

---

# 진해만에서의 해양유류오염 방제능력 향상에 관한 연구

윤종휘\* · 장하룡\*\*

A Study on the Improvement of Marine Oil Spill Response  
Capabilities in Jinhae Bay

*Jong-Hwui Yun\* · Ha-Lyong Jang\*\**

## Abstract

As the possibility of oil spill accident is getting higher in Jinhae Bay with the increase of marine traffic, the authors study and evaluate the capabilities of oil spill response under a worst case scenario in this area. As a result, it is found that oil slicks would reach to a sensitive area and partly be stranded on the shore after 6~12 hours of spill accident, and also found that the booms of about 8,000m, skimmers of 872tons/hour recovery rate and temporary storage capacity of 564tons are required to mechanically contain and recover all spilled oils at sea surface. Although the parts of required equipments can be mobilized from neighboring areas, they should be stockpiled for long-term preparation of prompt oil spill response.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

한국 남해 동부에 위치하고 있는 진해만은 진해시, 마산시, 창원시, 거제시, 통영시 및 고성군으로 둘러싸인 전형적인 반폐쇄형 만이다.

이곳에는 여러 부속만과 섬들이 분포하고 있어 복잡한 지형을 이루고 있으며, 평균수심은 10~20m, 최대 수심이 약 50m 정도인 천해역이다(Fig. 1). 진해만에서는 외해수와의 해수 교환의 80~90%가 가덕수로를 통하여 이루어지고 있으나(Kim, 1994), 수심이 얕고 폭이 좁아 해수

---

\* 한국해양대학교 해양경찰학과

\*\* 한국해양대학교 대학원

\*\*\* 본 연구는 한국해양대학교 학술진흥회 지원에 의해 수행한 연구임

교환이 매우 느리다. 이에 따라 진해만에서는 육상기원 오염물질이 만내에 체류하는 시간이 매우 긴 특징을 가지고 있다.

진해만은 천연적인 지형조건으로 물동량은 점점 늘어나고 있고, 최근에는 고성만에 LNG 기지가 건설되어 대형 LNG 운반선의 통항이 증가하고 있다. 또한 선박의 정박 및 계류시설, 해상 화물 취급 시설, 선박조선소 및 수리소 등이 있어 국가 경제에 중요한 역할을 하고 있다. 이 밖에 이 해역에는 해조류 양식어장, 제1종 공동어업 등 해양생물과 생태계에도 매우 중요하며 환경 변화에 매우 민감한 해역이다.

한편 지금까지 진해만에서 발생한 오염사고는 대부분 1 킬로 미만의 소형 오염사고이었고, 유출된 기름은 빌지유였다. 그러나, 최근 들어 진해만의 해상교통량이 점차 증가하고, 입출항 선박의 크기가 대형화되고 있어, 선박의 충돌 및 좌초 등으로 인한 해양오염사고 발생 가능성이 점점 높아지고 있다. 그리고 일단 오염사고가 발생할 경우에는 지형적 특성으로 인해 방제비용이 엄청나게 소요될 것이고 또한 양식 어장의 파괴, 해양생물의 치사 및 생태계 변화 등 막대한 피해가 뒤따를 것으로 예상된다.

그러나, 그 동안 진해만에 대한 연구는 적조현상, 해양환경변화 및 해수 유동 특성 등에 대한 것이 대부분이었고, 또 이들 연구는 물리해양학적, 해양생물학적 및 수산학적 관점에서 수행되어졌으며, 유류오염 및 오염방제와 관련한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 진해만의 해양환경변화에 따른 오염사고 발생에 대비한 방제 전략 수립의 일환으로 이 해역에서 발생할 수 있는 최악의 해양오염사고에 대한 시나리오를 설정하고, 수치모델을 이용하여 유출된 기름의 이동 및

확산 특성을 파악하여 추후 진해만에서의 해양 오염방제 능력 향상을 위한 대책 마련 및 지역 방제실행계획 수립의 기초자료를 제공하는데 그 목적을 두고 있다.

