

동다짐에 의한 구조물 피해분석

(Analysis of the Damage of Structures by Dynamic Compaction)

송 정 락 (Song, Chung-Rak)*

한 완 균 (Han, Wan-Kyoon)*

신 승 철 (Shin, Seung-Chul)**

Abstract

Dynamic compaction may cause some damages to structures because it uses the impact energy of heavy weight with high drop height. This study measured and analyzed the vibrations at the dynamic compaction site which was composed of man-made land fill.

From the vibration analysis, it was found that the particle velocity and attenuation was greatest in longitudinal direction and smallest in transversal direction, the dominant frequency ranged from 7 Hz to 9 Hz and the structural damage could be prevented by reducing the drop height at the vicinity of the vibration sensitive structures. Also, the damage to the office equipment could be prevented by doing the dynamic compaction work during closed-office hours.

요 지

동다짐은 무거운 다짐추를 고공에서 낙하시켜 낙하시 지반에 가하는 충격을 이용하여 지반을 개량하는 공법으로서, 시공시 발생하는 진동에 의하여 주변 구조물에 피해가 유발될 수도 있다. 본 연구는 쓰레기 매립지반에서 동다짐을 시공할 시 수행된 진동 측정자료들을 분석하였으며 그 결과 다음과 같은 사실들을 확인할 수 있었다.

① 동다짐시 발생하는 진동의 입자속도는 Longitudinal, Vertical, Transversal 방향순으로 그 크기가 크며, 체감을 또한 Longitudinal, Vertical, Transversal 방향순으로 큰 것으로 나타났다. ② 동다짐시 발생하는 진동의 탁월 진동수는 7-9 Hz 내외이다. ③ 구조물에 인접한 동다짐은 다짐추의 낙하고를 저하시켜 충격에너지를 감소시켰으며, 이를 이용하여 구조물에 대한 피해를 예방할 수 있었다. ④ 사무기기는 켜놓은 상태가 꺼놓은 상태보다 진동에 대하여 약하므로 사무기기에 대한 진동피해를 줄이기 위하여는 비 업무시간을 이용하여 사무실에 10 m 까지 인접하여 동다짐을 실시할 수 있었다.

* 정회원, 대우엔지니어링 대리

** 정회원, 기술사, 대우엔지니어링 부장

1. 서론

동다짐 (Dynamic Compaction) 공법은 무거운 다짐추(weight, pounder)를 고공에서 낙하시켜 다짐추가 지반에 미치는 충격에너지에 의해 지반을 다짐·개량하는 공법으로서 그 시공성 및 경제성이 우수하여 비교적 널리 쓰이는 지반개량공법중의 하나이다. 동다짐 공법은 세계 여러 지역에서 사용되었던 사례가 많고, 우리나라에서도 "지경"이라 불리워졌으며 주춧돌 설치예정 자리에 대하여 여러사람이 무거운 돌을 반복하여 떨어뜨려서 지반을 다지는 방법으로 사용되어져 왔다. 이러한 동다짐 공법은 1950년대 프랑스의 L. Menard⁸⁾에 의하여 체계화되어 오늘날과 같은 동다짐 공법으로 발전하여 왔다.

동다짐 공법은 다른 공법에 비하여 시공성 및 경제성이 우수한 장점이 있으나, 그 특성상 무거운 다짐추를 고공에서 낙하시키므로, 작업지역 주변에서 소음 및 진동을 유발하여 인근 주민 및 구조물에 대하여 환경적 및 구조적 문제를 일으키기도 한다. 따라서 도심지에서의 동다짐 공법을 적용하는데는 여러가지 극복하여야 할 문제가 있다.

동다짐시에 발생하는 진동은 말뚝 항타 및 압반 발파등의 진동과 달리 진동수 약 10Hz 정도로 알려져 있으며^{7), 8)}, 이러한 낮은 진동수는 보통 구조물의 공진 진동수와 유사한 범위이다. 공진 상태에서 구조물은 동일한 진동에너지에 대하여 그렇지 않은 경우보다 훨씬 큰 진폭으로 운동하게 되므로 구조물이 위협하게 될 수 있다.

그러나 적절한 시공관리와 안전관리를 통하여 구조물에 인접하여서도 동다짐 공법을 시행할 수 있을 것이며, 실제로 기존 구조물에 근접한 시공사례들도 보고되고 있다⁶⁾.

본 연구에서는 쓰레기 매립층으로 이루어진 대전 감천우안도로 동다짐 시공 현장에서 발생하는 진동을 측정·분석하여 동다짐 시공이 주변 구조물에 미치는 영향 및 피해경감 방안등을 검토하고자 한다.

2. 과업개요

2.1 현장 개요

본 현장은 대전 EXPO를 대비한 감천우안도로 제1공구 구간중의 일부로서, 대전 시 쓰레기 매립장 지역으로 주변현황은 <그림 1>과 같다.

본 지역의 쓰레기 매립 지반은 1983년부터 1989년까지 대전개발공사에 의하여 감천변에 퇴적된 모래 및 자갈을 준설한 후 주로 도시 생활 쓰레기, 연탄재, 구조물 해체 잔해물 및 일부 산업폐기물 등이 별도의 처리 없이 매립되어 있으며, 쓰레기층 사이에 일반토사를 이용한 부분적인 복토와 매립 완료후 상부 복토 처리만 되어 매우 느슨한 상태이며, 현상태의 지지력은 매우 불량하고 또한 외부하중에 대해서 큰 침하가 발생할 것으로 예상되었다.²⁾

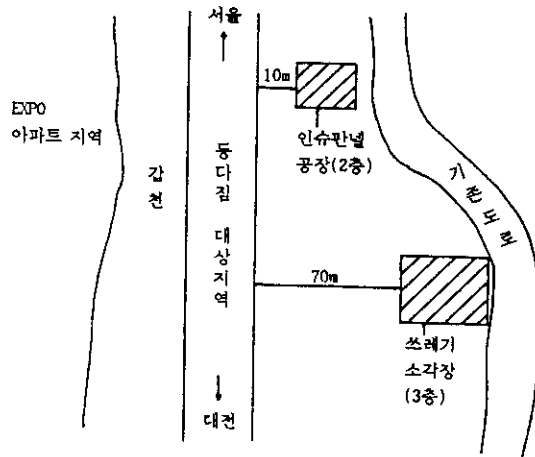


그림 1, 주변 현황도

본 지역은 쓰레기 매립층 두께가 3.0 ~ 7.6m 정도로 도로 종단 계획상 주로 노체에 해당되나 부분적으로 노상에 위치하는 구간도 있어 경제성, 시공성, 공기 및 환경영향 등을 고려하여 지반개량 공법을 검토한 결과 동다짐 공법으로 폐기물 (쓰레기) 층을 압축시키고 그 위에 양질의 토사로 노상을 형성시키거나 또는 약액으로 노상을 고화시켜 지반강도를 증가시키는 약액고화공법을 시행하는 방법이 채택되었다.

