

## 유조선의 선체손상 시 기름의 해상유출에 대한 실험적 연구

김을년<sup>†\*</sup>, 하우일\*, 최익흥\*

현대중공업 선박해양연구소 구조연구실\*

### An Experimental Study on the Oil Spillage of Damaged Oil Tanker

UI-Nyeon Kim<sup>†\*</sup>, Woo-Il Ha\* and Ick-Heung Choe\*

Structure Research Dep't, HMRI, Hyundai Heavy Industries Co., LTD\*

#### Abstract

Crude oil carriers or product oil carriers are confronted with sea pollution due to hull damage from various accidents. To reduce the oil spillage of tankers, IMO(International Maritime Organization) and OPA 90(Oil Pollution Act 1990) adopted the hull structures of double skin type. In this study, oil spillage test of the double skin tanker with 1/100 scaled model was carried out under damaged condition due to collision and grounding accidents. A new structural type of oil tanker was also tested with pipe and valve system arranged in double side and single bottom hulls. Their results were compared with that of conventional type double hull on the view point of ship safety and oil spillage.

※Keywords: Experiment(실험), Oil spillage(원유유출), Oil tanker(원유운반선), Sea pollution(해양오염), Single hull(단일선체), Double hull(이중선체), New type hull(신개념선체), Collision(충돌), Grounding(좌주), Stranding(좌초)

#### 1. 서론

1995년 여수 앞바다에서 씨프린스(Sea Prince)호의 좌초사고, 2007년 태안반도에서 허베이 스피리트(Hebei Spirit)호의 충돌사고 등 우리나라 연안에서 수많은 선박사고로 인하여 원유가 해상으로 유출되어 심각한 환경오염을 유발시키고 있다.

접수일: 2009년 1월 5일, 승인일: 2009년 6월 1일

†교신저자: unkim@hhi.co.kr, Tel: 052-202-5553

강성길과 강창구(해양오염사고 사례분석, 대한조선학회지, 제 40 권, 제 2 호)에 따르면 우리나라 연안에서 1990 년대에 발생한 선박의 해양오염사고 건수는 연평균 374 건이 발생하였으며 유출량은 연간 4,354 킬로리터, 피해보상액은 연간 90 억 원정도(방제비용 50 억원 포함)이다. 또한 2002년 스페인 갈리시아 근해에서 발생한 프레스트지호의 사고 한 건으로 1 만톤 가량의 중질유가 해상으로 유출되어 해안방제 비용만 10 억 유로 이상 지불되었다. 그러나 실제 환경오염에 따른 지불비용과

어민 등의 피해액을 합치면 비용은 이의 수배~수십배가 될 것으로 추정되고 있다. 최혁진(우리나라의 침몰선박 실태 및 처리 기술 개발현황, 대한조선학회지, 제 40 권, 제 2 호)은 국내외 대형 선박침몰사고에 대하여 정리하였으며 잔존유 회수, 사고 실태, 침몰선박의 관리와 처리 등에 대하여 기술하였다.

이와 같은 기름의 유출로부터 발생하는 피해액을 줄일 수 있는 방법은 해상에 유출된 기름을 제거하기 위한 체계적 방제시스템을 구축하는 것이다. 또 다른 방법으로는 사고 예방시스템을 갖춘 선박의 운항과 각종 해난사고가 발생하여도 기본적으로 선체구조가 안전하도록 설계하는 것이다.

본 연구에서는 사고 시에 화물창에서 해상으로 기름유출을 최소화 시킬 수 있는 방법을 찾기 위하여 이중선체 구조와 파이프와 밸브장치를 갖춘 새로운 형태의 선체구조에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 각종 선박사고로 선체가 손상되었을 때 기름의 해상유출에 안전한 선체구조로 알려진 이중선체 구조에 대하여 선체손상 시나리오를 선정하고 초대형 유조선(VLCC)의 1/100 크기의 모델을 만들어 기름 유출실험을 수행하였다. 또한 해상 기름유출을 최소화 할 수 있는 아이디어를 찾기 위하여 이중선체/단일선체 구조로 되어 있으며 파이프와 밸브 시스템이 구비된 새로운 선체를 설계하고 이에 대한 실험도 수행하였다. Fig. 1 은 본 연구에서 구상한 새로운 기름 유출방지 선체로서, 충돌과 좌초사고에서 화물창에 적재된 기름이 물과의 비중차이 또는 선체 내외부의 압력차이로 파이프를 통하여 화물창의 기름이 발라스트 탱크 또는 다른 화물창으로 이동하는 개념을 나타낸 것이다.

