

간섭식 부방파제의 2차원 단면형상 소파성능

송무석[†] · 김도영
홍익대학교 조선해양공학과

Performance Characteristics of Interference-Type Floating Breakwaters with Various Two-dimensional Sectional Shapes

Museok Song[†] and Do-Young Kim

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon 339-701, Korea

요 약

부방파제의 특성을 간단히 검토하고 수치해법을 이용하여 소파성능을 분석하였다. 비점성 포텐셜 유동의 일반적인 해법인 경계면적분법을 사용하였고, 다양한 형상의 부방파제 2차원 단면특성을 투과율을 중심으로 살펴보았다. 계류계의 강도와 질량관성반경 및 흘수의 영향을 기본적인 폰툰 형태에 대하여 고찰하였고, 사다리꼴, 중절모형상, 탁자형상 등의 단면에 대하여 형상에 변화를 주며 소파특성을 조사하였다. 각 단면마다 효과적인 소파가 기대되는 입사파의 파장이 달라지지만 입사파의 파장과 부체의 길이비가 10 이상이 되는 경우까지 만족스런 소파가 이루어지는 경우도 있다.

Abstract – The characteristics of the floating breakwater is briefly reviewed and their performance is numerically investigated. The numerical scheme is a boundary integral method for inviscid potential flows, and various two-dimensional floating breakwater modules are studied focusing on the transmission coefficient. The general characteristics of pontoons is studied as function of mooring line stiffness, mass moment inertia and draft. Trapezoidal-, hat- and table-shape cross-sections are also studied with varying shape-parameters. The efficiency varies with changes in each shape-parameter and for some cases satisfying tranquility can be expected with even longer waves.

Keywords: Floating Breakwater(부방파제), Tranquility(정온도), Boundary Integral Method(경계적분법), Transmission Coefficient(투과계수)

1. 서 론

해양공간의 다양한 활용을 위하여 적절한 정온도(tranquility)의 확보가 필요하고, 이를 위해 방파 혹은 소파구조물이 사용된다. 항만의 정온도를 보장하기 위하여 주로 이용되어 온 착저식 방파제는 입사파를 완전히 차단한다는 점에서 기능적으로 우수하나, 시공비와 설치기간이라는 경제적인 면과 해수의 순환을 억제한다는 환경적인 측면에서 부정적인 특성을 가진다. 이런 배경에서 부유식 방파제의 활용이 일본 등의 선진국을 중심으로 이루어지고 있고, 우리나라에서도 이들의 도입이 적극적으로 고려되고 있다(대한조선학회[1996], 김현주 등[1996], 谷本勝利[1992], 加藤重一[1974], 全國沿岸漁業振興開發協會[1992]).

본 연구에서는 여러 연구자들에 의하여 조명된 부방파제의 특성을 간단히 고찰하고, 계류된 간섭식 부방파제의 성능과 직접적인 관련이 있는 부체의 2차원 단면 형상에 따른 소파성능을 수치해법을 활용하여 체계적으로 조사하였다. 상자형(pontoon)의 대표 단면에 대한 일반적인 특성을 검토하고 사다리꼴, 중절모형, 테이블형의 단면들을 변형시키며 실현 가능한 최소소파 성능과 형상 변화가 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구의 결과가 부소파 구조물의 효율적인 단면을 도출하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 부방파제의 특징 및 종류

부유식 방파제의 특징을 중력식 착저방파제와 비교한 장단점을 중심으로 살펴보자. 우선 장점으로는, 환경 및 생태계에 미치는 영향이 작다; 수심의 제한을 덜 받는다; 건설 및 공사기간이 짧으며,

[†]Corresponding author: msong@hongik.ac.kr

건설비용이 고정식에 비하여 상대적으로 많지 않다; 이동성이 있다; 해저 지질 조건에 영향을 많이 받지 않는 등이다. 한편, 단점으로는, 어느 정도의 투과파를 허용할 수밖에 없다; 방파제의 성능이 입사파의 주기에 따라 다르다; 계류 시스템의 손상이 발생할 경우 근처의 구조물에 피해를 입힐 수 있다는 등이다(김현주 등[1996], 谷本勝利[1992], 加藤重一[1974]).

부유식 방파제의 종류는 파를 감소하는 원리에 따라, 감쇠식, 반사식, 간섭식, 복합식 등으로 분류한다. 또한 부체의 재료에 따른 종류로는, 폰툰이나 카타마란형태를 가지는 강체형식과 페타이어나 유연막을 사용하는 유연체형식이 있다. 구조물의 단면 형태에 따라 직사각형, 사다리꼴, 원형 등의 기본형과 이에 부가물을 부착하는 A프레임형 또는 Y프레임 형이 있다. 방파제의 거동을 제어하는 방식에 따라 수동형과 동력을 이용하여 최적 흡수를 유도시키는 능동형으로 분류하기도 한다(김도영 등[2000]).

