

폭발 하중을 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동 평가

Behavior of Precast Prestressed Concrete Panels subjected to Blast Loading

강 주 원* 조 은 선** 김 민 숙*** 이 영 학****
Kang, Joo-Won Jo, Eunsun Kim, Min Sook Lee, Young Hak

Abstract

The purpose of this study is to establish and examine the analytical methods based on FEA to predict the behavior of the precast prestressed concrete panels under blast loading. The precast prestressed concrete structures are on the rise, but there is little research in this regard explosion. In this paper, we set the variable to the three models. TNT 500 kg was an explosion in the standoff-distance 3m. In conclusion, the precast models damage was concentrated in the bonded portion. The concrete panels after an explosion occurred continuously deformed. But the including prestressed panels deformation occurs only at the beginning of the explosion were able to see the results.

Keywords : Precast, Prestressed Concrete, Blast Loading, AUTODYN, Computational fluid-dynamic

1. 서론

국제 사회에서 문화 및 정치적 이견으로 인한 충돌이 발생하며 폭발 및 테러의 발생 빈도가 잦아지고 있어 폭발 하중을 받는 철근 콘크리트, 철골 부재에 대한 구조물의 거동 및 성능 평가는 다수의 연구자에 의해 지속적으로 진행되고 있으며 관련 기초 자료 또한 축적되고 있다. 그러나 최근 건설 시장에서 그 수요가 증가하고 있는 프리캐스트 콘크리트(Precast concrete), 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed

concrete) 부재에 대한 방폭 연구는 아직 미흡하다. 22층 규모의 프리캐스트 건물인 Ronan Point Apartment 붕괴 사건은 18층에서 발생한 가스폭발로 인해 건물 모서리 외부 벽 및 바닥 패널이 무너지고 바닥 세그먼트가 낙하하면서 건물의 모서리 부분이 연쇄적으로 붕괴되었다 <Fig. 1>. 이 사고에서 확인할 수 있듯이 프리캐스트 공법을 사용한 구조물은 부재와 부재 사이에 접합부가 존재하여 폭발하중과 같은 이상극한하중을 받을 경우, 철근 콘크리트 또는 철골구조 보다 더 큰 손상 또는 파괴가 발생할 가능성이 크다.

Ngo. T. 등 (2007)은 폭발실험을 통해 폭발하중을 받는 고강도 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동을 평가하였다.¹⁾ Cramsey. N. 등 (2006)은 폭발하중을 받는 프리캐스트, 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동을 평가하기 위해 실험을 수행하였다.²⁾ R.A.Hawileh 등 (2010)은 주기 하중에 영향을 받는 프리캐스트 보-기둥 접합부의 거동 예측을 위한 3차원 비선형 유한요소 모델을 개발하는 연구를 수행하였다.³⁾ E. Jo. 등 (2014)은 폭발 하중에 대한 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동을 해석을 통해 평가하

* 정회원, 영남대학교 건축학부, 교수
Department of Architecture,
Yengnam University
** 정회원, 경희대학교 건축공학과, 석사과정
Department of Architectural Engineering,
Kyung Hee University
*** 정회원, 경희대학교 건축공학과, 공학박사
Department of Architectural Engineering,
Kyung Hee University
**** 교신저자, 경희대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering,
Kyung Hee University
Tel: 031-201-3815, Fax: 031-204-3815
E-mail: leeyh@khu.ac.kr

였다.⁴⁾ 폭발하중을 받는 부재의 실험은 현실적인 제약으로 인해 실험 모델의 수가 매우 적어 관련 실험 데이터 양 또한 매우 적다. 특히, 폭발 하중을 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 부재에 대한 해석 연구는 거의 전무하다.

따라서 본 연구는 비선형 동적해석이 가능한 AUTODYN 프로그램을 사용하여 폭발하중을 받는 프리캐스트 패널의 손상 정도를 평가하고자 하였다. 이를 위해 콘크리트 강도, 프리캐스트 적용 여부, 프리스트레싱 적용 유무를 해석 변수로 선정하였다. 본 연구를 통해 향후 프리캐스트 부재의 실험을 위한 설계 및 방폭 설계 등에 기초자료를 제공하는 것을 목표로 하였다.



