

## 철근콘크리트 기둥 발파해체를 위한 방호재 특성에 대한 실험적 연구

류창하<sup>1)</sup> · 최수일<sup>2)</sup> · 박용원<sup>2)</sup> · 김양균<sup>2)</sup>

### Experimental Study on the Characteristics of Protection Materials for Explosive Demolition of Reinforced Concrete Column

Chang-Ha Ryu, Soo-Il Choi, Yong-Won Park, Yang-Kyun Kim

**ABSTRACT** Safety concern is one of the most important parameters in the design of explosive building demolition. Laboratory experiments were performed to investigate the failure behaviour of concrete columns and the effects of protection materials. Fourteen reinforced columns with two sizes were constructed and the effects of protection materials were tested for two kinds of materials: non woven fabrics and wire net. The results showed that control of gas effects is a key to the control of flying chips. It was recommended to use both wire net and non woven fabrics as primary and secondary protection materials. Such protection method was successfully applied to the explosive demolition of 16 and 17-story apartment buildings.

### 1. 서 론

화약발파는 주로 암반굴착을 위한 수단으로 이용되어 왔으나 최근 건물해체방법으로 활용되면서 관심의 대상이 되고 있다. 강철 공이나 브레이커를 이용하는 기계식 해체방법은 장기간의 작업을 필요로 할 뿐만 아니라 고층화 된 건물이나 대형 콘크리트 구조물의 해체에는 적용이 어려운 단점이 있다. 반면에 화약발파에 의한 해체방법은 그러한 제약이 없으며 경제성면에서도 우수한 것으로 평가되고 있다.<sup>1)</sup> 건물해체는 주로 도심지 재개발 지역에서 이루어지며 따라서 환경영향과 안전성의 확보문제가 매우 중요하다. 건물발파해체의 기본 개념은 기존의 방법에서와 같이 대상 건물을 구성하고 있는 모든 부재들을 상부로부터 해체해 나가는 것이 아니라, 건물의 주요 지지점인 기둥이나 내력벽과 같은 구조 부재의 일부분만을 동시에 또는 시차적으로 파괴하여 건물구조가 지닌 안정성을 와해시킴으로써 자중에 의해 붕괴되도록 유도하는 것이다. 붕괴시 구조물이 지닌 위치에너지가 운동에너지로 전환되는 과정에서 파쇄물 상호간의 충돌작용 등 2차적인 파괴를 유

도하여 짧은 시간에 구조물을 붕괴 해체시키는 것이다. 구조적 불안정을 유도하기 위한 지지점들이 파괴되면 다음 단계로 각 지지점을 이루고 있는 부재들을 효과적으로 파괴시켜야 한다. 부재가 계획대로 파괴되지 않거나 부분적으로 파괴가 일어날 경우 붕괴실패의 원인이 되며 과도한 장약은 비산과 진동, 소음에 의한 피해를 야기시킨다. 따라서 붕괴에 영향을 주지 않도록 효과적인 파괴를 위한 발파설계와 발파시 파괴된 파쇄물의 비산에 대한 방호대책은 주요 요소기술의 하나이다. 비산은 인접한 건물뿐만 아니라 인명에 대해서도 피해를 유발할 수 있으므로 사전에 철저한 대책이 강구되어야 할 대상이다. 비산에 대한 피해발생은 국내외에서 종종 발생하고 있으며 이에 대한 방호대책은 발파해체시 주요 과제 하나가 되고 있다. 그동안 철근 콘크리트 파쇄에 대한 사례나 실험결과는 몇차례 보고된 바 있으나<sup>2,3)</sup> 방호대책에 이용할 수 있는 비산에 대한 연구는 보이지 않는다. 본 연구에서는 실험적 관찰을 통하여 비산의 양상을 정량적으로 검토하고 방호대책수립을 위한 기

