

중공트랙단면 에코필라 사방댐의 비선형 충돌해석

김현기¹, 김범준^{2*}

¹가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과, ²건국대학교 사회환경플랜트공학과

Nonlinear Impact Analysis for Eco-Pillar Debris Barrier with Hollow Cross-Section

Hyun-Gi Kim¹, Bum-Joon Kim^{2*}

¹Department of Energy Plant Engineering, Catholic Kwandong University

²Department of Civil and Environmental Plant Engineering, Konkuk University

요약 본 연구는 친환경 에코필라 사방댐의 시공성과 경제성을 향상시키기 위해 제안된 중공트랙형 단면의 프리캐스트 에코필라 사방댐에 대하여 산사태 발생시 토석류에 동반되는 암석이 충돌할 경우 구조체의 안전성과 손상도를 평가하기 위해 비선형 충돌해석을 수행하였다. 최근에는 콘크리트를 이용한 에코필라 사방댐의 설치가 늘고 있으나, 콘크리트 투과형 사방댐 설계의 기준이 전무하여 경험적으로 설계되고 있을 뿐 아니라 산사태로 인한 피해가 지속적으로 늘고 있는 상황임에도 불구하고 극한환경을 적용한 성능평가나 연구를 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 통해 적정성과 성능에 대해 검증된 중공트랙형 단면의 에코필라 사방댐에 대하여 급경사지에서 발생한 우면산 산사태의 토석류 속도로 암석이 충돌할 경우로 가정하였다. 암석의 규모는 ETAG 27의 성능평가 기준을 참조하여 유사한 규모로 설정하였고, 최대 충격력이 작용할 수 있는 조건과 작용위치, 암석직경을 변수로 고려하였으며, 콘크리트 비선형 재료모델을 적용하였다. 재료 비선형해석이 가능한 ABAQUS 소프트웨어를 이용하여 해석적 방법으로 구조체의 강도와 손상도 평가를 수행하였다. 해석결과, 암석직경 0.3m와 0.5m가 충돌했을 경우는 구조체의 변위나 응력이 허용치 이내로 안전한 것으로 평가 되었으나, 0.7m 직경의 암석이 충돌할 경우 중공트랙형 기둥부가 에너지를 충분히 흡수하지 못하여 파괴되는 것으로 예측되었다. 또한, 콘크리트 손상도 평가결과 암석직경 0.3m와 0.5m에서는 손상비가 1.0이하로 나타났으나 0.7m 직경일 경우는 1.39로 평가되어 일정수준 이상에서는 사방댐 기능수행 적합성이 제고되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 사방댐 단면설계 시 고려해야 할 충격력에 대한 기초자료로 활용할 수 있으며, 향후 실험적 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, a nonlinear impact analysis was performed to evaluate the safety and damage of an eco-pillar debris barrier with a hollow cross-section, which was proposed to improve constructability and economic efficiency. The construction of concrete eco-pillar debris barriers has increased recently. However, there are no design standards concerning debris barriers in Korea, and it is difficult to find a study on performance evaluations in extreme environments. Thus, an analysis of an eco-pillar debris barrier was done using the rock impact speed, which was estimated from the debris flow velocity. The diameters of rocks were determined by ETAG 27. The impact position, angles, and rock diameter were considered as variables. A concrete nonlinear material model was applied, and the estimation of damage was done by ABAQUS software. As a result, the damage ratio was found to be less than 1.0 at rock diameters of 0.3 m and 0.5 m, but it was 1.39 when the diameter was 0.7 m. This study could be used as basic data on impact force in the design of the cross section of an eco-pillar debris barrier.

Keywords : Impact Analysis, Debris Flow, Eco-Pillar, Hollow Cross-Section, Damage Ratio

*Corresponding Author : Bum-Joon Kim(Konkuk Univ.)

email: undertakerii@naver.com

Received May 27, 2019

Revised June 19, 2019

Accepted July 5, 2019

Published July 31, 2019

1. 서론

산지의 급경사가 많고 유로가 짧은 우리나라의 산악지형은 홍수와 산사태 발생빈도가 높아 인명과 재산피해가 자주 발생하고 있으며, 국지성 호우로 인해 Fig. 1과 같이 암석을 동반한 계곡부 토석류 피해사례가 증가하고 있다[1].

산사태 예방과 복구를 목적으로 토석류 유출저감 시설이 설치되고 있으며, 사방댐은 능동적이고 효과적인 시설로 크게 투과형과 불투과형으로 구분된다. 투과형 사방댐은 평상시 퇴적된 토사를 서서히 유하시키고 홍수 시에는 급격한 유목과 토사의 유출을 조절하기 위해 설치되나, 대부분 고가의 강재를 이용한 형식으로 용접제작 소요비용이 크고 물에 대한 장기간 반복적인 노출로 부식, 경관불량 및 유지관리 비용을 발생시키고 있다.



Fig. 1. Example of debris flows with rock

그러나, 콘크리트로 시공되는 에코필라댐은 2단으로 설치되어 유목등을 걸러내며 재해예방은 물론 상하류간 생태투과율과 생태차단높이가 낮아 생태계 보호와 자연 훼손을 최소화 하고, 설치비가 적게드는 효율적인 공법으로 사용사례가 증가하고 있다[2,3]. 산악지역에 설치되는 에코필라 사방댐의 특성상 자재운반, 양생, 공기등을 감안하면 현장타설콘크리트 보다는 프리캐스트 공법을 적용하는 것이 더 경제적이므로 최근 중공트랙형 단면을 적용한 프리캐스트 에코필라 사방댐 공법이 개발되었다[4].

