



선회다짐기의 설계 다짐횟수 선정을 위한 연구

A Study for Selecting the Design Number of Gyration of Gyrotory Compactor

김 부 일*

이 문 섭**

Kim, Boo il

Lee, Moon Sup

Abstract

The design number of gyration is required in the process of asphalt mix design using gyratory compactor. The purpose of this study is to select the design number of gyration for asphalt mix design in the laboratory. Three types of methods were used to select the design number of gyration. The first method is to select the gyration number which gives the same density with the mixtures compacted with 75 blows of Marshall Compaction. The second method is to select the gyration number which gives the same deformation strength with the mixtures compacted with 75 blows of Marshall Compactor. The third method is to select the gyration number which meet the 4% air voids. Ten mixtures, one type of aggregate(granite), one type of asphalt binder(pen. 60-80), and 10 types of gradation, were prepared for the laboratory tests. As a result, 100 number of gyration was selected for the design number of gyration of the asphalt mix design. This result shows a similar trend with the design number of gyration used in the foreign countries. Thus, the design number of gyration selected in this study can be used for the asphalt mix design using the gyratory compactors.

Keywords : asphalt mix design, gyratory compaction, design number of gyration

요 지

선회다짐기를 이용하여 아스팔트 혼합물의 배합설계를 하는 경우 선회다짐기의 설계 다짐횟수가 필요하다. 본 연구는 이러한 선회다짐기의 설계 다짐횟수를 결정하는데 그 목적이 있다. 선회다짐횟수의 선정을 위하여 세 가지 방법을 이용하였다. 첫 번째 방법은 Marshall 다짐기로 75회 다짐된 혼합물의 밀도와 동일한 밀도를 주는 선회다짐횟수를 선정하는 것이며, 두 번째 방법은 Marshall 다짐기로 75회 다짐된 혼합물의 변형강도와 동일한 변형강도를 주는 선회다짐횟수를 선정하는 것이다. 세 번째 방법은 선회다짐횟수에 따른 공극률을 측정하여 공극률 4%에 해당하는 다짐횟수를 찾아 결정하는 방법이다. 실내 실험을 위해 총 10가지 종류의 아스팔트 혼합물(1가지 골재×10가지 입도×1가지 아스팔트 바인더)이 제작되었다. 세 가지 방법을 종합한 결과, 아스팔트 혼합물의 배합설계를 위한 설계 선회다짐횟수는 100회로 결정되었다. 이러한 결과는 외국에서 사용되고 있는 설계 선회다짐횟수와 유사한 경향을 보이는 결과로, 향후 국내에서 선회다짐기를 이용한 아스팔트 혼합물의 배합설계가 이루어질 경우 적용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 아스팔트 배합설계, 선회다짐, 설계 선회 다짐횟수

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 선임연구원 · 공학박사

** 정희원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 연구원 · 공학석사



1. 서론

미국에서 새롭게 개발되고 있는 아스팔트포장 설계법(NCHRP 1-37A Guide)이나 국내에서 개발되고 있는 한국형 포장설계법 등에서는 기존의 경험적 개념에서 탈피하여 포장의 공용성 예측이 가능한 역학적-경험적인 설계법으로 발전하고 있다. 또한, 1994년 SHRP에서는 교통량과 교통하중의 증가에 따라 새롭게 개선된 배합설계방법의 필요성이 대두되어 새로운 배합설계가 개발되었다. 새로운 방법은 다양한 교통량과 축하중 그리고 환경조건에 대하여 혼합물을 합리적으로 설계할 수 있는 방법으로써 여러 가지 시험법과 그 결과 값을 소성변형, 온도균열, 그리고 피로균열을 예측할 수 있는 방법으로 개발되었다. 아스팔트 혼합물을 실내에서 다지는 방법도 실제 현장에서 다지는 방법과 유사하게 재현하기 위하여 새로운 다짐장치인 선회다짐기를 개발하였다. 하지만, 국내에서는 아직까지 Marshall 배합설계법을 사용하고 있으며, 배합설계에 사용하는 다짐기는 특정한 조건에서 개발된 경험적인 방법으로 다짐방법도 다짐봉의 충격에너지를 이용하여 시료를 다지기 때문에 실제의 현장 작업조건과는 많은 차이가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 김부일 등(2006)은 배합설계에 선회다짐기를 도입하는 연구를 수행하였다. 또한, 미국은 선회다짐기를 도입하면서 선회다짐횟수를 선정하는 방안으로 현장코어를 채취하여 현장밀도와 다짐밀도를 비교하여 선정하였고, 호주는 Marshall 다짐과 동일한 밀도를 나타내는 선회다짐횟수를 찾는 연구를 수행하여 결정하였다. 이와 같이 외국에서도 선회다짐횟수를 선정하는 방안이 밀도를 기준으로 하는 경험적 한계를 벗어나지 못하고 있으며, 국내에 도입하기 위해서는 많은 검증을 통하여 적용해야하는 문제점을 가지고 있다.