3. 2차원 단면형상에 따른 방파특성

본 절은 계산을 이용하여 다양한 형태의 2차원 단면의 소파특성을 살펴보고 이를 기반으로 방파효율의 극대화를 위한 단면형상의 방향을 제시해 본다. 사용된 수치해법은 일반적인 경계적분법으로 자세한 내용은 김도영 등[2000]을 참고하면 되고, 홍도천 등[2004]에서 유사한 형상의 계류계가 없는 부방파제에 대한 매우 제한적인 연구 결과를 찾을 수 있다. 본 연구에서 제시되는 소파특성은 투과계수, 즉 투과파고의 입사파고에 대한 크기비로 평가한다.

3.1 상자형의 일반 특성 분석

우선 가장 단순하면서도 2차원 부체의 보편적인 특성을 보이는 상자형(pontoon)의 부체를 살펴보았다(Fig. 1). B와 T는 각각 부체의 폭과 진행방향의 길이) 흡수이다. Table 1은 수치실험에 이용된 부체의 특성치들인데, R은 질량관성반경, KG는 바닥에서 무게중심까지의 연직높이, GM은 메타센터 높이, K는 2차원 스프링상수, 그리고 M은 방파제의 단위 길이당 질량이다.

Fig. 2는 기본 형태인 케이스3에 대하여 계류계의 강도에 변화를 주며 소파특성을 조사한 결과이다. 특별한 언급이 없는 한 가로축은 입사파의 파장과 부체폭의 비를 나타내고 세로축은 투과

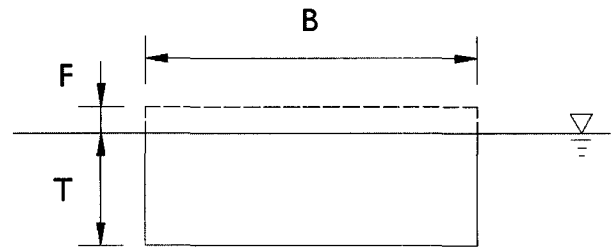


Fig. 1. Definition sketch of pontoon type.

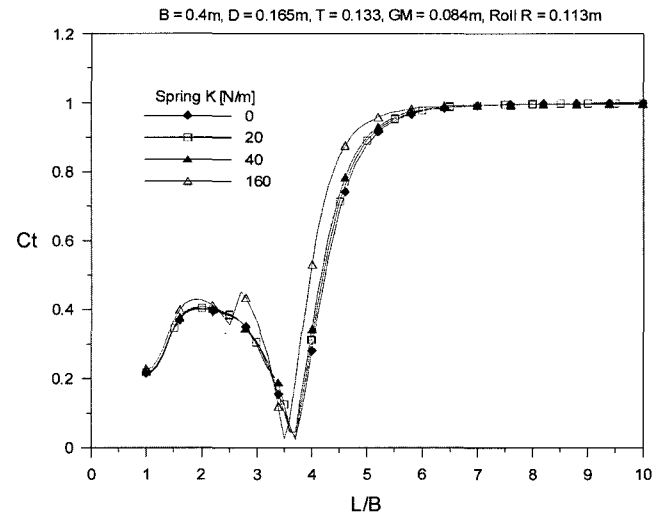


Fig. 2. Effect of spring constant (Case 3).

계수이다. 스프링상수가 크지 않으면 소파특성에 눈에 띄는 영향이 나타나지 않고 전반적으로 부체폭의 3.7배의 파장을 갖는 파에 대하여 소파효과가 큰 것을 알 수 있다. 원칙적으로 스프링상수가 작을수록 장파쪽에서 효과가 좋다는 것을 알 수 있는데, 이는 기본적으로 부체가 파주기에 따라 자유롭게 운동함으로써 발생시키는 발산파의 효과를 스프링상수가 최소가 될 때 얻을 수 있음에 기인한다. 결국 계류계는 조류, 파랑, 바람 등에 의하여 부체가 받게 되는 표류력을 견디면서 카타너리 형식을 취할 수 있도록 설계하면 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 부체의 질량관성 반경의 영향을 보이고 있다. 부체의 질량을 무게중심에 집중시키거나 무게중심에서 멀리 분포시킴으로써 질량관성반경을 변화시킬 수 있는데, 기본적으로 소파특성에

Table 1. Main particulars of pontoon type.

Case No.	B [m]	T [m]	F [m]	R [m]	KG [m]	GM [m]	K [N/m]	Mass [ton/m]
1	7.5	7.5	0.6	2.599	4.050	0.324	20	57.656
2	7.5	3.75	0.6	2.141	2.175	0.951	20	28.828
3	7.5	2.5	0.6	2.126	1.550	1.575	20	19.219
4	7.5	1.875	0.6	2.213	1.238	2.199	20	14.414
5	7.5	1.5	0.6	2.329	1.050	2.826	20	11.531
6	4.329	4.329	0.6	1.676	2.466	0.060	20	19.209
7	6.124	3.062	0.6	1.791	1.830	0.720	20	19.220
8	8.659	2.166	0.6	2.522	1.382	2.588	20	19.224
9	9.683	1.937	0.6	2.888	1.268	3.735	20	19.225

