

소파블록의 안정성 평가에 대한 새로운 실험방법 제안 Proposal of a New Experimental Method for Evaluating the Stability of Armor Blocks

김신용* · 이성대** · 이광호***
 Shinwoong Kim*, Seong-Dae Lee** and Kwang-Ho Lee***

요 지 : 소파블록은 제체의 보호와 파랑에너지 소산을 목적으로 사용되므로 피복된 블록의 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하다. 소파블록의 안정성은 주로 수리모형실험으로부터 산정되는 안정계수를 통해 평가되어 왔다. 본 연구에서는 새로운 형태의 소파블록인 K-블록을 활용하여 블록의 맞물림 효과를 포함한 안정성 평가를 위해 인발력에 기반한 새로운 안정성 실험방법을 제시하였다. 소파블록의 인발 실험은 일정 경사면 소파블록을 설치하고 수직 및 수평 방향으로 인장력을 작용시켜 사면 상의 피복층으로부터 블록이 분리되는데 필요한 힘을 직접 계측하는 방법이다. 제안된 실험방법은 소파블록의 맞물림 효과를 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였으며, 맞물림 영향에 의한 단층 피복블록(K-블록)의 높은 안정성을 검증하였다.

핵심용어 : 소파블록, 안정계수, K-블록, 인발력, 맞물림 효과

Abstract : The armor blocks are used to protect the body of the structure and dissipate wave energies, so it is crucial to evaluate the stability of the armor unit. The stability of armor blocks has been mainly evaluated through empirical coefficients called the stability coefficient obtained from hydraulic model experiments. In this study, a new type of single-layered armor block called K-Block was proposed, and a new experimental method based on the pull-out force was proposed to evaluate the stability of the armor unit, including the interlocking effects. The pull-out force test proposed in this study directly measures the force required to separate the armor unit from the armored layer on the slope by applying a tensile force in the vertical and horizontal directions to the installed armor unit. The proposed experimental method confirmed that the interlocking effects of the armor block could be quantitatively evaluated, and the high stability of the K-Block was verified.

Keywords : armor block, stability coefficient, K-Block, pull-out force, interlocking effects

1. 서 론

소파블록은 직립식 방파제의 전면이나 경사제의 사면에 피복되어 입사되는 파랑에너지의 소산과 제체를 보호하는 역할을 수행한다. 우리나라의 경우, 충분한 소요중량을 갖는 자연상태의 원석이 제한되므로 콘크리트로 제작된 인공블록이 주로 이용된다(Min et al., 2015). 기존의 직육면체 형태의 블록을 대신하여 Danel(1953)에 의해 프랑스에서 개발된 테트라포드(Tetrapod)가 소개된 이후에 Xblock(Hakenberg et al., 2004), Dolos(Hans and Liu, 1992), Accropode(Cyril et al., 2004), Tetra-Neo(Mitsui et al., 2018), Sea-Lock(Esteban et al., 2013)과 같은 다양한 형태의 소파블록들이 최근까지도 제안되어 왔다. 특히, 일본은 전체 해안선의 약 50%에 이르

는 길이가 테트라포드와 같은 소파블록으로 피복되어 있다고 보고되고 있을 만큼 소파블록의 활용도가 높으며(Stephen, 2007), 블록의 형상에 따라 입체형, 평판형, 계단형, 적층형, 상자형 등으로 구분되어 다양한 형식의 소파블록이 적극적으로 개발 및 활용되고 있다. 우리나라에서는 방파제나 호안의 소파제 이외에도 연안침식을 제어하기 위한 목적으로 설치되는 잠제나 이안제에 테트라포드(Tetrapod)를 활용하고 있으며, 최근에는 테트라포드의 맞물림(interlocking)과 소파성능이 보 완전 해외특허 블록들의 활용빈도가 점점 증가하고 있는 추세이다.

소파블록의 주요 기능 중의 하나인 제체 보호를 위해서는 소파블록의 안정성 평가가 매우 중요하며(Kim and Lee, 2017), 소파블록의 안정성을 대표하는 지수로 식(1)과 같은

*한라대학교 건설방재공학과 연구교수(Research Professor, Dept. of Civil and Disaster Prevention Eng., Halla University)

**한라대학교 건설방재공학과 교수(Professor, Dept. of Civil and Disaster Prevention Eng., Halla University)

***한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 건설공학전공 부교수(Corresponding author: Kwang Ho Lee, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeondo-gu, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4461, klee@kmou.ac.kr)

Hudson식(Hudson, 1959)에 기초한 안정계수 N_s 가 널리 활용되고 있다(Min et al., 2015).