따라서, 경험적인 배합설계를 벗어나 경험적-역학적 배합설계를 개발하기 위해서는 선회다짐기의 도입이 필수불가결하며, 이에 본 연구는 아스팔트 배합

설계에 적용할 수 있는 선회다짐기의 설계 다짐횟수 결정의 기초적인 연구를 수행하는데 그 목적이 있다.

2. 기술동향

2.1 선회다짐기의 개발과 적용현황

가열 아스팔트 혼합물의 품질평가를 효율적으로 하기 위하여 미국 공병단이 GTM(Gyratory testing machine)장비를 개발하였다(아스팔트 포장공학 원론). GTM은 건설현장의 롤러작용을 재현하는 니딩(Kneading) 방법으로 가열 아스팔트 혼합물을 다지는 특성을 지니고 있다. GTM은 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계나 품질관리에 이용될 수 있으며 현장에서 발생하는 궁극적인 밀도를 얻는데 적합하다. 그리고, 어떤 종류의 타이어 압력도 융통성있게 재현할 수 있으며, 밀도증가에 따른 혼합물의 반응변화를 추적할 수 있는 유일한 장비이다. 이러한 사실은 교통하중으로 인한 밀도의 증가에 관한 연구나 그 효과에 매우 중요하다.

1994년 SHRP에서 수퍼페이브 배합설계를 개발하면서 GTM이 본격적으로 사용되기 시작하였다. 수퍼페이브 배합설계의 주요 골자는 아스팔트 바인더와 혼합물의 점탄성 특성을 충분히 고려한 새로운 시험방법과 일련의 시험장비의 개발이었다. SHRP은 GTM을 바탕으로 선회다짐기를 개발하였고, GTM과 달리 다짐용으로만 사용하였다. 수퍼페이브 선회다짐기는 수직압력, 선회각, 선회다짐횟수의 3가지 요소로 혼합물의 다져진 다짐결과를 조절하여 사용한다.

2.2 외국의 선회다짐기의 설계다짐횟수 선정방법

2.2.1 미국

수퍼페이브 배합설계가 1994년에 처음으로 발표되었을 당시, 4종류의 기후조건과 7개의 교통량



조건을 나타내기 위해 총 28개의 설계다짐횟수를 결정하였다. 1999년에 The Federal Highway Administration Superpave Mixture Expert Task Group은 초기의 28개 다짐 레벨에 대한 실내 실험결과들을 현장조건과 비교검증할 수 없었기 때문에 혼합물의 용적특성을 통하여 4개의 다짐 레벨로 통합하였다. 다짐 레벨을 통합하기 위하여 총 16개 주의 40개의 현장에서 코어를 채취한 후 실내 실험 및 분석이 수행되었다. 교통량, 바인더 등급, 골재 종류를 달리하여 평가되었으며, 포장수명에 따른 밀도변화를 평가하기 위하여 2년 후 최종밀도에 도달한 포장을 선택하여 분석하였다. 또한, 각 현장은 4년 동안 5번(3개월, 6개월, 1년, 2년, 4년)을 조사하여 평가하였다. 선회다짐횟수 선정은 선회다짐기 2가지를 이용하여 최종 현장밀도와 일치하는 선회다짐기의 횟수로 결정하였다. 2가지 선회다짐기의 횟수는 거의 20회 정도의 차

이를 보였으며 이는 다짐 각에 따른 차이인 것으로 나타났다. 또한 포장의 초기밀도, 고온에서의 PG 등급, 누적등가축하중(Accumulated ESALs) 등을 고려하여 2년 공용후 밀도의 비율을 100회 선회다짐 후 측정된 실내 밀도와와의 관계를 찾았으며, 예측된 N_d 은 현재 기준이 되는 설계교통량보다 낮은 레벨을 가지는 것으로 확인하였다. 마지막으로, 최종 현장밀도를 이용하여 실내에서 예측된 최적 다짐횟수와 설계교통량과의 상호관계를 분석하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

2.2.2 호주

1993년 AUSTROADS(호주·뉴질랜드의 도로교통관리청연합회)는 혼합물의 현장 다짐과 유사하게 실내에서 다짐할 수 있는 롤러 다짐기 Gyropac을 개발하여 도입하였다. AUSTROADS 배합설계는 교통량을 3가지로 구분하고 있으며, 각각의 교통량에 대한 Gyropac의 횟수를 선정하였다. 선회다짐기의 다짐횟수를 선정하기 위하여 Oliver 등(1993)은

표 1. 슈퍼페이브 배합설계 교통량별 다짐횟수 (Superpave mix design)

설계	설계 평균 고온												
	39℃ 미만			39-40℃			41-42℃			43-44℃			
	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm	Ni	Nd	Nm	
수정 전	<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
	<1	7	76	117	7	82	129	7	88	138	8	93	146
	<3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
	<10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
	<30	8	109	174	9	121	185	9	128	208	9	135	220
	<100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
	<100	9	143	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288
수정 후		Ni			Nd			Nm					
	<0.3	6			50			75					
	<3	7			75			115					
	<30	8			100			160					
	≥30	9			125			205					