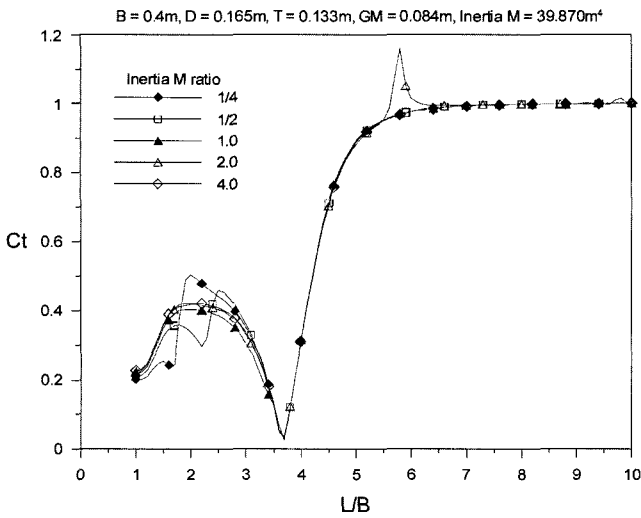


Fig. 3. Effect of moment inertia (Case 3).

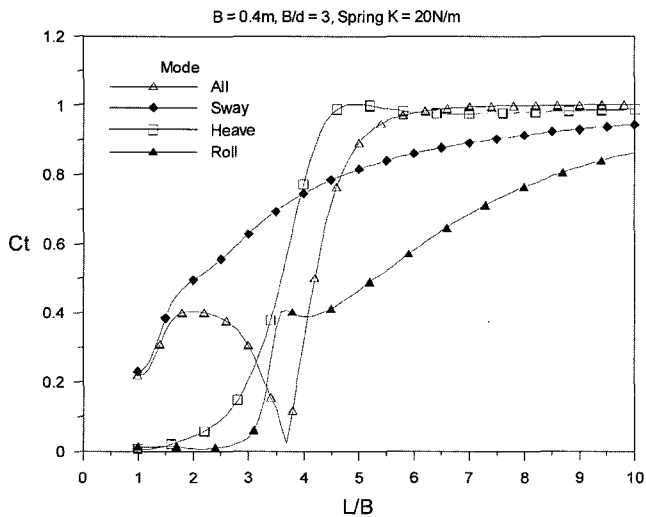


Fig. 4. Contributions of each mode (Case 3).

큰 영향을 주지 않는 것으로 파악된다. 질량관성반경은 부체의 운동 중에서 횡동요에(roll motion) 직접적인 관련이 있는데, 결국 횡동요가 상대적으로 긴 파장을 가지는 파랑의 소파에는 영향을 거의 주지 못함을 말한다.

파중에서 부체는 파 진행방향의 직선운동(좌우동요, sway), 수직운동(상하동요, heave) 그리고 회전운동(횡동요, roll)을 하는데, 이들 각 운동이 소파에서 하는 역할을 파악하고자 운동을 모드별로 분리하여 결과를 Fig. 4에 보였다. 단파쪽에서는 좌우동요의 영향을, 장파쪽에서는 상하동요의 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5와 6에는 운동 모드별 위상차와 운동응답의 크기를 보였다. 좌우동요와 상하동요의 위상차이가 없어지는 영역에서 최대의 소파효과가 얻어짐을 확인할 수 있고, 횡동요의 경우 감쇠력의 부족으로 운동응답이 과도하게 나타나지만 소파에는 큰 역할을 하지 못함을 알 수 있다.

부체의 흘수변화의 영향을 조사하여 Fig. 7과 8에 보였다. Fig.

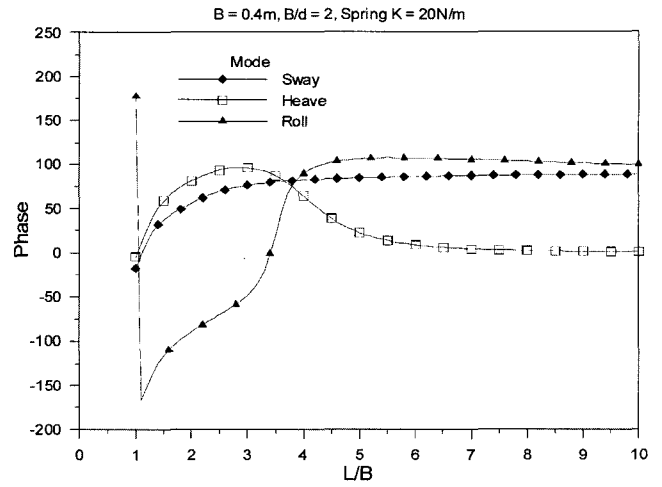


Fig. 5. Phases (in degree) of each motion (Case 3).

