

폐기물 매립지반에서 동다짐공법에 의한 진동영향에 관한 연구

A Study on the Vibration Effect
by Dynamic Compaction Method at Waste Landfill

천 병 식*

Chun, Byung-Sik

Abstract

Dynamic compaction is the ground improvement method by applying the impact energy. This impact energy can damage to adjacent structure in urban area. Therefore, if dynamic compaction method is applied, careful attention should be payed to surrounded structures. In this study, the method was performed in waste landfill and the frequency of vibrations were measured according to each distances, drop-heights, and vibrating directions. The measured data show that particle velocity has low frequency and it is greatest in longitudinal direction.

There was little differences between Maynes suggestion and measured data. Therefore, Maynes suggestion can be adopted if the range of vibration can be predicted. Also, It was found that minimum 45m distance is needed in order to satisfy the administrative code if dynamic compaction method is applied.

Keywords : dynamic compaction, vibration, waste landfill

1. 서 론

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. 동다짐공법은 1950년대 프랑스의 L. Menard⁽¹⁾에 의하여 체계화되어 오늘날과 같은 동다짐 공법으

로 발전하여왔다.⁽²⁾

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 여러 가지 극복하여야 할 문제가 있다.

동다짐시에 발생하는 진동은 말뚝 향타 및 암반

* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원

● 본 논문에 대한 토의를 2001년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

발파의 진동과는 다르게 진동수 약 10Hz 정도로 알려져 있으며⁽³⁾, 이러한 낮은 진동수는 보통 구조물의 공진 진동수와 유사한 범위이다. 공진상태에서 구조물은 동일한 진동에너지에 대하여 그렇지 않은 경우보다 훨씬 큰 진폭으로 운동하게 되므로 구조물이 위험하게 될 수 있다.⁽⁴⁾

그러나 적절한 시공관리와 안전관리를 통하여 구조물에 인접하여서도 동다짐 공법을 시행할 수 있을 것이며, 실제로 기존 구조물에 근접한 시공사례들도 보고되어 있다.

본 연구에서는 쓰레기 매립층으로 이루어진 서울 시 상암동 난지도 매립지반에 동다짐 시공 현장에서 발생하는 진동을 측정·분석하여 동다짐 시공이 주변 구조물에 미치는 영향 및 피해경감 방안 등을 검토하고자 하였다.

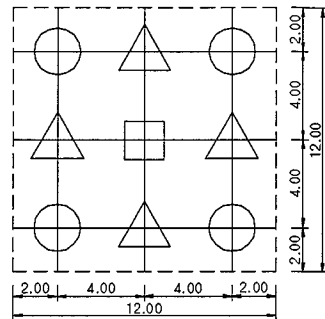
2. 현장 시험시공 및 진동측정 개요

2.1 시험시공

동다짐 시험시공은 서울 난지도 폐기물 매립장에서 실시하였다. 난지도 폐기물 매립장은 과거 15년(1978. 3~1993. 3)동안 서울시에서 발생된 약 92,000천³m의 폐기물이 위생기반시설 및 오염방지 시설 설치 없이 매립된 대규모 성도(평균 90m)된 지역으로, 본 시험시공은 1, 2 매립지와 매립장 사이의 부지(37m)에서 이루어졌다. 시추조사 자료에 의하면 본 지역의 지층상태는 일반적으로 지표로부터 매립층(쓰레기층 포함), 충적층(토시층, 시력층), 풍화대층(풍화토, 풍화암), 기반암층 등으로 구성되어 있다.

시공은 12m×12m의 부지를 1개의 Yard로 보고, 총 4개의 Yard로 나누었으며 Yard-1, Yard-2는 복토채를 제거하지 않고 동다짐을 실시하고, Yard-3, Yard-4는 복토채 0.5m를 제거하였으며, Yard-1, Yard-3는 낙하고를 20m으로 하여 실시하고, Yard-2, Yard-4는 낙하고를 15m으로 하여 실시하였다(나짐효율을 비교하기 위해서 원지반과 복토채 제거로 나눔). 각각의 Yard에 대하여

Tamping은 1,2,3단계로 나누어 Fig. 1과 같은 위치에서 실시하였으며 각 단계에서의 타격횟수는 Table 1과 같이 동일하게 적용되었다. 또한, 동다짐시 발생하는 진동이 자동차 및 사무실 안팎으로 어느 정도 영향을 미치는지 진동을 측정하여 보았다.