한편, 산사태로 유발되는 토석류는 물, 암석, 잡물, 흙 등으로 구성되어 있으며, 사방댐 설계 시 설계기준에 따라 외력을 산정하고 있으나, 속도가 빠르고 예상하지 못한 큰 피해가 발생하고 있음에도 불구하고 암석에 의한 충격력은 현재 고려하지 못하고 있는 실정이므로 산사태 유발 가능성이 높은 암석에 대해 토석류와 동시에 작용하는 충격력에 대한 검토와 그 방법에 대한 기준설정이 필요하다.

본 연구는 투과형 사방댐인 친환경 에코필라 사방댐의 암석 충돌 시 거동분석을 위해 비선형 충돌 해석을 수행하였다. 다른 크기의 암석을 원형 구체로 이상화하여 모

델링하였고, 국내 토석류 피해 발생 사례에서 산출된 평균유속을 충돌조건으로 적용하여 콘크리트 재료비선형을 고려한 해석적 방법으로 암석충돌에 관한 구조체 안정성 검토 및 손상도 평가를 수행하였다.

2. 중공트랙형 에코필라 사방댐

2.1 투과형 사방댐의 설계

투과형 사방댐은 계류의 수리적 연속성이 손상되지 않고, 평상시에 토사는 유하시키고, 토석류(유목)를 포착 또는 홍수 시에 토사유출을 조절하는 것이 특징이다. 설치위치나 기능에 따라 투과형 모듈러 강재사방댐, 슬릿사방댐, 골막이 등으로 나뉘며 현지 조사를 통해 요구되는 기능에 따라 형식이 선정된다. Fig. 2의 버트리스(Buttress)나 슬릿(Slit)형식은 강재를 이용해 공장제작 후 현장조립 공법으로 시공되나 공사비가 높고 부식문제가 발생한다[4].

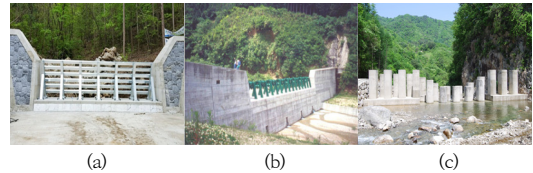


Fig. 2. Type of permeable debris control dam
(a)Buttress (b)Slit (c)Eco-Pillar

개방형인 에코필라 사방댐은 부식의 우려가 없으며 상하류간 소통을 통해 어류, 양서류 등 동물의 이동이 자유롭고 자연경관과 조화로운 뿐만 아니라, 폭우시 상류의 토석류 및 유목의 저지효과도 우수한 것으로 나타났다. 중력식 콘크리트 사방댐의 48%, 다기능사방댐의 71%의 사업비가 소요되어 경제적인 형식이다[5].

Kim [4]은 가시설을 최소화하고 공기절감을 통해 경제성을 확보할 수 있는 중공트랙형 단면의 프리캐스트 에코필라 사방댐 공법을 개발하고 설계방법을 제시하였으며 성능실험을 통해 검증하였다. 콘크리트재료를 이용한 프리캐스트 에코필라 사방댐의 설계는 콘크리트 구조설계 기준[6]에 따라 강도설계법을 적용하였다. 소성이론에 의해 부재를 파괴 상태로 만드는 극한하중 하에서 구조물의 파괴 형상을 예측 하는 설계법인 강도설계법에서 강도는 Eq. (1)과 같이 극한 단면력에 대한 최대 저항 능력을 갖는 부재단면의 강도를 의미한다.

$$M_d = \phi M_u \geq M_u \quad (1)$$

여기서, M_n 은 공칭강도, M_u 는 소요강도, M_d 는 극한 외력으로 설계된 부재의 공칭강도에 강도감소계수(ϕ)를 곱한 강도이다[6].

기존의 에코필라 사방댐은 구조계산 없이 경험적으로 설계되어, 설계외력 산정에 대한 명확한 기준이 없으므로, Kim [4]이 제시한 Fig. 3과 같은 설계외력 산정방법이 적용되었다.

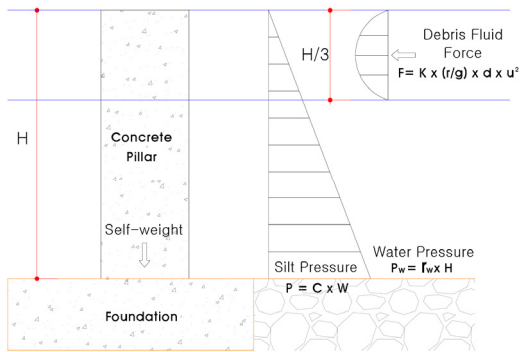


Fig. 3. Design force estimation for eco-pillar debris barrier

토석류시 하중종류에 따른 조합은 기존의 설계법에 따랐으며, 토사압과 유체력에 대한 하중증가계수는 1.2D(Dead)+1.4H(Earth)+1.4W(Water)를 적용하였고 토석류의 유체력은 기둥 높이의 H/3을 수심으로 보고 정량적으로 산정하였다.

2.2 중공트랙형 에코필라 단면 제원

토석류의 피크유량에 따라 설계외력에 견딜 수 있도록 단면이 결정되는 것이 설계일반이나, 본 연구는 기존에 설치된 에코필라의 단면제원을 이용하여 프리캐스트공법을 개발 및 검증한 선행연구 결과를 바탕으로 암석충돌에 대한 해석적 평가를 수행하였다.