2.2 지반특성

본 지역에 대한 시추조사에 의하면 지반특성은 <그림 2>와 같다.

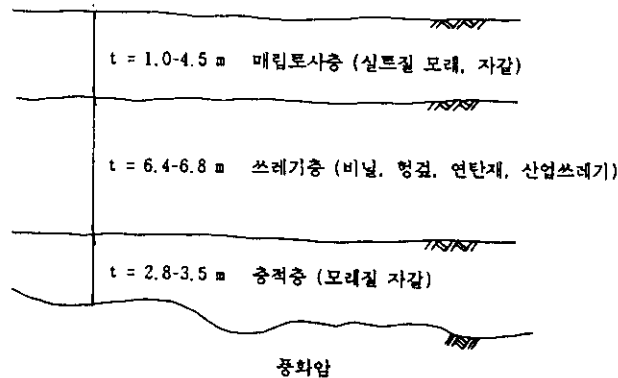


그림 2, 지반특성

이때 동다짐 대상지역은 쓰레기 매립지역이며, 인슈판넬공장 및 쓰레기 소각장은 일반산토 위에 위치하고 있다.

2.3 동다짐 시공법

동다짐 시공은 시험동다짐을 거쳐 <표 1>과 같이 실시하였다.

표 1. 동다짐 시공기준

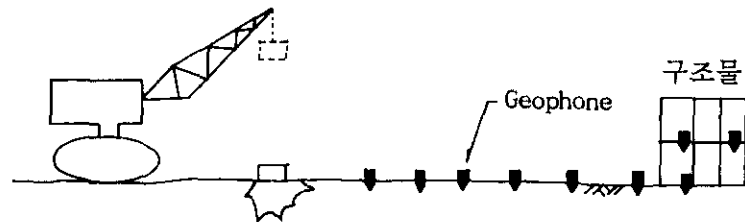
구 분	시 공 기 준	비 고
다짐추 중량 (ton)	12	
다짐추 낙하고 (m)	18	
다짐추 크기 (m)	φ2.2	
타격 지점간 간격 (m)	3 x 3 (격자망)	
단계별 타격횟수	1단계 : 7 ~ 8회 2단계 : 7 ~ 8회 3단계 1차 : 3 ~ 5회 2차 : 3회	지역에 따라 변경 적용함
타격간의 경과시간(분)	1 ~ 2	

3. 진동측정방법

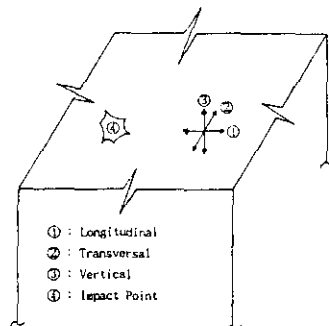
본 현장 주변에서의 주요 구조물은 동다짐 지역으로 부터 각각 10m 및 70m 떨어져 있는 인슈판넬 공장과 쓰레기 소각장으로서, 각각에 대하여 동다짐시의 진동을 측정하였다.

3.1 진동측정방법

본 연구에서의 진동측정은 각 구조물별로 <그림 3>과 같이 진동원 (타격지점)으로 부터의 거리에 따른 방향별 진동성분의 특성변화를 살펴볼 수 있도록 측정되었다.



(a) 진동측정 개요도



(b) 3-D Geophone 의 측정 개요도

그림 3. 진동측정방법

특히 측정시에는 3-D Geophone을 사용하여 1회 측정시마다 3방향 (vertical, longitudinal, transverse)의 진동측정이 동시에 이루어지도록 하였다.

진동 측정의 순서는 다음과 같다.

- ㉠ 지정된 위치에 동다짐용 크레인 및 다짐추를 설치한다.
- ㉡ 지정된 위치에 Geophone을 위치시킨다.
- ㉢ 동다짐용 다짐추를 낙하시켜 진동을 발생시키고 진동을 측정한다.
- ㉣ Geophone의 위치를 이동시키면서 (진동원에서 구조물쪽으로) 진동을 계속 측정한다.
- ㉤ 구조물에 도달하여서는 구조물의 중요부위 (1층, 2층, 기타 정밀 기기실등) 에서 진동을 측정한다.

3.2 진동측정 장비

본 진동측정에 사용된 장비는 캐나다 INSTANTEL 사의 BlastMate DS-477 및 그 부대장비로서 그 특성은 다음의 <표 2> 와 같다.

표 2. 진동측정장비의 특성

Maximum Range	254 mm/s (Particle Velocity)
Trigger Levels	0.125 ~ 254 mm/s steps of 0.01 mm/s
Peak Acceleration	0.01 ~ 30 g
Peak Displacement	0.00025 ~ 3.75 cm
Frequency Analysis	Frequency at Peak plus USBM/OSMRE and DIN 4150 Field Frequency Analysis
Frequency Response	Seismic and Linear Air 1.5 ~ 250 Hz

4. 측정결과 및 분석

4.1 측정결과

본 현장에 인접한 2개 지역 및 구조물에 대한 진동측정 결과는 <표 3> 및 <표 4>와 같이 나타났다.

