

## 전도공법에 의한 축소모형 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동

박 훈<sup>1)\*</sup>, 이희광<sup>2)</sup>, 유지완<sup>2)</sup>, 송정언<sup>2)</sup>, 김승곤<sup>3)</sup>

### Collapse Behavior of Small-Scaled RC Structures Using Felling Method

Hoon Park, Hee-Gwang Lee, Ji-Wan Yoo, Jeung-Un Song and Seung-Kon Kim

**Abstract** The regular RC structures have been transformed into irregular RC structures by alternate load of RC structures during explosive demolition. Numerical simulation programs have contributed to a better understanding of large displacement collapse behavior during explosive demolition, but there remain a number of problems which need to be solved. In this study, the 1/5 scaled 1, 3 and 5 stories RC structures were designed and fabricated. To consider the collapse possibility of upper dead load, fabricated RC structures were demolished by means of felling method. To observe the collapse behavior of the RC structures during felling, displacement of X-direction (or horizontal), displacement of Z-direction (or vertical) and relative displacement angle from respective RC structures were analyzed. Finally explosive demolition on the scaled RC structures using felling method are carried out, collapse behavior by felling method is affected by upper dead load of scaled RC structures. Displacement of X and Z direction increases gradually to respective 67ms and 300ms after blasting. It is confirmed that initial collapse velocity due to alternate load has a higher 3 stories RC structures than 5 stories.

**Key words** Collapse behavior, Scaled model, Explosive demolition, Felling method

**초 록** 발파해체 되는 철근콘크리트 구조물은 교대하중에 의해 정형구조에서 비정형구조로 변환되며 붕괴거동은 비선형적인 대변위 거동을 한다. 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동에 대한 많은 수치 모델링 연구가 수행되었지만, 비선형적인 대변위 거동을 해석하기에는 아직 부족한 수준이다. 본 연구에서는 실제 철근콘크리트 구조물을 1/5로 축소한 축소모형 구조물을 제작하였다. 전도공법으로 1층, 3층, 5층 축소모형 구조물을 발파하여 상부 자중에 의한 구조물의 붕괴 가능성을 고찰하였으며, 구조물의 붕괴거동을 X 방향(수평방향)의 변위, Z 방향(수직방향)의 변위, 상대 변위각으로 분석하였다. 실험결과 자중에 의한 구조물의 붕괴를 유도하기 위한 상부 자중의 크기를 확인할 수 있었다. 또한 구조물의 붕괴에 따른 X 방향의 변위와 Z방향의 변위는 발파 후 67 ms, 300 ms부터 서서히 증가하였고, 교대하중에 의해 3층 구조물의 초기 붕괴 속도가 5층 구조물보다 크게 발생하는 것을 확인하였다.

**핵심어** 붕괴거동, 축소모형, 발파해체, 전도공법

## 1. 서 론

최근 중·고층 구조물을 발파해체 할 때 구조물의 구성 재료 및 구성 재료의 특성, 구조물의 구조 형식, 구조물의 형태, 주변 여건 등에 따라 다양한 공법이 적용되고 있다(Lauritzen and Schneider, 2000, Elliott and

Woolf, 2000). 특히 도심지 구조물의 경우에는 구조물의 고층화, 내진설계에 의한 구성 재료의 고강도화, 구조물의 구조 형식 및 형태의 비정형화 등에 의해 구조물의 붕괴거동을 제어하기 위한 발파해체 설계가 요구되고 있다(Loizeaux and Andrew, 2006).

철근콘크리트 구조물의 붕괴거동에 대한 다양한 수치해석 모델링이 적용되고(Yarimer and Lapa, 1994, Ohtsuka et al., 1996), 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구가 진행되고 있으나(Meguro and Tagel-Din, 2001, Tagel-Din and Rahman, 2006, 양준 외, 2006), 비선형적인 철근콘크리트 부재의 붕괴로 인한 3차원 구조물의 대변위 붕괴거동을 예측하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그

<sup>1)</sup> 전북대학교 공업기술연구소 객원연구원

<sup>2)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과

<sup>3)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

\* 교신저자 : hujin@chonbuk.ac.kr

접수일 : 2007년 9월 27일

심사 완료일 : 2007년 10월 9일

램은 아직 개발되지 않았다. 그러므로 실제 구조물의 붕괴거동을 사전에 예측하기 위해서는 실제 구조물과 특정 상사관계를 갖는 축소모형 실험을 실시하여 실제 구조물의 붕괴거동을 분석할 필요가 있다.

