

천해역 비선형분산파랑 모델의 평가를 위한 수리실험연구 Experimental Study for Evaluation of Non-Linear Dispersive Wave Model in Shallow Water

이중우* · 신승호**

Joong Woo Lee* and Seung Ho Shin**

요 旨 : 천해역에서 외해의 구조물 주위에서의 파동계산을 위한 수치모델을 검증하기 위해서는 실험실에서의 수리실험이 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 경사해저면을 가진 해역에서 구조물 설치로 인한 파랑장과 이로 인한 흐름장에 대한 수리실험 예를 다룬다. 수역은 수직으로 층별 흐름을 관측하기 위한 추적 플로터를 투입하도록 4개층으로 나눈다. 자료의 측정은 제한된 수의 파고계와 실험실 상단에 설치한 비디오 카메라와 함께 추적 플로터를 사용하여 연속적으로 이루어졌다. 특정영역에서의 파고 및 각 층별 시간평균유속 분포를 상세히 측정하였으며, 측정된 모든 실험실 자료로부터 파랑 및 흐름장 분포를 상세히 분석하였다. 또한, 파랑의 비선형적 변형특성을 상하 및 전후 비대칭성의 관점에서 포괄적인 분석도 기하였다.

핵심용어 : 파고분포, 속도분포, 플로터 추적, 비선형성, 상하비대칭성, 전후비대칭성

Abstract □ In order to verify a numerical model for the calculation of wave motion around an offshore barrier in shallow water, laboratory physical experiments are necessary. In this study, sample experiments are carried out on the wave and wave induced current fields due to a sloping bottom topography and on that due to an isolated structure from the coastline. The water body is divided into 4 levels, in which the current tracking floaters are deployed to measure the wave induced currents. Data measurement was continued using the limited wave gauges and current tracking floaters including a video camera from the top. The wave heights for the preselected surface and time-averaged velocity distributions at each level were measured in detail. The distribution of wave and current fields was analyzed precisely combining the whole measured laboratory data. Moreover, comprehensive analyses were carried out on non-linearity of wave transformation in terms of skewness and atiltness.

Keywords : wave height distribution, velocity distribution, floater tracking, nonlinearity, skewness, atiltness

1. 서 론

연안해역의 개발에 따라 인접하는 해안에서의 침식 및 퇴적 등의 악영향을 가능한 한 경감시키기 위해서는 사전에 해빈변형에 관한 실험이나 시뮬레이션을 행하여, 다양한 관점에서 개발의 영향을 평가해줄 필요가 있다. 이를 위해서는 파의 변형과 흐름을 정확하게 구할 필요가 있으며, 그 위에 파의 제원에서 소류사나 부유사와 같은 해저면의 저질입자의 운동을 일으키는 유속이나 전

단응력을 결정하고, 나아가서는 부유한 저질입자를 이동시키는 흐름을 계산하는 것이 이루어져야 한다.

평면파랑장에 있어서 파·흐름의 계산은 여러 가지의 선형·비선형 수치모델에 의해 재현하여 왔으나 저질이동에 본질적인 역할을 부가하고 있는 저면유속파형의 비대칭성이나 전면 경사도의 평가가 중요한 것으로 받아들여지고 있는 것에서 최근 비선형 모델에 의한 파와 흐름이 공존한 장의 계산이 시도(佐藤와 Kabilng, 1993)되고 있다. 또한, 비선형 장파이론에 파의 분산성을 도

*한국해양대학교 토목환경공학부(Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Pusan 606-791, Korea)

**일본 큐슈대학 공학연구과(Division of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan)

입하여 단주기파의 계산에서도 응용되고 있는 Boussinesq 방정식은 Madsen and Sorensen(1991)에 의해 천해역과 심해역의 분산성을 통일한 형으로 제안되어 그 적용범위가 넓어졌다.

개발한 수치모델의 타당성을 검증하기 위해 구조물 설치시에 해변변형예측의 기본자료로 활용되고 있는 파랑장과 흐름장의 현장자료나 실험실 자료를 확보하는 것이 시급하다. 清水 등(1983), 西村 등(1984) 및 Nishimura et al.(1985)은 이안제 배후에서 순환류(해빈류)에 대한 실험실에서의 실험결과를 제시하여 많은 모델에서 검증수단으로 활용하고 있으나 보다 정밀한 계측이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 실험실에서 비선형 파동장 계산의 부담을 줄이는 일환으로 천해역 비선형 분산파랑모델을 개발할 때 이를 검증하기 위한 수리실험에 중점을 두고 외해의 구조물에 대한 평면수조실험장치를 설치하고, 대상수역의 수심을 4개 층으로 나누어 파랑과 흐름의 단면 및 평면적인 분포를 상세히 측정하여 분석하였다.

