

## 사용된 소파블록의 안전성 검토를 위한 시공단계별 충돌해석

허택녕<sup>1\*</sup>, 최창호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 토목환경화공융합공학부, <sup>2</sup>경남도청 행정국 인사과

### Impact Analyses for the Safety Checks of Used Wave Dissipation Concrete Block Considering Construction Phases

Taik-Nyung Huh<sup>1\*</sup>, Chang-Ho Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University

<sup>2</sup>Department of Human Resources, Administration Bureau, Provincial Government of Gyeongnam

**요약** 우리나라는 지정학적 요인으로 인해 항만수요가 증가하고, 자연재난의 강도 또한 날이 증대되고 있기 때문에 사용 중인 항만의 확장 및 증설 계획에 맞추어 이미 사용한 소파블록을 재활용할 필요성이 날로 증가하고 있다. 하지만 소파블록의 재활용을 위한 평가시스템 및 기준이 현재 마련되어 있지 않아 기술자의 경험에 의존하여 재활용 및 폐기여부를 판단하고 있기 때문에 자원의 재활용이라는 경제적인 측면에서 이는 매우 비합리적이다. 이에 본 연구에서는 소파블록의 안전성을 평가하기 위해 지상에 놓인 소파블록은 육안으로, 수중에 놓인 소파블록은 잠수에 의한 외관조사를 수행하였고, 소파블록 20개에 대하여 반발경도를 측정하고, 3개소의 콘크리트 코어를 채취한 후, 이를 기초로 소파블록의 재료적 평가를 수행하였다. 또한 사용된 소파블록은 시공단계에 따라 이동과 거치하는 과정에서 부분적으로 혹은 완전히 파손되어 본래의 기능이 상실되는 경우가 종종 발생한다. 따라서 사용된 소파블록의 안정적인 재사용 여부를 검토하기 위해 범용 유한요소 프로그램인 ADINA를 이용하여 소파블록을 3차원 유한요소로 모형화하고, 소파블록의 이동, 거치 및 시공단계에 따른 충돌해석을 수행하였다. 마지막으로 재료적 평가결과를 이용하여 수행된 시공과정이 고려된 충돌해석결과로부터 소파블록의 재활용 여부를 검토할 수 있는 합리적인 평가과정과 시공방법을 각각 제안하였다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가방법으로 소파블록을 평가하여 재활용하면 경제비용적 관점에서 소파블록의 재사용을 극대화할 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract** Many harbor structures have been constructed, and some structures are now under construction in Korea, which is a peninsular state and a logistics hub in Northeast Asia. Expansions and extensions of existing harbors are also being planned to meet increasing natural disaster threats. Wave-dissipation concrete blocks are recycled or discarded based on the personal experience of engineers only, and there are no safety checks or criteria. To check the safety of used blocks, material evaluations were done by visual inspection of blocks on the ground and under water and from 20 non-destructive measurements of the rebound hardness test and 3 concrete core samples. Wave-dissipation blocks are sometimes fully or partially damaged in the process of transferring and mounting them or during construction. Therefore, a safety check is essential for recycling blocks with an evaluation of materials while considering the construction phases. To do this, a block was modeled with a 3D finite element method using ADINA, and impact analyses were done according to the transfer, mounting, and construction phases. From the results of the impact analyses and material evaluation, the safety checks and reasonable evaluation of used blocks were examined, and detailed construction methods are proposed. The methods are expected to maximize the reuse of used wave-dissipation blocks from an economical point of view.

**Keywords** : Construction Phase, Impact Analysis, Safety Check, 3D Finite Element, Used-Armour Block

본 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

\*Corresponding Author : Taik-Nyung Huh(Changwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3773 email : tnhuh@changwon.ac.kr

Received August 30, 2018

Revised (1st September 17, 2018, 2nd September 20, 2018, 3rd October 1, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

## 1. 서론

지정학적으로 동북아시아의 요충지에 위치한 반도국가인 우리나라는 전세계적인 물류가 활발하게 이동하는 물류의 중심으로 떠오르면서 항만에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 부응하기 위하여 많은 항만들이 건설되었고 현재에도 향후 늘어날 물류와 점점 증가하는 자연재난에 대응하기 위하여 건설중이거나 계획중에 있다. 특히, 기존에 사용중인 항만을 확장 혹은 증설하게 되면, 사용된 소파블록을 이동하여 재사용하는 경우가 많이 발생한다. 따라서 필연적으로 기존 방파제에서 사용하고 있는 소파블록의 재활용은 공사비를 절약하고 자원의 재활용이라는 측면에서 안전성 검토가 반드시 요구되지만, 이에 대한 구체적인 평가방법이나 기준은 거의 없는 실정이다[1].

