

# 피복 케이슨의 소파블록 이탈이 직립벽에 작용하는 파압에 미치는 영향

박태건\* · 정연명\*\* · 이정흠\*\*\* · 정재현\*\*\*\* · † 허동수

\*경상국립대학교 해양토목공학과 수공학 박사과정, \*\*,\*\*\*경상국립대학교 해양산업연구소 연구원,

\*\*\*\*경상국립대학교 해양토목공학과 수공학 석사, † 경상국립대학교 해양토목공학과 교수

## The Impact of Armor Block Failure on Wave Pressure Acting on a Vertical Wall at the Front of a Caisson

Taegun Park\* · Yeon-Myeong Jung\*\* · Jeongheum Lee\*\* · Jaeheon Jeong\*\*\* · † Dong-Soo Hur

\*Ph.D. Student, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

\*\*,\*\*Researcher, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

\*\*\*M.Eng, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

† Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 3가지 형태의 소파블록 단면에 대한 수리모형 실험을 통해 피복 케이슨 전면 소파블록의 이탈로 인한 수직벽에 작용하는 파압에 미치는 영향에 초점을 둔다. 또한 소파블록의 완전 소파단면을 기준으로 소파블록 이탈을 재현한 2조건 단면에 대해 수리학적 특성을 비교하였다. 그리고 정량적인 분석을 통해 소파블록의 이탈 재현 단면에서 치오름은 평균 73% 상승하며 무차원된 파압의 합은 평균 28% 상승하며, 변환 파력은 33% 상승하였다. 이상의 분석을 토대로 소파블록의 이탈이 발생할 경우 이에 대한 대책이 필요하다고 본다.

**핵심용어** : 케이슨, 파압, 파력, 2차원 수리모형실험, 소파블록

**Abstract** : This study examines the effects of wave pressure on a vertical wall due to armor block failure at the front of a caisson, using a 2-D hydraulic model to simulate three types of armor block cross-sections. Additionally, the hydraulic characteristics of two cross-sections that replicated the armor blocks' failure, based on complete cross-sections, were compared. Moreover, quantitative analysis indicated that in the cross-section where the displacement of the armor block was recreated, wave run-up( ) increased by an average of 73%, the sum of dimensionless wave pressures increased by 28%, and converted wave force rose by 33%. These findings underscore the need for countermeasures in the event of armor block failure.

**Key words** : caisson, wave pressure, wave force, 2-D hydraulic model, armor blocks

### 1. 서 론

최근 이상기온 및 해수면 상승 등의 영향으로 폭풍해일·이상파랑 등 해양 재해들이 발생하고 있으며, 그로 인하여 기존에 설계·시공되어 있는 케이슨 전면 고파랑의 내습이 우려되고 있다. 현재 우리나라는 Goda(1974)의 경험식을 이용한 설계 파압 산정을 통해 혼성제를 설계하는 것이 일반적이며 해당 구조물은 항만 배후 권역의 물적·인적 재산을 보호하는 목적을 가진다. 근래에는 기존에 설치된 케이슨 전면 피복석과 소파블록을 활용하여 해당 지역의 100년 빈도 설계파랑 제어가 가능하도록 국가 어항보강 사업을 진행하고 있다. 이는 케이슨 전면 소파제를 피복하여 본체에 도달하는 파랑 에너지의 저감과 안정성을 증대시키며, 이 때, 일반적으로Goda

경험식을 준용한 Tanimoto et al.(1976)의 안전계수 도출을 통해 설계 파압을 산정하고 있다.

하지만 소파블록 보강 이후 장주기성 고파랑 내습으로 혼성제 전면 소파블록의 이탈·침하 등에 따른 피해(Kang, 2019)가 발생할 경우, 이러한 이탈·침하 등의 발생으로 변화된 단면은 기존 설계단계와 상이한 파랑에너지가 케이슨에 작용하며 실제 직립벽에 작용하는 파압은 불분명하게 된다.

