

외해구조물 건설에 따른 해빈 변형에 관한 실험적 연구 Experimental Study for Beach Process by Construction of Offshore Structure

신승호* · 이종우**

Seung Ho Shin* and Joong Woo Lee**

要 旨 : 최근에까지 대형구조물이 해양공간이용의 목적으로 외해공항 및 해양터미널로 건설되어 왔다. 그러나, 때로는 이와 같은 큰 규모의 구조물은 파랑에 대해 현저한 벽으로 작용하게 되고 해안에 심각한 침식현상을 야기하게 된다. 본 연구는 해안선으로부터 각기 다른 거리에 외해구조물을 건설할 때에 해저지형변화를 다룬 것으로 일련의 3차원 이동상실험으로 상세히 조사하였다. 또한 해빈류와 외해구조물 배후의 국소침식과의 관계를 분명하게 하기 위하여 수리모델실험과 같은 규격으로 Boussinesq 방정식 모델로 해빈류를 계산하고 비교하였다.

핵심용어 : 외해구조물, 3차원이동상실험, 국소침식, 이안거리, Boussinesq 방정식, 해빈류

Abstract □ Through the recent years, large scale structures have been built on offshore for utilization of coastal ocean space as offshore airport and marine terminals. Sometimes, those big scale structures, however, happened to act as significant barriers against waves and severe beach erosion would take place on the coast. The present study deals nearshore topography changes affected by construction of an offshore structure with different distance from the shore. The series of three dimensional movable bed experiments have been examined in detail. Moreover, in order to make clear the relation of nearshore currents and local erosions behind offshore structure, the nearshore currents are calculated by Boussinesq equation model and compared with the same scale condition of the physical model experiments.

Keywords : offshore structure, three dimensional movable bed experiment, local erosion, offshore distance, Boussinesq equation, nearshore current

1. 서 론

최근 영종도 공항개발과 같은 우리 나라 서해안 대규모 매립이나 인공섬의 건설과 같이 육지역에 필요 용지(用地)를 구하기가 곤란한 경우, 이를 외해에 면한 해상에서 확보하려고 하는 경우가 자주 발생된다. 그러나, 해상에 건설되는 구조물의 대안(對岸)이 자연해안인 경우에는 구조물 건설에 의해 야기되는 해빈변형은 피할 수 없는 것이 대부분의 상황이며, 이때 이를 최소한으로 억제하려는 노력은 mitigation의 관점으로부터도 대단히 중요하게 된다.

구조물 배후의 평면적인 해빈변형을 실험적으로 다룬

연구는 3차원 이동상(移動床) 실험장치의 번잡성 등이 원인으로 작용하여 그 예가 많지는 않지만, Sinohara and Tsubaki(1966), 三村 등(1982), Sunamura and Mizuno (1987) 등의 연구를 들 수 있다. 그 가운데에서도 三村 등(1982)의 실험은 이안제 배후의 해빈류 및 해빈변형을 다루어 해빈변형모델의 개발에 있어서 현재까지 모델의 검증수단으로 자주 이용되고 있다. 그러나, 이들 기왕(既往)의 연구에도 불구하고 아직 구조물 배후의 복잡한 유체동역학적인 관계 및 표사의 메커니즘은 완전히 설명되지 못하고 있는 것이 실정이며 특히, 해상 구조물의 이안거리(離岸距離)와 배후의 침식 및 퇴적특성에 관련한 검토까지는 아직 이르지 못하고 있다.

*일본 큐슈대학 대학원 공학연구부 해양시스템공학 전공(Department of Maritime Systems Engineering, Division of Engineering, Kyushu University Graduate School, Fukuoka 812-8581, Japan)

**한국해양대학교 토목환경공학부(Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea)

해상 구조물 배후에 있어서의 표사이동은 표사의 공급특성과 속성, 파랑장의 특성, 연안 구역의 지형 및 해상 구조물의 형상 등의 여러 가지 요소에 지배받게 되며 그 중에서도 특히, 해상 구조물의 설치 지점부터 해변까지의 거리(이안거리)와 연안방향의 규모 등이 주요한 요소로 작용할 것이다.

본 연구는 해상 구조물이 건설될 경우 그의 배후의 해변변형 및 이안거리가 해변변형에 미치는 영향이 어떻게 달라질 것인가를 상세한 3차원 이동상 실험을 통해 검토하고 본 3차원 이동상 실험과 동일한 scale의 해변류 수치실험 결과를 비교 검토한 것이다. 특히, 해상 구조물의 이안거리에 대해서는 국소적인 침식에 극대치를 부여하는 조건이 있는가 하는 점에 중점을 두고 검토했다.

2. 단면 2차원 및 소형 이동상 실험

3차원 이동상 실험을 실시함에 있어 우선, 단면 2차원 이동상 실험으로 부여된 제 조건에서의 해변단면 변화의 특성을 파악했다. 또한, 소형 이동상 실험으로 3차원 이동상 실험을 위한 예비 실험을 행하여 3차원 이동상 실험에서 문제가 되는 측면 경계처리의 문제를 해결하고 계속하여, 해상 구조물의 이안거리에 따른 흐름 및 지형변화의 개략적인 특성을 파악했다.

2.1 단면 2차원 이동상 실험

실험은 길이 28 m, 폭 0.3 m, 깊이 0.5 m의 2차원 조파 수조를 사용하였으며, 평면파동수조를 사용하였으며, 실험수조의 개요와 좌표계는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

수조단에는 1/20 경사의 사면을 설치하고 그 위에 두께 6 cm의 실험사($d_{50}=0.16$ mm)층을 만들었다. 외해 측의 일정 수심역은 30 cm이며 조파장치로부터 파고 5.0 cm, 주기 1.0 s의 파를 입사시켰다. 지형의 측정은 연속식 사면계를 설치하여 Fig. 2와 같은 시간 간격으로 행하고, 단면도 및 표사량을 산정 하였으며 또한, 4시간 조파 후

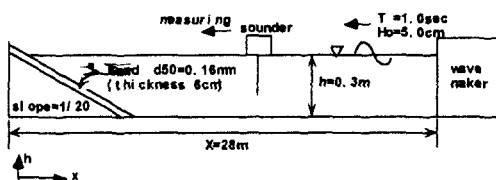


Fig. 1. Experimental setup for 2-D movable bed.

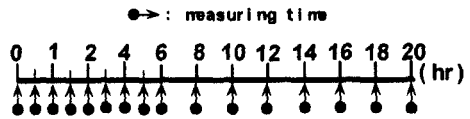


Fig. 2. Topography measuring intervals.

