

주철근의 개수 및 단면비에 따른 폭발하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석적 연구

Parametric Study on Reinforced Concrete Columns under Blast Load

최 호 순* 김 민 숙** 이 영 학†
Choi, Hosoon Kim, Min-Sook Lee, Young-Hak

요 지

기둥은 건물에서 하중을 지지하는 중요한 구성요소이므로 기둥의 손상 또는 파괴는 건물의 연쇄붕괴의 원인이 된다. 특히 폭발하중에 의한 기둥의 거동평가는 연쇄붕괴 방지에 있어 중요한 요소이다. 본 논문에서는 축하중을 받고 있는 기둥이 폭발하중을 받을 때의 거동과 폭발 저항성을 평가하였다. 이를 위해 동일단면적과 비슷한 철근비를 가지는 기둥에서 주철근의 개수를 달리하여 각 변수에 따른 폭발하중에 대한 폭발 저항성을 평가하였다. 또한, 동일한 성능을 지니는 기둥에서 단면비를 달리하여 기둥의 폭발 저항성을 비교하였다. 해석결과, 폭발 직후 충격량에 대한 수직 변형률은 철근의 개수 및 단면비에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 수평변형의 경우 폭발압력을 받는 면의 철근 개수가 증가함에 따라 기둥의 저항능력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 기둥 단면의 단면 2차모멘트가 클수록 폭발하중에 대한 저항 성능 및 복원력이 더 큰 것을 확인하였다.

핵심용어 : 철근콘크리트, 기둥, 폭발하중, 잔류변형, 전산유체해석

Abstract

Columns are the key elements supporting load in structure. Column failure causes the structure to collapse. It is important to evaluate residual strength for damaged columns under blast load for preventing progressive collapse. In this paper, columns were investigated to compare the blast resistance on the change of the number of steel bars within the range of reinforcement ratio. And this study was carried out 4 different analytical models to evaluate effects of aspect ratio. The results indicate that the vertical strain was unaffected by the number of steel bars and aspect ratio. As the number of steel bars facing blast load increase, the blast resisting capacity of the columns was improved in the lateral strain. Also, the analysis results showed that a large moment of inertia of area, as compared to a small one would be superior in residual strength as well as force of restitution.

Keywords : reinforced concrete, column, blast load, residual strain, computational fluid-dynamic

1. 서 론

현대 도시는 건물들이 밀집되고 고층화됨에 따라 이상극한 하중에 대한 건물의 연쇄붕괴에 대한 우려가 커지고 있다. 이상극한하중에 의한 건물의 국부적인 손상 및 연쇄붕괴에 대한 연구는 1968년 발생한 Roman Point Apartment 붕괴 사고를 기점으로 본격적으로 진행되기 시작하였다. 이 사건은 22층 프리캐스트 건물의 18층에서 발생한 가스폭발로

외부 벽 패널이 무너지고 상부바닥이 낙하하면서 건물 모서리 부분이 연쇄적으로 붕괴된 사건이다. Roman Point Apartment 사건 이후 2001년 세계무역센터 붕괴 사건은 이상극한하중 하의 구조물의 연쇄붕괴 및 거동을 평가하는 연구의 중요성을 더욱 높이는 계기가 되었다.

국외, 특히 미국에서는 연쇄붕괴를 방지하기 위한 대책으로 GSA(General Service Administration)와 DoD(Department of Defense)의 가이드라인을 제시하고 있다.

† 책임저자, 정회원 · 경희대학교 건축공학과 교수
Tel: 031-201-2864 ; Fax: 031-204-3815
E-mail: leeyh@khu.ac.kr

* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 석사과정

** 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

GSA와 DoD에서 제안하고 있는 방법은 대체하중경로법 (Alternative Load Path Method)으로, 이는 이상극한하중에 의해 일부 부재가 심한 손상을 입거나 파괴가 되었을 때 그 부재를 제외한 나머지 부재들이 손상을 입거나 파괴가 된 부재가 부담하던 하중의 전달이 가능한지 판단하는 방법이다. 이와 같이 국외에서는 연쇄붕괴 방지 및 방폭성능 향상을 위한 가이드라인이 제시되어 있는 반면에 국내에는 건축물 테러예방 설계 가이드라인 및 초고층 건축물 가이드라인의 준비단계에 있다. 그러나 국외에서 제시하고 있는 가이드라인도 군사적 개념을 반영한 보호수준이고, 대체하중경로법 적용시 기둥 일부를 제거하고 나머지 구조부재는 손상이 없는 것으로 가정하기 때문에 이상극한하중을 받는 건물의 실제 구조거동과 크게 다를 수 있다는 한계가 있다.

연쇄붕괴를 방지하기 위한 대책으로는 대체하중경로법 외에도 부재의 저항성능을 높이는 방법이 있다. 국외에서 진행되고 있는 부재의 저항성능을 높이는 연구에 대한 사례는 FRP를 부착한 철근콘크리트 건물의 폭발 저항성능에 관한 연구(Crawford 등, 2001)가 있다. Astaneh-Asl(2003)는 폭발하중을 받은 외부기둥이 제거되더라도 슬래브의 연쇄붕괴를 방지할 수 있도록 바닥 슬래브에 설치된 케이블에 의한 건물보강 기술을 제시하였다. Tuan Ngo 등(2007)은 폭발하중을 받는 고강도 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동에 관한 실험적 연구를 실시하였다. Carriere 등(2009)은 폭발하중을 받는 steel polymer로 보강된 철근콘크리트 기둥에 관한 연구를 통해 steel polymer를 보강한 기둥이 보강하지 않은 기둥에 비해 그 성능이 향상됨을 규명하였다.

