

## 월류제 부설 경사식 해수교환방파제의 유입유량 추정 Estimation of the Inflow Rate of Wave Chamber Installed Rubble Mound Seawater Exchange Breakwater with a Seawall

이달수<sup>1</sup> · 오영민<sup>1</sup> · 전인식<sup>2</sup> · 김창일<sup>2</sup> · 성효석<sup>3</sup>

Dal Soo Lee<sup>1</sup>, Young Min Oh<sup>1</sup>, In Sik Chun<sup>2</sup>, Chang Il Kim<sup>2</sup>, and Hyo Suk Sung<sup>3</sup>

### 1. 서 론

재래식 방파제는 투수성이 작아 항내·외간 해수 유통을 저하시켜 조석간만의 차가 작은 해역의 항만에서는 오염원이 유입될 때 수질이 쉽게 악화된다. 특히 방파제 후면 수역을 매립하여 선착장으로 이용하는 경우에 이 현상은 심화된다. 이를 해결하려면 육상으로부터의 오염원 유입을 저감시킴과 함께 정체된 항에 흐름이 존재하도록 하는 건설 공법을 도입할 필요가 있다. 방파제의 일부 구간에 해수교환방파제를 설치하여 해수교환을 촉진시키는 것은 훌륭한 방법이 될 수 있다.

해수교환방파제는 유입수로 인하여 항내에 전달파를 발생시킨다. 그러므로 해수교환방파제의 형식을 선정할 때에는 방파제 배후 수역의 사용계획과 해수교환방파제의 전달파고 발생특성을 동시에 고려하여야 한다. Fig. 1에서와 같이 해수유입 구조물 전면 해역에 월류제를 설치하면 해수유입구조물을 통해서 항내측으로 향하는 일방향 흐름만이 발생하므로 전달파고는 거의 무시할 수 있게 된다(이달수 등, 1999).

월류제를 설치하면 파가 월류제를 월파하는 과정에서 쇄파되어 월류제와 방파제 사이에 형성되는 유수지에서는 평균수위가 상승되어 항내측으로 일방향 흐름이 발생한다. 이 흐름은 일방향일 뿐 아니라 수중으로 유입되므로 유입수로 인한 항내 수면의 교란은 무시할 수 있을 정도가 된다. 한편 유수지는 토사의 침전지로 이용될 수 있을 것이다.

주문진항의 경우에는 방파제 후면 수역을 매립하여 선착장을 건설할 계획이므로 이러한 구조형식이 적합하다.

본 연구에서는 이달수 등(2001a)의 연구결과를 토대로 동해안의 주문진항을 대상으로 유수실 내장 경사식 해수교환방파제의 전면 해역에 월류제를 추가 설치한 구조형식에 대해 축척 1/25의 단면 수리모형실험을 수행함으로써 설계에 사용할 수 있도록 단면의 주요 제원의 변화에 따른 파고별 유입유량(해수의 유입강도)을 추정하기 위한 경험식을 개발하였다(이달수 등, 2001b)

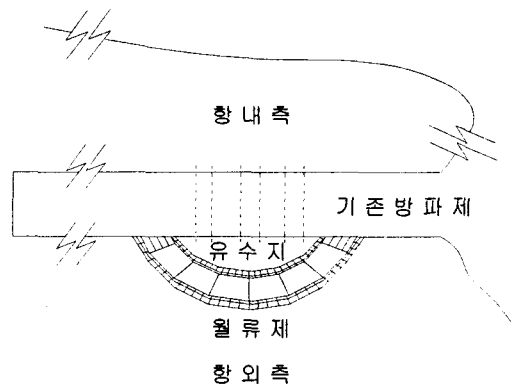


Fig. 1. Schematic layout of seawater exchange structure.