표 3. 진동측정결과 1 (구조물 주변 지반)

구조물	측정항목	방 향	진동원으로 부터의 거리 (m)						비 고	
			5	10	20	40	45	50		
인수판넬 공장지역	V _{PP} (mm/s) peak parti- cle velocity	Vertical	-	22.5	12.7	6.1	6.0	2.2		
		Longitudinal	-	84.8	9.9	4.2	4.2	3.9		
		Transverse	-	12.2	3.1	1.9	5.3	1.8		
		Maximum	-	84.8	12.7	6.1	6.0	3.9		
		True Vector Sum	-	85.8	14.5	6.5	7.6	4.2		
		Pseudo Vector Sum	-	88.6	16.4	7.6	9.0	4.8		
	A _{PP} (mm/s ²) peak accel- eration	Vertical	-	0.58	0.09	0.04	0.19	0.07		
		Longitudinal	-	1.72	0.07	0.03	0.03	0.03		
		Transverse	-	0.21	0.01	0.01	0.05	0.03		
		Maximum	-	1.72	0.09	0.04	0.19	0.07		
	D _{PP} (mm) peak dis- placement	Vertical	-	0.452	0.221	0.107	0.112	0.034		
		Longitudinal	-	1.521	0.231	0.089	0.118	0.074		
		Transverse	-	0.107	0.093	0.042	0.159	0.018		
		Maximum	-	1.521	0.231	0.107	0.159	0.074		
	Dominant Frequency (Hz)	Vertical	-	10	9	9	9	12		
		Longitudinal	-	8	7	8	5	8		
		Transverse	-	23	5	6	6	15		
	쓰레기 소각장 지역	V _{PP} (mm/s) peak parti- cle velocity	Vertical	107.2	19.6	12.1	-	-	1.3	
			Longitudinal	110.2	44.6	13.1	-	-	3.4	
			Transverse	25.4	19.1	11.8	-	-	5.2	
			Maximum	110.2	44.6	13.1	-	-	5.2	
True Vector Sum			114.5	46.3	17.2	-	-	5.3		
Pseudo Vector Sum			155.8	52.3	21.4	-	-	6.3		
A _{PP} (mm/s ²) peak accel- eration		Vertical	5.62	0.27	0.08	-	-	0.01		
		Longitudinal	5.94	0.62	0.11	-	-	0.03		
		Transverse	0.48	0.15	0.07	-	-	0.03		
		Maximum	5.94	0.62	0.11	-	-	0.03		
D _{PP} (mm) peak dis- placement		Vertical	2.051	0.633	0.252	-	-	0.018		
		Longitudinal	1.398	0.825	0.322	-	-	0.083		
		Transverse	0.476	0.490	0.296	-	-	0.115		
		Maximum	2.051	0.825	0.322	-	-	0.115		
Dominant Frequency (Hz)		Vertical	20	6	7	-	-	10		
		Longitudinal	11	7	6	-	-	6		
		Transverse	11	7	7	-	-	5		

표 4. 진동측정결과 2 (구조물)

구조물	측정항목	방 향	진동원으로 부터의 거리 (m)					
			9.5 1층 바닥	18 플렉스 기초	27.3 1층 바닥	37.3 1층 바닥	47.3 1층 바닥	53.0 (2층 컴퓨터실)
입수판넬 공장	V _{pp} (mm/s) peak parti- cle velocity	Vertical	16.8	14.0	5.0	4.6	3.6	2.2
		Longitudinal	44.2	9.8	11.9	3.9	3.7	3.9
		Transverse	11.0	8.6	4.1	2.5	3.7	1.8
		Maximum	44.2	14.0	11.9	4.6	3.7	3.9
		True Vector Sum	45.6	18.4	12.1	5.3	5.9	4.2
		Pseudo Vector Sum	48.5	19.1	13.5	6.5	6.4	4.8
	A _{pp} (mm/s ²) peak accel- eration	Vertical	0.15	0.09	0.08	0.03	0.03	0.07
		Longitudinal	0.32	0.08	0.11	0.03	0.03	0.03
		Transverse	0.15	0.05	0.07	0.03	0.03	0.03
		Maximum	0.32	0.09	0.11	0.03	0.03	0.07
	D _{pp} (mm) peak dis- placement	Vertical	0.282	0.239	0.108	0.107	0.091	0.034
		Longitudinal	0.631	0.206	0.241	0.097	0.083	0.074
		Transverse	0.119	0.195	0.066	0.056	0.085	0.018
		Maximum	0.631	0.239	0.241	0.107	0.091	0.074
	Dominant Frequency (Hz)	Vertical	9	9	7	7	6	12
		Longitudinal	9	8	7	6	8	8
		Transverse	15	7	10	6	7	15

<표 3> 및 <표 4>는 서로 유사한 진동특성을 나타내고 있으며, 진동원으로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 진폭이 점차 감소하는 특성을 나타내고 있다.

4.2 결과 분석

구조물에 영향을 주는 진동특성은 진동수, 변위, 입자속도, 가속도 등이 있으며 이러한 진동특성들의 관계는 변위를 시간에 대하여 미분한 것이 입자속도이며, 입자속도를 시간에 대하여 미분한 것 (또는 변위를 시간에 대하여 2중 미분한 것)이 가속도이다.¹⁰⁾

상기의 각 진동특성이 구조물에 미치는 영향을 검토하기 위하여는 Response Spectra를 이용하는 방법이 있다. Response Spectra는 지반-구조물 진동계를 일련의 SDOF (Single Degree of Freedom System, 1 차 자유도) 시스템으로 모델링하고 정현진동(sinusoidal wave)을 가정하여 진동수, 변위, 입자속도, 가속도를 동시에 표시하는 방법으로 <그림 4>와 같다.

