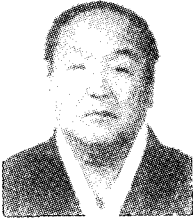


# 굴뚝 解體로 인한 地盤振動이 周邊 아파트에 미친 影響調查



許 墳

On the influence of ground vibration occurred when smoky-chimney is demolished

Ginn Huh, Engr, Dr, P.E

## Abstract

On influence of ground Vibration occurred when smoky-chimney is demolished. The Shock Energy by falling down of smoky-ehimney(60m height) demolition spread mainly to the breaking reinforced concrete and to ground Vibration.

### 1. 목 적

釜山에서 높이가 約 60m 되는 既存 철근콘크리트로 된 공장 굴뚝을 해체하였는바, 해체시 붕락(崩落)된 콘크리트 블럭(block)이 地盤과 충돌하여 생성된 地盤振動(ground Vibration)이 인근 建物에 미치는 被害 與否를 推定하는데 目的을 두었다.

### 2. 解體 作業 및 對象굴뚝의 概要

#### 1) 解體된 굴뚝의 概要

높이 : 약 60m  
하부직경 : 300cm  
상부직경 : 140cm  
콘크리트의 두께 : 20-12cm(평균 16cm)  
개략적인 중량 : 약 152 ton

#### 2) 해체방법

굴뚝하부의 한쪽을 콘크리트 브레이크로 절단(切斷)시켜 무게의 중심을 이동시킴으로써 자중(自重)에 의해 전도(顛倒)시키는 방법으로 구체적인 해체 과정 및 주변상황은 부록사진(11-4, 265-274)과 같다.

#### 3) 사전준비 상황

붕락시 지반과 충돌시 외부 에너지를 분산시킬 목적으로 낙하예상 지점에 진동감소를 위한 완충(緩衝)역활로 조그만 자갈 또는 岩石片을 지반에 깔음(시공자 측 진술과 Video 및 부록사진 266참조)

#### 3. 隣接建物과의 離隔거리

○굴뚝 밑부분(下部)에서 화인상아아파트2동까지의 最短거리 : 15.2m  
○붕락 굴뚝의 선단부(상부)의 낙하지점에서 화인상아파트 1동까지의 최단거리 : 37.5m  
○붕락 굴뚝의 중간 지점에서 화인상아 아파트 1동까지의 최단거리 : 27.1m(구체적인 도면 및 규격은 별첨 그림2 참조)

#### 4. 解體 工事場 부근의 地盤狀態

굴뚝 해체 지점 부근에서 실시한 총 28개의 시추 주상도는 제2장의 지질조사를 참조 하면, 대체적으로 토사 및 점성토층의 두께는 3.5m 내외로 추정됨.

## 5. 解體에 따른 振動問題와 그 影響

### 5-1 檢討方法 및 制限

굴뚝을 해체하기 이전에 주변환경 및 피해가 우려되는 건물 및 주요시설물의 상황조사를 철저히 실시하고 이들 시설물의 피해를 감소시키기 위하여 주변에 진동차단을 위한 방진구의 설치등 예방조치와 함께 해체작업의 전과정을 통하여 지반진동의 크기를 실측하고 기록하여 이들 자료로부터 최종적으로 피해 여부를 판단하여야 한다.

그러나 이와같은 준비상황이 불비한 상태에서 해체작업이 완료 되었기 때문에 진동으로 인한 피해여부를 검토하기란 대단히 어렵다. 왜냐하면 똑같은 상황을 재현할 수 없기 때문이다.

따라서 계측 기록치에 의한 객관적 검토가 불가능하기 때문에 국내·외에서 발표된 항타 진동치의 크기와 그 동안 여러가지 경험에 의한 이론적인 진동치의 크기를 추정하여 간접적인 피해여부를 판단 하기로 한다.