이 연구에서는 철근콘크리트 부재인 기둥, 보, 슬래브를 실제 구조물의 1/5로 축소하여 1층, 3층, 5층 축소모형 구조물을 제작하였다. 이들 축소모형 구조물을 발파하여 상부 지중에 의한 구조물의 붕괴 가능성을 고찰하였으며, 전도공법에 의한 구조물의 붕괴거동을 시간에 따른 X 방향(수평방향)의 변위, Z 방향(수직방향)의 변위, 상대 변위각으로 분석하였다.

**2. 축소를 산정 및 부재 제작**

이 연구에서는 철근콘크리트 부재의 축소율을 산정하기 위해 콘크리트는 굵은골재 최대치수에 따른 부재의 단면길이를 고려하였으며, 철근은 제품화된 어닐링 철선의 지름을 고려하였다. Table 1과 Table 2에 제시된 것처럼 철근콘크리트 부재 중 기둥은 단면의 길이, 보는 높이와 폭, 슬래브는 두께에 대해 1/5로 축소율을 산정하였고, 철근은 이형봉강의 공칭지름에 대해 1/5로 축소율을 산정하였다.

콘크리트의 배합 및 철근의 배근은 콘크리트 표준시

방서 및 콘크리트 구조설계기준에 준하였다. 콘크리트의 설계기준강도  $f_{ck}$ 는 대한주택공사 전문시방서에 제시된 상부구조, 기초구조를 포함한 건축공사 설계기준강도인 24 MPa을 설계기준강도로 적용하였다. Table 3은 콘크리트의 시방배합표이다.

기둥의 종방향 철근 간격은 주기둥의 경우 30 mm, 보조기둥의 경우 25 mm로 하였다. 축방향 주철근은 SWM-A, 4.00을 주기둥에는 8개를 배근하였고, 보조기둥에는 6개를 배근하였다. 띠철근은 SWM-A, 3.20을 62 mm간격으로 배근하였다. 보의 인장철근은 SWM-A, 4.00을 3개 배근하였으며, 철근 사이의 간격은 25 mm로 하였다. 슬래브에서는 휨 주철근은 SWM-A, 4.00을 90 mm간격으로 배근하였으며, 수축·온도철근인 배력 철근은 SWM-A, 3.20을 150 mm 간격으로 주철근에 수직하게 배근하였다. Table 4는 축소모형 철근콘크리트 부재의 규격 및 사용된 철근 개수를 나타낸 것이고, Fig. 1은 축소모형 철근콘크리트 부재의 단면 및 철근의 배근상태를 나타낸 것이다.

**3. 구조물 제작 및 시험방법**

축소모형 구조물의 층 높이는 680mm, X 열 경간의 폭은 800mm, Y 열 경간의 폭은 800 mm이다. X1 열에

**Table 1.** The scale factors of column, beam and slab

Member type	Prototype member dimension (mm)		Scaled model member dimension (mm)		Scale factor
Main column	Length	400 × 600	Length	80 × 120	1/5
	Sub column	400 × 400	Length	80 × 80	
Beam	Width & depth	400 × 600	Width & depth	80 × 120	1/5
Slab	Depth	150	Depth	30	1/5

**Table 2.** The scale factors of steel reinforcement

Type	Prototype model reinforcement (deformed reinforcement)		Scaled model reinforcement (annealing wire)		Scale factor
	Designation	Diameter (mm)	Designation	Diameter (mm)	
Main reinforcement	SD300, D19	19.1	SWM-A, 4.00	3.81	1/5
Tie (distributing) reinforcement	SD300, D16	15.9	SWM-A, 3.20	3.18	1/5

**Table 3.** Specified mix of scaled model concrete

Maximum size of coarse aggregate (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio W/C (%)	Fine aggregate ratio S/a (%)	Quantity of material per unit volume of concrete (kg/m <sup>3</sup> )				
					Water W	Cement C	Fine aggregate S	Coarse aggregate G	Admixture (g/m <sup>3</sup> )
10	10	3	47.2	54	228	483	827	718	-

보조기둥 80×80×680 mm를 2개 세웠고, X2 옆에는 주 기둥 80×120×680 mm를 2개 세웠다. 동일한 층의 기둥과 기둥사이에는 보 80×120×720 mm에 SWM-A, 4.00, 길이 80 mm인 정착철근 2개를 상단에 배근하고 에폭 시수지로 부착하였다. 서로 다른 층의 기둥과 기둥 사이에는 SWM-A, 4.00, 길이 115 mm인 정착철근 4개를 배근하여 에폭시수지로 부착하였다. 또한 각 층의 보 위에 슬래브 840×840×30 mm를 1장씩 얹었다.