Fig. 4는 강원도 고성군 현내면 화곡지구에서 시공된 에코필라 사방댐의 제원을 나타내며, 경험적으로 철근배근 하였으나, Fig. 5와 같이 구조계산을 통해 배근된 중공트랙형 단면을 이용하여 토석류와 동시에 흘러내리는 암석 충돌에 관한 구조체 안정성과 손상도 평가를 수행하였다.

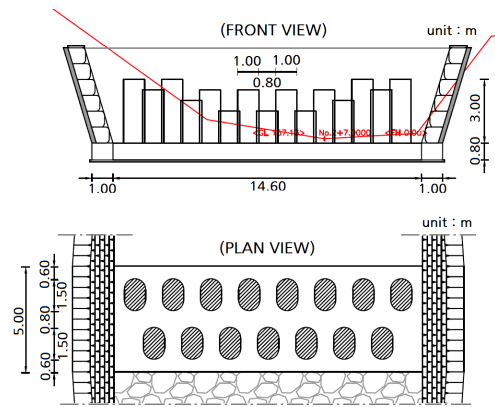


Fig. 4. Overview of eco-pillar debris barrier

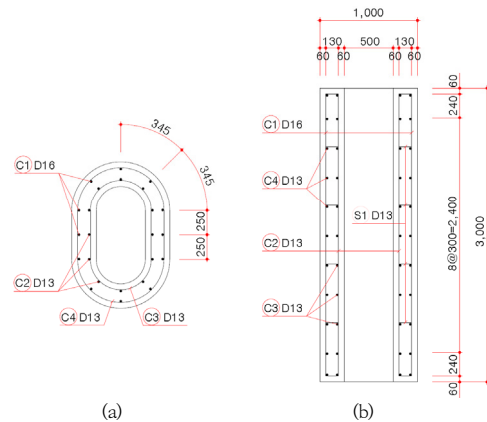


Fig. 5. Reinforcement drawing of column with hollowed track section
(a) Section (b) Front view

3. 충돌해석 및 손상도 평가

3.1 비선형 충돌해석

산사태 발생으로 인해 암석이 사방댐에 충돌하면 구조체의 변형 및 손상이 발생하게 되며, 그 영향이 클 경우, 재료는 탄성 영역을 벗어나 소성 변형을 일으키게 된다. 따라서 토석류와 동반되는 암석의 충돌로 인한 사방댐의 실질적인 거동을 묘사하기 위해서는 콘크리트 재료 비선형을 고려한 해석모델이 요구되며, 충돌하중과 운동방정식 산정에 따른 비선형 동적 해석이 수행되어야 한다. 충돌하중에 따른 비선형 동적해석을 위한 운동방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$M^{t+\Delta t}\ddot{u} + C^{t+\Delta t}\dot{u} + {}^tK_m u = {}^{t+\Delta t}P - {}^tF \quad (2)$$

여기서, M , C 및 tK_m 는 각각 질량, 감쇠 및 시간 t 일 때의 비선형 강성 행렬을 의미한다. ${}^{t+\Delta t}\ddot{u}$ 및 ${}^{t+\Delta t}\dot{u}$ 는 시간 $t + \Delta t$ 일 때의 가속도 및 속도를 나타내며, u 는 시간 t 에서 $t + \Delta t$ 일 때의 변위량으로, $u = {}^{t+\Delta t}u - {}^t u$ 로 계산된다. ${}^{t+\Delta t}P$ 는 시간 $t + \Delta t$ 일 때의 압력 하중을, tF 는 시간 t 일 때 $t + \Delta t$ 의 내력을 나타낸다. 즉, 강성 행렬이 재료 비선형 모델에 따라 산정되어 비선형의 운동방정식이 되고, 강성행렬, 작용하중 및 내력이 시간에 따라 변화됨을 알 수 있다.

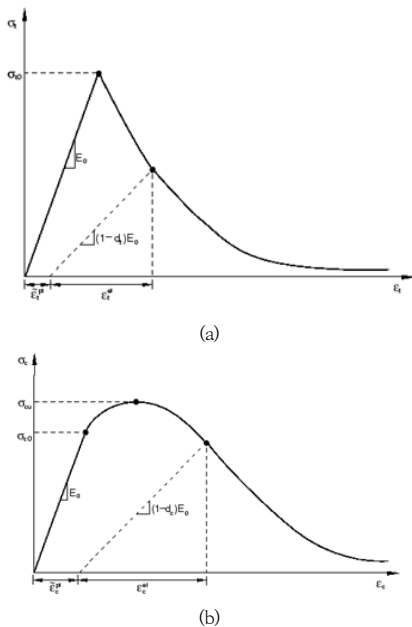


Fig. 6. Stress-strain relationship by uniaxial loading in tension and compression
(a) Tension (b) Compression

3.2 콘크리트 재료 모델 및 손상도

정적 하중, 반복하중 및 동적하중이 콘크리트 구조물에 작용함에 따라 콘크리트 구조물에는 압축파괴, 인장파괴 및 인장균열이 발생하게 되며, 이러한 콘크리트의 복잡한 매커니즘을 묘사하기 위해 응력-변형률에 따른 다양한 재료모델들이 개발되었다. 이 중 인장균열과 압축붕괴 모드에 대한 등방성 손상 모델을 표현 가능한 concrete damaged plasticity model이 있으며, 이는 강성 회복 효과 및 강성 저하 매커니즘을 반영할 수 있다. 콘크리트의 일축 인장 및 압축 응답이 손상 소성에

의해 묘사되며, 일축 하중에 대한 응력-변형률은 Fig. 6과 같다[7].