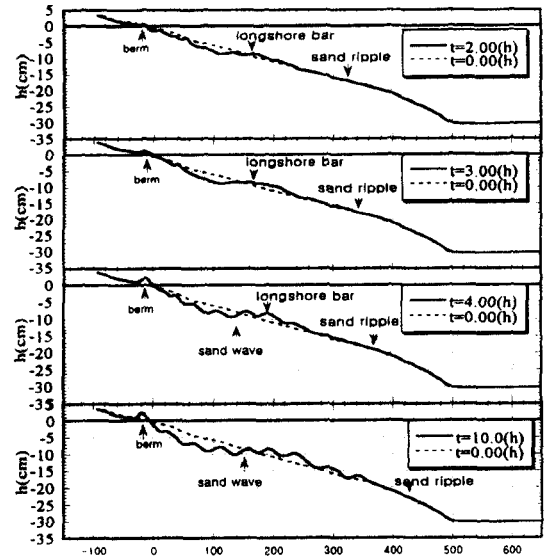


Fig. 3. Experimental results of cross-sectional changes (2, 3, 4, 10 hours).

의 단면에 대해서는 탁도계를 이용하여 쇄파대 내에 4개소, 쇄파대 외에 3개소를 선정하여 부유상태도 파악하였다.

실험과정에서 사련(sand ripple)의 형상은 초기의 1/20 사면에 조파한 직후, 쇄파점 부근으로부터 생성되기 시작하여 4시간까지는 시간의 경과와 함께 정선으로부터 3.5 m까지 발달하였다. 그 후 서서히 성장을 계속하여 10시간 이후에는 4.4 m(수심 약 22 cm)에 이르러 그 이상은 확대되지 않았다.

Fig. 3은 조파후 2, 3, 4, 10시간째의 단면 형상을 나타낸 것이며 사련의 회살표는 사련의 측정 시점에 있어서의 외해 발생 한계를 가리킨다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 조파후 3시간이 경과되면서부터는 사구, 연안사주, 사련 등의 전형적인 자연해안의 단면 형상이 형성되었으며, 4시간 경에 이르러서는 실험사의 이동이 적어져 상당히 안정된 단면이 형성되었으나 역으로 sand wave가 나타나기 시작하였다. sand wave는 규칙파를 이용한 이동상 실험에 있어서 장시간 조파하였을 경우 자주 드러나는 해안 단면의 특징으로 실제의 자연해빈에

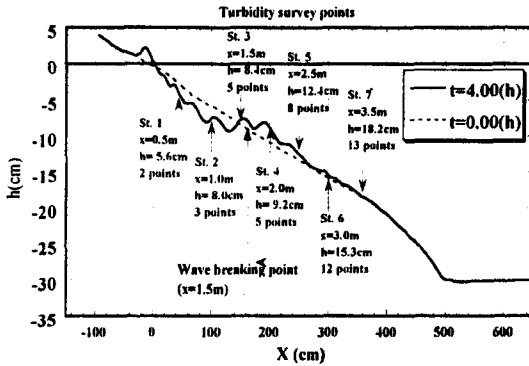


Fig. 4. Setup positions of turbidity gauge.

서는 좀처럼 나타나지 않는 단면이다.

이와 같은 sand wave 현상은 본 실험의 조파후 8-10시간 후에는 더욱 뚜렷한 형상을 나타내었다. 3차원 이동상 실험에 있어서는 해상 구조물의 영향만을 발체할 필요가 있으므로, 초기 1/20 사면으로부터 4시간 조파후의 안정된 준평형상태(準平衡狀態)의 지형이 해상 구조물의 설치에 적합하다고 판단하였다. 이 때 외해에서의 실험사 이동 한계수심은 22 cm이다.

주어진 파랑 및 실험사 등의 제반 조건하에서 구조물 배후의 지형 변화에 중요한 역할을 하는 실험사의 부유 상황은 3차원 이동상 실험의 실시 이전에 확인해 두어야 할 주요한 인자이다. Fig. 4는 쇄파대 내외에서 실험사의 부유 상황을 확인하기 위해 탁도계(濁度計)를 설치한 측정점을 나타내고 있다. 탁도계는 쇄파대 내(station 1-4) 및 외(station 5-7)에 설치되었으며 측정은 저면 사면 위 1cm로부터 1cm간격으로 수면 가까이 까지 10주기 분의 농도를 측정하여 평균을 취하였다. Fig.

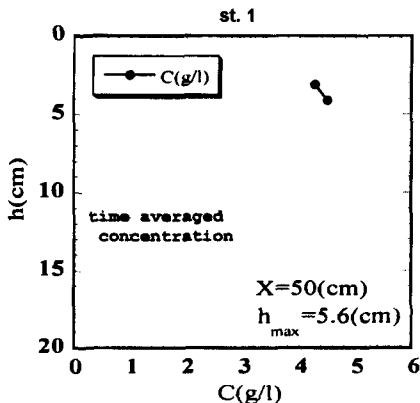


Fig. 5. Vertical concentration distributions (Station 1).

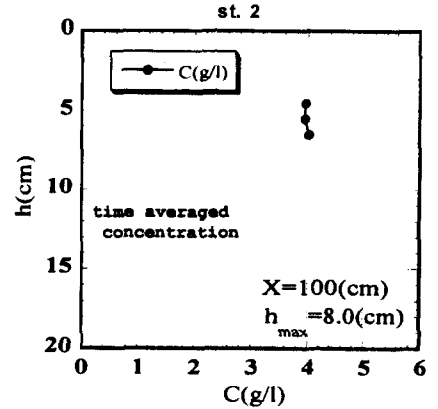


Fig. 6. Vertical concentration distributions (Station 2).

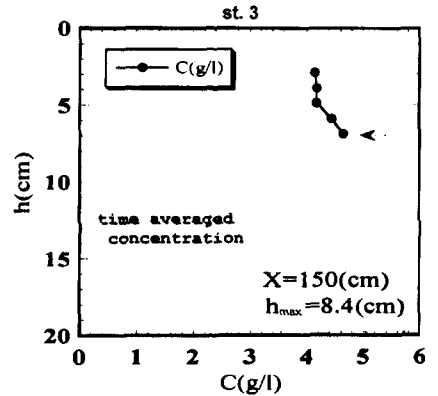


Fig. 7. Vertical concentration distributions (Station 3).

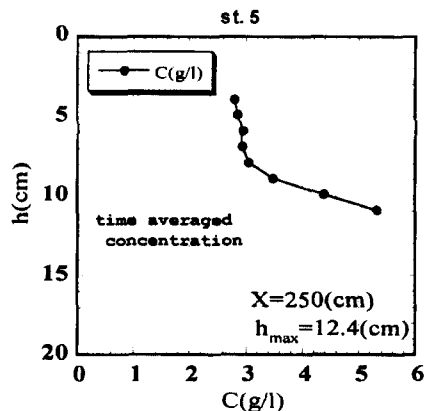


Fig. 8. Vertical concentration distributions (Station 4).

5~Fig. 11은 조파후 4시간 경과후 각 station마다 측정된 평균농도의 연직분포를 나타내고 있으며 Table 1은 이를 표로 정리한 것이다.