<Fig. 1> Ronan Point Apartment (1968)

2. 폭발하중

2.1 폭발하중의 특징

폭발 압력은 매우 짧은 지속시간 때문에 다른 재하 하중과 다르게 고차 모드에 의한 피해를 발생시킬 수 있으며, 거리에 따라 압력이 급격하게 감소하는 특징이 있다. 폭발파를 도식화하면 <Fig. 2>와 같다. 폭발이 발생하면 에너지의 급속한 방출로 열이 방출되고 대기와 지반을 통해 충격파가 전달된다. <Fig. 2>와 같이 공기를 통해 직접 전달되는 폭발파가 입사압력이고, 그 입사압력이 구조물이나 지반 등에 충돌하여 반사되는 압력을 반사압력이라고 한다. 구조물에 직접적으로 작용하여 구조물에 영향을 주는 폭발하중이 반사압력이다. 폭발이 발생한

순간 입사압력은 순간적으로 상승하여 매우 짧은 시간동안 생성된다. 그 후 입사압력은 감소하여 대기압과 같아지는데 이 사이의 압력을 정압기라고 한다. 정압기 이후, 대기압보다 압력이 낮아지는 단계를 부압기라고 하는데 부압력은 방호 설계에서 크게 영향을 미치지 않기 때문에 일반적으로 방호 설계에서 고려하지 않는다.

TM 855-1은 폭발 관련 연구 분야에 폭넓게 인용되고 있다. ConWEP은 TM 5-855-1에 기술된 하중 예측 방법을 기반으로 만든 전산프로그램이다. 아래 식은 ConWEP에서 사용하는 식으로 정압력 단계의 입사 및 반사 폭발 압력-시간을 산출한 식이다.⁵⁾

$$P_{initial}(t) = P_{so} \left[1 - \frac{t-t_a}{t_0} \right] \exp^{-A \frac{t-t_0}{t_0}} \quad (1)$$

$$P_{ref}(t) = P_r \left[1 - \frac{t-t_a}{t_0} \right] \exp^{-A \frac{t-t_0}{t_0}} \quad (2)$$

$P_{initial}(t)$: 시간 t에서의 입사폭발압력

$P_{ref}(t)$: 시간 t에서의 반사폭발압력

P_{so} : 최대입사압력 P_r : 최대반사압력

t_0 : 정압력 단계의 지속시간

t_a : 폭발압력이 구조물에 도달한 시간

A : 감쇠상수

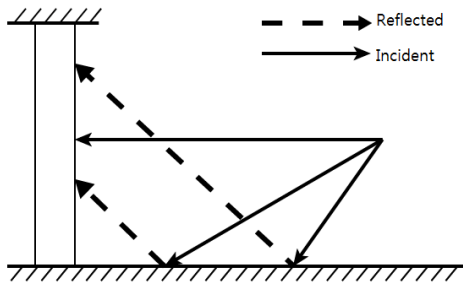
본 해석에서 사용한 프로그램에서의 폭발물 특성에 관한 부분도 정의되어야 한다. AUTODYN은 JWL (Jones, Wilkins, Lee) 물성 알고리즘으로 폭발물을 표현한다. 식 (3)은 폭발물을 표현하는 JWL 상태방정식이다. JWL 알고리즘은 실험에 의한 상수 데이터를 기반으로 정의된다.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{\frac{R_2}{\eta}} + \omega \rho e \quad (3)$$