### 5-2 地盤 振動의 特性

굴뚝의 붕락시 발생 가능한 문제점들은 철근 콘크리트가 전도되어 지반과 충돌시 충격에너지의 일부가 탄성파로 변환되어 생성된 지반진동과피콘크리트 조각의 비산, 순간적인 충격폭음과 폭풍압의 발생등을 들 수 있다.

그러나 이미 해체작업이 완료된 상태에서 다행히 비산, 폭음 및 폭풍압등은 별로 문제점이 없이 수행된 것으로 보고 본 보고서에서는 지반진동의 크기와 이로 인하여 영향만을 검토하기로 한다.

지표면상의 한 점에 충격을 가하면 충격파가 형성되는데 일반적으로 그 파형의 형태는 입체파인 P파와 S파 그리고 표면파인 L파와 Rayleigh파가 발생되어 지반중을 전달하게 된다.

그러나 건설진동과 같이 진원과 계측점이 수m, 수십m에 이르는 가까운 거리에서는 이러한 파형이 명확히 구분되지 않고, 복합파의 형태로 나타난다.

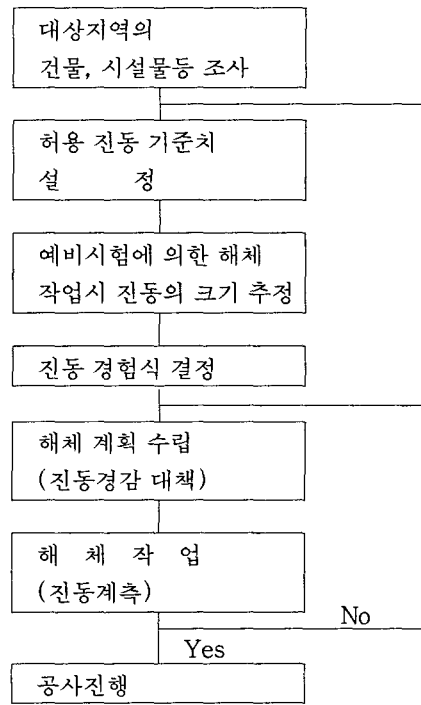
지표상에 도달하는 이 복합파는 측정하는 방향에 따라 수직방향(Vertical)성분, 진행방향(radial)성분, 진행방향에 대한 접선방향(tangential)성분으로 분류된다.

한편, 이들 지반진동의 크기는 보통변위, 속도

및 가속도의 3종류로 나누어 지는데 대부분의 경우 건설진동의 크기는 속도성분으로 계측된다.

이와같이 지반을 전파하는 진동의 크기는 진동원에서 건물이 놓인 위치까지의 거리에 따라 감소하지만 이외에도 토질(포토, 지층, N치) 토질의 구조적변화(지하수, 각종 불연속면), 파면의 종류와 전파방향, 주파수등에 따라 달라진다.

한편 이와같은 진동으로 인한 피해를 예방하기 위해서는 일반적으로 다음과 같은 작업순서를 거쳐야 한다.



### 5-3 鐵筋콘크리트 굴뚝의 崩落에 따른 理論的인 衝擊에너지의 크기

에너지의 종류는 이론적으로 크게 운동에너지와 위치에너지로 나누어지며 이들 에너지의 합은 일정하다고 볼 수 있다.

따라서 높이  $h_1$  m되는 곳에서 질량  $m$ 인 물체가 초속  $V_1$ 에서 자유낙하할 때 지표면과 충돌시 속도를  $V_2$ 라하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\frac{1}{2} mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2} mv_2^2 + mgh_2 : (1)$$

(표 4-1)

