



# 선회다짐기를 이용한 노상토의 다짐특성 평가

## Compaction Properties of Subgrade Soil using Gyrotory Compactor

차민경*	정태현**	이관호***	이병식****	임유진*****
Cha, Min Kyung	Jeong, Tae Hyun	Lee, Kwan Ho	Lee, Byung Sik	Lim, You Jin

### 1, 서론

현재 사용하고 있는 AASHTO 포장 설계법에서는 노상의 물성치로 아스팔트 포장의 경우 CBR 시험, 콘크리트 포장의 경우 평판재하시험 값을 이용하여 설계하도록 되어있다. 한국도로공사 시방서에서는 현장 CBR 적용의 어려움으로 인해 아스팔트 포장, 콘크리트 포장 모두 평판재하시험을 이용하여 관리 하도록 되어있다. 노상토의 특성평가를 위한 실내시험은 주로 ‘충격다짐방법’ 을 적용한 Proctor다짐(A다짐 또는 D다짐)이 이용되고 있다. 그러나, 현장의 경우 로울러를 이용한 압착형태의 다짐방법이 이용된다. 이러한 실내다짐방법과 현장다짐방법의 차이는 결국 실내시험으로부터 결정된 노상토의 물성치 적용시 상당한 오차를 포함함을 의미한다.

최근 아스팔트 혼합물의 배합설계법은 기존에 주로 사용하던 빔 및 마샬 배합설계법에서 수퍼페이브 배합설계법으로 점차적으로 바뀌고 있는 추세이다. 급증하는 교통량과 교통하중의 증가에 따라 새로이 개선된 설계방법의 필요성이 대두되면서 수퍼페이브 배합설계법은 다양한 교통량과 축하중 그리고 환경조건에 대하여 합리적인 배합설계를 목적으로 하여 1990년대 후반부터 사용되기 시작했다. 수퍼페이브의 배합설계과정에서 중요한 사항 중의 하나는 선회다짐기를 사용하는 다짐방법이다. 선회다짐기는 교통하중에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 현장밀도를 실내에서 재현하기 위해 제작된 것으로 현장에서 얻어지는 골재입자의 배열과 유사하게 다진다는 장점이 있다. 아스팔트포장은 노상 위에 보조기층, 기층, 표층의 순으로 구성되는데 노상은 포장 아래 약 1.0m의 흙부분으로 포장과 일체로 구성되며 포장체에 작용하는 하중을 최종적으로 지지하는 층이다. 따라서, 수퍼페이브 배합설계법에서 사용하는 선회다짐기를 포장과 일체로 구성되는 노상의 다짐시험에도 적용한다면 각각의 포장층에 같은 원리의 다짐방법을 적용한다는 큰 의미가 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 실내 Proctor 다짐시험, 선회다짐기를 이용한 다짐시험 및 현장에서 블록 샘플링하여 채취한 시료를 이용하여 국내 대표적인 노상토인 화강풍화토의 다짐방법에 따른 지반 및 도로공학적 물성치를 평가하기 위해 시행되었다. 특히, 현장의 다짐조건을 잘 모사하는 선회다짐기를 이용한 다짐방법의 적용성에 대한 기초 자료를 제시하고, 이를 바탕으로 국내의 노상토 다짐방법을 현장조건을 재현할 수 있는 선회다짐방법으로 개선하기 위해 이루어졌다.

### 2. 다짐기기의 종류 및 특징

- \* 경성대학교 건설환경공학부 공학석사
- \*\* 학생회원 · 공주대학교 건설환경공학부 석사과정
- \*\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수 · 공학박사
- \*\*\*\* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사
- \*\*\*\*\* 배재대학교 건설환경·철도공학과 교수 · 공학박사

### 2.1 Proctor 다짐기

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).

### 2.2 현장다짐기

다짐기계는 흙에 외력을 가하여 공극을 최소화하고 소요강도를 얻는 기계로 <그림 1>과 같이 기계장치에 따라 무거운 로울러(Roller)를 굴려서 다지는 전압식, 진동체의 진동에 의해 다짐하는 진동식, 중량물의 낙하 충격을 이용하는 충격식으로 분류될 수 있다. 다짐작업에서 기계의 선정은 대단히 중요하므로 토질조건, 함수비, 주행속도, 통과횟수 등을 면밀하게 검토하는 것이 다짐의 효과뿐만 아니라 경제성 측면에서도 매우 중요하다(박기식, 2001).



