

폐기물 매립지반에 대한 동다짐공법 적용평가

Assessment of Dynamic Deep Compaction Applied to Waste Landfill

김영목* · 이상용** · 김만구*** · 신승철****

Kim, Young Muk · Lee, Sang Yong · Kim, Man Goo · Shin, Seung Cheol

Abstract

This article is a case study of the ground improvement project which was carried out for man-made landfill. The project area is located near to Kapchun, Teajon and composed of the municipal wastes dumped, demolished building debris, coal ash and industrial waste made between 1983 and 1989. The DDC(dynamic deep compaction) based on the results of the test compaction at two representative locations was carried out from March 16, 1992 to Oct. 25, 1992. Field measurements and laboratory tests were carried out for ground improvement assessment and quality control for the DDC(dynamic deep compaction) work. From the results of field measurements and laboratory tests, it was found that the DDC work was successful: waste landfill was compressed considerably ($\approx 15\%$ of full depth); and the strength was increased satisfactorily ($\approx 100\%$ of original penetration resistance). Also, it is expected that the results of this work could be a guide to the future DDC work with the similar ground conditions, i.e. man-made landfills.

요 지

본 고는 폐기물 매립지반의 지반개량을 위하여 1992년 3월 16일부터 1992년 10월 25일까지 수행된 동다짐공사 결과에 대한 연구사례이며, 개량대상지역은 대전시 갑천변에 위치하는 폐기물 매립부지로 1983년부터 1989년까지 주로 도시생활 쓰레기, 연탄재, 구조물 해체 잔해물 및 일부 산업폐기물로 매립되어 형성된 지역이다. 동다짐 공사는 2개 지점에서 시험동다짐을 시행하여 그 결과를 기준으로 수행되었으며, 개량효과 분석 및 품질관리를 위하여 각종 현장확인 시험 및 지반거동 계측을 수행하였다. 또한 동다짐시 인접된 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 진동측정을 시행하였다. 제반 현장시험 및 계측자료 분석결과 전체적으로 지반의 강도증가 및 압축효과가 양호한 것으로 확인되어 본 지역의 폐기물 매립지반에 대한 동다짐공법 적용은 효과적인 것으로 나타났으며, 향후 본 지역과 유사한 폐기물 매립지반에 대한 동다짐공법 적용시 참고가 될 수 있을 것으로 기대된다.

* 정회원 · 대전산업대학교 토목공학과 조교수

** 정회원 · 대전직할시 종합건설본부 기술2과 과장

*** 정회원 · 대전직할시 종합건설본부 기술2과 계장

**** (주)대우엔지니어링 토목사업본부 지반공학부 부장

또는 약액고화공법으로 노상을 고화시켜 폐기물의 잔유유기물 분해로 인한 장기적인 침하발생시 부동침하를 최대한 방지하는 방안이 채택되었다.⁽³⁾

동다짐공법(Dynamic Deep Compaction)은 무거운 추를 상당 높이에서 자유낙하시켜 발생하는 충격에너지에 의해 지반을 강제다짐하여 밀도를 증가시켜 지반을 개량하는 공법으로 1970년 불란서의 Louis Menard에 의해 체계적으로 소개되었다.⁽¹²⁾

폐기물 매립지반에 대한 동다짐공법 적용은 외국에서는 시공사례가 보고된 적이 있으나^(5,7,10,15) 국내에서의 본격적인 시공사례는 보고되지 않고 있어 본 사례가 처음으로 적용된 것으로 판단되며, 추후 유사한 경우에 참고가 될 수 있도록 폐기물 매립지반에 대한 동다짐공사 결과를 정리하였다.

본 공사를 성공적으로 수행하기 위해 폐기물 매립지반의 대표적인 지점 2개소를 선정하여 시험동다짐을 시행하였으며, 그 결과를 분석하여 동다짐 적용의 타당성, 시공경제성 등을 추적하고, 동다짐 적용기준 및 최적시공을 위한 제반사항을 결정, 이를 기준으로 동다짐 공사를 수행하였다. 이를 위해 시험동다짐 및 동다짐공사시 현장확인 시험 및 지반 거동 측정을 시행하여 개량효과 분석 및 품질관리 등을 수행하였다.

2. 지반 조건 및 동다짐 계획

2.1 지반 조건

본 지역의 폐기물 매립지반은 그림 2와 같이 중앙부근(STA.4+600~STA.4+780)의 구릉지를 중심으로 하여 A, B 2구간으로 구분되고 있다. A구간은

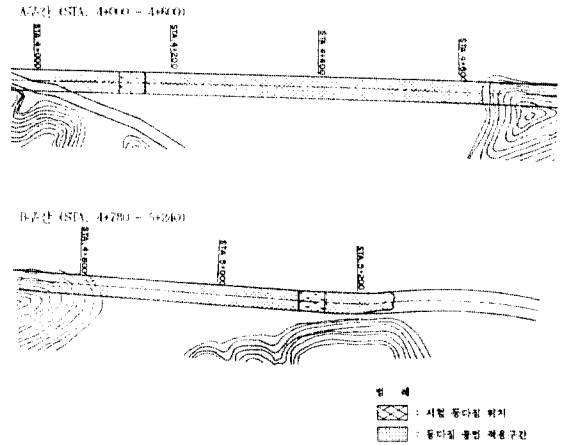


그림 2. 동다짐공법 적용구간 및 시험동다짐 위치도
A구간 (STA. 4+000~4+600)
B구간 (STA. 4+780~5+240)

89년 7월에 매립한 지역으로 STA.4+000에서 STA.4+600까지 약 600 m 구간으로 약 6.4~6.8 m 정도 두께의 폐기물에 평균 4.0~4.5 m의 매립토에 의해 비교적 균질한 상재하중을 받고 있는 지역이다. B구간은 83년도에 약 3.7~5.0 m 정도 두께로 매립한 지역으로 STA.4+780에서 STA.5+240까지 약 460 m 구간이다. B구간은 약 0.3~2.2 m 두께의 매립 표토층이 폐기물 매립지반 위에 위치하고 있는데, A구간과는 달리 위치에 따라 그 두께가 일정하지 않은 상태이다. 대상 부지의 개략적인 지반상태는 구간별로 표 1과 같다.⁽³⁾ 구간에 따라 지반조건이 상이하여 A구간은 STA.4+360을 기준으로 A-1과 A-2로 나누었고, B구간은 STA.4+980을 기준으로

