한국방재학회논문집
제9권 1호 2009년 2월
pp. 33 ~ 40

선회다짐곡선특성을 이용한 노상토의 다짐도 평가

Evaluation of Compaction Properties of Subgrade Soil by Gyratory Compaction Curve

이관호* · 차민경** · 임유진***
Lee, Kwan-Ho · Cha, Min-Kyung · Lim, Yu-Jin

Abstract

Compacted soil are used in almost roadway construction with compaction of soil. The direct consequence of soil compaction is densification, which in turn results in higher strength, lower compressibility, and lower permeability. The standard and modified Proctor tests are the most common methods. Both of these tests utilize impact compaction, although impact compaction shows no resemblance to any type of field compaction and is ineffective for granular soils. It has been dramatic advances in field compaction equipment. Therefore, the Proctor tests no longer represent the maximum achievable field density. The main objectives of this research are a survey of current field compaction equipment, laboratory investigation of compaction characteristics, and field study of compaction characteristics. The findings from the laboratory and compaction program were used to establish preliminary guidelines for suitable laboratory compaction procedures.

Key words **:** Fill materials, Roadway construction, Compaction, Gyratory compaction, Proctor compactor

요 지

입상재료를 이용한 도로의 시공은 주로 다짐을 이용한다. 다짐으로 인한 효과는 흙의 강도증진, 압축변형감소, 투수계수감소 등이 있다. 현재 사용하는 다짐은 주로 프록터 다짐기를 이용한 표준 및 수정다짐방법을 이용한다. 프록터 다짐기는 주로 충격에너지를 이용하여 다짐효과를 구현하는데, 이는 현장의 다짐기기에 의한 다짐조건과 상이하며, 최대건조밀도를 맞추는데 상당한 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 선회다짐기를 이용한 흙의 다짐평가를 시행하였다. 본 연구의 목적은 현장다짐장비의 조사, 실내다짐방법의 다짐특성 평가, 현장다짐특성을 평가하여, 선회다짐기를 이용한 새로운 다짐평가방법을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 다짐재료, 도로시공, 다짐, 선회다짐기, 프록터다짐기

1. 서 론

현재 사용하고 있는 AASHTO 포장 설계법(1972)에서는 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 실내실험은 주로 '충격다짐방법'을 적용한 Proctor다짐(A다짐 또는 D다짐)이 이용되고 있다. 그러나, 현장의 경우 로울러를 이용한 압착형태의 다짐방법이 이용된다. 이러한 실내다짐방법과 현장다짐방법의 차이는 결국 실내실험으로부터 결정된 노상토의 물성치 적용시 상당한 오차를 포함함을 의미한다.

최근 아스팔트 혼합물의 배합설계법은 기존에 주로 사용하던 빔 및 마샬 배합설계법에서 수퍼페이브 배합설계법(Blankenship, 1994, FHWA, 1995)으로 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 1.0 m의 흙부분으로 포장과 일체로 구성되며 포장체에 작용하는 하중을 최종적으로 지지

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수 (E-mail: kholee@kongju.ac.kr)
**경성대학교 건설환경공학부 석사
***정회원 · 배재대학교 건설환경공학부 부교수

하는 층이다. 따라서, 수퍼페이브 배합설계법에서 사용하는 선회다짐기를 포장과 일체로 구성되는 노상의 다짐시험에도 적용한다면 각각의 포장층에 같은 원리의 다짐방법을 적용한다는 큰 의미가 있을 것으로 판단된다(박태성 등, 2007, Browne, 2006, Harris et al., 2006). 이에 본 연구는 실내 Proctor 다짐시료, 선회다짐기를 이용한 다짐시료 및 현장에서 블록 샘플링하여 채취한 시료를 이용하여 국내 대표적인 노상토인 화강풍화토의 다짐방법에 따른 지반 및 도로공학적 물성치를 평가하기위해 시행되었다. 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. 특히, 선회다짐기를 이용한 다짐곡선을 좀더 세밀히 분석하여, 노상토의 다짐도 및 다짐특성 평가의 하나의 대안으로 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2.다짐기기의 종류 및 특징

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 1과 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(남상욱, 2002).