1) 한국자원연구소, 선임연구원

2) 코오롱건설주식회사

초자료를 도출하기 위한 목적으로 수행되었다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험기둥제작

폭파시험을 위한 철근 콘크리트 기둥은 국내 저층건물에서 많이 시공되고 있는 450×450×1,800 mm (기둥 I)와 600×300×1,800 mm (기둥 II)의 두가지 형태로 제작하였고 배근은 주철근이 직경 18 mm×8개, 띠철근이 직경 10 mm, 300 mm 간격이며 대각띠철근은 직경 10 mm, 900 mm 간격으로 하였다. Fig. 1은 철근 배치도이다. 콘크리트의 압축강도가 210 kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 유지하기 위하여 No 325 slag 시멘트를 사용하였으며 조성은 시멘트 : 모래 : 자갈=1.0 : 1.5 : 3.0으로 하였고 물/시멘트 비율은 0.52로 하였다. 콘크리트 양생기간은 1달 이상이였으며 강도를 측정하기 위하여 강도실험을 위한 시험편을 같은 재료로부터 제작하였다. 압축강도는 평균 334 kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

### 2.2 발파관련 변수설계

#### 2.2.1 장약공 패턴

장약공의 직경은 36 mm로 하였으며 전단면이 450×450 mm인 기둥에 대해서는 공간격을 400 mm, 공깊이를 300 mm로 하고 3개공을 배열시켰다. 전단면이 600×300 mm인 기둥은 공간격을 300 mm, 공깊이를 400 mm로 하고 모두 4개공을 배열시켰다.

#### 2.2.2 폭약

폭약은 종류가 다양하고 경우에 따라 선택하는 변수이다. 본 실험에서는 폭약종류에 대한 효과보다는 비산 및 방호특성 규명에 초점을 두어 질산암모니움을 사용

하고 성분비교를 통하여 기타 폭약류와 비교할 수 있도록 하였다. Table 1은 사용된 폭약의 특성을 보여준다.

U. Langefors에 의해 제안된 방법에 의하면 폭약의 강도 S는 35% NG 표준 다이내마이트(강도 S=1)와 비교하여 계산할 수 있다. 사용된 폭약의 강도는 0.833에 해당한다.

#### 2.2.3 비장약량 (Specific charge)

비장약량은 1차 1.0~1.25 kg/m<sup>3</sup>를 취하여 공당 장약량을 산정하고 시험발파를 실시하여 재조정하였다. 450×450 mm 기둥의 경우 공당 80~100 g에 해당하며, 600×300 mm 기둥의 경우 공당 55~80 g에 해당한다.

#### 2.2.4 장약 및 기폭방법

시험기둥 I에 대한 장약은 Fig. 2와 같이 공저부분에 장약을 하고 역기폭을 하였다. 시험기둥 II는 옆면에 대한 저항선이 15 cm 이하이고 공깊이가 깊고 장약길이 짧게 됨을 고려하여 발파효율을 높일 수 있도록 2부분으로 나누어 분산장약을 하고 역기폭을 하였다. 뇌관은 순발뇌관이 사용되었다.

### 2.3 고속카메라 촬영

실험에 사용된 고속카메라 모델 LBS-16A의 주요 규

Table 1. Characteristics of explosive used in experiment

Diameter	32 mm
Density	0.95-1.10 g/cm <sup>3</sup>
Detonation Velocity	3,286 m/sec
Oxygen Balance	3.36%
Specific Volume	922 l/kg
Explosion Heat	3,831 kJ/kg

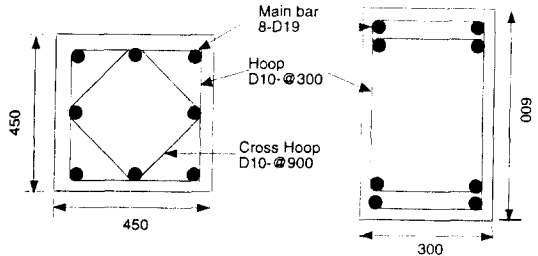


Fig. 1. Diagram showing reinforced test specimen column.