그림 및 표로부터 알 수 있는 바와 같이 쇄파대 내

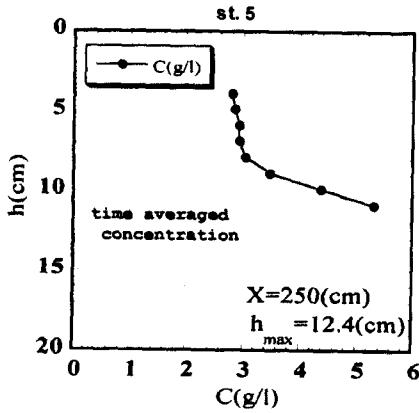


Fig. 9. Vertical concentration distributions (Station 5).

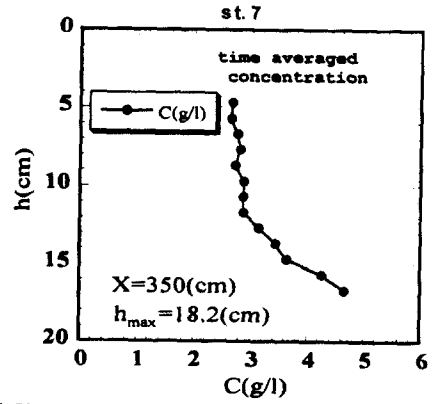


Fig. 11. Vertical concentration distributions (Station 7).

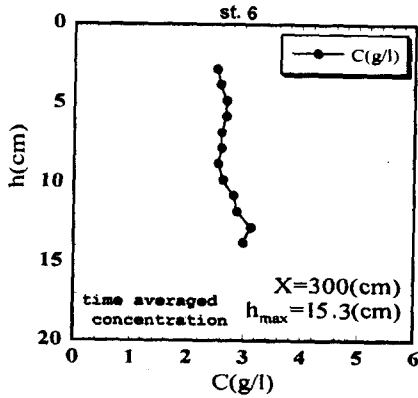


Fig. 10. Vertical concentration distributions (Station 6).

의 모두 저면 부근에 가까울수록 부유사 농도가 높게 나타나고 있으며 특히, 쇄파대 내가 현저히 높은 농도를 나타내고 있다. 쇄파대 외의 station 6, 7은 실험사의 이동한계 부근이며 평균 부유사의 농도 역시 낮은 값을 취하고 있음을 확인할 수 있다. 수심별 농도의 연속분포를 $y=Ae^{-b}$ 의 형으로 근사한 경우의 A, b 값은 Table 1에 제시하였다.

2.2 소형 평면 이동상 실험

3차원 이동상 실험을 실시할 경우 수조 내에서 장시간 동안 정상(定常)의 파 조건을 유지하기 위해서는 양측 벽면 경계처리 문제 및 구조물이 일으키는 난 반사

Table 1. Experimental results of vertical concentration.

| Station | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|-------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| depth(cm) | 5.6 | 8.0 | 8.4 | 9.2 | 12.4 | 15.3 | 18.2 | |
| height from bottom(cm) | concentration(g/l) | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | 2.670 | |
| 11 | | | | | | 2.510 | 2.641 | |
| 10 | | | | | | 2.578 | 2.755 | |
| 9 | | | | | | 2.680 | 2.812 | |
| 8 | | | | | 2.802 | 2.680 | 2.723 | |
| 7 | | | | | 2.855 | 2.600 | 2.879 | |
| 6 | | | | | 2.931 | 2.596 | 2.872 | |
| 5 | | | 4.138 | 3.446 | 2.931 | 2.550 | 2.873 | |
| 4 | | | 4.174 | 3.580 | 3.048 | 2.662 | 3.145 | |
| 3 | | 3.962 | 4.171 | 3.832 | 3.479 | 2.814 | 3.442 | |
| 2 | 4.272 | 3.950 | 4.438 | 4.512 | 4.378 | 2.876 | 3.635 | |
| 1 | 4.500 | 4.022 | 4.641 | 5.218 | 5.321 | 3.119 | 4.261 | |
| Avg. concentration(g/l) | 4.390 | 3.978 | 4.312 | 4.1174 | 3.468 | 3.119 | 3.509 | |
| suspended load(g) | 8.772 | 11.934 | 21.562 | 20.587 | 27.741 | 29.622 | 36.706 | |
| $y=A \times \exp(-b)$ | A | 8939 | 6.E+21 | 452005 | 87.314 | 49.733 | 104487 | 530.87 |
| | b | 3.045 | 12.46 | 2.7976 | 0.853 | 0.744 | 3.700 | 1.507 |

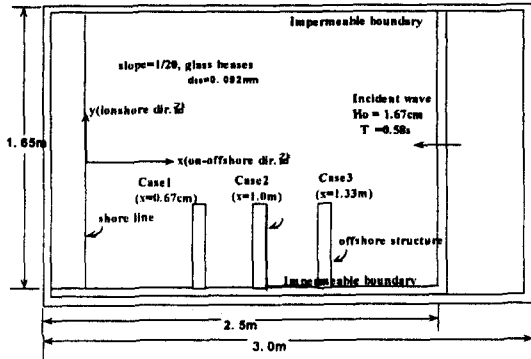


Fig. 12. Setup for small 3-D movable bed experiment.

Table 2. Experimental condition (small 3-D).

| offshore distance (established depth) | | | width of symmetric structure | Inc. wave height (period) |
|--|-------------------|--------------------|--|---------------------------------|
| case1 | case2 | case3 | | |
| 0.67 m (3.3 cm) | 1.0 m (5.0 cm) | 1.33 m (6.7 cm) | 0.5 m (1 m: in the case of full scale) | 1.67 cm (0.58 s) |

에 의한 교란을 방지할 방법에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 Fig. 12에 제시한 바와 같은 길이 2.5 m, 폭 1.65 m, 깊이 0.3 m의 소형 평면 파동수조를 이용하여 3차원 이동상 실험의 1/3 scale의 상사 실험(相似實驗)을 실시했다. 수조의 내부에는 $d_{50}=0.09$ mm의 glass beads로 1/20 경사의 초기 단면을 만들고 직각 입사로 파를 입사시켰다. 실험의 제 조건은 Table 2에 제시하였다.

3차원 이동상 실험에 있어서 장시간 일정한 파랑장을 유지하기 위해서는 구조물에 의한 파의 난반사(亂反射)를 억제시킬 필요가 있다. 우선, 실험은 구조물 및 정선에 대해 직각 입사를 대상으로 하고 있으므로 그 대칭성을 이용하여 설치하고자 할 구조물의 절반을 설치하고 대칭면이 되는 벽면을 직립 벽으로 하여 고정경계처리를 하였다. 한편, 파의 진행방향에 대한 우측의 경계면에는 파 흡수체를 설치하여 검토하였던 바, 측면 흡수경계에서의 교란과 흡수효과로 인해 장시간의 조파에 있어서도 파랑장의 교란은 충분히 억제할 수 있었으나 측면의 파 흡수체 속을 통과하는 진행파는 해안 측으로 진행해감에 따라 파고가 감소하여 측면 부근의 파랑장에 유사회절효과가 발생하였다. 이와 같은 효과는 흡수체 부근에서 파고 및 파속의 차를 만들어 내어 파의 진행과 함께 실험 영역 내부로 그 영향 범위를 넓혀감에 따라

