

해수교환효과를 고려한 방파제의 수리특성검토 Hydraulic character of the breakwaters with a function of water exchange using hydraulic model tests

김현민¹ · 김규한²
Hyun min Kim¹ and Kyu Han Kim²

1. 서 론

방파제는 항만계획에 있어서 항만을 구성하는 요소 중 가장 대표적인 요소이다. 방파제의 근본적인 목적은 외해로부터 내습하는 파랑의 에너지를 차단하여 정온한 수역을 확보함으로써 어민의 안전과 생활터전을 보호하는 데 그 목적이 있다. 하지만, 이렇게 조성된 항내 정온수역은 항 입구를 제외한 항내·외를 완전히 차단시킴으로써 항내·외의 해수순환 기능이 크게 저하되어 항내 수질 오염의 주 원인이 되고 있는 실정이다.

최근 항내 수질오염의 문제가 사회적인 이슈(Issue)로 떠오르면서 항내 오염문제가 방파제의 설계와 배치에 있어서 중요한 설계요소가 되고 있다. 그러므로 방파제 기본기능뿐만 아니라 해수교환 기능까지 겸비한 방파제의 개발이 필요하게 되었으며, 이에 해수교환을 목적으로 여러 검토가 이루어지고 있다.

하지만, 파랑이 탁월한 해역에서 방파제의 역할을 주로하고 또한 해수교환의 효과를 겸비하고자 하는 목적으로 검토된 사례는 매우 드물다.

따라서, 본 연구에서는 2차원 단면수리모형실험을 통하여 파랑이 탁월한 해역에서 파랑을 제어하는 기존 방파제의 주 목적 이외에 항내의 수질정화의 기능을 증가시킬 수 있는 해수교환효과를 가진 새로운 형식의 방파제의 안정성 및 여러 수리특성을 파악하고자 수행하였다.

2. 수리실험

2.1 실험조건

본 실험에 사용된 실험장치로는 2차원 불규칙 조파기, 측정장치로는 용량식파고계, 그리고 실험제어 및 자료 처리장치로는 A/D, D/A 변환기, PC 등이 있다.

2차원 수로(two-dimensional flumes)는 Fig 1, Fig 2에 나타내는 바와 같이 폭(B) 0.7m, 높이(H) 1.5m, 길이(L) 40m로 조파부와 소파부 6m를 제외한 34m구역의 양면이 강화유리로 제작되어 실험단면 뿐 아니라 입사파랑의 전반적인 경향에 대하여 관측할 수 있도록 설계되었다.

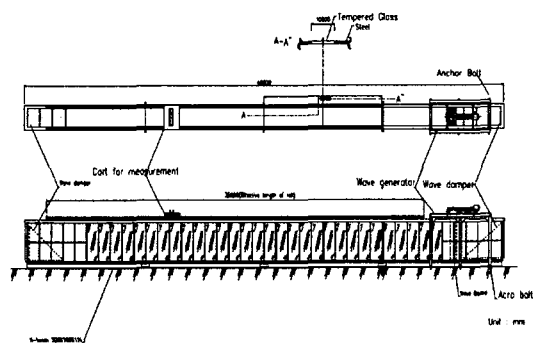


Fig. 1. 조파수로 단면.

1 이레이엔씨 (ERE E&C, Korea)

2 관동대학교 건설환경시스템공학부 (Division of Civil and Environmental System Engineering, Kwandong University, Yangyang, Kangwondo 215-802, Korea)

특히, 본 설비는 Goda의 입반사분리법에 기초한 반사파제어가 내장되어, 반사파를 수조자체에서 제어하면서 수행이 가능하다.

모형하상은 두 가지 경사로 설치하였으며, 시작 부분의 3m 구간은 1/10, 7m 구간은 1/20의 경사로 제작하였으며, 이후로 실험단면 설치부분까지 1/50의 경사로 제작하였다.

하상지면은 콘크리트로 타설하였으며, 모형 하상의 제작 후 불규칙파 조파신호를 검증하기 위한 입사파 검증 실험을 수행하였다.