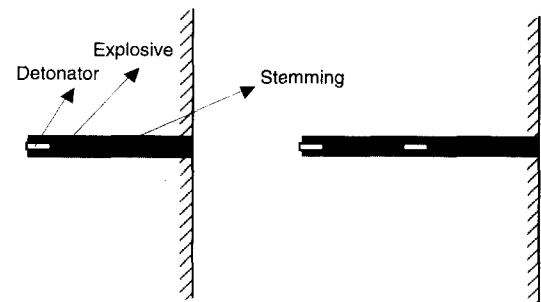


Fig. 2. Diagram showing charge structure.

격은 Table 2와 같다. Fig. 3은 고속카메라를 이용한 계측시스템을 보여준다.

2.4 시험계획

방호재료는 철망과 부직포 2종류를 사용하였고 방호재료가 없을 때와 방호재료를 한 경우 효과를 비교 검토하였다. 철망은 3 mm 직경의 철선으로 5 cm×5 cm 격자가 되도록 하였다. 부직포 A는 코오롱 섬유제품으로 100% 폴리에스터 장섬유를 사용하여 Spun Bond 법에 의해 제조된 것이다. 부직포 A의 물성은 인장강도 15 kgf/cm<sup>2</sup>, 신장률 70-100%, 인열강도 10 kgf이다. 부직포 B는 5 mm 두께의 일반 보온덮개용이다. 2종류의 철근 콘크리트 기둥에 대하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

- 1) 장약량 결정을 위한 시험발파 4회
- 2) 기둥 I(450×450×1800) 및 기둥 II(600×300×1800)+부직포 B 1겹
- 3) 기둥 I 및 기둥 II+부직포 A 1겹

Table 2. Specification of high speed camera model LBS-16A

Frame Rate:	100-8,000 frame/sec		
Image Size:	7.5×10.4 mm		
Film Capacity:	Max. 120 m/case		
Dynamic Resolution:	40-55 line pair/mm		
Shutter Factor:	1/2.9		
Time Scale:	5 settings of 100, 500, 1000, 5000, and 10,000 Hz		
Technical Features:			
Focal Distance	38	100	500
Relative Aperture	1:3	1:3	1:3
Field Angle	19°7'	7°24'	1°30'

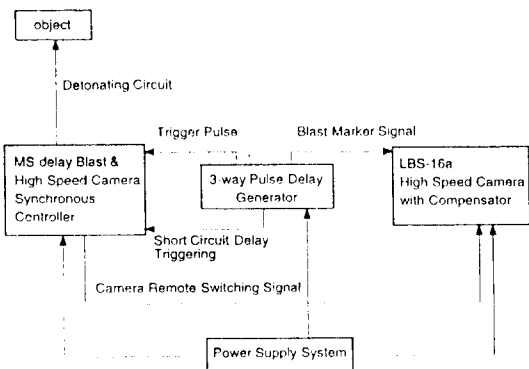


Fig. 3. Diagram of high speed photo testing system.

- 4) 기둥 I 및 기둥 II+철망 1겹
- 5) 기둥 I 및 기둥 II+철망 1겹+부직포 B 1겹
- 6) 기둥 I 및 기둥 II+철망 1겹+부직포 A 1겹
- 7) 기둥 I 및 기둥 II+부직포 B 1 & 2겹+부직포 A 1겹 (일정거리 위치)

실제 현장에서의 기둥은 단축압축응력하에 있으나 본 실험에서는 유사한 경계조건형성이 어려워 응력이 개방된 상태로 하였다. 따라서 초기응력조건이 발파과정에서 미치는 영향은 고려되지 않았다. 응력개방에 따른 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 발파후 주철근을 구속하기 위한 틀을 제작하여 기둥 상하부에 설치하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험발파 및 결과

시험발파는 적정 장약량의 추정과 고속카메라 촬영을 위한 frame rate의 적정성, 조명의 세기 등 여러가지 시험변수를 검토하기 위하여 실시되었다.