다짐기계의 유효다짐 폭(W)과 다짐속도(V)의 관계는 표 1에, 소요다짐 횟수(N) 및 다짐두께(D)에 대한 기준은 표 2에 나타내었다(건설교통부, 2000).

2.3 선회다짐기

일반적으로 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. 선회다짐기는 수직압력과 회전각, 그리고 현장 다짐장비와 장래의 교통량을 재현하기 위한 회전수를 조절 할 수 있는 장비이다. 선회다짐기를 개발한 주요 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다.

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

표 1. 다짐기계의 유효다짐 폭과 다짐속도

구분 / 다짐기계	규 격 (ton)	유효다짐폭 (m)	표준 다짐속도 (*km / hr*)		
			노체, 축제 노상	보조기층 기층	표층
머캐덤 로울러 울러	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, 양족식 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	

(a) 시프스 풋 로울러

(b) 진동로울러

(c) 플레이트 콤팩터

그림 1. 다짐방법에 따른 다짐로울러의 종류

표 2. 소요다짐횟수 및 다짐 두께

구분 / 공종		다짐 두께 (cm)	다짐 기계	규격 (ton)	다짐 횟수	다짐도 (%)
노체		30	진동 로울러	10	6	90 이상
			타이어 로울러	8~15	4	
노상		20	진동 로울러	10	6	95 이상
			타이어 로울러	8~15	4	
보조기층		15~20	진동 로울러	10	8	95 이상
			타이어 로울러	8~15	4	
기층 (AC 안정처리)		7.5~10	머캐덤 로울러	10~12	4	96 이상
			타이어 로울러	8~15	10	
			탠덤 로울러	10~14	4	
표층		5	머캐덤 로울러	8~10	2	96 이상
			타이어 로울러	8~15	10	
			탠덤 로울러	10~14	4	
저수지	심벽	20	양족식 로울러 (자주식)	19	10	95 이상
	점토	30		19	8	95 이상
	성토					
축제		30~50	불도저	12~19	6	80 이상

미국의 전략적 도로연구사업(SHRP, Strategic Highway Research Program) 중의 하나인 다짐방법의 개선연구에서는 기존의 미육군공병단에서 개발된 선회다짐기를 개량하여 시험시편만을 제작하는 용도의 선회다짐기를 개발하였다(Lee, 1996, Butcher, 1997, Hinrichsen, 2000, Mallick, 2000).

본 연구에 이용된 선회다짐기는 SHRP의 수퍼페이브 다짐기준을 만족하는 장비로서, 국내에 도입되어 사용되고 있는 선회다짐기의 종류로 Servopac 선회다짐기를 이용하였다. 본 연구에 이용된 Servopac 선회다짐기 구성요소는 그림 2(a)에 나타내었고, 선회다짐시 작용하는 하중조건은 그림 2(b)에 나타내었다. 중요 제원은 표 3과 같다. 다짐방법은 현장에서 다짐 로울러에 의해 다짐되는 현상과 같이 몰드안의 시료에 압축력과 다짐몰드의 회전에 의해 발생하는 전단력을 작용시켜 다짐을 수행한다. 다짐과정은 컴퓨터와 연결되어 제어되며, 다짐중의 시편의 높이, 다짐횟수, 다짐압력, 다짐밀도 등이 실시간으로 표시된다.

표 3. 선회다짐기의 중요제원

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

3. 실험재료의 기본물성

3.1 흙의 기본물성

흙의 분류는 위에서 구한 기본 물성치를 이용하여 KS F 2324 의 통일분류법을 이용하여 구하였다. 노상토의 입도분포곡선은 그림 3, 토질실험결과는 표 4에 나타난 것과 같다. 비중은 KS F2308에 의해서 시험하였으며, 비중값은 2.70이다. 액성한계 및 소성한계는 KS F 2303 & 2304 규정에 따라 수행하였고, 결과 값을 나타내었다(박승목과 이관호, 2003).

