

航海中 船舶 積載貨物의 動的 安全性 評價에 관한 研究

김 철 승¹⁾, 金 順 甲²⁾

On the Evaluation of the Dynamic Safety of the Ship's Cargo at Sea

Chol-Seong Kim , Soon-Kap Kim

Abstract

One of the most important missions that are imposed on merchant ship at sea is to accomplish the safe transportation of cargo loaded. Until now, however, there has not been any method of quantitative evaluation on the dynamic safety of the ship's cargo loaded. In this regards, this paper has introduced the evaluation method of dynamic safety of the ship's cargo.

In order to evaluate the dynamic safety of cargo, the vertical and lateral acceleration which causes the collapse, racking and local structure failure of cargo was adopted as the evaluation factors in the ship's motions.

A representative dangerous factor was determined by comparing permissible values of stacking and racking forces occurred typically to the vertical and transverse directions with the container strength required on ISO 1496 at the positions of forecastle, poop and ship's midship respectively.

1) 한국해양대학교 해사수송과학과 석사과정 산업공학 전공

2) 한국해양대학교 해사수송과학부 교수

Through the occurrence probability of the determined factor by Rayleigh's probability density function, the dangerousness which limits loads on container's side wall as an evaluation was applied in judging of the danger of the ship's cargo loaded.

1. 서론

대양을 항해하는 선박에 부여되는 임무는 불규칙한 해상에서 바람, 파랑 등의 외력에 대응하여 선체, 화물 및 인명의 안전을 확보하며 선박을 운항하여 항해의 목적을 달성하는 것이라고 할 수 있다. 적재화물의 현재 상태와 다가올 미래 해상에 대한 화물의 안전 여부를 미리 예측하여 고도의 안전성을 가지고 최적의 항로와 속력을 택하여 가장 경제적인 해상수송을 하기 위하여는 각 위치에 적재된 화물의 동적 거동을 정확히 파악함과 더불어 황천과 조우시에 선박운항자가 객관적이고도 정량적인 방법으로 적재화물의 동적 안전성을 파악할 수 있는 평가방법의 개발이 요구되어진다.

본 연구에서는 항해중 동적 하중으로 인한 화물의 손상과 밀접한 관련이 있는 전 화물선 중에서 화물이 규격화되어 있어 선박 각 위치에서 화물의 동적 거동을 용이하게 비교할 수 있는 컨테이너선을 채택하여 화물의 동적 안전성 평가를 실시해 보고자 한다.

2. 화물의 동적 안전성 평가 요소

2.1 동적 안전성 평가 요소의 채택

선체운동에 관련된 연구결과로써 선박의 초기 설계 단계에서 많이 응용되고 있으며 선박구조물과 탑재기기의 취부강도 및 성능을 파악하여 선박의 항행한계를 결정할 수 있고, 특히 화물의 동적 안전성 판단에 필요한

적재물의 고박강도 및 적재물에 작용하는 하중을 검토할 수 있는 선박의 상하, 좌우 방향의 가속도를 평가 요소로 채택한다.

2.2 해양파 스펙트럼

1964년 국제 선체구조회의(ISSC)에서 채용한 장파정 해양파 스펙트럼인 Modified Pierson-Moskowitz형 스펙트럼을 사용하였다.⁽⁶⁾

해양파 스펙트럼을 $S_{\zeta}(\omega)$ 이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{\pi}{2} \cdot 0.11(H_{1/3})^2 T_o \left(\frac{T_o}{2\pi}\omega\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{T_o}{2\pi}\omega\right)^4\right\} \quad (1)$$

2.3 동적 안전성 평가 요소의 분산치

선박이 단파정 불규칙 파중을 일정 속도로 일정한 침로 χ 를 유지하여 항해하고 있는 경우, 선체운동 응답계산을 위한 N.S.M. (New Strip Method)에 의해 구해진 임의의 평가 요소의 확률과정 $X_i(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{x_i}(\omega, V, \chi - \theta)$ 라 하면 P-M형 스펙트럼 $S_{x_i}(\omega, \chi)$ 는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$S_{x_i}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |H_{x_i}(\omega, V, \chi - \theta)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta \quad (2)$$

