

## 유회수기의 유체역학적 특성

현 범 수<sup>(1)</sup>

### Review on the Hydrodynamic Characteristics of Oil Skimmers

by

Beom-Soo Hyun<sup>(1)</sup>

#### 요약

해양오염 사고시 유출유의 수거를 위하여 사용되는 유회수기에 대하여 고찰하였다. 논문의 주요 내용은 (1) 유회수기의 종류, 장단점, 성능지표 및 시장현황에 대한 개괄적인 설명과 (2) 유회수 성능에 영향을 미치는 인자들에 대한 고찰, 그리고 (3) 유회수기 분야에 대하여 현재까지 발표된 논문들에 대한 핵심 아이디어들을 소개하였다. 끝으로 (4) 유체역학적 관점에서 본 유회수기의 특성과 해양, 토목, 기계등 유사관련분야의 연구결과가 유회수기 해석에 어떻게 이용될 수 있는지에 대하여 고찰하였다.

#### Abstract

The hydrodynamic characteristics of oil skimmers are reviewed. The paper consists of (1) introduction of the general aspects of oil skimmers, including kinds, performance indices, current market situations, (2) the analysis of factors affecting oil-skimming, (3) the review of existing papers with a special focus on hydrodynamic problem and finally (4) conclusions and some suggestions. The purpose of this paper is to draw hydrodynamicists' attentions on oil skimmer, more broadly on marine oil spill.

Keywords : Oil Skimmer(유회수기), Hydrodynamics(유체역학), Suction-type(흡입식), Adhesion-type(부착식), Viscosity(점성), Current(조류), Wave(파도), SER(누유직면율)

#### 1. 서 언

주지하다시피 국내 해양유류 유출사고의 대부분은 유류를 대량으로 적재 또는 수송하는 유조선이나 대형 화물선의 좌초, 충돌 또는 침몰등 해난사고

에 기인한다.(현범수 등, [1993]) 사고지역은 유조선 등의 출입이 잦은 항구근처이며, 사고의 특징은 일시에 많은 양의 기름이 바다에 유출된다는 사실이다. 따라서 장기간에 걸친 해양오염방제작업 보다는 긴급방제에 초점을 맞추어서 일시에 사

(1) 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

유회수기의 유체역학적 특성

Table 1 Classifications of Oil Skimmer

스키머 종류	안정성	회수율 (RR)	회수효율 (RE)	이동성	쓰레기/불순물 처리기능	수거가능한 기름의 점성영역	전개 및 회수성능	보수유지 및 비용	비 고
흡입식	정수중 최적 단과중 불량	높음. 펌프 용량 의존	낮음. 유수 분리 필수.	매우우수. 주로 소형.	불량	넓은 범위. 重質油엔 부적.	우수.	우수. 저가.	소형. 기능성.
위어 (Weir)식	정수중 최적. 파랑중 문제점.	높음.	낮음. 특수 환경우 높음	소형:우수 대형:보통	다소 불량. Hopper 설치.	주로 輕, 中質油 가능.	우수.	우수.	소형 혹은 대형 전용선.
붐 스키머	비교적 양호	높음.	비교적 높음.	대형장비 필요.	선별처리가 가능.	中質油에 최적.	전용선박 필요	고가.	대형사고시 최적.
와류식	정수중 양호. 파랑중 문제점.	보통 혹은 양호.	낮음.	소형:우수 대형:보통	주의 필요.	中質油에 적합.	비교적 우수.	비교적 저렴.	내구성 양호. 정온해역용.
침수판식 (SPS) *	선박자체의 운동에 의존.	매우 높음.	높음.	대부분 중대형.	전방에서 사전 차단.	中質油이하에 적합.	전용선박.	거의 불필요.	흡입식의 일종. 2-3노트 운항.
로우프 몹식	매우 우수.	보통 혹은 양호	비교적 높음.	우수.	쓰레기 유무에 무관하게 사용	넓은 범위. 대부분 적용가능.	비교적 우수.	저가. 소모 품 개념.	파랑중 우수. 다양한 종류.
디스크식	비교적 양호. 단과중 문제점.	보통.	높음.	소형:우수 대형:보통	비교적 무난.	넓은 범위. 中質油에 최적.	비교적 우수.	우수.	높은 RE. 비교적 고가.
드럼식	크기와 무게에 따라 다름.	보통 혹은 양호.	높음.	소형:우수 대형:보통	비교적 우수.	넓은 범위. 디스크 형 보다 양호.	우수.	우수.	높은 RE
벨트식(훅차, 부착식)	비교적 양호.	높음.	비교적 높음.	대부분 대형.	대부분 동시 수거 가능.	넓은 범위. 重質油에 적합.	전용선박	보통. 정기 점검 필요.	다양한 종류. 중 질유(H)에 적합.
브러쉬식	대부분 매우 우수.	비교적 양호.	비교적 높음.	대부분 우수.	대부분 우수.	모든 종류 가능. 重質油에 적합.	우수.	비교적 우수.	기름종류에 무관하게 사용.

고를 처리하는 순발력이 요구된다. 이러한 신속한 처리를 위해서는 오일펜스와 유회수기 및 유회수선을 이용한 물리적인 기름수거가 가장 중요하고 기본적인 방제기법이다.

물리적 기름수거 장치중 유회수기와 관련된 연구자료들은 미국 연안경비대를 중심으로 1970년대에 개발된 유회수기에 대한 성능테스트 결과와 일본해난방지협회를 중심으로 1980년대에 발표된 수조실험 결과들이 대표적이다. 이 결과들은 유회수기의 시제품개발과 성능평가에 초점을 맞추어 진행되었기 때문에 학술적이라기 보다는 직접 사고현장에 적용하기 위한 실용기술적인 측면이 강한 특징이 있다. 그외에도 방제기자재 업체나 많은 관련단체들의 보고서에서도 유회수기에 대한 정보가 산재해 있는데 대표적인 문헌을 소개하면 Schulze [1993]를 들 수 있으며, 국내의 경우에도

해양경찰청에서 발간하는 해양오염방제 및 시험연구보 [1994], 정부에서 발간한 해양오염방지 5개년계획 [1996] 및 선주협회 등에서 발간하는 다수의 관련자료가 있다.

이와같이 각종 해양오염방제와 관련된 자료의 종류와 양은 많으나 대부분 유회수기 제품들에 대한 소개와 간단한 작동원리 등에 대한 개요, 유회수기의 종류와 장단점 등을 거의 동일한 수준으로 나열하고 있기 때문에 막상 필요한 정보를 객관적으로 검토할 자료가 부족한 실정이다. 학술적인 면, 특히 유체역학적인 측면에서의 접근사례는 유회수기에 대한 학술적 고찰이 가능할까 싶을 정도로 이 분야에 대한 유체역학자들의 노력과 관심의 흔적이 보이지 않는다. 따라서 전반적으로 이론적인 배경이 매우 취약하고, 유회수기를 이론.수치적으로 설계하고 성능평가한 사례가 희귀한 실정이다

다. 본인의 경험에 비춰볼때 다른 독자들도 이 분야를 처음 접근하면서 참고문헌의 부재에 당혹감을 느꼈을 것으로 안다. 이로부터 기존 유회수기 제품들은 학자들의 연구의 산물이 아니라 몇몇 선진 방제기자재 업체의 노하우를 바탕으로 개발되었다는 사실을 짐작할 수 있다.

본고는 유체역학자의 시각에서 유회수기 문제를 관찰해 보고 현재의 상황을 서술하는 것이 그 자체로 의미가 있을 것으로 여겨져서 작성하게 되었다. 즉, 그동안 유회수 분야에 관심은 있었으나 막상 다루어야 할 문제가 명확하지 않았던 분들이 계실 것으로 믿고 유회수기에 대한 공학적인 개요와 유체역학적인 문제점을 짚어보고자 한다. 따라서 가능한 한 공학적인 관점에서 과거의 사례를 소개하면서 문제접근을 시도하고자 한다.

## 2. 유회수기의 일반적인 고찰

### 2.1 유회수기의 종류

유회수기는 흡입식과 흡착식 (부착식 포함)으로 대별된다. 흡입식은 상대적으로 많은 양의 기름/해수 혼합물을 수거하여 기름만을 유수분리하는 방식이며, 흡착식은 기름을 비교적 선별적으로 흡수하는 특성을 이용하고 있다. Schulze [1993]의 분류방식에 따르면 이는 다시 Table 1과 같이 10종류로 세분화 될 수 있다.

본고는 유회수기에 대하여 기초적인 사전지식이 있는 독자들을 대상으로 자료를 제공하는데 목적이 있기 때문에 각 유회수기에 대한 일반적인 설명이나 유회수기별 개념도 등은 제시하지 않는다. 흥미있는 독자는 해양경찰청 [1994], ITOFP [1986], Schulze [1993], 현범수 등 [1993]을 참고하기 바란다.

### 2.2 유회수기 성능지표

유회수기 성능을 나타내는 지표들은 다음과 같다.