## 1.2 연구의 방법

본 연구에서는 우선 2차원 조류모델을 이용하여 진해만에서의 해수 유동 특성을 계산하였다. 이렇게 하여 구한 결과를 미국의 ASA(Applied Science Association)에서 개발하여 현재 미국해안경비대(USCG), 캐나다해안경비대(CCG) 및 호주해양안전청(AMSA) 등에서 유출유의 추적 및 풍화과정을 예측하는데 사용하고 있는 수치모델인 OILMAP 프로그램에 입력시켜 기름의 이동 및 확산 특성을 조사하였다. 이 프로그램은 1993년 영국의 Shetland 섬 남쪽 해상에서 원유 약 85,000톤이 유출된 유조선 Braer호의 오염사고(Spaulding *et al.*, 1994) 및 1987년 Dubai 연안해역에서 발생한 오염사고(Anderson *et al.*, 1999)에 적용하여 실제 현상과 거의 일치함이 입증된 바 있다.

그리고 본 연구에서는 진해만에서의 최악의 오염사고 시나리오를 설정하는데 있어서, 이 만에 출입하는 선박 중 이중저유류탱크(double bottom F.O. tank)의 최대적재용량이 약 2,500톤인 50,000톤급 자동차 운반선을 대상으로 하였다. 사고 발생장소는 선박 통항이 집중되는 도선사 승선 장소로 하였고, 최대유출량은 MARPOL 73/78 부속서 I 규칙 제 22조 및 23조에 의해 계산한 병커유 약 872톤으로 하였다.

## 2. 수치모델

조류의 계산에 사용된 기본 방정식은 표층에

서 해저경계층까지 조류의 유속이 같으며 해저 경계층이 매우 작다는 가정인 천해장파이론을 도입하여 연직으로 평균된 2차원적 유체 운동방정식과 연속방정식으로 그 식은 아래와 같다.

식 (1)과 (2)는 각각  $x, y$ 방향의 운동방정식이며, (3)은 연속방정식이다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial y} - fV =$$

$$-gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + Ah \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \gamma \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial vU}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} + fV =$$

$$-gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + Ah \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \gamma \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서  $U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$ ,  $V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$  이다.

식 (1), (2), (3)에서  $t$ 는 시간,  $x, y$ 는 직교 좌표계 상에서 동쪽, 북쪽으로의 거리,  $u, v$ 는 연직적으로 평균된  $x$  및  $y$  방향의 유속,  $h$ 는 평균해면으로부터의 수심,  $\zeta$ 는 평균해면으로부터의 해면 변위,  $f$ 는 기준위도에 대한 코리올리 파라메타 ( $f = 2\Omega \sin \phi = 8.13 \times 10^{-5} s^{-1}$ ),  $\Omega$ 는 지구 자전 각속도 ( $\Omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{radian/sec}$ ),  $\phi$ 는 모델 적용해역의 기준 위도 ( $35^\circ 05'N$ ),  $g$ 는 중력가속도 ( $= 9.8 \text{ms}^{-2}$ ),  $\gamma$ 은 해저 마찰계수 ( $= 0.003$ ),  $A_h$ 는 와동확산계수 ( $= 10^2 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )이다.

시뮬레이션을 수행하기 위해 앞에서 주어진 기본방정식 (1), (2), (3)을 시간에 대해 전방차분, 공간에 대해 중앙차분으로 차분화하였고, 이류항은 경사차분법(angled derivative scheme)을 사용하였으며, 한 단계의 수치계산과정에서 발생될지도 모르는 오차를 분산시키거나 흡수하기 위해 양방향 순차계산법(double sweep scheme)