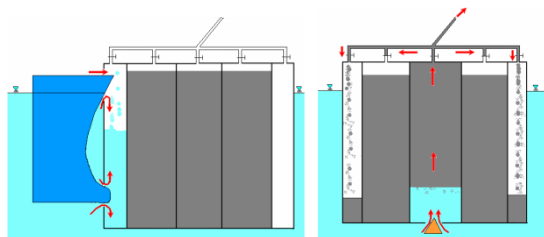


Fig. 1 New ship structure concept against oil spillage

## 2. 실험모델 및 시나리오

### 2.1 실험모델 치수

유조선이 해상사고로 선체가 손상되어 화물창에 적재된 기름이 해상으로 유출되는 현상을 구현하는 실험을 수행하고자 실험모델을 제작하였다. 30만톤급 초대형 유조선(VLCC)의 치수는 대략 폭 60m, 높이 30m 정도이다. 실험을 위한 모델의 크기는 운반과 설치, 기름유출과 기름이동의 관찰 등을 고려하여 초대형 유조선의 1/100 정도인 560mmx300mm (폭 x 높이)로 하였다. 또한 수조의 크기는 실험모델의 횡요(Rolling)과 종요(Pitching) 실험을 수행할 수 있는 공간을 고려하여 길이 x 폭 x 높이=1200mmx860mmx700mm 로 제작하였다. Fig. 2 에 실험모델과 수조의 주요치수를 나타내었다. 실험에서 기름의 유출과 이동 과정을 외부에서 관찰하기 위하여 투명한 아크릴 재질로 모델과 수조를 제작하였다.

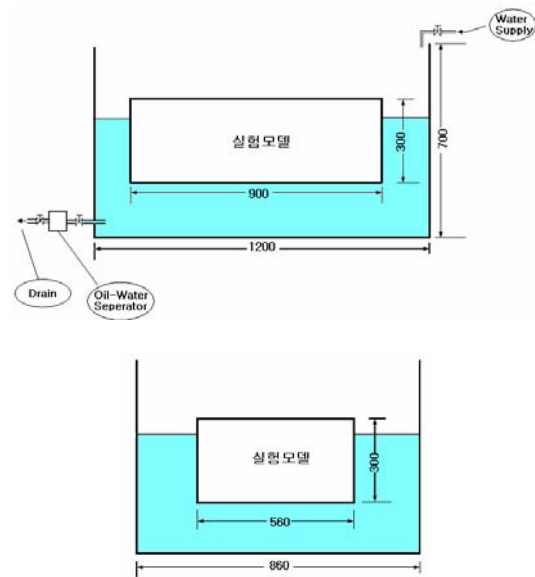


Fig. 2 Dimension of test model and water tank

유조선은 정유소로부터 휘발유와 경유 등 정제된 기름을 소비지로 운반하는 정유운반선과 산유국에서 원유를 정유소로 운반하는 원유운반선으로 나눌 수 있다. 실험모델의 화물창에 적재하는 기

름으로 3 가지 종류의 기름 즉, 휘발유, 경유, 벙커 A 유를 준비하였다. 여기서, 벙커 A 유는 원유와 가장 비슷한 특성치를 갖고 있어 원유를 대신하여 실험에 사용하였다.

Table 1 은 실험에 사용한 기름의 비중과 점도를 나타낸 것으로 원유는 1996 년도 중동의 산유국으로부터 국내로 수입한 것이다.

**Table 1** Specific gravity and viscosity of the crude oil and refined oil

Oil types	Specific gravity	Viscosity( $mm^2/sec$ )			
		15°C	20°C	40°C	100°C
Gasoline	0.7181	-	-	-	-
Diesel	0.8232	6.0	5.0	2.6	-
Bunker A	0.9112	21.0	17.5	9.4	2.4
Crude	0.8663	-	-	8.917	-

**2.2 실험 시나리오**

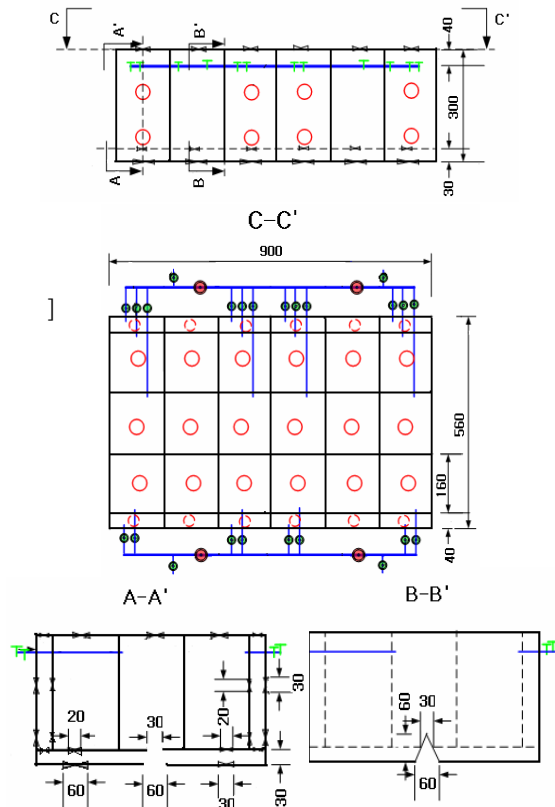
선박이 해난사고로 인하여 선체가 손상되는 경우는 크게 3 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 충돌(Collision, 衝突) 사고로 선박이 운항하면서 타선박 또는 항만시설 등에 정면 또는 선측으로 충돌하거나 타선박에 의하여 피충돌 되는 경우로 선측 또는 정면의 외판이 찢어지는 사고이다. 둘째, 좌초(Stranding, 坐礁) 사고로 선박이 운항하면서 수면하의 장애물인 암초와 같은 견고한 물질에 의하여 선저가 손상되는 사고를 말한다. 셋째, 좌주(Grounding, 坐礁) 또는 교사(Grounding, 膠砂) 사고로 선박이 수면하의 암초 또는 부드러운 물질인 장애물에 얽혀서 움직일 수 없는 사고를 말하는 것으로 여기서 부드러운 물질은 썰이나 모래, 연한 산호 등을 말한다. 주로 선박이 기관 고장 등으로 표류하다가 썰물 때 모래톱 또는 암석 위에 얽어지면서 선저가 파손되는 경우이다.