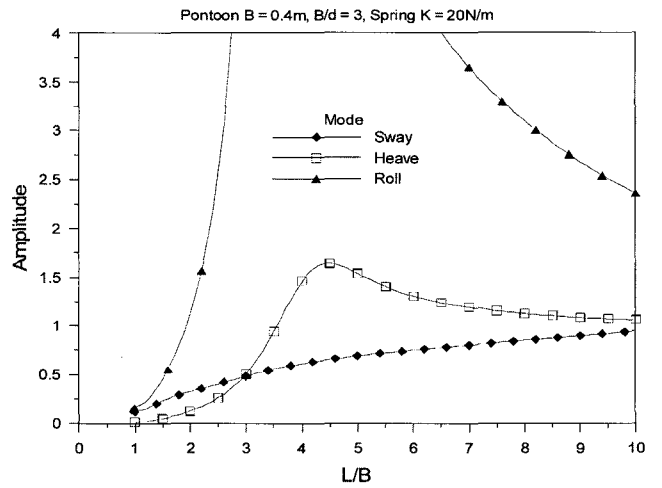


Fig. 6. RAO of each mode (Case 3).

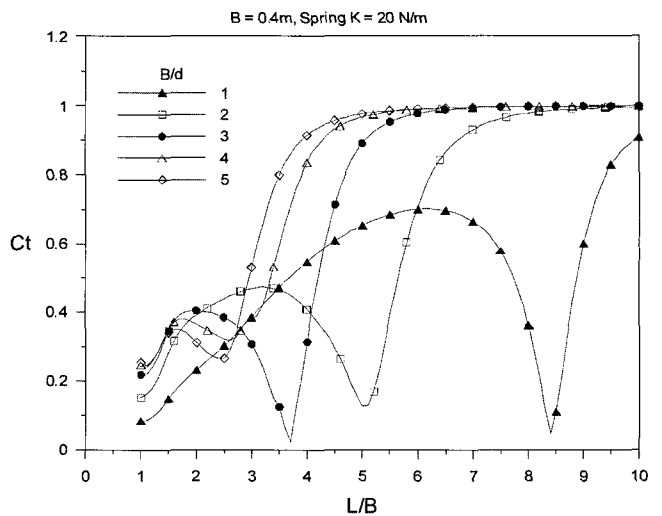


Fig. 7. Effect of draft with B fixed (Case 1~5).

7은 폭을 고정시킨 상태로 흘수에 변화를 주어 실제로는 부체의 크기와 질량이 변하는 상황이다. 흘수를 폭과 같은 크기까지 증가

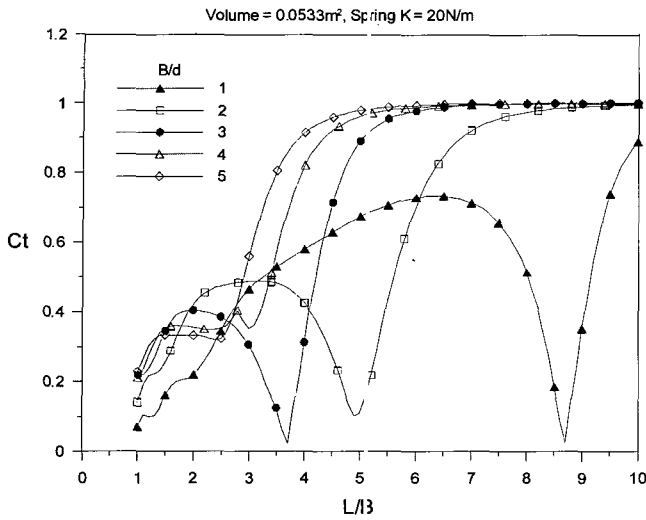


Fig. 8. Effect of draft with volume fixed (case 6~9).

시킬 경우 장파에서 소파효과가 매우 우수하게 예측이 되지만 상대적으로 단파에서 홀수가 작은 경우보다 많은 파를 투과 시키고 있다. 그림에서 기본형식인 $B/T=3$ 인 경우와 비교하여 홀수가 폭의 반인 경우($B/T=2$)가 비교적 장파에서 효과가 좋을 뿐 아니라 단파에서도 투과율이 0.5 이하로 나타나고 있다. 체적을 고정시킨 Fig. 8의 경우도 비슷한 경향이다.

3.2 사다리꼴 형상의 소파특성

수면을 관통하는 측벽에 경사를 줌으로써 수직운동에 의한 발산파의 변화를 기대할 수 있고, 이 효과에 따른 소파특성의 변화를 살펴 보았다. Fig. 9는 이러한 사다리꼴의 형상정의를 보이고 있고, Table 2에는 수치시험에 이용된 파라미터값들을 보였다. 경우에 따라 파도가 들어오는 좌측이나 만내인 우측만 경사가 있을 수 있고 (b_2 나 b_1 이 0일 경우) 그림과 반대로 깊이 방향으로 폭이 줄어드는 역사다리꼴의 형상을 가질 수도 있다 (b_1 이나 b_2 가 음일 경우).