국내에서는 이경구 등(2010)이 폭발하중을 받는 강재 기둥의 잔여 저항성능을 해석적으로 평가하였고, 이나현 등(2009)은 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동을 분석하였다. 김한수 등(2010)은 단면 형상에 따른 철근콘크리트 기둥의 폭발 저항성능을 평가하였다. 그리고 김한수 등(2011)은 콘크리트 충전강관기둥(CFT)의 폭발 저항성능을 평가하였다. 이와 같이 폭발하중을 받는 부재의 저항성능을 향상시키는 방법에 관한 연구가 최근들어 활발히 시작되고 있으나, 폭발하중을 받은 이후 부재의 폭발 저항성능에 관한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서 비선형 동적해석이 가능한 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 폭발하중을 받아 손상을 입은 기둥의 폭발 저항성능을 평가하고자 한다.

본 논문에서는 철근콘크리트 기둥의 주철근 개수 및 단면비가 기둥의 폭발 저항성능에 미치는 영향을 평가하기 위해, 동일한 단면에 비슷한 철근비를 가지는 기둥의 철근 개수를 달리한 것과 동일한 성능을 가지는 기둥의 단면비를 달리한 두 가지 변수를 고려하여 해석을 수행하였다.

2. 폭발하중

2.1 폭발하중의 특징

폭발은 빠르고 급격한 에너지의 방출을 의미한다. 폭발물의 폭발속도는 매우 빠르고 큰 특징이 있는데 일반적인 경우 4,000~8,400m/s 범위이며, 대표적인 폭발물인 TNT의 폭발속도는 약 6,900m/s로서 일반적인 정적하중에 비해 매우 크고 빠르다. 한편, 매우 짧은 시간동안 작용하는 하중이므로 시간에 종속되지 않는 특징이 있다.

그림 1은 폭발에 의한 압력-시간 이력곡선이다. 여기서, t_A 는 충격전단이 표적에 도달하는 시간, t_0 는 정압 지속시간, t_0^- 는 부압 지속시간을 나타낸다. t_A 이후 매우 짧은 시간동안 생성된 입사압력은 서서히 감소하게 되고 t_A+t_0 에서 대기압과 동일하게 된다. 그 이후 입사압력은 서서히 감소하여 대기압보다 작아지는 단계가 된다. t_A 와 t_A+t_0 사이의 압력을 정압단계라 하고, 정압단계 이후 대기압보다 낮아지는 단계를 부압단계라 한다. 이 부압단계에서 바람의 방향이 바뀌게 된다. 부압단계의 최대압력은 정압단계에 비해 작기 때문에 일반적으로 폭발하중에 대한 설계시 이 부압력은 고려하지 않는다. 그림 1에 나타난 정압단계에 대한 적분값인 정압충격량이 구조 설계시 충격량을 지칭하는 값이다. 이러한 충격

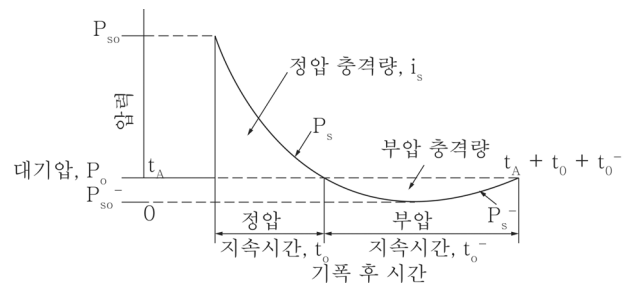


그림 1 폭풍파의 압력 - 시간 곡선 (TM 5-855-1, 1986)

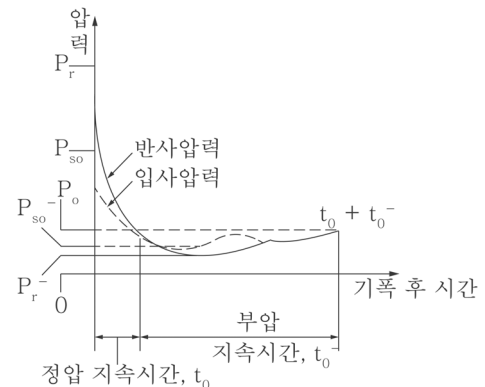


그림 2 반사파의 압력과 시간 관계(TM 5-855-1, 1986)

파가 건물과 같은 장애물을 만나게 되면 반사압력이 발생한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 반사압력은 입사압력과 비슷한 형태를 가지나 더 큰 최대압력을 가진다. 입사파가 장애물과의 충돌에 의해 반사파로 흘러나갈 때 반사파의 크기는 감소하게 된다. 이때, 최대 반사압력은 식 (1)과 같이 최대 입사압력에 반사압력 계수를 곱하여 구해진다(TM 5-855-1).

$$P_r = C_{ra} P_{so} \tag{1}$$

여기서, P_r 은 최대 반사압력을 나타내고, C_{ra} 는 반사압력 계수, P_{so} 는 최대 입사압력이다.

