

## 복합 3차원 해빈변형모델의 구축과 그 적용

신승호<sup>1†</sup> · 홍기용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부

# Development of Hybrid Three Dimensional Beach Deformation Model and Its Application

Seung-Ho Shin<sup>1†</sup> and Keyyong Hong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ocean Development System Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI, Jang-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Korea

### 요 약

연안 해역에서의 대규모 외해 구조물의 건설은 구조물 배후의 해안선으로부터 외빈에 이르는 광범위한 영역에서 심각한 해빈변형을 야기할 수 있다. Shin 등[2000]과 신과 홍[2004]은 일련의 3차원 이동상 실험을 통하여 외해 구조물 배후의 표사이동 양상을 밝혔으며, 본 연구는 이들 실험 결과를 토대로 복합 3차원 해빈변형모델을 제안한 것이다. 제안된 모델은 3차원 이동상 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 그 결과 외해 구조물 배후에 대한 해안선 측의 탐사로 재현은 물론 외빈대에서의 침식·퇴적역에 있어서도 좋은 일치율을 나타내었다. 또한 대규모 인공섬 건설에 의한 해빈변형문제가 실제 야기되었던 현지 해안에 제안된 모델을 적용하여 그 타당성을 확인하였다.

**Abstract** – Construction of a large offshore structure in coastal area may cause serious morphological changes for a wide region ranging from shoreline to offshore behind the structure. Shin *et al.* [2000] and Shin and Hong [2004] identified the sediment transport patterns behind the large offshore structure through a series of three dimensional movable bed experiments. In present study, a hybrid three dimensional beach deformation model was suggested based on those sediment transport mechanisms revealed by experimental results of the preceding studies. The model was verified by the results of the three dimensional moveable bed experiments and they agreed well not only in reappeared tombolo in shoreline side but also in the erosion and deposition region behind offshore structure. In addition, the model was applied to real beach deformation problem, which was occurred by construction of artificial offshore islands, and it validates the applicability of the model.

**Keywords:** Offshore structure(외해 구조물), Movable bed experiment(이동상 실험), Hybrid three dimensional beach deformation model(복합 3차원 해빈변형모델), Sediment transport(표사이동)

### 1. 서 론

연안역 특히 친해역으로부터 해안선에 이르기까지는 저질에 대한 파나 흐름의 작용이 가장 현저한 영역으로서, 파랑조건이 변하면 해빈류장도 변하며 이들이 서로 어울려 모래의 이동 즉 표사의 양이나 방향을 변화시켜 결과적으로 크고 작은 해빈 지형의 변동이 나타난다.

자연 해빈에 있어서 지형 변화는 주로 일시적인 고파랑 혹은 계절에 따라 그 정도가 달라지지만, 수년간에 걸쳐 판단하면 토사량의 수지(收支)는 내외해 방향으로 거의 균형을 이루고 있으며(평

형단면), 연안 방향으로도 일정한 경향으로 안정되어 있어 해빈의 지형은 안정 상태, 이른바 동적인 평형 상태인 것이 대부분이다. 그러나 해안에 주된 토사 공급원이 되는 하천에 댐이 건설되거나(공급원의 감소), 연안역에 방파제 등의 인위적인 구조물이 건설되면(파·흐름 등, 표사이동에 대한 외력의 변화), 이전 형성되었던 균형은 붕괴되고 새로운 평형으로 향하게 되므로 주변의 해빈 침식이나 결괴(缺壞) 등, 해안 보전의 관점에서 중대한 문제가 발생 되는 일이 자주 있다.

최근 고조되는 해상 구조물의 대형화 및 외해화 경향(해상 인공섬 혹은 초대형 구조물)은 건설 입지 주변의 파랑·흐름장의 광범위한 변화와 연결되어 특히 건설 적지의 대안(對岸)이 자연 해

<sup>†</sup>Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

빈을 가진 경우, 광범위하고도 심각한 해빈변형 문제에 직면할 우려가 높다.

수치 계산에 의한 해빈변형예측기법은, 지형변화 계산에 있어서 통상 예측 대상을 무엇으로 설정할 것인가 혹은 어떻게 모델화할 것인가에 따라 해안선 모델과 수심변화 모델로 대별된다. 어느 모델이던 양 모델은 모두 우선 지형 변화의 주된 외력이 되는 파랑·해빈류장(해안선 모델의 경우는 파랑장, 수심변화 모델의 경우는 파랑 및 해빈류장)을 계산해야 하므로 전체적인 해빈변형 모델은 표사이동의 외력장(파랑·해빈류장)의 계산 모델과 지형변화 모델로 구성된다.

해안선 모델은 하나의 해안선만을 다루는 1-line 모델과 수심이 깊은 곳까지 예측 가능한 등심선 모델(宇多·河野, 1996)로 나누어지지만 둘은 모두 연안류에 의한 저질의 이동을 쇄파점에서의 파고와 파향으로부터 산정하고 있으므로 연안표사의 차단이나 공급원 감소에 수반되는 광범위하고도 장기적인 해빈의 토사 수지를 논의하기에는 충분한 정밀도를 가지고 있다(예를 들면, 土屋 등, 1993). 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 대규모 해상 구조물(이하, 외해 구조물이라 부름)은 비교적 수심이 깊은 10~20 m 전후의 외해에 건설되며, 그 규모에 있어서도 연안 방향으로 상당한 영역을 차지하게 되므로 외해 구조물 배후에는 외빈대(offshore zone)를 포함하는 광범위한 차폐역이 존재하게 된다. 이와 같은 광역에 걸친 파고 분포의 공간적 차는 구조물 배후의 해안선 부근에서 파의 지그재그 운동에 기인한 연안표사와 함께 외빈대에서 형성된 대규모 순환류에 기인한 내외해 방향 표사(申 등, 1999; 申 등, 2000)를 만들어 내므로, 해안선 부근은 물론 외빈대에 이르는 광역의 해빈변형에 대한 배려가 필요하게 된다. 따라서 해안선 변화 모델은 해안선 부근에 한정된 광역의 해빈변형에는 적절하지만, 쇄파대나 외빈대가 포함된 대역역의 해빈변형이 고려되지 못한다는 근본적인 문제가 있다.