선행연구 중 Kubota et al.(2010)은 소파제 단면의 수평 길이와 천단 침하에 따른 작용 파압에 대해 검토하였으며, 소파블록의 이탈로 인하여 노출된 직립벽 상부에 강한 충격파압이 작용한다고 보고하고 있다. Ota et al.(2020)는 Nakajo et al.(2014)의 태풍 파랑 추산 데이터를 기반으로 한 장주기성 파랑 조건을 설정하여 실험한 결과, 케이슨 전면 전체 피복된 소

† Corresponding author : 정희원, dshur@gnu.ac.kr 055)625-3150

\* 정희원, taegun1739@naver.com 055)625-3150

\*\* jym3803@gmail.com 055)625-3150

\*\*\*\* scudis29@naver.com 055)625-3150

파블록 단면의 작은 변형에도 설계 파압과 유사한 힘이 작용한다는 것을 밝히고 있다. 또한 해당 구조물의 설계 파랑에서 약 20% 이상의 변형은 기존 설계 파압보다 높은 파압이 작용함을 경고하고 있다. Oh and Lee(2020)는 피복석과 소파블록 등의 천단 높이 및 폭을 조절하여 실험을 수행한 후, Takahashi et al.(2000)은 태풍에 의한 방파제 손상 발생조건에서의 설계 파압 제안식 안전계수와 비교·분석하여 수정된 안전계수를 제안하고 있다. 위의 선행연구들을 통해 케이슨 전면의 소파블록 및 피복석 등의 이탈 및 침하에 의한 단면변화가 설계파압과는 상이한 파압이 케이슨에 작용할 수 있다는 것을 확인할 수 있으며, 입사파 조건 및 소파제들의 제원과 사면경사 및 단면 배치 등에 따라 노출된 상부와 직립벽 전체에 작용하는 수평파압은 매우 다른 것을 알 수 있다. 하지만, 이러한 소파블록 단면의 변화에 따른 파압 작용기구에 대해서는 아직 명확하게 밝혀져 있지 않은 실정이다.

이상의 내용을 토대로 본 연구에서는 2차원 조파수조에 T TP로 설계 피복된 혼성 방파제를 재현한 Type-A와 설계 피복된 단면에서 TTP 소파블록의 상부 이탈을 재현한 Type-B, C 단면의 변화에 따라 무공케이슨에 작용하는 수평파압의 변화에 대한 실험을 수행한다. 소파블록 단면변화에 따라 노출된 케이슨 상부의 파압 변화에 대하여 검토하기 위해 기존 T TP 피복 설계된 1종류 단면과 소파블록 이탈 2종류 단면을 재현하여, 규칙파 내습에 따른 파장, 파고 및 수심 조건과 계측된 파압 값의 무차원화를 통해 정량·정성적인 비교·분석을 수행하여 경향성을 확인한다. 최종적으로 설계 시의 소파블록 단면을 기준으로 이탈에 의해 변화된 2종류의 소파블록 단면을 가지는 케이슨에 작용하는 파력을 비교·분석하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 수리모형실험