표 1. 동다짐지역의 지반상태

구분	매립토층		폐기물층		충적층		풍화암	
	층두께	구성상태	층두께	구성상태	층두께	구성상태	분포심도	구성상태
A 구간	4.0~4.5 m	실트질모래, 자갈	6.4~6.8 m	비닐, 형질, 연탄재 및 각종 산업쓰레기	2.8~3.5 m	모래질자갈	14~14.3 m	실트질모래
B 구간	0.3~2.2 m	실트질모래, 자갈	3.7~5.0 m	비닐, 형질, 연탄재 및 각종 산업쓰레기	4.3 m 이상	모래질자갈	8.5 m 이상	실트질모래

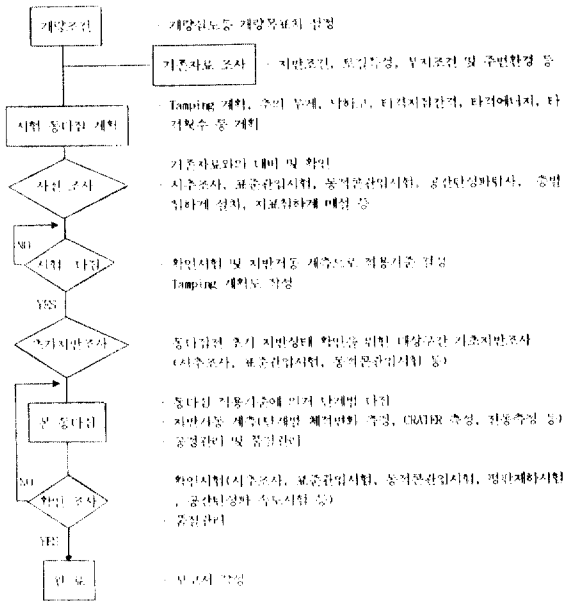


그림 3. 동다짐공사 흐름도

B-1과 B-2로 공사구간을 세분하였다.

2.2 동다짐 계획

본지역의 동다짐 공법을 적용하기 위한 전체 계획 및 관리 및 품질관리를 효과적으로 수행하기 위하여 그림 3에 표시한 바와 같이 공사를 시행하였다.

3. 시험 동다짐

동다짐공사 계획 및 설계기준을 설정하기 위하여 동다짐 대상지역중 각 구간별로 대표적인 지점을

선정하여 시험동다짐을 시행하였다(그림 2 참조). 시험동다짐시 시행한 지반저공 계측 및 현장확인 시험 결과로부터 개량심도 및 타격에너지, 각지점 및 단계별 타격횟수, 타격지점의 간격, 개량효과 등을 분석하였다.

시험동다짐에 대해서는 김영복 등⁽¹⁾에 의하여 발표된 바가 있으므로 본 고에서는 간략하게 결과를 요약하였다.

3.1 시험 동다짐 계획

시험 동다짐은 지반상태 및 현장여건을 감안하여 각 구간별로 표 2와 같이 계획하였으며, 시험동다짐 개요는 그림 4에 표시한 바와 같다.

3.2 타격에너지와 개량심도

동다짐에 의한 개량심도 및 개량효과에 미치는 영향은 흙의 종류, 지층의 구조 및 구성상태, 타격 에너지의 크기, 타격간격 및 타격횟수, 정치기간, 추의 특성 등 다양한 요소가 있다. 타격에너지의 크기에 따른 개량심도의 관계에 대해서는 Menard와 Broise⁽²⁾는 추(pounder)의 중량 W(ton), 낙하고 H(m)와 개량심도 D(m)는 다음과 같은 관계가 있음을 제안하였다.

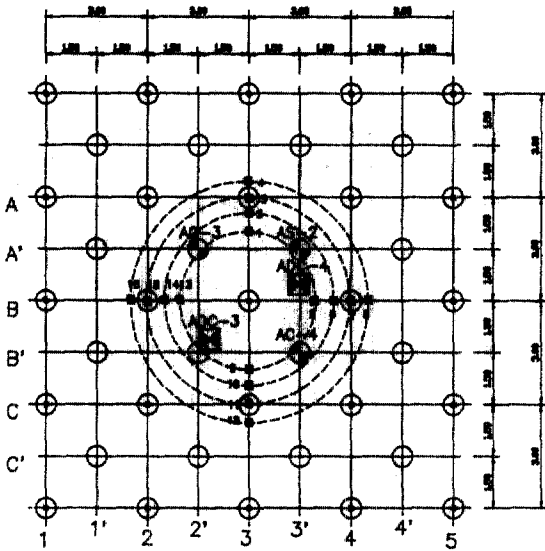
$$WH > D^2 \quad (1)$$

Mitchell⁽³⁾은 실트질흙, 사질토 및 잡석에 이르기까지 여러 지반을 대상으로 연구한 사례를 발표하였으며, Leonards 등⁽⁶⁾이 제안한 바와 같이 일반적으로 식 (2)가 타당함을 밝힌 바 있다.

$$D = 1/2 \sqrt{W \cdot H} \quad (2)$$

표 2. 시험동다짐 계획

구간	구분	시험동다짐 부지정지 형태	타격에너지(E)	타격지점 간격	타격횟수
A 구간	A-a	폐기물층 위 1.0 m 복토하고 실시하는 경우	216 ton-m	3m×3m 격자망	1단계: 10회 2단계: 10회 3단계: 5회
	A-b	폐기물층 상단에서 실시하는 경우	"	"	"
B 구간	B-a	폐기물층 위 1.0 m 복토하고 실시하는 경우	"	"	"
	B-b	폐기물층 상단에서 실시하는 경우	"	"	"



범례

- ⊙ Tamping (1차, 3차)
- Tamping (2차)
- ⊕ 공간탄성과 속도 측정공
 - 층별 침하계 매설공
- ⊠ 동적관입시험
- 지반거동측정말뚝 (1-16)