(여기서, N_i =Initial Gyration Number, N_d =Design Gyration Number, N_m =Maximum Gyration Number)

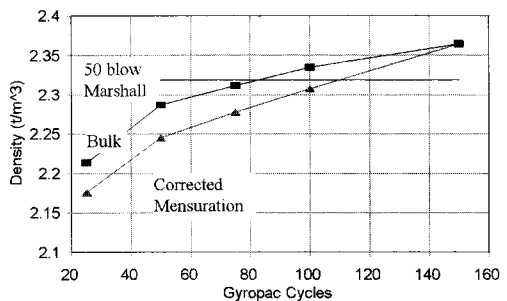
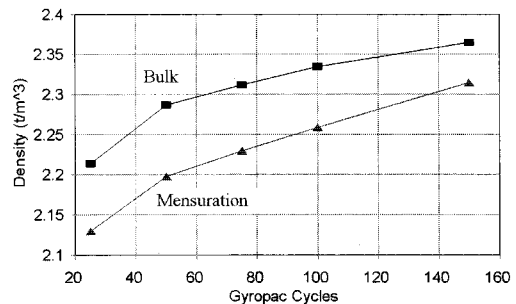


그림 1. 다짐횟수별 결보기 밀도(a)와 계산 밀도(b)



Marshall과 Gyropac 다짐기의 밀도를 비교하여 다짐횟수를 선정하였다.

다짐횟수마다 Gyropac에서 측정되는 높이를 이용하여 밀도를 계산하였고, 각각의 선회다짐수마다 겉보기 밀도를 측정하여 비교하였다. Gyropac 높이로 계산된 밀도는 실측으로 측정된 밀도보다 약간 낮은 값을 나타내었다(그림 1-a). 이와 같은 차이는 혼합물의 상·하 및 옆면에서 발생하는 공극을 고려하지 않아 발생하는 것이다. 표면 공극 때문에 발생하는 오차를 없애기 위하여 150회의 겉보기 밀도와 측정된 밀도를 같다고 보고 다른 다짐횟수에 대하여 보정을 하였다. 이때의 Gyropac에서 수정하여 계산되어 나오는 밀도와 Marshall 다짐과 같은 밀도가 나오는 횟수에서 다짐횟수를 선정하였다(그림 1-b).

표 2. 제안된 선회다짐횟수

Marshall blows	Gyropac cycles
30	50
50	80
75	120

2.2.3 국내 선회다짐기의 다짐횟수 선정방법

국내에서는 선회다짐기를 배합설계에 도입하기 위하여 공극률 4%가 나타나는 선회다짐횟수를 찾아 배합설계에 적용하였다(김광우 등, 2002a, b, c, 김부일 등, 2006). 공극률 4%에 해당하는 선회다짐횟수를 44회로 선정하여 배합설계에 적용한 결과를 표 3에서 보여준다. 표 3에서 보는 바와 같이 Marshall 다짐기를 이용한 경우보다 선회다짐기를 이용한 경우 최적 아스팔트 함량은 거의 변화가 없고 변형강도는 오히려 적어지는 결과를 나타내었다. 이것은 선회다짐횟수 44회의 다짐량이 부족하여 나타나는 결과로 볼 수 있으며, 이와 같은 결과를 토대로 3장에서 기술한 바와 같이 다짐밀도 외에 다양한 방법을 통해 보다 신뢰할 수 있는 선회다짐횟수를 선정하기 위한 연구를 시작하였다.

표 3. 다짐기별 배합설계 결과(김부일 등, 2006)

	밀입도					
	13mm			19mm		
다짐기	Marshall다짐기 (75회)	선회다짐기 (44회)	Marshall다짐기 (75회)	선회다짐기 (44회)		
배합설계방법	수정 ²⁾	기존 ¹⁾	수정 ²⁾	수정 ²⁾	기존 ¹⁾	수정 ²⁾
OAC (%)	5.4	5.5	5.5	5.1	5.2	5.1
S _b (MPa)	5.2	2.5	2.5	3.9	3.3	3.2

주 1) 기존 Marshall 배합설계 : 공극률과 VFA, Marshall 안정도 및 흐름값을 기준으로 OAC를 결정

주 2) 수정 Marshall 배합설계 : 공극률 4%를 기준으로 OAC를 결정

3. 연구내용

3.1 연구방법

본 연구에서는 적정 선회다짐횟수를 찾기 위하여 기존문헌에서 제시하는 경험적인 방법을 비롯하여 역학적 특성을 고려하는 방법으로 아래와 같이 3가지 방법을 통해 최적 선회다짐횟수를 선정하고자 하였다.

3.1.1 Marshall 다짐밀도와와의 비교를 통한 선회다짐횟수

Marshall 배합설계에서 다짐횟수는 교통량에 따라 양면 50회와 75회로 나누어서 다진다. 현재 교통량의 증가에 따라 75회를 많이 사용하고 있으므로, 본 연구에서는 75회에 대한 다짐횟수만 수행하였다. 선회다짐횟수를 선정하기 위해서는 Marshall 다짐기로 다짐된 혼합물의 밀도와 동일한 밀도를 가지는 선회다짐횟수를 선정한다.