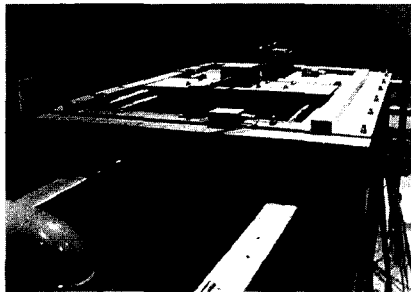
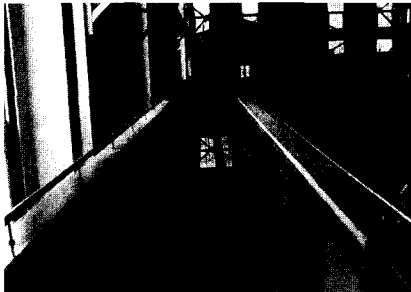


Fig. 2. 2차원 수로와 불규칙 조파기.

Table 1. 실험장비 제원

구분	내용	비고	
수조(m)	0.7×1.5×40 (B×H×L)		
조파기	최대발생파고(m)	0.3	피스톤식
	발생주기(sec)	0.1~3.0	
	발생파	규칙파 및 불규칙파	
계측장비	파고계	8채널	용량식
	비디오카메라	1대	디지털
	카메라	1대	디지털

2.2 실험내용

해수교환 기능을 겸비한 방파제를 개발할 때에는 일반 방파제와는 다른 요소들이 있겠지만, 본 연구에서는 기존의 방파제에 단순히 해수소통관로만을 내장한 방파제 단면 A, B를 계획하였다.

단면 A는 조수간만의 차가 적은 지역에서, 평상시 빈번한 작은 파가 내습할 때 해수소통이 가능하도록 설계되었다. 소파블록 배후의 Cap con'c 부분에 해수유입관로를 설치하여, 소파 후 해수가 향내로 유입되도록 하였다.

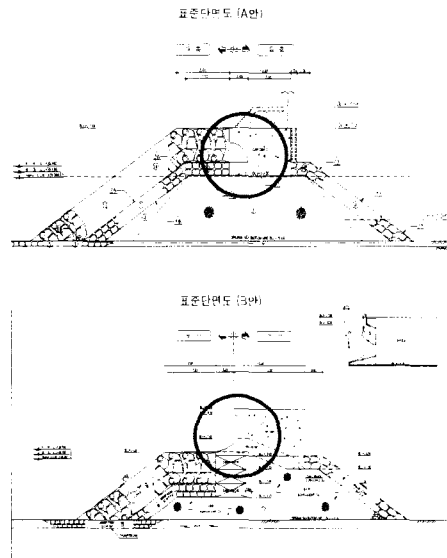


Fig. 3. 단면A와 단면B.

단면B는 단면A와는 다르게 해수소통이 가능하도록 설계되었다. 단면B와는 다르게 해수소통량의 증가를 위해서 Cap Con'c전면에 소파블록을 가지하지 않았으며, 파돌림공을 설치하여 율파를 방지할 수 있도록 계획하였다.

본 연구에서는 앞에서 서술한 바와 같이 단면 A와 단면B를 이용하여, 단면 2차원 불규칙파 실험을 수행하였으며 불규칙파 스펙트럼은 Bretschneider - Mitsuyasu 스펙트럼을 목표스펙트럼으로 하여 실험을 수행하였다. 입사파고와 주기는 유의파고($H_{1/3}$)와 유의주기($T_{1/3}$)를 각각 이용하였다.

단면A 및 단면B에 대해서 안정성 실험 및 반사파측정, 전달율 측정실험을 수행하였으며, 율파량 실험 및 해수소통량 측정도 동시에 실시하였다. 이상에서 언급한 실험조건을 실험별로 파고 및 주기를 나타내면 Table 2와 같다.