$$N_s = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (1)$$

여기서, 안정계수 N_s 는 $H(S_r - 1)^{-1} D_n^{-1}$ 로 정의되며 H 는 블록이 설치된 위치에서 진행파의 유의파고, S_r 은 해수에 대한 블록의 비중, D_n 은 블록을 정육면체로 가정한 경우 한 변의 길이(대표직경)로 $D_n = (W/\gamma_r)^{1/3}$ 로 정의되며, W 는 블록의 중량, γ_r 은 블록의 단위중량, K_D 는 블록의 형상이나 쇄파 조건, 피복층 두께, 거치방법 등에 의한 피해율에 의해 결정되는 안정계수, α 는 블록이 거치되는 제체사면의 경사각이다. The Rock Manual(CIRIA, 2007)과 Coastal Engineering Manual(USACE, 2011)에서는 개발된 소파블록에 대한 적정한 안정계수 값을 제공하고 있다. 소파블록에 대한 안정계수가 결정되면 Hudson 식으로부터 안정계수를 이용하여 파랑외력과 사면 경사에 따른 블록의 소요중량을 산정하게 된다. 한편, Hudson 식을 사용한 안정계수의 산정방법은 소파블록의 피해율이 5% 미만일 때 Hudson 식으로부터 산정되는 값이며, 소파블록의 피해는 일반적으로 파고를 단계적으로 증가시켜 가면서 실험을 수행하는 동안 소파블록의 이동이나 회전 혹은 탈락하는 경우로 정의한다. 따라서, 수리모형 실험 관찰자에 의한 주관적인 요소가 개입 될 수 있으며, 내습하는 파랑의 파형경사, 피복된 제체의 투수율, 작용 파수 등에 의한 영향을 반영할 수 없다는 한계점을 지닌다(Lee, 2003).

Hudson 식의 한계를 극복하기 위해 van der Meer(1987)는 경사제 피복석에 대한 수리모형실험을 통해 파형경사와 작용 파수를 고려한 안정계수에 대한 경험식을 제안하였으며, 우리나라의 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2017)에는 초파확률이 2%인 파고 $H_{2\%}$ 를 $1/20$ 최대파고 $H_{1/20}$ 로 치환한 식(2)의 van der Meer 식이 제시되어 있다.

$$N_s = \max(N_{spl}, N_{ssr}) \quad (2)$$

여기서, N_{spl} 과 N_{ssr} 은 각각 권파(plunging breakers)와 쇄기파(surging breakers)에 대한 안정계수로 식(3)과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S^{0.2}/N^{0.1}) I_r^{-0.5} \\ N_{ssr} = C_H P^{-0.13} (S^{0.2}/N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} I_r^P \end{cases} \quad (3)$$

여기서, C_H 는 $1.4H_s/H_{1/20}$ 로 정의되는 쇄파효과계수로 비쇄파 영역에서는 1.0이며, I_r 은 쇄파유사성 매개변수(Iribaren numebr), S 는 변형된 면적과 피복석 직경의 제곱과의 비, N 은 작용하는 파의 수이다. Hudson식과 van der Meer 식에 대한 구체적인 비교는 Lee(2003)의 연구를 참조하기 바란다.

실제 구조물 설계 시에는 안정성을 고려하기 위해 보수적인 관점에서 Hudson 식과 van der Meer 식의 결과 중 큰 소요중량 값을 적용한다. 하지만, 기존의 경험식들은 외력 대비 피해율을 통계적으로 반영하여 제안된 경험식으로 경험식 자체가 갖는 불확실성이 존재하며(Kim and Suh, 2009), 블록 사이의 맞물림 효과를 직접적으로 평가할 수 없다. Lee(2003)는 소파블록에 대한 수리모형실험을 통해 Hudson 식과 van der Meer 식에 의한 안정계수 결과에 상당한 차이가 있음을 확인하였다.

상하 블록의 맞물림을 극대화 하는 단층 블록의 경우에는 블록 이탈 시 지지력 약화로 인해 상대적으로 작은 외력에도 연쇄적인 피해가 발생한다. 이로 인해 단층 블록의 안정계수 산정 시에는 테트라포드나 피복석에 적용되던 피해율 5%의 기준을 동일하게 적용할 수 없고, 중량 산정 시 상대적으로 큰 안정계수를 직접적으로 활용할 수 없다. 따라서, 피복블록의 맞물림 영향을 평가하고 다층 피복블록과 차별성을 이해하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 새로운 형태의 단층 소파블록을 활용하여 제안된 블록의 맞물림 효과를 포함한 안정성을 평가하기 위해 인발력 측정에 기반한 새로운 안정성 평가 실험방법을 제시하고자 한다.

2. 인발 실험

2.1 단층 K-블록

소파블록으로 가장 많이 사용되는 테트라포드는 정사면체의 중앙에서 네 개의 다리가 무게중심으로부터 동일한 120° 의 각도로 하중이 분산되는 방사형 형태를 지니며, 적층방식

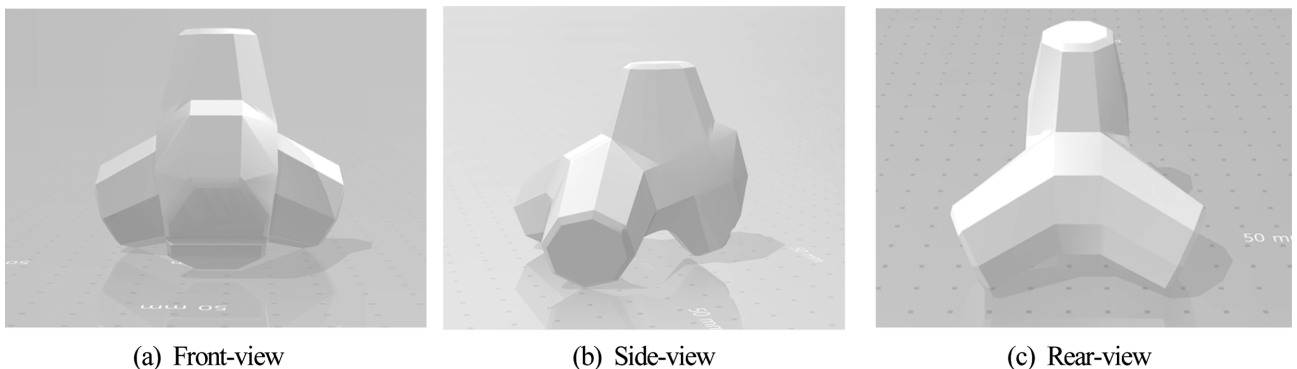


Fig. 1. K-block model diagram.