Fig. 10와 11은 표에 정리된 경우어 대한 투과율을 보이고 있다. Fig. 10에서 검은 점으로 표시된 선이 기본 폰톤의 결과임을 고려

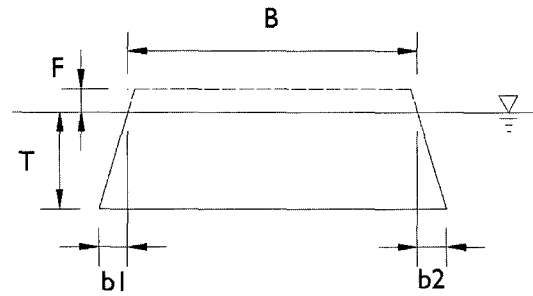


Fig. 9. Definition sketch of trapezoid type.

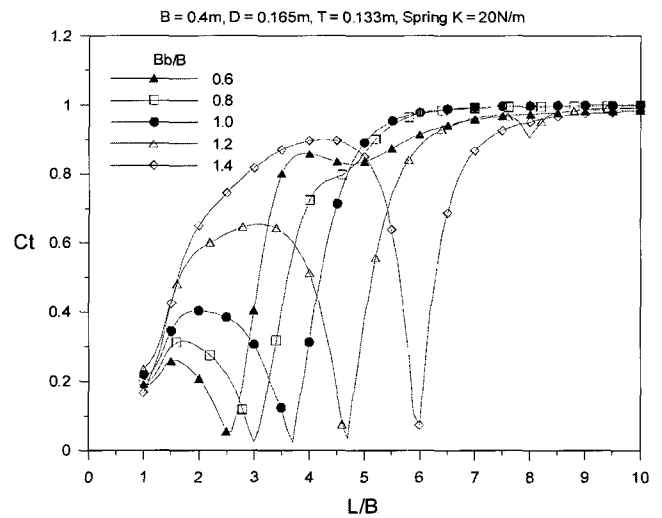


Fig. 10. Effect of bottom breadth for trapezoid type (Case 1~4).

하면 하단부의 폭을 줄이면 장파쪽으로의 효과는 나빠짐을 알 수 있고 하단부의 폭을 늘리면 다소 장파쪽으로 양호한 소파능력이 관찰된다. 하지만 단파쪽의 성능은 오히려 나빠지므로 표의 케이스4에 해당하는 수면폭의 20% 정도를 하단에서 키워주는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 11은 만내 쪽의 측면만 경사를 준 경우이다. 기본 상자형과 비교하면 단파와 장파 쪽에서 케이스 8의 경우(검은 세모) 다소 효과적인 소파특성을 보이지만 큰 효과는 없는 것으로 판단된

Table 2. Main particulars of trapezoidal type ($B=7.5$ m, $T=2.5$ m, $F=0.6$ m, $K=20$ N/m).

Case No.	B [m]	T [m]	F [m]	b1 [m]	b2 [m]	R [m]	KG [m]	GM [m]	K [N/m]	Mass [ton/m]
1	7.5	2.5	0.6	-1.5	-1.5	2.693	1.839	1.404	20	9.609
2	7.5	2.5	0.6	-0.75	-0.75	2.543	1.691	1.284	20	11.531
3	7.5	2.5	0.6	0.75	0.75	2.588	1.423	1.164	20	15.375
4	7.5	2.5	0.6	1.5	1.5	2.784	1.314	1.125	20	17.297
5	7.5	2.5	0.6	0.75	0.0	2.558	1.485	1.187	20	14.414
6	7.5	2.5	0.6	0.0	0.75	2.558	1.485	1.187	20	14.414
7	7.5	2.5	0.6	-0.75	0.0	2.535	1.620	1.245	20	12.492
8	7.5	2.5	0.6	0.0	-0.75	2.535	1.620	1.245	20	12.492
9	7.5	2.5	0.6	0.0	-1.5	2.589	1.689	1.286	20	11.531
10	7.5	2.5	0.6	0.0	-2.25	2.663	1.761	1.343	20	10.570
11	7.5	2.5	0.6	0.0	-3.0	2.779	1.828	1.416	20	9.609
12	7.5	2.5	0.6	0.0	-3.75	2.886	1.896	1.509	20	8.648

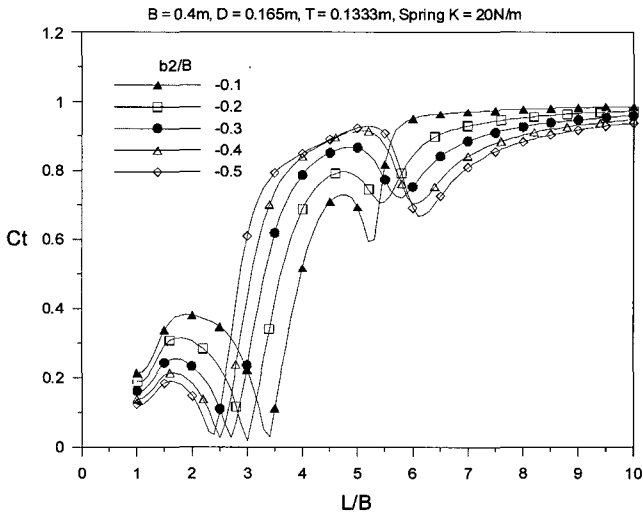


Fig. 11. Effect of right footage for trapezoid type (Case 8~12).

