

발파해체시 낙하충격진동 예측에 관한 연구

임대규¹⁾, 임영기²⁾

A Study for Felling Impact Vibration Prediction from Blasting Demolition

Dae-Kye Limm and Young-Ki Lim

ABSTRACT. Use term of tower style construction exceeds recently. Accordingly, according to construction safety diagnosis result, achieve removal or Improvement construction. But when work removal, must shorten shut down time. Therefore, removal method of construction to use blasting demolition of construction is very profitable. Influence construction and equipment by blasting vibration and occurrence vibration caused by felling impact. Is using disadvantageous machine removal method of construction by and economic performance by effect of such vibration. Therefore, this research studied techniques to forecast vibration level happened at blasting demolition and vibration reduction techniques by use a scaled model test.

Key words : blast demolition, felling impact vibration, tower structure, scaled model test

초 목. 최근 들어 타워형 구조물의 사용 연한이 초과함에 따라 구조물 안전 진단 결과에 따라 철거 작업 혹은 국부적인 성능개선 공사를 수행하고 있다. 그러나 철거 작업시 가능한 한 휴지기간(Shut down)을 단축하여야 한다는 측면 및 경제성 측면에서 발파해체공법은 매우 매력적인 철거수단으로 관심이 증대되고 있으나, 철거시 발생하는 진동으로 인해 인접한 정밀 기기류에 대한 영향을 우려하여 철거 기간과 비용측면에서 상대적으로 불리한 기계식 철거공법을 선호하고 있다. 따라서, 본 연구는 연돌과 같은 타워형 구조물의 발파해체시 붕괴된 부재가 지면과 충돌시 발생하는 지반진동 수준을 예측하는 기법과 진동을 저감할 수 있는 각종 방법에 대한 효과를 축소모형시험을 통해 도출하였다.

핵심어 : 발파해체, 낙하충격진동, 타워형 구조물, 축소모형시험

1. 서 론

발파에 의한 구조물 해체공법은 기계식 해체 공법에 비하여 비용을 절감시킬 수 있을 뿐만 아니라 소음, 진동 및 분진발생 등의 환경 문제에 관한 대책을 단기간 안에 해결할 수 있는 장점이 있다. 특히 발전소, 제철소, 정유공장 등과 같은 중요 산업시설물에서 국부적인 성능개선공사를 수행시 수반되는 철거작업은 가능한 한 휴지기간(Shut down)을 단축하여야 한다는 측면에서 발파해체공법은 매우 매력적인 철거수단으로 관심이 증대되고 있으나, 철거시 발생하는 진동으로 인해 인접한 정밀 기기류에 대한 영향을 우려하여

철거 기간과 비용측면에서 상대적으로 불리한 기계식 철거공법을 선호하고 있는 실정이다. 발파해체공법은 1940년대 말 미국의 CDI사에 의하여 개발되어 현재 일반건축물, 교량, 타원(연돌, 싸이로, 철탑)등 다양한 구조물에 대해 적용되고 있으며, 우리나라에서도 1991년 8월 26일 (주)한화 화약 응용팀과 육군사관학교에 의해 최초로 발파해체공법을 시도한 이래 약 30여 건의 시공사례를 보유하고 있다. 현재까지 국내에서 발파해체공법을 적용하여 수행된 대상물은 아파트, 빌딩 등 건축물이 주를 이루고 있으며 높이에 비해 상대적으로 바닥면적이 협소한 타워형 구조물은 총 9건을 수행하였고 점차 증가하는 추세에 있다. 타워형 구조물에 대한 발파해체방식은 경제성 측면에서 전도(Felling)방식을 선호하고 있으나 점진붕괴(Progressive Collapse)방식에 비해 상대적으로 높은 수준의 낙하충격진동을 발생시켜 인접한 지점

1) 대영발파엔지니어링, 대표이사
2) 대림산업(주) 기술연구소, 과장
접수일 : 2004년 9월 13일

에 정밀 기기류가 존재할 경우 적용에 제약을 받고 있는 실정이다. 우리나라에서는 낙하충격진동의 예측은 M.A.Perkin(1989)이 제안한 경험식을 주로 사용하고 있으나 이는 고층 건축물과 같은 붕괴 패턴에 의한 각 블록(Block)별 충격에너지량(joules)을 주요 인자로 하고 있으며 먼저 붕괴되어 쌓인 블록의 파쇄물 위에 새로운 블록이 낙하하므로 타워형식의 구조물이 전도하는 경우와 전도방식에 의한 발파해체서 진동발생 메커니즘은 상이할 것으로 예상된다.

2. 연구 대상

2.1 공사 개요

한국중부발전(주)에서 시행하고 대림산업(주)에서 시공 중인 “제주화력발전소 내연설비 교체건설공사”는 노후된 기존발전소를 철거하고 신규 발전소를 건설하는 것이 주요 내용으로 열화에 의한 건전성 부족으로 재활용 불가 판정을 받은 연돌(Stack)을 안전하고 신속하게 철거하여야 한다. 연돌 주변에는 가동 중인 발전소가 40m 이격되어 위치하고 있으며, 제주도 기후 특성상 초속 20m 이상의 돌풍이 빈번하게 발생하고 유지되는 달리 대형 양중장비의 동원에 어려움이 있으므로 D.W.S(Diamond Wire Saw)에 의한 절단·인양공법은 검토과정에서 배제되었고, 발파해체 공법이 대안으로 대두되었다.

2.2 공사 여건

본 철거공사는 도서지방 특성과 연돌 전도반경 이내에 진동에 취약한 것으로 알려진 가동 중인 발전소 터빈(Turbine) 및 변전시설(Switch Yard)이 위치하고 있어 계획된 전도방향으로 붕괴되지 않을 경우 중대한 재해가 발생할 수 있는 어려운 현장여건을 지니고 있다.

발전소를 운전하는 부서에서 제시한 진동관리 기준은 표 1과 같다.