1차 실험은 기둥 I에 대하여 실시하였으며 장약공에서 나오는 연기 및 물질로 카메라 관독에 어려움을 예상하여 장약공 반대면을 고속카메라로 향하게 하고 장약공의 위치를 표시하고 종이를 일정 간격으로 붙여 거리 척도로 사용하였다. Fig. 4는 시험기둥의 설치도이다.

폭약은 질산암모니움을 공당 100 g씩 장약하고 전색은 흙에 약간의 물을 섞어 진흙처럼 반죽하여 다짐을 하였고 폭발시간의 지표로써 뇌관을 바깥에 위치시키

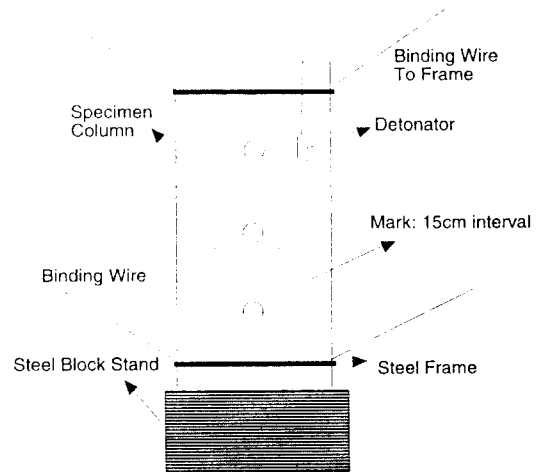


Fig. 4. Setup of test specimen column.

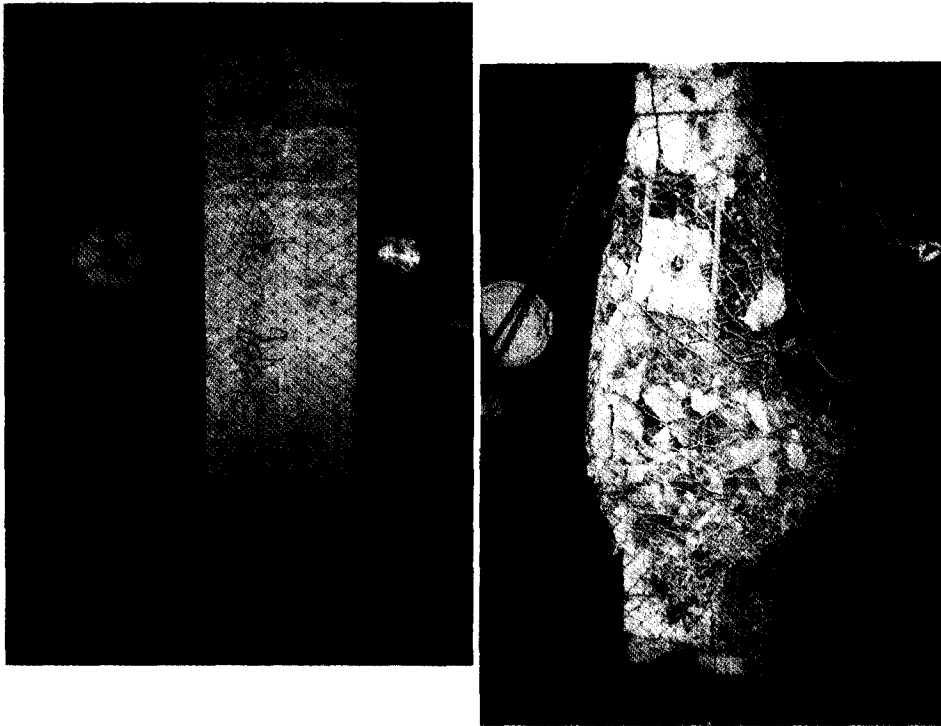


Fig. 5. Results of 4th test blasting, before and after blasting.