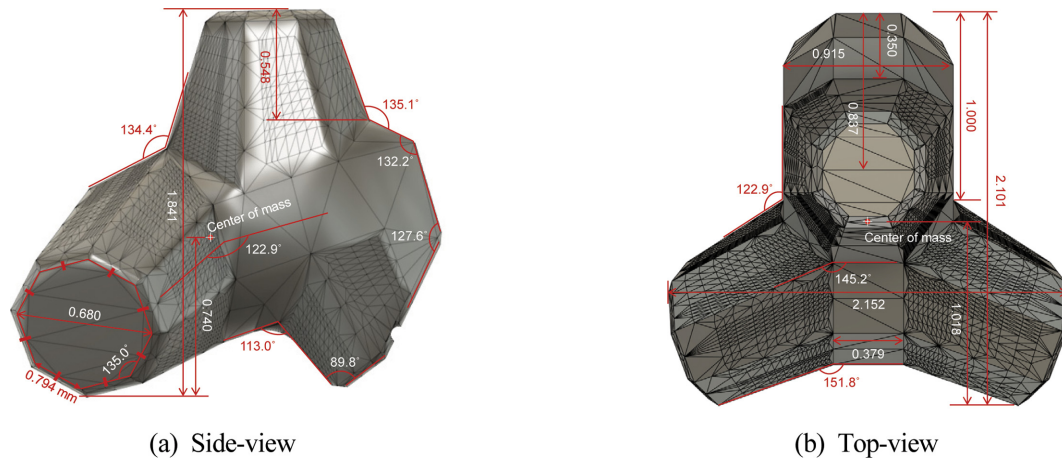


Fig. 2. Dimension of K-block substituted with representative radius.

과 무관하게 네 개의 다리가 인접한 블록과 서로 맞물리도록 되어 있다. 본 연구의 실험에서 활용한 K-블록은 Fig. 1에 보인 바와 같이 후면부 두 개의 다리에 갈고리 형식의 전면부 한 개의 다리가 연결되어 있는 형태를 지닌다. 상부측에는 상대적으로 짧은 길이의 다리가 수직방향으로 부착되어 있으며, 안정성을 높이기 위해 다리를 후면부에 위치 시켰다. 블록의 상부측 다리는 소파블록으로 피복된 경사면의 조도를 증가시켜 내습파랑의 월파 시 파랑에너지 소산을 증대시키는 역할을 한다. 또한, 다열로 설치하여 맞물림을 극대화 시키는 테트라포드와는 달리 K-블록은 상단 블록의 전면 다리를 하단에 위치한 블록의 후면 다리 사이에 거치하여 맞물림 효과를 극대화함과 동시에 단층으로 적층하는 방식을 취한다.

후면부 다리에서 전면부 다리 끝단까지의 길이를 대표반경(r)으로 활용하여 K-블록의 치수를 무차원화 하였고, 블록의 무게중심 위치와 함께 Fig. 2에 제시하였다. 전면부 하단 다리와 상단 다리를 불연속적 디자인하여 블록의 무게 중심을 후면부로 이동시켜 사면 적층 시 안정성을 향상 시켰으며, 이는 기존 단층 블록들과의 차별성을 보인다. 대표반경과 부피의 상관관계는 식(4)와 같다.

$$V = 2.2706 \times r^3 \quad (4)$$

본 연구에서는 대표반경이 3.06 cm인 1/40 축척의 소파블록 모형을 적용하였으며, 전·후면 사이의 최대 길이와 후면 다리의 최대 길이는 각각 6.428 cm와 6.585 cm이다. 실험에 사용된 모형의 중량범위는 110.4~138.1 g으로 중앙값과 평균값은 각각 122.6 g과 124.4 g이고, 인발력 측정을 위해 로드셀과 연결된 블록의 중량은 132.3 g이다.

한편, K-블록의 공극률의 정도 높은 산정을 위해 Autodesk사의 3D CAD/CAM/CAE 소프트웨어인 FUSION 360을 활용하였다. 1/40 축척으로 모델링된 소파블록의 3차원 STL (Standard Tessellation Language) 파일을 활용하여 1:4/3 사면에 피복한 후, 피복된 소파블록 사면의 부피와 블록의 부피를 계산하여 공극율을 산정하였다. K-블록으로 피복된 사

면의 공극률은 0.4925이다.

