



콘크리트구조물의 해체

건축구조물의 발파해체 기술과 적용사례

Explosive Demolition Technology and It's Application to Architectural Structures



신 영 수*



손 무 열**

1. 서 언

우리나라 경제 성장과 함께 1960년대에 건설된 구조물의 경제적, 사회적 원인으로 건물을 해체하는 경우가 많다. 즉, 지가의 상승으로 노후 구조물을 철거하고 재건축하는 것이 도심지에서는 경제적 측면에서 더욱 유리하게 된 것이다. 구조물의 해체에 관한 기술은 영국을 비롯한 유럽에서 활성화되기 시작하여 선진국에서는 새로운 첨단 장비의 개발로 환경오염을 최소화할 수 있는 방향으로 나아가고 있다. 그러나, 재래식 장비에 의한 해체 방법은 구조물의 높이에 따라 적용하는데 문제점이 있으며 각종 소음 분진 등에 따라 주변에 환경적인 영향을 많이 미치게 된다. 이러한 재래식 공법의 문제점을 최소화하고 고층건물을 경제적이고 단기간에 해체할 수 있는 방법이 발파해체 공법이다. 발파해체 공법은 하중을 많이 받는 기둥,

벽체 등의 구조부재에 소량의 화약을 장치한 후 계획된 지연단차(delayed sequence)에 의해 순차적으로 발파하여 원하는 방향으로 건물자체의 무게에 의해 붕괴시키는 공법이다. 고층건물을 발파해체하면 건물의 자체 낙하에너지에 의해 자기파쇄가 발생하여 2차적인 해체효과를 얻을 수 있으며, 진동이나 소음이 순간적이므로 주변환경오염을 최소화할 수 있다. 또한, 공사비에 투입되는 인원장비가 현저하게 감소되므로 건물해체 비용이 절감된다. 근래 우리나라에서도 70년대에 경제성장과 함께 건설된 건물의 경제적, 사회적, 사용적 측면에서 해체작업의 시기가 도래하고 있으므로 발파해체가 새로운 산업의 하나로 부각될 것으로 예상되고 있다.

본고에서는 먼저 발파해체 공법에 대해 기술하고, (주)한화에서 자체 개발한 발파해체 공법으로 해체된 건물의 해체과정에 대해 기술하도록 한다.

* 정회원, 이화여대 건축학과 교수

** (주)한화 화약사업본부 응용사업팀장

2. 발파해체 공법의 종류 및 환경대책

2.1 발파해체 공법의 종류

(1) 전도공법(Felling)

발파해체 공법 중에서 기술적으로 가장 간단한 방법으로 구조물의 하부에 썸(wedge 혹은 birdmouth)를 만들거나 전적으로 화약을 사용하여 구조체를 전도시키는 공법이다. 이 공법을 적용하기 위해서 정확한 현지점을 얻을 수 있도록 사전에 적절한 부위를 파쇄하여 구조체를 약화시켜 적용하기도 한다. 이 공법은 전도방향의 조절이 가능하나 진동이 심하고 전도방향으로 충분한 공간 확보가 필요하다. 굴뚝의 해체에 적용한다.

(2) 상부붕괴 공법(Toppling)

이 공법은 단축붕괴(Telescoping)와 전도(Felling)를 적절히 혼합한 공법으로 건물을 대상으로 해체할 경우에 주로 사용하는 공법이다. 건물내의 기둥열이 2~3열 정도에 한정된 건물을 대상으로 주로 적용하며 일방향으로 공간적인 확보가 이루어지면 쉽게 적용할 수 있다. 또한, 지반진동 등의 경감을 위해서는 붕괴가 점진적으로 이루어지도록 기록시스템을 설계할 필요가 있다.

(3) 단축붕괴(Telescoping)

이 공법은 사방으로 충분한 여유 공간을 확보하지 못한 경우 적용하는 방법으로 시각적으로 효과가 뛰어나다. 발파에 의해 구조물이 파쇄되어 발생한 자체 운동에너지에 의해 계속적인 붕괴를 유도하며 발파시 구조물의 하부에 파쇄물이 쌓이므로 그 자체가 충격흡수 기능을 하므로 진동의 경감 등에 효과적이다.