굴뚝 높이에 따른 이론적인 위치에너지

높이 (hm)	굴뚝직경 (P.m)	두께 (t,m)	비중량	단위중량 (ton)	총중량 최대 (ton)	위치에너지 (KN,m)	변환에너지 (Joule)	비고
0	2. <sup>8</sup>	0. <sup>20</sup>	2. <sup>4</sup>	4. <sup>22</sup>	21. <sup>1</sup>	0	0	굴뚝원형 보존(균열 발생)
10	2. <sup>567</sup>	0. <sup>1867</sup>		3. <sup>61</sup>	18. <sup>05</sup>	180. <sup>5</sup>	27. <sup>075</sup>	
20	2. <sup>334</sup>	0. <sup>1734</sup>		3. <sup>05</sup>	15. <sup>25</sup>	305	45. <sup>75</sup>	
30	2. <sup>1</sup>	0. <sup>16</sup>		2. <sup>53</sup>	12. <sup>65</sup>	379. <sup>5</sup>	56. <sup>928</sup>	굴뚝 파괴
40	1. <sup>867</sup>	0. <sup>1468</sup>		2. <sup>06</sup>	10. <sup>03</sup>	401. <sup>2</sup>	60. <sup>18</sup>	
50	1. <sup>634</sup>	0. <sup>1335</sup>		1. <sup>64</sup>	8. <sup>2</sup>	410	61. <sup>5</sup>	
60	1. <sup>4</sup>	0. <sup>12</sup>	1. <sup>26</sup>	6	378	56. <sup>7</sup>		

\* 에너지 변형율은 15%로 추정

\* 총 최대중량은 단위중량×5m(block 최대길이)

\* 위치에너지는 총중량×낙하높이

식에서 초속도  $v_1 = 0$ 이고, 지표면상에서는  $h_2 = 0$ 이므로 처음에는 위치에너지만 갖고, 지표면과 충돌시에는 운동에너지로 변화된다. 따라서, 굴뚝 높이에 따른 단순 위치 에너지는

$$V = mgh_1 = wh_1 : (2)$$

충돌시 속도

$$v_2 = \sqrt{2gh} : (3) \text{이 된다.}$$

길이 60m되는 굴뚝이 지표면과 충돌하는 이론적인 시간은 각 부분마다 같지만 항타시 진동의 주기가 1초 미만이며 또 지표면의 형태가 균일하지 않은 점을 고려할 때 엄격한 의미에선 시간차(millisecond)를 갖고 충돌하는 것으로 생각된다.

따라서 굴뚝길이 최대 5m가 한 덩어리(block)가 되어 지표면과 충돌한다고 가정할 때 각 부분별로 갖는 위치에너지의 크기는 대체로 (표4-1)과 같다.

위와 같은 위치에너지는 지표와 충돌시 철근 콘크리트 굴뚝의 파괴, 폭풍 및 폭풍압등으로 대부분 소모되고 극히 일부만이 탄성파로 변환되어 지반에 진동으로 전파되는 것으로 추정된다.

이때 탄성파로 변환되는 에너지 비율에 관해서는 구체적인 연구결과가 보고된 바 없기 때문에 정확한 기준을 설정하기는 어렵다.

여러 연구자들의 실험결과에 의하면 실제로 암

반중에 천공을 하고 폭약을 장약하여 발파하면 강력한 폭풍충격을 주위암반에 작용하게 되는데 이때 발생하는 전체 에너지중에서 5-20%미만일 것으로 생각된다.

#### 5-4 지반진동의 크기 추정

물체의 자유낙하로 인한 지반진동의 크기에 관하여 구체적인 연구결과가 보고된 바 없기 때문에 건설진동중 위와 비슷한 것으로 판단되는 충격식 해머 즉 램의 낙하에 의한 항타 진동식을 기초로 추정하기로 한다.

이와같은 항타 진동식은 먼저 국내외의 연구결과를 인용하고 다음으로 필자들이 서울 부근에서 실측으로 부터 구한 결과치와 종합하여 유도하기로 한다.

##### 1) 항타(抗打)에 의한 지반 진동치의 크기

말뚝 타설의 방법은 크게 충격 해머에 의한 방법과, 진동 해머에 의한 항타법으로 대별할 수 있는데 그 중에서도 지반진동이 문제가 되는 것은 충격 해머식이므로 이에 대한 국내의 진동치의 크기와 그 경향성을 살펴보기로 한다.

