

자성유체를 이용한 유희수선박의 선형연구

이귀주* · 박영식** · 김경화*** · 노준혁**** · 장희문*****

*조선대학교 선박해양공학과 교수, **조선대학교 선박해양공학과 BK21계약교수

조선대학교 선박해양공학과 대학원생, *(주) 플러스 인터내셔널, ***** (주) 세기 이. 엠. 이

A Study of the Hull Form of Oil Recovery Vessel by Using Magnetic Fluid

KWI-JOO LEE*, YOUNG-SIK PARK**, KYOUNG-HWA KIM***,
NO JOON HYUCK**** AND JANG HEE MOON*****

*Professor Department of Naval Architecture Chosun University, **BK21 Contract Professor Department of Naval Architecture Chosun University,

Graduate Student Department of Naval Architecture Chosun University, *Plus International CO., LTD., *****SEGI E. M. E

KEY WORDS: Resistance test 저항시험, Ferrofluid 자성유체, Magnetic film 자성 박막, High speed towing tank 고속 예인수조, Oil recovery vessel 유희수선

ABSTRACT: A study on the new active circulation type oil-water separation system including the oil-water separation system of magnetic film was carried out. Separation system is composed of several active types of circulating oil separation steps and one magnetic film separation step at final stage. At the magnetic separation step, ferrofluid easily forms a weak magnetic mixture with oil, which is from the water by magnetic field gradient. The vessel has been designed to run at the maximum speed of 25 knots. And two typical forms of SWATH and Catamaran have been studied as a new type of oil recovery vessel.

1. 서 론

기름의 하역 및 선적작업이 이루어지는 유조선의 입·출항이 빈번한 정유시설 인접항은 누유사고의 위험성이 매우 크므로 사고에 대비한 효과적인 방제장비의 확보가 절실히 요구된다. 또한 이러한 유출사고는 어민의 경제활동에 영향을 미치며 그들의 생계를 위협할 수 있으므로 유출기름은 신속하게 방제되어야 한다. 현재 국내에서 시행되고 있는 방제대책으로는 물리적인 방법, 화학적인 방법 및 미생물학적인 방법 등이 사용되고 있지만, 어느 하나도 만족스러운 결과를 기대하기 어려운 실정이다. 그런 면에서 유희수선은 선박의 자체동력을 이용하여 사고해역을 신속하게 이동하면서 작업을 수행할 수 있으므로, 누유수 작업반경이 넓으며 환경의 변화에 따른 적응력이 우수한 장점이 있다. 본 연구에서는 능동순환식 유희수 시스템에 자성 박막식 유수분리단계를 추가하여 누유 수거의 효율을 향상시키고자 노력하였으며, 이러한 단계에 적합한 유희수선 선형으로 쌍동선형 및 SWATH 선형에 관해 비교 연구하였다.

2. 유희수선

유희수선은 선박의 자체동력을 이용하여 사고해역을 신속하게 이동하면서 작업을 수행할 수 있으므로, 누유수 작업반경이 넓으며, 파도 및 조류변화에 따른 적응력이 우수하여 고정식보다는 작업성능이 우수한 장점을 가지고 있다. 해상에서

의 방제작업은 유희수선, 오일 붐(Oil Boom), 예인선, 회수유운 반선, 회수유저장선, 보급선, 기타 작업선 등의 선단에 의하여 이루어진다.

일반적으로 내해의 경우 외해에 비해 해상상태가 비교적 조용하며, 고정식 유희수기를 사용해도 효과적으로 누유수거가 가능하나, 외해나 우리나라의 서해안처럼 섬들이 많은 곳에는 파도와 조류의 속도가 빠르고 지형적으로 방제작업이 불리하므로, 방제작업이 신속하게 이루어져야 한다.