$\rho_0 = Reference Density$

$\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$

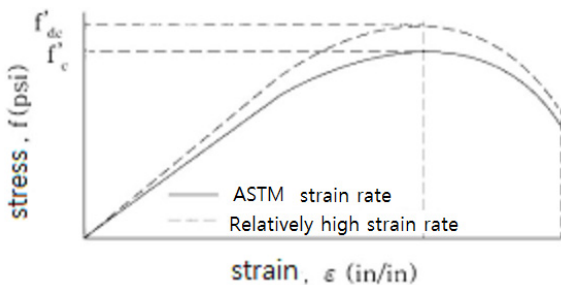
$A, B, R_1, R_2, \omega =$ 동적실험에 의한 상수



〈Fig. 2〉 The incident pressure and the reflected pressure

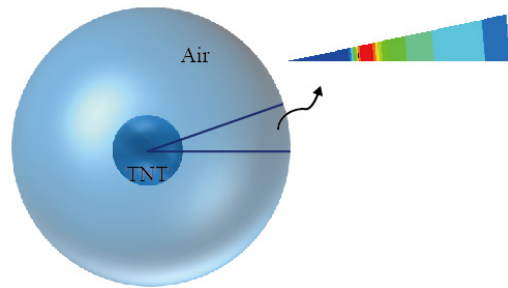
2.2 폭발하중의 모델링 기법

폭발은 고온이나 충격에 의해 높은 에너지가 매우 짧은 속도로 방출된다. 폭발하중은 매우 짧은 지속시간을 갖는 이상극한하중으로 매우 높은 변형률(Strain Rate)을 발생시킨다. 이러한 변형률은 구조재료의 기계적 성질과 파괴거동에 변화를 줄 수 있다. 즉, 변형률을 고려하지 않으면 재료강도를 과소평가할 우려가 있다. 폭발하중은 매우 짧은 시간에 $10^2 \sim 10^4 [s^{-1}]$ 정도의 매우 높은 변형률을 지니기 때문에 짧은 시간을 고려한 변형률을 반영해야 해석의 정확도가 상승한다. 폭발은 다양한 변형속도를 받는다. 〈Fig. 3〉은 콘크리트의 응력-변형률 곡선이다. 변형속도가 큰 동적하중을 받을 때, 정적하중을 받는 콘크리트보다 더 큰 응력에 저항한다는 것을 알 수 있다.⁶⁾ AUTODYN은 높은 변형 속도와 대변위해석이 가능하고 변형률을 고려한 재료모델을 제공하는 프로그램으로 본 논문에서는 AUTODYN을 사용하여 해석을 수행하였다.



〈Fig. 3〉 Stress-Strain curve of concrete in accordance with the strain rate

본 논문에서는 폭발물과 공기를 미리 모델링하여 최대 압력을 계산한 후에 3D 구조물에 이를 맵핑하는 1D-Wedge 방법을 사용하였다. 〈Fig. 4〉는 1D-Wedge 방법을 나타낸 그림이다. 폭발 압력을 3D 구조물에 맵핑하기 전에 2D 환경에서 모델링한 폭발물과 공기이다. 이러한 Remap 기능은 3D 환경에서 모델링하는 방법보다 해석 시간이 효율적이다. 이 과정에서 공기가 모델링으로 포함되어서 공기의 경계면에서 폭발 압력이 반사될 수 있는데 이는, 실제와 다른 결과가 도출될 수 있기 때문에 경계조건 설정에 유의해야 한다. 오일러 솔버로 모델링한 대기는 경계면에 압력파의 반사가 발생하지 않도록 Flow-out 경계조건을 적용한다. E. Jo. 등 (2014)은 1D wedge 방법을 적용한 구조물의 폭발하중 모델링 기법을 검증하였다.⁴⁾ 이 모델링 기법을 본 해석에 적용하였다.



〈Fig. 4〉 1D-Wedge

3. 재료모델

3.1 콘크리트

본 연구는 AUTODYN 라이브러리에서 제공하는 RHT 콘크리트 모델을 사용하였다.⁷⁾ RHT (The Riedel-Hiermaier-Thoma) 콘크리트는 충돌, 관통, 폭발 등 해석에 주로 사용되는 재료모델이다. 프리스트레싱의 도입을 위한 콘크리트는 높은 압축강도를 가지고 크리프와 건조수축이 작은 고강도 콘크리트를 사용한다. RHT 콘크리트는 초기 상태를 삼축응력 기준으로 고려하기 때문에 과도한 강도를 갖는다. 따라서 Nystrom and Gylltoft (2009)이 수정한 모델을 적용하여 주응력에 의한 인장파괴가 발생하게 하고 균열의 영향을 고려하도록 하였다.⁸⁾

3.2 프리스트레싱

강연선은 KS D 7002 규격의 SWPC 7연선 B종 (인장강도 : $1860 N/mm^2$)을 선정하였다. 프리스트레싱 텐돈은 항복비가 커야 하고 인장 강도가 높아야 한다. 강연선은 프로그램에서 기본 물성을 제공하지 않는다. 따라서 철근과 비슷한 응력-변형률 곡선의 형상을 나타내므로 철근과 유사한 거동을 보이는 Johnson-Cook 모델을 수정한 Piecewise linear Johnson-Cook 모델에서 항복 강도를 수정하여 적용하였다.