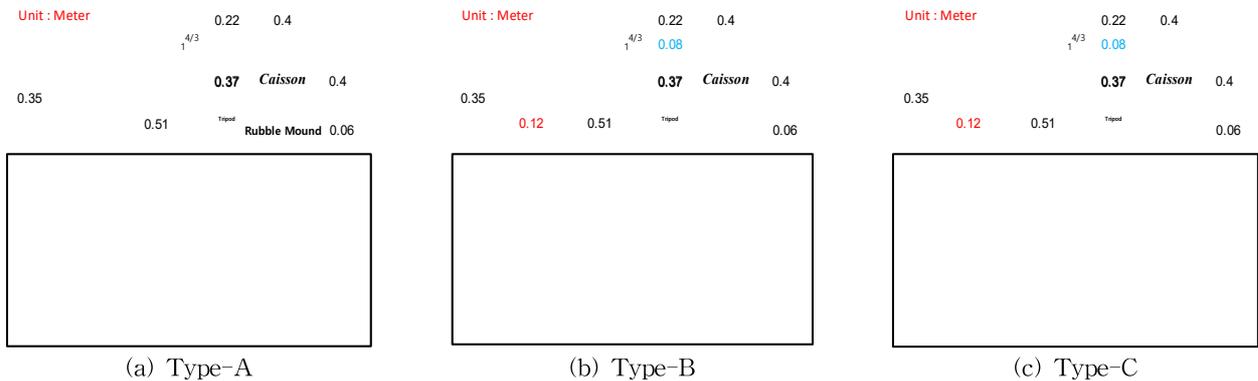


Fig. 2 Selected experimental images and cross-section conditions

### 2.1 조파수조

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 길이 37m, 폭 0.6m, 높이 1m의 단면 2차원 조파수조에서 수리모형실험을 진행하였다. 입사파는 피스톤타입의 조파기를 사용하며 생성시켰으며 구조물 배후에는 2m 길이의 반사파랑 제어목적을 가진 투과성 소파제가 설치되어 있다. 본 실험에서 설정된 입사 파고와 주기 등의 조건을 재현하기 위하여 전면에 1:30 경사와 0.2m 높이의 불투과성 스테인리스 스텝을 이용하여 구조물 설치 영역을 구성하였다. 실험영역에 설치된 구조물들은 1:50 축척을 적용하였으며 무공 케이슨은 아크릴로 제작되었으며 마운드 전면에는 1:4/3 구배를 가진 콘크리트 트라이포드 블록을 전면 마운드로 배치하였다.

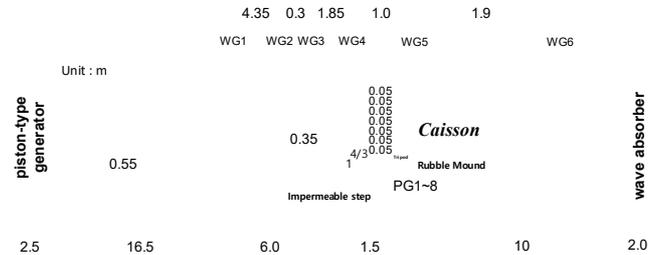


Fig. 1 Schematic diagram of 2-D wave flume

### 2.2 단면조건

단면 조건은 Fig. 2와 같으며 소파블록으로서 이용된 TTP는 64t급 평균중량 471g/ea, 공극률 0.5, Tripod는 22t급 평균중량 171g/ea, 공극률 0.5, 근고블록은 20t급 평균중량 157g/ea으로 구성하였다. Armor Stone의 외부 피복석은 제련된 매끈한 사석을 사용하였으며 Rubble Mound는 가장 작은 사석을 이용하여 구조물을 배치하였다.

또한 아크릴 케이슨 직립벽에 설치된 파압계에 파랑에너지 외에 작용하는 부가적인 영향을 최소화하기 위해 외부 유리벽면과 케이슨은 실리콘 처리하여 고정하였으며, 케이슨 내부에 사석과 담수를 채워 부력 등에 의한 케이슨의 진동과 이동을 최대한 제어하였다. 소파블록의 단면을 3종류(Type-A, Type-B, Type-C)로 구성하였으며, 전면에 소파재들로 완전 피복된 Type-A는 2층 거치의 TTP로 1:4/3 경사를 유지하며 천단 마루에 2배열과 우각부 2배열로 배치되었다. Type-B는 천단과 우각부 2층 TTP가 하부로 이동한 단면으로 배치하였고 Type-C는 천단과 우각부의 1, 2층 TTP가 전면 하부쪽으로 이동하여 쌓인 형태로 모의하였다(Fig. 2 참조).