2. 수리실험

2.1 실험조건

실험은 길이 20 m, 폭 9 m, 깊이 0.6 m의 평면파동수조를 사용하였으며, 실험수조의 개요와 좌표계는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 수조의 해안측에서 12 m에 걸쳐

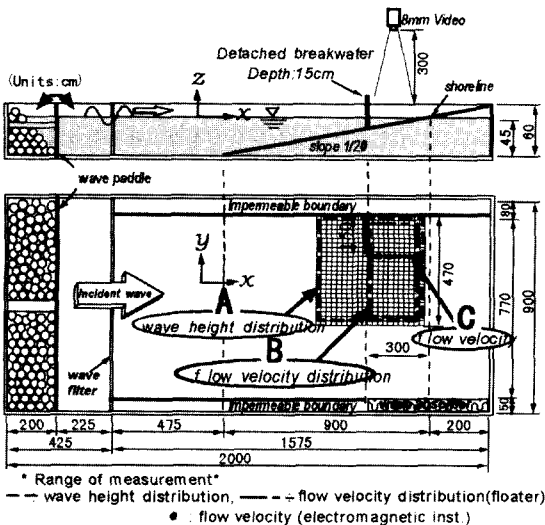


Fig. 1. Experimental setup and coordinate system.

1/20의 해저구배의 모형해빈을 설치하고, 이의 바깥에는 0.45 m의 일정한 수심이 개방경계인 조파기까지 유지되는 것으로 하였다. 파가 수조전역에 균등하게 진행하도록 양측에는 도파판(導波板)을 설치하였다. 외해에는 해안과는 3 m 떨어진 쇄파대 바깥 15 cm의 수심에 대규모의 해상구조물을 가정한 길이 1.5 m(대칭형으로 간주하면 3 m)이안제 형식의 구조물을 설치하고, 이 구조물의 전면과 후면은 완전반사하는 직립구조물로 처리하였다. 조파기 배후(2 m)와 구조물에서 해안쪽의 측면경계(5 m)에서는 발생한 파를 흡수할 수 있는 흡수체(wave absorber)를 설치하였으며, 조파기 전면의 2 m구간에는 파랑필터(wave filter)를 설치하여 의도한 파랑장이 형성되도록 하였다. 필터와 구조물 사이의 측면경계는 불투과로 처리하였다.

입사파는 파형구배 0.032, 파고 5 cm, 주기 1.0 s의 단주기 파랑을 적용하였다.

2.2 파고분포의 측정

파고분포의 측정은 Fig. 1에서 표시한 바와 같이 구조물을 중심으로 전·후 2 m 및 구조물이 설치된 측면 불투과 경계에서 4.6 m의 범위까지로 하고, 수심은 4.5 cm에서 24.5 cm까지의 범위(영역 A)로 하였다. 이 범위를 20 cm 간격의 격자로 나누어 그 위에서 총 462개 지점에서의 파고를 측정하였다. 측정방법은 20 cm의 간격으로 설치한 용량식 파고계 7개를 1조로 하여 조파개시에서 수조 전체가 정상상태에 달한 후 20주기에 해당하는 파고를 측정하였다. 1조의 측정이 이루어지면 그 다음 장소로 이동하여 설치하고, 수조내에서 파랑의 요란이 충분히 가라앉은 것을 확인한 후에 다음의 측정을 실행하였다.

2.3 흐름분포의 측정

요즈음 해빈류의 계산에 사용되고 있는 거의 모든 모델은 평균류로 수심적분을 행한 양을 취급하고 있다. 이와 같은 평균류를 수리모형실험에서 검증하기 위해서는 파동장에서 저면으로부터 수면까지의 유속을 상세히 측정하여 시간과 수심에 대하여 적분을 행하면 좋으나, 실제로는 시간에 대한 문제를 별도로 하여도 저면과 수면 부근에서의 유속측정방법 등에 여러 가지 어려운 점이 남아있다. 또한, 수심별로 시간평균한 평균류는 연직방향으로 특정의 분포를 나타내기 때문에 어떠한 대표 수심으로 유속을 측정할 결과를 사용하여 모델로 계산

한 평균류의 재현성을 검증하는 것에는 의문이 남는다.

그러므로, 본 연구에서는 플로터 및 전자유속계를 사용하여 시간·수심별 유속을 상세히 측정하고, 이들 측정치로부터 평균류를 구하고자 하였다.

2.3.1 플로터(floater)에 의한 측정

플로터는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 비중 1.006의 염수를 채워 넣고, 여기에 부이(buoy)를 가장 가는 낚시줄(0.165 mm)로 연결하여 결정한 수심에서 흐름에 따라 떠다니도록 하였다. 유속측정을 위한 플로터의 낙하점은 파고분포의 측정과 같은 20 cm간격의 격자상(총 252개 지점)이나, 구조물 배후의 수심 14.5 cm에서 해안측의 수심 3.5 cm까지를 측정범위(구역 B)로 하고, 수심별로 측정층의 수를 증감시켰다. Table 1은 각 수심별 측정층 수를 나타낸다.