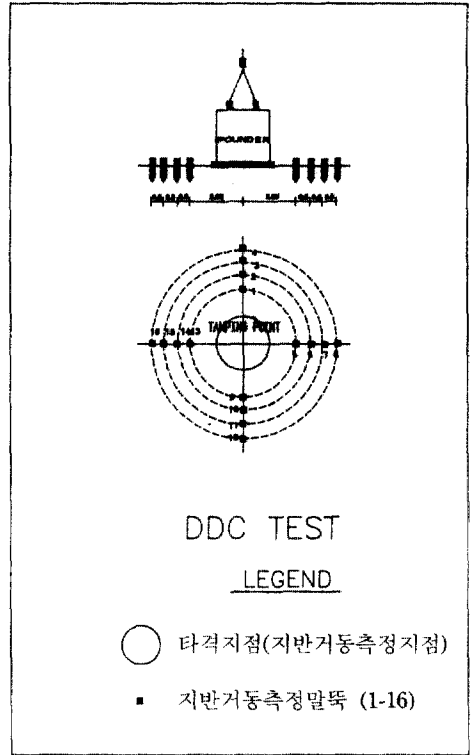


그림 4. 시험동다짐 계획도

본 사례에서는 폐기물 매립층의 두께가 약 3.7~6.8m 이므로 개량심도를 7m 이상을 목표로 하였다. 타격에너지는 제반여건을 감안하여 다음과 같은 조건으로 하였다.

추의 중량 $W=12\text{ ton}$

추의 크기 $\Phi=1.5\text{ m}$

추의 낙하고 $H=18\text{ m}$

사용 크레인 : 100 ton

이 때 개량심도는 다음과 같이 추정하였다.

$$D = \alpha \sqrt{W \cdot H} = 1/2 \sqrt{216} = 7.5\text{ m} \quad (3)$$

여기서 개량심도 계수 α 는 문헌^(2,4,6,8,10,13) 및 경험을 토대로 식 (2)와 같이 1/2로 가정하였다. 시험 동다짐 및 동다짐 시공시 이러한 추정이 타당한가를 확인하기 위해 표준관입시험, 동적관입시험, 층별침하계 측정결과 등 현장확인 시험결과를 분석하였으며, 그 결과를 Mitchell⁽¹³⁾의 그래프상에 도시한 결과 그림 5와 같다. α 의 크기는 약 0.4~0.7로서 본 연구

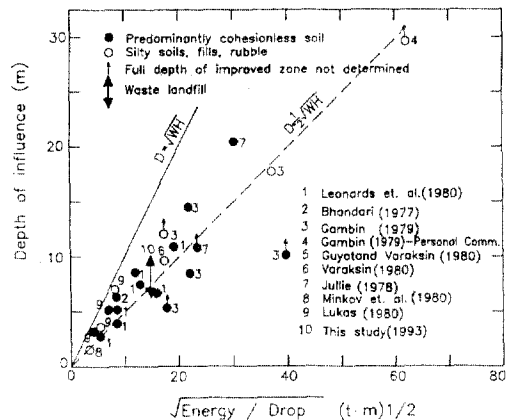


그림 5. 타격에너지와 개량심도와의 관계 (본 대상지역과 기타사례와의 비교)

사례와 같은 폐기물지반의 경우에도 $\alpha=0.5$ 로 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3.3 타격횟수

타격 횟수에 따른 다짐효과를 분석하기 위해 동일 타격지점에 가해지는 타격에너지에 따른 추의 관입 깊이를 측정하였다. 시험동다짐 결과 나타난 타격 횟수와 추의 관입심도와의 관계로부터 추의 관입에 의한 웅덩이의(crater)의 체적변화가 한계점에 도달한, 즉 한계 체적변화 상태를 판단하기 위해 그림 6과 같이 타격횟수에 따른 타격효율(effectiveness of impact)을 도시하였다. 이 때 한계체적 변화시의 타격은 시험 동다짐결과 1단계 및 2단계 타격시에는 10회, 3단계 타격시에는 7회로 하였다.⁽³⁾ 여기서 타격효율이란 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{타격효율}(e) = \frac{D_c - D_i}{D_c} \times 100 (\%) \quad (4)$$

여기서 D_c : 추의 타격에 의한 한계체적변화시의 관입깊이

D_i : 임의 타격횟수시의 추의 관입깊이

최적타격횟수는 그림 6으로부터 1단계 및 2단계 타격횟수는 7-8회, 3단계 다짐은 5회로 결정하였다.

3.4 타격지점 간격

타격지점간격은 타격시 주변의 용기를 최소화시키고 개량효율이 높도록 결정되어야 하는데 이에 대해서는 일반적으로 경험에 의해 개량심도(D)와 같은 간격 이내에서 현장여건을 감안하여 결정하고 있다. 이에 따르면 본 부지에서는 대략 3-7m 정도가 적절한 간격이 될 것이나, 폐기물층의 특성규명이 어렵고 매립폐기물이 대단히 비균질하며, 특히 B구간의 경우에는 관입전단(punching shear) 현상이 발생한 점⁽³⁾을 감안하여 대상지역을 전반적으로 압축하는 개념으로 3m×3m 격자로 결정하였다.

3.5 복토의 효과

동다짐시 폐기물층 위에 있는 복토의 효과에 대해서는 웅덩이의 크기, 주변지반의 용기정도, 타격효과, 층별침하계의 계측결과 등을 기준으로 하여 판단하였다. 층별침하계의 계측결과에 의하면 A-a의 경우 폐기물 표면에서부터 460 cm 깊이에서 18.1 cm의 침하가 계측되었으며, A-b의 경우에는 480 cm 깊이에서 4.6 cm가 측정되었다. 그러나 B구