RE (회수효율, Recovery Efficiency) : 수거된 혼합물중 기름의 비율 (%)

TE (처리효율, Throughput Efficiency) : 수거하고자하는 기름중 수거된 기름의 비율 (%)

RR (회수율, Recovery Rate) : 수거된 혼합물의 유량 ( $m^3/h$ )

ORR (유회수율, Oil Recovery Rate) : 수거된 순수기름의 유량 ( $m^3/h$ )

여기서 RR과 RE는 통상 서로 반비례하는 경향이 있다. 즉, RR이 작은 유회수기는 보통 높은 RE값을 보여주며, 큰 RR인 경우 낮은 RE값을 갖는다. 전자는 유수분리기가 부착된 유회수기의 경우에 해당하며, 후자는 부착식이거나, 유수분리기가 없고 혼합물 저장공간이 협소한 경우에 사용된다. 둘다 공히 회수되는 ORR은 비슷한 경우가 많다. 따라서 사고시 방제계획을 수립할 때 유회수기의 용량만을 참고로 하여 방제계획을 세우는 것은 매우 부적절하며 위에 제시한 RE, TE, ORR, RR을 모두 검토한 후에 계획을 수립해야 한다. 특히 흡입식 유회수기의 경우 펌프의 용량을 유회수 용량으로 오해하는 사례가 있음에 주의해야 한다.

실제 해상에서 유회수성능은 메이커가 제시하거나, 실험실 규모의 성능평가 결과의 약 20-30% 정도밖에 안되는 것으로 예상된다. 이는 실험결과가 기름의 점성이나 기름층 두께에 따라 크게 달라지기 때문으로서, 실험자료나 메이커측 자료를 이용하여 유회수 용량을 결정하고자 할 때는 반드시 사용한 기름의 점성과 유층 두께의 확인이 필요하다.

### 2.3 유회수기별 장단점 비교

Table 1에 소개한 유회수기의 주요특성과 장단점은 Table 2와 같으며, 이를 다시 대상수역별로 분류하면 Table 3과 같다.

### 2.4 유회수기 종류별 세계시장 현황

유회수기의 종류별 세계시장의 현황을 보기위하여 Table 4의 통계를제시한다. 이는 저자가 Schulze [1993]에 소개된 유회수기에 대한 모든 자료를 통계처리한 것이다. 여기서 회수용량은 유회수율(RR)에 준하는 값으로 생각할 수 있다. 표에서 볼 수 있듯이 위어식과 로우프 몹식의 제품이 가장 많으며, 흡입식은 주로 잔잔한 파도중에서 사용하

유회수기의 유체역학적 특성

Table 2 Characteristics of Oil Skimmer

대분류	중분류	개요
흡입식	흡입(Suction)식	펌프를 이용하여 수면근처의 기름혼합물을 수거. 주로 소형 포터블장비로 사용.
	위어식 (Weir)식	댐을 넘어오는 기름을 빨아들인 후 유수분리함. 소형은 흡입식과 같고 대형은 큰 댐을 갖는 전용선박들 임.
	봄 스키머 (Boom Skimmer)	오일펜스로 가두어진 기름을 오일펜스 중간에 설치되어 있는 자체 위어로 빨아들임. 보통 대형사고용.
	와류(Vortex)식	강제와류를 발생시켜서 수면근처의 기름혼합물을 빨아들인 후 원심분리 함. 보통 중소형.
	침수판(Submer-sion Plane)식	수면근처의 기름혼합물을 선수부에서 흡입한 후 부력차이를 이용하여 선내에서 기름선별처리. 보통 대형.
흡착식 (부착식)	로우프 몹 (Rope Mop)	친유성로우프를 사용하여 기름을 흡착시킴. 로우프가 수면에 항상 떠있으므로 파도중 강점이 있음.
	디스크(Disc)식	다수의 원판을 회전시켜서 기름을 원판표면에 부착한 후 스크레퍼로 수거. 주로 중소형.
	드럼(Drum)식	원통을 회전시켜서 원통표면에 부착된 기름을 수거. 보통 드럼을 장착한 소형 전용선박 사용.
	벨트(Belt)식	흡착재나 금속으로 된 벨트를 회전시켜 작업. 주로 선박에 장착된 경우가 많음.
	브러쉬(Brush)식	벨트식이나 드럼식과 유사하나, 체인브러쉬나 드럼브러쉬를 표면에 설치하여 사용.

\* SPS (Submersion Plane Skimmer) : 선박이 전진하면서 선수부를 통하여 기름혼합물을 흡입하는 방식. 선내에서 비중차이로 상부의 기름은 포획하고 해수는 하부로 빠져나게 함.

Table 3 Oil Skimmers at Different Sea States

수역	회수 방식	무게	펌프용량
경온해역	- 각종 포터블 흡착식 유회수기 (벨트, 원판, 드럼, 로우프식 등) - 흡입식 일부 (위어식, 와류식등)	통상 200kg 이내 (3톤까지 존재)	통상 10-70 톤/시간 (일부 RR = 1000 톤/시간까지 존재)
제한수역	- 선박일체형을 포함한 흡착식 - 흡입식 스키머 들 (봄 스키머, 위어식, 선박일체형등)	통상 2톤이내 (35톤까지 존재)	통상 90 톤/시간 이내 (일부 RR = 2,000 톤/시간까지 존재)
외해	- 주로 선박일체형 - 흡착식, 흡입식 및 콘베이어형 주걱식 등으로 주문형이 많음.	통상 45톤이내 (3,000톤급 존재)	통상 250 톤/시간 이내 (RR = 20,000톤/시간 급 까지 존재.)

록 채택되고 있다. 봄 스키머와 침수판식은 주로 외해용 위주로 개발되고 있으며 높은 RR 값을 보여주고 있다. 흡입식과 흡착식으로 대별할 경우 흡입식은 거의 예외없이 높은 RR 값을 나타내는데 이를 ORR이 큰 것으로 속단해서는 안될 것이다. 대표적인 경우가 외해용 침수판식이다. 흡입식 중에서는 위어식이 압도적으로 많이 사용되는 반면 흡착식은 다섯 종류의 스키머가 고루 개발되고 있다. 디스크 식은 상대적으로 무게가 가벼우나 그대신 선박등에 탑재하였다가 현장에서 바다에 띄워놓아야 하므로 별도의 크레인이 요구될 것이다. 작동원리가 유사한 디스크식, 드럼식, 벨트식

은 서로 비슷한 규모로 제품시장을 점령하고 있다. 제한수역에서의 흡입식과 로우프 몹식이 무게가 큰 것은 부수적인 장치를 포함한다든 경우에 따라서 해당 선박의 용량까지를 포함하였기 때문이다. 같은 이유로 외해용에서도 위어식이 275톤이 되는 것은 위어를 장착한 유회수 전용선박을 대상으로 하였기 때문이며, 드럼식과 벨트식도 전용선박을 사용하기 때문이다.

본 통계는 카탈로그에 나와있는 메이커 자료이므로 그 신뢰성은 확인할 수 없으며, 경우에 따라 비현실적으로 보이는 수치들이 일부 제시되어 있으나 가감없이 그대로 기술하였다. 경우에 따라 부대

장비의 무게나 펌프 등의 무게가 빠지거나 포함되는 등의 문제점도 있었다. 디스크 스키머와 로우프 몹의 경우 제한수역용 스키머 무게가 외해용보다도 더 무거운 것으로 되어있는 등의 문제점도 노출되었다. 그러나 개괄적으로 스키머에 대한 시장현황과 용량을 알아보는 데는 유용한 정보를 제공하고 있다. 국내에는 주로 소형 위어식, 벨트식, 디스크식이 사용되고 있는 것으로 파악하는 바 국내에서도 해상상태와 작업환경, 사고의 유형에 따

때문이다.

### 3.1 점 성

기름의 점성은 풍화작용을 거치면서 급격히 증가한다. 통상 사용하는 輕質油 (Light Oil), 中質油 (Medium Oil), 重質油(Heavy Oil)의 분류가 보통 점성 3-2,000 Cst범위에 대한 분류인 반면, Schulze [1993] 는 유출된 기름의 방제 측면에서

Table 4 Current Market Situations of Oil Skimmer

정온해역	종류	흡입	위어	붐	와류	침수판	로프몹	디스크	드럼	벨트	브러쉬
	메이커수	20	58	N/A	1	N/A	12	6	1	6	1
	제품수	20	72	N/A	1	N/A	47	20	6	11	1
	무게평균 (kg중)	238	259	N/A	50	N/A	205	143	24	425	1561
	회수용량 (m <sup>3</sup> /h)	24.4	26.1	N/A	10.1	N/A	19.4	14.5	1.0	17.1	101
제한수역	종류	흡입	위어	붐	와류	침수판	로프몹	디스크	드럼	벨트	브러쉬
	메이커수	2	14	2	1	1	9	5	6	6	1
	제품수	3	34	4	2	2	27	11	10	12	6
	무게평균 (kg중)	18483	2554	734	2083	7647	32582	2360	1375	6963	469
	회수용량 (m <sup>3</sup> /h)	58.3	170.4	218.5	23.0	253.0	36.0	35.7	41.1	66.2	20.3
외해용	종류	흡입	위어	붐	와류	침수판	로프몹	디스크	드럼	벨트	브러쉬
	메이커수	N/A	11	2	2	2	5	4	1	2	2
	제품수	N/A	30	8	5	6	7	9	2	10	10
	무게평균 (kg중)	N/A	275톤	6926	3242	8778	20톤	1100	65톤	85톤	2906
	회수용량 (m <sup>3</sup> /h)	N/A	279.5	464.3	173.6	6390	54.8	89.3	N/A	185.8	245.9

라서 로우프 몹식을 비롯한 다양한 제품의 사용이 필요할 것이다.