유속의 측정은 Fig. 1에서 표시한 바와 같은 격자상(구역 B)에서 9개의 플로터를 1조로 하여 20 cm 간격으로 제작한 전자석에 붙여서 설치하고, 조파기에서 파를 발생시켜 20주기 후에 동시에 낙하시켰다. 발생할 수 있는 낙하초기의 불안정한 이동효과를 최소화하기 위하

여 속도산정시 초기 3초의 데이터는 제외시키고 그 이후부터의 움직임에 대하여 이동하는 플로터의 양상을 8 mm 비디오 카메라로 촬영하였으며, 이동궤적을 화상분석을 통해 디지털화 하였다. Fig. 3은 깊이 3 cm 층에서의 플로터에 대한 시간별 변화를 나타내며 배열된 작은 동근 점이 플로터의 위치를 가리킨다. 평면수조실험에서는 장시간동안 파를 가할 경우 수조의 고유순환류가 발생하기 때문에, 1조의 촬영이 끝나면 조파를 중지시키고 다음 조의 촬영은 순환류가 완전히 정지된 후에 실행하였다.

플로터의 추적에 의한 유속의 측정은 라그랑주법(Lagrangian method)을 사용했다. 시간 $t=0$ 에 x_0 에 위치한 수립자의 시간 t (주기분에서의 위치를 x 로 하고, 수립자의 평균속도(라그랑주 속도)를 $U_L(x_0, t)$ 라고 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$x = x_0 + \Delta x \tag{1}$$

$$\Delta x = \int_0^t U_L(x_0, t') dt' \tag{2}$$

한편, (x, t) 에서 장의 유속(오일러 유속)을 $U_E(x, t)$ 라고 하면, 이것은 $U_L(x_0, t)$ 과 동일한 값이 된다. 이를 테일러 급수전개(Taylor series expansion)에 의해,

$$\begin{aligned} U_L(x_0, t) &= U_E(x, t) = U_E(x_0 + \Delta x, t) \\ &= U_E(x_0, t) + \Delta x \frac{\partial}{\partial x_0} U_E(x_0, t) + \dots \end{aligned} \tag{3}$$

결국, 플로터의 이동거리 Δ 와 이동에 따른 경과시간 t 이 아주 작게 하면 $U_L(x_0, t) \approx U_E(x_0, t)$ 로 간주할 수 있다. 본 실험에서는 조파기에서 발생시킨 파의 진동주기인 1초 간격으로 각 수심 층별 플로터의 이동거리를 추적하여 유속을 구하고, 이것을 그 장소에서의 오일러 유속으로 산정하였다.

2.3.2 전자유속계에 의한 측정

한편, 센서부가 직경 5 mm, 길이 1.5 cm 인 2성분 전자유속계(ACM250-A, 정도 ± 0.5 cm/s)에 의한 측정은 구조물의 선단에서 40 cm 떨어져, 수심 13.5 cm에서 4.5 cm까지 구역 C의 10개점을 측정하였다. 또한, 각 점에서의 측정은 저면에서 1 cm 위에서부터 1 cm간격으로 수면 가까이까지 시도하였으며, 파가 통과하는 수심(정수면 아래 약 3 cm)까지에서는 파의 상하운동에 의해 유속의 감지부가 수면위로 노출됨에 따라 측정이 불가능하였다. 측정가능한 범위내에서의 측정치는 입사파의 20

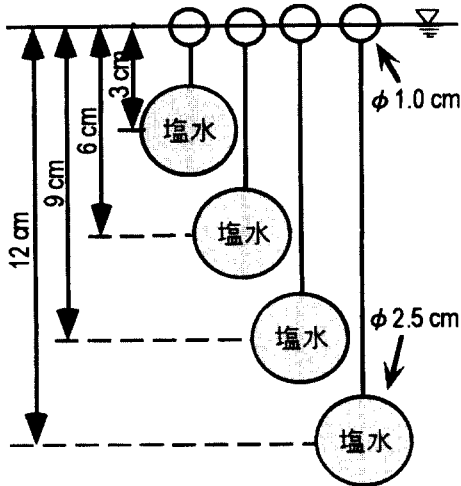


Fig. 2. Schematic diagram of floater.

Table 1. Current measurement cases.