3.1.2 역학적 특성에 근거한 선회다짐횟수

다짐밀도만으로 다짐횟수를 선정한다는 것은 경험적인 방법이라는 한계를 벗어나지 못한다. 경험적인 개념을 벗어나 역학적 개념을 도입하기위해서 변형강도를 이용한 다짐횟수 선정시험을 수행하였다. 다



짐밀도를 이용한 방법과 같은 방법으로 Marshall 다짐기로 다짐된 혼합물의 변형강도와 동일한 변형강도가 나타나는 선화다짐횟수를 선정한다.

3.1.3 용적특성(공극률 4%)을 이용한 선화다짐횟수

Marshall 배합설계에 용적특성을 도입하면서, 공극률 4%에 해당하는 아스팔트 혼합물이 최고의 특성을 나타내는 것으로 확인되었다. 따라서, 다짐횟수에 따른 공극률을 측정하여 4%에 해당하는 선화다짐횟수를 찾아 결정한다.

3.2 재료

3.2.1 아스팔트 바인더

아스팔트의 분류는 침입도, 연화점 및 점도를 기준으로 하고 있으며, 우리나라에서는 KS M 2252(침입도분류에 의한 도로포장용 아스팔트) 및 KS M 2208(점도분류에 의한 도로포장용 아스팔트)에 따라 아스팔트를 분류하고 있다. 본 연구에서는 우리나라에서 널리 사용되고 있는 일반 아스팔트(AP-5)를 이용하였으며, 바인더 함량에 따른 다짐횟수 변화의 변수를 줄이고자 아스팔트 함량을 5%로 고정하여 실험을 수행하였다.

3.2.2 골재

본 연구에서 사용한 골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 화강암을 선정하였다. 또한 굵은 골재 최대치수를 19mm와 13mm로 선정하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 19mm 및 13mm 밀입도규격(KS F 2349)에 적합한 입도로 조정하여 총 10가지 입도에 대하여 실험을 수행하였다(그림 2~그림 4).

3.3 아스팔트 혼합물 실내실험

3.3.1 체적특성관련 실험

다짐된 아스팔트 혼합물의 용적 특성인 공극률, 골

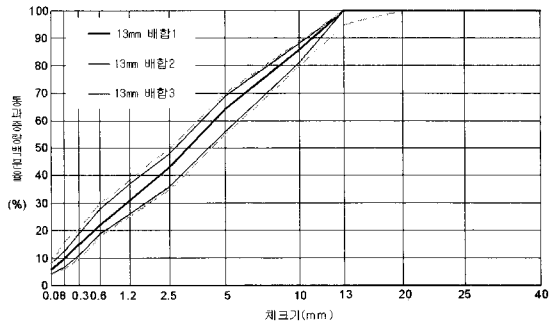


그림 2. 합성 입도 그래프(13mm 상, 중, 하)

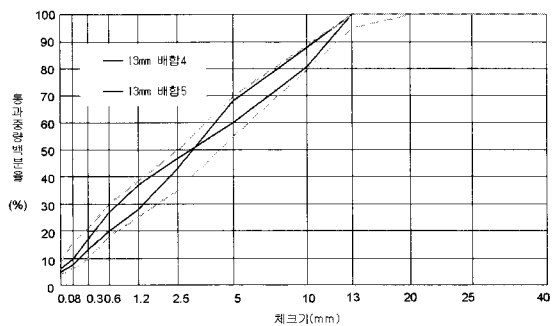


그림 3. 합성 입도 그래프(13mm S1, S2)

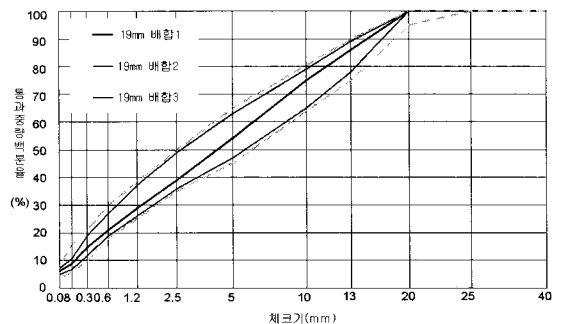


그림 4. 합성 입도 그래프(19mm 상, 중, 하)

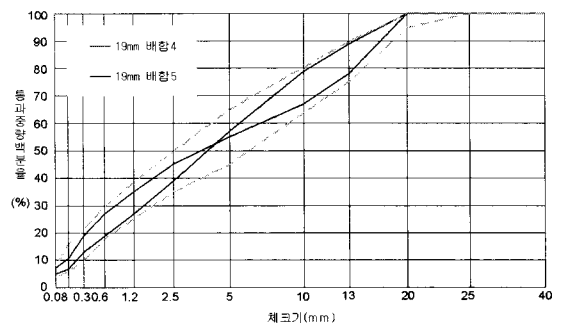


그림 5. 합성 입도 그래프(19mm S1, S2)