국내에 보유하고 있는 대부분의 방제선은 분리된 유희수기를 선박위에 싣고 다니면서 필요할 때 바다위에 띄워 기름을 수거하는 형태의 방제선이며, 기존의 유희수기는 주로 펌프로 퍼 올리기 때문에 대량의 해수가 동시에 유입되므로 회수효율이 낮을 뿐만 아니라, 해수표면에 얇게 퍼져있는 기름의 수거는 거의 불가능하다.

3. 능동순환식 유희수선형에 적합한 고속 선박

3.1 쌍동선

쌍동선의 자연능동 및 자성박막식 유수분리 선박으로서의 잇점은 첫째, 횡적인 안정성(transverse stability)이 단동선보다 크다. 이는 폭 방향의 길이가 증대함으로써 복원 모멘트가 증가하기 때문이다. 둘째, 두 개의 선체 사이로 오염수를 유도할 수 있다. 셋째, 쌍동선 선형 결정에 중요한 역할을 하는 기하학적 촛법의 다양성으로 해서 선박 성능의 제고를 꾀할 수 있

다. 즉, 단동선의 수선면적의 크기는 선택할 수 있는 범위가 제한되어 있지만, 쌍동선에서는 어느 정도 유연성있게 선택할 수 있어 내항성의 향상을 꾀할 수 있다. 넷째, 공기 부양이나 수중익을 설치함으로써 선박의 성능 향상을 꾀할 수 있다.

3.2 SWATH

최소 수선면적 쌍동선(SWATH)의 선체를 지지하는 원리는 보통형 쌍동선과 같이 정적 부력에 의한 것이지만, 배수량의 대부분은 수면하에 침수되어 있고 수면상 갑판부 선체와 수면하 원통형 잠수체(lower hull), 그리고 이를 연결하는 스트럿(strut)으로 구성되어 있다.

이 선형은 파도가 쌍동선체를 연결하는 갑판을 칠 정도로 높아지기 전까지는 내항 성능이 우수하여 큰 파랑 중에서도 고속을 유지할 수 있고, 수선면적이 작기 때문에 파도에 의한 영향을 비교적 적게 받게 되며, 두 개의 선체 사이로 물과 기름의 혼합류를 유도할 수 있다

본 연구에서 채택하고자 하는 자연순환방식의 효율을 높이기 위해서는 선체 내부로 유수혼합류를 유도하여 단계적인 유수분리과정을 효과적으로 진행시켜야 하는데, 쌍동선형과 SWATH 선형의 다음과 같은 이유로 본 연구의 선형으로 적합한 것으로 조사되었다.

- 선체 중앙부로 유수혼합류를 용이하게 유도가능
- 양측선체를 수로로 이용
- 선저부 용량이 상대적으로 크므로 자연유수분리 효율이 큼
- 고속화에 무리가 없음
- 파랑중에 타선형에 비하여 작업성이 우수
- 갑판면적이 크므로 작업공간이 큼

SWATH 선형은 깊은 물에서는 처리할 수 있는 공간이 넓기 때문에 유리하나 흘수가 얇은 경우에는 제한을 받으므로, shallow water에서는 쌍동선이, 그리고 깊은 물에서는 SWATH 선형이 적합할 것으로 예상된다.

3.3 자연순환식 유회수선의 초기사양

자연순환방식의 채택과 고속화 선형의 두가지 연구목표에 적합한 대상 선형 쌍동선과 SWATH 선형의 주요 준범은 다음과 같다.