사용된 콘크리트 소파블록의 건전성을 평가하려면, 먼저 소파블록의 외관조사와 더불어 본래의 기능을 검토하는 재료적 평가가 먼저 수행되어야 한다. 또한, 사용된 콘크리트 소파블록의 재활용계획에 따라 이동, 거치 혹은 시공단계에서 예상되는 현장조건을 고려한 구조해석을 수행한 후, 그 결과를 외관적 또는 강도평가에 따른 결과와 비교분석하여 재활용 여부를 검토하는 과정은 필수적이다. 사용된 소파블록은 시공방법에 따라 이동과 거치과정에서 항상 소파블록사이에 또는 소파블록과 지면사이에 충돌이 일어나기 때문에 이와 같은 시공조건을 보다 정확하게 고려하여 소파블록의 안전성을 평가하려면 충돌해석이 적극 요망된다.

따라서 본 논문에서는 소파블록의 재활용 시공계획에 따라 30톤급 소파블록의 이동방법에 대한 구조해석과 거치에 따른 사용된 소파블록의 시공단계별 충돌해석을 수행하여 기존 소파블록의 안전성과 시공방법을 검토하여 제안할 것이다.

## 2. 충돌문제의 유한요소해석

충돌이란 서로 다른 두 개의 물체가 같이 이동하거나 정지에 있는 물체에 다른 물체가 서로 충돌하는 과정에서 발생하며, 이와 같이 충돌하는 물체사이의 상호작용에 따라 각각의 물체에는 충돌력이 발생하여 상호작용하게 된다. 이와 같은 상호작용 (contact-impact

interaction)은 서로 이동하는 차량과 차량, 이동하는 차량과 교각, 이동하는 선박과 교각, 이동하는 선박과 충돌방호공 등과 같은 역학계에서 주로 발생한다[2-4].

서로 충돌하는 물체가 정적으로 평형상태를 유지하면 정적충돌(static contact-impact)이며, 평형상태를 유지하지 못하고 이동하고 있으면 동적충돌(dynamic contact-impact)이라 한다. 동적충돌은 정적충돌에 비하여 상대적으로 수식화하기 어려운 복합현상을 가지고 있으며, 동적효과를 해석에 고려하게 되면 동적충돌문제가 된다. 공학적으로 대부분의 충돌과정은 동적충돌문제가지만 수학적으로 해를 구하기가 매우 어렵고 많은 오차를 가지고 있으므로 단순화시켜 정적충돌문제로 가정하여 해를 구한다. 또한 충돌문제에서는 기본적으로 충돌경계면에서 마찰이 존재하지만 상대적으로 영향력이 작기 때문에 문제를 간략히 하기 위하여 해석에서는 생략되는 경우가 많다.

비용적인 측면에서 실험에 한계가 있기 때문에 충돌문제의 역학적 거동을 파악하기 위해 가장 널리 사용되는 수치방법은 유한요소법이다. 수학적인 어려움 때문에 매우 제한적인 충돌문제인 경우에만 거동을 파악할 수 있는 고전적인 충돌해석방법에 비하여 유한요소법은 상대적으로 충돌 구조물의 다양한 형상, 변형 및 재료적 특성을 고려할 수 있고, 최종적으로 도출된 수치방정식의 근사해를 통하여 충돌 구조물의 거동을 예측할 수 있으므로 현재에는 많은 분야에서 활용되고 있다.

단순한 직사각형의 탄성충돌체에 작용되는 하중과 경계조건을 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 보인 바와 같이 직사각형은  $x_1$ ,  $x_2$  및  $x_3$  좌표로 정의되었고, 충돌물체 내부에서 발생하는 변형은 작용하는 하중과 경계조건하에서 미소변형으로 가정하였다.