Table 2. 각 실험별 파고 및 주기

구분 실험	파고	주기
안정성	4m, 6m	13sec
전달율 반사율	1.5m~6.0m	6.0sec~13.0sec
월파량	6.0m	13.0sec
해수소통량	4m, 6m	12sec, 13sec

2.3 안정성 실험

각 단면별로 실제에서 4시간 동안의 설계파랑 작용시간인 34.29분 동안 조파를 실시하여 방파제의 활동량을 측정하였으며, 활동량측정은 육안 및 실험 전, 후의 사진을 이용하여 분석하였다. 상치콘크리트와 체체의 안정성은 수로의 유리면에 체체위치를 표시한 후 내습파에 의한 체체의 움직임을 육안으로 관찰하였다.

2.4 반사율의 측정

방파제의 반사율 측정 실험은 파고 1m부터 파고 6m까지 1m씩 증가시키면서 실시하였으며, 주기는 각 6.0~13.0sec로 변화하여 실험을 수행하였으며, 파고 및 주기에 따른 반사율의 변화를 관찰하였다.

반사율측정은 Goda의 2점법을 이용하여 입사파와 반사파를 각각 분리하여 실험을 수행하였다.

따라서, 반사계수는 방파제 전면에 4m 떨어진 거리에서 2개의 모형파고계를 통해 입반사를 분리하여 입사파고와 반사 파고를 측정한 후 아래의 식으로 평균 반사계수를 구하였다.

$$\text{반사율 (\%)} = \frac{\text{반사파고}}{\text{입사파고}} \times 100$$

2.5 전달율의 측정

방파제 배후의 전달과는 해수소통구 및 월파에 의한 경우와 블록의 체체를 뚫고 나오는 침투에 의한 투과파로 구성되어 있다. 또한, 월파가 없는 평상파에 대해서도 해수소통량의 영향이 있기 때문에 평상파에 대해서도 실험을 수행하였다. 수로 내 방파제 후면 1m지점에 모형파고계를 설치하여 약 10분간 전달파고를 측정하였다. 전달파 측정은 항내측 2개소에 파고계를 설치하여 항외측의 파고에 대한 비로 산출하였다.

$$\text{전달율 (\%)} = \frac{\text{전달파고}}{\text{입사파고}} \times 100$$

2.6 월파량의 측정

20 cm × 30 cm × 70 cm 의 눈금이 표시되어 있는 사다리꼴 모양의 월파량 측정기로 1시간(모형 8.57분)동안 측정하여 단위폭 당 월파량을 계산하였다.

2.7 해수소통량의 측정

본 실험에서의 해수소통량 측정은 유량측정기를 설치하여 항내로 유입되는 소통구 1개소당의 해수 유입량을 단위폭 당 유량으로 계산하였다.

3. 실험결과

3.1 안정성 실험결과

안정성 실험은 단면 A, B에 대하여 약최고 만조시의 설계파의 조건으로, 주기 13sec, H=5.0m, T=6.0m의 두 가지 조건에 대해 실시하였으며, 단면 A, B에 대해 모두 안정한 것으로 나타났다. 실험시 파랑작용시간은 현지에서 4시간 1/49인 34.29분을 사용하였으며, 이때 방파제 체체의 움직임이나 상치콘크리트의 이탈은 발생되지 않았다.

3.2 반사율측정 실험결과

반사율 측정은 약최고만조위에서 실시하였으며, 단면 A, 단면 B의 반사율의 범위는 0.230~0.452의 범위를 나타내고 있고, 소파블록이 상치전면을 덮고 있는 단면 A가, 파돌림공이 설치된 단면 B보다 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 전체적인 양상으로는 주기가 길어짐에 따라 반사율이 높아지는 경향이 나타났다. 그러나 파고변화에 따른 반사율은 일정한 결과를 나타내지 못하고 있다.