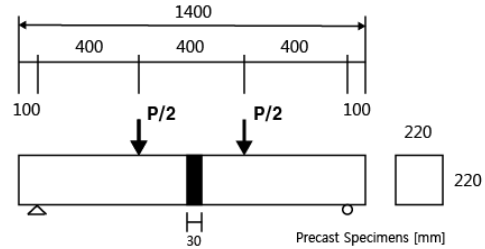
4. 폭발하중을 받는 부재의 해석

4.1 프리캐스트 부재의 모델링 기법 검증

폭발하중을 받는 프리캐스트 접합으로 이루어진 구조물의 거동에 관한 실험이 전무하고 관련 해석 데이터 또한 없기 때문에 본 논문에서는 C.H. Chung 등 (1998)이 수행한 프리스트레싱을 도입한 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판 연결부에 관한 정적실험의 결과를 사용하여 프리캐스트 부재의 모델링 방법을 검증하고자 하였다.⁹⁾ ANSYS Workbench를 사용하였다. Workbench는 AUTODYN과 서로 연동이 가능하고 사용하는 요소의 특성 또한 동일하기 때문에 정적 실험결과를 통한 모델링 방법의 검증에 위해 Workbench를 사용하였다.

<Fig. 5>는 C.H. Chung 등 (1998)의 실험 모델이다. C.H. Chung 등 (1998)의 실험은 콘크리트 강도 $350 kg/cm^2$, 충전용 모르타르 $311.7 kg/cm^2$ 을 사용하였다. 프리스트레싱 도입량은 약 $15 kg/cm^2$ 이다. 프리캐스트 부재의 접합은 콘크리트 충전 방식을 적용하고 연결부의 치수는 30mm이다. 본 해석은 콘크리트와 충전용 모르타르의 재료 모델을 설정한 후 완전히 접촉시켜 검증을 진행하였다. 실험 결과와 유사하게 해석 결과에서도 프리캐스트 접합부에서 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 정철헌 등 (1998)의 실험은 최대하중이 0.95 ton으로 측정되었고, ANSYS Workbench 해석결과는 약 1.1 ton에서 파괴하는 것으로 나타나 13.7%의 오차를 보였다. 또한 4 ton의 하중에서 변위를 비교해보면 실험에서는

약 3.8mm의 변위가 발생하였고 해석에서는 약 3.2 mm의 변위가 발생하여 약 15.8%의 오차가 발생하였다 <Table 1>. 실험과 해석의 환경적인 조건, 하중 가력 시간의 차이, 텐돈의 초기 장력 손실 등을 고려하면 수용할만한 오차라 판단된다.



<Fig. 5> Experimental model of Chung et al. (1998)

<Table 1> Summary of results

	Chung et al. (1998)	Analysis	Difference
Failure load	0.95 ton	1.10 ton	13.7%
Displacement	3.8 mm	3.2 mm	15.8%
Crack Position			

4.2 폭발해석기법의 검증

Ngo. T. 등 (2007)의 실험 결과와 비교하여 고강도 프리스트레스트 콘크리트 패널의 폭발 하중에 대한 해석 기법을 검증하였다. $2000 \times 1000 \times 100$ (mm)의 패널 부재에 6 ton의 TNT를 이격거리 30 m에 위치시키고 실험을 수행하였다. 콘크리트 압축 강도는 164.2 MPa이고, 텐돈의 극한 강도의 20%를 프리스트레싱으로 가하였으며 패널의 양 옆 방향은 단순 지지, 아래 위 방향은 자유단으로 경계조건을 적용하였다. 폭발 후, 패널의 중앙에서 최대 변형 값을 측정하여 해석 결과를 비교하였다. 패널 중간 지점에서 측정한 반사 압력과 최대 변위는 Ngo. T. 등 (2007)이 실시한 실험에서 1513 kPa, 37 mm 였고, AUTODYN 해석은 1178 kPa, 30 mm로 나타났다. 실험과 해석 결과에서 압력은 약 22%, 최대 변

위는 약 18%의 오차가 발생하였다 <Table 2>. 폭발 실험 당시의 환경 조건 또는 폭약의 형태 등이 해석 조건과 차이가 발생할 수 있으며 이러한 요인은 압력, 충격량, 변위 등에 영향을 줄 수 있기 때문에 이를 고려하면 실험과 해석 사이의 오차는 수용할 만한 것으로 판단된다.

