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

공학석사 학위논문

무인수상정의 진회수장치 설계 및 운용에 관한 연구

A Study on Design and Operation LARS for USV

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

조성원

본 논문을 조성원의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 정 재 현 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 서 주 노 (인)

2017년 01월 09일

한국해양대학교 대학원

Collection @ kmou

목 차

List of Tables ····· iv
List of Figures ····· v
Abstract ····· vi

1. 서 론
1.1 연구배경 ····· 07
1.2 연구목적 및 내용 ····· 07
1.3 기존 LARS 조사 ····· 08

2. 무인수상정의 LARS
2.1 무인수상정의 개요 ····· 10
2.2 무인수상정의 임무 ····· 10
2.3 무인수상정의 LARS 필요성 ····· 12
2.4 무인수상정의 LARS 운용 개념 ····· 12

3. 무인수상정의 LARS 설계
3.1 LARS의 요구사항 분석 ····· 14
3.1.1 LARS의 제원 요구사항 ····· 14
3.1.2 LARS의 기구학적 요구사항 ····· 14
3.1.3 LARS의 정역학적 요구사항 ····· 15
3.1.4 LARS의 동역학적 요구사항 ····· 15
3.1.5 LARS의 운용 요구사항 ····· 16

Collection @ kmou

3.2 LARS의 기본 설계 ····· 17
3.2.1 LARS의 메커니즘 설계 ····· 17
3.2.2 LARS의 기구부 설계 ····· 18
3.2.3 LARS의 구동기 용량설계 ····· 20

4. 무인수상정의 LARS 강도 해석
4.1 유한요소해석의 이론적 배경 ····· 22
4.1.1 유한요소법 ····· 22
4.1.2 탄소성 이론 ····· 23
4.2 기구부 유한요소 해석 ····· 30
4.2.1 기구부 모델링과 경계조건 ····· 30
4.2.2 기구부 유한요소 해석 결과 ····· 32

5. 무인수상정의 LARS 기구학 시뮬레이션
5.1 사점 ····· 34
5.2 LARS 링크 간의 관계식 ····· 36
5.3 LARS의 기구학 시뮬레이션 ····· 37

6. 무인수상정의 역학해석 및 LARS 모션 시뮬레이션
6.1 무인수상정의 역학해석 ····· 40
6.1.1 해상상태 3의 해수면 정보 생성 ····· 40
6.1.2 해상상태 3 시뮬레이션 ····· 42
6.1.3 USV의 자세 추정 ····· 43
6.1.4 해상상태 3에서의 USV 시뮬레이션 ····· 44
6.2 LARS의 모션 시뮬레이션 ····· 46

7. 결론

참고문헌 ····· 51

Collection @ kmou

List of Tables

Table 1 Specifications of USV ····· 11
Table 2 Characteristics data for sea state 3 ····· 19
Table 3 Condition of mesh ····· 31
Table 4 Material property of aluminum alloy 6061-T6 ····· 32
Table 5 Results of finite element analysis ····· 33
Table 6 Characteristics data for sea state 3 ····· 42

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

Collection @ kmou

List of Figures

Fig. 1 Existing LARS Mechanism ····· 9
Fig. 2 Overseas Development Case of USV's ····· 11
Fig. 3 Scenario of Operating LARS ····· 13
Fig. 4 Dynamical requirement for LARS ····· 15
Fig. 5 Mechanism of LARS ····· 17
Fig. 6 Exterior of LARS ····· 19
Fig. 7 Statical driving force for LARS ····· 20
Fig. 8 Expansion angle ····· 21
Fig. 9 Expansion driving force ····· 21
Fig. 10 Convected coordinate system in the deformation process ····· 28
Fig. 11 Slope of tangent and chord line in true stress-strain curve ····· 29
Fig. 12 Contact condition, boundary condition and FE modeling ····· 30
Fig. 13 Distribution of total deformation ····· 32
Fig. 14 Distribution of von mises stress ····· 33
Fig. 15 Dead Point ····· 35
Fig. 16 Link Structure of LARS ····· 35
Fig. 17 Simulation result - angle, displacement, angular velocity ····· 38
Fig. 18 Simulation result - angle, thrust force, linear velocity ····· 39
Fig. 19 Wave spectrum curve for sea state 3 ····· 43
Fig. 20 6 Degree of Freedom of Ship ····· 44
Fig. 21 Estimation results for heave, roll, pitch ····· 45
Fig. 22 Coordinate of USV ····· 46
Fig. 23 Rolling, pitching, heaving date of USV ····· 47
Fig. 24 Motion simulation of LARS ····· 47
Fig. 25 Height difference of LARS and sea surface ····· 48

Collection @ kmou

A Study on Design and Operation LARS for USV

Jo, Sung Won

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Launch and Recovery Systems(LARS) are developed for underwater exploration automatically. Side Scan Sonar(SSS) is mainly used for underwater exploration. LARS is essential to launch and to recover the underwater Tow-Fish.

In this study, the requirements for the design of automatic LARS for operating underwater Tow-Fish of USV(Unmanned Surface Vehicle) were analyzed. The currently developed LARS mechanism had been investigated to design the optimal mechanisms of LARS. Based on the investigated mechanism, the mechanism of structure of link assem bly which is able to slide and tilt simultaneously was studied. In this study, LARS was designed according to analyzed requirements and proposed mechanism. Structure analysis for the designed LARS was performed using FEM(Finite Element Method). In addition, kinematics and dynamics simulations were performed for the developed LARS.

KEY WORDS: LARS(Launch and Recovery System) 진회수장치; USV(Unmanned Surface Vehicle) 무인수상정; Underwater Exploration 수중탐색; Underwater Tow-Fish 수중예인체; SSS(Side Scan Sonar) 측면주사 음향탐사기.

Collection @ kmou

제 1 장 서론

1.1 연구배경

무인수상정(Unmanned Surface Vehicle)은 무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle)과 무인비행체(Unmanned Aerial Vehicle)와 더불어 미래전장환경의 무인화 추세에 따라 무인전장 시스템을 구성하는 주요 구성요소이다. 해외와 달리 국내에서는 UUV나 UAV에 비해 비교적 늦게 연구가 수행되었지만, 자율운항 및 원격통제에 필요한 다양한 기술들이 점차 고도화 되어감에 따라 USV의 활용 가능성이 증대되고 타 무인체계(UUV, UAV)와 연계된 임무 수행 연구도 주목받고 있다(J. E. Manley, 2008). USV의 최근 연구 동향은 지상통제소나 모선간의 통신거리를 증가시켜 USV를 활동 범위를 넓히고, 다양한 센서들을 탑재하여 감시 및 정찰 임무 범위를 확대시키는 연구가 수행되고 있다(Mahacek, et al., 2012).

수중 탐색에 있어 기존의 함정을 이용한 탐색은 3D임무 등으로 한계가 있어 USV에 의한 수중탐색의 필요성이 대두되고 있다. 특히 장기간 일정구역의 수중탐색을 위한 운용목적은 매우 중요하고 필수적인 USV의 임무이다. 따라서 본 연구에서는 USV가 자동으로 SSS(Side Scan Sonar)와 같은 수중탐색장비를 진수·회수 하기위한 필수장비인 LARS(Launch and Recovery System)를 설계하고 성능을 분석하는 연구를 하였다.

1.2 연구목적 및 내용

본 논문에서는 무인수상정의 주요 임무와 국내외 개발된 사례들을 소개하고, 현재 연구개발 중인 LARS의 운용 개념에 대해 기술하였으며, 실제 LARS 개발에 있어 필요한 요구조건들을 분석하고, 이를 바탕으로 최적화된 구동 메커니즘과 요구조건들을 만족하는 설계를 하였다. LARS를 설계하기 위해서는 우선 요구사항을 분석하여야 하며, 본 연구에서는 제원, 기구학, 정역학, 동역학, 운용에 대한 요구사항을 분석하였다. 그 후 분석한

Collection @ kmou

요구사항에 기반하여 L자형 링크를 이용한 구동 메커니즘을 설계하였다. 이 메커니즘은 하나의 구동부로 슬라이드와 틸팅모션이 동시에 구현 가능하며 타 방식에 비하여 진수 및 회수가 용이하고, 수중탐색장비의 자중에 의한 자가 진수 방식으로 단순한 구조와 경량화된 설계가 가능하다. 설계한 LARS에 대해 강도해석을 수행하여 그 구조적 안정성을 평가하고, 기구학 시뮬레이션과 USV의 역학 해석을 통해 LARS의 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 마지막으로 본 연구의 중요 사항을 요약 설명하고 향후 연구 방향과 방법에 대해 기술하였다.

1.3 기존 LARS 조사

본 연구에서 개발한 LARS가 적용될 무인수상정과 수중예인체에 최적의 메커니즘을 가진 LARS를 설계하기 위해 현재 개발된 LARS 메커니즘에 대해 조사하였다.

미 해군 및 이스라엘 해군에서는 저속의 UUV를 고속운항이 가능한 무인수상정에 탑재하여 원거리의 임무해역으로 신속한 투입이 가능한 시스템을 개발하고 있다. 그 외에도 여러 무인수상정의 수중탐색을 위한 연구개발이 이루어지고 있으며, 수중탐색을 위해서는 SSS와 같은 수중예인체가 사용된다. 이러한 수중예인체 운용에 반드시 필요한 장비는 LARS이며, Fig. 1과 같은 다양한 LARS 메커니즘이 개발되었다.

스파르탄에 사용된 Gantry Unit 타입은 수중예인체의 견인 위치가 전방일 경우에 주로 사용되는 방식으로, 무인수상정의 후미에 LARS가 위치하여 수중예인체를 진회수시 LARS가 슬라이드와 틸팅 모션을 통해 LARS의 끝단이 해수면 아래로 잠겨 수중예인체를 회수하는 방식이다. 이 방식은 소형 무인수상정에서 많이 사용되며 다른 방식에 비해 공간적 제약을 적게 받으며 일반적인 형상의 무인수상정에서 사용 가능하지만 수중예인체의 견인 위치가 전방일 경우에만 사용 가능하다.

Overhead Unit 타입은 수중예인체의 견인 위치가 중앙부일 때 사용하는 방식으로, 수중예인체의 진회수에 있어 안정적 운용이 가능하며, 대다수의 수중예인체가 중앙견인 방식이므로 범용성이 높은 진회수 방식이다. 그러나 이 방식을 사용하기 위해서는 이 타입에 맞는 전용 무인수상정의 설계가 필수적이며 구동부가 다른 방식에 비해 복잡하다.

A frame 타입의 경우 소형보다는 중대형 무인수상정에 주로 사용되며 side scan sonar와 같은 예인형 수중탐색장비보단 ROV와 같은 장비를 운용하는데 많이 쓰이는 방법이다. 다른

Collection @ kmou

방식에 비해 고중량 장비의 진회수가 가능하지만 공간적 제약사항이 크다.

Knuckle boom 타입은 크레인의 각 부위가 손가락처럼 접어짐으로 회수 완료 시 운용 및 기동을 위한 콤팩트한 크기를 가진다. 이는 진회수장치에 의해 막히는 갑판 공간이 적어 공간적으로 유리하며, 중앙 견인방식의 수중예인체를 무인수상정의 전용 설계가 필요 없이 운용 가능하다. 그러나 단점은 움직이는 부품의 양이 늘어나므로 전력 수요 및 구종 부품이 증가하고 유지보수가 늘어나게 된다.

Gantry Unit, Spartan

Overhead Unit, CUSV

A frame, Thales-Halcyon

Knuckle-boom-, nspector

Fig. 1 Existing LARS mechanism

Collection @ kmou

제 2 장 무인수상정의 LARS

2.1 무인수상정의 개요

무인수상정은 항만, 해상 등의 감시 및 정찰, 해상 플랫폼 보호 등을 임무를 위해 개발된 장비이다. 해상환경에서의 자율적인 운항이 가능한 무인수상정은 위험하거나 시간, 비용 등이 많이 소요되는 임무를 효과적으로 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 그리하여 군사적 측면뿐만 아니라 해양 조사 및 해안 감시와 같은 용도에서도 무인수상정의 수요가 증가되고 있다. 미 해군은 비전투용의 무인수상정을 활용하고 있으나, 최근에는 대잠전, 대기뢰전, 정찰 및 감시 등 전투용 다목적 무인수상선의 개발을 취진하고 있으며, 미군 뿐 아니라 이스라엘 및 선진국들에서 개발이 이루어지고 있다. 국내에서는 2000년도 KRISO에서 민군겸용과제로 위성통신을 활용한 원거리 원격제어 통제 알고리즘 개발 운용을 위해 천리안을 개발한 사례가 있고, 2011년부터 다목적 지능형 무인선 국산화 개발사업의 일환으로 무인수상정개발을 위한 선형개발, 탐색 및 항해, 자율 운항 등의 연구가 수행되고 있다. 2015년부터 국방과학연구소 중심으로 군사목적의 '복합임무 무인수상정 기술' 개발 프로그램의 일환으로 USV 임무모듈 연동기술 개발이 수행되고 있다.

2.2 무인수상정의 임무

방사능 오염 및 생화학 오염, 군사적 위협이 있는 해역 등에서 유인수상정이 임무를 수행하기는 매우 힘든 환경이다. 이와 같이 환경적으로 어려운 해역에서 주야간 및 장시간 임무수행 에서도 안정적으로 임무수행을 하기 위하여 무인수상정이 개발되고 있다. 이와 같은 장점을 갖는 무인수상정의 임무를 세분화 하여 살펴보면 다음과 같다.