재 간극률, 포화도와 유효 아스팔트 함량 등을 통해 혼합물의 포장공용성을 어느 정도 예측할 수 있다. 실내 다짐의 취지는 수년 동안의 교통개방 이후의 가열 아스팔트 포장 혼합물의 현장밀도변화를 모사하기 위한 것이다. 실내 다짐절차가 시공직후 또는 수년간 공용된 다짐 상태를 얼마나 잘 모사할 것인지는 현장의 포장체에서 채취한 호트러지지 않는 시료의 특성과 실험실에서 같은 포장 혼합물로 다짐된 시료의 특성을 비교함으로써 결정될 수 있다.

이와 같이 현장 공용성능에 가장 많은 영향을 미치는 요소인 공극률을 측정하기 위하여 다짐된 혼합물은 KS F 2446에 준하여 실측밀도를 측정하였다. 또한, KS F 2366에 준하여 이론최대밀도를 구하여 실측밀도와 함께 공극률을 계산하여 적용하였다.

3.3.2 변형강도실험

Marshall 안정도는 공시체를 축방향으로 다지고 하중은 측면방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장 포장에서 골재가 배열되어있는 방향과 다르게 하중이 작용할 뿐만 아니라 파괴시 변형의 형태도 포장의 어떤 파손형태와도 다른 시험방법이다.

따라서 이러한 문제점을 보완하고 소성변형을 모사하기 위한 시험방법으로 Kim test가 개발되었다. 개발된 Kim test에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 가해진 하중에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 전단·압밀에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용한다. 이에 의한 변형강도(Deformation Strength: S_b)의 계산은 반경 r 만큼 원형절삭한 직경 D 의 하중봉이 바닥으로부터 y 만큼 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우의 최대하중(P)과 그때의 변형값(y)을 구하여 식 (1)로 계산한다(김광우 등 2002a,b,c 2004).

$$S_b = \frac{4P}{\pi\{D-2(r-\sqrt{2ry-y^2})\}^2} \quad (1)$$

여기서 P = 최대하중 (N),

D = 하중봉 직경 (mm),

r = 원형절삭반경 (mm),

y = 수직변형 (mm)이고 얻어지는 S_b 의 단위는 MPa이다.

3.3.3 선회다짐 실험

선회다짐기의 가장 중용한 기능중에 한 가지는 다짐횟수별로 아스팔트 혼합물 시편의 높이를 측정할 수 있다는 것이다. 몰드에 넣을 재료의 량, 몰드의 직경, 시편의 높이에 대한 자료를 파악함으로써 다짐도중에 시편의 밀도를 쉽게 계산할 수 있다. 시편의 밀도는 시편의 중량을 체적으로 나누어 계산된다. 시편의 체적은 직경과 측정된 높이를 사용하여 계산하는데, 시편의 높이는 시험전후의 램의 위치를 측정하여 기록한다. 램의 수직변화위치는 시편의 높이 변화와 동일하다. 시편의 높이는 컴퓨터 및 프린터를 통하여 처리된다. 이러한 방법을 사용하여 아스팔트 혼합물 시편이 다져지는 동안 아스팔트 혼합물의 다짐 특성이 나타나게 된다.

4. 연구결과

4.1 Marshall 다짐밀도와 선회다짐밀도 비교

현재 국내에서 사용되고 있는 Marshall 배합설계는 공극률 $4\pm 0.5\%$ 일 때를 최적 아스팔트 함량으로 결정하고 나머지 기준(포화도, 골재간극률, 안정도, 흐름값 등)들이 만족되면 최종적으로 최적 아스팔트 함량을 결정한다(가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 지침, 건교부 2003). 이는 현장 공용성능에 가장 많은 영향을 미치는 요소가 공극률이며, 공극률은 아스팔트 혼합물의 밀도에 의해서 결정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Marshall 75회 다짐밀도와 선회다짐 밀도와의 비교분석을 통하여 적정선회다짐 횟수를 선정하고자 하였다. 입도변화에 따른 밀도변화를 측정하기 위해 총 10가지의 입도를 선정하였다. 아스팔트 함량은 다짐횟수변화의 변수를 감소시키기 위



해 5%로 고정하여 수행하였다. 다짐된 혼합물은 KS F 2446에 준하여 실측밀도(SSD 방법)를 측정하였으며, 시료의 중량과 체적으로 최종다짐횟수에서 계산된 밀도를 구하여 비교하였다. 그러나 실측 밀도와 계산밀도는 오차가 발생하게 되는데 이는 실측과 달리 계산밀도 측정에서는 상·하 및 측면의 표면공극을 고려하지 않기 때문이다. 따라서 실측밀도와 계산밀도 사이에는 공극을 고려한 보정계수(C)를 만들어 선화다짐횟수별 밀도를 측정하였으며 다짐횟수선정에 적용하였다.

