장주기 및 유동성분을 고려한 부유식방파제의 방파성능 개선

Functional Improvement of Floating Breakwaters with Long Wave Kinetics

윤재선* · 조용식**

Yoon, Jae Seon · Cho, Yong-Sik

Abstract

In this study, a series of laboratory experiments are carried out to analyze fluid behaviors around multi-arranged (2 pieces) floating breakwaters with various parameters such as distance between structures, wave periods and steepness. The rate of wave transmission is shown to be affected directly by wave periods of incident waves and the breakwaters with multi-arranged structures show the highest rate of wave protection compared with other cases. The velocity fields around the breakwaters are measured by using the Laser Doppler Velocimetry system. The transmission coefficients are also measured in laboratory experiments. Finally, laboratory observed data are compared with numerical experimental results and analyzed in detail.

Key words : Hydraulic model test, Floating breakwater, LDV(Laser Doppler Velocimetry), Wave transmission coefficient

요 지

본 연구에서는 단독형 및 2열형(multi-arranged (2 pieces)), 3열형(multi-arranged) 부유식방파제에서의 구조물간 거리와 흘수, 형상을 변화시키고 파의 주기와 파형경사를 변화시키며, 다양한 변수변화에 따른 영향을 분석하였다. 부유식방파제의 흘수변화는 전달계수에 직접적인 영향을 주며, 비교적 장주기에 해당하는 조파조건에선 단독형과 2열형 부유식방파제보다 3열형 구조에서 높은 방파효율을 나타내었다. 수리모형실험의 결과 검증을 위하여 수치모형과 동일한 조건하에 실험을 하고 LDV시스템을 이용하여 각 부유식방파제에서의 유동장을 측정하였으며, 수리모형실험을 통하여 그에 따른 전달계수를 분석하였다.

핵심용어 : 수리모형실험, 부유식방파제, 레이저 도플러유속계, 전달계수

1. 서 론

연안 및 해안공학의 발달과 더불어 부유식방파제의 기능적 효율성이 중요시 되고 있다. 흔히 사용되어오던 착저식방파제는 설치에 많은 시간과 경비가 소요되고 환경 및 생태계에 많은 변화를 줄 수 있으며, 설치 예정지의 수리학적 특성 등의 여건에 많은 제약을 받는 단점이 있다(Tsinker, 1995). 부유식방파제는 일본 등의 선진국을 중심으로 다수가 설치되어 운용 중으로써 수면 위에 설치되기 때문에 수중 생태계에 미치는 영향이 적은 친환경방파제이다. 또한 기존에 시공된 중력식방파제와 달리 수심에 제한을 덜 받고, 공사기간이 짧기 때문에 경제적이다.

국내에서는 조일형(2002)이 계류된 사각형 부유식방파제의 성능에 대하여 검토하였으며, 이정우와 조원철(2005)은 파랑과 계류라인 복원력의 비선형성을 반영할 수 있는 비선형수치모델을 확립하고, 설계조건에 따른 비선형과동장에 놓인 부유식방파제의 운동변화특성과 파랑제어기능을 분석하였다. 또

한, 윤종성 등(2005)은 부유식방파제 설치 시 유동 및 난류 문제에 대한 메커니즘을 해석하기위해 PIV시스템을 이용한 수리모형실험과 RANS방정식에 기초한 연구를 수행하였다.