Table 3. Summary of test blasing results

Test Column	Charge Weight per hole (g)	Specific Charge (kg/m <sup>3</sup> )	Description of Test Results	Remarks
I	100	1.23	Shattered column; bars pulled out; too much charge	450×450×1800 mm
I	57	0.7	Broken hole area; bars bulged at sides; good result	w/wire mesh
II	57	0.7	Local hole area broken but not fallen; too small charge	600×300×1800 mm
II	60	1.1	Broken hole area in large lumps; insufficient charge	adjusted to q=1.3

고 동시에 점화하였다.

시험발파 결과 및 비장약량 결정

1차 시험발파결과는 철근까지 빠질 정도의 효과를 보여 공당 장약량 100 g이 너무 많은 것으로 판단하고 기둥 I에 대하여는 장약량을 1/2로 줄여 2차 실험을 실시하였다. 2차 시험발파는 철망으로 방호를 하고 장약량을 1/2로 하여 (비장약량,  $q = 0.615 \text{ kg/cm}^3$ ) 실시하였다. 그 결과 콘크리트는 매우 적당하게 파쇄되었으며 따라서 450×450 mm 기둥에 대한 본실험에서는 비장

약량을 0.7 kg/cm<sup>3</sup>으로 결정하였다.

3차 시험발파는 기둥 II에 대하여  $q=0.7$ 로 38 g을 공당 두 부분에 분할하여 장약하였다. 발파결과는 콘크리트도 완전히 파쇄되지 않고 형상이 그대로 유지되었으며 철근 배치 및 띠철근이 기둥 I보다 훨씬 강하게 배치된 효과로 판단되었다. 따라서 장약량을 30 g씩 분할 공당 60 g 장약하고( $q=1.1$ ) 철망을 씌운 후 4차 시험발파를 실시하였다. 4차 시험발파 결과 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 콘크리트는 모두 적정하게 파쇄되었으며 따라