한편, 수심변화 모델은, 표사의 외력인 파랑·해빈류장의 계산 결과에 기초한 국소 표사량의 공간적 수지로부터 평면적인 지형 변화를 계산하므로 가장 본질적인 모델이라고 할 수 있다. 현재 해안선 및 소상대까지 포함시키려고 하는 시도가 진행되고 있으며(예를 들면, 佐藤·Kabiling, 1994; 清水 등, 1995), 실용적으로 적용할 수 있는 단계에 이르고 있지만, 해안선 부근의 변형 등에 대한 재현성이 빈약하여, 항로의 매몰 등과 같은 예측에는 적절하다고 하더라도 전체 해빈변형을 다루기 위한 충분한 정밀도가 있다고 할 수 없다. 이는 파의 소상대 및 쇄파대내의 극권해역에 대한 파나 해빈류 그리고 표사량의 계산방법이 아직 확립되지 못한 것이 그 원인의 하나이다.

본 연구에서는, 외해 구조물의 건설에 의한 배후의 해빈변형을 정밀도 높게 예측하기 위하여, 상세한 3차원 이동상 실험 및 형광사 실험(申 등, 2000; 신과 홍, 2004)에 의해 밝혀진 표사이동 기구를 토대로 외빈대와 쇄파대, 소상대의 해빈변형이 계산 가능한 복합 3차원 해빈변형모델을 구축하고 3차원 이동상 실험 결과와 비교, 검증하였다. 또한 대규모 인공섬 건설에 의한 해빈변형문제

가 실제 야기되었던 현지 해안에 제안된 모델을 적용하여 그 타당성을 확인하였다.

## 2. 외해 구조물 배후의 표사이동 기구

### 2.1 3차원 이동상 실험의 개요

실험에 대한 상세는 신과 홍[2004]에서 서술하고 있으므로 여기서는 개략만을 기술한다. 실험에는 길이 20 m, 폭 9 m, 깊이 0.6 m의 평면 수조를 이용하였다. 우선 초기 단면으로서 중앙 입경 0.16 mm의 실험사로 일정 경사의 사면(1/20)을 만들고 직각 입사의 조건으로 파(파고: 5.0 cm, 주기: 1.0 s, 규칙파)를 작용시켜 자연해빈에 가까운 지형을 형성시킨 후, 해안선에 평행한 외해 구조물을 추가 설치하였다. 또한 동일 조건의 일련의 실험을 통하여 현지한 침식역으로 나타났던 2개소(Fig. 1의 C 및 D)에 서로 다른 색의 형광사를 투입하고 재차 조파하여 형광사의 이동을 추적하였다. 추적은 정해진 시간마다의 촬영(블랙 라이트 사용, 암실 촬영) 및 실험사 채취에 의한 형광사의 입수계측(粒數計測)에 의해 행해졌다.

실험에 의하면, Fig. 1에 제시한 바와 같이 해안선 부근과 소상대에 투입하였던 적색 형광사(C 영역)는, 해안선 부근의 격렬한 파 운동(소상대의 지그재그 운동 및 해안선 부근의 강한 흐름)에 의해 비교적 빠른 속도로 이동하여 구조물 배후의 해안선 형상이 파의 입사 방향과 거의 직각을 이룬 곳(A 영역)에서 침전하였다(조파 개시후 약 4시간). 그러나 이 적색 형광사의 이동은 해안선으로부터 한정된 거리 이내로 구속되어 있었으며, 이동 방향은 연안 방향이 추가 되고 있었다. 한편, 외빈대의 침식역(D 영역)에 투입하였던 녹색 형광사의 운동 양상은, 주로 파의 운동에 따른 내외해 방향의 왕복운동이 기본이지만, 평균적인 이동은 외해 구조물 배후의 해빈 순환류에 의해 서서히 이동하여, 순환류의 중심 부근(B 영역)까지 이동하여 퇴적되었다. 또한 녹색 형광사의 이동

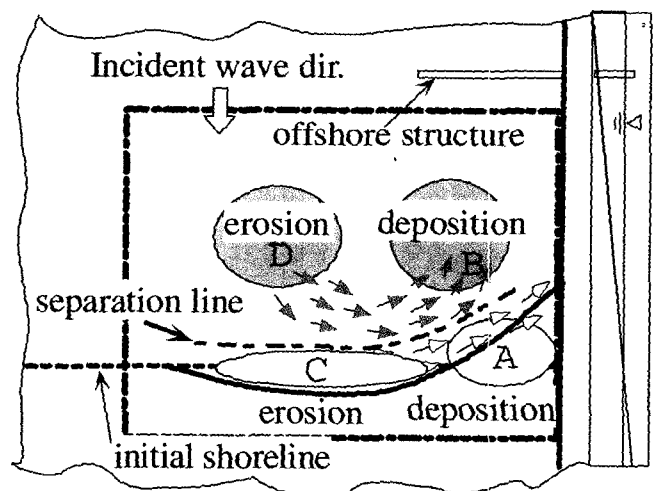


Fig. 1. Schematic diagram of sediment transport patterns behind offshore structure.

은 해안선 측의 적색 형광사의 이동에 비해 시간 지체를 보였으며, 해안선 부근의 형상이 어느 정도 갖추어진 이후부터 본격적인 이동이 일어났다.

### 2.2 외해 구조물 배후의 표사이동 기구

본 연구에 있어서 외해 구조물 배후의 해빈변형에 대한 일련의 실험에 의하면(申 등, 1999; 申 등, 2000; 신과 홍, 2004), 외해 구조물 배후의 표사이동 기구는; ① 해안선 측과 외빈대의 표사이동은 서로 독립된 기구에 의해 발생하여, ② 소상대를 포함한 해안선 측은 등심선에 대한 파의 입사 방향에 지배된 표사이동이 탁월하며, ③ 외빈대의 수심역에서는 파의 왕복운동에 의한 소류사 및 부유사가 해빈류에 편승되어 이동하고, ④ 이들 두 운동 패턴이 특정 경계를 기준으로 서로 분리된 영역에서 이동하고 있다. ⑤ 또한 해안선 측과 외빈대 측에서의 지형변화 속도에 있어서도 차가 있으며, 해안선 측의 변형이 선행하고 외빈대 측의 지형변화는 해안선 부근의 변형이 어느 정도 갖추어진 이후부터 본격적인 이동이 개시된다고 정리할 수 있다.

