

# 태안 누출유 확산의 수리학적 특성과 예측기술



서 승 원

군산대학교 해양시스템공학과 교수

suh@kunsan.ac.kr

## 1. 서론

우리나라 해양환경 사상 역사적인 오염을 기록한 2007년 12월 7일 발생한 허베이 스피리트(Hebei Spirit)호 원유 유출 오염에 대하여 그동안 실무 및 연구자의 많은 성과와 방제 및 해결방안에 관한 보고가 있었다. 우리 학회에서도 사고가 발발한 직후(2007년 12월 12일)에 연안환경분과위원들의 자발적인 참여로 현장 시찰을 실시하였으며, 이후 학회 사무실에서 3회에 걸쳐 오염 초기의 예보에 대한 문제점 분석과 유류확산 모델링에 대한 우리나라 기술 수준의 현 위치를 점검하였다. 2008년 2월 29일에는 전문가 50여명이 참석한 가운데 허베이 스피리트로 전반적인 유류오염 현황과 국내외의 모델링 접근방법에 관한 워샵이 한양대학교 재성토목관에서 성황리에 개최되었다.

본고에서는 연안환경분과위원회 위원들이 그동안

워샵과 지난 5월 연합학술발표회 등을 통해 활동한 자료를 토대로 기술하였으며, 태안 누출유 확산의 환경피해와 수리학적 특성 특히 모델링에 반영되어야 하는 필수 중요사항을 살펴보는 계기를 갖도록 하였다. 향후 누출유 확산 모델링의 신뢰성 향상에 기여하며 환경피해를 저감할 수 있는 계기가 되기를 기대한다.

본고 작성에는 분과위원회 위원장을 맡고 있는 필자를 비롯하여 간사인 대영엔지니어링 박원경 부장, 위원으로 중추적 활동을 한 한남대학교 정태성 교수 그리고 성균관대학교 이정렬 교수 등이 수고하였다.

## 2. 허베이 스피리트호 사고 당시의 해황 및 유류확산 일지

본장은 분과위원회 간사인 박원경 부장이 위원회

〈표 1〉 ‘허베이 스피리트’ 호 유류유출 사고의 개요

구분	내용
사고일자	· 2007년 12월 7일 07:15사고개요
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 선명: 허베이 스피리트(HEBEI SPIRIT)호 (홍콩), 삼성 1호 (한국)</li> <li>· 선종: 유조선(원유선), 부산</li> <li>· 운항자: 허베이 스피리트 shiping 컴퍼니 리미티드, 삼성중공업</li> <li>· 총 톤수: 146,848ton(유조선), 11,800ton(부산)</li> <li>· 사고당시 기름적재량: 302,641kl</li> <li>· 유출량: 12,547kl사고원인</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 예인선 및 크레인선과 유조선의 쌍방과실(검찰수사결과, '08.2.21)</li> <li>· 예인선 및 크레인선: 기상 악화에도 불구하고, 예인선 운항 감행, 무리한 작동으로 인한 와이어 절단</li> <li>· 허베이 스피리트호: 관제센터 요청에도 불구하고, 적극적 충돌방지 노력하지 않음. 해상상 정박하기 부적절한 위치에 정박</li> </ul>

모임 시 논의된 역할분담에 따라 매스컴에 보도된 자료를 근거로 작성한 것에 기초한다.

### 2.1 사고 개요

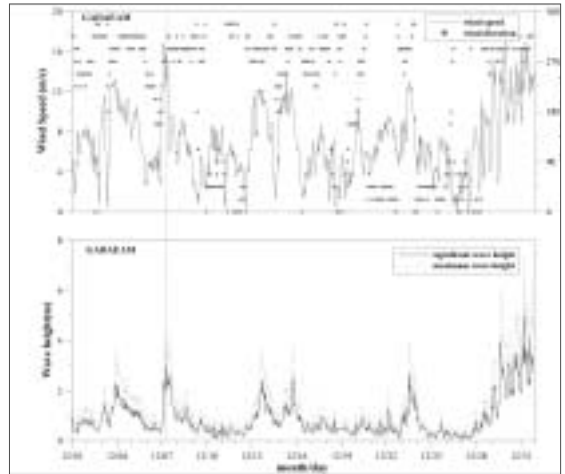
2007년 12월 7일 07시 15분경, 충남 태안군 만리포 북서방 5마일 해상에서 예인선(삼성T-5, 삼호T-3)에 의해 예인 중이던 삼성 1호 부산과 12월 6일 19시 18분부터 정박 중이던 유조선과 충돌하여 유조선 Hebei Spirit(허베이 스피리트)호의 좌현 탱크 5개소 중 3개소가 파공되어 원유 약 12,547kl(78,906배럴)가 유출되는 국내 최대 해양 유류 유출사고가 발생하였다 <표 1>. 검찰수사결과에서 밝혀진 사고 원인은 기상악화에도 불구하고 무리한 운항, 충돌방지 노력 부재 등 인재로 인한 사고로 간주된다.