또한, 확률과정 $X_i(t)$ 의 분산치 $\sigma_{x_i}^2$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{x_i}^2(\chi, V, S) = \int_0^{\infty} S_{x_i}(\omega, \chi) d\omega \quad (3)$$

2.3.1 상하 방향의 가속도

선체의 임의의 위치 $P(x, y, z)$ 에서 일어나는 상하 가속도 $A_v(t)$ 는 다음과 같다.

$$A_v(t) = \ddot{z}_G(t) - (x - x_G) \ddot{\theta}(t) + y \ddot{\phi}(t)$$

$$= A_{v_0}(t) \cos(\omega_e t + \varepsilon_{Av}) \quad (4)$$

$A_{v_0}(t)$ 의 무차원화한 진폭응답함수 $H_{Av}(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H_{Av}(t) = A_{v_0}(t)/(\zeta_a \cdot g/L) = \sqrt{A_{v_a}^2 + A_{v_b}^2} \cos(\omega_e + \varepsilon_{Av}) \quad (5)$$

$$\text{단, } A_{v_a} = \{-\omega_e^2/(g/L)\}\{H_z \cos \varepsilon_z - K(x-x_C)H_\theta \cos \varepsilon_\theta + KyH_\phi \cos \varepsilon_\phi\}$$

$$A_{v_b} = \{-\omega_e^2/(g/L)\}\{H_z \sin \varepsilon_z - K(x-x_C)H_\theta \sin \varepsilon_\theta + KyH_\phi \sin \varepsilon_\phi\}$$

$$\varepsilon_{Av} = \tan^{-1}(-A_{v_b}/A_{v_a})$$

2.3.2 좌우 방향의 가속도

선체의 임의의 위치 $P(x, y, z)$ 에서 일어나는 좌우 가속도 $A_t(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_t(t) &= \ddot{y}_C(t) + (x-x_C)\ddot{\psi}(t) - (z-z_C)\ddot{\phi}(t) + g \cdot \sin \phi(t) \\ &= A_{t_0}(t) \cos(\omega_e t + \varepsilon_{At}) \end{aligned} \quad (6)$$

$A_t(t)$ 의 무차원화한 진폭응답함수 $H_{At}(t)$ 는 다음과 같다.

$$H_{At}(t) = A_t(t)/(\zeta_a \cdot g/L) = \sqrt{A_{t_a}^2 + A_{t_b}^2} \cos(\omega_e + \varepsilon_{At}) \quad (7)$$

$$\text{단, } A_{t_a} = \{-\omega_e^2/(g/L)\}\{H_y \cos \varepsilon_y + (x-x_C)KH_\phi \cos \varepsilon_\phi - (z-z_C)KH_\phi \cos \varepsilon_\phi - (g/\omega_e^2)KH_\phi \cos \varepsilon_\phi\}$$

$$A_{t_b} = \{-\omega_e^2/(g/L)\}\{H_y \sin \varepsilon_y + (x-x_C)KH_\phi \sin \varepsilon_\phi - (z-z_C)KH_\phi \sin \varepsilon_\phi - (g/\omega_e^2)KH_\phi \sin \varepsilon_\phi\}$$