단면길이의 70%인 84 mm를  $\phi 8$  mm 핸드드릴로 1층,

3층 구조물은 축소모형 주기둥  $1C_{X2Y1}$ 과  $1C_{X2Y2}$ 에 각각 4공씩 총 8공을 천공하였으며, 5층 구조물은 축소모형 주기둥  $1C_{X2Y1}$ ,  $1C_{X2Y2}$ ,  $2C_{X2Y1}$ ,  $2C_{X2Y2}$ 에 각각 4공씩 총 16공을 천공하였다. 공당 순발뇌관 1개씩 장약하였고, 기폭시차는 0 ms로 동시 발파하였다. 발파되는 축소모형 주기둥의 방호는 부지포를 2겹으로 하였고, SWM-B, 2.00을 기둥에 4개씩 균등하게 묶어서 고정하였다. Table 5는 구조물의 발파패턴을 나타내며, Fig. 2는 5층 구조물의 구조 평면도이다.

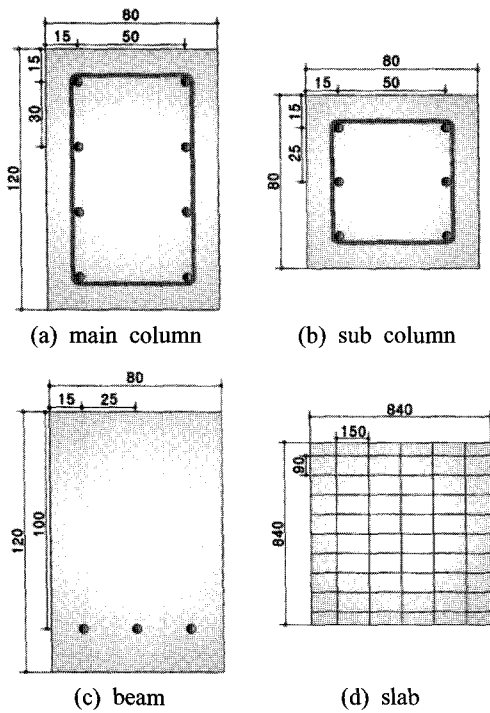


Fig. 1. Cross section of scaled members and arrangements of steel reinforcements (unit: mm)

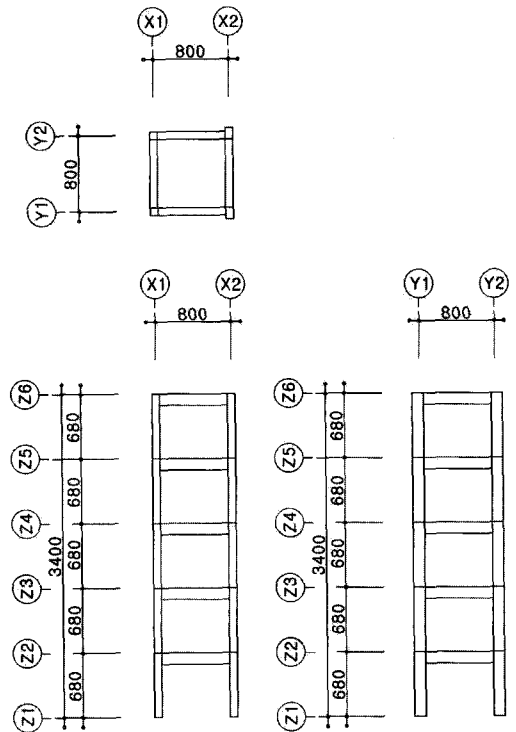


Fig. 2. Framing plan of 5 stories structure (unit: mm)

Table 4. Dimension and number of reinforcement by member type

Member type	Main column	Sub column	Beam	Slab
Dimension (mm)	80 × 120 × 680	80 × 80 × 680	80 × 120 × 720	840 × 840 × 30
Main reinforcement (EA)	8	6	3	9
Tie (distributing) reinforcement (EA)	10	10	-	5

Table 5. Blasting pattern of structures

Structures	1 × 1 bay 1 story structure	1 × 1 bay 3 stories structure	1 × 1 bay 5 stories structure
Dimension (mm)	800 × 800 × 680	800 × 800 × 2040	800 × 800 × 3400
Number of blasting holes (EA)	8	8	16

4. 1층 구조물 시험결과

Fig. 3은 1층 구조물을 발파할 때 각 시간대 별로 촬영한 연속사진이다. 0ms에 X2열의 주기둥  $1C_{X2Y1}$ 과  $1C_{X2Y2}$ 가 발파되었고, 발파되는 순간에 주기둥 상단은 발파하중에 의해 전체적으로 상향으로 들렸으나 발파