그림 6~그림 7은 보정계수(C)를 이용한 13mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 밀도곡선을 나타내며 그림 8~그림 9는 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 밀도곡선을 나타낸다. 그림에서와 같이 13mm 밀입도 아스팔트 혼합물인 경우 상입도를 제외하고 선화다짐횟수가 모두 45회~55회 사이에서 Marshall 75회 다짐밀도와 동일한 밀도를 가지는 것으로 나타났다. 반면, 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 경우에는 5

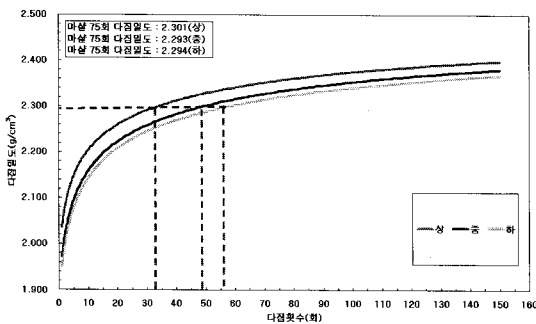


그림 6. 다짐횟수별 밀도(13mm 상, 중, 하)

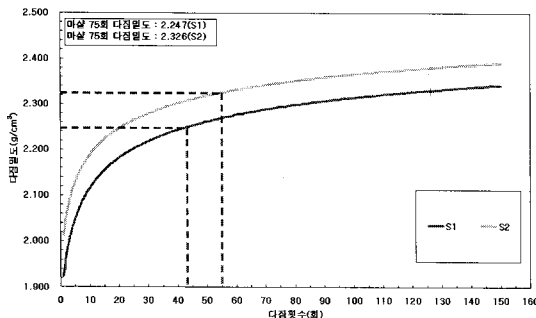


그림 7. 다짐횟수별 밀도((13mm S1, S2)

개의 입도 모두 55회~65회 사이에서 Marshall 75회 다짐밀도와 동일한 것으로 나타났다. 즉 Marshall 다짐밀도와 동일한 다짐밀도를 주는 선화다짐횟수는 13mm인 경우 약 50회, 19mm인 경우에는 약 60회인 것을 알 수 있다. 표 4는 13mm, 19mm 아스팔트 혼합물의 Marshall 다짐밀도에 따른 선화다짐횟수를 나타낸다.

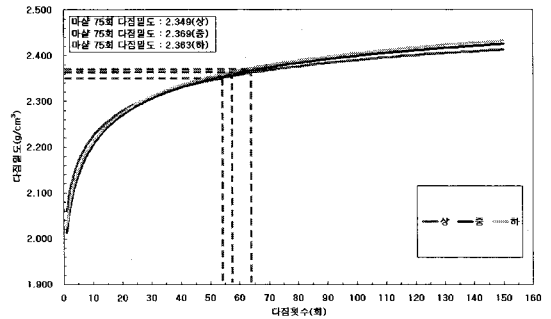


그림 8. 다짐횟수별 밀도(19mm 상, 중, 하)

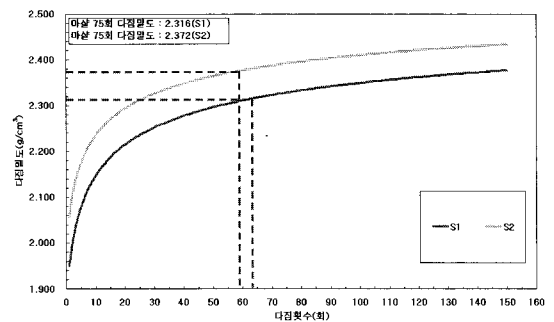


그림 9. 다짐횟수별 밀도((19mm S1, S2)

표 4. Marshall 다짐밀도에 상응하는 혼합물별 선화다짐횟수

혼합물	상	중	하	S1	S2
13mm	33	49	56	43	55
19mm	54	64	56	64	60

4.2 선화다짐횟수 변화에 따른 변형강도의 변화

현재 국내에서 가장 많이 발생되는 도로포장의 파손원인중에 하나는 소성변형이다. 따라서 역학적인



개념을 도입한 선회다짐횟수를 선정하기 위해 소성 변형에 대한 저항성을 평가할 수 있는 변형강도시험을 적용하였다. 다짐밀도를 이용한 다짐횟수선정과 동일하게 Marshall 다짐에 의한 변형강도 값을 기준으로 선회다짐횟수별 변형강도와 비교분석하여 최적 선회다짐횟수를 선정하였다.

