

# 2차원 및 3차원 동수역학모형을 이용한 유출유의 거동 예측



**손 상 영**  
고려대학교 건축사회환경공학부 부교수  
sson@korea.ac.kr



**정 태 화**  
한밭대학교 건설환경공학과 교수  
thjung@hanbat.ac.kr

등으로 말미암아 해상선박사고가 빈번하게 발생하며, 이로 인하여 원유 등의 오염물질이 유출되어 다양한 환경오염을 일으키고 있다. 몇몇 사례를 살펴보면, 1970년 4월에 유조선으로 건조되어 운항 중이던 경신호는 1988년 2월 24일 07시 40분경, 울산항에서 벙커C유 2,560킬로리터를 적재한 후 묵호항으로 항해 중 호미곶등대 동방 3.5마일 위치에서 기상악화로 인한 선수부의 침수로 침몰하였다<그림 1(왼편)>. 1995년 전라남도 여수에서는 선적 14만톤의 유조선 씨프린스호가 암초에 부딪히면서 5천여 톤의 기름이 바다에 유출된 적이 있으며, 2007년에는 서해 태안 앞바다에서 홍콩 선적의 유조선 ‘허베이 스피릿 호’와 ‘삼성1호’가 충돌하면서 유조선 탱크에 저장되어 있던 1만2547킬로리터의 유류가 서해 태안인근 해역으로 유출되어 어업으로 생계를 꾸리던 지역민들에게 심각

## 1. 들어가는 말

우리나라 항만지역에서는 컨테이너선, 유조선 등 대형 선박의 입출항의 증가와 기상조건의 악화



그림 1. 침몰한 경신호 3D 이미지(왼편) 및 유출중인 허베이 스피릿 호(오른편) (해양환경공단 제공)

한 물질적·정신적 피해를 입힌 바 있다<그림 1 (오른편)>. 이 외에도 2010년 서산 대산항에서 유조선 탱크의 밸브를 잠그지 않아 한시간 여 동안 기름이 유출된 적이 있으며, 2014년에는 울산 에스오일 공장에서 탱크에 균열이 생겨 3만 배럴 정도의 기름이 유출되는 사건이 있었다.

이렇듯, 오일 등을 포함한 해양유출사고는 거의 매년 발생하고 있으며 한번 발생하면 생태계뿐만 아니라 인근 주민들의 생계와 직결되는 사안이며, 막대한 물질 자원 손실을 수반하면서 회복하는데 짧게는 수개월에서 길게는 수년이 걸린다. 따라서, 해양오염사고에 조기 대응하여 피해를 최소화 할 수 있는 방재 매뉴얼의 확립이 필요하며 이에 대한 필수조건은 오염물질의 유출량과 해류 및 해상풍에 의한 이동범위의 정확한 예측이라 할 수 있다. 정확한 예측모형 개발을 위해서는 해류를 정도높게 예측할 수 있는 모형의 사용이 선제적으로 이루어져야 한다.

본 기사에서는 해역에서 발생하는 해양사고시 유출되는 유류의 초기확산을 정확도높게 예측하기 위해 최근에 개발된 유류유출모형의 사례를 소개하고자 한다. 즉 최근 Son et al.(2017) 및 Jung & Son(2018)에서 개발된 동수역학-유류확산 결합모형을 간략히 설명한다. 해당 모형들은 유류유출사고 발생시 유출량 및 해류/해상풍에 의한 확산 거동을 예측하고, 그 결과를 기초로 사고해역의 신속한 통제 및 처리를 가능하게 한다. 이러한 과정을 통해 해양사고 조기대응을 통한 산업적, 환경적, 재산적 피해를 최소화하고 향후 유류유출사고 발생 시 효율적으로 대처할 수 있는 대응체계 구축기반을 마련할 수 있다.