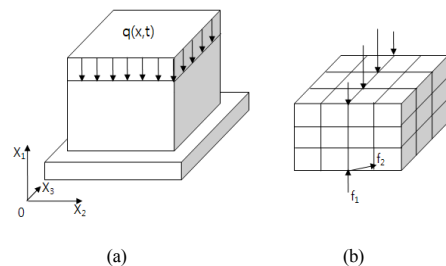


Fig. 1. Collision of simple elastic body  
(a) Load and boundary condition  
(b) Finite element model

임의 시간  $t$ 에서 충돌체의 위치벡터를  $x$ , 변위 벡터와 가속도 벡터를  $u(x,t)$  와  $a(x,t)$ 로 각각 정의하면, 미소변형이론에 기초한 충돌물체의 운동방정식은 다음과 같다[5-8].

$$\frac{\partial \sigma_{ij}(x,t)}{\partial x_j} + b_i(x,t) = \rho a_i(x,t) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{ij}(x,t)$ 는 Cauchy의 응력,  $b_i(x,t)$ 는 물체력 벡터  $b(x,t)$ 의  $i$ 번째 성분,  $\rho$ 는 질량밀도,  $a_i(x,t)$ 는  $i$ 번째 가속도 성분을 각각 의미한다.

탄성체인 경우, 응력-변형을 곡선은 서로 비례하고 직선이며 일반적인 Hooke의 법칙을 따른다.

$$\sigma_{ij}(x,t) = c_{ijkl} e_{kl}(x,t) \quad k, l = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서,  $c_{ijkl}$ 은 충돌체의 재료특성,  $e_{kl}$ 은 변형을 성분이며, 다음과 같은 변위와의 관계식을 갖는다.

$$e_{kl}(x,t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_k(x,t)}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l(x,t)}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

영역  $\Omega$ 의 경계조건  $\Gamma$ 는 다음과 같이 변위, 트렉션 및 충돌경계를 갖는다.

$$\Gamma = \Gamma_d + \Gamma_f + \Gamma_c \quad (4)$$

여기서,  $\Gamma_d$ 는 초기변위를 갖는 경계영역,  $\Gamma_f$ 는 초기 트렉션을 갖는 경계,  $\Gamma_c$ 는 충돌이 일어나는 충돌경계를 각각 의미하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_i(x,t) = \bar{u}_i(x,t) \quad x \in \Gamma_d \quad (5)$$

$$\sigma_{ij}(x,t) N_j = \bar{q}_i(x,t) \quad x \in \Gamma_f \quad (6)$$

여기서,  $\bar{u}_i(x,t)$ 와  $\bar{q}_i(x,t)$ 는 각각 기지의 변위벡터와 트렉션 벡터이며,  $N_j$ 는 경계  $\Gamma_f$ 에서 외부로 향하는 단위벡터를 의미한다.

변위장  $u(x,t)$ 을 만족하는 초기조건은

$$u(x,0) = \bar{u}(x) \quad x \in \Omega \quad (7)$$

$$v(x,0) = \bar{v}(x) \quad x \in \Omega \quad (8)$$

이며,  $\bar{u}(x)$ 와  $\bar{v}(x)$ 는 초기시간의 지지값을 각각 의미한다.

충돌경계에서 연직충돌응력은 반드시 압축력으로 작용하고 충돌경계는 물체내부로 관통은 하지 못하는 것으로 가정하면, 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$g(x,t) = g(x) - u(x,t) \cdot N \geq 0 \quad x \in \Gamma_c \quad (9)$$

$$q_1(x,t) = q_c(x,t) \cdot N \leq 0 \quad x \in \Gamma_c \quad (10)$$

여기서,  $g(x,t)$ 는 충돌면과 지반사이의 이격거리,  $g(x)$ 는  $g(x,t)$ 의 초기 설정값이며,  $q_c(x,t)$ 는 충돌면의 트렉션 벡터,  $q_1(x,t)$ 는 충돌경계면에서 외부로 향하는  $q_c(x,t)$ 의 연직성분을 각각 얻는다. 여기서  $g(x,t)$ 와  $q_1(x,t)$ 는 어느 하나는 0을 충족시켜야 하기 때문에 이를 적용하면 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$q(x,t) q_1(x,t) = 0 \quad (11)$$