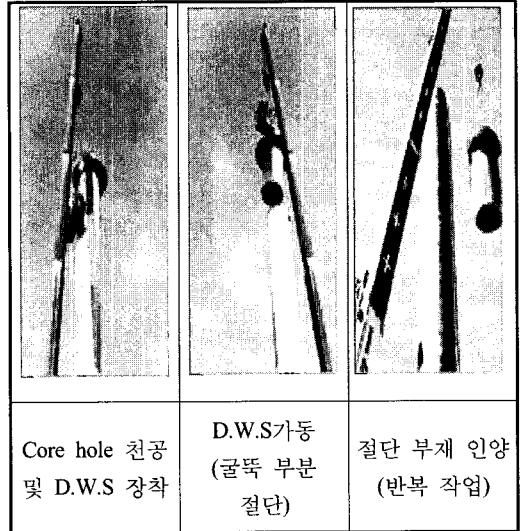


그림 1. Diamond Wire Saw 작업 과정



그림 2. 주변 보안물건 현황

표 1. 주요 시설물 진동관리 기준

적용 대상	진동관리 기준		비 고
	단 위	관리수준	
#1 호기 Turbine B/D	cm/sec	0.20	한국전력기술(주) 의견
	gal	0.07	원자력발전소기술4시방서
Switch Yard	cm/sec	0.20	한국전력기술(주) 의견
콘크리트 구조물	cm/sec	1.00	한국전력기술(주) 의견

2.3 철거공법 선정 기준

당 현장 철거 대상 물건인 "연돌(Stack)"은 높이가 70.0m에 달하며 주변에는 가동 중인 발전시설이 약 40m 이내에 위치하고 Switch yard 및 유류 저장시설 등이 근접거리에 산재하고 있을 뿐 아니라 부지가 제주도 해변인 관계로 강풍에 의한 영향을 고려하여야 한다. 이러한 현장 여건을 고려하여 철거공법 선정 원칙을 다음 표2와 같이 고려하였다.


표 2. 철거공법 선정 기준

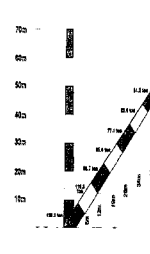
- 철거 작업 중 모든 발생 가능한 위해요소에 대해 확실한 안전성이 보장될 수 있을 것.
 - : 작업 중 불시 붕괴, 작업원 추락 등
- 소정의 요구공기를 충족할 수 있을 것.
 - : 본 공사 준공시한은 2005년 5월로 연돌이 신속히 제거되어야만 후속 공종 조기 착수 가능
- 도리지방인 제주도 공사 여건을 고려하여 공법을 선정할 것.
 - : 절단·인양공법 적용시 400톤 급 대형 Crane 획득 곤란 및 강풍에 의한 고소작업 위험성 증대
- 적절한 공사비가 소요되는 공법을 선정할 것.
 - : 본 공사 예산대비 연돌철거공사에 과도한 공사비 투입 곤란
- 운전 중인 발전소의 영향을 배제할 수 있는 공법.
 - : 발전소 운전 장애 발생시 막대한 손실 발생
- 철거시 발생하는 공해(진동, 소음, 분진 등)를 최소화할 수 있는 환경친화적 공법일 것.
 - : 발전소 주변 거주민의 민원발생시 원활한 본 공사 추진 지장 초래

2.4 철거 대상 주요 제원

철거 대상인 연돌의 주요 제원은 아래 표 3과 같다.

표 3. 철거 대상 연돌 주요 제원

구조	제 원 (m)				높 이	철거대상 굴뚝
	하 부		상 부			
	직경	두께	직경	두께		
R.C Shell	5.70	0.57	3.86	0.225	70.0	



- 철근콘크리트 및 내화벽돌 중량합산
- 내화벽돌의 단위중량은 2.15 ton/m³
- 적용
- 연돌(Stack) 중량 : 635 ton/기 (RC : 407 ton/기, 내화벽돌 : 228 ton/기)

3. 낙하충격진동

3.1 개요

구조물 발파해체시 발생하는 진동은 폭약이 장전공 내에서 폭발할 때 발생하는 발파진동과 발파에 의해 구조물 부재가 낙하하는 부재가 지면과 충돌하여 발생하는 충격진동의 두가지로 구분된다. 일반적인 발파에서 진동을 예측할 때는 지발당 장약량을 기준하고 있으나 타워형식 구조물은 블록별 중량과 낙하높이를 기준한다. 진동수준은 전파경로의 물성치 및 형상 등에 따라 큰 영향을 받으며 일반적으로 토사는 암반보다 진동값을 증폭시키는 성질이 있으며 표면파는 체적파에 비하여 감쇠경향이 적다. 그러므로 표면파는 자연지진과 같은 성질의 저주파 진동을 발생시켜 표면상에 있는 구조물(건축물)에 큰 손상을 줄 수 있다. 동일한 폭약량과 거리에도 불구하고 암반중에서의 진동속도와 지표 토사면에서의 진동속도가 큰 차이를 보이는 것은 지반조건이 서로 다르기 때문이며 심할

경우 10배 이상의 차이가 나는 경우도 있다. 그리고 건조한 암반에 비하여 물로 포함된 암반은 2.0~2.5배, 수중에서는 약 5배, 점토층은 3~4배로 진동 값이 커지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.

3.2 낙하 충격 진동 특징 및 예측 제안식

구조물 발파해체시 부재의 낙하·충격에 의해 지반에 충격을 주어 발생하는 진동은 암반을 발파시 생성되는 지반 진동과 비교하면 동일한 거리에서 1, 2층 정도의 건물일 경우에는 충격진동이 발파 진동보다 대체로 작은 값을 나타내는 경향이 있다. 이는 발파해체시 지반과 가까운 층을 먼저 파괴함으로써 파쇄된 파편이나 부재들이 지반에서 완충재 역할을 수행하기 때문이며, 또한 상부 하중에 비해 착지 면적이 상대적으로 넓기 때문이다.

그러나 일반적인 구조물 발파해체시는 구조물 상부의 자중에 따른 충격에너지에 의한 충격진동이 훨씬 우세하므로 이를 기준으로 진동수준을 예측한다.

