

강섬유보강 폴리머침투 콘크리트 원통형구조의 충격거동

Impact Behavior of Steel Fiber Reinforced Polymer-Impregnated Concrete Cylinder

변근주*, 정기영**, 김종우***, 심별**** 송하원*****

K.J. Byun, K.Y. Jeong, J.W. Kim, B. Shim, H.W. Song

Abstract

This paper is about impact behavior of cylinder container, made of steel fiber reinforced polymer-impregnated concrete (SFPIC), for intermediate and low level radwaste disposal.

In order to obtain the material properties of the SFPIC, steel ball impact tests were done to SFPIC beams and its simulation by finite element method was performed. By using the material properties in finite element impact analysis of the SFPIC concrete cylinder, we obtained impact behavior of the cylinder.

1. 서론

최근 전력의 수요가 날로 증가해감에 따라 원자력 발전에 대한 관심이 고조되고 원자력 발전소 및 관련설비가 증가해가고 있다. 따라서 이에 따른 다량의 방사선 폐기물의 발생은 시급한 대책을 요구하기에 이르렀다. 방사선 폐기물은 크게 사용후 핵연료와 중저준위 폐기물로 구분되며, 이중 사용후 핵연료는 중간 지장시설에 지장되고 중저준위 폐기물은 지상 용기에 모아서 지중매설 또는 해양투기하는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 중저준위 폐기물처리를 위한 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트(Steel Fiber Polymer-Impregnated Concrete : SFPIC) 원통형구조의 낙하충격에 의한 거동을 유한요소법을 이용하여 구명하고자 한다. 이에 사용되

는 기본재료인 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트는 콘크리트의 단점인 취성거동을 연성거동으로 유도하고 매트릭스의 국부적인 균열생성 및 성장을 억제함은 물론 강도를 크게 향상시킨 신소재 구조복합재료이다.¹⁾ 본 연구에서는 SFPIC로 제작한 원통형 구조를 유한요소 모델링한 후, 낙하시험의 수치해석 시뮬레이션을 통해 실제용기의 낙하충격거동을 예측하고자 한다. 이를위해 같은재료로 제작한 평판에 강철구(steel ball) 낙하시험을 실시하여 SFPIC의 충격 물성치들(material parameters)을 결정하고 실험에서 구한 SFPIC의 물성치를 사용하여 실제 SFPIC 원통형구조를 충격해석하고자 한다.

2. 유한요소 충격 해석

일반적으로 충격(impact)이란 운동하는 두 물체의 충돌로 인하여 그 접촉면에서 발생하는 충격하중을 주고받는 역학적현상을 말한다. 토목공학에서는 미사일, 항공기등이 구조물에 충돌하였을 때 고려되는 현상으로 충격하중을 개념적으로 구조물에 전달되는 운동에너지의

* 연세대학교 토목공학과 교수

** 삼성건설주식회사

*** 쌍용양회 중앙연구소 연구원

**** 연세대학교 토목공학과 석사과정

***** 연세대학교 토목공학과 조교수

충량으로 정의한다.

충격하중은 정하중(static load)에 비하여 그 강도가 크고, 지속시간(duration time)이 짧은 특징이 있으며, 충격이 발생한 직후 두 물체의 거동에 직접적인 영향을 준다.

1. 충격의 정식화

두 물체 Ω^A 와 Ω^B 가 그림 1과 같이 충돌에 의하여 접촉이 생길때 공간좌표계에서 좌표를 x_i , 속도를 v_i 라 한다면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

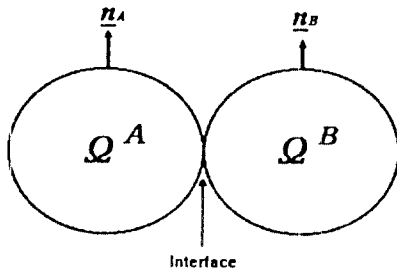


그림 1 충돌에 의한 접촉

$$v_i = \dot{x}_i \quad (1)$$

밀도를 ρ , 체적력을 b_i , Cauchy-응력을 σ_{ij} , 변형의 시간변화율을 \dot{v}_i 라 하면, 연속체의 운동방정식은 momentum 방정식에 의해 지배되므로 식 (2)와 같다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \dot{v}_i \quad (2)$$