## 2. 동수역학 모형

항만지역에서 선박사고에 의한 유류유출시 유류의 이송-확산-변형 등의 모의가 가능하기 위해서는 우선적으로 정확한 흐름조건이 선제적으로 계

산되어야 한다. 유류 등의 해상 오염물질은 특성상 흐름에 의해 지배적으로 이동, 전파 및 확산되므로 파랑 및 조류의 영향을 많이 받고 불규칙한 지형적 변화가 존재하는 연해역에서의 흐름 예측은 오염물질 이송-확산-변형 예측에 있어 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다. 오차를 포함하는 흐름조건 산출은 고스란히 오염물 이송-확산-변형 예측의 오차로 나타나게 되므로 정확도 높은 흐름조건 제공은 유류확산 예측에 가장 중요한 요소이다. 본 기사에서는 연안역에서 파랑-조류 등에 대한 정확도 높은 예측을 위해 개발된 2차원 수심적분형, 분산성의 Boussinesq 모형과 3차원 Navier-Stokes 방정식 기반의 NHWAVE(Non-Hydrostatic WAVE) 모형을 간략히 소개한다.

### 2.1 Boussinesq 모형

연안역에서 장파의 조건을 가정할 때 수학적으로 유도되는 비분산성 천수방정식은 조석, 지진해일, 폭풍해일 등 다양한 장파흐름에 대한 모의에 지배방정식으로 활용된다. 하지만 천해역에서는 조석 등의 장파흐름 뿐만 아니라 굴절, 반사, 쇄파 등 파랑의 다양한 변형이나 항주파 등에 의해 생성되는 단파가 존재하며 이 때문에 천해역에서 천수방정식의 적용은 제한적이라고 할 수 있다. 그러므로 항내 정온도 해석 등과 같이 다양한 주파수 성분의 흐름해석 등에 분산성이 보강된 Boussinesq 모형의 적용이 활발하다. 마찬가지로 선박사고가 빈번하게 일어나는 천해역에서는 천수방정식 모형에 비하면 물리적으로 더 정확히 모의할 수 있는 수심적분형 Boussinesq 모형을 적용하면 천수방정식 보다 정확한 해상 조건 재현이 가능하게 된다. 최근 개발된 수심적분된 비선형성, 분산성, 난류 및 회전류 효과를 포함한 Boussinesq 모형은 연안역에서 복잡한 특성을 보이는 장파 흐름의 거동을 비교적 정확히 모의할 수 있다. Boussinesq 모형의 지배방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial HV_\alpha}{\partial y} + D_c = 0$$

$$\frac{\partial HU_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial HU_\alpha^2}{\partial x} + \frac{\partial HU_\alpha V_\alpha}{\partial y} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + HD_m^x + U_\alpha D_c = 0$$

$$\frac{\partial HV_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial HU_\alpha V_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial HV_\alpha^2}{\partial y} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + HD_m^y + V_\alpha D_c = 0$$

위 식들에서의 각 변수에 대한 설명은 Son et al.(2009)에 수록되어 있다. Boussinesq 모형은 위 지배방정식의 수치해를 구하기 위해 공간차분항은 유한체적법에 기반한 4차 정확도의 MUSCL-TVD 기법을 사용하였고, 시간차분항은 3차원 정확도의 Adam-Bashforth 예측자와 4차정확도의 Adam-Moulton 수정자 기법을 이용

하여 수치분산으로 인한 오차발생을 최소화하였다. 또한 바닥마찰, 난류 및 회전류 효과 등을 추가적으로 고려함으로 근해에서 발생할 수 있는 국부적인 비선형효과를 잘 묘사하도록 개발되었다. Lynett et al. (2012)은 Boussinesq모형을 활용하여 지진해일 등 장파흐름영역에서 발생하는 고차의 난류흐름과 와류를 모의한 바 있다. <그림 2>

