

# 폐기물 매립장에서 동다짐공법의 적용성에 관한 연구

## Applicability of Dynamic Compact Pilot Test on Waste Landfill

천병식\*  
Chun, Byung-Sik

임병수\*\*  
Lim, Byoung-Soo

김명진\*\*\*  
Kim, Myung-Jin

### Abstract

In this study, the evaluation for utilization of waste landfill was performed by field test to use waste landfill as construction site(Nangido in Seoul). The site where dynamic compaction test was carried out was divided by 4 yards. Yard 1, 2 were not eliminated widening of cover soil and Yard 3, 4 were eliminated it. Dynamic Compaction Pilot Test was carried out by the 15ton heavy tamper with drop height of 20m in Yard 1, 3 and with drop height of 15m in Yard 2, 4. We evaluated the compaction ability, optimum compaction number and noise · vibration through field test, monitoring. To make use of waste landfill as a construction site, The dynamic compaction method is suitable for using in waste landfill as a construction site among the ground improvement methods.

### 1. 서론

본 연구에서는 폐기물 매립지의 건설부지로서의 적용성 평가를 위해 서울 난지도 부지 내에서 현장시험시공을 수행하였다. 시험시공 부지는 4개의 Yard로 나누었으며 Yard-1, 2는 복토재를 제거하지 않고 Yard-3, 4는 복토재를 제거하고 수행하였다. 동다짐시 에너지는 Yard-1, 3는 15 ton×20m, Yard-2, 4는 15ton×15m로 나누어 시험을 실시하였고 동다짐 효율, 최적타격 횟수, 현장 소음·진동영향을 파악하였다. 폐기물 매립지의 건설부지로서의 활용을 위한 동다짐 공법은 폐기물 매립지반에서 건설부지 활용을 위한 지반처리대책 공법 중 그 적용성이 매우 양호한 것으로 평가되었다.

### 2. 동다짐 공법의 지반개량원리

동다짐공법은 1969년 Louis Menard에 의하여 최초로 개발된 공법으로서 개량하고자 하는 지반에 10~200ton의 무거운 추를 10~40m 높이에서 낙하시키면 100~4,000 ton·m의 충격 에너지가 탄성파로 지중에 전달되고 수평방향의 인장응력이 발생하여 수직방향의 균열이 발생하고 폐기물

\* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원

\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정

이 압축되면서 다짐효과가 발생하여 밀도가 증가하며 즉시침하를 일으켜 매립지 자체의 강도가 증진된다.<sup>1)</sup>

진동에 의하여 개량하는 공법은 그림. 1 과 같이 입자와 입자사이의 마찰을 유발시켜 입자의 배열이 조밀하게 되도록 하여 입자와 입자의 접촉수가 증가되는 원리를 이용한다.

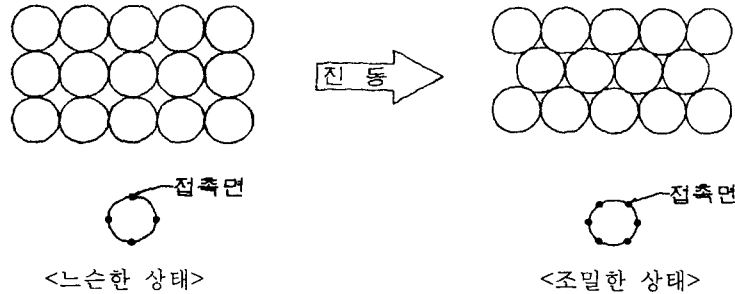


그림. 1 접촉면수증가에 의한 지반개량의 원리

즉, 진동에 의하여 흙 입자간의 상대변위를 유발시키고 이로 인하여 지반의 간극비를 감소시키는 원리를 이용한다. 그러나 조밀한 사질토의 경우 진동에 의한 흙 입자간의 상대변위는 그림. 1 의 역과정을 거쳐 오히려 느슨한 상태가 될 것이다. 따라서 진동에 의하여 지반이 개량되는가 느슨하게 되는가의 한계상태가 있을 수 있으며, 이 상태에서의 간극비를 한계 간극비(Critical void ratio, Casagrande, 1975)라 부른다. 동다짐의 대상지역은 일반적으로 느슨한 상태이므로 본 연구에서는 한계 간극비 이상인 느슨한 상태를 그 대상으로 하였다.