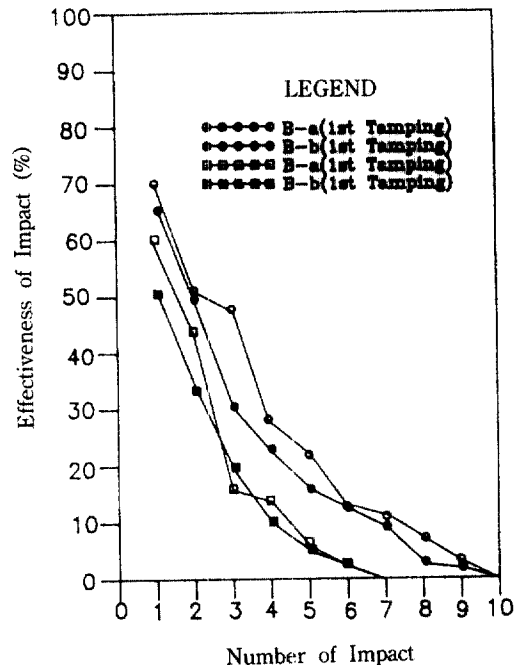
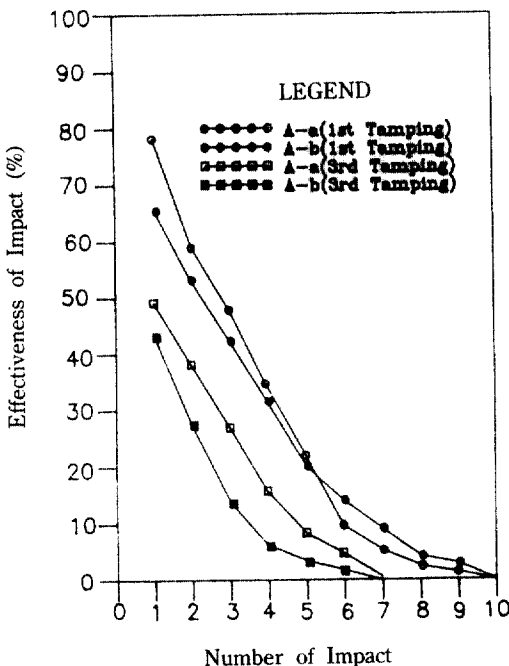


그림 6. 타격횟수와 타격효율과의 관계

간의 경우에는 1 cm 이하로 관측되었는데, 이는 관입전단 때문으로 보인다.

Crater의 주변거동 및 다짐효과를 판단하기 위해 다짐효율을 구하였다. 여기서 다짐효율이란 다음과 같이 정의된다.

$$\text{다짐효율 (P)} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 (\%) \quad (5)$$

여기서 V_1 : crater의 크기

V_2 : crater주변 용기량

표 3 및 기타 계측결과에 의하면 A구간의 경우 복토를 행한 A-a가 복토를 하지 않은 A-b보다 동다짐 효과가 큰 것으로 판단되나, B구간의 경우에는 복토를 하지 않은 B-b가 오히려 다짐효과가 큰 것처럼 보였다. B구간의 경우 앞에서 언급한 것처럼 관입전단으로 인해 지반이 오히려 crater를 중심으로 침하되는 형태로 나타나기 때문으로 보인다.

3.6 동다짐 적용 기준

시험동다짐 결과를 분석, 검토하여 본 지역의 동

다짐 적용기준을 표 4와 같이 결정하였다.

4. 동다짐 공사 및 개량효과 분석

4.1 동다짐 시행기준

동다짐 공사시 적용된 시행기준은 시험동다짐에 의해 결정된 적용기준을 토대로 지반상태, 폐기물층의 분포심도 및 층두께, 매립시기 등 현장여건에 따라 시공성, 경제성 및 안전성 등을 고려하여 각 구간별로 적용기준을 부분적으로 변경하여 시행하였다. 각 구간별로 적용된 동다짐 시행기준은 표 5와 같다.

4.2 개량효과 분석

동다짐 공사시 각 대상구간별로 지반 개량상태를 확인, 분석하여 개량효과를 극대화하고 동다짐 적용기준을 현장여건에 따라 보완하기 위하여 동다짐 전, 후로 각종 현장확인 시험 및 지반거동 계측을 시행하였다.

4.2.1 표준관입시험

동다짐 시공 후 지반의 강도증가를 확인하기 위

표 3. 시험 동다짐 결과

구분	다짐효율(%)	관입심도(cm)	동적관입 저항값 증가율(%)	공간탄성과 속도 증가율(%)	
				P파	S파
A-a	98.2	122.3	132-200	25.5-28.4	23.6-34.8
A-b	98.8	113.3	106-186	23.0-30.7	20.8-27.8
B-a	101.1	162.4	200-500	19.5-25.8	19.4-29.1
B-b	100.6	237.6	175-200	23.6-31.3	30.0-37.9

표 4. 동다짐 적용 기준

구간	타격에너지 (t·m/blow)	타격지점 간격	단계별 타격횟수	부지정지 형태	비고
A 구간	216	3m×3m 격자망	1단계: 8회 2단계: 8회 3단계: 5회	폐기물층+ 1.5m 복토	1 단계 및 2 단계 타격 횟수는 현장조건에 따라 조정 시행
B 구간	216	"	1단계: 7회 2단계: 7회 3단계: 5회	폐기물층+ 2.0~2.5m 복토	부지 정지 형태는 폐기물층 분포심도에 따라 지역별로 조정시행

표 5. 동다짐 시행 기준

구간	위치	타격에너지 지(t-m)	타격지점 간격(m)	단계별 타격횟수		부지 정지 형태		비고
				계획	시행	계획	시행	
A 구간	STA.4±000	216	3m×3m 격자망	1단계: 8회	동 일	폐기물층+	폐기물층+	약액고화 처리구간
	2단계: 8회			1.5m 복토				
3단계: 5회								
B 구간	STA.4±820	216	3m×3m 격자망	1단계: 7회	1단계: 7회 2단계: 7회 3단계 1차 3회 3단계 2차 3회	폐기물층+	폐기물층+	약액고화 처리구간
	2단계: 7회			2.0m~2.5m 복토				
	3단계: 5회							
	STA.4±780	216	3m×3m 격자망	1단계: 7회	1단계: 7회 2단계: 7회 3단계 1차 3회 3단계 2차 3회	폐기물층+	폐기물층+	동다짐후 층다짐 실시구간
STA.4+820	2단계: 7회			2.0m~2.5m 복토				
STA.4±920	3단계: 5회							
STA.5+240								

표 6. 표준관입저항값(N) 결과

구 간	동다짐 전	동다짐 후	변화율(%)
A 구간	A-1	4~24(14)	10~27(18) (133)
	A-2	5~30(13)	14~47(24) (185)
B 구간	B-1	3~34(10)	15~37(22) (220)
	B-2	3~25(14)	12~29(17) (121)

* 관입저항값 (N)는 폐기물층에서의 값임

* ()는 평균값

하여 18개 지점에서 동다짐 전, 후로 시추조사와 병행하여 표준관입시험을 시행하였다. 관입저항값(N) 분석결과는 표 6에 정리한 바와 같으며, 심도별 관입저항값(N) 분포도는 그림 7에 나타난 바와 같다.

