

새로운 소파블록의 수리특성에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Wave Dissipating New Armor Unit

김인철¹ · 박영우² · 유철희³ · 권혁민⁴

In Chul Kim¹, Young Woo Park², Chul Hee Yoo³ and Hyuck Min Kweon⁴

1. 서 론

외해로부터 내습하는 파랑을 차단하므로써 해안의 세굴, 침식 등을 방지하고 항내의 정온을 유지하고 항만시설물을 보호하기 위하여 축조되는 방파제, 호안 등의 구조물 형식에는 경사제, 직립제, 혼성제 등 여러 가지가 있다. 이 중 경사제는 표면을 파력에 충분히 대항할 수 있는 크기의 사석이나 콘크리트 블록을 쌓아 파랑을 경사면에서 쇄파시켜 에너지를 소멸시킴으로써 소파기능을 발휘한다.

특히 우리나라에서는 석재를 주재료로 사석식 경사제를 많이 쓰는데 이는 설계파보다 더 큰 파랑이 왔을 때에도 파손이 서서히 진행되고 보수, 보강이 쉬운 등 장점이 많기 때문에 수심이 매우 깊은 곳에 건설되는 경우 이외에는 사석식 경사제를 채택 시공하고 있다. 그리고 이 사석식 경사제의 제체 경사면에 피복재로 사용되는 콘크리트 소파블록은 지금까지 세계 각국에서 개발, 제안된 여러 가지 형태의 많은 소파블록들이 있으나 우리나라의 해안 및 항만 구조물에서는 Tetrapod (TTP), Arch-tribar(ATB) 등 몇 가지만이 시공된 실적을 가지고 있으며 최근에는 사석식 경사제에서 대부분 TTP로 설계, 시공되고 있다.

한편 ATB는 파랑에 대한 소파효과, 사면에서의 안전성 등 수리학적으로 우수하고 단층 피복만으로 소파기능의 발휘가 가능하므로 TTP와 같은 2

층이상 다층 피복블록에 비해 재료비의 절감 등 경제성 면에서도 월등히 유리하다. 그러나 이와같은 기술적, 경제적인 이점이 있음에도 불구하고 ATB가 현재 우리나라에서의 시공사례가 없는 가장 큰 이유는 그 구조가 3개의 원주기둥에 의해 지지되는 형태로 되어있어 구조상으로 원통형 연결부분의 강도, 내구성 및 내충격성이 약하여 이 부분이 절단, 파손되는 경우가 일부 발생되고, 또 파랑이 내습할 때에 파랑이 ATB에 부딪쳐 소파되면서 파의 일부가 ATB 중앙 골을 따라 쳐 올라가면서 구조물 제체의 경사면에 연하여 율파랑이 많으므로 기존의 ATB를 개량한 새로운 소파블록인 Modified-TriBar(MTB)가 제안되었다.

따라서 본 연구에서는 불규칙파를 대상으로 하여 가장 보편화되어 있으며, 수리실험 및 시공실적에 의해 그 특성이 잘 규명되어 있는 TTP와 새로운 소파블록인 MTB를 동일한 수리학적 조건하에서 수리 모형실험을 통하여 비교·검토하고자 한다.

2. 실험시설

본 실험에 사용된 조파수로는 Fig. 1에 도시한 것과 같이 길이 30m, 폭 0.8m, 높이 1.2m의 조파기의 후면과 수로 끝단부에 직립식 소파장치가 설치되어 있다. 불규칙파를 실험파로 하는 수리 모형 실험시 모형구조물과 조파판 양측에서 다중반사

1 동서대학교 건설공학부 (Division of Civil & Architecture Engineering, Dongseo University, Pusan 617-716, Korea, cvkic@dongseo.ac.kr)
2 (주) 부산신항만 (Pusan New Port Co., LTD.)
3 (주) 세광종합기술단 (Sekwang Engineering Consultants Co., LTD.)
4 경주대학교 건설환경시스템공학부 (Division of Civil & Environmental Engineering, Kyung-Ju University)

가 일어나 수로내에 에너지 누적현상이 생길 수 있으므로 격벽을 설치하여 2개의 수로를 만들어 한편에서는 실험파랑을 재현시키고 다른 한편은 수로 끝단에 있는 소파장치에서 파의 에너지를 흡수하는 수로를 사용하였다.

조파기는 전기식 피스톤형 서보(servo)방식으로, PC로부터 발생된 조파신호를 D/A converter를 통해 -10V~+10V 사이의 전압으로 바꾸어 모터드라이브에 전하고, 드라이브에서 AC서보 모터로 조파신호를 전송하여 조파판을 작동하는 방식이며 조파판의 최대이동거리는 ±50cm이고 최대발생 유의파고는 30cm, 발생유의 주기는 0.1sec~3.0sec이다. 특히 조파판에는 대상 구조물로부터 반사되어 조파판에 도달하는 반사파를 감지하여 controller에서 조파판의 움직임을 제어하도록 조파판 전면에 파고계가 부착되어 있다(김이, 2000).

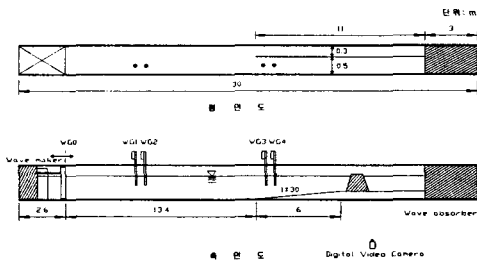


Fig. 1. 실험수로 및 조파장치의 개략도.

