

Article

잠제가 설치된 유공형 해수교환방파제의 도수량 특성 분석

정신탉^{1*} · 이달수² · 조흥연² · 오영민²

¹원광대학교 토목환경도시공학부
(570-749) 전라북도 익산시 신용동 344-2
²한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Analysis of Discharge Characteristics for the Seawater Exchange Breakwater Composed of Tunneled Breakwater and Submerged Mound

Shin Taek Jeong^{1*}, Dal Soo Lee², Hong Yeon Cho², and Young Min Oh²

¹School of Civil, Environmental and Urban Engineering
Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

²Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-744, Korea

Abstract : Five parameters such as the entrance size of the front wall, conduit size, wave period, wave height and the width of water pool were selected to estimate the inflow rate, which is basic and essential input data to design seawater exchange breakwater with a submerged mound by conducting hydraulic model experiments. In the results of multiple regression analysis, log-log equation showed a good agreement rather than linear equation and the estimation of inflow rate was well done with only two parameters except entrance size of the front wall, wave period and the width of water pool. Finally, non-dimensional flow rate equation is derived.

Key words : 잠제(submerged mound), 해수교환방파제(seawater exchange breakwater), 수리모형실험(hydraulic model experiment), 다중회귀분석(multiple regression analysis), 도수량(inflow rate), 무차원도수량(non-dimensional flow rate)

1. 서 론

방파제는 정온한 해역을 조성하기 위하여 건설된다. 그러나 이렇게 조성된 수역은 폐쇄적인 특성 때문에 방파제 건설 전에 비하여 항내·외의 해수 유통 기능이 크게 저하되므로 환경변화에 대한 자정능력이 감소하여 적은 오염부하에도 심각한 환경문제가 유발될 수 있다. 유역으로부터 유입된 오염물질이 외해로 확산되지 못하여 항내에 침전되고, 침전된 유기물이 분해되는 과정에서 해수 중의

산소를 소모하여 항만 저층에서는 빈산소상태가 유지되어 저층 생태계를 위협하게 된다.

기존의 방파제에 요구되는 기능은 파랑을 차단하여 항내의 정온을 유지하고, 항만시설을 보호하며, 선박의 안전한 입·출항, 하역작업의 편리를 도모하는 것이었다. 그러나 최근에는 연안해역 이용이 다목적화되고, 환경보전의 측면에서 반사파 감소, 항내 수질 향상, 환경과의 조화, 경제성 확보 등의 새로운 기능이 추가로 요구되고 있는 실정이다. 따라서, 이제는 항내의 수질을 보전함으로써 국민에게 쾌적한 생활환경을 제공하는 정책이 건설 측면에서도 적극 시행되어야 할 것이다. 또한, 항만을 신설할 경우

*Corresponding author. E-mail : stjeong@wonkwang.ac.kr

에는 수질보전을 위한 저감대책 수립 및 신공법 도입으로 인하여 추가되는 비용을 건설비에 적극 반영하고, 기존 항을 대상으로 하는 경우에는 환경오염의 정량적인 영향분석에 근거하여 구체적인 수질개선 효과가 예상되는 새로운 공법을 적극 도입하는 계획이 수립되어야 한다.

염 등(1989)은 수질 악화를 저감할 수 있는 소파제의 특성자료를 수집·정리하여 신소파제 개발에 필요한 제반 설계 및 시공기법을 파악하였다. 또한, 1990년에는 부유식 소파제의 설계 및 시공기법을 연구하였으며(염 등 1990), 1991년에는 부유식 구조물의 거동 및 소파특성을 파악할 수 있는 수치모형을 개발하였다(이 등 1991). 1992년부터는 3년에 걸쳐 항만수질 개선을 위한 방파제 개발연구를 수행하여 새로운 형태의 원호수로형 방파제의 단면 특성을 파악하였다(이 등 1992, 1993, 1994).

실해역에 응용하기 위한 해수교환방파제 연구는 이 등(1999a, 2003)에서 8종류의 형식을 도입하여 각 구조물의 특성과 유입량에 대하여 수행하였으며, 이 등(1999b)에서는 수리모형실험을 통하여 주문진항에 설치될 구조물의 월류제 형식의 단면 제원 설정, 단면 형식에 따른 해수유입량을 추정하였으며, 2000년에는 우수실 내장 경사제와 진동수로 내장 케이슨제의 수리특성을 연구하였다. 한편, 정확한 도수량 산정은 해수교환방파제의 성능 분석을 위하여 매우 중요한 인자이다. 즉, 실해역에 설치된 해수교환 방파제가 수질개선에 미치는 영향을 정량적으로 파악

하기 위해서는 다양한 해양환경, 특히 파랑하중에 대한 정확한 도수량 추정이 필수적이다.

본 연구에서는 잠제가 설치된 해수유입구조물(Fig. 1 참조)의 수리모형 실험을 실시하고(이 등 2001, 2002), 차후 해수교환방파제 기본설계 과정에서 기본적이고 필수적인 입력 자료가 되는 도수량을 산정하는 방법을 제시하였다. 먼저, 다중회귀분석을 통하여 도수량 산정에 관련된 인자들간의 정성적인 영향을 분석하고, 무차원 변수를 이용하여 도수량 산정식도 제시하였다.