이들 분석으로부터, 외해 구조물 배후에 있어서 외빈측 수심역과 극천해 영역과는 표사이동의 양상이 대별되므로 양 현상의 지배 영역별로 계산을 달리함이 정밀도 향상으로 연결되리라 사료된다. 따라서 본 연구에서는 외빈측의 경우 파·흐름에 의한 국소표사량 계산에 기초한 수심 모델을, 소상대를 포함한 해안선 부근의 경우는 쇄파점에서의 파향과 파고에 의존하는 연안표사량 계산과 이의 내외해 방향 분포함수에 기초한 multi-line 모델을 각각 이용하는 이른바 복합 3차원 해빈변형 모델을 제안한다.

## 3. 복합 3차원 해빈변형모델의 구축

### 3.1 표사이동의 지배 영역별 계산모델

본 연구의 3차원 해빈변형모델의 구축에 있어서, 파·흐름장의 계산에 있어서는 수정 boussinesq 방정식(Madsen and Sorensen, 1992)을 토대로 저면 마찰항과 片山·佐藤[1993]에 의해 제안된 파별 쇄파에 의한 운동량 확산항을 부가하여 사용하였다. 이때, 쇄파의 판정은 파별 해석법(窪 등, 1991)을 이용하였다.

지형변화모델은 앞장에서 서술한 바와 같이 표사이동기구별로 영역을 나누어 계산하기 위해 Fig. 2에 제시한 바와 같이 외빈 측은 파·흐름에 의한 부유 및 소류 표사량에 기초한 국소 표사량 모델로, 이동패턴의 분리 경계로부터 해안선 측은 연안표사량과 그의 내외해 분포를 고려한 multi-line 모델로 구축하였다.

#### 3.1.1 수심모델

본 연구에서의 수심모델은 우선 저면 전단응력이 한계 소류력을 넘었을 때, 이동 상태로 된 저질이 평균류 혹은 파에 의해 각각의 방향으로 운반되는 것으로 하여, 흐름에 의한 표사량( $q_c$ )과 파에 의한 표사량( $q_w$ )으로 나누어 정식화한 국소 표사량 모델(渡辺 등, 1984)를 선택하였다.

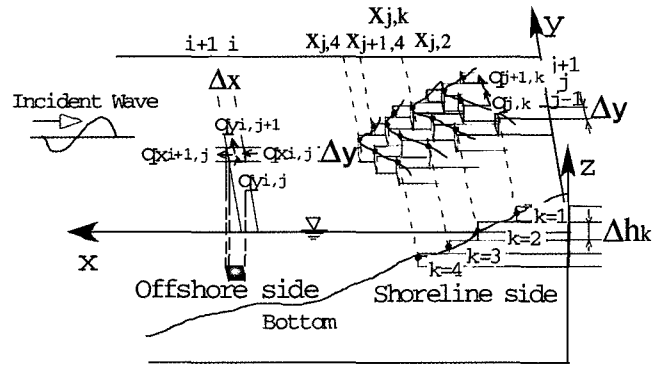


Fig. 2. Schematic diagram of hybrid 3-D beach deformation model.

$$q_c = \frac{A_c(u_s^2 - u_{sc}^2)}{g} \quad (1)$$

$$q_w = \frac{A_w(u_s^2 - u_{sc}^2)F_d u_{wb}}{g} \quad (2)$$

여기서,  $A_c$ : 파에 의한 표사량 계수,  $u_s$ : 파와 흐름 공존장에서의 저면 마찰속도,  $u_{sc}$ : 저질이동 한계마찰속도,  $u_{wb}$ : 경계층 외연에서의 파의 속도,  $F_d$ : 표사 방향함수이다.

#### 3.1.2 Multi-line 모델

宇多·河野[1996]는 등심선의 외해 방향 거리에 대해 시간적, 공간적 변화를 조사하는 방법(杉橋 등, 1983)으로 일본 전국각지를 조사하여 현지 해빈에 있어서 연안표사의 장소적 불균형에 의해 생긴 해빈변형에서는 천해역으로부터 전빈의 연안사주에 이르는 등심선이 해안선의 움직임과 대응하여 시·공간적으로 거의 동일 모드로 이동하는 예가 대단히 많음을 제시하며, 저질의 이동한 계 수심까지의 등심선 움직임을 해안선의 움직임에 연결하는 등심선 모델을 제안하였다. 그러나 앞 장의 이동상 실험 등으로부터 밝혀진 바와 같이 외해 구조물 배후의 해빈변형에 있어서는 해안선 부근과 외빈 측에서의 표사이동 기구가 서로 독립하고 있는 것으로부터 본 연구에서 있어서 해안선 부근의 해빈변형 계산에서는 파의 소상 위치로부터 표사이동의 분리경계까지의 한정된 범위에 대해 연안표사량 산정식을 토대로 한 multi-line으로 모델을 구축하기로 하였다.

Fig. 2의 해안선 측에 있어서 각 line에 대한 표사의 연속식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} + \frac{1}{D_{hk}} \frac{\partial q_{sk}}{\partial y} = 0, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

여기서,  $x_k$ : 번째 등심선의 위치,  $D_{hk}$ : k번째 등심선 표사이동 층의 두께,  $q_{sk}$ : k번째 등심선에 대한 연안표사량,  $k$ : 등심선 번호,  $n$ : 등심선 수이다.