Table 3. 단면A의 반사율 실험결과

실험파	파고	주기	반사율
1	1.5m	6.0	0.245
2		7.0	0.256
3		8.0	0.270
4	3m	7.0	0.230
5		8.0	0.240
6		9.0	0.278
7	4m	10.0	0.327
8		11.0	0.352
9		12.0	0.389
10	5m	12.0	0.391
12		13.0	0.431
13	6m	13.0	0.389

Table 4. 단면B의 반사율 실험결과

실험과	파고	주기	반사율
1	1.5m	6.0	0.249
2		7.0	0.251
3		8.0	0.252
4	3m	7.0	0.231
5		8.0	0.236
6		9.0	0.248
7	4m	10.0	0.351
8		11.0	0.403
9		12.0	0.452
10	5m	12.0	0.412
12		13.0	0.439
13	6m	13.0	0.438

3.3 전달율측정 실험결과

단면 A의 실험결과, $H=3.0m$ 에서 월파가 시작되었으나 월파량은 매우 미미하였고, $H=4.0m$ 에서 해수소통과 월파가 동시에 발생하였지만 전달과는 0.05미만으로 매우 약하게 나타났으며, $H=5.0m$ 이상의 파고에서 전달파가 발생하여 전달율 0.160 ~ 0.170의 범위로 나타났다.

단면 B의 실험결과, $H=3.0m \sim H=6.0m$ 의 실험과에서 주기가 길어질수록 전달율이 높아짐을 알 수 있으며, 파고변화에 따른 일정한 경향이 확인되지 않았다. 또한, 단면 A와 비교했을 경우, 단면 B가 전달율이 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

실험결과, $H=1.5m$ 부터 해수소통구를 통해 해수가 항내로 유입되면서 0.05m미만의 전달파가 발생하였다. 그리고 $H=3.0m$ 에서 해수소통구를 통한 해수 유입량이 증가하여 $H=4.0m$ 에서는 월파와 함께 전달파가 발생 하였다. 단면 B의 실험에서는 파고가 높아질수록 전달율은 작아지는 것으로 나타난다.

이는 외해측 입사파고가 높아져도 해수소통구 통과 유량은 한계가 있음에 기인한 것으로 생각 되어진다.

Table 5. 단면A 전달율 실험결과

실험과	파고	주기	반사율
1	1.5m	6.0	0.05미만
2		7.0	0.05미만
3		8.0	0.05미만
4	3m	7.0	0.190
5		8.0	0.190
6		9.0	0.210
7	4m	10.0	0.165
8		11.0	0.165
9		12.0	0.165
10	5m	12.0	0.137
12		13.0	0.138
13	6m	13.0	0.120

Table 6. 단면B 전달율 실험결과

실험과	파고	주기	반사율
1	1.5m	6.0	0.249
2		7.0	0.251
3		8.0	0.252
4	3m	7.0	0.231
5		8.0	0.236
6		9.0	0.248
7	4m	10.0	0.351
8		11.0	0.403
9		12.0	0.452
10	5m	12.0	0.412
12		13.0	0.439
13	6m	13.0	0.438

3.4 월파량측정 실험결과

월파량 측정실험은 약최고만조위에서 실험을 수행하였으며, $20cm \times 30cm \times 70cm$ 의 눈금이 표시되어 있는 사다리꼴 모양의 월파량 측정기로 1시간 (모형 8.57분)동안 측정하여 단위폭 당 월파량을 검토하였다.

단면 A는 $H=3.0m$ 로 부터 월파가 시작 되고, $H=6.0m$ 시의 월파량은 $0.0232m^3/sec/m$ 이었고, 단면 B는 $H=4.0m$ 부터 월파가 시작 되었으며, $H=6.0m$ 시의 월파량은 $0.00049m^3/sec/m$ 로 나타났다. 이에 따라 단면 B에 비해 단면 A가 월파량이 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

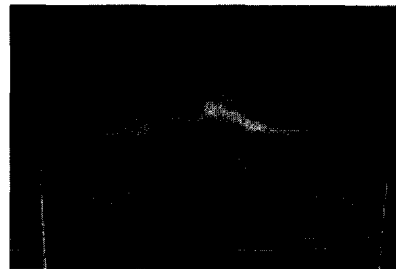


Fig. 4. 단면 A, $H=6.0m$, $T=13.0sec$.