2. 해수교환 방파제의 실험장치

본 실험의 목적은 주문진항 방파제의 기부측에 우수실 내장 경사식 해수교환방파제를 설치하고 이의 전면 해역에 잠제를 설치함으로써, 잠제와 해수교환 방파제 사이에 형성되는 우수지내의 수위 상승을 이용하여 외해수를 유입하는 신형 해수유입구조물의 실시설계에 필요한 연구를 수행하는 것이다. 이를 위하여 방파제 전면벽의 유입구와 후면의 도수파이프 설치규모를 변화시켜가면서 단면안별로 파고에 따른 유입량 특선곡선식을 결정하였다.

실험에 사용된 수조는 길이 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m이며, 해수교환방파제 모형은 Froude 상사법칙에 따라 축척 1/25로 제작하였다. 실험 수로는 Fig. 2에 보인 바와 같이 철재 분할판을 사용하여 폭 0.4 m의 협수로와 폭

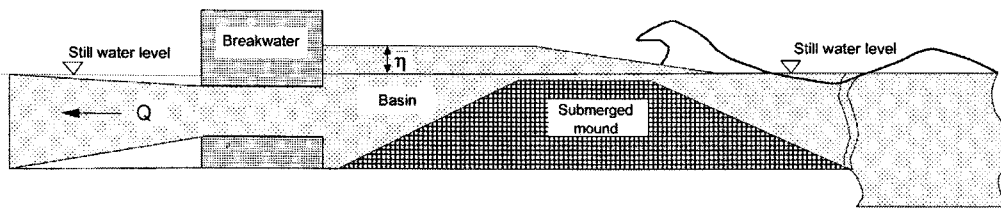


Fig. 1. Sketch of tunneled breakwater with submerged mound.

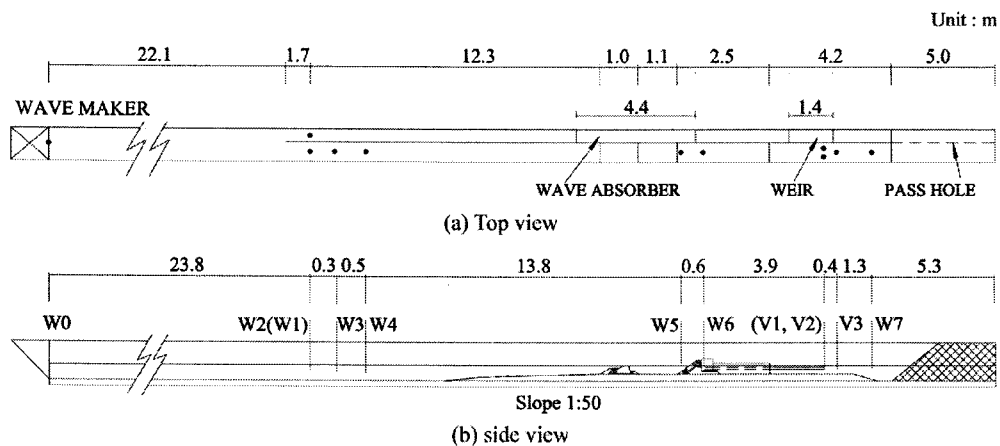


Fig. 2. Model setup in the wave flume.

0.6 m의 광수로로 분할하였다. 광수로 영역에는 모형을 설치하였으며, 협수로 영역에서는 통과파를 계측하였다. 방파제 전면의 해저 경사는 광수로와 협수로에서 동일하게 1/50로 하였다. 한편, 사용된 관측기기, 설치지점, 설치목적 및 관측내용 등은 다음과 같다.

- W1 : 협수로에서 실험 중 파고의 검증
- 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 검증
- V1~V2 : 양방향 프로펠러식 유속계로서 도수파이프 내부의 유속 측정

해수교환방파제의 수로를 통하여 상류에서 하류로 흐름이 발생하면 방파제 배후면의 수위가 과도하게 상승하므로 해수교환방파제를 통하는 흐름이 크게 약화된다. 따라서, 방파제 모형 내부의 광수로 구간에 3개, 협수로 구간에 직경 6 cm 파이프를 2개 설치하여 수조 하부에 설치된 회류파이프와 함께 하류측 수위의 상승이 자연적으로 감소되도록 하였다. 수조 하류의 광수로로부터 협수로로 물이 흐르도록 하기 위하여 소파장치 내의 철재 분할판에는 직경 1 cm의 통수공을 충분히 배치하였으며, 협수로에는 방파제 배후면의 과도한 수위상승을 억제하기 위한 웨어시스템을 설치하고 상류에는 별도의 소파장치를 설치하였다.

3. 도수량 산정을 위한 실험조건

잠제(월류제) 안정성 검토를 위한 실험은 DL(-)5.0 m, DL(-)7.0 m 조건에 대해서 수행하였다. 유속측정은 잠제를 DL(-)5.0 m에 설치하고 수위와 마루높이를 평균하면 (DL(+0.2 m)과 일치시킨 상태에서 실시하였다. 입사파는 불규칙파를 사용하였으며, 입사파 스펙트럼은 식 (1)과 같이 Goda(1987)에 의해 수정된 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼이다.

$$S(f) = 0.205H_s^2 T_s^4 f^{-5} \exp[-0.75(T_s f)^{-4}] \quad (1)$$

여기서, $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, f 는 주파수를 나타내며, H_s 및 T_s 는 각각 유의파고 및 유의파 주기를 나타낸다.