연안이나 항만을 자율적으로 순찰하는 연안 감시 및 정찰, 연안에 수상한 목표물이 나타났을 때 추적하거나 섬멸하기 위한 경전투, 아군 함대의 신속한 전개 및 이동을 위한 경로 확보의 대기뢰전, 수중의 잠수함의 음파 추적 및 위치 탐색을 위한 대잠전등의 임무로

Collection @ kmou

<Israel, Stingray>

<US, Sea Fox>

<Israel, Protector>

<US, Spartan>

Fig. 2 Overseas development case of USV's

Table 1 Specifications of USV

	L [m]	B [m]	Displ [t]	V [kn]	Payload [t]
QST-35 Septar	17.00	4.50	19.00	35	10
Roboski SDST	2.70	1.20	0.20	42	0.16
Spartan	7.00	3.00	4.00	30	0.7
Sea Fox	5.00	-	0.64	40	-
Protector	9.00	-	-	40	1

Collection @ kmou

구성된다(Ru-jian Yan, et al., 2010).

미군에 의해 본격적인 무인수상정 연구가 수행된 1990년 이래로, 해외에서 개발 및 연구되어 운용중인 무인수상정은 Fig. 2과 같으며, Table 1에 현재 개발된 주요 무인수상정들에 대한 사양을 정리하였다.

이스라엘에서 2005년경 개발된 Stingray는 3.2m 전장에 40 knots로 이동하며 소형이면서 고속으로 연안감시 수행이 가능하다. 또한 2003년경 개발된 Protector는 9m의 전장에 50knots의 속도로 고속이동이 가능하며 특히 'Mini-Typhoon'으로 명명된 무장을 탑재하여 고속이동시에도 정확하게 목표물을 타격할 수 있는 사격시스템을 개발하였다(Volker Bertram, 2008).

미 해군의 주도로 개발된 Sea Fox는 SPARTAN보다 작은 5m의 전장에 40knots 속도로 이동가능하며, 연안 감시와 자율 항해 연구에 활용되었다. 또한 미 해군의 SPARTAN은 연안 감시 및 정찰을 목적으로 2003년경 개발되었다. 7m의 전장을 갖고, 1.5 ton의 payload를 싣고 30knots의 속도로 이동이 가능하다. 특히 이라크전 등에 투입되어 그 실효성을 입증하였다(L. McLaunchlan, 2014).

2.3 무인수상정의 LARS 필요성

무인수상정에서 대잠전, 대기뢰전과 같은 수중탐색 임무를 수행하기 위해서는 수중탐색장비 운용이 필수적이다(M Eriksson, et al., 2013). 이러한 수중탐색장비로는 Side Scan Sonar(SSS)를 사용한 예인형 수중탐색장비가 주로 사용되며, 이를 무인수상정에서 운용하기 위해서는 자동으로 수중탐색장비를 전개 및 회수할 수 있는 Launch and Recovery System(LARS)이 필요하다(D. B. Nicklas, 2015).

2.4 무인수상정의 LARS 운용 개념

본 연구에서 개발 중인 무인수상정의 운용 개념은 다음과 같다. 예인형 수중탐색장비는 수심 50m의 운용범위와 6knots의 탐지속도를 가지며, 원격으로 자동 전개 및 회수가 되어야 한다. 또한 무인수상정은 탐색을 시작할 목표지점까지 30knots의 속도로 고속 이동하며, 이동간에 수중탐색장비가 이탈하지 않도록 진회수장치가 고정하고 있어야 한다.

Collection @ kmou

무인수상정이 탐색구역에 도착하면 탐색속도인 6knots로 운항하고 수중탐색장비 진수가 시작된다. 진수가 시작되면 수중탐색장비의 고정 장치가 해제되고, 수중탐색장비 견인장치(Winch)와 진회수장치의 유압실린더가 동기화된 속도로 구동된다. 진회수장치가 특정 각도에 도달하면, 수중탐색장비는 자중에 의해 진수(Self Launching)된다. 수중탐색장비의 진수가 완료되면 탐색을 시작하고, 해당 지역의 탐색이 끝나면 다음 목표 지점으로의 이동을 위해 수중탐색장비를 회수한다. 수중탐색장비견인장치를 구동시켜 수중탐색장비를 진회수장치로 끌어올린 후 진회수장치의 유압실린더와 수중탐색장비 견인장치가 동기화된 속도로 구동되어 무인수상정에 탑재한다. 이때 진회수장치에 설치된 근접센서 또는 화상카메라로 수중탐색장비의 탑재 완료여부를 파악한다. 수중탐색장비가 무인수상정에 완전히 탑재되면 수중탐색장비를 진회수장치에 고정하고, 다음 목표지역으로 고속 이동한다. 이와 같은 LARS 운용개념에 대한 시나리오 구성도는 Fig. 3과 같다.

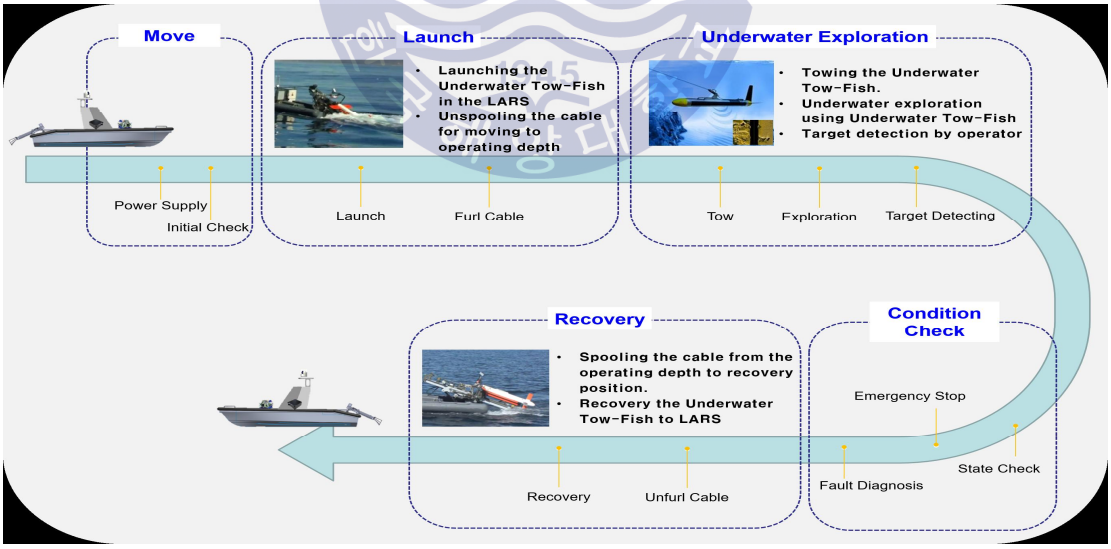

Fig. 3 Scenario of operating LARS

Collection @ kmou

제 3 장 무인수상정의 LARS 설계

3.1 LARS의 요구사항 분석

수중예인체를 무인수상정에서 자율적으로 전개-회수하기 위한 LARS를 설계하기 위해서는 요구사항 분석이 선행되어야 한다. 2장에서 제안한 운용 개념에 따른 요구사항을 분석하였다. 이에 따라 USV 및 예인체의 제원, 정-동역학적, 기구학적, 운용의 측면에서 요구사항 분석이 필요하다(Edoardo Sarda, et al., 2014).

3.1.1 LARS의 제원 요구사항

제원 요구사항으로는 진회수장치가 탑재될 무인수상정의 제원과 진회수장치가 운용해야하는 수중예인체의 제원이 있다. 현재 개발중인 진회수장치가 탑재될 무인수상정과 운용할 수중예인체의 제원은 표1, 표2와 같다. 이러한 제원을 분석한 결과 USV에 LARS를 설치 가능한 공간의 길이와 폭은 각각 1.8m와 1m, LARS 무게는 90kg 이내로 요구되었다.

3.1.2 LARS의 기구학적 요구사항

진회수장치의 기구학적 요구사항으로는 진회수장치의 구동메커니즘에 따른 슬라이딩 길이 및 전개 각도를 산출해야 하고, 각 링크 간의 사점 회피를 위한 기구학적 해석 및 시뮬레이션이 필요하다. 즉, 각 링크가 일직선상에 놓이지 않도록 조인트를 구성해야 하며, 이를 확인하기 외해 3d 모델링 및 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 또한 진회수장치를 무인수상정에서 운용할 때 견인장치-무인수상정-진회수장치 간의 예인케이블 간섭을 방지해야 하며, 수중탐색시 수중예인체의 운용에 따른 예인케이블과, 무인수상정의 추진기와의 간섭을 방지해야 한다. 그리고 예인케이블의 손상을 방지하기 위하여, 견인장치-무인수상정-진회수장치 연결 구간 내에 예인케이블이 꺾이지 않도록 최소곡률반경을 만족해야 한다.

Collection @ kmou

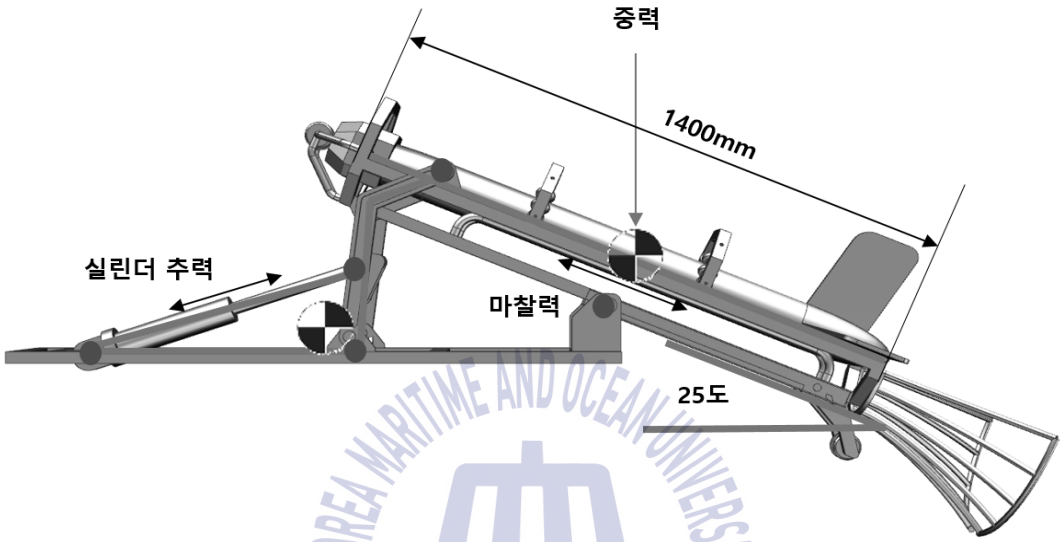

Fig. 4 Dynamical requirement for LARS

3.1.3 LARS의 정역학적 요구사항

정역학적 요구사항으로 45kg의 수중예인체와 90kg의 자중을 지지할 수 있는 기구부 강도가 요구되고, 수중탐색 시 예인케이블 및 수중예인체를 지지할 수 있어야 한다. 그리고 무인수상정의 고속이동(30knots)시 수중예인체를 안정적으로 고정할 수 있어야 하며, 수중예인체 운용 시의 견인력 및 수중 충돌 시 발생하는 힘을 견딜 수 있어야 한다.

3.1.4 LARS의 동구학적 요구사항

동역학적 요구사항은 자중에 의한 자가 진수의 최소 각도 와 최소정지 마찰계수를 만족하는 마찰면 재질을 선정해야 한다. Fig. 4와 같은 진수상황에서 진수 각도에 따른

Collection @ kmou

자가진수가 가능하여야 한다.

또한 회수 각도와 수중탐색장비의 상대 속도에 따른 수중탐색장비의 충격력 변화를 분석하여 최적 회수각도와 상대속도를 선정해 수중탐색장비의 충격을 최소화 하여야 한다. 또한 진수·회수 및 고속이동시에 수중예인체가 받는 충격을 분석하고 이에 따른 충격을 흡수 할 수 있는 구조물을 설치하여 수중탐색장비를 보호해야 한다.

3.1.5 LARS의 운용 요구사항

진회수장치의 운용 요구사항으로서는 카메라나 센서를 사용하여 진·회수시의 수중예인체의 위치확인 및 진·회수 완료 여부를 확인할 수 있어야 하며, 고속이동시 수중예인체의 안정적 고정여부를 확인할 수 있어야 한다. 그리고 근접센서 신호와 유압실린더 파워팩의 신호를 활용하여 견인장치와 동기화된 속도로 구동이 가능해야 한다.

Collection @ kmou

3.2 LARS의 기본 설계

3.2.1 LARS의 메커니즘 설계

앞서 서술한 요구사항에 따라 크기, 무게, 자세 안정성 등을 고려하여 구동 메커니즘을 선정했다. 제한된 무인수상정 내의 설치 공간과 무게에 따른 소형, 경량화의 최적화 된 구조가 필요하며, 이러한 조건들을 고려하여 Gantry Unit과 A frame 결합 방식의 구동 메커니즘을 선정하였다. 선정한 메커니즘은 Fig. 5와 같이 유압실린더와 L자형 링크의 결합으로 1개의 구동부로 슬라이드와 틸팅모션이 동시에 구현 가능하며 타 방식에 비하여 진수 및 회수가 용이하고, 수중탐색장비의 자중에 의한 자가 진수 방식으로 단순한 구조와 경량화된 설계가 가능하다.

Fig. 5 Mechanism of LARS

Collection @ kmou

3.2.2 LARS의 기구부 설계

설계한 진회수장치의 외형은 Fig. 6와 같다. 진회수장치 제원인 Table 2에서 알 수 있듯이, 제안한 LARS 메커니즘은 제원요구사항인 설치 가능한 공간의 길이와 폭인 1.8m, 1m, 무게는 90kg 이내로 만족됨을 simulation 배치를 통하여 확인하였다.

정역학적 요구조건 만족을 위해 제안한 LARS는 45kg의 수중예인체 하중을 진·회수시 견딜 수 있고, USV 고속이동시에도 안정적으로 고정 상태를 유지할 수 있는 필요 강도를 만족하는 구조 및 재료를 분석하여 선정하였다.

