

손상된 선박의 구난 기술 및 안전 예항에 관한 연구(1)

- 손상시의 선체 자세 및 잔존 복원성 평가법 -

손경호* · 이상갑* · 최경식* · 안영규* · 김윤수**

A Study on Rescue Technique and Safe Tow of Damaged Ship(1)

- Prediction of Final Drafts and Residual Stability of Ship in Damage -

K.H.Sohn · S.G.Lee* · K.S.Choi* · Y.K.Ann* · Y.S.Kim***

| <목 차> | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. 서 언 | 3. 모형 실험 및 이론 계산 결과와의 비교 |
| 2. 이론 계산법 | 3.1 공시 모형선 |
| 2.1 손상시의 최종 홀수 계산법 | 3.2 모형 실험 |
| 2.2 손상시의 잔존 GZ 계산법 | 3.3 실험 결과와 이론 계산 결과와의 비교 |
| 2.3 GZ 의 수치 계산법 | 검토 |
| 2.4 컴퓨터 프로그램의 flow chart | 4. 결 언 |

Abstract

Damage stability is generally very important as a part of rescue technique of damaged ship and also in connection with the requirements of MARPOL 73/78[2].

Damage stability calculation program has been developed and suggested, which can be used on an onboard computer for any operating drafts.

The program is based on lost buoyancy method for calculation of final drafts, and also based on added mass method for calculation of residual righting arm. The numerical method suggested by Hamamoto-Kim[6] is adopted for calculation of intact righting arm(GZ).

The model experiments on damage stability are also carried out in a small tank with tanker model 2.385 meters long. The experimental results are compared with the calculations by the suggested method.

* 정회원, 한국해양대학교

** 삼성중공업(주)

1. 서 언

최근 대형 유조선의 해난 사고가 빈번하게 발생되고 있으며, 해난 사고에 수반되는 많은 양의 기름 유출로 인하여 연안 해역과 생태계의 파괴가 점점 심각해지고 있다.

선박이 충돌, 좌초 등에 의해 손상을 받게 되면 자력으로서 이동이 불가능하므로 손상 선박을 신속하고도 안전하게 부양 또는 예항하기 위한 안전 대책 수립이 요구된다[1].

또한 유조선의 경우에는 MARPOL 73/78 규정에 의해 모든 운항 상태에 대해 선내에서 직접 손상시 복원성을 평가하여 규정에서 요구하는 복원성 기준의 만족 여부를 확인해야 한다[2],[3],[4].

이러한 배경하에 본 연구에서는 손상 선박의 구난에 필요한 요소 기술 개발의 일환으로서, 손상시 최종 평형 상태에서의 선체 자세 및 잔존 복원성의 평가법을 개발하고자 한다. 이론 계산시 필요한 입력 자료로서는 당해 선박의 offsets 자료와 탱크 배치 자료만으로서 손상시 복원성 평가가 가능하도록 하였다. 아울러 이론 계산법의 타당성을 입증하기 위해서 모형 실험도 병행 수행하였으며 계산치와 비교 검토하였다.

2. 이론 계산법

2.1 손상시의 최종 홀수 계산법

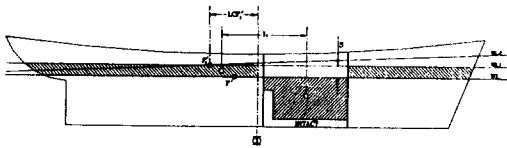


Fig.1 Sinkage and trim by lost buoyancy method[5]

Fig.1에서 홀수 WL로 떠 있던 선박이 어떤 구획실이 침수되어 최종 평형 상태에서 홀수 WL₂가 되었다고 하자. 침수가 진행되는 동안 제 1단계에서 홀수 WL₁으로 평행 침하만 일어나고, 제 2단계에서 홀수 WL₂로 트림이 발생한 것으로 간주한다.

우선 제 1단계에서의 평행 침하량 S는 다음과 같이 계산된다.

$$S = \frac{2v'}{A' + A_1'} = \frac{2\gamma v'}{TPM' + TPM_1'} \dots (1)$$

여기서 하첨자 "1"은 수선면 WL₁과 관련된 값, 상첨자 "'"는 비손상 부분과 관련된 값을 의미하며, v'는 홀수 WL 아래쪽에 있는 실제의 손실 부력 공간의 형용적, γ는 해수(또는 청수)의 비중량, A는 수선 면적, TPM은 매 1 m당 배수톤(ton per meter)이다.