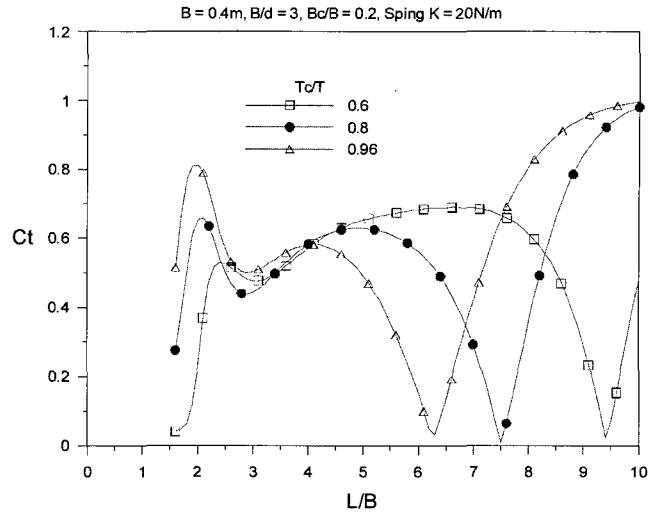


Fig. 13. Effect of upper draft for hat type (Case 1~3).

다. 반면, 그림으로 보이지는 않았으나, 파랑이 유입되는 쪽만 경사를 준 경우는 대부분 오히려 나쁜 소파효과가 나타났다.

3.3 모자형상의 소파특성

Fig. 12와 같은 모자형 단면의 특성을 살펴보고자 Table 3의 경우에 대해 계산을 수행하였다. 중절모 형상의 부체에서 변화를 줄 수 있는 대표적인 인자는 상부의 폭과 하부의 높이이다. Fig. 13에는 상부의 폭을 기준폭의 20%로 고정시키고 하부의 높이를 거의 평판과 같은 상황에서 키워준 경우의 소파효과를 보였다. L/B가 3.75 정도에서 최고의 소파효과를 보이던 상자형의 경우와 비

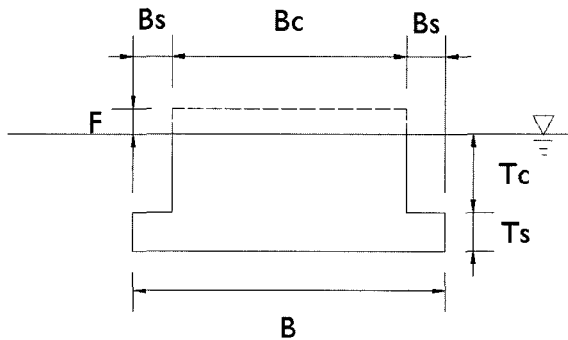


Fig. 12. Definition sketch of hat type.

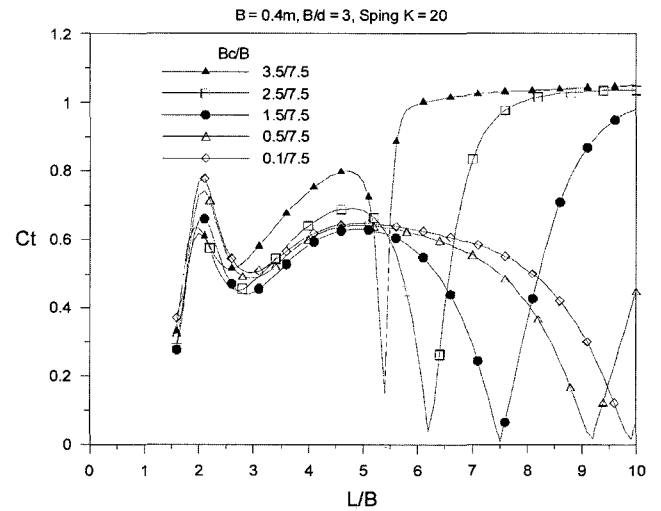


Fig. 14. Effect of water plane length for hat type (Case 4~7).

교하면 모든 경우 눈에 띄는 장파쪽에서의 소파효과 상승을 확인할 수 있다. 단파쪽에서의 효율 악화가 수치해에서는 나타나지만 해석에 포함되지 못한 계류계 및 부체의 점성감쇄 효과 등을 예상한다면 이와 같은 모자 형태의 부체는 상대적으로 넓은 파장/폭 비에서 좋은 성능을 발휘할 것으로 추정된다.

Fig. 14에는 하단의 높이를 고정시키고 상부의 폭을 변화시키는 경우에 관찰되는 효과를 정리하였다. 최소 투과율을 보이는 파장

Table 3. Main particulars of hat type (B=7.5 m, F=0.6 m, K=20 N/m).