표준관입시험 분석결과에 의하면 동다짐 시행 후의 관입저항 값이 시행 전에 비해 20~120% 정도로 증가된 것으로 나타났으며, 동다짐 후의 관입저항 값이 동다짐 시행 전체구간에서 10회/30cm 이상으로 나타나고 있어 전반적으로 지반이 개량된 것으로 나타났다.

그림 7을 보면 동다짐 전후의 N 값의 변화가 부분적으로 불규칙함을 보이고 있는데, 이는 폐기물층에 불규칙하게 함유되어 있는 자갈, 호박돌, 구조

물 해체 잔해물, 비닐 등의 영향 때문인 것으로 판단되며, 개량효과 분석에서 제외시켰다.

4.2.2 동적콘관입시험

동다짐 시공 후의 지반 강도증가를 확인하기 위하여 동다짐 전, 후로 16개 지점에서 동적콘관입시험을 시행하였다. 동적콘관입시험은 직경 51mm, 콘각도 60°인 콘을 사용하여 63.5kg 해머를 75cm 높이에서 자유낙하시켜 15cm 관입된 콘의 관입저항값(N_d)을 구하였다. 동적콘관입시험 분석결과는 표 7과 같고 심도별 콘관입저항값(N_d) 분포도는 그림 8에 도시된 바와 같다. 분석결과는 표 7에 나타난 바와 같이 동다짐 후의 콘관입저항값이 55~230% 정도로 증가된 것으로 나타났다. 동적콘관입시험 결과 콘관입저항값도 불규칙한 변화를 보이는 지점이 있으나 전반적으로 동다짐 전후의 변화성향이 표준관입시험 결과보다는 비교적 일정하고, 또한 연속적인 관입저항을 측정하기 때문에 본 지역과 같은 폐기물층에서는 표준관입시험보다 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.

4.2.3 평판재하시험

평판재하시험도 동다짐 시공 후 지반의 지지력 및 침하량을 확인하기 위하여 시행하였으며 시험결과를 요약하면 표 8과 같다.

표 8에서 보는 바와 같이 지반의 허용지지력은

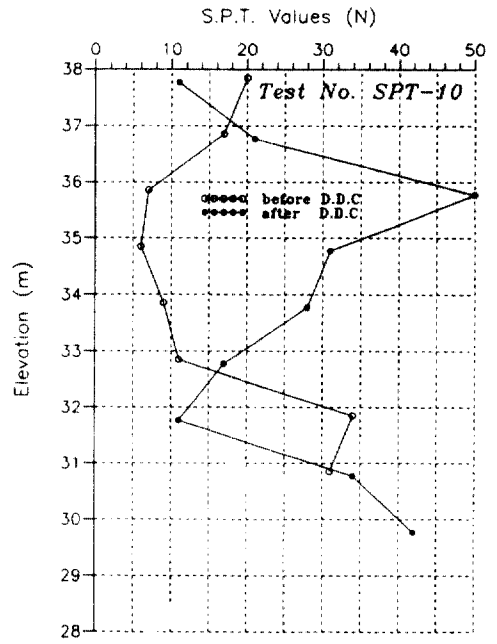
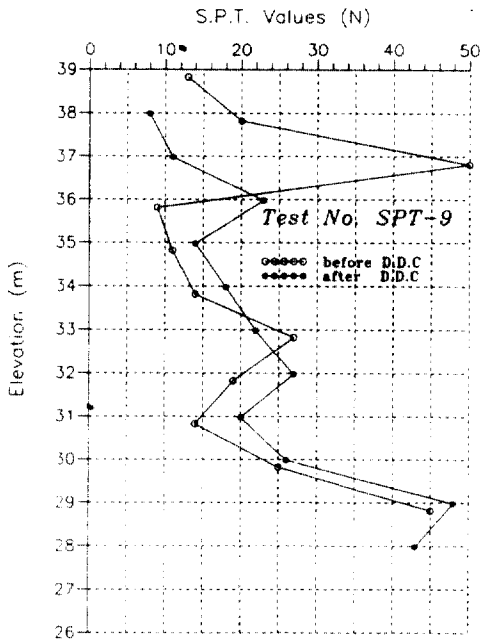


그림 7. 심도별 표준관입저항값(N) 분포도

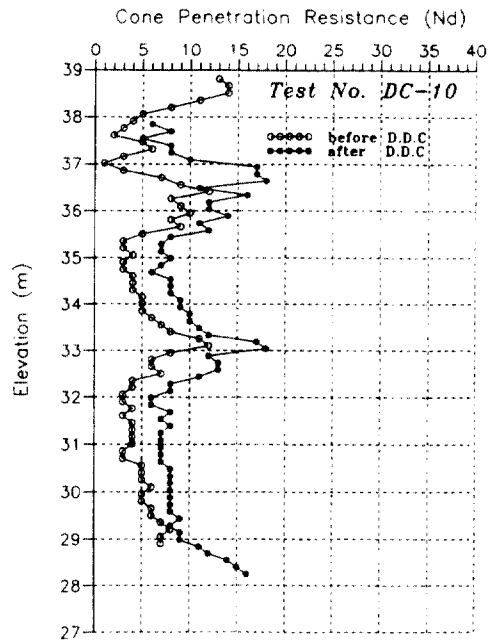
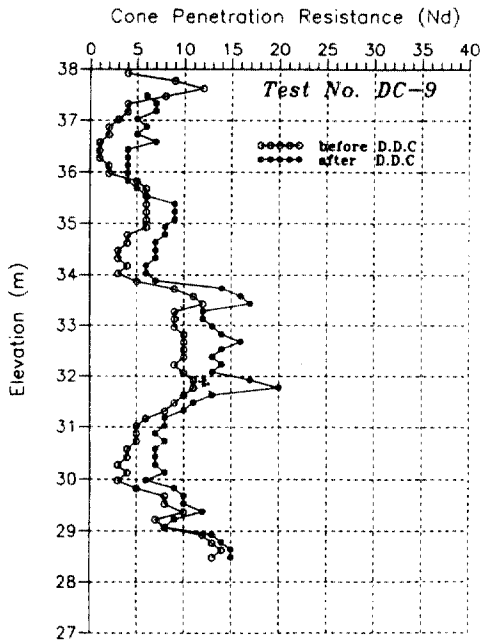


