

투수식 소파판에 의한 파랑의 반사와 통과 Reflection and Transmission of Waves due to Permeable Wave Barriers

전찬후¹, 고광오², 박구용³

Chan Hoo Jeon¹, Kwang Oh Ko² and Koo Yong Park³

1. 서 론

급증하는 수요에 대처하고, 이용객에게 친수 및 여가공간을 제공하는 한편, 해경선박을 위한 공간확보를 목적으로 부산항 국제여객 및 해경부두(이하 부산해경부두) 축조공사가 실시되고 있다. 본 공사의 원안설계에서 계획한 돌제 및 파제제는 중력식 구조물로 계획되었다. 그러나 원안설계는 항내의 해수정체로 인한 수질악화와 지반개량 및 매립시 부유토 등에 의한 환경문제 및 장주기파에 대한 반사율 증가 등이 예상되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 대안설계에서는 신개념의 투수식 소파판을 설치한 잔교식 구조형식을 채택함으로써 다음과 같은 효과를 얻고자 하였다. 첫째, 해수소통이 가능하여 항내오염을 방지할 수 있고, 항내퇴적물을 최소화할 수 있다. 둘째, 파랑의 통과율을 저감하여 항내 정온도를 향상시키는 등 수리특성을 개선할 수 있다. 셋째, 부산항 항로측으로의 반사파를 저감하여 선박 안정성을 증가시킨다. 넷째, 해상작업의 최소화 등에 따른 시공공기의 단축 및 환경오염을 최소화할 수 있다.

투수식 소파판을 적용한 사례로는 프랑스의 Dieppe항 방파제, 미국 샌프란시스코항의 Pier #39 구조물, 그리고 미국 시애틀의 Everette항의 접안시설 등이 있다. 이 중, 미국 시애틀 Everette Homeport 해군기지 항공모함 접안시설 구조물은 투수식 소파판을 적용하여 항내의 정온도, 접안 및 계류시설의 안정성을 확보하고, 파랑의 반사율을 최저화하여 외측 기준항로의 영향을 최소화하도록 설계되었다(Rusten and

Zahn, 2000). Everette항의 접안시설 겸 파제 구조물은 요구되는 통과율과 반사율에 따라 각 열의 배열 간격과 소파판의 개구율을 결정하였다. 현재 이 구조물은 소요의 통과율 및 반사율을 만족시키는 것으로 관측되고 있으며, 사용성 및 운용성이 우수한 것으로 보고되고 있다.

투수식 소파판을 적용시키려는 부산항은 외항 방파제(오륙도 방파제 및 조도 방파제)에 의하여 파랑이 1차 저감되어 미국 시애틀 Everette 해군기지의 적용사례와 유사한 설계과 조건과 해저지반 조건을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 미국 Everette 해군기지를 모델로 부산해경부두 축조공사의 파제제에 계획된 투수식 소파판에 의한 파랑의 반사와 통과에 대해 수치모형실험으로 수리모형실험 결과와 비교하였다.

2. 수리모형실험

수리모형실험은 2차원 조파수로에서 수행하였다. 수로는 길이 97m, 폭 2m, 높이 2.7m이며, 프로그램을 통해 다양한 파랑을 조파할 수 있는 흡수식 조파기가 설치되어 있어 최대 파고 1.1m의 파랑을 조파할 수 있다. 조파기의 반대편에는 금속 흡수재로 된 소파장치가 있어 반사율을 5% 미만으로 제어할 수 있으며, 측면은 다중 유리벽으로 이루어져 있어 수로 내부의 관측이 용이하다. Fig. 1은 수로와 설치된 모형 및 장치 등을 나타낸다. 소파판 1은 가장 외해쪽에 위치하고, 소파판 2와 3 순으로 육지 방향으로 위치하고 있다.