Case No.	B [m]	Bc [m]	F [m]	Tc [m]	Ts [m]	R [m]	KG [m]	GM [m]	K [N/m]	Mass [ton/m]
1	7.5	1.5	0.6	2.4	0.1	3.692	0.701	0.448	20	4.459
2	7.5	1.5	0.6	2.0	0.5	3.081	0.593	0.253	20	6.919
3	7.5	1.5	0.6	1.5	1.0	2.642	0.752	0.066	20	9.994
4	7.5	0.1	0.6	2.0	0.5	3.538	0.422	0.094	20	4.049
5	7.5	0.5	0.6	2.0	0.5	3.379	0.471	0.045	20	4.869
6	7.5	2.5	0.6	2.0	0.5	2.951	0.716	0.398	20	8.969
7	7.5	3.5	0.6	2.0	0.5	2.914	0.838	0.557	20	11.019

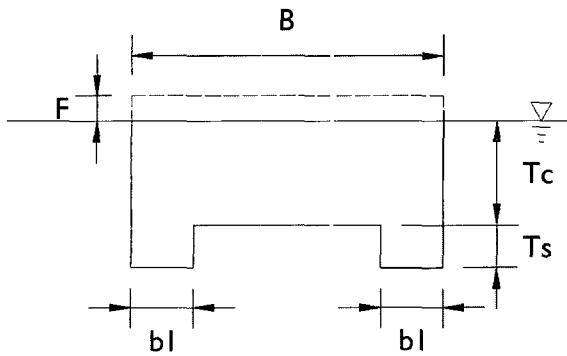


Fig. 15. Definition of table (or twin-leg) type.

이 상부폭의 감소에 따라 상당히 장파쪽으로 이동함을 확인 할 수 있지만, 상부의 폭이 충분히 작지 않으면(검은 세모의 경우) 단파 쪽에서의 소파특성이 나빠짐을 알 수 있다. 중절모 형태의 결과를 요약하면, 장파와 단파를 포함하는 상대적으로 큰 폭의 파장 영역에서 우수한 소파효과를 예상할 수 있는 형상이 존재한다는 것인데, 수치계산 결과로는 케이스3의 경우, 즉 상부의 폭이 기준폭의 20%이고 하단의 높이가 흘수의 40%인 형상이 파장/폭 비 7.5에서 최소 투과율을 보이고 단파쪽에서도 투과율 0.5 정도의 양호한 특성을 나타내는 것으로 파악되었다.

3.4 탁자형상의 소파특성

부체에 하부로 늘어뜨리는 부가물을 설치하여 부체를 탁자모양으로(혹은 다리 부가 형상) 만들어 유효 흘수의 증가 효과를 유도하는 것은 잘 알려져 있다. 이를 체계적으로 조사하여 정리하였다. Fig. 15는 형상의 정의를, Table 4는 조사된 경우의 파라미터를 보였다. 기본적으로 다리의 길이와 다리의 폭을 변화시키며 파장별 소파특성을 분석하였다.

Fig. 16과 17은 각각 다리의 폭을 0.5 m와 1.5 m로 고정시키고 다리의 길이를 다양하게 변화시킨 영향을 보이고 있다. 다리가 길어질수록 유효 흘수의 증가로 장파쪽의 소파특성이 좋아지는 반면 단파쪽의 특성은 상자형의 흘수증가의 경우와 마찬가지로 다

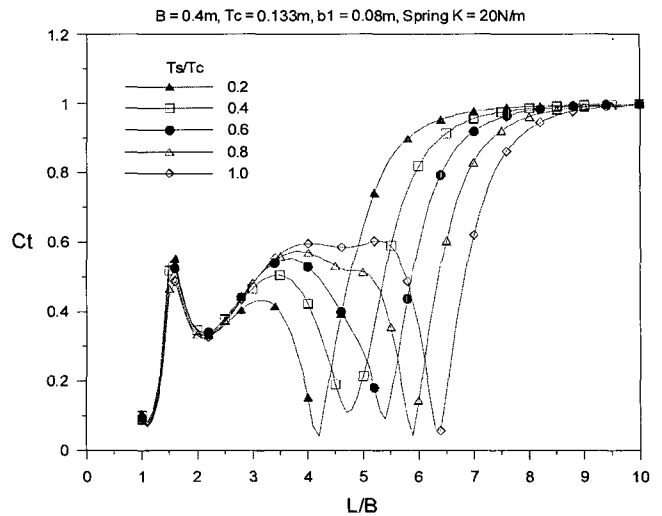


Fig. 16. Effect of upper draft for table type (Case 1~3).

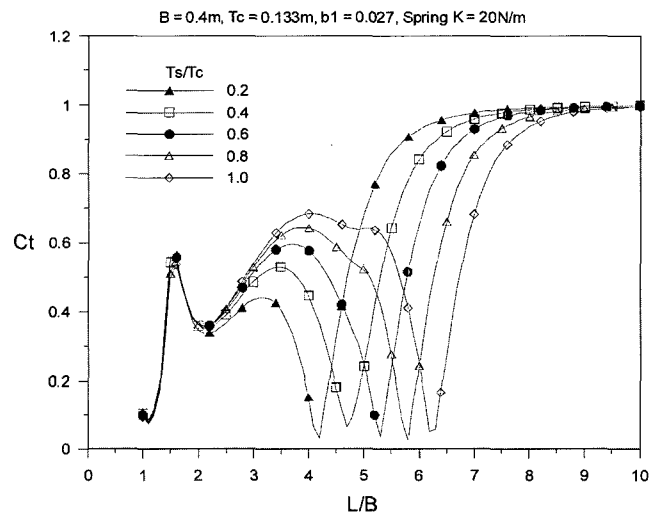


Fig. 17. Effect of water plane length for table type (Case 4~7).