실제 시공사례로는 2007년 미산 원전항에 완공된 부유식방파제가 대표적이며, 지금까지도 부유식방파제에 대한 여러 연구자들의 관심이 증가하고 있는 추세이다. 방파제뿐만 아니라 우리나라처럼 국토의 면적이 작은 지역에서 증가하는 해산물 동량을 소화하기 위해서 부유식구조물을 이용한 항만의 시공이 시급한 실정이다. 또한, 분석적인 측면에 있어서 수치해석은 파랑과 구조물의 상호작용을 해석하는 데 한계가 있으며, 부유식방파제 단면형상을 정확하게 재현할 수 없으므로, 수리실험을 통한 부유식방파제의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 전달계수는 0~1.0 사이의 값을 갖게 되는데 전달계수가 0인 것은 입사파가 완전히 반사됨을 의미하며, 1.0인 것은 반사가 전혀 없이 모두 통과함을 의미한다. 박재현(2000)은 현재 설계 기준으로 받아들이고 있는 전달계수는 0.5로써 입사파의 파고를 절반으로 감소한 것을 뜻하며, 파랑

*한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : yjs77@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 (교신저자)

의 에너지 관점에서 보면 입사파 에너지의 약 75%를 제거한 것으로 분석하였다. 전달계수(transmission coefficient)는 방파제의 성능을 나타내는 중요한 요소 중의 하나로 입사파의 파고(H_I)와 방파제 후방의 전달파의 파고(H_T)의 비로 표시된다.

$$C_t = \frac{H_T}{H_I}$$

본 연구에서는 하나의 구조물로 이루어진 단독형 및 구조물 두 개인 2열형, 세 개의 구조물로 이루어진 3열형 부유식 방파제에서의 다양한 변수변화에 따른 방파성능에 대하여 분석하였다. 또한, 단독형 및 2열형 부유식방파제에 있어, LDV 시스템을 이용하여 정확도 높은 유동장을 측정하고 부유식방파제 주변에서의 와의 이동에 따른 방파성능을 분석하였다. 단독형의 경우 직사각형과 사다리꼴형상에 따른 흡수변화에 대하여 실험을 실시하였고, 2열형의 경우 전방 제 1방파제의 형상과 흡수를 변화시키고 동시에 제 2방파제와의 거리변화에 따른 전달율을 분석하였다. 또한, 방파성능 향상을 위하여 3열형 부유식방파제에서의 전달율을 분석하였다.

2. Laser Doppler Velocimetry(LDV) 실험

LDV는 레이저 빔을 단면으로 만들고 입자의 산란광을 후방산란(back scatter)방법으로 받아서 도플러 효과를 이용, 속

도에 대한 주파수를 획득하여 유속을 측정하는 장비로 매우 높은 정확도를 나타내며, 비접촉식이라는 장점을 가지고 있다. 실험에 사용한 LDV는 Dantec사의 제품이며, 측정렌즈의 초점거리는 310 mm이고 레이저 광은 아르곤이온 레이저 4000 mW를 최대로 출력하여 사용하였다. 광선 분산기를 사용하여 2차원으로 측정을 하되 한 파장에 대하여 데이터 45,000~60,000개를 case별로 20~45초 동안 한 지점에 대하여 2cm간격으로 수집하고 평균값을 취하였다. LDV는 현존하는 장비 중 가장 정확한 유속측정이 가능하나 상대적으로 PIV(Particle Image Velocimetry)에 비하여 측정시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. Fig. 1은 실험 시 LDV시스템의 제원과 관측한 전방구조물의 FOV (field of view)를 나타내었다.

3. 수리모형실험

본 연구는 구조물의 형상과 흡수, 거리 변화에 따른 부유식방파제의 방파효율성을 파악하기 위하여 2차원 수리모형실험을 수행하였다. 실험에 사용된 단면수로의 길이는 32.5 m, 폭은 0.6 m, 높이 1.1 m이며, 사용된 조파기는 피스톤형이다. 단독형일 경우 입사파용으로 1개(wave gage 1), 전달파용으로 1개(wave gage 2-1)의 파고계를 사용하였고, Fig. 2의 수리모형 실험 단면도와 같이 2열형일 경우 입사파용 1개(wave gage 1), 전달파용 1개(wave gage 2-2)를 사용하였으