낙하 충격진동속도를 계산하기 위한 예측공식은 전문회사 별로 그리고 국가별로 다른 경험식을 사용하고 있다. 국내에서는 보편적으로 사용하는 진동예측은 다음의 경험공식에 의한다.

$$R = \left(\frac{d}{\sqrt{K \cdot E}} \right)^n$$

(1)

여기서,

- R : 최대 진동 속도 (mm/sec)
- d : 충격 중심으로부터의 거리 (m)
- K : 지반의 상태를 나타내는 상관계수(0.0 ~ 1.0)

- E : 충격 에너지 (Joules)
- (E = m x g x h
- = 부재질량(kg)x중력가속도x낙하높이(m))
- n : 경험 계수 (-0.5 적용이 일반적)

(출처 : Explosives Engineering Handbook, M.A.Perkin(1989))

상기 공식은 남산외인 Apt 발파해체설계시에 적용하였으며 많은 안전율이 포함되어 있으므로 실

제로 발파해체 현장에서의 계측기에 의한 실측치는 상기 공식에 의하여 예측한 값의 절반 또는 절반이하 정도에 불과하다. 여기서 K는 해체대상 구조물이 세워져 있는 대지의 토질에 따라 모래질일 경우는 0.5내외, 일반 토사일 경우는 0.6~0.7, 그리고 암반일 경우에는 0.8~0.9를 적용하며, E는 건물의 자중과 낙하 높이에 의하여 계산된 충격에너지를, n은 -0.5를 적용하여 R값이 관리기준 이하가 되도록 붕괴패턴 설계를 조정하여야 한다.

3.3 연구 배경

다층 건축물의 경우 붕괴패턴 설계시 불력별 기폭시차를 두기 때문에 불력중량과 낙하고를 조절할 수 있으나, 타워형 구조물을 전도방식에 의해 해체할 경우에는 부재가 일시에 지면에 착지되므로 최초 발파에서 종료시까지의 진동발생 양상이 매우 상이하기 때문에 예측 제안식의 적용에는 문제점이 발생될 것으로 예상되어 본 연구를 시행하게 되었다.

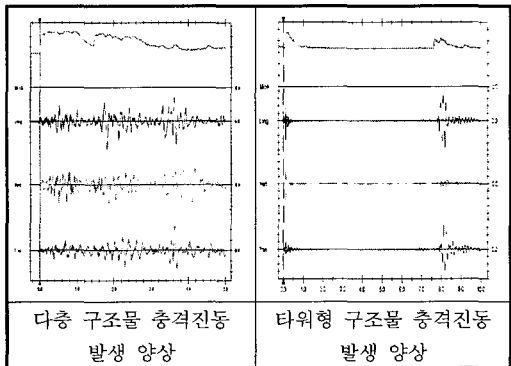
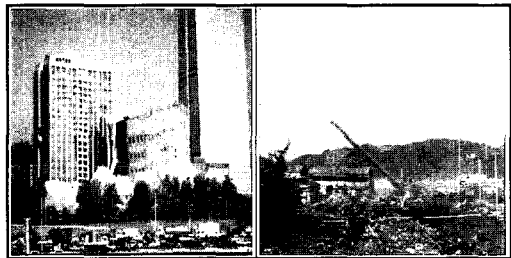


그림 3. 붕괴 형태에 따른 충격진동 발생 양상 비교

3.4 낙하충격진동 예측

3.4.1 사례 연구

본 연돌해체에 따른 낙하충격진동발생수준을 예측하기 위하여 기 수행된 계측자료를 분석하였다.

(가) 사례-1 : 포항제철 3후판 현장내 고가수조 Stack 1기 발파해체

적용 공법	전도공법 (Felling)			
규모	높이	31.8m	직경 (외경/내경)	4.5m/3.5m
	두께	50cm	총중량	636 ton
	구조	철근콘크리트 Shell 구조		

충격 진동 측정 결과	측정 거리 (m)	진동 (cm/sec)				소음 dB(A)
		PVS	T	V	L	
			성분	성분	성분	
	40.0m	0.503	0.189	0.432	0.489	105.6
	45.0m	0.365	0.114	0.237	0.364	106.2

그림 4. 고가수조 발파해체 제원 및 계측결과

(나) 사례-2 : 홍천 연봉지구 Stack 1기 발파해체


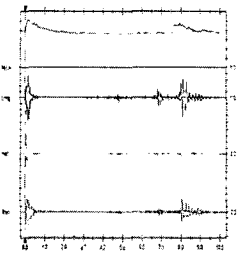
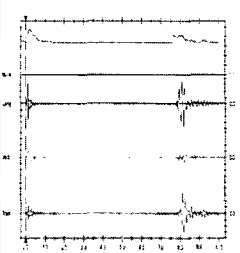
규모	적용공법		전도공법 (Felling)			
	높이	40.0 m	직경 (외/경)	2.50 m/2.00 m		
	두께	25 cm	총중량	116 ton		
구조		철근콘크리트 Shell 구조				
발파 해체 광경						
계측 결과	계측장소	이격 거리	P.P.V (cm/sec)	소음 dB(A,L)	비고	
	전신주	10.0m	0.873	102.2 (A)		발파진동
	현장내 1	50.0m	0.230	95.2 (A)		낙하 충격 진동
	현장내 2	80.0m	0.249	93.4 (A)		
	현대자동차	200.0m	0.040	121.7 (L)		
	카페레드	150.0m	0.030	122.5 (L)		
삼호 Apt	110.0m	0.021	80.4 (A)			

표 4. 연돌 발파해체에 따른 진동 특성 비교

폭원 10m 지점 계측 기록			폭원 50m 지점 계측 기록		
Microphone	'A' Weight		Microphone	'A' Weight	
PSPL	102.2 dB(A) at 0.158 sec		PSPL	95.2 dB(A) at 0.150 sec	
ZC Freq	N/A		ZC Freq	N/A	
Channel Test	Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 481 mv)		Channel Test	Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 504 mv)	
	Tran	Vert Long		Tran	Vert Long
PPV	4.98	8.37 7.64	PPV	1.02	1.27 1.83
PPV	53.9	67.1 69.0	PPV	55.2	53.1 56.2
ZC Freq	10	32 16	ZC Freq	9.0	>100 8.0
Time (Rel. to Trig)	0.171	0.048 0.147	Time (Rel. to Trig)	8.127	0.122 8.179
Peak Acceleration	0.113	0.102 0.128	Peak Acceleration	0.0530	0.0693 0.0878
Peak Displacement	0.0726	0.0403 0.127	Peak Displacement	0.0320	0.00543 0.0422
Sensorcheck	Passed Passed Passed		Sensorcheck	Passed Passed Passed	
Peak Vector Sum	8.73 mm/s at 0.148 sec		Peak Vector Sum	2.30 mm/s at 8.155 sec	
					

3.4.2 경험식과 실측치 비교

사례 2에서 측정된 진동수준을 바탕으로 다층 건축물 낙하충격 진동 예측식(M.A.Perkin)과의 상관성을 분석하였다.