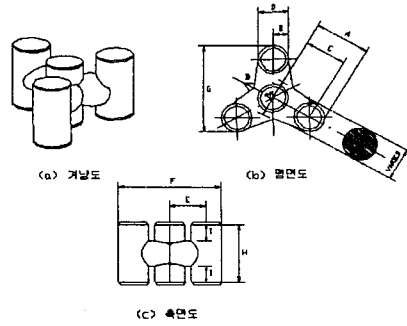
3. 실험조건 및 실험방법

3.1 모형블록의 중량결정

본 실험은 새로운 소파블록인 MTB와 사용실적과 실험결과가 많은 TTP를 대상으로 하였다. Fig. 2~Fig. 3은 MTB와 TTP블록의 기하학적 형상 및 제원이다

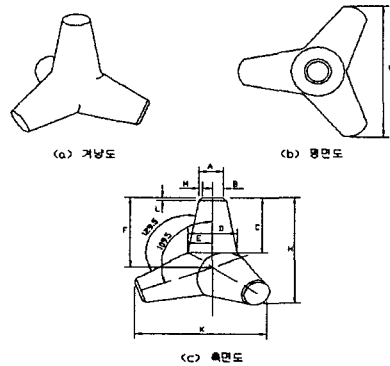
모형블록의 중량결정은 수조의 크기 및 조파기의 성능과 밀접한 관계가 있다. 우선, MTB의 기본치수인 원주기둥의 직경 D 에 대하여 체적 V 를 산정한다. 블록 1개의 체적이 결정되면 이의 중량 W 가 계산 가능하다. 이때 예상되는 안정계수 K_D 값을 설정하고 이에 상응하는 $H_{1/3}$ 을 Hudson(1969)이 제안한 식 (1)로 산출한다.

$$K_D = \frac{\gamma_s (H_{1/3})^3}{W (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (1)$$



Volume of individual armor unit = $8.45 D^3$
 D = 원주기둥의 직경 $H = 2.2 D$
 $A = 1.835 D$ $F = 3.312 D$
 $B = 0.5 D$ $G = 3.002 D$
 $C = 1.335 D$ $I = 0.6 D$
 $E = 1.156 D$ $Do = 1.3 D$
 * 수평부재의 수직부재가 서로 교차되는 무각부의 곡면적은 0.25 D 모따기의 일반 값인 0.1 D로 함

Fig. 2. MTB의 기하학적 형상 및 제원.



Volume of individual armor unit = $0.243 H^3$
 $A = 0.300 H$ H = Overall dimension of unit
 $B = 0.150 H$ $K = 1.075 H$
 $C = 0.485 H$ $L = 0.040 H$
 $D = 0.478 H$ $M = 0.040 H$
 $E = 0.239 H$ $N = 1.195 H$
 $F = 0.655 H$

Fig. 3. TTP의 기하학적 형상 및 제원.

여기서, W 는 피복재의 중량, γ_s 는 피복재의 공중 단위체적중량, S_r 는 피복재의 해수에 대한 비중, $\cot \theta$ 는 사면경사 그리고 $H_{1/3}$ 은 유의파고이다.

실험에 사용할 블록 중에서 MTB는 사용실적이 없는 새로운 소파블록이므로 수리학적 안정성에 대한 피해한계를 알 수 없으므로 기존에 개발된 블록 중에서 거치 형태가 정적이고 블록간의 맞물

림 상태가 양호한 블록의 예를 참고로 하여 K_D 값을 설정할 필요가 있다. 여기서는 MTB의 K_D 값이 블록의 거치형태에 따라 다르게 나타날 수 있으나 20을 훨씬 상회할 것으로 예상했다. 단, 본 실험이 TTP와의 비교실험이고 동일한 실험조건이 요구되어지므로 블록의 수리학적 안정성에 대한 안정계수 K_D 값의 설정범위는 앞서 예측한 K_D 값의 범위를 확장하여 8~45로 설정했다.

실험에 사용할 MTB의 기본치수인 원주기둥의 직경 1.73cm에 대한 블록의 체적은 43.5cm³이며, 이때 블록의 중량은 97.4 g이다. 이 중량과 위에서 설정한 K_D 값으로 식 (1)을 이용하여 유의과고를 구해보면 $H_{1/3}$ 은 10cm~18cm이다.

이 유의과고는 본 실험 수조의 조파한계 내에 존재하므로 실험에 사용할 MTB의 중량은 97.4 g으로 하였다. 또한 TTP의 중량은 앞서 선택한 MTB와 외관상 블록치수가 가장 비슷한 것을 선택하여 중량을 구해보면 95.0 g이 된다.

3.2 거치형태 및 공극률 결정

소파블록의 공극률은 블록의 종류, 거치형태에 따라 다르지만, 블록 사용갯수의 산출 및 파랑에너지 흡수 및 감쇠의 여부, 반사파의 강약, 파의 저오름 높이 등과 같은 수리특성을 결정하는 중요한 요소이다. 블록의 사용갯수를 감소시키기 위하여 공극률을 크게 하면 파랑에너지의 흡수 및 감쇠효과가 저감되고, 블록의 안정성이 저해되어 제체 자체의 안정성에 크게 영향을 미치게 되므로 소파블록을 사용하는 해안 구조물은 적당한 공극률을 가질 필요가 있다.

각 블록별의 거치형태 중에서 MTB의 정적 1층 평적배열은 Photo. 1과 같이 먼저 MTB를 정방향으로 하여 제체 등의 법선에 평행한 방향으로 삼각점 원주기둥이 옆으로 서로 맞닿도록 연속으로 제 1행을 설치한 후, 인접되는 제 2행은 MTB를 정방향으로 하여 설치한다. 그리고 MTB를 옆으로 눕혀서 1개의 삼각점 원주기둥을 1층에 설치된 제 1행과 제 2행의 블록과 블록사이의 빈 공간에 원주기둥의 축이 법선에 직각방향이 되도록 끼워 넣어 밀착시킨다. 다음의 제 3행은 제 1행과 같은 방법으로 그리고 제 4행은 제 2행과 같은 방법으로 계속 반복하여 설치한다.

정적 1.5층 평-횡 혼합배열은 Photo. 2와 같이 먼저 1층 평적의 제 1행과 같이 제체의 법선에 평행하게 설치하고 인접되는 제 2행은 MTB를 정방향으로 하여 설치하되 양측의 삼각점 원주기둥을

기 설치되어 있는 제 1행의 양쪽 블록의 삼각점 원주기둥과 각각 맞닿도록 밀착시켜 설치하고 다음 행도 같은 방법으로 계속 반복하여 설치한다. 그리고 MTB를 옆으로 눕혀서 1개의 삼각점 원주기둥을 1층에 설치된 제 1행과 제 2행의 블록과 블록사이의 빈 공간에 원주기둥의 축이 법선에 직각방향이 되도록 끼워 넣어 횡적으로 계속 반복하여 설치한다. 그리고 TTP는 Photo. 3과 같이 2층난적으로 설치한다.

또한 앞서 설명한 블록별 거치형태로 폭 47 cm, 길이 130cm의 나무판 위에 알맞게 배열하여 그 갯수를 파악하고 식 (2)로 공극률을 계산하였다.

$$P = \frac{V - Nb}{V} \quad (2)$$

여기서, P 는 공극률, N 는 블록의 사용갯수, V 는 블록으로 피복되는 체적(cm³) 그리고 b 는 블록 1개의 체적이다.