또한 변형의 변화율 $v_{i,j}$ 과 변형률의 시간변화율 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 의 관계식은 식 (3)과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

Cauchy-응력과 변형률의 관계식은 다음 (4)식과 같다.

$$\sigma_{ij} = S_{ij}(\epsilon_{kl}, \sigma_{kl}, \dots) \quad (4)$$

미지수인 v_i 와 σ_{ij} 의 초기조건은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i(0) = v_i^0 \quad (5)$$

$$\sigma_{ij}(0) = \sigma_{ij}^0 \quad (6)$$

두 물체가 관통이 되지 않으려면 식 (7)을 만족해야 하며

$$\Omega^A \cap \Omega^B = 0 \quad (7)$$

경계조건은 식 (8)과 (9)와 같다.

$$\sigma_{ij} n_j = p_i \quad (8)$$

$$v_i = \bar{v}_i \quad (9)$$

식 (2)를 가상일의 법칙을 사용하여 다시 쓰면 식 (10)과 같다.

$$M \dot{v} = F^{ext} - F^{int} + F^{body} \quad (10)$$

여기서,

$$M = \sum_{elements} \int_V \rho \phi_i \phi_j dV ; \text{ 질량 매트릭스}$$

$$F^{ext} = \sum_{elements} \int_S \phi_i p_i dS ; \text{ 부가된 외력벡터}$$

$$F^{int} = \sum_{elements} \int_V \sigma_{ij} \frac{\partial \phi_i}{\partial x_j} dV ; \text{ 내력벡터}$$

$$F^{body} = \sum_{elements} \int_S \phi_i \rho b_i dV ; \text{ 체적력 벡터}$$

이며, ϕ 는 형상함수이다.

식 (10)에 충격문제를 고려하기 위하여 hourglass항과 접촉력항을 첨가하면 식 (11)과 같다.

$$M \dot{v} = F^{ext} - F^{int} + F^{bod} + F^{hrk} + F^{cont} \quad (11)$$

여기서, $F^{hrk} = \sum_{elements} f^{hrk}$; hourglass항력 벡터

$$F^{cont} = \sum_{contact\ surfaces} f^{cont} ; \text{ 접촉력 벡터}$$

2. 시간적분

시간적분(time integration)은 일반적으로 implicit method와 explicit method으로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 explicit method를 사용하였다.

Explicit method에 의한 시간적분을 순서대로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 Explicit방법에 의한 시간적분

① initial condition : $\dot{u}^0 = u(0) ; \ddot{u}^{-1/2} = \dot{u}(0), n=0$
② update velocities : $\dot{u}^{n+1/2} = \dot{u}^{n-1/2} + \Delta t \ddot{u}^n$ displacements : $u^{n+1} = u^n + \Delta t \dot{u}^{n+1/2}$
③ compute internal nodal forces LOOP over elements $E = 1$ to NEL (element number) strain rates : $\dot{\epsilon}^{n+1/2} = B \dot{u}^{n+1/2}$ stress rates : $\dot{\sigma}^{n+1/2} = T(\dot{\epsilon}^{n+1/2})$ update stress : $\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta t \dot{\sigma}^{n+1/2}$ internal forces : $f_{int}^{n+1}, E = \int_{\Omega E} B^T \sigma^{n+1} d\Omega$ assemble : f_{int}^{n+1}, E into f_{int}^{n+1}
④ compute external nodal forces f_{ext}^{n+1}
⑤ accelerations : $\ddot{u}^{n+1} = M^{-1} [f_{ext}^{n+1} - f_{int}^{n+1} - C \dot{u}^{n+1/2}]$ C : damping
⑥ output
⑦ $n = n + 1$; go to ②