Table 7. 단면A 월파량 실험결과

제원	파고	주기
실험과	6.0m	13.0sec
	12.2m	1.9sec
항목	내 용	
실험 내용	<ul style="list-style-type: none"> 30분(실험시간-257sec)동안 연속적으로 월파량을 측정하여 단위시간당, 단위폭당 월파량을 검토하였다. 	
실험 결과	<ul style="list-style-type: none"> 파고 3.0m이상에서 월파 발생 파고 6.0m시 월파량 측정결과 : $0.000014cm^3/sec/cm$(모형환산치) $0.0232m^3/sec/m$(원형환산치) 	



Fig. 5. 단면 B, $H=6.0m$, $T=13.0sec$.

Table 8. 단면B 월과량 실험결과

제원	파고	주기
실험과	6.0m	13.0sec
	12.2m	1.9sec
항목	내 용	
실험 내용	<ul style="list-style-type: none"> 1시간(실험시간-514sec)동안 연속적으로 월과량을 측정하여 단위시간당, 단위폭당 월과량을 검토하였음 	
실험 결과	<ul style="list-style-type: none"> 파고 4.0m이상에서 월과 발생 파고 6.0m시 월과량 측정결과 : $0.0000003cm^3/sec/cm$ (모형환산치) $0.0049m^3/sec/m$(원형환산치) 	

3.5 해수소통량측정 실험결과

해수소통량의 측정은 약최고만조위시의 조건에서 실험을 실시하였으며, 각각의 단면 A, B에 대해 해수소통의 한계파고와 $H=6.0m$ 조파시의 해수소통량을 산정하였다. 단면 A의 실험결과, 해수소통의 한계파고는 $H=4.0m$ 이었고, $H=6.0m$ 조파시의 해수소통량은 $0.0898m^3/sec$ 으로 측정되

Table 9. 단면A 해수소통량 실험결과

제원	파고		주기	
	원형	모형	원형	모형
실험과	4.0m	8.2m	12.0sec	1.7sec
	6.0m	12.2m	13.0sec	1.9sec
항목	내 용			
실험 내용	<ul style="list-style-type: none"> 해수소통 한계파고 산정 소통구 1개소 당 해수유입량 산정 			
실험 결과	<ul style="list-style-type: none"> 해수소통 한계파고 : 4.0m 한계파고(4m, 12.0sec) 조파시 : $0.000008m^3/sec$(모형환산치) 유입 $0.129m^3/sec$(원형환산치) 유입 설계파고(6m, 13.0sec) 조파시 : $0.000053m^3/sec$(모형환산치) 유입 $0.898m^3/sec$(원형환산치) 유입 			

Table 10. 단면B 해수소통량 실험결과

제원	파고		주기	
	원형	모형	원형	모형
실험과	1.5m	3.1m	6.0sec	0.9sec
	6.0m	12.2m	13.0sec	1.9sec
항목	내 용			
실험 내용	<ul style="list-style-type: none"> 해수소통 한계파고 산정 소통구 1개소 당 해수유입량 산정 			
실험 결과	<ul style="list-style-type: none"> 해수소통 한계파고 : 1.5m 한계파고(1.5m, 6.0sec) 조파시 : $0.000012m^3/sec$(모형환산치) 유입 $0.201m^3/sec$(원형환산치) 유입 설계파고(6.0m, 13.0sec) 조파시 : $0.000105m^3/sec$(모형환산치) 유입 $1.768m^3/sec$(원형환산치) 유입 			

었다. 단면 B의 해수소통 한계파고는 $H=1.5m$ 이었고, $H=3.0m$ 부터 해수소통이 활발히 일어났다. $H=6.0m$ 조파시의 해수소통량은 $1.768m^3/sec$ 으로 단면 A에 비하여 해수소통량이 월등히 크게 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 해수교환기능을 가진 두 가지 단면을 대상으로 2차원 단면수리모형실험을 통해 수리학 적인 특성을 파악·검토하였으며, 실험결과 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