$$\varepsilon_{At} = \tan^{-1}(-A_{t_b}/A_{t_a})$$

2.4 적재 위치에 따른 상하, 좌우 방향의 가속도

Fig. 1-2 (a), (b)에서 나타내듯이 상하 및 좌우 가속도의 발생 경향은

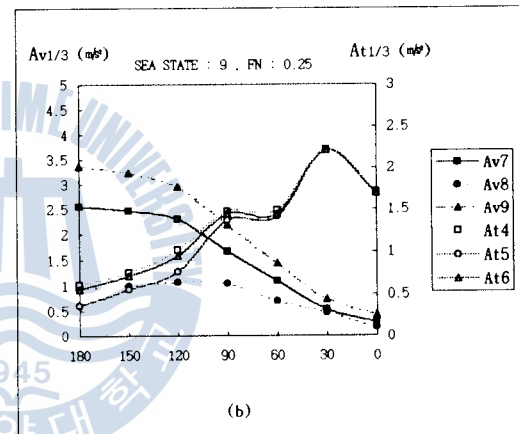
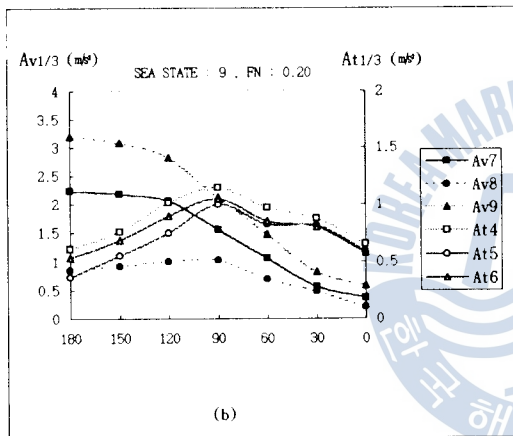
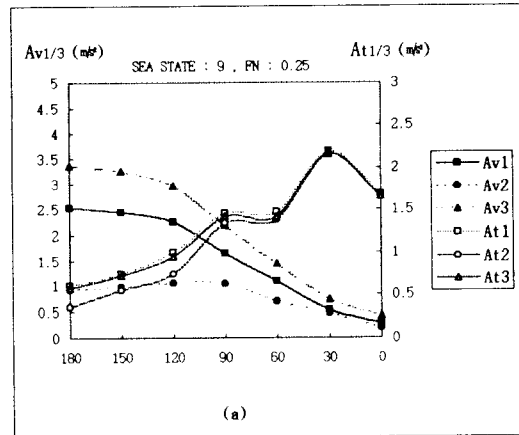
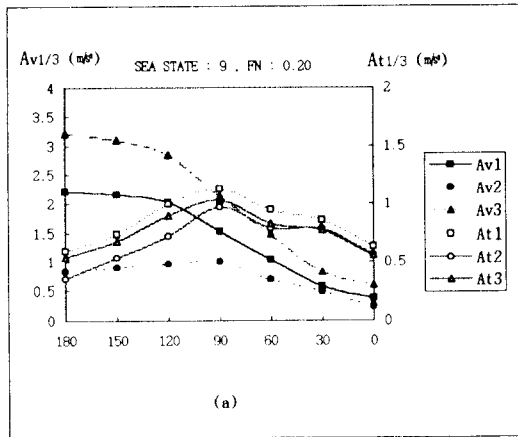


Fig.1 Comparison of Vertical and Lateral Acceleration of Each Position

Fig.2 Comparison of Vertical and Lateral Acceleration at Each Position

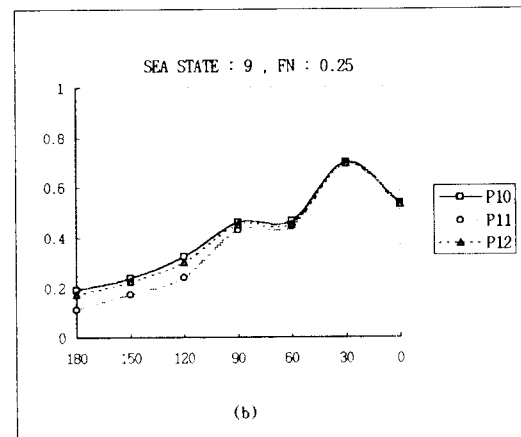
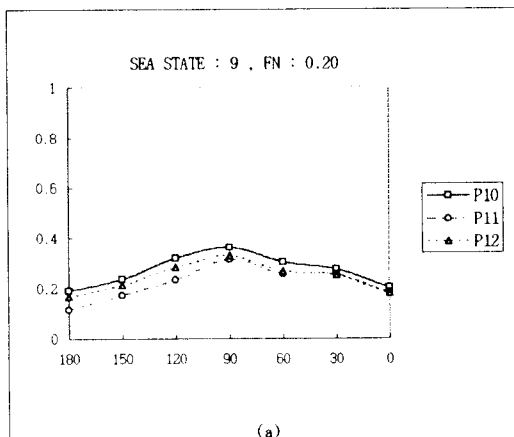