표 5. 낙하충격진동 예측 결과

<p>◆ 충격진동 예측</p> $R = \left(\frac{d}{\sqrt{K \cdot E}} \right)^n$ <p>여기서 R : 최대진동속도 (mm/sec) d : 충격 중심으로부터 의 거리 (m) K : 지반의 상태를 나타내는 상관 계수 (0.0 ~ 1.0) E : 충격에너지(Joules) $(E = m \times g \times h)$ n : 경험 계수 (-0.5) 적용이 일반적)</p>	<p>【검토 조건】</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stack 총 중량 : 116.05 ton - Block 최대 총량 : 116.05 ton <p>(최악조건)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 최대 낙하 높이 : 38.00 m - 검토 이격거리 : 50.00 m (현장내 1 지점) <p>▶ 산출 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - $E = 116,050\text{kg} \times 9.8\text{m/sec}^2 \times 38.0\text{m} = 43,217,020 \text{ Joules}$ - $R = \left(\frac{50}{\sqrt{0.5 \times 43,217,020}} \right)^{-0.5} = 9.642 \text{ mm/sec} = 0.9642 \text{ cm/sec}$
---	--

검토 결과	<ul style="list-style-type: none"> ○연돌 전도지점에서 50m 이격된 장소에서 측 정된 진동수준은 0.183 cm/sec (P.P.V) 및 0.23 cm/sec (P.V.S)로 예측식에 의해 산출된 0.964 cm/sec 대비 약 19% ~ 24%에 불과하였다. ○이는 낙하고 및 중량을 적용함에 있어 실제 연돌의 붕괴 거동을 제대로 반영하지 못한 것 에 기인하는 것으로 추정된다.
-------	--

3.5 모형시험에 의한 낙하충격진동 평가

3.5.1 시험 개요

Stack 낙하 충격 하중에 의한 진동 예측 및 방

진흡득, 방진구의 효과를 검증하기 위해 모형을 제작하여 시험을 실시하였으며, 적용한 축소 Scale은 아래 표 6과 같다.

표 6. 모형시험 적용 축소 Scale

구 분	실규모제원	모의시험제원	축 척
Stack 높이	70.0m	3.5m	20 : 1
Stack 중량	635 ton	30.0 kg	21,166 : 1
SWYD 거리	133.0m	10.62	12.5 : 1
#1 Turbine 거리	69.4	5.55	12.5 : 1

(가) 시험방법

검토 항목	<ul style="list-style-type: none"> ○모형연돌(Stack) 중량차이에 의한 진동양상 : 8.0kg vs. 30.0kg ○낙하고 차이에 의한 진동 양상 : 90° vs. 45° ○토제 높이 차이에 의한 진동 양상 : 15cm vs. 30cm ○방진구 유·무에 의한 진동 양상 : 방진구 깊이 20cm vs. 미설치
-------	---

시험의 진행과정은 아래 그림 6과 같이 진행하였다.

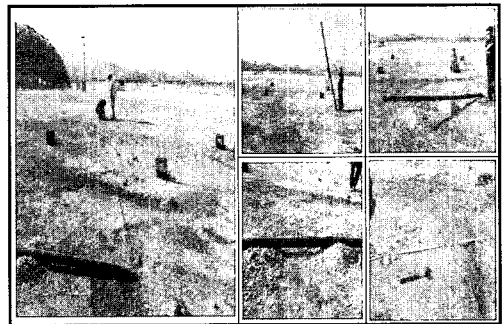


그림 6. 모형시험 전경 및 세부 검토 사항

(나) 시험결과

(a) 중량, 전파거리, 낙하각도 변화에 따른 진동 경향

중량 4배 증가 대비 충격진동은 약 2배 가량 증가.
이격거리 2배 증가 대비 충격진동 감소량은 약 7
배 정도 감소.
낙하각도 45°에서 90° 대비 약 10%정도 감소.

계측거리	중 량	충격진동(mm/sec)		비 고
		8.0 kg	30.0 kg	
5.55m	90°	1.19	2.86	2.40배 ↑
	45°	1.05	1.91	1.13배 ↑
6.17m	90°	0.572	1.02	1.78배 ↑
	45°	0.556	1.14	2.05배 ↑
8.67m	90°	0.206	0.667	3.23배 ↑
	45°	0.191	0.492	2.56배 ↑
10.62m	90°	0.286	0.445	1.55배 ↑
	45°	0.206	0.349	1.68배 ↑

(b) 토제 설치 유·무에 따른 진동 경향

충격 흡수시설(토제)을 한 경우가 안한 것 대비
평균 40~50%정도 감소하는 것으로 나타남.

계측거리	중 량	충격진동(mm/sec)		비 고
		토제 無	토제 有	
5.55m	90°	2.86	1.64	43% ↓
	45°	1.91	0.984	48% ↓
6.17m	90°	1.02	0.921	10% ↓
	45°	1.14	0.667	42% ↓
8.67m	90°	0.667	0.381	43% ↓
	45°	0.492	0.302	33% ↓
10.62m	90°	0.445	0.349	22% ↓
	45°	0.349	0.365	4% ↑

(c) 토제 설치 높이 변화에 따른 진동 경향

토제 높이에 대한 충격진동 변화량은 높이 100%
증가시 평균 30%정도 감소하는 것으로 나타남.

계측거리	중 량	충격진동(mm/sec)		비 고
		토제 100% (15cm)	토제 200% (30cm)	
5.55m	90°	1.64	1.30	21% ↓
	45°	0.984	0.730	26% ↓
6.17m	90°	0.921	0.540	42% ↓
	45°	0.667	0.397	41% ↓
8.67m	90°	0.381	0.254	34% ↓
	45°	0.302	0.175	43% ↓
10.62m	90°	0.349	0.314	11% ↓
	45°	0.365	0.175	53% ↓

(d) 방진구 유·무에 따른 진동 경향

방진구 설치시 평균 약 20% 정도 감소하는
것으로 나타남.