여러종류의 충격해머로 프리 캐스트 콘크리트 말뚝을 항타하는 동안 생성되는 지반진동의 크기를 평가하는데, 가장 좋은 방법은 최대입자속도(Peak Particle Velocity)를 해머의 에너지와 거리로 나타내는 것이다.

Wiss는 광범위한 측정 자료를 기초로 하여 몇가지 흠에 대한 입자속도와 에너지 거리와의 관계식을 만들었다.

이와 비슷한 방법으로 Attewell등은 Sheet pile 항타시 표면파와 연관된 수직방향 운동에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 최대진동 추정식을 제시하였는데 이것은 상한값 추정식으로 이용된다.

$$V \leq 1.5 \frac{\sqrt{w_0}}{D} \quad : (4)$$

여기서

V : 상한 경계선 값으로서의 최대입자속도 (mm/sec)

W<sub>0</sub> : 해머에너지(Joule)

D : 수평거리(m)

한편 항타 진동의 영향을 평가하기 위하여 (주)대우가 부산시 현대 아파트 기초공사시 아래와 같은 조건에서 콘크리트 말뚝을 디젤해머로 항타하는 동안 실측한 자료를 회귀분석법으로 해석하여 구한 식은 (5)와 같다.

$$V = 1.7(D/\sqrt{E})^{-0.8}$$

$$A = 0.3(D/\sqrt{E})^{-1.12}$$

여기서

V = 최대입자 진동속도(cm/sec)

A = 최대 진동가속도(gal)

(D/√E) = 환산거리 (m/√KN·m)

※ 참고

위 식은 다음과 같은 조건에서 얻어진 것이다.

(1) 조건

프리캐스트 콘크리트 말뚝의 크기 : ϕ300mm  
 항타깊이 : 표준관입시험 N = 35회 지점까지 항타 (지표로부터의 깊이 13m)

지반조건 : 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화암층, 연암층의 구성되어 있으며 이중 매립층과 퇴적층의 두께는 대략 10m 정도임

항타기의 규격 : K35 디젤해머(Kobe, Japan)  
 램의 무게 3,500kg

낙하무게 1.5m

측정방법 : 말뚝으로부터 수평거리 9-30m 구간에서 거리를 변화시켜 가면서 진동속도 및 가속도를 측정함.

(2) 측정결과

① 디젤해머로 1회 항타시 발생하는 지반진동의 지속시간은 1초이하이며, 항타할때마다 파형이 형성, 소멸되는 등 반복된다.

② 말뚝에서 수평거리 9m 떨어진 곳에서 최대 수직방향 속도는 0.823 cm/sec이고, 30m 떨어진 곳에서는 0.298cm/sec이다.

③ 항타 진동의 탁월 진동수(Predominant frequency)는 12-22Hz이다.

표 5와 같은 이유로 금번 진동 측정실험을 20여회에 걸쳐 실시하고 그 결과를 정리하면 (표 4-2)와 같다.

(표 4-2) 아파트 항타 진동 측정치 및 분석표

측정위치	지반 상태	해머 에너지 (KN.m)	수평거리 (m)	환산거리 (m/√KN.m)	최대속도 (cm/sec)	탁월진동수 (Hz)
서울지하철 선정차량기지		15.0	10	2.582	0.904	9-20 Hz
		15.0	10	2.582	0.841	
		15.0	15	3.873	0.691	
		15.0	18	4.648	0.521	
		15.0	20	5.164	0.439	
		15.0	25	6.455	0.418	
		15.0	26	6.713	0.352	
		15.0	30	7.746	0.326	
		15.0	32	8.262	0.304	
		15.0	35	9.037	0.263	

비고 : 1. 진동속도값은 항타깊이가 깊어질수록 감소하는 경향임으로 그중 최대치를 택한것임.