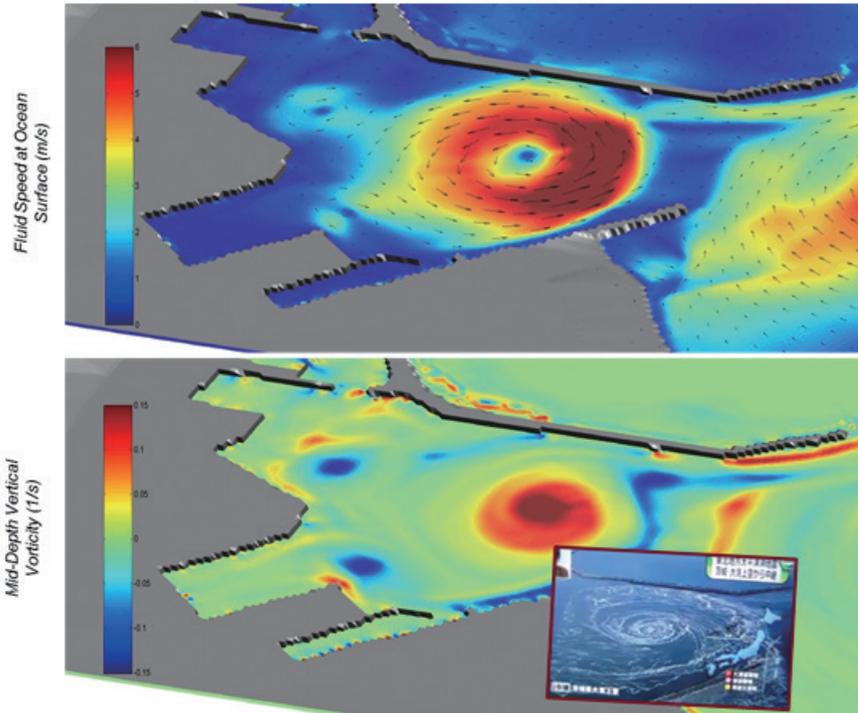


그림 2. 2011년 일본 동북부 지진해일에 의해 Oarai 항내에 발생한 소용돌이의 수치해석 결과

## 2.2 NHWAVE 모형

앞서 설명한 바와 같이 해역에서의 흐름을 모의하기 위해서 수심적분된 방정식을 주로 사용한다. 그러나 이러한 방정식의 사용은 다음과 같은 단점들이 있다. 첫번째로, 3차원 지배방정식을 단순화시키기 위하여 수심방향으로 적분을 하여 유속의 연직분포를 정확히 고려할 수 없다. 천수방정식의 경우에는 연직분포를 무시하며 Boussinesq 방정식의 경우 2차원 방정식의 연직분포를 가정한다. 하지만, 이는 연직 방향으로의 유속차이로 인하여 야기되는 다양한 순환현상을 모의할 수 없으며 수평방향 유속을 구함에 있어서도 정확도를 떨어뜨린다. 두번째로, 천수방정식은 파의 중요한 특징 중에 하나인 분산성을 고려할 수 없다. 즉, 수심평균한 비분산성 흐름모형을 사용하여 파랑의 분산성이 무시되고 이로 인하여 오차를 포함하는 흐름 조건을 산출되게 되므로 결과적으로 유류의 이송확산 예측의 정확도를 떨어뜨리게 된다. 따라서, 이러한 단점들을 동시에 해결하고자 수심방향으로의 다양한 특성을 고려하고 복잡한 흐름특성(난류, 쇄파 등)을 모의할 수 있는 3차 수치모형의 사용이 요구된다. 본 기사에서 소개하고자 하는 3차원 모형은 Navier-Stokes 방정식을 기본으로 사용하는 NHWAVE이며 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i^*} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t^*} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i^*} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j^*}$$

복잡한 수심과 자유수면을 정확하게 모의하기 위하여 다음과 같이 정의된  $\sigma$ 좌표계 사용하면

$$t = t^*, \quad x = x^*, \quad y = y^*, \quad \sigma = \frac{z^* + h}{D}$$

지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \sigma} = \mathbf{S}_h + \mathbf{S}_p + \mathbf{S}_\tau$$