Fig. 1. A schematic sketch of LDV system and FOV

Fig. 2. A brief sketch of the wave tank and LDV system

Fig. 3. Floating breakwaters in hydraulic experiments

Table 1. Wave conditions used in laboratory experiments

Case	Period T (sec)	Frequency f (Hz)	Wave Height H (m)	Wave Length L (m)	Wave Steepness (H/L)	(L/S_L)
Case 1	0.80	1.25	0.029	0.998	0.0291	0.10
Case 2	0.93	1.08	0.027	1.340	0.0201	1.34
Case 3	1.20	0.83	0.060	2.122	0.0283	2.12
Case 4	2.00	0.50	0.059	4.361	0.0135	4.36
Case 5	3.00	0.33	0.070	6.950	0.0101	6.95
Case 6	4.00	0.25	0.095	9.458	0.0100	9.46

며, 3열형일 경우 입사파용 1개(wave gage 1), 전달파용으로 1개(wave gage 2-3)를 사용하였다. 파고계위치는 구조물 전·후면으로부터 각 파장의 두 배인 지점에 각각 설치하였다. 수로의 길이를 고려하여 주기가 긴 파장은 한파장인 지점에 설치하였다.

2열형 부유식방파제의 설치 시 구조물간 거리(S)는 0.8 m, 1.6 m, 2.4 m인 지점에 설치하였다. 수심(h)은 0.6 m로 모든 실험에서 동일하게 적용 하였다. 구조물의 폭(B)은 수로의 폭과 똑 치는 0.59 m로 제작하여 구조물과 수조벽체로의 전달파를 최소화 하였고, 전방 제 1방파제의 홀수(D)는 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m로 변화를 주고 제 2방파제는 0.15 m로 고정시켰다. 입사 및 전달파의 측정은 Kenek사의 용량식 파고계를 사용하였고, 모의 테스트를 걸쳐 수로내의 에너지가 쌓이지 않는 범위인 45~120초 동안을 구분하여 측정하였다. Fig. 3과 같이 3열형 구조에서는 구조물간 거리를 0.8 m, 전방 제 1방파제의 홀수(D)를 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m로 동일하게 변화시켰으며, 제 2방파제와 제 3방파제는 0.15 m로 고정하였다. 본 실험에서는 구조물자체의 거동해석이 아닌 구조물의 형상 및 변수변화에 따른 전달계수 산정 및 방파성능 향상에 주된 목적이 있으므로 구조물을 수조의 상부에 고정시켜 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 파랑의 특성은 파장(L)은 0.99 m~9.50 m, 파고(H)는 0.027 m~0.095 m, 파형경사(H/L)는 0.02~0.03 정도의 규칙파에 해당한다. Table 1은 수리모형실험에 사용된 실험과 조건을 정리한 것이다.

4. 수치모형실험

수리모형실험의 결과검증을 위하여 비교적 규칙파에 탁월한 성능을 나타내는 CADMUS-SURF를 사용하였다. CADMUS-SURF에 대한 지배방정식은 식(1)-식(3)과 같으며, 각각의 식은 2차원 비압축성 점성유체를 대상으로 하는 연속방정식 식

(1)과 Navier-Stokes 방정식을 porous모델에 근거하여 확장한 운동방정식 식(2)와 식(3)을 의미한다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z u}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x w + S_w - R_z - \gamma_n g \quad (3)$$

여기서, t 는 시간을 나타내고, x, z 는 수평과 연직좌표, u, w 는 각각 유속의 수평 및 연직성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, v_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합을 의미한다. 또한, g 는 중력가속도, γ_n 는 공극률, γ_x, γ_z 는 각각 수평과 연직방향의 면적전달계수, S_p, S_u, S_w 는 조파원천을 위한 원천항, D_x, D_z 는 에너지 감쇠대를 위한 계수이며, $\lambda_x, \lambda_z, \lambda_n$ 는 구조물로부터 받는 관성력의 효과로서 $\gamma, \gamma_x, \gamma_z$ 및 관성력계수 C_m 를 사용하여 나타낼 수 있다.