다음으로 트림에 대한 구속을 제거하면 제 2단계에서 선체는 다음과 같은 트림 모우먼트를 받게 된다.

$$\text{Trimming moment} = \gamma v' l_x \dots (2)$$

$$\text{단, } l_x = \frac{LCF' + LCF_1'}{2} - lcg \dots (3)$$

여기서 l_x는 모우먼트 레버, lcg는 v'의 체적 중심의 선체 중앙으로부터의 거리, LCF는 부면심의 선체 중앙으로부터의 거리이다. lcg와 LCF는 선수 방향을 양(+)으로 취한다.

한편, 홀수 WL₁에서 일부 수선면이 손상된 상태에서의 1m 트림 변화 모우먼트 MTM₁'는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} MTM_1' &= MTM_1 \\ &- \frac{TPM_1 \times tpm_1 \times (LCF_1 - lcf_1)^2}{L \times (TPM_1 - tpm_1)} \\ &- \frac{\gamma \mu_s i_{L1}}{L} \end{aligned} \dots (4)$$

여기서 tpm은 손상된 수선면의 매 1 m당 배수톤, lcf는 tpm의 중심의 선체 중앙으로부터의 거리(선수 방향을 양(+)으로 취함), μ_s는 표면 침수율, i_{L1}은 손상된 수선면의 중심을 지나는 횡방향 축에 관한 손상된 수선면의 2차 모우먼트, L은 선체

길이이다.

식(2), (3)으로부터 트림 t 는 다음과 같이 구해진다.

$$t = \frac{\gamma v' l_x}{MTM_1'} \dots\dots\dots (5)$$

따라서 최종 홀수 df, da 는 다음과 같이 구해진다.

$$df = df_0 + S - t \times (0.5 - LCF_1'/L) \dots\dots\dots (6)$$

$$da = da_0 + S + t \times (0.5 + LCF_1'/L)$$

여기서 df_0, da_0 는 손상전의 선수, 선미 홀수이다.

2.2 손상시의 잔존 GZ 계산법

최종 홀수 WL_2 에서 선체 내부에 침입한 유체의 종량 w 를 포함한 전체 배수량을 W_2 라 하면 선저로부터 W_2 의 무게중심까지의 높이 KG_2 는 다음과 같이 구해진다.

$$KG_2 = \frac{KG \times W + Kg \times w}{W_2} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 KG 와 W 는 각각 손상전의 무게중심의 선저로부터의 높이와 배수량이다.

홀수 WL_2 에서 수선면의 2차 모우멘트 손실에 기인하는 BM 감소량은 다음과 같다.

$$BM \text{ loss} = \frac{\mu_s i_{TCL} + (\mu_s a_2 \times tcf_2)^2 / (A_2 - \mu_s a_2)}{W_2 / \gamma}$$

$$= \frac{\gamma \mu_s i_{TCL} + (tpm_2 \times tcf_2)^2 / (TPM_2 - tpm_2)}{W_2} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\mu_s a$ 는 손상된 수선 면적, tcf 는 $\mu_s a$ 의 중심의 선체 중심선으로부터의 횡방향 거리(정횡 우현 방향을 양(+)으로 취함), i_{TCL} 은 선체 중심선을 지나는 중방향 축에 관한 $\mu_s a_2$ 의 2차 모우멘트이다.

따라서 침입수의 자유 표면 영향을 고려한 메타센터높이 GM_2 는 다음과 같다.

$$GM_2 = KB_2 + BM_2 - KG_2 - (BM \text{ loss}) \dots\dots (9)$$

여기서 KB, BM 은 각각 선저로부터 부심까지의 높이, 부심으로부터 메타센터까지의 높이이다.