Floater depth (cm)	No. of layer	Length of floater(cm)	(No. of deployment) ×(No. of layer)
14.5,13.5,12.5	4	3, 6, 9, 12	63×4
11.5,10.5,9.5	3	3, 6, 9	63×3
8.5,7.5,6.5	2	3, 6	63×2
5.5,4.5,3.5	1	3	63

주기분에 해당하는 시간동안 50 Hz로 기록하였으며, 이를 모두 수심적분하여 평균류로 환산하였다.

3. 수면파형의 비선형성

파가 해안으로 진행함에 따라 천수변형에 의하여 파장은 짧아지며 파고는 증가한다. 그러나 실제의 수심의 변화에 따른 파의 변형은 상기 기술한 천수변형 뿐만 아니라 파형자체에도 영향을 미쳐 수심이 얕아짐에 따라 점차 비선형성을 강하게 나타내게 된다.

수면파형의 비선형성을 표현하는 지표로서는 Ursell수 및 合田(1983)이 제안한 Π 등이 있지만, 이들은 수면파형의 개념적인 비선형성을 표현한 것으로서 저질이동의 방향성에 크게 기여하는 파형의 상하 비대칭성(skewness) 및 전후 비대칭성(atiltness)의 정도를 파악하기는 어렵다.

본 연구에서는 수면파형의 비선형성을 표현하는 지표로서 파의 시계열 측정 데이터로부터 식 (4)의 skewness 및 식 (5)의 atiltness를 산정하였다.

$$S_k = \frac{1}{\eta_{rms}^3} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \quad (4)$$

$$A_t = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (\dot{\eta}_n - \bar{\dot{\eta}})^3}{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (\dot{\eta}_n - \bar{\dot{\eta}})^2 \right]^{3/2}} \quad (5)$$

여기서, η_{rms} 는 수면변동량의 root mean square, $i=1, 2, \dots, N$ 은 수면변동량의 시계열, η_n 는 n 번째 시계열의 수면변동량, $\bar{\eta}$ 는 수면변동량 시계열 데이터의 평균치를 나타낸다. 또한, $\dot{\eta}_n$ 는 시계열 n 번째 수면변동량과 $n+1$ 번째의 수면변동량과 기울기로, 각 샘플링점의 증분 $\Delta\eta$ 를 샘플링 시간간격 Δt 로 나눈 값이며 매 샘플링 간격에서 파형의 경사를 나타내는 값이다.

Skewness는 수면파형의 상하 비대칭성을 나타내는 지표로서 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 수면파형이 상하 대칭인 경우는 0이 되며, 파곡보다 파봉이 크게 되면 (+), 반대의 경우는 (-)가 되며 실제해역에서의 파는 대부분의 경우 (+)값을 취한다. 특히, 천해역의 경우 쇄파가 시작되는 장소에서는 2.0 이상이 되지만, 쇄파대외에서는 1.5를 넘는 경우가 드물다(合田, 1990). 또한 쇄파가 급격히 일어나는 쇄파대의 중앙부로부터

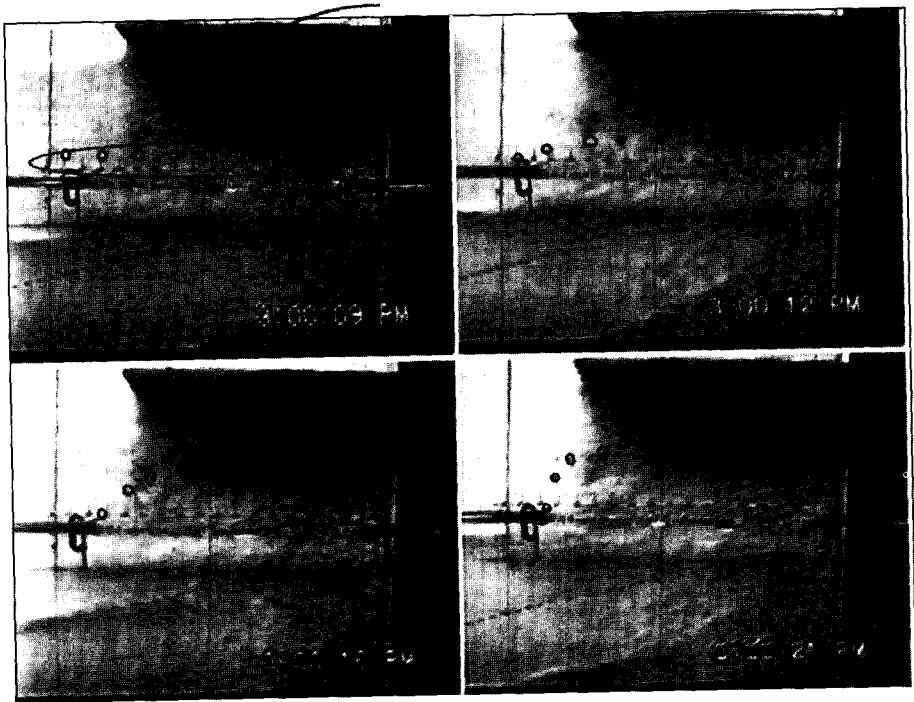


Fig. 3. Video images for floater tracking at the level of 3 cm.