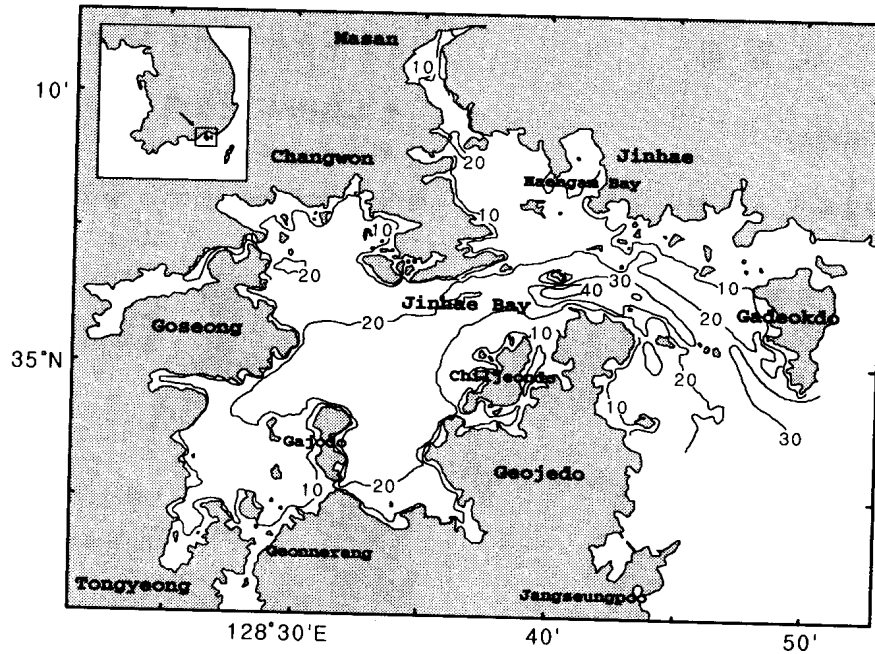


Fig. 1 Water depth of the study area

을 사용하였다.

그리고 진해만은 반일주조가 약 70% 정도 우세한 조석형태에 속하므로(KORDI, 1983) 조류는  $M_2$  분조만을 사용하였다. 계산의 시간 간격은 양해법의 CFL(Courant- Friedrichs-Lewy) 수치적 안정도 조건을 충분히 만족하는 10.35sec를 적용하였다.(Mesinger and Arakawa, 1976)

수심 자료의 입력은 축척 1:50,000의 국립해양조사원 발행해도 No. 206, 237을 참고하였다. 계산에 사용된 총격자의 수는  $x$ 방향으로 267개,  $y$ 방향으로 206개로 구성하였고 한 격자의 간격은 200m를 취하였다.

연안경계 조건으로는 해안선에 수직인 유속  $u$ 와  $v$ 는 0이라는 조건을 사용하였다. 남쪽 경계면에서의 지각은 계산초기의 불연속을 최소화하기 위해  $90^\circ$ 로 환산한 값을 사용하였다. 계산 영역에서 바람의 영향, 하천 유입 등의 영향은 고려되지 않았다.

### 3. 결과

#### 3.1 해수유동특성

Fig. 2는 제2장에서 구한 해수 유동벡터를 간

단하게 표시하기 위하여  $x,y$  방향으로 격자수를  $20 \times 20$ 으로 조정하여 나타낸 최강창조류 및 최강낙조류의 분포도이다. 진해만과 그 부근 해역에서의 조류의 유속은 국립해양조사원의 조류도(1997)에 나타난 유속의 크기보다는 작게 나타났으나, 흐름의 패턴은 거의 비슷하게 나타났다.

최강창조류시 가덕도 남쪽해역에서 가덕수로를 거쳐 진해만으로 유입된 조류는 가덕도 서쪽해역에서 분기되어 하나는 반시계 방향으로 흘러 고성쪽으로 유입되고, 다른 하나는 마산항쪽으로 흐른다. 이 때 고성쪽에서의 흐름이 마산항쪽에서의 흐름에 비해 유속이 훨씬 강하며, 최강 유속은 가덕수로 중앙 부근에서 약 1.4kts 정도이다.(Fig. 2-a)

최강낙조류시에는 최강창조류와 반대방향으로 고성 및 마산항에서 가덕수로를 거쳐 남해로 빠져나와 동류하며 가덕수로 중앙부근에서 약 1.2kts의 최강유속을 보인다.(Fig. 2-b)