(4) 내파공법(Implsion)

이 공법은 도심지 구조물과 같이 제약된 구조물에서 사용된다. 즉, 구조물의 외벽을 내부로 중심 방향으로 당기면서 붕괴하게 됨에 따라 주변의 필요한 공간을 최소화 할 수 있는 공법이다.

(5) 점진 붕괴(Progressive Collapse)

기술적으로 이 공법은 내파공법과 유사하다고 할 수 있으며 내파공법이 중심방향으로 유도하는데 비해 이 공법은 선형적으로 진행되는 특징을 갖고 있다. 길이가 긴 건물에 적용할 수 있는 공법이다.

2.2 환경대책

발파해체 공법은 해체가 화약으로 순간적으로 이루어지므로 주변환경에 영향을 미치는 요소에 대해 고려하여 이를 경감시킬 수 있는 조치를 해야한다. 즉, 발파에 의해 발생하는 환경적 저해 요인은 진동, 비석(flying debris), 소음, 분진 등으로 나타나는데 이러한 환경적 저해 요인으로 인한 피해가 최소화되도록 발파해체 계획을 세워야 한다.

2.2.1 진동(Ground Vibration)

(1) 화약 발파에 의한 지반 진동

일반적으로 발파 총에너지의 0.5~20% 정도가 탄성파로 변환되어 발파진동으로 소모되는 것으로 나타나고 있다. 지반진동은 변위, 속도, 가속도, 주파수 등으로 표현되는데 1962년 Duvall과 Fogelson의 연구에 의하면 진동속도가 구조물의 피해 정도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 유럽 및 캐나다에서 유사한 연구 결과가 발표되었는데, 수십~수백 Hz 범위의 주파수에서는 구조물의 피해정도가 진동속도에 비례하는 것으로 나타났다. 진동속도는 장약량에 비례하고 거리에 반비례하는데 이를 식으로 나타내면 다음 식(1)과 같다.

$$V=k(D/W^{0.5})^{-n} \quad (1)$$

V : 최대입자속도

D : 거리(발파지점과 측정간 거리)

W : 지발당 장약량

k : 입지상수(지반조건에 의해 결정됨)

n : 감쇄계수

(2) 상부부재 낙하에 의한 충격에너지로의 진동 예측

구조물의 발파해체시 발생하는 진동은 발파에 의한 발파진동이라고 간주하기는 곤란한 것으로 건물을 발파시 구조물의 주요 지지점에 장약하여 발파하게 되는데 발파원이 지상에 있으므로 발파 자체에 의한 지반진동보다는 구조물의 낙하에 의한 충격으로 발생하는 지반진동을 더 고려해야 된다. 낙하에 의한 충격에너지로 인한 주변의 진동 속도는 경험적으로 다음과 같이 표현된다.

$$R = (D / (kE))^{0.5n} \quad (2)$$

R : 최대입자속도

D : 거리(발파지점과 측정점 거리)

k : 상관계수(0-1)

E : 충격에너지(J)

n : 경험상수

(3) 진동속도에 따른 인체의 반응

1968년의 Wiss의 연구에 의하면 진동속도에 따른 인간의 반응은 다음 표1과 같다.

표 1 진동속도에 따른 인체반응

범 위(cm/sec)	인 체 반 응
0.38-0.8	불편함을 느낀다.
0.81-1.30	심리적 교란 상태가 된다
1.31-2.00	불쾌감이 발생

방진구, 충격흡수재의 사용 및 붕괴속도의 조절 등을 통하여 인체에 미치는 진동의 영향을 최소화 시켜야한다.