Fig. 4와 같이 동역학적 요구조건 분석을 통해 자중에 의한 진수 최소각도는 12도이며, 수중탐색장비의 진수 속도 및 충격량 등을 고려하여 본 연구에서는 진수각도를 25도로 설정하였다. 이때 필요한 마찰계수는 0.466이하로 산출되었고, 재질 선정에 고려되었다.

기구학적 요구사항 만족을 위해 사점 방지를 위한 링크구조, 링크수, 링크 결합을 고려하여 구성하였다. 그리고 3D CAD (CATIA, Solidworks)를 이용하여 모델링 및 기구학적 시뮬레이션을 수행하였고, 사점이 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 운용 시 예인케이블의 손상을 방지하기 위하여, 견인장치-무인수상정-진회수장치 연결 구간 내에 예인케이블의 최소곡률 180mm를 만족하는 풀리 또는 롤러등을 설치하여 예인케이블 손상을 고려하였다.

운용 요구사항의 만족을 위해, 근접센서를 설치하여 진회수시 수중탐색장비의 위치를 파악할 수 있고, 고속이동시 수중탐색장비의 안정적 고정여부도 확인할 수 있다. 또한 예인케이블의 원활한 길이 조절을 위해 견인장치 신호와 유압실린더 파워팩의 신호를 활용하여 견인장치와 동기화된 속도로 구동이 가능하다.

Collection @ kmou

Table 2 Characteristics data for sea state 3

Index	Value	Dimension
Length (Recovery)	2.22	m
Length (Launch)	2.80	m
Breadth	1.00	m
Height (Recovery)	0.42	m
Height (Launch)	0.68	m
Depth (Launch)	0.61	m
Launching Angle	25.0	deg.
Weight	90	kg

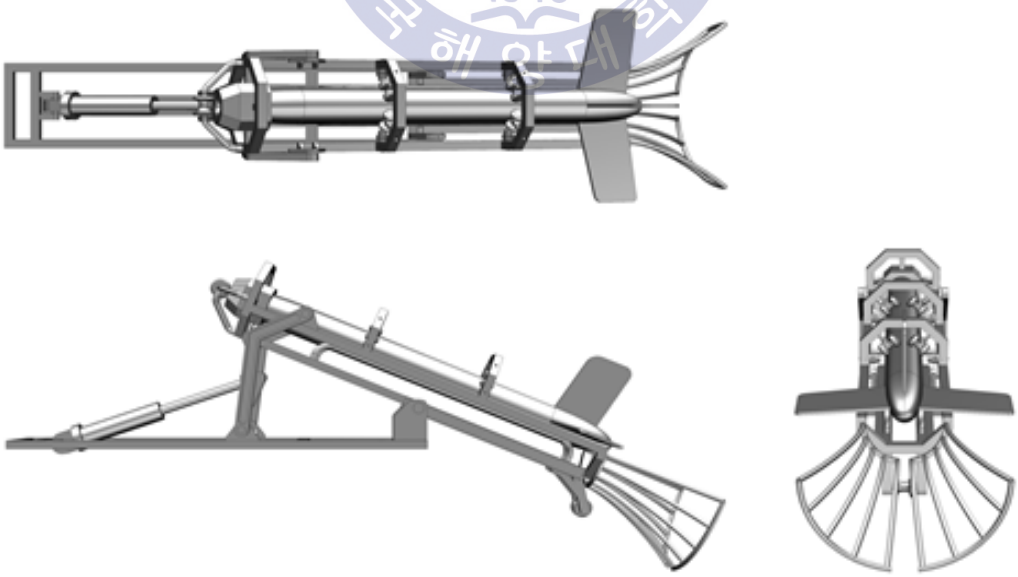

Fig. 6 Exterior of LARS

Collection @ kmou

3.2.3 LARS의 구동기 용량 설계

진회수장치의 운용을 위해서는 진회수장치를 구동시키는 엑츄에이터의 구동력을 산출하여 적합한 엑츄에이터를 선정하여야 한다. 이를 위해 정역학적인 구동력과 시뮬레이션을 통한 구동력을 산출하였다. 정역학적 구동력은 Fig. 7과 같이 진회수시 최대 힘이 필요한 지점에서의 구동력을 산출하였고 다음과 같이 계산된다.

$$F_c = \frac{L_b F_{cm}}{L_a L_c \sin\theta} \tag{3.1}$$

식 (1)에 따라 계산된 구동력은 2374N 이고 시뮬레이션에 의한 구동력은 Fig. 8 ~ 9와 같이 2536N이다. 두 값의 유사함에서 신뢰성을 확인할 수 있으며 이를 바탕으로 구동 엑츄에이터를 선정하였다.

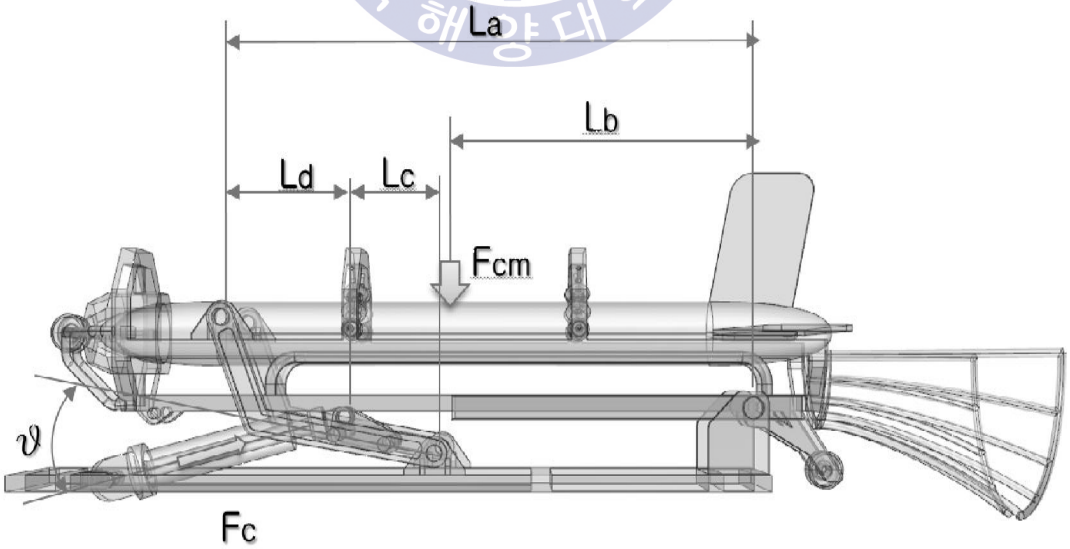

Fig. 7 Statical driving force for LARS

Collection @ kmou

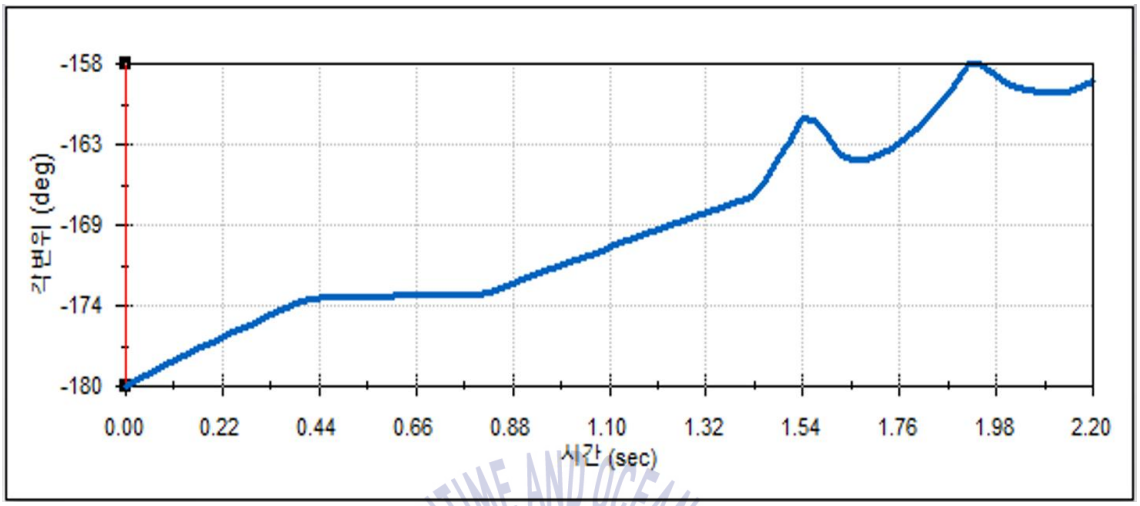

Fig. 8 Expansion angle

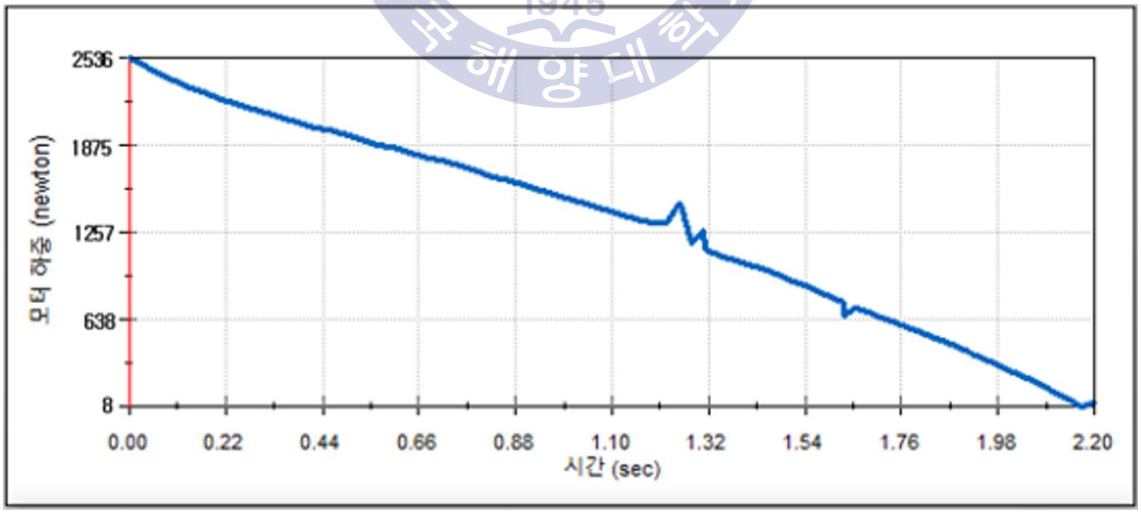

Fig. 9 Expansion driving force

Collection @ kmou

제 4 장 무인수상정의 LARS 강도 해석

4.1 유한요소해석의 이론적 배경

4.1.1 유한요소법

유한요소법은 해석하고자 하는 계(구조, 열, 유체등)를 유한요소라고 불리는 작은 부분으로 나누고, 행렬을 통하여 물리적인 법칙을 각각의 유한 요소에 적용한다. 이때, 계산된 근사치 값은 인접한 다른 요소를 절점(node)을 통해서 결합하여 최종적으로 전체 시스템에 대한 지배 방정식을 만든 후 이를 풀이해서 유용한 물리적 정보를 얻는 방법이다.

흔히 사용하는 두 가지 방법은 하중법(force method) (또는 flexibility method)과 변위법(displacement method)을 들 수 있다. 첫 번째의 하중 법에서 요소 사이의 내력을 미지수로 설정하고 평형방정식에서 요소에 대한 지배방정식을 구한다. 그런 다음 적합조건을 사용하여 추가의 식을 유도한 후 이를 전체적으로 합쳐서 연립대수방정식을 구하고 이 방정식을 풀어서 미지의 내력을 구하는 방법이다. 두 번째의 변위법은 절점의 변위를 미지수로 설정하여 지배 방정식을 작성하는 방법이다.

유한요소법은 각각의 요소에 대해서 서로 다른 방정식으로 문제를 풀기 때문에 다른 물질로 구성된 물체의 모델링을 쉽게 할 수 있는 이점이 있다. 하지만, 실제 구조물이나 공정을 이상적으로 모델링하기 위해서는 많은 경험과 지식이 필요하며 결과의 신뢰성 평가를 위해서는 많은 경험이 필요하다.

Collection @ kmou

4.1.2 탄소성 이론

대변형문제와 탄소성문제의 특징은 비선형성으로 인하여 시간과 외력의 각 단계에서의 크기에 대해 불안정하다는 것이다. 해가 충분한 정확도를 가지기 위해서는 반복 계산이 필요하다. 탄소성체의 특성은 통상 속도 형으로 표시된 구성 식에 의하여 표현되므로 변형을 지배하는 기초식도 속도 형으로 표시된다. 탄소성 경계 값 문제에서 탄소성 변형은 이런 속도형 기초 식을 구성식과 주어진 경계조건을 이용하여 순차적으로 풀어가는 것에 의해 구해진다. 이들 구성식과 기초 식은 변형과정 중의 기준 상태를 변형전 초기상태 또는 현 변형상태 중 어디에 설정하는가에 따라 전자의 경우 Total Lagrangian Formulation(TLF), 후자의 경우 Updated Lagrangian Formulation(ULF)으로 구별된다. Fig. 1 에서와 같이 탄소성 변형 중에 있는 물체를 고려하면 시간 t에서 평형상태에 있는 물체의 모든 값 (변형량 분포, 응력분포, 변형형상 등)이 알려져 있을 때 시간 증분 Δt동안 미소 외부 변형에 대한 물체의 반응(탄소성 해)은 직교 데카르트 좌표계 x를 기준 좌표로 하여 ULF표시에 의한 다음의 가상일 원리를 푸는 것에 의하여 구해진다.

$$\int_v (\dot{S} + \sigma L)\delta L dv = \int_{st} \dot{p}\delta v ds \tag{4.1}$$

여기서 p 는 물체의 표면 s의 단위면적에 작용하는 외력의 변화율, v는 변위속도, L = dv/dx는 속도구배 텐서는 가상 변위속도이다. 또, V, s 는 각각 물체의 체적과 표면적을 나타낸다. S 는 Kirchhoff 응력텐서이고 Cauchy 응력텐서 σ와는 다음의 관계가 있다.

$$S = \frac{\rho_0}{\rho}\sigma \tag{4.2}$$

$$\dot{S} = \dot{\sigma} + \sigma tr L - \sigma L - L\sigma \tag{4.3}$$

탄소성 경계 값 문제, 식 (4.1)을 풀기 위해서는 재료고유의 응답특성을 나타내는 변형률 속도와 응력속도의 대응관계인 구성 식은 재료의 물리적 특성을 나타내므로

Collection @ kmou

물체의 운동 혹은 좌표계의 운동에 무관하게 객관성을 가져야 한다.