고 변형률(일반적으로 전단 변형률  $\gamma=1 \times 10^{-3}\%$  이상) 진동을 받은 느슨한 사질토 지반의 간극비가 감소하고 단위중량이 증가하는 현상은 Youd(1972), D'Appolonia and D'apponia(1967), Whitman and Ortigosa(1968) 등에 의해 실험적으로 확인된 바 있다.

간극비 감소에 의한 지반의 강성증가에 대하여 Hardin(1978)은 식 (1)를 제안하였으며, 이로 부터 동다짐에 의한 지반의 간극비 감소는 전단파와 압축파의 속도 및 강성증가의 한 원인이 될 수 있음을 알 수 있다.

$$G = A \cdot [\text{OCR}^K / F(e)] \cdot P_a \cdot 1^{-n} \cdot \sigma_o^n \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

여기서, A = 상수 ( $\approx 400 \sim 800$ ), OCR = 과압밀비, K = 상수,  $F(e) = 0.3 + 0.7 \cdot e^2$

$P_a$  = 대기압,  $n = \log G$  vs.  $\log \sigma_o$  관계도의 기울기,  $\sigma_o$  = 구속압력

그러나, Drenevich(1967), Drenevich and Richart(1970), Song and Stoloe(1986), Song et al.(1989)는 깨끗한 사질토의 경우 간극비의 실질적 감소 없이도 고 변형률 반복진동에 의하여 지반의 반복진동에 의하여 지반의 전단탄성계수가 증가함을 공진주 시험을 통하여 보고한 바 있다. Kim(1992)은 비틀림 단순전단 시험을 통하여 유사한 결과를 보고하였다. Petrakis and Dobry(1986)는 지반의 간극비와 흙입자간의 접촉수에 관한 통계적 연구로부터, 지반의 전단 탄성계수는 일반적인 시험으로부터 구한 값보다 최고 3배까지 커질 수 있음을 이론적으로 증명하였으며, 그 결과는 Drenevich(1967), Song and Stokoe(1986), Song et al.(1989) 등의 시험결과와 잘 일치한다.

송정락(1991), Petrakis and Dobry(1986)는 이러한 현상을 반복진동에 의하여 흙입자간의 접촉상태가 건전하게 되기 때문으로 풀이하고 있다. 즉 그림. 2와 같이 입자간에 큰 상대변위가 발생하지 않더라도 반복진동에 의하여 입자간의 약한 접촉부분은 파괴되고 강한 접촉부분만 남게 되어 접촉상태만 개선되더라도 간극비의 변화없이 지반의 전단탄성계수가 증가될 수 있다.

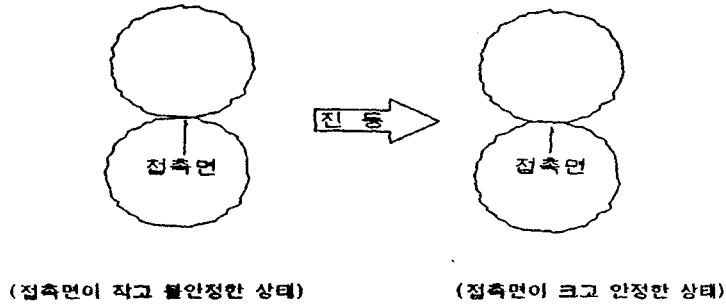


그림.2 접촉면적 증가에 의한 지반개량의 원리

그림. 2와 같은 기구(mechanism)에 의한 지반개량 효과는 세립토보다는 조립토에서 그 효과가 현저하게 나타나는데, 송정락(1991)은 이에 대하여 다음과 같이 보고하고 있다.