본 연구에서는 선박이 충돌, 좌초 그리고 좌주 사고로 인하여 선체가 파손되는 경우를 가정하여 실험모델을 제작하였다. 충돌사고를 구현하기 위

하여 선측 내/외판에 각각 2~3 개의 구멍을, 좌주 사고를 위하여는 각 화물창의 선저 내외판에 1 개의 구멍을 만들었다.

**3. 이중선체에 대한 실험**

이중선체 구조는 저에너지 충돌/좌초사고가 발생하여 선체외판의 일부가 손상하더라도 선체내판이 기름유출을 막아 환경오염 방지 측면에서 효과가 크다. DNV(2007)의 설계 규정은 이중선체의 최소높이와 선측 발라스트 탱크의 최소폭을 제시하고 있으며 초대형유조선의 경우, 최소 높이와 폭은 2m 이다. Fig. 3 에 나타난 바와 같이 선저와 선측이 각각 이중선체로 된 실험모델을 제작하였으며 충돌, 좌주, 좌초사고를 실험할 할 수 있도록 손상부위를 고려하였다.



**Fig. 3** Dimension for double hull model

Fig. 4 는 제작된 이중선체 실험모델을 나타낸 것으로 선저와 선측이 모두 이중 선체로 되어 있으며 선측상부에 파이프와 밸브 시스템을 갖추었다.



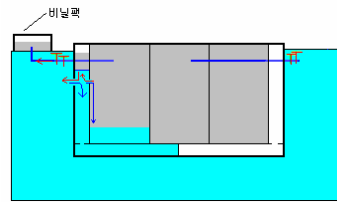
Fig. 4 Fabricated double hull model

3.1 충돌사고로 선측 상단이 파손되었을 때

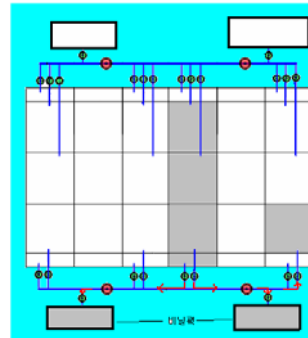
Fig. 5 와 같이 선측 상단부의 내외판에 구멍이 생겼을 때 경유를 사용하여 기름유출 실험을 수행하였다. 모델의 흘수는 275mm 로 맞추었으며 실험에서는 모델의 운동이 없는 정적상태에서 수행하였다.

첫번째 실험은 정상상태에서 선측 내외판의 구멍마개를 동시에 제거하였다. 선체 외부의 물이 순식간에 선측 발라스트 탱크와 선저 발라스트 탱크로 유입되었다. 동시에 화물창에 있는 경유가 선측 발라스트 탱크로 이동하기 시작하였다. 선측 발라스트의 구멍위치까지 물이 차고 난 후 물은 다시 화물창으로 이동하여 고이기 시작하였다. 동시에 경유는 선측 발라스트 탱크 상부에 어느 정도 고인 후 선체 외부로 유출되기 시작하였다.

Fig. 6(a)는 실험중인 모습을 나타낸 것이다. 실험 전 화물창 내부의 경유 양은 6.19ℓ이었고 실험 후 화물창 내부에 1.3ℓ, 그리고 선측 발라스트 탱크에 0.31ℓ가 남았다. 따라서 나머지 4.58ℓ가 선체 외부로 유출되었다. 한편 선측 발라스트 탱크 상부에는 물의 유입으로 압축공기가 고여 있었다. 따라서 고 에너지 충돌사고로 선측 내판까지 손상되면 이중선체 구조는 해양오염방지 측면에서 큰 효과가 없는 것을 알 수 있다.

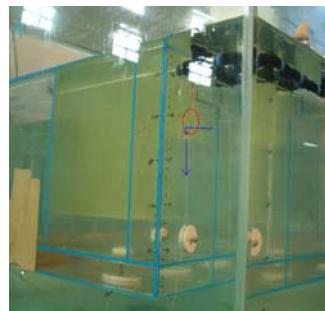


(a) Section view



(b) Plane view

Fig. 5 Test concept for damaged double hull due to upper side collision



(a) oil spillage under test



(b) Oil transfer from cargo tank to external tank

Fig. 6 Test for damaged double hull due to upper side collision

두번째 실험으로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 밸브를 열어 파이프를 통하여 선체외부에 있는 별도의 외부탱크(실험에서는 비닐팩을 사용)으로 기름이송 실험을 수행하였다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 상당량의 경유가 비닐팩으로 이동되었다. 따라서 선박의 상갑판상에 해상사고에 대비하여 외부탱크를 구비하고 사고가 발생하였을 때 구멍정처럼 해상에 낙하하여 활용하면 기름유출을 크게 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

**3.2 충돌사고로 선측 하단이 파손되었을 때**

이중선체 구조에 대하여 선측 하단부에 손상이 난 경우에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 화물창에 벵커 A를 가득 채우고 선측 하단부의 구멍 마개를 열면서 실험을 수행하였다.