<Table 2> Results of the analysis and experimental

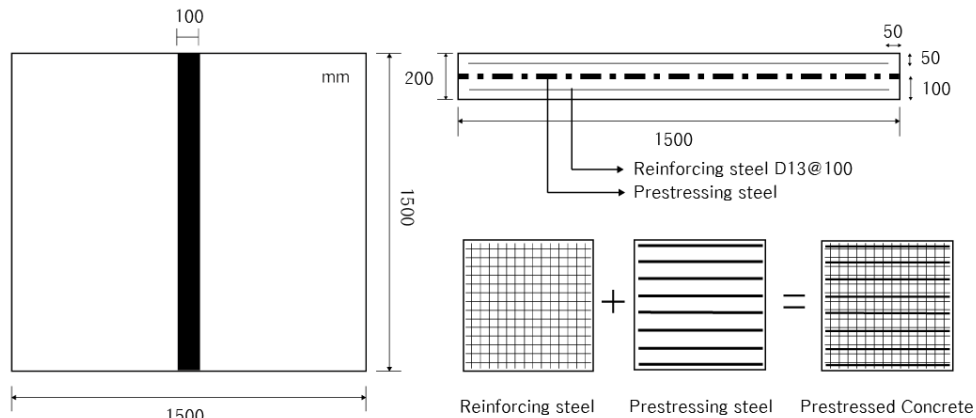
	Tuan Ngo et al. (2007)	Analysis	Difference
Pressure	1513kPa	1178kPa	22 %
The maximum displacement	37 mm	30 mm	18 %

4.3 해석 모델 및 변수

해석 모델은 <Fig. 6>과 같다. 1500×1500×200

(mm) 크기의 콘크리트 패널로 상, 하부에 철근이 배근되어 있고, 충전 연결부 치수는 100 mm 이다. 텐돈은 중앙에 150 mm 간격으로 배치하였다. 500 kg의 TNT를 이격거리 3 m 위치에 설치하여 해석을 수행하였다. 폭발을 받는 면의 중앙 지점에 게이지를 설치하여 최대 변위를 기록하였다. 폭발이 발생하면서 압력파가 패널의 후면에 더 큰 충격을 주는 것을 고려하여 Damage Contour는 패널 후면에 대해 나타내었다. 모든 해석 모델의 철근은 지름 13 mm, 항복강도 400 MPa, 배근 간격은 100 mm로 동일하게 하였다.

앞서 4.1장에서 검증한 콘크리트 충전 방식을 사용하여 프리캐스트 부재가 접합되는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 콘크리트 강도는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트에 영향을 미치는 중요한 요소로 본 해석에서는 35 MPa, 140 MPa의 두 가지



<Fig. 6> The analytical model

<Table 3> Parameter table

Variable name	Precast	Concrete Strength [MPa]	Tendon		
			Prestressing Strength [MPa]	Diameter [mm]	Spacing [mm]
Concrete	A 1	-	-	-	-
	A 1-1	-	-	-	-
	A 2	○	-	-	-
Tendon + Concrete	B 1	-	372	12.7	150
	B 1-1	-	372	12.7	150
	B 2	○	372	12.7	150
Tendon + Reinforced concrete	C 1	-	372	12.7	150
	C 1-1	-	372	12.7	150
	C 2	○	372	12.7	150

콘크리트 강도를 변수로 선정하였다. 또한 프리스트레싱의 적용 유무, 프리캐스트 적용 유무를 변수로 선정하여 해당 변수가 폭발 하중을 받는 프리캐스트 부재에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. <Table 3>에 해석 변수를 정리하여 나타내었다. 무근 콘크리트 모델을 Group A, 무근 콘크리트에 프리스트레싱을 도입한 모델을 Group B, 그리고 철근 콘크리트에 프리스트레싱을 도입한 모델을 Group C로 분류하였다. Group 1은 프리캐스트 공법을 적용하지 않은 모델이고, Group 2는 프리캐스트 공법을 적용한 모델이다. 본 해석에서는 경제적인 해석 시간을 고려하여 50×50×50 (mm)로 Mesh 크기를 선정하였다.