- 사질토일수록 cyclic sensitive 한계변형률(  $\gamma_{th} \approx 1 \times 10^{-2} \%$  )이 작고
- 점성토일수록 cyclic sensitive 한계변형률(  $\gamma_{th} \approx 1 \times 10^{-1} \%$  )이 크다.
- 따라서 동일한 전단변형률의 진동을 받더라도 사질토의 경우 입자간의 상대변위가 심하게 발생한다.<sup>2)</sup>

### 3. 지반특성 및 시험 계획

#### 3.1 지반특성

시험시공부지인 난지도 폐기물 매립장은 과거 15년(1978. 3~1993. 3) 동안 서울시에서 발생된 약 92,000천 $m^3$ 의 폐기물이 위생기반 시설 및 오염방지시설 설치 없이 매립된 대규모로서 성토(평균 90m)된 지역으로, 1, 2 매립지 사이의 부지(37m)로 이루어 졌다.<sup>3)</sup>

시험시공 폐기물 매립층의 두께는 30m정도로 내재된 쓰레기의 분포형태가 불규칙적이기는 하나 주로 표층부에는 쇠석들이 토사와 함께 다량 피복되어 있으며 상층부에는 콘크리트조각, 나무, 형걸조각, 비닐 및 유기물질 등이 매립되어 있고, 하층부에는 일반쓰레기(나무조각, 형걸조각, 비닐, 플라스틱 및 각종 유기물질 등)가 매립되어있고 부분적으로는 산업쓰레기도 매립되어 있는 것으로 조사되었으며, 표준관입시험결과 느슨~매우 조밀까지 분산정도가 매우 심한편이나 전반적으로는 심도증가에 따라 N치도 증가하는 경향으로서 평균치는 16 정도로 나타났으며 지하수위는 GL-6.19m(EL +31.00m)로 조사되었으며 공내재하시험 결과에 의한 변형계수는 24.5~136.5  $kg/cm^2$ 의 범위를 나타내었다. 그 밑으로 충적층(토사층, 사력층), 풍화대층(풍화토, 풍화암), 기반암층 등으로 구성되어 있다.

### 3.2 각 Yard 별 동다짐 Tamping Pattern

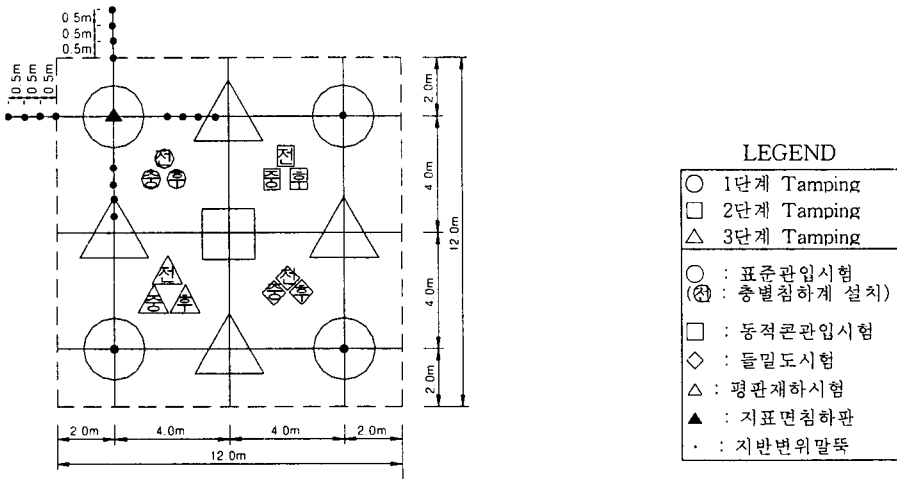


그림. 3. 시험 및 계측위치

### 3.3 구간별 시험방안

그림. 3의 시험계획에 의해 Yard-1, Yard-2 는 복토재를 제거하지 않고 동다짐을 실시하고, Yard-3, Yard-4는 복토재 0.5m를 제거하고 동다짐을 실시한다. <sup>4)</sup>