해수교환방파제를 통과하는 도수량(유입량) 측정을 위한 파의 주기 및 파고 조건은 주문진 현장의 파고 관측 자료를 이용하여 Table 1과 같이 결정하였으며, ○ 표시는 파가 실제로 실험실에서 생성된 것을 의미한다. 여기서, H_s 는 각 파군의 유의파고로서 입사파고는 주기마다 약간씩 차이가 난다.

4. 도수량 산정을 위한 실험단면

Fig. 3은 사전에 안정성을 검토한 후 채택한 월류제의 실물 단면이다. 모형에 사용한 월류제와 방파제의 이격거리(유수지 폭)는 평균수면을 기준으로 80 cm, 120 cm,

Table 1. Test wave climates for measuring inflow discharge.

Hs(cm, m)	Ts(s)					Duration time (min)
	1.06(5.3)	1.46(7.3)	1.86(9.3)	2.26(11.3)	2.60(13.0)	
1.8(0.45)	○	○	○	○	-	6(30)
4.2(1.05)	○	○	○	○	○	6(30)
6.4(1.60)	○	○	○	○	○	6(30)
10.0(2.50)	-	-	○	○	-	6(30)
12.0(3.00)	-	-	-	-	○	11(55)

*The value in () is the in-situ values.

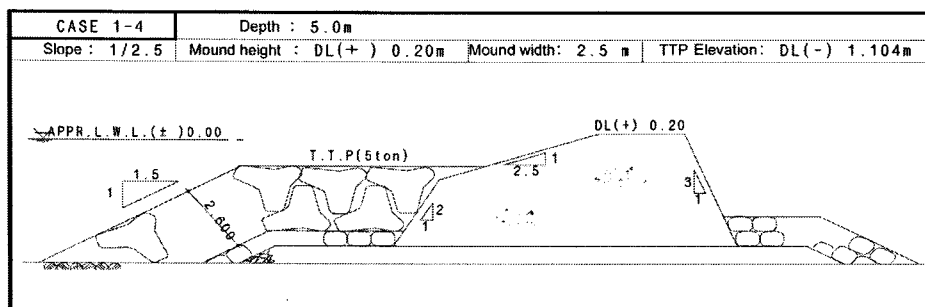


Fig. 3. Prototype section of submerged mound.

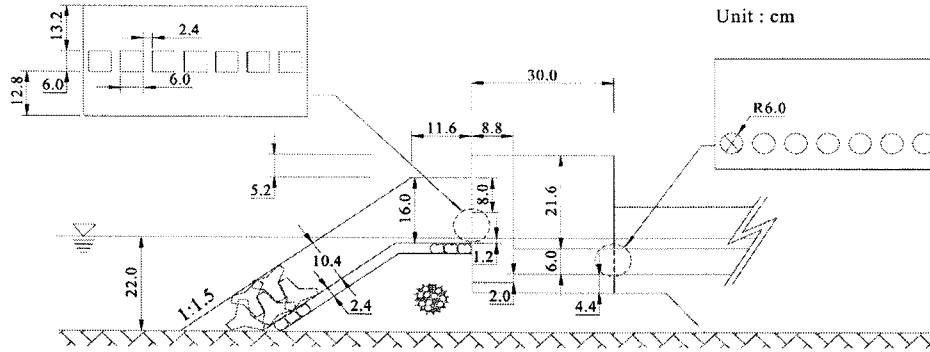


Fig. 4. Model section of breakwater for interchanging sea water.

160 cm이며, 각각의 경우에 대하여 실험하였다. 한편, 주문진항에 설치할 해수교환방파제의 표준 단면도는 동해지방해양수산청(2001)에 도시되어있다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 모형 해수교환방파제의 전면벽에는 가로, 세로가 각각 6 cm인 정사각형 유입구를 설치하였으며, 유입구의 하단은 정수위와 일치시켰다. 방파제 후면에는 내경 6 cm의 도수파이프를 설치하였다. 실험은 전면벽 유입구의 설치 간격과 후면 도수파이프의 설치 간격을 바꾸면서 수행하였으며, 도수파이프의 길이는 390 cm이다. 이 구조양식은 방파제의 배후에 물량장 등의 공간이 필요한 경우에 설계가 가능한 형식이다.

5. 실험 및 분석 결과

실험 조건

현장수심 DL(-)5.0 m 조건에서 5분 동안 유입유속을 관측하였다. 유속은 도수파이프의 중앙에서 프로펠러 유속계로 초당 40개의 자료를 취득하여 산정하였으며, 이 결과를 도수파이프내에서의 단면 평균유속으로 가정하였다. 유입유속 관측중 해수교환방파제 배후 수역의 평균수위 상승은 0.1 cm 이내로 제한되도록 웨어시스템 전면의 웨어 높이를 조절하였으며, 실험은 해수교환방파제의 전면벽 유입구의 개구율과 도수파이프의 개구율을 변화시키며 수행하였다(Table 2 참조).