Table 1 Dimension of oil recovery vessel

Length PP	37m
Breath	18m
Depth	7m
draft	4m

4. 자연순환식 유수분리장치

능동식 순환 방식의 유수분리장치는 Fig. 1에 도시한 바와 같은 순환방식으로서 유입구를 통하여 유입된 기름들이 3단계 이

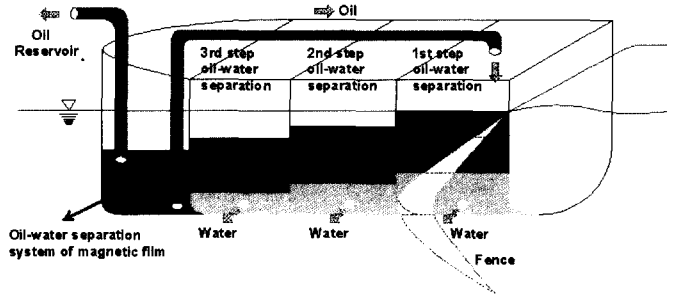


Fig. 1 Active type of oil separation system

상의 자연분리과정과 1단계의 자성 박막식 분리과정을 지속적으로 반복하기 때문에 수거효율이 매우 높은 장점이 있다. 또한 혼합유체의 유도과정에서 쌍동선체 사이의 선저의 유출구로 해수는 자연적으로 밖으로 밀려가게 되어 있어 단위 공간당 유입·유출 운동량이 극대화됨으로 현재 운용중인 기존 방제선박에 비해 훨씬 넓은 지역의 방제를 감당할 수 있게 된다.

4.1 자성박막식 유수분리장치

자성유체는 마그네타이트(*magnetite*; Fe_3O_4)와 같은 강자성 미립자(단자기구역; *single magnetic domain*)를 유기용매에 분산시킨 콜로이드 용액으로서 매우 안정하여 자기장이나 중력장에서도 분리가 일어나지 않는다. 용매에 분산된 강자성 미립자의 자화의 회전이 비교적 자유로움으로 자성유체는 자기적으로 상자성체와 유사한 특성을 보이거나 자화도는 상자성체에 비해 대단히 큰 값을 갖는다(초상자성). 자기장의 구배 내에서 유체 내의 강자성 미립자는 자기력을 받아 액체에 대한 상대적인 운동을 하지만 일반적으로 무시할 수 있을 정도 작아서 개개 입자에 작용하는 자기력의 합은 유체에 전달되므로 단위 체적당 자성유체가 받는 힘은 자성유체의 자화도 \vec{M} 과 자기장 구배 $\vec{\nabla}H$ 향으로써 표현된다.

$$\vec{F} = (\vec{M} \cdot \vec{\nabla})\vec{H}/4\pi \tag{1}$$

이 식을 자기장에 대해 적분을 하면 자기에너지를 표현하는 식을 얻을 수 있고 Bernoulli의 방정식에 이 항을 더함으로써, 자성유체의 운동을 기술할 수 있다.

이러한 유기분산매 자성유체는 기름과 쉽게 혼합되어 혼합체는 초상자성을 띠게 되므로 자기장 구배하에 가속을 받는다. 이 원리를 전술한 자연식 유수 분리와 함께 사용하면 수면 유포된 기름을 효율적으로 제거할 수 있을 것이다. 기름이 물에 유포되어 있을 때 기름이 물위에 퍼져 나가는 성질은 다음과 같이 된다.

$$S_{ow} = \gamma_w - \gamma_o - \gamma_{ow} \tag{2}$$

여기서, S_{ow} 는 물위에 유포된 기름의 퍼짐계수이고, γ_w 는 공기에 대한 물의 표면장력, γ_o 는 공기에 대한 기름의 표면장력, γ_{ow} 는 물에 대한 기름의 표면장력, dynes/cm이다.