### 2.2 기상 및 해상자료 조사

누출유 확산범위를 신속하고 정확하게 추산하고 예측하기 위해서는 유류확산현상을 지배하는 외적



〈그림 1〉 사고 해역 인근의 기상 및 해상 관측소 위치도



〈그림 2〉 가대암에서 관측된 바람과 파고 시계열(2007년 12월)

인 인자로 조석, 바람, 파랑 자료의 정확한 입력이 매우 중요하므로 사고 해역 인근에 위치한 기상 및 해상 관측소의 관측 자료를 수집하여 사고발생 전·후의 해황을 살펴보았다. <그림 1>은 사고 해역 인근의 기상 및 해상 관측소의 위치도이며, 이중 2007년 12월 동안 가대암에서 매시간 관측된 풍향 풍속 및 파고를 <그림 2>에 시계열로 나타내었다. 사고 당일의 풍속은 최대 16.8m/sec, 풍향은 남서에서 북서풍으로 전향하였던 것으로 나타났으며, 파고의 경우 유의파 최대값은 3.0m로 사고발생 직전인 07시에 발생하였으며, 유의파고 2.0m이상의 파

〈표 2〉 사고 당일 기상청 특보상황(예보치)과 관측지 비교

날짜	구분	기상청 특보상황(서해중부)		가대암 관측지
		먼바다	앞바다	
2007년 12월 7일 (사고 당일)	풍속(m/s)	12~16m/s	12~16m/s	5.7~16.8m/s
	풍향	서~북서	서~북서	남서~서북서
	파고(m)	2.0~4.0m	2.0~4.0m	<ul style="list-style-type: none"> <li>●유의파 최대치: 3.0m (07시)</li> <li>●최대파 최대치: 4.4m (07시)</li> <li>●유의파 2.0m이상 12시간 지속(03시 ~ 15시)</li> </ul>

주) 기상청 특보상황 - 먼바다: 발표 12월 6일 22시 40분, 발효 12월 7일 03시~  
 앞바다: 발표 · 발효 12월 7일 07시~

고가 당일 03시부터 15시까지 약 12시간 지속되는 약 기상이었던 것으로 나타났다 〈표 2〉. 한편 가대암 관측지와 당시 기상청 특보상황(예보치)을 비교하여 보면 기상청의 예보치는 비교적 정확했던 것으로 사료된다.

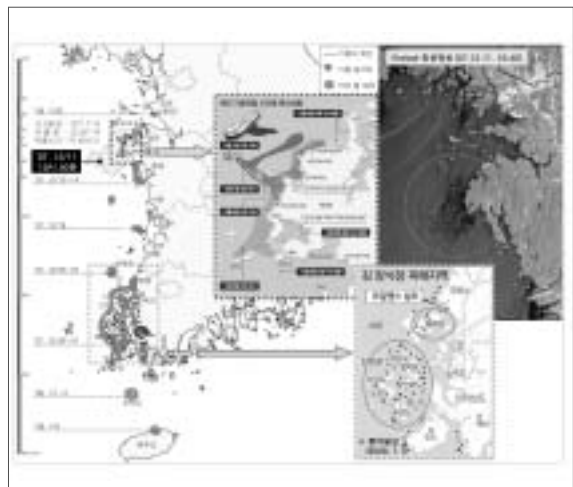
### 2.3 누출유류 확산 일지 조사

유류 사고 발생 후 누출유류의 확산과정 모니터링은 현상 파악뿐만 아니라 예측모델의 개발, 정확도 검증에 위해 매우 중요하나, 사고 직후 방제의 시급성, 광범위한 조사에 따른 장비, 예산 확보의 어려움 등으로 제대로 이루어지지 못한 것은 안타까운 현실이다. 본고에서는 직접적인 현장조사가 아닌 사고 후 일자별 중앙재난안전대책본부의 사고 수습상황보고 자료('07.12.8~'08.2.17)와 유류 피해에 관한 각종 언론보도자료, 위성자료에 근거하여 누출유류의 확산현황을 정리하였다.

〈그림 3〉은 사고 발생 후 2008년 1월 20일까지의 유류 확산현황을 도시한 것으로서 이를 살펴보면 누출유류는 사고 후 6일째까지는 남북방향으로 약 80km 범위까지 기름 띠 형태로 확산되었던 것으로 추정되며, 이후 사고 7일째부터는 타르볼 형태로 남쪽으로 확산되어 사고 35일째(2008년 1월 9일)에는 사고지점으로부터 약 400km 떨어진 제주 조촌읍

북촌리 다려도 해상까지 확산된 것으로 조사되었다. 〈표 3〉은 언론보도 자료로부터 정리한 일자별 타르 발견 일지이다.

또한, 유출된 유류의 일자별, 지역별 폐유, 타르 및 폐기물 수거량을 유류로 환산하여 〈표 4〉에 제시하였다. 충남지역에서는 폐유 4,428kl를 포함하여 총 8,446kl(총 누출유류의 약 67%)가 수거되었고, 기타 지역에서는 폐기물과 타르 형태로 수거되었으며, 2008년 1월 9일까지의 총 유류수거량은 10,516kl로서 이는 총 유출량의 약 84%에 달한다.



〈그림 3〉 유류 유출사고 후 시간 경과에 따른 확산 현황도

<표 3> 타르 발견 일지(2007년 12월 13일~2008년 1월 20일)