<그림 4>의 Response Spectra 곡선중 좌측의 변위가 일정하게 나타나는 부분은 SDOF 시스템에서 스프링 계수가 매우작은 상태로서 시스템의 자연진동수에 비하여 높

은 외부진동이 가해진 경우로서 SDOF 시스템에서 질량의 움직임은 거의 없고 작용하는 가속도만 변하는 경우이다. 또한 우측의 가속도가 거의 일정하게 나타나는 부분은 SDOF 시스템에서 스프링의 스프링계수가 매우 큰 상태로서 시스템의 자연진동수에 비하여 높은 가진 진동수를 갖는 외부진동이 가해진 경우로서 SDOF 시스템의 질량이 움직이기는 하나 시스템이 진동하기보다는 작용하는 외력에 의해 속도와 입자속도가 지배되고 있음을 나타낸다. <그림 4>의 좌측과 우측은 이와 같이 구조물 또는 지반을 대표하는 지반의 자연진동수가 가해지는 진동의 진동수보다 현저히 크거나 작아서 SDOF 시스템의 공진이 발생하지 않는 상태이며, 각각 변위 경계 (displacement bound) 및 가속도 경계 (acceleration bound)라 부른다. 변위 경계와 가속도 경계사이의 구간을 속도경계(velocity bound)라고 부르며, 이 구간에서는 지반-구조물의 자연진동수와 가해지는 진동의 진동수가 유사하여 공진이 발생할 수 있는 진동수 범위이다.

<그림 4>는 지반 또는 구조물의 공진이 발생하는 범위에서는 입자속도 및 가속도, 변위등이 모두 최대가 됨을 보여주며, 특히 입자속도를 이용하여 구별이 용이함을 보여준다. 또한 입자속도를 이용하여 진동에 의한 구조물의 변형률, 응력등을 구할 수 있어 ($\epsilon = u/c$, ϵ =변형률, u =입자속도, c =진동 전파속도 ; $\sigma = E\epsilon$, σ =응력, E =동탄성계수) 입자속도는 진동분석시의 중요한 지표가 됨을 알 수 있다. 따라서 본 고에서는 진동의 변위 및 가속도 보다는 입자속도 및 진동수를 이용하여 진동을 분석하였다.

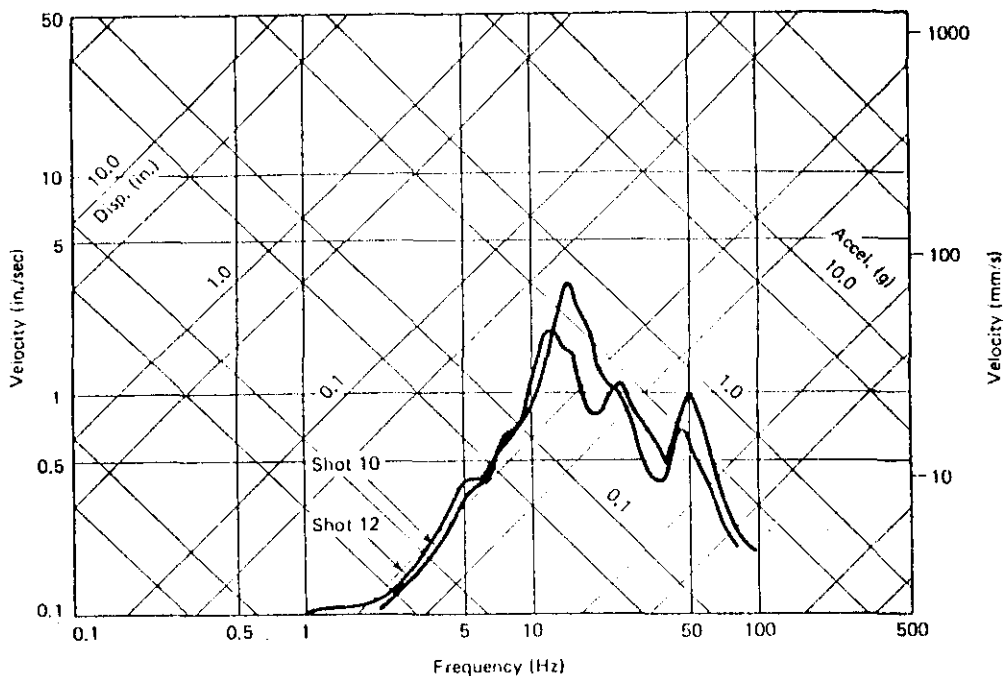


그림 4. 진동 Spectra 의 예 (After Dowding, 1985)

- 최대 입자속도

발파 또는 동다짐과 같은 충격에너지에 의하여 어느 지점에 발생하는 지반 진동의 최대 입자속도는 충격에너지가 클수록 커지는데 Wiss (1981)¹²⁾는 최대입자속도와 충격에너지의 관계를 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$V_{pp} = K \times \left[\frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{-n} \quad (1)$$

여기서,

K = 절편

D = 진동원으로 부터의 거리 (m)

E = 1회 타격당 충격 에너지 (ton·m)

n = 기울기

$\frac{D}{\sqrt{E}}$ 를 일반적으로 환산거리 (scaled distance)라고 함

식 (1)로 부터 충격에너지에 의하여 지반에 발생하는 진동의 강도는 충격 에너지가 클수록 그리고 진동원으로 부터의 거리가 가까울수록 커지는 것을 알 수 있으며, 또한 K 및 n 으로 나타나는 지반의 진동 전파특성에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 본 지역에서 측정된 진동치들인 <표 3> 및 <표 4>의 측정결과를 회귀 분석하여 식 (1)을 적용시키면 <그림 5>와 같으며 이로부터 다음과 같은 결과를 얻는다.

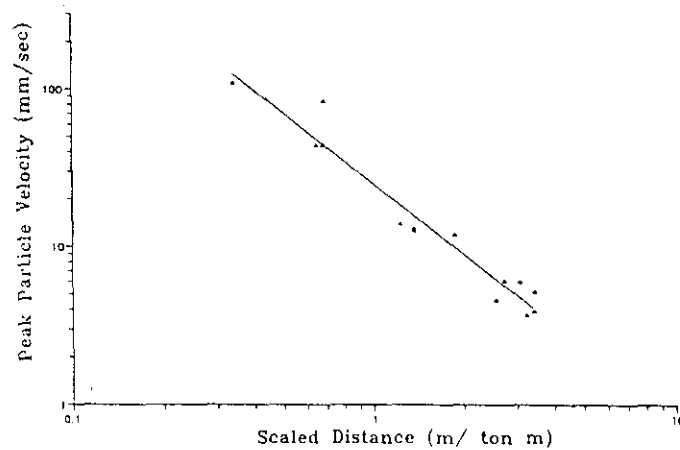


그림 5. 최대 입자속도 (maximum V_{pp})와 환산거리 (Scaled distance)의 관계 (구조물 2 층 컴퓨터실에 대한 측정결과는 제외함)