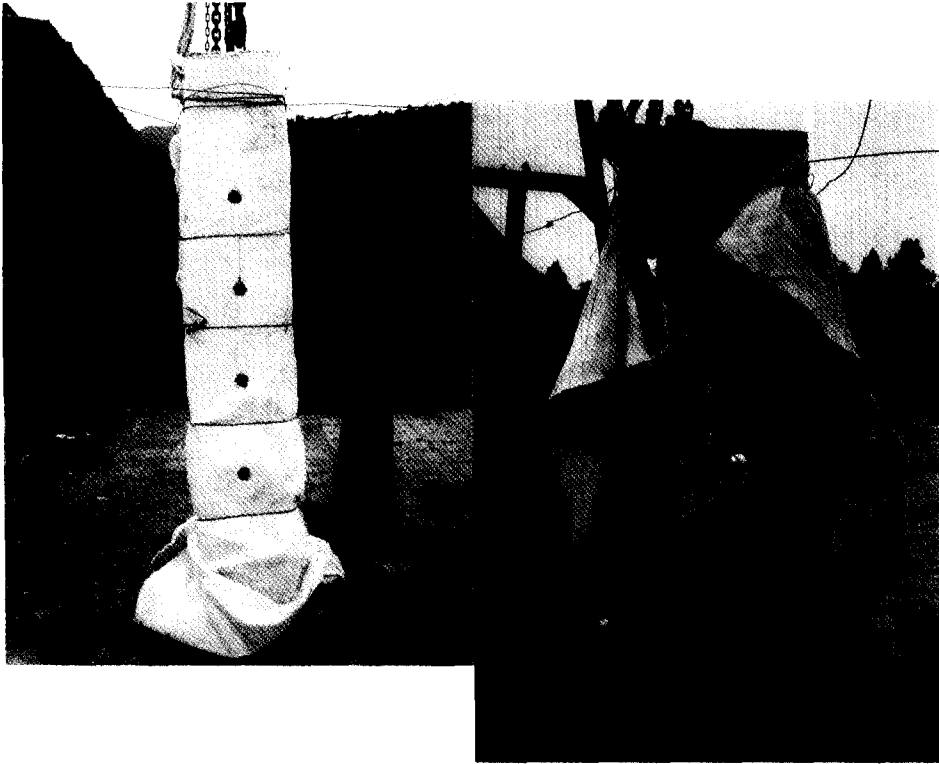


Fig. 6. Results of blasting for column II with non-woven fabric B, before and after blasting.

서 기둥 II에 대한 본 발파실험에서의 장약량은 비장약량  $q=1.3$ 인 공당 70 g으로 조절하였다. 시험발파결과를 요약하면 Tabel 3과 같다.

### 3.2 방호재 특성에 대한 고찰

기둥 I에 대한 비장약량은  $0.7 \text{ kg/m}^3$ 이었으며 공당 장약량은 55 g, 총 장약량은 165 g이었다. 단면에 3개의 공을 천공하였다. 기둥 II에 대한 비장약량은  $1.3 \text{ kg/m}^3$ 이었으며 공당 장약량은 70 g, 총 장약량은 280 g이었다. 단면에 4개의 공을 천공하고 각 공은 분할 장약하여 공당 2개의 뇌관을 사용하였다.

부직포 B만을 방호재로 사용한 실험결과와 파쇄물과 함께 형체도 없이 날아갔으며 1,170 g 무게의 파쇄물이 23 m까지 비산된 것으로 관측되었다. 부직포 A의 경우에는 많은 부분이 손상되었지만 전체적인 형상은 유지한 채로 기둥에 남아 있었으며 파쇄물은 83 g 무게가 22 m까지 비산되었다. Fig. 6은 기둥 II에 대해 실시한 발파 전 후의 모습을 보여 준다.

철망으로 기둥 주위를 한번 감은 경우의 실험결과와

장약공 주위에  $100\sim 150 \text{ cm}^2$  정도의 구멍이 났고 나머지 부분은 좋은 상태를 유지하였다. 파쇄물은 25 g 무게가 32 m까지 비산된 것이 확인되었다.

기둥 주위에 철망을 먼저 씌우고 부직포 A를 댄 경우, 부직포 A는 형체는 남아 있었으나 대부분 찢겨 방호효과는 거의 나타내지 못했다.

기둥 주위에 철망을 씌우고 부직포 B를 설치한 경우, 부직포 B는 겹쳐지는 부분이 서로 떨어지거나 또는 장약공 주위에 철망과 함께 구멍이 발생하였다. 비산은 전자의 경우 없었고 후자의 경우 20~45 g 무게의 파쇄물 3개가 32 m 거리에서 관측되었다.

기타 실험조건과 결과를 종합하여 요약하면 Table 4와 같다.

고속카메라 촬영결과와 해석에 있어서 각 시간간격에 대한 변위는 등고선을 기준으로 측정할 수 있다. 운동하는 특정 대상점의 평균 속도,  $V_p$ 는 다음식으로 계산하였다.

