jeju·Seogwipo (n.mile)
Mokpo	0	83	151	125
Wando	83	0	79	110
Yeosu	151	79	0	122
Jeju·Seogwipo	125	110	122	0

dCollection

아래 Table 5.6은 목포지역에서 최대오염사고(8,500kℓ)시 제2권역 각 지역에서 동원가능한 해상방제장비에 의한 기름회수능력 총량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 권역내 사고 가정 지역인 목포의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력 총량에 해당하는 기름을 3일 동안 회수할 수 있고, 완도, 여수, 제주·서귀포의 해상방제장비는 목포와의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

Table 5.6 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Yeosu region(Area 2)

Region		Distance from Yeosu(n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)	Actual Recovery Amount(kℓ)
Area 2	Mokpo	0	600	600
	Wando	83	1,350	1,125
	Yeosu	151	4,575	3,813
	Jeju·Seogwipo	125	975	812

목포와 권역내 지역간의 거리를 기준으로 지역별로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.7과 같다. 제2권역내에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 6,350kℓ로, 목포지역의 최대오염사고시 해상회수목표량(2,833kℓ)을 충족시키는 것으로 나타났다.

Collection

Table 5.7 Accumulated actual oil recovery amount in Mokpo region(Area 2)

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)
Mokpo	1st day	1	25
		2	50
		3	75
		4	150
		5	463
		6	775
		7	1,088
		8	1,400
	2nd day	1	1,713
		2	2,025
		3	2,338
		4	2,650
		5	2,963
		6	3,275
		7	3,588
		8	3,900
	3rd day	1	4,213
		2	4,525
		3	4,838
		4	5,150
		5	5,463
		6	5,775
		7	6,063
		8	6,350

Collection

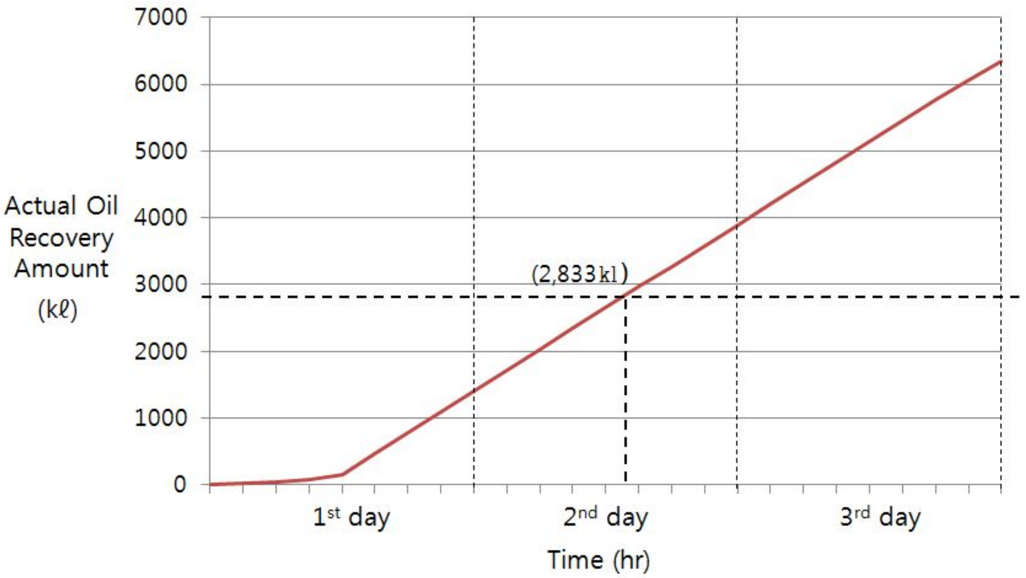

Fig. 5.3 Accumulated actual oil recovery amount in Mokpo region(Area 2)

(3) 제3권역 해상방제장비 동원 시뮬레이션

아래 Table 5.8은 해상거리표에 따라 제3권역 내 지역간의 거리를 나타낸 표이다. 제3권역은 권역내 기타지역 중 현행기준 대비 배치량이 감소한 부산지역에 최대오염사고를 가정하여 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 실시한다.

Table 5.8 Distance table between regions in Area 3

Ulsan area	Tongyeong·Masan(n.mile)	Busan (n.mile)	Ulsan (n.mile)	Pohang (n.mile)	Donghae·Sokcho(n.mile)
Tongyeong·Masan	0	63	92	142	264
Busan	63	0	37	89	220
Ulsan	92	37	0	56	191
Pohang	142	89	56	0	148
Donghae·Sokcho	264	220	191	148	0

Collection

Table 5.9는 부산지역에서 최대오염사고시 울산권역 각 지역에서 동원가능한 해상방제장비에 의한 기름회수능력 총량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 권역내 부산지역에서의 사고를 가정하였으므로 부산의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력 총량에 해당하는 기름을 3일 동안 회수할 수 있고, 통영·마산, 울산, 포항, 동해·속초의 해상방제장비는 중심지역과의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

Table 5.9 Mobilization of marine oil spill equipments for oil spill accident in Busan region(Area 3)

Region		Distance from Ulsan(n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)	Actual Recovery Amount(kℓ)
Area 3	Tongyeong·Masan	63	1,500	1,250
	Busan	0	1,575	1,575
	Ulsan	37	3,675	3,369
	Pohang	89	525	438
	Donghae·Sokcho	220	225	187

부산과 권역내 지역간의 거리를 기준으로 지역별로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.10과 같다. 제3권역내에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 6,819kℓ로 부산지역 최대오염사고시 해상회수목표량(3,333kℓ)을 충족시키는 것으로 나타났다.

Collection

Table 5.10 Accumulated actual oil recovery amount in Busan region(Area 3)

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)
Busan	1st day	1	66
		2	131
		3	197
		4	700
		5	1,003
		6	1,306
		7	1,619
		8	1,931
	2nd day	1	2,244
		2	2,556
		3	2,869
		4	3,200
		5	3,513
		6	3,825
		7	4,138
		8	4,450
	3rd day	1	4,763
		2	5,075
		3	5,388
		4	5,700
		5	6,013
		6	6,325
		7	6,572
		8	6,819