표 5. 회귀 분석에 의한 식 (1)의 K 및 n (구조물 2 층 컴퓨터실에 대한 측정결과는 제외함)

구분	Longi.	Verti.	Trans.	Peak	TVS	PVS
K	15.49	22.84	8.88	25.05	27.74	31.91
n	1.38	1.60	0.95	1.49	1.43	1.43

*TVS = True Vector Sum

PVS = Pseudo Vector Sum

<그림 5>와 같이 방향별 최대 입자속도 v_{pp} 와 환산거리 ($D/\nu E$)를 반대수지에 도시하여 회귀분석하여 K 와 n 값을 구하였으며 그 결과는 <표 5>와 같다. <표 5>는 서로 유사한 경향을 나타내나 약간씩 다른 체감특성을 나타낸다. 즉<표 5>에서 Vertical, Longitudinal, Transversal 성분중 Longitudinal 성분이 가장 큰 K 및 n 값을 나타내어 가장 큰 입자속도 및 진폭감소(attenuation)를 나타냄을 알 수 있다. 또한 Transversal 성분은 가장 작은 K 및 n 값을 나타내어 가장 작은 입자속도 및 진폭감소(attenuation)를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상은 Gambin(1979)⁵⁾에 의하여 보고된 동다짐시의 사례 및 Wiss and Nicholls(1973)¹³⁾에 의하여 보고된 발파시의 사례와 유사한 것으로 나타났다.

가장 큰 입자속도를 나타내는 Longitudinal 성분은 가장 큰 진폭감쇠를 보여주며, 가장 작은 입자속도를 나타내는 Transversal 성분은 가장 작은 진폭감쇠를 보여주는 현상은 진폭이 커질수록 진동의 감쇠비(damping ratio)가 커지는 현상으로 송정탁·김수일(1988)³⁾에 의하여 보고된바와 일치한다.

구조물은 Vertical, Longitudinal, Transversal 방향의 어느 한 방향의 진동에 대하여 특별히 약할 수 있으며 진동에 의한 구조물의 피해를 엄밀히 분석할 경우 진동의 방향을 고려하는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 시도들은 Mayne(1985)⁷⁾ 등에 의하여 제안되고 있으나 아직 연구단계이며, 진동이 구조물에 미치는 영향은 주로 진동의 최대치 (방향 구별없이)에 의하여 결정되고 있으며⁷⁾, 본 고에서도 최대 입자속도에 대한 식(1)을 이용하여 진동에 의한 구조물의 피해 및 이에 대한 시공관리 방안을 검토하였다.

- 진동수

Mayne(1985)⁷⁾ 및 Menard and Broise(1975)⁸⁾는 동다짐시 발생하는 진동은 말뚝 항타 및 암반 발파등의 진동과는 달리 10 Hz 내외의 저주파 진동을 나타내는 것으로 보고하고 있다. 본 지역에서 측정된 진동기록을 FFT (Fast Fourier Transformation) 처리하여 산정된 탁월 진동수는(dominant frequency) 각 경우별로 <표 3> 및 <표 4>에 나타낸바와 같다. 여기서 최대 입자속도를 나타낼 때의 진동수를 통계처리하면 <그림 6>과 같은 정규분포도를 얻을 수 있다.

<그림 6>으로 부터 본 지역에서는 약 7 - 9 Hz의 진동수를 가지는 진동이 지배적임을 알 수 있다. 또한 <표 3> 및 <표 4>로 부터는 진동원으로 부터의 거리가 증가함에 따라 탁월진동수가 점차 감소하는 추세를 알 수 있다. 이는 일반적으로 알려진바와 같이 지반은 고진동수 성분을 잘 전달하지 못하므로 진동원으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 고진동수 성분은 소멸되고(지반에 흡수되고) 저진동수 성분이 주로 전달되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 일반적인 구조물의 대략 공진 진동수가 식 (2)과 같은 관계로 표시될 수 있으므로(Dowding, 1985)⁴⁾, 본 지역의 2 건물인 인수판넬 공장과 쓰레기 소각장의 공진진동수는 대략적으로 각각 5 Hz(실측치는 6 - 12 Hz),

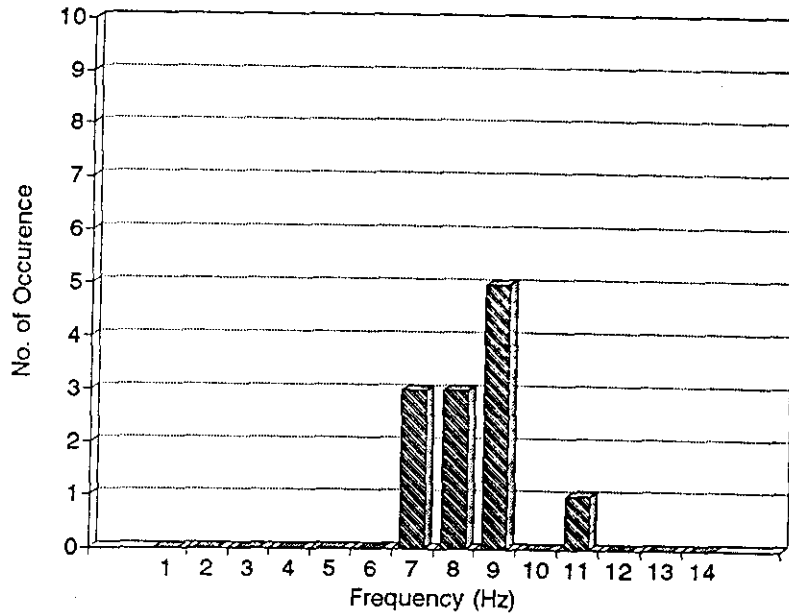


그림 6. 동다짐 진동의 진동수와 빈도

3.4 Hz 정도의 범위를 갖음을 고려하면 본 지역 동다짐시의 진동은 건물의 공진진동수에 근접함을 알 수 있다. 따라서 동다짐시 매우 치밀한 시공관리가 필요함을 알 수 있다.

$$f_n = 1/(0.1 \cdot N) \text{ (Hz)} \quad (2)$$

여기서,

f_n = 공진 진동수

N = 건물 층수

- 동다짐에 의한 진동이 구조물에 미치는 영향

진동이 구조물에 미치는 영향은 여러 사람들에 의하여 연구되었으나 (그림 7 참조) 오늘날 일반적으로 널리 적용되고 있으며, 손쉽게 적용할 수 있는 방법은 미 광무국 (USBM, United States Bureau of Mines) 에서 제안한 최대입자속도와 진동수를 연관지어 해석하는 방법이다. 미 광무국의 방법은 이론적인 방법이기는 보다는 수많은 현장시험을 분석하여 파괴발생 여부, 통계적 분석, 확률론적 분석등을 거쳐서 만들어진 경험적 방법이다.⁷⁾

