

## Article

## 해수교환방파제의 형상별 순유입유량 특성 비교

이달수<sup>1\*</sup> · 이창훈<sup>2</sup> · 오영민<sup>1</sup> · 전인식<sup>3</sup> · 김창일<sup>3</sup><sup>1</sup>한국해양연구원 연안·항만공학연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29<sup>2</sup>세종대학교 토목환경공학과  
(143-747) 서울특별시 광진구 군자동 98<sup>3</sup>건국대학교 토목공학과  
(143-701) 서울특별시 광진구 화양동 1번지Comparison of the Net Inflow Rates of Seawater Exchange  
Breakwater of Different ShapesDal Soo Lee<sup>1\*</sup>, Changhoon Lee<sup>2</sup>, Young Min Oh<sup>1</sup>, In Sik Chun<sup>3</sup>, and Chang Il Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University  
Seoul 143-747, Korea<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Konkuk University  
Seoul 143-701, Korea

**Abstract :** The seawater exchange breakwaters can be effectively employed to conserve or enhance the water quality inside harbors by transmitting the exterior water into the harbor. In the present study, three shapes of the breakwater, that is, the flow conduit embedded type, the wave chamber type and the oscillating water channel type are compared for their water exchanging capability through regular wave experiments. The results show that the net influx of water appears differently depending on wave period for each breakwater type. The net influx of the wave chamber type is much greater than that of the flow conduit embedded type. It is also ascertained that the influx of the oscillating water channel type can be greatly enhanced by attaining the resonance condition inside the channel at the wave periods frequently occurring at the fields where the breakwaters are to be installed.

**Key words :** 해수교환방파제(seawater exchange breakwater), 유수실(wave chamber), 진동수로(oscillating water channel), 수위 공진(water surface resonance), 항내 수질(harbor water quality)

## 1. 서 론

재래식 방파제를 설치하여 조성한 항내 수역은 항내·외로 해수유통이 원활하게 일어나지 않는 폐쇄성 수역이

될 수가 있다. 이런 수역에 항내의 자정능력을 초과하는 오염원이 유입되면 수질이 악화되어 항내수는 사용하지 못하게 될 뿐 아니라 항 전체가 오염되어 주민들의 쾌적한 생활공간이 훼손되며, 주민의 보건도 악영향을 받는다. 이를 해결할 수 있는 1차적인 방안은 항내로의 오염원을 줄여 나가며 바닥에 가라앉은 오염물을 준설하는 것이고,

\*Corresponding author. E-mail : dslee@kordi.re.kr

2차적으로 해수유통을 원활하게 할 수 있는 해수교환시설을 설치하는 것이다.

이에 대한 해외 및 국내의 연구사례를 살펴보면, 폐쇄성 수역을 정화하기 위해 ① 오염물의 유입저감, ② 용출저감, ③ 각종 여과장치를 사용해 오염물질을 제거하는 직접정화, ④ 투과성 방파제를 통하여 외해수를 항내로 유입시켜 항내의 오염수를 희석시키는 도수희석 방법(중국공업기술연구소 1991) 등이 사용되고 있다. Murakami *et al.* (1994)는 구조물의 배치에 의해 항내에 일방향 흐름과 수평순환류를 발생시키는 방법을 이용한 해수교환촉진법에 대한 연구를 하였다. Parker *et al.* (1972)은 San Francisco 만의 연구에서 물질의 혼합과정을 고려한 해수교환율은 Golden Gate에서 창조 시에 만 내로 들어가는 새로운 해수의 비율로 정의하여 이용하였다.

국내에서는 Lee 등(1994)이 방파제 케이슨의 전면에 원호형의 진동수로를 내장시켜 이 수로에서 발생하는 수위의 공진으로 진동수로 내부와 항내 사이의 수두차를 증폭시켜 외해수를 다량 유입시키는 진동수로형 케이슨식 해수교환방파제를 세계 최초로 개발하였으며, 이달수 등(1999) 및 Lee와 Lee(2003)는 진동수로 내 수위의 공진주기에 관한 선형이론식을 유도하였다.