1 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-744, Korea)  
 2 건국대학교 토목공학과 (Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)  
 3 동일기술공사 (Dongil Eng. Co., Seoul 138-190, Korea)

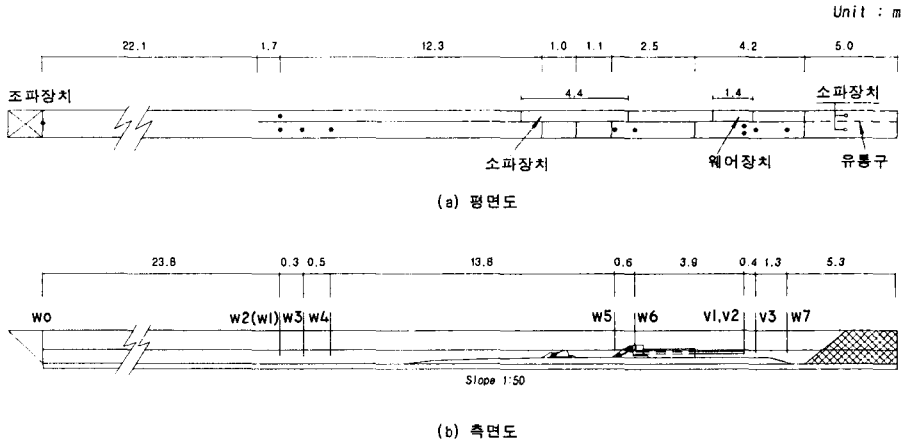


Fig. 2. Plan and elevation views of experimental facilities and model setup.

주문진항에서 월류제는 Fig. 1에 보인 바와 같이 평면배치형상을 반원형으로 하였다. 이렇게 배치한 이유는 파의 내습방향에 큰 제한을 받지 않고 해수가 유입되며 만일 파력에 의해 월류제에 활동이 발생하는 경우에는 축방향력이 지지력으로 작용하도록 함으로써 활동에 대한 안정성이 추가로 확보되도록 하기 위함이었다.

월류제는 반원형으로 배치되지만 기존 방파제를 대체할 유수실 내장 경사식 해수교환방파제는 그 길이가 반원형 유수지의 직경에 비해 현저히 짧고 중앙에 설치됨을 고려해 단면수리모형실험에서는 월류제와 방파제의 이격거리를 반원형의 반경에 해당하도록 단면을 구성하였다.

## 2. 실험수로 및 실험장치

실험에 사용된 수조는 53m, 높이 1.25m, 폭 1.0m인 장수로로서 Fig. 2에 보인 바와 같이 철재 분할판을 사용하여 수로를 폭 0.4m의 협수로와 폭 0.6m의 광수로로 분할하였다. 광수로에는 모형을 설치하였으며 협수로에서는 통과파를 계측하였다. 방파제 전면의 해저 경사는 광수로와 협수로에서 1/50로 하였다.

실험파의 조파를 끝내고 계측을 위한 실험을 수행할 때에는 방파제 배후 구역의 수위를 조절하기 위하여 협수로에 웨어시스템을 설치하였으며 웨어시스템의 상류에는 별도의 소파장치를 설치하였다.

본 실험과 같이 방파제의 수로를 통하여 상류에서 하류로 흐름이 발생하면 방파제 배후면의 수위

가 과도하게 상승하므로 해수교환방파제를 통과하는 흐름이 대폭 약화된다. 따라서, 단면수리모형실험에서 배후 구역의 수위 조절은 매우 중요하다. 그러므로, 방파제 모형상의 내부에 직경 6cm의 파이프를 광수로 구간에 3개, 협수로 구간에 2개를 설치하고 수조의 하부에 설치된 회류파이프의 밸브를 열어놓음으로써 하류측 수위가 자연적으로 감소되도록 하였다.

실제 실험을 수행하게 되면, 파고가 클 때에는 이 회류파이프들 만으로는 방파제 배후 구역의 수위 상승을 효과적으로 억제시키지 못하는 경우가 자주 발생한다. 따라서, 협수로 구간에 웨어시스템을 추가로 설치하여 과도한 수위 상승은 웨어시스템에서 추가로 조절하도록 하였다. 이를 위해 수조 하류측의 소파장치 내에서는 분할판에 공극율 40% 정도의 작은 통수공들을 설치하였으며 소파장치 전면의 수조 바닥에도 두 수로를 연결하는 통수공들을 설치함으로써 방파제 배후면에서 수위가 과도하게 상승할 때에는 광수로에서 협수로의 웨어장치 쪽으로 흐름이 쉽게 형성되도록 하였다.

여기에 사용된 관측기기는 다음과 같다.