2.2 폭발하중의 모델링

AUTODYN에서 폭발물을 모델링하여 직접 폭약을 폭발시키는 방법으로 해석을 수행할 경우, 폭발 후 폭발압력이 공기 중으로 일부분 팽창하는 동안 나머지 Lagrange들은 메모리만 차지하게 된다. 반면, 화약 remapping 방법은 해석 이전에 공기와 화약만 미리 모델링하고, 화약을 폭발시켜 일정거리까지의 에너지 즉, 팽창력을 가진 공기를 계산하고, 이 데이터를 옮겨와서 팽창 에너지를 가진 공기만 가지고 해석을 수행한다. 본 연구에서는 AUTODYN에서 해석의 시간적 효율성을 높이기 위해 1D-Wedge를 이용한 remap 기능을 사용하였다.

그림 3은 1D-Wedge를 통해 압력파를 해석한 모습이다. 폭발하중 모델의 타당성을 확인하기 위해 Carriere 등(2009)의 실험과 동일하게 폭발하중을 모델링하였다. C4 15kg을 2m 거리까지 화약과 공기만을 미리 모델링하고, 압력파가 공기의 최대 거리 2m에 이를 때까지 해석을 수행하였다.

1D-Wedge 해석 후 공기에 remapping을 하여 해석을

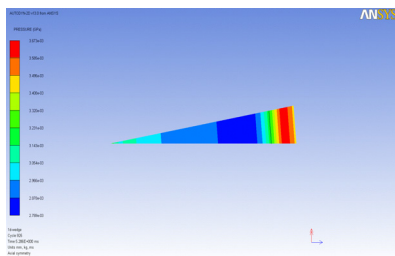


그림 3 1D-Wedge를 이용한 압력파

표 1 최대압력 해석결과 및 비교

방 법	최대압력	실험값 대비 해석값의 최대압력 비율
Carriere 등(2009)의 실험	1620kPa	1.00
ConWEP	1759kPa	1.09
AUTODYN	1685kPa	1.04

수행 한 결과, 표 1에서 보는 바와 같이 AUTODYN에서 해석한 압력값은 ConWEP과 비교했을 때 약 5%, 그리고 Carriere 등(2009)의 실험에서 측정한 최대압력과 비교했을 때 약 4%의 오차를 보였다. 따라서 본 연구의 해석에 사용될 폭발하중의 모델링이 타당한 것으로 사료된다.

3. 수치해석모델

3.1 재료 모델

폭발하중을 받는 구조물의 거동을 해석하기 위해서는 일반적으로 정적하중을 받는 부재와 동적하중을 받는 부재는 서로 다른 거동을 하고 있다는 특성이 반영되어야 한다. 그림 4는 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선 변화를 나타내는 그래프이다. 그래프에서 보이는 바와 같이 변형속도가 큰 동적하중을 받을 때 동일한 변형률에서 더 큰 응력에 저항함을 알 수 있다. 이는 동적하중의 변형속도가 재료의 변형속도보다 상대적으로 빨라 재료가 파괴되기 이전에 항복점과 극한 응력에 도달하기 때문이다.

현재 이러한 동적하중을 받는 콘크리트 재료모델을 제공하고 있는 상용해석 프로그램으로는 AUTODYN 및 LS-DYNA 등이 있다. 본 연구에서는 충격 및 관통, 탄두 해석, 폭발과 압력파에 대한 영향 평가 등의 해석에 폭넓게 사용되고 있는 AUTODYN을 해석 프로그램으로 사용하였다.

본 연구에서 사용된 콘크리트의 물성으로는 AUTODYN에서 제공하는 압축강도 35MPa의 RHT 콘크리트를 사용하였다. RHT 콘크리트는 폭발, 충돌의 해석에 주로 사용되는 모델로, 인장에 약하여 작은 변형에도 파괴되는 반면 압축력의 증가에 따라 콘크리트 강도가 증가하는 현상을 나타낸다.

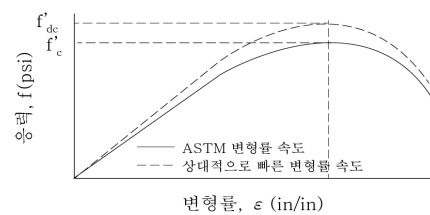


그림 4 변형률속도에 따른 콘크리트의 응력-변형률 곡선 (TM 5-130, 1990)

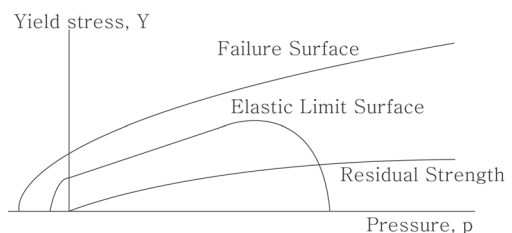


그림 5 RHT 콘크리트의 압력-항복응력 그래프

그림 5는 RHT콘크리트의 파괴면, 탄성 파괴면과 잔류 강도 상태를 항복응력과 압력에 따라 나타낸 그래프이다.