정선에 이르기까지는 오히려 감소하는 경향을 나타낸다.

또한, 해역에서의 파는 쇄파대에 접근함에 따라 파의 전면이 급경사를 이루고 파봉이 파의 전면에 근접하는 파형을 가지게 된다. 즉, 전후에 대해서도 비대칭성을 나타내게 되는데 권파(plunging wave) 형태의 쇄파는 이러한 전후 비대칭성의 극한상황에 해당한다. 본 연구에서는 파의 zero up cross 시각부터 파봉이 통과할 때까지의 시간과 파봉이 통과한 후부터 zero down cross 까지의 시간에 대한 비를 취하여 이를 파형의 전후방향의 비대칭성으로 하고 식 (5)로 산정하였다. (+)일 경우, 파형은 전방으로, (-)일 경우는 후방으로 기울어진 형태의 파형을 의미한다.

4. 결과의 분석

4.1 파고분포

Fig. 4는 측정된 파고분포와 쇄파선을 2차원 및 3차원으로 나타낸 것이다.

구조물에 의한 차폐의 영향을 받지 않는 범위에서는

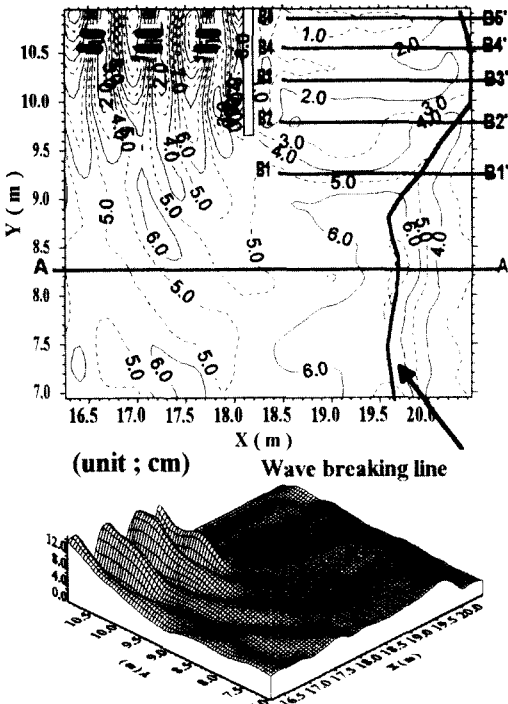


Fig. 4. Experimental result of wave height distribution (H=5.0 cm, T=1.0 s).

수심이 얇아짐에 따라 천수변형으로 파고가 높아짐을 확인할 수 있었다. 또한 이 경우의 쇄파는 수심 7.5 cm 전후에 발생하여 쇄파 후 급격히 파고가 감소하고 있지만, 구조물의 선단에서 80 cm 이내의 배후에서는 차폐효과로 인해 파고 감소의 영향으로 쇄파선이 해안쪽으로 이동하고 있는 양상을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 구조물의 전면은 완전중복파가 발생하며, 약 30 cm 간격으로 중복파의 배(anti-node)와 마디(node)가 교호로 출현하였으며, 천수효과로 인한 파고의 증가와 증첩되어 입사파 5 cm의 파고가 최대 13 cm 까지 증폭되어 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 구조물 배후에는 구조물 선단에서 내부로 진행함에 따라 점차 파고가 감소하고 있으나, 해안부근에서 다시 약간 높아지고 있다.

Fig. 5는 구조물의 영향을 받지 않은 일정 구배(Fig. 4에서 A-A' 단면)에서의 비선형성을, Fig. 6은 구조물 배후(B1-B1', B2-B2', ..., B5-B5')에서의 비선형성에 대해 skewness 및 atiltness를 산정하여 평가하고자 한다.

단면 A-A'에서는 구조물의 영향이 거의 없는 일정 구배에 대한 전형적인 파의 비선형성이 잘 나타나 있다. 수심 약 7.5 cm 정도의 쇄파점에 이르기까지 skewness는 서서히 증가하여 쇄파점에서 1.6의 값을 나타내고 쇄파 후 다시 감소하는 경향을 보인다.

한편 atiltness의 경우는 수심 12 cm 정도까지는 크게 증가되는 경향을 보이지 않지만, 쇄파점에서 급격히 상승하여 4.3에 달하고 있다. 구조물 배후는 구조물의 차폐효과로 인하여 비선형성이 일정 구배에서의 비선형성에 비해 작게 나타나고 있지만, 구조물에 의하여 감소되어가는 파가 수심이 얇아지는 영향으로 다시 전면경사의 파형을 띠게 되는데 이는 atiltness의 경우 (-)치가 (+)로 역전되는 현상으로 표현되고 있다.

