

# 다짐방법에 따른 노상토의 설계입력변수 특성 연구

## A Study on the Design Parameters of Subgrade Soil by Different Compaction Methods

박승목\*, 이관호\*\*

Park, Seung-Mok & Lee, Kwan-Ho

### 1. 연구배경 및 목적

국내의 도로설계는 미국의 AASHTO 설계법과 일본의 TA 설계법을 혼용하여 사용하고 있다. 이들 설계법은 시험도로로부터 얻어진 각종 자료를 기초로 개발된 설계법이다. 특히, 미국의 AASHTO 설계법의 경우 1958년부터 1960년까지의 일리노이주 오타와시에 건설된 시험도로를 이용하여 도로설계 및 공용성 평가에 필요한 각종 자료를 수집하였고, 이를 기초로 개발된 설계법이다. 현재 사용하고 있는 AASHTO 포장 설계법에서는 노상의 물성치로 아스팔트 포장의 경우 CBR 시험, 콘크리트 포장의 경우 평판재하시험 값을 이용하여 설계하도록 되어있다. 도로공사 시방서에서는 현장 CBR 적용의 어려움으로 인해 아스팔트 포장, 콘크리트 포장 모두 평판재하시험을 이용하여 관리하도록 되어있다. 노상토의 특성평가를 위한 실내시험은 주로 충격다짐방법을 적용한 Proctor 다짐(A 다짐 또는 D 다짐)을 이용하고 있다. 그러나, 현장의 경우 로울러를 이용한 압착형태의 다짐방법이 이용되고 있다. 이러한 실내다짐방법과 현장다짐방법의 차이는 결국 실내시험으로부터 결정된 노상토의 물성치 적용 시 상당한 오차를 포함함을 의미한다. 실내 프록터 다짐시험, 선회다짐기를 이용한 다짐시험 및 현장에서 블록 샘플링하여 채취한 시험료를 이용하여 국내 대표적인 노상토인 화강풍화토의 다짐방법에 따른 지반 및 도로공학적인 물성치를 평가하였다. 특히, 선회다짐기를 이용한 다짐방법의 적용성에 대한 기초 자료를 제시하고, 국내의 노상토 다짐방법을 현장조건을 재현할 수 있는 선회다짐방법으로 개선하는 것이 본 연구의 주요 목표이다.

### 2. 노상토의 설계 및 시공기준

노상은 포장 밑에 위치하는 흙쌓기 또는 땅깍기의 최상부 100cm 부분으로 포장과 일체로 구성되어 포장체에 작용하는 하중을 최종적으로 지지하는 층이다. 따라서, 노상은 포장체의 거동 및 내하력 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 포장체의 공용성 확보를 위하여 노상은 균등한 지지력과 균일한 강성도를 갖도록 설계·시공하여야 한다. 또한 균일한 노상토 재료를 선정하여 사용하고, 얇고 균일하게 포설하여 다지는 것이 중요하다. 그리고 노상 마무리면의 평탄성은 포장체 최상부의 평탄성에도 영향을 미치므로 표면마무리를 평탄하게 하여야 한다. 노상층 가운데 두께 100cm 중 상부 40cm층을 상부노상, 그 이하 부분(60cm)을 하부노상이라 하며, 땅깍기부의 원지반이 암반이거나 상부노상 재료로서 합당한 재료인 경우에는 원지반을 노상으로 취급한다. 최종적인 노상의 구성 및 재료의 선정은 가장 경제적인 것이 되도록 공사초기에 시험시공을 통하여 결정하고, 노상재료는 현장에서 발생하는 흙을 최대한 활용하여 경제적인 설계가 되도록 한다(건설교통부, 2000).

노상재료의 품질은 표 1에 나타난 것과 같다. 다짐규정은 최소관리이므로 각종의 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 한다. 또한 균일한 지지력과 강성도를 갖도록 얇고 균일하게 포설하여 다진다. 노상의 다짐조건을 표 2에 나타내었다.

\* 정회원. 한국중합기술개발공사, 도로공항본부 전무이사

\*\* 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부, 조교수 (khlee@ks.ac.kr, 051-620-4756)



표 1. 노상재료의 품질기준

구 분	상부노상	하부노상	시험법	
최대치수	100mm 이하	150mm 이하		
4.75mm 통과량	25~100 %	-		
0.074mm 통과량	0~25 %	50 %이하		
0.425mm 통과분에 대한 소성지수 (PI, %)	10 이하	20 이하		
다짐도 (%)	95 % 이상	90 % 이상	KS F 2312	
시공시의 함수비 (%)	다짐도 및 수정 CBR 10 이상을 얻을 수 있는 함수비, 최적함수비 ± 2%	다짐도 및 수정 CBR 5 이상을 얻을 수 있는 함수비	KS F 2306 KS F 2312	
시공층 두께	20cm 이하	20cm 이하	한 층 당 마무리두께	
수침 CBR	일반노상	안정처리 노상	일반노상	안정처리 노상
	10 이하	20 이상	5 이상	10 이상