그림 10~그림 11은 13mm, 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 선회다짐횟수별 변형강도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 혼합물은 다짐횟수가 증가할수록 변형강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 100회에서 120회 사이에서는 하, S1, S2가 급격하게 증가되는 것으로 나타났다. 그림 10에서와 같이

13mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 경우, Marshall 75회에 상응하는 선회다짐횟수는 상입도를 제외하고 모든 입도에서 75~83회로 나타났다. 반면 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 경우는 중입도를 제외하고 모든 입도에서 90~110회로 나타났다. 이는 소성변형에 대한 저항성이 골재의 크기와 상관성을 가지고 있음을 보여주는 결과이다. 다시 말해 아스팔트 혼합물의 공칭최대치수가 증가될수록 동일한 다짐량을 가지기위해 선회다짐횟수 또한 증가되는 것으로 판단된다. 따라서 변형강도에 따른 선회다짐횟수는 13mm 밀입도 혼합물의 경우 약 80회, 19mm는 약 100회로 결정되었다. 표 5는 변형강도에 따른 혼합물의 선회다짐횟수를 정리한 것이다.

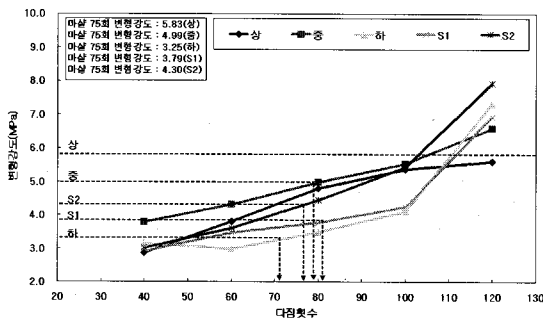


그림 10. 다짐횟수별 변형강도(13mm)

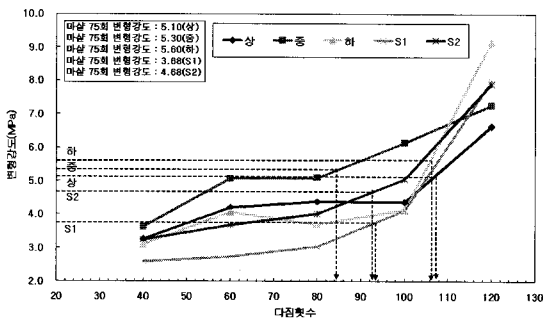


그림 11. 다짐횟수별 변형강도(19mm)

표 5. 변형강도에 따른 혼합물별 선회다짐횟수

혼합물	상	중	하	S1	S2
13mm	-	78	70	80	76
19mm	108	84	106	94	94

4.3 선회다짐횟수 변화에 따른 응력특성의 변화

4.1절에서 언급했듯이 현장공용성능에 가장 많은 영향을 미치는 요소는 공극률이며, 이러한 공극률을 분석하기 위하여 다짐횟수별 공극률의 추이를 분석하였다. 공극률은 다짐횟수별로 KS F 2446을 이용하여 겉보기 밀도를 측정하였으며, KS F 2366에 준하여 이론밀도를 측정하여 공극률을 계산하였다. 각각의 다짐횟수별로 10가지 입도에 대하여 3개씩 공시체를 제작하여 다짐횟수선정에 적용하였다.

그림 12에서 볼 수 있듯이 다짐횟수가 증가할수록 공극률은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 다짐횟수에 대하여 평균값으로 결과를 분석해보면, 공극률 4±0.5%에 들어오는 다짐횟수는 100회부터

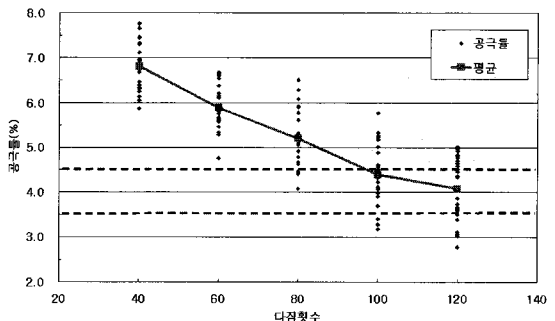


그림 12. 다짐횟수별 공극률



시작하며, 120회에서 약 4%에 도달하는 것으로 나타났다.

이상의 결과, 용적특성에 따른 다짐횟수선정은 아스팔트 혼합물의 다짐관리를 고려했을 경우 120회로 선정하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 외국의 다짐횟수와 유사한 결과를 보여주는 것이다.

4.4 최적 선회다짐횟수의 결정

표 6은 상기와 같이 3가지 다짐횟수 선정방법에 의해 결정된 다짐횟수를 보여주고 있다. 다짐밀도를 이용한 경우에 13mm는 50회, 19mm는 60회로 나타났으며, 변형강도를 이용한 경우에 13mm는 80회, 19mm는 100회로 나타났다. 마지막으로 용적특성을 이용한 경우에 13mm, 19mm 모두 동일한 결과로 120회로 나타났다. 이는 기존 국내에서 사용한 44회 보다는 높은 결과값을 보여주며, 외국의 100회, 120회와 유사한 결과 값을 보여준다(Superpave mix design, Oliver(2000)).

다짐밀도를 이용한 경우에는 골재공칭치수에 따라 10회 정도의 차이를 보였으며, 변형강도를 이용한 경우에는 20회로 큰 차이를 나타내었다. 이는 골재 공칭치수의 크기에 따라 나타나는 결과로서 골재 치수가 증가할수록 동일한 다짐량이나 강도를 나타내기 위해서 더 많은 다짐횟수를 요구하기 때문이다.