Table 1. 실험에 사용한 블록의 제원

| 블록명 | 중량 (g/개) | 체적 (cm ³) | 비중 | 공극률 (%) | 사용갯수 | | 거치형태 | 사진 |
|-----|----------|-----------------------|------|---------|---------|---------|---------|----|
| | | | | | 1 : 1.5 | 1 : 4/3 | | |
| MTB | 97.4 | 43.5 | 2.24 | 43 | 302 | 276 | 정적 1층 | 1 |
| | | | | 44 | 351 | 330 | 정적 1.5층 | 2 |
| TTP | 95.0 | 43.2 | 2.20 | 51 | 426 | 406 | 난적 2층 | 3 |

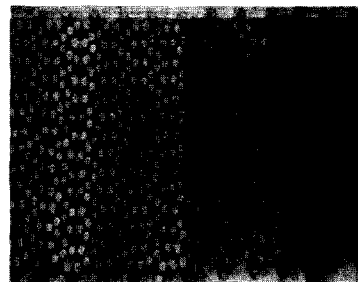


Photo. 1.

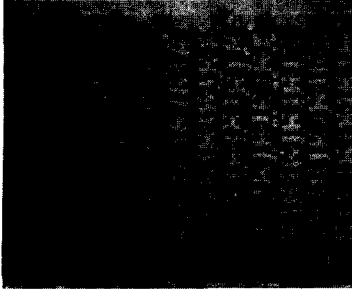


Photo. 2.

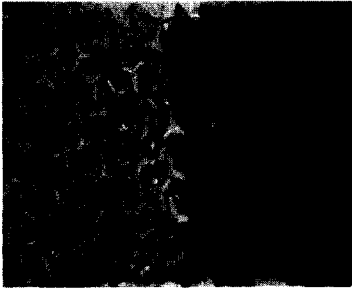


Photo. 3.

3.3 대상단면

실험을 위한 대상단면의 설계는 블록의 크기, 예상안정도, 모형의 크기, 파의 제원 및 수조의 제원 등의 상호관계를 고려하여 결정하였다.

실험단면의 기본적인 제체형태는 상부에 상치콘 크리트가 있는 사석식 경사체를 대상으로 하였으며 실험항목에 따라 제체의 천단고를 일정한 사면 경사에서 월파를 허용하지 않는 경우와 제체의 천단고에 제한을 두어 월파를 허용하는 두 가지 경우로 설정하였다.

실험에서 측정 분석할 항목은 블록의 안정성, 반사계수 및 월파량이며, 대상단면에 따라 실험항목은 Table 2와 같이 분류시킬 수 있으며 각 실험에 대상 단면도는 Fig. 4에 도시하였다.

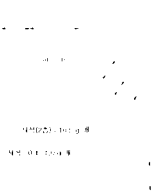


Fig. 4. 실험 대상단면도(무월파 : +35.0, 월파허용 : +22.0).

Table 2. 대상단면 및 실험항목

| 단 면 | 실험 항 목 | | 블록 안정성 | 반사 계수 | 월파량 |
|----------------|-------------------|---------|--------|-------|-----|
| | 경사 | 높이 | | | |
| Fig. 7 무월파 | TTP 난적 2층 | 1 : 1.5 | 0 | 0 | |
| | | 1 : 4/3 | 0 | 0 | |
| | MTB 정적 1층 | 1 : 1.5 | 0 | 0 | |
| | | 1 : 4/3 | 0 | 0 | |
| | MTB 정적 1.5층 | 1 : 1.5 | 0 | 0 | |
| | | 1 : 4/3 | 0 | 0 | |
| Fig. 7 월파허용 | TTP 난적 2층 | 1 : 1.5 | | 0 | 0 |
| | | 1 : 4/3 | | 0 | 0 |
| | MTB 정적 1층 | 1 : 1.5 | | 0 | 0 |
| | | 1 : 4/3 | | 0 | 0 |
| | MTB 정적 1.5층 | 1 : 1.5 | | 0 | 0 |
| | | 1 : 4/3 | | 0 | 0 |

실험단면의 처오름 높이에 대한 정보는 CERC(1984)에서 Dols를 대상으로 한 처오름 실험자료를 정리한 Seeling(1980)의 결과를 이용하였으며 이때 주기 T 는 실험의 최대주기인 $T=2.2\text{sec}$ 를 대상으로 하였다.

월파를 허용하지 않는 실험단면의 천단고는 수조의 크기를 고려하여 $H_{1/3}=18\text{cm}$ 의 최대파까지 월파하지 않도록 +35cm 하였으며 월파를 허용하는 단면의 천단고는 앞선 경우의 실험결과를 근거로 하여, 한정된 실험파에 대하여 적절한 월파량이 생길 수 있도록 +22cm로 결정하였다. 제체의 설치수심은 실험파의 H_{\max} 가 쇄파하지 않는 경우의 수심으로 $h > 1.5H_{\max}$ 관계를 경험적으로 사용하여 $h=45\text{cm}$ 로 결정하였다.

제체의 사면경사는 1 : 1.5와 1 : 4/3의 2가지 종류를 대상으로 채택하였으며, 제체의 후면경사는 위의 두 가지 경우에 대하여 똑같이 1 : 1.5로 하였다. 또한 제체의 중간피복재의 중량은 7.0 ~ 13.0 g(평균 10.0 g), 사석중량은 0.1 ~ 1.0 g 범위의 쇄석을 사용하였으며 제체 저면의 해저 경사는 1/30로 하여 모형상의 하부에 모래로 속채움을 한 후, 그 위에 벽돌을 깔아 바닥경사를 유지시키면서 표면은 몰타르로 마감 처리하였다.

3.4 불규칙파의 조파

우선 목표로 하는 파랑 스펙트럼을 조파기의

특성함수에 따라 조파판의 구동 스펙트럼으로 변환된 다음 변환된 스펙트럼을 불규칙한 위상을 가진 성분파로 분해한 후 D/A converter를 거치게 되면 아나로그 조파신호가 얻어진다. 이와 같이 조파된 파랑을 모형 구조물 설치위치에서 입사파를 분리한 후 측정된 입사파의 스펙트럼이 목표 스펙트럼과 일치하지 않으면 응답함수에 의해 조파판 구동 스펙트럼을 수정하여 실험과 스펙트럼이 목표 스펙트럼에 근접할 때까지 반복한다. 여기서 입사파 분리에는 상호 적정한 간격을 두고 설치된 2개의 파고계로부터 관측된 파고기록을 이용하는 Goda와 Suzuki(1976)가 제안한 방법을 사용하였다.