2.2 실험방법 및 실험안

소파블록의 맞물림 영향을 평가하기 위한 인발 실험은 소파블록이 사면에서 분리되는 힘을 직접 측정하는 방법으로 설계하였다. 일정 경사면(1:4/3)에 K-블록을 설치하고 수직 및 수평 방향으로 인장력을 작용시켜 사면 상의 피복층으로부터 블록이 분리되는데 필요한 힘을 직접 측정하는 방법이다. 이와 같은 인발 실험 장치 및 모식도를 Fig. 3에 제시하였다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 프로파일을 활용하여 1:4/3의 사면 구조물을 제작한 후, 경사면에 길이 90 cm의 합판을 설치하였다. 사면의 수평방향(y축) 길이는 70 cm이다. 인발되는 블록은 직경 0.147 mm의 폴리에틸렌(PE) 합사로 모터와 연결하였다. 합사는 비신장성 재질로 최대 6.8 kg의 인장강도를 갖는다. 모터와 블록 사이에는 로드셀(모델명: SSAB-S 10 kg)을 연결하여 인장력을 측정하였다. 측정결과는 인디케이터(모델명: CTI 2100)와 연결하여 목측하는 동시에 아두이노와 RS232 인터페이스를 통해 PC와 연결하였고, 매 초당 30회 데이터를 수집하도록 하였다. 로드셀의 최소 인장력 분해능은 0.01 kg이다. 실험에 사용된 모터(모델명 KGC-KD3427T2)는 DC 모터로 24 V, 7500 rpm 제품을 활용하였고, 1:150 기어박스에 연결하여 감속하였다. 최대정격 부하시의 회전수는 43 rpm이며, 정격토크는 3.5 kg/cm이다. 인발 실험 시, 모터는 아두이노(Aduino Uno)의 5.0 V 출력 단자와 연결하였으며, 합사는 모터의 샤프트와 직접연결 하였다. 샤프트 직경은 6 mm로 1회전 당 약 18.8 mm의 변위를 만들고, 인장력 실험에서는 수직/수평 방향으로 초당 2.8 mm 블록을 이동시킨다. 또한, 모터는 사면 구조물과는 별개로 가이드 구조물을 제작하여 설치하였다.

피복블록의 인발시 합사와 모터의 샤프트, 블록의 무게중심 간의 수직/수평을 유지시키는 것이 중요하다. 본 실험에서는 블록에 연결된 합사의 위치나 힘이 작용하는 위치를 정량적으로 제시할 수 없지만, Fig. 2에 제시한 무게중심 정보에

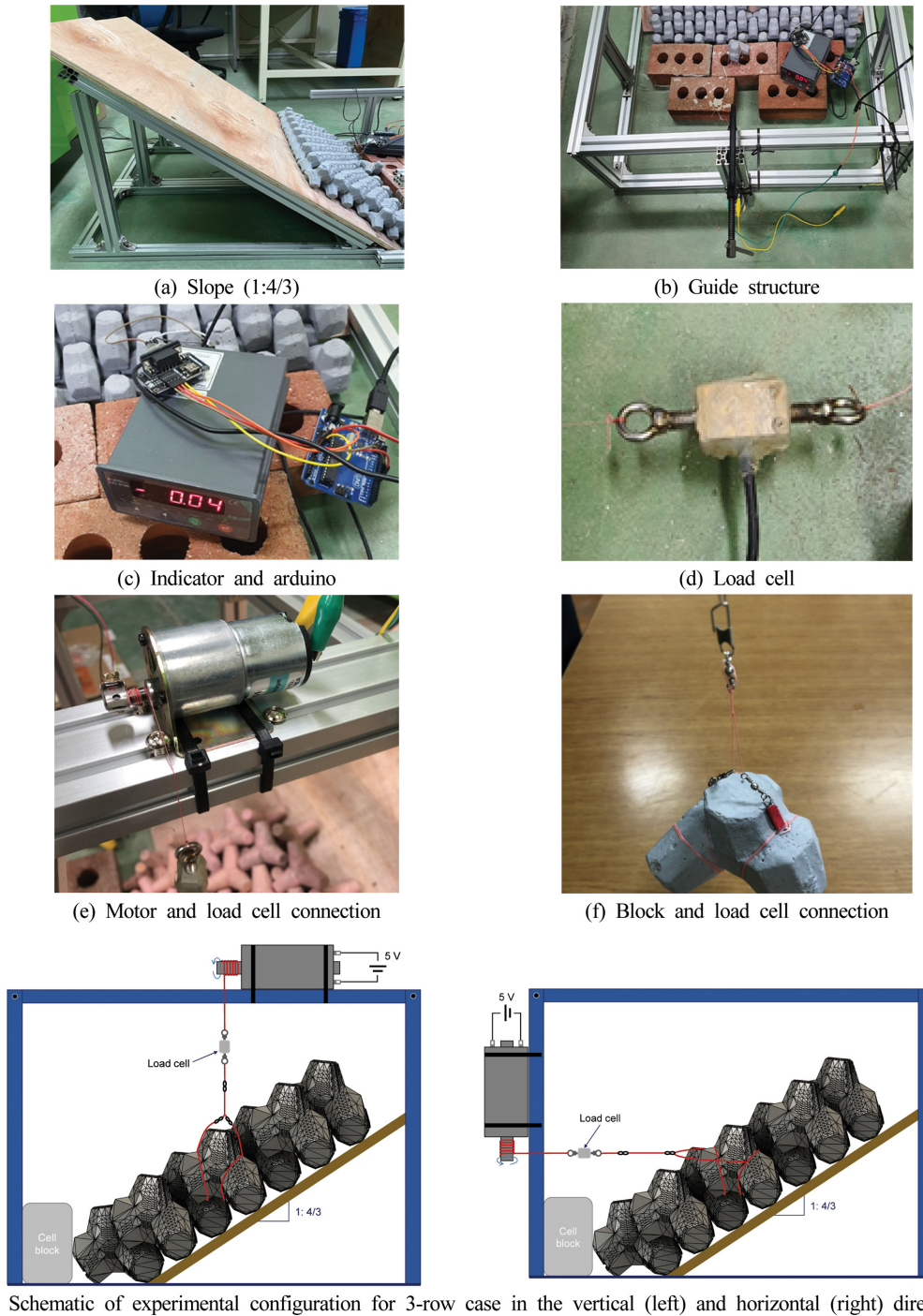


Fig. 3. Tensile force experimental equipment and components.