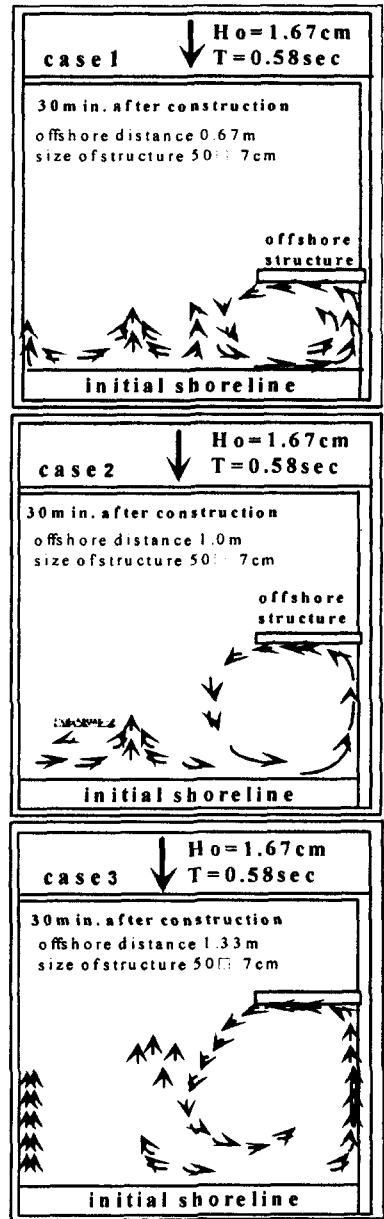


Fig. 13. Flow patterns for different offshore distance.

결국, 실험 영역을 축소시키는 효과가 야기되었다. 따라서, 본 실험에서는 우측 경계면에 있어서도 불투과 고정경계벽면처리를 하고 그 대신에 해상구조물 전면 및 조파판 전면의 wave filter에 흡수체를 보강하여 안정된 파랑장을 얻을 수 있도록 하였다.

Fig. 13은 소형 이동상 실험의 결과 중 이안거리가 서로 다른 세가지 경우의 구조물 배후에 있어서의 흐름

을 관찰한 결과이다. 구조물은 최초의 사면으로부터 2 시간 30분간 조파하여 자연해빈을 형성한 후 설치하였으며 구조물 설치 후 다시 조파를 재개하여 30분이 경과한 시점에서 염료를 사용하여 관찰하였다. 그림에의 화살표의 크기는 상대적인 흐름의 강도를 나타낸다. Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 이안거리가 다른 모든 경우에 대하여 구조물 배후에는 순환류가 존재하고 있으며 순환의 중심은 구조물 침단부의 약간 내측에 위치하고 있다. 또한 순환류의 해안선 부근 유속은 후술하는 3차원 이동상 실험 결과 및 해빈류의 계산 결과와 같은 경향을 나타내는데 case 2의 경우가 가장 크게 발달한 것으로 확인되었다.

소형 이동상 실험에서의 지형변화를 관측하기 위해 매 시간 모사(毛絲)를 사용하여 등심선을 묘사하고 이를 비디오 및 카메라로 촬영한 후 디지털이저로 입력하여 분석하였다. 그러나, 실험이 반복됨에 따라 glass beads의 움직임이 점차 둔해져 구조물 배후, 주변역에서 퇴적 및 침식의 개략적인 경향만을 파악할 수 있는 정도로만 나타났다.

3. 3차원 이동상 실험(본 실험)

3.1 실험의 개요

전술한 단면 2차원 및 소형 이동상 실험의 결과분석을 토대로 3차원 이동상 실험(이하, 본 실험이라 칭함)을 실시하여 해상 구조물에 의한 지형변화를 측정하였다.

본 실험은 Fig. 14에 나타난 길이 20 m, 폭 9 m, 깊이 60 cm의 평면 수조를 이용하였다. 수조의 내부에는

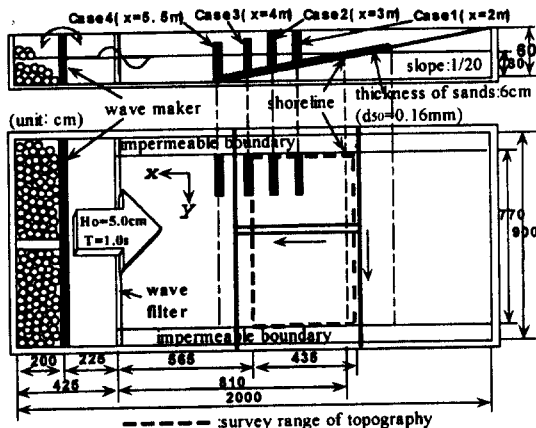


Fig. 14. Experimental setup for three dimensional movable bed experiment.

Table 3. Experimental conditions of 3-D movable bed experiment.

| | | |
|--|--------------------------------------|--|
| offshore distance(D) & depth(h) | case 1 case 2 case 3 case 4 | $x=2.0\text{ m}, h=15\text{ cm}$ $x=3.0\text{ m}, h=20\text{ cm}$ $x=4.0\text{ m}, h=25\text{ cm}$ $x=5.5\text{ m}, h=28\text{ cm}$ |
| width of symmetric structure (in the case of full scale) | | 1.5 m (3.0 m) |
| offshore wave height | | 5 cm |
| wave period | | 1.0 s |
| sand | | $d_{50}=0.16\text{ mm}$ |

초기 단면으로서 1/20 경사의 사면을 만들고 그 위에 중앙입경(d_{50}) 0.16 mm의 실험사를 두께 6 cm로 덮었다. 파의 입사조건은 파고 5.0 cm, 주기 1.0 s의 규칙파로서 해상 구조물 및 초기 정선에 대해 직각으로 작용시켰다. 이때 외해 일정 수심부는 수심 30 cm이다.

지형의 측정은 Fig. 14의 점선으로 둘러싼 x방향(외해방향) 435 cm, y방향(연안방향) 770 cm의 범위를 연속식 사면계를 사용하여 연안방향 10 cm간격으로 행하였다.

본 연구는 인공섬 또는 해상 공항 등과 같은 대규모 해상 구조물에 의한 배후 해빈변형을 대상으로 하고 있으므로 해상 구조물로 상정한 이안제 형상의 규모는 비교적 큰 3 m이지만, 현상의 대칭성을 이용하여 이안제 절반의 현상을 대상으로 하여 1.5 m를 설치하였다.

구조물의 전면과 wave filter에는 파의 반사로 인한 파랑장의 교란을 막기 위해 흡수체(wave absorber)를 부착했다. 해상 구조물의 이안거리는 초기 정선으로부터의 거리 2, 3, 4, 5.5 m의 4개의 경우(case 1~4)로 하였으며 상세한 내용은 Table 3에 제시하였다.

본 실험의 목적에 해당하는 해상 구조물 설치에 따른 지형 변화만을 추출하기 위하여 우선, 초기 1/20 경

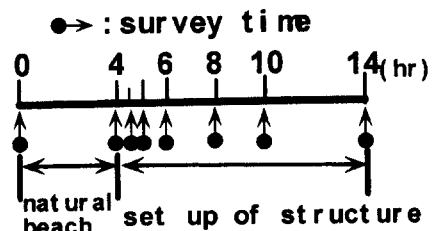


Fig. 15. Topography measuring intervals for 3-D movable bed experiment.