도표. 1 각 Yard 별 시험 계획

구 분	시험동다짐 부지정지형태	다짐에너지		Tamping 상세			비 고
		무 게	낙하 고	단 계	Grid	타격횟수	
Yard-1	복토재를 제거하지 않고 실시하는 경우	15 t	20m	1	8×8m	10회	
Yard-2				2	8×8m	10회	
				3	5.6×5.6m	5회	
				Ironing	2×2m	1회	
Yard-3	복토재를 0.5m 제거하고 실시하는 경우	15 t	20m	1	8×8m	10회	
Yard-4				2	8×8m	10회	
				3	5.6×5.6m	5회	
				Ironing	2×2m	1회	

## 4. 동다짐 결과분석 및 고찰

### 4.1 최적타격횟수 및 다짐효율 검토

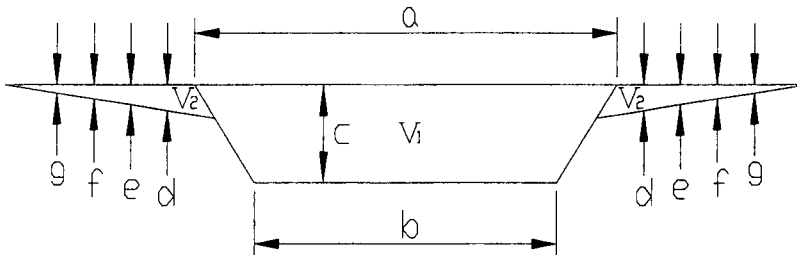


그림. 4 최적타격횟수에 의한 Crater의 형상

다짐의 영향이 미치는 범위에서 매립지반의 체적변형량을 구하기 위해서 지반변위말뚝을 이용하여 지반의 변형형태를 계측하여 식 (3)을 이용하여 다짐효율을 구하였다.

$$\text{다짐효율(Pr)} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \% \quad (3)$$

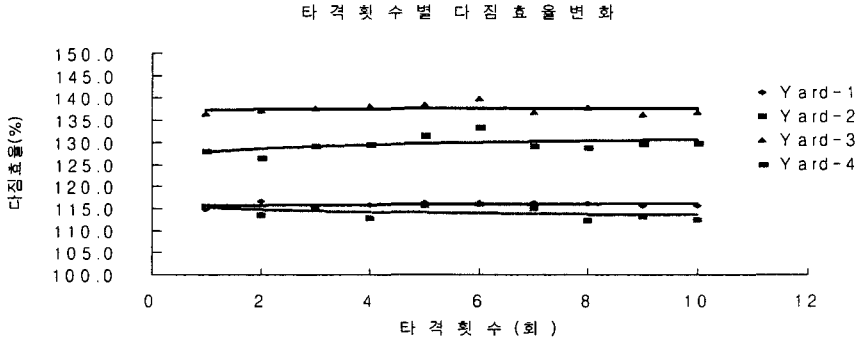


그림. 5 각 야드별 타격횟수에 따른 다짐효율변화

그림. 5 에 나타난 바와 같이 복토 제거전 상태인 Yard - 1, 2 에서의 다짐효율은 112~116(평균 114)% 정도이며 복토 제거(약 50cm)후 다짐효율은 126~139(평균 133)% 로 나타나 복토 제거후 다짐효율은 증가는 약 14% 정도 증가한 것으로 나타났다.

도표. 2 최적타격횟수에 의한 Crater 및 주변지반거동 계측결과

구 분	Yard - 1	Yard - 2	Yard - 3	Yard - 4
최적타격횟수	5~6 회	5~6 회	5~6 회	5~6 회
a (m)	3.36	3.21	2.82	3.01
b (m)	2.28	2.34	2.31	2.27
c (m)	0.726	0.682	0.497	0.475
d (m)	0.041	0.044	0.051	0.051
e (m)	0.026	0.021	0.026	0.023
f (m)	0.015	0.009	0.019	0.014
g (m)	0.009	0.003	0.013	0.011
A (m <sup>2</sup> )	0.051	0.046	0.074	0.062
V <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> )	-0.770	-0.675	-1.024	-0.887
V <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> )	4.701	4.226	2.567	2.651
다짐효율				
$\frac{v_1 - v_2}{v_1} \times 100(\%)$	116.379	115.973	139.891	133.459