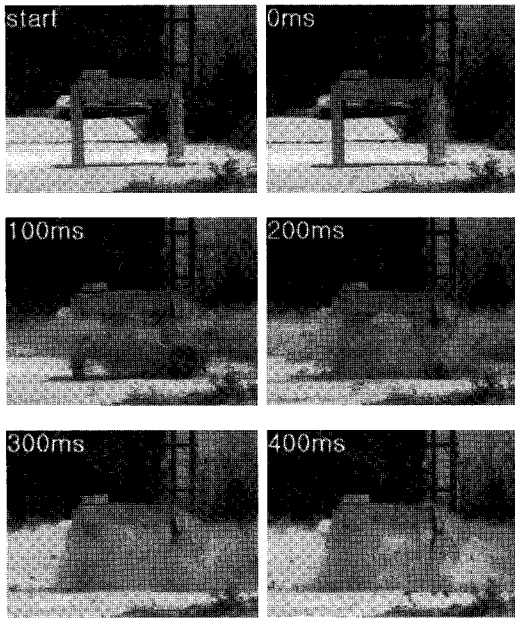


Fig. 3. Images of consecutive blasting process of 1 story structure

후 구조물은 붕괴되지 않았다.

Fig. 4는 1층 구조물의 보  $1B_{Y1-X1X2}$ 와  $1B_{X2-Y1Y2}$ 의 발파 후 상태를 나타낸 것이다. 주기둥  $1C_{X2Y1}$ 과  $1C_{X2Y2}$ 이 발파되면서 보  $1B_{Y1-X1X2}$ 에는 전단균열이 발생하였으며, 보  $1B_{X2-Y1Y2}$ 에는 휨하중에 의한 인장균열이 발생하였다.

Fig. 5는 1층 구조물에서 (X2, Y1, Z2) 교점에서의 X방향의 변위, Z방향의 변위, 중심점 (X1, Y1, Z1)에 대한 상대 변위각을 시간에 따라 나타낸 것이다.

X방향의 최대변위는 발파 후 67 ms에서 발생하였으며, 이때의 최대변위값은 (-)1.07 mm이었다. 발파 후 67 ms 이후 교점을 중심으로 좌우로 변위가 변하면서 200 ms 이후부터는 영구변위가 발생하였고, 이때의 영구변위

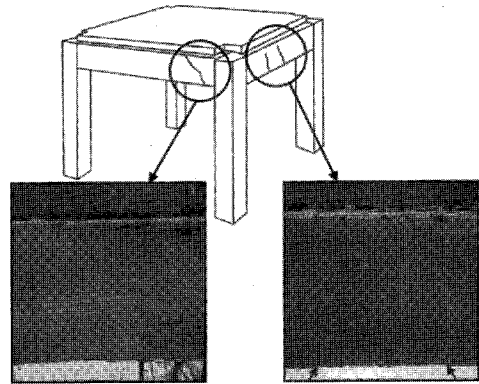


Fig. 4. The shear and tensile cracks resulting from the main column blasting

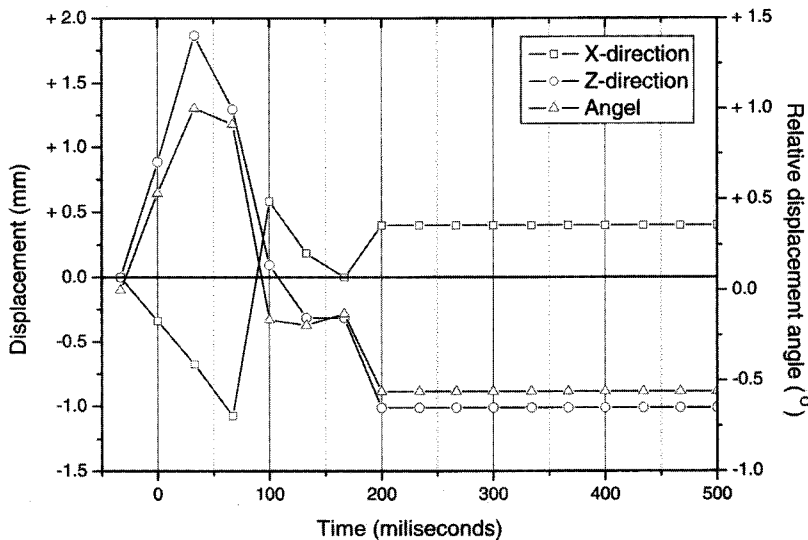


Fig. 5. Displacement of X, Y direction and relative displacement angle

값은 0.4 mm이었다. 여기에서 (-)는 교점을 중심으로 좌측방향을 나타낸다.