기초하여 인발력이 블록의 무게중심에 수직/평행하게 작용하도록 설정하였다. 수직 인발 시에는 블록의 좌우 대칭되는 중앙부에 고리를 연결하고 전/후면 고리의 사이는 합사로 연결하였다(Fig. 3(f) 참조). 수평 인발 시에는 뒷다리와 전면 몸체가 만나는 양측면 부분에 설치하여 합사를 고정시켰다. 이후 인발 시, 블록-로드셀-모터 간에 연결된 합사가 수직/수평이 되도록 모터가 설치된 가이드 구조의 위치를 조절하여 실험 장치를 구성하였다.

인발 실험은 로드셀과 연결된 블록의 경사면 상부로 배열

개수를 1열에서 7열로 증가 시키며 수행하였고, 수직방향과 수평방향으로의 인발력을 비교 및 검토하였다. 여기서, 적층수는 인발되는 블록을 기준으로 하면 상부로 수직 위치가 높이가 변화하는 블록 배열의 수로 구분하여 표기하였다. Fig. 4에 제시된 실험안은 중앙부 비어있는 공간의 인발되는 블록을 기준으로 상부 7열이 적층된 경우이다. 모든 실험안에서 인발되는 피복 블록의 위치는 동일하고, 근고블록 이후 4번째 열, 수평 방향 중앙에 위치한 블록을 인발하는 실험을 수행하였다. 블록 설치 시 소파블록 사이에 이격이 발생하는 경



Fig. 4. Stacking of armor blocks in the 7-row experimental test in horizontal direction (after the experiment).

우에는 맞물림의 영향이 급격히 감소될 수 있으므로 실험 케이스 별로 블록을 다시 설치하며 인발 실험을 수행하였다. 실험의 신뢰도와 재현성 확보를 위해 각각의 실험을 7회 반복하여 수행하였다. 경사면에 피복된 소파블록에 대한 실험 전경을 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4에서와 같이 경사면 최하단 부의 전면에는 근고블록을 설치하여 인발 실험 시 경사면 하부로 블록이동이 발생하지 않도록 하였다.

3. 실험 결과

3.1 K-블록에 작용하는 힘

소파블록에 작용하는 모든 힘은 직육면체로 간략화된 블록의 도심에 작용하고, 블록의 거동 과정에서는 모멘트가 발생하지 않는다고 가정하였다. Fig. 5는 이와 같은 가정에 기초하여 경사사면 상에 피복된 소파블록에 작용하는 힘을 도식화한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 블록에 작용하는 힘은 블록의 자중 W , 상부 블록의 하중 F_B , 실험 장치에 의한 강제 인발력 F_L 로 구성된다. 단, 근고블록에 의해 경사면의 하부 수평방향으로의 거동은 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

수직 인발력 발생 시, 경사면의 상부 수평방향인 x' 방향으로 블록이 움직이기 시작하는 이동한계 조건은 다음과 같다.

$$F_{Lx'} - F_{Bx'} - W_{x'} > f_{frs} \quad (5)$$

여기서, f_{frs} 는 최대 정지 마찰력이다. 식(5)에 사면의 경사각 θ 를 고려하면 x' 방향에 대한 블록의 이동한계 조건은 식(6)와 같다.

$$F_L > F_B + W + \frac{f_{frs}}{\sin \theta} \quad (6)$$

또한, 식(6)와 유사하게 수직 인발력 발생 시 경사면의 수직 방향인 y' 방향으로 블록이 이동하기 시작하는 조건은 다음과 같다.

$$F_L > F_B + W \quad (7)$$

경사면에서 상부 수평방향으로 피복된 블록이 거동하기 위해서는 경사면 수직 방향에 필요한 힘보다 최대 정지마찰력 만큼의 외력이 더 필요하다. 따라서 수직 인발 시 블록은 수직 방향으로만 탈락한다. 수평 인발력 발생 시, 근고블록에 의해 경사면의 상부 수평방향으로는 블록이 움직이지 못하며, 사면의 수직방향으로 블록이 움직이는 조건은 다음과 같다.

$$F_L > \tan^{-1} \theta (F_B + W) = 1.33(F_B + W) \quad (8)$$

수평방향으로 소파블록의 인발 시 필요한 외력(식(7))은 수직 인발력(식(8)) 대비 1.33배 크게 나타났으며, 피복된 블록은 사면의 수직방향으로 탈락한다.