LEGEND

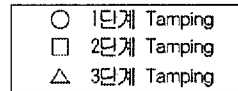


Fig. 1 Yard별 텀핑계획도

* Grid는 Tamping시 동다짐의 영향이 미치는 범위

Table 1 각 부지 별 시험 계획

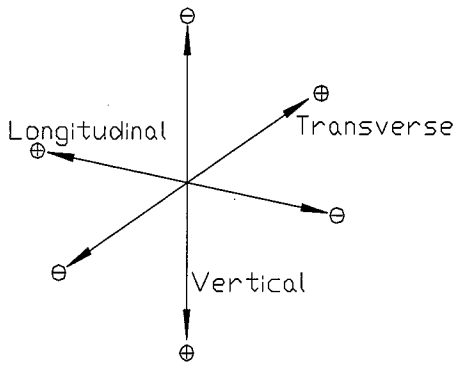
구분	부지 정지 형태	다짐에너지		Tamping 상세	
		다짐추 무게(t)	낙하고 (m)	단계	타격횟수
Yard 1	원 지 반	15	20	1	10회
				2	10회
Yard-2	반	15	15	3	5회
				마무리	1회
Yard-3	복토채 0.5m 제거	15	20	1	10회
				2	10회
Yard-4	제거	15	15	3	5회
				마무리	1회

2.2 진동측정

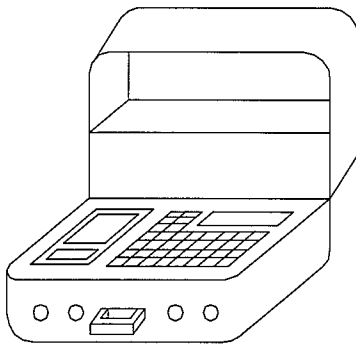
동다짐시 발생하는 진동 및 소음은 공사장 주변 일정한 영향권내에서 인접건물에 피해를 줄 수 있다. 이러한 영향에서 벗어나기 위해 확보해야 하는 층

분한 거리를 결정하기 위하여 동다짐시 발생하는 주변지반의 진동을 측정하고 분석하였다. 측정방법으로는 진동원으로부터 떨어진 각각의 거리별로 진동을 측정하는 방법을 사용하여 진동이 미치는 영향반경을 구하고자 하였으며, 각각의 측정에서 x,y,z 세 방향으로의 입자속도를 측정하였다. 동다짐작업에 의해 발생하는 충격파의 속도와 크기를 측정하여 충격파의 영향범위를 구한 후 서울, 부산 지하철의 진동에 관한 진동속도 규정과 비교하여 영향이 미치지 않는 범위를 조사하였다.

측정장비는 Instantel Inc.의 BlastMatell (DS-477)을 이용하였고, 장비의 측정범위 및 특성은 Table 2와 같다.



(a) Geophone에 의하여 측정되는 진동의 방향



(b) 진동 측정장비 (BlastMatell)

Fig. 2 진동 측정장비

Table 2 진동 측정장비의 특성

측정범위	254mm/s(입자속도)
측정시작시 레벨	0.125~254mm/s steps of 0.01mm/s
최대 가속도	0.01~30g
최대 변위	0.00025~3.75cm
진동해석	USBN/OSMRE

측정시에는 3-D Geophone을 사용하여 1회 측정시 마다 종방향(Longitudinal), 연직방향(Vertical), 횡방향(Transverse)의 진동측정이 동시에 이루어지도록 하였다. 표준 Geophone의 설치방법은 Fig. 3과 같으며, 거리는 진동원(타격지점)으로부터 10m 및 20m 간격씩 160m 지점까지 측정하였다.

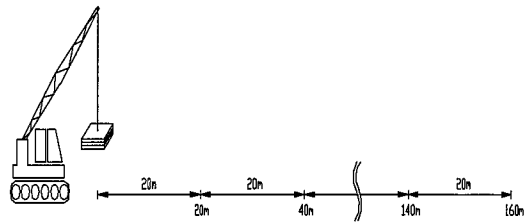


Fig. 3 진동 측정 위치

진동 측정의 순서는 다음과 같다.

