

HMA와 WMA 혼합물의 선회 다짐횟수 적정성 검토 연구

Feasibility Evaluation of Number of Gyration for HMA and WMA Mixtures

<p>이 문 섭 Lee, Moon Sup 윤 천 주 Yoon, Chun Joo 권 수 안 Kwon, Soo Ahn 김 광 우 Kim, Kwang Woo</p>	<p>정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 · 공학박사 (E-mail : treupath@kict.re.kr) 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 · 공학석사 (E-mail : cjyoon@kict.re.kr) 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 · 공학박사 (E-mail : sakwon@kict.re.kr) 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : asphaltech@hanmail.net)</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ABSTRACT

The objective of this study is to validate the number of gyrations of Superpave gyratory compactor(SGC) for compaction of hot-mix asphalt (HMA) and warm-mix asphalt(WMA) mixtures. Marshall compaction was also used for comparison purpose. The 13mm and 19mm aggregates of 1st class quality shape were used. A PG64-22 and a PG76-22 for HMA and a PG70-22 for WMA. Four compaction temperatures based on the suggested value were used for each binder using 100 gyrations for SGC and 75 blows per side for Marshall compactor. It was found that SGC compaction was somewhat better than Marshall compaction. The analysis of variance showed that two compactors were significantly different in air voids of 19mm mixtures at $\alpha=0.05$ level. The 13mm mixture did not show a significant statistical difference. When compacted at the temperature below a certain level, however, the compaction of two compactors were found to be poor. Therefore, observing compaction temperature above the minimum level is important to secure proper compaction work. If the minimum temperatures were maintained, 100 gyrations, which was given for HMA of arterial road pavement by the Korean Guide, was found to be appropriate compaction, showing similar or better compaction work than 75 blows per side of Marshall compaction.

KEYWORDS

gyratory compactor, marshall compactor, number of compaction, air voids, warm mix asphalt, hot mix asphalt

요지

본 연구에서는 국토해양부 기준으로 제시된 선회 다짐횟수를 가열아스팔트 혼합물과 중온아스팔트 혼합물을 이용하여 검증하는데 그 목적이 있다. 다짐횟수 검증을 위하여 굵은골재최대치수 13mm와 19mm 1등급 골재와 가열아스팔트 혼합물용 PG64-22와 PG76-22, 중온아스팔트 혼합물용 PG70-22 아스팔트를 사용하였다. 또한, 각각의 바인더 별로 권장 다짐온도를 기준으로 4가지 온도에서 선회다짐 100회와 마샬다짐 75회의 다짐량을 비교하였다. 두 다짐기를 공극률 상으로 평가할 때 전반적으로는 선회다짐기의 다짐이 다소 더 잘 되었다. 공극률에 대한 분산분석 결과 두 다짐기 사이에 19mm 혼합물에서는 통계적 유의차가 나타났고 13mm의 경우 유의차가 나타나지 않았다. 특히 일정 다짐온도 이하에서 다졌을 경우 두 다짐기 모두 다짐이 불량하여 다짐온도를 확보하여 다짐하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다. 따라서, "가열 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공"에서 제시한 선회 다짐횟수 100회는 지침에서 제시한 아스팔트 혼합물의 다짐온도를 준수한다면 마샬다짐기 양면 75회 다짐과 유사하거나 다소 좋은 다짐량을 나타내는 것을 알 수 있었다.

핵심용어

선회다짐기, 마샬다짐기, 다짐횟수, 공극률, 중온아스팔트, 가열아스팔트

1. 서론

아스팔트 혼합물의 배합설계에 사용되는 마샬다짐의 근본적 문제점은 혼합물의 다짐 메커니즘에 있다. 마샬

다짐기는 혼합물을 몰드 내에 구속한 채 충격하중을 가해 다지는데 이는 현장에서의 포설 방식과 다짐에너지가 전달되는 메커니즘이 크게 다르다. 골재는 충격에 의

해 배열되며 경우에 따라 골재 파쇄도 유발되므로 마찰 다짐에 의한 혼합물내의 골재배열은 롤러다짐에 의한 혼합물과 같다고 할 수 없다.

아스팔트 포장체는 골재 배열에 따라 특성에 차이가 난다. 굵은골재는 대부분 구체나 정 6면체에 가까운 입방체가 아니므로 현장에서 롤러 다짐에 의해 주로 장방향이 수평에 가깝게 눕게 되며 윗하중은 이 누운 방향에 수직으로 작용해 전단, 압축은 물론 휨 인장 응력도 유발한다. 충격 다짐으로 제조된 혼합물에 대해 측정되는 특성치는 현장 혼합물의 모사치로 추정하기 어렵고, 이러한 공시체에서 측정된 물성도 현장에 적용할 판단기준으로 보기 어렵다. 따라서 간편하면서도 혼합물을 현장과 가능한 한 유사한 방법으로 다짐하여 이와 같은 문제점을 해결하고자 개발된 다짐기가 선회다짐기(Gyratory compactor)이다.

선회다짐기를 최초로 도입한 미국은 선회 다짐횟수 선정에 위하여 현장 밀도와 일치하는 선회다짐기의 횟수를 선회 다짐횟수로 결정하였다. 또한 포장의 초기밀도, 고온에서의 PG등급, 누적 등가축하중(Accumulated ESALs)등을 고려하여 2년 공용 후 밀도의 비율을 100회로 선정하였다(NCHRP, 2002).

호주는 1993년 AUSTRROADS(호주·뉴질랜드의 도로 교통 관리청 연합회)는 선회 다짐기를 개발하였으며, Gyropac으로 명명하여 도입하였다. 선회다짐기의 다짐 횟수를 선정하기 위하여 Oliver 등(1993)은 Marshall과 Gyropac 다짐기의 밀도를 비교하여, 마찰 75회에 대응되는 선회 다짐횟수를 120회 결정하였다. 또한, AUSTRROADS 배합설계는 교통량을 3가지로 구분하고 있으며, 각각의 교통량에 대한 Gyropac의 횟수를 선정하였다.

국내에서는 선회다짐기를 배합설계에 도입하기 위하여 공극률 4%가 나타나는 선회 다짐횟수를 찾아 배합설계에 적용하였다(김광우 등, 2002a, b, c, 김부일 등, 2006). 공극률 4%에 해당하는 선회 다짐횟수를 44회부터 증가시켜 가며 선정연구를 수행하였다. 김부일 등(2006)은 역학적 특성을 배합설계에 도입하는 방안을 마련하면서 선회 다짐횟수를 적용하여 연구를 수행하였다. 김부일 등(2007)은 지속적인 연구를 통하여 다짐밀도, 용적 특성, 변형강도 등 다양한 조건에서 시험을 수행하여 마찰 75회에 대응하는 선회 다짐횟수 100회를 선정하였다. 한국형 포장 설계법(2008)에서는 선회다짐기를 도입하는 방안에 대한 연구를 진행하여 ‘아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침’에 도입하였다. 마찰 다짐 50회와 75회에 대응하는 선회 다짐횟수를 75회와 100

회로 선정하여 적용하였다.