Table 2에서 F_n 과 S_n 은 방파제 단면의 제원과 관련된 것으로서, F_n 은 모형 방파제의 길이 60 cm당 크기 6 cm × 6 cm의 유입구가 전면벽에 n 개 설치된 단면을 의미하며, S_n 은 내경 6 cm의 도수파이프가 방파제 후면에 n 개 설치된 단면을 의미한다. 파의 주기변화에 따른 평균유속

변화는 민감하지 않았다. 본 연구의 도수량 산정 분석에 사용한 불규칙파랑 실험 결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 5종류이며, 각각 68개(파고와 주기 변화 경우 수 17 개 × 도수파이프수 4개)의 자료로 구성되어 총 340개의 자료를 포함하고 있다. 실험 경우의 수가 많고, 변화인자가 많으므로 체계적이고 다각적인 분석을 통하여 도수량에 영향을 미치는 인자를 추출하여야 한다.

분석 방법

자료분석과 관련된 대부분의 연구는 관련된 변수의 상호 관련성을 찾아야 한다. 즉, 독립변수와 종속변수의 함수관계를 알아내려고 하는 수많은 노력이 필요하며, 이러한 관계를 실험자료를 분석하여 도출할 수 있다면 귀중한 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 변수의 함수관계를 추출하는 통계적 기법으로 이용되는 다중회귀분석 방법을 도수량 산정에 적용하였다.

해수교환방파제의 도수량(유입량 또는 유속 × 단면적)은 파고, 주기, 수위 등 두 개 이상의 독립변수에 의하여 영향을 받고 있다. 이처럼 종속변수가 2개 이상의 독립변수에 의해 영향을 받는 것으로 예상될 때, 즉 종속변수의 변화를 설명하기 위하여 여러 개의 독립변수가 사용될 때의

Table 3. Outline of experiment for measuring inflow discharge.

Front Inflow Mouth	Water-carrying Pipe	Width of the Basin, B		
		80 cm	120 cm	160 cm
F3	S1, S2, S3, S4			○
F5	S1, S2, S3, S4			○
F7	S1, S2, S3, S4	○	○	○

Table 2. Total cross sectional area per unit length of breakwater.

Unit	Site	Inflow Mouth of the Front Wall (F_n)			Water-carrying Pipe of the Rear Wall (S_n)			
		F7	F5	F3	S4	S3	S2	S1
cm ² /cm		4.20	3.00	1.80	1.884	1.413	0.942	0.471

회귀분석을 다중회귀분석(multiple regression analysis; 박 2001)이라 한다. 특히 독립변수와 종속변수간의 관계가 직선형태일 경우 다중선형 회귀분석을 사용하게 된다. 독립변수가 $p(\geq 2)$ 개일 때 다중선형 회귀분석의 모형은 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_px_p + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

여기서, y 는 종속변수, x_1, \dots, x_p 는 p 개의 주어진 독립변수들, $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_p$ 는 미지의 회귀계수, ε 은 오차항으로서 기대값 0, 분산 σ^2 인 정규분포를 따른다. 그러나, 이들 함수관계가 선형이 아닌 경우는 비선형모형이라 부른다. 그러나, 비선형 모형은 적절한 변환을 취하여 선형으로 바

꿀 수 있는 모형도 있다. 다음 식 (3)은

$$y = \alpha x_1^\beta x_2^\gamma \dots x_p^\omega \quad (3)$$

로그변환을 통하여 선형 식 (4)로 나타낼 수 있다(Ott and Longnecker 2001).

$$\begin{aligned} \log y &= \log \alpha + \beta \log x_1 + \gamma \log x_2 + \dots + \omega \log x_p \\ &= \theta_0 + \theta_1(\log x_1) + \theta_2(\log x_2) + \dots + \theta_p(\log x_p) \end{aligned} \quad (4)$$

회귀분석은 통계 분석용 프로그램인 SAS(Version 8.2)를 사용하였다. 본 연구에서 다중회귀분석을 실시한 이유는 종속변수인 유입유량에 영향을 미치는 독립변수의 정

Table 4. Results of multiple regression analysis using original data.