먼저, 파괴면은 콘크리트의 압축강도, 인장강도와 전단강도를 포함하는 물성치에 의해 형성된다. 파괴면의 압력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{fail} = Y_{TXC(p)} \cdot R_3(\theta) \cdot F_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (2)$$

여기서, Y_{fail} 은 파괴면의 응력, θ 는 콘크리트 입자 사이의 각도, $Y_{TXC} = f_c [A(p^* - p_{spall}^* F_{RATE(\dot{\epsilon})})^N]$, f_c 는 압축강도, A는 파괴면의 상수, N은 파괴면의 지수, p^* 는 f_c 에 의해 표준화된 압력, $p_{spall}^* = p^*(f_t/f_c)$, $F_{RATE(\dot{\epsilon})}$ 는 변형률 속도 함수, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도, $R_3(\theta)$ 는 모델의 세 번째 불변식을 나타낸다.

초기 탄성 한계 파괴면은 인장 및 압축 파괴면을 따라 형성되다가 갑자기 압착되는 형태로 탄성 한계 파괴면은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{elastic} = Y_{fail} \cdot F_{elastic} \cdot F_{CAP(p)} \quad (3)$$

여기서, $Y_{elastic}$ 은 탄성 한계 파괴면의 압력, $F_{elastic}$ 은 탄성 강도의 파괴면 강도에 대한 비, $F_{CAP(p)}$ 은 정수압력 상태에서 탄성편차 응력을 제한하는 함수이다.

잔류 파괴면은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{resid}^* = B^* p^{*M} \quad (4)$$

여기서, B는 잔류파괴면 상수, M은 잔류파괴면 지수를 나타낸다.

Nyström 등(2009)에서는 실제와 유사한 동적거동을 표현하기 위하여 AUTODYN 라이브러리에서 제공하는 35MPa-RHT 콘크리트 모델의 삼축응력 상태를 주인장응력을 기준으로 수정하여 사용하였다. 본 연구에서는 표 2와 같이 Nyström 등(2009)이 수정한 재료모델과 AUTODYN 라이브러리에서 제공하는 재료모델을 A-D22-8-1.94 변수에 적용하여 최대변형과 잔류변형을 비교하였다. 그 결과

표 2 콘크리트 물성치

압축강도	35MPa
인장강도	3.5MPa
전단강도	6.3MPa
압축변형률	0.032
인장변형률	0.036
밀도	2314kg/m ³
푸아송비	0.17

Nyström 등(2009)의 재료모델을 적용한 기둥의 최대변형은 0.21mm였고 AUTODYN 라이브러리에서 제공하는 재료모델을 적용한 기둥의 최대변형은 0.22mm였다. 잔류변형은 0.02mm로 동일한 값을 보였다. 두 기둥의 최대변형과 잔류변위는 근소한 차이를 보여 본 연구에서는 AUTODYN 라이브러리에서 제공하는 재료모델을 사용하였다.

3.2 해석 모델 및 변수

본 연구에서는 폭발하중을 받는 기둥의 변형과 연직하중에 대한 잔류저항성을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 5MPa의 축하중을 받는 기둥으로 가정하였다.

그림 6에서와 같이 폭발하중을 가하기 전 5MPa의 일정한 크기의 축하중을 가하고, 폭발에 의해 이상극한하중을 받은 기둥이 폭발 후에도 일정한 하중을 받을 때의 잔류 저항성을 주철근의 개수와 기둥의 단면비를 변수로 해석하였다.

기둥으로부터 3m 떨어진 거리에서 50kg의 TNT 폭발물을 설치하였으며, 지면으로부터 1400mm 이격시켰다. 공기의 메쉬(mesh)는 100mm×100mm×100mm, 기둥의 메쉬는 10mm×10mm×25mm인 직사각형 솔리드로 구획하였다. 경계조건은 양단 고정단을 기본으로 설정하였지만 축방향 하중에 의한 압축력을 고려하기 위해 축방향에 대한 변위는 구속하지 않았다. Interaction에 대한 contact 조건은 철근과 콘크리트 사이의 경계면은 External gap을 사용하여 최소한의 이격만을 고려하였고, 공기와 콘크리트 사이의 경계면은 fully coupled를 가정하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 폭발하중에 대한 저항성을 평가하기 위해서 두 그룹으로 나누어 해석을 수행하였다. 그룹 A는 동일한 단면과 비슷한 철근비를 갖는 기둥에서 철근의 직경을 달리