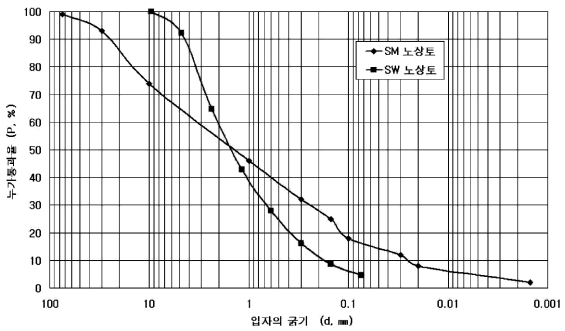
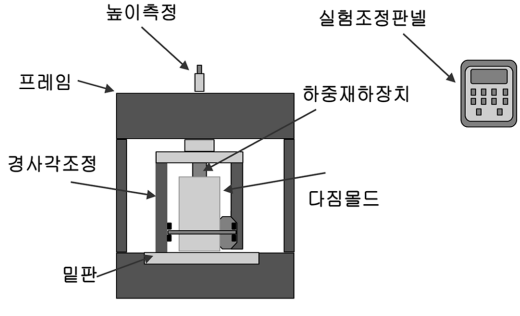
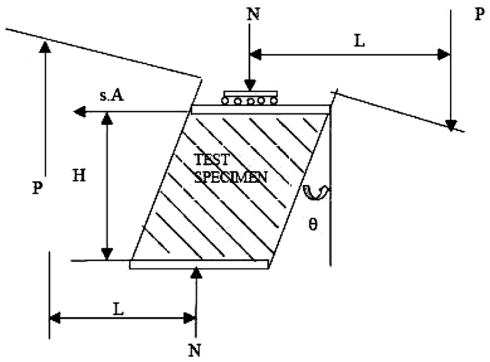


그림 3. 노상토의 입도분포곡선



(a) 선회다짐기의 구성요소



(b) 선회다짐시 하중조건

그림 2. 선회다짐기

표 4. 노상토의 기본물성 시험결과

시험구분	분석항목	SM 노상토	SW 노상토
비중	비중	2.700	2.650
액소성 시험입도분석 입도분석	액성한계	28.7%	-
	소성한계	23.9%	-
	소성지수	4.80%	NP
	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

3.2 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 5에 나타내었다.

3.3 선회다짐기 다짐특성시험

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

표 5. Proctor 다짐시험 결과

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

효과가 SM 시료의 다짐효과보다 다소 크게 나타났다. 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.

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 5에 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

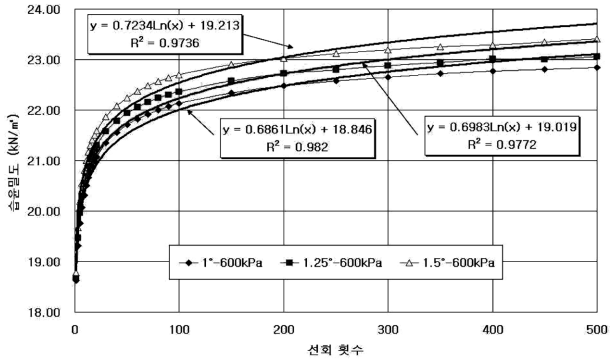
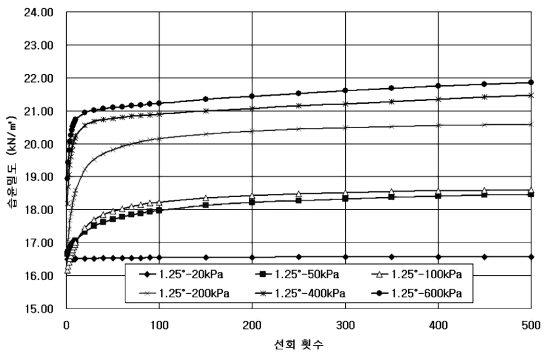
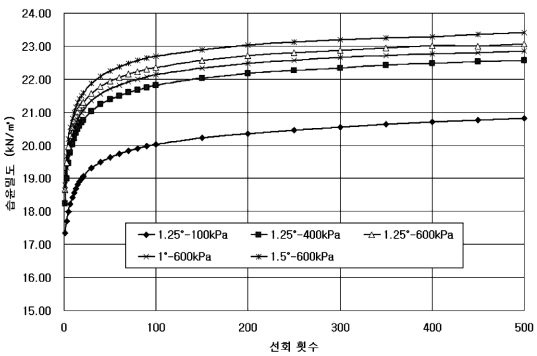