응력이 파괴응력에 이를 때까지 응력-변형률은 선형 탄성적인 거동을 하고, 파괴응력에 도달하면 미세균열이 발생하게 된다. 파괴응력을 넘어서 후에는 연화되며, 강성의 저하가 발생하게 된다. 강성 저하는 인장손상변수 d_t 와 압축손상변수 d_c 로 표현될 수 있으며, 이는 Eq. (3,4)와 같이 인장 및 압축 등가 소성 변형률($\epsilon_t^{pl}, \epsilon_c^{pl}$)의 함수로 정의될 수 있다.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (3)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (4)$$

여기서, E_0 는 손상이 일어나지 않은 초기 탄성 강성을 의미한다.

4. 비선형 충돌해석 및 결과

4.1 비선형 충돌해석

산사태 발생시 토석류와 함께 동반되는 암석 충돌로 인한 에코필라 사방댐의 파괴 및 손상도 평가를 위해, 암석 충돌에 따른 구조해석 모델을 정립하고 비선형 충돌해석을 수행하였다. 사방댐과 암석의 모델링과 비선형해석을 위해 ABAQUS 소프트웨어의 Dynamic/explicit 옵션을 통한 3차원 유한요소해석이 수행되었으며[8], 콘크리트와 암석 충돌 접촉면은 interaction 옵션 중 surface to surface contact이 이용되었다. 접촉 모델의 경우 접촉면의 수가 증가할수록 연산 처리되어야 할 비선형 해의 수가 증가하게 되어 해석 모델의 수렴이 어려워지게 되므로, 해석모델에 적합한 접촉요소의 정립을 통해 해석결과와 수렴성이 반드시 제고되어야 한다. 따라서, 사방댐 기둥 상부와 암석의 접촉면에만 contact을 적용하였고, 콘크리트 기둥과 기초 사이에는 tie 구속조건을, 콘크리트에 매립된 철근은 embedded region 옵션을 적용하여 일체화 하였다. 일반적인 기둥과 달리 내부가 빈 중공트랙형 기둥에 대한 성능평가를 위해, 콘크리트 기둥 내부의 수직 철근은 기초부까지 연장하여 충분히 하중이 전달되도록 고려하고, 수직 철근 주위에는 루프형 띠철근을 모델링 하였다.

콘크리트의 비선형 거동을 고려하기 위해 concrete

damaged plasticity 모델이 적용되었으며, 콘크리트 기둥과 기초는 Fig. 7과 같이 C3D10 요소(solid), 철근은 B31 요소(beam)를 이용하여 모델링 하였고, 콘크리트 기둥하부에 고정 경계조건을 적용하였다.

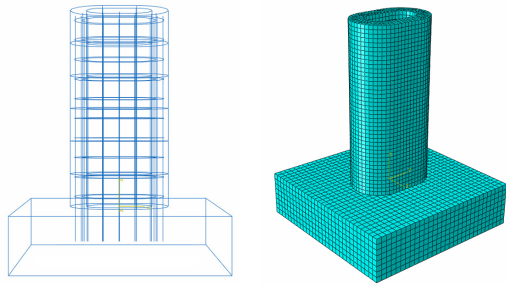


Fig. 7. Rebar and concrete model by solid element

김원명(1998) 등의 연구에 따르면, 화강암 지역의 산사태 빈도가 변성암 지역보다 4.7배, 화산암 지역보다는 2.7배 높게 나타나는 것으로 평가되었다[9]. 따라서 에코필라 사방댐에 충돌하는 암석은 지질학적으로 산사태가 동반되는 사례가 많은 화강암으로 선정하였으며, 물리적인 특성은 Table 1과 같다. 암석 충돌속도는 급경사지인 우면산 지역 산사태 시 발생하였던 토석류의 유속 14.7 m/s를 적용하였다[10].

Table 1. Material properties of granite [11]

Type	Porosity	Cohesive strength (MPa)	Friction angle (deg)
Granite	0.2	55.1	51.0

산사태 발생 시 암석이 사방댐에 충돌하는 조건은 매우 다양하므로, 구조물의 손상도 평가를 위해서는 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 하중조건을 반영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 암석은 토석류와 함께 동반되어 사방댐에 충돌하는 것으로 예상하여 증공트랙형 에코필라에 0도 및 45도 방향으로 작용시켰으며, 응력집중을 피하고 콘크리트 손상으로 충격력이 소산되는 것을 방지하기 위해, 기둥 하부로부터 2.5 m 높이 위치에 암석을 충돌시켜 기둥과 기초와의 연결부에 휨모멘트가 최대로 발생하도록 하였다.

암석의 크기와 무게는 충돌로 인해 콘크리트 기둥부에 미치는 영향이 커져서 적용 규모의 적정성이 고려되어야 하므로, 국내에도 차용되고 있는 유럽통합설계지침

ETAG27의 표준충돌시험과 인증을 위한 성능평가 기준에서 제시하는 암석 모델을 참고하여 비슷한 수준의 크기로 산정하였다 [12]. ETAG27에서는 Table 2와 같이 50 kJ 충돌에너지에 대한 160 kg의 낙석과 100 kJ 충돌에너지에 대한 320 kg의 낙석을 성능평가를 위해 사용토록 제시하고 있다. 사방댐에 충돌하는 암석의 직경을 0.5 m로 계산하면, Table 3과 같이 무게는 167 kg, 충돌에너지는 52 kJ 정도로, 이는 50 kJ 충돌에너지에 대한 낙석과 비슷한 수준이며, 이를 기준으로 0.3 m 및 0.7 m의 암석을 0.5 m 직경과 함께 고려하여 Fig. 8과 같이 적용하였다. 또한, 암석이 충돌하기 전의 사방댐 초기하중으로 사방댐 자중과 수압이 고려되었다.