식 (4.1)에 객관성을 갖는 구성 식으로 Kirchhoff응력의 Jackman 속도 $\dot{s}$와 변형률 속도 d의 대응 관계를 이용하면

$$\int_v [(D-F)d+\sigma L]\delta L dv = \int_{st} \dot{p}\sigma v ds \tag{4.4}$$

$$\dot{s}=\dot{s}+\delta w - w\sigma = \dot{s}+Fd \tag{4.5}$$

$$w=\frac{1}{2}(L-L^T 1), d=\frac{1}{2}(L+L^T) \tag{4.6}$$

이 된다. 여기서 D는 구성 매트릭스이고 재료의 소성변형조건을 나타내는 항복곡면의 형태에 따라 구체적인 형태가 구해진다.

탄소성 변형문제의 해를 구하기 위한 탄소성 유한요소방정식은 가상일의 원리 식 (4.1)에 의해 정식화된다. 즉 N개의 절점을 갖는 요소내의 임의의 점에서 변위속도를 V, 변형률속도를 d, 변위 속도구배를 g로 하고 이것을 절점에서의 변위 속도 $\bar{v}$와 형상함수 ϕ 및 ϕ의 도함수를 성분으로 하는 매트릭스 B, E로 표시하여 가상의 일 원리인 식 (4.3)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 매트릭스 형으로 요소의 강성방정식이 얻어진다.

$$K\hat{v}=\hat{\dot{f}} \tag{4.7}$$

$$K=\int_{ve} [B^T(D-F)B+E^T]QEdv \tag{4.8}$$

$$\hat{\dot{f}}=\int_{set} \phi^T \dot{p} ds \tag{4.9}$$

$$v=\phi\hat{v}, d=B\hat{v}, g=E\hat{v} \tag{4.10}$$

요소의 체적은 v_s, 표면적은 S_e로 나타낸다. 매트릭스 K는 강성 매트릭스이고, $\hat{\dot{f}}$는 표면적에 등가인 절 점력이다. 식 (4.9)의 유한요소방정식을 모든 요소에 대하여

Collection @ kmou

구하고 절 점력의 평형조건과 변위의 적합조건을 만족하도록 중첩시키면 물체 전체의 강성방정식이 얻어지고 여기에 절 점력 증분 및 절점 변위 증분으로써 경계조건을 가하면 물체내의 모든 미지의 절점변위 증분이 구해진다. 상기의 정식화는 증분 변형전의 상태를 기준으로 증분 변형 후의 상태를 표시하는 Eisler법에 의한 것이므로 계산정도의 향상을 위해서 증분 간에는 선형 영역에서 비선형 영역으로의 재료특성의 변화나 형상의 급격한 변화가 발생하지 않도록 증분의 크기를 결정하는 것이 중요하다.

객관성을 갖는 응력속도와 변형률 속도 간의 대응관계인 구성 식으로서 탄소성체의 소성변형에 자주 이용되고 있는 구성 식은 크게 연합유동법칙 (associated flow rule)을 따르는 J2-flow theory와 J2-kinematic hardening theory, 항복곡면에 코너의 존재를 고려한 구성 식으로 J2-deformation theory와 J2-corner theory, 비연합 유동법칙 (non-associated flow rule)을 따르는 Rudnicki-Rice's theory와 Gurson's theory에 의한 구성 식으로 대별된다. 이들 중에서 비연합유동법칙은 토양, 암석과 같이 소성변형 이전에 재료내부에 미세크렉이나 간극을 갖고 있는 재료나 금속재료가 정수압 응력 지배하에 있을 때 해당되는 사항이다. 본 연구에서는 연합유동법칙을 따르는 두 구성방정식을 사용하였다.

통상 탄소성 구성식의 도출에 있어서 전 변형률 속도 $\bar{d}$ 는 가역적인 탄성성분 $\overrightarrow{d^e}$와 비가역적인 소성성분 $\overrightarrow{d^p}$로 분해할 수 있다고 다음과 같이 가정 한다.

$$\vec{d} = \overrightarrow{d^e} + \overrightarrow{d^p} \tag{4.11}$$

탄성성분은 Hooke의 법칙을 유한변형까지 확장시켜 일반화 시킨 선 형관 계에 의해 나타내고 소성성분은 항복함수 f(yield function)와 유동법칙(flow rule)에 의해 나타낸다. 즉, 탄소성체의 구성 식은 Hill(6)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{s} = D^e \overrightarrow{d^e} = D^e(\vec{d} - \overrightarrow{d^p}) \tag{4.12}$$

여기서 D^e는 순간 탄성강성계수(instantaneous elastic modulus)이다. 소성 변형률속

Collection @ kmou

도 $\vec{d^p}$는 다음 식으로 주어진다.

$$\vec{d^p} = \frac{1}{h}\vec{m}(\bar{s}\cdot \quad n) \tag{4.13}$$

$$\vec{n} = \frac{\partial f}{\partial \sigma}/ab\left|s\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right| \tag{4.14}$$

$\vec{m}$은 소성변형률 속도방향, $\vec{n}$은 항복곡면에 세운 법선방향을 나타낸다. h 는 재료의 변형경화특성을 나타내는 스칼라함수로 응력, 변형이력의 함수이다. 식 (2-6)와 식 (4.14)에서 $\bar{s}$ • n을 구하면 다음과 같다.

$$\vec{n}\cdot \quad D^e\vec{d} = \vec{n}(\bar{s} + D^e d^p)$$

$$= \begin{cases} (\vec{n}\cdot \quad \bar{s})[1 + \frac{1}{h}(\vec{n}\cdot \quad D^e\vec{m})] : \vec{n}\cdot \quad \bar{s} > 0, \text{부하} \\ \vec{n}\cdot \quad \bar{s} \qquad\qquad\qquad\qquad\quad \vec{n}\cdot \quad \bar{s} \le 0, \text{제하, 중립} \end{cases} \tag{4.15}$$

따라서 식 2-6에서 탄소성 구성 식은

$$\bar{s} = D^e(\vec{d} - \vec{d^e})$$

$$= \left[D^e - \beta\frac{D^e\vec{m}D^e\vec{n}}{h + \vec{n}\cdot \quad D^e\vec{m}}\right]\vec{d} = D\vec{d} \tag{4.16}$$

$\beta = 1 : \vec{n}\cdot \quad D^e\vec{d} > 0, \text{부하}$

$0 : \vec{n}\cdot \quad D^e\vec{d} \le 0, \text{제하, 중립}$

로 주어진다. 여기서 β는 소성 영역과 중립 • 제하 영역을 구분하는 지수이다. $\vec{m} = \vec{n}$인 경우에 연합유동법칙이 성립하고 D는 ij, kl에 대해 대칭이 된다. 참고적으로 $\vec{m} \neq \vec{n}$인 경우에는 비연합유동법칙이 성립하여 D는 ij, kl에 대하여 비대칭이 된다.

초기 항복함수가 Von Mises형의 매끈한 항복곡면으로 주어지는 등방경화(isotropic hardening) 탄소성체의 경우 소성변형률 속도방향은 항복곡면에 세운 법선방향과 일치한다. ($\vec{m} = \vec{n}$)

Collection @ kmou

따라서 Von Mises 형의 항복함수 $f=3/2\acute{\sigma}\cdot\ \acute{\sigma}-\sigma_Y^2(\acute{\sigma}=\sigma-1/3tr\sigma I)$를 식 (4.16)에 대입하면 J2-flow theory에 의한 탄소성구성식의 구체형은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{s}=(D^e-\frac{\beta}{g}NN)\vec{d}=(D^e-\frac{2\beta G}{g}\sigma'\sigma')\vec{d} \tag{4.17}$$

$$N=D^e\vec{n},g=h+N\cdot\ \vec{n}=\frac{3}{2}\overline{\sigma^2}(1+\frac{h}{2G})$$

가공경화 파라미터 h는 Fig. 2 와 같이 단축인장 진응력-대수변형율 관계로부터 구할 수 있다.

$$h=\frac{3}{2}\frac{d\epsilon^p}{d\sigma}=\frac{3}{2}\left[\left(1-\frac{1-2v}{E}\sigma\right)\frac{1}{E_t}-\frac{1}{E}\right] \tag{4.18}$$

E_t: 진응력-대수변형률 곡선의 접선계수 $(=d\sigma/d\epsilon)$

한편 초기 항복조건을 만족한 후 소성변형의 진행에 따라 항복곡면이 형상 및 크기를 그대로 유지한 상태에서 응력 공간 내를 평행 이동하는 이동경화 이론(Kinematic hardening theory)에 의한 구성식은 다음과 같이 구할 수 있다.

즉, 현재 상태에서 항복곡면의 중심 수 f 위치를 a라 하고, 식 (2-9)에 항복함수 $f=3/2\hat{\sigma}'\hat{\sigma}'-\sigma_Y^2(\hat{\sigma}=\sigma-\alpha)$를 대입하면 이동경화 탄소성체에 대한 구성식이 얻어진다.

$$\bar{s}=\left(D^e-\frac{2\beta G}{\hat{g}}\hat{\sigma}'\hat{\sigma}'\right)\bar{d}$$

$$\hat{g}=\frac{2}{3}\sigma_Y^2(1+\frac{\hat{h}}{2G}) \tag{4.19}$$

항복곡면의 중심위치를 결정하는 방법으로 Ziegler는 항복곡면의 중심의 이동은 현 응력점과 항복곡면의 중심을 연결하는 방향과 일치한다고 가정하여 항복곡면 중심의 이동량을 결정하였다.

Collection @ kmou

$$\bar{\alpha} = \mu\hat{\sigma}, v > 0$$

$$v = (\frac{3}{2}\bar{s} \cdot \hat{\sigma}')/\sigma_Y^2 \tag{4.20}$$

가공경화 파라미터 $\hat{h}$를 구하기 위해서는 식 (4.18)에서 진응력 σ에 대응하는 양으로 식 (2-14)에 대입하면 된다.

$$\sigma = \sigma_Y + \bar{\alpha}$$

$$\bar{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}\alpha' \cdot \alpha'} \tag{4.21}$$

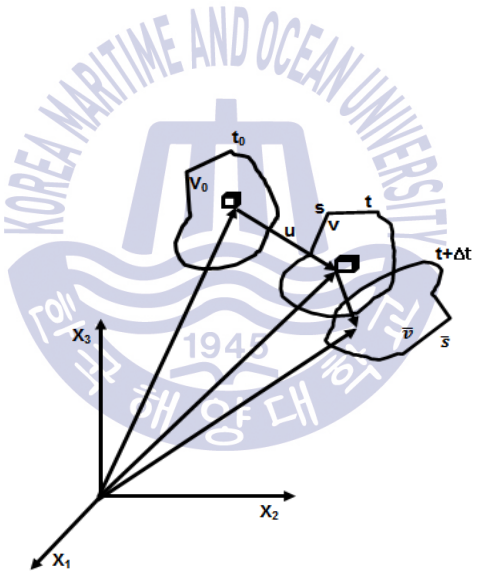

Fig. 10 Convected coordinate system in the deformation process

Collection @ kmou

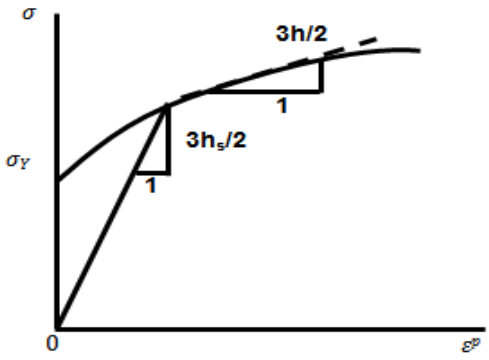

Fig. 11 Slope of tangent and chord line in true stress-strain curve

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

Collection @ kmou

4.2 기구부 유한요소 해석

본 절에서는 진회수장치의 자중 및 수중예인체의 무게를 견딜 수 있는 진회수장치 기구부의 두께 및 안정성을 평가하기 위해 정적해석을 수행하였다. 기구부의 정적 해석을 통해 수중예인체를 운용할 때의 변위와 응력 분포를 유한요소 해석함으로써 최적의 두께선정 및 안정성을 평가할 수 있다.

4.2.1 기구부 모델링과 경계조건

해석을 위하여 설계된 진회수장치의 기구부 3D 모델링은 Fig. 1 과 같다. 길이 2200mm, 폭 620mm, 높이 420mm 의 링크 구조물이다. 진회수장치 기구부의 접촉정의 설정과 격자생성, 경계조건을 적용한 그림은 Fig. 1 과 같다. 생성된 격자의 세부 사항은 Table 1과 같다. 진회수장치 기구부의 바닥면은 모든 병진 및 회전자유도를 구속하며, 수중예인체와의 접촉부에 수중예인체의 무게(45kgf)가 Uniform Distributed Load 로 작용한다. Table 1 은 기구부의 재질인 알루미늄 합금 6061-T6의 물성치이다(ASME, 2013).