해수교환방파제는 해수유통의 양상에 따라 크게 두 종류로 구분할 수 있다. 하나는 항입구 이외의 곳에 항내·외로의 양방향 흐름을 유도하기 위하여 기존 방파제에 도수로를 만들거나 일부분을 절개하여 조류에 의한 해수유통을 원활히 하는 방식이다. 이런 형식은 조석간만의 차가

큰 해역에서 적합하나 황천시에 파 에너지가 항내로 들어와 항내정온도를 저해하여 선박의 정박 및 하역에 어려움을 주는 단점이 있다. 다른 한 종류는 항내로 일방향 흐름이 강화되게 하는 유공방파제를 방파제의 일부 구간에 설치하는 것이다. 이 방식은 조석간만의 차가 작은 해역에서 파력을 이용하여 해수유통을 촉진시키는 방식이다. 여기서는 이렇게 파력을 이용하는 해수교환방파제의 연구결과를 제시한다.

바람직한 해수교환방파제의 요건으로는 크게 네 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 항내로 일방향 흐름을 유도할 수 있는 형식, 둘째, 방파제 주변의 일상파를 효과적으로 이용할 수 있는 형식, 셋째, 유입수의 흐름이 항내측 깊숙이 흘러 들어갈 수 있는 형식, 넷째, 유입수로 인하여 항내 교란이 크지 않은 형식이라 할 수 있다.

본 연구에서는 위의 요건들 중 한 가지 이상을 충족시킬 수 있는 해수교환방파제의 단면을 구상하였다. 실용화 연구 대상 형식을 선정할 목적으로 파이프 내장식, 유수실 내장식, 전위 유수실 내장 진동수로 형식을 대상으로 각 형식별 해수유입 특성을 개략적으로 상대비교하기 위하여 규칙파를 이용한 단면수리모형실험을 수행하였다.

## 2. 실험

### 실험장치 및 실험조건

Fig. 1에는 실험수로와 방파제 및 유입량 측정장치의 설치도를 나타냈다. 실험수로의 제원은 길이 53 m, 높이

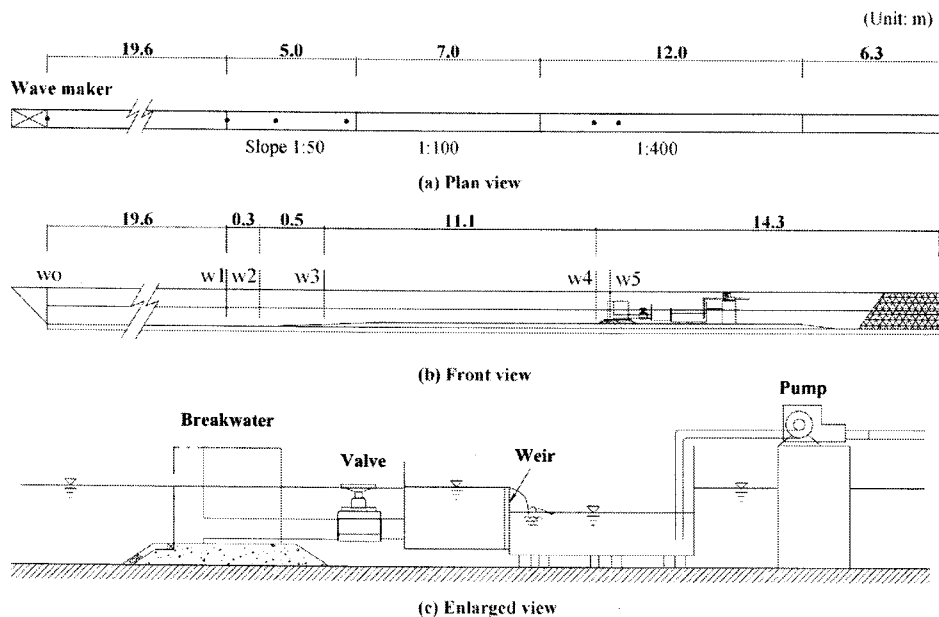


Fig. 1. Model setup in the wave flume.