즉 초기에 USBM은 구조물에 안전한 진동 허용한계로서 $V_{pp} = 2 \text{ in./sec}$ (5.08 cm/sec)를 제안하였으나 (일반적으로 인간의 활동 및 온도, 습도 변화에 의하여 구조물에 발생하는 진동의 최대입자속도도 약 1.2 in./sec 정도임)⁶⁾, Wiss and Nicholls (1974)¹³⁾ 등의 광범위한 연구를 거쳐 진동허용 한계를 V_{pp} 와 진동수를 연관짓는 <그림 8>과 같은 도표를 제안하였다.

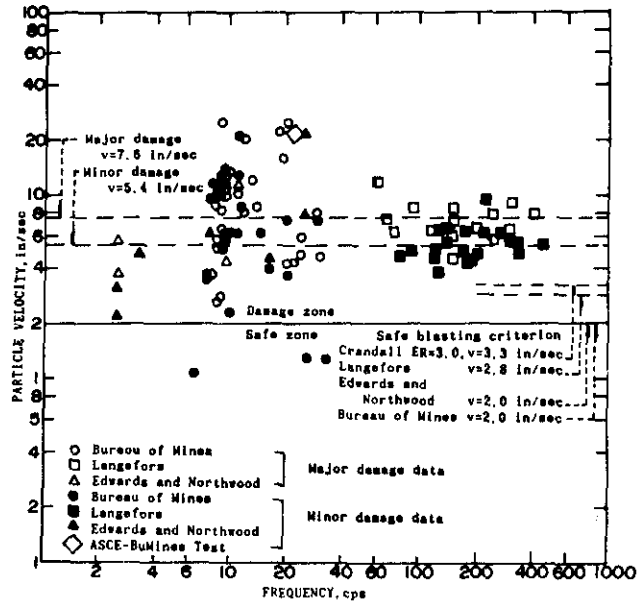


그림 7. 구조물에 안전한 진동기준(After Nicholls et. al, 1971)

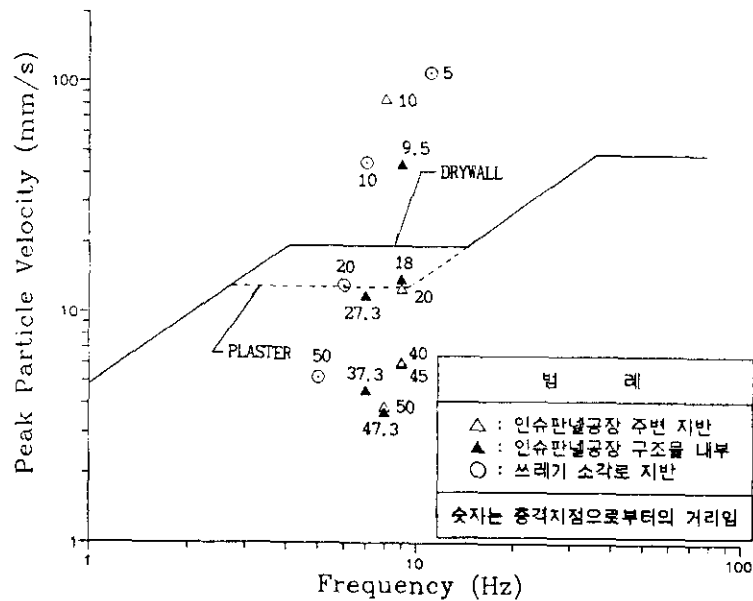


그림 8. USBM 진동기준에 따른 허용 진동속도와 진동수의 관계

<그림 8>은 진동수가 낮아질수록 상대적으로 허용 한계진동속도 V_{pp} 가 낮아지고 있음을 나타낸다. 이러한 현상은 일반적인 구조물의 공진 진동수가 대개 10 Hz 이하의 낮은 범위임을 감안하면 합리적인 기준으로 판단된다. 즉 동일한 진동에너지를 받게 되더라도 구조물의 공진 진동수에 가까운 진동을 받는 경우는 그렇지 않은 경우보다 상대적으로 매우 큰 진폭으로 진동을 하기 때문이다. 그러나 <그림 8>은 동다짐 시 발생하는 진동을 해석하기 보다는, 발파와 같이 진동지속시간이 비교적 큰 진동원

에 대하여 개발되었다. 동일한 진폭의 진동을 받더라도 진동지속시간이 긴 경우에 지반의 액상화 및 구조물의 피해가 커진다는 것은 이미 여러차례 보고된바 있다(강기영·노상천, 1989)¹⁾. Welsh 등(1987)¹¹⁾에 의하면 동다짐에 의한 진동의 경우 3 cycles 이내에 진동이 실질적으로 소멸되어 진동 지속시간이 발파동에 의한 진동보다 짧아 동일한 V_{pp} 에 대하여도 <그림 8>의 기준을 동다짐 진동에 적용할 시는 다른 진동원에 의한 진동보다 안전축이며 실제 적용시에는 진동 한계치를 상향 조정할 필요가 있는 것으로 보고되고 있다.

본 지역에서 측정된 값들을 <그림 8>의 USBM 도표에 도시하면 인슈판넬 공장 주변 및 쓰레기 소각장 모두의 경우 광범위한 주파수 대역에서 진동원로부터의 거리가 20m 이상일 경우 USBM의 허용기준치 이내에 들고 있음을 나타낸다.