- W1 : 협수로에서 실험 중 파고의 검출
- W2 ~ W4 : 광수로에서 입사파와 반사파의 분리
- W5 : 광수로의 유수지 내에서 수위 변화 계측
- W6 : 광수로 해수교환방파제의 유수실 내에서 수위 변화 계측
- W7 : 방파제 배후측 수면에서 전달파고의 계측과 평균수위의 검출

- $V_1 \sim V_2$  : 도수파이프 내부의 유속 측정
- $V_3$  : 도수파이프 출구 부근의 유출유속 측정

### 3. 수심 및 실험과 구성

유속측정은 수심 22cm(조파기의 수심 55cm)에서 수행하였으며, 월류제의 안정성 검토는 수심 22cm 및 30cm(조파기 수심 63cm) 에서 수행하였다.

실험과는 불규칙파로서, 입사파 스펙트럼의 형상은 식(1)과 같이 畠田良實(1987)에 의해 수정된 Bretschneider - Mitsuyasu 스펙트럼과 그 형상이 유사하도록 조파하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

여기서  $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도,  $f$ 는 주파수를 나타내며,  $H_{1/3}$  및  $T_{1/3}$ 은 각각 유의파고 및 유의파 주기를 나타낸다.

유입량 측정을 위한 파들의 주기 및 대표파고는 Table 1과 같이 결정하였으며, ○ 표시는 파가 작성된 것을 의미한다. 여기서  $H_s$ 는 각 파군의 대표 파고로서 입사파고들은 주기마다 약간씩 차이나는. 향후 유속과 파고와의 관계를 도출할 때에는 주기별 실제 입사파고를 사용하였다.

**Table 1.** Wave conditions for experiment on flow velocity

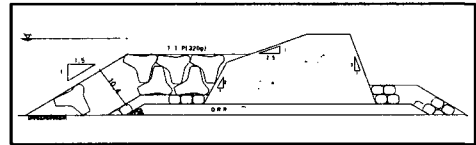
$H_s(\text{cm}) \backslash T_s(\text{s})$	1.06	1.46	1.86	2.26	2.60	지속시간 (min)
1.8	○	○	○	○	-	6
4.2	○	○	○	○	○	6
6.4	○	○	○	○	○	6
10.0	-	-	○	○	-	6
12.0	-	-	-	-	○	11

월류제의 안정성을 검토하기 위한 설계파로는 해운항만청(1992)을 참조하여  $H_s = 14.4\text{cm}$ 로 선정하였으며, 주기는 동해안의 일반 설계파 범주에 들도록 2.6s로 정하였다.

### 4. 실험 단면

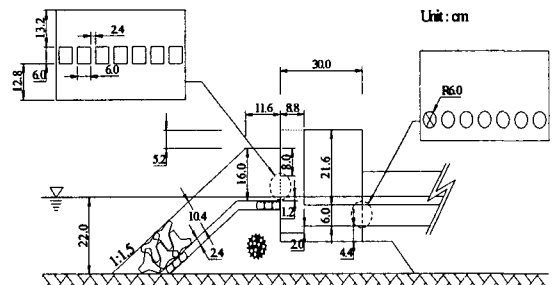
Fig. 3은 월류제의 단면을 나타낸다. 월류제는 월파가 쉽게 발생하고 월파시 구조물에 하향파력이 작용하도록 방파의 단면형상을 5각형으로 설계하

였다. 안정성 검토에서는 평균해수면시 월류제의 설치 위치에 따른 수심 22cm 및 30cm에 대해서 전면 tetrapod의 중량, 방파 상부면의 경사 및 방파의 마루폭을 변경하며 설계파에 안정한 단면을 찾는 방법으로 수행하였다. 월류제의 마루높이는 평균해수면을 기준으로 수심 22cm인 경우에는 0cm, 수심 30cm인 경우에는 2cm이다.



**Fig. 3.** An example of the cross-section of seawall.

Fig. 4는 기존 방파제의 일부구간을 대체할 유수실 내장 경사식 해수교환방파제의 단면도의 한 예이다. 케이슨의 전면에는 높이 7.6cm, 중량 320g인 tetrapod가 설치되었고 케이슨의 전면벽에 설치된 유입구는 장방향으로서 한 변의 크기가 이 tetrapod의 높이보다 작은 6cm이다. 유입구의 하단은 평균해수면과 일치시켰으며, tetrapod는 어깨 높이가 유입구의 상단보다 훨씬 높도록 설치하였다. 유수실의 폭은 tetrapod의 크기보다 크게 8.8cm로 하였다. 방파제 후면에는 내경 6cm의 도수파이프들이 수중에 설치되었다. 도수파이프의 길이는 390cm이다. 유속측정시 단면의 제원에서 전면벽 유입구 및 후면 도수파이프의 설치 간격을 변화시켰다. 경사식 해수교환방파제와 월류제간의 이격거리는 마주보는 거리가 평균해수면에서 160cm로 일정하게 유지하였다.