홀수 WL_2 에서 메타센터높이 GM_2 일 때 비손상시의 정복원아암을 GZ_2 라 하면, 초기 홀수 WL 에 대응하는 유효 정복원아암 GZ' 는 다음과 같다.

$$GZ' = GZ_2 \times \frac{W_2}{W} \dots\dots\dots (10)$$

한편, 비대칭 침수에 기인하는 횡방향 모우멘트에 의해 Fig.2와 같이 홀수 WL_2 가 홀수 WL_3 으로 횡경사되었다고 하면, 횡방향 모우멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$Transverse \text{ moment} = \gamma v' \times (tcg - TCG) \dots\dots (11)$$

여기서 TCG 와 tcg 는 Fig.2와 같이 정의되며, TCG 는 다음 식으로 표시된다.

$$TCG = - \left(\frac{tpm_1 + tpm_2}{2} \right) \times h_s \times \left(\frac{tcf_1 + tcf_2}{2} \right) / \gamma v' \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{단, } h_s = S + (LCF_1' - lcf_1) \times t / L \dots\dots\dots (13)$$

따라서 손상시 최종 평형 상태에서의 잔존 GZ 는 식(10), (11)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$ResidualGZ = GZ' - \gamma v' \times (tcg - TCG) \cos \phi / W \dots\dots (14)$$

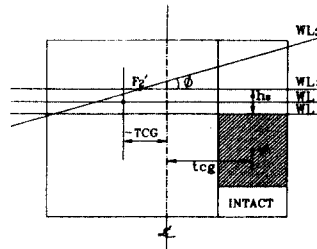


Fig.2 Unsymmetrical moment and heel

2.3 GZ의 수치 계산법

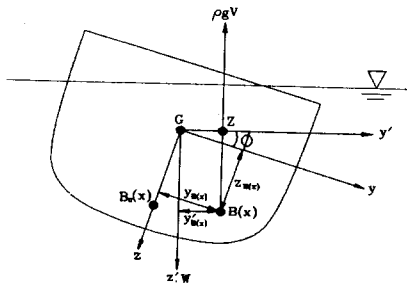


Fig.3 coordinate system

Fig.3의 좌표계에서 정복원아암 GZ는 다음과 같이 표시된다.

$$GZ = \frac{1}{V} \int_L y_{B(x)} A(x) dx \quad \dots\dots\dots (15)$$

여기서 $y_{B(x)}$ 는 다음과 같다.

$$y_{B(x)} = y_{B(x)} \cos \phi - z_{B(x)} \sin \phi \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$y_{B(x)} = \frac{\int \int_A y dA}{A(x)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$z_{B(x)} = \frac{\int \int_A z dA}{A(x)}$$

한편, $A(x)$ 와 $y_{B(x)}$ 는 선체의 침하량 ζ_G 와 트림각 θ 의 함수인데, 선체의 횡경사 ϕ 에 의해 ζ_G 와 θ 가 변화하기 때문에 $A(x)$ 와 $y_{B(x)}$ 도 변화한다. 그래서 $A(x)$ 와 $y_{B(x)}$ 를 구해 식(15)에 의해 GZ를 계산하기 전에 다음의 정적 평형 조건을 만족하는 ζ_G 와 θ 를 결정해야 한다.

$$W - \gamma \int_L A(x) dx = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\int_L x A(x) dx = 0$$

ζ_G 와 θ 를 구하기 위해서 Hamamoto-Kim[6]은

다음과 같은 수치 계산법을 제안하였다. Fig.4의 선체 횡단면에서 먼저 횡경사시의 선체 좌우 현측과 정수면과의 교점 (y_p, z_p) , (y_s, z_s) 및 중점의 좌표 (y_c, z_c) 를 구한다. 다음으로 Fig.4의 미소 삼각형의 면적을 다음 식을 이용하여 구한다.

$$A(x) = \Delta A_p + \sum_{j=1}^N \Delta A_j + \Delta A_s \quad \dots\dots\dots (19)$$

여기서

$$\Delta A_j = \frac{1}{2} \{ (z_j - z_c)(y_{j+1} - y_c) - (z_{j+1} - z_c)(y_j - y_c) \}$$

$$\Delta A_p = \frac{1}{2} \{ (z_p - z_c)(y_1 - y_c) - (z_1 - z_c)(y_p - y_c) \}$$

$$\Delta A_s = \frac{1}{2} \{ (z_{N+1} - z_c)(y_s - y_c) - (z_s - z_c)(y_{N+1} - y_c) \}$$

$$\dots\dots\dots (20)$$

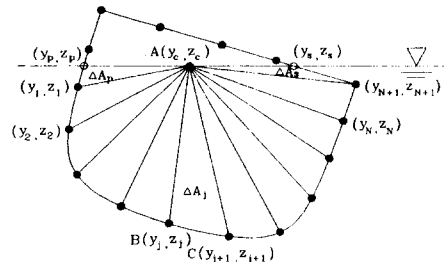


Fig.4 Notation for calculation of sectional area

식(19)로부터 구한 $A(x)$ 를 식(18)에 대입하여 정적 평형 조건을 만족하지 아니하는 경우에는 다음 식을 이용하여 새로운 ζ_G 와 θ 를 결정한다.