2.2.2 폭풍압(Air-Blast)

폭풍압은 주변 건물이나 인체에 미치는 영향이 크므로 검토되어야 한다. 폭풍압이 과다하게 큰 경우 소음이나 분진 뿐만 아니라 주변 건물에 창문의 피해 및 구조적인 손상을 초래할 수 있으므로 유의해서 계획을 세울 필요가 있다. 폭풍압의 계산에는 일반적으로 다음 식(3)을 사용한다.

$$P = kW^m D^n \quad (3)$$

P : 압력(atm)

k, m, n : 폭약의 종류로 정해지는 상수

고성능 폭약의 경우: k=3, m=0.5, n=-1.5.

W : 지발당 장약량(kg)

D : 발파원으로 부터 직선 거리

식(3)으로 부터 산출된 폭풍압을 dB로 환산하면 다음과 같다.

$$dB = 20 \log P + 194 \quad (4)$$

발파해체시 발생하는 소음치는 일반적으로 100~130dB 정도이나 방호공사에 따라 하향 조정이 가능하지만 충분한 사전 홍보활동으로 체감치를 줄여 주는 노력도 매우 중요하다.

일반적으로 폭풍압에 의한 건물의 피해정도는 다음 표2와 같다.

표 2 폭풍압에 따른 건물의 피해정도

폭풍압(kg/cm ²)	피 해 정 도
0.06	창문유리 일부파괴
0.08-0.10	창문유리 거의 파괴
0.15-0.20	창문과 덧문 일부파괴
0.25-0.30	창문과 덧문 파괴
0.40-0.50	기왓장이 떨어진다.
0.60-0.70	지붕 및 기둥에 심각한 피해를 입는다.
1.5	15명 정도의 가옥이 파괴된다.

2.2.3 비석(Flying Debris)

발파시 구조체의 조각이 주변으로 비산하게 되는데 이를 비석이라고 하며 비석으로 인하여 주변 건물 및 인체에 영향을 미칠 수 있으므로 비석의 처리에 대해 계획을 세워야 한다. 비석을 효과적으로 제어하기 위하여 적절한 재질의 방호재를 사용하여 장약개소 및 구조물의 개활면(open area)을 막는 공사를 하게 되는데 이를 방호공사라고 한다. 이 방호공사를 효율적으로 실시하므로써 비석을 제어할 수 있다. 방호재로는 파형철판, 용접철망, 플라스틱 쉬트, 고무매트 등을 주로 사용한다.

3. 발파해체의 공정

(1) 사전 조사

이 공정에서는 구조물의 특성, 주변환경, 지하

매설물 등을 조사하며 공법선택에 중요한 변수가 된다.

(2) 발파공법의 선택

여러 발파공법중 현장여건에 맞고 주변에 주는 영향을 최소화할 수 있는 공법을 선택한다

(3) 기본설계

비용산출을 위한 기초설계를 실시하여 사전 공사량과 공사금액을 산출한다.

(4) 건적작성 및 제출

기본설계에 근거하여 산출된 공사량과 공사금액을 제출한다.

(5) 구체발파 설계

주변환경에 미치는 영향인 진동, 폭풍압, 비석 등을 고려하여 기폭시스템과 방호방법을 설계한다. 이 구체설계가 완료되면 인허가를 처리하고 주민들에게 작업에 대해 홍보활동을 한다.

(6) 작업장 조건의 확보

작업장 주변을 공사가 가능하도록 정리하고 비계 및 울타리를 설치한다.

(7) 시험발파

시험적으로 구조적 안정성에 영향을 미치지 않는 부재를 선택, 발파하고 화약의 종류, 화약량 및 천공 등이 적절한지 파악하여 문제점을 파악한다. 파악된 문제점을 대상구조체에서 문제점을 최소화할 수 있도록 보정한다.

(8) 사전공사

구조물의 발파가 단순히 화약만으로 행해지는 것은 아니므로 화약량을 줄이고 발파의 안전성을 향상시키도록 사전에 부재를 파쇄, 제거한다.

(9) 장약 및 전색

장약량과 장약위치를 선택하여 장약하고 장약된 주변을 전색제를 사용하여 완전 밀폐한다. 장약량은 건물크기 및 주변환경에 따라 다르게 설정

되며 구조체의 크기와 붕괴방향을 고려하여 차별 장약하고 장약위치를 정한다. 또한, 구조체의 강도 및 배근상태에 따라 다르게 장약시킨다.