**Fig. 4.** Cross-section of wave chamber installed rubble mound seawater exchange breaker.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 월류제의 안정성 검토

설계파를 31분(715파)씩 작용시키면서 월류제와 경사식 해수교환방파제의 안정성을 동시에 검토하였다. 월류제는 최초의 안에서 전면 tetrapod의 안정성이 결여된 것으로 나타나 방파 상부 사면의 경사와 tetrapod의 어깨 부분의 표고를 변화시키면서 안정한 단면을 구하였다. 월류제의 안정성 검토 결과는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Result of stability tests of seawall

수심 (cm)	tetrapod 중량(g)	상부 경사	마루폭 (cm)	안정성 검토 결과
22	320	1/2.0	12.0	월류제로부터 역류 발생시 tetrapod 불안정
	205	1/2.5	10.0	월류제로부터 역류 발생시 tetrapod 매우 불안정
	320	1/2.5	10.0	안정(채택안)
30	320	1/2.5	10.0	월류제로부터 역류 발생시 tetrapod 이탈 심함
	320	1/2.0	10.0	월류제로부터 역류 발생시 tetrapod의 공극 확대됨
	320	1/2.5	12.0	안정
	320	1/2.5	10.0	안정(채택안)

### 5.2 유속측정 및 유입유량 추정식

수심 22cm인 조건에서 파를 6분간씩 작용하여 이 중 5분 동안 도수파이프의 중앙에서 양방향 propeller 유속계로 유속을 계측하여 이를 단면평균유속으로 가정하였다. 유속 관측 중에는 경사식 해수교환방파제의 배후 수역(항내)에서 평균수위가 0.1cm 이상 상승하지 않도록 웨어시스템의 웨어 높이를 조절하였다. 유속측정실험은 해수교환방파제에서 전면벽 유입구의 개구율과 도수파이프의 개구율을 Table 3에 보인 바와 같이 변화시키며 수행하였다. 여기서  $m^2/m$ 의 단위로 표시된 값들은 현장에서의 값을 의미한다. 여기서  $f_i$ 와  $S_i$ 는 방파제 단면의 제원과 관련된 것으로서  $f_i$ 는 모형 방파

제의 길이 60cm당 크기 6cm × 6cm의 유입구가 전면벽에  $i$ 개 설치된 단면을 의미하며,  $S_i$ 는 내경 6cm의 도수파이프가 방파제 후면에  $i$ 개 설치된 단면을 의미한다.

Table 3. Total cross-section area of inlets and conduit pipes per breakwater length

위치 값	전면벽 유입구			후면의 도수파이프			
	f7	f5	f3	S4	S3	S2	S1
$cm^2/cm$	4.2	3.0	1.8	1.884	1.412	0.944	0.472
$m^2/m$	1.05	0.75	0.45	0.471	0.353	0.236	0.118

Fig. 5는 전면벽 유입구 설치조건이 f7인 경우에 파이프 내에서의 무차원 평균유속의 변화를 파의 주기별로  $S/H_s$ 의 함수로 나타낸 것이다. 파의 주기가 길어지더라도 유속은 매우 미세하게 증가하는 경향이 있다. 따라서 본 형식의 구조물에서는 설계 목적으로 유입유속을 평가할 때에는 파의 주기를 무시해도 무리가 없다고 판단된다.