(a) 시프스 풋 로울러



(b) 진동로울러



(c) 플레이트 콤팩터

<그림 1> 다짐방법에 따른 다짐로울러의 종류

다짐기계의 유효다짐 폭(W)과 다짐속도(V)의 관계는 <표 1>에, 소요다짐 횟수(N) 및 다짐두께(D)에 대한 기준은 <표 2>에 나타내었다.

<표 1> 다짐기계의 유효다짐 폭(W)과 다짐속도(V)

다짐기계	구분	규격 (ton)	유효다짐 폭(m)	표준 다짐속도 ( km/hr )		
				노체, 노상	축계	보조기층 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			
경인식 양축식 (드럼2개 기준) 로울러		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	

<표 2> 소요다짐 횟수(N) 및 다짐두께(D)

공종	구분	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 (AC 안정처리)	7.5~10	머캐덤 로울러	10~12	4	96이상
			타이어 로울러	8~15	10	
			탠덤 로울러	10~14	4	
	표층	5	머캐덤 로울러	8~10	2	96이상
			타이어 로울러	8~15	10	
			탠덤 로울러	10~14	4	
저수지	심벽	20	양축식 로울러 (자주식)	19	10	95이상
	점토성토	30		19	8	95이상
	축계	30~50	불도저	12~19	6	80이상



### 2.3 선회다짐기(Gyratory Compactor)

기존의 충격다짐과는 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 2>는 국내에 도입되어 사용되고 있는 선회다짐기의 종류이다. 본 연구에 이용된 Servopac 선회다짐기의 중요 제원은 <표 3>과 같다. 다짐방법은 몰드안의 시료에 압축력과 전단력을 작용시켜 다짐을 수행한다. 다짐과정은 컴퓨터와 연결되어 제어되며, 다짐중의 시편의 높이, 다짐횟수, 다짐압력, 다짐밀도 등이 실시간으로 표시된다.



<그림 2> 실험에 이용된 선회다짐기

<표 3> 선회다짐기의 중요제원

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



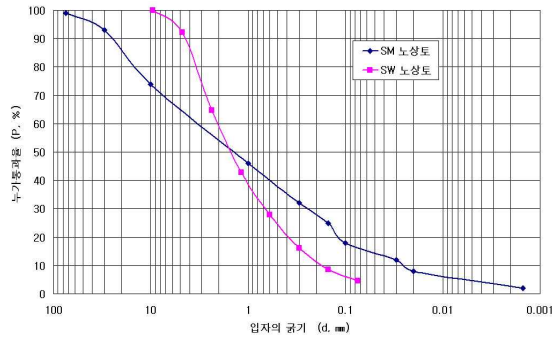
### 4. 실험재료의 기본물성

#### 4.1 흙의 기본물성

흙의 분류는 위에서 구한 기본 물성치를 이용하여 KS F 2324 의 통일분류법을 이용하여 구하였다. 노상토의 입도분포 곡선은 <그림 3>, 토질실험결과는 <표 4>에 나타난 것과 같다. 비중은 KS F2308에 의해서 시험하였으며, 비중값은 2.700이다. 액성한계 및 소성한계는 KS F 2303 & 2304 규정에 따라 수행하였고, 결과 값을 나타내었다.

<표 4> 노상토의 기본물성 시험결과

시험구분	분석항목	SM 노상토	SW 노상토
비중	비중	2.700	2.650
액소성 시험	액성한계	28.7 %	-
	소성한계	23.9 %	-
	소성지수	4.80 %	NP
입도분석	최대입경	75 mm	9.5 mm
	$D_{10}$	0.028 mm	0.180 mm
	$D_{30}$	0.270 mm	0.670 mm
	$D_{60}$	3.700 mm	2.100 mm
	균등계수, $C_u$	132.00	11.67
	곡률계수, $C_g$	1.00	1.19



<그림 3> 노상토의 입도분포 곡선

#### 4.2 Proctor 다짐시험

각 시료의 다짐특성, 즉 최대건조단위중량 및 최적함수비(OMC)를 평가하기 위하여 KS F 2312의 다짐시험방법을 적용하였다. 시험에 이용된 다짐방법은 Proctor A다짐과 D다짐을 적용하였다. 다짐시험 결과는 <표 5>에 나타내었다.