그림 5. 추세선을 이용한 다짐각과 다짐밀도 변화 특성



(a) SM 노상토



(b) SW 노상토

그림 4. 노상토의 다짐압력별 다짐밀도변화

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.

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

3) 다짐시편 상의 다짐밀도 차이 분석

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 400 kPa와 600 kPa의 다짐압력을 주어 100회 선회다짐을 실시한 시편의 상부와 하부의 습윤밀도와 함수비를 체크해 보았다. 표 7은 그 결과를 보여주고 있다. 상부와 하부에 대한 각각의 값들이 큰 차이를 보이진 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.

4. 선회다짐기 다짐곡선을 이용한 다짐특성평가법

4.1 다짐곡선을 이용하여 단계별 다짐효과 평가

그림 6은 각각의 노상토의 다짐곡선으로부터 선회다짐곡선의 초기다짐 구간의 기울기와 안정화되는 구간의 기울기를 이용하여 두 개의 기울기를 표시하는 직선이 만나는 점을 초기다짐(1차다짐)과 2차 다짐구간을 구분하는 것으로 정의하였다. 이는 지반공학에서 흙의 압축으로 인해 발생하는 시간-변위 그래프상의 다짐과정을 구분하는 것을 선회다짐곡선에 적용하여 이용한 것이다.

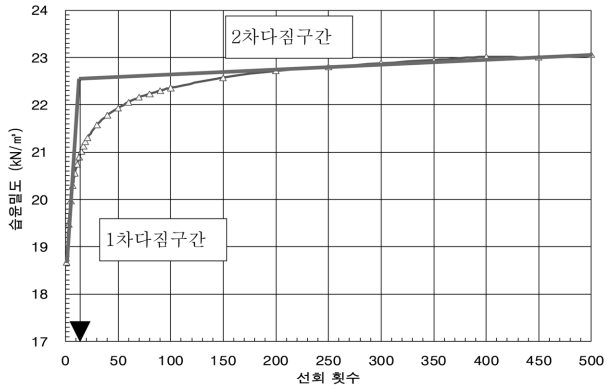


그림 6. 다짐곡선을 이용한 1차 다짐구간과 2차 다짐구간의 구분

다짐압력이 커짐에 따라 1차다짐 구간의 선회다짐횟수가 작아지고, 2차 다짐구간이 커지는 경향을 나타내었다. 동일한 선회다짐압력 적용 시 선회다짐각이 커짐에 따라 1차 다짐구간이 작아지고, 2차 다짐구간이 커지는 효과를 나타내었다. 이는 현장다짐조건을 적용시 다짐장비가 커짐에 따라 1차다짐 효과가 커지고, 다짐장비가 작아짐에 따라 2차 다짐효과가 커짐을 의미한다.

4.2 다짐곡선의 기울기를 이용한 다짐특성 평가

선회다짐기기의 다짐곡선의 기울기(SGC Compaction Slope)를 이용하는 방법이다. 선회다짐기의 다짐곡선은 주로 골재 또는 노상토의 입도에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 방법은 다짐곡선을 로그축의 선회다짐횟수와 일반대수

표 6. 다짐밀도 평가를 위한 추세선 및 방정식 (x : 선회다짐횟수, y : 습윤밀도)

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

표7. 선회다짐시편의 상 · 하부 습윤밀도 및 함수비 차

구 분		SM 노상토		SW 노상토	
		1.25°-400 kPa	1.25°-600 kPa	1.25°-400 kPa	1.25°-600 kPa
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

축의 밀도(kN/m^3) 상에서 각각의 다짐곡선의 기울기(k_{SGC})를 평가하는 것이다. 각각의 다짐곡선의 기울기는 선회다짐기기에서 다짐이 되는 동안 다짐에 대한 저항능력을 나타내는 것이다. 이는 현장에서 다짐롤러를 이용하여 다짐을 하는 과정을 잘 모사한다고 볼 수 있다. 일반적으로 입자의 형상이 각이 지고, 표면조직이 거칠수록 원형 입자에 비해 다짐에 대한 저항능력이 커진다.