- ① 지정된 위치에 동다짐용 크레인 및 다짐추를 설치한다.
- ② 지정된 위치에 Geophone을 위치시킨다.
- ③ 동다짐용 다짐추를 낙하시켜 진동을 발생시키고 진동을 측정한다.
- ④ Geophone의 위치를 이동시키면서 진동을 계속 측정한다.

3. 측정결과

3.1 최대진동속도 측정

동다짐에 의한 진동으로 발생된 주변지반의 입자의 최대진동속도를 측정된 결과는 Table 3~6과 같다.

Table 3 Yard-1 진동 측정

진동원으로 부터의 거리(m)	최대진동속도 (mm/s)			최대 벡터 속도 (mm/s)
	Tran	Vert	Long	
10	7.490 (13)	14.700 (9)	17.800 (7)	20.400
20	3.560 (10)	8.260 (11)	6.100 (8)	9.140
40	1.650 (12)	2.920 (9)	3.680 (8)	4.240
60	1.270 (14)	1.520 (8)	1.910 (11)	2.320
80	0.762 (12)	1.020 (11)	1.020 (12)	1.190
100	0.635 (6)	0.889 (11)	1.020 (27)	1.110
120	0.508 (16)	0.762 (13)	1.020 (10)	1.100
140	0.762 (7)	0.635 (10)	0.635 (6)	1.030
160	0.508 (7)	0.381 (15)	0.635 (8)	0.762

Table 4 Yard-2 진동 측정

진동원으로 부터의 거리(m)	최대진동속도 (mm/s)			최대 벡터 속도 (mm/s)
	Tran	Vert	long	
10	9.020 (10)	16.300 (10)	14.900 (9)	17.600
20	5.210 (9)	7.240 (10)	3.940 (12)	8.160
40	1.650 (9)	2.160 (17)	2.549 (6)	3.160
60	0.762 (16)	1.520 (7)	1.520 (12)	1.980
80	0.508 (16)	1.270 (11)	1.270 (11)	1.300
100	0.381 (17)	1.270 (12)	1.020 (12)	1.560
120	0.508 (16)	0.889 (13)	1.020 (10)	1.190
140	0.762 (12)	0.889 (7)	1.020 (7)	1.370

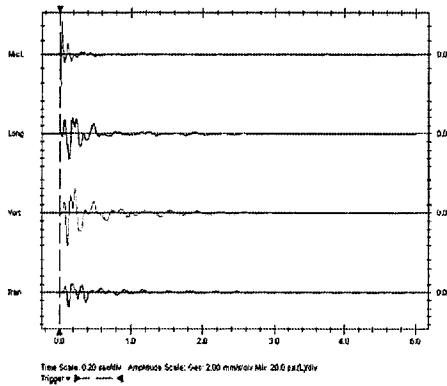
Table 5 Yard-3 진동 측정

진동원으로 부터의 거리(m)	최대진동속도 (mm/s)			최대 벡터 속도 (mm/s)
	Tran	Vert	long	
10	17.500 (11)	15.500 (6)	38.400 (8)	38.800
20	3.430 (16)	7.370 (8)	11.600 (9)	12.600
40	2.790 (7)	2.410 (8)	3.940 (5)	4.540
60	1.520 (7)	1.140 (8)	1.400 (5)	1.830
80	1.020 (8)	1.020 (8)	0.508 (8)	1.300
100	0.381 (5)	0.635 (8)	0.508 (6)	0.746
120	0.508 (6)	0.508 (8)	0.381 (7)	0.619
140	0.508 (8)	0.635 (9)	0.762 (7)	0.778
160	0.508 (7)	0.381 (12)	0.381 (9)	0.587