1.25 m, 폭 1.0 m이며, 모형에서의 수심은 32 cm이다. 여기서, (a)는 설치 평면도, (b)는 설치 측면도, 그리고 (c)는 모형 및 유량 측정장치의 확대도이다. 수위계는 5개를 설치하여 w1, w2, w3로는 입사파 계측과 반사율 분석, w4로는 방파제 전면의 수위, 그리고 w5로는 유수실 내의 수위를 계측하였다. 저면경사는 방파제 전면에서 조파기 쪽으로 가면서 1/400, 1/100, 1/50로 점진적으로 경사를 크게 하였다. 유량 측정장치는 웨어상자와 이 웨어상자로부터 넘어 오는 물을 임시 받아 둘 수 있는 유량상자 그리고 유량상자의 물을 실험 도중에 펌핑하여 무게를 측정할 수 있는 무게 측정시스템으로 구성하였다. 웨어상자의 상류 쪽은 파이프를 통하여 모형 방파제의 배출파이프에 연결되었으며 이 파이프 중간에는 스톱밸브를 설치함으로써 실험 중 원하는 시간 동안만 유량을 받아들일 수 있도록 하였다.

실험과는 규칙파로서 파고가 2.8 cm, 4.0 cm, 6.0 cm, 8.0 cm, 그리고 12.0 cm인 5가지 경우에 대해 주기를 각각 0.8s, 0.9s, 1.0s, 1.1s, 1.2s, 1.4s, 1.6s, 2.0s, 2.4s, 그리고 2.8s로 변화시켰다. 실험과의 파형경사는  $H_0/L_0 = 0.002\sim 0.126$  사이에 있다.

**해수교환방파제의 구조형식**

**파이프 내장 혼성제**

해수교환방파제(Seawater exchange breakwater: SEB)에서 통수파이프를 수중에 완전히 잠기게 설치하면 방파제 전면에서 파봉과 파곡이 교대로 형성됨에 따라 파이프 내에는 크기가 비슷한 흐름이 양방향으로 번갈아 생겨 순 유입량을 기대하기 어렵다. 그래서, Fig. 2는 파이프의 전면부는 정지수면보다 높게 하였으며 후면부는 물 속에 잠기게 하여 방파제 전면으로의 유출을 줄이는 단면으로 구상한 것이다. 본 연구에서는 파이프 내장 혼성제라 명하며, 파에 의해 구조물 전면에 수위가 상승되면 통수파이프를 통해 물이 항내로 유입되는 형식이다. 모형에서 파이프의 굽힘각도는 45°이다.

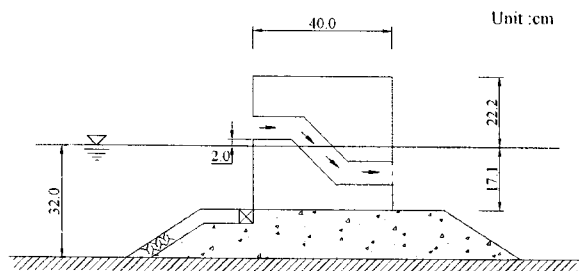


Fig. 2. Pipe installed SEB (type 1).

**유수실 내장 혼성제**

Fig. 3은 일방향 흐름을 강화하면서 통수파이프 내에 발

생하는 충격적 유속의 크기를 감소할 수 있는 단면을 나타낸다. 이것은 케이슨의 전면벽에 유입구가 있고 전면벽 뒤에는 유수실이 설치된 것을 특징으로 한다. 파에 의해 유수실로 물이 유입되면 이 유수실과 방파제 후면 사이에 있는 통수파이프를 통해 방파제 후면으로 물이 유입되는 형식이다.

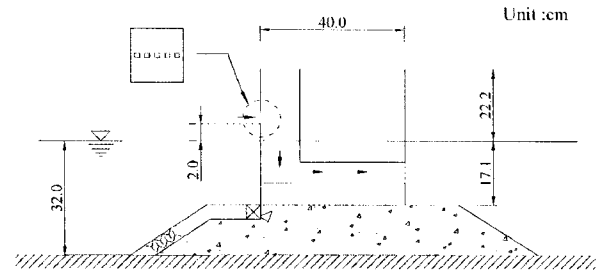


Fig. 3. Wave chamber installed SEB (type 2).