#### 3.2 유출유의 이동 및 확산

제 1.2절에서 설정한 해양오염 가상 시나리오의 위치에서 병커유 872톤이 유출되었다고 가정하여, 조류모델에서 구한 결과치를 OILMAP 프

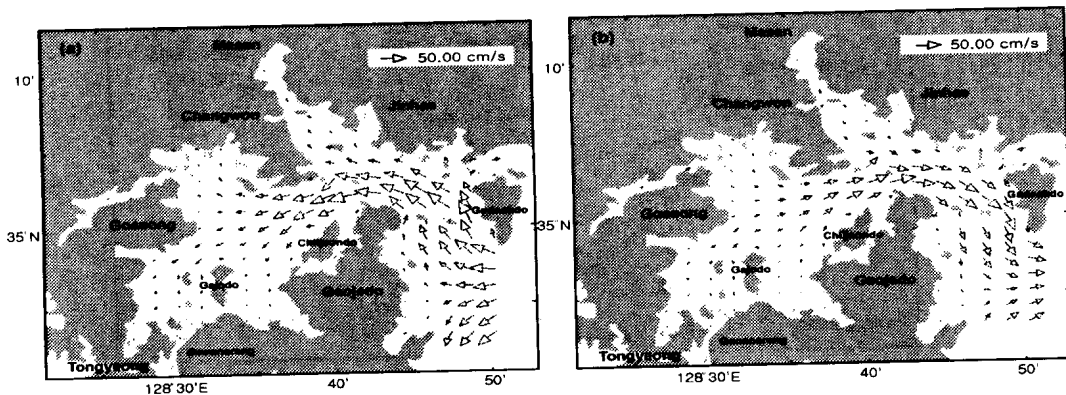


Fig. 2 Tidal current at Jinhae bay and adjacent area : Max. flood current(a) and Max. ebb current(b)

로그그램에 입력하였다. 그리고, 바람의 영향을 고려하기 위하여 연중 비교적 풍향이 일정한 동계와 하계의 두 계절만 택하여, 이 두 계절의 마산에서의 평균 풍향·풍속값(동계 N'ly 3.0m/s, 하계 SE'ly 3.0m/s : 기상연보 1993~1995)을 입력하여 유출유의 이동 및 확산 특성을 조사하였다.

### 3.2.1 동계의 경우

사고발생 6시간 후에 거제도 북동 해안 부근쪽으로 이동한 유막은 12시간 후에는 남남동으로 약 3km 이동하고 유막의 두께는 얇아지면서 그 면적은 약 2배로 넓어지고 있다. 24시간 경과후에

는 거제도 북동단 해안에서 능포까지 해안을 따라 길게 분포되며, 48시간 후에는 옥포만까지 확장하고 일부 기름은 해안에 부착한다.(Fig. 3)

### 3.2.2 하계의 경우

사고발생 6시간 후 진해항 남쪽 약 3.7km 떨어진 해역까지 이동한 유막은 점점 확산되면서 12시간 후에는 북서쪽으로 약 2km 정도 이동하고 있다. 그 후 유막은 북서~북북서로 이동하여 24시간 후에는 진해항 입구 해안 및 부도(Budo)에 도달하여, 부분적으로 해안에 부착하면서 계속 서북서~북서쪽으로 이동하여 48시간 후에는 마산항 입구까지 이동한다.(Fig. 4)