<표 5> Proctor 다짐시험 결과

구분	SM 노상토		SW 노상토	
	$d_{max} (kN/m^3)$	OMC (%)	$d_{max} (kN/m^3)$	OMC (%)
A 다짐	17.062	17.70	19.168	12.42
D 다짐	18.430	15.20	20.206	9.76

#### 4.3 선회다짐기 다짐시험

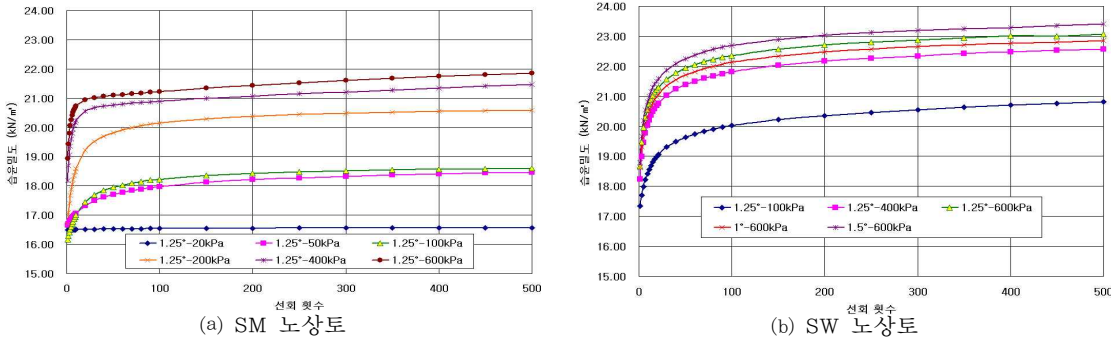
선회다짐기의 다짐특성을 평가하기 위해서 다짐하중과 선회다짐횟수를 적절히 조합하여, 현장에서 가져온 흐트러진 노상토를 이용하여 다짐을 수행하였다.

##### ① 선회다짐압력 변화에 따른 다짐특성

선회다짐기의 다짐압력에 따른 다짐효과를 평가하기 위하여 20kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa 및 600kPa를 이용하여 다짐을 시행하였고, 선회다짐횟수에 따른 밀도변화를 평가하였다. <그림 4>는 SM 및 SW 노상토의 선회다짐압력과 선회다짐횟수에 따른 다짐밀도의 변화를 나타낸 것이다. <그림 4>에서 알 수 있듯이 선회다짐기의 다짐압력이 클수록 다짐밀도는 커지는 경향을 나타내었다. 다짐조건이 같은 경우, 노상토의 종류에 따른 다짐효과는 SW 노상토의



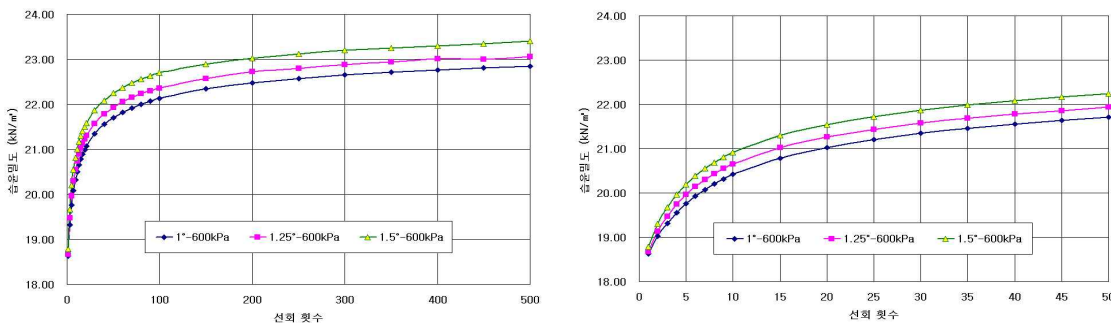
다짐효과가 SM 시료의 다짐효과보다 다소 크게 나타났다. <그림 4>을 통해 알 수 있듯이 선회다짐횟수가 약 100회 이상이 되면 다짐압력의 변화에 다소 무관하게 다짐밀도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는, 작은 선회다짐횟수에 대부분의 다짐효과가 나타나기 때문이다. 다짐 초기에 선회횟수에 따른 밀도 변화의 폭이 크게 나타났는데 이는 초기 접선의 기울기가 큰 것을 통해서도 확인 할 수 있다. 이러한 경향을 보이는 것은 초기의 다짐효과가 크기 때문인 것으로 판단된다. SM 노상토가 SW 노상토에 비해 초기다짐횟수에 더 민감하게 나타났다. 이는, SM 노상토가 SW 노상토에 비해 초기다짐효과가 더 큰 것으로 판단된다. 이렇듯 선회횟수가 클 경우에는 기울기가 완만한 형태로 일정하게 수렴을 하는 반면, 선회다짐을 시작한 초기에는 선회횟수에 따른 밀도변화가 크기 때문에 다짐압력과 선회횟수의 선정이 매우 중요한 작업이라는 것을 알 수 있다.