두 물체의 충돌 경계면에서 Coulomb의 마찰을 고려하면, 충돌 경계면에서 발생하는 트렉션의 접선방향성분  $q_1(x,t)$ 은 다음과 같다.

$$q_t(x,t) \leq \nu q_1(x,t) \quad x \in \Gamma_c \quad (12)$$

충돌경계에서 발생하는 접선방향 속도  $v_t(x,t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$v_t(x,t) = 0 \quad \text{if } q_1(x,t) < \nu q_1(x,t) \quad x \in \Gamma_c \quad (13)$$

$$v_t(x,t) = -\lambda q_t(x,t) \quad \text{if } q_1(x,t) = \nu q_1(x,t) \quad x \in \Gamma_c \quad (14)$$

여기서,  $\nu$ 는 마찰계수이고  $\lambda$ 는 (+)값을 갖는 스칼라 상수이다.

$$q_t(x,t) = q_c(x,t) - q_1(x,t) N \quad (15)$$

전술한 식(9)부터 식(15)는 일반 역학문제에서는 없고 충돌문제를 고려하는 경우 얻을 수 있는 조건식들이다.

### 2.1 정적충돌

마찰이 없는 충돌면에서 탄성체의 정적평형 방정식을 세우면, 충돌면의 마찰력과 탄성체의 가속도는 각각 0이 된다. 또한, 경계조건의 기지변위를 모두 0으로 가정하면, 식(1)의 운동방정식과 식(4)의 경계조건식은 다음과 같이 간략하게 정식화할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (16)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad x \in \Gamma_d \quad (17)$$

$$\sigma_{ij} N_j = \bar{q}_i \quad x \in \Gamma_f \quad (18)$$

$$g = g_o - u \cdot N \geq 0 \quad \text{on } \Gamma_c \quad (19)$$

$$q_1 = q_c \cdot N \leq 0 \quad \text{on } \Gamma_c \quad (20)$$

$$q_1 g = 0 \quad \text{on } \Gamma_c \quad (21)$$

따라서, 정적충돌의 해는 식(16)~식(21)을 충족시켜 주는 변위벡터  $u$ 를 구할 수 있도록 단순화되었다. 충돌 탄성체에서 허용이 가능한 변위벡터를  $V$ 라 가정하고, 모든 수학적 연산이 충분히 수행될 수 있는  $V$ 의 벡터로  $v$ 를 가정하면, 충돌면에서의 경계조건은 다음을 만족해야 한다.

$$g = g_o - v \cdot N \geq 0 \quad \text{on } \Gamma_c \quad (22)$$

변위벡터  $u$ 를 정적 충돌문제의 해로,  $u$ 에 의한 실제응력은  $\sigma(u)$ 로, 변분이 가능한 가상변위의 변분은  $\delta u = v - u$ 로, 가상변위변분  $\delta u$ 에 의한 가상변형을 변분은  $\delta e$ 로 각각 정의하여 가상일의 원리로부터 다음과 같은 식이 얻어진다. 여기서, 충돌 경계면의 트랙션은 실제 충돌경계  $\Gamma_c$ 에서만 존재하는 값이다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta e_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} \bar{b}_i \delta u_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} \bar{q}_i \delta u_i dS - \int_{\Gamma_c} q_1 \delta u_1 dS = 0 \quad (23)$$

여기서, 첨자  $i, j$ 는 1, 2, 3이고  $\delta u_1$ 은 허용가능한 충돌 경계면  $\Gamma_c$ 에서 연직방향으로 향하는 가상변위벡터를 의

미한다. 따라서, 정적충돌문제는 식(23)과 경계조건을 만족시키는 변위벡터  $u$ 와 충돌 경계면에서 발생하는 트랙션 벡터  $q$ 를 얻을 수 있다.

### 2.2 동적충돌

외연적 시간적분법(explicit time integration)을 필요로 하는 동적 충돌문제는 식(23)에 관성력으로부터 발생하는 가상일을 추가함으로써 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta e_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} \rho a_i \delta u_i - \int_{\Omega} \bar{b}_i \delta u_i d\Omega - \int_{\Gamma_f} \bar{q}_i \delta u_i dS - \int_{\Gamma_c} q_1 \delta u_1 dS = 0 \quad (24)$$

식(24)의 수치적분식을 구하려면, 영역  $\Omega$ 는 유한요소로 정의된 부영역을 구분하고, 각각의 부영역내에서 정적의 수치적분식을 구한 후, 구한 수치적분을 조합하여 전체 해를 구한다.