### 3. 유회수기 성능에 영향을 주는 인자들

유회수기의 종류, 성능, 장단점 등은 기름의 점성, 해상의 파도와 조류상태 및 SER에 따라 달라지게 된다. 따라서 유회수기의 선택시 반드시 위의 4가지 측면에서 면밀한 검토가 필요하다. 여기서 SER이란 누유직면율(Spill Encounter Rate)로서 해상에 흩어져있는 기름중 유회수기가 직접 접할 수 있는 기름의 양을 의미하는데, 만약 기름층이 얇다면 그만큼 SER은 낮아지게 된다. 이러한 인자들이 유회수기 성능에 미치는 영향에 대하여는 정확한 자료가 부족한데 이는 많은 자료들이 유회수기 메이커의 선전자료를 인용하는 사례가 많기

실제 해상에서 작업해야 하는 유출유의 점성에 대하여 다음과 같이 5단계로 분류하고 있다.

이로부터 풍화작용 이전의 모든 기름은 코오드 I과 II의 범위에 속하며, 해상에서 풍화작용을 거친 기름은 거의 고형화 되어 엄청나게 증가된 점성계수를 갖게됨을 볼 수 있다.

### 3.2 파 도

해상상태는 파고가 0.3m 이내 (정온해역, Calm Water), 1m 이내 (제한수역, Protected Water), 2m 이내 (외해, Open Water)로 분류하는 것이 보통이며, 2m 이상의 파고는 방제작업이 실질적으로 불가능 한 경우이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 수면에 항상 떠있는 로우프 몹이나 특수한 브러쉬식을 제외하고는 파고 1m 정도의 파도중에서 대부분의 유회수기가 작동에 어려움이 있다. 흡착식보다는 흡입식이 좀 더 파랑에 민감하다고 할 수

Table 5 Viscosity of Various Crude Oils

코오드	점 도 (Cst)	기 름 종 류
I	150-250	Alberta Sweet MixBlend, 20% Weathered (10 to 15 oC)
II	1,500-2,500	Prudhoe Bay Crude, 25% Weathered (10 to 15 oC)
III	17,000-23,000	Bunker C
IV	50,000-70,000	Heavily Weathered Crude Oil Bunker C (Heavy Cut)
V	130,000-170,000	Heavily Emulsified Crude

있는데, 보통의 경우 위어식은 특별한 고려가 없는 한 자체의 중량으로 인하여 파랑중 수면추적에 문제가 있다. 따라서 유희수기 본체가 운동하더라도 위어는 본체의 운동과 무관하게 항상 수면에 위치하도록 큰 부력체를 사용하게 된다. 대형 위어식 스키머인 독일의 MPOSS는 두 개의 위어(혹은 플랩, Flap)와 부력체를 이용하여 유희수용판이 항상 수면근처에 위치하여 파고 2m까지 작업이 가능하도록 고안된 대표적인 유희수 전용선이다. 이에 대하여는 5장에서 좀 더 자세히 다룰 것이다. 유희수기가 오일펜스에 내장되어 펜스와 함께 운동하는 붐스키머(Boom Skimmer)는 파랑중 수직운동(Heave) 성능이 좋기 때문에 상대적으로 우수한 파랑추적 성능을 보이나 이 역시 단파중에서는 문제점을 가지고 있다. 침수판식은 비교적 높은 파랑중에도 작업은 가능하나 과도한 해수의 유입으로 인하여 큰 RR값에 비하여 RE 값은 낮아지게 되어 효율성에 문제가 있을 것이다. 침수판식은 선박자체에 흡입구를 갖는 것이므로 파랑중 성능향상을 위하여는 선박자체의 운동성능을 향상시키는 것이 필수적이다. 파랑중 유희수기 성능향상의 핵심은 수면에서 기름을 채취하는 부분의 질량을 최소화하여 파랑중 수면추적성능을 향상시키는 것이다. 문제가 되는 파도는 주로 파고 1m 이상이거나 주기가 짧은 단파이므로 연구방향 역시 단파중의 운동성능향상에 모아져야 한다. 흡입식이 아닌 다른 유희수기들도 필수적인 부분만 수상에 띄워놓고 나머지 대부분은 선박내에 별도로 설치하는 방향으로 개발이 진행되어야 한다.

### 3.3 조 류

특별한 고려가 없는 경우 해상의 기름층은 0.7노

트 이상의 조류중에서 오일펜스나 유희수기의 하부로 대부분 빠져나가는 현상이 발생한다. 이때의 유속을 임계속도(Escape Velocity)라고 하는데 이 값은 기름의 비중이나 유속이 커질수록 감소하는 경향이 있다. (강관형 [1996]) 이러한 조류속도를 상쇄시키기 위하여 유희수기를 자체로, 혹은 선박 등으로 추진하여 ZRV (Zero relative velocity)상태를 만들어 주며 작업하는 것이 필요하다. 일반적으로 조류가 커지게 되면 오일펜스를 흐름에 경사지게 하여 기름의 탈출을 감소시키는데 이 목적으로 사용하는 펜스를 Deflecting boom이라 한다. Tsocalis 등 [1994]에 따르면 펜스를 경사지게 설치함으로써 유속 3노트 정도에서도 기름의 탈출을 저지할 수 있다고 기술하고 있다. 따라서 유희수기의 추진속도를 조절하면서 Deflection Boom이나 Sweeping Arm을 적절히 사용할 경우에 약 6노트의 조류중에서도 작업이 가능하다는 보고도 있다. 여기서 Sweeping arm이란 선박 선측에 비행기 날개모양으로 오일펜스를 매달아서 보다 넓은 범위의 기름을 모으기 위한 장치이다. 기름층이 오일펜스나 유희수기를 접하는 각도를 최대한 줄여서 기름이 한 곳으로 모은 다음 수거하는 이러한 기법은 붐스키머를 비롯하여, 두척 이상의 선박으로 오일펜스를 예인하는 Sweeping System (주로 J타입이며, U, V 타입도 가능함.)에 응용되는 사항이다. Sweeping system에 대한 설명은 ITOPF [1986]에 나와있다. 한편 소형 포터블 유희수기들은 조류중에서 흐름과 같이 떠다니면서 작업이 가능한 장점이 있다.

### 3.4 SER (Spill Encounter Rate, 누유직 면율)

유출된 기름은 해수면위에서 유체역학적으로 중력

-관성력, 중력-점성, 표면장력-점성의 지배를 받는 상태를 순차적으로 거치면서 빠르게 확산한다. 따라서 확산이 오래 진행되어 얇은 막으로 퍼져있는 기름층은, 유회수기의 관점에서 보면 유출된 기름의 양에 무관하게 낮은 SER값을 주게된다. 따라서 기름층 확산이 크게 일어난 경우 무조건 대용량의 유회수기를 투입하는 것보다는 SER을 증대시킬 수 있는 회수기의 사용이 요구된다. 대형 위어식이나 붐식을 비롯하여 자체 추진능력이 있는 회수기들이 이러한 목적에 적합하며 Sweeping arm의 사용으로 SER은 더욱 향상된다. 위에 언급하였듯이 Deflecting Boom의 예인속도가 커지게 되면 기름이 아래로 빠져나가기 때문에 작업 속도에 한계가 있다. 통상 유회수기 성능표에 기록되는 SER 값은 유막두께 1mm에서의 값을 기준으로 하고 있다.

Table 6 Escape Velocity Versus Angle of Deflecting Boom Against Current

Boom Angle (deg)	90	45	28	20	16	13
Escape Velocity (knots)	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

## 4. 유회수기의 개발정도 및 전망

유회수기의 현황과 주요 인자들을 종합하여 국내에서 개선이 가능한 사항을 정리해 본다.

### 4.1 점 성

輕質油와 中質油에 대한 수거방법은 기존의 유회수기를 적절히 활용하면 되나, 풍화작용이 일어난 후의 고점성 기름혼합물을 수거하는 기술이 미흡하다. 또한 동결기를 전후하여 해수온도가 기름의 응고점 이하로 떨어지는 경우가 많으므로 이 경우에 적합한 기름 수거기술이 필요하다. Table 2에 주어진 각 유회수기별 특성을 참고하면 브러쉬 방식이나 고형화된 기름을 걷어내기 위한 특수 그물식 유회수장치에 대한 검토와 연구가 필요하다.

### 4.2 파 도

파도는 유회수성능에 가장 영향이 큰 인자이다. 특히 위어식이나 와류식과 같은 흡입방식에서는 파도의 영향이 심각할 것으로 예상된다. 따라서 국내에도 독일의 MPOSS나 MOD (제5장에서 다시 소개할 것임.)와 같이 파랑에서 수면추적성능이 우수한 위어식 유회수 전용선의 확보가 필요하다. 혹은 벨트식 소형유회수선도 파랑중 선체의 운동과 무관하게 수면근처에서 작업이 가능하도록 벨트모듈을 설계할 필요가 있다. 한편, 국내에서 별로 사용되지 않고있는 로우프 몹식을 보다 많이 사용할 필요가 있음도 지적하고자 한다. 이 방법은 현재 흡착재 조각을 해상에 뿌려놓은 후 막대기로 회수하는 방식을 보다 효과적으로 대체할 수 있을 것이다.