표 7은 각각의 노상토의 다짐곡선으로부터 선회다짐횟수에 따른 곡선의 기울기를 정리한 것이다. 그림 7은 선회다짐곡선의 기울기를 표시한 것이고, 추세선을 이용하여 전체를 대표하는 곡선의 방정식을 거듭제곱 형식을 이용하여 결정하였다. 결정된 추세선의 방정식은 신뢰도 96% 수준으로 상당히 높은 값을 나타내었다. 그림 7에 나타난 것과 같이 선회다짐곡선의 기울기는 동일한 흙에서 선회다짐압력과 다짐각의 변화를 고려할 때, 하나의 대표곡선으로 정의할 수 있다. 이러한 결과는 마치 기준값을 이용하여 정규화한 것과 같은 효과를 보여줌을 의미한다.

4.3 선회다짐곡선을 이용한 다짐에너지

선회다짐기의 다짐횟수와 다짐곡선과의 상관관계를 이용하는 이 방법은 주로 선회다짐비(Gyratory Ratio)를 이용하는 것이다. 특히, Bahia는 그림 8과 같은 다짐곡선을 이용한 에너지 해석법을 제시하였다. 선회다짐시 다짐에너지는 다짐시편의 부피변화를 만들고, 이러한 다짐에너지는 주로 입자의 형상 및 입도에 큰 영향을 받는다. 다짐동안의 전단응력은 다짐되는 입자의 마찰특성과 밀접한 관계를 나타낸다. 마찰저항이 클수록 다짐에너지는 증가하고, 다짐이 어려워진다고 볼 수 있다. 이러한 다짐에너지 조건을 노상토의 다짐조건에 반영하기 위하여 다짐회수를 증가시켜 다짐에너지를 평가하였다.

선회다짐곡선을 이용한 다짐에너지는 그림 2(b)와 같은 힘의 합력조건을 이용하여 결정할 수 있다. 선회다짐기를 이용한 다짐은 다짐하는 동안 동일한 크기의 연직방향압력이 작용되고, 연직방향압력을 이용한 다짐에너지는 다음과 같다.

$$W_v = P_v \times \Delta H \tag{1}$$

$$P_v = p_v \times A \tag{2}$$

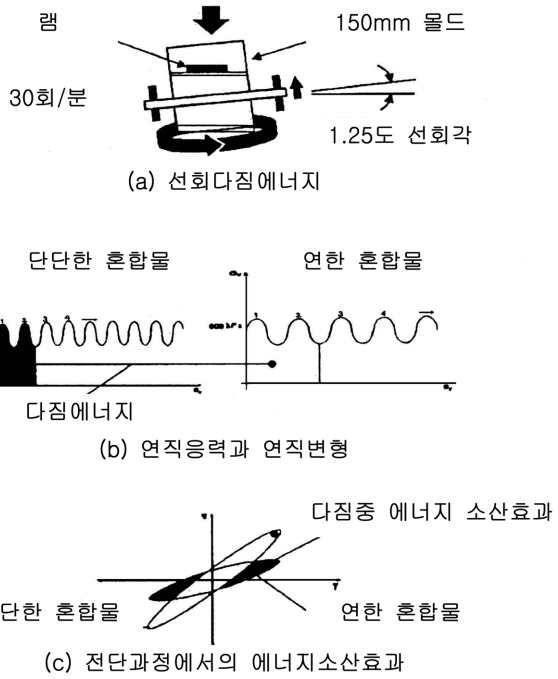


그림 8. 다짐에너지 해석법(Bahia 등, 1998)

$$\Delta H = H_{before} - H_{after} \tag{3}$$

$$w_v = \frac{w_v}{V} \tag{4}$$

여기서,

W_v : 다짐하중 P_v과 시편의 높이 변화를 고려한 다짐에너지 (kgfcm)