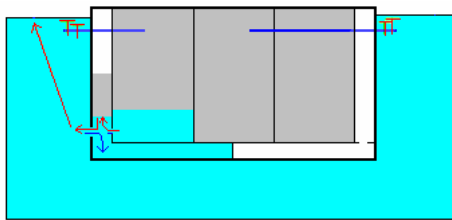


Fig. 7 Test concept for damaged double hull due to lower side collision

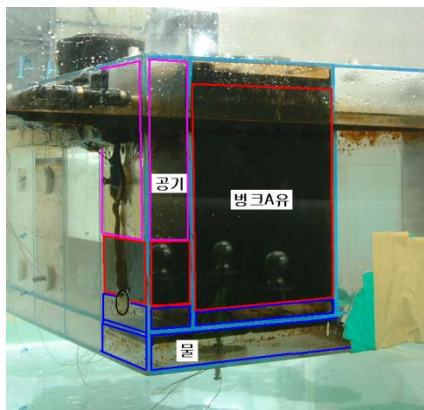


Fig. 8 Test concept for damaged double hull due to lower side collision

모델의 흘수를 230mm이며 정적 상태에서 선측 하단부 내외판의 구멍마개를 동시에 제거 하였다. 모델 외부에서 물이 선측 발라스트 탱크를 통하여 선저 이중저로 유입되면서 화물창에 있는 벵커 A 유는 선측 발라스트 탱크로 이동하였다. 동시에 선측 발라스트 탱크내에 있는 공기가 모델 외부로 유출되었다. 이후 미량의 벵커 A 유가 선체 외부로 유출된 후 발라스트 탱크내에서 안정이 이루어졌으며 벵커 A 유의 유출이 없는 상태에서 발라스트 탱크내에 벵커 A 유가 축적되었다. 그 후 Fig. 8에 나타난 바와 같이 발라스트 탱크내의 벵커 A 유가 유입된 후에 선체 외부로 벵커 A 유가 유출되었다. 이어서 물이 선측 파손부위 높이까지 화물창과 발라스트 탱크에 채워진 후 더 이상 유출은 없었다.

**3.3 좌주사고로 선저가 파손되었을 때**

Fig. 9에 나타난 바와 같이 이중선체의 선저 내외판이 좌주사고로 구멍이 생겼을 때에 대하여 실험을 수행하였다. 첫번째로, 모델의 흘수를 270mm로 하고 화물창에 경유를 가득 채워 실험을 수행하였다. 선저 내외판의 손상 구멍을 연 순간 선저 이중저로 경유가 내려오고 동시에 물이 선저 이중저로 유입되었으며 미량의 경유가 선체 외부로 유출되었다. 다음으로 선저 이중저의 상층에는 경유가 하부층에는 물이 차면서 분리면이 생겼다. 상층의 경유가 선측 발라스트 탱크로 이동을 시작하였으며 이후 선체 내외부의 압력 평형으로 더 이상 경유의 이동과 유출은 관찰되지 않았다.

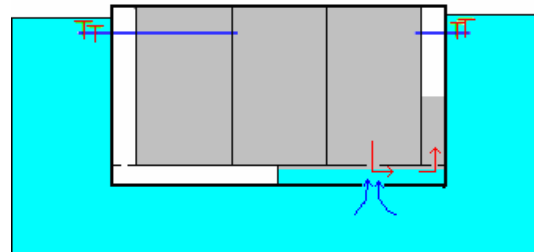


Fig. 9 Test concept for damaged double hull due to bottom grounding

두번째로 흘수를 220mm로 맞추고 병커 A 유를 사용하여 첫번째와 동일 실험을 수행하였다. 선측 발라스트 탱크의 195mm 까지 물이 유입되었으며 병커 A 유의 유출은 전혀 없었다. 이후 해상상태가 좋지 않은 때를 가정하여 횡요(Rolling)와 종요(pitching) 실험을 수행하였으나 유출량은 거의 없었다.