### 2.3 파랑조건

본 실험에서의 입사파랑 제원은 Table 1과 같으며 파랑조건은 해당 수심 조건의 불확실성 요소를 줄이기 위해 규칙파 실험을 수행하였다. 또한 입사파랑이 케이슨 직립벽에 도달한 후, 중복파동장을 유지하는 60초간 조파를 진행하였다. 입사파랑 조건에 따른 파장, 파고 및 파랑의 처오름( $n^*$ )의 분석에는 파랑이 도달하는 직립벽 전면에 WG5(Capacitance-Type Wave Gauge)을 밀착하여 50Hz 간격으로 측정된 값을 이용하였다.

Table 1 Incident wave conditions used for laboratory experiment

Prototype					
Case	$h(m)$	$H_i(m)$	$T_i(s)$	$L(m)$	$\frac{H_i L^2}{h^3}$
1	17.50	3.70	11.24	133.5	12.30
2		4.38	11.24	133.5	14.56
3		8.27	10.68	125.4	24.25
4		9.00	11.46	136.6	31.31
5		9.66	11.46	136.6	33.59
6		3.39	13.01	158.6	15.90
7		4.01	12.94	157.6	18.55
8		8.08	11.95	143.6	31.07
9		8.89	12.02	144.6	34.68
10		9.91	12.73	154.6	44.17
Model scale					
Case	$h(cm)$	$H_i(cm)$	$T_i(s)$	$L(cm)$	$\frac{H_i L^2}{h^3}$
1	35.00	7.39	1.59	267.1	12.30
2		8.75	1.59	267.1	14.56
3		16.53	1.51	250.8	24.25
4		18.00	1.62	273.1	31.31
5		19.31	1.62	273.1	33.59
6		6.78	1.84	317.1	15.90
7		8.01	1.83	315.1	18.55
8		16.15	1.69	287.2	31.07
9		17.78	1.70	289.2	34.68
10		19.81	1.80	309.2	44.17

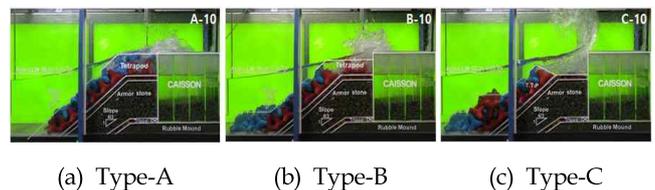
### 2.4 파압계측

파압계측에 사용된 장비는 KYOWA(PS-05KCM3Z5P)로 최대 50kPa까지 계측 가능하며 최대 1000Hz로 측정이 가능하다. 파압계의 부착은 케이슨 직립벽 전면 중앙에 정수면을 기준으로 하여  $\pm 0.05m$ 의 간격으로 연직 배치하였으며 총 8개의 파압계를 사용하였다. 직립벽에 파랑이 내습하여 파압계에 작용한 에너지를 전기적 데이터로 측정하며 디지털 데이터 취득을 위한 측정 간격은 500Hz로 설정하여 계측하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 처오름

케이슨 직립벽 전면의 처오름( $n^*$ ) 특성은 구성된 소파블록 단면인 3조건 Type-A, B, C의 각 단면별 10조건에 대하여 분석하였으며, Lee and Bae.(2015)의 처오름( $n^*$ ) 수리모형실험을 참고하였다. 입사파랑 조건인 Case 1, 2, 6, 7은 비월파(Non-wave overtopping) 조건이며 Case 3, 4, 5, 8, 9, 10은 월파(Wave overtopping) 조건이다. 또한 Table 2는 계측된 처오름( $n^*$ )의 높이를 나타내고 있으며, Type-A를 기준으로 하여 Type-B, C를 정량적인 수치로 비교하였다. Fig. 3은 Ursell number( $H_i L^2/h^3$ )와 처오름( $n^*$ ) 높이의 관계를 나타내고 있으며,  $\circ$ 는 Type-A,  $\square$ 는 Type-B,  $\triangle$ 는 Type-C에 대한 실험결과를 의미한다. Fig. 3으로부터 Ursell number가 커짐에 따라 처오름( $n^*$ ) 높이가 증가하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 소파블록의 이탈이 많은 Type-C, Type-B 및 Type-A의 순으로 명확하게 나타나고 있으며, 소파블록의 이탈이 많은 Type-C의 경우가 가장 파랑에너지의 저감효율이 떨어진다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 정량적으로 나타내면, 비월파 조건에서는 낮은 Ursell number의 영향으로 케이슨 전면에서의 처오름은 크게 발생하지 않지만 Type-A를 기준으로 Type-B는 약 106~114%, 평균 110% 상승하며 Type-C는 약 119~134%, 평균 122% 상승하였다. 하지만 월파 조건에서는 높은 Ursell number의 영향으로 Type-A를 기준으로 Type-B는 최대 174%, 평균 145% 상승하며 Type-C는 최대 115%, 평균 180% 상승하였다(Table 2 참조).