$$W - \rho g \int_L A(x) dx = \rho g \zeta_G \int_L B(x) dx \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\int_L x A(x) dx = \theta \int_L x^2 B(x) dx$$

여기서 $B(x)$ 는 수선폭을 나타낸다. 식(18), (19), (21)의 계산을 반복 수행하여 최종 평형 상태에서의 ζ_G 와 θ 를 결정한다.

그리고 최종 평형 상태에서의 $y_{B(x)}$, $z_{B(x)}$ 는 다

음과 같이 계산된다.

$$y_{B(x)} = \frac{\sum y_{ig} \Delta A_j}{A(x)}$$

$$z_{B(x)} = \frac{\sum z_{ig} \Delta A_j}{A(x)} \dots\dots\dots (22)$$

여기서 (y_{ig}, z_{ig})는 Fig. 4의 미소 삼각형의 면적 중심의 좌표를 나타낸다. 식(22)를 식(16), (15)에 대입하면 임의의 경사각에 대한 GZ를 구할 수 있다.

2.4 컴퓨터 프로그램의 flow chart

손상시 복원성 계산을 위한 컴퓨터 프로그램의 flow chart는 Fig.5와 같다.

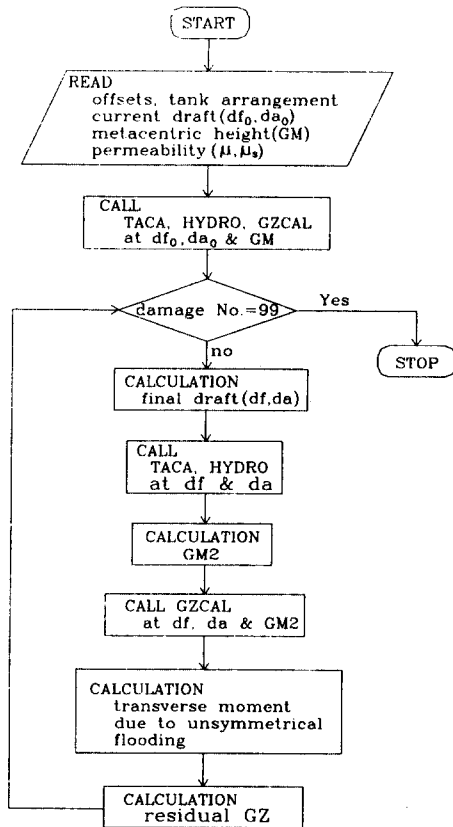


Fig.5 Flow chart for calculation of damage stability

Fig.5에서 각 subroutine은 다음과 같은 계산을 수행한다.

TACA : 임의의 흘수에서 offsets와 탱크 배치 자료를 이용하여 손상 탱크의 체적과 중심 좌표를 계산한다. 만약 2구획 침수시에는 각각의 탱크를 합하여 하나의 탱크로 간주하여 체적과 중심 좌표를 계산한다.

HYDRO : 임의의 흘수에서 offsets 자료를 이용하여 유체 정역학적 특성치 및 손상 탱크의 수선면의 면적, 면적 중심 및 2차 모우멘트를 계산한다.

GZCAL : 임의의 흘수에서 offsets 자료를 이용하여 정복원아암 GZ를 계산한다.

3. 모형 실험 및 이론 계산 결과와의 비교

3.1 공시 모형선

본 연구에서 채택한 공시 모형선의 주요목은 <Table 1>과 같고, 정면도는 Fig.6과 같다. Fig.6에서 각 점은 이론 계산시 필요한 offsets 자료를 나타내고 있다. 이 모형선은 길이 167 m인 실선을 1/70로 축소하여 FRP(fiberglass reinforced plastic)로써 제작한 것이다. 그리고 손상시 복원성 실험을 위한 각 탱크의 격벽 배치는 Fig.7과 같다.