입사파랑으로는 다음과 같이 Goda(1987)에 의해 수정된 Bretschneider-Misuyasu 스펙트럼을 사용하였다.

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

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

식 (3)을 목표스펙트럼으로 하여 모형 구조물의 설치 예정위치에 Fig. 1과 같이 두 개의 파고계 WG3와 WG4를 설치하여 통과파 스펙트럼과 목표스펙트럼이 일치하도록 재현시키고 이들과 병행하여 조파판 부근의 일정 수심상에 설치한 두 개의 파고계 WG1과 WG2는 통과파 및 모형구조물 설치시의 입사파 조건을 확인하기 위한 지시계로 사용하였다. 모형상 위에 모형 구조물이 설치된 후에는 구조물에서 반사되어 조파판으로 돌아오는 파는 반사파 흡수필터에 의하여 보정되어 조파되므로, 모형 설치전의 입사파가 모형설치 후에도 그대로 구조물 위치에 도달할 것이므로 파고계 WG1과 WG2로부터 입사파를 분리한 후, 앞서 통과파 실험시 입사파의 지시계(WG1, WG2)로부터 측정된 입사파 조건과 비교, 확인하면서 실험을 수행하였다(권이, 1999).

Table 3. 실험과 제원

| 일정수심의 수심 (cm) | 제체의 설치수심 (cm) | 유의주기 (sec) | 유의 파고(cm) | | | | |
|---------------|---------------|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1.60 | 10.01 | 12.04 | 14.02 | 16.00 |
| 65 | 45 | 1.90 | 9.98 | 12.00 | 14.01 | 16.02 | 18.00 |
| | | 2.20 | 9.98 | 12.01 | 14.02 | 16.00 | 18.00 |

3.5 실험항목의 측정방법

1) 블록의 안정성

실험은 제체 설치후 블록이 이동하지 않는 정도의 작은 파를 작용시켜 결속을 다진 후에, Table 3에 나타낸 실험과 중에서 주기별로 파고가 작은 쪽에서 큰 파의 순서로 증가시키면서 연속적으로 실행하였다. 실험과는 대상 파고 조건에서 30분간 연속적으로 작용시켰으며 블록의 이탈 상황은 육안으로 관찰하여 기록하였으며 또한 중요한 장면들은 캠코더 촬영기록을 통하여 비교분석하여 판단하였다.

이탈 블록의 갯수는 새로운 블록을 쌓고 작은 파로 결속을 다진 후에 앞서 제시한 실험과에서 주기는 일정하게 하고 파고는 작은 쪽에서부터 작용시키고, 다음 큰 파고로 바꿀 때는 앞의 파에 의한 상황은 그대로 두고 그 이전의 파고조건에서 이탈한 갯수에 새롭게 이탈한 갯수를 누계하여 계산했다.

피해정도가 큰 파고에서는 실험을 중단하고 다시 블록을 쌓고 다음 주기에 해당하는 실험으로 전환하였으며 또한 블록의 피해 이전에 발생한 하층부의 사석부 피해로 인한 제체의 피해가 발생한 경우에도 실험을 중단하고 제체를 다시 쌓고 다음 주기로 실험을 수행하였다. 실험은 최종 파고까지 실행하고 난 후, 처음상태로 블록을 다시 쌓아 다음 주기로 실험을 수행하였다.

블록은 원래 위치에서 블록의 특성길이 이상 이탈한 것을 피해로 간주했다. 단, 인접하고 있는 아래열의 블록 이탈에 의해서 블록이 원래 위치에서 이탈한 블록과 모형의 양벽에서 이탈한 블록은 피해량에서 제외시켰다. 본 실험에서 사용한 피해율의 정의는 식 (4)와 같다.

$$D = \frac{n}{N} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서, D 는 통상의 정의에 의한 피해율, n 는 해당파고 조건까지 누적피해 갯수, N 는 피복블록의 총수이다.

2) 반사계수

방파제 등의 피복층에 도달한 파의 에너지 일부는 피복층내에서 감쇠되어 소멸하지만 일부는 반사파로 되어 구조물의 전면해역에 되돌아온다. 그러므로 소파공으로부터 반사계수가 작으면 그 만

큼 소파효과가 양호하다는 것을 의미한다.

제체에 도달한 입사파는 제체로부터 반사하게 되므로 제체에서 유의과장 이상 떨어진 지점에 적절한 간격을 두고 2개의 파고계를 설치하여 이들의 계측결과인 파형기록에 의해서 FFT법을 사용해서 성분파의 진폭을 구하고, 이러한 성분파로부터 입반사파의 진폭을 구한 후, 이들의 페리오도그램(periodogram)을 평활화함으로써 입반사파의 스펙트럼을 추정할 수 있다. 그리고 스펙트럼의 분리 추정치는 발산하지 않는 식 (5)와 같은 주파수 범위에서만 유효하다.

$$\begin{aligned} \text{상한치 } (f_{\max}) : \Delta l / L_{\min} &\approx 0.45 \\ \text{하한치 } (f_{\min}) : \Delta l / L_{\max} &\approx 0.05 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

f_{\max}, L_{\max} = 유효한 주파수 범위의 상한치 및 그에 대응하는 파장

f_{\min}, L_{\min} = 유효한 주파수 범위의 하한치 및 그에 대응하는 파장

Δl = 파고계 간격 (유효 주파수 범위내에 포함된 에너지가 전 에너지의 90% 이상 되도록 결정함)

$$E_I = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_I(f) df \quad (6)$$

$$E_R = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_R(f) df$$

여기서, E_I 및 E_R 은 입사파 및 반사파의 에너지이고 $S_I(f)$ 및 $S_R(f)$ 는 입사파 및 반사파의 스펙트럼 밀도함수이다. 식 (6)를 이용하면 반사계수는 식 (7)로 구할 수 있다.

$$K_R = \sqrt{E_R / E_I} \quad (7)$$

3) 월파량

월파량은 호안 및 방파제 설계시 가장 중요한 실험인자 중의 하나이다. 월파량에 대한 실험은 블럭파의 파고운을 대상으로 200~300파를 연속적으로 작용시켜 파랑이 월류하는 제체의 상부와 하류측 저수통 사이에 설치된 도수로를 통하여 저수통에 도달하는 물의 총량을 펌핑하여 회수된 물의 총 무게를 계측한 후 단위시간당 단위길이당의 무게로 환산하였다(해양수산부, 1997).