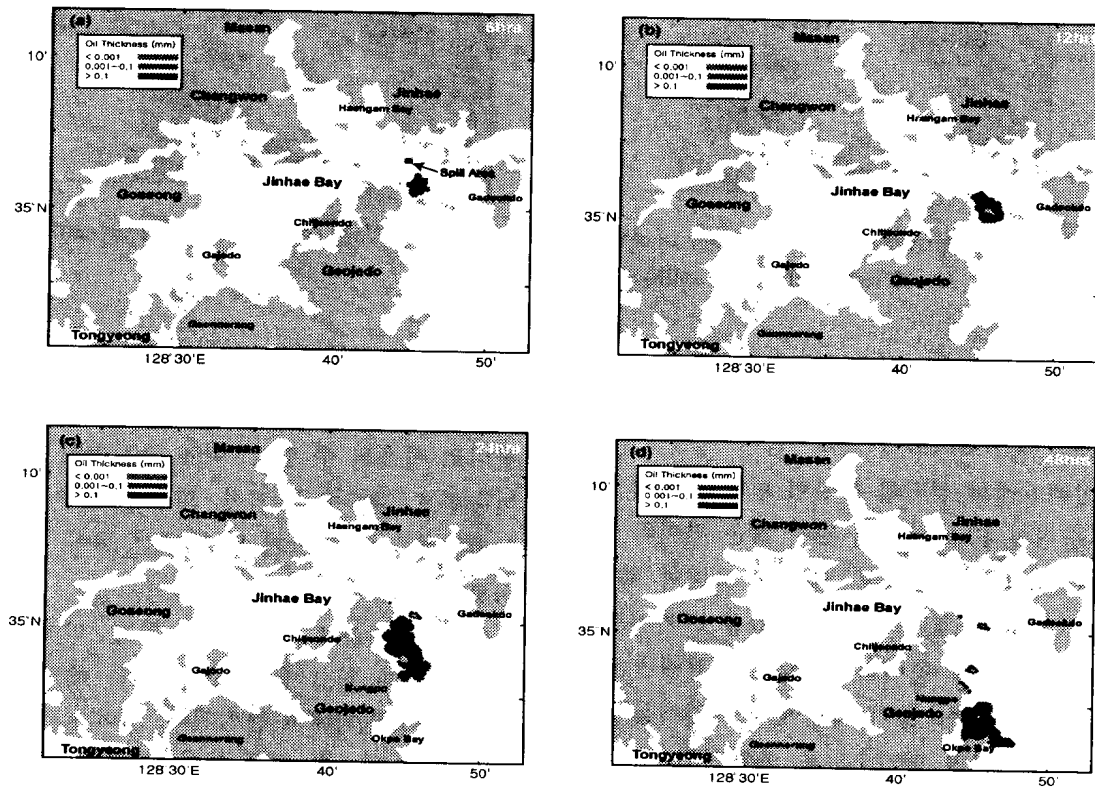


Fig. 3 Spreading and trajectory of spilled oil at the sea surface in winter with times(6, 12, 24, 48 hours after oil spilled)