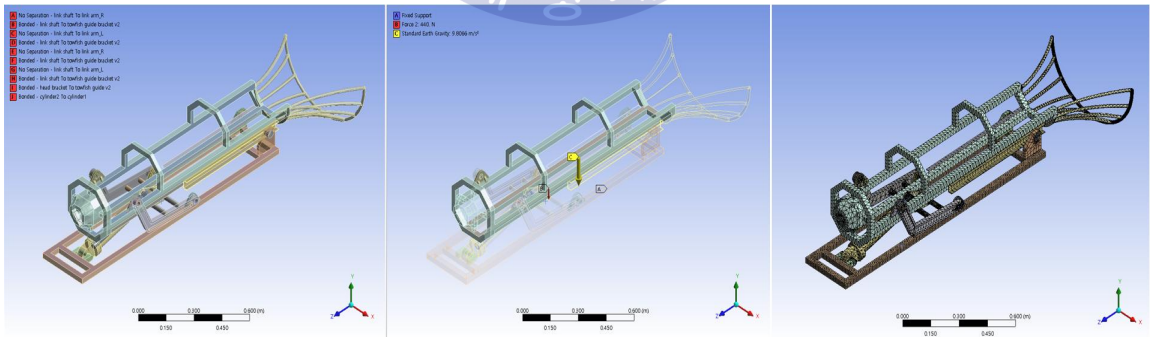

Fig. 12 Contact condition, boundary condition and FE modeling

Collection @ kmou

Table 3 Condition of mesh

Object Name	Mesh
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	2.e-002 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Minimum Edge Length	3.e-003 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	172833
Elements	72517
Mesh Metric	None

Collection @ kmou

Table 4 Material property of aluminum alloy 6061-T6

Property	Value
Modulus of Elasticity	69GPa
Poisson's Ratio	0.33
Allowable stress	121MPa

4.2.2 기구부 유한요소 해석 결과

정적해석은 변위와 Von mises stress를 구하여 안정성을 평가하였다. Fig. 1 은 변위에 대한 해석결과 이다. Fig. 1 은 변형스케일은 20배로 과장하여 어떻게 변형되는지 볼 수 있도록 표현하였다. 최대 변위는 1.4721mm로 진회수장치의 Head 부위에서 수직방향의 최대변위를 확인하였다.

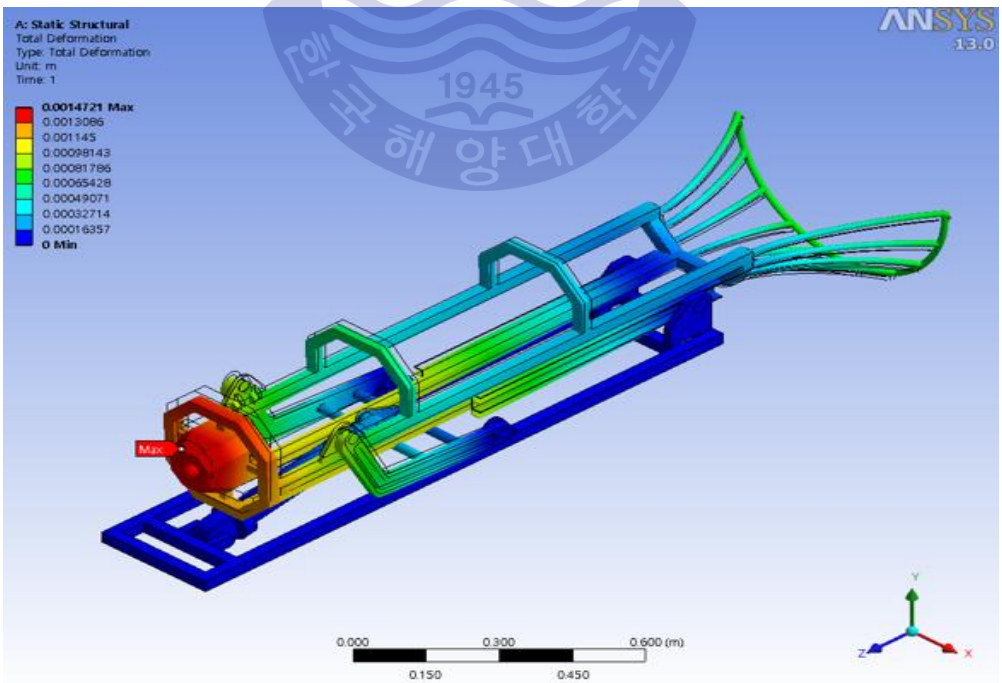

Fig. 13 Distribution of total deformation

Collection @ kmou

Fig. 1. 은 Von mises stress에 대한 해석결과이다. 해석의 세부 결과는 Table 1 과 같다. 알루미늄 합금 6061-T6의 허용 응력은 121MPa이다. 이는 물체에 가해지는 최대응력인 47.97MPa보다 큰 값이므로 안전하다고 판단할 수 있다.

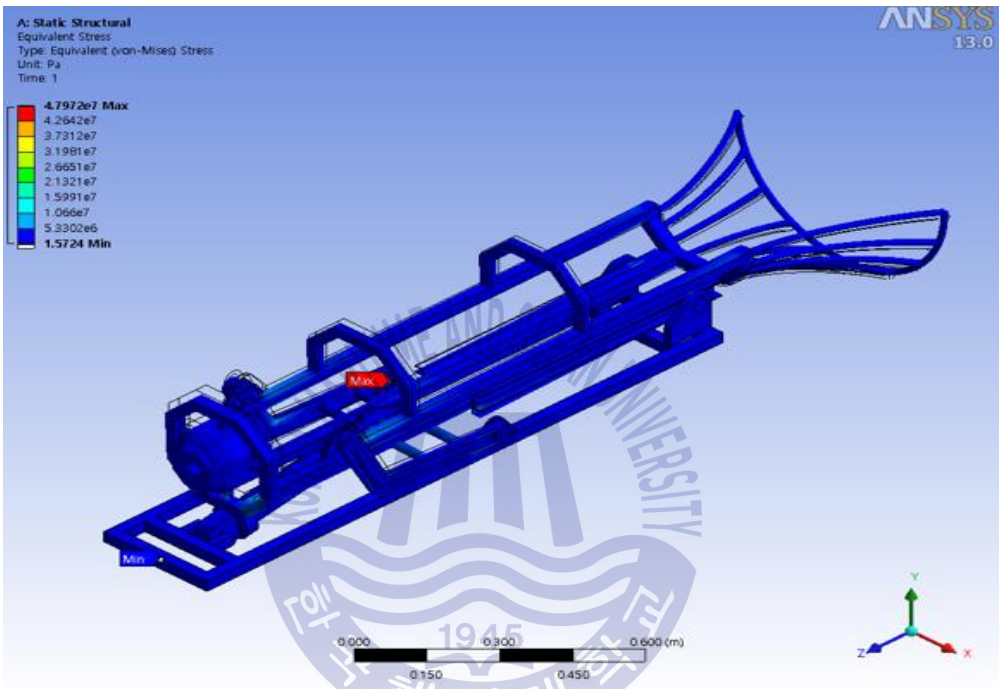

Fig. 14 Distribution of von mises stress

Table 5 Results of finite element analysis

Object Name	Equivalent Stress
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
Results	
Minimum	1.5724 Pa
Maximum	4.7972e+007 Pa
Minimum Occurs On	lars main frame
Maximum Occurs On	link shaft

Collection @ kmou

제 5 장 무인수상정의 LARS 기구학 시뮬레이션

앞서 설계한 LARS는 링크 결합 구조로 이루어져 있으며, 하나의 구동부로 슬라이딩과 틸팅 모션을 동시에 구현 가능하다. 이러한 링크 결합 구조의 운동에 있어 사점이 발생할 수 있으며 그 경우 더 이상의 운동이 불가능하다. 그렇기 때문에 링크 결합 구조에서의 사점 회피는 아주 중요한 요소이다. 사점회피를 검토한 뒤, 관절운동과 직선운동 간의 기구학적 관계를 해석하고 이를 바탕으로 기구학 시뮬레이션을 수행하였다.

5.1 사점(Dead point)

사점이란 링크 결합 구조에서 링크가 운동하는 중에 각 링크가 일직선이 되어 구동부에서 발생하는 힘이 힘의 방향을 따라 아무리 힘을 가해도 링크가 움직이지 않는 위치를 말한다.

예를 들어 Fig. 15에서 링크 AB와 측면 링크가 결합된 링크 BC가 B_1-C_1, 또는 B_2-C_2 와 같이 일직선상에 정렬되면, AB링크에 작용하는 토크로는 운동이 가능하지만, 다른쪽의 링크 CD에 작용하는 토크로는 링크 AB에 회전을 유도할 수 없다. 따라서 이 링크는 B_1-C_1, 또는 B_2-C_2 와 같은 상황에서 사점에 있다고 할 수 있다.

LARS를 설계함에 있어 이러한 사점을 회피하기 위해 링크가 일직선상에 놓이는 구조를 피해야 하며 이를 확인하기 위하여 2D상에서의 링크 결합 구성을 확인할 수 있다. LARS의 링크 결합 구성은 Fig. 16과 같으며 링크 구조에서 사점이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

Collection @ kmou

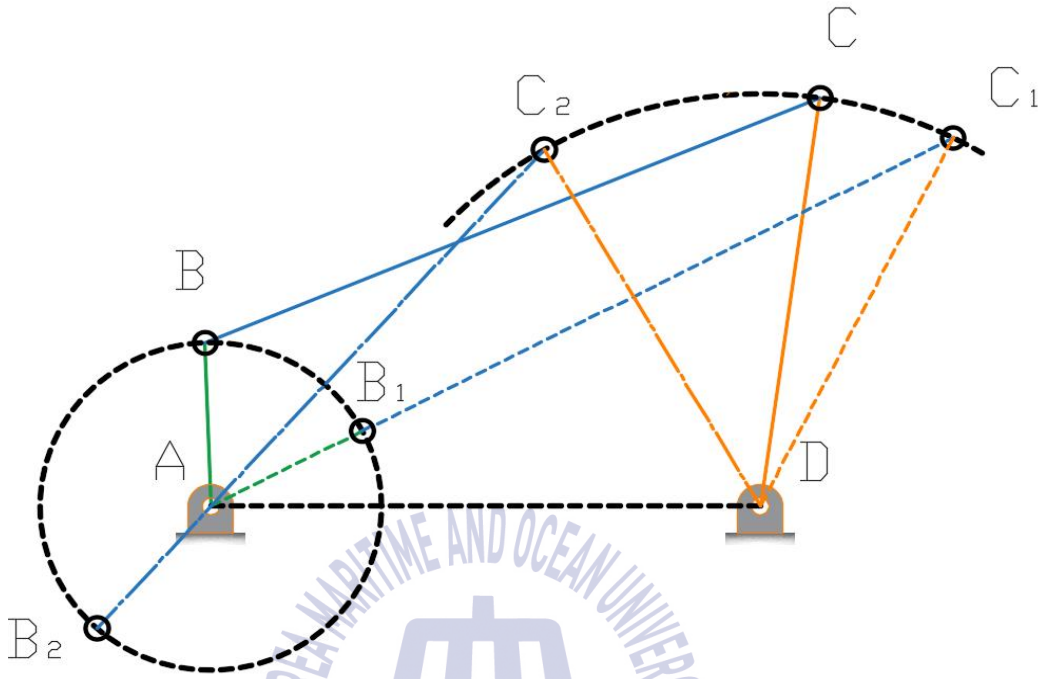

Fig. 15 Dead Point

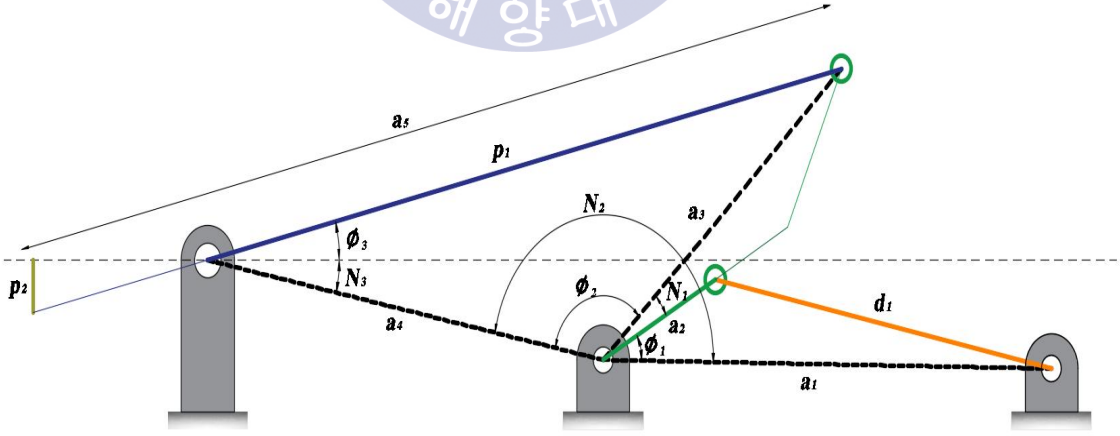

Fig. 16 Link Structure of LARS

Collection @ kmou

5.2 LARS 링크 간의 관계식

본 연구에서 개발된 LARS는 하나의 리니어 엑츄에이터의 구동에 의해 직선 및 회전운동이 이루어진다. 기존의 링크 구조물들은 구동모터가 회전관절에 직결되어 있어 역학식이 회전운동 공간에서 표현되었으나, 개발된 LARS는 리니어 엑츄에이터에 모터가 직결되어 구동하므로 직선운동 공간에서 역학식이 표현되는 것이 바람직하다. 이를 위해 사절링크로 관계되는 링크 결합의 회전운동과 직선운동 간의 관계를 해석하였다.