이와 같이 많은 연구를 진행하여 선회 다짐횟수가 선정되어 지침에 선회다짐기가 도입되었다. 하지만, 아직까지 선회 다짐기는 고가의 장비로 현장에 쉽게 적용할 수 없는 실정이기 때문에 다양한 재료 및 조건에서 현장 검증이 이루어지고 있지 못하다. 특히 새로이 적용이 되기 시작한 중온아스팔트(Warm mix asphalt: WMA) 혼합물에 대한 검증은 전무한 상태이다. 이에 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 가열 아스팔트 혼합물 2가지와 WMA 혼합물 1가지에 대해서 다양한 조건으로 지침에 제시된 선회다짐기의 다짐횟수에 대한 적정성을 검토하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

배합설계에서는 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)을 아스팔트 혼합물의 용적특성인 공극률((Air-void), VFA (void filled with asphalt)와 VMA(void in mineral aggregate)와 변형강도를 이용하여 결정한다. 이 세 가지 특성 중 본 논문에서는 공극률 분석을 통하여 두 다짐기 사이의 특성을 평가하였다. VMA의 경우 모든 혼합물에서 거의 기준치를 크게 상회하며 만족하여 분석의 의미가 없었다. VFA는 일반적으로 공극률 4%가 되는 아스팔트 함량에서 그 값이 만족이 되면 그때의 아스팔트 함량을 OAC로 결정하므로 분석에서는 제외하였다.

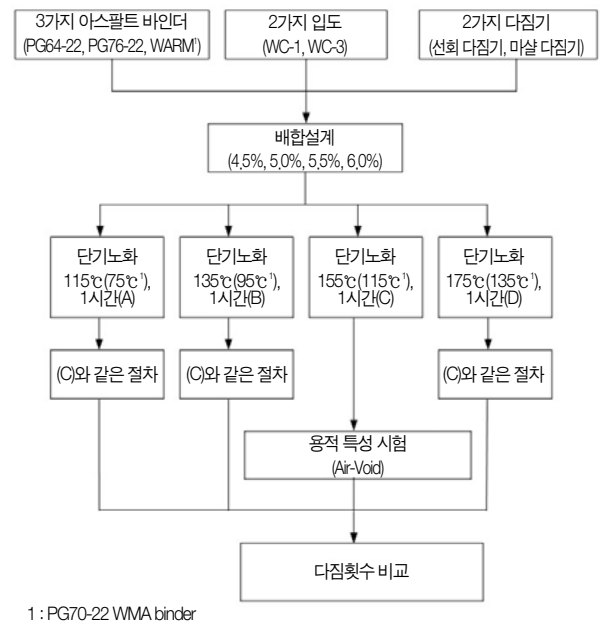


그림 1. 다짐횟수 비교 실험 절차

사용된 재료는 바인더 3종류와 골재입도 2가지이며 이를 4가지 온도에서 총 24 조합의 혼합물로 6개씩 총 576개의 공시체를 제조하였으며, 다짐횟수 비교 실험에 대한 흐름도는 그림 1과 같다.

2.1. 사용 재료

본 비교 실험에서는 3가지 아스팔트 바인더를 사용하여 혼합물을 각각 4가지 온도에서 혼합 및 다짐하여 직경 100mm 공시체를 제조하고 용적특성을 분석하였다. 3가지 바인더는 가열아스팔트 혼합물(hot-mix asphalt: HMA)용 PG64-22와 PG76-22 한가지 씩과, 중온아스팔트 혼합물(warm-mix asphalt: WMA)용 PG70-22 한가지이다.

골재 품질에 따른 아스팔트 혼합물의 영향이 크므로, 골재의 영향을 최소화하기 위하여 편장석(Flat and

elongated particles) 비율이 낮은 1등급 골재를 선정하였다. 표 1은 선정된 골재의 물리적 성질을 보여 주고 있다. 굵은골재 최대치수를 19mm와 13mm에 잔골재, 채움재와 혼합하여 각각 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 실험을 수행하였다(그림 2~그림 3).

아스팔트 혼합물의 작업온도를 30~50℃ 낮추어 중온에서 작업이 가능하게 하기 위해서는 상온에서는 고체 상태이면서 중온에서는 유체로 변하는 분자량 수백 정도로 낮은 물질로 바인더의 용점을 낮추기 위하여 Wax계의 컴파운드를 사용하였다. 또한, 개질제로는 가루 형태의 폴리머로 LDPE(Low-Density Polyethylene)를 사용하였다. 특히 LDPE는 종류에 따라 차이가 있지만 작업온도범위(110~130℃)에서 아스팔트 혼합물의 작업성에 지장을 주지 않는 대표적인 폴리머 중 하나이다. 그 외에 성형성의 강화, 스티프네스 강화 등을 위해 미량의 첨가제들이 추가 투입되어 개발된 중온 고내구성 아스팔트(Durable Semi-hot-mix Asphalt: DSA)를 사용하였다.

표 1. 골재 특성

구분	비중	흡수율	마모율	편장석	
비중	≥2.5	≤3.0%	≤40%	≤10%	
화강암	굵은 골재	2.62	1.02	21.0	8.7
	잔골재	2.78	1.94	-	-
필러	2.69	-	-	-	

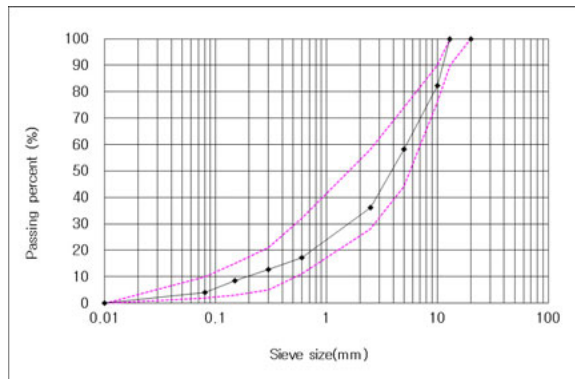


그림 2. 굵은골재 최대치수 13mm 합성 밀입도

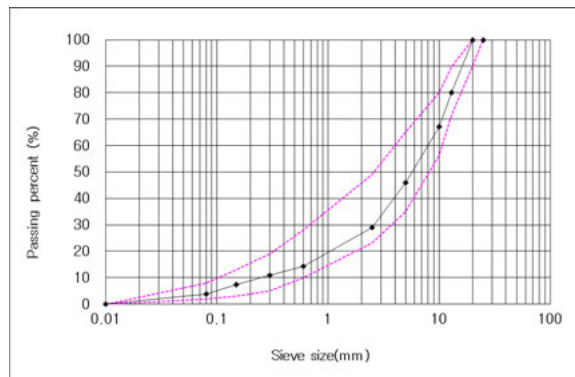


그림 3. 19mm 밀입도 합성 입도

2.2. 시험 방법

표 2는 각각의 아스팔트 바인더 생산자가 제시하고 있는 다짐온도를 보여준다. 이를 바탕으로 HMA용 PG64-22와 76-22는 각각 135℃와 155℃를 현장 다짐온도로 보고 그 위 아래로 각각 20℃를 가감하여 혼합물을 제조하였다. 그리고 중온화 바인더인 PG70-22는 135℃를 최고의 다짐온도로 보고 그 밑으로 얼마나 낮은 온도에서의 다짐이 가능한지를 보기위해 20℃씩 3단계를 낮추어 제조하였다. 이와 같이 결정한 다짐온도를 표 3에서 보여주고 있다.