### 4.3 조 류

조류의 영향을 최소화 하기 위하여 자항능력을 갖춘 유회수장치의 확보가 요구된다. 주로 흡입방식이 되겠으나 흡착식의 경우도 무관하다. 특히 육지로부터의 손길이 미치지 않거나 선박으로 접근이 어려운 위치의 기름수거를 위하여는 자항능력이 있는 소형 포터블 유회수기의 개발도 중요하고 고려대상이 되어야 한다. 후자의 경우 파도의 영향을 무시해도 큰 문제가 없을 것이므로 정온해역용 소형 유회수기에 간단한 추진장치를 첨가한 형태의 스키머도 유용할 것이다.

### 4.4 SER

SER을 높이기 위해서는 무엇보다 Sweeping System의 적극적인 사용이 필요하다. 다행히 최근 국내에서도 이 방법을 사용하고 있으나 보다 광범위하게 이 방법을 채택하는 것이 필요하다. 여러 예인방법 중에서 1척의 유회수기와 1척의 예인선으로 작업하는 J-타입이 가장 효과적일 것이다. 소형사고의 경우에는 Sweeping arm을 갖는 유회수 전용선이나 VOSS (Vessel of Opportunity Skimming System)선의 사용도 효과적일 수 있다. Sweeping system을 채택할 때 일반적인 포터블

유회수기를 기름이 모아져있는 오일풀에 띄워서 작업할 수도 있으나 오일펜스에 직접 장착되는 위어식 붐스키머의 사용이 적극적으로 고려되어야 한다.

한편, 중소형 사고시나 사고후 시간이 경과되어 기름층이 해상 곳곳에 산재해 있는 경우에는 문어발식 (Octopus type)의 유회수기 사용을 고려할 필요가 있겠다. 저자의 지식으로 문어발식은 기존에 개발된 제품이 아직 없는 것으로 알고 있는데, 해상에 흡입펌프를 포함한 유회수기 본체를 중심으로 다수의 위어를 문어발식으로 연결하여 사용하는 개념이다. Fig. 1에 개념도가 제시되어 있으며, 기름층이 얇은 경우 1개의 대용량 위어스키머를 사용하는 것보다 훨씬 효율적일 수 있을 것이다.

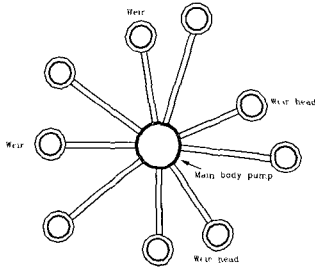


Fig. 1 Conceptual Drawing of Octopus-type Skimmer

## 5. 유회수기 개발과 관련한 주요 유체역학적 문제

지금까지의 유회수기에 대한 일반적인 고찰을 바탕으로 유체역학적인 관점에서 연구되어야 할 사항을 종합해 보고자 한다. 따라서 본 고에서는 기존의 연구결과들을 소개하므로 유체역학자들의 관심을 구하고자 한다.

### 5.1 위어(Weir)식 유회수기

중소형 흡입식 유회수기와 관련하여서는 성층화 (Stratification)된 해수층 중에서 원하는 층의 해수만을 선별적으로 이용하는 선별취수 (Selective withdrawal)를 비롯하여 댐주위 유동에 관한 Weir flow 해석 등 수력학분야의 연구결과를 응

용하는 방법이 있을 수 있다. (Dias & Tuck [1991]; Vanden-broeck [1987] 등) 또한 유동장에 배출구가 존재하는 경우에 대한 Sink Flow 연구도 그 대상이 될 수 있다.

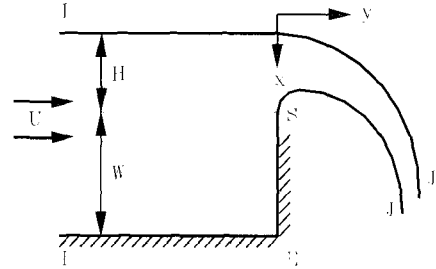


Fig. 2 Weir Flow

(Imberger [1972]; Kao [1965]; Kao 등 [1974]) 선별취수 문제에 대한 Fig. 2의 개념도에서 볼 수 있듯이 수력 댐을 넘어가는 2차원 유동은 2차원 위어식 유회수기의 위어를 타고 넘어가는 유동과 등가함을 볼 수 있다.

이러한 유동에 대하여 유선을 따라 베르누이방정식을 적용하면 최대유량과 그때의 유속은 각각

$$Q = \frac{2}{3} H \sqrt{\frac{2}{3} gH}, \quad u = \sqrt{\frac{2}{3} gH}$$

부터 실제유량은  $Q = \frac{2}{3} C_d H \sqrt{\frac{2}{3} gH}$  로 표시

된다. 여기서  $C_d$ 는 Discharge coefficient로서 표면장력이나 점성 등의 함수로 표시되는 수정계수로서 문제의 성격에 따라 다양한 형태의 계수들이 제시되어 있다. 배광준 등 [1995]은 위어 부근 유동을 Near-field 로, 충분히 떨어진 지점을 Far-field로 구분한 후 해를 정합시키는 방법으로 위어스키머 유동을 해석하였다. 이때 Far-field는 Sink flow 유동과 등가시켜 유량을 계산하였는데, 점성을 무시한 후 위어에서 멀리 떨어진 위치의 수심과 위어에서의 속도 간의 관계를 2차원 라플라스 방정식 문제로 표현하였다. 위어 주위의 동력학적 경계조건 역시 베르누이방정식의 적용으로부터 도출하였다. 참고로 이들의 경계치 문제는 아래와

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= 0 && \in \text{domain} \\ \nabla \phi \cdot \nabla \phi &= \frac{2}{3} \rho g H, \quad \phi_n \leq 0 && \text{on body boundary} \\ \phi, \nabla \phi &\rightarrow 0 && \text{as } r \rightarrow \infty \end{aligned}$$



같다.

여기서 구한 속도포텐셜  $\phi$ 를 사용하여 위어로 흡수되는 유량은 위어 가장자리에서의 법선방향 유입속도를 적분하여 구하였다. 위어의 형상은 기본적으로 원형을 택하였다. 이 방법은 위어의 모양이 복잡한 경우 압력경계조건의 적용에 한계가 있으며, 단지 단상유체에 대하여만 해석하였기 때문에 추후 보다 일반적인 다상유체중 선별흡수에 대한 연구로의 확장이 요구된다.

이러한 이론적 접근은 최적입구형상 및 높이 결정 등 소형 위어스키머 설계에 유용한 정보를 제공할 뿐 아니라 대형 유회수전용선 설계에 대단히 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

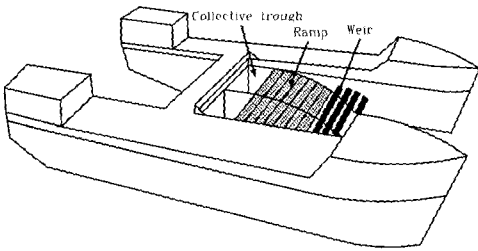


Fig. 3 Mobil Oil Dike (MOD)

대표적으로 Fig. 3에는 독일의 MOD (Mobil Oil Dike)이 소개되어 있다. 이 경우 위어의 폭이 유한하기 때문에 Clause [1986]가 지적한 바와같이 램프 앞쪽의 카타만 선속에서 발생하는 1장의 강한 소용돌이를 고려해야 하므로 단순한 포텐셜 해석만으로는 정확한 해석이 어려울 것이다. (Fig. 4 참조) Clause 등 [1992]은 자신이 설계한 MOD의 위어를 넘어오는 기름이 예측치보다 매우 적게되는 이유가 위어와 위어를 지지하는 선박의 측벽사이에서 발생하는 강한 소용돌이가 기름을 램프하부로 유도하기 때문임을 발견하였고, 따라서 위어의 전방에 와류생성방지를 위한 격자 (A row of pipes)를 배치하여 문제를 해결하였다. 이러한 유회수방법에서 위어의 높이는 선속과 배의 흡수에 따라 조절이 가능해야 하며 격자의 높이도 조절 가능해야 한다. 또한 파랑중 작업시에는 파도에 의한 과도한 해수유입을 막기위하여 추파 (Following sea)에서 작업할 것을 권하였다. 잘 조절된 MOD는 파고 1-1.5m에서 60-80%의 수거효

율을 보인다고 보고되어 있다.