<그림 4> 노상.의 다짐압력별 다짐밀도 변화

② 선회다짐각 변화에 따른 다짐특성

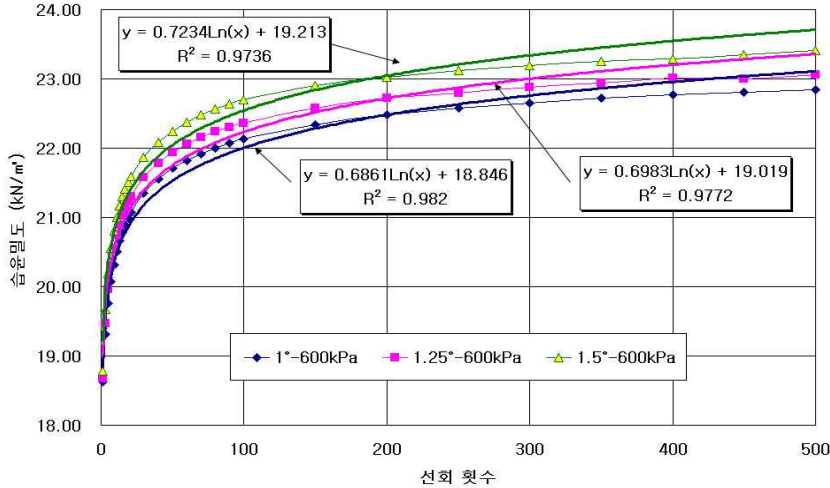
선회다짐기의 다짐각도에 따른 다짐효과를 평가하기 위하여 다짐각을 1도, 1.25도, 1.5도를 이용하여 다짐을 수행하였다. 선회다짐각의 변화에 따른 SW노상토의 다짐밀도변화를 <그림 5>에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이, 같은 크기의 다짐압력조건에서 선회다짐각이 커질수록 다짐밀도가 커짐을 알 수 있다. 선회다짐의 경우 초기다짐효과가 크기 때문에 다짐 초기에 선회횟수에 따른 밀도 변화의 폭이 크게 나타난다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 선회다짐기의 다짐각은 현장조건에서 현장 로울러의 크기 및 노상토의 다짐 정도에 따라 흙과 다짐 로울러간의 마찰 및 전단특성을 반영하는 항목이다. 따라서, 현장에서 다짐초기에는 다짐각이 커지고, 다짐이 진행됨에 따라 다짐각이 작아지는 특성을 보여준다. 선회다짐기의 경우 이를 모사하기 위해 단계별 다짐공법을 적용하여 다짐횟수와 다짐각의 상관관계를 정의할 수 있다.



<그림 5>-a 선회다짐각 변화에 따른 다짐밀도 변화

<그림 5>-b 선회다짐각 변화에 따른 다짐밀도 변화

선회다짐각 변화에 따른 다짐밀도 변화를 <그림 6>과 같이 추세선을 이용한 회귀분석을 통해 각 다짐각별 선회횟수에 따른 습윤밀도에 관한 방정식을 제시하였고 <표 6>에 정리하였다. 추세선과 함께 표시한 결정계수  $R^2$  값은 추세선의 예상 값이 실제 데이터에 어느 정도 가까이 일치 하는지를 나타내는 것으로 모두 0.97이상의 값으로 높은 신뢰도를 보이며 안정적인 값을 나타낸다.