<Table 1> principal particulars of ship and model

| Items | Ship | Model |
|---|---------|--------|
| Length between perpendiculars L (m) | 167.0 | 2.385 |
| Breadth B (m) | 22.6 | 0.323 |
| Depth D (m) | 13.4 | 0.191 |
| Mean draft(designed) d (m) | 9.0 | 0.1287 |
| Displacement volume V (m ³) | 26186.0 | 0.0763 |
| Block coeff. C_b | 0.77 | 0.770 |
| Prismatic coeff. C_p | 0.778 | 0.778 |
| Waterline coeff. C_w | 0.849 | 0.849 |
| Model scale | | 1/70 |

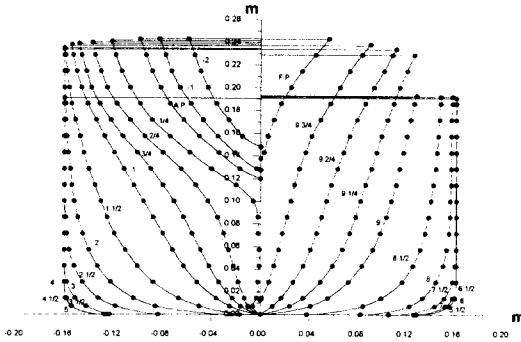


Fig. 6 Body plan of tested model

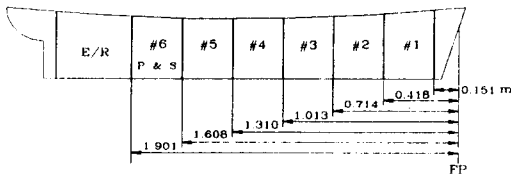


Fig. 7 Tank arrangement of tested model

3. 2 모형 실험

모형 실험은 Fig. 7에 보인 각 탱크가 완전히 비어 있는 상태에서 한 개의 탱크 또는 인접한 두 개의 탱크가 동시에 손상되는 경우를 생각하고 있기 때문에, 많은 물이 선내로 침수될 것에 대비하여 발라스트 상태에서 수행되었다. 실험시의 상태는 <Table 2>와 같다. 여기서 홀수는 모형선에 그려 넣은 홀수표(draft mark)로부터 읽었으며, 배수량은 판수동저울로 측정하였고, 메타센터높이는 경사 시험에 의해 구하였다.

<Table 2> Tested condition of intact ship model

| | | |
|--------------------|------------|--------|
| Draft fore | $df_0 (m)$ | 0.053 |
| aft | $da_0 (m)$ | 0.063 |
| Displacement | $W (kg)$ | 30.75 |
| Metacentric height | $GM (m)$ | 0.0445 |

그리고 Fig. 7의 탱크 배치에서 손상 상태를 나타내는 손상 번호(Damage No.)를 <Table 3>과 같이 정의한다.

<Table 3> Definition of damage No.

| Damage No. | Damaged tank |
|------------|-----------------|
| -1 | #6 port |
| 1 | #6 star. |
| 2 | #5 |
| 3 | #4 |
| 4 | #3 |
| 5 | #2 |
| 6 | #1 |
| 7 | #6 port & star. |
| 8 | #6 port & #5 |
| 9 | #6 star. & #5 |
| 10 | #5 & #4 |
| 11 | #4 & #3 |
| 12 | #3 & #2 |
| 13 | #2 & #1 |

임의 상태에서 선체에 작용하는 복원 모우멘트(righting moment)의 측정은 Fig. 8과 같은 실험 장치를 이용한다. Fig. 8에서 강제 횡경사시 선체에 작용하는 복원 모우멘트와 scale pan에 올린 weight에 의한 반대 방향의 모우멘트가 서로 평형이 되면 pointer rod이 수직 방향이 된다. 측정된 복원 모우멘트를 배수량으로 나누어 주면 정복원 아암 GZ를 구할 수 있다.