(d) Wave gauge 5  $n^*$  data

Fig. 3 Analysis of wave run-up comparison graph and experiment video snapshot

이상의 결과에 근거하면, 처오름( $n^*$ ) 높이는 TTP의 배치와 체적에 의한 영향을 많이 받으며 소파블록의 이탈이 없는 Type-A의 경우는 파랑에너지 저감 및 처오름( $n^*$ )의 감소에 효율적인 반면, 이탈에 의하여 소파블록의 단면변화가 발생한 “Type-B와 Type-C는 직립벽의 노출로 인하여 입사파의 제어 능력이 다소 감소된 결과 처오름( $n^*$ )이 크게 발생된 것으로 판단된다.” 위 분석을 토대로 Goda의 파압식에서 처오름( $n^*$ ) 높이의 상승은 본체에 작용하는 수평파압 상승으로 직결하는 요인으로서, 후술하는 것처럼 본 실험에서 측정된 파압 또한 유사한 경향을 가지며 상승한다.

Table 2 Analysis of the compared wave run-up( $n^*$ ) heights for three cross-sections.

Case	Type-A (cm)	Type-B (cm)	Type-C (cm)	(B) Compar ed to (A) [%]	(C) Compar ed to (A) [%]
1	8.66	9.28	10.28	107	119
2	10.03	10.68	13.40	106	134
3	18.91	23.18	28.40	123	150
4	19.60	26.53	33.30	135	170
5	19.91	26.98	37.02	136	186
6	9.63	10.84	10.98	113	114
7	10.57	12.07	12.89	114	122
8	19.85	27.33	39.96	138	201
9	20.08	34.99	42.97	174	214
10	20.84	34.56	44.87	166	215
avg	16.60	21.64	27.41	131	162

### 3.2 파압

케이슨 직립벽 전면 중앙에 정수면을 기준으로 하여  $\pm 0.05$  m의 간격으로 연직 배치한 총 8개의 PG(Wave Pressure Gauge)에서 측정한 수평파압을 이용하여 3종류의 소파블록 단면 Type-A, B, C에 대하여 정량적인 수치로 비교·분석을 수행하

였다. Fig. 4는 무차원연직파압( $p/\rho g H_i$ )의 분포를 나타내고 있으며, (a)와 (b)는 각각 비월파조건(Case 1)과 월파조건(Case 8)에 대응하고 있다. 여기서,  $p$ 는 실험의 계측파압,  $\rho$ 는 유체밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $H_i$ 는 입사파고이다. 또한 종축의  $z$ 는 파압계 설치 높이이며 입사파고  $H_i$ 로 무차원하였다. Fig. 4로부터 (b)의 Type-A는 (a)의 비월파 조건에 비해 상부측 파압이 높게 계측이 되었으며, 그 이유는 Lee et al, (2019)의 수리모형실험 분석과 유사하며 “완전 피복되어 있는 TTP를 통과한 파랑이 쇄파되며 복합적인 파랑에너지가 직립벽에 도달하여 그로 인해 한 지점에 위치한 파압계에 쇄파된 파랑 에너지가 전달된 것으로 판단하고 있다.” Fig. 5는 Ursell number ( $H_i L^2/h^3$ )의 변화에 따른 파압의 변화를 보이고 있으며, 종축은  $P^* = P/\rho g H_i$ 를 나타낸다.  $P^*$ 는 8개의 파압계에 계측된 동일 지점의 계측된 파압  $P$ 를  $\rho g H_i$ 로 무차원한 값의 합이며, ●는 Type-A, ■는 Type-B, ▲는 Type-C에 대한 실험결과를 의미하고 있다. 또한 그래프의 경향선은 실험값을 피팅한 선으로서 소파블록의 이탈이 많이 발생한 Type-C에서부터 Type-B, Type-A의 순으로 직립벽에 작용하는 파압이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 소파블록 상부측의 테트라포드가 하부 쪽으로 이동함에 따라 노출된 직립벽 상부의 파압계에 충격파압이 작용하여  $P^*$ 의 상승을 초래한 것으로, 처오름( $n^*$ ) 높이의 분석에서 논의된 것과 같이 소파블록의 이탈로 파랑의 제어능력이 감소된 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