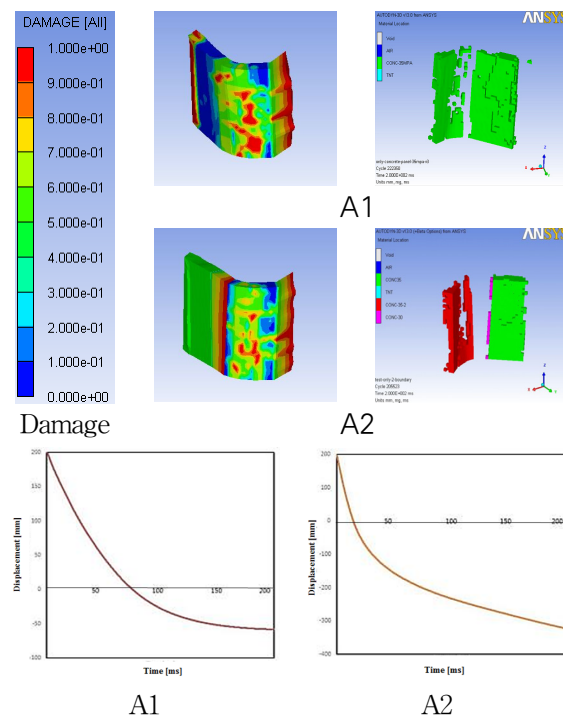
5. 해석 결과 및 분석

5.1 프리캐스트 적용 유무에 따른 결과

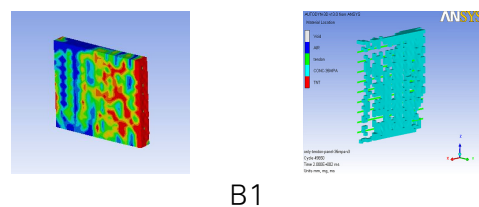
프리캐스트 적용 유무에 따른 거동을 평가하기 위해서 Group 1은 프리캐스트를 적용하지 않고, Group 2는 프리캐스트를 적용하였다. <Fig. 7> ~ <Fig. 9>에 프리캐스트 적용 유무에 따른 각 모델의 손상 정도와 파편 형상을 나타내었다. 콘크리트 패널 모델인 Group A의 35 MPa 강도인 A1과 A2는 모두 완전 파쇄 되었다. A1과 A2에서 변위가 0이 되는 시점을 완전 파괴라 가정할 때, A1은 약 70 ms, A2는 약 20 ms에서 변위가 0이 되었다. 콘크리트 모델에서 폭발하중에 대한 저항성을 비교해보면, 프리캐스트 공법을 적용한 모델이 그렇지 않은 모델보다 현저히 낮다는 것을 알 수 있다.

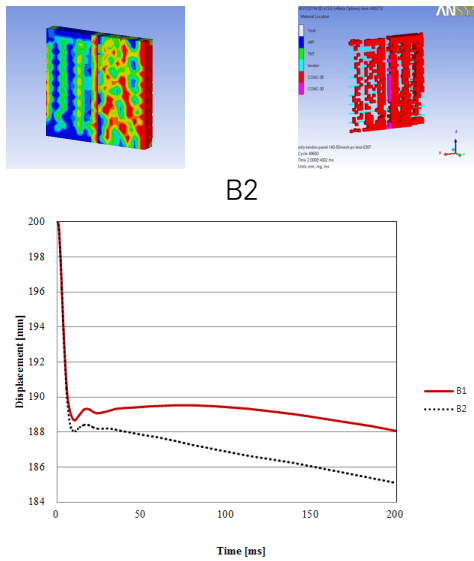
콘크리트 모델에 프리스트레싱을 도입한 Group B는 프리캐스트 적용 유무에 따라 B1과 B2의 최대 변형이 약 1 mm 정도로 미세한 차이가 발생하여 프리캐스트 공법 적용 유무가 폭발 하중에 대한 저항 성능에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 손상 정도를 비교할 때, 프리캐스트를 적용한 B2의 경우 중앙 충전재 부분의 손상 정도가 B1보다 크게 나타났다. 철근 콘크리트 모델에 텐돈을 도입한 Group C는 프리캐스트 적용 유무에 따라 C1과 C2가 최대 변형에서 약 0.7 mm 정도의 차이가 발생하였다.