표 2. 노상의 다짐 조건

구 분	상부노상	하부노상	비 고	
시공조건	시공 층 두께	20cm 이하		한 층 당 마무리두께
	함수비	다짐도 및 수정 CBR 10 이상을 얻을 수 있는 함수비	다짐도, 수정 CBR 5 이상을 얻을 수 있는 함수비	
다짐 후의 조건	다짐도	95% 이상	90% 이상	KS F 2312상의 C, D 또는 E방법
	지지력계수 (K30,kg/cm <sup>2</sup> )	-		평판재하시험을 실시한 경우
	허용 처짐량	5mm 이하	-	타이어 로울러의 복륜하중 5톤 이상, 접지압 5.6 kg/cm <sup>2</sup> 에 의한 프로프 로울링

### 3. 다짐방법 및 다짐기기

#### 3.1 실내 프록터다짐

현재 보편적으로 이용되고 있는 실내 프록터다짐기를 이용한 시험방법 및 시험장비는 KS F-2312와 ASTM D-698에 규정되어 있다. 시험방법은 표준다짐방법과 수정다짐방법으로 구분된다(김용필 등, 2002).

#### 3.2 선회다짐기

기존의 충격다짐기가 다른 로울러 다짐방법을 모사한 최초의 선회다짐기가 1939년 미국 텍사스주 교통국에서 개발되었다. 텍사스주 교통국에서 개발된 선회다짐기는 많은 연구기관에서 여러 차례 개량되었고, 현재와 유사한 형태의 모델이 미 육군 공병단에 의해 개발되었다(Ortolani & Sandberh, 1952). 개발된 장비는 1957년 AAPT(Association of Asphalt Paving Technologist) 학술발표회에서 소개되었다. 선회다짐기를 개발한 주요 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다(Lee, 1996).

- ① 연속된 교통하중 및 차량하중에 의한 밀도가 큰 시편의 제작
- ② 실제포장체가 경험하는 응력-변형조건을 실내실험에서 구현
- ③ 아스팔트 포장의 파손에 필요한 차량주행반복횟수의 결정



④ 기존의 충격다짐방법의 한계를 극복할 수 있는 새로운 다짐방법의 필요

미국의 전략적 도로연구사업(SHRP, Strategic Highway Research Program) 연구사업 중의 하나인 다짐방법의 개선연구에서는 기존의 미육군공병단에서 개발된 선회다짐기를 개량하여 시험시편만을 제작하는 용도의 선회다짐기를 개발하였다(SHRP, 1994, Butcher, 1997, Hinrichsen, 2000, Mallick, 2000). 그림 1은 국내의 도입되어 사용되고 있는 선회다짐기의 종류이다. 본 연구에 도입되어 사용되고 있는 선회다짐기의 종류이다. 본 연구에 이용된 Servopac 선회다짐기의 중요 제원은 표 3과 같다. 다짐방법은 몰드안의 시료에 압축력과 전단력을 작용시켜 다짐을 수행한다. 다짐과정은 컴퓨터와 연결되어 제어되며, 다짐중의 시편의 높이, 다짐횟수, 다짐압력, 다짐밀도 등이 실시간으로 표시된다. 그림 2는 컴퓨터상에서 나타나는 제어프로그램을 보여준다.

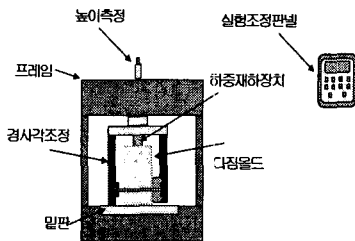


그림 1. Servopac 선회다짐기

표 3. 선회다짐기의 중요제원

구분	주요항목	주요내용
외형	크기	197cm × 76cm × 45cm (높이×가로×세로)
	총중량	240 kg
다짐몰드	직경	100mm, 150mm
	높이	270mm
	두께	10mm
	마감상태	≤ 0.4μm
다짐관련	표면경도	48 Rockwell C
	하중	20kN ± 100N
	용력	최대 999kPa
	다짐속도	3~60 ± 0.1 회/분
시편	회전각도	0.02° ± 0.02도
	최소높이	50mm
다짐압	공기이용	건조공기, 800~1000 kPa 최소공기량 5L/sec