Collection

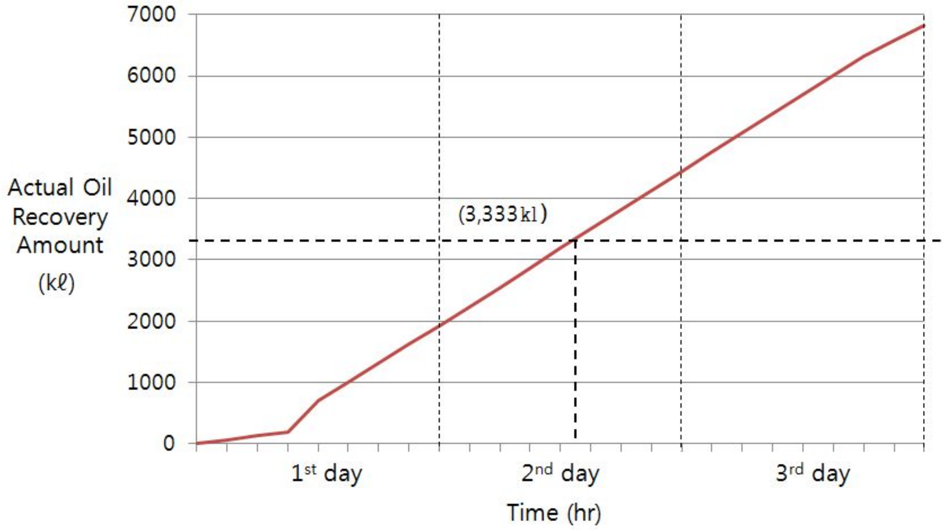

Fig. 5.4 Accumulated actual oil recovery amount in Busan region(Area 3)

(4) 시뮬레이션 결과 종합

시뮬레이션 결과를 종합한 결과는 Table 5.11과 같다. 권역내 기타지역 중 현행배치 기준 대비 해상방제자원 배치량이 적고 사고가 빈번히 발생할 것으로 예상되는 지역에 대하여 최대오염사고를 가정하여 권역내 해상방제자원 동원 시뮬레이션을 실시한 결과, 모든 지역에서 최대오염사고시의 해상방제 목표량을 충족시키는 것으로 확인되었다.

Table 5.11 Result of simulation of oil recovery capacity mobilization in area

Region	Planned Qty. of Oil Recovery on Water(kℓ)	Final Qty. of Oil Recovery(kℓ)
Incheon	2,833	7,056
Mokpo	2,833	6,350
Busan	3,333	6,819

Collection

5.2.2 권역내 중심지역에서 발생한 최대오염사고 대응 시뮬레이션

권역 중심지역에서 발생한 예상 최대오염사고는 현행기준에 따라 45,000 ㎘가 해상에서 유출된 것으로 설정하여 이 중 ⅓에 해당하는 15,000㎘를 해상에서 회수하기 위해 전국의 해상방제장비를 동원하여 대응하는 시뮬레이션을 실시한다.

2단계 시뮬레이션은 현행기준과 HBD Model에 따른 해상방제장비의 해상 기름회수량 비교를 위한 시뮬레이션으로 모든 조건은 동일한 것으로 가정하여 해상·기상상태와 같은 외부의 조건들은 이상적인 상태로 가정한다. 따라서 해상방제장비 동원을 위한 준비시간과 기타 다른 변수들은 동일한 것으로 간주하였다. 지역간 거리는 Table 5.12와 같다.

Table 5.12 Distance table between regions in Korea Coastal area

Region		Daesan (n.mile)	Yeosu (n.mile)	Ulsan (n.mile)
Area 1	Incheon	38	335	435
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0	277	362
	Gunsan	96	265	358
Area 2	Mokpo	163	151	257
	Wando	203	79	168
	Yeosu	277	0	126
	Jeju·Seogwipo	265	122	209
Area 3	Tongyeong·Masan	297	42	92
	Busan	334	96	37
	Ulsan	362	126	0
	Pohang	411	164	56
	Donghae·Sokcho	536	293	191

Collection

(1) 대산·태안·평택지역

Table 5.13은 대산지역에서 최대오염사고 발생시 전국 각 지역에서 동원 가능한 해상방제장비에 의한 해상 기름회수량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 현행기준과 HBD Model에 따라 각각 계산하였으며, 모든 조건은 동일하게 적용하였다. 대산지역에서의 사고를 가정하였으므로 대산의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력 총량에 해당하는 기름을 3일 동안 회수할 수 있고, 전국 각 지역의 해상방제장비는 대산과의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

Table 5.13 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Daesan region

Region		Distance from Daesan (n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)		Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model	Current Criteria	HBD Model
Area 1	Incheon	38	2,833	2,400	2,597	2,200
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0	3,400	4,875	3,400	4,875
	Gunsan	96	1,267	225	1,056	188
Area 2	Mokpo	163	2,833	600	2,361	500
	Wando	203	200	1,350	167	1,125
	Yeosu	277	4,200	4,575	2,450.0	2,669
	Jeju·Seogwipo	265	267	975	167	609
Area 3	Tongyeong·Masan	297	533	1,500	266	750
	Busan	334	3,333	1,575	1,666	788
	Ulsan	362	3,200	3,675	1,600	1,838
	Pohang	411	267	525	133	262
	Donghae·Sokcho	536	167	225	28	37

Collection

대산과 지역간의 거리를 기준으로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.14와 같다. 전국에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 현행 기준 15,891kℓ, HBD Model 기준 15,841kℓ로 HBD Model 기준 회수용량이 50kℓ 적은 것으로 나타났다. HBD Model 기준 회수용량이 15,000kℓ를 충족시키고 있으므로 HBD Model은 대산·태안·평택지역의 최대오염사고에 대하여 실행가능한 배치모델로 확인되었다.

Table 5.14 Accumulated actual oil recovery amount in Daesan·Taean·Pyeongtaek region

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model
Daesan·Taean·Pyeongtaek	1st day	1	142	203
		2	283	406
		3	425	609
		4	1,086	1,419
		5	1,517	1,756
		6	1,956	2,150
		7	2,394	2,544
		8	2,833	2,938
	2nd day	1	3,272	3,331
		2	3,711	3,725
		3	4,150	4,119
		4	4,980	5,072
		5	5,911	6,000
		6	6,842	6,928
		7	7,772	7,856
		8	8,703	8,784
	3rd day	1	9,633	9,713
		2	10,564	10,641
		3	11,494	11,569
		4	12,425	12,497
		5	13,362	13,434
		6	14,300	14,372
		7	15,096	15,106
		8	15,891	15,841