두 단면에 대해 안정성 실험을 검토해 본 결과, 단면 A, B 모두 구조물 설계과 ($H=6.0m$)보다 큰 파고를 적용했을 경우에도 체체의 움직임이나 상치콘트리트의 이탈이 발생되지 않고 매우 안정하게 나타났다. 전달율실험 결과에서는 단면 A에 비해 단면 B가 전달율이 높게 나타났다. 단면 A에서는 $H=5.0m$ 이상에서 월과와 해수소통구로 유입되는 해수에 의해 전달과가 발생하여 20%이하의 전달율을 보이고 있다. 단면 B에서는 $H=1.5m$ 부터 해수소통구를 통해 해수가 항내로 유입되면서 전달과가 발생하였다.

또한, 단면 B에서는 $H=3m \sim 6m$ 의 실험과에서 주기가 길어 질수록 전달율이 높아짐을 알 수 있었다.

반사율측정 실험결과, T.T.P가 상치전면을 덮고 있는 단면 A가, 파돌림공이 설치된 단면 B보다 작게 나타나는 경향을 보이고 있다.

전체적인 양상으로는 주기가 길어짐에 따라 반사율이 높아지는 경향이 나타났다.

그러나 파고변화에 따른 반사율은 일정한 결과를 나타내지 못하고 있다. 두 단면에 대해 월파량을 검토해 본 결과, 파돌림공이 설치된 단면 B에 비해 단면 A가 월파량이 매우 높게 나타났다.

단면 A는 $H=3.0m$ 부터 월파가 시작되었으며, 단면 B는 $H=4.0m$ 부터 월파가 시작되었다. 이는 파돌림공이 설치된 단면 B의 특성이 뚜렷하게 확인됨을 알 수 있다. 단면 A보다 평상시 파랑에 대한 해수소통효과를 높이기 위해 설계된 단면 B가 해수소통이 활발하게 일어남을 알 수 있다. 단면 A는 $H=4.0m$ 부터 해수소통이 시작되었으며, 단면 B는 $H=1.5m$ 부터 해수소통이 시작되어 $H=3.0m$ 부터 해수소통이 활발하게 나타났다.

향후 연구과제로서는 수치모형실험을 병행하여, 해수소통구로 유입된 해수유입량이 항내에 미치는 영향분석이 필요할 것이며, 이로 인해 변화되는 항내 생태계 변화 및 항내오염의 개선에 대한 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

또한, 항내로 유입된 다량의 해수가 항내의 정온에 미치는 영향을 파악해야 할 것이며, 단면 B에 대한 파압특성 및 파돌림공에 대한 정확한 규명이 필요할 것으로 생각 되어진다. 이는 실제 시공시 파돌림공에 대한 상부공의 경제성 및 시공성에 관련된 중요한 요소가 될 수 있기 때문이다.

참고문헌

- Goda Y., and Suzuki Y., Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments, Proc. 15th Int. Conf. Coastal Eng., Hawaii, 1976, pp. 828-845
- Goda Y., Random Seas and Design of Maritime Structures, Univ. of Tokyo press, 1985
- Seeling w. N., Effect of Breakwaters on Waves : Laboratory Tests of Wave Transmission by overtopping, Coastal Structures '79, ASCE, 1979, pp. 941-961
- Van Der meer J.W., Stability of Cubes, Tetrapodes and Accropode, Proceeding of Breakwaters '88, Eastbourne, UK, 1988, pp. 59-68
- 合田良實 増補改定港灣構造物の耐波設計, 庇島出版會, 1993
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗(1992):越波時の人の轉倒に関する研究~親水性港灣構造物に

關する水工の研究(第二報)~, 港灣技術研究所報告, 第31卷, 第4, pp.3-29, 運輸省