특히 쓰레기 소각장의 경우, 동다짐 지역으로 부터의 최소 이격거리가 50m 이상이므로 동다짐으로 인한 피해가 예상되지 않았다. 따라서 진동차단등 별도의 대책없이도 동다짐 시공이 진행될 수 있는 것으로 나타났다.

그러나 인슈판넬 공장은 최소근접 거리가 10m 이므로, 동다짐으로 인한 진동을 억제하기 위한 대책이 요구되었다. 구조물 내부에서 진동반응은 기초형식, 골조 및 Slab의 구조, 설치기기의 종류등에 의하여도 달라지게 된다¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 구조물 주변 및 인슈판넬공장 건물내부에서 직접 진동을 측정하였으며, 그 결과는 <표 4>와 같다. <표 4>는 <표 3>과 유사한 탁월 진동수 및 V_{pp} 나타내어 본 지역의 경우 지반에서의 진동특성과 구조물에서의 진동특성이 서로 유사한 상태임을 알 수 있다.

구조물 내부의 사무기기에 대한 진동의 규제치는 대표적으로 진동에 대하여 민감한 기기인 컴퓨터 디스크 드라이브와 진동에 대하여 비교적 민감치 않은 전화기에 대하여 <그림 9>와 같이 보고되어 있다. 본 지역중 인슈판넬 공장지역의 경우 <표 4> 및 <그림 8>과 <그림 9>를 비교하면 부분적으로 <그림 9>의 기준을 초과하고 있어 이에 대한 대책이 요구되는 상태임을 알 수 있다.

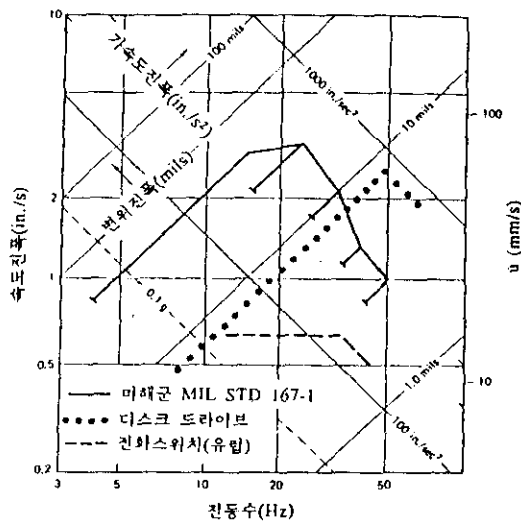


그림 9. 컴퓨터 및 전화기에 대한 진동규제치 (After Dowding, 1985)

- 진동피해 대책

둥다짐으로 인한 진동에 의하여 구조물이 손상을 받을 가능성이 있는 경우에 대한 대책은 진동차단벽등 여러가지가 있으나 본 과업에서는 둥다짐의 다짐 에너지를 감소시키는 방안을 선정하였다. 다짐 에너지의 감소 정도는 식(3)에 의하여 결정될 수 있다. 식 (1) 및 <표 5> 로 부터

$$E = \left[\left(\frac{25.05}{V_{pp}} \right)^{-1.49} \cdot D \right]^2 \quad (3)$$

여기서,

E = 다짐 에너지 (ton·m)

D = 진동원으로부터의 거리 (m)

V_{pp}=최대 입자속도 (mm/sec)

식 (3)은 쓰레기 구조물 주변지반과 구조물 1 층 지역에 대한 진동측정결과를 평균하여 산정된 것이나, 본 지역의 경우 구조물 주변지반과 구조물 지역에서 진동특성이 서로 유사하게 나타나 본 지역 구조물의 진동피해를 평가하기 위하여 식 (3)을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

진동원으로 부터 10m 떨어진 곳의 V_{pp}를 0.75 in/sec (=19.05 mm/sec)로 규제할때(그림 8 참조) E = 69.3 ton·m 가 얻어진다. 이때 다짐용 추의 중량은 12 ton 이므로 낙하고 h=E/W = 69.3/12 = 5.8m 가 얻어진다. <그림 8>의 기준은 전술한 바와 같이 상당히 안전측이므로 본 지역의 낙하고는 평균 6.0m 로 조절하여 시공하였다. 진동 억제 대책으로서 다짐에너지를 감소시켜 시공한 지역은 지반의 개량 심도가 얕아지게 되는 문제가 발생할 수 있다. 그러나 인슈판넬 공장부근 지역은 개량대상 쓰레기 층의 두께가 표면으로 부터 4 m 내외로서, 감소된 다짐에너지 (h = 0.5 √h = 0.5 √12.6 = 4.2 m) 에 대하여도 그 개량가능심도가 충분한 것으로 나타났다. 개량효과 확인은 동적 콘 관입시험으로 수행되었으며 <그림 10>과 같이 충분한 심도까지의 개량효과를 확인할 수 있었다.

구조물 내부의 사무기기에 대한 진동 대책으로는 사무실 업무시간을 피하여 둥다짐 작업을 수행함으로써 피해를 방지할 수 있었다. 진동에 대하여 비교적 민감한 컴퓨터 하드 디스크 드라이브의 경우 충격에 대한 생산자 사양은 40 g 이고, 움직이는 부분이 거의 없는 전자식 전화기의 경우 움직이는 부분이 거의 없으므로 <그림 9>의 기준은 정상적인 컴퓨터 및 전화기 사용을 위한 진동 규제치임을 알 수 있다. 따라서 컴퓨터 디스크 드라이브의 read & write head를 안전한 위치에 park 시키고, 전화기를 사용하지 않는다면 <그림 9>의 진동 규제치보다 큰 진동에 대하여도 둥다짐 작업이 수행될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 현장에서는 컴퓨터 디스크 드라이브의 read & write head가 안전한 위치에 park되고 전화기 사용이 없는 비 업무시간 (출근전 및 퇴

근후 시간)에 <그림 9>의 규제치를 약간 상회하는 동다짐을 실시하여 사무기기에 피해 없이 지반개량을 할 수 있었다.