일자	발견지역	규모
2007년 12월 13~14일 (사고 7~8일째)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●안면도 꽃지해수욕장, 천수만 남단 영북항 입구</li> <li>●보령시 오천면 호도,소청도,삼시도, 원산도,고대도,장고도</li> </ul>	●태안 안면도내 백사장 해수욕장에서 꽃지 해수욕장에 이르는 해변 10여km에 타르불이 대량으로 밀려옴
15일(사고 9일째)	●전북 군산시 연도 북서방 5.4km 해역	●지름 1-2m 크기의 타르불
16일(사고 10일째)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●군산시 개야도 김양식장</li> <li>●서천군 춘장대 해수욕장, 마랑리 해변</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1m 안팎 크기의 타르불</li> <li>●직경 3~7cm의 타르불</li> </ul>
17일(사고 11일째)	●군산시 어청도, 연도, 개야도, 말도, 죽도 인근	●지름 1m 안팎 크기의 타르불
18일(사고 12일째)	●고군산군도 말도-방축도 앞 5km 부근 해역	●10cm 안팎의 비교적 작은 타르불
23~24일 (사고17,18일째)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●전북 부안</li> <li>●전남 영광 안마도 인근</li> </ul>	●영광과 신안 앞바다에서 타르 153kg 수거
27일(사고 21일째)	●전남 영광 안마도 북서쪽 14.4km 해상	●신안군 대평해수욕장에서 타르 50kg 수거
30일(사고 24일째)	●전남 신안군 임자면 삼두리 대평 해수욕장	
31일(사고 25일째)	●무안 해안 20km 지역	●1월5일(사고 30일째)까지 타르가 유입된 지역 해안에서 총 800여ton의 타르 제거 (영광 234ton, 신안 419ton, 무안 135ton, 진도 24ton, 해남 370kg 등)
2008년 1월 2일 (사고 27일째)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●진도 지산면 세포리, 조도면 관매, 관사, 외병, 내병, 가사도, 해남 해역</li> <li>●제주 추자도</li> </ul>	●제주 추자도의 경우 타르가 달라붙은 해조류와 쓰레기 등 30포대 400여kg을 수거(타르 150kg 추정)
9일(사고 34일째)	●제주 조촌읍 북촌리 다려도	●5kg 수거
20일(사고 45일째)	●경기 안산 풍도 남쪽 2km 해상 (반경 3km)	●30m x 500m, 20m x 700m규모 10여 개의 기름덩어리 제거

자료 : 연합뉴스 일자별 보도자료 참조

<표 4> 지역별 유류 수거량 산정

일자	산정기간	유류수거량				비고
		총계(kℓ)	폐유(kℓ)	폐기물	타르	
총계 (※경기 제외)	07.12. 7~ 08. 2.16	10,516kℓ	4,428kℓ	30,321ton (4,013kℓ)	1,803ton (2,075kℓ)	중앙재난안전대책본부 (허베이 스피리트호 유조선 유류 유출사고 수습상황 보고, 2008년 2월 17일)
충남 (서산, 태안 등)	07.12. 7	8,446kℓ	4,428kℓ	30,014ton (3,972kℓ)	40ton (46kℓ)	
전북 (군산, 부안, 고창 등)	~ 08. 2.16	265kℓ	-	307ton (41kℓ)	195ton (224kℓ)	
전남(영광, 신안, 무안, 진도 등)		1,804kℓ	-	-	1,568ton (1,804kℓ)	서울뉴스(1/10)
제주 (추자, 다려도)	08. 1. 2 ~1. 9	0.178kℓ	-	-	0.155ton (0.178kℓ)	연합뉴스(1/4, 1/9)
경기 (안산 풍도)	08. 1.20	?	20 x 700m 규모 기름덩어리 10개의 양			연합뉴스(1/22)

주) 유류밀도는 0.869 ton/m<sup>3</sup>, 폐기물의 유류 함유율은 11.5%로 가정  
 총 유류수거량 = 폐유 수거량 + 타르 수거량 + 폐기물 × 11.5%

여기서 특이할 사항은 사고 발생 후 계절적인 바람과 조류의 이동에 따라 서해연안을 따라 남하하던 타르가 1달 보름이 지난 이후 사고해역 인근에서 발생한 점이며, 이는 인근해역에 사고 초기에 침강되었던 타르볼이 재부유 등의 변화과정을 거쳐 나타난 것으로 추정된다.

### 3. 유류류 확산예측기술의 국내외 현황

#### 3.1 국내현황

모델링 관련된 국내 보고서는 주로 국책연구기관에서 수행한 연구 성과를 발간한 것으로 1994년부터 3년간 한국기계연구원에서 해양장비 핵심기술개발의 일환으로 해상누출유 확산방지 기술개발을 연구한 보고서에 이어 G7과제로 수행한 해상유출사고 방재지원시스템 개발 및 상용화 기술 개발 및 유류확산 예측 시뮬레이션 상용화 기술개발 그리고 해상유출사고 방재지원시스템 개발 및 상용화 기술 개발 등이 있다. 해양연구원에서 수행한 국가 재난적 대형오염사고 대비 대응방안 연구, HNS 국가방체제 구축방안 연구 및 해양오염방재지원시스템 개발 기술보고서 등이 있다.

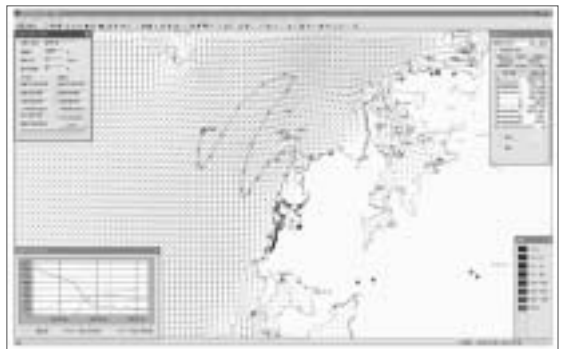
유류확산에 관한 연구논문은 시프린스호 사고 이후 1997년 대형 유조선 사고 어떻게 할 것인가라는 주제로 한국해양환경공학회 학술대회에서 발표(강창구, 1997)한 이후 학회지에 소개된 논문이 있으며 타 학회지에는 소수의 논문이 발표되고 있다. 근래에는 김영관 등(2007)과 이문진(2007)이 발표한 논문과 GIS 기술을 사고대응에 도입한 논문(김혜진 등, 2007)발표가 있으나 국내에서 유류확산 오염이 빈번하게 발생하지 않는 희소성 때문에 연구 논문의 수도 많지 않으며 연구자 층도 두텁지 못한 점이 있다.