즉, 프리스트레싱을 도입한 모델은 프리스트레싱력의 영향으로 인해 프리캐스트 유무에 따라 폭발 하중에 대한 저항 성능이 크게 차이나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그러나 손상 정도는 Group B와 마찬가지로 C2의 경우 충전재 부분에 손상이 집중된다는 것을 알 수 있었다. Group B, Group C를 보면 전체적으로 프리캐스트를 적용한 모델들은 적용하지 않은 모델에 비해 충전 부분에 손상이 발생하였다. 프리캐스트를 적용하지 않은 모델들은 패널의 뒷면에 손상이 분포되어 있는데 이는 폭발 압력이 분산되어 작용되었지만, 프리캐스트를 적용한 모델은 충전재 부분이 손상을 받으면서 강도가 약해지고 이로 인해 충전재 주변까지 손상이 집중되는 결과를 볼 수 있었다.

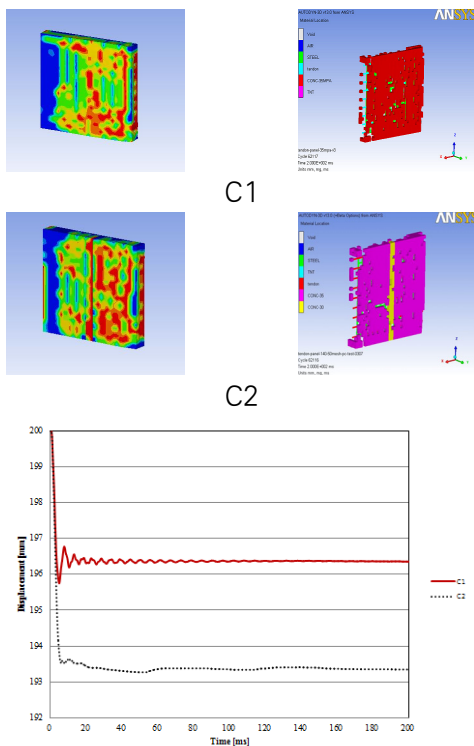


<Fig. 7> Damage Contour, Fracture geometry and Displacement of A1, A2





〈Fig. 8〉 Damage Contour, Fracture geometry and Displacement of B1, B2

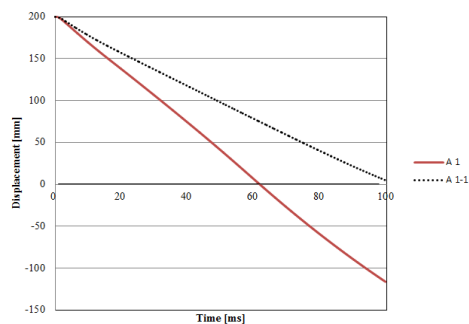


〈Fig. 9〉 Damage Contour, Fracture geometry and Displacement of C1, C2

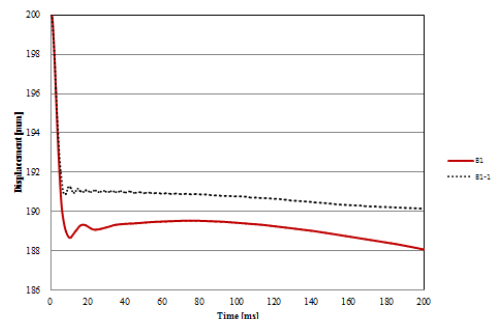
5.2 콘크리트 강도에 따른 결과

프로그램의 라이브러리에서 제공하는 기본 물성인 RHT 콘크리트 35 MPa, 140 MPa 강도를 선정하여 해석을 수행하였다. 변위가 0이 되는 시점을