$$V_p = (\Delta X / \Delta t) D_p$$

Table 4. Description of test results

Test Column	Protection Method	Description of Results	
		Protection Material	Test Column
I	B	Completely torn, a great part thrown away with flying chips	Concrete completely shattered and thrown away in hole area, bars exposed; a part of 25-35 cm thick at column ends not shattered but cracked
II	B	-ditto	Concrete shattered in hole area, a great part thrown away, bars exposed; a part of 30-40 cm thick at column ends not shattered but cracked
I	A	Non-woven fabric torn, a part thrown away	Column toppled, 8 bars all pulled out; a part of 35-40 cm thick not shattered but cracked
II	A	Non-woven fabric joint forced apart, torn holes at some part, but still hung on column	concrete shattered and thrown away in hole area, bars loosened; a part of 40-50 cm thick at column ends not shattered but cracked
I	C	3 torn holes of about 100 cm <sup>2</sup> , the rest in good condition	Concrete shattered in hole area, all fallen on removal of wire mesh; a part of 33-41 cm thick at ends not shattered
II	C	A torn hole of 500×300 mm over column face with blast hole, the rest in good condition	Concrete in hole area shattered, all fallen on removal of wire mesh; a part of 20-30 cm thick at ends not shattered but cracked
I	B+C	Torn holes on both materials	Broken pieces all fallen on removal of protective materials; a part of 35 cm thick at ends not shattered
II	B+C	Grey fabric torn, wire mesh partially torn at blast holes and at right side	Concrete in hole area shattered, all fallen on removal of protective materials; a part of 40-45 cm thick at ends not shattered
I	A+C	Only lap joint of white fabric torn apart	All broken pieces fallen on removal of protection; a part of 40-44 cm thick at ends not shattered
II	A+C	White fabric torn, wire mesh damaged with many torn holes	Concrete at blast hole area shattered; a part of 40-44 cm thick at ends not shattered
I	A+B	White fabric thrown away by 7 m; grey fabric at left side torn to strips, many torn holes at right side and shifted backwards over 1 m	Concrete shattered and thrown away; a part of 45 cm thick at ends not shattered but seriously cracked
II	A+B	All fabric torn	Concrete at hole area shattered and thrown away; a part of 27-35 cm ends not shattered

여기서,  $\Delta X$ =운동하는 특정 대상점의 프레임간 수직 변위  
 $\Delta t$ =프레임 시간 간격

$D_p$ =물체의 크기에 대한 보정 계수

Table 5는 기둥 I 발파시 파쇄물의 비산운동을 분석한 결과를 보여준다. 표에서 첨자 r과 l은 각각 기둥의 오른쪽 및 왼쪽 방향을 의미한다.

방호재 특성실험에서 철망은 큰 파쇄물의 비산을 제어하는 효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 작은 크기의 파쇄물의 경우에도, 파쇄물의 입도분포가 장약중심에서부터 바깥쪽으로 점차 크게 형성되는 현상을 나타냄으로써 격자크기보다 작은 크기를 포함한 대부분

Table 5. High speed photographic test results

Test Column	Protection Method	Flying Chip Movement					
		Occurrence Time (ms)		Mean Speed (m/s)		Max. Size (cm)	
		$t_r$	$t_l$	$V_r$	$V_l$	$s_r$	$s_l$
I	B	22	37	14.4	14.1	14.4	8.8
I	A	19	28	15.7	25.4	12.8	19.2
I	C	13	12	24.6	22.1	8.8	4.8
I	C+B	11	13	12.0	38.2	6.3	4.2
I	B(hung)	8	10	27.4	18.6	24.4	16.7

의 양이 5×5 cm 격자에 의해서 제어될 수 있었으나 비산되는 파쇄물은 추진력이 크고 비산거리가 크게 나

타나고 있음이 관찰되었다.

부직포 A는 방호재로서의 역할을 하지 못하였으며 부직포 B의 경우 설치방법에 따라 좋은 비산제어효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 기둥에 직접 설치할 경우 관찰된 부직포의 손상은 주로 장약공 주위에 나타나고 겹계 탄 열에 의한 현상을 동반하는 것으로 보아 폭발시 발생하는 고온 고압의 가스에 의한 것으로 판단된다. 이러한 손상은 철망을 사용한 경우보다 훨씬 큰 파쇄물이 비산되는 결과를 가져온다. 그러나 가스압이 부직포에 의해 1차 약화되므로 비산거리가 줄어드는 것으로 관찰되었다. 장약공 주위를 제외한 부분은 손상이 없거나 몇개의 작은 구멍이 발생하고 있으며 파쇄물의 비산거리 역시 철망을 사용한 경우보다 작다.