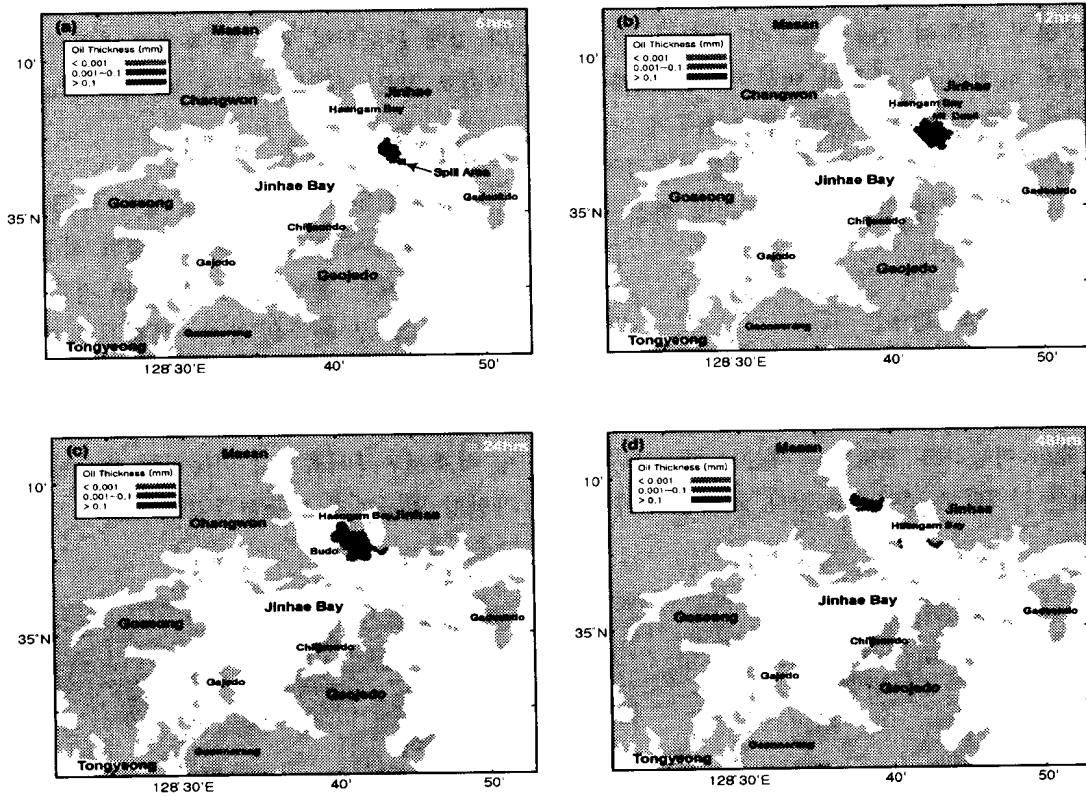


Fig. 4 Spreading and trajectory of spilled oil at the sea surface in summer with times(6, 12, 24, 48 hours after oil spilled)

### 3.3 해양오염 방제전략

#### 3.3.1 오염방제장비 현황

진해만에서 선박의 통항이 빈번한 항계 부근은 수심이 40m 이하로 깊지 않은 편이라 오일 붐의 설치가 가능하고, 해수의 흐름이 빠르지 않아 오일붐으로 봉쇄한 유출유를 스키머로 회수하는 작업이 용이하다. 반면에 진해만은 어장 및 양식장이 많기 때문에 유처리제를 사용할 시 2차적인 해양오염을 유발시킬 수 있어 유처리제의 사용을 금해야 한다. 이와 같은 주변 환경을 고려하면, 진해만에서는 기계적 봉

쇄 및 회수를 위한 오일붐 및 스키머, 유흡착재 및 각종 방제장비를 구비한 방제선이 주 방제 장비로 사용될 수 있다. 이에 추가하여 작업선, 이송펌프, 회수유 수거선, 회수유 저장시설 및 처리시설, 고압세척기 및 방제선 등이 보조 장비로 사용될 수 있다.

진해와 마산에 비치되어 있는 방제장비는 <Table-1>과 같으며, 이 들 장비는 해양오염사고 시 초동단계에서 동원된다. 그러나, 만약 추가 장비가 필요할 경우 부산 및 통영지역의 유관기관 및 단체·업체의 보유 장비가 동원되어야 한다.

〈Table-1〉 Stockpile of major oil spill response equipments at Jinhae and Masan area

장비명	구분	보유량				
		계	방제조합	관계기관	유관단체	유관업체
오일붐(m)		9,094	3,350	3,314	400	2,030
유회수기(대)		5	5	-	-	-
유흡착재(kg)		7,391	3,166	3,457	88	680
유처리제(l)		29,271	14,327	8,354	1,800	4,790
방제선(척)		4	4	-	-	-

자료 : 해양경찰청(2001)

### 3.3.2 방제 방법 및 방제 능력

진해만은 지형적으로 해수 교환율이 낮고 외해와 어느 정도 격리되어 있어 파 에너지가 약하기 때문에 환경피해복구에 장기간 소요된다. 또 진해만에는 여러 종류의 어패류 양식어장 및 정치어장 등이 많아 기름 유출과 같은 오염사고는 해양생물에 치명적인 영향을 미친다. 특히 가

덕도 북쪽에서 진해만 입구까지의 해역 및 마산만 입구의 왼쪽 해역에 양식어장이 집중되어 있고, 거제도 북동쪽의 이수도에서 옥포만까지 정치어장이 많아, 유류오염사고 발생시 이 지역에 기름이 유입되지 않도록 신속한 조동조치가 필요하다.