위 식에서 S_{ow} 가 양의 값을 갖는다면 계의 자유에너지가

증가하여 물위에 유포된 기름은 얇은 막을 형성하며 퍼져 나 갈 것이다. 그러나 음의 값을 갖는다면 기름은 퍼지지 않고 렌즈 모양으로 모여 있게 된다. 위 식에서 알 수 있는 바와 같이, 유회수에 사용 될 자성유체의 퍼짐계수는 살포시 조류, 파도, 바람 등에 의해 기름과 손쉽게 혼화가 될 정도로 충분히 커야 하지만 기름보다 크면 안 된다. 자성유체의 퍼짐계수는 계면활성제 양과 유기용매의 종류 등에 의해서 결정되므로 자성유체는 유의해서 선택되어야 한다. 자성유체 선택 시 고려하여야 할 또 다른 사항은 미립자의 크기이다. 마그네타이트의 경우, 입자의 크기가 100Å미만 일 때 우수한 분산물의 자성유체가 가능하고 파도나 조류에 의해서 물밑으로 가라앉지 않고 기름과 쉽게 혼화 될 수 있다. 입자의 크기가 자성유체의 자기적 특성에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 두 입자간 자기적 상호작용으로 인한 위치 에너지는 다음과 같다.

$$U = -2\mu_1 \cdot \mu_2 / r^3 \quad (3)$$

여기서 모멘트 μ_1 과 μ_2 는 서로 평행하며 r 만큼 떨어져 있다. $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ 이라 가정하면, $\mu = \pi D^3 I_s / 6$ 이고 I_s 와 D 는 각각의 단위부피당 포화자화도이고 단 구역 입자의 직경이므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$U = -2(\pi D^3 I_s / 6)^2 / r^3 \quad (4)$$

위치 에너지는 표면끼리 서로 닿을 때 최소가 된다 ($r = D$). 만일 이 위치 에너지가 열 에너지 kT 와 같다면 대응하는 입자의 직경은 열 진동만으로 입자간의 응집을 막을 수 있는 입자 직경의 상한선을 의미한다.

London형의 반 데르 발스 힘은 중성 원자에 유도된 쌍극자들 간의 상호 작용에 기인한다. 가까운 거리에 대한 표현식은

$$U = -AD/24s \quad (5)$$

이고 먼 거리에 대해서는 다음과 같다.

$$U = -16A(D/2s)^6/9 \quad (6)$$

위 식에서 D 는 입자의 직경이며 s 는 입자의 구표면간의 최단 거리이고 비례상수 A 는 $A = \pi^2 n^2 \lambda$ 이다. 한편 A 에 대한 표현식에서 n 는 원자수 밀도이고 $\lambda = \frac{3}{4} h \nu_e a^2$ 이다. (a 는 원자의 분극도이고 이온화 에너지이다.)

위 표현식들은 유기용매 내의 강자성 입자들의 경우처럼 입자들 사이의 공간은 유전체로 메워졌다는 가정하에서 유도되었다.

유기용매 자성유체 내에서 입자간의 반 데르 발스 흡인력은 입자 표면에 화학 흡착된 분산매로 인한 반발력으로써 극복된다.

그러므로 유기용매 내에서 강자성 입자가 안정하게 분산되기 위한 필요 조건들은 열 진동으로써 자기적 상호 작용을 보상할 수 있을 만큼 충분히 작은 입자의 크기와 London형의 반 데르 발스 흡인력을 극복하기 위한 계면 활성제 간의 반발력이다.

본 연구에서는 위와 같은 특성을 갖는 자성유체를 방제선 안으로 유입된 기름과 물의 혼합체위에 부분적으로 살포하여 경제성 및 기름제거의 효율성을 증대시켰다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 순환 통로는 그 끝에서 기름층이 두꺼워지도록 흐

름 방향을 따라 점점 좁아지는 형태를 갖고 있다. 그러나 통로의 형태는 박리가 없도록 적절히 설계되어야 한다. 자극 사이의 기름층은 자기구배에 의한 수직 상방향 자기력을 받게되어 통로 끝의 분리막을 거쳐 다른 통로로 흘러간다(Fig.2(b)참조). 여기서 분리막의 위치는 순환통로의 내벽에 고정되었으나 인가되는 자기장의 세기를 조절함으로써 유수경계면을 분리막 아래에 놓을 수 있다. 이때 상층의 기름은 분리막 상부에 연결된 통로를 자연스럽게 흘러 갈 것이다. 또한 이러한 구조를 갖는 본 유수분리장치는 움직이는 부분이 없으므로 타 유회수기에 비해 보수가 용이하고 내구성이 좋다.