LARS의 각 링크의 회전각과 리니어 엑츄에이터의 관계는 Fig. 16과 같이 표현될 수 있으며, p_2은 LARS의 진수 깊이, ϕ_3는 진수 각도이다. 여기서 N_i은 기구부 설계에 의해 정해진 고정각이며 a_i는 고정된 링크 길이이다. d_1은 리니어 엑츄에이터의 직선운동 변위이며, L자형 링크의 각을 결정하는 ϕ_1은 코사인 법칙을 사용하여 식 (5.1)과 같다.

$$a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2\cos\phi_1 = d_1^2 \tag{5.1}$$

식 (5.1)을 통해 직선운동 변위 d_1에 대한 ϕ_1을 알 수 있다. 진수각 ϕ_3를 결정하는 ϕ_2는 식 (5.2)와 같고 식 (5.3)(5.4)(5.5)(5.6)을 통해 진수각을 결정할 수 있다.

$$\phi_2 = N_2 - N_1 - \phi_1 \tag{5.2}$$

$$\cos\phi_2 = \frac{a_3^2 + a_4^2 - p_1^2}{2a_3a_4} \tag{5.3}$$

$$p_1 = \sqrt{a_3^2 + a_4^2 - 2a_3a_4\cos\phi_2} \tag{5.4}$$

$$\cos(\phi_3 + N_3) = \frac{a_4^2 + p_1^2 - a_3^2}{2a_4p_1} \tag{5.5}$$

$$\phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{a_4^2 + p_1^2 - a_3^2}{2a_4p_1}\right) - N_3 \tag{5.6}$$

Collection @ kmou

LARS의 진수 깊이 p_2는 식 (5.7)과 같다.

$$p_2 = \sin\phi_3(a_5 - p_1) \tag{5.7}$$

진수 각도 및 진수 깊이를 결정하는 링크각ϕ_2의 각속도$\dot{\phi}_2$과 링크의 회전을 결정하는 ϕ_1의 속도 관계는 다음과 같다.

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1 \tag{5.8}$$

위 식을 식 (5.1)을 이용하여 1차 및 2차 미분을 하면 다음과 같이 ϕ_2와 d_1의 속도 및 가속도의 관계를 정리할 수 있다.

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1 = \frac{1}{a_1 a_2 \sin\phi_1}\dot{d}_1 \tag{5.9}$$

$$\ddot{\phi}_2 = \ddot{\phi}_1 = \frac{-\cos\phi_1}{a_1 a_2 \sin^2\phi_1}\dot{d}_1 + \frac{1}{a_1 a_2 \sin\phi_1}\ddot{d}_1 \tag{5.10}$$

진수량을 결정하는 p_1은 식 (5.3)을 이용하여 1차 및 2차 미분을 통해 p_1과 d_1의 위치 및 속도 관계를 정리할 수 있다.

$$p_1 = a_3 a_4 \cos\phi_2 \frac{1}{a_1 a_2 \sin\phi_1}\dot{d}_1 \tag{5.11}$$

$$\dot{p}_1 = a_3 a_4 \left(-\sin\phi_2 \frac{1}{a_1^2 a_2^2 \sin^2\phi_1}\dot{d}_1^2 + \frac{-\cos\phi_1\cos\phi_2}{a_1 a_2 \sin^2\phi_1}\dot{d}_1 + \frac{\cos\phi_2}{a_1 a_2 \sin\phi_1}\ddot{d}_1\right) \tag{5.12}$$

5.3 LARS 링크 간의 관계식

앞에서 연구한 사점 회피 및 링크간의 관계식을 적용하여 기구학 시뮬레이션을 수행하였다. 3D 모델링을 바탕으로 Solidworks를 사용하여 기구학 시뮬레이션을 진행하였다. 기구학 시뮬레이션을 수행하여 사점 회피 및 링크간의 관계식의 검증 하였다. 리니어 엑츄에이터의 구동속도는 v=70[mm/sec], 전개각도 ϕ=30°를 인가하였다. 시뮬레이션은 11초간 수행하여 진회수 각도(Launch&recovery angle), 리니어 엑츄

Collection @ kmou

에이터 변위(Linear actuator displacement), 진회수 각속도(Angular velocity), 리니어 엑츄에이터 변위에 따른 진회수 각도 및 리니어 엑츄에이터 추력(Linear actuator thrust force), 리니어 엑츄에이터 속도(Linear velocity)의 결과를 Fig. 17 ~18dp 나타내었다.

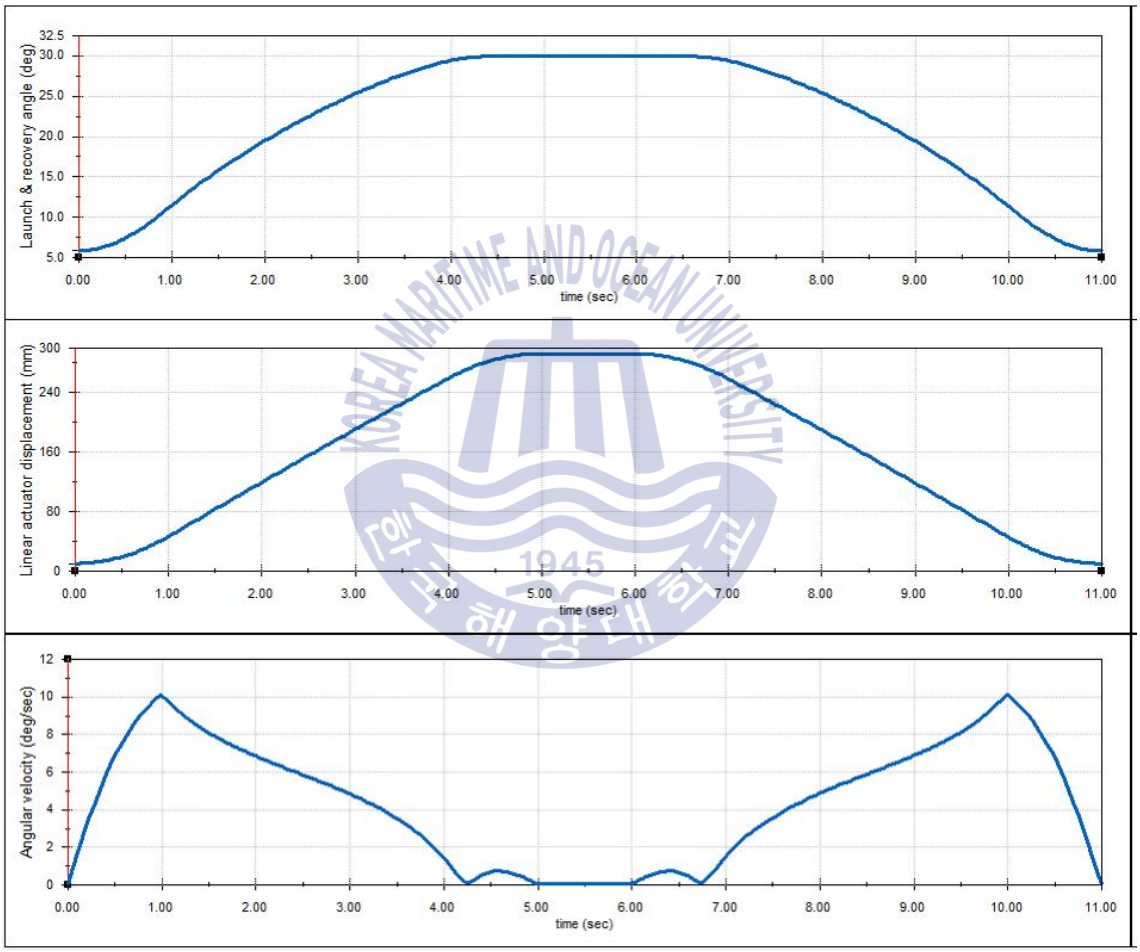

Fig. 17 Kinematics Simulation of LARS-angle, displacement, angular velocity

Collection @ kmou

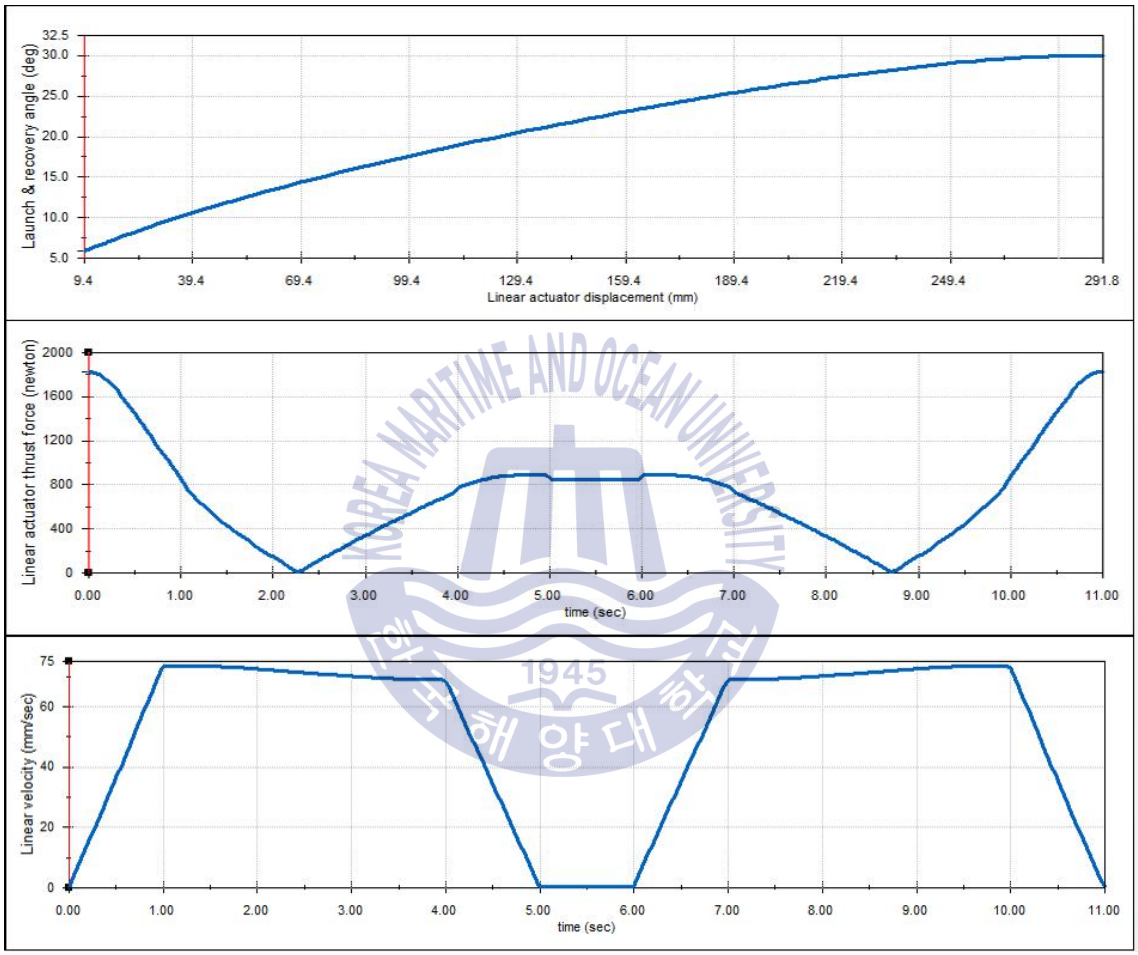

Fig. 18 Simulation result - angle, thrust force, linear velocity

Collection @ kmou

제 6 장 무인수상정의 역학해석 및 LARS 모션 시뮬레이션

6.1 무인수상정의 역학해석

LARS를 활용하는 임무 수행에 있어 USV의 운동에 따른 외란에 대한 안정성 판단이 고려되어야 한다. 본 연구의 LARS를 적용하는 USV는 운항 조건을 해상상태 3으로 하고 있으므로 이에 대한 안정화를 위해 최고 운항속도 및 해상상태에 따른 파도의 영향에 의해 USV에 인가되는 외란의 특성을 파악하고 그것이 LARS에 미치는 영향을 분석하여야 한다. 이를 위해 해상상태3에 대한 해수면 정보를 생성하고, 이에 의한 USV의 운동을 추정하였으며, 그것이 LARS에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다.

6.1.1 해상상태 3의 해수면 정보 생성

선형파이론을 이용한 파랑들의 합성을 통하여 해수면 정보를 생성하는 것으로 실제 바다를 시뮬레이션으로 모사할 수 있다. 해상상태에 대한 해수면의 표현을 선형파이론에서는 식 (6.1)와 같이 다양한 주파수를 지닌 파랑들의 선형중첩으로 나타낼 수 있다(박재한 등, 2016).

$$\varsigma = \sum_{i=1}^{\infty} A_i sin(\omega_i t - k_i x cos(\theta_i(t)) - k_i y sin(\theta_i(t)) + \varepsilon_i(t)) \tag{6.1}$$

A_i는 $i-$번째 파랑에 대한 진폭의 크기, ω_i는 각주파수, k_i는 파수(wave number)를, θ_i및 ε_i는 파랑의 방향과 위상을 각각 나타낸다. 그리고 일반적으로 θ_i와 ε_i는 0과 2π사이에 분포하는 랜덤변수로 모델링한다.

식 (6.2)의 레일리분포(Rayleigh distribution)에 의해 랜덤한 해수면의 분포에 대한 파고 H를 근사적으로 모델링 할 수 있다.

Collection @ kmou

$$f(H) = \frac{H}{4m_0} \cdot \quad e^{-\frac{H^2}{8m_0}} \tag{6.2}$$

$$H_m = \int_0^\infty H f(H) dh = \sqrt{2\pi m_0} \tag{6.3}$$

여기서 m_0는 평균파고(mean height)와 관련된 파라미터이다.