#### 3.2 누출유 확산 예보

원유 유출사고 이후 중앙재난안전대책본부는 즉시 다각적인 안전조치 및 관계기관 대책본부를 구성하고 해당지자체에 긴급방제를 지시하면서 피해를 최소화하기 위한 노력을 기울였다. 대책본부는 누출유 확산 전망에서 해상에 유출된 유류가 풍향 및 조류의 영향으로 태안군 가로림만~모항 일대 해안가에 부착될 것으로 예상하여 가로림만 입구 및 학암포~모항일원 등 민감해역 및 해안표착 가능해역에 오일펜스를 설치하는 방안을 강구하였다. 이들은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 기



〈그림 4〉 중앙대난대책본부에서 초기추정된 누출유 확산분포(사고발생 후 24시간 경과: 2007년 12월 8일 07:30)



〈그림 5〉 중앙대난대책본부에서 초기추정된 누출유 확산분포(사고발생 후 48시간 경과: 2007년 12월 9일 07:30)

술자문을 받아 <그림 4> 및 <그림 5>와 같이 북서풍 10-14m/sec을 적용하여 24시간 및 48시간 경과 시 누출유 확산분포를 초기 추정하고 있다(중앙재난안전대책본부, 2007).

지난 5월 공동학술대회에서는 허베이 스피리트호 유류 유출사고 공동 심포지움이 있었는데, 누출유 확산모델과 방제기술을 발표(이문진, 2008)한 결과인 <그림 6>과 비교하면, 동일한 모형을 적용하여 이후 추정한 결과가 전반적인 확산양상이 앞서 제시된 재난대책본부에서 초기 추정한 자문자료와 유사하나 육상 피해시점과 영역이 다소 차이가 나고 있다. 이러한 문제는 예측시스템을 구동시 어떤 입력자료를 어떻게 활용하는가에 따라 그 결과가 달라질 수 있음을 보여주는 것이다.

심포지움에서 소개된 국내의 오염확산 예측 시스템은 현재 국외의 여타 모델들과 마찬가지로 GIS기반에 GUI 환경을 기본으로 하고 있다. 우리나라 연안에 산재된 양식어장을 고려하도록 레이어기능을 탑재하여 생물자원별 특성을 고려하도록 한점이 특이하다. 이 시스템은 타 모델들과 마찬가지로 상세한 누출유의 성상, 유출량, 예측기간 등(증발량, 해



<그림 6> 공동심포지움에서 발표된 누출유 오염확산도 (이문진, 2008)

안부착량, 해상잔존량)을 시간별로 도시하는 기능을 가지고 있다. 그러나 제한사항도 없지 않은데, 최종결과물과 적용만을 강조하여 가장 중요한 기본방정식과 수치해석을 어떤 방법을 적용하였는지 파악하기 곤란하며, 특히 이번 사고와 같이 유출 초기의 바람 영향이 지배적인 경우 이를 어떻게 반영하는지 그에 대한 적정성이 어떠한지 잘 나타나 있지 않다. 아울러 tarball 등의 거동을 잘 표현할 수 있는 3차원 유동모형이 기본이 되어야하나 2차원 모형을 적용함으로써 기본적인 제한사항을 극복할 수 없는 문제점이 노정된 것으로 판단된다.

### 3.3 국외의 현황

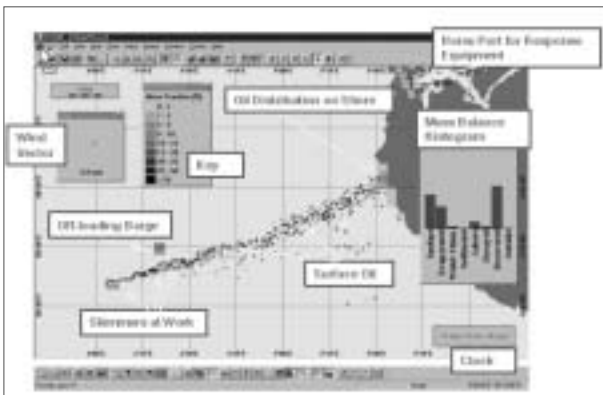
해양환경 분야 중 유류 오염에 따른 사고는 그 사후 방제도 중요하지만 정확한 예보도 이에 못지않게 매우 중요하다. 우리나라에서는 Hebei Spirit호와 같이 예상하지 못하고 간헐적으로 부득이하게 유류오염 사고가 발생할 수 있지만, 해상 원유 채굴의 경우 그리고 채굴된 원유를 해상으로 수송하는 경우 유류확산오염이 빈번하게 발생할 수 있으며 해양오염의 위험성이 상존하고 있다. 이에 따라 원유생산 및 수송을 담당하는 원유회사와 수송회사들은 이미 오래전부터 상당한 수준으로 원유누출에 따른 오염확산 예측 모델링을 활용하고 있다.

지난 2000년부터 국제해양환경모델링세미나(IMEMS; International Marine Environmental Modeling Seminar)에 매년 필자가 참석하여 그동안 발표되었던 주제를 중심으로 살펴보면 국외의 원유유출에 관한 모델링은 다음과 같이 정리할 수 있을 것이다. 세미나 발표의 한 세션 이상이 Oil spill modeling이며, 여기에서는 다양한 모델링 접근방법과 실제 적용 그리고 위해성 평가 등이 다루어진다. 대부분의 모델링은 GIS 기반으로 GUI환경을 기초로 하여 오염확산이 빈번하게 예상되는 해

역에 시스템을 구축하여 사고발생시 신속한 예보를 실시하고 있다.