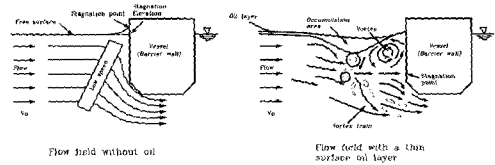


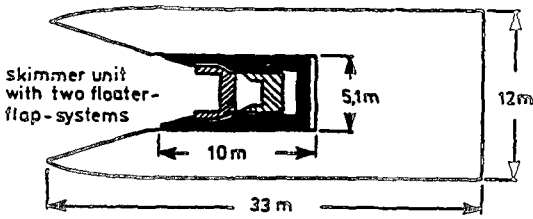
Fig. 4 Water Flow and Oil/Water Flow in Front of a Structure

### 5.2 파랑중 유회수기 성능해석

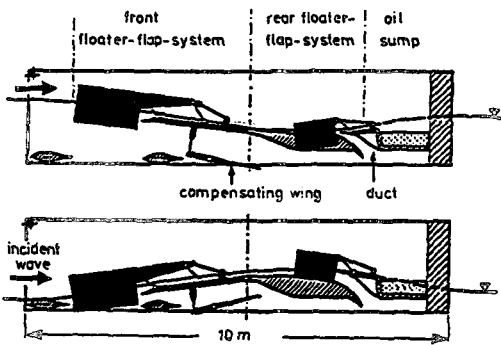
특별한 고려가 없는 한 대부분의 유회수장치가 단파중에서 사용이 곤란하다. 일례로 국내에서 일부 사용되는 와류형 유회수기는 스키머 본체를 선박의 측벽에 고정시켰기 때문에 파랑중 선체운동으로 인하여 성능이 급격히 감소함은 지극히 당연하다. 파랑중 유회수기 성능에 관한 연구는 주로 선박일체형 중대형 유회수전용선에 대하여 수행되고 있다. 유회수 전용선은 독일이 거의 유일하게 여러 척을 건조하였는데 대표적으로 SHORV, MPOSS와 앞에서 소개한 MOD의 3종류가 있다.

MPOSS (Multi-Purpose Oil Skimming System)는 파랑중 위어 (위어대신 플랩(Flap)이라는 용어를 주로 사용함.)의 수면추적성능을 획기적으로 개선하기 위하여 개발된 선박으로서 Clause 등 [1992]에 상세한 설명이 나와 있다.

그 원리는 Fig. 5에서와 같이 선체의 운동과 무관하게 플랩을 수면근처에 유지시키기 위하여 플랩을 선박과 분리하여 선속의 커다란 부력체들과 연결한 형태이다. 홍도천 등 [1994]이 제시한 유회수선도 MPOSS와 유사한 형태를 보이고 있다. MPOSS 등과 같은 형태의 선박에서 플랩은 쌍동형 유회수선박 사이에 설치되는데 그곳에 파도가 들어오게되면 선박측벽에서 파도가 반사되면서 작업구역의 파고가 증폭되는 현상이 발생한다. 이를 해결하기 위하여는 플랩과 인접한 선체의 측벽에 적절한 소파장치를 설치하여 파의 증폭을 막아야 한다. 파의 감쇠를 위하여 Clause [1986]는 여러층의 다공판과 수직 파이프들을 측벽에 평행하게 설치하였다. 이때 소파판의 길이, 간격, 갯수



(a) Sketch of MPOSS



(b) Flap/floater Arrangement

Fig. 5 MPOSS Designed by Clause et al. [1992]

및 투과율 등을 최적화 하는 기법이 요구되는데, 아직까지는 주로 실험적인 방법에 의존하고 있다. 그외에도 플랩과 부력재의 동력학적 설계, 급격한 파랑하중에 의하여 플랩이 과도한 운동을 하는 현상을 피하기 위한 감쇠장치 설계를 위한 파랑하중 예측 등 여러 유체역학적 문제들이 내포되어 있다.

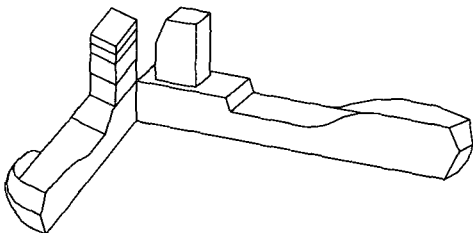


Fig. 6 Split Hull Oil Recovery Vessel (SHORV)

SHORV (Split Hull Oil Recovery Vessel)는 항해시에는 일반적인 형태의 선박이나 Fig. 6 에

서와 같이 작업시에는 중심선(Centerline)을 따라서 선체가 둘로 분리되어 폭방향으로 넓게 펼 수 있도록 설계하여 SER을 향상시킨 선박이다. Head sea 상태를 제외하고는 파랑중 유회수성능이 우수하여 북해에서의 실험결과 유회수율 86%의 놀라운 성능을 선보이기도 하였다. 또한 순항시 높은 선속이 가능하므로 장거리이동이나 긴급출동시에 강점이 있다. 그러나 Head sea 상태에서는 작업구역에서 엄청난 파의 증폭이 발생하여 유회수가 곤란하다고 알려져 있으며, Clause 등 [1992]에 의하면 MPOSS와 마찬가지로 다수의 파이프를 선체 측벽에 배치하여 파랑증폭을 억제하고 있다. 파랑중 높은 효율의 유회수장치를 개발하기 위하여는 이상에서 살펴본 분야 이외에도 선박자체 운동의 감소기법, 일단 가두어진 기름층이 빠져나가지 못하도록 처리하는 방법등에 보다 심도있는 연구가 필요하다.

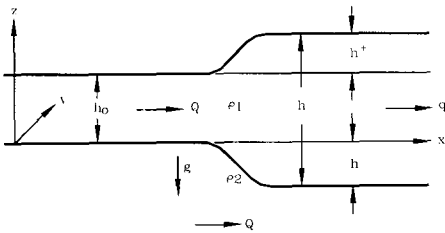
### 5.3 유회수선 주위의 기름층 해석

유회수성능은 유층의 두께에 따라 크게 영향을 받으므로 유회수선에 의하여 주변의 유층분포가 어떻게 변화하는지를 조사하는 것이 필요하다. 즉, 균일한 두께로 퍼져있는 기름층에 유회수선이 접근할 때 기름층의 분포는 정수시와는 크게 달라질 것이다. 이러한 해석은 선형, 특히 유회수선의 선수각(Entrance angle)을 결정하는데 대단히 중요하다 알려져 있으며, 작업시 유회수기를 선박주위 어떤 위치에 투입해야 하는지를 결정하는데에도 유용하게 사용될 수 있다. 그러나, 오일붐에 의하여 가두어진 기름층의 거동해석이 다수의 연구자들에 의하여 시도된 반면 (강관형[1996], Milgram & Van Houten [1978]), 전진하는 선박에 의한 기름층 거동해석은 관심의 대상이 되지 못하였다. 유체역학적으로 양자간의 차이는 오일붐 문제가 조류에 의하여 기름층과 해수사이에 상대속도가 발생하는 경우인 반면, 유회수선 주위 기름층운동은 기름층과 해수간에 상대속도의 차이가 무시할만큼 작은 경우라는 특징이 있다.

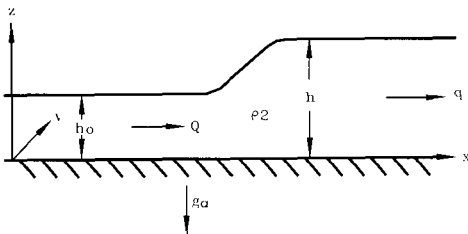
Sukuki 등 [1989]은 유층이 얇고 유층내 깊이 방향 유속분포가 균일하며 기름/물 경계면에서의 점성과 표면장력이 없고 물과 기름의 밀도차이가

작다는 가정을 사용하여 유희수선에 의하여 변형된 유동에 대한 지배방정식을 유도하였다. 이는 수리학 분야에서 Ippen [1951]의 Supercritical flow 개념을 응용한 것으로서, 해수의 존재를 무시하고 Fig. 7에서와 같이 기름층의 거동을 Densimetric Froude 수 ( $Fn_D = \frac{V}{C} = \frac{V}{\sqrt{gah_0}}$ )에 의하여 지배되는 제한수내 천수역에서의 문제로 치환하였다. 여기서  $V$ ,  $C$ 는 각각 선속과 기름층의 파속에 해당되며  $h_0$ 는 기름층 두께이다. 한편,  $\alpha$ 는  $\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$ 로서 기름의 밀도  $\rho_1$ 과 해수밀도  $\rho_2$ 의 차이이다. 유도된 지배방정식은 다음과 같이 기름층 내부에서의 속도포텐셜  $\phi$ 를 구하는 편미분방정식이 된다.

$$\left(1 - \frac{u^2}{C^2}\right) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{2uv}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + \left(1 - \frac{v^2}{C^2}\right) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

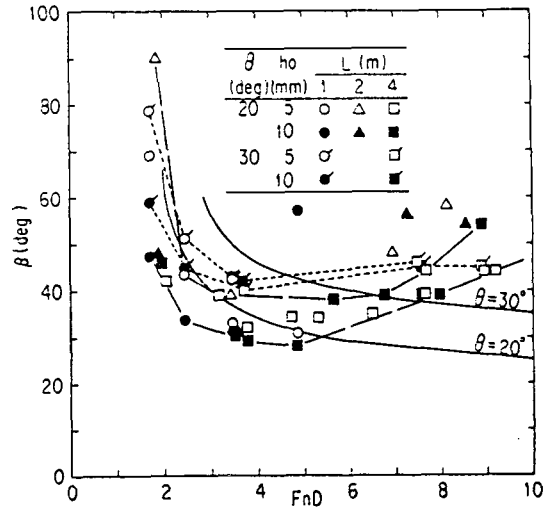


(a) Oil Layer on Water

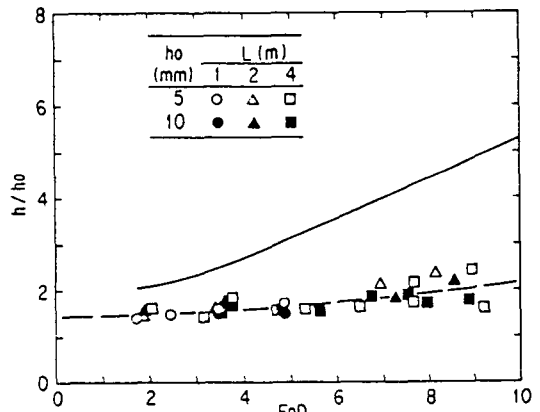


(b) Shallow Open-water Channel

Fig. 7 Flow of Oil Layer on Water and Shallow Open-water Channel



(a) Wave Front Angle vs FnD



(b) Oil Layer Thickness vs FnD

Fig. 8 Typical Results of Suzuki et al. [1989]. Solid Lines are Theoretical Values.