유한요소해석을 통해 충격해석을 할 때 접촉이 예상되는 부분을 먼저 지정해 주어야 한다. 두개 이상의 물체가 맞붙어서 닿는 부분을 접촉면(interfaces)이라 하며, 접촉면은 master면과 slave면으로 나눌 수 있는데 master면과 slave면의 normal방향은 항상 상대방향을 향해야 하며 slave면은 master면의 운동방정식에 의해 지배된다. 그림 2는 접촉이 일어난 master면과 slave면을 나타낸다.

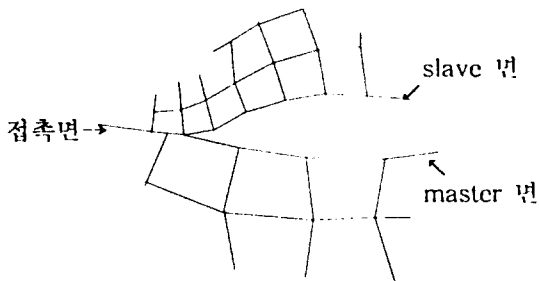


그림 2 접촉이 일어난 slave면과 master면

충격해석시 접촉문제를 해결하기 위하여 Hydrocode methodology에 의한 explicit code를 사용하였다.³⁾ 8절점 solid요소를 사용하여

SFPIC 원통형구조를 유한요소모델링하였고 SFPIC의 거동을 나타내기 위해 탄-소성 손상 모델을 사용하였다.

3. 강철구 낙하 충격시험의 시뮬레이션

SFPIC로 제작된 보에 대해 강철구를 낙하하여 일어나는 충격거동을 유한요소해석을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 충격시험의 개요를 도시하며, 그림 4는 낙하시험의 유한요소해석을 위한 모델링을 나타낸다.

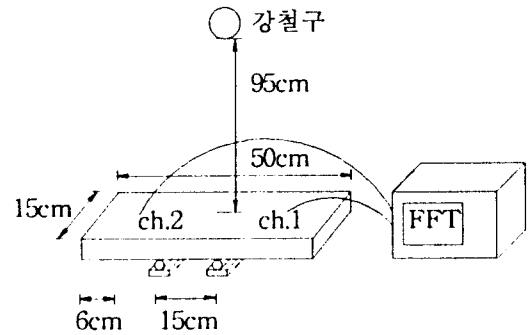


그림 3 시험개요도



그림 4 강구낙하시험의 모델링

그림 5는 강철구가 평판의 중앙에 낙하한 경우에 시험과 해석의 결과를 비교하여 가속도의 시간이력을 도시한 것이다. 가속도의 최고값 및 최저값이 발생하는 시간은 거의 같지만 가속도의 크기는 해석결과가 다소 큰 경향을 보이고 있다. 이것은 시험에 사용된 가속도계가 시험에 완전부착되지 않은 결과로 판단된다.

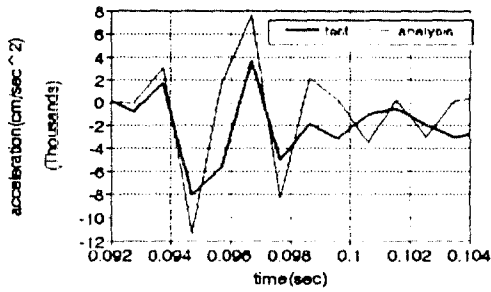


그림 5 시험 및 해석에서의 충돌후 가속도의 시간이력 비교

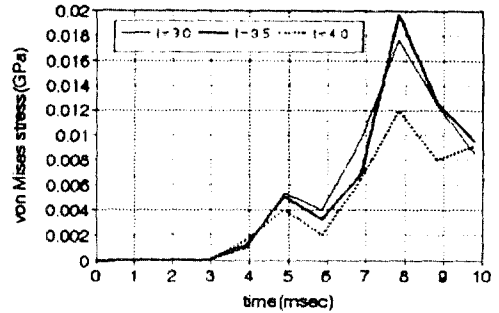


그림 7 원통형구조 바닥판에서의 제1층의 von Mises 응력

이 시험과 해석은 원통형구조의 충격해석을 위한 충격물성치를 얻기 위해 행하여졌다.