그림 8. 심도별 동적관입저항값(Nd) 분포도

10~17.5 t/m² 정도이고 침하량은 3.6~10.3 mm 정도로 나타나고 있어 도로 기초지반으로 활용하기에 충분한 것으로 판단되며, 동다짐에 의한 지반개량 효과는 양호한 것으로 나타났다.

4.2.4 체적변화 측정

동다짐 시공 전, 후의 폐기물층의 변화상태 및 지반의 압축상태를 파악하기 위하여 시추조사 및 단계별 체적변화 측정을 시행하였다. 시추조사는 폐기물층 및 각 지층의 분포심도 및 층후의 변화를 확인하기 위하여 18개 지점에서 동다짐 전, 후로 시행되었으며, 단계별 체적변화 측정은 동다짐 시공 각 단계별로 동다짐에 의해 지반이 압축되어 일어난 체적변화 상태를 측정하기 위하여 시행되었다. 단

표 7. 동적콘관입시험(N₆₀) 결과

구 간		동다짐 전	동다짐 후	변화율(%)
A 구간	A-1	2~25(11)	6~31(17)	(155)
	A-2	2~29(7)	6~23(11)	(157)
B 구간	B-1	1~22(5)	6~22(9)	(180)
	B-2	1~ 9(3)	6~21(10)	(333)

* 동적콘관입 저항값 (N₆₀)는 폐기물층에서의 값임

* ()는 평균값

계별 체적변화 측정은 동다짐 전과 후의 지반고의 변화상태를 측정하는 것으로 동다짐 전의 부지정지고를 기준으로 각 단계별로 동다짐 시공이 완료된 후 부지 정지를 실시하고 지반고를 측량하여 체적 변화상태를 파악하였다. 이 때 지반고 측정은 전지역을 부지의 중앙선을 중심으로 좌측 및 우측단부 등 일정한 간격으로 격자형으로 측정지점을 선정한 후 행하였다.

측정결과 동다짐 전, 후의 폐기물층 및 지반의 체적변화 상태를 비교, 정리하면 표 9와 같으며, 동다짐 전, 후의 지층 변화상태 및 동다짐 단계별 지반고 변화상태는 그림 9에 도시한 바와 같다. 분석결과에 의하면 동다짐 전, 후의 체적변화는 전체적인 지반은 0.5~1.5 m 정도, 폐기물층은 0.5~1.3 m 정도 압축된 것으로 나타났다. 이는 폐기물층의 두께가 약 3.0~7.0 m 임을 고려해 볼 때 15~20% 정도 압축효과가 있는 것이다.

4.3 진동측정

동다짐시 충격에너지에 의하여 발생하는 진동파가 인접구조물이나 구조물내의 시설물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동다짐현장에 바로 인접해 있는 가건물 형태의 대양인슈 건물 부근과 동다짐 현장에서 60~70 m 떨어진 곳에 위치한 쓰레기 소각장

표 8. 평판재하시험 결과

구간	위치	재하판 직경(cm)	항복하중(t/m ²)	*허용지 지력(t/m ²)	*침하량 (mm)	비 고
A 구간	STA.4+410	40	35.05	17.50	9.5	3단계 다짐 후 폐기물층 상부
	STA.4+520	40	30.25	15.13	4.4	"
	STA.4+240	40	20.70	10.35	7.2	"
	STA.4+160	40	27.07	13.54	7.7	"
	STA.4+060	40	19.90	9.95	10.3	"
B 구간	STA.5+125	35	29.94	12.47	3.6	1, 2단계 다짐 후 폐기물층 상부
	STA.5+060	35	28.66	14.33	5.8	1, 2단계 다짐 후 폐기물층 상부
	STA.4+930	40	29.46	14.73	7.5	3단계 1차 다짐 후 폐기물층 상부

* 1. 허용지 지력 = 항복하중의 1/2

2. 침하량 : 허용지 지력일 때 재하판의 침하량

표 9. 체적변화 측정 결과

구 간	위치	부지정지고(m)			폐기물층 두께(m)			동다짐 적용기준		
		다짐 전	다짐 후	변화량	다짐 전	다짐 후	변화량			
A 구간	A-1	STA.4+000	37.157	36.768	(0.453)	3.4	3.4	1단계: 8회 2단계: 8회 3단계: 5회		
		~	~	~		~	~		(0.6)	
	STA.4+360	39.227	38.780	(38.452)	(37.999)	7.6	6.3		(5.5)	(4.9)
	~	~	~	~	~	~	~	~		
A-2	STA.4+360	37.940	36.723	(0.758)	2.9	2.6	"			
	~	~	~		~	~		(0.5)		
STA.4+600	38.729	37.867	(38.218)	(37.452)	6.7	6.3		(5.1)	(4.6)	
~	~	~	~	~	~	~		~		
B 구간	B-1	STA.4+780	36.941	35.724	(1.149)	2.6	2.2	1단계: 7회 2단계: 7회 3단계 1차: 3회 3단계 2차: 3회		
		~	~	~		~	~		(0.5)	
	STA.4+980	37.761	36.832	(37.578)	(36.429)	5.0	4.3		(3.7)	(3.2)
	~	~	~	~	~	~	~		~	
B-2	STA.4+980	36.326	34.965	(1.519)	2.2	1.5	"			
	~	~	~		~	~		(1.3)		
STA.5+240	37.708	35.475	(36.772)	(35.253)	5.4	3.3		(4.0)	(2.7)	
~	~	~	~	~	~	~		~		