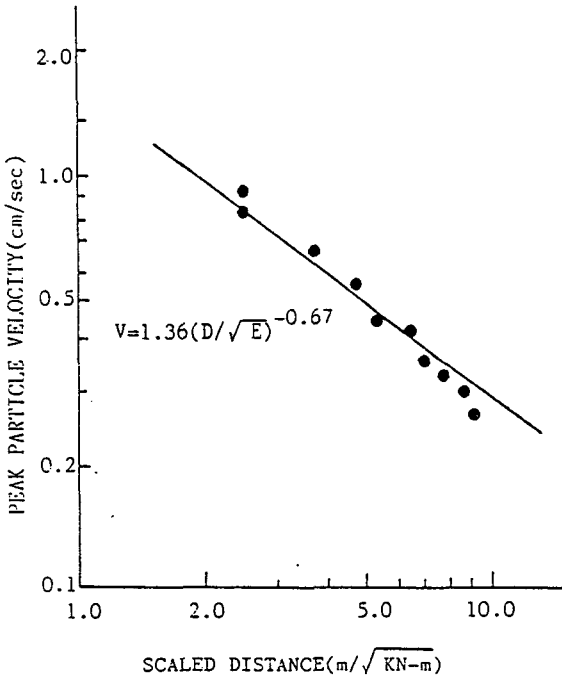
2. 항타에너지(E)

$$= 2wr \cdot H = 2 \times 2.5 \text{톤} \times 3\text{m} = 15(\text{KN.m})$$

실측한 자료를 회귀분석법으로 해석한 결과는 식(6)과 같고 그 결과는 그림1과 같다.

$$V = 1.36(D/\sqrt{E})^{-0.67} \quad : (6)$$

그림 1 환산거리에 따른 최대진동속도의 크기



- \*참고 : 1. 실험 hammer : Diesel  
 ram무게 : 2.5톤  
 낙하높이 : 최대 3m  
 말 뚝 : P.C Pile  $\phi$  500mm
2. 지반구조  
 2m까지 clay  
 2m-10m Silt층으로 N치 35에서 50  
 까지 항타함.
3. 실험장소  
 서울지하철 신정기지

7. 建設에 影響을 미치는 地盤振動의 크기

건설진동중 발파로 인한 지반진동의 피해범위는 그동안 많은 학자들의 연구결과가 발표되고 있으나 항타(抗打)나 해체(解體)로 인한 지반 진동의 피해범위는 구체적으로 알려지지 않고 있다.

그러나 지반의 진동이란 점에서 양자는 발생기구(mechanism)가 유사하기 때문에 발파진동의 범위에 준하기로 한다.

그러나 같은 진동에 대한 건물이 받는 피해의 정도는 건물의 상태, 사용된 건축 재료의 종류와 강

도 및 기초(foundation)등 여러가지 조건에 따라 다르기 때문에 일률적으로 규정하기는 어렵지만 그동안 국내에외에서 사용된 사례를 기준하기로 한다.

1) 외국에서의 진동허용치

지금까지 연구된 결과중 중요한 기준치로는 미국 광무국(U.S.B.M)Langefors, Kihlstrom등 Sweden의 연구, Edwards와 Northwood등 캐나다에서의 기준, Dvorak, Duball과 Fogelson, Susuki등의 연구를 들 수 있는데 이 관계는 (표 4-3)과 같다.

(표 4-3) 학자들에 따른 발파진동 피해의 범위

20.0	큰 피해				피해 발생	
15.0	피해 발생	피해 발생			피해 발생	
10.0	피해 발생	주 의	피해 발생		경이한 피해 발생	피해 발생
5.0	미세균열			주 의	주 의	
0	주 의	안 전		안 전	안 전	
	안 전		주 의			주 의
			안 전			안 전

Langefors Crandell Kohler Edwards USBM 鈴 木

즉 (표 4-3)에서 알 수 있듯이 각 나라마다 기준이 다르지만 그 중에서도 몇 가지 최저치를 들면 다음과 같다.

Langefors 값 : 0.4cm/sec

(점토, 모래, 자갈층에서)

Dvorak : 1.0cm/sec

鈴木(Susuki) : 1.0cm/sec

2) 國內에서의 基準置

국내에서는 서울 지하철 3, 4호선 건설시 진동에 관한 연구와 아울러 외국의 각종 기준치는 물론이고, 우리나라 건물 기초의 특성등을 감안하여 설정한 기준치는 다음과 같다.