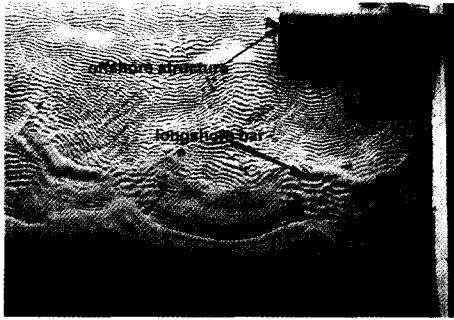


Fig. 16. Experimental natural beach and offshore structure setup (case 1; offshore distance 2 m)

사의 사면에 4시간 조파한 준평형상태의 해변(이하, 자연해빈이라 칭함)을 만든 후, 자연해빈 지형을 홀트리지 않도록 최대한 주의하여 구조물을 설치하였다. Fig. 16은 본 실험의 case 1(이안거리 2 m)의 자연해빈에 구조물을 설치한 직후의 사진이며 사구, 사륜, 연안사주가 잘 발달되어 있음을 확인할 수 있다.

3.2 해변의 변형과정과 설상사주의 형성

3.2.1 파의 운동과 순환류의 발생

Fig. 16은 본 실험에 있어서 관찰한 해상 구조물에 의한 배후의 해변과정을 나타낸 모식도이다.

당초 자연해빈에 거의 직각으로 입사하여 천수변형을 일으켜 왔던 파는 구조물 설치 후 회절에 의해 첨단부로부터 동심원을 그리면서 구조물의 차폐역으로 퍼져 나간다. 이와 같은 동심원상의 회절파는 구조물의 내부 영역으로 진행할수록 진폭이 지수적으로 감소해 나가지만, 대칭을 이루고 있는 반대측으로부터의 회절파와의 상호간섭에 의해 구조물 중심(본 실험의 경우, 대칭 중심선의 벽)부근의 파봉선은 망상(網狀)구조를 띄게 되어 다시 연안방향에 대해 직각인 파의 진행이 보인다.

구조물 설치역을 벗어난 구역에서의 파는 천수변형에 의해 파고가 증대하여 결국 쇄파하게 되며 단파(bore) 형태로 쇄파대를 통과한 파는 정선부근에 이르러 정선에 대해 직각의 run-up현상이 생긴다(run-up height 3-4 cm). 그러나, Fig. 17에 나타난 것과 같이 파봉선은 구조물에 접근할수록 정선에 대해 기울어진 각을 가지게 되고 이때 따라 소상영역(swash zone)에서의 run-up도 위치에 따라 특정 경사를 띄게 된다. 중력의 효과에 지배되는 run-down은 소상영역의 최대경사방향으로 향하므로 소상영역 및 해안선 부근에서의 파 운동은 지그

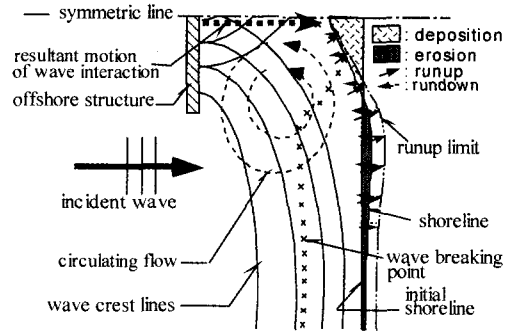


Fig. 17. Beach process behind offshore structure.

재그 운동(zigzag motion)이 활발해진다.

한편, 구조물 배후에는 반시계 방향의 순환류가 형성되어 있다. 순환류의 형성기구는 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 우선, 첫 번째로 소상영역과 해안선 부근의 지그재그 운동을 들 수 있다. 쇄파대를 단파형태로 통과한 수괴(水塊)는 소상영역에서의 경사진 run-up 및 run-down이 만들어 내는 지그재그 운동에 의해 해안선 부근에서 구조물 중심을 향한 연안류를 창출한다. 연안류는 구조물 중앙부에서 대칭 역으로부터 만들어진 연안류와 조우(遭遇)하여 다시 구조물 측을 향한 흐름으로 그 방향을 전환하게 되어 구조물 배후의 순환류 형성에 직접적인 영향을 끼치게 된다.

두 번째로는 평균수위의 차를 들 수 있다. 외해로부터 입사하는 파가 사면을 타고 inshore로 접근하면 천수변형과 쇄파에 의해 파고분포는 장소에 따라 변화하게 된다. 이 같은 공간적인 파고 분포의 차로 인하여 쇄파선을 중심으로 외해 측에서는 평균수위의 저하, 그리고 쇄파대내에서는 급격한 상승하는 wave set-down, wave set-up현상이 발생한다. Fig. 17에 제시한 바와 같이 해상 구조물에 의한 차폐 역이 존재할 경우의 평균수위는 wave set-up이 발생하는 쇄파대가 가장 높고 다음으로 구조물 배후의 차폐역, 마지막으로 쇄파선 외측의 수역이 가장 낮은 순의 단차가 발생하게 된다. 본 실험에서는 평균수위의 측정은 행하지 않았으나, 본 실험과 동일한 scale의 고정상 실험에서 파랑과 해변류를 상세히 측정한 이·신(1999), 申 등(1999a, b)의 실험 및 본 연구의 해변류 계산에서도 확인하였다. 이와 같은 평균수위의 공간적인 경사는 구조물 배후에서 흐름을 야기하는 중요한 외력으로 작용하게 되고 수괴의 지그재그 운동에 의한 순환에 부가되어 배후의 순환을 더욱 발달시키고 있다고 사료된다.



Fig. 18. Appearance of cusped spit and swash zone.

3.2.2 표사의 이동과 설상사주(舌狀砂州)의 형성

해상 구조물에 의한 해빈변형과 설상사주의 형성 과정에 대한 설명은 구조물의 이안거리(D)와 폭이 1:1이 되는 것을 표준으로 간주하여 case 2($D=3$ m)의 변화과정을 중심으로 행한다.

Fig. 19는 자연해빈에 구조물을 설치하고 Fig. 15에 제시한 간격으로 지형을 측정한 case 2의 결과 가운데서 구조물 설치 후 1, 2, 4, 6시간째의 결과를 나타내고 있다. 그림에서의 가로축은 외해방향(x), 세로축은 연안방향(y)으로 좌측은 등수심도, 우측은 자연해빈의 지형으로부터 지형 측정 시간까지의 수심 변화량을 나타낸다.