Fig.3 Dangerousness of the Dynamic Safety on Each Container

길이 방향의 적재 위치에 따라서 상당한 차이를 보이며 폭 및 깊이 방향의 적재 위치에 따라서는 그다지 큰 차이를 보이고 있지 않다. 또한 상하, 좌우 가속도 모두 파와의 만남각이 180° 에서 90° 까지는 각 적재 위치별로 상당한 차이를 보이거나 추파 및 추사파 상태에서는 미소한 차이를 보이는 경향이 있다. 선속에 의한 영향으로서는 감속하였을 때에 상하 가속도보다 좌우 가속도가 크게 감소한다는 것을 알 수 있다.

3. 화물의 동적 안전성 평가를 위한 위험 판정 요소

본 장에서는 갑판상에 적재한 각각의 컨테이너에 미치는 상하, 좌우 방향의 하중을 비교 검토하기 위하여 ISO에 명시돼 있는 컨테이너의 강도 중에서 붕괴 사고의 전형적인 원인이 되는 Stacking 하중 및 Racking 하중에 대한 외부 강도를 채택한다.

3.1 적재 위치에 따른 Stacking 및 Racking 하중의 분석

Table 1과 같이 해상상태 9, 선속 $F_n = 0.25$ 상태에서 Stacking 및 Racking 하중이 가장 크게 나타나는 좌현 선미 P 09에 적재된 컨테이너의 경우에 Stacking 하중은 만남각 180° 에서 ISO 허용 하중의 약 1/3의 값이 나타나며, Racking 하중의 경우에는 만남각 30° 에서 약 1/4의 값을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서 사용한 대상선의 경우에는 모든 적재 위치에서 상하, 좌우 가속도의 1/3 유의진폭치에 대한 동하중을 고려한 Stacking 및 Racking 하중은 ISO에서 규정한 허용 하중에 비해 비교적 낮은 수치를 나타내 보이고 있다. 각 적재 위치별로 Stacking 하중의 경우 만남각 180° 에서 가장 크게 발생하고 Racking 하중의 경우 추사파 및 횡파에서 비교적 크게 일어난다. 선속에 의한 영향으로는 Stacking 하중의 경우에 선속을 낮추었을 때에도 비교적 영향이 적으나 Racking 하중의 경우에는 추파 및 추사파 상태에서 감속하였을 때에 상당히 감소하는 경향을 보인다.

Fn : 0.20, Sea state : 9 단위 (ton)

적재위치 \ 만남각	P07		P08		P09	
	Ws	Wr	Ws	Wr	Ws	Wr
180°	12.2	0.6	16.3	0.5	19.8	0.8
150°	12.2	0.7	16.4	0.8	19.7	1.0
120°	12.0	1.0	16.5	1.1	19.3	1.3
090°	11.5	1.1	16.5	1.4	18.2	1.5
060°	11.0	0.9	16.0	1.2	17.2	1.2
030°	10.5	0.8	15.7	1.1	16.2	1.1
000°	10.3	0.6	15.3	0.8	15.8	0.8

(a)

Fn : 0.25, Sea state : 9 단위 (ton)

적재위치 \ 만남각	P07		P08		P09	
	Ws	Wr	Ws	Wr	Ws	Wr
180°	12.5	0.6	16.4	0.5	20.1	0.8
150°	12.5	0.7	16.5	0.8	19.9	1.0
120°	12.3	1.0	16.6	1.1	19.5	1.4
090°	11.6	1.4	16.5	2.0	18.3	2.1
060°	11.1	1.4	16.0	2.1	17.2	2.1
030°	10.5	2.2	15.7	3.3	16.1	3.2
000°	10.2	1.7	15.2	2.5	15.6	2.5

(b)