Table 2. Test model of ETAG 27 [12]

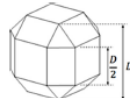
Weigh (kg)	Impact energy (kJ)	Shape of rock
160	50	Polyhedron with 26 Faces 
320	100	

Table 3. Weight and impact energy of Rock model

Diameter	Weigh (kg)	Impact energy (kJ)
0.3	36	11
0.5	167	52
0.7	460	144

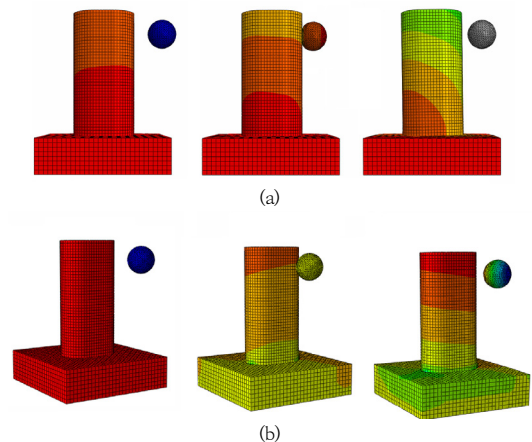


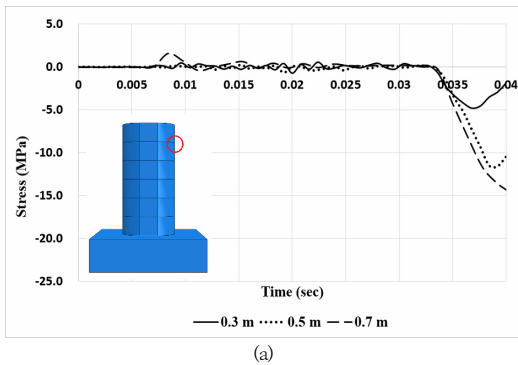
Fig. 8. Impact analysis model according to rock model (a) 0 deg (b) 45 deg

4.2 암석 충돌해석 결과

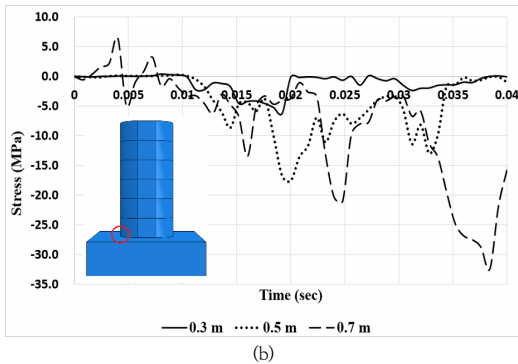
암석직경 0.3 m, 0.5 m 및 0.7 m가 각각 에코필라 사방댐의 기둥부에 0도 및 45도 방향으로 충돌할 경우, 캔틸레버 구조이므로 콘크리트 에코필라 사방댐에 발생하는 응력은 충돌부와 기초연결부에서 가장 크게 발생하였으며, 시간에 따른 응력변화 그래프를 Fig. 9 및 10에 나타내었다. 초기 상태에 수압이 작용하고 있는 상황에서 추가적으로 암석이 충돌하게 되므로, 초기 하중과 충돌에 따른 에너지의 흡수 및 분산의 반복으로 인한 응력의 증감이 주기적으로 발생하는 것으로 나타났다.

콘크리트구조기준[6]에 따르면, 콘크리트 허용압축 및 인장응력은 각각 $0.6f_{ck}$ 및 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 로, 콘크리트 설계 기준강도 40 MPa을 기준으로 각각 24 MPa과 3.98 MPa을 허용응력으로 볼 수 있다. 충돌 각도 0도 및 45도에 대한 최대 발생 응력을 살펴보면, 0도의 응력이 45도보다 큰 것으로 확인된다.

주어진 하중조건에서 직경 0.3 m 및 0.5 m 크기의 암석에 의해 사방댐에서 발생한 최대 압축 및 인장 응력은 콘크리트 허용 응력 이내로 안전한 것으로 판단되지만, 직경 0.7 m 크기의 암석이 충돌할 경우, 사방댐에서 발생한 압축응력 32.5 MPa과 인장 응력 6.46 MPa은 콘크리트 허용응력보다 커 파괴에 이를 것으로 예상된다. 상기 결과는 기둥 하부로부터 2.5 m 위치에 암석이 충돌했을 경우이므로, 0.7 m 크기의 암석이 기둥 높이 1.5 m 혹은 0.5 m의 높이에 0도로 충돌하였을 경우 발생하는 압축 및 인장 응력은 Fig. 11과 같이 콘크리트 허용응력보다 작아 안전측의 결과를 보이고 있다. 결과적으로, 선행연구에서 제시한 중공트랙형 에코필라 사방댐의 기둥부 단면은 직경 0.7 m 이하의 암석에 의해 가해지는 충돌에너지를 충분히 흡수하여 구조체가 파괴되지 않는 결과를 보였으며, 암석이 기둥의 2.5m 이하 지점(하단부)을 충돌면으로 설정하였을 경우에는 충돌로 인한 모멘트가 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다.