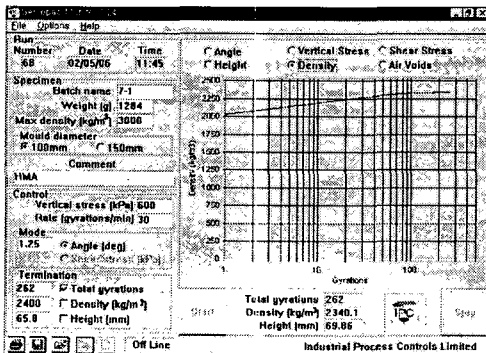


그림 2. 선회다짐기용 전용프로그램

3.3 현장다짐기

다짐기계의 자체 중량을 이용하여 정적 압력으로 토사를 다지는 기계를 말하며, 종류는 머캐덤롤러, 탠덤롤러, 다이어롤러 및 슈프트롤러 등이 있다. 다짐기계의 유효다짐 폭(W)과 다짐속도(V)의 관계를 표 4에 다짐 회수(N) 및 다짐두께(D)에 대한 기준을 표 5에 나타내었다(건설교통부 2000; 남상욱, 2000)



표 4. 다짐기계별 유효폭(W) 및 다짐속도(V)    표 5. 공중 별 소요다짐 횟수(N) 및 다짐두께(D)

다짐기계	구분	규격 (ton)	유효 다짐 폭(m)	표준다짐속도(km/hr)		
				노체, 축체 노상	보조기층 기층	표층
머캐덤 로울러		6~8	1.7	2.0	2.5	3.0
		8~10	0.8			
		10~12	0.8			
		12~15	0.9			
탠덤 로울러		6~8	1.1	2.0	-	3.0
		8~10	1.1			
		10~13	1.2			
타이어 로울러		5~8	1.4	2.5	4.0	4.0
		8~15	1.8			
		15~25	2.0			
불도저		12	0.7	4.0	-	-
		19	0.8			
견인식 양측식 로울러 (드럼2개 기준)		3~6	2.7	4.0	-	-
		7~10	3.1			
		11~20	3.4			
진동 로울러		2.5	0.7	1.0	1.0	-
		4.4	0.8	1.0	1.0	
		6.0	1.5	3.0	3.0	
		10.0	1.9	4.0	4.0	

공중	다짐 두께 (cm)	다짐기계	규격 (ton)	다짐 횟수	다짐도 (%)
		타이어 로울러	8~15	4	
노상	20	진동 로울러	10	6	95이상
		타이어 로울러	8~15	4	
보조기층	15~20	진동 로울러	10	8	95이상
		타이어 로울러	8~15	4	
기층 (아스팔트 안정처리)	7.5~10	머캐덤 로울러	10~12	4	96이상
		타이어 로울러	8~5	10	
		탠덤 로울러	10~14	4	
		머캐덤 로울러	8~10	2	
표층	5	타이어 로울러	8~15	10	96이상
		탠덤 로울러	10~14	4	
저수지	심벽 (점토) 성토	양측식 로울러 (자주식)	19	10	95이상
			30	19	8
축제	30~50	불도저	12~19	6	80이상

4. 실험재료의 기본 물성시험 및 다짐특성 평가

4.1 흙의 분류 및 기본물성

흙의 분류는 위에서 구한 기본 물성치를 이용하여 KS F 2324의 통일분류법을 이용하여 구하였다. 노상토의 입도분포곡선은 그림 3, 토질실험결과는 표 6에 나타난 것과 같다. 비중은 KS F 2308에 의해서 시험하였으며, 비중값은 2,700이다. 액성한계 및 소성한계는 KS F 2303 & 2304 규정에 따라 수행하였고, 결과 값을 표 6에 나타내었다.

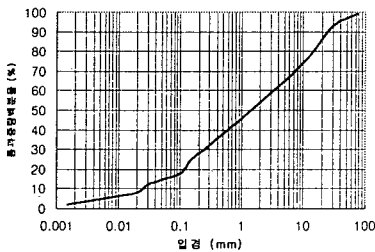


그림 3. 노상토의 입도분포곡선

표 6. 노상토 실험결과

비중	2.700	최대입경	75mm	곡률계수	1.0
자연함수비	10.5%	60%입경	3.7mm	10번체통과량	53%
액성한계	28.7%	30%입경	0.27mm	40번체통과량	35%
소성한계	23.9%	10%입경	0.028mm	0.08mm통과량	18%
소성지수	4.8%	균등계수	132	흙의분류	SM

4.2 다짐특성평가 시험 및 결과

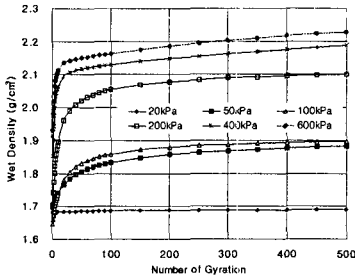
4.2.1 프록터(Proctor) 다짐시험 및 결과

프록터 다짐에 대한 시험방법은 KS F 2312에 소개되어 있고, 본 연구에서는 프록터 A다짐과 D다짐을 이용하였다. 다짐시험 결과, A다짐의 최적함수비 및 최대건조밀도는 17.7% 및 1.74 kg/cm<sup>3</sup>이고, D다짐의 경우 15.2% 및 1.88 kg/cm<sup>3</sup>이다.