여기서,

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} Duu + \frac{1}{2}gD^2 \\ Duv \\ Duw \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} Duv \\ Dvw + \frac{1}{2}gD^2 \\ Dvw \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} u\omega \\ v\omega \\ w\omega \end{pmatrix}$$

NHWAVE에서는 위 식에 유한체적법과 유한차분법을 적용하여 수치해를 구한다. 운동량 방정식에는 2차 Godunov-type 유한체적법을 적용하였으며 셀 면에서의 유량을 계산하기 위하여 HLL 리만 근사해를 사용한다(Ma et al., 2013). 운동량 방정식을 풀 때 필요한 압력은 Poisson식을 사용하여 구하였으며, 파의 생성 및 경계처리는 내부조파 및 스폰지 경계층 개념을 사용하여 처리한다. 특히, 유류확산 모의와 같이 해양을 대상으로 하는 경우, 영역이 광범위하기 때문에 3차원 모형을 사용할 경우 계산에 상당히 많은 시간이 소요된다. 이를 극복하기 위하여 High performance preconditioner HYPRE software를 모델에 적용하여 MPI(Message passing interface)를 이용한 병렬처리가 가능하도록 설계되었다. Jung & Son(2018)은 NHWAVE를 사용하여 연안역에서 3차원 흐름구조의 형태를 지니고 발생하는 이안류를 모의한 바 있다. <그림 3>

## 3. 유류의 이송-확산 거동 모의

일반적인 유류의 거동은 이송확산방정식을 기본으로 하여 증발, 접착, 풍화(혹은 변형) 등의 물리

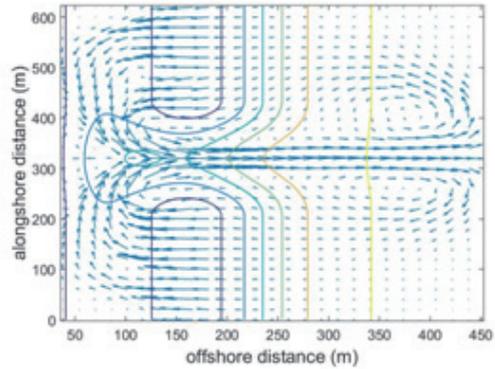
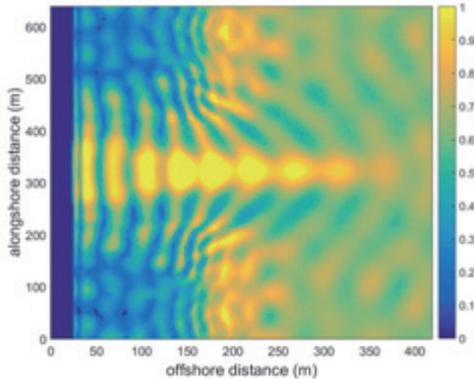


그림 3. Rip채널에서 이안류 발생시의 파고분포(좌측)와 유속벡터(우측)

화학적 과정을 포함한 수식으로 설명된다. 이송-확산 방정식을 바탕으로 다양한 수치모형이 개발되었으며 본 기사에서는 최근 Son et al.(2017) 및 Jung & Son(2018)에서 동수역학-유류확산 결합 모형에 활용한 두 가지 유류유출 해석모형을 간략히 소개한다.

### 3.1 GNOME

유동모델에서 계산한 유속과 해상풍 등을 결합하여 유류의 유출을 모의할 유류유출모형은 기본적으로 Lagrangian 좌표를 기반으로 한다. 이는 유류의 특성상 이송의 메커니즘이 유류입자의 이동으로 가정될 수 있기 때문이다. 해역에서 발생하는 유류의 이동 및 확산은 Eulerian 기반의 유동모델과 Lagrangian 기반의 유류유출 모형의 결합을 통해 예측할 수 있다. 대표적인 유류유출모형 중 하나로 미국 Office of Response and Restorations(OR&R)의 Emergency response division에서 개발하여 사용중인 GNOME(General NOAA operational modeling environment)을 소개한다. (Zelenke et al. (2012)). GNOME은 다양한 종류의 유류유출에 대해 이동, 확산, 증발 및 해안접착 등을 모의할 수 있도록 제안된 프로그램이다.