4. 실험결과 및 분석

4.1 블럭의 안정성

피해량을 계측하기 위하여 Table 3에서 제시한 실험파를 주기별로 작은 파고부터 시작하여 파고를 점차 증가시키며 작용시켰다.

각 파의 작용시간은 실험실 규모로 30분씩이었다. 피해량은 실시간 육안관찰로 기록하였으며 중요 장면들은 디지털 캠코더 촬영을 통하여 비교, 분석에 이용하였다. Table 4는 블럭의 안정성에 대한 실험결과를 각 블럭 종류, 사면경사 및 거치형태 별로 해당 파고조건까지 이탈한 블럭의 누적갯수를 도시한 것이다. 그리고 Photo. 4~Fig. 6은 앞의 실험 결과 중에서 최종 파고조건에서 촬영한 블럭의 피해장면이다.

Table 4. 각 블럭의 거치형태에 따른 피해량의 누적갯수

| 유의 주기 (sec) | 유의 파고 (cm) | 이탈 누적 갯수 | | | | | |
|-------------|------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | | 사면경사 (1 : 1.5) | | | 사면경사 (1 : 4/3) | | |
| | | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 |
| 1.6 | 10.01 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| | 12.04 | 16 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| | 14.02 | 22 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| | 16.00 | 중단 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| | 17.37 | 중단 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| 1.9 | 9.98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 12.00 | 3 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| | 14.01 | 5 | 0 | 0 | 31 | 0 | 0 |
| | 16.02 | 10 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| | 18.00 | 47 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| 2.2 | 9.98 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| | 12.01 | 4 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| | 14.02 | 7 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| | 16.00 | 중단 | 0 | 0 | 중단 | 0 | 0 |
| | 18.00 | 중단 | 0 | 1 | 중단 | 0 | 0 |

TTP 난적 2층의 사면경사 1 : 1.5의 실험결과에서 안정성이 확인된, 즉 피해율 D가 0%인 실험파 조건은 주기 1.9sec, 파고 9.98cm이고, 주기 2.2sec때는 파고 9.98cm이다. 이때 TTP의 안정성을 평가하기 위해 식 (1)에 표시한 Hudson공식으로 K_D 값을 구해보면 위의 두 경우에 대하여 $K_D=8.88$ 이 된다. 이 값은 CERC(1984)에서 제

시한 사면경사가 1 : 1.5보다 급하지 않으며 파가 비쇄파인 경우의 안정계수 $K_D=8.0$ 보다 10.0% 정도 큰 값이다. 이와 같이 안정계수에서 차이는 이유는 축소모형실험에서 블록의 심한 동요나 회전으로 인한 블록의 파괴현상을 재현시키지 못하므로 블록의 안정성 실험에서 도출되는 피해계수는 보통 낮게 제시되기 때문이라 추측된다. TTP 난적 2층의 사면 경사 1 : 4/3의 실험결과에서 피해율 D가 0%인 실험과 조건은 주기 1.9sec, 파고 9.98cm일 때이다. 이 조건에서 식 (1)을 이용하여 안정계수를 구해보면 $K_D=9.99$ 가 된다. 이 값은 "TETRAPOD설계, 시공"에서 규칙파를 이용하여 사면경사 1:4/3인 경우, 비쇄파에 대하여 사용하도록 제시한 $K_D=10.2$ 에 근사하며 2.1%정도 작은 값이다. 이는 본 실험이 불규칙파가 대상인 것을 감안하면 비교적 합당한 실험결과라 생각된다.

MTB 정적 1층의 사면경사 1 : 1.5와 1 : 4/3의 실험에서는 전 실험과 조건에서 실제 피해를 발생시키는 파고는 없었으나, MTB 정적 1.5층 사면경사 1 : 1.5의 경우에서 실험과 주기 2.2sec, 파고 18.0cm에서 피해가 발생함을 확인할 수 있었다. 그러므로 MTB 정적 1.5층에서 안정성이 확인된 실험과 조건은 주기 2.2sec, 파고 16.0cm이다. 이 값을 식 (1)에 대입하여 피해율 0%때의 안정계수를 구해보면 32.7이 된다. 그러나 이 안정계수는 매우 제한된 실험조건에서 추정된 것이고 또한 심해역의 방파제와 호안 현장에서 발생할 수 있는 심한동요 및 회전에 의한 블록의 파괴현상을 감안할 때 새롭게 개발된 MTB의 안정계수는 30정도로 추정될 수 있다.

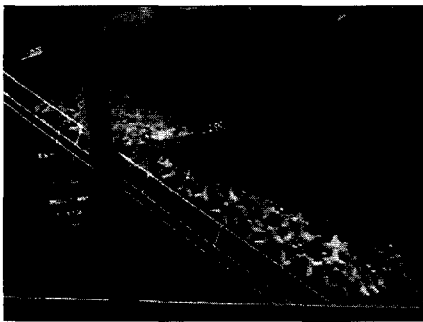


Photo. 4. $H_{1/3}=16.00\text{cm}$, $T_{1/3}=2.2\text{sec}$ 를 경험한 TTP 난적 2층(사면경사 1 : 1.5).



Photo. 5. $H_{1/3}=18.00\text{cm}$, $T_{1/3}=2.2\text{sec}$ 를 경험한 MTB 정적 1층(사면경사 1 : 1.5).

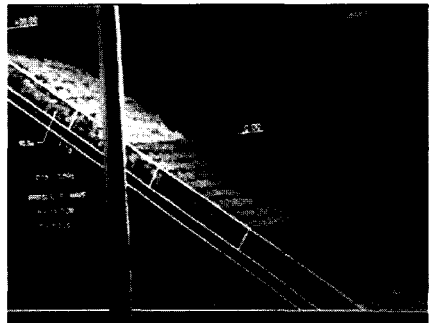


Photo. 6. $H_{1/3}=18.00\text{cm}$, $T_{1/3}=2.2\text{sec}$ 를 경험한 MTB 정적 1.5층(사면경사 1 : 1.5).

TTP 2층 난적의 실험결과에서 Fig. 4로부터 피해율 D와 Hudson공식에 의해서 구한 K_D 값의 관계를, Fig. 5는 제체위치에서 파형경사 (H/L)_{1/3}와 K_D 값의 관계를 사면경사 별로 각각 도시하였다.