연안표사량은 구조물에 의한 파의 회절이나 차폐역 형성 등을 고려하여, 小笹·Brampton의 식을 참고로 하여 y방향의 각 셀(cell) j에 대한 쇄파점의 파고  $H_b$ 와 파향  $\alpha_{b,j}$ 과 해안선과 파향이 이루는 각도  $\alpha_{s,j}$ 를 토대로 식 (4)와 같은 각 line별 산정식을 도출하였

으며 이때, 각 line별 내외해 방향 분포량은 宇多·河野[1996]가 제안한 분포함수로 배분하였다.

$$q_{x,j,k} = F_{xk} \cdot \frac{(H^2 C_b)_{bi}}{8 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda_v) 1.416^{3/2}} \left\{ \frac{K_1}{2} \sin 2\alpha_{bsj} - \frac{K_2}{\tan \beta} \cos \alpha_{bsj} \frac{\partial H_{bi}}{\partial y} \right\} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_s$ : 저질의 밀도,  $\rho$ : 해수의 밀도,  $\lambda_v$ : 저질의 공극율,  $\tan \beta$ : 저면 경사,  $K_1, K_2$ : 무차원 표시량 계수,  $\alpha_{bsj}$ : 해안선과 입사파의 파봉선이 이루는 각도,  $F_{xk}$ 는 내외해 방향 표시량 분포함수이다.

연안표사량의 내외해 방향 분포를 토대로 각 line의 전진 및 후퇴를 계산하는 multi-line 계산에서는 경우에 따라 계산 과정에서 해저 경사가 대단히 급해지기도 하며 극단적인 경우에는 과잉돌출(overhung)이 나타나는 곳도 있다. 수치 계산상 발생할 수 있는 이같은 개별 line간의 급경사 방지를 위해서는 인접한 line간에서의 모래 이동을 고려하였다. 즉 Fig. 3과 같이 매 계산 시간간격에 있어서 인접한 선간(k+1,k)의 경사가 각 선마다 정해진 평형 경사( $\tan \delta_k$ )보다 급경사( $\tan \delta_k$ )로 된 경우, 다시 평형 경사로 되돌아가도록 식 (5)를 사용하여 해당선의 보정치(l)를 구하여 인접한 선간에서 서로 보정하도록 하였다.

$$l = \frac{\Delta h_k}{2} \left( \frac{1}{\tan \delta_k} - \frac{x_{j+1,k} - x_{j,k}}{\Delta h_k} \right) \quad (5)$$

본 계산에 대한 각 선의 평형 경사는 이동상 실험에 있어서, 초기 1/20의 일정 경사면으로부터 4시간 조파후 형성된 준평형 단면(자연 해변)에서 계측한 각 등심선의 경사를 사용하였다. 이때, 해안선을 기준으로 하여 소상대의 경사는 0.15, 수면하는 0.17 전후였다.

### 3.2 복합계산법

2장에서 서술한 바와 같이 해안선 부근과 외빈의 수심역에서의

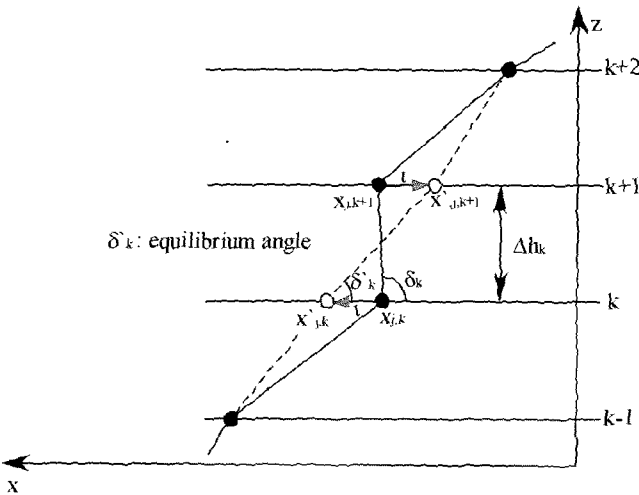


Fig. 3. Contour compensation between k+1 and k line.

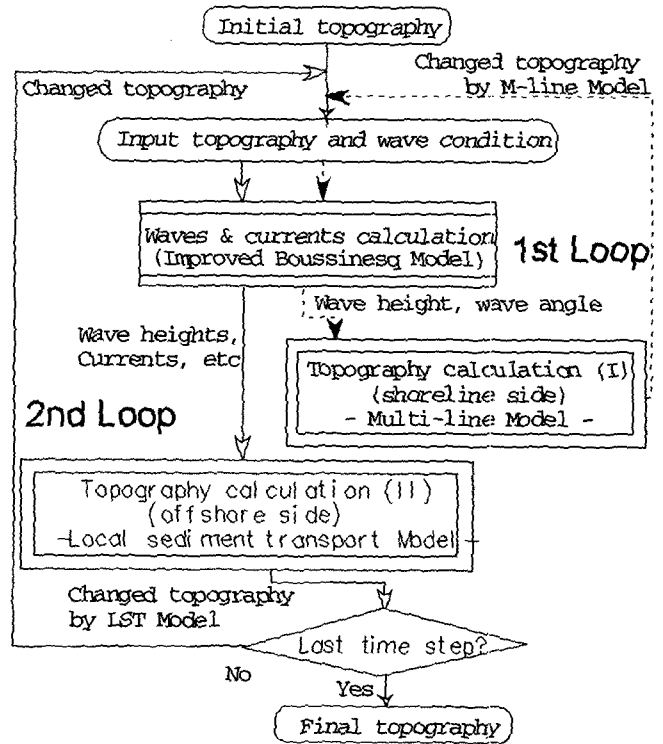


Fig. 4. Calculation flow for hybrid 3-D beach deformation model.

지형변화 속도에는 차가 있으며, 해안선 측의 변화가 선행하는 것으로부터 계산 영역을 나눈 복합계산에서는 이를 반영하여 Fig. 4에 제시한 흐름을 따라 계산을 진행한다. 구체적으로는, 우선 초기의 지형 데이터와 입사파를 토대로 boussinesq 모델을 이용하여 파랑 및 흐름장을 계산한다. 다음으로 계산된 파의 제원에서 왜곡점에서 파고, 파향 등의 외력으로 해안선 측의 multi-line에 대한 이동을 계산한다(Fig. 3의 1st loop). 이 계산에 의해 해안선 부근의 지형이 변화하므로, 변화된 지형에 대한 파랑 및 흐름장을 다시 계산하고, 갱신된 파와 흐름을 외력으로 하여 외빈 측 수심역의 해변변형을 계산한다(Fig. 4의 2nd loop). 이 방법에 의하면 입사파의 조건이 일정하다고 하더라도 해변변형의 변화에 수반된 파랑 및 해변류장이 시시각각 변하게 된다. 이와 같은 영향을 계산에 반영하기 위해서는 Fig. 4의 파랑·흐름장이나 지형변화의 전체 계산(1st loop 및 2nd loop)을 짧은 시간간격으로 반복해야만 한다. 그러나 실제 계산에서는 이들 각각의 계산량이 대단히 많으므로, loop 계산을 빈번히 행하기란 결코 용이하지 않다. 실용상으로는 최종 목표로 하는 해변변형의 예측 정밀도와 계산 소요시간 등을 감안하여 loop 계산의 회수 및 간격을 설정할 필요가 있다.