(10) 결선 및 확인

뇌관과 연결하고 결선상태를 확인한다.

(11) 대피 및 경계

주민들을 대피시키고 발파지역내로 주민의 출입이 없도록 경계한다. 경찰에 협조를 요청하고 필요시 교통통제도 실시한다.

(12) 발파

발파를 실시한다.

(13) 불발잔류약 확인

(14) 버럭처리 및 공사완료

버럭을 처리한 후 공사를 완료한다.

4. 발파해체의 시공사례

4.1 공사 및 건물개요

- (1) 층수: 지하2층 지상8층 높이 40m
- (2) 면적: 6054평
- (3) 소재지: 강원도 속초시 장사동
- (4) 건물명: 킹덤호텔
- (5) 발파일시: 1993년 6월 21일(월) 17:00
- (6) 공사기간: 29일

4.2 건물주변여건

건물 좌측에 5m 지점에 100mm 급수배관이 존재하고 우측 80m지점에 골프장 캐디하우스와 후면 100m 지점에는 골프장 클럽하우스가 있는 상태이다.

4.3 해체공법: 상부붕락 공법(Toppling) 및 단축 붕괴(Telescoping)를 적용

4.4 천공 및 화약사용량

- (1) 총천공수: 2,275공
- (2) 전기뇌관(DSD) 747개
- (3) Gelatine Dynamite: 173.8 kg
- (4) Detonating Cord: 1625m

4.5 붕괴유도 방향 및 붕괴방법

(1) 고려사항

- 가. 건물이 붕괴될 때 발생하는 버력이 쌓일 수 있는 공간 확보
- 나. 붕괴시 Kick-Back 현상을 배제할 수 있는 방향
- 다. 충격하중으로 인한 지반진동을 줄일 수 있는 붕괴형태

(2) 붕괴 유도방향 설정

- 가. 건물의 중심으로 붕괴 유도하며 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

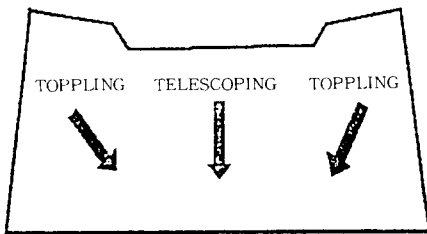


그림 1 정면에서 본 붕괴방향

- 나. 지하공간을 충분히 활용할 수 있도록 건물의 앞쪽으로 붕괴 유도하며 이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

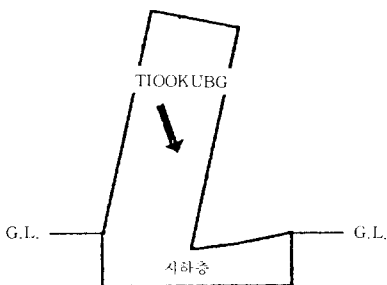


그림 2 좌측면에서 본 붕괴방향

(3) 건물의 붕괴 방법 설정

건물의 중심부부터 붕괴가 시작되어 좌, 우측이 일정한 시차를 두고 연속적인 붕괴가 발생하도록 유도한다.

4.6 시험발파

시험발파는 설계상의 최소화약량을 사용하며 대상구조물 전체의 안정성에 유해하지 않은 부재를 선택하여 실시하며, 시험발파를 통하여 화약의 종류, 화약량 및 천공 등의 설계치가 대상구조체에 적합한 지를 검정, 보정한다. 기둥과 전단벽의 2개소에 대해 시험발파를 실시하여 양호한 것으로 나타났다. 전단벽에 장전된 화약의 기폭은 도폭선을 사용하였는데, 시험 발파시 소음치가 50m에서 104~118 dB로서 본 발파시 건물 전체에 사용될 도폭선의 소량을 고려하면 발생소음치가 130~140 dB(50m거리)로 예상되었기에 비록 주변피해는 없다 하더라도 인체감각상 불편을 겪을 수 있다고 판단되어 도폭선 기폭을 줄이고 전기뇌관 기폭으로 대체하므로써 소음을 120dB 정도로 줄이는 것으로 수정하였다.