5. 실험결과

5.1 유동 및 소용돌이(vorticity)

LDV 시스템을 이용한 유속측정에 있어서 자료의 양이 너무 방대한 이유로 2열형 중 제 1방파제와 제 2방파제 사이의 거리가 0.8 m일 때, 홀수별 결과만을 Fig. 4에 도시하였다. 본 실험에 적용한 조건 내에서 상대적으로 단주기에 해

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

(e) Case 5

(f) Case 6

Fig. 4. Comparisons of flow field and vorticity distribution for multi-arranged (2 pieces) breakwaters (left: seaward side, right: leeward side)

당하는 Case 1~Case 3의 실험결과인 Fig. 4(a)~(c) 경우, 유속 자체가 현저히 작기 때문에 큰 소용돌이의 발생은 없었으나, 비교적 장주기에 해당하는 Case 4~Case 6의 실험결과인 Fig. 4(d)~(f)의 경우 직사각형 구조에서 제 1방파제의 전면부와 제 2방파제의 후면부에 큰 소용돌이가 발생하였음을 알 수 있다. 반면 사다리꼴 형상의 경우 제 1방파제의 전면부에서는 파랑이 대체적으로 빠른 유속으로 진행하였으며, 제 2방파제 후면에서 큰 소용돌이의 생성을 나타내었다. 이는 전방 방파제의 형상변화에 따라 입사파의 진행 및 방파의 효율성을 보여주는 단적인 예라고 할 수 있다. (d) Case 4~(f) Case 6의 경우 직사각형 제 1방파제의 입사면에서 소용돌이의 궤적을 보면 파랑이 구조물 전면에 부딪히며 큰 소용돌이의 궤적을 형성하는 것을 확인할 수가 있다. Fig. 4의 그림 중 막대그래프는 각 case별 평균유속을 의미하며, 본 연구에서는 case별로 최전방 방파제에서 최후방 방파제로 전달되는 과정에서의 소용돌이 현상을 한주기에 대하여 평균적으로 나타내었다.

5.2 시간파형

파랑에너지 전달계수 산정의 타당성 제시를 위하여 수리모형실험 시 전방방파제와 후방방파제의 3cm 지점에 용광식 파고계를 장착하여 시간변화에 따른 자유수면의 데이터를 측정하였다. 획득한 데이터는 조파판으로부터 조파를 시작한 후 총 6개의 Case에 대하여 각각 약 200번의 파랑 모의 테스트를 걸쳐 파고데이터를 독취 후 수로 내 에너지가 쌓이지 않는 시점으로 사료되는 (Case 1은 45.20 sec, Case 2는 40.00 sec, Case 3은 34.30 sec, Case 4는 31.00 sec, Case 5는 24.00 sec, Case 6은 16.00 sec)이후 한 주기에 대한 시간파형을 나타내었다. 수치모형실험은 입사파가 안정화된 이후의 계산결과를 동일한 조건하에서 수리모형실험과 비교하였다. Fig. 5에는 2열형 구조일 때, 구조물간 거리가 0.8m 인 Case 3에 대하여 형상과 흡수변화에 따른 결과만을 대표적으로 나타내었으며, 직사각형구조물에 비하여 사다리꼴 형상의 구조물일 경우 제 1전방방파제의 입사 면에서 입사파가 상당수 투과되어 후방방파제에 전달되는 양상을 나타내었다. 2열형 전방 직사각형 구조물의 경우 전방 구조물의 흡수가 0.1 m일 때 수리모형실험 결과보다 수치모형실험 결과가 상

Fig. 5. Wave profiles for rectangular multi-arranged(2 pieces) breakwaters(left: seaside, right: leeside)

대적으로 조금 높은 것을 제외한 수치모형실험과 수리모형실험의 결과는 대부분 잘 일치하는 것으로 나타났다. 정리된 결과를 보면, 구조물 전방의 자유수면의 높이가 제 2방파제의 후방보다 높은 것을 확인 할 수 있다. 반면, 입사파의 주기가 길어질수록 후방방파제에서 발생하는 파랑은 상대적으로 커지는 현상을 보였다.