표 2. 아스팔트 혼합물 제조사 제시 다짐온도

혼합물명	아스팔트 바인더 등급	다짐온도(℃)		비고
		기준	제조사 제시온도	
HMA	PG64-22	140±2		HMA 64-22
HMA	PG76-22	150±20	145~155	HMA 76-22
WMA	PG70-22	-	115±10	WMA 70-22

표 3. 골재 치수별 혼합물의 시험 다짐온도 구분

굵은골재 최대치수	혼합물 구분	바인더 등급	시험 다짐온도
13mm	HMA	PG64-22	115℃, 135℃, 155℃, 175℃
	HMA	PG76-22	115℃, 135℃, 155℃, 175℃
	WMA	PG70-22	75℃, 95℃, 115℃, 135℃
19mm	HMA	PG64-22	115℃, 135℃, 155℃, 175℃
	HMA	PG76-22	115℃, 135℃, 155℃, 175℃
	WMA	PG70-22	75℃, 95℃, 115℃, 135℃

2.3. 배합설계

배합설계는 상기 각각의 온도로 아스팔트 함량을 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%까지 4단계로 변화시켜가며 선회다짐 횟수 100회, 마샬다짐 횟수 75회로 혼합물을 다짐하였다. 비빈 혼합물(loose-mix)은 다짐 전 1시간동안 오븐에 각각의 다짐온도에서 단기노화(short-term aging) 시켰으며 이때 몰드도 함께 넣어 같은 온도를 유지토록 하였다. PG64-22와 76-22 바인더의 HMA 다짐온도는 115, 135, 155, 175°C이며, PG70-22의 중온 아스팔트 혼합물(WMA)의 다짐온도는 75, 95, 115, 135°C이다. 이 온도는 혼합물을 1시간 단기노화 시킨 온도이므로 실제 다짐온도는 약간 낮을 수 있으나 신속한 다짐으로 그 차이는 미미하였다. 또한 다짐 초기와 다짐 후기에 다소의 온도차이도 있을 수 있으나 그 변화를 일일이 측정하기란 쉽지 않으므로 혼합물이 다짐몰드에 들어가는 온도인 상기 온도를 다짐온도로 간주하였다.

마샬다짐기와 선회다짐기의 다짐 정도 차이를 비교하기 위하여 같은 혼합물의 공시체를 두 다짐기로 제조하였다. 두 다짐기의 다짐정도 차이는 용적특성중 공극률을 이용하여 비교 분석하였다.

2.4. 다짐횟수

국토해양부(2009)에서는 선회다짐기를 도입하기 위하여 선회 다짐횟수 선정연구를 수행하였으며, 표 4는 교통량에 따른 선회다짐 및 마샬다짐횟수를 보여주고 있다. 본 논문에서는 $ESAL > 10^7$ 에 해당하는 마샬다짐 75회와 선회다짐 100회에 대한 다짐기별 다짐 특성을 연구하였다.

표 4. 다짐기별 아스팔트 혼합물의 다짐횟수 기준

교통량	마샬다짐기	선회다짐기
$ESAL \leq 10^7$	양면 50회	75회
$ESAL \geq 10^7$	양면 75회	100회

2.5. 통계분석

겉보기 밀도의 특성을 통계적 분석을 통해 각종 실험 인자의 유의성 분석을 수행하였다. 사용된 통계 Software는 Statistical Analysis System (SAS 9.0)이며, 다원분산분석(Multi-way ANOVA) 방법을 사용하였다. 분산분석의 인자(source variable)로는 바인더 종류, 다짐온도, 아스팔트 함량, 다짐기를 사용하였으며, 이들 각 인자가 밀도에 미치는 영향을 굽은골재 최대치수 별로 통계적 유의성을 분석하였다.

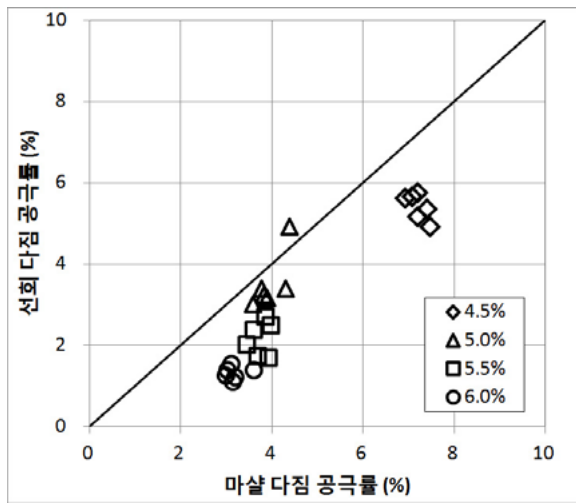
3. 결과 분석

그림 4~6은 다짐온도별 다짐기 간의 상관관계를 공극률로 보여주고 있다. 각각의 다짐온도는 아스팔트 함량 4.0%에서부터 0.5%씩 증가하여 6.0%까지 아스팔트 함량별로 6개씩 공시체를 제작하여 평가하였다. 일반적으로 아스팔트 함량의 증감에 따라 공극률은 낮거나 높게 되므로, 그림에서 공극률이 높은 점들은 아스팔트 함량이 낮고 낮은 점들은 함량이 높은 부분이다.

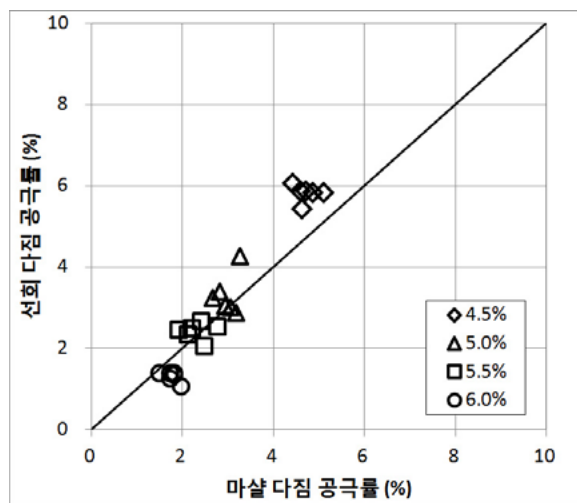
그림 4는 PG64-22로 13mm 밀입도 HMA 혼합물 제조시의 선회다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 4(a)의 115°C에서는 선회다짐에 의한 공극률이 더 낮아 대부분의 점들이 대각선 하단에 형성되므로 선회다짐이 마샬보다 더 잘됨을 알 수 있다. PG64-22의 기본 다짐 온도는 145°C로 지침(국토해양부, 2009)에 제시되어 있다. 이는 기준 다짐 온도보다 30°C 낮은 온도에서는 마샬다짐보다 선회다짐이 더 잘된다는 결과이다.