P_v : 다짐하중(kN)

p_v : 선회다짐기 다짐압력 (kPa)

A : 시편의 단면적 (cm^2)

H : 시편의 다짐전 초기높이와 다짐후 높이의 차이

w_v : 다짐압력에 의해 결정된 단위 일량(unit work)

V : 다짐 후 시편의 부피(cm^3)

그림 9는 선회다짐 1회 증가에 따른 구간별 다짐에너지 변화를 보여주고 있다. 다짐압력이 클수록 초기 다짐에너지의

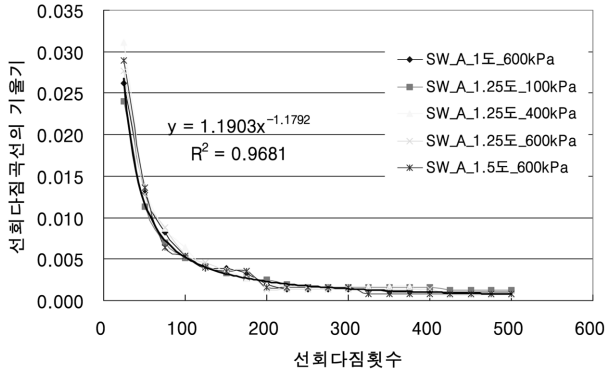


그림 7. 선회다짐횟수와 다짐곡선의 기울기 특성

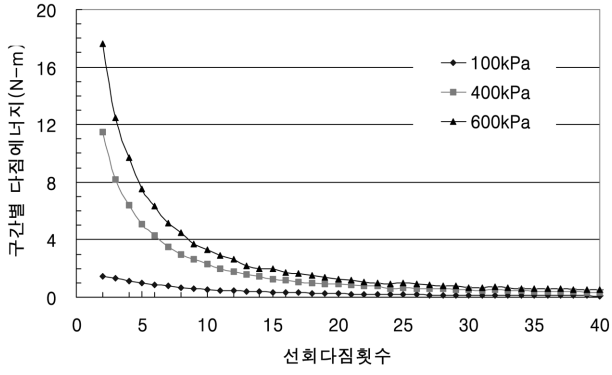


그림 9. SW 흙의 다짐구간별 다짐에너지 변화

사용량이 커지고, 이로 인한 다짐효과가 커짐을 알 수 있다. 전체적으로 약 20-30회 선회다짐회수 범위에 이르면, 구간별 다짐에너지의 변화가 매우 작아지는 경향을 나타내며, 이는 다짐으로 인한 시편의 부피변화가 상대적으로 작음을 의미한다. 그림 10은 누적된 다짐에너지를 시편의 부피로 나누어준 단위부피당 누적된 다짐에너지를 보여주고 있다. 그림에 나타난 것과 같이 선회다짐곡선과 거의 동일한 경향을 나타내고 있다.