Collection

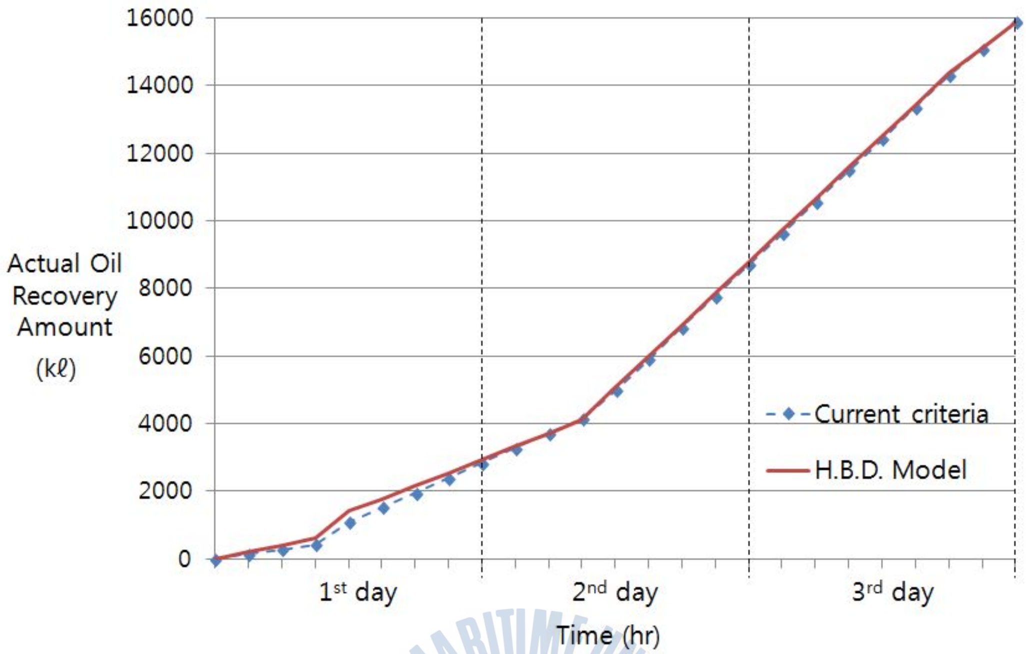

Fig. 5.5 Accumulated actual oil recovery amount in Daesan·Taean·Pyeongtaek region

(2) 여수지역

Table 5.15는 여수지역에서 최대오염사고 발생시 전국 각 지역에서 동원 가능한 해상방제장비에 의한 해상 기름회수량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 현행 배치기준과 HBD Model에 따라 각각 계산하였으며, 모든 조건은 동일하게 적용하였다. 여수지역에서의 사고를 가정하였으므로 여수의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력 총량에 해당하는 기름을 3일 동안 회수할 수 있고, 전국 각 지역의 해상방제장비는 여수와의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

Collection

Table 5.15 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Yeosu region

Region		Distance from Yeosu (n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)		Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model	Current Criteria	HBD Model
Area 1	Incheon	335	2,833	2,400	1,417	1,200
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	277	3,400	4,875	1,983	2,844
	Gunsan	265	1,267	225	792	141
Area 2	Mokpo	151	2,833	600	2,361	500
	Wando	79	200	1,350	167	1,125
	Yeosu	0	4,200	4,575	4,200	4,575
	Jeju·Seogwipo	122	267	975	222	812
Area 3	Tongyeong·Masan	42	533	1,500	466	1,313
	Busan	96	3,333	1,575	2,778	1,313
	Ulsan	126	3,200	3,675	2,667	3,062
	Pohang	164	267	525	222	437
	Donghae·Sokcho	293	167	225	83	112

여수와 지역간의 거리를 기준으로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.16과 같다. 전국에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 현행 기준 17,358kℓ, HBD Model 기준 17,434kℓ로 HBD Model에 따른 회수용량이 현행기준에 대비하여 76kℓ 많은 것으로 나타났다. 또한, HBD Model에 따른 회수용량은 15,000kℓ를 충족시키고 있으므로 HBD Model은 여수지역의 최대오염사고에 대하여 실행 가능한 배치모델로 확인되었다.

Collection

Table 5.16 Accumulated actual oil recovery amount in Yeosu region

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model
Yeosu	1st day	1	175	191
		2	350	381
		3	525	572
		4	1,072	1,206
		5	1,690	1,822
		6	2,308	2,438
		7	2,926	3,053
		8	3,544	3,669
	2nd day	1	4,162	4,284
		2	4,780	4,900
		3	5,399	5,516
		4	6,458	6,566
		5	7,396	7,503
		6	8,333	8,441
		7	9,271	9,378
		8	10,208	10,316
	3rd day	1	11,146	11,253
		2	12,083	12,191
		3	13,021	13,128
		4	13,958	14,066
		5	14,896	15,003
		6	15,833	15,941
		7	16,596	16,688
		8	17,358	17,434

Collection

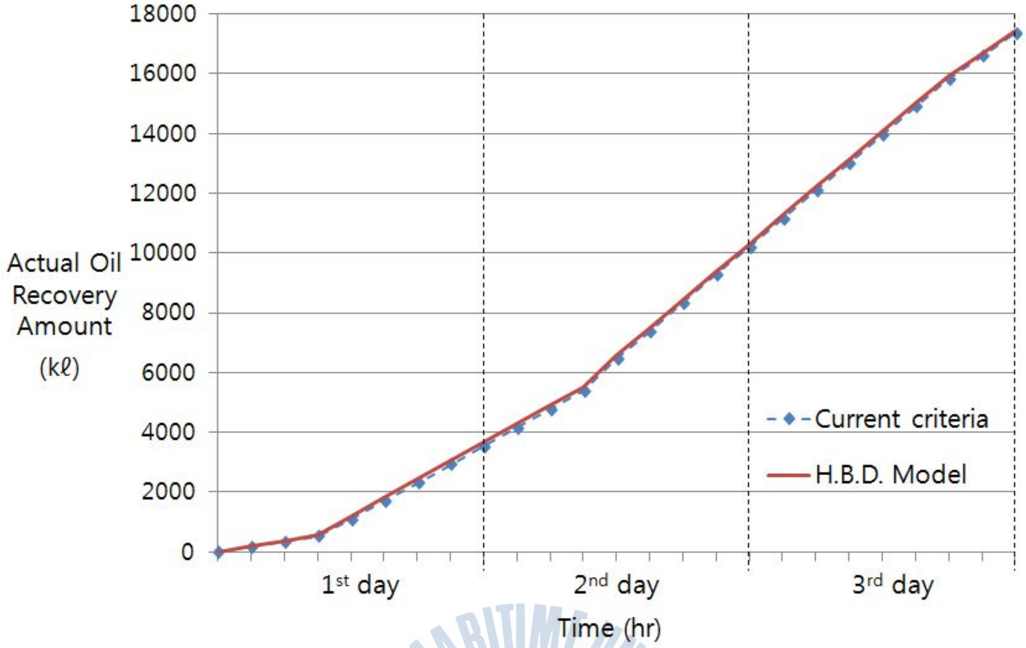

Fig. 5.6 Accumulated actual oil recovery amount in Yeosu region

(3) 울산지역

Table 5.17은 울산지역에서 최대오염사고 발생시 전국 각 지역에서 동원 가능한 해상방제장비에 의한 해상 기름회수량을 위에 제시한 식에 따라 계산한 표이다. 현행 배치기준과 HBD Model에 따라 각각 계산하였으며, 모든 조건은 동일하게 적용하였다. 울산지역에서의 사고를 가정하였으므로 울산의 해상방제장비는 설정된 기름회수능력 총량에 해당하는 기름을 3일 동안 회수할 수 있고, 전국 각 지역의 해상방제장비는 울산과의 거리에 따라 동원되는 시간을 감안하여 사고지역에 도착 후 회수작업에 투입되는 것으로 간주하여 동원량을 산정하였다.