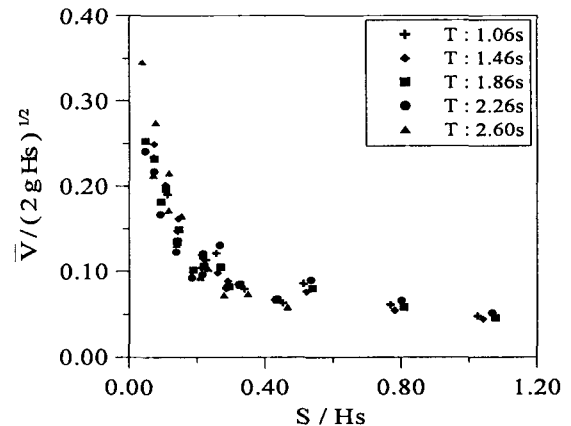
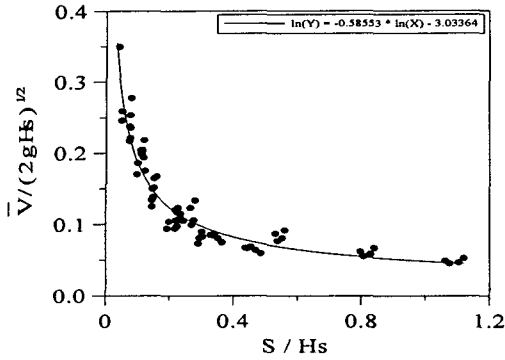
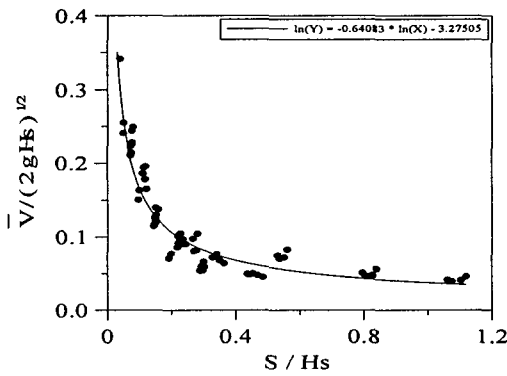


Fig. 5. Variation of non-dimensional mean flow velocity in the pipe vs.  $S/H_s(f7)$ .

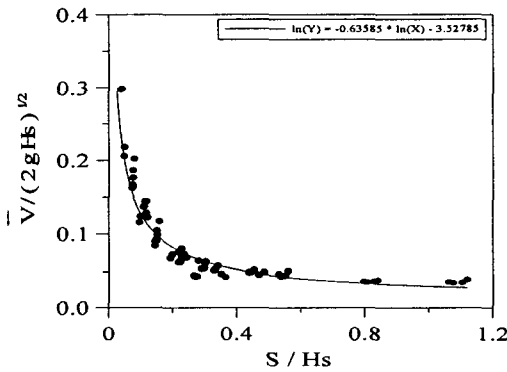
따라서, Fig. 6은 유속 분석 자료들을 주기를 고려하지 않고 전면 유입구의 설치 규모별로 조합하였으며 이들 자료를 잘 대표하는 곡선 및 곡선식을 나타내었다. Fig. 6에서 곡선식의 상관계수( $R^2$ )의 값들은 0.88 이상으로서 곡선은 자료들을 매우 잘 대표하고 있다.



(a) f7,  $R^2 = 0.92$



(b) f5,  $R^2 = 0.88$



(c) f3,  $R^2 = 0.90$

Fig. 6. Relation formula between normalized mean flow velocity and  $S/H_s$ .

전면벽 유입구의 설치규모별로 무차원 곡선식은 식(2)와 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_i=f7 \text{일 때, } \ln Y &= -0.586 \ln X - 3.034 \\ f_i=f5 \text{일 때, } \ln Y &= -0.641 \ln X - 3.275 \\ f_i=f3 \text{일 때, } \ln Y &= -0.636 \ln X - 3.528 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{V}$ 를 평균유입유속,  $Y = \bar{V}/(2gH_s)^{1/2}$ ,  $X = S/H_s$ 이라 할 때 이 식들은 다음 식(3)의 형태를 가진다.

$$\ln Y = a_0 \ln X + b = \ln X^{a_0} + \ln e^b = \ln e^{b} X^{a_0} \quad (3)$$

식(3)을 이용하면 도수파이프 내의 평균 유입유속  $V$ 와 해수교환방재 단위 길이당의 평균 유입유량(유입강도)  $q$ 를 추산하는 경험식은 다음 식(4)와 같은 형태로 표시된다.

$$\begin{aligned} V &= C_d \left(\frac{H_s}{S}\right)^a \cdot \sqrt{2gH_s} \\ q &= C_d S \left(\frac{H_s}{S}\right)^a \cdot \sqrt{2gH_s} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $C_d = e^b$ 로서 유사유출계수이고,  $a = -a_0$ 이다.