Z방향의 최대변위는 발파 후 33 ms에서 발생하였으며, 이때의 최대변위값은 1.87 mm이었다. 발파 후 33 ms 이후 변위는 다시 감소하였으며, 200 ms 이후부터는 영구변위가 발생하였고, 이때의 영구변위값은 (-)1.01 mm이었다. 여기에서 (-)는 교점을 중심으로 아래 방향을 나타낸다.

중점(X1, Y1, Z1)에 대한 상대 변위각은 발파 후 33 ms에서 최대 1.003°이었고, 200 ms 이후부터 영구 상대 변위각은 (-)0.561°이었다. 여기에서 (-)는 교점을 중심으로 아래 방향을 나타낸다.

축소모형 기둥 발파에서 기둥이 좌굴되는 축방향 하중과 발파공수와의 관계는 주기둥의 경우 식 (1)과 같고, 보조기둥의 경우 식 (2)와 같다(박훈, 2007).

$$VL = 2.434 + 20.867e^{\left(-\frac{BH}{0.887}\right)} \quad (1)$$

$$R^2 = 0.992$$

$$VL = 0.716 + 5.966e^{\left(-\frac{BH}{0.887}\right)} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.958$$

여기서, VL은 축방향 하중(KN), BH는 발파공수를 나타낸다.

1층 구조물의 주기둥 발파에서 발파공수가 4공이므로 주기둥이 좌굴되는 축방향 하중은 평균 2.66 KN이다. 따라서 축방향 하중이 2.66 KN 이상일 때 발파된 주기둥이 좌굴되면서 구조물은 자중에 의해 붕괴될 것이다. 그러나 1층 구조물 상단부의 전체 하중은 1.10 KN이므로 발파 후 구조물은 붕괴되지 않았으며, 자중에 의한 붕괴를 유도하기 위해서는 상단부가 최소한 2층 이상인 3층 이상의 구조물이어야 할 것으로 판단된다.

### 5. 3층, 5층 구조물 시험결과

Fig. 6은 3층 구조물이 전도될 때 일정한 시간 단위로 촬영한 연속사진이다. 주기둥  $1C_{X2Y1}$ 과  $1C_{X2Y2}$ 가 발파된 후 X1의 Z1을 기준으로 구조물이 전도되기 시작하였다. 800ms 이후 보조기둥  $1C_{X1Y1}$ 과  $1C_{X1Y2}$ 가 지면에서 인발되었고, X2를 기준으로 전방향으로 전도되었다. X2열이 지면과 완전히 충돌한 후 X1열이 회전에 의해 전방향으로 쏠리면서 구조물은 붕괴되었다.

Fig. 7은 5층 구조물이 전도될 때 일정한 시간 단위로 촬영한 연속사진이다. 주기둥  $1C_{X2Y1}$ ,  $1C_{X2Y2}$ ,  $2C_{X2Y1}$ ,  $2C_{X2Y2}$ 가 발파된 후 X1의 Z2를 기준으로 구조물이 전도