dCollection

Table 5.17 Mobilization of marine oil spill equipments for max. oil spill accident in Ulsan region

Region		Distance from Ulsan(n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)		Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model	Current Criteria	HBD Model
Area 1	Incheon	435	2,833	2,400	1,417	1,200
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	362	3,400	4,875	1,700	2,438
	Gunsan	358	1,267	225	633	112
Area 2	Mokpo	257	2,833	600	1,889	400
	Wando	168	200	1,350	167	1,125
	Yeosu	126	4,200	4,575	3,500	3,813
	Jeju·Seogwipo	209	267	975	222	813
Area 3	Tongyeong·Masan	92	533	1,500	444	1,250
	Busan	37	3,333	1,575	3,055	1,444
	Ulsan	0	3,200	3,675	3,200	3,675
	Pohang	56	267	525	223	437
	Donghae·Sokcho	191	167	225	139	187

울산과 지역간의 거리를 기준으로 동원되는 해상방제장비의 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.18과 같다. 전국에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일간 회수가능한 기름의 양은 현행 기준 16,589kℓ, HBD Model 기준 16,894kℓ로 HBD Model에 따른 회수용량이 현행기준에 대비하여 305kℓ 많은 것으로 나타났다. 또한, HBD Model에 따른 회수용량은 15,000kℓ를 충족시키고 있으므로 HBD Model은 울산지역의 최대오염사고에 대하여 실행가능한 배치모델로 확인되었다.

Collection

Table 5.18 Accumulated actual oil recovery amount in Ulsan region

Region	Working Hour (hour)		Accumulated Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Current Criteria	HBD Model
Ulsan	1st day	1	133	153
		2	267	306
		3	400	459
		4	1,078	1,050
		5	1,574	1,609
		6	2,081	2,209
		7	2,588	2,809
		8	3,094	3,409
	2nd day	1	3,601	4,009
		2	4,108	4,609
		3	4,733	5,234
		4	5,606	5,950
		5	6,543	6,888
		6	7,481	7,825
		7	8,418	8,763
		8	9,356	9,700
	3rd day	1	10,293	10,638
		2	11,231	11,575
		3	12,168	12,513
		4	13,106	13,450
		5	14,043	14,388
		6	14,981	15,325
		7	15,785	16,109
		8	16,589	16,894

Collection

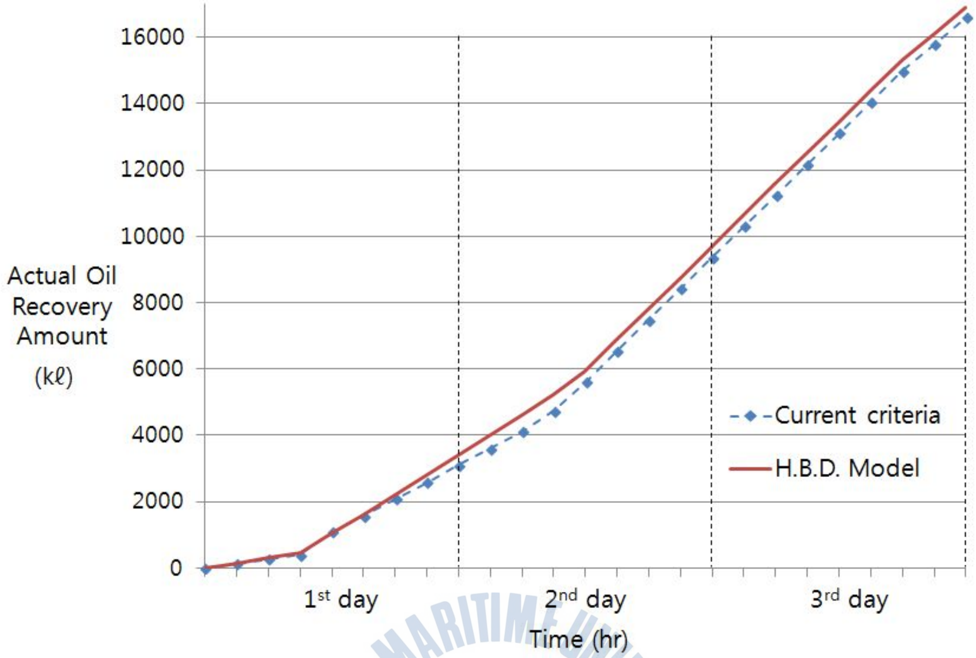

Fig. 5.7 Accumulated actual oil recovery amount in Ulsan region

(4) 시뮬레이션 결과 종합

권역내 중심지역에서 예상 최대기름유출사고의 발생을 가정한 해상방제 장비 동원 시뮬레이션 종합 결과는 Table 5.19와 같다.

Table 5.19 Result of simulation of mobilization for max. oil spill

Region	Actual Recovery Amount(kℓ)								
	1st day			2nd day			3rd day		
	Current Criteria	HBD Model	Diff.	Current Criteria	HBD Model	Diff.	Current Criteria	HBD Model	Diff.
Daesan	2,833	2,938	105	8,703	8,874	171	15,891	15,841	(-)50
Yeosu	3,544	3,669	125	10,208	10,316	108	17,358	17,434	76
Ulsan	3,094	3,409	315	9,356	9,700	344	16,589	16,894	305

Collection

예상 최대유출사고를 가정한 시뮬레이션 결과, 3일 동안 회수가능한 기름의 양은 모든 권역이 15,000kℓ 이상을 확보하는 것으로 나타났다.