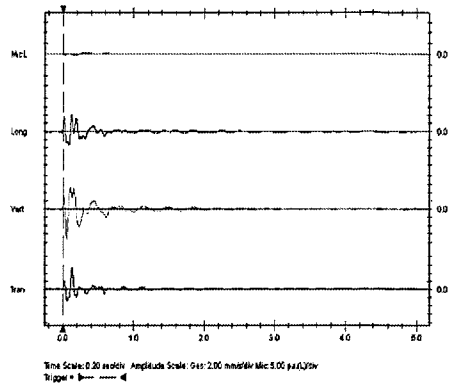
Table 6 Yard-4 진동 측정

진동원으로 부터의 거리(m)	최대진동속도 (mm/s)			최대 벡터 속도 (mm/s)
	Tran	Vert	long	
10	7.490 (13)	4.830 (11)	15.400 (9)	12.200
20	4.830 (11)	15.400 (9)	12.200 (8)	16.800
40	2.290 (11)	4.060 (9)	3.430 (6)	4.780
60	1.910 (8)	1.520 (8)	1.650 (10)	2.250
80	0.635 (6)	1.020 (7)	1.020 (6)	1.190
100	0.508 (6)	0.762 (8)	0.635 (7)	0.953
120	0.381 (10)	0.508 (10)	0.381 (9)	0.683
140	0.381 (9)	0.635 (8)	0.254 (9)	0.667
160	0.508 (6)	0.508 (7)	0.508 (9)	0.746

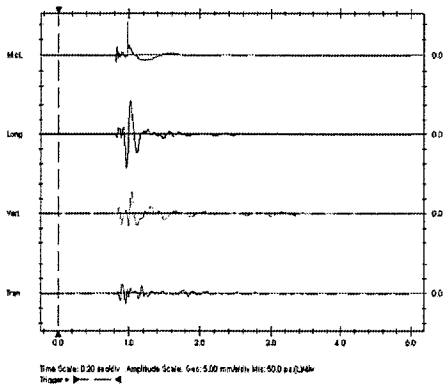
※ ()는 진동수를 의미하며 단위는 Hz임



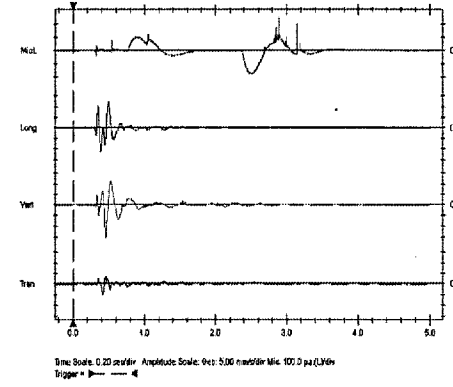
(a) Yard - 1



(b) Yard - 2



(c) Yard - 3



(d) Yard - 4

Fig. 4 대표적 파형기록(측정거리 20m)

이상의 Table 3~Table 6에서 보는 바와 같이 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 최대벡터속은 감소하고, 횡방향, 연직방향, 종방향 순으로 최대진동속도는 커짐을 알 수 있다. 각각의 Yard별 진동의 파형은 Fig. 4와 같이 측정되었다.

여기서 MicL은 측정된 소음을 의미하며, 파형에서도 횡방향, 연직방향, 종방향 순으로 커짐을 알 수 있다(Long는 종방향, Vert는 연직, Trans는 횡방향으로 측정된 입자의 속도를 의미한다).

또한 동다짐시 발생하는 진동이 주변건물이나 자동차 내부에 어떤 영향을 미치는지 알기 위해 각각

의 대상물 내부와 외부의 진동속도를 측정하여 비교한 결과는 Table 7과 같다.

4. 분석 및 고찰

4.1 현행 규정과의 비교

측정된 결과를 분석해 보면 진동속도는 종방향(진동방향과 정방향)에서 최대값을 보이고 있으며 진동수는 암반발파나 말뚝항타와는 달리 (10Hz) 내외의 저주파 진동이 나타났다. 그리고 측정된 입지속도가

Table 7 기타 위치에서 진동 측정(진동원으로부터의 거리 40m)

위 치		최대진동속도 (mm/s)			최대벡터 속도 (mm/s)
		Tran	Vert	Long	
Yard -1	자동차 안	3.56 (5.0)	8.38 (4.0)	2.54 (3.0)	8.87
	자동차 밖	3.40 (6.0)	3.87 (6.0)	5.18 (9.0)	5.75
Yard -3	사무실 안	4.24 (8.0)	7.73 (10)	6.00 (6.0)	8.46
	사무실 밖	4.91 (8.0)	6.18 (11)	6.30 (6.0)	7.72
Yard 4	사무실 안	3.0 (12)	9.02 (9.0)	4.32 (8.0)	9.14
	사무실 밖	4.86 (10)	4.06 (10)	4.91 (8.0)	5.64