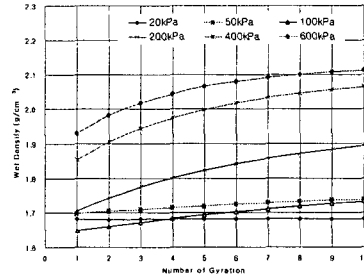


### 4.2.2 선회다짐기를 이용한 다짐특성평가

선회다짐기의 다짐특성을 평가하기 위해서 다짐하중과 선회다짐횟수를 적절히 조합하여, 현장에서 가져온 흐트러진 노상토를 이용하여 다짐을 수행하였다. 그림 4(a)는 다짐압력과 선회다짐횟수를 변화시켰을 때, 다짐밀도의 변화를 보여준다. 그림 4(b)는 초기 약 10회까지의 선회다짐횟수에서의 다짐밀도의 변화를 보여준다.



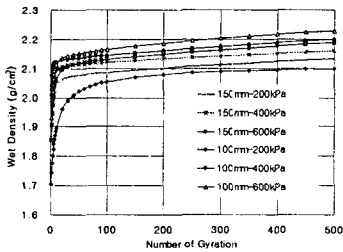
(a) 다짐압력별 다짐밀도



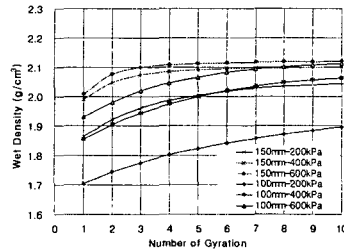
(b) 선회횟수에 따른 다짐밀도

그림 4. 다짐압력별 다짐밀도

일반적인 경향으로 다짐초기에 다짐효과가 매우 크게 나타나며, 약 100회 정도의 다짐횟수에 이르면, 다짐 시료의 밀도 값은 어느 정도 일정한 값으로 수렴함을 보여준다. 그림 5에서 보듯이 다짐압력과 시편의 크기가 작을수록 초기 다짐밀도 변화폭이 크다는 것을 알 수 있다. 선회횟수가 클 경우에는 다짐밀도가 일정한 값에 수렴을 하는 경향을 보인다. 특히, 선회다짐을 시작한 초기에 변화가 크기 때문에 다짐압력과 선회다짐 횟수의 선정이 매우 중요한 작업이라는 것을 알 수 있다.



(a) 시편크기에 따른 다짐밀도



(b) 선회횟수에 따른 다짐밀도

그림 5. 시편 크기별 다짐밀도

표 7은 현장다짐기기의 다짐전압과 관련된 특성값을 보여준다(남상욱, 2002). 유효다짐너비는 노상토를 다짐할 때 최초의 다짐너비와 다짐후의 너비를 평균한 값으로, 0.2m이다. 현장다짐기기의 평균 다짐전압은 머캐넌 롤러의 경우 600kpa, 탬뎀 롤러와 타이어 롤러의 경우 약 400kpa가 나온다. 현장다짐기기의 평균 다짐압력을 선회다짐시험에 적용하였다. 주어진 다짐전압을 이용하여 표 8의 현장 들밀도 조건과 같은 다짐밀도를 맞추어 다짐을 시행하였다. 그림 6에서 보듯이 400kpa와 600kpa로 압력을 주었을 때의 현장 들밀도 값인 2.03 g/cm³에 해당하는 선회횟수는 2회 정도이다.



표 7. 현장다짐기기의 다짐전압(남상욱, 2002)

다짐기기	중량 (ton)	유효다짐폭 (m)	너비 (m)	다짐 횟수	다짐속도 (km/h)	다짐면적(m <sup>2</sup> )	다짐전압 (ton/m <sup>2</sup> )	평균전압 (kPa)
머캐덤 로울러	7	0.7	0.2	6	2	0.14	50.0	600
	9	0.8	0.2	6	2	0.16	56.3	
	11	0.8	0.2	6	2	0.16	68.8	
	13	0.9	0.2	6	2	0.18	72.2	
탠덤 로울러	7	1.1	0.2	6	2	0.22	31.8	400
	9	1.1	0.2	6	2	0.22	40.9	
	11	1.2	0.2	6	2	0.24	45.8	
타이어 로울러	7	1.8	0.2	6	2.5	0.36	19.4	400
	11	1.8	0.2	6	2.5	0.36	30.6	
	20	2	0.2	6	2.5	0.4	50.0	

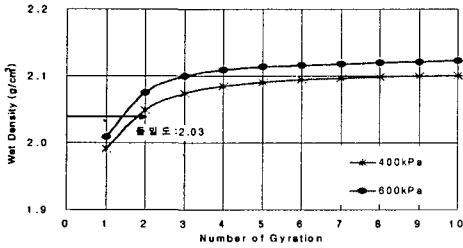


그림 6. 다짐전압에 따른 선회횟수

표 8. 현장지점별 들밀도

지점	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	avg.
들밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.01	1.996	1.993	1.975	2.051	2.094	2.03
건조밀도(g/cm <sup>3</sup> )	1.905	1.899	1.905	1.881	1.887	1.919	1.89
함수비(%)	10.3	10.3	10.3	10.3	10.1	10.1	10.2