## 4. 이동상 실험결과와의 비교를 통한 모델의 검증

### 4.1 계산 조건

#### 4.1.1 파랑모델의 계산조건

표사이동의 외력인 파랑·해빈류의 계산은 수정 boussinesq 모

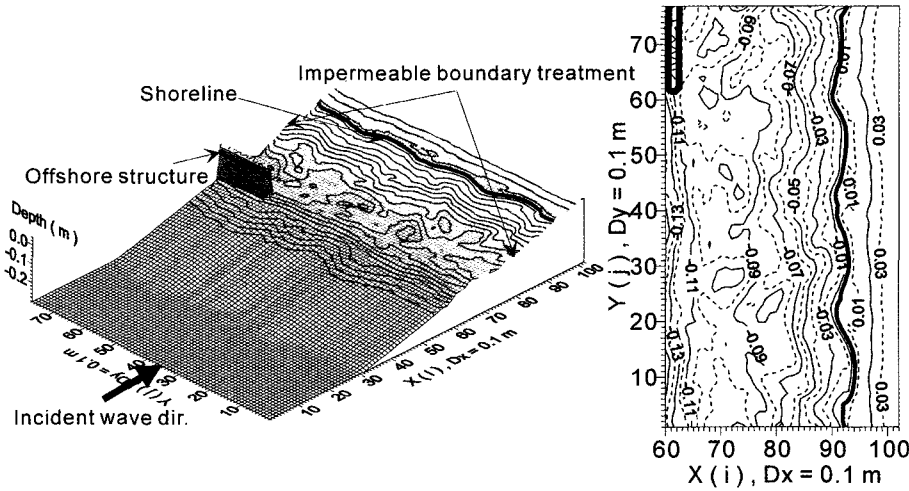


Fig. 5. Initial topography for calculation of hybrid 3-D beach deformation model.

델을 이용하여 행해졌으며, 모델의 검정을 위해 계산에 사용한 지형은 신과 홍[2004]의 이동상 실험으로부터 얻어진 자연 해변에 가까운 지형(Fig. 5)이며, 입사경계에서의 입사파고 5 cm, 주기 1.0s로 하는 등 전 계산조건을 실험 조건과 동일하게 설정하였다. 계산에 있어서, 공간 격자간격은  $\Delta x = \Delta y = 0.1$  m로 하고, 시간 간격은  $\Delta t = 0.5 \times 10^{-2}$  로서 입사파 주기의 1/200에 해당한다.

4.1.2 지형변화모델의 계산조건

복합 3차원 해변변형 계산에 있어서는 두 표사이동 형태별로 계산영역을 분리하기 위한 경계를 설정하여야 한다. 2장에서 논의한 형광사의 이동상 실험 결과에서는 정수면으로부터 수심이 약 2 cm에서 분리가 나타났으므로 본 계산에 있어서도 동일 수심에서 분리 경계를 설정하였다. 즉, 그보다 더 얕은 영역은 multi-line 모델로 계산하게 된다.

수심모델에 의한 수심 2 cm이상의 영역 계산은 파 및 흐름에 대한 표사량 계수를 각각  $A_w = 0.04$ ,  $A_c = 0.4$ (일본토목학회, 1999)로 설정하였으며, 해저 경사의 영향을 고려하였다.

한편, multi-line 모델에서는 해안선 측의 계산을 위해 4개의 선을 설정하고, 실험 결과로부터 얻은 파의 소상고(遡上高, runup height)를 첫 번째 선(-2.0 cm), 두 번째를 해안선(0.0 cm), 세 번째를 수면하 1.0 cm, 그리고 네 번째를 표사이동 경계인 2 cm로 설정하였다. 식 (4)의 연안표사량 산정에 있어서는, 표사량 계수를 시행착오 계산에 의해  $K_1 = 0.4$ ,  $K_2 = 1.8$ 으로 설정하였다.

3.2 절에서 기술한 바와 같이 Fig. 4에 제시한 복합 계산에 있어서는 파 및 흐름이라는 외력을 빈번히 갱신하는 것이 용이하지 못하다. 본 계산에서는 3차원 이동상 실험 과정에 대한 고찰로부터 30분 정도의 시간이 경과하면, 변화된 지형이 파 및 흐름장에 대해 현저한 변화를 일으킨다고 판단하여 30분 간격으로 외력장의 계산을 갱신하는 것으로 하였다. 구체적인 계산 흐름을 Fig. 4에 따라 기술하면, 우선 초기 경사 1/20의 일정 경사 사면에서 4시간 조파한 자연해빈의 지형(준평형 상태의 해빈이며, 구조물을 설치한 직후, Fig. 5)을 초기 지형으로서 입력하여 파·흐름을 계산한다. 다음으로 multi-line 모델을 사용하여 30분간의 해안선 측

지형변화를 계산한다(1st loop). 해안선 측의 30분간 변화 지형에 대한 영역 전체의 파·흐름을 다시 계산한 후, 수심 모델을 사용하여 30분간의 외빈에 대한 지형변화를 계산하면(2nd loop), 영역 전체에 대한 30분간의 해변변형이 얻어진다. 상기 언급한 계산의 수행은 자동으로 연동되는 전체 loop를 구성하여 계산하였으며, 본 검정 계산에 있어서는 계산상 초기 지형으로부터 2시간 후의 계산 결과를 대상으로 하고 있으므로, 전체 4회의 과정이 반복되어, 파랑 및 흐름은 계산은 8회, 수심모델 및 multi-line 모델의 계산은 각각 4회씩 계산하게 되는 것이다.