135°C에서는 공극률이 4%보다 높은(아스팔트 함량이 낮은) 부분에서는 마샬다짐이 더 잘되었으나 4% 이하에서는 유사하였다. 155°C에서 공극률이 4%보다 높은 부분에서는 선회다짐이 더 잘되었으나 2~4%에서는 마샬이 더 잘되어 서로 교차됨을 보인다. 이로부터 배합설계의 기준이 되는 공극률 4%의 다짐은 135°C와 155°C 중간 정도에서 두 다짐기가 유사한 다짐을 보일 것으로 추정할 수 있다. 따라서 이를 근거로 한다면 국토해양부 제시 다짐온도인 145°C는 두 다짐기에 모두 적절한 수준이라고 사료된다. 반면 175°C의 선회다짐은 공극률이 대부분 4% 이하에서 형성되어 너무 과다짐이 됨을 알 수 있다.

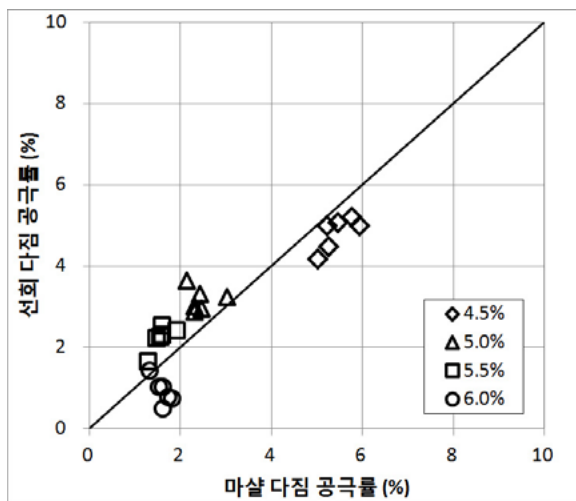
그림 5는 PG76-22로 13mm 밀입도 HMA 혼합물 제조시의 선회다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 5(a)의 115°C에서는 두 다짐기 모두 공극률이 4% 이상에서 형성되므로 다짐이 잘 안 됨을 알 수 있다. 135°C에서는 대부분의 점들이 대각선 하단에 형성되므로 선회다짐은 어느 정도 다짐이 되나 마샬다짐은 약 1% 이상 덜 됨을 알 수 있다. 155°C, 175°C 모두 4% 이상에서는 마샬다짐이, 4% 이하에서는 선회다짐이 조금 잘되는 것을 알 수 있다. 하지만 155°C의 경우 그 차이가 미미하며 공극률도 1~7%에 크게 분포되어 다짐이 잘 된 것으로 판단되며 155°C 이상을 유지하면 두 다짐기 간에 차이가 없는 것으로 사료된다. PG76-22 개질 아스팔트의 국토해양부 지침의 기준 다짐온도는 155°C 이상이며, 본 실험결과에서도 이를 입증한 결과를 보여주었다.



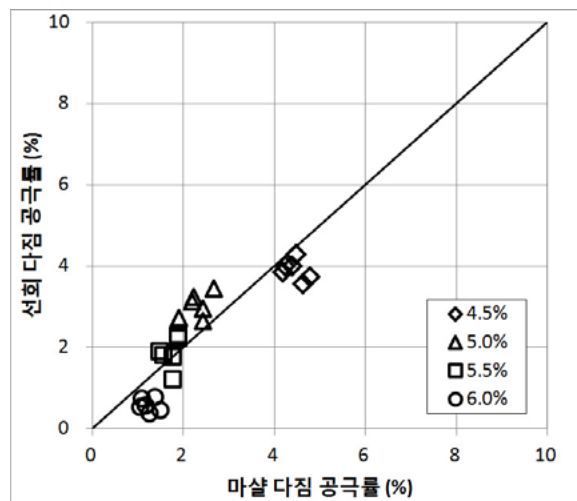
(a) 115°C



(b) 135°C

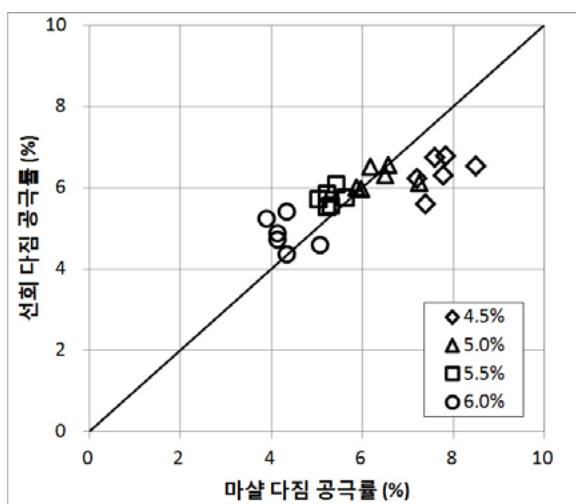


(c) 155°C

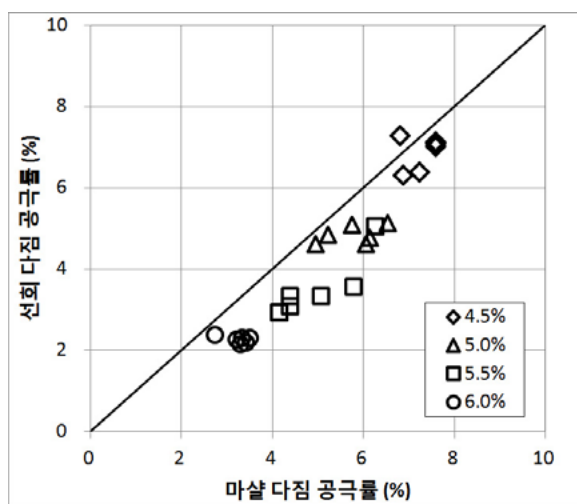


(d) 175°C

그림 4. 다짐온도별 공극률의 변화(13mm, PG64-22)