유의파고(significant wave height)는 해상상태와 관련하여 매우 중요한 파라미터의 하나로, 이는 식 (6.4)에 표현된 바와 같이 특정 시간주기 내에서 일어나는 모든 파고 중 가장 높은 3분의 1에 해당하는 파고의 평균높이를 의미한다.

$$H_{\frac{1}{3}} = \int_{H_0}^\infty H f(H) dh \tag{6.4}$$

여기서 H_0는 다음과 같이 정의된다.

$$\int_{H_0}^\infty f(H) dh = \frac{1}{3} \tag{6.5}$$

또한 파랑 스펙트럼(wave spectrum)이라는 해수면 모델링과 관련된 또 다른 중요한 요소가 있다. 이는 해수면을 이루는 파랑에 대해 주파수 영역의 에너지 분포를 나타내며, 피어슨-모스코비츠 등의 수학적 모델이 제시되어 있다. 피어슨-모스코비츠 스펙트럼 모델은 식 (6.6)과 같다.

$$S(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-\frac{0.0323 \times g^2}{H_{\frac{1}{3}}^2 \times \omega^4}} \tag{6.6}$$

Collection @ kmou

6.1.2 해상상태 3 시뮬레이션

해상상태를 구분하는 주요 정보로서 주요주기번위, 평균주기 및 풍속, 유의파고 등과 같은 파라미터들이 있다. Table 1은 피어슨-모스코비츠 스펙트럼 모델에 대한 해상상태 3의 특성정보를 제시한다.

선형파이론에 의해 해수면 정보를 생성하기 위해서는 파랑스펙트럼에서 합성할 파랑들을 주파수별로 샘플링하는 것이 선행되어야 하다. Table 1에 따르면 해상상태 3에서 유의파고는 4피트 이므로 먼저 식 (6.6)을 통하여 파랑 스펙트럼 분포를 생성했다. 다음으로 해상상태 3의 주요 주기범위인 2~7[sec]의 정보를 이용해 주파수 영역에서 이 구간에 해단되는 0.8975~3.1415[rad/sec] 범위에서 $\omega_1 \sim \omega_{30}$에 해당하는 30개의 파랑들을 균등하게 샘플링했다. Fig. 1은 해상상태 3에 대한 피어슨-모스코비츠 스펙트럼 분포와 30개의 샘플링된 파랑들을 각각 나타내고 있다.

해수면 정보를 생성하기 위한 식 (6.1)에서 샘플링된 ω_i의 파랑에 대한 진폭A_i는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_i = \sqrt{2S(\omega_i) \cdot \quad \triangle\omega} \tag{6.7}$$

또한 $i-$번째 파랑의 파수 k_i는 그에 해당되는 ω_i에 대하여 다음과 같다.

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} = \frac{\omega_i^2}{g} \tag{6.8}$$

Table 6 Characteristics data for sea state 3

significant wave height(Ft.)	significant range of periods (sec)	average period (sec)	wind speed (Knots)
4	2~7	4	15

Collection @ kmou

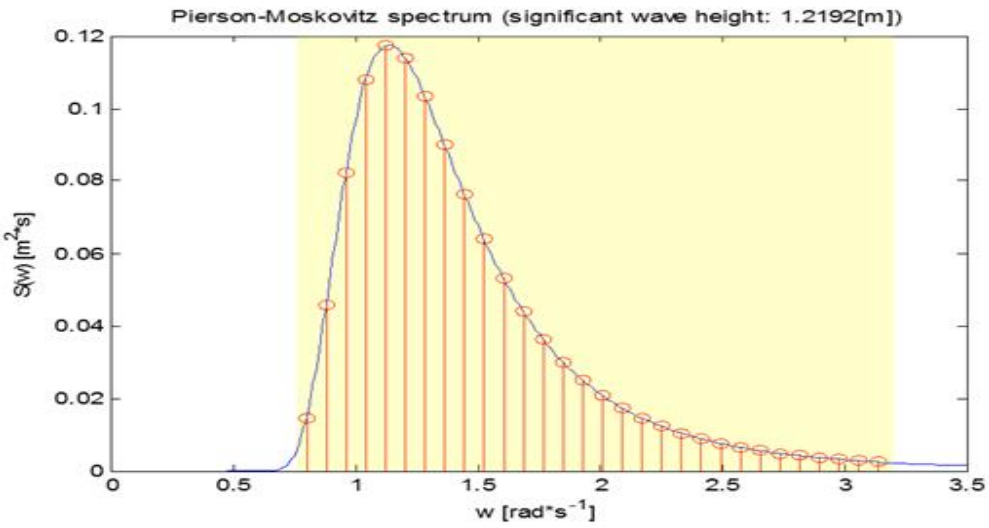

Fig. 19 Wave spectrum curve for sea state 3

6.1.3 USV의 자세 추정

USV를 포함한 모든 선박은 해상에서 6자유도의 운동을 가진다. 이중 3가지 성분은 위치에 대한 운동을 나타내며, 다른 3가지는 방향에 대한 운동을 나타낸다. Fig. 2에서와 같이 배의 운동에서 위치에 대한 운동은 Surge, Sway, Heave 로 정의되고, 방향에 대한 운동은 Roll, Pitch, Yaw에 대한 운동으로 정의된다.

USV의 운용에 있어 해상상태에 의한 외란으로 작용하는 성분은 위치와 관련한 Heave와 방향에 대한 Roll, Pitch 운동이므로 해수면에 대하여 이 세 가지 운동 성분을 추정하였다. 반응표면법을 이용하여 해수면에 대한 USV의 위치, 방향에 대한 자세추정을 실시하였다. 반응표면법을 위해서는 유한개의 측정점이 요구되는데 해수면에 의해 USV에 부력이 작용하는 점을 타원으로 근사화하여 측정점을 선정하였다. 테스트를 수행할 USV의 길이를 6m, 폭은 3m로 가정하였다.

반응표면법에 의한 USV의 자세추정은 다음 과정을 통해 수행된다. 앞서 근사화한 타원의 24개 측정점에 대하여 식 (6.1)를 통해 해수면 정보를 계산한다. 다음으로 최소제곱법을 이용하여 측정점과 그에 대한 해수면 정보에 접하는 평면방정식을 구하게 되는데 이때 측정정보의 무게중심은 USV의 추정된 위치 정보가 되고 평면의 법선 벡터 정보를 이용하여 USV의 Roll, Pitch 방향을 추정할 수 있다.

Collection @ kmou

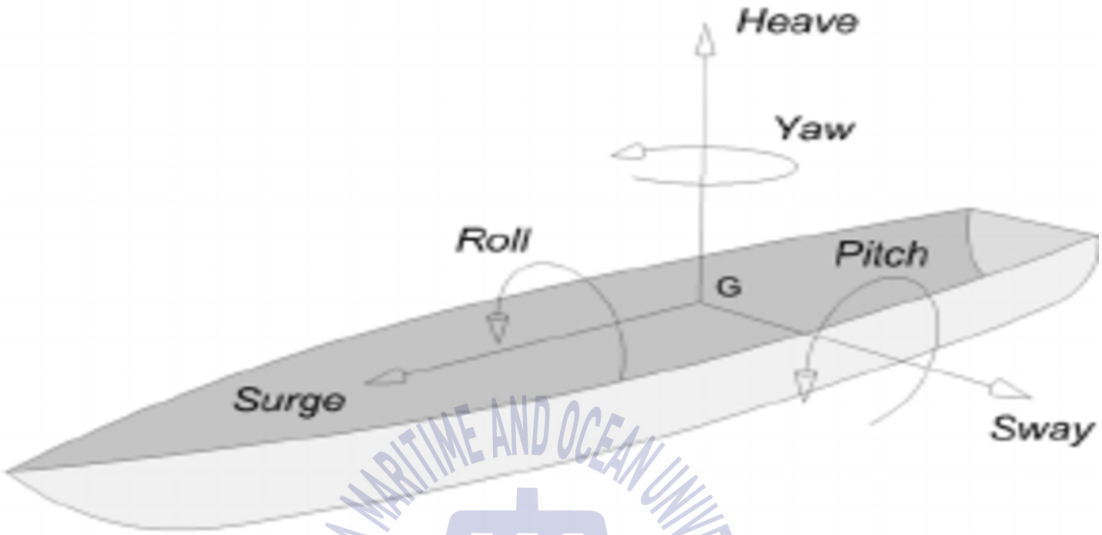

Fig. 20 6 Degree of Freedom of Ship

6.1.4 해상상태 3에서의 USV 시뮬레이션

해상상태 3의 조건에서 USV 운행 시 발생되는 특성을 파악하기 위해 목표 운행속도인 30[Knots]의 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 60초간 수행하여 Heave 및 Roll, Pitch 정보를 수집하였으며 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

Collection @ kmou

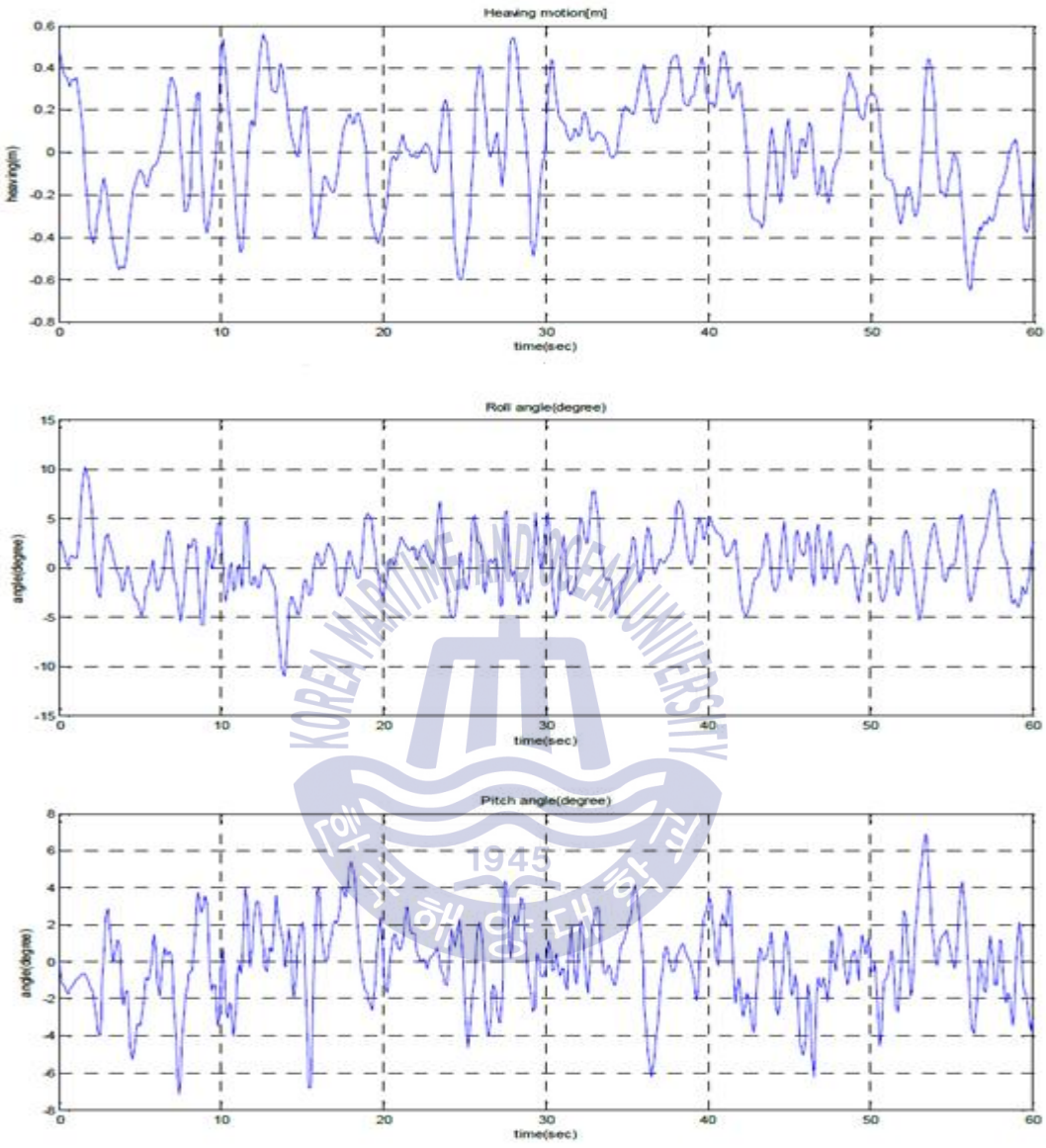

Fig. 21 Estimation results for heave, roll, pitch

Collection @ kmou

6.2 LARS의 모션 시뮬레이션

시뮬레이션을 통해 수집한 Heave 및 Roll, Pitch 정보를 이용하여 USV 운행 시 발생되는 LARS의 거동 특성을 파악하기 위해 Solidworks를 이용한 모션 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 22와 같이 무인수상정의 좌표계를 설정하였으며, USV의 흘수 높이는 623[mm], 후방 750[mm]에 위치하고 있다. Fig. 23은 해상상태3에서 목표 운용 속도인 6[knots]로 운항할때의 무인수상정의 운용을 시뮬레이션한 결과로서, 10초간의 롤링, 피칭, 히빙 움직임의 결과값을 그래프로 나타내었다.