실험결과를 살펴보면 K_D 값은 크게 변동하고 피해율이 커짐에 따라서 당연히 크게 된다. 또한 파형경사가 크면 K_D 값이 크게 나타남을 알 수 있고, 특히 주기가 긴 파에서는 파형경사의 변화에 의한 K_D 값의 증가율이 크게 나타난다. Fig. 4로부터 피해율 0~1%에 대한 TTP의 K_D 값은 8.8~15.5의 범위에 있다.

사면경사의 변화에 의한 영향은 사면경사가 급할수록 K_D 값은 감소하나, 파형경사가 동일한 경우에는 사면경사가 급할 수록 K_D 값은 크게 나타났다. 이는 Hudson공식에 있는 $\cot \alpha$ 의 영향이라 생각된다. 또한 파형경사의 변화에 의한 K_D 값의 증가율은 사면경사가 급할 수록 현저하게 나타남을 알 수 있다.

주기의 영향을 살펴보면, 3개의 주기조건인 실

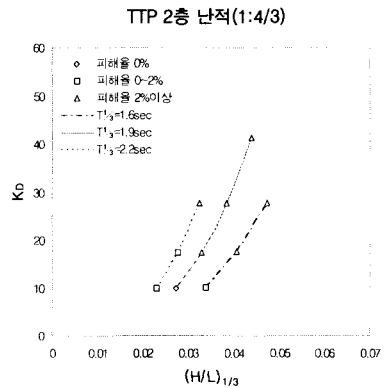
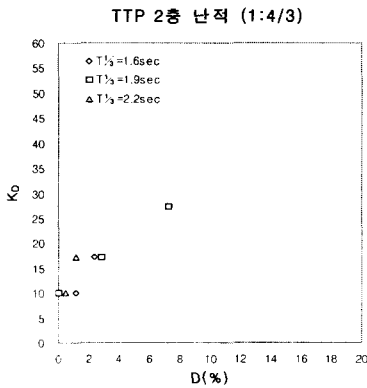
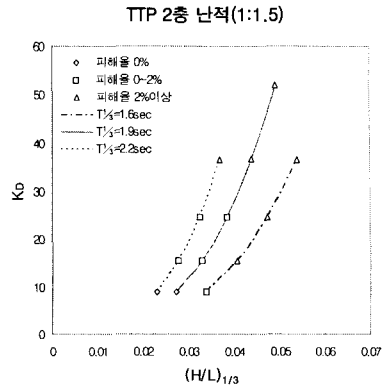
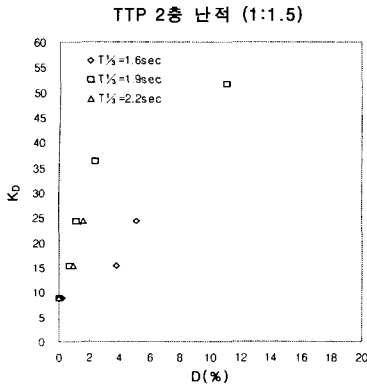


Fig. 4. 피해율(D)과 K_D 값의 관계.

Fig. 5. 파형경사 $(H/L)_{1/3}$ 과 K_D 값의 관계.

험결과이지만 피해율 0~3% 내에서 사면경사가 1:1.5인 경우 $T_{1/3}=1.6\text{sec}$ 에서 K_D 값이 최소값을 가지며, 1:4/3 인 경우 $T_{1/3}=1.9\text{sec}$ 에서 K_D 값이 최소값을 가진다. 또한 파형경사가 같으면 주기가 긴 파의 K_D 값은 크게 나타남을 알 수 있다.

4.2 반사계수

Table 5와 Table 6은 각각 무월파 및 월파허용 조건에서 각 블록의 거치형태에 따른 반사계수를 계측한 실험결과이고 Fig. 6은 무월파조건에서 반사계수와 파형경사 $(H/L)_{1/3}$ 의 관계를 도시한 것이다.

무월파조건의 실험결과를 살펴보면 TTP 난적 2층과 MTB 정적 1.5층의 모든 실험조건에 대하여 반사계수는 비슷한 결과를 보여주고 있으나 MTB 정적 1층의 반사계수는 약간 높게 나타났다. 그리고 월파조건의 실험결과에서는 TTP 난적 2층,

MTB 정적 1.5층 그리고 MTB 정적 1층 순서로 반사계수가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 같은 실험조건이라도 월파가 생기는 경우에는 반사계수가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 월파가 일어나면서 체체에 입사하는 파랑에너지의 일부가 체체 밖으로 전달되기 때문이다. 또한, MTB 정적 1층 그리고 MTB 정적 1.5층은 공극률은 비슷하나 그 거치형태를 달리 했을 때 반사계수가 달라진 것을 알 수 있는데 이는 MTB 정적 1.5층으로 거치할 경우 표면조도가 증가하여 파랑에너지 손실이 상대적으로 크게 발생했기 때문이라 생각된다. Table 5에서 보는 바와 같이 실험의 모든 경우에 대하여 같은 파고조건에서 주기가 길거나 또는 사면경사가 급할수록 반사계수가 크게 나타남을 알 수 있고 파형경사 $(H/L)_{1/3}$ 가 증가할수록 반사계수가 감소함을 알 수 있다.

Table 5. 각 블록의 거치형태에 따른 반사계수 (무월파)

| 유의 주기 (sec) | 유의 파고 (cm) | 반사 계 수 (K_R) | | | | | |
|-------------|------------|-------------------|-----------|-------------|-------------------|-----------|-------------|
| | | 사 면 경 사 (1 : 1.5) | | | 사 면 경 사 (1 : 4/3) | | |
| | | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 |
| 1.6 | 10.01 | 0.230 | 0.258 | 0.245 | 0.272 | 0.283 | 0.270 |
| | 12.04 | 0.227 | 0.258 | 0.244 | 0.275 | 0.293 | 0.274 |
| | 14.02 | 0.215 | 0.258 | 0.243 | 0.262 | 0.295 | 0.273 |
| | 16.00 | 중단 | 0.254 | 0.239 | 중단 | 0.277 | 0.272 |
| | 17.37 | 중단 | 0.252 | 0.237 | 중단 | 0.272 | 0.269 |
| 1.9 | 9.98 | 0.286 | 0.293 | 0.286 | 0.308 | 0.331 | 0.307 |
| | 12.00 | 0.297 | 0.299 | 0.300 | 0.310 | 0.321 | 0.309 |
| | 14.01 | 0.299 | 0.302 | 0.302 | 0.302 | 0.335 | 0.313 |
| | 16.02 | 0.321 | 0.314 | 0.316 | 0.307 | 0.337 | 0.323 |
| 2.2 | 18.00 | 0.311 | 0.305 | 0.313 | 중단 | 0.335 | 0.321 |
| | 9.98 | 0.354 | 0.366 | 0.338 | 0.374 | 0.385 | 0.367 |
| | 12.01 | 0.340 | 0.355 | 0.332 | 0.362 | 0.375 | 0.359 |
| | 14.02 | 0.329 | 0.342 | 0.336 | 중단 | 0.368 | 0.350 |
| | 16.00 | 0.322 | 0.339 | 0.344 | 중단 | 0.368 | 0.351 |
| 18.00 | 중단 | 0.339 | 0.366 | 중단 | 0.373 | 0.354 | |