**전위 유수실 내장 진동수로 혼성제**

파의 주기를 효과적으로 이용하여 유입량 증대에 큰 효과를 줄 수 있는 단면으로 Fig. 4와 같다. 이것은 전위 유수실 내장 진동수로 혼성제로서, 수위의 공진을 유발하기 위한 진동수로 및 이를 통해 월류해 오는 물을 일시 받을 수 있도록 자유수면이 있는 유수실을 진동수로의 전방에 내장시킨 형식이다. 진동수로로 유입된 물은 유수실의 전면벽에 있는 유입구를 통해 유수실을 거쳐 통수파이프로 흘러간다.

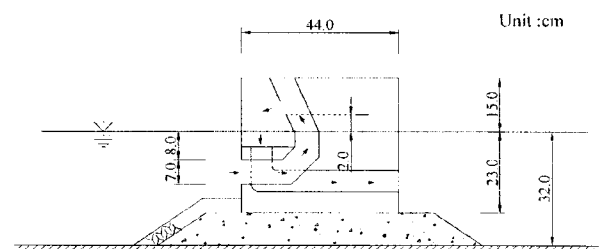


Fig. 4. Oscillating channel installed SEB with front wave chamber (type 3).

**구조형식별 단면의 제원**

각 구조형식별 단면의 주요 제원은 Table 1에 제시한 바와 같다. 여기서, 유수실 폭이라 함은 유수실의 항내의 측 방향의 길이를 나타낸다. Type 1과 Type 2의 단면에서 유입구의 하단은 정지수면상 2 cm에 설치하였으며 Type 3에서 진동수로 내의 유수실 유입구의 하단 높이는 정지수면상 2 cm에 설치하였다. 실험수심은 32 cm로 일정하였다.

Table 1. Outline of cross-section parameters.

Parameter Type	Caisson length (cm)	Front inlet (cm <sup>3</sup> )	Channel diameter (cm)	Chamber width (cm)
type 1	33	50.3	8.0	-
type 2	33	31.2	6.0	10.0
type 3	49	(259.0)	6.0	11.5

### 3. 순유입유량 분석결과

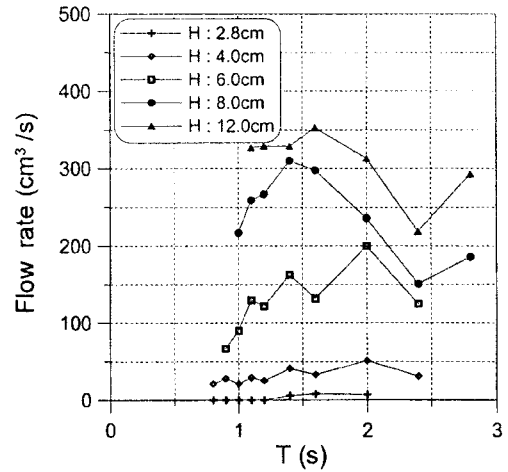
실험 단면의 형식별로 유입수의 경로가 다르다. 모든 형식에서 물은 일단 케이슨의 전면벽에 설치된 유입구를 통해 케이슨 내로 유입되므로 파고는 유입량 증감을 1차적으로 좌우한다. Fig. 5에는 각 형식별 주기에 따른 순유입유량을 파고별로 도시하였다. 여기서 순유입유량이란 단위시간당 파이프를 통해 방파제 배후수역으로 흘러간 총유량으로부터 파이프를 통해 방파제 전면 수역으로 흘러나온 총유량을 감한 양을 시간으로 나눈 값의 의미를 가지며 시간평균유량으로 볼 수 있다.

본 실험은 각 단면의 유입특성을 개략적으로 파악함에 1차 목적을 두었기에 각 형식의 단면제원은 주어진 실험 조건에서 유입유량이 최대로 발생하도록 최적화된 것이 아니다. 따라서 본 실험만으로 형식별로 순유입유량에 관한 우열을 최종 판정할 수는 없다. 그러나 실용화 대상 형식을 선정하는 과정에서 중요한 정보를 얻을 수 있다.