설계선회다짐횟수 선정을 위하여 세 가지 방법을 사용한 결과, 다짐밀도를 이용한 선회다짐횟수는 변형강도나 용적특성을 이용한 선회다짐횟수에 비해 매우 낮음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Marshall 다짐기와 선회다짐기 사이의 다짐 메커니즘의 차이에 기인한 결과로, 충격방식인 Marshall 다짐방식보다 니딩방식인 선회다짐방식이 혼합물의 파괴감소에 더 효과적이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 단순한 다짐밀도의 비교보다는 혼합물의 공용특성을 대변하는 변형강도를 기준으로 설계선회다짐횟수를 결정하는 것이 적절하다고 판단되어 이들의 평균적인

값인 100회를 최종 설계다짐횟수로 결정하였다. 또한, 김광우 등(2002a,b,c)은 변형강도값은 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 일 때 가장 좋은 특성을 나타내고 있다고 보고하였다. 이와 같은 결과를 종합적으로 살펴볼 때, 최적 선회다짐횟수는 100회로 결정하는 것이 타당하다고 판단된다.

표 6. 다짐횟수 선정방법별 최적다짐횟수

다짐횟수 선정방법	선회다짐횟수	
	13mm	19mm
다짐밀도를 이용한 선회다짐횟수	50회	60회
변형강도를 이용한 선회다짐횟수	80회	100회
용적특성을 이용한 선회다짐횟수	120회	

5. 결론

Marshall 다짐기의 단점을 극복하고 현장과 유사한 다짐 메커니즘으로 아스팔트 배합설계를 수행하기 위해서 선회다짐기(Gyratory compactor)가 이용된다. 이를 국내에 적용하기 위해서는 선회다짐기의 설계선회다짐횟수 결정이 전제되어야 한다. 이를 결정하기 위한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 선회다짐횟수별 아스팔트 혼합물의 밀도와 Marshall 75회 다짐밀도를 비교한 결과, 13mm 혼합물은 50회, 19mm 혼합물은 60회에서 Marshall 다짐밀도와 동일한 값을 주었다.
- 변형강도를 이용한 경우, 13mm 혼합물은 80회, 19mm 혼합물은 100회에서 Marshall 75회에서의 변형강도와 동일한 값을 주었다.
- 용적특성을 이용한 다짐횟수 선정의 경우, 13mm 혼합물과 19mm 혼합물에서 동일하게 4% 공극률을 만나는 선회다짐횟수는 120회를 알 수 있었다.
- 설계선회다짐횟수 선정을 위하여 세 가지 방법을 종합한 결과, 단순한 다짐밀도의 비교보다는 혼합



물의 공용특성을 대변하는 변형강도를 기준으로 설계선회다짐횟수를 결정하는 것이 적절하다고 판단되어 이들의 평균적인 값인 100회를 최종설계다짐횟수로 선정하였다.

- 본 연구에서 제시된 선회다짐횟수 100회는 외국에서 사용되고 있는 선회다짐횟수와 유사한 경향을 보여주는 결과이다.
- 본 연구에서는 10가지 골재입도에 대하여 아스팔트 함량을 고정한 상태에서 실험을 수행하였기 때문에 제한적인 결과를 보여준다. 향후, 최적의 선회다짐횟수를 선정하기 위해서는 다양한 골재입도 및 바인더뿐만 아니라, 교통량 및 균열특성치를 고려할 수 있는 선회다짐횟수를 찾는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 '장수명·친환경도로포장 재료 및 설계시공기술 개발'의 연구수행 결과입니다.

참고문헌

김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정 모델을 통한 변형강도 시험장치변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 41-52

김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 23-39

김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002c), "아스팔트 콘크리트의 고온 변형저항 특성 측정방법 개발," 석재연 논문집 제 7권, 강원대학교 석재복합신소재 연구센터.

김광우, 최선주, 이기호, 도영수 (2004), "온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형과의 상관성 연구," 대한토목학회 논문집, 제 24권 5D호, 743-748.

김부일, 이문섭, 김광우 (2006), "포장성능관련 역학적 특성이 고려된 아스팔트 혼합물의 배합설계법 개발 방안", 한국도로학회 논문집, 제8권 1호, 15-23

가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침(2003), 건설교통부

아스팔트 포장공학 원론, 한국도로포장공학회 NCHRP(2002), "NCHRP 1-37A 2002 Design Guide"

Asphalt Institute(2001), "Superpave mix design"

Oliver J.W.H. (1993). The relationship between Marshall and Gyropac compaction. ARRB Working Document No. WD R193/011. Australian Road Research Board.

W. H. Oliver and A. J. Alderson (1993). Evaluation of the Gyropac gyratory compactor. ARRB Contract Report, No: ACR RI 93/03(k) 27p. Australian Road Research Board.

접 수 일: 2007. 11. 21
 심사 일: 2007. 11. 21
 심사완료일: 2007. 12. 5