Table 1 Stacking and Racking Forces at Sea State 9

3.2 위험 판정 요소의 선정

선박의 내항성능에 관한 연구에서는 컨테이너의 내부 강도로 규정되는 화물 자체의 이동 및 붕괴로 인한 위험에 대하여 선박의 안전성을 평가하고 있다.⁽¹¹⁾ 상하 가속도로 인한 하중은 컨테이너를 5단적 했을 때 동하중에 대한 안전율을 최대 총중량의 0.8배로 하여 컨테이너의 강도가 규정되어 있고, 2,700 TEU 컨테이너선의 경우 갑판상에 4단적 이상으로는 적부를 하지 않으므로 컨테이너 용기 자체의 결함이나 오랜 사용으로 인한 각부의 마멸로 인한 사고 이외에는 상하 가속도에 의한 위험은 없을 것으로 판단된다. 따라서, 평가 요소 중에서 선박의 좌, 우 방향으로 작용하는 화물의 동하중으로 인하여 컨테이너 측벽 (side wall)에 가해지는 하중을 견딜 수 있는 허용 하중에 도달하는 좌우 가속도를 ISO 규정에 의거하여 위험 판정 요소로 선정한다.

4. 화물의 동적 안전성 평가

4.1 평가방법 및 한계치

컨테이너 화물의 동적 안전성 평가는 각각 적재된 위치에서의 평가요소가 그 한계치를 초과하는 발생확률로부터 정의되는 평가치와 위험도를 적용하는 방법을 사용한다.⁽¹²⁾

평가 요소 중에서 위험 판정 요소로 선정된 좌우 가속도의 한계치는 ISO 규정에서 요구하는 0.6g로 정하는 데, 이것은 선박의 좌, 우 방향으로 작용하는 화물의 동하중으로 인하여 컨테이너 측벽 (side wall)에 가해지는 하중을 견딜 수 있는 허용 하중에 도달하는 좌우 가속도의 값이다. 또한, 그때의 한계발생확률은 Kitazawa 등이 컨테이너선의 파랑중 한계속도에서 정한 10^{-3} 으로 한다.⁽¹¹⁾ 이것은 횡요의 평균 고유주기를 약 15초로 하면 4시간에 1회 발생할 때에 상당하는 값이다.

4.2 위험도

임의의 A_i 의 주어진 한계발생확률에 관한 한계 평가치를 E_{Ak} 로 하고, 한계 평가치 E_{Ak} 에 대한 평가치 E_{Ai} 의 비를 A_i 요소의 위험도라 하면,⁽¹²⁾

$$\mu_{Ai} = \frac{E_{Ai}}{E_{Ak}} = \frac{\{A_i/\sigma_{Ak}\}}{\{A_i/\sigma_{Ai}\}} = \frac{\sigma_{Ai}}{\sigma_{Ak}} \quad (8)$$

여기에서, σ_{Ak} 는 A_i 가 위험하게 되는 표준편차이다.

위험도 μ_{Ai} 는 갑판상에 적재된 컨테이너의 각 위치에서 파에 대한 만남 각 (χ), 선속(V) 및 해상상태(S)에 따라서 변화한다. $\mu_{Ai} \geq 1.0$ 인 경우 적재된 컨테이너가 위험하고, $\mu_{Ai} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다. Fig. 10에서와 같이 sea state 9에서도 각 위치에 적재된 컨테이너의 위험도는 1.0 이하로 나타나 본 연구에 사용된 대상선의 화물의 동적 안전성은 우수한 것으로 판명된다. 한편, 각 위치별로 위험도를 비교해 보면 선수에 적재된 컨테이너가 가장 위험도가 크고 선체 중앙에 적재된 컨테이너가 안전한 것으로 나타난다. 선속이 $F_n = 0.25$ 일 경우에 추파 및 추사 파 상태에서 위험도가 크며 선속을 감속하였을 경우 화물의 위험도는 급격히 작아지고 횡파 상태에서 가장 위험하게 된다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