No. of independent variables (n)	p = n + 1	Independent variables	Sum of residual squares, SSE (p)	Determination coefficient	Modified determination coefficient	MSE(p)	Cp	I_a
1	2	Hs	13681	0.5855	0.5843	40.47693	626	0.8555
1	2	Sn	24881	0.2463	0.244	73.61158	1414	0.6194
1	2	Ts	30533	0.0751	0.0723	90.33293	1812	0.3590
1	2	Fn	32208	0.243	0.0214	95.29105	1930	0.2104
1	2	B	32798	0.0064	0.0035	97.0353	1971	0.1108
2	3	Sn, Hs	5551	0.8318	0.8308	16.47371	56	0.9521
2	3	Fn, Hs	12879	0.6098	0.6075	38.21751	572	0.8662
2	3	Hs, B	13469	0.592	0.5896	39.96693	613	0.8583
2	3	Ts, Hs	13681	0.5856	0.5831	40.59631	628	0.8555
2	3	Sn, Ts	22403	0.3213	0.3173	66.47766	1242	0.6840
2	3	Fn, Sn	24079	0.2706	0.2662	71.45049	1360	0.6403
2	3	Sn, B	24668	0.2527	0.2483	73.19991	1401	0.6246
2	3	Fn, Ts	29731	0.0994	0.094	88.22146	1757	0.4385
2	3	Ts, B	30320	0.0815	0.076	89.97088	1799	0.3773
2	3	Fn, B	32206	0.0244	0.0186	95.56583	1932	0.2094
3	4	Fn, Sn, Hs	4749	0.8561	0.8548	14.13613	2	0.9598
3	4	Sn, Hs, B	5339	0.8383	0.8368	15.89076	43	0.9542
3	4	Sn, Ts, Hs	5551	0.8318	0.8303	16.52201	58	0.9521
3	4	Fn, Hs, B	12877	0.6099	0.6064	38.32324	574	0.8663
3	4	Fn, Ts, Hs	12879	0.6098	0.6064	38.33053	574	0.8662
3	4	Ts, Hs, B	13469	0.592	0.5883	40.08515	615	0.8584
3	4	Fn, Sn, Ts	21601	0.3456	0.3398	64.2889	1187	0.7040
3	4	Sn, Ts, B	22191	0.3278	0.3218	66.04353	1229	0.6895
3	4	Fn, Sn, B	24076	0.2706	0.2641	71.65513	1362	0.4861
3	4	Fn, Ts, B	29728	0.0994	0.0914	88.47601	1759	0.4111
4	5	Fn, Sn, Hs, B	4747	0.8561	0.8545	14.17029	4	0.9598
4	5	Fn, Sn, Ts, Hs	4749	0.8561	0.8544	14.1776	4	0.9598
4	5	Sn, Ts, Hs, B	5339	0.8383	0.8363	15.93747	45	0.9542
4	5	Fn, Ts, Hs, B	12876	0.6099	0.6053	38.43691	575	0.8663
4	5	Fn, Sn, Ts, B	21598	0.3457	0.3379	64.47277	1189	0.7041
5	6	Fn, Sn, Ts, Hs, B	4746	0.8562	0.854	14.21199	6	0.9598

량적인 영향을 파악하기 위한 것이다. 즉, 회귀 방정식을 추정 목적에 유용하도록 만들기 위해서는, 가능하면 모든 독립변수를 포함하여야 한다. 그러나 모든 독립변수를 포함할 경우, 관련 자료를 취득하고 분석하는 데 많은 시간과 비용이 필요하기 때문에 중요한 독립변수만을 회귀 방정식에 포함시키게 된다. 이러한 상반되는 목적달성을 위한 절충안으로 최적 회귀방정식을 선정할 필요성이 발생한다(Draper and Smith 1998; Montgomery et al. 2001; 김 등 2001; Ott and Longnecker 2001). 이러한 두 가지 원칙은 서로 이율 배반적이므로 타협이 이루어져야 하며, 적절한 관정기준을 택하여 독립변수를 선택하여 최적 회귀방정식을 만들어야 한다. 변수 선택을 위해서는 표본결정계수 R^2 , 수정된 표본결정계수 R_{adj}^2 , Mallows의 C_p 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

분석 결과

1단계로 선형 식 (2) 또는 비선형 식 (3)을 사용할 것인지 결정하기 위하여 전술한 수리모형 실험결과에 대하여 다중회귀분석을 실시하였다. 종속변수 및 독립변수가 포함된 관계식은 $V=f_n(Fn, Sn, Ts, Hs, B)$ 로 설정하였다. 여기서, V 는 시간 평균 유속, F_n 은 전면벽 유입구의 설치규모, S_n 은 도수파이프의 설치규모, T_s 는 주기, H_s 는 파고, B 는 유수지 폭을 의미한다. 본 연구에서는 SAS 프로그램을 이용하여 340개의 관측 자료에 대하여 분석을 실시하였다.

원래의 자료를 사용하여 분석한 결과는 Table 4에, 로그 변환한 자료를 사용한 분석결과는 Table 5에 정리하였다. 표에서 n 은 독립변수의 개수, p 는 $n+1$ 이며, $SSE(p)$ 는 오차 제곱합(error sum of squares), $MSE(p)$ 는 평균제곱오차(mean squared error)를 의미한다. Table 5, Fig. 5~Fig. 7에

Table 5. Results of multiple regression analysis using transformed data.