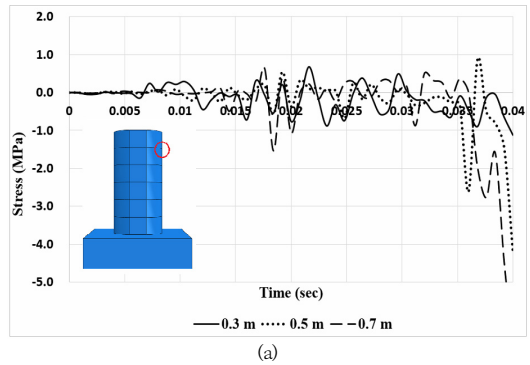


(a)

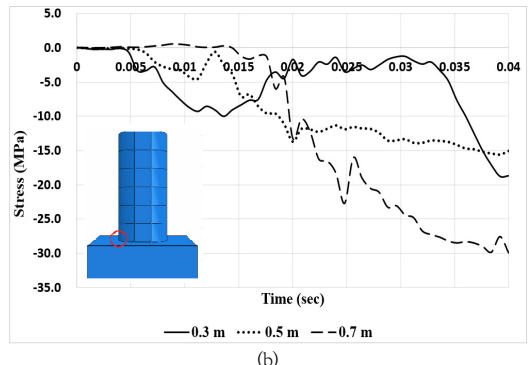


(b)

Fig. 9. Stresses in concrete pillar (0 deg.)
(a) Impact point (b) Bottom of Pillar



(a)



(b)

Fig. 10. Stresses in concrete pillar (45 deg.)
(a) Impact point (b) Bottom of Pillar

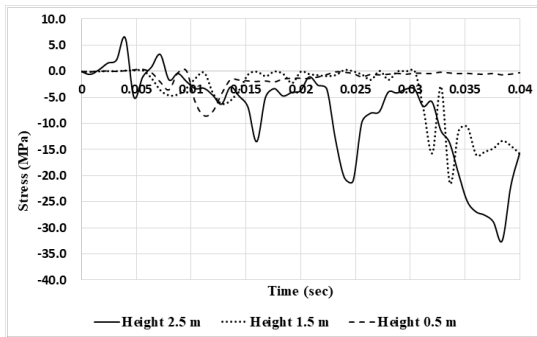


Fig. 11. Stresses in concrete pillar according to impact position (0 deg)

Fig. 12 및 13은 암석 충돌부에 배치된 인장 철근의 시간-응력 관계 그래프를 나타내며, 충돌 각도 0도, 암석 직경 0.3 m 인 경우 발생 응력이 철근(SD400)의 항복강도 400 MPa을 초과하지 않았으나, 직경 0.5 m 및 0.7 m 인 경우에는 최대 응력이 각각 408 MPa 및 470 MPa 로 나타나 항복응력을 초과하는 결과를 보였다.

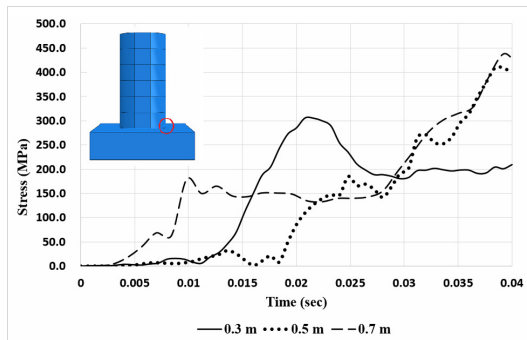


Fig. 12. Stresses in rebar according to impact position (0 deg)

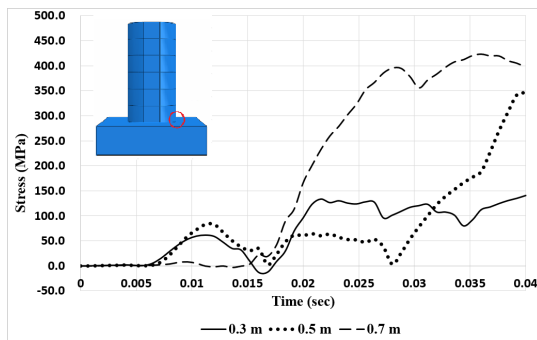


Fig. 13. Stresses in rebar according to impact position (45 deg)

이를 콘크리트에 발생하는 인장응력과 함께 살펴보면, 직경 0.5 m의 암석이 충돌하는 경우에는 철근은 항복이 후에도 소성영역에서 변형률이 늘어나면서 콘크리트의 허용 인장응력내에 머물러 충돌시점에 파괴되지 않는 결과를 보이지만, 직경 0.7 m의 경우에는 철근 항복에 따른 인장 변형률 증가가 한계변형률을 넘어서 구조체가 파괴에 이를 것으로 예상되는 결과를 보였다. 충돌각도 45도인 경우에는 암석 직경 0.3 m 및 0.5 m에 대해 철근이 항복하지 않고, 0.7m 인 경우에는 철근 항복 및 구조체 파괴로 이를 것으로 예상되는 결과를 보였다.

암석 충돌 지점에 발생하는 구조체의 변위는 Fig. 14 및 15에 나타내었고, Fig. 16 및 17은 충돌에 따른 변형 형상과 분포도를 나타낸다. 암석 충돌로 인한 충돌에너지의 흡수 및 분산으로 발생 변위의 증감이 발생한 것으로 예상되며, 암석 직경이 클수록 충돌지점의 변위가 증가하였다.