Table 4. Experimental constants

전면 유입구	상수	$C_d$	$a$
f7		0.0481	0.586
f5		0.0379	0.641
f3		0.0294	0.636

Table 4에는 무차원 경험상수  $C_d$ 와  $a$ 의 값들을 제시하였으며 Fig. 7에는  $f_i$ 에 따른  $C_d$ 의 변화를 그림으로 나타냈다.

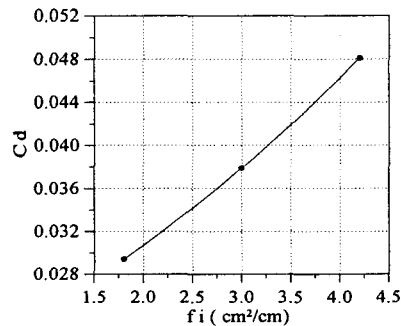


Fig. 7. Variation of pseudo discharge coefficient.

Fig. 7에서 보면 유사유출계수  $C_d$ 의 값은 유수실 내장 경사식 해수교환방파제의 단위 길이당 전면 유입구의 총단면적  $\bar{n}$ 의 크기에 거의 선형적으로 비례한다. 이로부터 전면 유입구의 설치규모는 유입량에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

위의 식(4)의  $q$ 에 관한 경험식은 설계에서 다음과 같이 이용될 수 있다.

- ① 파고(m)의 급간별 발생시간(s)을 표로 작성한다 (연간 또는 월간 등)
- ② Table 3, Table 4 및 Fig. 7을 참조하여 전면벽 유입구의 설치규모에 따른 무차원 상수  $C_d$  및  $a$ 의 값을 추정한다.
- ③ 도수파이프의 설치규모  $S(m)$ 의 값을 계산한다.
- ④ 식(4)에 파고를 대입하면 그 파고의 파에 의한 경사식 해수교환방파제 1m당 1초당의 유입유량이 추산된다.
- ⑤ 위의 ④의 각 결과에 원하는 기간동안의 각 파고의 출현시간(s)을 곱하여 이들을 전 파고에 걸쳐 합하면 경사식 해수교환방파제 1m당 원하는 기간동안의 총 유입량( $m^3/m$ )이 산출된다.

## 6. 결 론

방파제의 일부 구간에 유수실 내장 경사식 해수교환방파제를 설치하고 이의 전면 해역에 월류제를 설치함으로써 월류제와 해수교환 방파제 사이에 형성되는 유수지 내 수위의 상승을 이용하여 외해수를 항내측에 일방향으로 유입시키는 신행 해수유입구조물을 주문진항에 초점을 두어 단면수리모형실험을 수행하였다. 중요 발견사항은 다음과 같다.

1. 월류제의 단면제원을 변화시키며 설계파를 적용 시킴으로써 안정단면을 결정하였다.
2. 월류제 부설 경사식 해수교환방파제에서 일정 단면을 통해 발생하는 평균유속은 파의 주기와는 별 상관없이 주로 파고에 따라 결정된다.
3. 경사식 해수교환방파제 케이스는 전면벽의 유입구의 설치규모별로 파고 및 도수파이프의 설치규모를 변수로 하는 평균유속과 유입강도 추산 경험식을 도출하였다.
4. 유입강도 추산 경험식의 유사유출계수  $C_d$ 는 전면 유입구의 설치규모에 거의 선형적으로 변하여 유입구의 설치규모가 증가할수록 유입유량은 따라서 선형적으로 증가한다.
5. 도출한 유입강도 경험식을 이용하여 현장에서

해수의 유입량을 추산하는 방법을 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “해수교환방파제의 실용화 연구(IV)와 (주)동일기술공사 및 (주)전일 엔지니어링에서 의뢰한 “주문진항 해수교환시설 실시설계 용역 수리 및 수치모형실험” 연구결과의 일부이며 연구비의 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 이달수 등, 1999. 해수교환방파제의 실용화 연구 (II), 해양수산부(연구기관: 한국해양연구원).
- 이달수 등, 2001a. 해수교환방파제의 실용화 연구 (IV), 해양수산부(연구기관: 한국해양연구원).
- 이달수 등, 2001b. 동해지방해양수산청(연구기관: 한국해양연구원)
- 해운항만청, 1992. 전국항만구조물도집
- 合田良實. 1987. 수치 simulation에 의한 파랑의 표준 spectral과 통계적 성질. 제 34회 해안공학강연회 논문집, pp. 131-135.