각 Yard별 조건에 따른 적정타격횟수를 평가하기 위하여 타격횟수 증가에 따른 관입심도를 계측하여 타격횟수 & 관입심도의 그래프에서 접점에서의 타격횟수를 최적타격횟수로 하였다. 계측결과 복토재를 제거조건 및 다짐에너지에 구분없이 최적타격횟수는 6회 정도로 평가되었다.

## 4.2 침하특성

### (1) 층별침하계 측정결과

No.1 의 Settlement Target은 GL-3m 정도에 설치하였고 No.2는 GL-7m, No.3 는 GL-11m 정도에 설치하여 침하특성을 조사하였다.<sup>5)</sup>

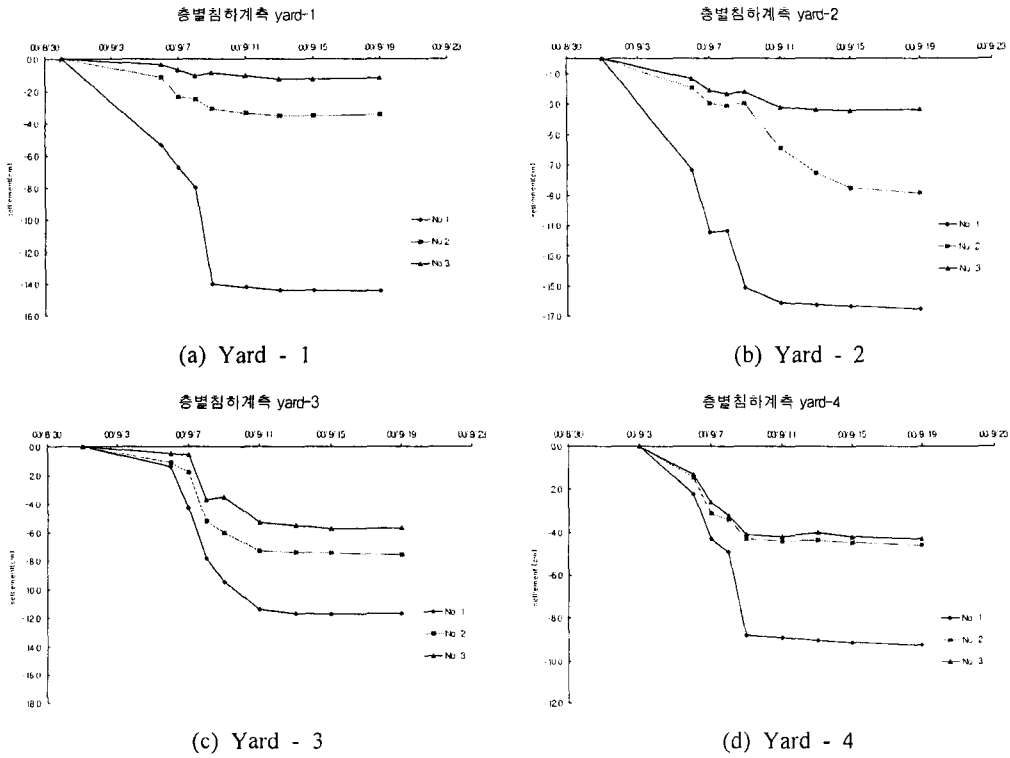


그림. 6 Yard별 층별침하량 분포도

도표. 2 층별침하 계측결과

구분	No.	층별침하계설치시 (m)	지반안정화후(m)	침하량(cm)	비고
Yard-1	No.1	-3.019	-3.163	14.40	
	No.2	-7.033	-7.068	3.45	
	No.3	-11.151	-11.162	1.15	
Yard-2	No.1	-3.034	-3.199	16.50	
	No.3	-11.036	-11.069	3.30	
Yard-3	No.1	-3.076	-3.193	11.65	
	No.2	-7.092	-7.168	7.55	
	No.3	-11.038	-11.095	5.70	
Yard-4	No.1	-3.084	-3.177	9.25	
	No.2	-7.037	-7.083	4.60	
	No.3	-11.023	-11.066	4.30	