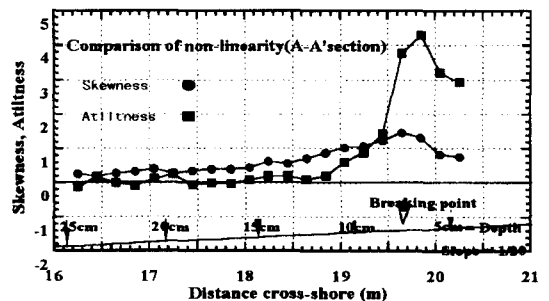


Fig. 5. Non-linearity calculation at A-A'.

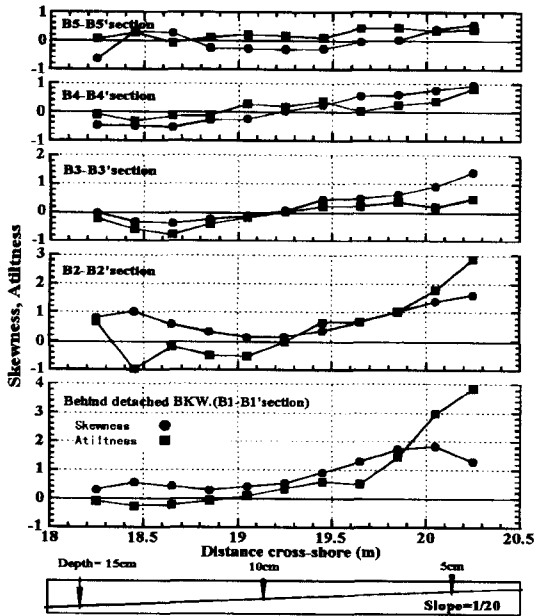


Fig. 6. Non-linearity calculation at B-B'.

4.2 유속분포

Fig. 7은 플로터의 추적의 예로, 각 측정 층별(각각 수면하 3, 6, 9, 12 cm)로 떠 있는 플로터를 20~30초

동안 추적하여 디지털화한 것을 나타낸 것이다.

플로터의 추적에 의한 유속의 측정은 각각 층별로 디지털화한 플로터의 위치에서, 그 위치의 오일러 유속을 계산하여 20 cm 간격의 측정격자에 내삽시킨 후 제각각의 격자에 대하여 전층 유속의 평균을 취하여 이를 평균유속을 하였다.

각 층별 플로터의 이동궤적을 디지털화한 결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 trace03 은 수심 3 cm 층이므로 전체 영역에서 궤적이 나타나는 반면, trace12는 12 cm 층

Table 2. Measured current velocity with electromagnetic current meter.

Depth(cm)	U(cm/s)	V(cm/s)	Velocity(cm/s)
13.5	-1.62	-3.41	3.78
12.5	-0.62	-2.60	2.67
11.5	-0.44	-1.40	1.47
10.5	-0.14	-0.68	0.70
9.5	-1.06	-0.75	1.30
8.5	-1.20	-0.89	1.49
7.5	-0.66	-1.68	1.80
6.5	-1.73	-1.69	3.19
5.5	-2.13	1.14	2.42
4.5	-0.86	12.66	12.69

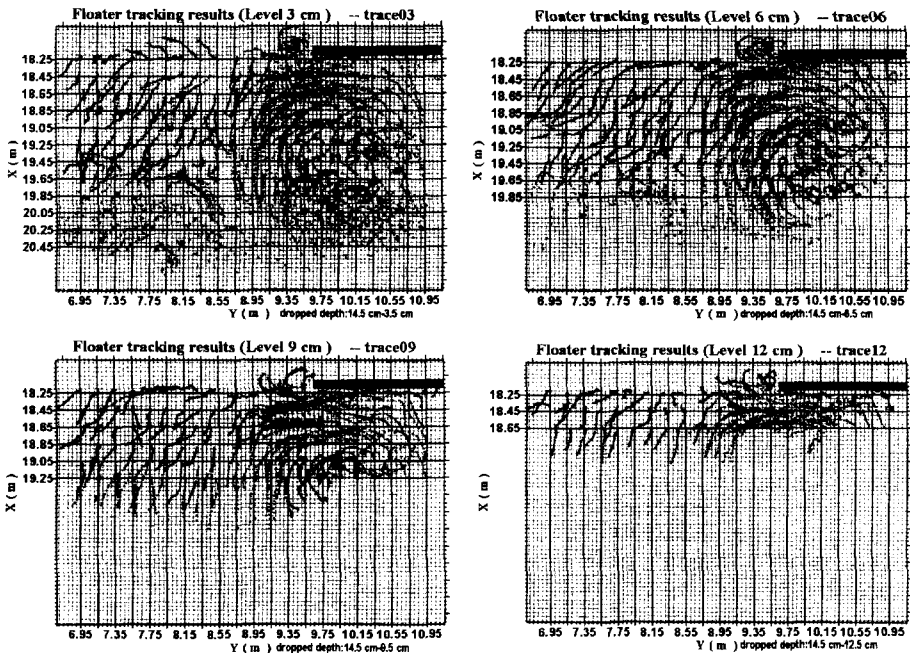


Fig. 7. Digitalized floater tracking results.