※ ()는 진동수를 의미하며 단위는 Hz임

Table 8 서울·부산 지하철 진동허용기준

구 분	문화재	주택, APT	상가	공장 및 철근 콘크리트빌딩
건물진동에서의 허용기준치(mm/s)	2	5	10	10~40

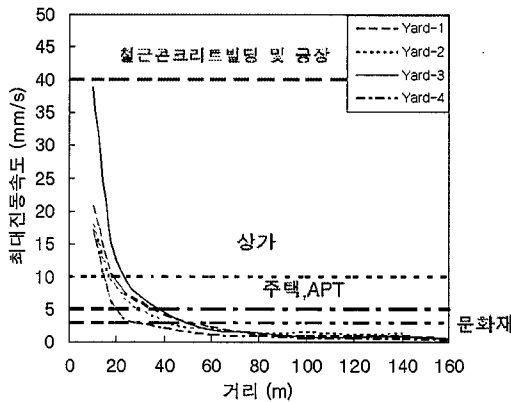


Fig. 5 측정된 최대입자속도와 현행진동규정곡과의 비교

현재 시행되고 있는 진동에 관한 규정⁽⁵⁾에 만족하고 있는지 Table 8의 서울·부산 지하철의 허용진동속도에 관한 규정을 비교하였다.

Table 9 매립지반에서의 동다짐시공시 소요이격거리

구 분	원지반			
	복토계를 0.5m 제거한 경우			
다짐추	15t			
낙하고	20m	15m	20m	15m
부지	Yard-1	Yard-2	Yard-3	Yard-4
문화재	68~72m	48~50m	50~53m	40~42m
주택, APT	40~45m	20~25m	40~45m	20~25m
상가	20~25m	15~20m	25~30m	20~25m
철근콘크리트 빌딩 및 공장	15~20m	10~15m	20~25m	15~20m

Table 8의 진동허용 기준치와 측정된 각Yard별 입자속도를 비교하여 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다.

이상의 결과를 이용하여 각 Yard별 동다짐에서 각각의 구조물에 영향을 받지 않을 최소 이격거리를 구하면 Table 9와 같다.

본 시험시공과 같이 15t의 낙하추를 이용하여 20m높이에서 낙하시키는 동다짐 시공시에는 이격거리를 상가주변에서 20m의 거리를 두고, 주택이나 APT주변에서는 40m의 최소 이격거리가 필요함을 알 수 있다.

건물과 자동차의 내·외부에서 각각 진동속도를 측정한 결과 각각의 대상물 내에서 측정된 값이 외부에서 측정된 값보다 더욱 크게 나타난 것을 분수 있었다. 즉, 동다짐시 발생하는 진동으로 각 구조물은 고유의 특성(응답 스펙트럼)으로 다른 형태의 진동으로 나타나므로 진동규제시 구조물의 특성을 고려한 분석이 필요하다.

4.2 Mayne에 의한 최대입자속도 추정

진동시 입자속도는 Mayne(1985)이 제안한 다음 식으로 대략적인 값을 추정해 볼 수 있다.⁽⁶⁾

$$V = 24.16 \left[\frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{-1.28} \quad (1)$$

여기서, V = 최대입자속도(mm/s)

$$D = \text{진동원으로 부터의 거리(m)}$$

$$E = \text{1회 타격당 다짐에너지 (t \cdot m)}$$

Mayne이 제안한 식에 본시험시공 현장의 여건을 적용시켜 보면 Table 10과 같은 추정값을 얻을 수 있다.

Table 10 Mayne식으로 추정된 입자의 최대진동속도

낙하높이20m일 경우 (Yard-1, Yard-3)		낙하높이15m일 경우 (Yard-2, Yard-4)	
진동원으로 부터의 거리(m)	최대벡터 속도(mm/s)	진동원으로 부터의 거리(m)	최대벡터 속도(mm/s)
20	20.155	20	16.814
40	8.416	40	7.021
60	5.049	60	4.212
80	3.514	80	2.931
100	2.653	100	2.213
120	2.108	120	1.759

위의 산출된 값들을 바탕으로 각각의 다짐에너지에 대하여 진동원으로부터의 거리와 최대 입자속도의 관계를 그려보면 다음과 같다.