계측거리	중 량	충격진동(mm/sec)		비 고
		방진구 無	방진구 有	
5.55m	90°	1.64	1.40	15% ↓
	45°	0.984	0.714	28% ↓
6.17m	90°	0.921	0.953	3% ↑
	45°	0.667	0.540	19% ↓
8.67m	90°	0.381	0.413	8% ↑
	45°	0.302	0.222	27% ↓
10.62 m	90°	0.349	0.302	14% ↓
	45°	0.365	0.191	48% ↓

(다) 결과 분석

45° 낙하고 및 방진용 흙덩(토제 높이를 적절히
증대시킬 경우)과 방진구를 설치한 경우 원지반에
방진조치를 시행하지 않은 경우에 비해 약 70~
75%의 진동감소율을 나타냄.
예측식으로 산출한 진동 추정값과 모형시험에 의
한 실측값은 매우 큰 차이를 나타냈으며, 이는 적
용 중량과 낙하고 적용시 개선이 필요함을 의미
함.

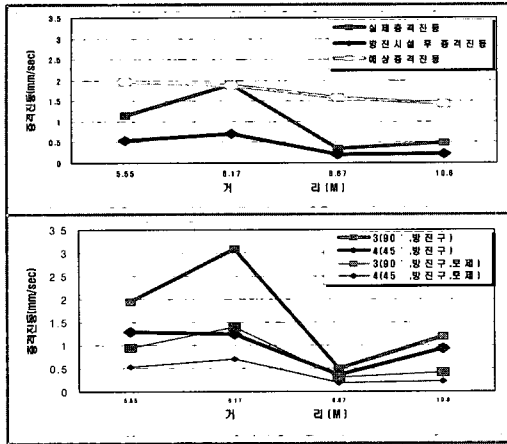


그림 7. 모형시험 결과 (일부)

3.6 발파해체시 연돌 충격진동 예측

3.6.1 예측 방법

다층 건축물의 발파해체시 충격진동을 예측하는 경험식(Perkin)은 타워 구조물에 그대로 적용하기에는 상당한 무리가 있는 것으로 검토되어 모형시험을 통해 획득된 결과를 바탕으로 입력 인자를 일부 수정하여 검토하였다.

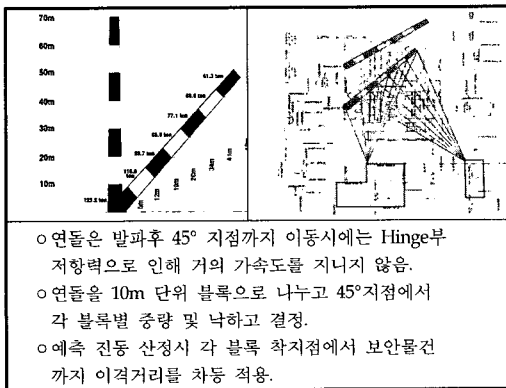


그림 8. 예상 낙하충격진동 산출 개념

3.6.2 예측 결과

연돌을 10m 단위 블록으로 분할하고 각 블록마다 45°에서의 낙하고 및 중량을 산출하여 Perkin의 예측식을 적용하여 산출하였으며, 모형시험에 의해 획득한 토제-방진구 설치에 따른 감소율 70%를

고려하여 연돌 발파해체시 주요 보안물건에서의 예상 진동을 산출한 결과는 아래 표 7과 같다.

표 7. 연돌 낙하충격진동 예측 결과

연돌 높이 (m)	Stack 중량 (kg)	낙하 거리 (m)	중속 가속도 (m/sec ²)	충격 에너지 (J)	지반 조건 (토사)	예상 진동 수준 (단위:mm/sec)			
						#1 Turbine		Switch Yard	
						X	Y	X	Y
70~60	61,300	44.5	9.8	26,732,930	0.65	6.34	1.90	6.39	1.92
60~50	69,600	37.5	9.8	25,578,000	0.65	6.53	1.96	6.45	1.94
50~40	77,100	30.0	9.8	22,667,400	0.65	6.63	1.99	6.37	1.91
40~30	85,800	22.5	9.8	18,918,900	0.65	6.65	1.99	6.17	1.85
30~20	99,700	15.5	9.8	15,144,430	0.65	6.65	1.99	5.88	1.77
20~10	115,800	8.5	9.8	9,646,140	0.65	6.27	1.88	5.05	1.52
10~0	125,200	2.5	9.8	3,067,400	0.65	4.97	1.49	3.93	1.18

3.7 발파해체 시행전 발전소 시설물 진단실시

3.7.1 시행 목적

연돌 발파해체에 의한 낙하충격진동으로 발전소 시설물의 영향 여부를 파악하기 위해 발파해체 시행전에 주변 시설물에 대해 조사, 진단을 실시하였다.

조사, 진단을 시행한 대상물 현황은 그림 9와 같다.

대 상	내 용	비 고
Turbine B/D	○상시 유발진동 측정	
Switch Yard	○상시유발진동, 균열진행, 반발경도 등	
콘크리트 구조물	○균열진행, 기울기 변화, 초음파 속도 등	

그림 9. 사전 조사, 진단 대상 및 내용

3.7.2 발전소 진동 규제기준 검토

우리나라 발파진동 규제기준(=허용기준)에서 가장 엄격하게 취급하는 부류로는 통상 “진동 예민 시설물, 정밀기기, 컴퓨터” 등으로 통칭하고 있으며, 진동 속도를 기준으로 “0.2 ~ 0.3cm/sec”를 적용하고 있는 실정이나, 정밀기기에 대한 세부 구분 및 기준의 차등적용은 아직 미비한 실정이다.

외국 자료(API ; American Petroleum Institute)

를 통해 발전소에 적용할 수 있는 진동관리수준을 가능할 수 있다.

이러한 배경에서 시험발파 및 본 발파 시행 이전에 Turbine B/D과 Switch Yard에 대해 "자체유발진동(상시진동)"을 측정하였다.