으로 수심이 12 cm 이하에서는 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

전자유속계의 측정결과는 수심 11 cm 이상에서는 크기·방향과 함께 플로터의 추적결과가 잘 일치하였으나, 파의 비선형성이 두드러지는 수심 약 8 cm 이하에서는 일치 정도가 좋지 않았다.

Table 2는 전자유속계로 측정된 유속으로서 측정 수심별로 수심평균유속을 산출한 결과이다. 한편, Fig. 7을 분석하여 각 층별 유속을 찾아낸 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 9는 추적 및 전자유속계에 의한 구조물 배후에서 시간 및 수심 평균유속과 전자유속계로 측정된 위

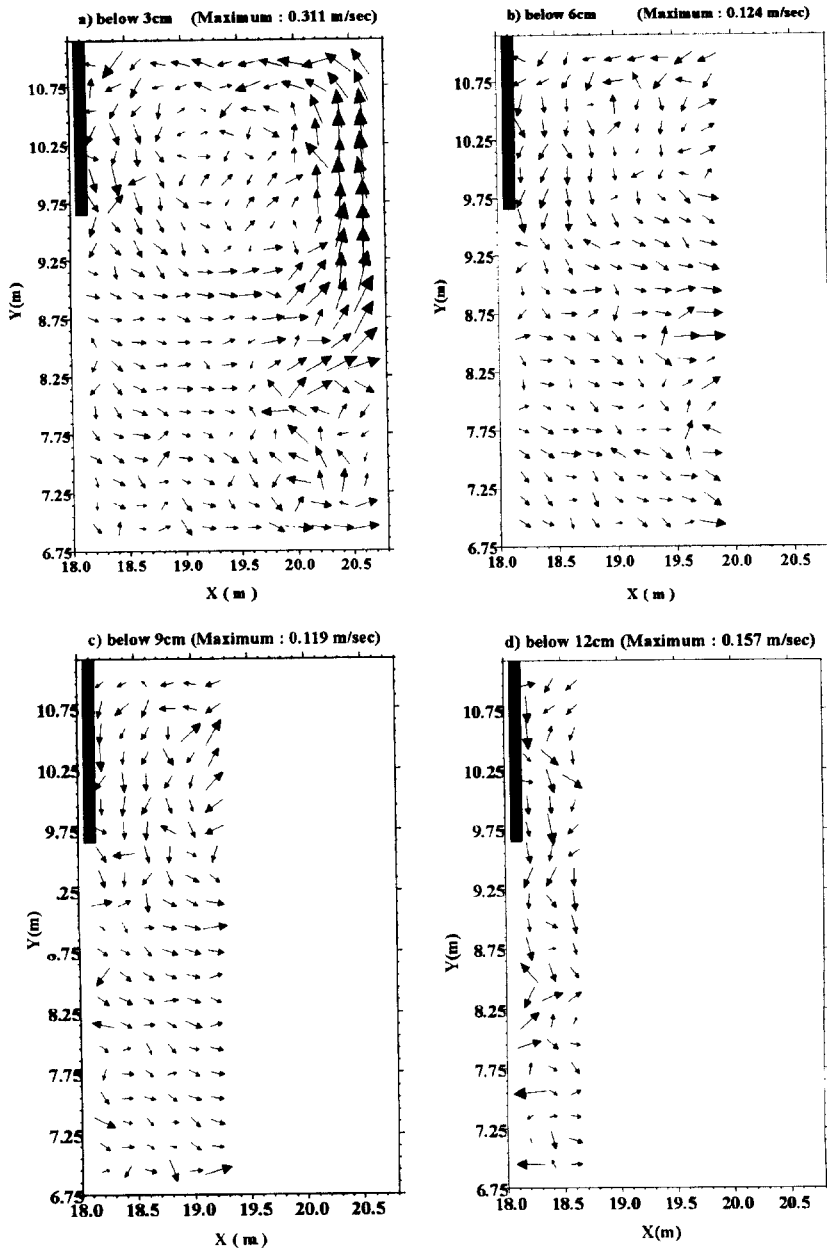


Fig. 8. Experimental results of time averaged velocity.