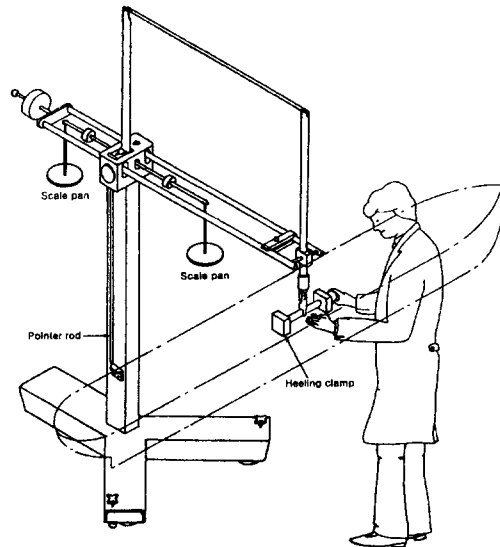


Fig. 8 Experimental apparatus for measurement of righting moment acting on model[7]

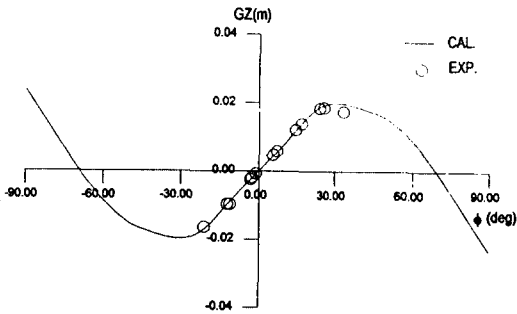


Fig.9 Righting arm at intact condition

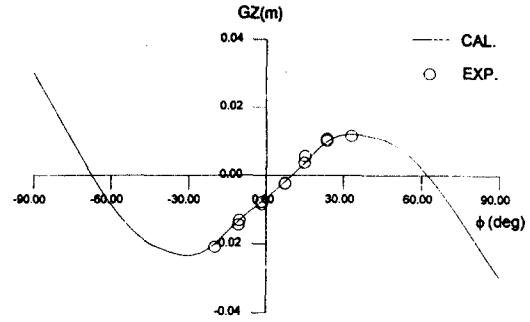


Fig.10 Residual righting arm at damage No. 1 condition

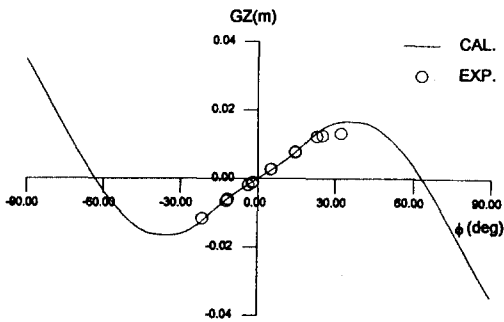


Fig.11 Residual righting arm at damage No. 2 condition

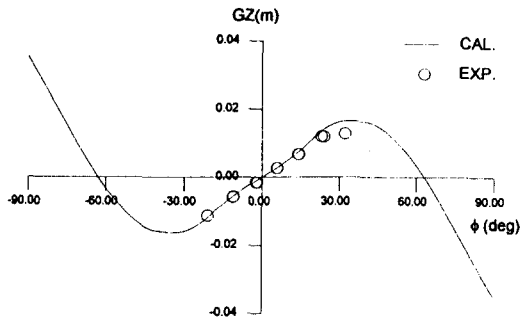


Fig.12 Residual righting arm at damage No. 4 condition

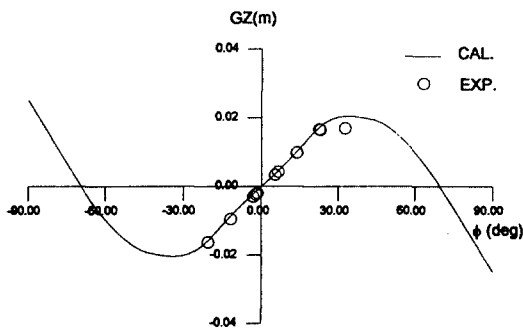


Fig.13 Residual righting arm at damage No. 6 condition

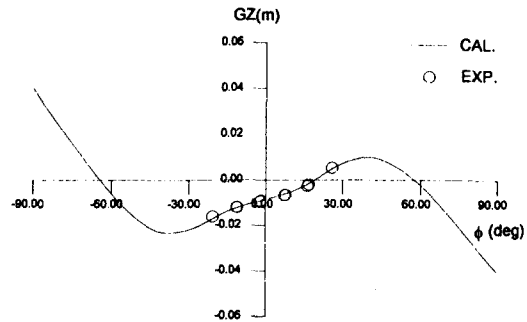


Fig.14 Residual righting arm at damage No. 9 condition

3. 3 실험 결과와 이론 계산 결과와의 비교 검토

Fig.9는 <Table 2>의 조건에서 비손상시의 정복원아암 GZ에 관한 실험 결과와 이론 계산 결과

를 나타내고 있다. 이론 계산시에는 공식 모형선의 hog 수정을 고려하여 배수량이 일치하도록 약간 조정된 흘수를 이용하였다. 이론 계산시 조정된 선수 흘수는 0.051 m, 선미 흘수는 0.061 m이다[7].