GNOME에서 유류입자의 이동은 해당시간 동

안의 유속 및 풍속 등에 의해 결정되며 1st order Runge-Kutta 방법을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta x = \frac{u}{\cos(y)} \Delta t, \quad \Delta y = \frac{v}{111,120.00024} \Delta t$$

여기서 111,120.00024는 위도 1도에 해당하는 metric unit을 의미하며 어디서나 동일하다고 가정한다. 확산은 아래의 확산방정식을 이용하여 모의한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

여기서 C는 유류의 농도를 나타내며 D는 확산 계수를 의미하며 random walk 이론에 기반을 하여 구할 수 있다. 보다 자세한 내용은 GNOME의 매뉴얼을 참조 바란다 (Zelenke et al. (2012)).

### 3.2 MEDSLIK-II

2013년 유럽연합 (European Union)의 재정적 지원으로 Dominics et al.(2013)에 의해 개발된 유류확산모델로서 기존에 개발된 MEDSLIK 모형의 개선된 모형인 MEDSLIK-II은 기본적인

로 해류와 바람에 의해 지배되는 유류의 이송, 확산 및 풍화 작용을 모의하는 모델이다. 본 모형에서 오일 입자는 무작위보행(Random-Walk) 개념으로 매개변수화된 난류모형에 따라 분산되며 이송 및 확산에 의한 거동 이외에 증발, 풍화, 해안선 접촉, 유화 등 다양한 물리적/화학적 변화에 따라 이동한다. 한편, 라그랑지안 궤적모형(Lagrangian Trajectory Model)과 스토크스 표류(Stokes Drift) 속도 등을 도입하여 파랑에 대한 효과를 고려하고 추가적으로 원격감지 데이터와의 연결이 가능하다. MEDSLIK-II은 현재 국제해사기구(IMO)가 관리하는 지중해 지역 해양오염 긴급대응 센터(REMPEC; Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean)에서 공식적으로 채택 및 활용하고 있으며, 지중해 지역 해양오염 긴급대응 센터(REMPEC)에서는 바르셀로나 협약(2002)에 의거하여 선박으로 인한 오염 방지와 긴급을 요하는 지중해 오염을 대처하는데 이를 적극 활용하고 있다. 그리고 부표 및 인공위성 등의 관측자료와의 연계가 가능하며, 지중해 운용해양네트워크(MOON)의 경우 지중해 지역 해양오염 긴급 대응센터(REMPEC)와 협력하여 유류유출 예측 결과 공유를 통한 환경오염 피해 최소화에 활용하고 있다.

이와 같이 MEDSLIK-II 모형은 국제적으로 그 활용범위를 확장하고 있는 추세이며 여러 방제단체 등에 활발히 활용되고 있는 실정이다. MEDSLIK-II는 Eulerian좌표계 기반의 이송-확산-변형식에서 유막, 유류의 입자 등에 대한 Lagrangian 표현을 사용함으로써 유출된 유류의 이송-확산 및 풍화 상태를 예측하는데 사용될 수 있도록 설계되었다. MEDSLIK-II모델의 학술적 배경은 Dominics et al. (2013)에 자세히 수록되었으며, 본 기사에서는 이송-확산-변형 방정식 등의 기본 지배방정식에 대해 간략히 기술하고자 한다. 유류의 추적 농도의 일반식인  $C(x,y,z,t)$ 은 단위체적당 질량의 단위를 지닌 해역상의 유류