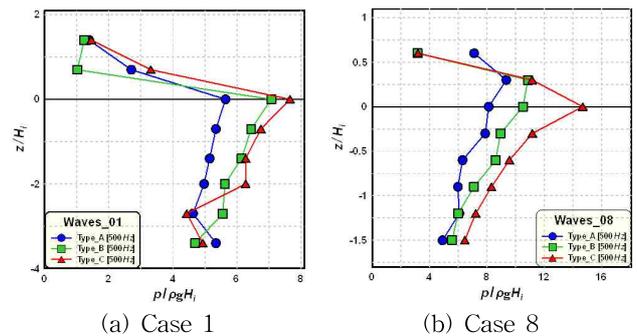


Fig. 4 Dimensionless wave pressure



Fig. 5 Wave pressure analysis graph measured in the experiment

Table 3은 500Hz로 측정한  $P^*$ 의 정략적인 수치를 나타내고 있으며, 동일 파랑조건에서 Type-A를 기준으로 Type-B는 약 108 ~ 144%, 평균 120%의 상승률을 보였으며, Type-C는 약 107 ~ 161%, 평균 129%의 높은 상승률을 보였다. 그리고 Type-B 및 Type-C의 경우, 소파블록 상부측 TTP가 이탈되어 외해측 하부에 배치되어 하부측의 블록 폭이 넓어졌음에도 불구하고 Type-A에 비해 정수면 아래의 블록 폭이 넓어진 부분의 직립벽 파압계에 작용하는 파압이 전반적으로 상승하는 결과를 보였다. 이에 대해서는 현재 보유하고 실험자료 및 결과로는 분석이 힘들며 추후 더욱 많은 수리모형실험자료의 확보를 통한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

Table 3 Wave pressure sum analysis of 500Hz measured wave pressure

Wave	Type (B) $P^*$	Type (C) $P^*$	Type (D) $P^*$	(B) Compared to (A) [%]	(C) Compared to (A) [%]
1	35.16	35.77	41.05	108	117
2	32.34	37.39	41.26	116	128
3	48.00	59.01	64.51	123	134
4	48.55	63.16	66.40	130	137
5	50.96	64.29	81.79	126	161
6	41.81	45.45	44.65	109	107
7	37.76	42.84	44.55	113	118
8	55.72	69.00	71.76	124	129
9	56.89	67.05	72.77	118	128
10	55.75	80.15	72.48	144	130
avg	46.29	56.41	60.12	120	129