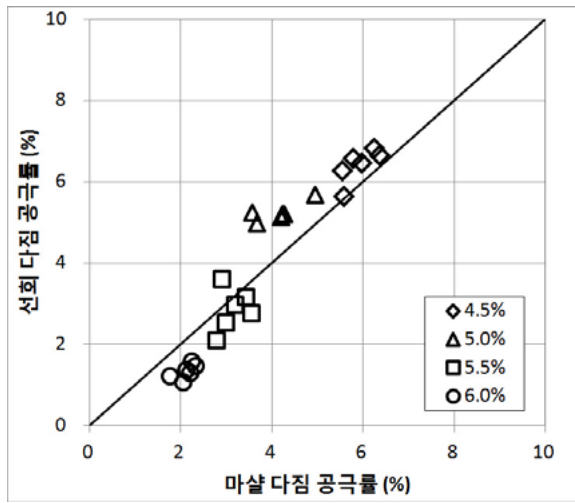


(a) 115°C

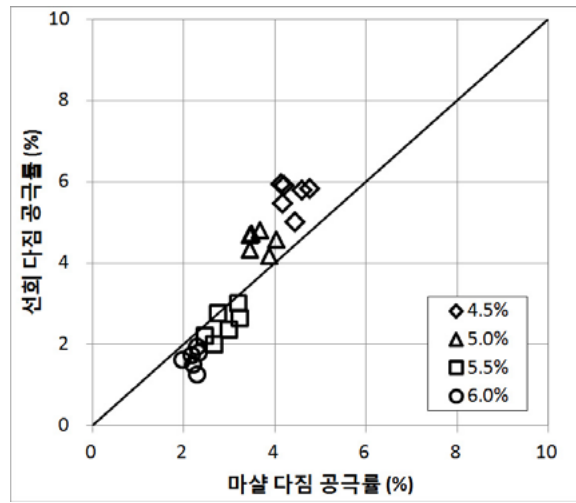


(b) 135°C

<그림 계속>

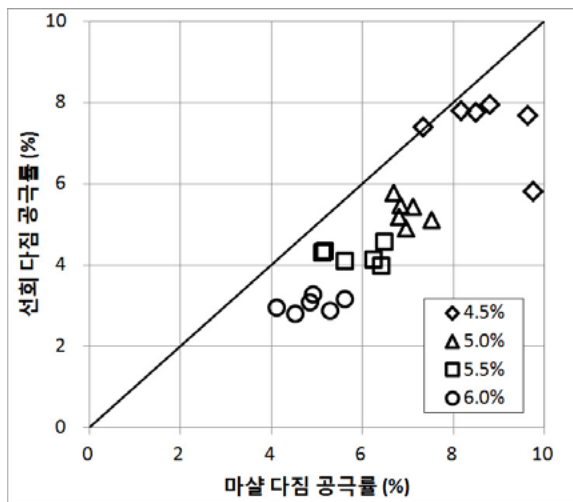


(c) 155°C

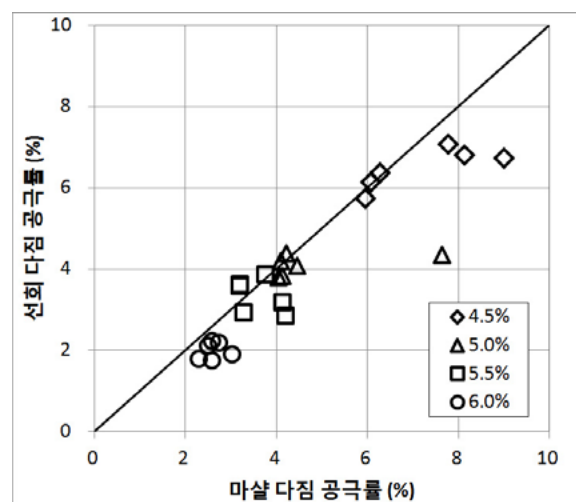


(d) 175°C

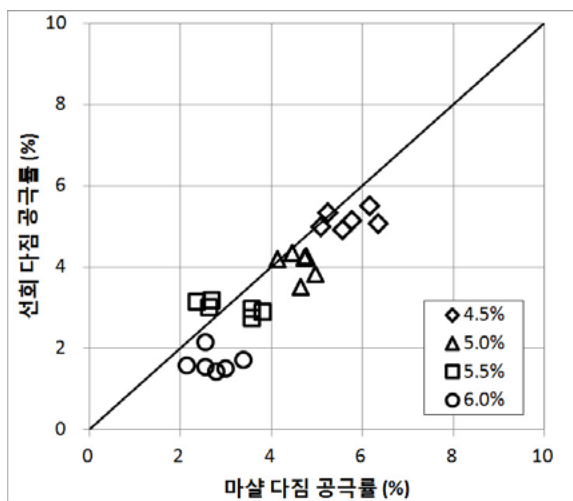
그림 5. 다짐온도별 공극률의 변화(13mm, PG76-22)



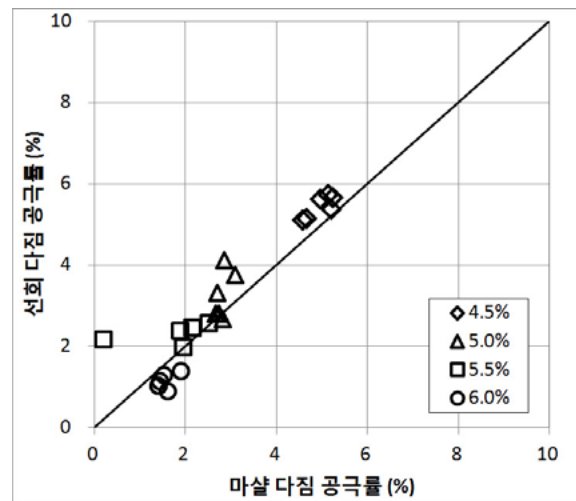
(a) 75°C



(b) 95°C



(c) 115°C



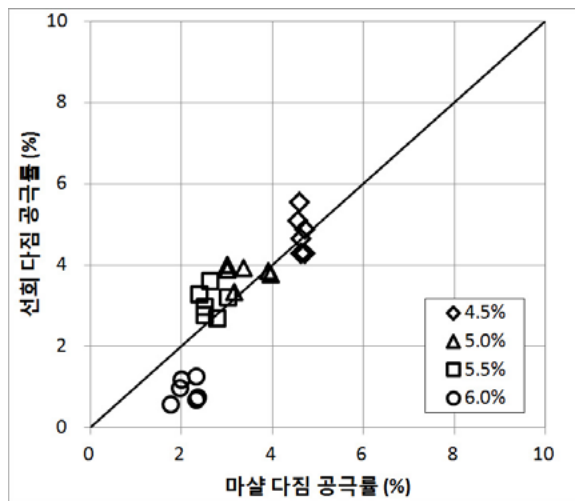
(d) 135°C

그림 6. 다짐온도별 공극률의 변화(13mm, PG70-22)