모델의 기본은 Hydrodynamic model 에 기본을 두고 있으며 다수의 사용자 그룹이 형성되어 모델의 신뢰성이 입증된 POM 등의 모델을 이용하고 있다. 모델의 공간적 차원은 2차원 또는 3차원 모델을 이용하며 적정 수평확산계수 산정이 해석해의 결과에 미치는 영향을 중점적으로 다루기도 한다. 특히 누출유 확산에 매우 중요한 인자인 외적 인자로 바람장을 고려할지 영향 유무가 수동역학 해석의 기본을 이룬다고 볼 수 있다. 특정의 경우로는 입자상으로 뭉쳐서 움직이는 tarball 거동 예측을 위해 Particle tracking 방법과 Parcels 추적방법을 이용하기도 한다. 바람의 영향이 고려된 Random walk 기법을 이용한 적용 예도 세미나에서 발표되고 있으며, 강한 바람 경우 기존 surface 거동과 다른 양상으로 확산됨을 평가한 보고도 있다. 모델에서는 Landfall, Stranding 등으로 소멸되는 양을 고려한 잔존량을 평가한다.

2000년 발표에서는 지중해 동부연안을 포함한 Greece 연안에서 유류확산 예측 모델로 유동은 POM, 바람장은 WAM을 근간으로 한 POSEIDON으



〈그림 7〉 Norway SINTEF 연구소의 유류확산예측모형, OSCAR

로 명명된 모델이 소개되었는데, 수평 및 연직확산과 증발, 유화 그리고 연안부착 및 침강 등을 고려하고 있다. Norway 연구소인 SINTEF에서는 〈그림 7〉에 보는 바와 같은 OSCAR(Oil Spill Contingency and Response)와 추계학적인 방법을 적용한 StatMap을 소개하고 있다. StatMap은 1984년부터 개발되어 1990년에는 노르웨이 기상연구소의 격자체계로부터 도출된 바람장을 고려하는 개발과정을 거치고 있다. 미국 ASA에서는 OilMap과 SIMAP (Spill Impact Model Assessment Package)를 발표하였는데, 이 모델에서는 유처리제 살포를 고려하기도 하며 누출유 진행을 추적하고 생물학적인 영향까지도 고려하고 있다. ASA에서는 이후 원유 누출뿐만 아닌 일반적인 화학물질이 해양에서 예기치 않게 확산되어 피해를 입히는 경우를 고려하는 ChemMap을 소개하고 있다.

#### 4. 누출유 확산 모델링시 고려사항

유류확산은 물리 화학적 그리고 최종적으로는 생물학적인 변화과정을 거치면서 사고발생 초기의 오염이 점차 희석되고 자연 정화의 적응단계를 거쳐 안정화된다. Oil spill 모델링에서는 초기 예측이 매우 중요한데 예측도구로 이용하는 수치모델 자체의 신뢰성과 입력시 고려하는 외력 등이 중요하다.

모델링시 필수적 고려사항과 개선에 대한 내용을 본 장에서 다루는데, 연안환경분과에서 유류확산에 지속적인 관심을 가진 정태성, 이정렬 두 분 교수가 분과 토의시 발표한 내용과 지난 2월 29일 개최된 워크샵에서 발표한 내용을 토대로 하여 학회지 성격에 맞추어 필자가 재구성하였다. 4.1절은 조류예측의 중요성을 강조한 정태성교수의 내용을 4.2절은 풍파의 영향고려와 중요성을 제시한 이정렬 교수의

원고를 기초로 작성하였다.

#### 4.1 조류예측의 중요성

허베이 스피리트 유조선 충돌사고시 누출유 확산 과정을 정확하게 예측한 결과가 제공되지 않아 초기에 효과적으로 피해를 방지하기 위한 대책을 제대로 수립하지 못해서 피해가 커졌다는 주장이 일부 시민단체와 주민들로 제기되었다. 누출유 확산에 관한 연구는 최근 누출유 오염사고가 거의 발생하지 않아 대부분의 국내 연구자들은 관심을 가지고 있지 않고 있었으며, 일부 관련기관에서만 소수의 연구자가 연구를 진행하고 있었다. 이번 사고를 계기로 연안공학자들이 책임감을 느끼고 연구에 관심을 가져야 할 것이다. 국내 누출유 확산 예측과정의 현황과 문제점을 분석하고, 향후 사고발생시 예측정확도를 높일 수 있는 방안을 수립하여야 할 것이다.

누출유 확산현상은 해수유동(조류, 해류, 취송류, 연안류 등), 기상(바람, 수온, 증발 등), 파랑, 생화

학적 반응 등이 복합된 매우 복잡한 자연현상이다. 이중에서도 확산범위를 예측하는 데 있어서 해수유동, 바람, 파랑이 중요한 것으로 알려져 있으며, 이 요소를 정확히 고려할 경우에 확산범위는 비교적 정확히 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본고에서는 현재 국내에서 연구되고 있는 누출유 확산 예측모형에 대해 살펴보고, 예측정확도 개선방안에 대해 고찰하였다.

국내 누출유 확산 수치모형에 관한 연구는 대형 유류오염사고가 다수 발생한 1990년 중반에 누출유 확산 원인분석을 위해 주로 수행되었다(표 5). 누출유 확산을 모의하기 위해서 초기 연구에서는 이송과 확산과정만을 고려하였으나 점차 유류 물성의 변화와 관련된 증발, 분산, 유상화, 침강 등의 현상을 모형에 고려하였고, 방제시스템 가동에 의한 인위적인 회수도 포함하였다. 참고로 누출유 확산과 관련된 주요 현상은 다음과 같다.