<그림 6> 추세선을 이용한 선회다짐각 변화에 따른 다짐밀도 변화

<표 6> 선회다짐각 변화에 따른 다짐밀도 변화에 관한 추세선의 방정식

구 분	1° -600kPa	1.25° -600kPa	1.5° -600kPa
추세선의 방정식	$y = 0.6861 \ln(x) + 18.846$	$y = 0.6983 \ln(x) + 19.019$	$y = 0.7234 \ln(x) + 19.213$
결정계수 $R^2$	0.9820	0.9772	0.9736

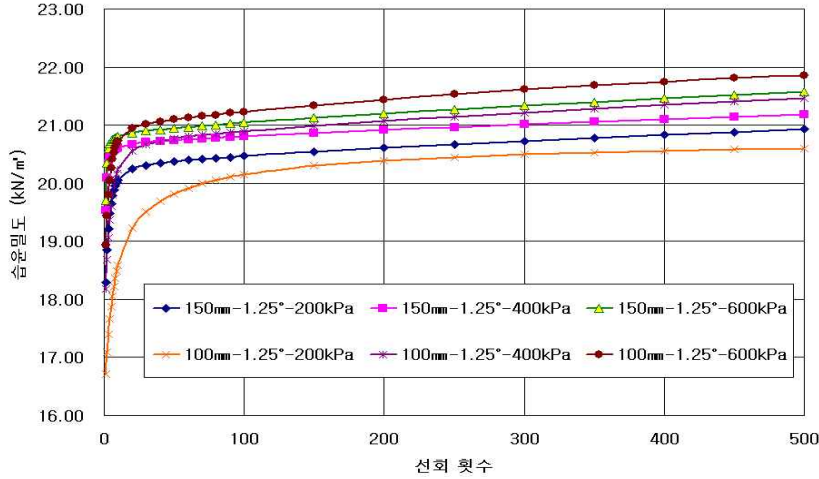
### ③ 시편의 크기에 따른 다짐특성

선회다짐기를 이용한 시험시편의 직경은 100mm와 150mm 두 가지로 제작 이 가능하고, 시편의 높이는 최대 200mm 까지 제작이 가능하다. 다만, 시편을 제작하는 과정에서 다짐밀도는 시편의 높이에 따라 민감하게 변하므로, 시편제작 시 하나의 시편제작에 사용되는 다짐 횟의 양을 일정하게 맞추는것이 매우 중요하다. <그림 7>은 다짐각도 1.25도에서 다짐압력을 200kPa, 400kPa, 600kPa로 변화시켰을 때, 시편의 크기에 따른 다짐밀도의 변화를 보여주고 있다. <그림 7>에 나타난 것과 같이 같은 크기의 다짐압력 적용 시 시편의 직경이 작을수록 다짐밀도가 큰을 알 수 있다. 지반공학분야에서의 실험시편의 직경이 보통 2.5cm에서 약 5cm임을 감안한다면, 역학적 시험을 위한 시편의 제작에 상당한 주의가 필요한 것으로 판단된다. 시편의 직경이 150mm인 경우가 100mm인 경우에 비해 초기다짐효과가 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 이는 시편의 직경이 클수록 초기 다짐에 더 민감하기 때문에 선회횟수 선정에 더 큰 주의를 요한다는 것을 의미한다.

선회다짐기는 시편을 제작하기 위해 시료를 몰드 안에 넣고 한 번에 다짐을 수행하기 때문에 시료의 안쪽과 바깥쪽, 위쪽과 아래쪽의 다짐밀도가 다소 차이가 있는 것이 단점으로 지적되고 있다. 시편의 상부와 하부의 다짐밀도를 확인하기 위해 SM과 SW 노상토에 대하여 각각 1.25도의 다짐각에 400kPa와 600kPa의 다짐압력을 주어 100회 선회다짐을 실시한 시편의 상부와 하부의 습윤밀도와 함수비를 체크해 보았다. <표 7>은 그 결과를 보여주고 있다. 상부와 하부에



대한 각각의 값들이 큰 차이를 보이지 않았지만 SM과 SW 노상토 모두에 대하여 대체로 시편의 하부의 다짐밀도가 상부에 비하여 약간 크게 나왔으며 함수비의 경우 상부가 하부에 비해 약간 크게 나왔다. 그리고 다짐압력이 600인 경우보다 400인 경우에 다짐밀도와 함수비의 상·하부의 차가 다소 큰 경향을 보였다. 이러한 선회다짐기의 단점은 향후에 개선되어야 할 것이다.