4.3 CBR 시험

CBR시험은 KS F 2320에 의해서 프록터 다짐을 이용한 시험, 다짐압력 400kpa와 600kpa를 이용하여 현장 들밀도 조건에 맞춰서 선회다짐을 한 시료 등을 이용하여 비교하였다. 그림 7와 표 9는 프록터 다짐과 선회 다짐후의 CBR 시험결과를 나타낸다. 5.0 mm 관입시 프록터 다짐을 구한 CBR 값은 10회다짐에서는 3.14%, 25회 다짐에 대해서는 12.86%, 55회 다짐에 대한 값은 24.29%가 나왔다. 선회다짐을 한 시료는 400kpa의 경우 17.41%, 600kpa의 경우 13.31%가 나옴을 알 수 있다.

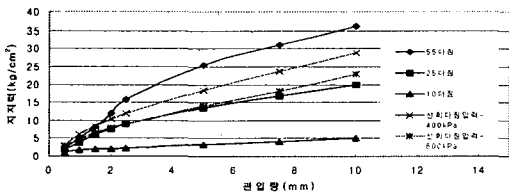


그림 7. 하중-관입량 곡선

표 9. 프록터 다짐과 선회다짐 시료의 CBR결과

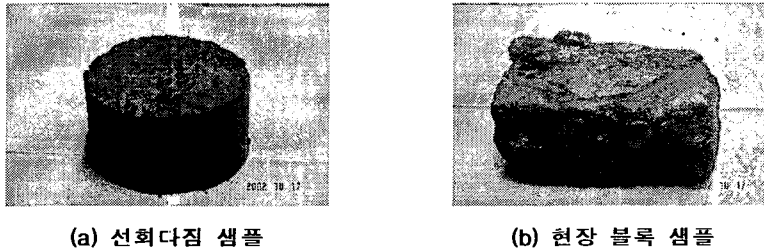
		관입량(mm)	2.5	5.0	7.5	10
		표준하중(kg/cm <sup>2</sup> )	70	105	134	162
CBR(%)	프록터	10회다짐	3.43	3.14	12.54	12.22
		25회다짐	12.57	12.86	12.54	12.22
	선회	400kPa(6회)	17.01	17.41	17.72	17.77
		600kPa(4회)	12.90	13.31	13.59	14.51

5. 역학적 시험 및 결과

5.1 시험시편의 제작



역학적 시험의 시편제작을 위해서 현장의 시료는 현장에서 큰 블록으로 가지고 와서 성형을 하는 방법을 택했다. 프록터 다짐의 경우에는 A, D 다짐을 하여 추출을 한 후 성형을 하였다. 선회다짐의 경우는 100 mm의 몰드에 400 kpa와 600 kpa의 압력을 주어서 그림 8(a)와 같은 시료를 제작 후 성형을 하였다. 현장에서 노상이 완료된 구간에서 채취한 블록샘플시료는 그림 8(b)와 같고, 이를 이용하여 시험용 원통형 시편을 제작하여 이용하였다.



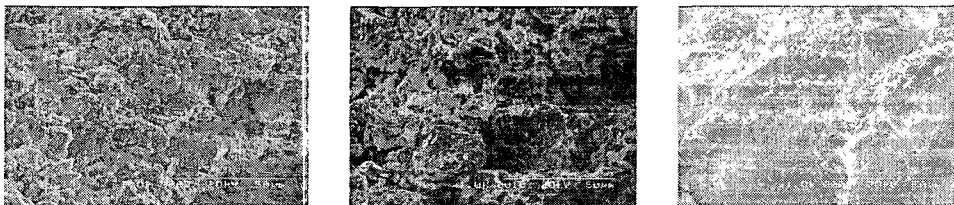
(a) 선회다짐 샘플

(b) 현장 블록 샘플

그림 8. 시험에 사용한 시료샘플

### 5.2 다짐방법별 입자특성

그림 9는 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 각 다짐 방법별 입자모양을 나타낸 것이다. 선회다짐과 프록터 다짐의 경우 실내시험을 위해서 체가름을 한 상태이기 때문에 입자의 크기가 비교적 균질한 상태이고, 현장의 블록샘플의 경우 입자의 크기가 상당히 불균일함을 알 수 있다. 프록터 다짐시료의 경우 55회의 충격다짐을 하였고, 이로 인해 시편의 조직이 비교적 치밀하게 구성되어 있다. 그러나, 선회다짐시편과 현장 블록샘플시편의 경우 압착형태의 정하중을 이용한 약 4-6회의 다짐횟수를 적용한 상태이고, 이로 인해 시편의 조직이 프록터 다짐시료에 비해 치밀하지 못하다. 다짐으로 인한 이러한 시편조직의 치밀함은 결국 강도정수, 즉, 일축압축강도, 전단강도 및 침하량 등에 상당한 차이를 나타내는 주요 원인으로 판단된다.