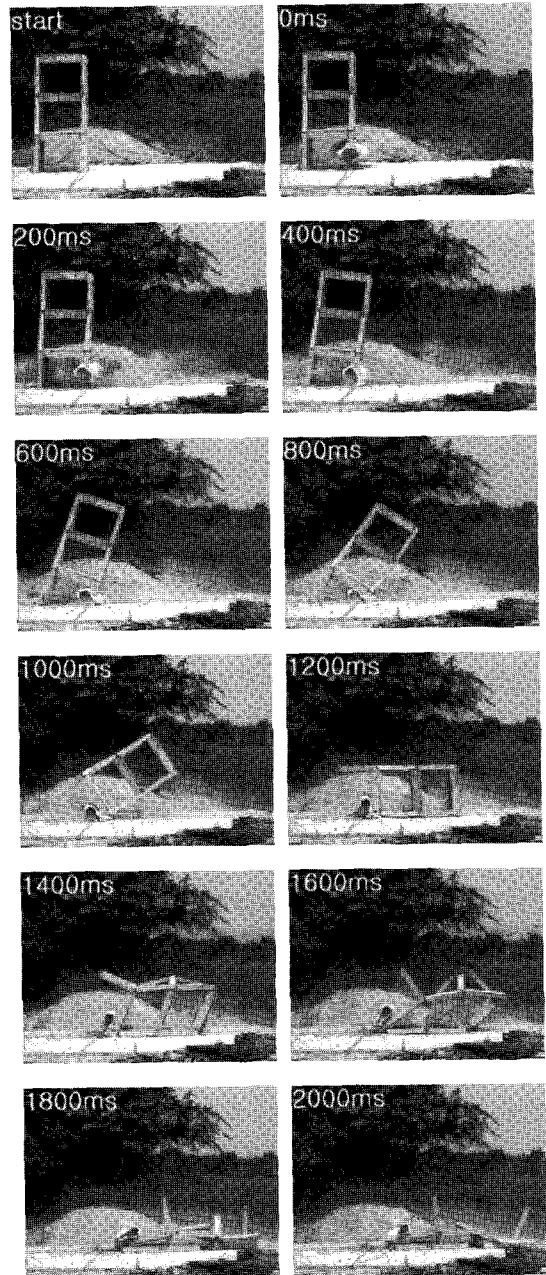


Fig. 6. Images of consecutive collapse behavior process of 3 stories structure

되기 시작하였다. 1,000 ms 이후 보조기둥 X2의 Z2와 Z3이 충돌하면서 전도되었고, X2열이 지면과 완전히 충돌한 후 X1열이 회전에 의해 전방향으로 쏠리면서 구조물은 붕괴되었다.

Fig. 8은 3층 구조물 (X1, Y1, Z4) 교점과 5층 구조물 (X1, Y1, Z6) 교점에서의 X 방향의 변위곡선을 나타낸 것이다. 3층 구조물의 X 방향의 변위곡선의 기울기는 67 ms 후에 서서히 증가하다가 보조기둥  $1C_{X1Y1}$ 과  $1C_{X1Y2}$ 가 지면에서 인발되는 801 ms 이전까지 거의 일정하였다.

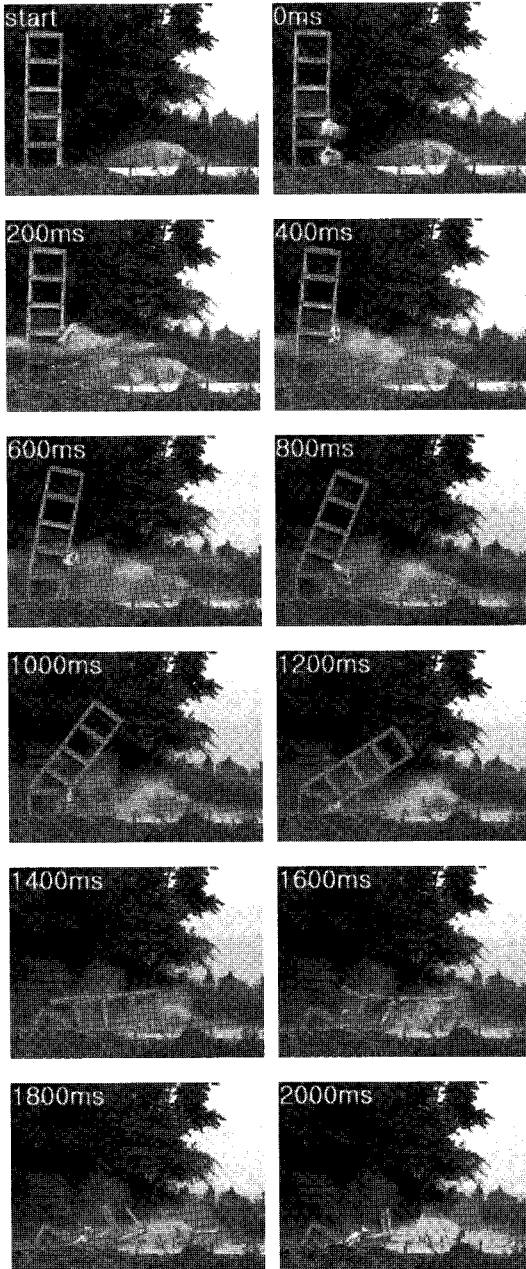


Fig. 7. Images of consecutive collapse behavior process of 5 stories structure

이것은 X 방향의 속도가 801 ms까지 일정한 속도로 이동하고 있다는 것을 나타낸다. 지면과 완전히 충돌한 1,235 ms 이후부터 1,802 ms까지 다시 변위곡선의 기울기는 변하며, X2열이 지면에 완전히 충돌한 후 X1열이 회전하여 전방향으로 쏠리면서 일정한 속도로 이동했기 때문이다. 1,802 ms 이후에는 변위 변화가 없었으며, 3층 구조물의 붕괴가 완료됐음을 의미한다. 5층 구조물의 X 방향의 변위곡선의 기울기는 67 ms 후에 서서히 증가하다가 1,001 ms이후부터 지면과 완전히 충돌한 1,435 ms까지 변위곡선의 기울기가 약간 변화였다.