4.7 사전파쇄공사

화약량을 줄이고 발파의 안전성을 향상시키기 위해 사전 파쇄공사를 실시하며 이를 통하여 붕괴 저항의 밸런스를 유지시켜 계획된 방향으로 유도할 수 있다.

(1) 사전파쇄대상

- 가. 화약장전층 내벽 및 전단벽: 지하 1,2층, 지상 1,2,4,6 층
- 나. 화약장전층 외벽: 지상 1,2층

(2) 사전파쇄 방법

- 가. 완전 파쇄 및 제거: 장전층의 내벽체
- 나. 하부 slit: 비장전 대상 중 저층(지상 3층)

(3) 천공

천공은 화약을 기둥내부에 장전할 수 있도록 기

등의 중심부를 관통하여 구멍을 뚫는 공정으로서 본 건물은 착암기를 사용하여 기둥 및 전단벽체에 대해 실시하였다. 천공경은 38mm로 하였고 기둥은 3~5공, 전단벽은 3~5열 40cm 간격으로 천공하여 총천공수는 2275공 이었다. 천공각은 기둥면에 대하여 30~45도를 유지하여 전색장이 길어지게 함은 물론 전색제로서 유동 물질을 사용할 경우 기울어진 천공구멍으로 저절로 흘러들어가 작업효율을 증대시킬 수 있다.

4.8 방호

(1) 1차방호 : 화약을 장전한 개소에 직접 붙여서 화약의 폭발력에 의해 발생하는 콘크리트의 비산을 억제할 목적으로 골함석 및 방폭시트를 사용하였다.

(2) 2차방호 : 창문 등의 개구부를 막아 1차방호에 빠져나온 비산물을 제어할 목적으로 파형철판 등을 이용하여 밀폐시켰다. 이때 방호자재를 단단히 부착시켜 비석의 제어뿐만 아니라 발파소음도 차단시키고 사전 공사전에 시행하여 사전 공사시 소음도 감소시켰다.

(3) 3차방호 : 해체 대상건물 외곽에 방호막을 설치하여 2차방호를 통과하는 비석의 제어 및 발생분진중 비교적 큰 비중의 입자를 제어한다.

(4) 4차방호 : 필요시에 설치하는 것으로 발파 대상 건물 인근에 위치한 건물 등에 방호막을 설치하여 비석 및 소음으로 부터 보호조치 한다.

4.9 장약 및 전색

지하층의 기둥에 대해서는 기둥당 5공, 지상부 저층(1,2층) 기둥은 4공, 고층(4,6층)의 기둥은 3공을 뚫어 장약하였고 전단벽의 경우 3열~5열로 장약하였다. 화약은 (주) 한화 제품을 사용하였고 최대장약량은 45.1kg이었다. 이때 비장약량은 기둥의 경우 0.4~0.5 kg/m³, 벽체의 경우 1.0~01.5 kg/m³으로 하였다. 전색제로는 석고를 물에 적당 비율로 섞어서 사용하였는데 유동성이 좋아 작업효율이 향상되었으며 완전 밀폐가 가능하였다. 작업에 소요된 시간은 장전, 전색에 3일, 결선 및

최종확인에 2일이었으며 결선방법은 직렬로 하였다.

4.10 기폭시스템

계획된 방향으로 붕괴를 유도하며 파쇄효율을 향상시키기 위하여 건물을 4개블록으로 나누어 시간차를 두고 발파하였는데 중앙부가 먼저 아래방향으로 붕괴하여 좌우측 부분을 연쇄적으로 파괴되도록하였다. 개략적인 기폭순서와 붕괴형상은 다음 그림 3, 4와 같으며 실제 해체되는 장면은 사진1과 같다.