이상의 결과는 철망은 파쇄물 대부분의 비산을 제어할 수 있는 효과적인 방호재로서의 역할을 할 수 있으나 격자를 통해 비산되는 파쇄물은 크기가 작아도 비산거리가 크므로 이에 대한 추가적인 대책이 필요함을 나타낸다.

부직포와 같은 비격자 재료는 가스압을 약화시키는 효과로 인하여 비산거리를 작게할 수 있으나 완벽한 제어를 위하여는 고온 고압에 대한 대책이 필요하다. 실용적인 면에서 고온 고압에 견딜 수 있는 재질을 선택하는 것보다는 폭발가스에 의한 직접적인 영향이 완화될 수 있도록 하는 것이 효과적일 것으로 보인다. 이러한 점에서 철망을 1차 방호재로 하여 대부분의 파쇄물을 제어하고 가스압의 방출통로를 제공한 후, 격자를 통하여 비산되는 파쇄물을 부직포와 같은 비격자 재료를 2차 방호재로 하여 제어하는 조합이 매우 효과적인 방법으로 판단된다. 철망과 부직포를 1, 2차 방호재로 이용한 방법은 남산 외인아파트 발파해체시 적용되었고 비산에 대한 피해없이 성공적으로 실시되었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 발파해체시 발생하는 비산의 양상을 정량적으로 검토하고 방호대책수립을 위한 기초자료를 도출하기 위한 목적으로 수행되었다. 실물크기의 철근 콘크리트를 제작하여 실험적으로 관찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 적정파쇄에 필요한 장약량은 비장약량개념에서

비교하여 볼 때 기둥의 재질외에 철근의 배치가 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

2) 가스압의 작용을 조절하는 방법에 따라 파쇄물의 가속현상이 좌우되고 있으며 가스방출을 효율적으로 하는 방법이 비산의 위험을 감소시킬 수 있는 주요 변수가 되는 것으로 나타났다.

3) 격자형의 철망은 격자보다 작은 크기를 포함하여 상당량의 파쇄물의 비산을 제어하는 효과적인 방호재로서 사용될 수 있다.

4) 철망의 격자를 통하여 비산되는 파쇄물은 큰 추진력을 받고 멀리까지 비산되었으며 따라서 이에 대한 추가 방호대책을 필요로 한다.

5) 부직포와 같은 비격자 재료는 가스압을 약화시키는 효과로 인하여 비산거리가 작게 나타나고 있으나 고온 고압에 대한 저항능력을 필요로 한다.

6) 효과적인 방호방법으로서 철망을 1차 방호재로 하여 파쇄물을 제어하고 가스압의 방출통로를 제공한 후, 격자를 통하여 비산되는 파쇄물을 부직포와 같은 비격자 재료로 제어하는 조합방법이 제안되었다.

#### 사 사

본 연구는 건설교통부로부터 건설교통기술 연구개발 사업의 연구비 지원을 받아 수행되었다. 폭파실험동의 제공과 실험협조를 준 북경 건정연구소 Ni Shishun, Sha Wenjian과 중국과학원 Jin Xing Nan 선생께 감사사를 드린다.

#### 참 고 문 헌

1. 최수일, 류창하 외, 1995, 건물발파해체를 위한 제어 발파 설계기술 개발, 건설교통부, pp. 203.
2. 강영철, 1995, 붕괴 기구 형성을 위한 적정 장약량 산정 공식의 평가, 최신엔지니어링발파심포지움, 자원공학회, pp.274-284.
3. R. Saito, N. Kobayashi & Y. Yoshida, 1988, Blasting Demolition of Model Reinforced Concrete Pillars, Demolition and Reuse of Concrete Masonry, vol.1, Proc. 2nd Int. Symp. on RILEM, pp. 79-87.