3.2 인발력에 대한 실험결과

상부 피복층의 배열 수 변화에 따른 수직 및 수평 방향의 인발 실험결과를 Fig. 6에 제시하였다. 실험명에서 V와 H는 각각 수직 및 수평 방향의 인발 실험을 의미하며, 숫자는 인발되는 블록 상부에 적층된 블록의 배열 수를 나타낸다. 케이스 별로 반복된 실험 결과를 검정색 표식으로 제시하였고, 반복된 실험 결과의 평균값을 빨간색 표식으로 제시하였다. Fig. 6으로부터 확인되는 바와 같이 배열 수가 증가함에 따

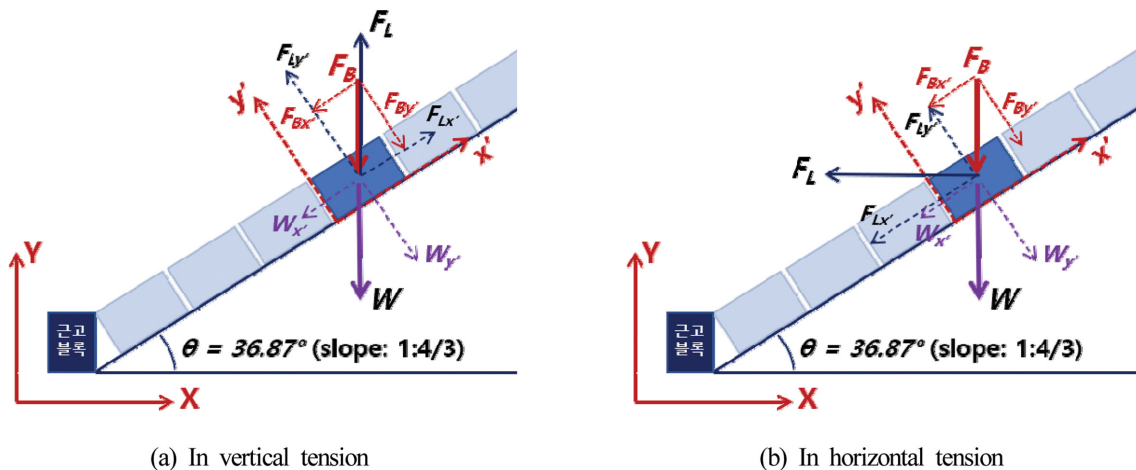


Fig. 5. Force acting on the armor block on the slope.

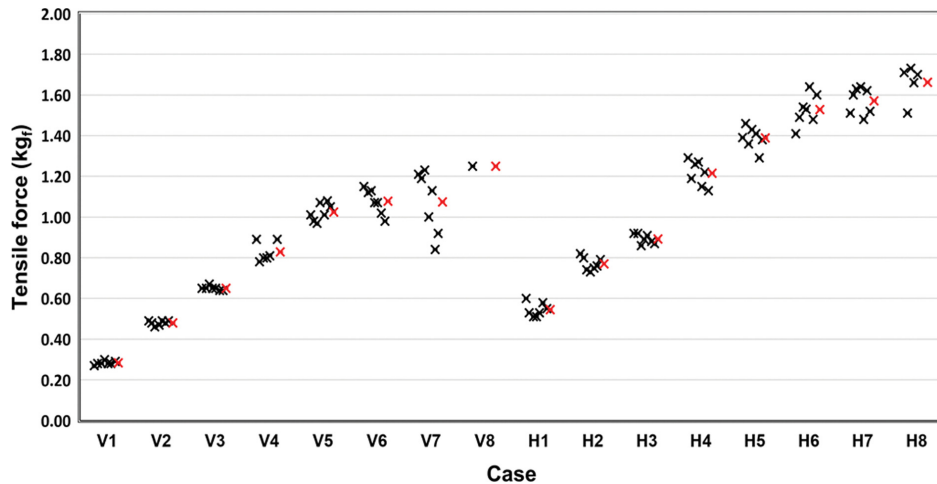


Fig. 6. Results of horizontal and vertical tensile force by number of stacked floors (red symbols: average value of repeated experiments).

라 인발력은 선형적으로 증가하며 수직 실험의 경우 5층 이후, 수평 실험은 6층 이후 인발력의 증가폭이 점차 감소함을 확인할 수 있다. 1열 배열에 대한 수직 인발력의 7회 평균값은 0.28 kg_f 로 피복블록 중량 0.13 kg_f 의 2.15배이고, 7열 배열에 대한 수직 인발력의 평균값은 1.07 kg_f 로 인발되는 블록 중량의 8.29배로 나타났다.

테트라포드와의 차이를 비교하기 위해 0.11 kg_f 의 테트라포드를 동일한 사면에 Güre et al.(2005)이 제시한 G-T-A 피복 방법으로 2단 적층하고 상단과 하단의 피복석에 대한 수직방향의 인발실험을 추가적으로 수행하였다. 테트라포드 피복 전경을 Fig. 7에 제시하였다. 상단 피복석 실험의 인발력 결과는 0.15 kg_f 로 중량 대비 1.36배로 관측 되었고, 상부의 배열 수와 관계없이 대부분의 위치에서 유사한 결과가 나타났다. 블록간의 맞물림 영향이 작은 상부 블록에서는 피복 방법에 따른 인발력 차이가 크지 않을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 K-블록의 경우 맞물림 증가로 인하여 기존 테트라포드 대비 위치에 따라 최소 50%, 최대 500% 이상 큰 인발력에도 안정함을 의미한다. 2단으로

적층된 테트라포드 피복블록 중 하단에 위치하고 상부에 5열 배열된 경우의 수직 인발력을 2회 측정하였고, 인발력 결과는 $1.15, 1.22 \text{ kg}_f$ 로 관측 되었다. 이는 단층 블록이 2단 블록 중 하단에 위치한 테트라포드 만큼의 높은 안정성을 지닌다는 점을 보여준다.