5. 모형시험

5.1 시험수조의 특성

모형시험은 조선대학교 회류수조와 미국의 Davidson lab.의 고속예인수조에서 수행하였다.

고속 예인 수조(Davidson lab.)

L×B×D : 95.40 × 3.66 × 1.83 m

Speed range : 0 ~ 30 m/s

Double-flap programmable wave maker

- ① 여러 가지의 파 생성이 가능
- ② Both regular waves
- ③ Psuedorandom waves
- ④ 20 inch까지의 규칙적이고 불규칙한 wave생성이 가능

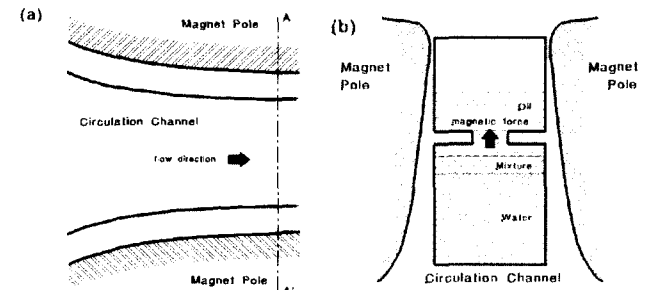


Fig. 2 (a)Structure of magnetic oil-water separator and (b) cross-sectional view A-A'



Fig. 3 High speed towing tank

5.2 모형시험결과

쌍둥선과 SWATH 선형의 모형시험을 수행한 결과의 C_R 을 식 (5)에 의해 해석하여 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에 보인 바와 같이 SWATH 선형이 전반적으로 저항이 적었음을 알 수 있다.

$$C_{TM} = C_{FM} + C_R \quad (5)$$

6. 능동순환식 유수분리장치 모형시험

능동순환식 유수분리 장치의 효율을 향상시키기 위하여 Fig. 5와 같은 유수분리 장치의 모형을 제작하여 격벽의 높이 및 모형의 길이와 폭을 Table 2에서와 같이 변화시켜 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에 보인 바와 같이 격벽의 위치를 적절히 조절하면 회수효율을 85%까지 향상시킬 것으로 예상된다.