Fig. 9는 3층 구조물 (X1, Y1, Z4) 교점과 5층 구조물 (X1, Y1, Z6) 교점에서의 Z 방향의 변위곡선을 나타낸 것이다. 3층 구조물의 Z 방향의 변위곡선은 발파 후 300 ms부터 기울어지기 시작했으며, 801 ms까지 서서히 증가하였다. 보조기둥  $1C_{X1Y1}$ 과  $1C_{X1Y2}$ 가 지면에서 인발되는 801 ms 이후부터 다시 변위곡선의 기울기가 변하며, 이것은 Z2의 X2열을 기준으로 전방향으로 회전하

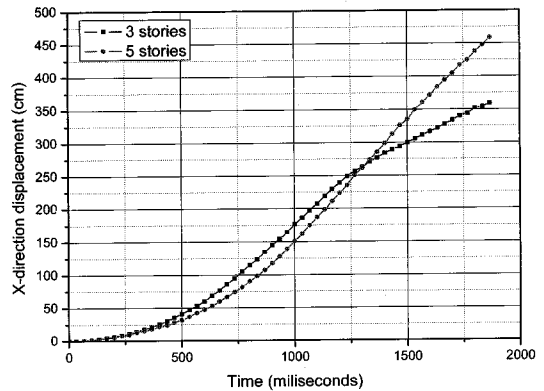


Fig. 8. Displacement of X-direction

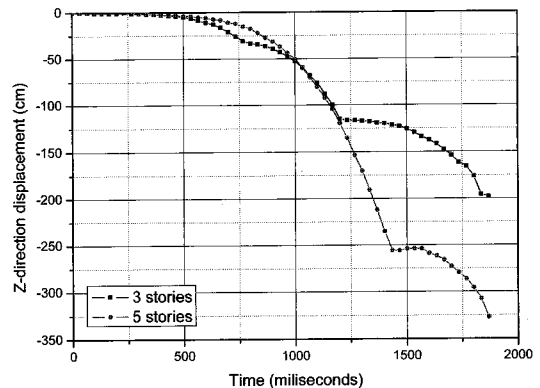


Fig. 9. Displacement of Z direction

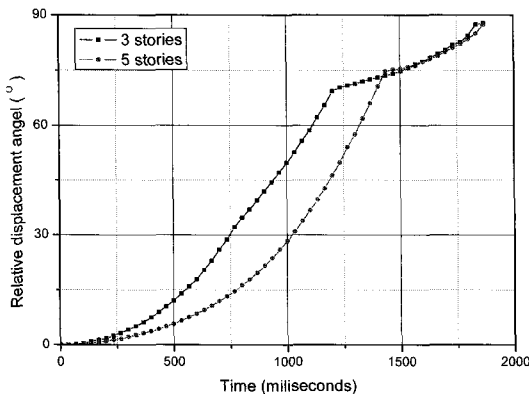


Fig. 10. Relative displacement angle

였기 때문이다. 또한 1,235 ms 이후 X2열이 지면에 완전히 충돌한 후, X1열의 회전에 의해 새로운 변위곡선의 기울기를 나타내며, 1,802 ms 이후에는 Z방향의 위치변화가 더 이상 없으며 3층 구조물의 붕괴가 완료되었다. 5층 구조물의 Z 방향의 변위곡선의 기울기는 발파 후 300 ms 이후부터 Z2의 X1열을 기준으로 서서히 증가하다가 X2 열이 지면에 완전히 충돌하는 1,435 ms 이후부터 X1열의 회전에 의해 새로운 변위곡선을 나타내고 있다.

Fig. 10은 X2열을 기준으로 (X1, Y1, Z4) 교점에서 3층 구조물의 상대 변위각 곡선과 (X1, Y1, Z6) 교점에서 5층 구조물의 상대 변위각 곡선을 나타낸 것이다. 구조물이 지면에 완전히 충돌하는 시간까지 3층 구조물의 상대 변위각이 5층 구조물의 상대 변위각보다 크게 발생하였다. 이것은 구조물의 높이가 작을수록 상대적으로 회전속도가 크고 교대하중에 의한 3층 구조물의 초기 붕괴속도가 5층 구조물의 초기 붕괴속도보다 크게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실제 철근콘크리트 구조물을 1/5로 축소한 1층, 3층, 5층 축소모형 구조물을 제작하여 전도공법으로 상부 자중에 의한 구조물의 붕괴 가능성을 검토하였다. 또한 구조물의 붕괴거동을 X방향(수평방향)의 변위, Z방향(수직방향)의 변위, 상대 변위각으로 분석하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

축소모형 구조물의 붕괴를 유도하기 위해서는 구조물 상단부가 최소 2층 이상인 3층 이상의 구조물이어야 하며, 실제 철근콘크리트 구조물의 전도 해체시 상부 자중의 영향을 고려해야 할 것이다.