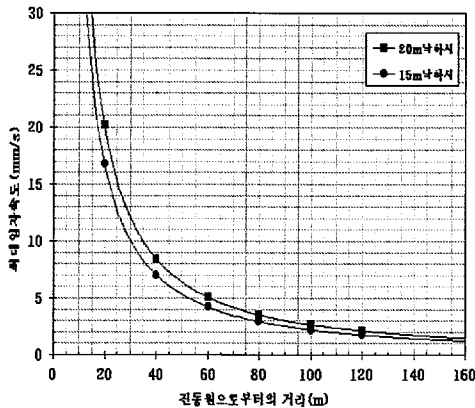


Fig. 6 Mayne 공식에 따른 이격거리별 최대입자속도

위의 그래프와 실제 진동원으로부터의 거리별로 측정된 실측값들을 비교하여 볼 때, 각각의 값들은 2~9mm/s 사이의 근소한 차이를 보이고 있다. 그러므로 실제로 진동속도를 측정하기 어려운 동다짐

시공현장에서는 동다짐시 발생하는 진동에 의한 인접구조물의 피해를 방지하기 위하여 최소한 확보하여야 하는 이격거리를 Mayne의 식을 이용하여 진동속도를 추정함으로써 얻을 수 있다고 볼 수 있다.

5. 결론

서울시 마포구 상암동에 위치한 난지도 매립지에서 실시한 시험동다짐 과정에서 다짐에너지 및 측정거리별 진동측정결과를 분석하여 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 최대 입자속도의 크기 동다짐시 발생하는 진동은 횡방향, 연직방향, 종방향 순으로 나타났다.
- (2) 복토제를 제거하거나, 원지반에 동다짐시 다짐에너지가 커짐에 따라 최대벡터속도는 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 동다짐에 의한 진동분석은 진동방향과 상관없이 최대입자속도 위주의 분석이 대부분이나, 진동 방향을 구분하여 피해정도를 분석하는 방안이 보다 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 동다짐시 실측치와 Mayne에 의한 산정치는 근소한 차이를 보이므로, 실측 자료가 없을 경우에는 Mayne의 식으로 입자의 진동속도를 산정하여 이격거리를 확보함으로써 인접구조물에 피해를 최소화할 수 있으리라고 판단된다.
- (5) 진동 실측치를 분석해 보면 15t의 낙하추를 이용하여 20m 높이에서 낙하시키는 동다짐 시공시 문화제는 최소 소요이격거리를 대략 70m 정도로 해야 적당하고, 주택 및 아파트단지의 경우는 대략 45m, 상가의 경우는 30m 정도로 하는 것이 진동에 의한 구조물 피해를 최소로 줄일 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 논문은 1999년~2000년 건설교통부 '98 연구개발사업(건설부지로서 폐기물 매립지반의 활용연구, 과제번호: R&D/98-0014)에 의한 연구성과의

일부임을 밝히며 지원해 주신 동아건설산업(주)에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Menard, L. and Broise, Y. "Theoretical and Practical aspects of dynamic consolidation", *Geotechnique*, Vol. 15, No. Mar, 1975. pp. 3~18
2. 김상규 "토질역학-이론과 응용", 정문사, 1998. 1. 10. pp. 420~424
3. Mayne, P.W "Ground Vibration during Dynamic Compaction", *Proceeding of a Symposium by the*

Geotechnical Engineering Div. in Conjunction with the ASCE Convention in Detroit, Michigan. pp. 247~265 1985

4. 한국지반공학회, "지반진동 영향평가", 한국지반공학회 지반진동위원회 학술발표집 제 2집, 1993. pp. 55~71.
5. 한국전력공사 "서천화력회사장 동다짐 공법 시험동다짐 보고서", 1998. pp. 28~32
6. Mayne, P.W., Jones, J. S and Dumas, J. C., "Ground Response to Dynamic Compaction", *Geotechnique*, Vol. 15, No.1 pp. 3~8. 1984

(접수일자 : 2000년 11월 14일)