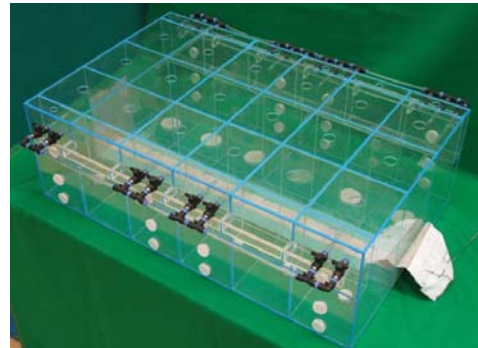
**4. 새로운 개념적 선체구조 실험**

이중선체 모델과 동일한 치수이고 선저와 선측 하단부는 단일선체로, 선측 상단부는 이중선체로 모델을 제작하였다. 선측 하단부를 단일 선체구조로 만들어 선체 파손 시 단일 선측일 때와 이중 선측일 때를 비교하였다. 기름유출 사고 시 해상 유출을 최소화하기 위하여 선체내부 또는 외부탱크로 기름을 이송하는 파이프를 배치하고 각 파이프 끝단부 또는 중앙부에 밸브(Valve)를 설치하여 선체 손상 시 화물창 내외부의 압력차이로 인하여 기름이 이송 또는 차단할 수 있도록 하였다. 파이프의 내경은 5mm 이며 기름의 이동을 관찰하기 위하여 투명한 파이프를 사용하였다.

Fig. 10에 나타난 바와 같이 상갑판상에 파이프와 밸브를 설치한 신모델 I과 파이프를 상갑판상에 설치하지 않고 선측 상부(상갑판상에서 40mm 하부)에 설치한 신모델 II를 각각 제작하였다. 충돌과 좌주사고를 가정하여 모델의 측면과 하부에 구멍을 만들고 필요할 때 구멍을 여닫을 수 있는 마개를 준비하였다.



(a) New type I



(b) New type II

Fig. 10 Fabricated new type hull model

**4.1 좌주사고로 선저가 파손되었을 때(신모델 I)**

Fig. 11은 실험모델을 측면에서 본 모습으로 한 쪽 화물창에는 휘발유를 가득 채우고 다른 화물창은 빈 상태로 준비하였다. 본 실험에서는 단일선저에 구멍마개를 열었을 때 비중 차에 의한 휘발유의 이송 여부 및 유출 여부를 확인하고자 수행하였다.

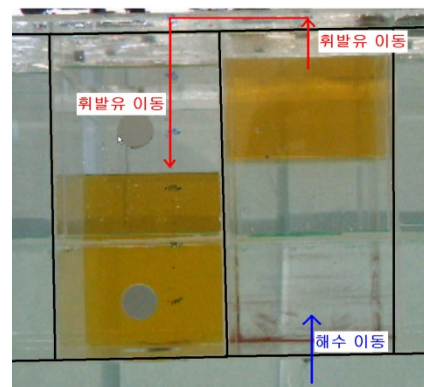
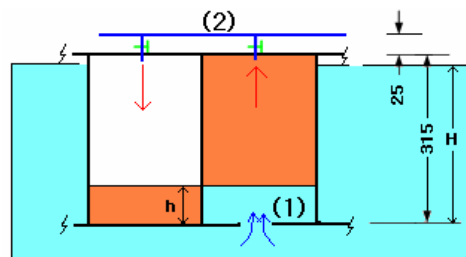


Fig. 11 Test for damaged new type II due to bottom grounding

선저부의 구멍마개를 빼는 순간, 화물창 내외부의 압력차이로 물이 화물창내로 유입되었으나 휘발유 유출은 거의 없었다. 화물창내부의 휘발유는 파이프를 통하여 인접한 빈 화물창으로 이동하였다.

휘발유 이송이 중단되는데 까지 걸린 총 시간은 890 초였으며 이때 인접한 화물창에 고인 휘발유의 깊이는 175mm 이었다. 화물창의 휘발유와 물의 압력차로 인하여 이송되는 휘발유의 양과 시간을 이론적으로 계산하고 실험결과와 비교하였다. 이론 계산에 필요한 휘발유의 비중과 파이프 치수 등을 Table 2 에 정리하였다.

**Table 2** Calculation data for bottom damaged condition of new type I

Gravity of water, $\rho_{water}$	1.0 ton/m <sup>3</sup>
Gravity of gasoline, $\rho_{oil}$	0.72 ton/m <sup>3</sup>
Draft of model, H	287.5 mm
Diameter of hole	60 mm
Inner diameter of pipe	5 mm
Inner diameter of valve	3.2 mm
Size of hold	150mm × 160mm × 300mm

Fig. 11 에 나타낸 바와 같이 물과 휘발유의 비중차이와 선체 내외부의 수두차이에 기인한 압력이 선저 구멍에 작용한다. (1)과 (2)번 지점에서의 베르누이가 정리한 정상흐름의 에너지식을 적용하면 식(1)과 같다(Frank 1986). 단 계산에서 파이프의 표면 거칠기 효과와 휘발유의 점도 등은 무시한다.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 + h_f \quad (1)$$

여기서,  $h_f$ 는 순수 수두손실(Net Head Loss)이다. 물의 점성을 무시하고 파이프 단면적은 구멍의 단면적에 비하여 무시할 정도로 작다고 가정하면 파손구멍을 통하여 유입되는 물의 이동속도( $v_1$ )는 파이프를 통한 휘발유의 이동속도( $v_2$ )에 비해 매우 작은 값이 되며  $v_1 \approx 0$  이라 할 수 있다.  $P_1 = \rho_{water} gH$  이고 실험모델의 파손구멍에서의 중