Table 6. 각 블록의 거치형태에 따른 반사계수 (월파허용)

| 유의 주기 (sec) | 유의 파고 (cm) | 월 파 량 반 사 계 수 (K_R) | | | | | |
|-------------|------------|-------------------------|-----------|-------------|-------------------|-----------|-------------|
| | | 사 면 경 사 (1 : 1.5) | | | 사 면 경 사 (1 : 4/3) | | |
| | | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 |
| 1.6 | 12.04 | 0.231 | 0.268 | 0.257 | 0.261 | 0.289 | 0.274 |
| | 14.02 | 0.218 | 0.251 | 0.251 | 0.239 | 0.286 | 0.269 |
| 1.9 | 12.00 | 0.263 | 0.289 | 0.271 | 0.295 | 0.319 | 0.300 |
| | 14.01 | 0.270 | 0.303 | 0.283 | 0.299 | 0.335 | 0.324 |
| 2.2 | 12.01 | 0.319 | 0.335 | 0.328 | 0.347 | 0.365 | 0.346 |
| | 14.02 | 0.306 | 0.331 | 0.320 | 0.336 | 0.361 | 0.339 |

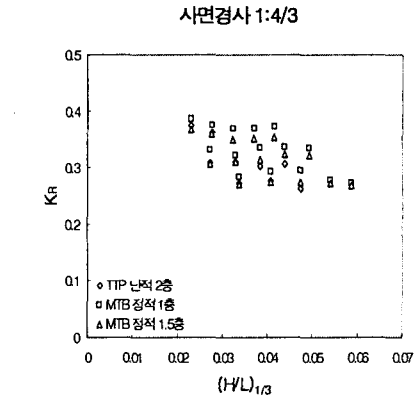
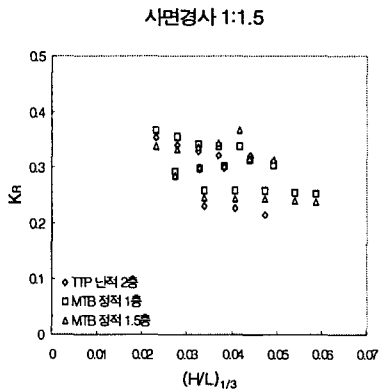


Fig. 6. 파형경사 (H/L)^{1/3}와 K_R 의 관계.

4.3 월파량

월파량은 불규칙파의 파고를 대상으로 200~300 파를 연속적으로 작용시켜 월파량 측정장치를 이용하여 3회 반복하여 측정한 후, 그 평균값을 Table 7에 나타내었다.

계측결과를 살펴보면 전체적으로 파고가 증가하면 평균 월파량도 증가함을 볼 수 있으며, 평균 월파량은 TTP 난적 2층이 가장 적고, 그 다음으로 MTB 정적 1.5층, MTB 정적 1층 순서로 높게 나타남을 알 수 있다. MTB 정적 1.5층이 MTB 정적 1층보다 평균 월파량이 적은 이유는 반사계수의 경우와 마찬가지로 공극률은 비슷하나 거치표면의 조도가 상대적으로 크기 때문이라 생각된다.

TTP 난적 2층과 MTB 정적 1.5층을 비교하여 보면 반사계수는 비슷하게 나타났으나 월파량에서는 MTB 정적 1.5층에서 상대적으로 크게 나타나는 것은 MTB 정적 1.5층이 TTP 난적 2층에 비해 공극률이 작고 거치형태가 정적이라 공극이 주로 거치표면에 집중되어 있으며 체체에서 소산되는 파랑에너지가 적기 때문에 소파블록의 경사면 위에서 발생하는 파의 처오름 높이의 저감효과가 감소되어 나타난 결과이다.

평균월파량에 대한 주기 및 사면경사의 효과를 보면 같은 파고 조건이라도 주기가 길거나 사면경사가 급할수록 월파량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 반사계수의 특성과 비교하여 보면 전반적으로 반사계수가 크면 월파량이 많이 발생함을 알 수 있다.

Table 7. 각 블록의 거치형태에 따른 평균 월파량

| 유기 주기 (sec) | 유기 파고 (cm) | 월 파 량 ($cm^3/cm/sec$) | | | | | |
|-------------|------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| | | 사 면 경 사 (1 : 1.5) | | | 사 면 경 사 (1 : 4/3) | | |
| | | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 | TTP 난적 2층 | MTB 정적 1층 | MTB 정적 1.5층 |
| 1.6 | 12.04 | 2.20 | 4.70 | 3.56 | 2.58 | 5.46 | 5.46 |
| | 14.02 | 10.23 | 24.39 | 18.41 | 12.27 | 22.73 | 21.67 |
| 1.9 | 12.00 | 4.55 | 9.02 | 6.29 | 4.55 | 10.61 | 7.50 |
| | 14.01 | 36.36 | 50.91 | 46.21 | 40.00 | 56.21 | 53.71 |
| 2.2 | 12.01 | 2.79 | 4.86 | 3.43 | 3.50 | 6.29 | 4.93 |
| | 14.02 | 38.57 | 60.86 | 47.07 | 46.50 | 62.57 | 62.00 |

5. 결 론

불규칙파를 대상으로 하여 가장 보편화 되어있고 수리모형실험 및 시공실적이 가장 많은 TTP와 새로운 소파블록인 MTB의 수리학적 성능을 비교 검토하기 위하여 각 블록의 거치형태 및 사면경사에 대한 수리모형실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) TTP 난적 2층의 사면경사 1 : 1.5 인 실험결과에서 피해율이 0%일 때 K_D 값은 8.88로 나타났고, 이 값은 CERC(1984)에서 제시한 사면경사 1 : 1.5보다 급하지 않으며 비쇄파인 경우의 $K_D=8.0$ 보다 10.0% 큰 값이다.