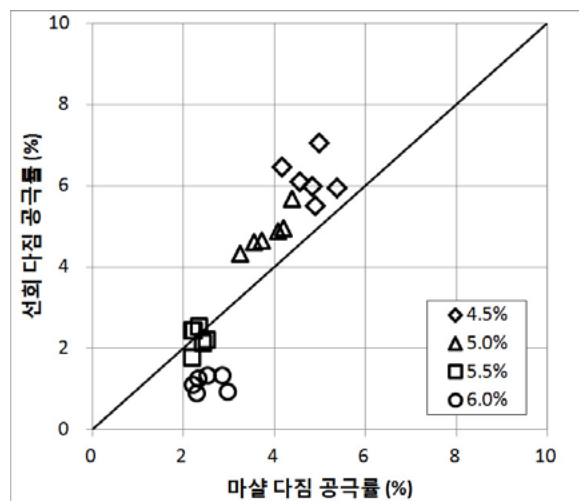
그림 6은 PG70-22로 13mm 밀입도 WMA 혼합물 제조시의 선회다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 6(a)의 75℃에서는 두 다짐기 모두 대부분 공극률이 4% 이상에서 형성되므로 다짐이 잘 안되며 특히 마샬다짐이 덜됨을 알 수 있다. 95℃에서는 함량이 낮은 경우를 제외하고는 대부분의 점들이 대각선에 붙어 형성되어 다짐이 잘됨을 알 수 있다. 115℃에서는 전 구간에 걸쳐 다짐이 잘되며 전반적으로 마샬이 더 잘됨을 알 수 있다. 그리고 135℃에서는 두 다짐기 모두 다짐이 충분히 잘됨을 알 수 있다. 따라서 중온 혼합물이라도 다짐온도만 확보되면 선회다짐기가 마샬과 유사하거나 더 잘 다져짐을 확인하였다. 중온아스팔트 바인더의 제조사의 제시 기준 다짐온도는 115℃인데 본 실험결과는 75℃를 제외하고는 115℃는 물론 95℃부터 135℃까지 모두에서 다짐이 잘 이루어짐을 알 수 있

었다. 하지만 보다 안전하게 다짐량을 확보하기 위해서는 95℃보다는 높은 온도에서 다짐을 수행하는 것이 바람직할 것이다.

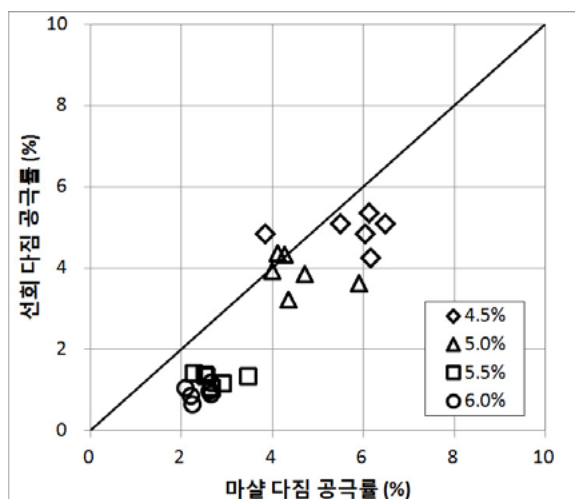
그림 7은 PG64-22로 19mm 밀입도 HMA 혼합물 제조시의 선회다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 7(a), (b)의 115℃와 135℃에서 다짐이 비교적 잘 된것으로 나타났다. 반면 155℃ 이상에서는 두 다짐기 모두 다짐이 잘 되었으나 선회다짐에 비해 마샬다짐이 덜 되는 것으로 나타났다. 이는 고온에서 바인더 유동성이 커서 혼합물의 workability가 좋으므로 선회 시에 골재들의 이김질(kneading)이 잘 이루어져 공간을 메우며 다져지므로 선회다짐이 좋은 결과를 보인 것이라 사료된다. 하지만 175℃는 너무 온도가 높아 보이며 115~155℃에서는 모두 다짐이 잘되는 것으로 판단된다.



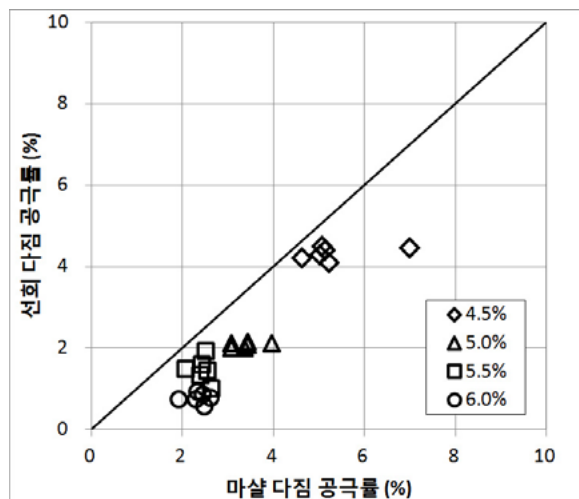
(a) 115℃



(b) 135℃



(c) 155℃



(d) 175℃

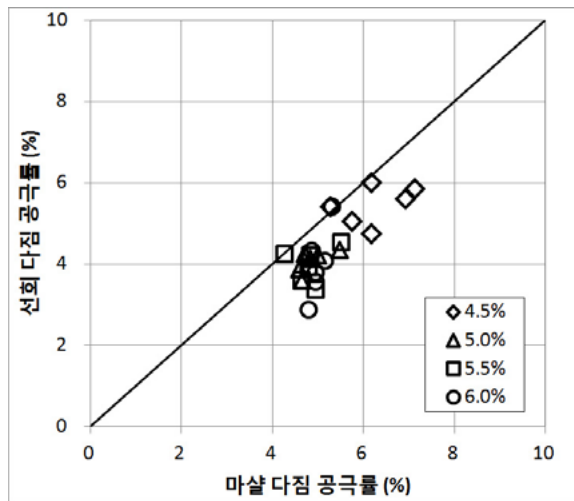
그림 7. 다짐온도별 공극률의 변화(19mm, PG64-22)

그림 8은 PG76-22로 19mm 밀입도 HMA 혼합물 제조시의 선화다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 8(a), (b)의 115℃와 135℃에서 다짐은 불량한 것으로 나타났다. 왜냐하면 115℃에서는 대부분이 공극률 4% 이상으로 다져졌고, 135℃에서는 선화다짐에 비해 마샬다짐이 공극률 1~2% 덜 다져졌기 때문이다. 그러나 155, 175℃의 다짐은 비교적 양호하며 두 다짐기 간의 공극률 차이도 약 1% 이내로 나타나 155℃ 이상에서 두 다짐기 모두 다짐이 잘 되는 것으로 확인되었다.