소 불량해진다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 다리의 폭은 결과에 크게 영향을 주지 않는다.

Table 4. Main particulars of table type: (B=7.5 m, Tc=2.5 m, F=0.6 m, K=20 N/m).

Case No.	B [m]	Tc [m]	F [m]	B1 [m]	Ts [m]	R [m]	KG [m]	GM [m]	K [N/m]	Mass [ton]
1	7.5	2.5	0.6	1.5	0.0	2.126	1.550	1.575	20	19.219
2	7.5	2.5	0.6	1.5	0.5	2.711	1.830	1.545	20	20.719
3	7.5	2.5	0.6	1.5	1.0	2.899	2.106	1.519	20	22.219
4	7.5	2.5	0.6	1.5	1.5	2.998	2.378	1.498	20	23.719
5	7.5	2.5	0.6	1.5	2.0	3.056	2.646	1.479	20	25.219
6	7.5	2.5	0.6	1.5	2.5	3.152	2.912	1.463	20	26.719
7	7.5	2.5	0.6	0.5	0.0	2.126	1.550	1.575	20	19.219
8	7.5	2.5	0.6	0.5	0.5	2.897	1.852	1.602	20	19.719
9	7.5	2.5	0.6	0.5	1.0	3.002	2.145	1.631	20	20.219
10	7.5	2.5	0.6	0.5	1.5	3.141	2.432	1.658	20	20.719
11	7.5	2.5	0.6	0.5	2.0	3.289	2.714	1.685	20	21.219
12	7.5	2.5	0.6	0.5	2.5	3.424	2.992	1.712	20	21.719

4. 결 론

부방파제의 일반적인 특성을 고찰하고 다양한 형상의 간섭식 부방파제 단면 특성을 투과율을 중심으로 살펴 보았다. 기본적인 상자형 부체에 대하여 계류계의 강도와 질량관성반경의 영향과 홀수증가의 영향을 확인하였다. 계류계는 부방파제의 위치를 유지하면서 가능한 부체의 운동을 억제하지 않는 것이 좋고 질량관성반경은 투과율에는 큰 영향을 주지 않는다. 폭과 홀수의 비가 3 정도인 폰툰형 부방파제의 경우 파장/폭 비가 4보다 약간 작은 파장에 대해 소파효과가 가장 좋고 허용 투과율을 0.5 정도로 본다면 파장/폭 비가 4.5 정도 되는 파랑까지 적용이 가능하다. 홀수의 증가는 일반적으로 장파쪽의 소파성능을 개선하는 경향을 보임과 동시에 단파쪽의 투과율을 상승시키는 효과를 보인다. 폭과 홀수의 비가 2 정도인 폰툰의 경우 비교적 양호한 소파율을 보이고 유효 파장/폭 비는 약 6.0 정도까지이다. 사다리꼴의 경우 하단의 폭이 증가하는 형태가 바람직하고 하단의 폭이 상부에 비해 20% 정도 클 경우가 비교적 양호한 소파 특성을 가진다. 전반적으로 단파쪽의 소파특성은 불량해지지만 만내쪽의 측벽만 경사를 줄 경우 단파쪽의 특성도 다소 개선할 수 있다. 폰툰의 하단에 폭이 넓은 판을 댄 것 같은 증절모 형상의 부방파제는 장파쪽에서의 특성이 상당히 개선되는 경향을 보이며 단파쪽의 소파효율 감소를 다소 허

용한다면 유효 파장/폭 비를 10 이상으로 올릴 수도 있다. 테이블 형태로 유효홀수를 증가시킨 경우 상자형과 마찬가지로 장파쪽의 소파성능증대와 단파쪽의 성능저하가 예상된다.

참고문헌

- [1] 김도영, 송무석, 김현주, 2000, "규칙파중 상자형 부유식 방파제 특성에 대한 연구," 대한조선학회논문집, 제37권 3호, 45-56.
- [2] 김현주, 홍기용, 최학선, 1996, 해역정온화기술의 현황과 전망, 기계와 재료, 제8권, 제1호, 69-78.
- [3] 대한조선학회편, 1996, "해양공학개론," 동명사.
- [4] 홍도천, 홍사영, 2004, "소파제-초대형부유식해상구조물 운동 및 소파효율 해석", 대한조선학회지, 41-3, 22-27.
- [5] 加藤重一, 1974, "浮き防波堤の開発と研究の現況", 土木學會誌, 5, 65-71.
- [6] 谷木勝利, 1992, "防波堤構造の歴史的變遷と展望", 第11回海洋工學シンポジウム, 105-110.
- [7] 全國沿岸漁業振興開發協會, 1992, "沿岸漁場整備開發事業實施設計指針", 411.

2005년 3월 31일 원고접수

2005년 4월 20일 수정본 채택