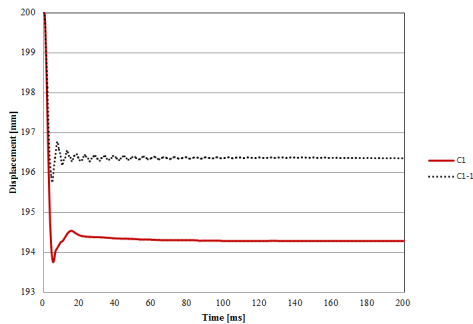
완전히 파괴되는 시점이라고 가정할 때, A1은 62 ms, A1-1은 100 ms에서 변위가 0이 되는 것으로 나타났다 <Fig. 10>. 콘크리트 모델에 프리스트레싱을 도입한 Group B의 경우, 약 7 ms에서 35 MPa 강도인 B1은 약 12 mm 변형, 140 MPa 강도인 B1-1은 약 9.8 mm의 변형이 발생하였으며 해석 종료 시까지 약 1 mm 정도의 변형이 지속되었다. 콘크리트 강도에 따라 약 2.2 mm 차이가 발생하였다 <Fig. 11>. 철근 콘크리트에 프리스트레싱을 도입한 Group C는 콘크리트 강도에 따라 약 2 mm의 차이가 발생하였다. 35 MPa 강도인 C1은 5.4 ms에서 약 6 mm, 140 MPa 강도인 C1-1은 4.8 ms에서 약 4 mm의 변형이 발생하였다 <Fig. 12>. Group C가 Group B보다 최대 변형 값에서 약 5mm 작은 것으로 나타났으며 최대 변형이 발생한 후에 변형의 회복 없이 변형을 유지하는 것을 볼 수 있었다. 이는 철근 콘크리트에 프리스트레싱을 도입한 모델 (Group C) 이 콘크리트에 프리스트레싱을 도입한 모델 (Group B) 보다 폭발 하중에 대한 저항 성능이 뛰어나다는 것을 알 수 있다.



〈Fig. 10〉 The displacement of the Group A corresponding to the concrete strength



〈Fig. 11〉 The displacement of the Group B corresponding to the concrete strength



〈Fig. 12〉 The displacement of the Group C corresponding to the concrete strength

6. 결론

본 연구에서는 폭발 하중을 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동을 해석을 통해 평가하고자 하였으며 이를 위해 프리캐스트 적용 유무, 프리스트레싱 도입 유무, 콘크리트 강도를 변수로 해석을 수행하였다.

1. 프리캐스트를 적용하지 않은 모델은 폭발 압력이 패널 뒷면에 전체적으로 퍼지며 손상이 골고루 분포되었지만, 프리캐스트를 적용한 모델은 충전재를 통해 접합된 접합부에 손상이 집중되었다.

2. 폭발 하중을 받는 패널의 거동은 철근과 텐던 적용 여부에 영향을 받지만, 콘크리트 강도에 따라 35 MPa을 적용한 모델은 140 MPa을 적용한 모델보다 약 2~2.2 mm의 변위가 더 발생하였다. 특히, 철근과 텐던의 영향을 받지 않은 콘크리트 모델은 35 MPa 적용 모델이 확연히 빠르게 파괴되었다.

3. 프리스트레싱을 도입한 모델(Group B, Group C)은 프리캐스트 적용 유무, 콘크리트 강도에 따른 변위에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 프리스트레싱을 도입한 부재는 4~7 ms 내에 최대 변형이 발생한 후, 해석 종료 시간까지 변형을 유지하였다. 프리스트레싱을 도입하지 않은 Group A의 콘크리트 모델은 해석 종료 시간까지 변형이 발생하였다.

4. 즉, 콘크리트 강도 보다는 프리스트레싱력이 폭발저항성능 향상에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013R1A2A2A01067754).

References

1. Ngo. T., Mendis. P., "Behavior of ultra high-strength prestressed concrete panels subjected to blast loading", *Journal of Structural Engineering*, 133(11), pp.1582-1590, 2007
 2. Cramsey. N., Naito. C., "Analytical Assessment of the Blast Resistance of Precast, Prestressed Concrete Components", *PCI Journal*, 52(6), pp.67-80, 2007
 3. R.A.Hawileh, A.Rahman, H.Tabatabai, "Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-column connection subjected to cyclic loads", *Applied Mathematical Modeling*, 34(9), pp.2562-2583, 2010
 4. E. Jo., M.S. Kim., J.Y. Park., Y.H. Lee., "Behavior of Prestressed Concrete Panels under Blast Load", *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27(2), pp.11-18, 2014
 5. TM 5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons", U.S.Department of the Army, Washington DC, 1986
 6. Department of the Army, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", TM 5-130, 1990
 7. ANSYS (2005) AUTODYN Theory Manual, Century dynamics.
 8. Nyström U., Kent Gylltoftgo., "Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading", *International Journal of Impact Engineering*, 36(8), pp.995-1005, 2009
 9. C,H. Chung, Y,J. Kim, S,W. Kim, C,L. Park., "Static Tests on Transverse Joints of Precast Prestressed Concrete Bridge Deck", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(2), pp.109-117, 1998
- Received : December 04, 2014
 - Revised : January 06, 2015
 - Accepted : January 13, 2015