4.2 계산 결과의 분석

Fig. 5에 제시한 바와 같이, 실험으로부터 얻어진 자연해빈은 계단 형상의 단면 경사를 가지며 상당히 안정되어 있는 상황이다. 본 연구의 주된 관심 영역은 외해 구조물 배후이므로 계산 결과의 비교에 있어도 배후 영역을 대상으로 하였다.

복합 해변변형모델을 사용한 4시간제(Fig. 5) 및 6시간제의 파랑·해빈류장의 특징을 기술하면, 실험 지형을 그대로 사용하고 있으므로 복잡한 파랑 및 해빈류장이 계산 결과에 나타나지만, 외해 구조물 배후에서의 순환류는 확연히 형성되어 있었다. 또한 6시간제의 지형에 대한 계산 결과와 4시간제의 그것과 비교하면 해저 지형 변화에 의해, 배후에서의 쇄파점 위치나 순환류의 중심 변화 등이 두드러졌으며, 해안선 측에 있어서의 유속도 최대 0.16 m/s에서 0.13 m/s 정도로 약화되어 있었다.

지형변화의 계산 결과는 Fig. 6에 제시하고 있다. Fig. 6에서의 6시간제의 계산 결과는, 준평형 상태의 해빈(Fig. 5)를 초기 지형으로 입력하고, 30분마다의 외력 갱신을 반복하여 6시간제의 지형을 계산한 것이며, Fig. 6의 8시간제 지형 계산 결과는 6시간제의 실험지형에 대해 동일한 계산을 수행한 결과이다.

각각을 같은 시간대에 계측된 실험 결과와 비교하면, 서로 완벽히 일치하진 않지만 외해 구조물 배후 해안선 측의 톱보로 형상 및 수면 하에서의 관련 침식·퇴적의 위치는 물론 구조물 외측의 침식·퇴적역에 있어서도 상당히 높은 정밀도로 재현되어 있음을

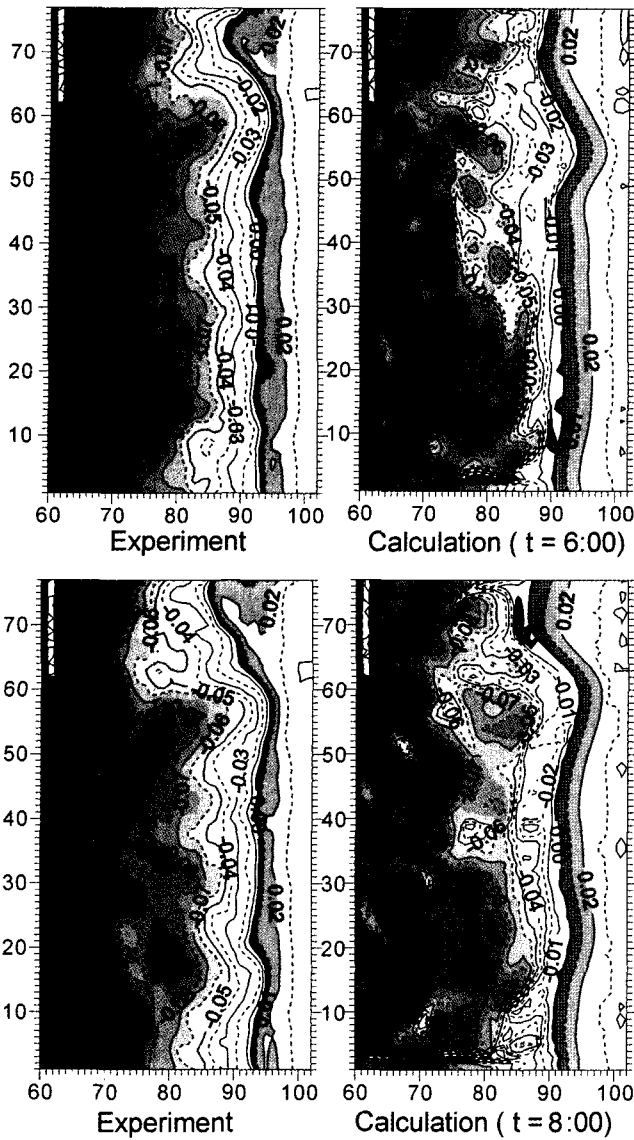


Fig. 6. Comparison of numerical solutions with experimental results behind offshore structure.

알 수 있다. 특히, 6시간 후의 쌍봉형 톱보로가 재현되어 있으며, 8시간 후의 지형에 나타난 단봉형 톱보로에의 천이까지 어느 정도 재현되어 있다.

### 5. 현지에 대한 적용성 검토

여기서는 앞서 제안된 복합 3차원 해빈변형모델을 현지에 적용하여 어느 정도의 재현성이 얻어지는가에 대해 조사한다. 대상으로 한 해안은 일본 가고시마현 시부시만의 카시와바라 해안이다. 카시와바라 해안은 1984년 말, 외해 500 m지점에 인공섬 형태의 석유비축기지 건설공사가 착공되어 1987년 6월에 196 ha 규모의 외곽시설이 완성되었으며, 1993년 12월부터 전면 조업을 개시한 곳이다.

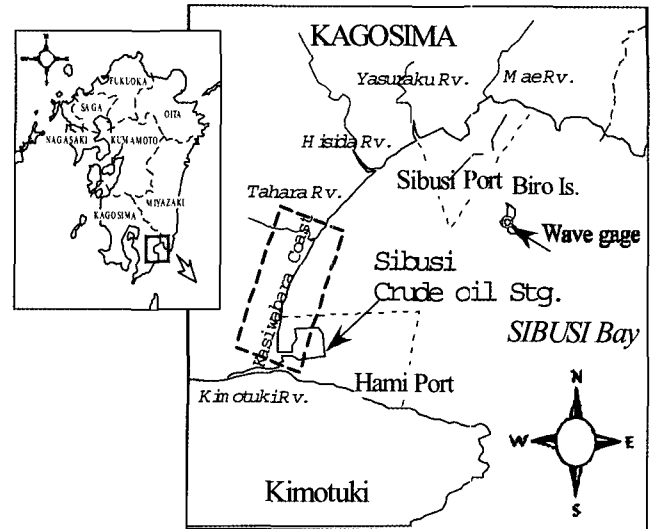


Fig. 7. Initial topography for calculation of hybrid 3-D beach deformation model.