만약 충돌이 발생하지 않으면( $q_1 = 0$ ), 식(24)은 일반적인 동적평형방정식과 동일한 형태로 표현된다.

$$MA + KU = F \quad (25)$$

식(25)에 표시된  $M$ 은 질량행렬,  $K$ 는 강성도행렬,  $U$ 는 변위벡터,  $A$ 는 가속도벡터이고  $F$ 는 외부하중벡터를 각각 의미한다. 만약 충돌  $q_1$ 이 일어나면, 절점  $m$ 의 형상함수(shape function)로부터  $q_1^m$ 와 같은 절점력이 계산되어 식(25)에 추가된다. 이때, 1차의 미지수를 갖는  $q_1^m$ 는 궁극적으로 하중벡터  $F_c$ 로 표시된다.

$$MA + KU = F + F_c \quad (26)$$

식(26)는 충돌절점의 구속조건을 만족시켜야 한다.

$$QU + G = 0 \quad (27)$$

여기서,  $G$ 는 충돌 절점사이의 이격거리,  $Q$ 는 유한요소 이산화에 따른 벡터행렬을 각각 의미한다.

식(27)의 수치해를 구하기 위하여 최종해가 얻어지기 전까지 미지수로 남아있는 충돌 절점수를 가장 먼저 결정해야 한다. 따라서 일시적으로 발생하는 충돌절점을 반복적으로 가정하고 허용된 오차내에서 실제 충돌절점

을 찾아내는 동시에 충돌조건을 만족시켜줌으로써 충돌력을 구할 수 있다. 또한 식(27)에서 미지수인 변위와 가속도 값을 구하려면 수치시간적분이 도움이 필요하다.

### 3. 소파블록의 충돌해석

본 장에서는 사용된 소파블록의 재활용 평가를 위해 범용 유한요소 프로그램인 ADINA를 이용하여 소파블록을 3차원 유한요소로 모형화하고, 소파블록의 이동, 거치 및 시공단계에 따른 충돌해석을 수행하였다. 또한, 사용된 소파블록의 안전성 평가를 위하여 수중조사를 통한 외관평가와 함께 콘크리트의 강도평가를 수행하였다.

#### 3.1 소파블록의 외관조사 및 강도평가

사용된 소파블록의 외관조사는 지상과 수중에 있는 소파블록에 대하여 각각 수행하였다. Fig. 2와 Fig. 3에는 대표적인 소파블록의 외관상태를 나타낸다.



Fig. 2. Partial damage of concrete block on the ground

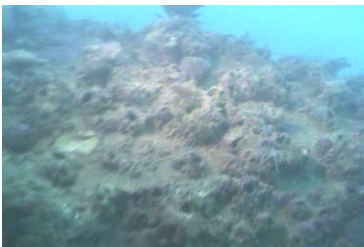


Fig. 3. Surface condition of concrete block under water

그림에서 보는 바와 같이 지상에 노출된 일부의 소파블록은 파력 혹은 거치시 발생하는 외적인 영향에 의하여 부분적인 파손이 발생되어 있었으며, 수중에 있는 소파블록은 표면에 많은 이물질이 부착되어 있지만 지상에 거치된 소파블록에 비하여 상대적으로 파손은 적게 발생

되어 있음을 알 수 있었다. 또한 사용된 소파블록에서 발생된 균열은 제작과정에서 발생하는 수화열과 거푸집 조기제거와 같은 과정에서 발생된 표면균열이 대부분인 것으로 판단되었다.

사용된 소파블록의 재료적 특성을 평가할 수 있는 가장 기본적인 방법은 콘크리트 압축강도를 측정하는 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에는 반발경도측정과 콘크리트 코어 채취 과정을 각각 나타낸다.