파랑 중을 항해하는 컨테이너 선박에 적재된 화물의 동적 안전성 평가를 행한 본 연구의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 화물의 동적 안전성을 평가하기 위해서 파랑 중을 항해하는 선박에 발생하는 위험 현상 중에서 상하, 좌우 방향의 가속도를 평가 요소로 채택하고, 적재 위치별 평가 요소의 상하, 좌우 방향에 따른 발생 경향을 고찰한 결과 상하, 횡방향의 적재 위치에 따른 차이보다는 종방향의 적재 위치에 따른 영향이 많은 것을 알 수 있다.
- (2) 컨테이너 화물의 붕괴 사고의 원인이 되는 Stacking 및 Racking 하중에 대한 값을 각 적재 위치에서 계산하고 ISO에서 규정한 컨테이너의 강도와 비교하여 평가 요소 중에서 대표적인 위험 요소를 채택할 수 있었다.
- (3) 컨테이너선의 경우에는 좌우 가속도를 동적 안전성 위험 요소로 채택하고 컨테이너 횡격벽 (Side Wall)에 대한 한계치 및 한계발생확률을 설정하여 개개의 컨테이너를 위험도로서 평가하는 방법을 개발함으로써 정량적인 판정에 의해 운항자들이 화물의 동적 안전성을 판별할 수 있는 방법을 제안하였다.
- (4) 일반적으로 화물의 동적 안전성을 평가할 수 있는 방법은 화물종류나 적재 방법 또는 화물의 고박 방법 등에 따라 다르지만 화물의 특성을 고려하여 대표적인 평가 요소를 채택하고 그것에 대한 한계치 및 한계발생확률의 기준화 연구가 선행된다면 화물의 동적 안전성을 정량적으로 평가할 수 있다고 사료된다.
- (5) 본 연구의 평가방법을 적용하여 항해중 화물의 이동 및 붕괴로 인한 해난사고의 원인 규명과 화물의 적부계획 수립 단계에서의 반영 및 적재 화물의 고박 방법 등에 관한 대책수립 등에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 金順甲·內藤 林·中村彰一 : 船舶の波浪中耐航性能評價に關する研究, 日本造船學會論文集, No.155 (1984), p. 71.
- (2) 金順甲·孔吉永 : 안전공간 설정에 의한 선박 내항성능의 평가 시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제16권, 제1호 (1992), p. 13.
- (3) 金順甲·朴文洙·孔吉永 : 선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제18권, 제2호 (1994), p. 19.
- (4) 金順甲·金昞辰·李忠魯 : 벌크선의 적화상태에 따른 항해안전성 평가에 관한 연구, 해사산업연구소 논문집 (1993), p. 123.
- (5) 細田龍介·國武吉邦·宮本雅史 : 耐航性能評價と評價基準, 運航性能研究會, 第5回シンポジウム, 日本造船學會 (1988), p. 236.
- (6) 山内保文 : 不規則現象論, 海文堂 (1986), p. 6-29.
- (7) 福田淳一 : 船體應答の統計的豫測, 第1回耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會 (1969), p. 99.
- (8) Rameswar Bhattacharyya : Dynamics of Marine Vehicles, John Wiley & sons (1978), p. 331-395.
- (9) 元浪誠三 : 船體と海洋構造物の運動學, 成山堂 (1992), p. 207.
- (10) 梁時權·金順甲 : 船舶積貨, 韓國海洋大學校 海事圖書出版部 (1995), p. 418
- (11) 金順甲 : 선박의 파랑중 내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제11권, 제1호 (1987), p. 67.
- (12) 北澤孝宗, 黒井昌明, 高木又男 : コンテナ船の波浪中での限界速度, 日本造船學會論文集, 第 138号 (1975), p. 269.
- (13) K.S. Miller : Multidimensional Gaussian Distributions, John Wiley and Sons (1964), p. 36.
- (14) A.R.J.M. LLOYD : Seakeeping Ship Behaviour in RoughWeather, Ellis Horwood Limited (1989), p. 337-339.
- (15) 中村彰一 : 耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會 (1969), p. 121.