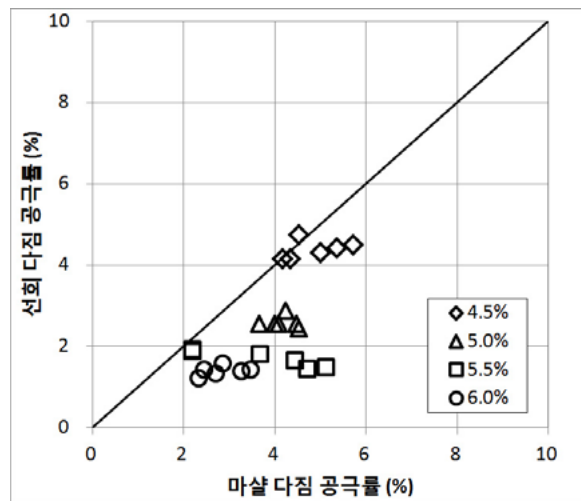
그림 9는 PG70-22로 19mm 밀입도 WMA 혼합물 제조시의 선화다짐과 마샬다짐의 상관관계를 공극률의 변화로 보여주고 있다. 그림 9(a)의 75℃에서는 두 다짐기 모두 대부분 공극률이 4% 이상에서 형성되므로 다짐이 잘 안되며 특히 아스팔트 함량이 낮을 수록 마샬다

짐이 덜됨을 알 수 있다. 95℃에서는 전반적으로는 다짐이 양호하나 대부분의 점들이 대각선 하단에 붙어 형성되어 마샬다짐이 잘 안됨을 알 수 있다. 115℃에서는 전 구간에 걸쳐 다짐이 잘되며 전반적으로 잘됨을 알 수 있다. 그리고 135℃에서는 두 다짐기 모두 과도한 다짐이 이루어짐을 알 수 있다. 이를 통해 19mm 중온혼합물의 경우도 최소한의 온도만 확보된다면 선화다짐기의 다짐이 마샬다짐과 같거나 더 잘된다는 것을 확인할 수 있었다.

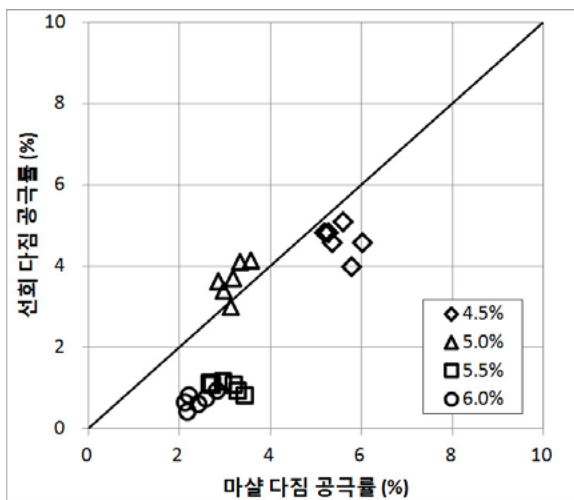
이상의 결과에서 13mm에 비해 19mm는 마샬다짐에 의한 공극률이 선화다짐보다 약 1% 정도 높아 선화다짐이 더 잘되는 것을 알 수 있다. 이는 골재 치수에 따른 차이로 볼 수 있다. 13mm보다 골재치수가 큰 19mm의 경우, 마샬 해머로 다짐하였을 경우 굵은골재에 충격을 가하기 때문에 골재가 부서지지 않는 이상 다짐에는 한



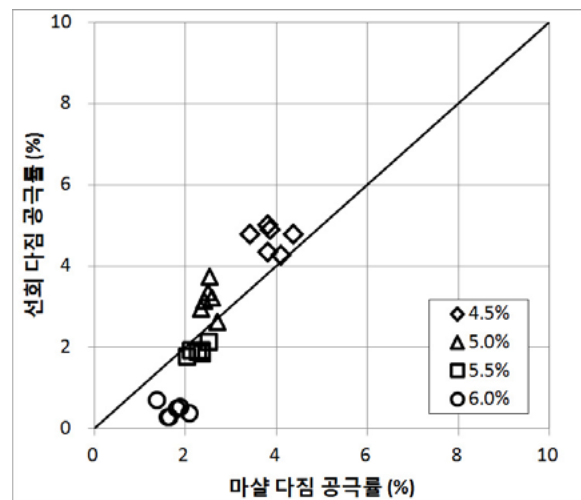
(a) 115℃



(b) 135℃

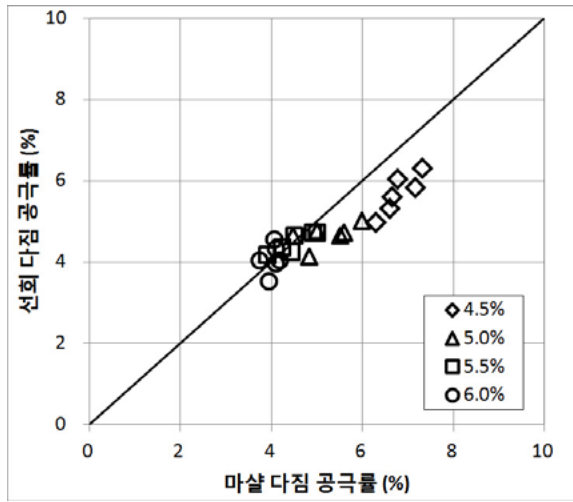


(c) 155℃

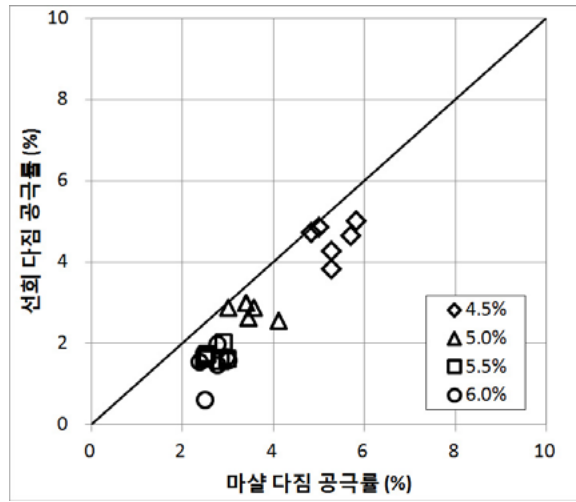


(d) 175℃

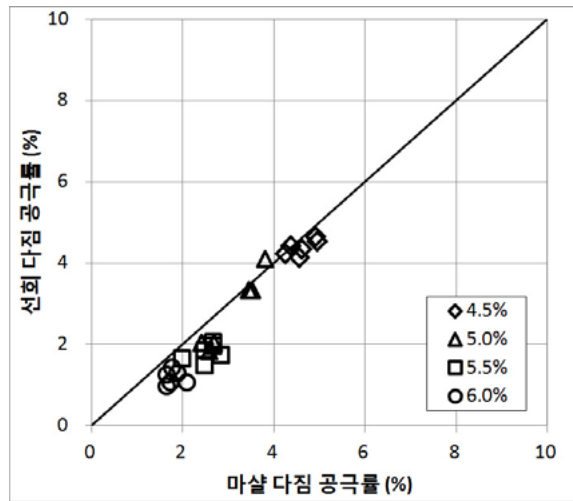
그림 8. 다짐온도별 공극률의 변화(19mm, PG76-22)