3.7.3 발전소 Turbine B/D 자체유발진동 실측 결과

Turbine 및 계전기류는 가동 중인 동안 연속진동을 발생하므로 진동측정시 "연속 Mood"로 실시하였으며, 결과 값은 "수치"와 "Waveform"으로 각각 정리하였다. (측정 수치는 mm/sec 임)

표 9. 발전소 시설물 자체유발 진동속도 측정결과

Microphone 1/12 Weight PSPL 68.2 dB(A) on April 23, 2004 at 11:02:10 ZC Freq N/A Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 656 mV)			
Tran Vert Long PPV 0.0316 0.0535 0.0836 mm/s ZC Freq N/A 84 57 Hz Date Apr 23 04 Apr 23 04 Apr 23 04 Time 11:01:10 11:01:20 11:02:25 Sensorcheck Check Passed Passed Peak Vector Sum 0.0794 mm/s on April 23, 2004 at 11:04:45		소음 : 68.2 dB(A), 진동 : 0.00794 cm/sec Vert 및 Long 성분 우세	
Switch Yard		자체유발진동은 매우 미미한 수준으로 나타남.	
Microphone 1/12 Weight PSPL 90.8 dB(A) on April 24, 2004 at 09:47:12 ZC Freq N/A Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 254 mV)			
Tran Vert Long PPV 3.05 3.58 2.54 mm/s ZC Freq 47 43 >100 Hz Date Apr 24 04 Apr 24 04 Apr 24 04 Time 09:47:02 09:47:12 09:47:02 Sensorcheck Check Check Passed Peak Vector Sum 4.46 mm/s on April 24, 2004 at 09:48:32		소음 : 90.8 dB(A), 진동 : 0.446 cm/sec Vert 및 Tran 성분 우세	
Turbine 기기 위		자체유발진동 수준이 관리기준(0.2 cm/sec)을 초과하고 있음.	

Measurements Vibration Analysis PPV - Max 0 to Peak (mm/s) 0.805 1.074 1.220 Time of Peak (s) 2.557 2.692 2.947 ZC Frequency at Peak (Hz) 256.0 7.0 170.7 Peak Vector Sum (mm/s) 1.719 Max Acceleration (m/s ² /g) 1.172 1.452 1.551 Max Displacement (mm) 0.003 0.012 0.006 Sound Pressure Analyt: Max dB(A) (PA) 61.1 (0.0227)		
소음 : 61.1 dB(A), 진동 : 0.1719 cm/sec	측정 현황 : 기기 위(Ds-677), 기초(PMT)	
Turbine 밑 기초 turbine 기기 위에서의 수준에 비해 약 39% 정도로 낮게 측정됨.		

표 10. 발전소 Turbine 본체 자체유발 가속도 측정결과

	<ul style="list-style-type: none"> ● 10초간 측정된 가속도는 Vert 성분이 탁월하였으며 최대치는 "1.961 gal"로 나타남. ● 이는 원자력발전소의 OBE(운전정지지진동)인 "0.07 gal"에 비하면 매우 높은 수준이나, ● 스웨덴 Holmberg 등의 연구 결과인 "컴퓨터 디스크 드라이버"에 대해 2~3 gal을 허용한계로 보고 있는 것에 비하면 양호한 것으로 평가될 수 있다.
--	---

자체유발진동 측정 결과 값을 분석한 결과 #1 발전소 Turbine에서 매우 흥미로운 사실이 발견되었으며, 그 내용은 아래와 같다.


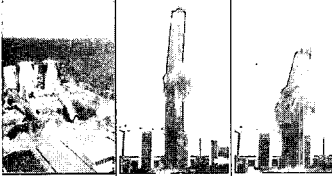
Turbine e 진동 사전 조사 결과	Turbine 운전시 최대 자체유발 진동속도 수준은 0.446 cm/sec로 이미 발전소 측에서 제시한 관리기준인 0.2 cm/sec를 초과. Turbine 운전시 최대 자체유발 진동 가속도 수준은 1.961 gal로 원자력 발전소의 OBE(운전정지 지진동)인 0.07gal을 초과. 한편, 불과 1.0m 정도 이격된 기초 Slab에서 측정된 진동 수준은 0.1719 cm/sec로 자체 유발진동의 약 39%에 해당. 이는 Turbine 기계기초에 방진설비(방진 Pad 등)가 되어 있어 진동을 차단 또는 감쇠하고 있음을 유추할 수 있음. 따라서, 반대로 외부에서 전파되어온 진동(발파충격진동) 역시 기초를 통해 Turbine으로 도달될 때, 약 60% 정도 감소될 수 있음을 의미함.
-----------------------------------	---

4. 발파해체 실시

4.1 설계 개요

연돌(Stack)에 대한 발파해체공법을 적용할 때, 우선 붕괴형식을 선정하여야 하며 크게 2가지 방식으로 대별된다.

표 11. 연돌 발파해체 붕괴방식 비교 및 선정사유

구분	전도방식(Felling System)	다절붕괴방식 (Accordion Callapse)
특징	기술적으로 가장 간단한 공법전도방향으로 충분한 공간 필요굴뚝(Stack) 구조물에 최적	송신탑, 굴뚝(Stack)과 같이 높은 구조물을 제자리에 다점으로 절단, 붕괴 전도방향으로 여유 공간 부족시 적용
시공 개요		
장점	고소작업 천공이 불필요하여 안전관리 측면 우수 방호면적 축소로 경제성 향상	주변 여유공간 부족시 적용성 우수, 절단부재 소형화로 충격진동 경감
단점	낙하 충격진동이 다절 붕괴방식에 비해 다소 높음.	고소에서 천공 및 방호 작업을 수행 하므로 안전 관리상 취약함. 정밀한 기폭시차 설정이 필요하며 구조 해석에 소요되는 시간과다
선정	●	
선정 사유	철거 대상 굴뚝의 부지조건은 전도시 충분한 여유 공간을 확보하고 있음. 낙하 충격진동에 대해 안정성이 확보되지 않을 경우 다절붕괴를 적용할 수 있으나, 당 현장은 방진용 흙둑(Earth Mound)을 설치할 경우 진동 문제 해결 가능 다절붕괴를 위해 굴뚝 상부 Platform에서 천공작업시 안전관리 취약	

4.2 발파 시행

시험발파에 의해 최적 장약량 및 기폭시차를 선정하고 2004년 4월 24일 오전 11시 30분에 발파를

시행하였다. 당초 계획은 1, 2호기를 시간차를 두어 일시에 기폭할 계획이었으나 발전소측의 요구에 의해 5분간의 간격을 두고 1기씩 차례로 기폭하였다.