Fig. 4. Rebound hardness test



Fig. 5. Extraction of concrete core sample

그림에서 보인 바와 같이 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 20개의 소파블록에 대한 반발경도측정과 3개의 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도를 측정하고, 산출된 평균 허용휨강도의 분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였다. 여기서 허용휨강도는 콘크리트의 압축강도  $f_{ck}$ 를 사용하여 콘크리트 표준시방서에서 제시된  $2.0\sqrt{f_{ck}}$ 로부터 산출하였다.

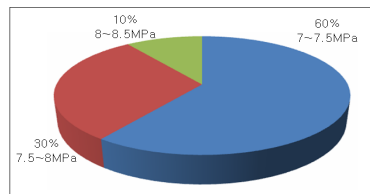


Fig. 6. Tensile strength distribution(weight : 12.5ton)

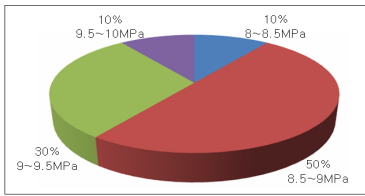


Fig. 7. Tensile strength distribution(weight : 32ton)

그림에서 보인 강도분포로부터 산출한 평균 허용휨강도는 12.5톤급 소파블록은 7.46MPa, 32톤급 소파블록은 9.01MPa인 것으로 추정하였다.

### 3.2 소파블록의 이동에 따른 안전성 검토

사용된 소파블록을 재활용하려면 반드시 새로운 위치로의 이동이 필요하며, 이동하는 방법으로는 케이블이 많이 사용되기 때문에 이동 중에 소파블록의 안전성 검토가 요망된다. 따라서 본 절에서는 총무게 32톤급 소파블록인 테트라포드의 이동에 따른 정적 구조해석을 수행한다. 소파블록의 이동방식은 중장비에 케이블 2개와 3개가 연결되어 사용하는 것으로 가정하였고, 해석에는 소파블록의 자중만을 고려하였으며, 케이블과 소파블록이 만나는 지점에 경계조건을 부여하였다. Fig. 8에는 4절점을 갖는 3차원 유한요소를 사용하여 모형화된 소파블록을, Fig. 9와 Fig. 10에는 케이블 2개 및 3개를 사용하여 이동할 때 소파블록내부에 발생하는 최대인장 응력 분포를 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 케이블과 소파블록이 만나는 점인 경계조건에서 응력집중이 발생함을 알 수 있다.

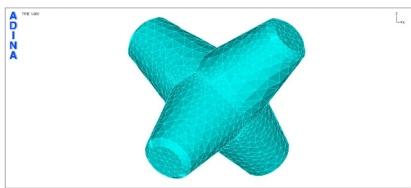


Fig. 8. 3D Finite element model

### 3.3 소파블록의 거치에 따른 안전성 검토

사용된 소파블록을 이동하여 새로운 위치에 안전하게 거치하려면, 실제 현장에서 이용되고 있는 공법의 자세한 공정과정을 숙지해야 보다 정확한 충돌해석을 수행할 수 있다. 현장에서는 주로 소파블록을 중장비를 이용하여 이동하고 거치한다.

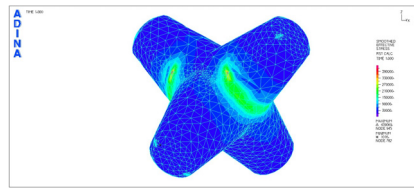


Fig. 9. Stress distribution with 2 cables

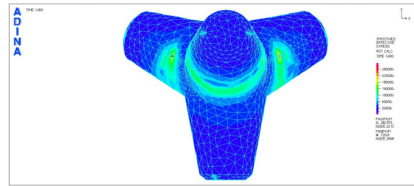


Fig. 10. Stress distribution with 3 cables

여기서 소파블록의 안전성에 가장 영향을 미치는 것은 중장비의 거치속도와 낙하높이이며, 주로 중장비 사용자의 특성에 따라 다르다. 이와 같은 개인적 특성이 해석에 미치는 영향을 최소화하기 위해 낙하높이는 최대 10cm로, 거치속도는 자유낙하로 가정함으로써 안전측이 되도록 충돌조건을 결정하였다. 전술한 조건은 실제 현장에서 발생할 수 있는 소파블록의 거치시 발생할 수 있는 불확실성을 제거하여 준다. 본 절에서는 전술한 거치조건과 기존의 소파블록이 거치되어 있는 현장조건을 고려하여 평면과 사면에 각각 1층과 2층으로 거치되는 경우에 대하여 충돌해석을 수행하였다.