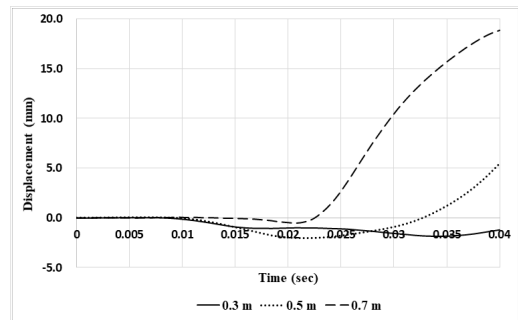


Fig. 14. Horizontal displacement at impact position (0 deg)

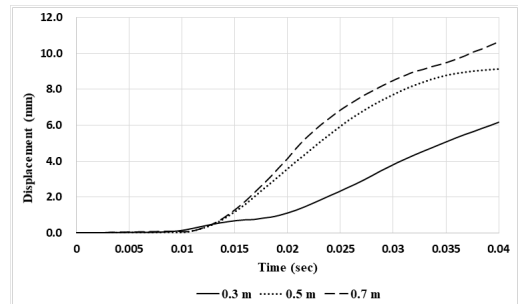


Fig. 15. Horizontal displacement at impact position (45 deg)

암석 직경이 0.3 m 및 0.5 m 인 경우에는 충돌에너지의 영향이 콘크리트 기둥의 강성보다 작아 충돌지점을 중심으로 변위가 발생하나, 암석 직경이 0.7 m 인 경우에는 충돌에너지가 기둥 강성보다 커, 기둥 전체의 기둥

에 영향을 미친 것으로 평가된다. 충돌각도에 대한 충돌 지점에서의 변위를 비교하면, 암석 직경 0.7 m를 제외하고는 45도인 경우가 더 큰 것을 알 수 있는데, 이는 중공 형상에 따른 에너지 흡수 및 분산 효과 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다.

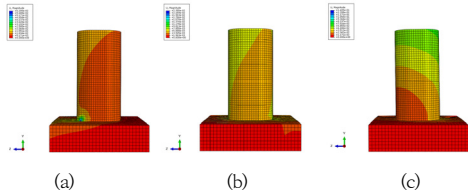


Fig. 16. Deformed shape (0 deg)
(a) 0.3 m (b) 0.5 m (c) 0.7 m

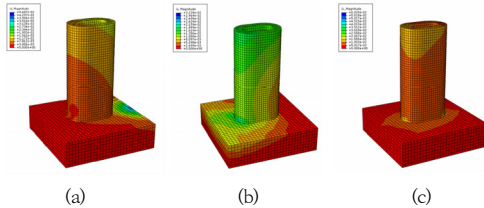


Fig. 17. Deformed shape (45 deg)
(a) 0.3 m (b) 0.5 m (c) 0.7 m

4.3 손상도 평가

충돌 암석의 직경 크기에 따른 콘크리트의 인장에 따른 손상 양상은 Fig. 18 및 19와 같다. 암석 직경의 크기가 커질수록 인장균열이 발생하는 범위는 기둥 하단 즉, 기둥과 하부 콘크리트의 연결부에서 기둥 및 하부 콘크리트 전체로 증가하며, 균열 확률 또한 증가된다.

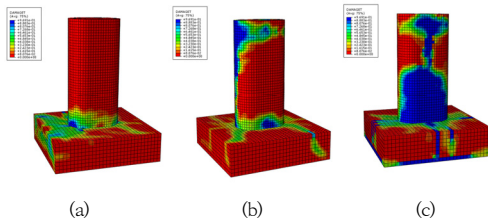


Fig. 18. Concrete tensile damage (0 deg)
(a) 0.3 m (b) 0.5 m (c) 0.7 m

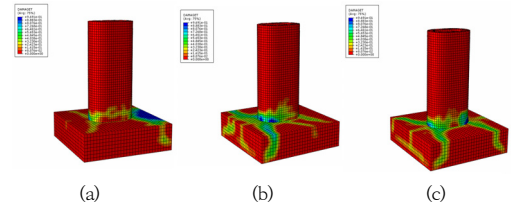


Fig. 19. Concrete tensile damage (45 deg)
(a) 0.3 m (b) 0.5 m (c) 0.7 m

충돌에 따른 손상도를 계산하기 위해 충돌 시 구조물에서 발생한 최대인장응력을 충돌의 손상수준으로, 구조물의 파괴응력을 손상기준으로 설정하였다. 암석 크기에 따른 손상도 그래프는 Fig. 20 및 21과 같으며, 충돌 각도가 0도인 경우가 45도인 경우보다 손상 정도가 큰 것으로 나타났다. 직경 0.3 m 및 0.5 m의 경우는 최대 손상도가 0.78 및 0.93으로 1.0보다 작아 손상에 대해 안전하지만, 직경 0.7 m의 경우에는 최대 손상도가 1.39로 1.0을 초과하여 균열과 손상이 발생하여, 직경 0.7 m 크기의 암석이 충돌 할 시에는 본 사방댐이 안전하지 않고, 사방댐으로서의 제기능을 유지하지 못할 것으로 판단된다.