5.3 파랑 에너지 전달계수

수리모형실험을 통한 단독형과 2열형 직사각형, 사다리꼴형에 대한 흡수 변화 및 거리변화에 따른 전달계수를 중심으로 방파제의 성능을 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6~Fig. 8에서 횡축은 L/S_L 를 적용하였으며, 종축은 전달계수(C_t)를 의미한다.

종축은 구조물의 흡수를 3가지로($D=0.10$ m, 0.15 m,

Fig. 6. Transmissivity variation of multi-arranged (2 pieces) breakwaters ($h/D=6.00$)

Fig. 7. Transmissivity variation of multi-arranged (2 pieces) breakwaters ($h/D=4.00$)

Fig. 8. Transmissivity variation of multi-arranged (2 pieces) breakwaters ($h/D=3.00$)

Fig. 9. Transmissivity variation of multi-arranged breakwaters ($h/D=6.00, 4.00, 3.00$)

0.20 m) 변화시키고 구조물간 거리(0.8 m, 1.6 m, 2.4 m)를 변화시켜 측정된 부유식방파제의 전달계수변화를 나타내었으며, 그래프의 횡축은 L/S_L 를 사용하였다. 이것은 전달파랑의 파장과 구조물의 비로써, 값이 증가할수록 부유체 체체길이에 비해 파장이 상대적으로 긴 장주기 영역이 됨을 의미한다.

Fig. 6은 수심흘수비 h/D 가 6.00일 때 단독형과 거리 변화에 따른 2열형 구조물의 전달계수를 직사각형과 사다리꼴 형상을 구분하여 나타낸 것이며, 직사각형의 경우 L/S_L 가 0.998인 비교적 단파 영역에서 최소 전달계수를 보이고, Fig. 6의 사다리꼴형은 L/S_L 가 1.34 근처인 영역에서 안정적인 최소 전달성향을 보이고 있다. Fig. 7의 h/D 가 4.00인 흘수 0.15 m에서는 직사각형 구조물 L/S_L 가 0.998 근처에서, 사다

리꼴형에서는 단독형을 제외한 2열형의 L/S_L 가 0.998, 1.34에서 최소 전달양상을 보였다. 장주기에 해당하는 Case 4-6은 방파효율성이 설계기준을 상당수 초과하며 전달되는 경향을 보였으며, 상대적으로 단주기인 Case 1~Case 3에 비하여 전달성향이 높게 분석되었다. 상대적으로 주기가 긴 파랑의 진행이 제 1전방방파제 구조물 전면에서 일부 쇄파되고 나머지는 상당수가 제 2, 제 3방파제로 전달되기 때문이라 판단된다. 또한, 파고의 변화보다는 주기에 의한 영향이 전달성향에 더 좀 더 지배적인 영향을 주는 것으로 판단되며, Fig. 4에서와 같이 상대적으로 장주기에 해당하는 경우 후방 방파제에서 소용돌이의 성향이 두드러지게 나타났다.

5.4 수치 및 수리모형실험 결과 비교

Figs. 6~8의 결과 중 장파 영역대인 Case 4~6의 방파성능 개선을 위하여 3열형 구조에서의 수리모형실험을 실시하였으며, 수치모형 결과와 비교하였다. 비교적 단파영역인 Case 1~3의 경우 수치모의 결과가 수리모형실험의 결과보다 전달 성향이 높은 것에 비하여 장파영역인 Case 4~6에서는 수치 모의 결과가 낮은 전달계수를 보였다. 수치모의 결과와 수리 모형실험의 결과는 비교적 비슷한 양상을 나타내었다. 2열형 결과 중 Case 4의 경우 전달계수 산정에 있어 설계기준인 0.5를 대부분 초과하는 반면, 3열형에서는 대부분이 0.5 이하로 비교적 안정적인 방파성능 결과를 나타내었다. 이는 구조물의 길이가 상대적으로 늘어남으로 인해 형상고유주기의 변화에 따라 구조물 전·후로 파랑이 소산된 것으로 분석된다.