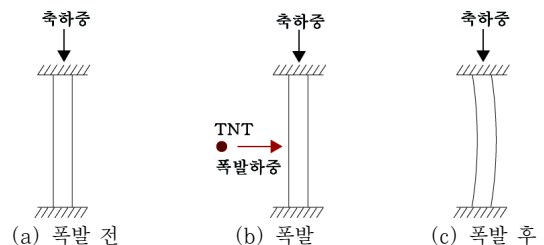


그림 6 해석수행 절차

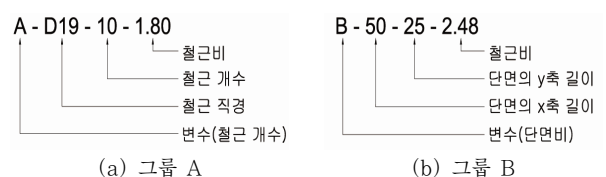


그림 7 변수명 표기

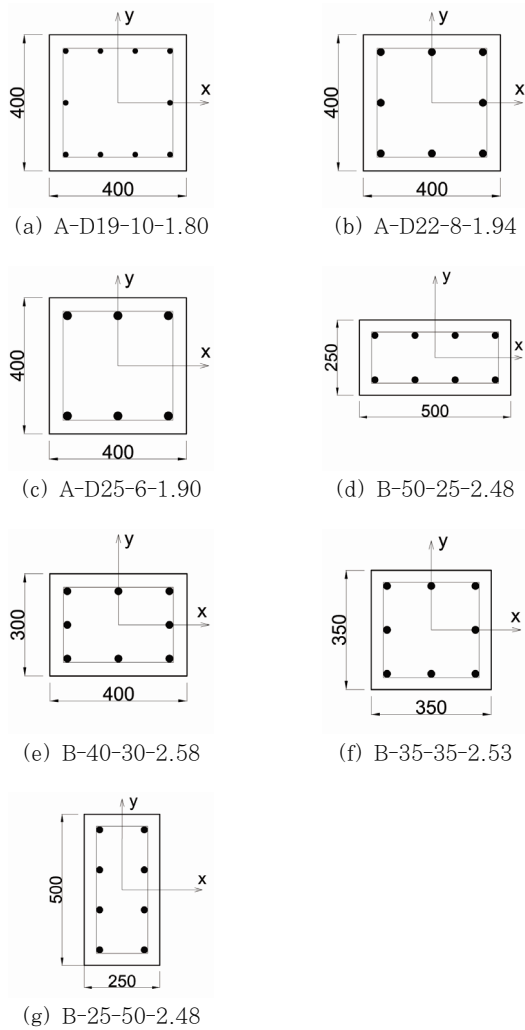


그림 8 각 변수에 따른 기둥 단면

하였고, 그룹 B는 동일한 성능을 지니는 기둥의 단면비를 달리하였다. 표 3은 해석에 사용된 변수를 나타내고 있으며 그림 7은 변수명의 표기방법을, 그림 8은 각 변수에 해당하는 기둥의 단면을 나타낸 것이다. 띠철근은 그림 9에서 보는 바와 같이 D13 철근을 단부에는 80mm 간격으로 중앙부에는 160mm 간격으로 동일하게 배근하였다.

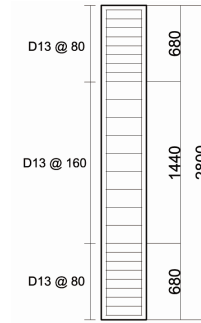


그림 9 띠철근 배근

4. 해석결과 및 분석

축하중은 기둥의 전단강도를 증가시켜 그림 10에서 보는 바와 같이 축하중을 받지 않는 기둥에 비해 최대변형과 잔류변형을 줄이는 역할을 한다. 하지만 축하중을 받지 않고 폭발 하중만을 받은 기둥의 최대변형이 45.63mm이고 잔류변형이 35.40mm로 최대변형대비 잔류변형의 비가 0.78인데 비해 축하중을 받고 있는 기둥의 최대변형은 40.30mm, 잔류변형이 29.66mm로 최대변형대비 잔류변형의 비는 0.74이다. 이는 최대변형이 발생된 직후 원상태로 돌아오려는 복원력이 축하중을 받고 있는 기둥이 더 우수한 것으로 나타났다.

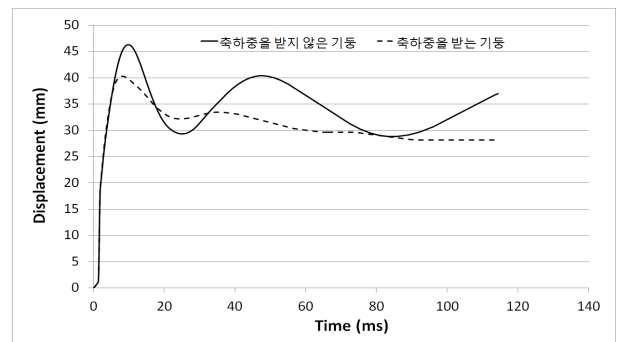


그림 10 축하중 유무에 따른 수평변위 - 시간 그래프

표 3 주철근 개수와 단면비에 따른 변수 Table

변수 종류	변수명	기둥의 단면 크기 (mm × mm)	기둥의 높이 (mm)	주근	철근비	단면비	단면 2차 모멘트, I_x (mm ⁴)	P_n (kN)
주철근 개수	A-D19-10-1.80	400 × 400	2800	10 - D19	1.80%	1	2.1×10^9	5821.5
	A-D22-8-1.94	400 × 400	2800	8 - D22	1.94%	1	2.1×10^9	5906.6
	A-D25-6-1.90	400 × 400	2800	6 - D25	1.90%	1	2.1×10^9	5885.6
단면비	B-50-25-2.48	500 × 250	2800	8 - D22	2.48%	0.5	6.5×10^8	4865.3
	B-40-30-2.58	400 × 300	2800	8 - D22	2.58%	0.75	9.0×10^8	4791.0
	B-35-35-2.53	350 × 350	2800	8 - D22	2.53%	1	1.3×10^9	4791.0
	B-25-50-2.48	250 × 500	2800	8 - D22	2.48%	2	2.6×10^9	4865.3