한편, 진해만에서 발생할 수 있는 최악의 오염

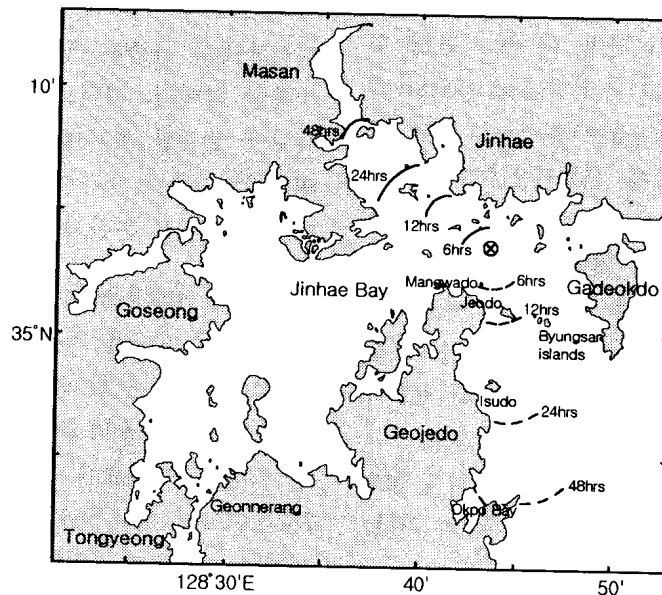


Fig. 5 Limit of oil slick with times in winter(dotted line) and summer(thick line) respectively. "⊗" mark denotes the oil spill site.

사고 시나리오를 설정하여 동계와 하계에 있어서의 기름의 이동 및 확산을 Fig. 3 & 4의 결과를 이용하여 조사해 보면(Fig. 5), 동계에는 기름 유출후 약 24시간 경과하면 유막이 이수도 남쪽까지 이동하고, 하계에는 기름 유출 후 약 12시간 경과하면 진해항 해안 및 마산항 입구까지 이동하는 것으로 나타났다.

또 바람이 비교적 불규칙적인 춘계 및 추계에, 바람이 동풍일 경우에는 유막이 고성쪽으로 이동하므로 상당 시간 해상에 머무르지만, 서풍일 경우에는 유출후 단시간 내에 진해항 남쪽 해안에 부착될 것으로 예상된다.

이와 같은 유출유의 이동·확산 특성 및 지형적 특성을 고려하면, 진해만에서 유류오염사고가 발생하면 민감지역을 우선적으로 보호하기 위하여 먼저 유막이 이동할 것으로 예상되는 지역에 신속하게 오일붐을 설치하여 기름의 이동을 봉쇄하고 가두어야 한다. 그 다음으로 스키머를 이용하여 회수하여야 하며, 이 때 사용할 수 있는 스키머로는 디스크 스키머(disc skimmer) 및 워어 스키머(weir skimmer)를 들 수 있다. 이렇게 하여 회수한 기름을 기름저장용기에 저장한 후 다시 육상 저장소 또는 처리소로 이송하여 기름 및 유성폐기물을 처리한다. 이 밖에 오염방제 방법으로 유처리제 살포 또는 유흡착재의 사용이 고려될 수 있으나, 진해만에서는 유출유 전량을 해상에서 기계적으로 봉쇄 및 회수하는 방법이 가장 바람직한 것으로 생각된다.

상기와 같이 방제 작업을 실행하기 위하여 필요한 방제장비의 수량을 산정해 보면 다음과 같다.

#### ① 오일붐(Boom)

기름이 민감지역의 해안에 부착할 가능성이 있는 약 12시간을 기준하여 유막의 길이를 고려하면 약 8,000m의 오일붐이 필요하다.

#### ② 스키머(Skimmer)

미국이나 캐나다에서는 오염방제 장비의 확충 계획을 기계적 회수율을 기준으로 하여 수립한다. 여기에서 기계적 회수능력을 산정하는데 고려할 요소는 시간당 회수율(RR : 제조회사에서 제시한 용량), 기계적 회수율(MR : 우리나라의 경우 20%), 작업일(WD : 부산지역 방제실행계획에 의한 작업일 3일), 1일 작업시간(WH : 계절에 따라 다르지만, 평균 8시간으로 간주), 실행적 효율(PE : 65%) 및 장비동원율(EM : 33%)이다. 따라서 유출유의 전량인 벙커유 872톤(AO)을 회수하기 위한 회수용량( $m \cdot \text{ton/hr}$ )은 식  $RR = AO / (RM \times WD \times WH \times PE \times EM)$  의해 구하면 약 847 톤/hour이 된다.

진해만에서 보유한 스키머는 통영해양경찰서 관할 마산방제조합지부에서 보유하고 있는 5대의 스키머가 전부로 총 용량은 152톤/hour이다. 이 용량은 본 연구에서 설정한 해양오염사고 시나리오에서 유출된 벙커유를 처리하기에 매우 부족한 양이다. 그러므로 진해만에서 유류오염사고가 발생한 초기에 통영해양경찰서 및 부산해양경찰서에서 보유하고 있는 스키머를 신속히 사고 현장으로 운반하는 것이 필요하다.