No. of independent variables (n)	p = n + 1	Independent variables	Sum of residual squares, SSE(p)	Determination coefficient	Modified determination coefficient	MSE(p)	Cp	I_a
1	2	LHs	13.16186	0.6548	0.6538	0.03894	2648	0.8863
1	2	LSn	27.98341	0.2661	0.2639	0.08279	6009	0.6437
1	2	LTs	35.94433	0.0573	0.0545	0.10634	7814	0.3218
1	2	LFn	36.58808	0.0404	0.0375	0.10825	7960	0.2790
1	2	LB	37.78434	0.009	0.0061	0.11179	8231	0.1341
2	3	LSn, LHs	3.01785	0.9208	0.9204	0.00896	350	0.9790
2	3	LFn, LHs	11.62252	0.6952	0.6934	0.03449	2301	0.9029
2	3	LHs, LB	12.81879	0.6638	0.6618	0.03804	2572	0.8902
2	3	LTs, LHs	13.16153	0.6548	0.6528	0.03905	2650	0.8863
2	3	LSn, LTs	25.80032	0.3233	0.3193	0.07656	5516	0.6905
2	3	LFn, LSn	26.44406	0.3064	0.3023	0.07847	5662	0.6782
2	3	LSn, LB	27.64033	0.2751	0.2708	0.08202	5933	0.6500
2	3	LFn, LTs	34.40499	0.0976	0.0923	0.10209	7467	0.4145
2	3	LTs, LB	35.60126	0.0663	0.0607	0.10564	7738	0.3433
2	3	LFn, LB	36.58444	0.0405	0.0348	0.10856	7961	0.2777
3	4	LFn, LSn, LHs	1.4785	0.9612	0.9609	0.0044	3	0.9900
3	4	LSn, LHs, LB	2.67477	0.9298	0.9292	0.00796	274	0.9815
3	4	LSn, LTs, LHs	3.01752	0.9209	0.9202	0.00898	352	0.9790
3	4	LFn, LHs, LB	11.61888	0.6953	0.6925	0.03458	2302	0.9030
3	4	LFn, LTs, LHs	11.62219	0.6952	0.6925	0.03459	2303	0.9029
3	4	LTs, LHs, LB	12.81846	0.6638	0.6608	0.03815	2574	0.8902
3	4	LFn, LSn, LTs	24.26098	0.3637	0.358	0.07221	5169	0.7203
3	4	LSn, LTs, LB	25.45724	0.3323	0.3263	0.07577	5440	0.6974
3	4	LFn, LSn, LB	26.44043	0.3065	0.3003	0.07869	5663	0.6784
3	4	LFn, LTs, LB	34.40135	0.0977	0.0897	0.1023	7468	0.4147
4	5	LFn, LSn, LHs, LB	1.47487	0.9613	0.9609	0.0044	4	0.9900
4	5	LFn, LSn, LTs, LHs	1.47818	0.9612	0.9608	0.00441	5	0.9900
4	5	LSn, LTs, LHs, LB	2.67445	0.9299	0.929	0.00798	276	0.9815
4	5	LFn, LTs, LHs, LB	11.6156	0.6953	0.6916	0.03468	2303	0.9030
4	5	LFn, LSn, LTs, LB	24.25734	0.3638	0.3562	0.07241	5170	0.7204
5	6	LFn, LSn, LTs, LHs, LB	1.47453	0.9613	0.9607	0.00441	6	0.9900

서 독립변수 앞에 붙인 문자 “L”은 로그변환의 의미를 갖고 있다. 분석 결과 5개의 변수를 모두 포함하여 원래 자료를 사용한 경우 $R^2=0.86$, 로그변환된 자료를 사용한 경우 $R^2=0.96$ 로 산정되어, 로그변환된 자료를 사용한 결과의 표본결정계수 값이 상당히 커지는 것을 볼 수 있다. 이 방법은 결정계수에 의한 비교 방법이고, 이외에도 비교하는 사람의 관점에 따라서 여러 가지 비교 방법을 생각할 수 있다.

한편, Willmott(1981)가 제안한 일치지수(Index of Agreement)는 1에 가까워질수록 예측치와 측정치가 일치함을 의미한다. 일치지수는 다음과 같이 표현된다.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|]^2} \quad (5)$$

여기서, P_i 및 O_i 는 각각 예측된 무차원 평균유속과 측정된 무차원 평균유속을 나타내며, \bar{O} 는 측정된 평균유속의 평균을 나타낸다.

원 자료와 로그변환된 자료를 사용하여 분석한 일치지수, I_a 를 Table 4, Table 5에 제시하였으며, 대부분의 경우 로그변환된 자료를 사용한 결과의 일치지수가 더 크다.

Fig. 5에 p 와 표본결정계수 R^2 의 관계를 도시하였다. 5개의 변수중 S_n, H_s 만을 사용한 경우 $R^2=0.92$ 로 5개의 변수를 사용한 결과 $R^2=0.96$ 와 근사한 값을 얻을 수 있다. Fig. 6에는 p 와 평균 제곱합 MSE의 관계를 도시하였다. 2개의 변수 S_n, H_s 만을 사용하여도 5개의 변

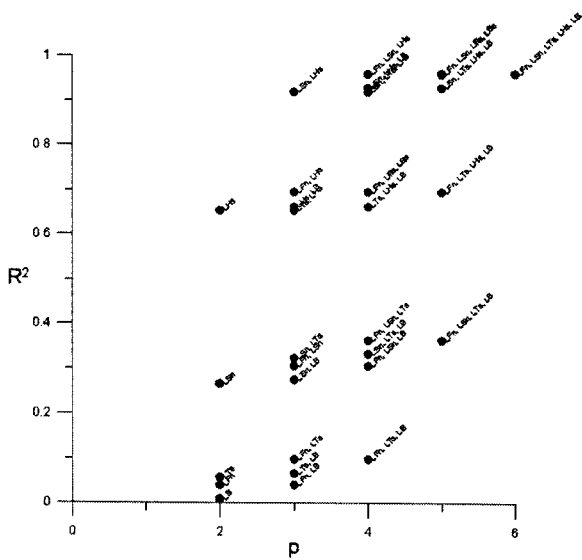


Fig. 5. Relationship between sample coefficient of determination R^2 with p .