그림 8은 바닥판이 지면에 충돌한 후 소성 변형률의 분포를 나타내며 그림 9는 이때의 용기의 변형을 나타낸다.

4. 원통형구조의 낙하충격해석

그림 6과 같이 SFPIC 원통형구조를 유한요소 모델링하여 45° 경사로 1.2m 높이에서 콘크리트지면에 낙하하였을 경우를 시뮬레이션하였고 원통형구조에 발생하는 충격손상을 파악하였다.

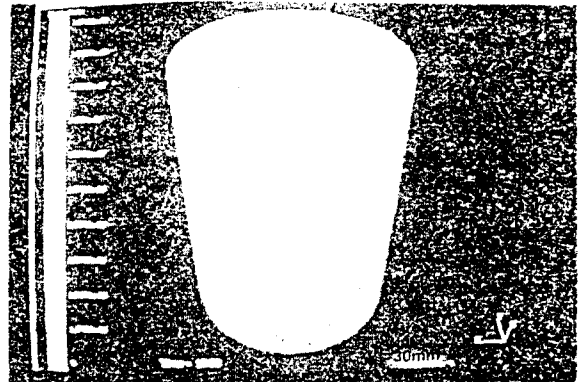


그림 8 충돌후 소성변형률 분포

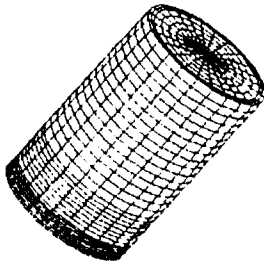


그림 6 원통형구조 낙하시험 모델링

그림 7은 원통형구조 바닥판에서 발생한 von Mises응력을 도시한 것이다.

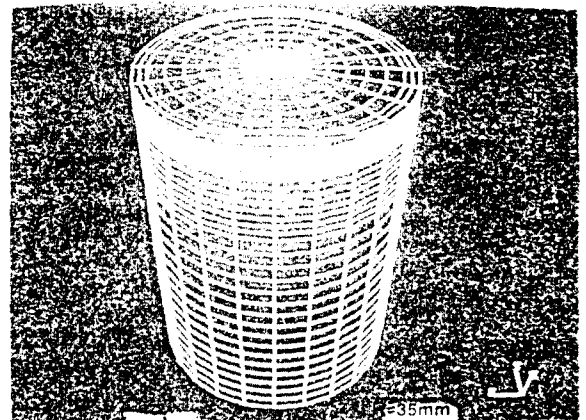


그림 9 충돌후 용기의 변형

5. 결 론

본 논문은 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트 원통형구조의 낙하충격거동을 예측하기 위한 연구이다. 강섬유보강 폴리머침투콘크리트보에 대한 강철구 낙하시험과 해석과의 비교분석에 의해 사용재료인 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 최적충격불성치를 도출하였다.

얻어진 재료불성치를 사용한 유한요소해석을 통해 강섬유보강 폴리머침투콘크리트 원통형구조의 낙하시험을 시뮬레이션하였으며, 충격거동을 도출하였다.

참 고 문 헌

1. 변근주, 송하원, 정해성, 정기영, 김중우, "중저준위 원자력폐기물용기 콘크리트재료의 역학적거동", '94 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1994, pp. 887~892.
2. Byun, K. J., Jeong, H. S., Song, H. W. and Song, Y. C., "Mechanical Behaviors of Steel Fiber Reinforced Polymer-Impregnated Concrete", Proceeding, 8th ICPIC Conf., Belgium, 1995.
3. Arnaudean, F. et. al, Seminaire Radioss, 1992.