통상 유층의 두께는 10cm 이내이므로 기름층의 파속  $C$ 는 최대 1노트 이내가 되게 되며 따라서 유희수선의 선속  $V$ 는 대부분의 경우 파속보다 빠르게 된다. 즉,  $Fn_D$ 는 항상 1보다 크고 지배방정식은 쌍곡선형 미분방정식이 되며 충격파가 선수부에서 방사하게 된다. 이로부터 본 문제는 선수부에서 발생하는 충격파의 각도를 결정하는 문제가 된다. 이 각도가 바로 유층이 두꺼워지는 위치에 해당되는데 Suzuki 등 [1989]의 해석결과에 의

하면 단동선인 경우 Fig. 8에 보이는 것처럼  $Fn_D < 4$ 에서 실험치와 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 그후 Suzuki 등 [1992]은 유희수선으로 널리 사용되는 쌍동형선에 대하여 선수각을 바꾸어가면서 여러 선속과 유층두께에 대하여 해석한 결과를 실험과 비교하였다. 단동형과 달리 쌍동형에서는 쌍동체 사이에서 생기는 유층의 막힘 (Blocking-up) 현상과 충격파 들의 간섭이 중요하게 지적되었으며, 전반적으로 대형선박에 대한 해석결과가 소형선보다 실험과 잘 일치하는 결과를 주었다. 유층두께는  $Fn_D$ 에 따라 차이는 있으나 특정위치에서 정수시와 비교하여 2배이상 두꺼워지는 현상을 보였는데, 특히 쌍동형선에서 유희수를 수행하는 위치인 선체중앙부에서는 최대 5-6배 만큼 유층의 증가를 보였다고 보고되어 있다.

#### 5.4 붐스키머 (Boom Skimmer)

통상 해상에 확산된 유막은 마이크론 정도로 얇기 때문에 Sweeping system을 이용하여 이를 최소한 cm 차원의 두께로 만들어 주어야 한다. 따라서 2척이상의 선박이 오일펜스를 예인하면서 넓은 범위의 기름을 원하는 위치로 수집하는 U, V 혹은 J-type sweeping system을 사용하게 될 때 기름을 채취하는 위치 (통상 V 형태 오일펜스의 뾰족한 끝으로서 Oil Pool 혹은 Captive pool 이라함.)에서의 유동특성을 이해하는 것이 중요하다. 이때 가두어진 기름층이 빠져나가지 못하도록 하기 위하여 유희수선의 선속과 조류속도와의 상대속도를 1-3노트 이내로 꾸준히 유지시켜야 하는 어려움이 있다.

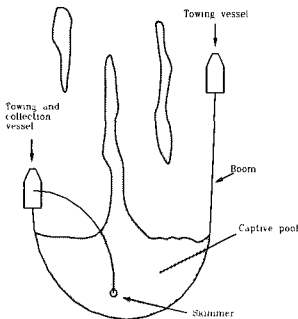


Fig. 9 Example of Sweeping System (J-configuration)

일반적인 설계요건으로는 예인속도, 펜스의 길이와 깊이, 장력등이 있으나 이러한 사항은 오일풀의 설계에 관한 것이므로, 여기서는 Fig. 9와 같은 오일풀에서의 유체역학적 특성에 대하여 만 고찰해 본다. 오일펜스에 의하여 가두어진 기름층의 거동은 관성력, 해수와 기름층의 밀도차이에 의한 중력 및 해수와 기름층 사이의 마찰력에 의하여 지배되므로, 차원해석에 의하면

지배무차원수는 Densimetric Froude수

$$Fn_D = \frac{U_o}{\sqrt{g\Delta h}}$$

(여기서  $U_o$ 와  $\Delta h$ 는 기름층의 속도와 두께)와 Reynolds수가 된다. 가두어진 기름층 내부의 속도는 대개 무시할 정도로 작으므로 기름층내부에서 두 무차원수는 모두 작은 값이 될 것이다. 한편 오일풀에 가두어진 기름을 수거하기 위하여 오일펜스의 뾰족한 끝부분에 흡입식 유희수기를 설치한다고 할 때 그 출구 (즉, 유희수기의 입구쪽)는 기름층이 비교적 빠른 속도로 빠져나가게 되므로 기름층의 속도가 해수의 속도와 같은 정도의 크기가 될 것이다. 따라서 기름-해수 경계에서의 마찰은 무시할 수 있게 된다. 또한 오일풀의 유층두께도 유희수기의 입구크기에 비하여 그다지 작지 않게 되므로  $Fn_D$  값은 O(1) 정도가 되며 Re도 커지게 된다.

Hoult 등 [1970]은 가두어진 기름층에서의 힘의 평형과 스키머 입구에서의 임계유동 가정 ( $Fn_D = 1$ )을 사용하여 스키머 용량을 산출하는 방법을 제시하였다. 즉, 가두어진 기름층에서 힘의 평형관계로부터 기름층 최대두께 공식은

$$h_{max} = C_f^{1/2} \left( \frac{U_w^2}{g\Delta} \right)^{1/2} L^{1/2}$$

가 되는데, 여기서  $U_w$ 는 해수의 유속, L은 오일펜스로 가두어진 기름층의 길이이며  $C_f$ 는 기름-물 경계면에서의 마찰저항계수로서 실험에 의하여 이 값을 결정토록 하였다. 참고로 연료유나 공기층의 경우에 대략  $C_f = 0.005-0.008$  정도가 제시되었다. 한편, 스키머 입구

에서의 최대유량은  $Q_t = \frac{2}{3} h_{max} w_t \sqrt{\frac{2}{3} g\Delta h_{max}}$ 로 구하였다. 여기서  $w_t$ 는 스키머입구의 폭이다. 이 값은 앞에 소개한 위어스키머에서의 유량식과 동일한 형태의 값으로서 오일풀의 끝에 모아진 기

름층의 두께와 스키머 입구의 폭을 알면 유량이 계산된다. 그들의 해석결과를 실험치와 비교하였을 때 서로 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 윗 식에서 얻은 유량을 바탕으로 스키머의 최대 수거가능 용량이 결정될 수 있으며, 역으로 스키머 용량이 주어진 경우 오일풀내 기름층의 두께를 원하는 정도로 얻기위하여 필요한 오일팬스의 길이를 결정하는 데에도 사용이 가능하다.

Hoult 등 [1970]은 또한 Fig. 10에서와 같이 오일풀의 뾰족한 끝과 스키머 흡입구사이에 별도의 채널 (channel)을 설치할 것을 제안하였는데, 이는 기름층이 과도한 압력의 영향에 의하여 교란되는 것을 방지하면서 원활한 기름층의 흐름을 보장하기 위한 아이디어로서 참고할 만한 사항이라 여겨진다.

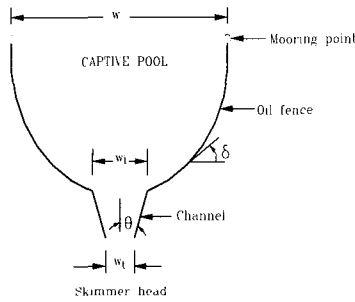


Fig. 10 Channel Proposed by Hoult et al. (1970)

### 5.5 부착식 유회수기

부착식 유회수기의 운전조건을 결정하는데 있어서 스키머의 구동속도와 기름의 물리, 화학적 성질에 따른 스키머의 유회수율을 예측하는 것이 필요하다. 부착식 유회수기로는 벨트식, 드럼식, 디스크식이 있는데 유체역학적 작업원리는 모두 동일하나, 벨트나 드럼의 경우 문제를 2차원화할 수 있는 반면에 디스크식은 3차원해석이 불가피한 어려움이 있다. 간단한 예를 보기위하여 단일유체중 수직평판에 부착된 기름층의 자유표면유동에 대하여 고려하자. 이 문제는 필름코팅분야에서 많이 연구되어 졌으며 Dip coating의 경우 유회수기와 유체역학적으로 대단히 유사하므로 그들의 연구결과를 응용하는 것이 가능하다. 코팅분야에서는 유막의 두께가 얇고 구동속도가 작으므로 Capillary 수 (Ca)와 Reynolds 수 (Re)가 충분히 작다는 가

정에서 출발한다.