6. 결 론

본 연구는 각각의 변수들에 의한 부유식방파제의 방파성능을 전달계수에 따라 분석하였다. 전달계수는 각각의 주어진 흘수변화에 따른 최소값을 가지는 L/S_L 가 존재하며, 단독형 구조물의 경우와 2열형 구조물의 경우 2열형의 전달계수는 비교적 L/S_L 가 작은 단파영역에서 많이 낮아진다. 또한, 대체적으로 단독형을 제외한 2열형 구조물의 경우, 방파제사이의 S/L 가 클수록 방파성능이 좋고 사다리꼴형 구조물보다 직사각형 구조물일 경우 비교적 큰 장파 영역 내에서 전달계수가 낮은 성향을 나타내었다. 구조물 마다 고유형상주기가 있어 파랑의 전달이 각각 다른 양상을 나타내었으며, 장주기에 있어 2열형의 실험 결과보다 3열형에서 높은 방파성능을 나타내었다. LDV시스템을 이용한 유속측정에 있어 장주기에 해당하는 Case 5와 Case 6의 경우 2열형 제 2방파제 후면에서 와류의 성향이 두드러졌으며, 이는 구조적 고유형상주기와 관계해명을 하는 것으로 사료되며, 파고보다 주기변화에 따른 전달 성향이 강하다는 것을 나타내고 있다.

구조물 후면에서 소용돌이의 생성 및 소멸시점을 보면 파랑의 주기와 관계시켜 비교를 해본 결과 Case 1 보다 주기

는 길지만 작은 파고를 가진 Case 3에서 소용돌이의 강도가 강하게 나타났으며, 주기가 길수록 부유식방파제 자체의 에너지 전달율이 상승하므로 파고의 전달을 또한 상승한 것으로 판단된다. 또한, 단주기에 해당하는 Case 1~3의 경우 소용돌이의 궤적운동에 의해 생겨나는 파랑 에너지의 소산이 빨라 제 2방파제의 후면에 전달되는 파랑변형이 작아지는 경향을 나타내었다. 장주기에 있어 수리모형실험과 수치모의 결과를 분석해보면 3열형 흘수 20 cm($h/D = 3.00$)에서 가장 이상적인 방파성능을 나타내었으며 특히, Case 4의 경우 2열형에 비하여 3열형에서의 실험결과가 안정적인 방파성능을 보였다.

감사의 글

본 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구 결과입니다 (과제번호 2010-0022337).

참고문헌

- 박재현, 안용호, 김도영 (2000) 상자형 부유식 방파제의 소파성능 개선을 위한 실험적 연구, **한국해양환경공학회논문집**, 제3권, 제2호, pp. 41-48.
- 윤종성, 이민규, 정황교 (2005) 부유식방파제의 설치에 따른 유동 및 난류구조 해석, **대한토목학회 논문집**, 제25권, 제5B호, pp. 375-383.
- 이정우, 조원철 (2005) 약비선형 파랑하중에 대한 부유식방파제의 동적거동해석, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, pp. 2023-2026.
- 조일형 (2002) 계류된 사각형 부유식방파제의 파랑제어성능, **한국해양환경공학회 논문집**, 제5권, 제3호, pp. 35-44.
- Chakrabarti, S.K. (1994) *Offshore structure modeling*. World Scientific, Singapore, pp. 470.
- Tsinker, G.P. (1995) *Marine structures engineering specialized applications*, Chapman & Hall, New York, pp. 269.

© 논문접수일 : 10년 08월 19일
 © 심사의뢰일 : 10년 08월 25일
 © 심사완료일 : 10년 12월 07일