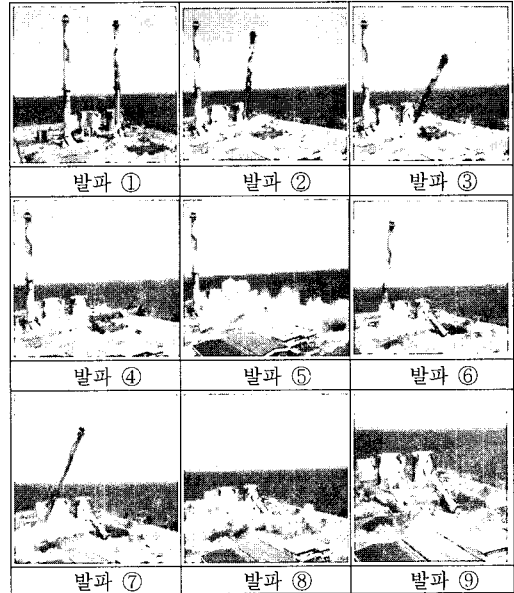


그림 10. 발파진행 단계별 전경

발파후 지면에 도달한 연돌 파쇄양상 및 방호재 효과는 아래 그림 11과 같이 매우 양호하였다.



그림 11. 파쇄 및 방호 결과

4.3 계측 결과 분석

연돌 발파해체시 발전소 주요 시설물에서 실측한 진동속도 및 가속도 측정값은 다음과 같이 분석되었다. (시설물에 인접한 2호기를 검토 대상으로 함)

4.3.1 Switch Yard

Microphone 'A' Weight PSPL 97.0 dB(A) at 0.315 sec ZC Freq N/A Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 0.48 mv)	
Tran Vert Long PPV 0.068 0.041 0.089 mm/s ZC Freq 8.0 4.0 8.0 Hz Time (Rel to Trig) 8.776 8.768 8.058 sec Peak Acceleration 0.02004 0.02006 0.0115 g Peak Displacement 0.0167 0.0413 0.0213 mm Sensorcheck Passed Passed Passed Peak Vector Sum 1.36 mm/s at 8.042 sec	Tran 성분 우세
소음 : 97.0 dB(A), 진동 : 0.138 cm/sec	
평가 충격진동이 탁월함. P.P.V는 0.0968 cm/sec이고 P.V.S는 0.138 cm/sec로 관리기준 이하임. 진동가속도는 0.0116 g로 0.07 g 보다 낮음.	

4.3.2 Turbine B/D

(가) 빌딩 1층 바닥

Microphone 'A' Weight PSPL 90.9 dB(A) at 0.293 sec ZC Freq N/A Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 293 mv)	
Tran Vert Long PPV 1.05 1.10 0.937 mm/s ZC Freq 7.0 47 8.0 Hz Time (Rel to Trig) 5.277 0.028 0.056 sec Peak Acceleration 0.01189 0.0389 0.0106 g Peak Displacement 0.0330 0.0372 0.0220 mm Sensorcheck Passed Passed Passed Peak Vector Sum 1.30 mm/s at 0.266 sec	Tran 및 Vert 성분 우세
소음 : 90.8 dB(A), 진동 : 0.130 cm/sec	
평가 충격진동(8.5 ~ 10.0 sec)보다 발파에 의한 진동(0.366 sec)이 우세함. P.P.V는 0.116 cm/sec이며 P.V.S는 0.130 cm/sec로 측정되어 관리기준 0.2 cm/sec 이하임. 진동가속도는 0.0398 g로 0.07 g 이하임.	

(나) 빌딩 2층 바닥 (Turbine 설치 장소)

Microphone 'A' Weight PSPL 85.2 dB(A) at 3.856 sec ZC Freq N/A Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 508 mv)	
Tran Vert Long PPV 0.572 0.746 0.381 mm/s ZC Freq 4.0 4.0 4.0 Hz Time (Rel to Trig) 0.020 0.027 0.041 sec Peak Acceleration 0.0182 0.0365 0.0116 g Peak Displacement 0.0169 0.0375 0.0137 mm Sensorcheck Passed Passed Passed Peak Vector Sum 0.921 mm/s at 0.027 sec	Vert 성분 우세
소음 : 86.2 dB(A), 진동 : 0.0921 cm/sec	
평가 충격진동(8.5 ~ 10.0 sec)보다 발파에 의한 진동(0.027 sec)이 우세함. P.P.V는 0.0748 cm/sec이며 P.V.S는 0.0921 cm/sec로 측정되어 관리기준 0.2 cm/sec 이하임. 진동가속도는 0.0365 g로 0.07 g 이하임.	

4.3.3 소음 평가

(가) 관람석 소음

	연돌 발파 및 전도의 전면인 관람석에서 소음치는 94.4 ~ 105.9 dB(A)로 측정됨.
--	---

(나) 발전소 부지경계 소음

	발파시간(1호기→11:30, 2호기→11:36)을 고려할 때, 발전소 부지경계(삼양해수욕장측 방면)에서의 최소소음수준은 60 dB(A)를 초과하지 않은 것으로 측정됨. 최고치 소음은 발파음이 아니라 바람에 의해 Peak치로 판단됨.
--	--

4.3.4 진동, 소음 계측 종합 평가

계측결론	금번 시행한 연돌 2기에 대한 발파 전도 해체시 발파진동 및 낙하충격진동은 관리기준인 0.2 cm/sec에 모두 미달하여 운전중인 발전소 시설물에 영향을 미치지 않은 것으로 평가됨. 정밀기기류에 대한 진동 평가 기준은 "진동가속도"를 사용하고 있는 바, 원자력발전소 'Q-Class'에 적용하는 0.07 g에 비교하여 모두 미달하여 안전한 것으로 평가됨. 발파소음은 관람석에서 105.9 dB(A)로 측정되어 환경규제기준을 다소 초과한 것으로 나타났으나, 풍속이 5.0 m/sec를 초과한 것으로 나타나 측정값의 신뢰성이 떨어진다. 발전소 부지경계에서 측정된 소음은 최고 60 dB(A)를 넘지 않아 환경규제기준인 85 dB(A)를 만족한 것으로 평가됨. 따라서, 삼양해수욕장 방면으로 배출된 발파소음은 매우 낮은 것으로 평가되었는바, 이는 발파지점과의 이격거리가 원거리인 이유와 전파경로상에 발전소 건물이 차음효과를 발휘한 것으로 분석됨.
------	---

4.4 발파 전·후 균열 변화 분석

발파 시행 전, 후에 발전소 주요 시설물의 기존 균열에 대해 측정 핀을 설치하고 1/1,000 mm까지 측정할 수 있는 “균열진행측정기”를 이용하여 변화 여부를 측정하였으며 그 결과는 아래 표 12와 같다.