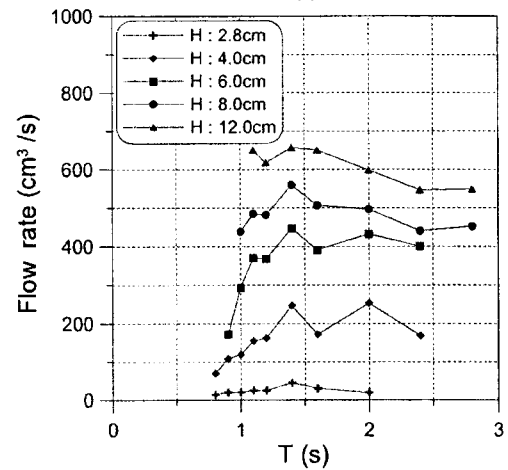
순유입유량은 파고가 커짐에 따라 모든 형식에서 증가한다. Type 1과 Type 2의 단면에서 케이슨의 길이는 같다. 한편, Type 1이 Type 2보다 전면벽에 설치된 유입구의 단면적은 61% 정도 크며 통수파이프의 단면적도 78% 정도 크다. 그럼에도 불구하고 순유입유량은 반대로 Type 1에서보다 Type 2에서 훨씬 큰 결과를 얻었다. 그리고 Type 2에서는 Type 1과는 달리 순유입유량은 파고가 증가할수록 점진적으로 증가한다. 이는 Type 1에서는 입사파고가 커지면 통수파이프 내로 유입된 물이 방파제를 통과하는 과정에서 파이프 내에 있던 공기 덩어리를 밀고 들어가지 하는 데에 1차적인 원인을 찾을 수 있다. 그리고 전면 유입구의 분포상 Type 1에서는 Type 2에 비하여 유입구의 중심이 더 높기 때문이다. 그러나 이 유입구의 높이의 영향은 입사파고가 증가함에 따라 점점 작아지는 것으로 판단된다.

이로부터 자유수면을 가지는 유수실은 유입유량의 증가에 큰 역할을 함을 알 수 있다. 다른 한편 유수실을 설치하면 전면벽 유입구의 숫자나 크기를 통수파이프의 숫자나 크기와 일치시키지 않고 현장 여건에 따라 독립적으로 결정할 수 있으므로 설계 및 시공상의 장점이 있다.

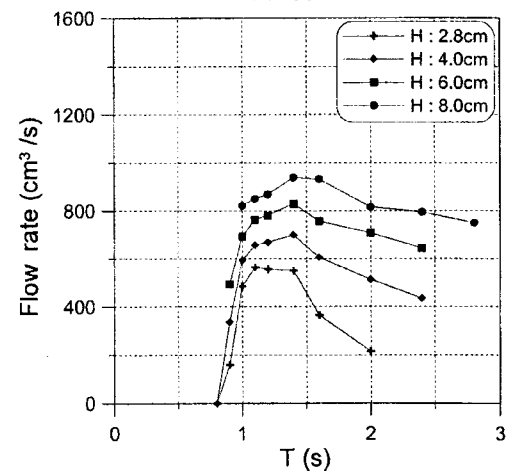
Type 3는 케이슨의 길이가 Type 1 및 Type 2에 비하여



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 5. Net inflow rate with respect to wave periods.

48% 큰 49 cm이다. 여기서 두 가지 특징을 발견할 수 있다. 첫째, 파고가 작은 경우에는 순유입유량이 Type 1 및

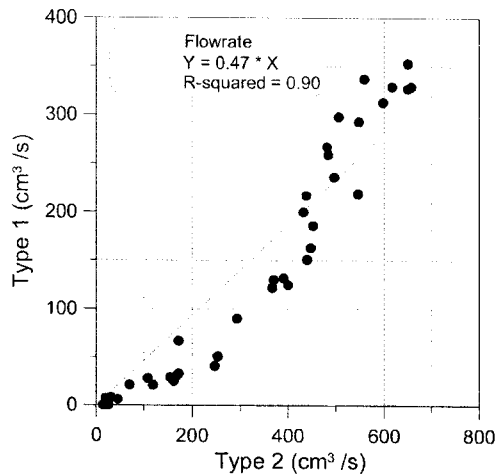


Fig. 6. Comparison of net inflow rate between Type 1 and Type 2.