1 현대건설(주) 기술개발원(기술연구) 사원

2 현대건설(주) 기술개발원(설계) 파장

3 현대건설(주) 기술개발원(설계) 항만 및 수자원 팀장

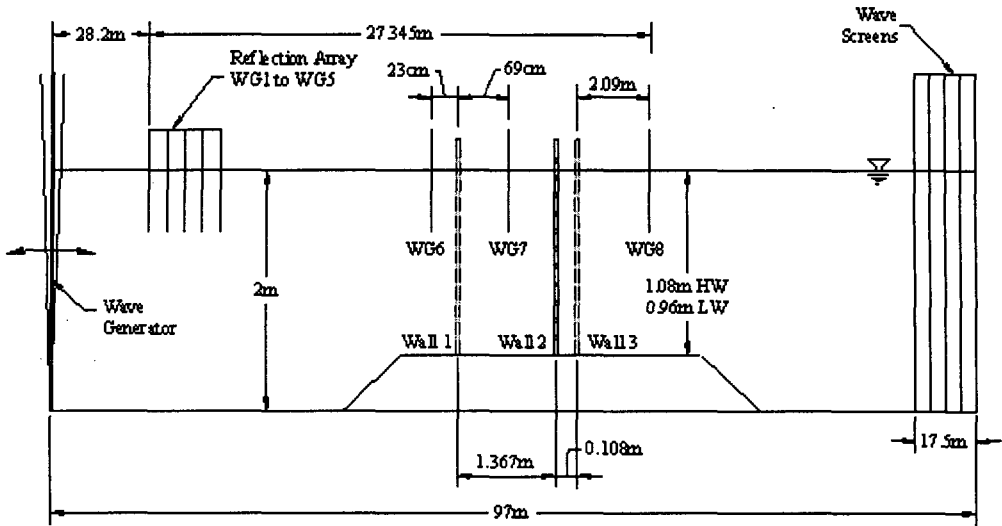


Fig. 1 수리모형실험 제원

투과성 소파판으로 인한 파랑 감쇠의 중요한 메커니즘 중 하나는 소파판 주변에서 발생하는 난류에너지의 소산이다. Froude 축척을 적용하면서 모형과 원형에서 난류흐름의 상사를 확보하기 위해서는 축척을 크게 하는 것이 바람직하다. 그러나, 축척은 수로의 크기에 제한을 받기 때문에 이를 고려하여 1/12의 축척을 사용하였다. Table 1은 원형과 모형에서 파랑변수를 나타낸다.

Table 1. 원형과 모형의 파랑변수

원형		모형	
Hs,p (m)	Tp,p (s)	Hs,m (m)	Tp,m (s)
2.35	12	0.20	3.46
2.5	7.7	0.21	2.22
1.4	15	0.12	4.33

Table 2. case별 실험조건

case	h(m)	Hp(m)	Tp(s)	Wave Type	개구율			B1	B2
					λ 1	λ 2	λ 3		
개구율 구성 1									
1	12.94	2.35	12	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
2	12.94	2.5	7.7	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
3	12.94	1.4	15	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
7	11.5	2.35	12	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
8	11.5	2.5	7.7	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
9	11.5	1.4	15	TMA	0.291	0.29	0.163	16.4	1.3
개구율 구성 2									
13	12.94	2.35	12	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3
14	12.94	2.5	7.7	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3
15	12.94	1.4	15	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3
19	11.5	2.35	12	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3
20	11.5	2.5	7.7	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3
21	11.5	1.4	15	TMA	0.291	0.22	0.163	16.4	1.3

실험을 수행하였다.

본 실험에서는 Table 2에 나타난 것과 같이 두 번째 소파판의 개구율을 변화시킨 두 가지 구성에 파랑변수와 수심을 변화시킨 12가지 경우에 대해 수리모형

표에서 h는 수심, Hp는 유의파고, Tp는 유의파 주기, λ 는 소파판의 개구율, B는 소파판 간격을 나타낸다. 개구율은 전체 길이와 개구부 길이의 비로 계산하

였으며, 소파판 사이의 간격은 모든 경우에 동일하게 하였다. 또한, 각 구성에 대해 전후 소파판 개구부에 의한 차단효과를 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 소파판을 배열하였다. 축척계산에 의해 소파판 1과 2 사이의 간격은 1.37m로 하였고, 소파판 2와 3 사이의 간격은 0.108m의 간격을 두었다. 본 수리모형실험에서는 TMA 스펙트럼을 이용하여 생성한 불규칙파를 입사파로 사용하였다.