4.4 현장들밀도 시험결과와 비교

프록터 A 및 D 다짐시험에서 결정된 최적함수비(OMC)를 이용하여 선회다짐을 시행하였다. 그림 11은 SW흙에 프록터

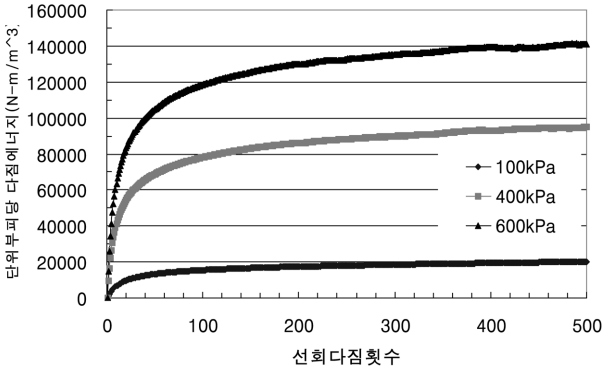


그림 10. SW 흙 시편의 단위부피당 다짐에너지 누적 변화량

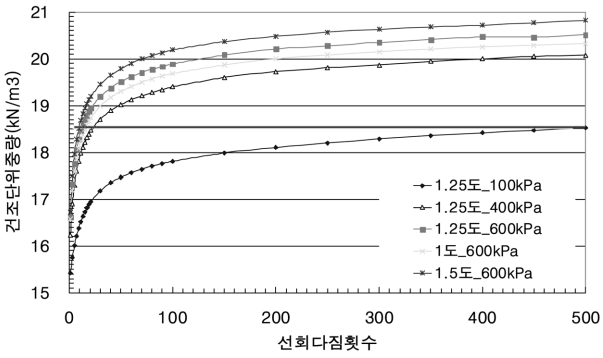


그림 11. Proctor-D다짐 OMC를 적용한 SW흙의 선회다짐시험

다짐결과를 적용하여 선회다짐시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. OO 지역도로건설현장에서 수행한 다짐 후 들밀도 시험결과 평균건조단위 중량은 18.54 kN/m^{3}이다. 선회다짐기를 이용한 다짐시 현장에서 측정한 평균 건조단위중량을 재현할 수 있는 선회다짐횟수를 결정하여 표 8에 나타내었다.

5. 결 론

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 제

표 8. 흙의 종류별 선회다짐곡선의 기울기

흙종류	SW_D다짐 OMC 적용					SW_A다짐 OMC 적용				
선회각	1도	1.25도	1.5도	1도	1.25도	1.5도				
압력 / 선회수	600 kPa	100 kPa	400 kPa	600 kPa	600 kPa	600 kPa	100 kPa	400 kPa	600 kPa	600 kPa
25	0.0262	0.0240	0.0311	0.0277	0.0289	0.0260	0.0207	0.0230	0.0240	0.0240
50	0.0131	0.0113	0.0139	0.0128	0.0137	0.0109	0.0090	0.0100	0.0102	0.0090
75	0.0083	0.0070	0.0087	0.0088	0.0064	0.0058	0.0050	0.0060	0.0052	0.0052
100	0.0053	0.0052	0.0064	0.0054	0.0054	0.0038	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
125	0.0039	0.0042	0.0040	0.0046	0.0040	0.0030	0.0029	0.0030	0.0028	0.0028
150	0.0039	0.0033	0.0037	0.0037	0.0036	0.0025	0.0019	0.0020	0.0024	0.0024
175	0.0033	0.0027	0.0027	0.0037	0.0036	0.0025	0.0015	0.0016	0.0013	0.0010
200	0.0020	0.0025	0.0020	0.0013	0.0016	0.0014	0.0013	0.0015	0.0011	0.0004
225	0.0013	0.0020	0.0017	0.0013	0.0016	0.0014	0.0010	0.0011	0.0010	0.0010
250	0.0013	0.0016	0.0017	0.0013	0.0016	0.0014	0.0007	0.0011	0.0010	0.0010
275	0.0013	0.0016	0.0017	0.0013	0.0016	0.0014	0.0004	0.0008	0.0010	0.0010
300	0.0013	0.0016	0.0017	0.0013	0.0016	0.0005	0.0004	0.0008	0.0010	0.0010
325	0.0013	0.0016	0.0017	0.0013	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
350	0.0010	0.0016	0.0017	0.0013	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
375	0.0010	0.0016	0.0017	0.0013	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
400	0.0010	0.0016	0.0007	0.0013	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
425	0.0010	0.0013	0.0007	0.0007	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
450	0.0010	0.0013	0.0007	0.0007	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
475	0.0010	0.0013	0.0007	0.0007	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006
500	0.0010	0.0013	0.0007	0.0007	0.0008	0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0006

표 9. Proctor A 및 D 다짐과 동일한 건조단위중량을 구현하는 선회다짐횟수 결정

흙종류	SW _ Proctor A 다짐 OMC 적용					SW _ Proctor D 다짐 OMC 적용				
선회각(도)	1	1.25	1.5	1	1.25	1.5				
압력(kPa)	600	100	400	600	600	600	100	400	600	600
선회다짐횟수	40	-	55	27	23	16	500	24	12	10