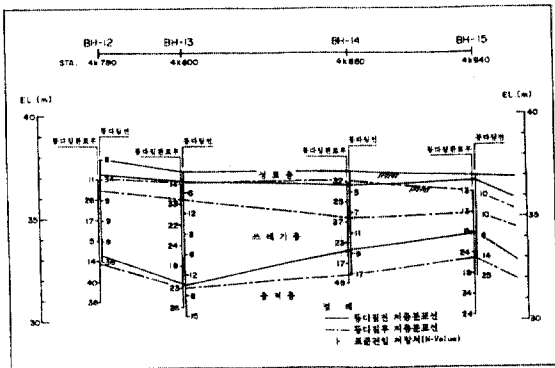


그림 9. 동다짐 전, 후의 지층단면도

부근의 2개 지역에 대해 동다짐시 발생하는 진동을 측정하여 그 영향을 분석하였다.

4.3.1 다짐에너지 및 진동측정장비

진동 측정시 사용된 다짐에너지는 동다짐공사시 사용된 에너지 E=216t·m 이며 진동 측정장비는 캐나다 INSTANTEL 사의 Blastmate DS-477을 사

용하였다.

4.3.2 측정방법 및 결과

타격지점으로부터의 거리가 10 m 이내인 경우에는 지반으로 전파되는 진동에너지가 클 것으로 예상하여 Trigger Level(Particle Velocity)을 5 mm/s로 하고 그 이상의 거리에서는 Trigger Level을 1 mm/s로 하였으며, 모든 경우에 Record Time을 1 sec로 Setting 하였다.

동다짐 1회 실시 때마다 3방향(vertical, longitudinal, transverse)의 진동을 측정하고 이 중 최대값을 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV)로 결정하였다. 측정된 최대입자속도(PPV)와 거리 및 진동수는 표 10 및 표 11에 나타난 바와 같으며, 이 측정치들을 USBM & OSMRE의 진동규제치에 따라 정리한 결과는 그림 10과 같다.

4.3.3 진동측정 결과분석

그림 10에 표시된 바와 같이 USBM & OSMRE 진동규제치 기준에 의하면 동다짐지점으로부터 10 m 내의 떨어진 지역에서는 1~2층의 소규모 구조

표 10. 대양인슈 건물 부근에서의 진동 측정치

진동원으로부터 떨어진 거리 (m)	10.0	20.0	40.0	45.0 (2층 건물내 사무실)	50.0 (2층 건물내 컴퓨터실)
최대입자속도 PPV (mm/s)	84.8	12.7	6.1	6.0	3.9
진동수(Hz)	8	9	9	9	8

표 11. 쓰레기 소각장 부근에서의 진동 측정치

진동원으로부터 떨어진 거리 (m)	5.0	10.0	20.0	50.0
최대입자속도 PPV(mm/s)	110.2	44.6	13.1	5.2
진동수(Hz)	11	7	6	5

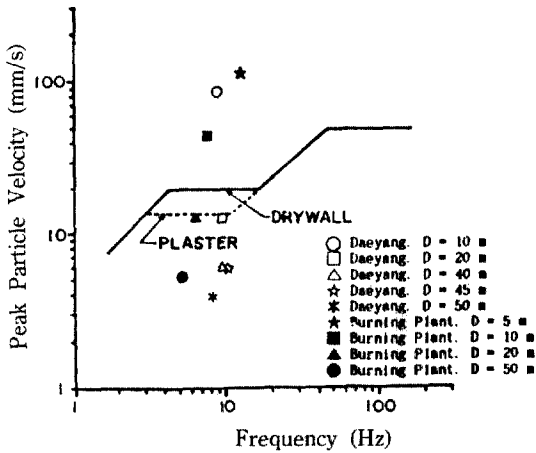


그림 10. 미광무국(USBM) 기준에 따른 최대입자속도 규제치와 진동수와의 관계

물에 영향을 미칠 수 있을 정도의 진동이 발생하며, 그 이상의 거리에서는 진동으로 인해 구조물에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

일반적으로 충격에 의한 지반 진동시 다짐추의 무게보다는 낙하높이가 지반의 입자속도에 더 큰 영향을 미치므로 동다짐 지점으로부터 10m 부근에 위치한 대양인슈 가건물 지역에서는 다짐추의 낙하고를 줄이고 다짐횟수를 증가시켜 야간 작업을 실시하여 진동 및 소음에 의한 피해를 최대한 방지하였다.

본 현장에서 측정된 진동치를 진동원으로부터의

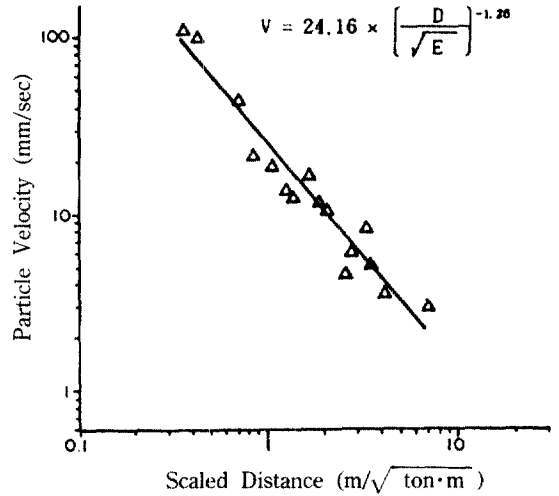


그림 11. 환산거리에 따른 최대입자속도 측정치

거리에 따라 도시하면 그림 11과 같으며, 회귀분석을 통해 이들 자료를 분석하여 다짐에너지와 진동속도의 관계를 표시하면 다음과 같은 진동속도 추정식을 얻을 수 있었다.

$$PPV = 24.16 \left[\frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{-1.26} \quad (6)$$

V: 최대입자속도 (mm/s)

D: 진동원으로부터의 거리 (m)

E: 1회 타격당 다짐에너지 (t·m)