(a) 프록터다짐 시 입자모양

(b) 선회다짐 시 입자모양

(c) 현장블록 샘플

그림 9. 다짐방법 별 노상토의 입자모양

### 5.3 일축압축시험

일축압축시험은 KS F 2314에 의해서 시험을 하였다. 지름 50 mm, 높이 100 mm 원통형 시편을 제작하였고, 일축압축시험은 압축속도 2 mm/min(분당 1.6%정도의 변형)을 적용하였다(Head, 1982). 그림 10과 표 10은 각 다짐방법에 따른 일축압축 결과를 보여준다. 표 10에서 보듯이 현장에서 로울러로 다진 시료와 600 kpa의 다짐압력을 이용한 선회다짐시편의 일축압축강도가 1.14 kg/cm<sup>2</sup>, 1.19 kg/cm<sup>2</sup>로 거의 유사한 값을 나타내었다. 프록터 A다짐과 D다짐의 경우에는 1.60 kg/cm<sup>2</sup>과 6.77 kg/cm<sup>2</sup>으로 현장의 다짐 상태보다 과다한 강도가 나왔다. 이것은 단편적이지만, 선회다짐의 경우 현장의 실제적인 로울러 다짐을 더 잘 반영한다고 볼 수 있다. 또한 프록터 D 다짐방법의 적용 시 이로부터 얻어지는 흙의 물성치가 매우 과대평가가 될 수 있음을 의미한다.

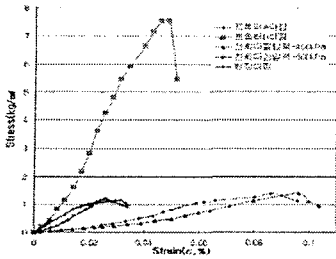


그림 10. 다짐방법별 일축압축강도

표 10. 다짐방법 별 비배수전단강도 및  $E_{50}$ (kg/cm²)

구분	현장다짐	선화다짐		Procter 다짐	
		400kPa	600kPa	A 다짐	D 다짐
일축압축강도	1.14	1.35	1.19	1.60	6.77
비배수전단강도	0.57	0.68	0.60	0.80	3.39
$E_{50}$ (kg/cm²)	55.37	23.77	57.17	19.26	184.22
$E_{50}$ 표준편차	0.09	0.19	0.12	0.26	0.69

5.4 직접전단시험

직접전단 시험은 KS F 2343을 기준으로 하여 시험을 실시하였으며, 각 다짐 방법별로 점착력  $c$ (kg/cm²)와 내부마찰각  $\psi$ (°)을 비교 하였고 그림 11과 표 11에 나타내었다. 표 11에 나타난 것과 같이, 현장다짐시료의 점착력은 0.704 kg/cm²,  $\psi$ 는 10.2°, 선화다짐의 경우 다짐압력이 400 kpa일 때, 0.700 g/cm²,  $\psi$ 는 8.9°, 600 kpa 일 때 0.485 kg/cm²,  $\psi$ 는 12.6°, 프록터 다짐의 경우 A다짐은 0.441 kg/cm²,  $\psi$ 는 9.6°, D다짐은 0.943 kg/cm²,  $\psi$ 는 12.48°이 나왔다. 흙의 점착력을 기준으로 볼 때 선화다짐의 시료의 값이 현장시료의 값보다 다소 작게 나타났으나, 프록터 다짐시험결과에 비해 현장시료의 값에 근접한 값을 보여주고 있다. 프록터 다짐의 경우 A다짐 결과가 D다짐 결과에 비해 현장 시료 값과 근접한 값을 나타냈다. 직접전단시험결과만을 기준으로 볼 때, D다짐을 이용한 시편의 경우 노상토의 강도정수값을 다소 과다하게 평가할 수 있음을 의미한다.

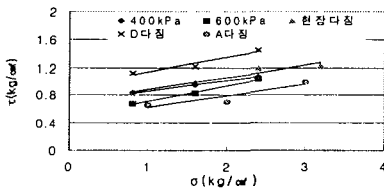


그림 11. 다짐방법 별 응력-전단강도

표 11. 다짐방법 별 강도정수

구분	예측수식	$c$ (kg/cm²)	$\phi$ (°)
프록터	A다짐 $y=0.1700x+0.4407$	0.441	9.6
	D다짐 $y=0.2031x+0.9433$	0.943	12.4
선화다짐	400kPa $y=0.1569x+0.7003$	0.700	8.9
	600kPa $y=0.2244x+0.4847$	0.485	12.6
현장다짐	$y=0.2000x+0.7035$	0.704	10.2