력가속도가 작용하는 높이는 0 이 됨으로  $\rho gh_1 = 0$  이다.  $P_2$  는 대기압임으로 0 이 되고  $\rho gh_2 = \rho_{water} gh + \rho_{oil} g(0.315 + 0.025 - h)$  이다. 따라서 식(1)을  $h_f$  에 대하여 나타내면 식(2)로 된다.

$$h_f = \rho_{water} gH - [\rho_{water} gh + \rho_{oil} g(0.34 - h)] - \frac{1}{2}\rho_{oil} v_2^2 \quad (2)$$

순수 수두손실( $h_f$ )을 무시하면 (2)지점에서 임의 순간에서의 관속을 통과하는 휘발유의 속도( $v_2$ )는 식(3)으로 된다.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2[\rho_{water} gH - \rho_{water} gh - \rho_{oil} g(0.34 - h)]}{\rho_{oil}}} \quad (3)$$

한편 화물창의 부피변화율( $\Delta V$ )는 식(4)로 된다.

$$dV = dh \cdot (0.15 \times 0.16) = 0.024dh \quad \text{또는}$$

$$dV = Q \cdot dt = v_2 \cdot A \cdot dt \quad (4)$$

여기서, Q는 유량, A는 파이프의 단면적, t는 기름의 이동시간이다.

식(4)로부터 시간변화율(dt)는 식(5)로 된다.

$$dt = \frac{0.024dh}{v_2 \cdot A} \quad (5)$$

Table 2 의 실험조건에서 밸브의 내경이 3.2mm 임으로 식(5)를 사용하여 계산하면 식(6)이 된다.

$$dt = \frac{0.024}{v_2} \frac{4}{\pi d^2} dh = \frac{2984.2}{\sqrt{1.183 - 7.694 \cdot h}} dh \quad (6)$$

따라서 휘발유가 파이프를 따라 이동하고 어느 순간이 되면 내부의 휘발유 깊이에 의한 위치에너지와 외부 물의 수두에 의한 위치에너지가 평형을 이룬다. 즉, 식(2)는 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\rho_{water} gH = \rho_{water} gh + \rho_{oil} g(0.34 - h) \quad (7)$$



식(7)로부터 화물창내 유입된 물의 수두(h)는 0.153 m 가 되고 총 걸린시간(T)는 식(8)로부터 842 초가 된다.

$$T = \int dt = \int \frac{2984.2}{\sqrt{1.183 - 7.694 \cdot h}} dh \quad (8)$$

Fig. 12 는 실험에 걸린 시간과 이송한 휘발유의 양을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 밸브의 내경은 3.2mm 였다. 이론적 계산결과와 실험결과와는 유사한 경향을 나타내었으나 약간의 차이가 발생하였다. 그 이유는 휘발유의 점성으로 인한 파이프 내부에서의 마찰과 실험 수행 시 흡수 및 수두의 계측 오차 등에 의하여 발생한 것으로 생각된다. 실험에 사용한 파이프의 내경 5mm 로 이론적 계산 결과도 함께 나타내었다.

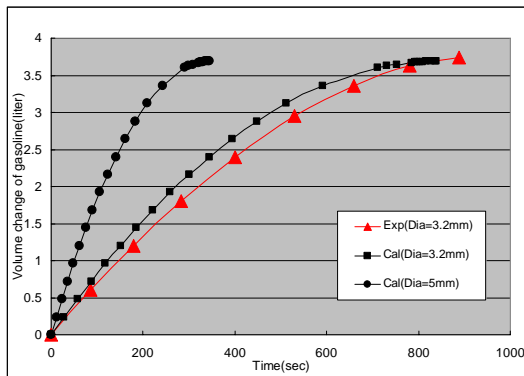


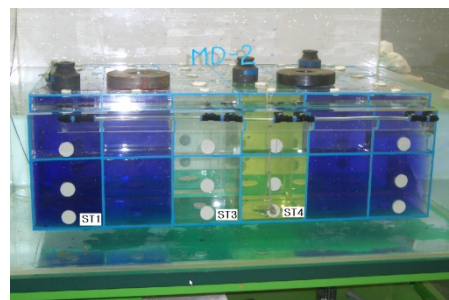
Fig. 12 Volume of transfer oil according to change of time

한편 같은 실험조건으로, 휘발유 대신에 병커 A 유를 사용하였다 단일 선저에 파손이 생겼을 때 모델의 흡수를 270mm 로 하여 동일한 유출실험을 수행하였다. 마개가 열리는 순간 미소량의 병커 A 유가 압력차로 인하여 유출되었으나 이후 더 이상의 유출은 없었다. 또한 파이프를 통한 이송 실험을 수행하였으나 이론적으로 비중차이에 의한 이송은 이루어질 것으로 계산되었으나 병커 A 유의 높은 점도로 인하여 상감판상에 있는 파이프를 통한 이동은 없었다. 그러나 파이프의 직경이 커지면 압력차로 인한 이동이 이루어지는 것을 파이프

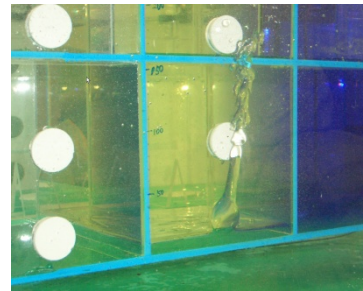
직경에 따른 압력차 실험으로부터 확인하였다.