그림. 6 및 도표. 2 나타난 바와 같이 층별침하량은 GL-3m에서 최대 16.5cm 로 나타났으며 층별침하특성은 복토재를 제거하지 않고 Yard-1, 2에서 크게 나타났으며 하층부(GL-7m, GL-11m)에서의 발생침하량은 복토재를 제거한 경우가 더욱 크게 발생한 것으로 나타나 깊은 심도까지 개량을 위해서는 복토재를 제거시에 적용성이 있는 것으로 나타났다. 또한 층별침하계 분석결과 다짐에 의한 영향범위는 Menard 식에서 평가한 7m 보다 깊은 11m 이상인 것으로 판단된다.

(2) 지표면 침하판 계측결과

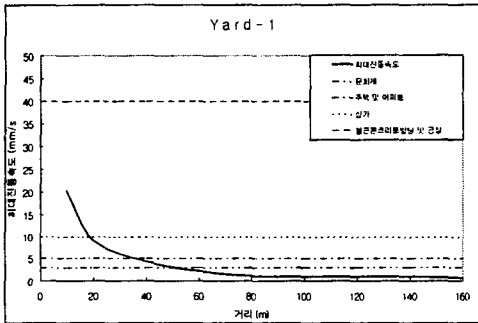
최종 타격후 지표면에서의 발생 침하량은 최대 1cm 정도이며 시간경과에 따라 수렴하는 것으로 나타나 입자 재배열을 통한 다소의 침하량 발생을 확인 할 수 있었다.

도표 3. 지표면침하판 계측결과

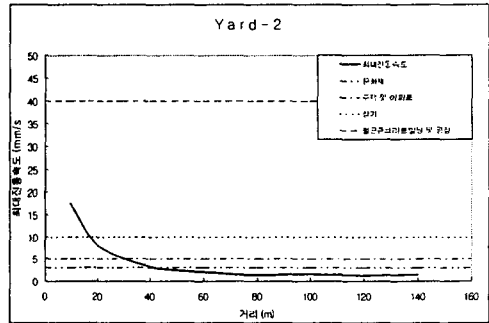
구 분	초기측정치(m)	최종측정치(m)	침하량(cm)	비 고
Yard 1	36.168	36.159	0.9	
Yard 2	36.328	36.322	0.6	
Yard 3	35.449	35.441	0.8	
Yard 4	35.527	35.520	0.7	

4.3 진동측정결과

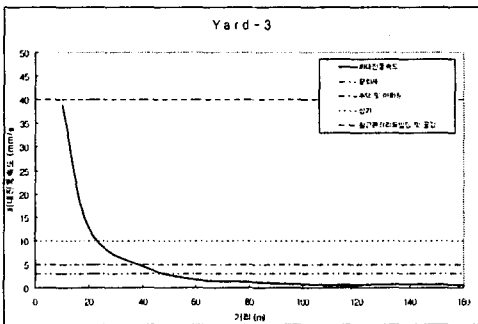
진동 측정 결과분석을 통하여 문화재가 있는 장소에서 동다짐 시공을 실시할 경우 소음·진동에 의한 주변구조물의 피해영향을 최소화하기 위한 최소 소요이격거리는 대략 70m정도, 주택 및 아파트단지의 경우는 대략 45m, 상가의 경우는 30m 정도로 평가되었다.