제1권역의 최대유출사고를 가정하는 경우 해상방제장비를 동원하여 3일 동안 회수가능한 기름의 양은 현행기준 15,891kℓ, HBD Model 기준 15,841kℓ로 계산되었고, HBD Model에 따르면 현행기준 대비 동일조건에서 50kℓ 부족한 것으로 나타났다. 하지만, HBD Model 기준 회수가능한 기름의 양은 최대유출사고시의 해상회수 목표량인 15,000kℓ는 충족시키는 것으로 나타났다

지리적으로 중간에 위치한 제2권역의 최대유출사고를 가정하는 경우 제1권역과 제3권역과의 거리가 가까워 해상방제장비를 동원하는 시간이 단축됨에 따라 해상방제장비를 동원하여 3일 동안 회수가능한 기름의 양은 현행 기준 17,358kℓ, HBD Model 기준 17,434kℓ로 계산되었고, HBD Model에 따르면 현행기준 대비 동일조건에서 76kℓ 많은 것으로 나타났다.

제3권역의 최대유출사고를 가정하는 경우 3일 동안 해상방제장비를 동원하여 회수가능한 기름의 양은 현행 기준 16,589kℓ, HBD Model 기준 16,894kℓ로 계산되었고, HBD Model에 따른 지역별 기름회수능력이 동일조건에서 최대유출사고 가정시 305kℓ 많은 것으로 나타났다.

현행 기준과 HBD Model을 기준으로 한 권역별 최대오염사고 대응 시뮬레이션 결과는 실질적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 두 기준이 최대오염사고에 대비한 권역별 해상방제장비의 기름회수능력 목표량을 7,500kℓ로 동일하게 설정한 것이 원인으로 판단된다. HBD Model 적용시 현행기준 대비 제1권역의 경우 50kℓ 부족, 제2권역의 경우 76kℓ 초과, 제3권역의 경우 305kℓ 초과로 나타났는데, 이 차이는 전체 동원량에 대비하여 본다면 미미한 것으로 볼 수 있고, 세 권역 모두 15,000kℓ를 충족시키

Collection

고 있으므로 현행 해상회수 목표량을 회수하는데는 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다.

대응 첫째 날의 결과를 보면, HBD Model 적용시 현행기준 대비 해상 기름회수량은 제1권역 105kℓ, 제2권역 125kℓ, 제3권역 315kℓ 초과로 나타났는데, 이는 기름유출사고 초동대응시 현행기준 대비 더 많은 양을 회수할 수 있다는 것을 의미한다. 유출된 기름은 시간이 흐름에 따라 풍화되어 성상이 변화되기 때문에 회수가 어려워지는 것을 감안하면, 대응 초기 현행기준 대비 더 많은 양의 기름을 회수할 수 있는 HBD Model이 초동대응에 더 효율적인 것으로 판단할 수 있다.

HBD Model은 현행 기준의 설정에 대비하여 부분적으로 초과 또는 부족하지만 현행 해상회수 목표량을 충족시키고 있고, 초동대응에 효율적이며, 추가적인 요소들을 감안하여 설계하였으므로 향후 해양오염사고를 대비하여 HBD Model을 적용한다면 방제효율 뿐만 아니라 환경피해의 최소화에도 도움이 될 것으로 예상된다.

Collection

5.2.3 Hebei Spirit호 오염사고 대응 시뮬레이션

Hebei Spirit호 오염사고는 2007년 태안에서 12,547㎘의 기름이 유출된 사고로, 우리나라에서 발생한 사고 중 최대 해양오염사고이다. 2007년 사고 당시 해상방제장비 배치현황과 HBD Model의 배치량을 기준으로 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 실시하여 비교해봄으로써 HBD Model의 유효성을 검증하였다.

Hebei Spirit호 오염사고의 실제 기름유출량을 시뮬레이션 유출량으로 가정하게 되면 12,547㎘의 기름이 유출되어 이의 ⅓인 4,183㎘가 해상에서 회수하는 목표량이 되고, 해상 기름회수 목표량만큼의 기름을 회수할 수 있는 해상방제장비를 동원하는 것으로 가정한다. 대산·태안·평택지역의 2007년 당시 배치량은 해상 기름회수 목표량보다 적은 양이 배치되어 있었던 반면, HBD Model 기준 배치량은 목표량보다 많은 양이 설정되어 있다. 따라서 2007년 배치현황 기준의 경우, 목표량 대비 부족분은 가까운 인천지역에서 동원하여 4,183㎘를 회수하는 것으로 가정하여 동원 시뮬레이션을 실시한다. HBD Model 기준의 경우, 목표량인 4,183㎘에 필요한 만큼의 해상방제방비를 동원하는 시뮬레이션을 실시한다.

본 시뮬레이션에서 모든 조건은 동일한 것으로 가정하고, 해상·기상상태와 같은 외부의 조건들은 이상적인 상태로 가정한다. 따라서 해상방제장비 동원을 위한 준비시간과 기타 다른 변수들은 동일한 것으로 간주하였다.

Table 5.20에 따르면 대산·태안·평택지역의 2007년 당시 실제 해상방제장비 배치에 따른 기름회수능력은 3,551㎘였고, HBD Model에 따른 해상방제장비의 기름회수능력 설정량은 4,875㎘이다. HBD Model을 따르는 경우 해상회수목표량인 4,183㎘를 지역 자체적으로 충족시킬 수 있으나 2007년 당시 실제 배치량으로는 632㎘만큼 부족한 것으로 나타난다.

Collection

Table 5.20 Comparison of Oil Recovery Capacity for stockpile in 2007 and HBD Model in Daesan·Taean·Pyeongtaek

Region		Oil Recovery Capacity(kℓ)	Target Amount(kℓ)	Difference (kℓ)
Daesan·Taean·Pyeongtaek	Stockpile('07)	3,551	4,183	(-)632
	HBD Model	4,875	4,183	692

Table 5.21은 2007년 당시 배치 현황에 따라 대산·태안·평택지역 자체적으로 대응할 때 목표량 대비 부족분인 632kℓ를 가까운 인천지역에서 동원하여 회수작업을 하는 경우와 HBD Model의 배치량에 따라 대산·태안·평택지역 자체적으로 대응하는 경우의 동원량을 나타낸 표이다. 최종 동원량은 두 경우 모두 해상회수 목표량인 4,183kℓ이다.

Table 5.21 Actual oil recovery amount for Hebei Spirit accident in Taean

Region		Distance from Taean (n.mile)	Oil Recovery Capacity(kℓ)		Actual Recovery Amount(kℓ)	
			Stockpile ('07)	HBD Model	Stockpile ('07)	HBD Model
Area 1	Incheon	38	2,916	2,400	632	0
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0	3,551	4,875	3,551	4,183
Sum					4,183	4,183

Table 5.21의 동원량을 기준으로 태안에 동원되는 해상방제장비의 작업시간별 해상 기름회수 누적량을 계산하면 Table 5.22와 같다.