해상 구조물 주위의 분포된 실험사는 조파 개시 후 곧 정상상태에 달한 파랑장 및 해빈류 장에 의해 이동하기 시작했다. 조파 재개의 초기 단계에서부터 구조물의 침단의 연장선상에 있는 소상영역의 지그재그 운동에 의한 beach drift와 해안선 부근에서 가장 빠른 유속을 나타내는 연안류에 의해 $x=80\sim 90$, $y=50\sim 200$ 에 존재하는 실험사는 구조물 중앙에 위치하는 정선을 향해 이동하였다. 이동된 실험사는 구조물 중앙의 $x=100\sim 170$, $y=20\sim 100$ 의 해안선 부근에 퇴적하여 먼저 수면하 설상사주의 형상으로 성장한다.

한편, 구조물 외측의 쇄파대내($x=100\sim 300$, $y=200\sim 300$)에서 부유된 실험사는 구조물 배후에 형성된 순환류에 편성하여 이동해 가지만, 유속이 약해진 순환의 중심 부근($x=160\sim 270$, $y=40\sim 140$)에서 거의 대부분이 침강하여 퇴적된다. 이들 실험사의 퇴적은 우선 구조물 중앙의 해안선 부근 수면 하에서 일어나며 어느 정도 퇴적된 후, 연이어 공급되는 beach drift에 의해 수면 상에 설상사주로서 모습을 드러낸다(Fig. 18, Fig. 19(a)).

이와 같은 해빈과정은 본 실험의 모든 case에 있어 동일한 형태로 발생하며 시간의 경과와 함께 설상사주도 발달해나가기만 대개 6시간 이후가 되면 파의 run-up 및 run-down이 거의 같은 경로를 왕복하게 되어 구

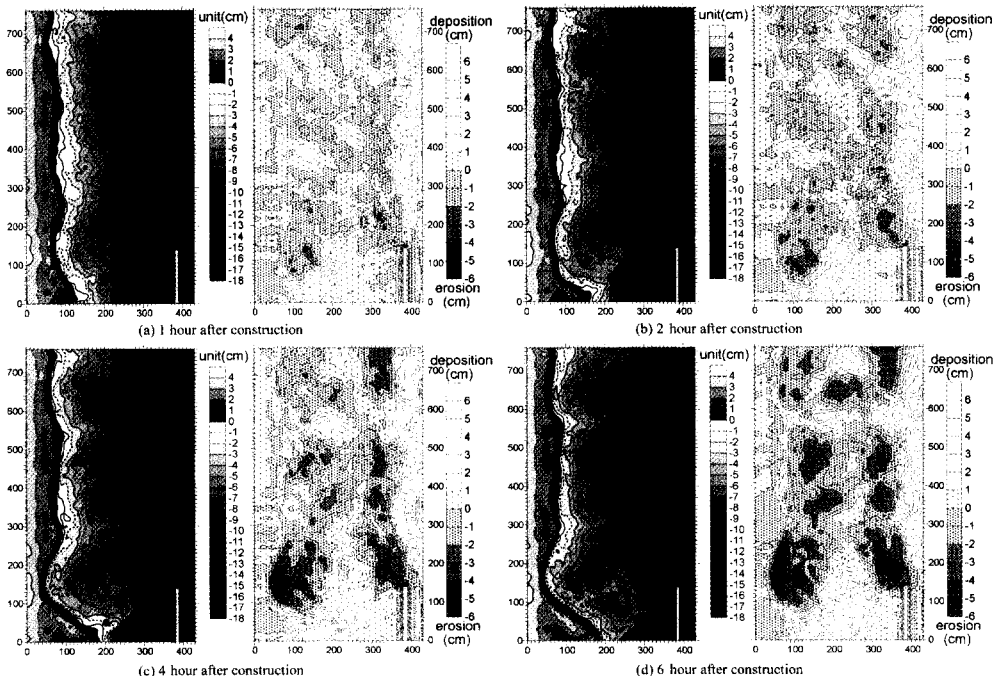


Fig. 19. Topography changes (case2, $D=3$ m).

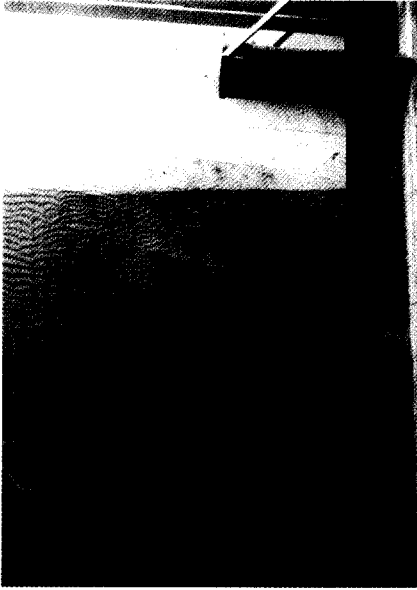


Fig. 20. Shoreline erosion and cusped spit (case 2, 6 hours after construction)

조물 침단을 연결한 해안선 부근의 국소적인 심각한 침식 및 설상사주의 성장도 안정된 국면에 접어든다(Fig.

19(d), Fig. 20).

그러나, 구조물 외측의 쇄파대내에서 공급되는 부유사가 순환류에 의해 이동하여 순환의 중심 부근($x=160\sim 270, y=40\sim 140$)에 침강하여 퇴적하는 현상은 계속되고 있어 정선에서 떨어진 수면 하에서는 아직 안정상태에 달하지 못하였음을 언급해두고자 한다.

4. 이안거리에 의한 해변변형과 해빈류

Fig. 21은 본 실험에 있어서의 해상 구조물의 이안거리별 해변변형 결과이며 구조물 설치 후 6시간이 경과한 때의 등심선 및 수심 변화량을 나타내고 있다. 구조물을 설치한 후 조파를 재개하면 구조물의 배후에 순환류가 발생하여, 쇄파대에서 부유된 실험사가 순환류에 의해 구조물 배후로 이동하고 침강하는 과정 그리고 구조물 배후의 해안선 부근 및 swash zone에서의 beach drift에 의해 설상사주가 형성되는 과정은 본 실험의 모든 case에 있어서 확인되었다. 그러나, 구조물의 영향이 지형변화에 직접적으로 관계하는 범위를 외해방향 $0 \leq x < 200$, 연안방향 $0 \leq y \leq 300$ 으로 가정하고, 외해에서 입사파의 파장을 L_0 라 할 때, $D/L_0=1.92$ 인 case 2(Fig.