4.1 철근 개수에 따른 잔류 저항성능

표 4는 동일단면에서 비슷한 철근비를 갖는 기둥의 철근의 개수를 달리할 때 폭발하중에 대한 기둥의 최대변형과 잔류변형을 비교한 표이다. 해석수행 중 변수 A-D19-10-1.80와 A-D25-6-1.90은 축에 따라 철근의 수가 달라지기 때문에 X축을 기준으로 해석을 수행하였다.

표 4와 그림 11은 비슷한 철근비에서 철근의 개수를 달리한 철근콘크리트 기둥의 최대변형과 잔류변형을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 철근비가 일정할 때 최대변형은 0.21mm~0.22mm로 일정한 값을 나타내는데 비해 잔류변형은 D19를 10개 배근했을 때 0.07mm로 가장 작게 나타났고, D25로 6개 배근했을 때 0.10mm로 가장 크게 나타났다. 이는 폭발하중에 저항하고 있는 면의 주철근이 3개인 A-D19-10-1.80과 A-D22-8-1.94가 주철근이 2개인 A-D25-6-1.90보다 짧은 시간에 작용하는 횡하중에 대해 더 잘 저항하고 최대변형대 잔류변형비의 비가 가장 작아 복원력 또한 우수함을 보여준다. 즉, 폭발하중에 면하는 철근 수의 증가가 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키는 것으로

표 4 폭발하중을 받은 기둥의 철근개수에 따른 기둥 중심 위치에서의 변위 비교

변수명	주철근	철근비	최대 변형 (mm)	잔류 변형 (mm)	최대변형대 잔류변형의 비
A-D19-10-1.80	10 - D19	1.80%	0.22	0.07	0.33
A-D22-8-1.94	8-D22	1.94%	0.21	0.02	0.10
A-D25-6-1.90	6-D25	1.90%	0.22	0.10	0.47

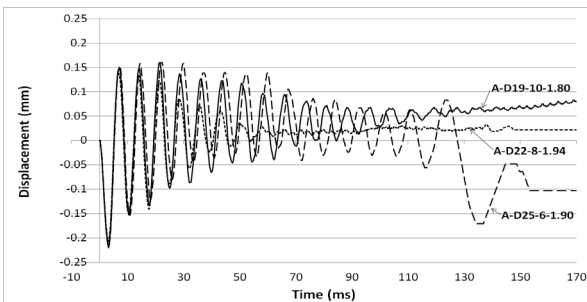


그림 11 철근 개수에 따른 수평변위 - 시간 그래프

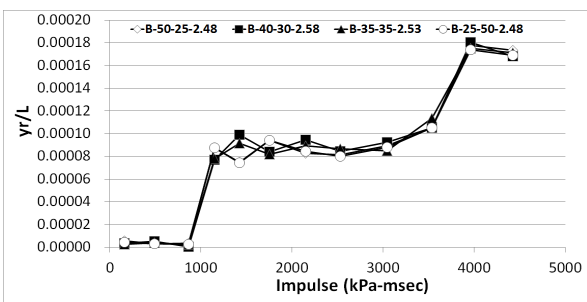


그림 12 철근 개수에 따른 수직변형률-충격량 그래프

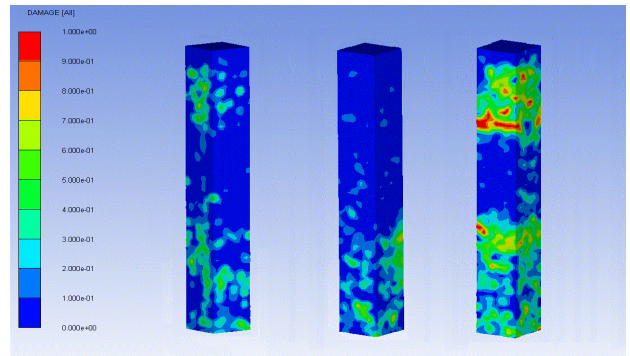


그림 13 주철근이 각각 10-D19, 8-D22, 6-D25 (왼쪽으로부터)일 때 Damage Contour

나타났다.

그림 12는 철근비에 따른 폭발 직후 충격량에 대한 수직 변형률을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 주철근의 직경이 다른 세 기둥은 폭발 직후 받은 폭발압력에 유사한 거동을 하는 것을 알 수 있다. 즉, 동일한 양의 폭발물을 일정한 거리에서 폭발시켰을 때, 철근비가 일정한 기둥의 초기거동은 철근의 직경과 개수에 관계가 없이 유사한 거동을 가진다고 사료된다.