농도이며 아래 이송-확산-변형 방정식을 따르며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\mathbf{g}\nabla C = \nabla\mathbf{g}(K\nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x,t), t)$$

여기서  $\partial/\partial t$ 은 시간에 대한 편미분항으로써, 국부적인 유류 농도변화를 나타낸 항이고, 벡터성분인  $U$ 는 해역에서의 흐름요소를 의미하며, 각 방향별 유속성분인 ( $U, V, W$ )를 요소로 갖는다. 또한,  $K$ 는 난류효과를 파라미터로 나타낸 확산계수 Tensor이다.  $r_j$ 는 유류의 변형 정도, 즉 물리적, 화학적 변형과정에 의한 농도 수정성분을 나타낸다. 그 밖의 상세한 내용은 Dominics et al. (2013)을 참고하기 바란다.

#### 4. 동수역학모형과 유류이송확산모형의 결합

마지막으로 동수역학 모형(Boussinesq모형 및 NHWAVE 모형)과 유출유류 이송-확산-변형 모형(GNOME 및 MEDSLIK-II)간 외적 결합을 통하여 흐름상태모의를 포함하는 유류유출모형을 구축할 수 있다. 즉, 해역에서의 파랑 및 조류 흐름 상태를 Boussinesq 모형 등의 동수역학모형으로 예측하고 그 결과에 의하여 유류가 이송-확산-변형되는 양상을 모의하게 되는 것이다. 앞서 언급한 대로 GNOME와 MEDSLIK-II모형은 해상풍 및 해역예측망 시스템에 의한 정규화된 해역정보를 수동적으로 활용하는 모형이므로 동수역학 모형인 NHWAVE모형 혹은 Boussinesq 모형과 결합을 통해서 파랑에 의한 이송확산 효과 고려, 사전 유류유출 모의 등 정확도 및 방제분야 활용성을 확대할 수 있다. 다만, 동수역학모형과 유류확산모형의 기본 좌표계가 각각 Eulerian과 Lagrangian으로 다른 형태를 지니기 때문에 이들 상호간의 정보 교환시 정확한 위치에서의 정보가

공유되기 위한 면밀한 고려가 필요하며, 이를 통해서 외적 결합이 성공적으로 이루어 질 수 있을 것이다. 예를 들면, MEDSLIK-II의 경우 이송-확산-변형의 과정이 Eulerian 좌표계상에서 묘사되며 이를 활용해 Lagrangian 좌표 기반의 유막, 유류입자, 구조적 변수 등에 대한 계산이 이루어진다. 따라서 공간적으로는 Boussinesq 모형에서 산출된 Eulerian 기반의 흐름정보가 MEDSLIK-II에 전달되어 Eulerian 기반의 정보로 입력 및 활용되고, 시간적으로는 Boussinesq모형의 흐름정보를 정규화된 시점의 정보로 추출함으로써 두 모형간 시간적 분포를 일치하도록 할 수 있다. <그림 4>는 동수역학모형과 유류유출모형간의 결합 모식도를 나타낸다.

### 5. 연안지역 유류유출에 대한 수치해석

마지막으로, 결합된 두 종류의 유류유출모형

을 활용하여 수치해석을 실시한 사례를 소개하고자 한다. 우선 Boussinesq모형과 MEDSLIK-II 모형간 결합된 모형으로 울산 진해해변의 수치 해석이 행해졌다 (Son et al.(2017)). 외해의 경계조건으로는 해양조사원에서 운영하는 울산 조위관측소 자료를 참조하여 대표기간의 관측 수위자료를 직접 입력하였으며 이는 장주기의 조석성분과 단주기의 파랑성분의 합성으로 구성되어 있어 파랑과 조석의 상호작용을 고려하도록 선택되었다. Boussinesq모형의 모의격자는 약 13.7m 간격으로 하여 601개×367개의 고해상도 격자로 구성하였으며 모의 시간은 만조시와 간조시를 각각 포함할 수 있도록 13시간으로 설정하였다. 이를 바탕으로 수치해석을 실행하여 우선 조석-파랑 흐름 상태에 대한 결과가 도출되고, 각 시간에서의 유속 성분은 유류의 이송-확산-변형 모형으로 전달되어 해상풍 정보와 함께 유류의 확산 및 농도 변화 수치계산에 활용되었다. 이 때, 해상풍 정보