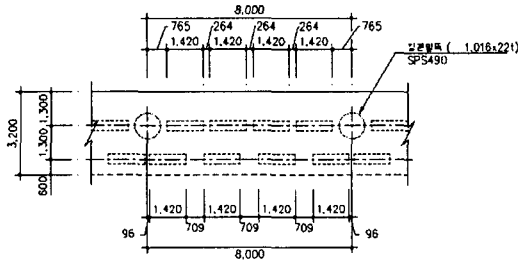


Fig. 2 차단효과를 고려한 소파판 배열

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

$$\lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z u w}{\partial z} = -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) - D_x w + S_w - R_z - \gamma_\nu g \quad (3)$$

또한, 장시간 해석시 해석영역 양단에 미치는 영향을 최소화하기 위해 Sommerfeld 방사경계조건과 에너지감쇠대를 사용하였다. 에너지 감쇠대는 파의 에너지를 서서히 감쇠시키는 것으로 추가의 계산영역이 필요하지만, 여러 파형에 대해 적용이 가능하고, 안정된 결과를 쉽게 얻을 수 있다(수치파동수로연구회, 2003).

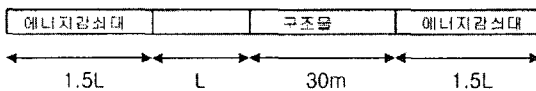


Fig. 3 해석영역

Fig. 3은 수치파동수로의 해석영역을 나타낸다. 양쪽경계에 위치한 에너지감쇠대의 길이는 시행착오 결과 1.5파장으로 하였고, 조파소는 감쇠대의 우측에 위치하며, 조파소로부터 1파장 우측에 구조물을 위치시켰다. 해석시간의 절감과 구조물의 정확한 표현을 위해 가변격자를 사용하였고, 구조물 주변의 격자망은 Fig. 4에 나타내었다.

3. 수치모형실험

3.1 CADMAS-SURF

수치파동수로(CADMAS-SURF)는 유체를 2차원 비압축성 점성유체로 가정하여 식 (1)~(3)과 같은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 확장한 운동량 방정식을 지배방정식으로 한다. 여기서, ρ 는 유체의 밀도, ν_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, γ_ν 는 공극율, γ_x, γ_z 는 수평과 연직방향의 면적투과율, λ 는 구조물에 의한 관성력 효과, D_x, D_z 는 에너지 감쇠대를 위한 계수, S 는 조파소스항, R 은 다공질체로부터의 저항력을 의미한다.

CADMAS-SURF에서 자유표면 해석모델은 복잡한 표면형상의 해석이 가능한 VOF법을 채용하였다. VOF함수 F는 유체의 체적율을 나타내므로 유체영역 뿐만 아니라 기체영역까지 적용이 가능하다.

입사파는 유의파고 및 유의파 주기에 해당하는 규칙파를 사용하였고, 실험조건은 Table 2의 수리모형 실험조건과 동일하게 수행하였다.

Fig. 4에 나타낸 것과 같이 소파판의 배열은 차단효

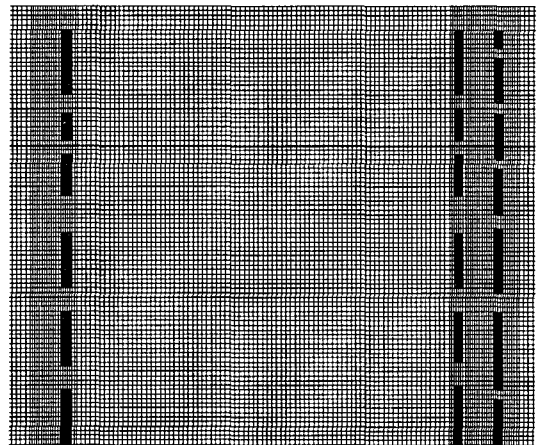


Fig. 3 격자망과 구조물 위치

파를 고려하기 위해 Fig. 2와 유사하게 하였고, 횡배열된 실제 구조물과 종배열된 수치모형의 구조물간의 차이를 최소화하기 위해 자유수면 부근에는 구조물을 위치시키지 않았다.

3.2 MPB(Multi-wall Porous Breakwater)

여러 겹의 소파판을 가진 구조물은 내부에서 파랑의 다중반사가 발생하기 때문에 해석이 복잡하다. 따라서, 비선형 수두 손실을 표현하기 위해서 여러 번의 반복 계산이 필요하고, 각 반복 계산에서 여러 개의 선형 방정식을 풀어야 한다(실험보고서, 2003). Fig. 5은 다중 소파판의 개념도이다.