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \ll 1, \quad Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \ll 1$$

여기서  $\mu, \nu, \sigma$  는 점성계수, 동점성계수 및 표면장력을 나타낸다. 필름코팅시 수직구동 평판상의 기름층형성 문제에 대한 자세한 고찰은 Ruschak [1985]에 나와있다.

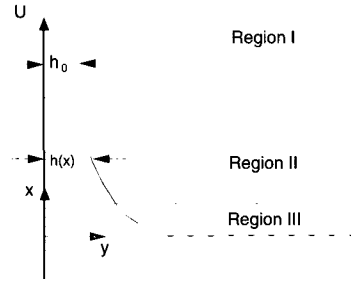


Fig. 11 Profile of a Liquid Film Adhering to a Vertically Driven Surface

정상유동에서 유체영역은 Fig. 11에서와 같이 3구간으로 나누어 고려할 수 있다.

영역 I : 필름두께  $h(x)$ 는 상수 ( $h_0$ ) 이다.

유동은 1차원이고 점성과 중력에 지배된다.

영역 II: 두께는  $x$ 의 함수이며, 점성, 중력, 표면장력이 전부 고려되어야 한다.

영역 III: 유동은 거의 정지상태로서 중력과 표면장력에 지배된다.

이중 영역 I에서의 수직방향 유속분포와 유량은

$$u(y) = U - \frac{gh_0^2}{2\nu} \left\{ \left( \frac{y}{h_0} \right)^2 - \left( \frac{y}{h_0} \right) \right\}$$

$$q = Uh_0 \left( 1 - \frac{\rho gh_0^2}{3\mu U} \right)$$

이며, 이를 무차원화로 표시하면 무차원 필름두께  $T_0$ 와 유량  $Q$  는

$$h_0 = T_0(\nu/g)^{1/2} U^{1/2},$$

$$q = Q(\nu/g)^{1/2} U^{3/2}$$

와 같이 표시할 수 있다. 윗식간의 관계로부터 무차원 유량은

$$Q = T_0(1 - T_0^2/3)$$

가 된다. 이로부터 최대유량은  $T_0 = 1$  일 때 얻어

지며 그때의 최대가능 유량은  $Q = 2/3$  가 될 것이다. 여기서  $T_0$  는 물론  $Re$ 와  $Ca$ 의 함수이다. 영역 III 역시 중력과 표면장력간의 관계로부터 쉽게 구할 수 있다. 그러나  $T_0$  값을 알기 위하여는 영역 II에서의 해석이 필요하며, 문제의 복잡성으로 인하여 정확한 해를 구하기 어렵기 때문에 다소간 제한적인 경우에 대하여 근사적으로 이론해를 구한 것들이 김장환, 현범수 [1994]에 소개되어 있다. 보다 자세한 내용은 Landau & Levich [1942], White & Tallmadge [1965], Spiers 등 [1974] 의 논문을 참조하면 된다. 과거의 코팅분야 연구를 종합하면  $Ca = 1$  부근까지는 해석해가 실험값과 잘 일치하나 그 이상에서는 큰 차이를 보였는데 김장환, 현범수 [1994]는 이를 관성력을 무시한데서 오는 차이로 해석하였으며 따라서 필름코팅에 비하여 구동속도가 훨씬 빠른 유희수기의 경우에는  $Re$  수를 무시해서는 안됨을 지적하였다. 수직 구동평판 문제에 관성력, 점성력 등을 모두 고려하려면 이론적 접근이 실질적으로 불가능하며 표면장력을 고려한 Navier-Stokes 풀개를 사용하여 수치해석을 수행해야 하나, 저자의 지식으로는 아직 이에 대한 수치해석결과는 발표된 바 없다. 관성력을 고려한 이론적인 접근으로 김장환, 현범수 [1994]는 수직구동 평판상에 부착된 기름층의 자유표면유동 안정성 (Stability)을 Fig. 11의 영역 I의 구간에 대하여 근사적으로 해석하였다. 이는 스키머의 구동속도가 어느 임계속도 이상이 되면 유막내에서 불안정성이 증폭되어 유층의 두께가 더 이상 증가할 수 없다는 가정에서 출발하였다. 필름의 구동속도는 자유낙하 필름층내 불안정파의 최대군속도보다 커야한다는 절대불안정성 (Absolute instability) 개념 (Alekseenko 등 [1985])을 바탕으로, 구동면상 유막의 안정성을 확보하기 위하여 필요한 유희수기의 구동속도는 정지면에서 전파되는 불안정파 들의 최대군속도 (Group velocity) 보다 높아야 한다는 조건을 설정하였다. 즉, 구동속도를  $U$ , 스키머 면위의 유체속도와 정지한 평판을 흘러내리는 유체의 속도를 각각  $u_d$ ,  $u_f$  라고 할 때  $u_d = U + u_f$ 로 바꾸어 주면 영역 I에서 끌려 올라가는 기름층을 고정평판을 따라서 자유낙하하는 Alekseenko 등 [1985]의 문제로 등가시킬 수 있다. 선형해석결과 얻어진 최대 가능

한 유막두께는 다음과 같다.

$$T_0 = \sqrt{0.643 - \frac{0.934}{CaRe^3} + O\left(\frac{1}{Ca^2Re^6}\right)}$$

한편, Kim & Hyun (1994)은 동일한 개념으로 비선형해석도 수행하였는데 Navier-Stokes 방정식을 FEM으로 수치해석하면서 영역 I의 유막상에 Solitary wave가 발생하여 해가 발산하는 상태를 모사하여 최대 구동속도를 추정하였다. 이상에서도 출된 유막두께와 유량의 한계조건은 다음과 같이 얻어졌다.

선형해석:

$$T_0 < 0.80, Q < 0.63 \text{ for } ReCa^2 \gg 1$$

비선형해석:

$$T_0 < 0.60, Q < 0.53 \text{ for } Re \gg 1$$

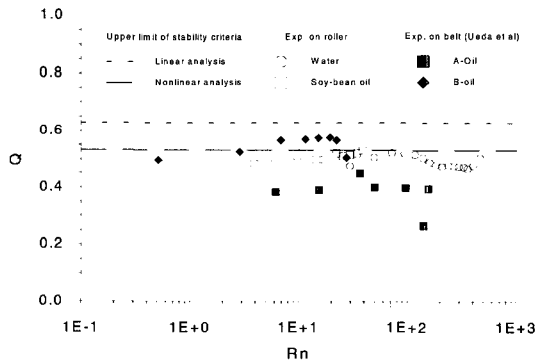


Fig. 12 Nondimensional Withdrawal Rate Against Reynolds Number

이론추정 결과는 Fig. 12에서 보는 것과 같이 드럼식과 벨트식 스키머에 대하여 계측한 실험치와 비교하였는데,  $Re$ 와  $Ca$ 가 커질때 안정성해석 결과가 코팅분야에서 사용하는 이론들을 보완해 줌을 알 수 있다. 따라서 유희수기와 같이 상대적으로 고레이놀즈수에서 작동하는 유동의 경우 안정성해석을 사용한 유막두께 산정도 해석의 한 방편으로 여겨진다. 그러나 이러한 해석은 단상유체에 제한되어 수행되었기 때문에 실제 해상에 떠있는 유층에 대한 적용은 아직 곤란한 단점이 있다. 물위에 떠있는 기름층에 대하여 유희수기의 성능을 추정한 연구는 여러 실험논문에 발표되어 있다. Ueda [1987]는 벨트식과 디스크식 두종류에 대하여 실험과 이론해석을 시도하였다. 그의 이론해석은

Fig. 11에서 영역 I과 영역 III에 평판 경계층이론을 도입한 반경험적인 방법으로서 코팅분야의 논문들과 유사한 접근이었다. 영역 I에서의 유량은 단일유체의 경우 유막의 두께에 의존하는 반면, 기름-물 이상유체 (Two-layer flow)인 경우 오일 풀 내부에 있는 벨트표면상의 경계층두께에 의존함을 정성적으로 보인 것이 특색있는 결과였다. 또한 벨트의 경사각, 회전방향 및 속도를 바꾸어가면서 수행한 성능비교로부터 벨트식 유회수기의 최적작업상태를 Fig. 13에 보이는 것과 같이 제시하였다. 이는 영역 I의 유막이 중력에 의하여 흘러 내리는 것을 감소시켜 줌과 동시에 해상의 기름층과 벨트가 접하는 각도를 줄여주므로서 자유표면에서 유동의 교란을 줄여주기 위함이었다. 한편, 벨트의 회전방향은 벨트표면에 해수가 부착하기 전에 기름이 먼저 부착되도록 하기 위함이었다.