폐짐: 유류 유출 초기의 누유 확산과정이다.

이송: 조류, 해류, 취송류 등의 해수유동에 의한

〈표 5〉 유출류 확산 예측모형에 대한 국내 연구동향

연구자	조류예측	취송류예측	확산예측	고려현상	연구해역	비고
최병호 (1985)	1개 분조	모형에 포함	간편식	이송, 폐짐	경기만	이송과 폐짐만을 사용하여 확산 계산
한성대 (1995)	1개 분조		입자추적법	이송, 확산	광양만	일정 농도 확산범위와 관측 범위 비교
홍기용 등 (1997)	4개 분조 조화상수의 합성	간편식	입자추적법	이송, 확산, 폐짐 증발, 분산, 유상화, 회수	남해안	푸른바다와 오성호 사고
류청로 등 (1998)	4개 분조 조화상수의 합성	간편식	입자추적법	이송, 확산, 폐짐, 증발	동남해안	알렉산드리아호 사고(1995)
김기철 등 (1999)	2개 분조	모형에 포함	입자추적법	이송, 확산, 풍화, 유상화, 증발	남해안	씨프린스 사고(1995)
환경부 (2001)	4개 분조 조화상수의 합성	모형에 포함	입자추적법	이송, 확산, 폐짐, 증발, 분산, 유상화, 침강	포항, 울산	
류청로 등 (2005)	4개 분조 조화상수의 합성	간편식	입자추적법	이송, 확산, 분산, 증발, 유독화	인천해역 부산해역	분산에 대한 실험 조류, 파랑, 해류의 민감도 분석



이동과정이다.

난류확산: 난류운동에 의한 유류입자의 확산과정이다.

증발: 바람과 대기온도 등에 의해 기름이 대기로 방출되는 현상이다.

분산: 주로 쇄파에 의해 유출류가 용해, 분해되는 과정이다.

유상화: 물과 기름의 혼합으로 기름의 밀도, 점성, 부피가 증가하는 현상이다.

침강: 부유물질에 흡착하여 해저에 퇴적하는 현상이다.

회수: 인위적인 방제작업에 의한 유출류 제거과정이다.

광화학산화: 대기의 산소와 태양의 복사에 의한 기름 성분이 변화되는 현상이다.

독성화: 극성을 가진 탄화수소 성분의 일부가 해수에 녹아 독성화되는 현상이다.

분해: 자정작용의 일환으로 미생물에 의해 분해되는 현상이다.

위에 언급된 과정 중에서 단기 확산범위 예측에는 초기 퍼짐, 해수 유동, 확산을 고려하면 확산범위는 비교적 정확하게 예측할 수 있으며, 누출유 확산량의 공간분포를 정확하게 예측하기 위해서는 위에 언급된 과정을 모두 고려하여야 한다.

초기 예측에 있어서 중요한 정성적인 확산범위의 예측에 필수적인 항목에 대한 예측과정을 중점적으로 검토하였다. 조류예측에는 주로 4개 분조에 의한 조위와 조류를 모의하고, 각 계산격자점에서 조위와 조류를 조화분석하여 조화상수를 얻은 후에 조화상수를 가지고 조위와 조류를 예측하는 방법을 대부분의 모형에서 사용한다. 그렇지만 이 방법은 신속하게 예보할 수 있다는 장점은 있으나 조류의 비선형성과 취송류와의 상호작용 등을 고려하지 못하는 문제점이 있다. 또한 조석현상은 단지 주요 4

개 분조만을 가지고 정확하게 예측할 수 없다. 일례로 광양만에서 4개 분조만을 고려하여 예측한 조류와 38개 분조를 고려하여 예측한 조류를 관측조류와 비교한 것으로 38개 분조에 의한 조류는 관측조류와 거의 일치하나 4개 분조만을 사용하여 예측한 결과는 큰 차이를 보이고 있다.

취송류는 대부분 풍속에 일정한 비율을 곱하여 취송류를 계산하는 방법을 널리 사용하고 있으며, 전체 해수유동을 계산하기 위해서는 조류와 단순하게 합성한다. 이 방법은 간단하기는 하나 조류와 취송류의 비선형성을 고려할 수 없고, 우리나라 서해안과 같이 수심이 얇은 천해역에서 취송류의 크기와 방향이 지형조건(해안선, 수심, 조간대 등)에 크게 영향을 받는 점을 모델링에서 고려하지 못하는 문제가 있다. 이송-확산의 수치 근사화에는 대부분 모형이 수치분산이 작고, 가시화에 유리한 입자추적 방법을 사용하고 있다.

지금까지 국내 연구동향을 고찰한 결과를 종합하면, 누출유 확산해석에 가장 중요한 인자인 해수유동 즉, 조류를 보다 정확하게 예측할 필요가 있으며, 취송류 계산에서 지형적인 영향을 효과적으로 고려해야 하고, 바람에 의한 직접적인 수송 그리고 파랑이 누출유 표면 확산에 미치는 영향 등에 대한 면밀한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

잘 개발된 모형이라도 실제 운영 시 입력자료의 적정한 구비 및 모델의 구동과 해석에 전문성이 필요하므로, 방제시스템의 운영과정에서는 일부 기관에서 독자적으로 수행할 것이 아니라 사전에 전문가 그룹을 구성하여 사고 발생 시 예측모형에만 전적으로 의존하지 말고, 다양한 전문가의 의견을 토대로 예측하여 예측 정확도를 높여야 할 것이다.