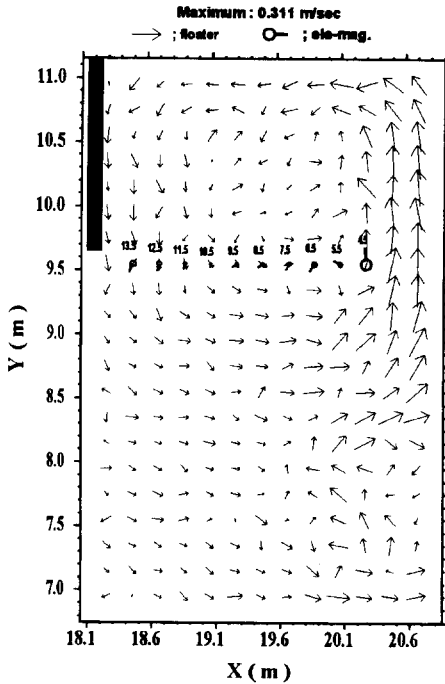


Fig. 9. Experimental results of time and depth averaged velocity.

치의 수심(단위: cm)을 함께 나타낸 것이다.

플로터 추적에 의한 흐름의 패턴은 구조물에 의한 영향이 있는 범위와 거의 없는 범위로 크게 나뉜다. 순환류의 중심은 이안제의 선단에서 배후 1.3 m, 내부 30 cm 정도에 존재하였다. 순환의 내부는 약 2 cm/s, 외부는 약 4 cm/s의 유속을 가지나, 수심 5 cm 이하에서는 10 cm/s~30 m/sec의 유속이 나타났다.

한편, 구조물에서 약 1 m 정도 떨어진 곳에서는 2~3 cm/s의 해안으로 향하는 평균류가 나타나며, 수심 5.5 cm에서는 7 cm/s 전후의 다소 외해로 향하는 흐름이 나타나는데 이는 저인류(底引流, undertow)의 영향으로 보인다. 저인류는 파곡이하에서 외해를 향한 정상류이며, 쇄파에 의해 파곡의 상부에서 발생하는 해안을 향한 질량수송에 대한 보상류로서, 저면부근에서 유속이 큰 경향을 나타내므로 표사에 미치는 영향이 큰 인자로 알려져 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 파랑 및 유동장의 수치모델의 수립과정에서 모델의 재현성을 검증하기 위한 수단으로

사용할 수리실험의 실행 결과를 나타낸 것이다. 실험은 평면수조에서 해양구조물이 있을 때에 파고 및 흐름의 평면적인 분포를 측정하는 것으로 하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

수리실험에서 파고의 세밀한 측정으로 구조물 주위에서의 평면적인 파고분포는 물론 단면적인 비선형적 특성을 나타내어 파랑장 시뮬레이션 모델에서의 검증자료로 활용할 수 있게 되었다. 또한, 플로터의 추적 및 전자유속계에 의한 정상류의 유속을 상세히 측정하여, 구조물 후면에서 해안선에 이르는 유동장에서 각 층별 유동특성을 파악하였으며, 차폐해역의 소규모 와동은 물론 인접역에서의 발생하는 저인류로 인한 흐름장의 변화도 설명할 수 있었다.

본 연구 결과는 구조물 건설 후 해저 지형변화에 입력조건이 될 파랑장과 해빈류장에 대한 수리학적 특성을 파악함으로써 앞으로 후속연구로 이어질 Boussinesq 방정식을 이용한 수치모델개발에서 검증수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

Madsen, P.A. and Sorensen, O.R., 1991. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, *Coastal Engrg.*, **15**, pp. 371-388.

Nishimura, H., Maruyama, K. and Sakurai, T., 1985. On the numerical computation of nearshore currents, *Coastal Engrg. in Japan*, **28**, pp. 137-145.

合田良實, 1983. 波浪의非線形性とその記述パラメータ, 第30回海岸工學講演會論文集, 土木學會, pp. 39-43.

合田良實, 1990. 港灣構造物の耐波設計(增補改訂版), 鹿島出版會, pp. 210-224.

佐藤慎司, Kabling, M., 1993. Boussinesq方程式を用いた波浪·海浜流·海浜變形の數値計算, 海岸工學論文集, **40**: 386-390.

清水琢三, 三村信男, 渡見, 1983. 波浪·海浜流共存場における海浜變形と漂砂量モデル, 第30回 海岸工學講演會論文集, 土木學會, pp. 229-233.

西村仁嗣, 丸山康樹, 櫻井力, 1984. 海浜流の數値計算法について, 第31回 海岸工學講演會論文集, 土木學會, pp. 396-400.

Received June 7, 1999

Accepted October 20, 1999