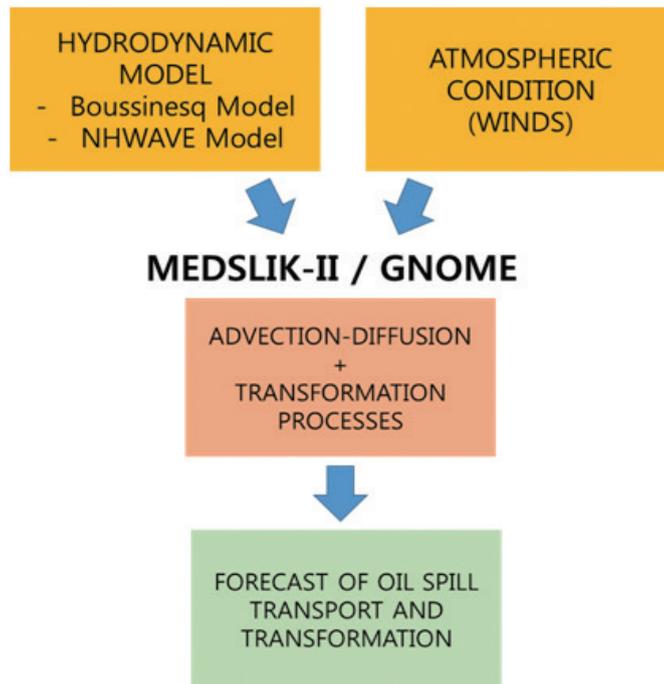


그림 4. 동수역학모형과 유류확산모형간 결합 개념도

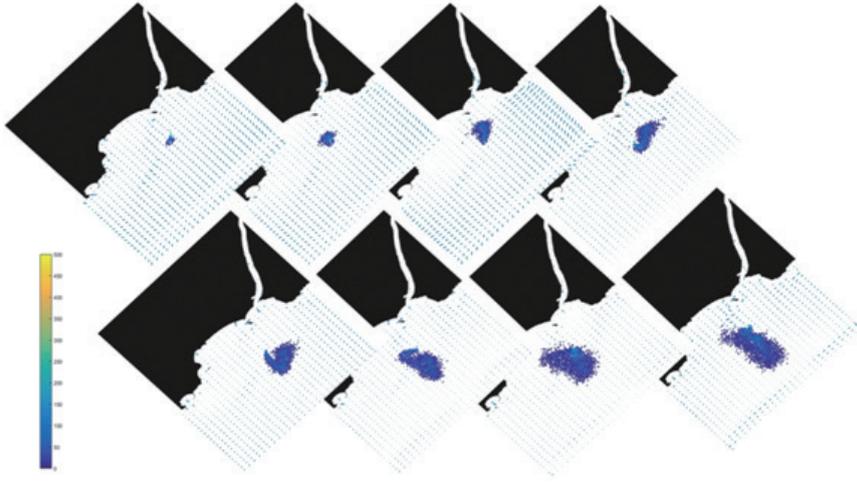


그림 5. 진해해역 전면해상에서 유류유출 사고시 연속유류유출에 대한 모의 결과 (1시간 간격변화)