Collection

Table 5.22 Accumulated actual oil recovery amount in Taean

Region	Time after removal start(hour)		Accumulated Oil Recovery Capacity(kℓ)	
			Stockpile('07)	HBD Model
Daesan·Taean·Pyeongtaek	1st day	1	148	174
		2	296	349
		3	444	523
		4	592	697
		5	771	871
		6	951	1,046
		7	1,131	1,220
		8	1,310	1,394
	2nd day	1	1,490	1,569
		2	1,669	1,743
		3	1,849	1,917
		4	2,028	2,092
		5	2,208	2,266
		6	2,387	2,440
		7	2,567	2,614
		8	2,747	2,789
	3rd day	1	2,926	2,963
		2	3,106	3,137
		3	3,285	3,312
		4	3,465	3,486
		5	3,644	3,660
		6	3,824	3,834
		7	4,003	4,009
		8	4,183	4,183

Collection

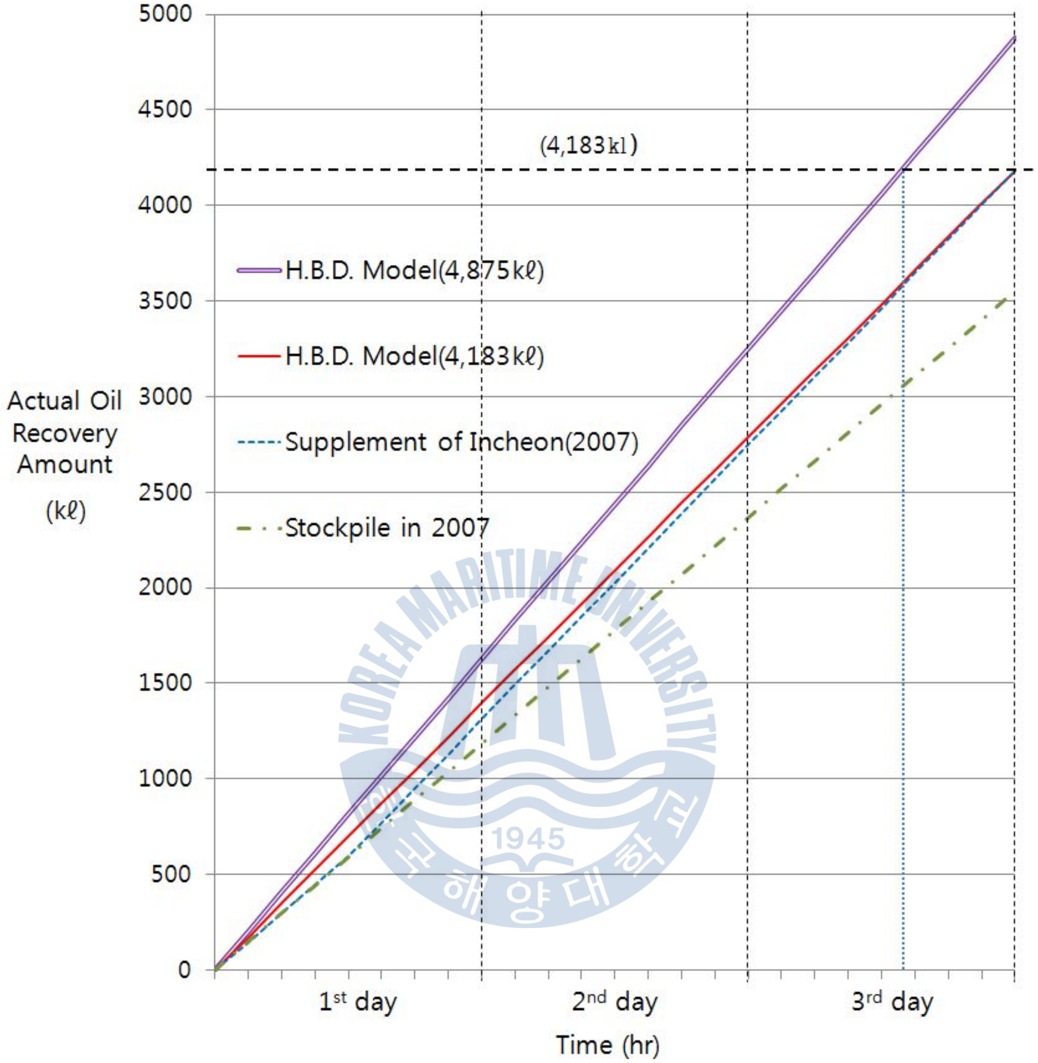

Fig. 5.8 Accumulated actual oil recovery amount in Taean

HBD Model에 따라 대산·태안·평택에 배치된 해상방제장비의 기름회수 용량 전량(4,875kℓ)을 동원하여 대응하는 경우, 해상회수 목표량(4,183kℓ)의 기름을 모두 회수하는데 소요되는 시간은 약 2일 5시간 정도인 것으로 나

dCollection

타난다(Fig. 5.8). 이는 지역 자체적으로 대응하더라도 약 3시간 이상의 시간적 이점이 있는 것으로 볼 수 있다.

해상회수 목표량(4,183㎘)의 기름을 회수하는데 필요한 해상방제장비를 동원하는 경우, 사고후 기름회수작업 초기에는 HBD Model 기준 기름회수량이 2007년 배치현황 기준 기름회수량보다 다소 많은 것으로 나타나지만, 작업 1일차 5시간째부터는 인천지역의 해상방제장비가 동원되면서 그 차이를 줄이는 것으로 보여진다(Fig. 5.8, Fi.g 5.9).