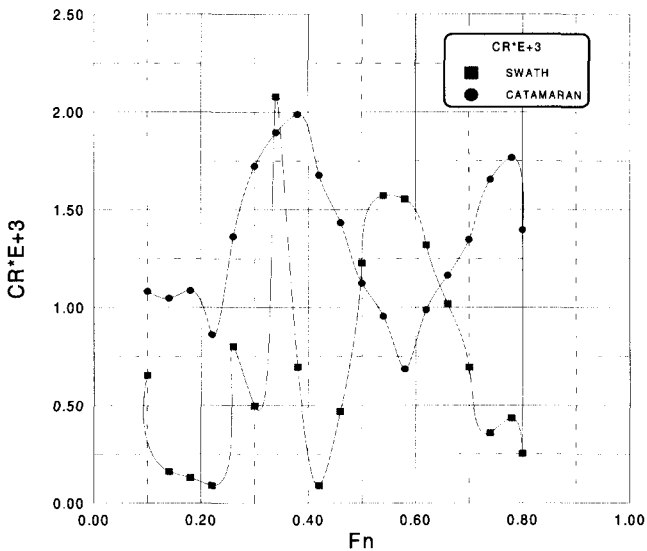


Fig. 4 C_r, v_s, Fn curve

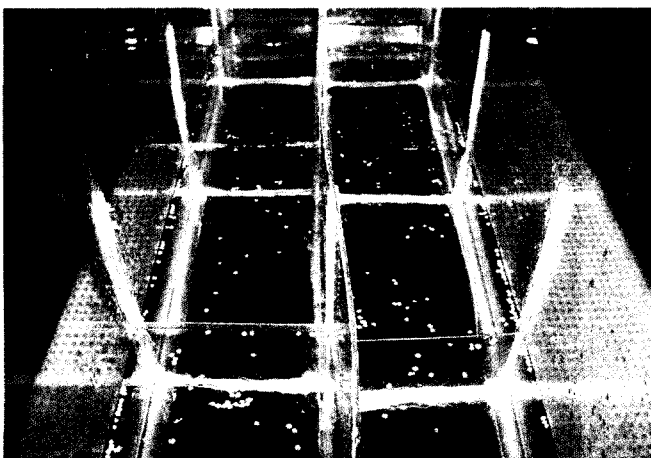


Fig. 5 Model of active type oil separator

Table 2 Principal dimension of model of active type oil-water separating system

	Type 1-1	Type 1-2	Type 2-1	Type 2-2
Length (m)	800	1000	800	1000
Breath (m)	400	800	400	800
Depth (m)	300	300	300	300
High difference of bulk head	10	10	5	5

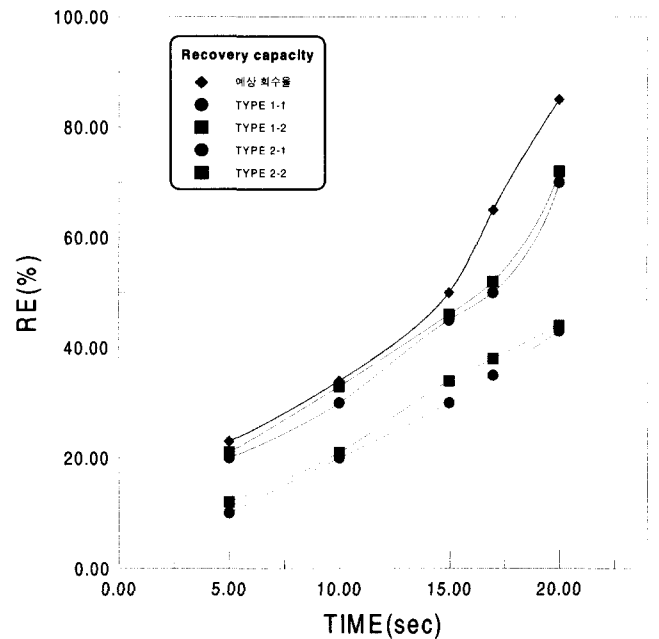


Fig. 6 Recovery capacity

7. 결 론

- (1) 자연순환식 고속 방계선으로서 쌍둥선이나 SWATH선형이 선형특성상 적합하나, Shallow Water(얕은 물)에서는 쌍둥선형이 깊은 물에서는 SWATH 선형이 적합할 것으로 예상된다.
- (2) 자연순환 방식의 유수분리 선박의 예상 회수 효율은 85%로서 기존의 유회수 방식보다 유회수 성능이 우수할 것으로 기대된다.
- (3) 자성박막식 유수분리장치는 아직 실용화되지 않은 기술이나 자연순환식 유수분리 과정에 포함 되면 보다 더 높은 수거 효율을 높일 것으로 예상된다.

후 기

위 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 김장환·현범수(1997). “흡착식 유회수기의 회수율 추정에 관한 연구”, 한국해양공학회지 제11권, 제3호, pp 124.
- 송동업·윤경환(1997), “벨트식 유회수기를 사용한 디젤유 회수에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지 제11권 제3호, pp 132.
- 이귀주·한재호(1999), “능동식 유회수 선박의 개발”, 한국해양 공학회 추계학술대회 논문집.
- 이귀주·박영식·김경화(2000). “자성박막식 유수분리장치를 장착한 유회수선 개발에 관한 연구”, 대한조선학회지 춘계학술대회 논문집.
- Ferromagnetic Materials Vol.2 Edited by E. P. Wohlfarth.
-
- 2000년 10월 25일 원고 접수
2001년 4월 23일 수정본 채택