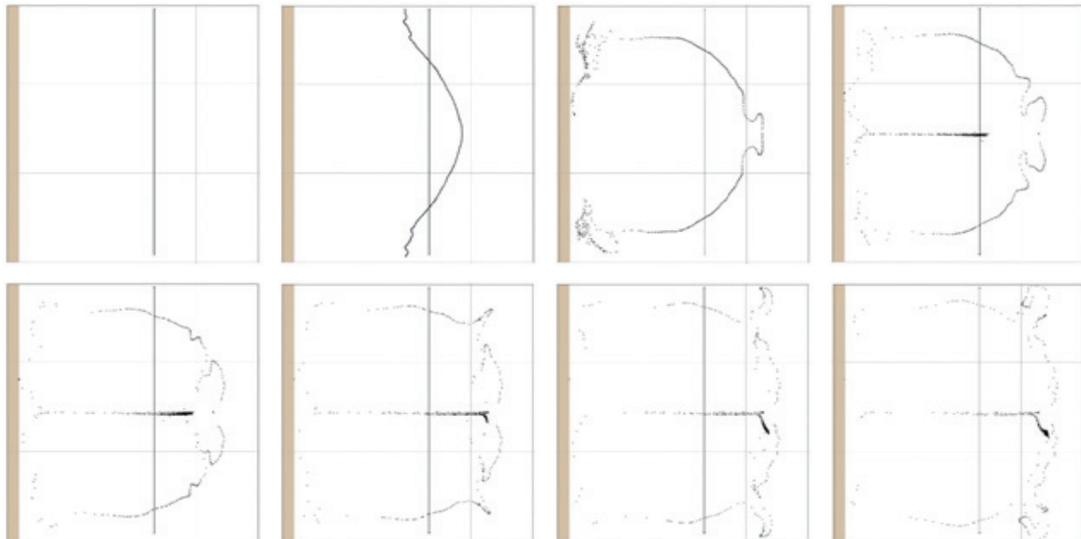


그림 6. Rip channel에서 선형유류유출시 모의 결과 (6시간 간격 변화)

역시 해당시점의 울산 조위관측소 자료를 참고하였다. 이러한 과정을 통해 진해해역 전면해상에서 발생한 연속유류유출사고에 대한 모의 결과를 <그림 5>에 예시적으로 나타냈다. 또한 NHWAVE모형과 GNOME모형간의 결합모형을 활용하여 <그림 3>에서 모의한 Rip channel 지형에 유류유출 사고가 발생할 시 이안류에 의한 유류의 이동 및 확산을 검토해 보았다 (Jung & Son(2018)). 전 영

역에 걸쳐 유류의 이동을 모의하기 위하여 <그림 6>처럼 100 배럴(약 16,000 리터)의 오일을 세로로 길게 분포시킨 후 6시간 간격으로 유류의 이동을 모의하였다. 바람의 효과는 무시하였으며 증발은 없는 것으로 가정하였다. <그림 3>의 유속과 비교해보면 유류의 이동이 유속에 의해 절대적으로 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.



Son, S., Lee, C., Yoon, H. D., & Jung, T. H. (2017). Development of Highly-Resolved, Coupled Modelling System for Predicting Initial Stage of Oil Spill, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 189-197.

Jung, T. H. and Son, S. (2018) Oil Spill Simulation by Coupling Three-dimensional Hydrodynamic Model and Oil Spill Model, *Journal of Ocean Engineering and Technology* (in press)

S. Son, P. Lynett, D.-H. Kim (2011), Nested and multi physics modelling of tsunami evolution from generation to inundation, *Ocean Modelling*, 38, 96-113. Ma et al., 2013

Lynett, P. J., Borrero, J. C., Weiss, R., Son, S., Greer, D., & Renteria, W. (2012). Observations and modeling of tsunami-induced currents in ports and harbors, *Earth and Planetary Science Letters*, 327, 68-74.

Dominicis, M. D., Pinaridi, N., Zodiatis, G., & Lardner, R. (2013). MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting - Part 1: Theory. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 1851-1869.

B. Zelenke, C. O'Connor, C. Barker, C.J. Beegle-Krause, L. Eclipse (Eds.) (2012), *General NOAA Operation Modelling Environment (GNOME) technical documentation*, U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 40, 105 pp.