그림 13은 TNT 50kg이 폭발한지 0.2초가 경과했을 때 주철근이 다른 기둥의 손상정도를 보여주고 있다. 그림에서 나타나듯이 A-D25-6-1.90 기둥의 손상정도는 A-D19-10-1.80과 A-D22-8-1.94 기둥에 비해 더 큰 것을 볼 수 있다.

4.2 단면형상에 따른 기둥의 잔류 저항성능 분석

표 5는 동일한 성능을 가지는 철근콘크리트 기둥의 단면비를 달리함에 따른 철근콘크리트 기둥의 폭발 저항성능을 비교한 표이다. 철근비는 동일하게 하고 단면을 변화시켜 동일한 성능을 지니는 기둥을 비교하였다.

표 5와 그림 14의 그래프에서 단면비를 변화시켰을 때 단면비가 2인 B-25-50-2.48 기둥의 최대변형이 0.05mm로 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 폭발하중에 대해 폭이 좁고 깊이가 깊은 단면을 가지고 있어 단면 2차 모멘트가 가장 커 강성이 우수하여 최대변형이 가장 작은 것으로 판단된다. 한편, B-50-25-2.48 기둥은 단면 2차 모멘트가 가장 작은 값을 가져 최대변형이 가장 큰 것으로 판단된다. 즉, 같은 성능 단면의 기둥에서 최대변형은 폭발하중을 받는 축에 대해 단면 2차모멘트가 큰 단면이 폭발하중에 저항하는 능력이 우수한 것으로 판단된다.

잔류변형 또한 단면 2차 모멘트에 영향을 받는 것으로 확인되었다. 단면 2차 모멘트가 가장 큰 B-25-50-2.48 기둥의 잔류변형이 0.01mm로 가장 작게 나타났고, 단면 2차 모멘

표 5 폭발하중을 받은 기둥의 단면비에 따른 기둥 중심 위치에서의 변위 비교

변수명	단면	단면비	최대 변형 (mm)	잔류 변형 (mm)	최대변형대 잔류변형의 비
B-50-25-2.48	500×250	0.5	0.63	전단파괴	-
B-40-30-2.58	400×300	0.75	0.23	0.08	0.34
B-35-35-2.53	350×350	1	0.09	0.02	0.18
B-25-50-2.48	250×500	2	0.05	0.01	0.08

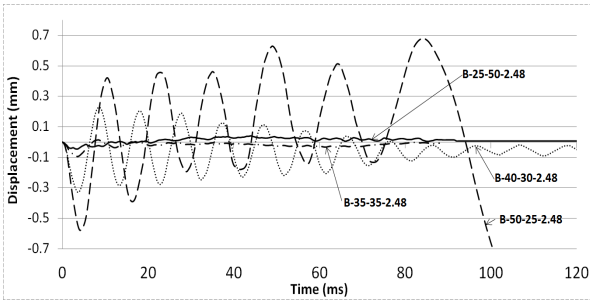


그림 14 단면비에 따른 수평변위-시간 그래프

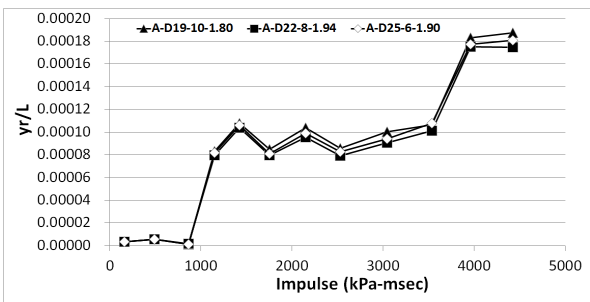


그림 15 단면비에 따른 수직변형률-충격량 그래프

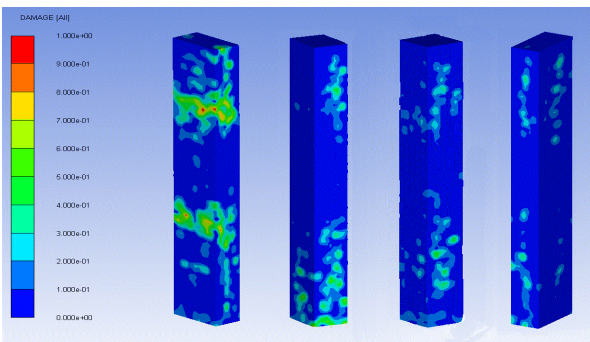


그림 16 단면비가 각각 0.5, 0.75, 1, 2 (왼쪽으로부터)일 때 Damage Contour

트가 가장 작았던 B-50-25-2.48 기둥에서는 90ms이후에 전단파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 성능을 지닌 철근콘크리트 기둥에서 최대변형과 잔류변형은 모두 기둥 단면의 단면 2차모멘트에 영향을 받는다고 판단된다.

그림 15는 단면비에 따른 폭발직후 충격량에 대한 수직변형률을 나타낸 그래프이다. 1000~2500kPa-msec 범위에서 각 변수별 변형률이 최대 0.00004 정도 근소한 차이를

보이지만 2500kPa-msec 이후 비슷한 거동을 보인다. 이 차이는 각 변수별 철근비의 근소한 오차로 인한 것으로 사료되며, 그래프에서 보는 바와 같이 단면비를 달리한 네 기둥 모두 폭발직후 초기 충격량에 대해 비슷한 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 폭발하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 초기 거동은 기둥의 단면형상과 관계가 없다고 판단된다.