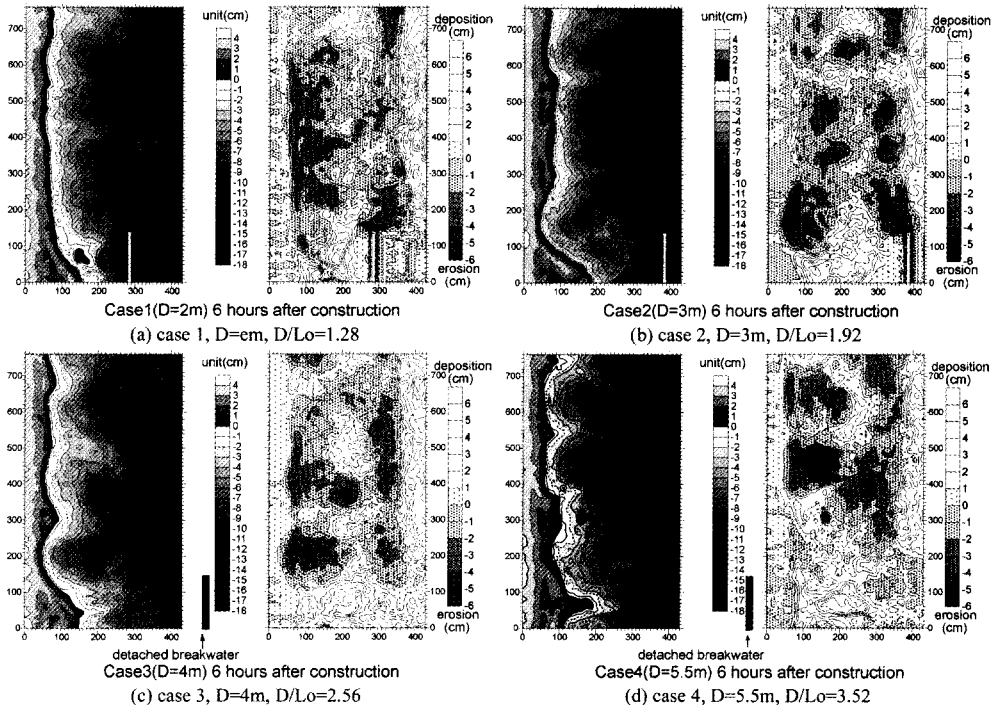


Fig. 21. Difference of topography changes according to different offshore distance.

21(b))의 경우가 극부적인 침식량, 설상사주의 규모 및 정선의 후퇴량이 가장 크고, 다음으로 case 3(Fig. 21(c), $D/L_0=2.36$), case 1(Fig. 21(a), $D/L_0=1.28$), case 4(Fig. 21(d), $D/L_0=3.52$)의 순으로 나열되어 있음을 알 수 있다. 특히, 변화량이 가장 큰 case 2의 경우는 재현성의 확인을 위해 동일 조건에서의 반복 실험을 행한 결과 거의 같은 결과를 얻었다.

본 연구에서는 이와 같은 해상 구조물의 이안거리에 있어서 해빈변형에 극대치를 부여하는 조건이 존재한다고 사료되어 우선, 본 실험과 동일한 크기로 해빈류를 계산하여 이의 결과와의 고찰을 행하였다.

해빈류 계산은 비선형분산파동방정식으로 심해 역까지 적용범위가 확장된 Madsen *et al.*(1992)의 수정 Bousinesq방정식에 쇄파에 의한 운동량 혼합항 및 저면 마찰항을 부가하여 천해 역에서의 쇄파현상을 고려하도록 수정한 모델을 이용하여 계산하였다. 모델에 있어서 연속방정식 및 운동방정식은 다음과 같다.

$$\eta_t + p_x + q_y = 0 \tag{1}$$

$$p_t + \left(\frac{p^2}{D'}\right)_x + \left(\frac{pq}{D'}\right)_y + gD'\eta_x - M_1 + F_1 + \varepsilon p = \Psi_1 \tag{2}$$

$$q_t + \left(\frac{q^2}{D'}\right)_y + \left(\frac{pq}{D'}\right)_x + gD'\eta_y - M_2 + F_2 + \varepsilon q = \Psi_2 \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(p_{xx} + q_{xy}) + Bgh^2(\eta_{xx} + \eta_{xy}) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{3}p_{xt} + \frac{1}{6}q_{yt} + 2Bgh\eta_{xx} + Bgh\eta_{yy}\right) \\ & + hh_y\left(\frac{1}{6}q_{xt} + Bgh\eta_{xy}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \Psi_2 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(q_{yy} + p_{xy}) + Bgh^3(\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{3}q_{yt} + \frac{1}{6}p_{xt} + 2Bgh\eta_{yy} + Bgh\eta_{xx}\right) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{6}p_{yt} + Bgh\eta_{xy}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, p , q 는 x , y 방향의 선유량, h 는 수심, η 는 수면 변동량, 전 수심 $D' = \eta + h$ 이다.

식 (4), (5)는 분산항을 나타내고 ε 는 경계처리를 위해 도입한 계수로서 투과경계에서의 파 에너지 흡수계수를 의미하고 있다. B 는 보정계수이다. M 은 쇄파에 의한 운동량 혼합항을 나타내고 있으며 佐藤 등(1993)을 참고하여 다음과 같이 처리하였다.

$$M_1 = v(p_{xx} + p_{yy}) \tag{6}$$

$$M_2 = v(q_{xx} + q_{yy}) \tag{7}$$

여기서, v 는 쇄파에 의해 발생하는 교란에 의한 운동량의 확산을 나타내는 와동점성계수로서 片山·佐藤(1993)의 설정을 따랐다.

$$v = \frac{\alpha_D s g d}{\omega^2} \sqrt{\frac{g\hat{Q} - Q_r}{dQ_s - Q_r}} \tag{8}$$

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3s)\sqrt{gd^3} \tag{9}$$

$$Q_r = 0.135\sqrt{gd^3} \tag{10}$$

여기서, d 는 평균수심, s 는 해저경사, \hat{Q} 는 선유량의 진폭, α_D 는 무차원 계수로서 규칙파인 본 계산의 경우는 2.5를 적용하였다.

저면 마찰항 F 는 다음과 같다.

$$F_1 = \frac{f}{2D^2} p\sqrt{p^2 + q^2} \tag{11}$$

$$F_2 = \frac{f}{2D^2} q\sqrt{p^2 + q^2} \tag{12}$$

여기서, f 는 저면 마찰계수로서 0.1을 취하였다.

계산에 있어서의 쇄파 판정은 수립자의 속도와 파속의 비로 결정하였으며 申 등(1999a, b)의 동일 축척의 고정상 실험에 대한 파랑, 해빈류의 재현 결과를 근거로 0.45를 취하고 이를 초과하면 쇄파하는 것으로 판단하였다. 수치계산은 교호 음해법을 이용한 ADI법으로 3중대각행렬(tri-diagonal matrix)을 구성하여 처리하였으며, 계산 격자간격은 0.1 m, 시간간격은 0.5×10^{-2} s로 하였다.

해상 구조물의 이안거리와 해빈류와의 관계를 명확히 하기 위해 외해에서의 수심을 실험과 동일한 30 cm로 하고, 1/20의 초기 사면에 대한 해빈류를 계산하였다. 입사경계조건은 본 실험과 동일한 파고 5.0 cm, 주기 1.0 s의 규칙파로 하고 구조물의 규모 및 이안거리 등의 모든 조건도 일치시켰다.