4.2 충돌사고로 선측하단부의 단일선측이 파손 되었을 때(신모델 II)

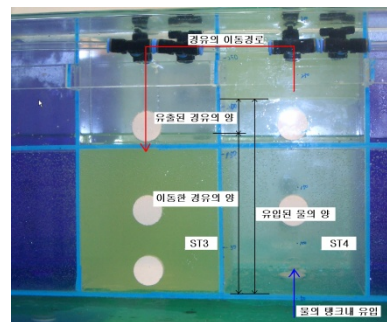
Fig. 13 은 선측 화물창에 경유를 적재하고 선측 하단부 단일선측에 구멍이 생겼을 때 기름이 선체 외부 또는 빈 화물창으로 이동하는 것을 관찰한 것이다.



(a) before test



(b) directly after opening of the stopcock



(c) under test

Fig. 13 Test for damaged new type II due to lower side collision

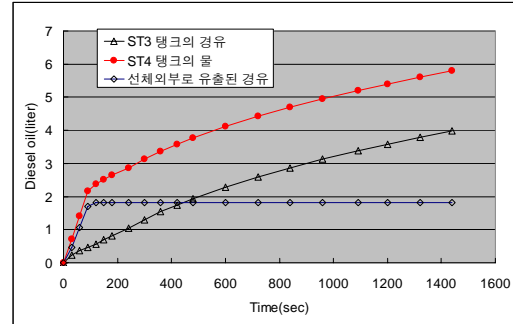


흘수 275mm 를 맞추기 위하여 나머지 화물창에는 파란색의 수성잉크로 착색된 물로 채우고 상갑판상에 웨이트(Weight)로 중 및 횡경사를 조절하였다.

Fig. 13(b)에 나타난 바와 같이 구멍의 마개를 여는 순간 물이 선체내부로 유입되면서 내부의 경유는 파이프를 통하여 인접한 빈화물창으로 이동하거나 큰 구멍을 통하여 선체외부로 유출되었다. 이후 구멍 높이까지 화물창 내부가 물이 차면 더 이상 선체 외부로의 경유 유출은 없었으며 인접한 화물창으로만 이동하였다. Fig. 13(c)는 실험중 외부유출 없이 빈 화물창으로 경유가 이동하는 모습을 나타낸 것으로 외부로 유출된 경유의 양과 다른 화물창으로 이동된 경유의 양, 화물창내부로 유입된 물의 양을 나타낸 것이다. 실험후 외부 경유 유출량은 약 0.777ℓ이었다.

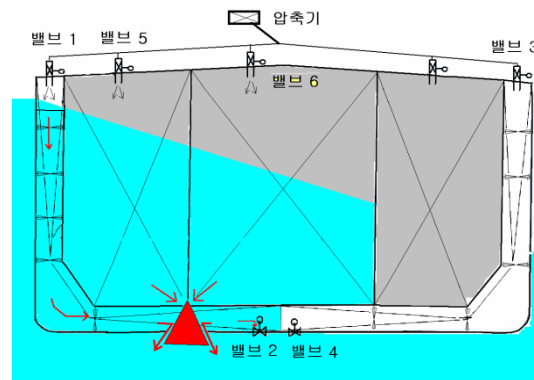
Fig. 14(a)는 선측 화물창에 경유를 가득 채우고 선측 중앙부의 단일 선측에 구멍이 생겼을 때 기름의 선체외부 유출과 빈 화물창으로 기름이 이동하는 실험을 수행한 것이다. 실험전 모델의 흘수는 275mm 로 맞추었다.

Fig. 14(b)는 실험시간 경과에 따른 선체 내외부의 경유의 이동량과 선체 내부로의 물의 유입량을 나타낸 것이다. 실험 시작 후 약 120 초부터는 외부로의 경유 유출이 없었으며 그 이후는 모두 빈 화물창으로 경유가 모두 이동하였다. 선측 하단부 구멍에 대한 실험보다 많은 양의 경유(약 1.8 ℓ)가 유출되었다.