5.5 크리프시험

차량하중에 의한 노상토의 변형특성을 평가하기 위해 크리프시험을 하였다. 시험에 이용된 시편은 프록터 다짐, 선화다짐기 및 현장다짐 시료를 이용하여 제작하였다. 특히, 현장다짐시료의 경우 노상토의 샘플링이 어려운 관계로, 블록샘플링을 한 후, 실내에서 크리프 시험에 맞는 크기의 시편으로 성형하여 이용하였다. 시험에 이용된 시편의 크기는 직경 100 mm, 높이 650 mm를 적용하였다. 시험은 그림 12와 같은 삼축압축 실험 조건에 시행되었고, 구속압력은 AASHTO에서 제시한 포장체상의 표준단면을 적용하여 구속압력을 설정하였다. 시험에 적용된 조건은 표 12에 나타내었다.

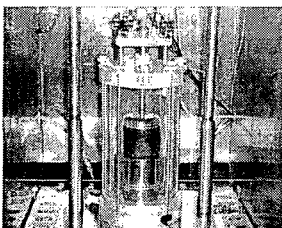


그림 12. 크리프시험기

표 12. 정하중 크리프시험 조건

구속하중	0.4kg/cm²	시험온도	25도
예비하중	0.1kN	하중재하시간	300초
본하중	0.4kN	하중재하시간	1200초
		하중제하시간	400초





각각의 크리프시험의 1200초에서의 최대 변형량 및 1500초에서의 변형량(최대변형량-회복변형량)을 표 13에 나타내었다. 또한, 각각의 시험결과는 그림 13에 자세히 나타내었다. 그림 13에 나타난 것과 같이, 현장다짐시료와 선회다짐기를 이용한 시료의 크리프 특성이 비교적 유사한 양상을 보였고, 프록터다짐의 경우 A다짐과 D다짐에 의한 차이가 크게 발생하였다. 이는 다짐방법이 교통하중에 대한 노상토에 변형특성에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서, 실내에서 프록터 다짐을 이용한 시험의 경우 노상토의 변형특성을 제대로 반영할 수 없음을 의미하고, 또한 사용하는 다짐방법에 따라 물성치의 변화가 매우 큼을 의미한다.

표 13. 다짐방법별 변형량

변형량(μm)	선회다짐		프록터다짐		현장다짐
	400kPa	600kPa	A 다짐	D 다짐	
하중제하직후	167.68	137.93	191.96	66.46	150.46
1200초	205.87	194.14	252.99	125.22	198.55
1200.1초 (하중제하직후)	134.17	124.90	184.74	79.70	143.17
1600초 (영구변형량)	95.32	86.92	135.57	51.38	115.37

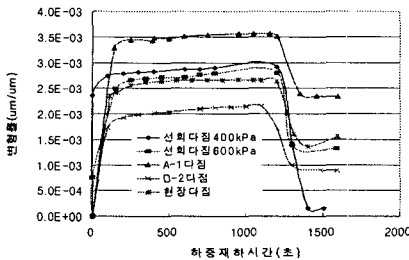


그림 13. 다짐방법 별 크리프시험결과

### 5.6 현장 평판재하시험

평판재하 시험은 현장의 시험위치에 설치한 강성 재하판을 단계적으로 하중을 가해서 침하량을 측정한 자료에서 지반의 전단파괴유형, 극한 및 항복 지지력, 지반반력 계수, 변형계수 등을 구하는 시험으로써 KS F 2444 & 2310을 기준으로 시험하였다. 그림 14는 각 하중단계에 대한 현장노상토의 침하량을 보여준다. 그림 14에서 보듯이 2.5 mm의 침하량이 생길 때의 하중강도의 값은 6.08kg/cm<sup>2</sup>이다. 지반반력계수(k)는  $K_{30}=6.08/0.25=24.3\text{kg/cm}^2$ 이다.