해빈류의 계산 결과는 Fig. 22에 제시하였다. Case 2(3 m, $D/L_0=1.92$)의 경우는 구조물의 침단과 정선을 연결하는 선의 1/2 위치에 반시계 방향 순환류의 중심이 존재하며 해안선 부근의 최대 유속은 0.15 m/s이다. Case 1(2 m, $D/L_0=1.28$)은 case 2와 같은 형태의 순환류는 명확히 존재하며 순환 중심의 위치에 있어서도 구조물과 해안선의 1/2 위치라는 점에서는 동일하지만, 순환의 규

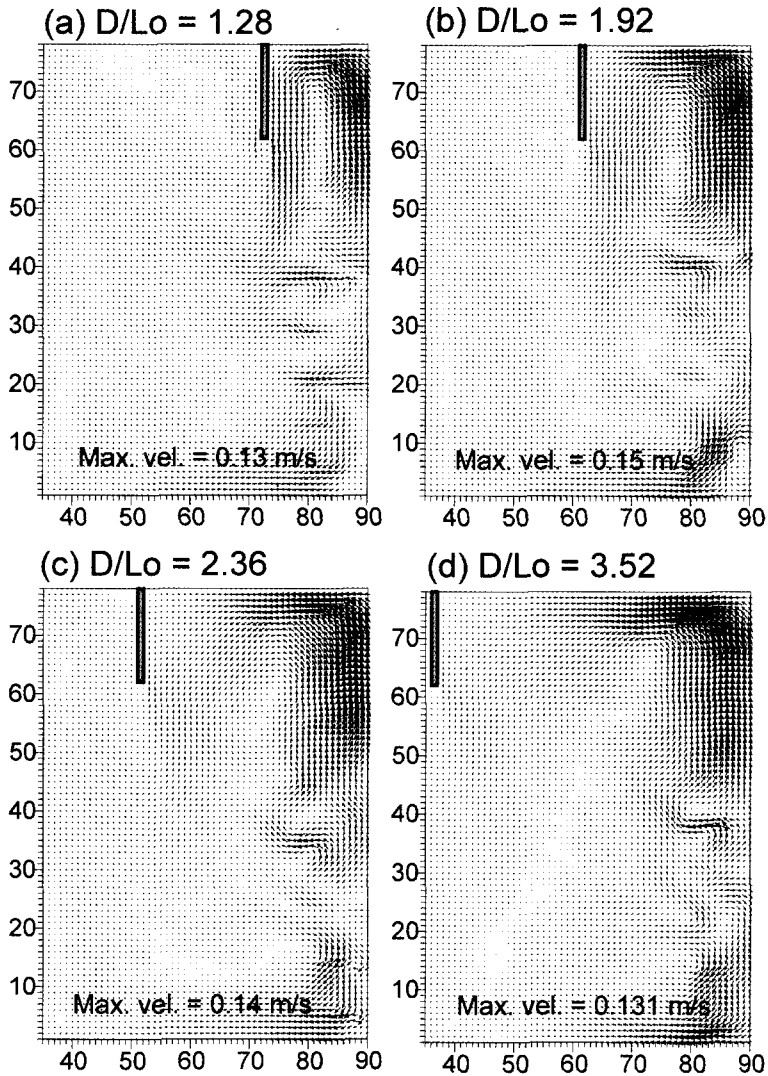


Fig. 22. Nearshore currents depended on offshore distance.

모는 다소 축소되어 있다. 이때 해안선 부근의 최대 유속은 0.13 m/s이다.

Case 3(4 m, $D/L_0=2.56$)은 case 1 및 2에 비교하여 상대적인 순환류의 명확도는 감소되어 있긴 하지만 순환류는 존재하고 있으며 해안측의 최대 유속은 약 0.14 m/s이다. 한편, case 4(5.5 m, $D/L_0=3.52$)의 경우는 구조물 배후의 순환류라기 보다는 해안선 부근의 연안류의 형태를 띠고 있으며 0.13 m/s 정도의 유속을 나타내고 있다. 이들 해빈류의 계산 결과는 앞서 서술한 소형 이동상 실험에서의 흐름 관찰 결과와도 동일한 경향을 보이고 있는 것으로부터, 해안선과 쇄파 위치까지의 거리

와 해안선과 해상 구조물까지의 거리에 있어서의 상관관계가 주요한 요소로 작용하고 있다고 사료되며, 본 연구에서는 case 2(3 m, $D/L_0=1.92$)의 경우가 가장 순환류를 발달시키는 조건이 되어 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 이동상 실험을 통하여 해상 구조물의 건설에 따른 해빈변형 과정을 상세히 파악하였으며 또한 이안거리에 따른 지형변화의 경향을 분석하였다.

해상 구조물의 이안거리에 의한 지형변화 경향의 분

석 결과, 모든 case에 있어서 쇄파대에서 부유된 부유사 및 소상영역에서의 beach drift에 의해 구조물의 배후에 설상사주를 형성해 가는 양상은 확인되었지만, 이 안거리에 따른 해빈류 분포의 차이로 인하여 설상사주 및 구조물 배후의 퇴적에 큰 비율로 기여하는 주변의 침식범위와 그 정도가 다름을 파악할 수 있었다. 특히, case 2(Fig. 21(b))의 경우 일정 경사의 사면에서의 해빈류 패턴(Fig. 22(b))이 잘 반영되어, 해안선 부근의 영향 범위와 국소적인 침식 정도가 동일 패턴으로 나타나고 있어 구조물 설치 직후의 해빈류 패턴이 해당 해빈에 대한 영향을 지배하는 주된 요소임을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 이후 후속연구로 이어질 해상 구조물이 야기하는 해빈변형을 예측하기 위한 3차원 해빈 변형 모델 개발과 관련하여 중요한 검증수단으로 활용될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- 이중우, 신승호, 1999. 천해역 비선형분산파랑 모델의 평가를 위한 수리실험 연구, 한국해양·해안공학회지, **11**(4): 189-196.
- Madsen, P.A. and O.R. S rensen, 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics Part 2, *Coastal Engrg.*, **18**, pp. 183-204.
- Shinohara, K. and Tsubaki, T., 1966. Model study on the change shoreline of sand beach by the offshore breaker, *Proc. 10th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, pp. 551-563.
- Sunamura, T. and Mizuno, O., 1987. A study on deposition shoreline forms behind an island, *Ann. Rep., No. 13, Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, pp. 71-73.
- 片山裕之, 佐藤慎司, 1993. Boussinesq方程式を用いた不規則波の浅水・碎波變形の計算法, *海岸工学論文集*, **40**, pp. 16-20.
- 佐藤慎司, Michael Kabiling, 1993. Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜變形の數値計算, *海岸工学論文集*, **40**, pp. 386-390.
- 申承鎬, 高畑榮治, 入江功, 村上啓介, 1999a. 非線形分散波浪モデルの豫測精度評價と線形波浪モデルとの接續, *海洋開發論文集*, **15**, pp. 345-351.
- 申承鎬, 高畑榮治, 入江功, 吉田明德, 1999b. Boussinesq方程式を用いた沖合の構造物による波浪・海浜流の數値計算の適用性, *海岸工学論文集*, **46**, pp. 206-210.
- 三村信男, 清水琢三, 渡辺見, 1982. 離岸堤による波浪・海浜流場の變化と海浜變形, 第29回 海岸工学講演會論文集 土木學會, pp. 299-303.

Received May 4, 2000

Accepted June 20, 2000