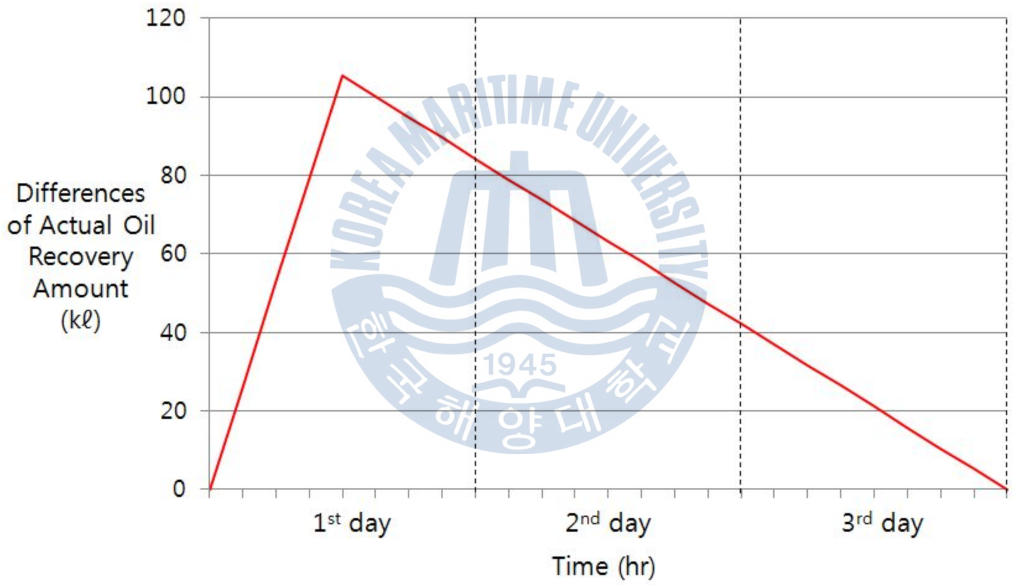

Fig. 5.9 Differences of actual oil recovery amount between stockpile in 2007 and HBD Model in Taean

Hebei Spirit호 오염사고에 대한 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 종합해 보면, 해상기름회수 용량을 4,183㎘로 동일하게 설정하는 경우, 2007년 배치현황을 기준으로 하면 지역 자체적으로 대응이 불가하므로 회수목표량

dCollection

대비 부족분은 인천에서 동원하여 대응해야 한다. 이는 대응시간의 지연으로 이어지고, 시간의 흐름에 따라 유출된 기름은 풍화되어 회수하기가 어려워지므로 초기 대응시 방제효율을 감소시키는 결과를 낳게 된다. 또한, 방제장비의 동원에 따른 추가적인 경비가 지출되는 단점이 있다.

반면, HBD Model에 따라 배치량을 결정하면 대산·태안·평택의 기름회수 능력은 4,875㎘로, Hebei Spirit호 오염사고시의 해상회수 목표량(4,183㎘)에 대하여 자체적으로 대응가능하고, 해상회수 목표량의 기름을 회수하는데 소요되는 시간은 약 2일 5시간 정도인 것으로 나타나 시간적인 이점이 있는 것으로 판단된다. 또한, 해상회수 목표량 만큼의 해상방제장비 동원을 통한 대응시에는 인근 지역에서 해상방제장비의 부족분을 동원해야 하는 2007년 배치현황 대비 대응 초기 기름회수시간의 단축이 가능한 것으로 나타났다.

HBD Model이 2007년 Hebei Spirit호 오염사고시 적용되었다면 당시 배치현황 대비 해양오염사고 초동대응시 시간적·경제적인 관점에서 유리했을 것이며, 따라서 보다 효율적인 대응이 가능했을 것으로 예상할 수 있다.

Collection

제6장 결　론

우리나라 현행 지역별 기름회수능력은 각 지역에 입·출항 또는 부근을 통항하는 최대크기의 선박과 과거 해양오염사고로 인한 최대유출량을 기준으로 지역별 최대오염사고를 설정하고, 최대오염사고의 대응에 필요한 거리에 따른 해상방제장비의 동원시간에 근거하여 지역별로 적정 배치량이 설정되어 있다. 본 연구는 우리나라 현행 기름회수능력 설정 기준에 환경·경제적인 요소를 추가·반영하여 도출한 해양환경위해도를 기반으로 지역별 해상방제자원 배치모델(Hazard-Based Deployment Model ; HBD Model)을 설계하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

해양오염 방제기법은 해상방제기법과 해안방제기법으로 나눌 수 있는데, 해상에서 효율적인 방제작업을 수행하게 되면 해안에 표착되는 오염물질을 최소화할 수 있으므로 해안방제작업 보다 해상방제작업을 우선적으로 고려하여 실시할 필요가 있다. 이러한 해상방제방법에는 기계적 회수 방법, 유흡착재를 이용한 방법, 유처리제를 이용한 방법 및 현장소각 방법이 해당되는데, 기계적 회수 방법이 현재 가장 효율적이고 광범위하게 이용되고 있는 해상방제방법이다. 기계적 회수를 위해서는 유회수기 뿐만 아니라 오일붐과 저장탱크가 모두 필요한데, 이는 현행 기름회수능력 설정의 대상이다.

주요 해양선진국의 기름회수능력 설정 기준은 지역을 기반으로 한다는 점과 사고의 장소나 규모에 따라 차등 대응한다는 점이 공통적인 부분이다. 한국의 기름회수능력 설정은 국가적 차원에서 접근하여 지역에 분산·배치하는 방식으로 설정되어 있으며, 지역별 기름회수능력은 해당 지역을 통항 또는 입출항 하는 최대크기의 선박과 과거 해양오염사고 최대유출량을 기준으로 설정되었는데, 최근의 사회적 분위기를 반영함과 동시에 기름오염으로 인한 환경피해를 최소화하기 위해 환경·경제적인 요소를 반영하여 설정할 필요가 있다.

Collection

HBD Model은 지역별 해양환경위해도를 기반으로 한다. 해양환경위해도는 사고 개연성과 사후 민감도를 모두 반영한 지역별 위해도를 의미하는데, 지역별 해양환경위해도를 구하기 위해 먼저 기름물동량, 산업시설 분포, 선박 입출항척수, 과거 해양오염사고, 양식어업 분포, 환경관리해역 및 위락시설의 7개 항목에 대한 지역별 현황을 바탕으로 권역내 점수치를 계산하여 정규화를 실시하고, 다음으로 계층분석과정(AHP)을 이용하여 7개 항목간의 가중치를 도출한다. 지역별 정규화 결과와 항목별 가중치를 종합한 단일값을 권역내 지역별 해양환경위해도로 보고, 권역내에서 차지하는 지역별 해양환경위해도의 비율에 따라 각 권역에 설정된 7,500㎘를 분산·배치하는 방식으로 HBD Model을 설계하였다. 권역별로 살펴보면, 제1권역의 경우 현행 기준 대비 인천지역과 군산지역의 배치량이 대산·태안·평택지역으로 이동되는 결과를 보이고 있고, 제2권역의 경우 현행 기준 배치량이 과하게 설정된 목포의 배치량이 권역내 다른 지역으로 이동되는 결과를 보이고 있으며, 제3권역의 경우 현행 기준 배치량이 과하게 설정된 부산의 배치량이 권역내 다른 지역으로 이동되는 결과를 나타내고 있다. 세권역 모두 공통적으로 현행기준 대비 권역 중심지역인 대산·태안·평택지역, 여수지역 및 울산지역의 해상방제장비 배치량이 증가하는 결과를 보이고 있다.