Type 2에 비하여 매우 크다. 둘째, 주기에 따른 순유입유량의 곡선은 포물선을 닮은 형상을 보이며 침투값은 파고가 증가할수록 근소하게 큰 주기에서 발견된다. 이는 진동수로 내에 수위의 공진과 관련된 현상으로서 파고가 증가함에 따라 유입유량이 증가하면 유량을 방파제 배후면으로 통과시키지 않을 때에 비하여 수위의 공진주기가 증가하기 때문이다. 따라서, Type 3와 같이 진동수로가 내장된 직립 케이슨식 해수교환 방파제는 발생빈도가 높은 파고 및 주기에 맞추어 단면의 제원을 설계함으로써 유입유량을 증대시키려 할 경우에 유리한 형식이다.

Fig. 6에는 Type 1과 Type 2 사이의 순유입유량의 상관관계를 도시하였다.

이로부터 유수실을 내장한 Type 2의 형식이 통수파이프만 내장한 Type 2보다 순유입유량 면에서 성능이 우수하며 실험에 사용된 단면들에 한하면 순유입유량은 Type 2가 2배 정도로 크을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 케이슨식 해수교환방파제로서 파이프 내장형, 유수실 내장형, 전위 유수실 내장 진동수로형 방파제 등 3가지 형식을 대상으로 규칙파에 의한 유입량 측정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 케이슨에 통수파이프만 설치한 형식(Type 1)과 케이슨 전면에 유수실을 설치하고 이로부터 통수파이프를 설치한 형식(Type 2)를 비교하면 순유입유량은 유수실을 설치한 형식이 월등히 크다.

2. 케이슨 내에 수위의 진동수로와 이 진동수로의 전면에 유수실을 설치한 형식(Type 3)에서는 파고가 작은 경우에도 순유입유량이 매우 크다. 또한 현장에 발생빈도가 높은 파의 주기에서 수위의 공진이 발생하도록 단면을 설계하면 순유입유량을 증대시킬 수 있음이 확인되었다.

3. 이상의 결과와 실제 방파제에서는 통수파이프 설치 단면적에 제한이 있음을 고려할 때 통수파이프만 설치한 케이슨식 해수교환방파제는 검토된 3가지 형식 중 해수유입 성능이 가장 낮은 것으로 판단된다.

4. 진동수로형 방파제에서 유수실을 진동수로의 전면에 설치한 Type 3의 형식에서는 유수실 내에서 회전류가 발생하게 되는데, 이는 순유입유량을 감소시키는 요인이 될 것으로 추측된다. 따라서, 진동수로형 해수교환방파제에 유수실을 설치할 경우에는 유수실의 위치를 진동수로의 후면에 배치하는 것이 유입량 측면에서 유리할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 해양수산부의 연구과제 “해수교환 방파제의 실용화 연구(I)” 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 이달수 등. 1999. 해수교환 방파제의 실용화 연구(I), 해양수산부(연구기관: 한국해양연구원).
- 중국공업기술시험소. 1991. 해양환경 개선기술에 관한 기술 개발의 동향 조사 보고서, 통상산업성 공업기술원.
- Lee, C. and D.S. Lee. 2003. Water surface resonance in the L-shaped channel of seawater exchange breakwater. *Ocean Engineering*. (in press)
- Lee, D.S., W.S. Park, and N. Kobayashi. 1994. Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange. *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, Kobe, 1373-1387.
- Murakami, K., S. Katsuyoshi, and K. Yamada. 1994. Water exchange mechanisms in enclosed coastal seas influenced by marine structure. *Hydro-Port'94*, Yokosuka, Japan, 2, 921-940.
- Parker, D.S., D.P. Norris, and A.W. Nelson. 1972. Tidal exchange at Golden Gate. *Proc. ASCE*, 98, 305-323.

Received Jul. 15, 2003

Accepted Nov. 20, 2003