#### ③ 회수유 저장용량(Temporary Storage Capacity)

스키머로 회수한 기름은 임시저장용기에 보관한다. 이 때 미국 등 선진국에서는 저장용량을 1일 유효 유회수율의 2배로 정하고 있다. 이 기준을 적용하면 필요한 스키머의 1일 회수용량이 282톤이므로 결국 564톤을 저장할 수 있는 저장용기가 필요하다. 그러나, 현재 진해만에서의 회수유 저장용량은 방제선 4척에서 수용할 수 있는 약 140톤 정도이므로 부족한 것은 인근 통영, 부산 또는 울산에서 동원되어야 한다.



#### 4. 결론

진해만은 전형적인 반폐쇄형 만으로 외해수와 의 해수교환이 느려 오염물질이 장기간 체류하며, 또 해조류 양식어장 및 제1종 공동어장 등이 많아 해양생물 및 생태적인 면에서 매우 민감한 지역이다. 이 해역에서는 매년 선박통항량이 증가하고 있어 앞으로 선박에 의한 기름 유출사고가 발생할 가능성이 점차 높아지고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 이 해역을 중심으로 최악의 오염사고 시나리오를 설정하여 기름의 이동과 확산 및 이에 대한 방제 방법과 방제장비의 필요 수량에 대해 조사해 본 결과 다음과 같다.

(1) 최악의 시나리오, 즉 50,000톤급 자동차운반선이 선박통항 밀도가 가장 큰 도선사 승선지점에서 충돌사고로 인해 벙커유 약 872톤을 유출하였다는 가정하에 유막의 이동 및 확산을 조사해 본 결과, 동계에 유막은 거제도 북동쪽 해안을 따라 이동 및 확산하면서 48시간 후에는 옥포만까지 진행한다. 그리고 하계에는 마산만을 향해 이동하는 유막은 48시간 후에는 마산항 입구까지 확장한다.

(2) 진해만에서의 유류오염사고에 대한 방제방법으로는 지형적·생태적 측면에서 회수유 전량을 기계적으로 봉쇄 및 회수하는 방법이 가장 바람직하다. 특히 유막이 유출 후 6~12시간 경과하면 민감지역에 다다르기 때문에 무엇보다도 신속한 방제작업을 개시하여야 하며, 방제 장비로는 오일붐 약 8,000m, 스키머 회수용량 약 847 tons/hour, 회수유 저장용량 약 564톤이 필요하다.

(3) 진해만에 비치되어 있는 방제장비는 최악의 오염사고에 대비하기에는 부족하다. 따라서, 부족한 장비는 인근 통영 및 부산지역에서 동원할 수 있으나, 진해만의 특성을 고려하여 장기적으로 방제장비의 필요 수량을 진해항 또는 마산항에 확보해 두는 것이 바람직하다.

#### 참고문헌

- 국립해양조사원(1997) : 조류도(부산에서 여수), 서지 제620호
- 한국해양연구소(1983) : 적조 및 오염모니터링 연구, BSPE : 48-80-7
- 해양경찰청(2001) : 부산지역방제실행계획
- 해양경찰청(2001) : 전국방제자원현황
- Anderson, E, R. Henry and P. R. Ryback(1999) : Oil Spill Model Applications Dubai Coastline and Offshore Areas, GAOCSMAO Conference & Exhibition, Doha
- Kim, C(1994) : Three-dimensional numerical model experiments of tidal and wind-driven current in Chinhae Bay, J. Oceanol. Soc. Korea, 29, 95-106
- Mesinger, F and A. Arakawa(1976) : Numerical Methods used in Atmospheric Models, Global Atmospheric Research Program, WHOO-ICSU Joint Organization Committee, Vol. 1
- Spaulding M. L, V. S. Kolluru, E. Anderson and E. Howlett(1994) : Application of Three-Dimensional Oil Spill Model to Hindcast the Braer Spill, Spill Science & Technology Bulletin Vol. 1, Elsevire Science Ltd, 23-35