그림 16은 TNT 50kg이 폭발한지 0.1초가 경과했을 때 단면비에 따른 기둥의 손상정도를 보여주고 있다. 단면 2차모멘트가 큰 B-25-50-2.48 기둥에 비해 단면 2차모멘트가 작은 B-50-25-2.48 기둥의 손상정도가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 폭발하중을 받은 기둥의 잔류 저항성능을 유한요소해석을 수행하여 평가하였다. 동일한 단면에서 비슷한 철근비를 갖는 철근콘크리트 기둥을 대상으로 철근의 개수를 달리하여 최대변형과 잔류변형을 비교하였고, 동일한 성능을 가지는 철근콘크리트 기둥의 단면비를 변화시켜 기둥의 잔류 저항성능을 비교하였다. 본 연구를 통해 구해진 결론은 다음과 같다:

- 1) 폭발하중 모델검증을 통하여 Carriere 등(2009)의 실험결과와 유한요소해석의 결과값이 유사함에 따라 본 연구의 해석방법이 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.
- 2) 주철근의 개수에 따른 철근콘크리트 기둥의 폭발 저항성능을 평가하고자 동일한 단면에서 비슷한 철근비를 갖는 철근콘크리트 기둥의 철근의 직경과 개수를 달리하여 해석을 수행하였다. 세 변수를 해석한 결과 폭발하중에 저항하는 면의 주철근의 수가 증가할수록 최대 변형값과 잔류 변형값이 감소함을 알 수 있었다. 이는 폭발하중에 저항하는 면의 철근의 수가 증가할수록 폭발 저항성능을 향상시키는 효과를 가져온다고 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 이상극한하중과 같은 짧은 시간동안 받는 횡하중에 대한 철근콘크리트 기둥의 단면비의 영향을 고려하여 기둥의 폭발 저항성능을 비교하였다. 동일한 성능을 지니는 철근콘크리트 기둥의 최대변형은 기둥의 단면 2차 모멘트가 클수록 최대 변형값과 잔류 변형값이 작게 나타났다. 즉, 단면 2차 모멘트가 클수록 잔류 변형값이 작아지고 복원력이 향상되어 폭발 저항성능을 향상시킨다고 판단된다. 이는 단면 2차모멘트가 일반적인 정적하중 하에서와 같이 폭발하중과

같은 이상극한하중 하에서도 동일하게 기둥의 내력에 영향을 끼친다고 판단된다.

- 4) 폭발 직후 수직 변형률은 철근의 개수, 단면 형상에 관계없이 동일한 성능의 철근콘크리트 기둥에서 유사한 거동을 보였다. 이는 주철근이 매우 짧은 시간동안 받는 이상극한하중에 대하여 횡방향에 비해 축방향 변형에 영향을 덜 받기 때문이다. 즉, 초기 충격량에 대한 축방향 변형률은 단면비나 철근의 개수보다는 철근비에 영향을 받는다고 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 폭발하중에 의해 부분손상을 입은 기둥의 잔류 저항성능을 평가하였다. 부분손상을 고려한 평가에서 더 나아가 부재가 파괴가 되었을 때 연쇄붕괴 방지에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012-0005424).

참 고 문 헌

김한수, 박재표 (2010) 단면의 형상에 따른 철근콘크리트 기둥의 폭발 저항성능 평가, 한국전산구조공학회 논문집, 23(4), pp.387~393.

김한수, 박재표 (2011) 전산해석을 이용한 CFT 기둥의 폭발 저항성능 평가, 대한건축학회 논문집, 27(3), pp.65~72.

이경구 (2010) 폭발하중을 받는 강재압축재의 잔여저항성능 평가, 대한건축학회 논문집, 26(10), pp.37~44.

이나현, 김성배, 김장호, 이종권 (2009) 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동 분석 : (1) 실험수행절차, 대한토목학회 논문집 29(5A), pp.557~564.

ANSYS (2005) *AUTODYN Theory Manual*, Century dynamics.

Astaneh-Asl, A. (2003) Progressive Collapse Prevention in New and Existing Buildings, *Proc. Of the 9th Arab Structural Engineering Conferene, Abu Dhabi, UAE*.

Carriere M., Heffoernan P.J., Wight R.G., Braimah A. (2009) Behaviour of Steel Reinforced Polymer Strengthened RC Members under Blast Load, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36, pp.1356~1365.

Crawford J.E., Malvar L.J., Morrill K.B., Ferritto J.M. (2001) composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings, *10th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with structures*, P-01-13.

Department of the Army (1986) Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM 5-855-1.

Department of the Army (1990) Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM 5-130

Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. (2007) Blast Loading and Blast Effects on Structures, *EJSE international, Load on Structures 2007*, pp.76~91.

- 논문접수일 2012년 2월 23일
- 논문심사일
1차 2012년 3월 1일
2차 2012년 6월 5일
- 게재확정일 2012년 6월 11일