### 3.3 변환 파력

취득한 파압데이터를 이용하여 변환 파력을 산정하여 검토하였다. 구조물의 한 지점에 미치는 파압이 아닌 구조물에 작용하는 파력을 분석하기 위해 Paolo(2013)의 수리모형실험을 참고하였으며 사다리꼴 적분(식1)을 사용하였다. 여기서,  $x_j$  : length coordinate,  $p(x_j)$  : recorded pressure,  $A_j$  : area obtained by numerical integration,  $n$  : number of numerical integration points를 의미한다. 그리고 Fig. 7은 Ursell number ( $H_s L^2/h^3$ )의 증가에 따른 변환 파력의 변화를 나타내고 있는 그림으로서, ●는 Type-A, ■는 Type-B, ▲는 Type-C에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 또한 그림 안의 경향선은 실험값을 피팅한 선으로서, Type-A의 경향선은 다소 완만한 형태를 보이지만 Type-B와 Type-C의 경향은 Ursell number ( $H_s L^2/h^3$ )가 증가함에 따라 변환 파력이 급격하게 상승함을 확인할 수 있다. 이상과 같이, 케이슨 전면 상부에 피복된 소파블록인 TTP의 이탈에 따른 단면 및 체적의 변화로 인해 구조물에 미치는 변환 파력은 TTP의 이탈이 없는 경우에 비해

크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 변환 파력의 정략적인 결과를 수치로 보이고 있으며, 이로부터 동일한 입사파 조건에서 Type-A을 기준으로 Type-B는 106 ~ 155%, 평균 124% 상승률을 보이며 Type-C는 107 ~ 171%, 평균 133% 상승률을 보였다.

이상과 같이 설계 시의 소파블록 Type-A 단면(이탈 없음)와 소파블록이 이탈한 경우의 Type-B, C 단면에 대하여 10조건의 입사파랑을 적용하여, 즉 총 30 Cases의 실험조건을 설정하여 케이슨에 작용하는 파압의 변화에 대한 수리모형실험을 수행한 후, 처오름 높이, 파압의 연직분포 및 변환 파력을 대상으로 비교·분석하였다. 그 결과, 소파제 상부의 블록 이탈이 케이슨 직립벽에 작용하는 파압 및 파력에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 이에 대한 대책이 시급할 것으로 판단된다.

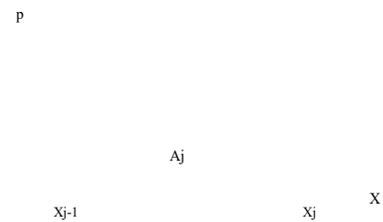


Fig. 6 Trapezoidal integration concept diagram

$$F = \sum_{j=0}^n (x_j - x_{j-1}) (p(x_j) + p(x_{j-1})) / 2 \quad (1)$$

$$A_j = \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x) dx \approx (x_j - x_{j-1}) \frac{p(x_j) + p(x_{j-1}))}{2} \quad (2)$$

$$F = \int_0^\infty p(x) dx \quad (3)$$

$$F = \sum_{j=0}^n (x_j - x_{j-1}) \frac{p(x_j) + p(x_{j-1}))}{2} \quad (4)$$



Fig. 7 Analysis graph of conversion wave force

Table 4 Conversion wave force analysis of 500Hz measured wave pressure

$\frac{H_i L^2}{h^3}$	Type-A force (N/m)	Type-B force (N/m)	Type-C force (N/m)	(B) Compar ed to (A) [%]	(C) Compar ed to (A) [%]
12.30	131.17	141.40	153.49	108	117
14.56	141.03	165.04	181.48	117	129
24.25	379.38	470.19	537.16	124	142
31.31	420.29	558.09	602.98	133	143
33.59	468.18	609.96	801.16	130	171
15.90	143.09	151.93	152.58	106	107
18.55	152.21	173.84	179.43	114	118
31.07	433.85	558.70	583.61	129	135
34.68	488.28	593.64	630.48	122	129
44.17	511.71	790.97	730.70	155	143
avg	326.92	421.38	455.31	124	133

#### 4. 결 론

본 연구에서는 규칙파랑의 내습에 따른 피복 케이슨의 테트라포드 이탈에 의한 단면변화가 직립벽 파압 및 변환 파력에 미치는 영향에 대한 분석이 목적이며 2차원 수리모형실험 결과를 바탕으로 검토하였다. 입사파랑 10조건 비교·분석에는 기준인 Type-A(소파제 완전피복)단면을 통해 Type-B, C(소파제 불완전 피복)단면의 처오름( $n^*$ ),  $P^*$ , 변환 파력의 정량적 결과들은 아래와 같다.