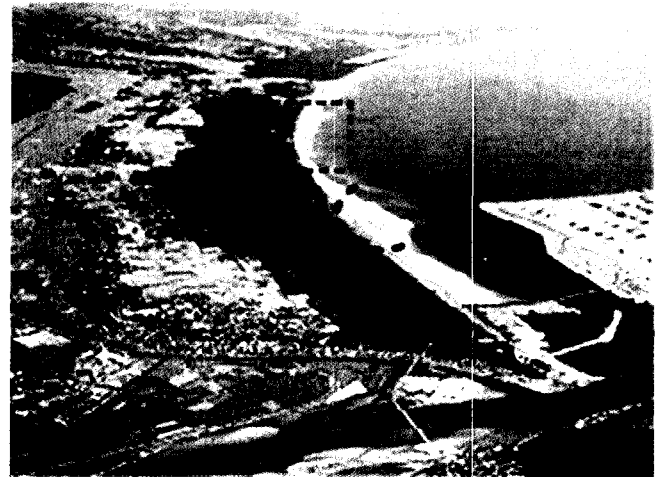


Fig. 8. Kasiwabara coast(dotted circle for deposited region, and dotted box for eroded region).

대상 해안지구는 기본적으로 토사가 계절적인 파랑조건의 차이에 따라 연안 방향인 남북으로 이동하고 있으며, 비교적 안정되어 있었다. 그러나 인공섬 건설(외곽시설 완성 이후부터)에 의해 파의 차폐역이 형성되어 차폐역으로 유입된 토사는 내부에서 지속적으로 퇴적되고, 반면에 차폐역 외부로는 유출되지 못하는 것이 원인이 되어 Fig. 8에 제시된 바와 같은 해빈변형이 유발되었다. 본 연구에서는 제안된 모델의 재현성을 검토하기 위해, 대상인 해역이 카시와바라 해안 석유비축기지의 외곽시설이 완성된 1987년 6월의 지형(Fig. 9의 좌)으로부터 3년이 경과된 1990년까지 지형 변화(Fig. 9의 중앙)를 계산하였다.

#### 5.1 계산 조건

카시와바라 해안에 대한 해빈변형 특성의 분석(申, 2000)에 따르면 대상 해안의 해빈변형은 고파랑이 주된 원인으로 나타났으

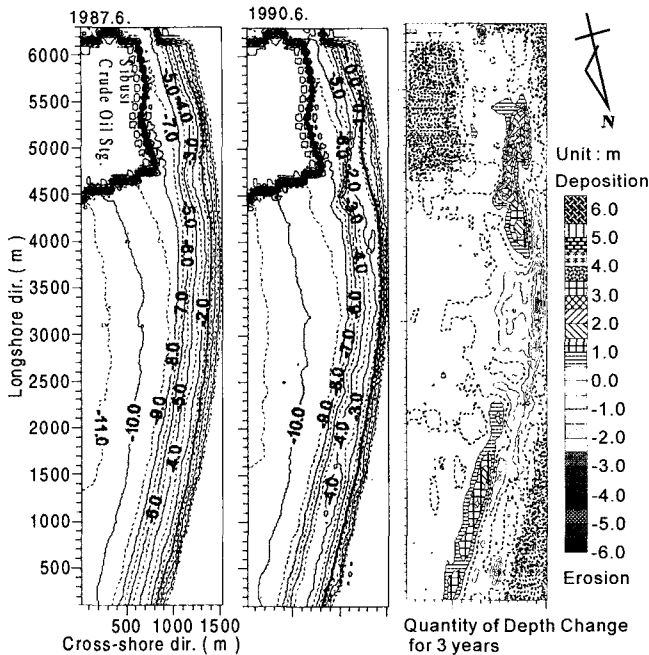


Fig. 9. Topographical changes of Kasiwabara coast for 3 years.

며, 본 연구의 재현 기간인 3년간에는 파고 3m 이상의 고파랑이 9회 나타났다. 본 계산에서는 매회 고파랑시의 지속 일수가 4일이라 가정하고 합계 36일간의 고파랑 조건(파고 3m, 주기 10초)를 입사파 조건으로 부여하여 해안 지형의 변화를 계산하였다. 파향에 있어서는 1983년부터 1985년까지 실시되었던 파랑관측결과(관측 위치는 Fig. 7에 제시된 Biro 섬)을 참고로 하여 ESE계를 주파향으로 설정하였으며, 계산 시간간격은  $\Delta x = \Delta y = 5$  m이다.

본 연구에서 제안한 복합 3차원 해빈변형계산은 Fig. 4의 계산 흐름에서 제시한 바와 같이 1회의 loop계산에 대해 multi-line 및 수심모델로 각각 지형을 계산할 때마다 파랑장을 계산하고 이를 지형변화의 외력으로 사용하여야 한다. 하지만 현지 해안의 광대역을 다루는 본 계산에서는 계산 시간에 있어서 지나친 부담이 되는 것이 현실이다. 따라서 예측기간인 3년 동안 초기 지형에 대한 파랑 및 흐름장의 변화가 현저하지 않다고 가정하고 1987년 6월의 초기 지형에 대한 파랑장만을 계산하여 지형 변화의 계산에 대해서만 multi-line 모델과 수심모델을 교호로 계산하도록 설정하였다.