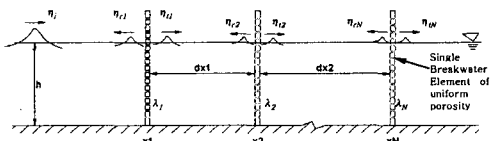


Fig. 5 MPB 모델 체계의 개념도

n번째와 n+1번째 소파판 사이에서 파랑의 진행 방향과 진행반대 방향으로 진행하는 파랑은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{i,n+1} = A_{i,n+1} \quad (4)$$

$$\eta_{r,n+1} = A_{r,n+1}$$

여기서, 진폭 $A_{i,n}$ 과 $A_{r,n}$ 은 허수이다. N개의 소파판을 갖는 구조물의 경우에 2N개의 미지 진폭이 나타나므로 2N개의 방정식이 필요하다. 따라서, 각 소파판을 해석하기 위해서는 두 개의 방정식을 해석해야 한다. n번째 소파판에서의 방정식은 식 (5)와 (6)과 같다. 여기서, α_n 은 식 (7)과 같다.

$$A_{i,n}e^{-ikx} + A_{r,n}e^{ikx} + A_{i,n+1}e^{-ikx} + (-1 - \alpha_n) + A_{r,n+1}e^{ikx}(-1 + \alpha_n) = 0 \quad (5)$$

$$A_{i,n}e^{-ikx} - A_{r,n}e^{ikx} - A_{i,n+1}e^{-ikx} + A_{r,n+1}e^{ikx} = 0 \quad (6)$$

$$\alpha_n = \frac{4}{3\pi} \frac{K_n k H_i (A_{i,n+1} e^{-ikx} - A_{r,n+1} e^{ikx})}{2\lambda_n^2 \sinh(kh)} \times \frac{3\sinh(kh) + \frac{1}{3}\sinh(3kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (7)$$

실험조건은 수리모형실험 및 CADMAS-SURF에 의한 수치모형실험과 동일하게 수행하였다. 그리고, 본 수치모형실험에서는 마찰계수를 'high'와 'low'의 경우로 나누어 수행하였다. 'high'인 경우는 소파판이 하나인 경우(SPB model)로부터 얻은 경험상수로 결정된 것이고, 'low'인 경우는 두 번째와 세 번째 소파판 사이에서 발생하는 난류 소산을 좀더 정확히 모의

하기 위하여 미국 Everette항의 수리모형실험 자료를 바탕으로 산정한 것이다.

4. 결 과

Fig. 6은 첫 번째 소파판 전면 2.75m에 위치한 파고계(gage1)과 첫 번째와 두 번째 소파판 사이에 위치한 파고계(gage2)에서 측정된 파고를 비교한 것이다. 삼각형은 수리모형실험에서 측정된 값이고, 사각형과 원형은 CADMAS-SURF에 의한 수치모형실험의 결과값을 나타낸다. 수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 잘 일치하고 있다. case 1,2,3 과 case 7, 8, 9는 수심 이외에는 파랑특성이 동일하다. 그림에 나타난 것과 같이 수심과는 상관없이 파고의 크기 및 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 다만, gage2에서 약간의 차이가 발생하는 것은 2차원 수치모델로는 횡배열된 구조물에 의한 난류에너지 소산을 정확히 재현하지 못했기 때문이다.

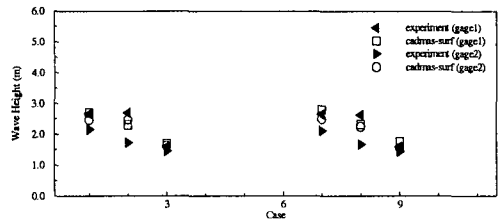


Fig. 6 소파판 전면과 중간지점 파고 비교

투수식 소파판에 의한 파랑의 반사율과 통과율을 Fig. 7와 8에 나타내었다. 그림에서 사각형은 수리모형실험의 결과값을 의미하고, 원형은 CADMAS-SURF에 의한 수치모형실험값이며, 삼각형은 MPB 모델에 의한 결과값이다. 실험에 사용된 파랑의 특성은 세 종류로 분류할 수 있다. case 1, 7, 13, 19는 파고 2.35m, 주기 12 sec의 파랑을 입사파로 하였고, case 2, 8, 14, 20은 파고 2.5m, 주기 7.7sec이며, case 3, 9, 15, 21은 파고 1.4m, 주기 15sec의 파랑을 조건으로 하였다. 그림에 나타난 것과 같이 주기 12sec와 15sec의 파랑은 수리모형실험 및 수치모형실험의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나, 주기 7.7sec의 파랑은 수리모형실험의 결과값과 수치모형실험의 결과가 다소 차이를 보이고 있다. 그리고, 파랑의 통과율도 일치된 경향을 보이고는 있으나 값에서 차이를 나타낸다. 이는 수치모형실험에 사용된 모델이 2차원 모형으로 횡배열된 투수식 소파판의 표현에 한계가 있어 강한 비선형성을 갖는 파랑의 난류에너지 소산을 제대로 재현하지 못하기 때문이라 판단된다. 또한, 수리모형