#### 3.3.1 평면거치

소파블록을 평면에 거치하는 경우에 대한 충돌해석을 수행한 후, 소파블록 내에 발생하는 최대응력을 Fig. 11, Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 하중으로는 소파블록의 자중만을 고려하였고, 거치조건으로 세 개의 빨 (pod)이 지면에 동시 충돌하는 경우, 한 빨이 먼저 충돌하고 뒤에 두 빨이 동시 충돌하는 경우, 두 빨이 먼저 동시충돌하고 뒤에 한 빨이 충돌하는 경우에 대하여 각각 충돌해석을 수행하였다.

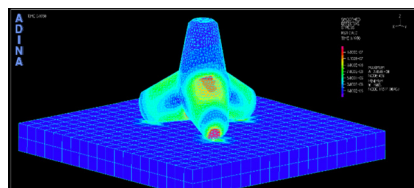


Fig. 11. Stress distribution in collision of three pod

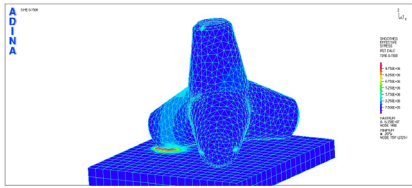


Fig. 12. Stress distribution in collision of one pod first

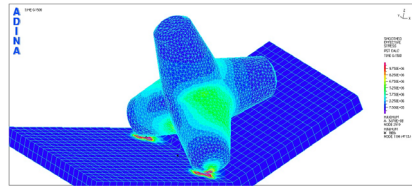


Fig. 15. two pods first on the inclined plane

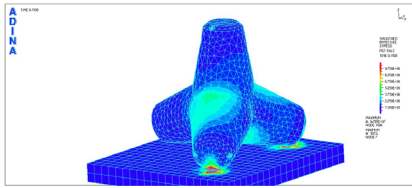


Fig. 13. Stress distribution in collision of two pods first

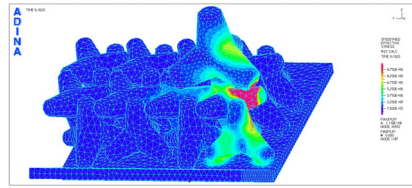


Fig. 16. one layer on the inclined plane

### 3.3.2 사면거치

본 절에서는 소파블록을 경사면에 거치하는 경우에 대한 충돌해석을 수행한 후, 소파블록내에 발생하는 최대응력을 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 나타내었다. 거치조건으로 한 뿔이 먼저 동시충돌하고 뒤에 두 뿔이 충돌하는 경우와 두 뿔이 먼저 동시충돌하고 뒤에 한 뿔이 충돌하는 경우에 대하여 각각 충돌해석을 수행하였다. 또한, 하중조건, 낙하조건 및 시공조건은 평면거치와 동일하게 가정하였고, 방파제의 평면과 사면을 모형화하여 충돌이 지반에 미치는 상호작용을 해석에 고려할 수 있도록 하였다.

### 3.4 시공단계에 따른 안전성 검토

본 절에서는 기존의 12.5톤급 소파블록위에 32톤급 소파블록이 추가로 거치되는 시공방법에 따른 충돌해석을 수행하였다. Fig. 16에는 12.5톤급 소파블록위에 32톤급 소파블록이 1층으로 거치되는 경우, 소파블록에 발생하는 최대 인장응력분포를, Fig. 17에는 12.5톤급 소파블록위에 32톤급 소파블록이 2층으로 거치되는 경우, 소파블록에 발생하는 최대 인장응력분포를 각각 나타내었다.

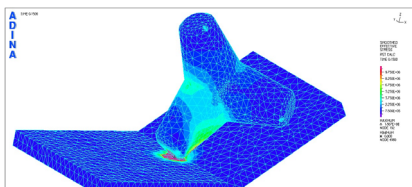


Fig. 14. one pod first on the inclined plane

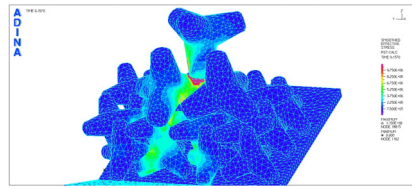


Fig. 17. two layer on the inclined plane

### 3.5 소파블록의 안전성 평가

본 절에서 수행된 소파블록의 재료적 평가를 이용하여 다양한 현장조건이 고려된 충돌해석으로부터 소파블록에 발생하는 최대 인장응력을 산출하고 Table 1에 도시하였다.