(표 4-4) 서울지하철공사 진동속도 허용치

구 분	문화재	주택, 아파트	상가	철근콘크리트 빌딩 및 공장
진동속도치 (cm/sec =keine)	0.2	0.5	1.0	1.0-4.0

### 3) 굴뚝 崩落 振動値에 依한 建物の 影響

(표 4-1)에서와 같이 높이 60m 굴뚝이 지반과 충돌할때 발생하는 에너지는 굴뚝높이 30-60m 구간이며 특히 50m 지점에서 최대로 그 값은 61.5Joule 정도로 예측된다.

따라서 굴뚝높이 50m가 지표와 충돌하는 점을 폭원으로 보고(표 4-1)의 여러가지 값중 최대에너지인 61.5Joule을 Energy로 하여 식(6)에 대입하면 예상최대 진동속도치는 (표 4-5)와 같다.

(표 4-5) 예상되는 최대진동속도치

폭원으로 부터 의 거리(m)	최대에너지 (E.Joule)	진동속도치 (V cm/sec)	진동속도 허용치	피해여부
10	61.5	1.156	0.5	피해가능지점
20	61.5	0.604	0.5	
30	61.5	0.5535	0.5	
35	61.5	0.499	0.5	
40	61.5	0.456	0.5	
45	61.5	0.422	0.5	무피해지점
50	61.5	0.393	0.5	

(표 4-5)의 결과는 다음과 같은 사항을 설명한다.

즉 굴뚝의 높이 50m가 지반에 낙하하는점(그림 2에서 0점으로 표기한점)에서 최대 에너지가 작용하는 것으로 보고 점 0으로 부터 거리가 10m, 20m, 30m로 점점 멀어짐에 따라 진동치의 크기는

각각 1.156cm/sec, 0.604cm/sec, 0.554cm/sec 로 감소되며 서울지하철 공사시 사용한 진동속도 허용치중 주택이나 아파트의 경우로 0.5cm/sec를 기준으로 하면 피해범위는 0점에서 부터 약 35m 지점까지는 피해를 받았을 가능성이 높다.

굴뚝 높이 60m가 崩落時 地表와 衝突하여 에너지중 일부는 굴뚝 콘크리트체의 파쇄와 비산으로 사용되고 극히 일부만이 地盤振動으로 전파되는 것으로 알려지고 있다.

따라서 에너지가 지반진동으로의 변환율을 15%, 굴뚝낙하시 동시에 (milli-second단위로) 낙하하는 구간을 최대 5m로 보고, 말뚝향타시測定된 振動性에 대입하였다.

또한 진동치가 건물에 미치는 被害基準도 각 나라에 따라 다르고 또 건물의 상태 및 기초지반의 여건에 따라 다르기 때문에 확립적으로 판단하기는 대단히 어려우나 본 보고서 내용에 서술한 바와 같이 여러가지 조건을 단순화하여 이론적으로 계산한 결과 피해範圍는 그림 2에서의 0점(굴뚝 높이 50m가 낙하하는 지점)을 기준으로 35m 범위인 것으로 推定된다. 즉, 그림 2에서 진하게 표시된 부분이 해당된다.

본 보고서는 理論에 根據한 計算이기 때문에 실제 그 피해의 정도 및 영향은 차이를 보일수도 있음을 부언(附言)한다.

### 本學會發刊書籍

- ANFO爆劑新發破學, 東亞出版社 1964. 12.
- 新火藥發破學, 機電研究社 1981. 9.
- 新火藥發破學解說, 寶晉齋 1982. 5.
- 서울地下鐵工事 3, 4號線發破工法, (非賣品) 1984. 4.
- 岩石力學, 機電研究社 1985. 2.
- 岩石力學解說, 同上 1986. 7.
- 智山許墳博士回甲記念集, 1987. 2.