실험에서는 불규칙파를 입사파로 하였으나, 수치모형실험에서는 규칙파를 입사파로 한 점도 결과값 차이의 원인으로 분석된다.

Fig. 9 ~ 11은 파랑 특성별로 수리모형실험과 수치모형실험 결과값의 상관관계를 나타낸다. 각 그림에서 (a)에는 반사율, (b)에는 통과율을 나타내었다. Fig. 10(a)의 반사율을 제외한 나머지 그래프에서는 수리모형실험과 수치모형실험이 상관계수 0.85 이상을 나타내며 만족할 만한 결과를 보이고 있다.

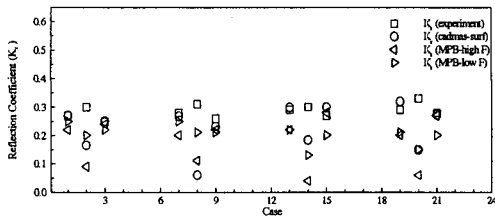


Fig. 7 case에 따른 반사율

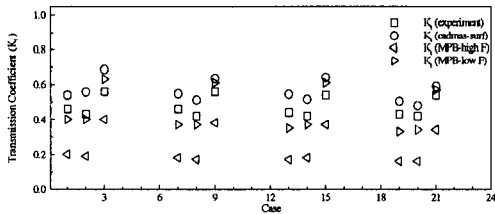


Fig. 8 case에 따른 통과율

5. 결 론

본 연구에서는 부산해경부두의 대안으로 제안된 투수식 소파판을 적용한 파체계 구조물에 대한 수리모형실험 및 수치모형실험의 결과를 분석하였다. 수리모형실험은 1/12의 축척으로 제작하였고, 파랑변수는 세 개의 파고와 주기를 사용하였다. 또한, 수리모형실험과 입사파를 제외한 동일한 조건에서 CADMAS-SURF와 MPB 모델을 이용한 수치모형실험을 실시하여 두 실험의 반사율과 통과율을 비교하였다. 그러나, 2D 및 1D 수치모델로는 횡방향으로 배열된 소파판을 정확히 재현할 수 없어 차이를 최소화하는 방향으로 중배열하여 해석을 실시하였다.

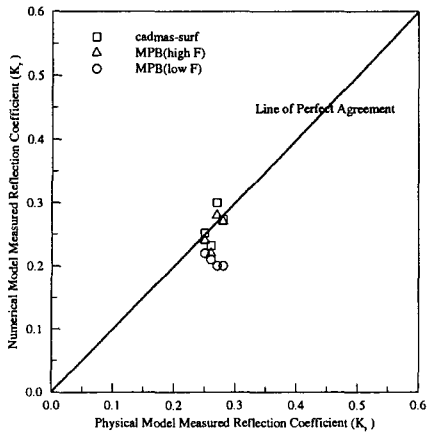
수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 파고비 (h/L)가 큰 경우를 제외하고는 잘 일치하였다. 파고비

가 큰 경우의 불일치는 강한 비선형성에 의한 난류에너지 소산율 중배열 구조물이 표현하지 못하기 때문이라 판단된다. 또한, 입사파가 수리모형실험에서는 불규칙파인데 반해 수치모형실험에서는 규칙파인 점도 결과값 차이의 원인이다. 연구결과, 원안(통과율 0.45, 반사율 0.6이상)과 비교하면, 파고 1~2.5m, 주기 7~15초의 상시파에 대한 반사율(0.3이하) 저감이 우수한 것으로 검토되었으며, 이에 의한 항내의 접안 및 계류 시설의 선박가동율을 더욱 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 항외의 부산항 항로에 대한 반사율에 의한 항로교란을 최소화하는 것으로 판단된다.