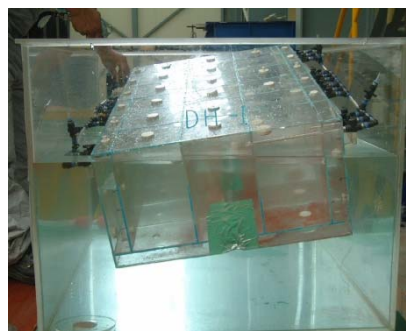


(b) Volume of the transfer's oil and water according to change of time

Fig. 14 Test for damaged new type II due to middle side collision

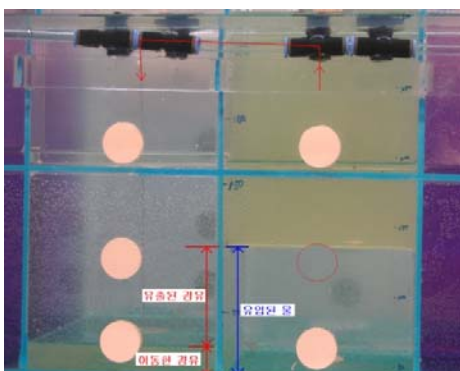


(a) Concept of heel recovery



(b) Test of heel and trim recovery

Fig. 15 Stability test for heel and trim condition



(a) under test

### 4.3 복원성 회복 실험

좌초사고 시 선저부분의 손상으로 인하여 많은 양의 해수가 선체 내부로 유입되면 선박이 침몰할 수 있으며 심각한 횡경사 또는 종경사로 선박의 복원력을 상실할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 Fig. 15(a)에 나타낸 바와 같이 화물창내의 유입된 해수를 압축공기로 선체 외부로 밀어내는 개념을 도입하였다. 횡경사를 바로잡기 위하여 해수가 유입된 화물창과 발라스트 탱크에 밸브 2 를 열고 밸브 1, 5, 6 을 통하여 압축공기를 적절히 주입함으로써 유입된 해수가 밸브 2 또는 좌초된 부위를 통하여 선체 외부로 빠져 나가면서 선박의 자세를 복원한다.

Fig. 15(b)에 나타낸 바와 같이 종 및 횡경사된 실험모델에 대하여 외부에서 파이프에 공기를 주입하고 밸브를 조절함으로써 침수된 화물창내의 해수를 선체 외부로 배출하는 실험을 수행하였으며 복원력이 회복되는 것을 확인하였다.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구는 유조선이 운항 중 충돌 또는 좌초사고로 선체가 파손되었을 때 내부에 적재되어 있는 기름이 해양으로 유출되는 현상을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 실험모델은 초대형 유조선(VLCC)의 1/100 크기로 제작하였으며 화물창 내에 적재되는 기름은 휘발유, 경유, 벙커 A 유를 사용하였다. 실험모델의 선체형상은 이중선체와 밸브와 파이프시스템을 갖춘 새로운 형태의 선체구조이며 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

이중선체 구조는 저 에너지 선측 충돌사고 시 선측외판이 파손되더라도 선측 내판은 손상되지 않아 선체 외부로 기름이 유출되지 않는다. 그러나 고 에너지 선측 충돌사고 시 선측 내외판 모두가 손상됨으로써 기름이 해양으로 유출된다. 그 유출량은 구멍의 크기가 같을 때 선측 하부가 파손되는 것보다 선측 상부가 파손되는 것이 많은 것으로 나타났다.

고 에너지 선측 충돌사고에 대비하여 이중선측

폭을 크게 설계하는 것이 선측내판의 손상방지에 효과적이다. 또한 선측 내판이 파손되는 대규모 사고에서도 화물창으로부터 흘러나온 기름이 선측 발라스트 탱크에 보다 많이 보유할 수 있어 해양으로 유출이 적다.

선박의 출수가 충분히 클 때 선저좌주 사고로 이중저가 손상되면 해수와 기름의 비중차와 압력차로 기름의 해양 유출은 단일 또는 이중선체 모두 거의 없었다. 그러나 출수가 작을 때 손상탱크에 원유가 가득 채워져 있을 때 단일선체의 유출량이 많을 것으로 예상된다.

해상 기름유출을 최소화 할 수 있는 아이디어로서 이중선측/단일선저 구조로 되어 있으며 파이프와 밸브 시스템이 구비된 새로운 형태의 선체를 제안하였다. 그 개념은 충돌과 좌초사고로 선체가 파손되었을 때 화물창내의 기름과 유입된 해수의 비중차이 또는 선체 내외부의 압력차이를 이용하여 구비된 파이프를 이용하여 파손된 화물창의 기름을 발라스트 탱크 또는 다른 화물창으로 이동하는 것이다. 실험을 통하여 해상오염방지에 충분히 효과가 있음을 확인하였다.

상갑판상에 외부탱크를 구비하여 선체가 파손되었을 때 이를 해상에 낙하하고 새로운 선체구조에서 채택한 파이프와 밸브를 이용하여 화물창의 기름을 외부탱크로 이동함으로써 해상유출을 크게 줄일 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

해상사고로 선체가 손상하여 화물창 또는 발라스트 탱크에 과도하게 해수가 유입됨으로써 선박의 침몰 또는 복원력(Stability)에 문제가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 압축공기를 이용하여 발라스트 탱크 또는 화물창에 유입된 해수를 해상으로 불어내는 실험을 수행하였으며 그 효과를 확인하였다.

각종 해난사고로 유조선의 선체가 손상하여 기름이 유출되는 사고를 줄이기 위하여는 사고 예방 시스템을 갖춘 선박에 대한 연구 그리고 선체의 화물창 배치와 시스템적 운용에 대한 연구 등도 향후 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- DNV, 2007, DNV Rules for Classification Ship, Part 8: IACS Common Structural Rules, Chapter 1: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker with Length 150 meters and above, Section 5.
- Frank M.W., 1986 Fluid Mechanics, McGraw-Hill Book Company.



&lt; 김을년 &gt;



&lt; 하우일 &gt;



&lt; 최익흥 &gt;