(1) 처오름의 높이는 Ursell number의 10조건에 대해 평균하여 비교하며 Type-A를 기준으로 Type-B는 약 131 % 상승하며, Type-C는 약 162 % 상승하였다.

(2)  $P^*$ 는 Ursell number의 10조건과 비교하여 평균 Type-A를 기준으로 Type-B는 약 120 % 상승하며, Type-C는 약 129 % 상승하였다.

(3) 변환 파력 분석 시 Type-B, C에 작용한 변환 파력은 Type-A를 기준으로 상승하였으며 Type-B는 124 % 상승하며, Type-C는 133 % 상승하였다.

위와 같은 실험 결과 분석에 근거하여 피복 케이슨의 TTP의 단면, 체적의 이동 및 변화는 낮은 Ursell number에서 작용하는 파압에 많은 차이를 보이지 않았지만, 높은 Ursell number에서는 내습한 높은 파랑에너지가 천단 TTP의 하부쪽 이동으로 노출된 상부 직립벽에 상이한 파압이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과를 종합하면 실제 설계 및 시공이 완료된 피복 혼성제에서도 소파블록에 의해 피복된 단면에 이탈 및 침하 등의 문제가 발생하게 될 가능성까지 대비한 다양한 설계 파압 조건도 고려되어야 할 것으로 판단된다. 따라서, 향후 해당 연구를 바탕으로 실제 해역에서 혼성제에 작용하는 불규칙파랑 제원과 다양한 단면 및 소파블록의 제원으로 2·3차원적인 추가 검토를 수행할 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00256687, 순환적응형 연안침식 관리기술 개발).

#### References

- [1] Goda, Y.(1974), "New Wave Pressure Formulae for Composite Breakwaters", In Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, 24-28 June, pp. 1702-1720.
- [2] Kang, Y. G.(2019), "Connotative sense of design standard and our future tasks.2" Korea Ports and harbours, Vol 149, pp. 63-72.
- [3] Lee, G. S., Oh, S. H. and Yoon, S. B.(2019), "Evaluation of Empirical Porous-Media Parameters for Numerical Simulation of Wave Pressure on Caisson Breakwater Armored with Tetrapods", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 31, No. 6, pp. 344-350.
- [4] Lee, J. I. and Bae, I. R.(2015), "Empirical Formula for Wave Runup of Rubble-Mound Structure Covered by Tetrapods 1:1.5 Slope Condition", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 35, No. 4, pp. 845-852.
- [5] Oh, S. H. and Lee, J. S.(2020), "Experimental investigation of horizontal wave pressure on the caisson protected by armor blocks on the rubble-mounted core", Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 8, No. 9, p. 691.
- [6] Paolo, M.(2013), "Experimental investigation on caisson breakwater sliding", Padua University, Graduate school of civil engineering, Ph.M Dissertation.
- [7] Kubota, S., Yamaoto, M., Matsumoto, A., Hanzawa, M., Araki, S. and Deguchi, I.(2010), "Effects of Deformation of Wave-Dissipating Works on Wave Forces Acting on Caisson Breakwaters", Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2, pp. 866-870.
- [8] Ota, T., Kim, S. Y. and Nakahara, S.(2020), "Increase of acting wave force due to deformation of wave dissipating works and accidental waves and its countermeasure", Japan Society of Civil Engineers, Vol. 76, No. 2, pp. 793-798.
- [9] Takahashi, S., Ohki, Y., Shimosako, K., Isayama, S. and Ishinuki, K.(2000), "Seawall Failures by Typhoon 9918 and Their Reproduction in Wave Flume Experiments", The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan, Vol. 973, pp. 3-50.

- [10] Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S. and Goda, Y.(1976), "An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters", In Proceedings of the 23rd Japanese Conference on Coastal Engineering, pp. 11-16.

---

Received 28 June 2024

Revised 16 July 2024

Accepted 30 July 2024