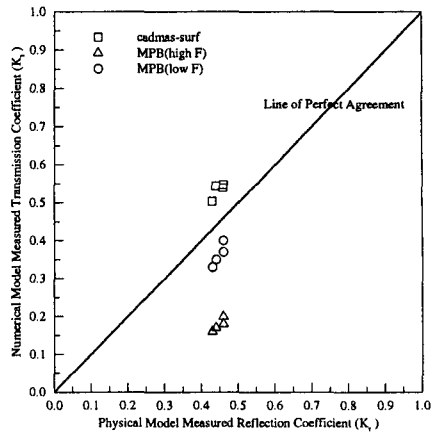
향후 불규칙파를 입사파로 하는 수치모형실험과 횡배열 소파판에 의한 효과를 정확히 재현할 수 있는 3D 모델을 사용한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- 수치파동수로의 연구 및 개발 (2003). 수치파동수로 연구회 번역.
- 실험보고서 (2003). 부산항 국제여객 및 해경부두 축조공사 대안설계, 제4권
- Arnfinn Rusten and Janice Zahn (2000). "Design-construction of a breakwater/pier structure at U.S. Naval Station Everett." PCI Journal, pp.28-pp.39

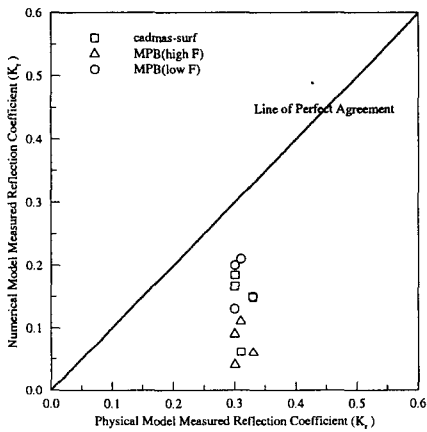


(a) 반사율

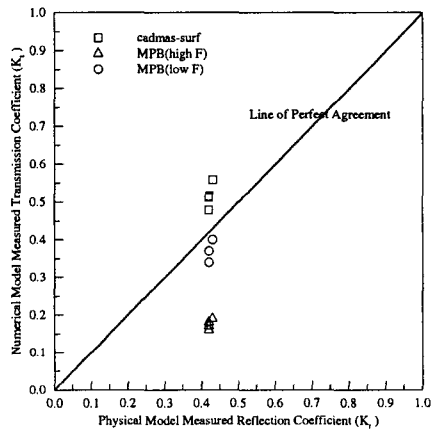


(b) 통과율

Fig. 9 수리모형실험과 수치모형실험의 결과 비교(파고 2.35m, 주기 12sec)

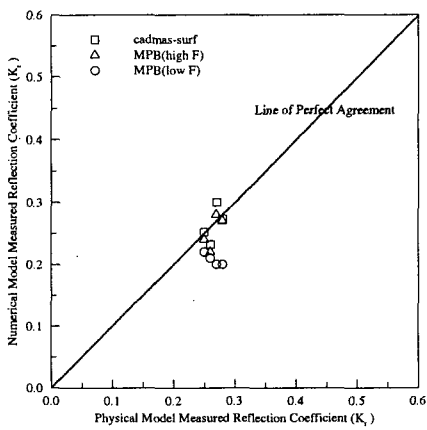


(a) 반사율

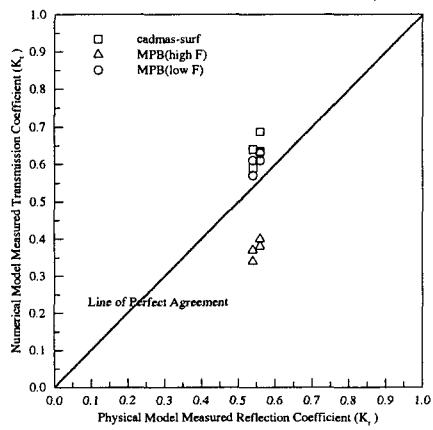


(b) 통과율

Fig. 10 수리모형실험과 수치모형실험의 결과비교(파고 2.5m, 주기 7.7sec)



(a) 반사율



(b) 통과율

Fig. 11 수리모형실험과 수치모형실험의 결과비교(파고 1.4m, 주기 15sec)