Mayne⁽¹¹⁾은 12개 각각 다른 토질 및 다짐조건에서 측정된 결과를 근거로 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$PPV = 92 \left[\frac{\sqrt{E}}{D} \right]^{1.7} \quad (7)$$

Mayne의 식 (7)과 본 사례와 비교해 본 결과 본 사례에서 제안한 식 (6)은 Mayne의 식 (7)에 비해 PPV가 D=10m에서 약 25%, D=20m에서 24%

정도밖에 되지 않는다. 즉, 폐기물지반은 일반적인 지반과는 상당한 차가 있음을 알 수 있다. 그러므로 식 (6)은 폐기물층에서의 동다짐시 발생하는 최대 입자속도를 개략적으로 추정하여 진동대책을 수립하는데 참고가 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

폐기물지반에 대한 동다짐공사 결과를 분석하여 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 동다짐공사시 시행된 표준관입시험, 동적콘관입시험, 층별침하계 및 공간탄성파 속도 시험 등 제반 현장확인시험 결과 지반강도가 전반적으로 증대된 것으로 나타났다. 지반거동계측결과 폐기물 매립지반이 전체적으로 약 0.5~1.5m 정도 침하되었으며, 이로서 폐기물층 두께의 약 15~20% 정도 압축된 것으로 나타났다.

2. 본 폐기물 지반의 경우 개량심도계수 $\alpha=0.4-0.7$ 로서 $\alpha=0.5$ 를 사용하였으며, 본 사례와 유사한 폐기물지반에서도 $\alpha=0.5$ 로 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

3. 폐기물 지반의 개량정도를 측정하기 위한 현장시험에서는 표준관입시험보다는 동적콘관입시험이 보다 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

4. 폐기물 매립지반에 동다짐공법 적용시 폐기물층 상부에 1~2m 정도의 복토를 한 후 시행하여 타격에너지의 전달효율성을 높이고 폐기물층의 함물현상 및 비산현상 등을 방지할 수 있었으나, 위치에 따라서는 복토의 효과가 오히려 불필요하게 보이는 곳도 있었다.

5. 제반 결과를 종합한 결과 본 지역의 폐기물 매립지반에 대한 동다짐공법 적용은 타당한 것으로 판단되고 개량효과도 양호한 것으로 나타났으며, 타 지역의 유사한 지반에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 본 지역 폐기물 매립지반에서 동다짐시 발생하는 진동을 측정한 결과 다음과 같은 최대입자속도 추정식을 구하였다. 이는 일반적인 지반에 비해 약 25% 정도이었으며, 이와 유사한 폐기물 지반의 진동대책을 수립하는데 참고가 될 것이다.

$$V = 24.16 \left[\frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{1.26}$$

7. 폐기물 매립지반에 동다짐공법을 적용하고자 할 경우에는 폐기물지반의 특수한 지반여건을 고려하여 충분한 사전조사 및 계획수립과 철저한 확인 시험 및 품질관리가 수행되어야 개량효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 폐기물층에 함유된 유기물의 분해에 의한 장기침하 문제에 대하여는 폐기물층의 화학적 분석, 분해과정 및 변화상태 등에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되며, 본 사례에서는 지표면에 침하관을 설치하여 도로건설 완료 후에도 지속적으로 장기침하량을 측정관리토록 하였다.

9. 폐기물 매립지반은 일반적인 토사지반과 달리 유기물과 고형체 등의 비율에 따라 공학적특성이 크게 다르므로 다짐시험법 등 기존 토질공학에서 사용하고 있는 표준시험법의 적용이 곤란하거나 불가능한 경우가 많다. 따라서 이 분야에 대하여도 향후 지속적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 고 작성에 협조하여 주신 영진건설산업(주) 관계자 제위와 자료정리 및 원고정리를 도와주신 (주)대우엔지니어링 지반공학부 관계자 제위께 심심한 감사를 표한다.

참 고 문 헌

1. 김영목, 이상용, 김만구, 이충환, 신승철, "폐기물 지반에 대한 동다짐공법 적용의 타당성 분석 및 평가", 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 1992, pp. 481-484.
2. (주)대우엔지니어링, "천안시 하수처리장 시설부지 지반개량 동다짐공사 보고서", 1990.
3. 대전직할시 종합건설본부, "대전시 갑천 우안도로 건설공사 (제1공구) 동다짐시공 종합보고서", 1992.
4. 한국건설기술연구원, "연약지반 천층 안정처리연구", 1988, pp. 77-99.
5. 山崎 結城, 小川 泰昭, 鳴海 直信, 勝又 保, "動壓密工法による廢棄物地盤の改良施工例", 『最新の地盤改良工法, 基礎工』, 1991, pp. 109-115.
6. Leonards, G.A. Cutter, W.A. and Holtz, R.D., "Dynamic Compaction of Granular Soils", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. GT4, Proc. Paper 15144, January, 1980, pp.

35-44.

7. Lukas, R.G., "Densification of a Decomposed Landfill Deposit", *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, CA, Volume 3, 1985, pp. 1725-1728.
8. Lukas, R.G., "Dynamic Compaction Engineering Consideration", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, Geotect, Special Publication, No. 30, 1992, pp. 927-939.
9. Lukas, R.G., "Dynamic Compaction for Highway Construction, Volume 1: Design and Construction Guidelines", *FHWA Report No. RD-86/133*, 1986.
10. Luongo, V., "Dynamic Compaction: Predicting Depth of Improvement", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, Geotect, Special Publication, No. 30, 1992, pp. 927-939.
11. Mayne, P.W., "Ground Vibrations during Dynamic Compaction", *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*, ASCE, 1985, pp. 247-265.
12. Menard, L. and Broise, Y., "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1, 1975, pp. 3-18.
13. Mitchell, J.K., "Soil-Improvement-State of the Art Report", *Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, Stockholm, 1981, pp. 509-520.
14. Rahimi, M.M. and Bayetto, P.M., "Ground Improvement by Vibro Dynamic Compaction Techniques", *Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, 1987, pp. 183-192.
15. Welsh, J.P., "Dynamic Deep Compaction of Sanitary Landfill to Support Superhighway", *Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 1983, pp. 319-321.

(接受：1993. 6. 10)