설계된 지역별 해상방제장비 배치모델의 적용 및 평가를 위해 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 실시하였다. 최대오염사고 발생을 가정한 동원 시뮬레이션은 2단계로 실시하였는데, 1단계는 현행 기준 대비 해상방제장비 배치량이 감소한 권역내 상대적 취약지역의 최대오염사고를 가정하여 권역내 배치된 해상방제장비를 동원하여 방제작업을 실시하는 시뮬레이션이고, 2단계는 각 권역 중심지역에서 최대오염사고를 가정하여 전국에 배치된 해상방제장비를 동원하여 방제작업을 실시하는 시뮬레이션이다. 여기

dCollection

에 부가하여 사례연구로서 2007년에 발생한 Hebei Spirit호 오염사고에 대하여 당시 지역별 해상방제장비 배치현황과 HBD Model을 기준으로 해상방제장비를 동원하여 비교하는 시뮬레이션이다.

1단계 시뮬레이션을 실시한 결과, 사고를 가정한 인천, 목포, 부산지역의 최대오염사고를 충분히 대응할 수 있는 것으로 나타났다. 2단계 시뮬레이션을 실시한 결과, 현행 기준 대비 HBD Model을 기준으로 한 해상방제장비 동원량은 제1권역은 부족, 제2권역과 제3권역은 초과하는 것으로 나타났지만 모든 권역의 최종적인 해상방제장비 동원에 따른 기름회수용량은 15,000㎘ 이상인 것으로 나타나 해상 기름회수 목표량을 충족시키는 결과를 보였다. 그리고 Hebei Spirit호 오염사고 대응 시뮬레이션을 실시한 결과, HBD Model에 따라 배치량을 결정하면 대산·태안·평택지역은 자체적으로 Hebei Spirit호 오염사고 당시의 해상방제 목표량을 충족시킬 뿐만 아니라 대응시간의 단축도 가능한 것으로 나타났다. 따라서 HBD Model은 모든 경우를 충족시키는 것으로 나타나 실제 실행가능한 배치모델로 평가되었으며, 2007년 Hebei Spirit호 오염사고 당시 해상방제장비 배치현황에 대비하여 해양오염사고 대응에 효율적인 배치모델로 판단할 수 있다.

해양사고로 인한 피해 복구와 관련된 요소를 반영한 HBD Model은 해양사고로 인한 피해를 최소화하여 복구의 효율을 높일 수 있으므로 해양방제정책 수립시 반영된다면 해양오염방제분야의 발전에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 향후, 본 연구에서 이용한 7개 항목에 추가적인 항목들을 HBD Model에 반영하여 배치모델의 고도화를 위한 추가 연구를 수행할 계획이다.

Collection

참 고 문 헌

1. 국승기, 윤종휘, 김원돈, 이상호, “여수해역에 있어서 기름유출에 대한 방제대책 수립에 관한 연구”, 해양환경안전학회지, 제7권, 제2호, pp.23-37, 2001
2. 국립해양조사원, 해상거리표(Distance Tables, 2011 Edition), 2011
3. 국토해양부, 허베이 스피리트호 유류오염사고 방제부문 백서, 2008
4. 김상운, 우리나라 국가해안방제모델 개발 연구, 박사학위논문, 한국해양대학교 대학원, 2012
5. 김세헌, 현대경영과학, 무역경영사, 2008
6. 문화체육관광부, 2010년 관광지 방문객 보고통계, 2011
7. 박용성, AHP에 의한 의사결정, 교우사, 2009
8. 박윤미, 설현주, “국방기술의 민수화 우선순위 평가 방법론 : 특허 분석 및 계층분석과정(AHP 기반)”, 한국국방경영분석학회지, 제36권, 제3호, pp.15-27, 2010
9. 윤종휘, 기본 해양오염방제, 다솜출판사, 2013
10. 윤종휘, 김상운, 국승기, 문정환, 하민재, “재난적 해양오염사고 대비 적정 해상기름회수용량 산출에 관한 연구”, 해양환경안전학회, 춘계학술발표회, 2010
11. 임은선, “계층분석과정(AHP), 선택의 기로에서 합리적으로 판단하기”, 국토 294, pp.128-135, 2006
12. 통계청, 양식방법별 사육수 면적, http://kosis.kr/, 2010
13. 해양경찰청, 국가긴급방제계획, 2008
14. 해양경찰청, 실용적 방제능력 산정방안 연구, 2009

Collection

15. 해양경찰청, 해양경찰백서, 2006~2011
16. 해양경찰청, 해양오염 관리업무 30년의 발자취, 2008
17. 해양경찰청, 해양오염 대비·대응 실태조사 연구, 2011
18. 해양경찰청, 해양오염 방제기술서, 1997
19. 해양경찰청, 해양오염방지관리인 교육교재, 2010
20. 해양수산부, 선박입출항현황, http://kosis.kr/, 2012
21. 해양수산부, 외내항 품목별 화물 입출항현황, http://kosis.kr/, 2012
22. 해양환경관리공단, 신개념 방제능력 확충 및 선진화 방안 연구, 2011
23. 해양환경관리공단, 선박의 해양오염방지관리인, 2013
24. Fingas, M., The Basics of Oil Spill Cleanup(3rd edition), CRC Press, 2012
25. Canadian Coast Guard, Handbook for the Review of Oil Handling Facilities Emergency Plans, 1996
26. Canadian Coast Guard, Oil Spill Response Field Guide, 1995
27. Canadian Coast Guard, Response Organizations Standards, 1995
28. Japan Coast Guard, Japanese National Contingency Plan for Oil and HNS Pollution Preparedness and Response Plan, 2006
29. International Maritime Organization, Manual on Oil Polution, Section Ⅳ Combating Oil Spills, 1988
30. International Maritime Organization, International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships 73/38, 1988
31. International Petroleum Industry Environment Conservation Association, Guide to Tiered Preparedness and Response, Vol. 14, 2007
32. International Petroleum Industry Environment Conservation Association, Sensitivity Mapping for Oil Spill Response, Vol. 1, 1994

Collection

33. Robert T. Clemen, Making Hard Decisions ; An Introduction to Decision Analysis(2nd Edition), Duxbury Press, 1996
34. United States Coast Guard, 33CFR155 Appendix B, Determining and Evaluating Required Response Resources for Vessel Response Plans, 2008
35. United States Coast Guard, 33CFR155, Subpart D, Tank Vessel Response Plans for Oil, 2008
36. United States Coast Guard, Oil Pollution Act, 1990

Collection