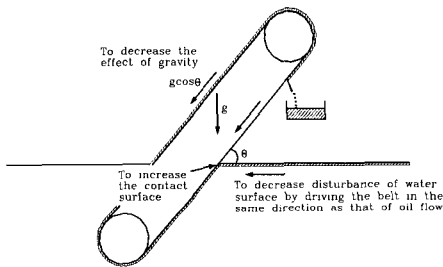


Fig. 13 Direction of Rotation and Inclination of Belt for Better Performance

끝으로 국내에서도 송동업, 윤경환 [1997]은 위와 비슷한 실험적연구를 수행하였다. 대상 기름은 벙커 C유, 디젤유로서 회전방향, 구동속도에 따른 유층두께별 유회수성능 실험을 체계적으로 실시하였다. 실험결과는 Ueda(1987)가 제시한 Fig. 13의 최적작업조건을 잘 증명해 주고 있으며, 벨트와 수표면과의 경사각이 45도일 때 가장 좋은 결과를 줌을 밝혔다. 이 논문의 결과를 정성적으로 관찰할 때 해상 기름층의 두께가 1 cm 이상이 되면 어느 정도의 구동속도 범위내에서는 유회수량이 Kim & Hyun (1994)이 제시한 단일유체의 최대 유회수량에 비교적 근접하는 것으로 여겨진다.

5.6 기타 연구대상

이상에서 소개한 바와같이 유회수기에 관련된 이론적 접근은 이 분야에 대한 연구가 비록 활발하지는 않으나 여러 흥미있는 해석이 가능함을 보여주고 있다. 전체적으로 볼 때 향후 유체역학적으로 관심을 가지고 연구되어야 할 분야는 무공무진할 것으로 생각된다. 흡입식 유회수기에 필요한 유수분리기능을 유회수방식에 따라 가장 효율적으로 수행할 수 있는 방법의 연구나 오일펜스 설치와 Sweeping 방법에 따른 최적 유회수 방법의 개발 등이 대표적인 예가 될 것이다.

6. 결 언

Tsocialis 등 [1994]은 미래형 유처리방법으로 환경친화적인 방법, 예를들면 생물학적인 처리 (Bioremediation)를 중요하게 거론하고 있다. 원격탐사 (remote sensing)나 현장소각 (In-situ burning)의 중요성도 많은 전문가들에 의하여 강조되고 있다. 그러나 생물학적 처리는 장기 해양환경 회복기술로서 다량의 유출기름을 신속한 초동조치를 통하여 제거하기 위하여는 기계적인 수거가 필수적이다. 따라서 유회수기를 사용한 수거 방법은 앞으로도 계속 사용되어야 하며 실제로도 사용되어 질 것이다. 본 고에서 고찰한 유회수기의 현황과 특성, 향후 개발방향 등에 대한 제시가 독자들에게 다소나마 도움이 되기를 바란다. 끝으로 제5장에서 고찰한 유회수기 관련 유체역학적 문제접근 사례들은 비록 부족하나마 여러 유체역학을 전공하는 분들의 관심을 고조시키는 계기가 되었으면 한다. 비록 현재는 유회수분야에 학술적인 뒷받침이 필요치 않을지 모르나 미래지향적으로 보아서 언젠가는 본격적으로 이론적인 뒷받침이 필요한 시점이 올 것이라 여겨진다. 국내 해상 상태에서 탁월한 성능을 보이는 유회수기법을 개발하는 날이 오기를 기대한다.

후 기

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 강관형, 1996, "표면 오염층의 운동과 수용에 관한 이론 및 실험적 연구", 박사학위논문, 포항공과대학교 대학원.
- [2] 김장환, 현범수, 1994, "흡착식 유회수기상의 유막의 안정성해석," 대한조선학회 '94 춘계학술대회, 현대중공업, 울산.
- [3] 배광준, 유병석, 1995, "다상유체중 유회수장치 성능해석 및 응용연구", 한국기계연구원 연구보고서 UCN339-1879.D (해상유출유 확산방지 기술개발 보고서 별첨1).
- [4] 송동업, 윤경환, 1997, "벨트식 유회수기의 회전방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 (B), 제21권 제5호, pp.679-690.
- [5] 日本海難防止協會, 1979-1981, "海洋汚染防止の調査研究", 日本船舶振興會 補助事業 報告書.
- [6] 통상산업부 외, 1996, "해양오염방지 5개년계획 (1996-2000)".
- [7] 海上災害防止センター, 1983, "海上防除の調査研究報告書 (流出油防除機資材の有効性に關する調査研究)", 調57-2.
- [8] 해양경찰청, 1994, "시험연구보", 제7권.
- [9] 현범수, 1994, "해양유류오염 방지기술", 해양한국 10월호, pp. 130-140, 1994. 10.
- [10] 현범수 외, 1993, "해양오염방지기술 개발 (I)", 한국기계연구원 UCN282-1727 .D, 1993.8.
- [11] 홍도천 외, 1993 - 1995, "해양유출사고 예방 및 방지장치 개발 (I), (II), (III)", 한국기계연구원 연구보고서.
- [12] Alekseenko, S.V., Nakoryakov, V.Ye. and Pokusaev, B.G., 1985, "Wave formation on a vertical falling liquid film," AIChE J. vol. 31, No.9, pp. 1446-1460.
- [13] Chang, H.C., Demekhin, E.A. and Kopelevich, D.E., 1993, "Nonlinear evolution of waves on a vertically falling film," J. Fluid Mech., vol. 250, pp. 433-480.
- [14] Clauss, G.F., 1986, "Hydrodynamic Problems of Offshore Skimming Systems", Marine Technology, Vol. 17, No. 2.
- [15] Clauss, G.F. and Kühnlein, W.L. 1992, "Oil Skimming Vessels : Structure-Seaway Interaction Problems and Provisions for Wave Attenuation Systems", OTC 6989, OTC'92, Houston, Texas, USA, May 4-7.
- [16] Cutter Information Corp., 1993, "The International Oil Spill Control Directory", Oil Spill Intelligence Report, 13th ed.
- [17] Dias, F. and Tuck, E.O., 1991, "Weir Flows and Waterfalls", J. Fluid Mech, Vol. 230, pp. 525-539.
- [18] Hault, D.P., Cross III, R.H. and Milgram, J.H., 1970, "The Feasibility of Surface-skimming Oil Collection Devices", Project No. 704103/004, Office of Research & Development, U.S. Coast Guard, June.
- [19] Imberger, J., 1972, "Two-dimensional Sink Flow of a Stratified Fluid Contained in a Duct", J. Fluid Mech, Vol. 53, pt.2, pp. 329-349.
- [20] Ippen, A.T., 1951, "Mechanics of Supercritical Flow", Trans. ASCE, Vol. 116, pp. 268-295.
- [21] ITOPF, 1986, "Response to Marine Oil Spills, A Training Package of Five Films/Videos", IMO, ITOPF, EC Co-production.
- [22] Kao, T.W., 1965, "A Free-streamline Solution for Stratified Flow into a Line Sink", J. Fluid Mech, Vol. 21, pt.3, pp. 535-543.
- [23] Kao, T.W., Pao, H.-P. & Wei, S.N., 1974, "Dynamics of Establishment of Selective Withdrawal of a Stratified Fluid from a Line Sink", J. Fluid Mech. Vol. 65, pt. 4, pp.657-710.
- [24] Kim, J.W. and Hyun, B.S., 1997, "Investigation on the Recovery Rate of Adhesion-type Oil Skimmers", J. Ocean Engineering & Technology, Vol. 11, No. 3.
- [25] Landau, L. and Levich, B., 1942, "Dragging of a liquid by a moving plate," Acta Physico-chim., vol. 17, pp. 42-54.



- [26] Milgram, J.H. & Van Houten, R.J., 1978, "Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a Water Current", J. Hydronautics, Vol.12, No.3, July.
- [27] Ruschak, K.J., 1985, "Coating flows," Ann. Rev. Fluid Mech. vol. 17, pp. 65-89
- [28] Spiers, R.P., Subbaraman, C.V. and Wilkinson, W.L., 1974, "Free coating of a Newtonian liquid onto a vertical surface," Chem. Eng. Sci., vol. 29, pp.389-396,
- [29] Schulze, R., 1993, "World Catalog of Oil Spill Response Products", World Catalog, 4th ed., Robert Schulze Environmental Consultant, Inc.
- [30] Suzuki, I. et al., 1989, "Oil Layer Flow Around Skimming Vessels", 1989 Oil Spill Conf., San Antonio, Texas, USA.
- [31] Suzuki, I., Miki, K. and Yagi, T., 1992, "Behavior of Oil Layer for Twin-hull Oil Skimming Vessels", J. Kansai Soc. of Naval Archi., Vol. 217, March, pp. 153-162.
- [32] Tsocalis, E.A., Kowenhoven, T.W. and Perakis, A.N., 1994, "A Survey of Classical Methods for Marine Oil Spill Cleanup", Marine Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 79-93.
- [33] Ueda, K., Yamanouchi, H. and Ueta, Y., 1987, "Removal of Spilled Oil by Adherence", Ship Research Institute Report, Vol.24, No.5., Japan (in Japanese).
- [34] Vanden-broeck, J.-M. and Keller, J.B., 1987, "Weir Flows", J. Fluid Mech. Vol. 176, pp. 283-293.
- [35] White, D.A. and Tallmadge, J.A., 1965, "Theory of drag out of liquids on flat plates," Chem. Eng Sci., vol.20, pp.33-37
- [36] Yagi, T. et al., 1981, "On Behavior of Oil Film Around a Ship", Kansai Society of Naval Archi., Vol. 180.