## 4.2 풍파의 영향

태안 현장시찰 및 분임토의와 워샵에 공동으로 할

동하였던 이정렬 교수는 누출유 확산에 외적 인자로 중요한 인자인 바람이 미치는 영향을 고려한 수치모델링을 실시하여 이의 중요성을 피력하였다. 본 절은 지난 해양공동학술회의시에 이교수가 발표한 자료(이정렬 등, 2008)에 근거하였으며 모델링에서 풍파의 영향에 대해 살펴본다.

사고 당시 초속 14~18m의 강한 바람과 2~4m 높이의 거친 파도로 오일 펜스가 무력화되는 등 200~500톤급 규모의 방제정으로 해상방제 조치를 한다는 것은 현실적으로 문제가 있어 초동 대처에 실패하였다. 이는 북서풍의 바람과 WNW계의 풍파로 인하여 태안반도 해안선 150km 중 17~20km 해안에 대량의 기름띠가 유입되어 큰 피해를 입었다.

당시 해안에 도달하는 데 24-36시간 걸리리라 예상한 해양경찰청의 예상과는 달리 사고 후 13시간 만에 만리포와 신두리 일대 해안에 기름띠가 유입되기 시작하였고 특히 파동의 영향으로 다음 날인 12월 8일 오전에는 상당량의 기름이 해안에 부착되어 더욱 큰 재앙이 유발되었다. 고조시에 파도의 영향으로 발생되었을 것으로 예상되는 기름띠의 흔적이 현장 시찰시 파악되었으며, 고조위보다 2-3m를 상회하는 높이까지 기름이 부착된 점으로 미뤄 상당한 파가 해안에 지속적으로 작용하였다는 알 수 있다.

Shattri and Tec은 풍속, 유속(조류 및 Stoke의 mean drift)에 대하여 다음 식을 사용하여 원유의 이동을 모의하였다(이정렬 등, 2008).

$$W_{ad} = 0.033W_{surf} + 0.56W_{current} \quad (1)$$

풍파에 기인된 수면에서의 파랑 주기 평균 유속은 파랑 진행 방향으로 다음 Stoke의 평균 이동 속도로 계산된다.

$$w_w(z) = \frac{\omega k a^2 \cosh(2k(d+z))}{2 \sinh^2(kd)} c_p \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 파의 진폭,  $\omega$ 는 각주파수( $=T/2\pi$ )이며,  $k$ 는 파수( $=L/2\pi$ ),  $d$ 는 조위를 반영한 총 수심,  $c_p$ 는 파의 위상 속도이다.

식 (2)로 태안 원유 누출 이동속도를 추산하면 유출된 기름이 10시간 반 만에 만리포 해안에 도달되었을 것으로 추정된다. 평균 40m 수심에서 8초의 주기와 2m 파고의 파랑에 의하여 발생하는 이동 속도는 약 1m/s이며 유출된 기름이 이동하는 속도는 약 0.56m/s이다.

이정렬 등(2008)은 조석 및 조류를 모의하는 DICEM을 개발하여 황해 및 동해, 남해의 조석 정보가 사전에 입력되어 계산 영역의 위치와 모의 시간만 입력되면 자동적으로 조석 및 조류가 실시간으로 계산되며 사용자가 편리하게 모형을 수행할 수 있도록 GUI 시스템을 구축하였다. 여기에 풍파를 모의하는 WIWAM을 결합하고 오염물질의 이송과 확산을 모의하는 기능 중 유출된 기름의 이동 및 확산을 다루는 버전인 TICEM-OF(Transport In Circulation Environment Model-Oilspill Fate)를 개발하여 서해의 조석 환경에서 풍파로 인한 누유의 이동 및 확산을 모의하였다.

이 모델을 이용하여 파랑장을 고려하고 수치실험한 결과가 <그림 8>에 시간별로 도시된다. 사고 지점으로부터 만리포/신두리 사이 해역과 같이 파고가 큰 영역에서는 누유가 빠른 속도로 이동하는 결과를 잘 보여주고 있다.

당시 해안에 도달하는 데 24-36시간 걸리리라는 해양경찰청의 예상과는 달리 사고 후 13시간 만에 만리포와 신두리 일대 해안에 기름띠가 유입되기 시작하였다. 모델링에서는 사고 시점으로부터 기름띠가 해안에 도달될 때까지 파고가 높았다는 점을 감안하여 풍파 모형을 도입하고 Stoke's mean drift를 고려하여 수치 모의하였다. 수치실험 결과 풍파의 영향이 기름띠의 해안 유입에 상당한 영향을 미

치고 있음을 알 수 있었다.

### 4.3 바람장을 포함한 외적인자가 누출유 확산에 미치는 중요성

우리 학회지 ‘해안과 해양’ 창간호에 소개된 해외 학술정보 중 Coastal Engineering을 소개한 보고(윤성범, 2008)에 따르면 Hebei Spirit호 유출이 발생하였던 시점에 간행된 2007년 12월호(Vol. 54, No.12)에 “Numerical modelling of boom and oil spill with SPH”의 논문에서는 유출된 기름은 점성이 크고 물보다 가벼워 수면에 떠서 상부의 바람과 하부의 해수유동에 의해 이동되고 확산되며 기름과 물은 매우 다른 물리적 특성을 지니고 있어 이에 대한 이동 및 확산을 정확히 예측하기 위해서는 2상 흐름을 다뤄야 함을 제시하고 있다. 특히 해수유동 및 바람 방향에 따라 이동 양상이 크게 달라지므로 흐름의 연직분포를 알아야 하므로 3차원 해석이 필수적

임을 제시하고 있다.