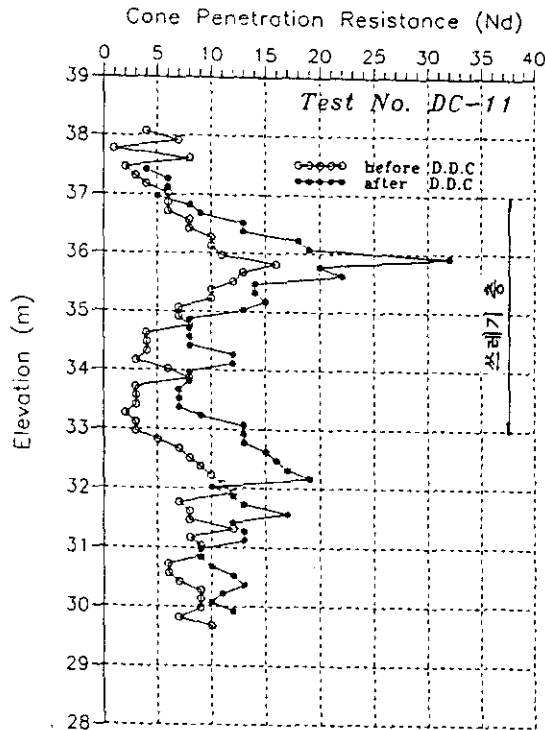


그림 10. 지반개량 효과 확인

5. 결 론

대전 갑천 우안도로 동다짐 공사에서 쓰레기층 동다짐시 발생하는 진동을 측정, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 환산거리를 고려한 진동에너지 및 최대입자 속도는 다음의 관계를 가진다.

회귀 분석에 의한 식 (1)의 K 및 n
(구조물 2 층 컴퓨터실에 대한 측정결과는 제외함)

구 분	Verti.	Longi.	Trans.	Peak	TVS	PVS
K	15.49	22.84	8.88	25.05	27.74	31.91
n	1.38	1.60	0.95	1.49	1.43	1.43

- ② 본 지역에서 동다짐시 발생하는 탁월 진동수는 7 - 9 Hz 내외이다.
③ 동다짐시 발생하는 진동의 최대 입자속도는 Longitudinal, Vertical,

Transversal 방향 순으로 크고 감쇄비 또한 Longitudinal, Vertical, Transversal 방향 순으로 크게 나타났다.

- ④ 주변 구조물에 미치는 피해를 피하기 위하여 동다짐시 다짐추의 낙하고를 식 (3) 에 의하여 6m 로 조정하여, 피해를 방지할 수 있었다.
- ⑤ 진동으로 인하여 사무용 기기에 대한 피해를 방지하기 위하여는 <그림 9> 의 진동 규제 기준을 적용할 수 있으나, 이것은 사무기기를 정상 사용키 위한 기준이므로 사무기기를 사용치 않을 경우는 <그림 9>의 기준을 상 회하여 적용할 수도 있다.
- ⑥ 동다짐 시공시 동다짐에 의한 진동을 정밀하게 측정, 분석하는 시공관리를 적극적으로 한다면, 기존 구조물에 근접하여도 동다짐 시공이 가능하다.
- ⑦ 현재 동다짐에 의한 진동분석은 진동방향과 상관없이 최대입자속도 위주의 분석이 대부분이나, 진동방향을 구분하여 피해정도를 분석하는 방안이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

6. 감사의 글

본 연구의 저자들은 현장 측정시 많은 노고를 아끼지 않은 영진건설 산업 주식회사 관계자 제위와 원고 교정 및 검토의 수고를 하여주신 (주) 대우엔지니어링의 한영철 차장, (주) 쌍용엔지니어링의 목영진 박사 그리고 한국건설기술연구원의 우제윤 박사에게 심심한 감사를 표한다.

7. 참고문헌

1. 강기영, 노상천 (1989), "단순 방법에 의한 액상화 잠재력 평가", 대우엔지니어링 기술보, 제 6 권, 제 1 호, pp.60-70
2. 대전직할시 종합건설본부(1993), "갑천우안도로 건설공사(제1공구) 동다짐 시공 보고서", pp. 3-113
3. 송정락·김수일 (1988), "Silt질 모래의 고 변형을 진동특성(기본성질)", 대한토질 공학회지, 제 3 권, 제 2 호, 9 월, pp.27-33
4. Dowding, C.H. (1985), "Blast Vibration Monitoring and Control", Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ 07652, pp.66, 91, 191
5. Gambin, M.P. (1979), "Menard Dynamic Consolidation", SOLS SOILS, No.29,

pp. 27-40

6. Lukas, R.G. (1986), "*Dynamic Compaction for Highway Construction, Vol. 1, Design and Construction Guidelines*", FHWA/RD-86/133, pp.98-113
7. Mayne, P.W. (1985), "GROUND VIBRATIONS DURING DYNAMIC COMPACTION", Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Div. in conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan, Oct. 22, Edited by G. Gazetas and E.T. Selig, PP.247-265
8. Menard, L. and Broise, Y. (1975), "Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation", *Geotechnique*, Vol.15, No.1, Mar. pp.3-18
9. Nicholls, H.R., Johnson, C.F. and Duvall, W.I. (1971), "Blasting Vibrations and Their Effects on Structures", Bureau of Mines, Bulletin 656 (After Lukas, 1986)
10. Richart, F.E. Jr., Woods, R.D. and Hall, J.R. (1970), "*Vibrations of Soils and Foundations*", Prentice Hall, pp.191-239
11. Welsh, J.P., Anderson, R.D., Barksdale, R.P., Satyapriya, C.K., Tumay, M.T. and Wahls, H.E. (1987), Chapter of the Densification Subcommittee, Placement and Improvement of Soils Geotechnical Engineering Division, ASCE, Geotechnical Special Publication, No.12, pp.67-75
12. Wiss, J.F. (1981), "Construction Vibrations: State-of-the-Art", *J. of Geotechnical Engineering Div. ASCE*, Vol.107, No.GT2, Feb. pp.167-181
13. Wiss, J.F. and Nicholls, H.R. (1974), "*A Study on damage to a residential structure from blast vibrations*", Research Report for the Research Council for Performance of Structures of the ASCE. pp.1-73