발파 후 축소모형 구조물의 전도에 의한 X방향의 변

위와 Z방향의 변위곡선의 기울기는 각각 67 ms, 300 ms 이후부터 서서히 증가하였으며, 3층, 5층 구조물 모두 동일한 시간범위 내에서 변위곡선의 기울기가 증가하는 것을 확인하였다.

3층, 5층 구조물의 전도에 의한 상대 변위각을 분석한 결과, 구조물이 지면에 완전히 충돌하는 시간까지 3층 구조물의 상대 변위각이 5층 구조물의 상대 변위각보다 크게 발생하는 것을 확인하였다. 이것은 구조물의 높이가 작을수록 상대적으로 회전속도가 크고, 발파 후 교대하중에 의한 초기 붕괴속도가 3층 구조물이 5층 구조물보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문의 발파실험에서 자재 및 장비를 적극 지원하여 주신 (유)정음화약사 정삼호 사장님과 신상범 부장님께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

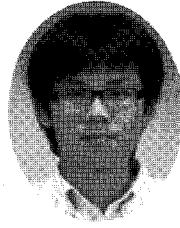
1. 박훈, 2007, 발파해체를 위한 철근콘크리트 구조물 축소모형의 붕괴거동 연구, 전북대학교 박사학위 논문, 61p.
2. 양준, 천평완, 쉬페이, 양귀량, 2006, 철근콘크리트 구조물 발파해체의 FEA 시뮬레이션 연구, 한·중·일 3국의 발파해체 기술현황 및 활성화 방안, 주택도시연구원, 165-182.
3. Elliott, R.J. and R. Woolf, 2000, Demolition blasting of reinforced concrete structures, World Conference on Explosives and Blasting Technique, 397-404.
4. Lauritzen, E.K. and J. Schneider, 2000, The role of blasting techniques in the demolition industry, World Conference on Explosives and Blasting Technique, 377-382.
5. Loizeaux, M. and E.N.O. Andrew, 2006, Progressive collapse-an implosion contractor's stock in trade, Journal of Performance of Constructed Facilities, 20.4, 391-402.
6. Meguro, K. and H. Tagel-Din, 2001, Applied element simulation of RC structures under cyclic loading, Journal of Structural Engineering, 127.11, 1295-1305.
7. Ohtsuka, N., Y. Shindo, and M. Ueoka, 1996, Deformation measurement and FEM simulation of a reinforced concrete building during controlled demolition, Proceedings of the Australasian Congress on Applied Mechanics, 643-648.
8. Tagel-Din, H. and N.A. Rahman, 2006, Simulation of the Alfred P. Murrah Federal Building collapse due to blast loads, Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference, 1-15.
9. Yarimer, E. and J.A.M. Lapa, 1994, Factors affecting the numerical modeling of demolition by explosives, Structures under Shock and Impact 3rd International Conference, 11-20.



### 박 훈

1998년 전북대학교 자원공학과 공학사  
2000년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학석사  
2007년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학박사

Tel: 063-270-2358  
E-mail: [hujin@chonbuk.ac.kr](mailto:hujin@chonbuk.ac.kr)  
현재 전북대학교 공업기술연구소 객원연  
구원



### 이 희 광

2006년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학사

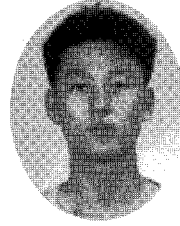
Tel: 011-9437-8250  
E-mail: [leeheegwang@nate.com](mailto:leeheegwang@nate.com)  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사  
과정



### 유 지 완

2006년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학사

Tel: 011-9477-0720  
E-mail: [zaamchi@nate.com](mailto:zaamchi@nate.com)  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사  
과정



### 송 정 언

2001년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학사  
2003년 전북대학교 자원·에너지공학과  
공학석사  
2006년 전북대학교 자원·에너지공학과  
박사수료

Tel: 017-642-4007  
E-mail: [sjuda@chonbuk.ac.kr](mailto:sjuda@chonbuk.ac.kr)  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 박사  
과정



### 김 승 곤

1977년 전북대학교 자원공학과 공학사  
1980년 전북대학교 자원공학과 공학석사  
2003년 전남대학교 지구시스템공학과  
공학박사

Tel: 063-270-2364  
E-mail: [kimsk@chonbuk.ac.kr](mailto:kimsk@chonbuk.ac.kr)  
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수