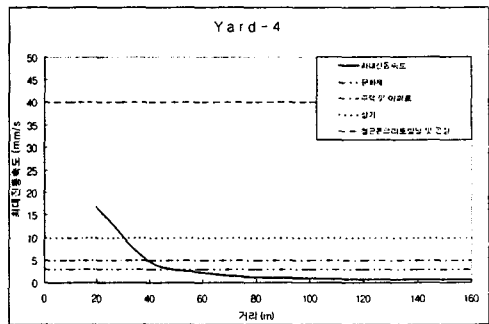
(a) Yard - 1



(b) Yard - 2



(c) Yard - 3



(d) Yard - 4

그림. 6 입자의 최대벡터속도와 거리의 관계

도표 4. 매립지반에서의 동다짐시공시 소요이격거리

Yard	Yard-1	Yard-2	Yard-3	Yard-4
구분	복토재를 제거하지 않은 경우		복토재를 0.5m 제거한 경우	
타격에너지	20m×15ton	15m×15ton	20m×15ton	15m×15ton
문화재 (2mm/s)	50~60m	40~50m	45~50m	50~55m
주택, APT (5mm/s)	35~40m	30~35m	35~40m	35~40m
상가 (10mm/s)	15~20m	15~20m	25~30m	30~35m

※( )는 최대진동허용속도를 의미함.

#### 4. 결론

쓰레기 매립지반의 건설부지로 활용을 위한 동다짐 시험결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 Yard 별 최적타격횟수는 6회 정도로 평가되었고 다짐효율은 115~140% 내외로 매우 양호한 것으로 나타났으며 Yard-3, Yard-4의 경우(복토재를 0.5m제거한 경우)가 다짐효율 126~139(평균 133)% 이였고 Yard-1, Yard-2의 경우(복토재를 제거하지 않은 경우)는 다짐효율 112~116%(평균 114)% 로서 다짐효율의 증가는 약 14% 로 복토재를 제거 할 경우 다짐효율이 증가하는 것으로 나타났다
- (2) 층별침하계 계측결과는 하층부(GL-7m, GL-11m)에서의 발생침하량은 복토재를 제거한 경우가 더욱 크게 발생한 것으로 나타나 깊은 심도까지 개량을 위해서는 복토재를 제거시에 적용성이 있는 것으로 나타났다. 또한 층별침하계 분석결과 다짐에 의한 영향범위는 Menard 식에서 평가한 7m 보다 깊은 11m 이상인 것으로 나타났으며 타격 완료후 시간경과에 따른 지표면 침하관 계측결과 지표면에서의 발생 침하량은 최대 1cm 수렴 상태를 보이고 있으며 이와 같은 침하는 지반의 안정화 과정 중에 발생하는 것으로 나타났다.
- (4) 진동 측정 해석 결과 동다짐 시공지역으로부터 최소 소요이격거리는 대략 70m정도, 주택 및 아파트단지의 경우는 45m, 상가의 경우는 30m 정도로 할 경우 진동에 의한 피해를 최소화할 수 있는 것으로 평가된다.
- (5) 상기 결과에서와 같이 개량심도 10m 까지의 동다짐 시공을 통한 개량효과는 침하, 밀도증대, 지지력 효과에서 크게 개선되었으며 진동시험을 통한 시공 적용시에도 이격거리에 따라 매우 적용성 있는 것으로 연구되었다. 따라서 폐기물 매립지반의 개량공법으로 동다짐 시공을 적용할 경우 시험시공 등을 통한 개량효과, 진동영향 대책계획 수립에 따라 시공이 이루어질 경우 그 적용성은 매우 양호한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부 한국건설기술연구원(1999) 건설부지로서의 폐기물 매립지반의 활용 연구보고서, pp. 207-240.
2. 한국지반공학회(1993), "지반진동 영향평가", 한국지반공학회 지반진동위원회 학술발표집 제 2집, pp. 83~110, 55~82
3. 건설교통부 한국건설기술연구원(1999), "건설부지로서의 폐기물 매립지반의 활용 연구보고서", pp. 207-240
4. 대전직할시종합건설본부(1998) 갑천우안도로건설공사(제1공구)동다짐시공 종합보고서, pp 10-38
5. 신승철, 이경수, 백승훈, 최성순(1993), "동다짐법에 의한 쓰레기층의 지반개량 시공사례", 대우엔지니어링기술보, 제10권, 제1호, 대우엔지니어링기술연구소, pp. 3-47