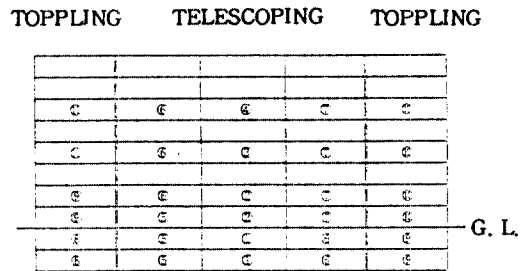


그림 3 정면에서 본 기폭순서 및 붕괴방향

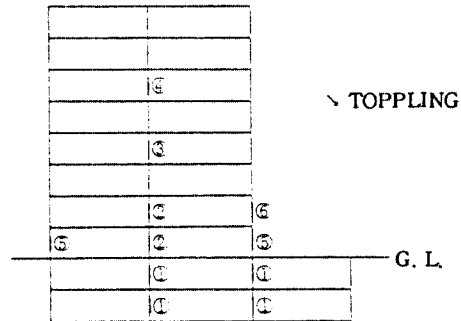


그림 4 측면에서 본 기폭순서 및 붕괴방향

4.11 환경영향치

(1) 진동

발파시 예상치와 실제 측정치를 비교하면 다음 표3와 같다.

(2) 소음치

가. 폭풍압

폭풍압을 측정된 결과는 다음 표4와 같다.

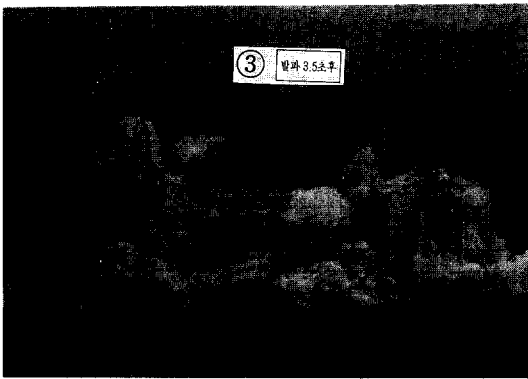
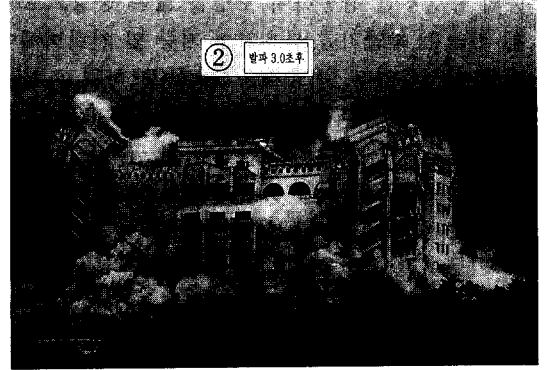
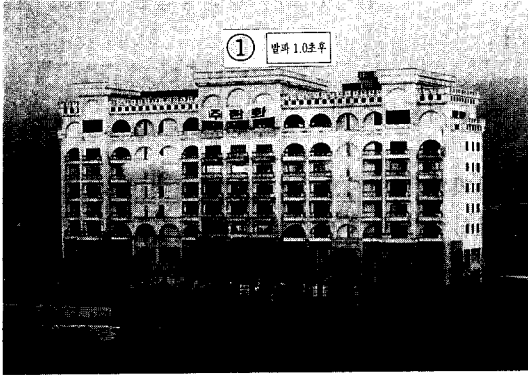


사진 1 실제 해체장면

표 3 진동측정결과

거리(m)	진동 속도	
	예상치(cm/sec)	측정치(cm/sec)
20	1.831	1.329
50	1.158	0.600
100	0.818	0.400
115	0.760	0.234
140	0.679	0.217

표 4 폭풍압측정 결과

측정거리(m)	측정치(dB)	비고
20	측정안됨	
50	142	
100	142	
150	137	

나. 소음 : 발파대상건물 전면에서 80m떨어진 곳에서 측정된 결과 122.7dB로 측정되었다.

다. 비석 : 1차 2차, 3차 방호로 완전히 제어되었다.