시하는데 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 이며 D 다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 15.20%, 18.430이다. SW 노상토의 경우 A다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 12.42%, 19.168이며 D다짐에 대한 최적함수비와 최대건조단위중량은 9.76%, 20.206이다.
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) 다짐압력이 클수록 초기 다짐에너지의 사용량이 커지고, 이로 인한 다짐효과가 커짐을 알 수 있다. 전체적으로 약 20~30회 선회다짐회수 범위에 이르면, 구간별 다짐에너지의 변화가 매우 작아지는 경향을 나타내며, 이는 다짐으로 인한 시편의 부피변화가 상대적으로 작음을 의미한다. 누적된 다짐에너지를 시편의 부피로 나누어준 단위부피당 누적된 다짐에너지 특성은 선회다짐곡선과 거의 동일한 경향을 나타내고 있다.
5) 다짐곡선으로부터 선회다짐횟수에 따른 곡선의 기울기는 선회다짐횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 추세선을 이용하여 전체를 대표하는 곡선의 방정식을 거듭제곱 형식을 이용하여 결정하였고, 신뢰도는 96% 수준으로 상당히 높은 값을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 스마트하이웨이사업단 '도로구조의 내구성 향상 방안' 과제의 지원을 받아 연구되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(2000), **도로설계편람(II)**, pp. 405.1 - 405.9
김용필 등 (2002), **지반공학시험 이론과 실무**, 세진사, pp. 800
남상욱 (2002), 토목시공학, 청운문화사, pp. 158-168
박승목, 이관호(2003), **다짐방법에 따른 노상토의 설계입력변수 특성 연구**, 대한토목학회, 23권 4D, pp. 439-448
박태성, 이관호, 이병식, 현성철 (2007), **선회다짐기 다짐곡선을 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성 평가**, 한국방재학회, 7권 3호, pp. 59-68
AASHTO (1996), Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, June 1996 Edition, pp. 150
Bahia, H.U., Timothy P. Friemel1, Pehr A. Peterson1, Jeffrey S. Russell1, and Brian Poehnelt (1998), *Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor*, AAPT, Vol. 67, pp. 189-213
Blankenship, P.B., K. C. Mahboub, G. A. Huber, Rational Method for Laboratory Compaction of Hot-Mix Asphalt, Transportation Research Record 1454, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1994, pp. 144-153.
Browne, M. J. (2006), *Feasibility of using gyratory compactor to determine compaction characteristics of soil*, Montana State University, Master Thesis, pp. 126
Butcher, M. (1997), *Determining Gyratory Compaction Characteristics using the Servopac Gyratory Compactor*, TRB, Vol. 1630, pp. 89-97
FHWA (1995), *Superpave Level 1 Mix Design, Asphalt Institute*, FHWA Publication Series No. 2, Publication Number (SP-2), February, pp. 170
Harris, P., Holdt, J.V., Sebesta, S., and Scullion, T. (2006), *Recommendations for stabilization of high sulfate soil in Texas*, FHWA/TX_06/0_4240_3, pp. 62
Hinrichsen, J. (2000), *A Comparison of Four Brands Superpave Gyratory Compactor*, TRB, Vol. 1767, pp. 167-172
Lee, K. (1996), *The use of waste materials in hot mix asphalt,* Ph.D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Purdue Univ., W. Lafaytte, IN, USA
Mallick, R. B. (2000), *Use of Superpave Gyratory Compactor to Characterize Hot Mix Asphalt (HMA)*, TRB, Vol. 1681, pp. 86-96
Ortolani, L. and Sandberh, H. A. (1952), *The Gyratory Shear Method of Modeling Asphaltic Concrete Test Specimens ; Its Development and Correlation with Field Compaction Methods*, Proceeding, AAPT, Vol. 21, pp. 280-297.

◎ 논문접수일 : 08년 11월 7일
◎ 심사의뢰일 : 08년 11월 10일
◎ 심사완료일 : 08년 12월 16일