2) TTP 난적 2층 사면경사 1 : 4/3인 실험결과에서 피해율 0%일 때 K_D 값은 9.99임을 알 수 있었으며, 이 값은 "TETRAPOD 설계, 시공"에서 규칙파를 이용하여 사면경사 1 : 4/3인 경우, 비쇄파에 대하여 사용하도록 제시한 $K_D=10.2$ 에 근사하며, 이는 본 실험이 불규칙파를 대상으로 한 것을 감안하면 합리적인 실험결과라 판단된다.

3) MTB 정적 1층의 모든 실험조건에서는 본 수리모형실험을 통하여 실제 피해를 발생시키는 파고를 발견할 수 없었으나, MTB 정적 1.5층, 사면경사 1 : 1.5에서 피해가 발생함을 확인할 수 있었고, 이때 안정성이 확인된, 즉 피해율 0%일 때의 K_D 값은 32.7이 된다. 그러나 본 실험이 매우 제한된 실험조건에서 수행되었고 또한 실제 해역에서 일어날 수 있는 블록의 파괴현상을 감안하면 새롭게 개발된 MTB의 K_D 값은 30정도로 제시될 수 있다. 따라서 MTB는 수리학적 안정성

의 관점에서 볼 때 TTP보다 훨씬 우수한 소파블록임이 입증되었다.

4) TTP 난적 2층에 대한 K_D 값의 특성을 고찰한 결과, 파형경사가 크면 K_D 값이 크게 나타났으며, 특히 장주기에서는 파형경사의 변화에 의한

K_D 값의 증가율이 높게 나타났다. 사면경사의 변화에 의한 영향은 사면경사가 급할수록 K_D 값은 감소하나, 동일한 파형경사의 경우에는 사면경사가 급할수록 K_D 값이 크게 나타났다. 주기의 영향을 살펴보면, 3개의 주기조건인 실험결과이지만 피해율 0~3%내에서 사면경사가 1:1.5인 경우 $T_{1/3}=1.6sec$ 에서 K_D 값은 최소값을 가지며, 1:4/3인 경우 $T_{1/3}=1.9sec$ 에서 K_D 값이 최소값을 가진다. 또한 파형경사가 같으면 주기가 긴 파의 K_D 값은 크게 나타났다.

5) 무월파조건인 실험결과에서 TTP 난적 2층과 MTB 정적 1.5층의 모든 실험조건에 대하여 반사계수는 두 경우가 비슷한 결과를 보여주고 있으나 MTB 정적 1층에서는 약간 높게 나타났다. 그리고 월파조건인 실험결과에서 TTP 난적 2층, MTB 정적 1.5층 그리고 MTB 정적 1층 순서로 반사계수가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 같은 블록이라도 거치형태를 달리하면 반사계수가 다르게 예측될 수 있음을 알 수 있었고, 실험의 모든 경우에 대하여 같은 파고조건에서 주기가 길거나 사면이 급할수록 반사계수가 크게 나타났고 파형경사가 증가할수록 반사계수가 감소함을 알 수 있었다.

6) 평균월파량은 TTP 난적 2층이 가장 적고, MTB 정적 1.5층, MTB 정적 1층 순서로 많게 나타남을 알 수 있었다. TTP 난적 2층과 MTB 정적 1.5층에서 반사계수는 비슷하게 나타났으나 평균 월파량이 MTB 정적 1.5층에서 상대적으로 많게 나타났다. 이는 MTB 정적 1.5층을 TTP 난적 2층과 비교하면 공극률이 약간 적고 거치형태가 정적이기 때문에 공극이 주로 거치표면에 집중되어 있기 때문이라 판단된다. 월파량에 대한 주기 및 사면경사의 효과는 반사계수와 마찬가지로 같은 파고조건이라도 주기가 길거나 사면이 급할수록 평균월파량은 크게 나타났다.

이상과 같은 결론을 종합하여 보면 MTB는 안정성에서 상당히 우수한 블록임이 입증되었으며 또한 소파효과를 나타내는 반사계수도 TTP 난적 2층과 비슷하게 나타났으나, 거치형태가 정적인 관계로 월파량에서는 TTP 난적 2층보다 다소 기능이 뒤떨어짐을 알 수 있었다.

참고문헌

- 권혁민, 이달수(1999) : 신형 중간 피복블록의 개발, 대한토목학회 논문집, 19(II-3): pp183-194
- 김인철, 이태환(2000) : 소파안벽의 수리학적 성능에 관한 실험적 연구, 한국해안·해양공학회지 : pp195-202
- 홍군희, 전인식(1999) : 신 소파블록 Octopus의 성능 평가 수리실험, 대한토목학회 논문집, 19(II-3) : pp359-374
- (주) 대우건설(1999) : 해군 99-5951-2시설 공사입찰 설계를 위한 수리모형실험 보고서, 143P
- 박영우(2000) : 해안 및 항만구조물의 새로운 콘크리트 소파블록 : MTB 피복공법, 34P
- (주) 해건개발(1999) : O.T.P를 이용한 방파제 및 호안 피복공법, 68P
- 해양수산부(1997) : 울산 신항만 방파제 기본설계 보고서, 92P
- 해양수산부(1997) : 부산 신항만 방파제 실시설계 용역 단면 2차원 수리모형 실험 보고서, 67P
- 해양수산부(2001) : 경사식 방파제의 최적설계기술개발(I), 249P
- CERC(1984) : Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Goda, Y. and Suzuki, Y.(1976) : "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave experiments", Proc. 15th conf., Coastal Engg., Honolulu, pp. 828-845.
- Hudson, R Y.(1969) : "Laboratory Investigation of Rubble Mound Breakwater", Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- Seeling, W.(1980) : "Two-Dimensional Tests of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters," TR 80-1, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- 藤本稔美, 阿部宣行, 長谷川寛(1982) : 消波 ロックの水理特性に関する實驗的研究, 電力中央研究所報告, No. 382001.
- 何原壽一, 三浦雅彦(1987) : 不規則波による消波ブロックの安定性, 中部電力研究資料, 第78号, pp.89-104.
- 合田良實(1987) : 數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43回海岸工學講演會論文集, pp. 131-135.