라. 분진 : 발파후 5분이내로 침강하여 소방차로 인공도로에 살수하여 분진을 제거하였다.

5. 결 론

이상으로 발파해체공법과 그 예를 중심으로 기술하였다. 도심지에서의 발파해체 공사는 건물자재를 주변피해 없이 붕괴시키는 고도의 기술력도 중요하지만 환경적인 영향도 무시할 수 없는 요소로 공사전에 이에 대한 철저한 분석과 대책이 필요하다. 아울러 해체공사비 중 상당부분을 차지하는 콘크리트의 재활용에 대해서도 연구가 시급하다. 또한, 국내 발파해체의 육성을 위해서 외국의 선진기술 도입도 중요하나 우리의 기술로 정착시키

는데 노력할 것을 이 분야의 기술자와 전문인에게
바라는 마음이다. □

■ 용어의 정의 ■

1. 기폭시스템
뇌관의 기폭순서(즉, 폭약을 터트리는 순서) 및 뇌관
끼리의 연결(전기뇌관의 경우 직렬, 병렬, 직병렬) 방
법을 말한다.
2. 전색
발파공에 폭약을 장전한 후 그 공에 다시 점토나 모래
등을 충전하는 것.
이때 매워지는 것을 **stemming materials**, 매우는 행
위를 **tamping**이라고 한다.
전색, 텀핑은 그 양자 모두를 말한다. 전색에 의해 밀
폐효과가 나타나 폭약의 위력을 충분히 발휘하는 동시
에 탄광에서는 메탄, 탄진에의 착화를 방지하므로 극
히 중요하다. 일반적으로 모래, 점토, 암분 등이 이용
되나 경우에 따라 물, 그외의 물질이 이용된다.
3. 불발잔류약
가. 발파에서 천공내에 장전한 폭약이 폭발하지 않는
것을 불발(**miss fire**)이라고 하며, 불발되어 천공
내에 남아 있는 폭약을 불발잔류약이라 한다.
나. 일반적으로 폭발해야 할 화약류가 폭발하지 않는
불폭현상은 뇌관의 결함, 결선방법의 오류 또는 결
합, 화약종류에 따른 비적정뇌관 등의 원인이 있
다.
4. 버럭처리
발파후의 남은 콘크리트나 암석의 잔해를 버럭이라고
하며, 이를 처리(폐기물처리, 또는 재활용)하는 행위
5. 인자속도
발파로 인한 충격파가 통과한 후에 최초로 정지하여
있던 매체가 돌연한 유속을 갖게 된다. 이 유속을 인자
속도 또는 물질속도라 한다. 충격파의 전파속도보다는
통상 작다.
6. kick-back 현상
건물을 어떤 방향으로 쓰러뜨릴 경우, 반대편으로 건
물구조체의 하부가 밀려나오는 현상
7. 최소저항선
장약(천공구멍내에 장전된 폭약)의 중심에서 자유면
까지의 최소거리를 말한다.
8. slit
구조물발파해체에서 사전약화방법의 하나이며, 벽체
나 바닥을 일정한 폭으로 파쇄하여 건물의 붕괴시 저
항을 줄여준다.
9. 도폭선 기폭
도폭선이란 폭약을 심약으로 섬유, 플라스틱 또는 금속
속관으로 피복한 것을 말하여 외형은 마치 굵은 전기
선과 비슷하게 생겼다.
흑색화약이 심약으로 되어서 서서히 연소되는 도화선
과는 달리 고폭약을 심약으로 사용하는 도폭선의 폭속
은 5,500m/sec이며 그 자체가 폭약의 기폭력이 있다.
천둥, 번개가 많이 있는 지방이나, 누설전류의 위험이
있는 경우, 또는 전기뇌관의 각선이 충격파에 잘릴 우
려가 있는 경우 등, 전기발파가 실용적이 되지 못할 때
행하는 방법.
10. 비 장약량
대상 구조체(또는 암석)의 파쇄량 대비 화약량.
11. Detonating cord : 도폭선
12. 장약개소
화약을 장전한(설치한) 곳.