〈그림 7〉 다짐시편의 크기에 따른 다짐밀도 변화

〈표 7〉 선회다짐시편의 상·하부 습윤밀도 및 함수비 차

구 분		SM 노상토		SW 노상토	
		1.25° -400kPa	1.25° -600kPa	1.25° -400kPa	1.25° -600kPa
습윤밀도 ( $kN/m^3$ )	상부	19.82	19.89	18.21	18.51
	하부	20.19	20.12	18.78	18.87
표준편차	상부	0.54	0.15	0.52	0.10
	하부	0.27	0.11	0.16	0.19
상·하부 습윤밀도 차		0.37	0.23	0.57	0.36
함수비 (%)	상부	18.02	18.18	11.63	11.09
	하부	17.40	17.65	11.14	10.98
표준편차	상부	0.49	0.76	0.10	0.23
	하부	0.29	0.20	0.19	0.15
상·하부 함수비 차		0.62	0.53	0.49	0.11

#### 4.4 현장다짐시험

유효다짐너비는 노상토를 다짐을 할 때 최초의 다짐너비와 다짐후의 너비를 평균한 값으로, 0.2m이다. 현장다짐기기의 평균 다짐전압은 머캐덤 로울러의 경우 600kPa, 탠덤 로울러와 타이어 로울러의 경우 약 400kPa나온다. 현장다짐기기의 평균 다짐압력을 선회다짐시험에 적용하였다. 주어진 다짐전압을 이용하여 현장 들밀도 조건과 같은 다짐밀도를 맞추어 다짐을 시행하였고, 400kPa 와 600kPa로 압력을 주었을 때의 현장 들밀도 값인  $2.03g/cm^3$ 에 해당하는 선회회수는 1~2회 정도이다.



## 5. 결론

본 연구는 현장의 다짐조건을 잘 모사할 수 있는 선회다짐기로 다짐한 노상토의 특성을 기존의 충격 다짐방법에 의한 다짐 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 Proctor 다짐시험 결과, SM 노상토의 경우 A 다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 17.70%, 17.062  $kN/m^3$ 이며 D 다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 15.20%, 18.430  $kN/m^3$ 이다. SW 노상토의 경우 A다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 12.42%, 19.168  $kN/m^3$ 이며 D다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 9.76%, 20.206  $kN/m^3$ 이다.

② 선회다짐기를 이용한 노상토의 다짐특성을 평가한 결과 선회다짐압력이 클수록, 선회다짐각이 커질수록, 시편의 직경이 작을수록 다짐효과가 크게 나타났다. 그리고 다짐조건이 같은 경우, 노상토의 종류에 따른 다짐효과는 SW 노상토의 다짐효과가 SM 노상토의 다짐효과보다 다소 크게 나타났다.

③ 선회다짐의 경우 초기다짐효과가 커서 다짐 초기에 선회횟수에 따른 밀도변화의 폭이 크게 나타났는데 SM 노상토가 SW 노상토에 비해 초기다짐효과가 더 큰 경향을 보였고 시편의 직경이 클수록 초기다짐효과가 더 큰 경향을 보였다.

④ 현장다짐기기의 평균다짐압력 400kPa와 600kPa를 선회다짐시험에 적용하였다. SM 노상토의 경우, 400kPa와 600kPa로 압력을 주었을 때의 현장 들밀도 값인 19.91  $kN/m^3$ 에 해당하는 선회다짐횟수를 이용하였고 SW 노상토의 경우, 400kPa와 600kPa로 압력을 주었을 때의 현장 들밀도 값인 20.88  $kN/m^3$ 에 해당하는 선회다짐횟수를 이용하였다.

### 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.