동일한 배열의 수직 인발력 대비 수평 인발력 비는 1열과 2열 배열 시에 각각 1.92와 1.60으로 가장 크게 나타난다. 이는 상부 배열 수가 작은 경우 피복블록의 맞물림의 영향을 충분히 발휘하지 못하지만, 수평 인발력의 경우에는 근고블록의 지지력이 충분히 나타나기 때문이다. 3층 이후 수직 대비 수평 인발력 비는 1.33~1.47로 균일하게 나타난다. 인발력이 식(8)에 제시된 계산결과보다 다소 크게 나타나는 이유는 실제의 피복블록의 움직임은 고려하는 경우 블록의 맞물림에 의한 외력이 구조물 도심에 작용하지 않으며 이로 인해 발행하는 모멘트 영향을 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

수직 7열(Case V7) 결과의 경우, 타 실험안 대비 분산도가 크게 나타난다. 해당 실험안의 인발력 최대치와 최소치의 편차는 0.39 kg_f 로 최소 인발력의 46.4%에 해당한다. 이러한 현상의 원인은 블록 적층 시 블록간의 미세한 유격에 의해 발생한다. 실제 해상에서 피복블록 설치 작업은 정밀하게 이루어지지 못하므로, 단층 피복블록을 적용하는 경우에는 블록의 안정성이 보수적으로 평가되어야 한다.

각 적층 수별 대표안 결과에 대한 인발력 시계열을 Fig. 8에 제시하였다. 수평 인발의 경우에는 최대값이 초기 기울기가 끝나는 변곡점 인근에서 관측되며, 수직 인발의 결과는 인발력이 오랜 기간 지속되며 상대적으로 늦게 최대값이 관측된다. 이는 Fig. 9에 제시된 실험 장면과 같이 블록의 형태에 기인한 것으로 판단된다. 수직 인발의 경우에는 깔고리 형태의 전면부 다리에 의해 상부 블록들의 하중을 지속적으로 받으며 후면부 다리가 상부 블록에서 빠져나가지 전까지 인발력이 지속된다. 이에 반해 수평 인발은 후면부 다리가 상하부의 블록들을 밀어내며 빠져나오는 형태로 블록 배치의 변

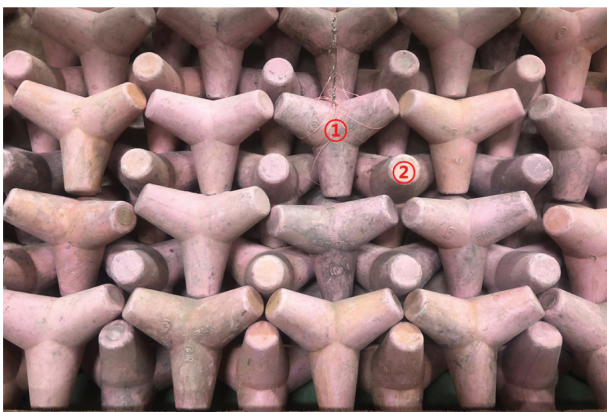
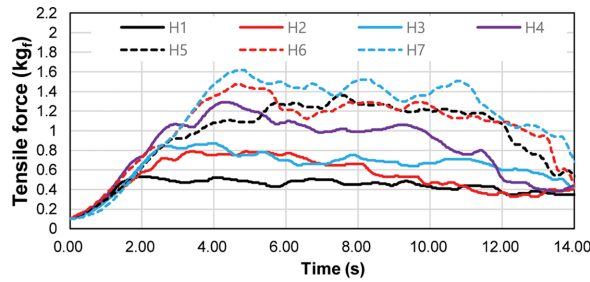
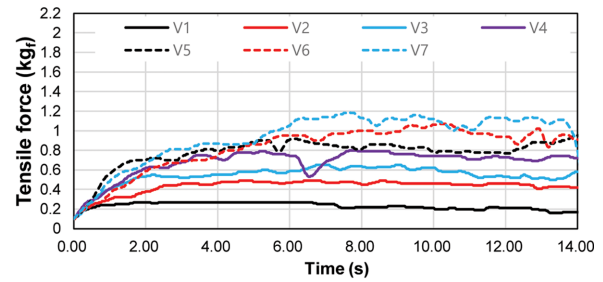


Fig. 7. Front view of tetrapod experiment for vertical tension (①: upper draw target block; ②: lower draw target block).



(a) Horizontal tension results



(b) Vertical tension results

Fig. 8. Time-series of horizontal and vertical tensile force by number of stacked floors.



(a) Horizontal tension results



(b) Vertical tension results

Fig. 9. Shifting of the block placement during the drawing process.

화가 발생하였다.

4. 결론 및 고찰

본 실험에서는 소파블록의 인발 실험을 통해 단층 블록(K-블록)의 높은 안정성을 검증하였다. 본 연구의 실험 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

K-블록은 블록 사이의 맞물림으로 인해 높은 안정성을 보였다. 여기서 언급한 맞물림이란 상호 마찰에 의해 탈락을 완화시키는 것이 아니라 경사면 위쪽의 블록이 하부 블록을 직접적으로 눌러주어 대상 블록의 하중이 증가함을 의미한다. 테트라포드가 난적 되는 경우에도 상부 적층된 피복석이 유사한 효과를 낼 수 있지만 정적으로 적층하는 경우에는 이러한 영향은 나타나지 않는다.