Table 2. Maxim tensile stresses in block (unit : MPa)

Max. stresses in transfer		Max. stresses in mounting		Max. stresses in construction phase		Allow. tensile strength
2 cables	3 cables	flat plane	inclined plane	one layer	two layers	
0.44	0.28	6.76	7.25	7.56	8.11	9.01

Table 1.에서 보는 바와 같이 시공단계에 따른 이동과 거치시 발생하는 소파블록내의 최대인장응력은 소파블록의 콘크리트 허용 휨인장강도보다 작게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 수행된 충돌해석 결과로부터 얻은 조건에 따라 소파블록을 이동, 거치 및 시공하면 소파블록의 안전성은 확보할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 범용 유한요소 프로그램인 ADINA를 사용하여 30톤급 소파블록의 이동, 거치 및 시공단계에 따른 충돌해석을 수행하고 얻은 충돌해석 결과와 소파블록의 콘크리트 강도를 서로 비교분석하여 소파블록의 안전성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 유도하였다.

- (1) 사용된 콘크리트 소파블록의 이동시 3줄을 사용하여 이동하고, 낙하높이 10cm이내에서 자유낙하로 거치하게 되면, 현장에서 발생할 수 있는 공법에 대한 불확실성의 영향이 최소화될 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 소파블록을 경사면에 거치하면 평면에 거치하는 것에 비하여 최대인장응력이 상대적으로 7.2%, 2층으로 거치하면 1층 거치에 비하여 최대인장응력이 상대적으로 7.3% 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 콘크리트 소파블록의 시공단계별 충돌해석결과를 기준으로 제시한 평가시스템은 사용된 소파블록의 재활용 평가기준을 정립하는데 적용할 수 있음을 보였다. 따라서 경제비용적 관점에서 사용된 소파블록의 재활용을 극대화 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] C. H. Choi, Impact Analyses Considering Construction Sequences for the recycling of Used-Armour Concrete Block, pp.1-3, Changwon National University, 2009.
- [2] G. H. Lee, "A Study on Behaviors of Pile Protective Structures by Simplified Collision Model", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.36, No.1, pp.31-32, 2016.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.1.0031>
- [3] W. S. Kim, K. Kim, J. Lee, "A Comparison Study Direct Impact Analysis of Vehicle to Concrete Pier and In-Direct Impact Analysis using Load-Time History Functions", *Journal of the Computational Structure Engineering Institute of Korea*, Vol.27, No.6, pp.533-534, 2014.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2014.27.6.533>
- [4] C. H. Kim, Safety Evaluation of the Caisson Structures by Barge Collision, p.13, Changwon National University, 2009.

- [5] P. S. Bulson, "Structures under Shock and Impact", pp.289-300, *Proceedings of the first International Conference*, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [6] G. J. Huh, "Transverse Impact Analysis between Sphere and Plate", *Journal of Research institute of Industrial Technology*, Vol.56, pp.331-338, Busan National University-ISSN:1225-8849, 1999.
- [7] S. L. Lee, G. H. Lee, W. S. Lee, "Estimation of Ship Collision Energy on the Bridge", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.5A, pp.951-960, 2004.
- [8] E. K. Cho, K. O. Ko, J. S. Kim, "Ship-to-Bridge Structure Collision analysis", *The Magazine of Korean Society of Steel Construction*, Vol.16, No.3, pp.56-65, 2004.

#### 허택녕(Taik-Nyung Huh)

[정회원]



- 1987년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 1996년 8월 : 현대건설 기술연구소 과장
- 1996년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야>

유체-구조물 상호작용, 구조해석, 구조물 안전진단

#### 최창호(Chang-Ho Choi)

[정회원]



- 2009년 8월 : 창원대학교 산업대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 ~ 현재 : 경남도청 공무원(사무관)

<관심분야>

시공관리, 현장관리, 공정관리