### 5.2 계산 결과의 분석

Fig. 10은 1987년 6월의 지형을 초기 지형으로 입력하고, 3년 후의 지형변화를 계산한 결과이며, 그림의 좌측은 해빈류의 계산 결과, 중앙은 3년 후의 지형을 그리고 우측은 수심 변화량을 나타낸 것이다. Fig. 10의 전체를 보면, 외해 구조물에 의한 파의 차폐역 형성에 의한 전형적인 변화인 침식과 퇴적이 재현되어 있어, 현지에 대한 적용성이 확인되었다고 할 수 있다. 특히, 그 결과는 해안선뿐만 아니라 현지 측량 결과(Fig. 9의 우측 그림)에서 보이는 외빈 측의 침식·퇴적까지 정성적으로 잘 일치되고 있어, 본 모델의 장점인 해안선부터 외빈에 이르기까지의 해빈변형예측에 대

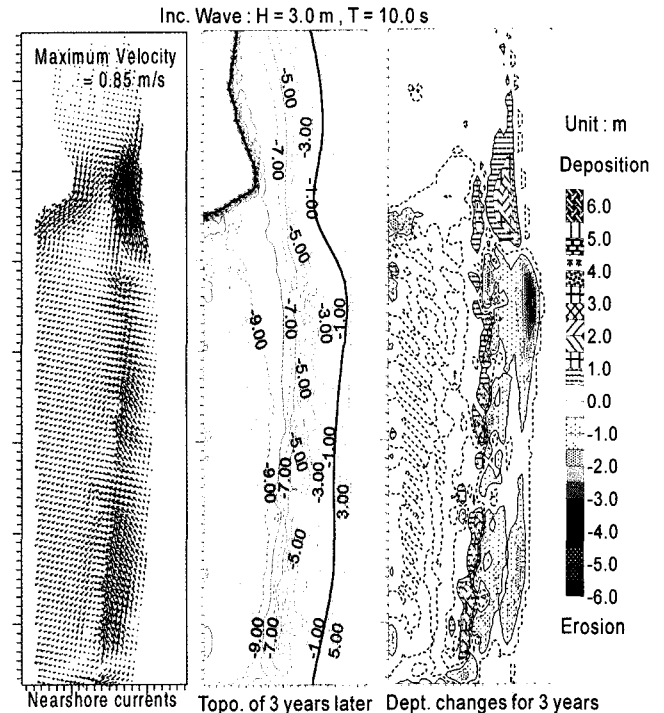


Fig. 10. Distribution of nearshore currents at Kasiwabara coast and resultant topographical changes calculated hybrid model.

한 유효성을 확인할 수 있다. 이와 같은 외빈 측 변형의 경향은 Fig. 10의 좌측 그림에 제시한 고파랑시의 해빈류 계산 경과와도 일치하고 있어, 광역의 지형변화를 다루는 경우에는 해당 해역의 해빈류까지 고려하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 또한 광역에 걸친 해빈 순환류는 주로 고파랑시에 발생함을 고려해 보면, 지금까지 해빈변형을 계산할 때, 해당 해역의 연간 평균 에너지 대표파를 주 외력으로 다루던 종래의 입사파 선정 방침으로는 불충분하다고 사료되며, 대상 영역이 광역이 될수록 해당 해안의 변형에 주 외력이 되는 입사파 선정에 각별한 주의가 필요하리라 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는, 이동상 실험에 의한 표사이동 기구의 분석을 토대로, 새로운 형태의 복합 3차원 해빈변형예측모델을 구축하였다. 모델은 3차원 이동상 실험의 결과와 비교를 통해 재현성을 검토하여 외해 구조물 배후의 톱보로 재현 및 외빈 측의 수면하 침식·퇴적역에 좋은 일치를 보임을 확인하였다. 또한 대규모 인공섬 건설에 의한 해빈변형 문제가 실제 발생하고 있는 현지 해안의 해빈변형 계산에 적용하여 현지에 대한 적용성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 “초대형 부유식 해상구조물 기술개발”과 공공기술연구회의 지원

으로 한국해양연구원에서 기본연구사업으로 수행한 “해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술 고도화 연구”의 연구 결과 중 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 신승호, 홍기용, 2004, “외해 구조물 배후의 표사이동에 관한 실험적 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 7, No. 4, 207-215.
- [2] 宇多高明, 河野茂樹, 1996, “海浜變形予測のための等深線変化モデルの開発”, 土木学会論文集, No. 539/II-35, 121-139.
- [3] 片山之裕, 佐藤慎司, 1993, “Boussinesq方程式を用いた不規則波の義水・碎波変形の計算法”, 日本土木学会 海洋工学論文集 40, 16-20.
- [4] 佐藤慎司, Kabiling, M., 1994, “波打ち帯を含む三次元海浜変形数値モデル”, 日本土木学会 海洋工学論文集 41, 406-405.
- [5] 清水琢三, 山田晶子, 内山一郎, 渡辺 晃, 1995, “汀線変化を考慮した三次元海浜変形モデルの現地適用性”, 日本土木学会 海洋工学論文集 42, 606-610.
- [6] 申 承鎬, 2000, “沖合構造物背後の海浜変形機構とそのモデル化に関する研究”, 九州大学大学院, 学位論文, 190p.
- [7] 申 承鎬, 入江 功, 一田 剛, 2000, “沖合人工島の設置位置による海浜変形の相違について”, 日本土木学会 海洋開発論文集 16, 303-308.
- [8] 申 承鎬, 高畑学治, 入江 功, 吉田明德, 1999, “Boussinesqモデルを用いた沖合の構造物による波浪・海浜流の数値計算の適用性”, 日本土木学会 海洋工学論文集 46, 206-210.
- [9] 土屋義人, 山下隆男, 泉 達尚, 鳥取一雄, 1993, “大規模海浜過程の予測—上越・大潟海岸の場合—”, 日本土木学会 海洋工学論文集 40, 456-460.
- [10] 土木学会, 1999, “漂砂環境の創造に向けて”, 海岸工学委員会, 359p.
- [11] 窪 泰浩, 小竹康夫, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 1991, “非定常緩勾配不規則波動方程式について”, 日本土木学会 海洋工学論文集 38, 46-50.
- [12] 渡辺 晃, 丸山康樹, 1984, “構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値モデル”, 第31回海岸工学講演会論文集, 17, 547-552.
- [13] Madson, P. A. and O. R. Sorensen, 1992, “A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics part 2”, Coastal Engineering, Vol. 18, 183-204.

2004년 8월 8일 원고접수

2004년 10월 12일 수정본 채택