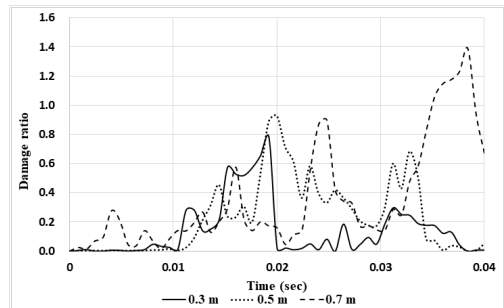


Fig. 20. Damage ratio according to diameter of rock (0 deg)

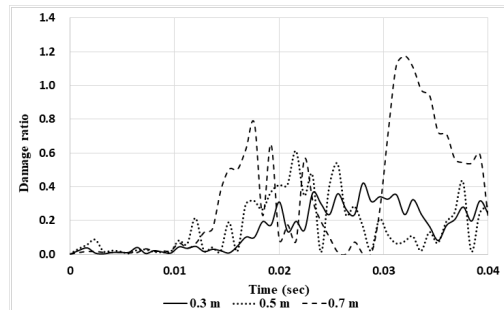


Fig. 21. Damage ratio according to diameter of rock (45 deg)

5. 결론

본 연구는 투과형 사방댐인 친환경 에코필라 사방댐의 암석 충돌 시 거동분석을 위해 비선형 동적해석을 수행하였다. 암석을 원형 구체로 이상화하여 모델링하였고 국내 토석류 피해 발생 사례에서 산출된 평균유속을 충돌 조건으로 적용하여 콘크리트 재료비선형을 고려한 해석적 방법으로 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 충돌해석을 위한 암석의 종류 및 크기에 대한 기준을 제시하고, 토석류에 동반되는 암석으로 한정하여 국내 사례 분석을 통해 토석류의 평균유속에 기반한 암석 충돌속도 산정모델을 제시하였다.
2. 콘크리트 기둥부재가 도입되는 사방댐형식 중 중공 트랙형 단면의 충돌해석을 수행하여 기존의 설계외력 및 설계법에 따른 단면을 기준으로 암석충돌로 나타나는 거동을 해석적 방법으로 규명하였다.
3. 기둥부 높이에 따른 암석 충돌해석 결과는 전형적인 캔틸레버 구조이므로 최상단이 가장 큰 모멘트를 유발시켰고, 충돌각도 0도, 암석 직경 0.7m일 경우 콘크리트 인장응력이 6.46 MPa, 철근의 인장응력이 470MPa로 허용응력을 넘어서는 결과를 보였다.
4. 충돌에 따른 구조물 손상수준을 평가한 결과, 충돌각도 0도인 경우가 손상정도가 더 크고, 암석직경 0.3 m 과 0.5 m의 경우는 최대 손상도가 각각 0.78, 0.93으로 1.0보다 작았고, 암석직경 0.7 m의 경우에는 최대 손상도가 1.39로 나타나 균열과 손상이 심각한 상태로 평가되었다.
5. 암석충돌에 대한 해석적 연구는 단면설계 시 정적외력에 대한 고려와 함께 추가로 검토해야 할 동적내용에 대한 기초자료를 제공하며, 다양한 형식의 사방댐에 대한 충돌해석의 연구방향을 제시하였다. 향후, 실험적 연구를 통해 한계를 보완하는 추가연구가 필요하며, 현장 여건에 따라 암석충돌에 관한 사항이 설계 시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Forest Service, Unforeseen Flood of Valley will be predictable, Press release, January 2016.
- [2] Korea Forest Service, Debris Control Dam, Establishment Completion contribute to accident prevention program Before rainy wet season, Press release, June 2010.
- [3] G. B. Koo, M. S. Kim, C. Kim, S. M. Yu, "A Study on Type Classification of Erosion Control Dam using Ecosystem Connectivity", *Journal of Korean Forest Society*, Vol.100, No.3, pp.484, 2011.
- [4] H. G. Kim, "Development of Precast Concrete Method for Eco-Pillar Debris Barrier with Hollow Cross-Section", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.3, pp.542-552, March 2018. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.3.542>
- [5] Korea Forest Service, Debris Control Dam, Establishment Completion contribute to accident prevention program Before rainy wet season, Press release, June 2010.
- [6] Korea Concrete Institute, Explanation of concrete structure standard, 2012.
- [7] M. U. Hanif, Z. Ibrahim, K. Ghaedi, "Finite Element Simulation of Damage In RC Beams", *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, Vol.9, No.1, pp.50-57, 2018. DOI: <http://doi.org/10.33736/icest.883.2018>
- [8] ABAQUS, Inc., ABAQUS/Standard User's Manual-Version 6.2., Pawtucket, R.I., 2001.
- [9] W. Y. Kim, S. R. Lee, K. S. Kim, B. G. Chae, "Landslide Types and Susceptibilities Related to Geomorphic Characteristics", *Korean Society of Engineering Geology*, Vol.8, No.2, pp.115-132, 1998.
- [10] W. I. Choi, S. G. Lee, B. K. Lee, S. J. Jang, "A Study of Vulnerability of Structure by Debris Flow", *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.3, pp.141-146, June. 2012.
- [11] H. S. Jang, J. T. Jeong, B. A. Jang, "Experimental Study for determining the Basic Friction Angle of the Rock Joint", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.26, No.4, pp.447-460, 2016. DOI: <http://doi.org/10.9720/kseg.2016.4.447>
- [11] K. J. Han, B. G. Moon, M. G. Ko, K. D. Kim, "Performance Assessment of Rockfall Protection Fences for the Rockfall Energy of 100 kJ Using ETAG 27", *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.16, No.4, pp.247-259, 2016. DOI: <http://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.247>

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : ㈜동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 해상풍력발전, 교량공학

김 범 준(Bum-Joon Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 아시아시설물연구센터 박사후연구원

<관심분야>

토목구조