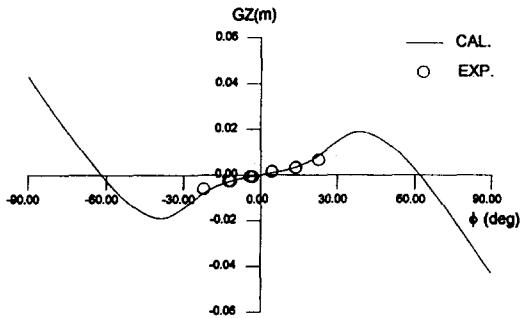


Fig. 15 Residual righting arm at damage No. 12 condition

Figs. 10~15는 <Table 2>의 조건에서 <Table 3>의 손상 번호 1, 2, 4, 6, 9, 12에 대한 손상시의 정복원아암 GZ의 실험 결과와 이론 계산 결과를 나타내고 있다. 이론 계산시 각 탱크의 침수율은 $\mu = 0.95$, 표면 침수율은 $\mu_s = 0.97$ 로 가정하였다. 인접한 두 탱크가 동시 손상된 경우에는 손상된 두 탱크를 하나의 탱크로 간주하여 한 개의 탱크 손상시와 동일하게 계산을 수행하였다. Fig. 16은 손상시의 최종 흘수에 관한 실험 결과와 이론 계산 결과를 나타내고 있다.

본 연구에서 제안한 이론 계산법에 따른 손상시의 최종 흘수 및 GZ값은 실험 결과와 전체적으로 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 이론 계산법의 타당성이 입증된다.

4. 결 언

본 연구에서는 손상된 선박을 안전하게 부양 또는 예방하기 위한, 손상시 안전 대책 수립의 일환으로서 손상시의 최종 흘수와 잔존 GZ의 이론 계산법을 확립하였다.

또한 제안된 이론 계산법의 타당성을 입증하기 위해서 모형 실험도 병행 수행하였으며, 이론 계산 결과와 비교, 검토하였다.

제안된 이론 계산법은 손상시의 안전 대책 수립 뿐만 아니라, 선내에서 직접 MARPOL 73/78의 만족 여부를 확인하는 데도 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

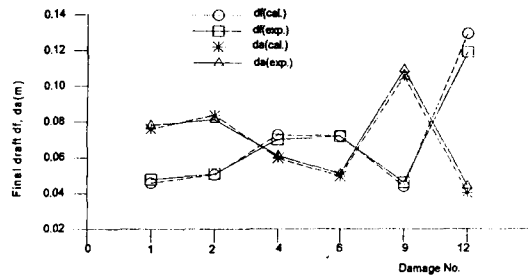


Fig. 16 Final drafts at bow and stern after damage

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Kijima, K., “조종성 기준과 Manoeuvring Booklet에 관한 국제 동향”, 선박의 항행 안전과 조종 성능, 일본조선학회 운동성능연구위원회, 제2회 심포지움 텍스트, page 4, 1985(일본어).
- [2] 박용섭, “MARPOL 1973 및 MARPOL 1978의 정서”, 해양출판사, page 150, 1981.
- [3] Munk T. et al., “Onboard Calculation of Damage Stability for Actual Loading Conditions”, 2nd Inter. Conf. on Stability of Ship and Ocean Vehicles, Tokyo, Oct. 1982.
- [4] Maritime Computer and Technical Services Ltd., “Taskmaster Damage Stability Module Program Description”, 1984.
- [5] Lewis, E. V., “Principles of Naval Architecture”, 2nd Revision, Vol. I, Published by SNAME, page 159, 1988.
- [6] 김윤수, “추파중을 항행하는 선박의 전복 현상에 관한 연구”, 일본 오사카대학 박사학위 논문, 1994(일본어).
- [7] Townsin, R. L., “Guidance Booklet and Instruction Manual for NA8 Large Angle Ship Stability Dynamometer and Inclining Models”, Armfield Technical Education Co. Ltd., 1983.