즉, 누출유 이동 및 확산 모델링에는 누출유의 물리적 성상의 이해가 필수적이며 외적인 환경에 의한 퍼짐과 이동이 중요하므로 표층의 바람 저층의 해수유동에 대한 난류특성이 3차원적으로 표현되어져야만 소기의 목적한 성과를 거두면서 유출류의 실시간 예보 또는 후측을 성공적으로 이룰 수 있을 것이다.

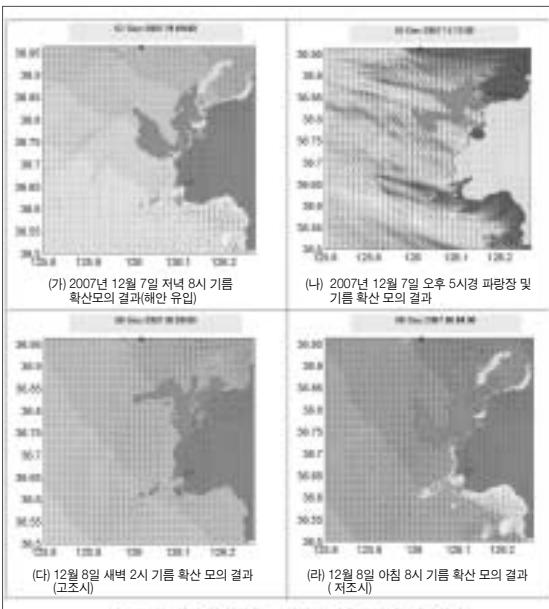
이처럼 누출유의 확산모델링에는 해수유동뿐만 아니라 파랑의 영향이 매우 중요하게 영향을 미치므로 이에 대한 세심한 주의와 반영이 정확도 향상과 예보에 중요함을 알 수 있다.

## 5. 맺음말

사상 초유의 해양오염으로 기록될 Hebei Spirit호 원유 누출사고는 해안해양공학을 전공하여 실무 및 연구에 임하는 우리 학회 회원들뿐만 아니라 일반 국민에게도 많은 충격을 주었다. 원유확산의 수리특성과 이에 따른 피해는 초기 확산예보 시스템의 중요성을 일깨우는 계기가 되었다.

본고에서는 Hebei Spirit호 원유 누출사고를 계기로 사고 발발 이후 일지별로 서해연안을 따라 확산되는 tarball의 이동 및 피해현황을 살펴보았으며, 무엇보다 중요한 초기예보에 필수적인 수리학적 특성을 고찰하고, 국내외의 예측기술의 현황을 고찰하였다. 국내 연구진의 원유확산에 관한 연구능력이 부족한 것은 전혀 없으나 그동안 원유누출의 발생이 흔하지 않아 초기 예보의 중요성 및 시스템 구축의 필요성이 등한시 되었던 것으로 판단된다.

확산예측 모델링에 필수적인 조류예측의 신뢰성 향상이 필요하며 풍파의 영향이 적정하게 고려되어야만 만족스러운 확산결과를 도출할 수 있음을 알



〈그림 8〉 풍파의 영향을 고려하여 예측한 누출유 확산양상

수 있었다. 지리정보를 활용한 잘 개발된 예보 시스템이라도 실제 운영시 신속 정확한 입력자료의 대입과 예측결과에 대한 분석 및 해석능력이 제고되어야 향후 발생 가능한 원유누출의 확산피해를 저감할 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고문헌

- 강창구(1997). 대형유조선사고 - 어떻게 대처할 것인가, Hot Issue Session, 한국해양환경공학회 1997년도 추계학술대회논문집, 1-27.
- 김기철, 이중우, 강신영, 도덕희(1999). 해양유출기름의 확산 시뮬레이션 모델 개발 (II), 한국항만학회지, 13(2), 1-9.
- 김용관, 박장범, 도재만(2007). 해양오염방제시스템에 의한 침몰선 오염사고 대응, 한국해양환경공학회 2007년 추계학술대회 논문집, 1권 1호, 360-367.
- 김혜진 외(2007). 해양유출류 사고대응 GIS 기술, 한국항해항만학회 춘계학술대회, 31(1), 43-148.
- 류청로, 김종규, 설동관, 강동욱(1998). 한국 동남해역에서의 유출류 확산예측모델, 한국해양환경공학회지, 1(2), 52-59.
- 류청로, 김홍진(2005). 유류확산모델 개발 및 동해의 유류오염 사고대책, 한국해양공학회지, 19(4), 35-41
- 윤성범(2008). 해외학술정보-Coastal Engineering, 해안과 해양. 1(1), 68-70.
- 이문진(2007). 부산지역 위험,위해물질 유출사고 가상시나리오 개발, 한국해양환경공학회 2007년 추계학술대회 논문집, 1권 1호, 62-68.
- 이문진(2008). 유출류 확산모델과 방제기술, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 공동심포지움.
- 이정렬, 이주용, 김기철(2008). 태안기름유출사고시 누유 이동 및 확산에서 풍파의 영향, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회. 83-86.
- 중앙재난안전대책본부(2007). 충남 태안 앞바다 유조선 유류유출 사고 수습상황보고(2007. 12. 8)
- 최병호(1985). 동지나해의 순환과 유류확산모델, 대한토목학회논문집, 5(1), 101-111.
- 한성대(1995). Eulerian-Lagrangian 수송모형에 의한 광양만 유류확산 모의, 대한환경공학회지, 17(8), 1-13.
- 홍기용, 이문진(1997). 누유확산 모델링의 남해안 적용, 1997년도 추계 학술대회 논문집, 한국해양환경공학회, 109-120.
- 환경부(2001). 해양오염방제 및 환경회복기술(해양 유출사고 방제지원시스템 개발 및 상용화 기술 개발), BSPN 425-00-1368-4.