## 6. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 현장의 다짐조건을 잘 모사할 수 있는 선회다짐기로 다짐한 노상토의 특성을 기존의 충격 다짐 방법에 의한 지반 특성치를 상호 비교하고 현장에서의 로울러 다짐과의 적용성을 지반 및 도로공학적인 관점에서 파악하고, 기존의 다짐방법 대신 선회다짐기를 이용할 수 있는 근거자료를 제시하는데 그 목적이 있다. 비교적 제한된 실험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시험에 이용된 노상토의 흙의 분류는 실트질 모래(SM)이고, 비중 값은 2.70이다. 시료의 액성한계는 28.7%, 소성한계는 23.9%, 소성지수는 약 4.8이다.
2. 현장에서의 다짐조건을 반영하기 위해 현장밀도( $\gamma_t=2.03\text{g/cm}^3$ ) 및 함수비(16.9%)를 이용하여 선회다짐기의다짐횟수 및 압력을 결정하였다. 현장조건에서의 다짐밀도를 묘사하기 위해 다짐압력 400kpa에서 600kpa를 적용시 다짐횟수는 약 2-3회로 나타났다.
3. 수퍼페이브 선회다짐기의 다짐특성을 평가하기 위해 다짐압력, 다짐횟수, 다짐시편의 크기를 변수로 각각의 factorial design을 이용하여 조합을 결정하여 시험을 시행하였다. 다짐압력 및 다짐횟수와 다짐밀도는 비례 관계를 나타내었다. 100mm 직경의 다짐시편의 경우 150mm 직경의 다짐시편에 비해 다짐밀도가 약간 크게 나타났다.
4. 일축 압축 시험 결과로 선회다짐과 현장 다짐이 거의 유사한 강도 특성을 보이고 있으며, 충격다짐의 다짐에너지의 차이에 따라 비교적 크게 변화하였다. 현장다짐시료의 일축압축강도는 약 1.14kg/cm<sup>2</sup>, 선회다짐의 경우 400kpa 다짐압력 시 1.35kg/cm<sup>2</sup>, 600 kpa 다짐압력 시 1.19kg/cm<sup>2</sup>, A다짐의 경우 1.60kg/cm<sup>2</sup>, D다짐의 경우 6.77kg/cm<sup>2</sup>



cm정도로 나타났다. 일축압축강도 면에서 볼 때 충격다짐과 압착형태의 다짐을 이용하는 현장다짐과의 차이가 매우 큼을 보여주며, 반면에 선회다짐의 경우 현장다짐시료의 특성을 비교적 잘 반영한다고 할 수 있다. 또한, 같은 크기의 다짐밀도를 얻기 위해 중량의 로울러를 이용하는 것은 다짐횟수를 줄이는 효과는 있으나, 노상토의 강도특성을 저하시키는 요인이 되므로, 적절한 다짐중량의 선정 및 현장에서의 다짐횟수의 결정이 매우 중요한 것으로 판단된다.

5. 크리프 시험의 경우 탄성회복량은 선회다짐 압력 400kpa의 경우  $71.7\mu\text{m}$ , 600kpa의 경우  $69.24\mu\text{m}$ , 프록터 A다짐의 경우  $68.26\mu\text{m}$ , D다짐의 경우  $45.52\mu\text{m}$ , 현장 블록샘플의 경우  $53.42\mu\text{m}$ 로 나타났다. 프록터 D다짐을 제외하고는 비슷한 결과를 보이고 있으며, 특히 선회다짐과 현장블록샘플 시료의 전체적인 거동이 아주 비슷한 양상을 보이고 있다. 시료의 전체적인 거동이 아주 비슷한 양상을 보이고 있다. 시료를 성형하는 과정의 실험오차를 생각한다면 좋은 결과라고 할 수 있을 것 같다.

본 연구에서 적용된 노상토는 하나의 현장시료를 기초로 작성된 것이므로 위에서 얻어진 결론을 충분히 뒷받침하기 위해서는 좀더 많은 현장의 노상토에 대한 시험을 시행하여야 할 것이다. 또한, 현재까지의 연구 결과는 지반 및 도로공학적 강도 특성에 중점을 맞추었으나, 향후 도로 노반재로서의 역학적 설계법의 입력 변수인 회복 탄성계수( $M_R$ )시험이 시행되어야 할 것이다. 본 연구에 사용된 선회다짐기의 경우 국내의 적용사례가 적은 실정이므로 현장의 다양한 로울러 종류에 따른 적절한 선회다짐기의 다짐조건을 DB화하여 현장에서의 다짐방법과 실내에서의 다짐방법으로 인한 차이점을 최소화 할 수 있을 것으로 기대하며, 또한, 노상토의 설계에 직접 반영한다면 좀더 현실성 있는 설계가 이루어질 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계편람(II), pp. 405.1 ~ 405.9
2. 김용필 등 (2002), 지반공학시험 이론과 실무, 세진사, pp. 800
3. 남상욱 (2002), 토목시공학, 청운문화사, pp. 158-168
4. Butcher, M. (1997), "Determining Gyrotory Compaction Characteristics using the Servopac Gyrotory Compactor", TRB
5. Hinrichsen, J. (2000), "A Comparison of Four Brands Superpave Gyrotory Compactor", TRB
6. Lee, K. (1996), "The use of waste materials in hot mix asphalt", Ph.D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Purdue Univ., W. Lafayette, IN, USA
7. Mallick, R. B. (2000), "Use of Superpave Gyrotory Compactor to Characterize Hot Mix Asphalt (HMA)", TRB
8. Ortolani, L. and Sandberh, H. A. (1952), "The Gyrotory Shear Method of Modeling Asphaltic Concrete Test Specimens ; Its Development and Correlation with Field Compaction Methods", Proceeding, AAPT, Vol. 21, pp. 280-297.
9. SHRP (1994), "The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-379, National Research Council, Washington, D.C., pp 125.