수 모두를 사용한 결과와 동일한 정도의 최저 MSE 값을 얻을 수 있다. Fig. 7에는 p 와 Mallows의 C_p 의 관계를 도시하였다. 이 결과에서 2개의 변수 S_n, H_s 만을 사용한 경우에는 5개의 변수 모두를 사용한 결과를 상회하는 C_p 값을 얻고 있으나, 다른 변수들을 2개씩 조합한 경우보다는 상당히 작은 C_p 값이라는 것을 알 수 있다.

이러한 검토결과를 종합한 결과, 2개의 변수 S_n, H_s 만을 사용하여 회귀식을 구성하여도 해수교환방파제를 통한 유입유속을 표현할 수 있으며, F_n, T_s, B 는 유속에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있다.

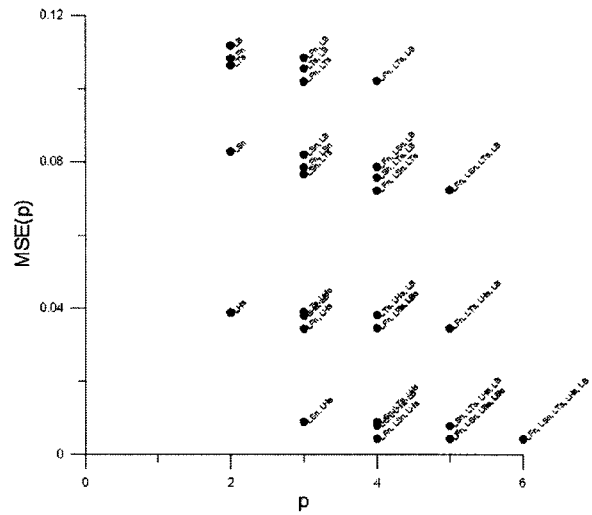


Fig. 6. Relationship between mean squared error MSE(p) with p .

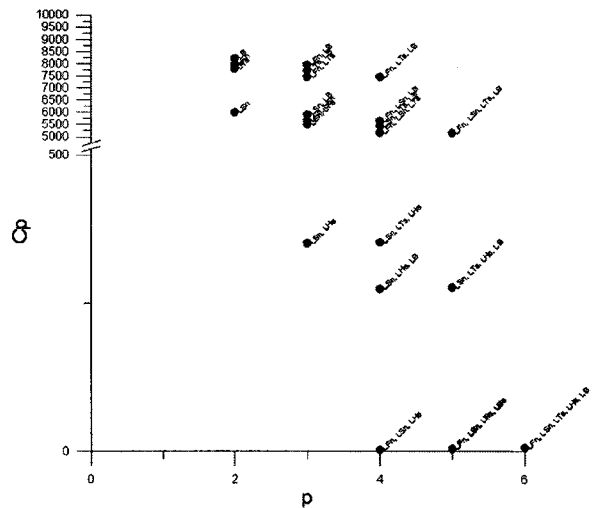


Fig. 7. Relationship between Mallows's C_p with p .

6. 차원해석

공학적인 측면에서 자료의 활용성을 높이기 위하여 변수를 무차원화하여 관계식을 유도하였다. 차원해석의 목적은 변수를 줄이고 또 그들을 모아서 무차원 형태로 만드는 것에 있지만, 부가적으로 시간과 경비에 있어서 막대한 절약이 가능하고, 실험이나 이론을 생각하고 계획할 때에 도움이 된다. 또한 값싸고 작은 모형에서 얻은 자료를 값비싸고 큰 원형에 대한 설계자료로 변환시킬 수 있는 상사법칙을 얻을 수 있다.

$V=f_n(S_n, H_s, g)$ 의 관계가 있으므로, Buckingham 방법(ASCE 2000; Fischer *et al.* 1979; Sharp 1981)을 사용하여 차원해석을 실시한 결과, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{V}{\sqrt{g \cdot S_n}} = f_n\left(\frac{H_s}{S_n}\right) = A\left(\frac{H_s}{S_n}\right) \quad (6)$$

이 식에서 좌변의 무차원 변수는 Froude no, A 는 실험에 의하여 구하는 상수이며, 본 실험결과를 이용하여 산정한 결과 $A=0.0809$, $R^2=0.934$ 를 얻는다. 따라서, 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V}{\sqrt{g \cdot S_n}} = 0.0809 \cdot \left(\frac{H_s}{S_n}\right) \quad (7)$$

식 (7)을 활용하여 예측한 결과와 측정치로 일치지수를 산정한 결과, $I_a=0.9813$ 로 계산되어, 식 (7)의 활용성을 확인하였다.

7. 결론 및 토의

본 연구에서는 잠제와 유수지를 갖는 해수유입 구조물에 대하여 도수량 추정식을 개발하기 위하여 불규칙파 2차원 수리모형실험을 실시하고, 다중회귀분석을 실시하였다. 수리모형실험은 5종류에 대하여 실시하였으며, 각 경우에 대하여 각각 68개의 자료가 생성되었으며, 총 340개의 자료를 얻었다. 다중회귀분석과정에서, 종속변수에 대하여 설명력이 좋은 독립변수를 선택하기 위하여 변수 선택법을 사용하였다. 본 연구에서는 통계 프로그램인 SAS 모형을 이용하여 독립변수를 선택하였다.