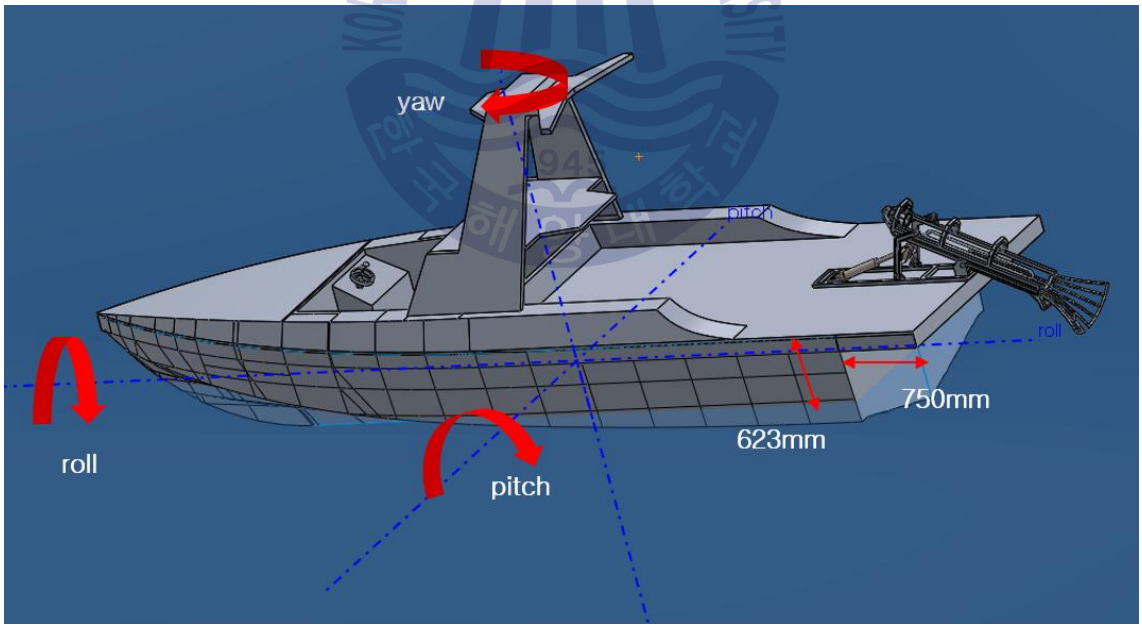

Fig. 22 Coordinate of USV

Collection @ kmou

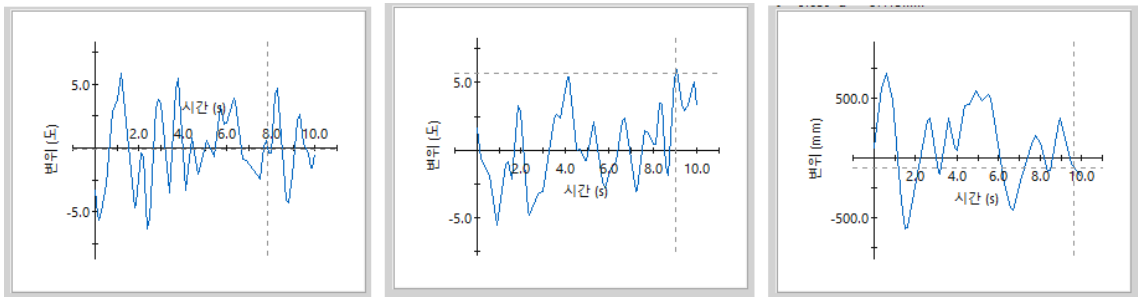

Fig. 23 Rolling, pitching, heaving date of USV

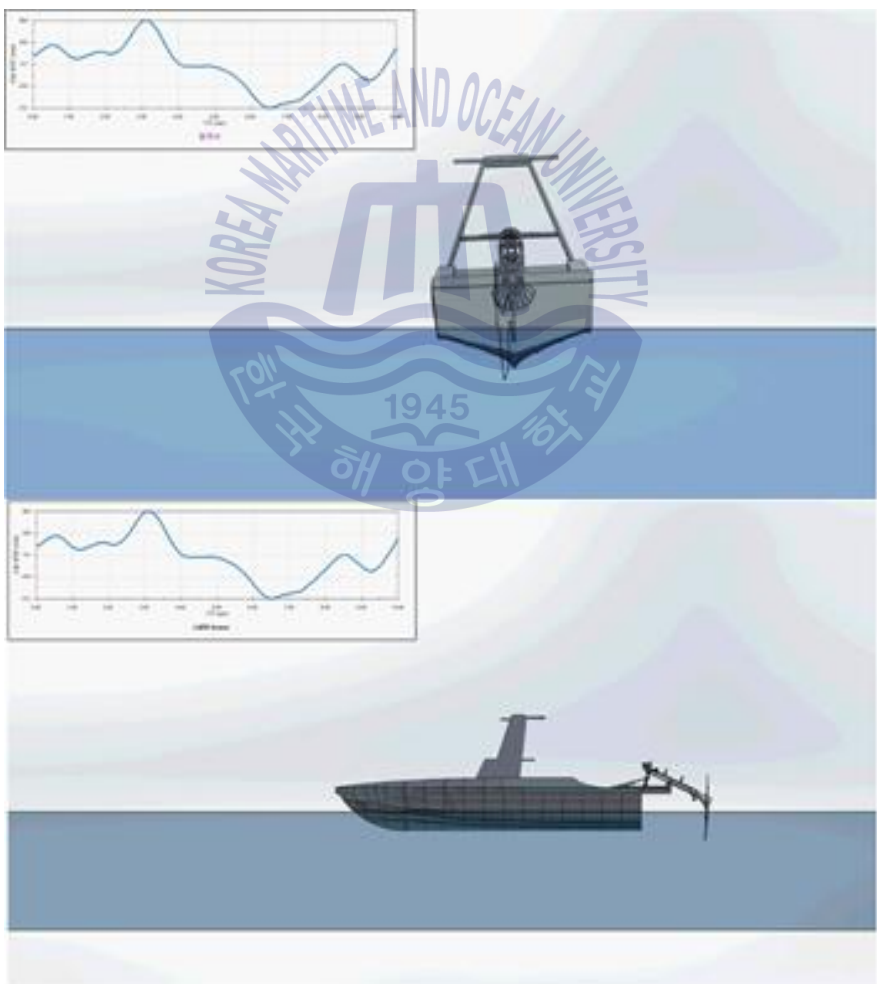

Fig. 24 Motion simulation of LARS

Collection @ kmou

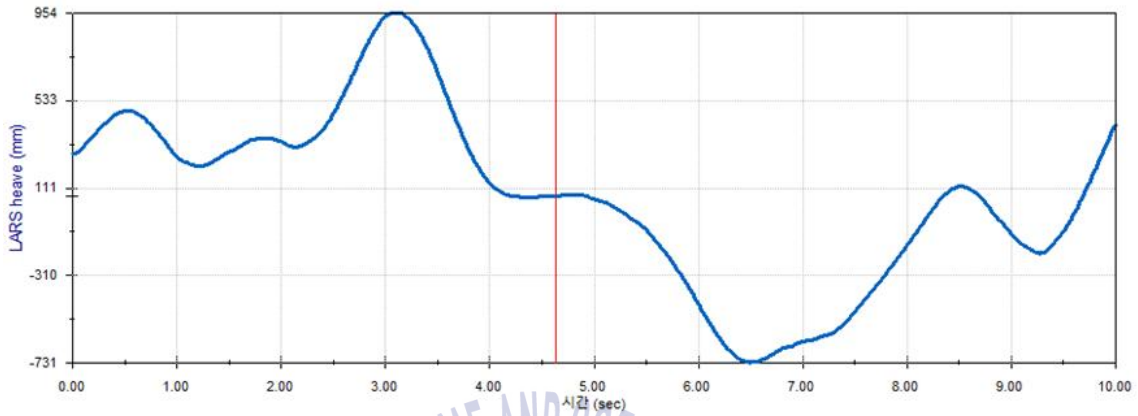

Fig. 25 Height difference of LARS and sea surface

Solidworks를 이용하여 해상상태3에서 6[knots]의 속도로 운항하는 무인수상정에 대한 모션 시뮬레이션을 수행하였고 Fig. 24는 그 결과이다. 모션 시뮬레이션은 10초간 수행하였으며 Fig. 25는 해상상태3에서 6[knots]로 무인수상정이 운항할 때 그 뒤에 설치되어 있는 LARS의 진수모드에서의 끝점과 수면과의 높이 차를 나타낸 것이다. 이러한 모션 시뮬레이션으로 수중예인체를 진수 및 회수할 때 얼마나 안정적으로 진회수를 할 수 있는지 알 수 있다.

수중예인체의 원활한 진수 및 회수를 위해서는 LARS의 끝단이 항상 물에 잠겨 있을 필요가 있으며 그러한 조건을 만족하는지 모션 시뮬레이션을 통해 알아볼 수 있다.

본 연구에서의 시뮬레이션은 해상상태3에서의 무인수상정이 운항할때의 LARS의 거동을 파악하였고 해수면과의 높이차를 분석하였다. 하지만 향후 단순 해수면과의 높이차가 아닌 해상상태3의 실시간으로 변화하는 해수면과의 높이차를 분석할 필요가 있다.

Collection @ kmou

제 7 장 결론

본 연구에서는 무인수상정이 자동으로 Side Scan Sonar와 같은 수중탐색장비를 진수·회수하기위한 필수장비인 LARS의 운용개념을 제시하였고, LARS를 개발하기 위한 요구사항들을 분석하였으며, 그에 따른 최적의 메커니즘을 설계하고 LARS를 설계하였다. 그리고 설계한 LARS에 대한 강도해석을 수행하였으며, 기구학 시뮬레이션 및 무인수상정의 역학해석, LARS의 모션 시뮬레이션을 수행하였다.

수중예인체를 무인수상정에서 자율적으로 전개-회수하기 위해서는 USV 및 수중예인체의 제원, 정-동역학적, 기구학적, 운용의 측면에서의 요구사항 분석이 필요하며 이에 따른 요구사항을 분석하였다.

분석된 각각의 요구사항에 따라 크기, 무게, 자세 안정성 등을 고려하여 Gantry Unit과 A frame결합 방식의 구동 메커니즘을 설계하고 그에 따른 진회수장치를 설계하였다.

진회수장치의 운용을 위해서는 진회수장치를 구동시키는 엑츄에이터의 구동력을 산출하여 적합한 엑츄에이터를 선정하여야 한다. 이를 위해 정역학적인 구동력과 시뮬레이션을 통한 구동력을 산출하였으며, 정역학적 구동력은 진회수시 최대 힘이 필요한 지점에서의 구동력을 산출하였다. 정역학적으로 계산된 구동력은 2374N이며, 시뮬레이션을 통해 산출한 구동력은 2563N이다. 두 값의 유사성에서 신뢰성을 확인할 수 있으며, 해상상태3 에서의 USV 모션 및 안전율을 고려하여 6000N급의 엑츄에이터를 선정하였다.

선정된 메커니즘에 따른 LARS를 설계하였고, 이에 대한 유한요소해석을 통한 기구부의 응력해석을 수행하였으며, 그 안정성을 확인하였다. 또한 설계한 LARS에 대해 사점 발생 및 안정적 기구부 운용을 확인하기 위하여 링크간 관계 해석 및 기구학 시뮬레이션을 수행하였다. 리니어 엑츄에이터의 제어에 따른 LARS의 진수 각도와 진수 깊이의 관계를 해석하고, 여기에 LARS의 기구학적 운동을 시뮬레이션하여 그에 따른 위치 및 속도,

Collection @ kmou

가속도를 계산하여 수집함으로써 LARS의 특성을 추정할 수 있었다. 5[sec] 동안 진수 각도인 30[deg]까지 진수와 회수를 각각 수행하며, 이때 리니어 엑츄에이터의 속도는 70[mm/sec]이다. 리니어 엑츄에이터의 가감속 시간은 1[sec]로 설정하였다. 리니어 엑츄에이터의 총 행정길이는 300mm 이며, 진회수 중의 최고 각속도는 10[deg/sec]로 1[sec], 10[sec]에서 확인되었다. 수행한 시뮬레이션을 통해 추정한 특성은 LARS의 운용 및 설계 시 반영되어야 할 중요한 정보이다.

해상상태3에서의 원활한 진회수를 위하여 해상상태3에서의 무인수상정의 역학해석을 수행하였으며, 그에 따른 무인수상정 및 LARS의 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 해상상태3에서 목표 운용 속도인 6[knots]로 운항할때의 무인수상정의 운용을 시뮬레이션 하였으며, 결과로서 10초간의 롤링, 피칭, 히빙 특성을 파악하였다. 이때 롤링, 피칭은 각각 최대 5[deg]의 변화를 확인하였으며, 히빙은 위 아래 각 600[mm]씩, 최대 1.2[m]의 변화를 보였다. LARS는 무인수상정 선미에 위치하므로, 무인수상정의 모션 시뮬레이션 결과로부터 LARS의 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 진수의 경우 자가진수 방식을 취하고 있으며 이는 앞서 설명한 진수각도와 재질에 따른 마찰계수로부터 진수여부를 판별할 수 있다. 회수의 경우는 무인수상정-LARS-수중예인체 간의 모션 시뮬레이션으로 그 여부를 확인할 수 있다. 무인수상정의 흘수 높이는 623[mm]이며, LARS는 후방 750[mm] 지점에 위치한다. 예인윈치의 회수 속도는 100[mm/sec]이며, 모션 시뮬레이션을 통해 회수의 원활함을 확인하였다.

Collection @ kmou

참고문헌

박재한, 장가람, 신용득, 백문홍 (2016). “해상상태 3에서의 USV 운행 시 진동 특성 분석”, 한국수중수상로봇기술연구회 2016년 춘계학술대회, pp.B2-1-1-B2-1-4

J.E. Manley (2008). “Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development”, Proc. MTS/IEEE Oceans 2008, Quebec City, Canada.

Volker Bertram (2008). “Unmanned surface vehicles-a survey”, Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark.

Ru-jian Yan, Shuo Pang, Han-bing Sun, and Yong-jie Pang (2010). “Development and Missions of Unmanned Surface Vehicle”, Journal of Marine Science and Application, Vol. 9, No. 4, pp. 451-457.

Mahacek, Paul, Christopher A. Kitts, and Ignacio Mas (2012). “Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets“, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions, Vol. 17, No. 1, pp. 65-75.

M. Eriksson, P. Ringman (2013). “Launch and Recovery System for Unmanned Vehicles Onboard Ships. A Study and Initial Concepts”, Master thesis, KTH.

Edoardo Sarda, Manhar Dhanak, and Karl von Ellenrieder (2014) “Concept for a USV-based Autonomous Launch and Recovery System”, in Proc. Launch and Recovery 2014, Baltimore, USA.

D.B. Nicklas (2015). “Development of Overhead Launch and Recovery System”, Master thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.

L. McLaunchlan, “Simulation and Control of an Unmanned Surface Vehicle”, in Proc. 121st ASEE Annual Conference & Exposition 2014, indianapolis, USA, 2014.

Collection @ kmou