표 12. 연돌 발파해체 전·후 발전소 균열진행상황

측정 위치	발 파 전	발 파 후	비 고
#1발 전소 1층	1 0.740 2 0.741 3 0.741 4 0.741 5 0.741 PART NO.: 141-1 DATE 2004/ 4/23 TIME 12: 2 NAME: * RESULT * N 5 MAX 0.741 MIN 0.740 R 0.001 X 0.74080 dn 0.00040 dn-1 0.00045	1 0.741 2 0.741 3 0.743 4 0.744 5 0.747 PART NO.: 141-1 DATE 2004/ 4/24 TIME 12:55 NAME: * RESULT * N 5 MAX 0.747 MIN 0.741 R 0.008 X 0.74320 dn 0.00223 dn-1 0.00249	균열변화값 발파전 평균 : 0.74080mm 발파후 평균 : 0.74320mm 변화 값 :(-)0.0024 mm 축소 (2.4/1,000mm 변화)
	#1발 전소 2층	1 -0.267 2 -0.267 3 -0.267 4 -0.267 5 -0.266 PART NO.: 141-2 DATE 2004/ 4/23 TIME 12: 3 NAME: * RESULT * N 5 MAX -0.266 MIN -0.267 R 0.001 X -0.26680 dn 0.00040 dn-1 0.00045	1 -0.263 2 -0.264 3 -0.265 4 -0.265 5 -0.266 PART NO.: 141-2 DATE 2004/ 4/24 TIME 12:56 NAME: * RESULT * N 5 MAX -0.263 MIN -0.266 R 0.003 X -0.26480 dn 0.00102 dn-1 0.00114

4.4.1 발파 전·후 균열 진행 진단 결과

진단 결론	금번 시행한 연돌의 발파 전도로 발생한 진동에 의해 기존 균열의 발전(확대, 축소)은 최대 5.4/1,000mm 발생함. (Switch Yard에서 발생) 이는 측정기의 계측 오차에 해당되는 정도임. 따라서, 발파진동 및 낙하 충격진동에 의해 발전소 구조물에 대한 영향은 전무한 것으로 판단됨.
----------	--

5. 결 론

금번 “제주화력 내연설비 교체건설공사”시 연돌 2기를 철거함에 있어 기계식 절단·인양공법의 제한성으로 인해 발파해체공법을 적용하게 되었고, 주변 시설물의 국가적 중요도로 인해 낙하충격진동에 대한 발전소 운영자 측의 관심이 매우 높았다.

본 연구는 가동 중인 발전소라는 특수한 입지조건에서 1기당 635톤의 중량물이 지상 70m 지점에서 자유낙하로 인해 발생하는 낙하충격진동 수준을 예측하는 기법에 대한 것으로 이와 관련된 자료는 외국 (Perkin)에서 시행된 경험식 밖에 없었으며, 본 경험식은 다층 건축물을 대상으로 획득된 자료이므로 기 수행된 유사사례에서 확인된 바와 같이 타워형 구조물에 대해서는 많은 편차를 초래하였다.

사례분석 및 모형시험을 통해 타워형 구조물의 낙하충격진동에 대한 예측기법을 가정하여 실제 적용한 결과 다음과 같은 결론을 획득하였다.

구 분	#1 Turbine	Switch Yard	비 고
	규제기준 : 0.2cm/sec	규제기준 : 0.2cm/sec	
예상 진동 (A)	0.149	0.118	2호기
실측 진동 (B)	0.130	0.138	연돌 기초 기준
편 차 (C)	(-) 0.019	(+) 0.020	(A-B)
예측적중률 (%)	87.24	83.05	(C/A) * 100

국내·외에서 가장 널리 사용되는 Perkin의 경험식을 바탕으로 일부 입력 변수를 변형하여 적용한 결과 연돌과 같은 타워형 구조물에 대한 낙하충격진동을 평균 약 85% 내외로 예측하였다는 사항에 본 연구의 의미를 부여할 수 있으며, 아래와 같이 연구 결과를 정리하였다.

- 타워형 구조물에 대한 낙하충격진동을 예측할 때 Perkin의 경험식을 바탕으로 중량 및 낙하고를 적절히 적용함으로써 예측 적중률을 향상시킬 수 있다.

- 중량은 연돌을 블록으로 분할하여 적용하고 낙하고 산정은 연돌이 지면으로부터 45° 위치를 기준하여 각 블록에 대한 평균 연직거리를 취할 수 있다.
- 연돌이 발파에 의해 붕괴, 거동시 지표면에서 45°까지는 Hinge부 저항력에 의해 가속도 운동을 하지 않으며 45° 선을 통과하면서 급속히 가속 낙하하므로 낙하고 산정시 45°를 선정함이 타당한 것으로 나타났다.
- 토제(Earth Mound)는 약 45% 내외의 진동저감 효과를 발휘하였으며, 토제의 설치간격 및 높이에 따라 진동저감효과는 변화하였다.
- 진동전파경로가 2배 증가하면 약 7배의 진동감쇠효과가 발휘되었다.
- 방진구를 설치할 경우 약 20%의 진동감소효과를 나타냈다.
- 진동에 민감한 특수 시설물에 대한 진동관리기준은 시설물이 정상 가동할 때의 자체유발진동 수준을 기준하는 것이 타당할 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지. Vol. 16, pp. 42 ~ 44.
2. 대한화약기술학회, 2001, 발파진동소음계측과 자료처리, pp. 23 ~ 30.
3. Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kopp and W. I. Duvall, 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM, Bulletin 656, p. 105.
4. Crandell, F.J., 1949, Ground vibration Due to Blasting and Its Effect Upon Structures, J. Boston Soc of Civil Engineers, pp. 222~245.