도수유량을 결정하는 중요 변수로는 F_n , S_n , T_s , H_s , B 중 F_n , T_s 와 B 를 제외한 S_n , H_s 2개의 독립변수를 선택하였다. 즉, 잠제와 유수지를 갖는 해수교환방파제의 도수파이프를 통한 평균유속은 주로 파고 및 도수파이프의 설치 규모에 따라 결정되며, 파랑의 주기 및 유수지 폭에 따라서는 거의 변하지 않는 것으로 파악되었다.

최종적으로 자료의 활용도를 높이기 위하여 변수를 무차원화하여 분석을 실시하였다. 즉, 무차원 변수 $Y=V/\sqrt{g \cdot S_n}$, $X=H_s/S_n$ 를 도입하여 $Y=0.0809 \cdot X$ 의 관계식을 도출하였다. 본 연구결과는 유사한 형태의 해수교환 방파제 수리모형실험 및 유입유량 산정식 개발에 활용될 수 있으며, 현장 설계에 필요한 기본설계지침서 작성에도 활용이 가능할 것으로 사료된다.

본 실험은 해양수산부의 연구과제 ‘해수교환 방파제의 실용화 연구(IV)’의 지원하에 수행되었으며, 수리모형실험을 수행한 장세철 선임연구기사에게 사의를 표합니다. 또한 첫 번째 저자는 2002년도 원광대학교 교비지원을 받아 연구를 수행하였습니다.

사 사

본 실험은 해양수산부의 연구과제 ‘해수교환 방파제의 실용화 연구(IV)’의 지원하에 수행되었으며, 수리모형실험을 수행한 장세철 선임연구기사에게 사의를 표합니다. 또한 첫 번째 저자는 2002년도 원광대학교 교비지원을 받아 연구를 수행하였습니다.

참고문헌

- 김우철, 김재주, 박병욱, 박성현, 송문섭, 이상열, 이영조, 전중우, 조신섭. 2001. *일반통계학*. 영진문화사. 591 p.
- 동해지방해양수산청. 2001. 주문진항 해수교환시설 실시설계 용역 수리 및 수치모형 실험 보고서. 228 p.
- 박성현. 2001. *회귀분석*. 민영사. 666 p.
- 염기대 등. 1989. 해안구조물의 파력흡수를 위한 신소재 개발 연구(I). 과학기술처(연구기관: 해양연구소). 394 p.
- 염기대 등. 1990. 해안구조물의 파력흡수를 위한 신소재 개발 연구(II). 과학기술처(연구기관: 해양연구소). 356 p.
- 이달수 등. 1991. 해안구조물의 파력흡수를 위한 신소재 개발 연구(III). 과학기술처(연구기관: 해양연구소). 169 p.
- 이달수 등. 1992. 항만수질 개선을 위한 방파시설의 개발연구(I). 과학기술처(연구기관: 한국해양연구소). 167 p.
- 이달수 등. 1993. 항만수질 개선을 위한 방파시설의 개발연구(II). 과학기술처(연구기관: 한국해양연구소). 233 p.
- 이달수 등. 1994. 항만수질 개선을 위한 방파시설의 개발연구(III). 과학기술처(연구기관: 한국해양연구소). 171 p.
- 이달수, 오영민, 김창일. 2001. 유수실 내장형 경사식 해수교환방파제의 개발 및 기본 유입특성. 대한토목학회 학술발표논문집. CD ROM.
- 이달수 등. 1999(a). 해수교환방파제의 실용화 연구(I). 해양수산부(연구기관: 한국해양연구소). 154 p.
- 이달수 등. 1999(b). 해수교환방파제의 실용화 연구(II) - 주문진항의 해수교환 방안 -. 해양수산부(연구기관: 한국해양연구소). 313 p.
- 이달수 등. 2000. 해수교환방파제의 실용화 연구(III). 해양수산부(연구기관: 한국해양연구소). 386 p.
- 이달수 등. 2001. 해수교환방파제의 실용화 연구(IV). 해양수산부(연구기관: 한국해양연구원). 337 p.
- 이달수 등. 2002. 해수교환방파제의 실용화 연구(V). 해양수산부(연구기관: 한국해양연구원). 480 p.
- 이달수 등. 2003. 해수교환방파제의 형상별 순유입유량 특성

- 비교. *Ocean Polar Res.*, 25(3S), 393-397.
- 合田良實. 1987. 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質. 第34回 海岸工学講演會 論文集, 131-135.
- ASCE. 2000. Hydraulic Modeling Concepts and Practice. 390 p.
- Draper, N.R. and H. Smith. 1998. Applied Regression Analysis. Wiley Interscience Publication. 706 p.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger, and N.H. Brooks. 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press. 483 p.
- Montgomery, D.C., E.A. Peck, and C.G. Vining. 2001. Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley Interscience Publication. 641 p.
- Ott, R.L. and M. Longnecker. 2001. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. Duxbury. 1152 p.
- Sharp, J.J. 1981. Hydraulic Modelling. Butterworths. 242 p.
- Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2(2), 184-194.

Received Jan. 27, 2004

Accepted Sep. 13, 2004