상층 블록이 하층 블록을 누르는 형식으로 적층되는 단층 블록은 높은 안정성을 갖지만 상부에 배열된 수에 따라 인발력이 상이하게 나타났다. 따라서 기존의 안정계수를 산정하는 과정에서 반영할 수 없는 블록 위치에 따른 수위 변화나 쇄파 위치에 따른 영향을 충분히 고려해야 한다.

이와 동일한 이유로 단층 블록 사면에 소단이 있는 경우에

는 단층 블록의 맞물림 효과를 충분히 이끌어 내기 어렵기 때문에 높은 안정성을 기대할 수 없다.

단층 블록의 경우 블록간의 작은 이격으로 맞물림 효과가 급격하게 작아 질 수 있다(Case V7 참조). 피복블록의 탈락은 블록간의 이격보다 월등한 성능 저하를 만들어 내며, 이에 대한 보수가 어렵다. 따라서 활용 시에는 보다 보수적으로 적용 되어야 한다.

실제 경사면에 피복된 소파블록의 탈락은 인발 실험과 같이 특정 외력에 발생하기보다 반복적인 외력의 작용으로 블록 간의 이격이 발생하고 이로 인해 맞물림 혹은 마찰력의 영향이 감소된 이후 발생한다. 또한 사면을 합판이 아닌 중각 피복석으로 재현하는 경우에는 거치상태의 변화로 인해 블록 간 이격 발생할 수 있다. 이러한 실험적 한계점에도 불구하고 인발실험 결과는 상부에 거치된 블록들이 인발되는 블록을 눌러주는 효과로 인해 적층된 배열 수에 따라 인발력 변화가 발생함을 정량적으로 보였다. 추후 중간 피복석의 영향이나 블록 간 이격, 사면 경사변화 영향을 평가할 수 있도록 인발 실험을 보완하여 최초 블록의 움직임이 발생하는데 필요한 외력을 산정함으로써 인발력과 안정계수와의 관계를 검토하고자 하며, 블록 거동을 포함한 3차원 CFD 모델의 적용

방안을 검토하고자 한다. 아울러, 본 연구에서 제안한 인발 실험은 포화상태에서 동일하게 적용될 수 있으므로 소파블록의 맞물림 효과를 포함한 안정성 평가에 유용한 방법이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 「해외우수과학자유치사업」의 지원을 받아 수행되었음(2019H1D3A1A01103001)

References

- CIRIA. (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering(2nd edition), Ch. 3, C683, CIRIA, London.
- Cyril, G., Nicolas, G. and Sebastien, L. (2004). Single-layer breakwater armouring: Feedback ACCROPODE™ Technology from site experience. Internatationl Conference on Coastal Engineering, Lisbon, Portugal, September. 19-24, 2004.
- Danel, P. (1953). TETRAPODS. Coastal Engineering Proceedings, 1(4), 28.
- Esteban, M., Thao, N.D., Takagi, H. and Jayaratne, R. (2013). Stability of Breakwaters Against Tsunami Attack. Handbook of Coastal Disaster Mitigation for Engineers and Planners, 293-322, Elsevier.
- Gürer, S., Cevik, E., Yüksel, Y. and Günbak, A.R. (2005). Stability of Tetrapod breakwaters for different placing methods. Journal of Coastal Research, 21(3), 464-471.
- Hakenberg, R., Von-Rovers, I., Reeduk, B. and Muttray, M. (2004). Structural Integrity of XBLOCK Breakwater Armour Units Prototype and Numerical Drop Tests. Internatationl Conference on Coastal Engineering, Lisbon, Portugal, September. 19-24, 2004.
- Hans, F.B. and Liu, Z. (1992). Design of Dolos Armour Units. 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, October 4-9, 1992.
- Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.
- Kim, S.W. and Suh, K.D. (2009). Evaluation of partial safety factors of Hudson formula for Tetrapod armor units constructed in Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 21(5), 345-356.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic Experiments on Stable Armor Weight and Covering Range of Round Head of Rubble-Mound Breakwater Armored with Tetrapods: Non-breaking conditions. J. of Korean Soc. of Coast. and Ocean Eng., 29(6), 389-398.
- Lee, J.-I. (2003). Hydraulic model test for armor stability of rubble-mound breakwaters. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 15(4), 249-258.
- Min, E.-J., Cheon, S.-H. and Suh, K.-D. (2015). Comparison of stability coefficients of radial shape armor blocks depending on placement methods. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(2), 135-141.
- Ministry of Oceans and Fisheries. (2017). The Guideline of Design for Harbor and Fishing Port. Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- Mitsui, J., Kubota, S. and Matsumoto, A. (2018). Stability Estimation Method for Armor Units for Breakwaters with Parapets against Tsunami Overflow. International Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea, June. 15-20, 2014.
- Stephen, S. (2007). "TETRAPODS". The Japan Times Online. ISSN 0447-5763.
- U.S. Army Corps of Engineers (2011). Coastal Engineering Manual-Part VI. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- van der Meer, J.W. (1987). Stability of breakwater armor layers design formulae. Coastal Engineering, 11, 219-239.

Received 28 May, 2021

1st Revised 11 June, 2021

2nd Revised 21 June, 2021

Accepted 21 June, 2021