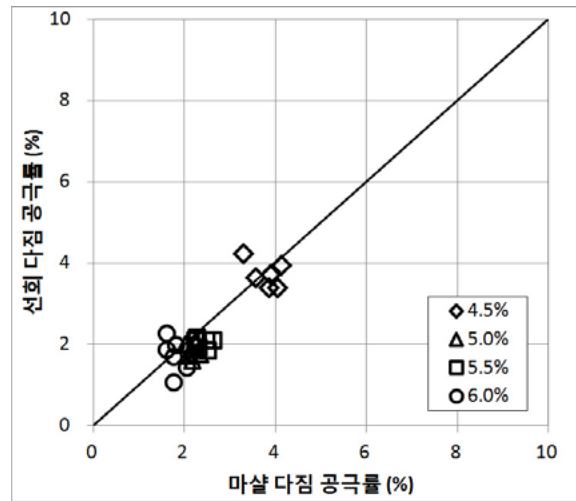
(a) 75°C



(b) 95°C



(c) 115°C



(d) 135°C

그림 9. 다짐온도별 공극률의 변화(19mm, PG70-22)

계가 있다. 하지만 선회다짐은 롤러와 같이 밀어 다지므로 유동성이 좋으면 굵은골재를 눌러 밀 때 잘 이겨지며 잔골재와 섞여 다짐이 잘되는 것으로 보인다.

아스팔트 혼합물의 변형강도(Kim et al. 2011) 및 간접인장강도 등과 같은 공용성 평가를 하기 위해서는 동일한 아스팔트 함량으로 3개의 공시체를 제조한다. 이때 각각의 공시체는 시험에 사용되는 공극률(보통 4%를 기준 공극률로 사용) 기준 $\pm 0.5\%$ 를 만족하게 제조한다. 이때의 공극률 $\pm 0.5\%$ (즉, 1%)의 차이는 공용성 평가에서 큰 영향을 미치지 않는 것으로 가정한다. 이는 기존의 마살다짐기로 공용성 시험을 위한 공시체를 3개 이상 제작시 각 공시체 공극률에 1%의 차이가 나더라도 동일한 공용성을 낼 것으로 추정한다. 따라서, 선회다짐기와 마살다짐기로 제작된 공시체의 공극률이 1% 이내

에서 차이를 보인다면 두 다짐기의 다짐량은 유사한 것으로 볼 수 있는 것이다.

표 5와 표 6은 13mm와 19mm에 대하여 종속변수를 공극률로 설정하여 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 공극률에 대한 분석결과 유의수준 5% ($\alpha=0.05$)에서 바인더의 종류, 다짐온도, 아스팔트 함량의 유의확률($Pr > F$ 값)이 < 0.0001 을 보여 공극률에 크게 영향을 미치는 것으로 13mm 및 19mm 모두에서 나타났다. 하지만, 13mm 입도에서 다짐기 변수는 유의수준 5%에서 유의확률이 0.1150으로 공극률에 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 반면에, 19mm 입도에서는 0.0002로 공극률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 같은 통계분석 결과는 앞의 다짐기 종류에 따른 공극률 변화분석과 동일한 결과를 보여주고 있으며, 19mm 입도는 굵은골재

최대치수가 크기 때문에 다짐하는 방법에 따라서 공극률에 영향을 미치는 것이다.

표 5. 공극률에 대한 분산분석 결과(13mm 혼합물)

Source	DF	Type SS	Mean Square	F Value	Pr>F
바인더 종류	2	121.7435632	60.8717816	179.63	<.0001
다짐온도	3	321.4180788	107.1393596	316.17	<.0001
아스팔트 함량	23	507.0249330	22.0445623	65.05	<.0001
다짐기	215	98.7237084	0.4591800	1.36	0.1150

표 6. 공극률에 대한 분산분석 결과(19mm 혼합물)

Source	DF	Type SS	Mean Square	F Value	Pr>F
바인더 종류	2	6.8352083	3.4176042	10.33	<.0001
다짐온도	3	104.9008083	34.9669361	105.66	<.0001
아스팔트 함량	23	266.6391500	11.5930065	35.03	<.0001
다짐기	176	116.6222576	0.6626265	2.00	0.0002

4. 결론

본 논문에서는 아스팔트 혼합물의 실내 선회다짐기의 다짐횟수에 대한 적정성 검토를 위해 마샬다짐기와 비교를 통해 다양한 온도에서의 다짐 효과 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 13mm 골재 밀입도 혼합물의 경우 일정 온도 이상에서는 선회다짐기의 다짐횟수 100회는 마샬 다짐기 양면 75회와 공극률로 비교한 결과 유사하거나 더 나은 다짐량을 보이는 것으로 나타났으며 이는 가열혼합물은 물론 중온혼합물에서도 유사하게 나타났다.
2. 하지만 일정 다짐온도 이하로 다졌을 경우 두 다짐기의 다짐 량에 차이를 나타내어 다짐온도를 확보하여 다짐하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다.
3. 13mm보다는 19mm와 같은 최대 입경이 큰 골재 혼합물의 경우 롤러 방식으로 밀며 눌러 다지는 선회다짐기가 더 좋은 다짐 효과를 나타내었다.
4. 두 다짐기의 공극률의 차이는 1% 정도를 보여 선회다짐기가 다짐 량이 더 크며 19mm 혼합물에서 통계적 유의차가 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 13mm의 경우 두 다짐기 사이의 다짐량은 유의차가 없는 것으로 나타났다.
5. “가열 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공”에서 제시한 선회다짐횟수 100회는 지침에서 제시한 아스팔트 혼합물의 다짐온도를 준수한다면 마샬다짐기 양면 75

회 다짐과 유사하거나 다소 좋은 다짐 량을 나타낸다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 강원대학교 석재신소재연구소의 장비 지원으로 이루어진 것입니다.

참고 문헌

국토해양부 (2008), “한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구” 2단계 2차년도 최종보고서

국토해양부 (2009), *아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침*

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 (2007), “선회다짐기의 설계 다짐횟수 선정을 위한 연구,” *한국도로학회 논문집*, 제9권 4호, 227-236

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

이문섭 (2010), “아스팔트 혼합물의 용적 및 강도 특성에 근거한 적정 다짐온도의 결정 연구” 강원대학교 대학원 박사학위논문.

Kim, K. W., Amirkhanian, S. N., Kim, H. H., Lee, M. S. and Doh, Y. S., “A New Static Strength Test for Characterization of Rutting of Dense-graded Asphalt Mixtures,” *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, 39(1), Jan., 2011.

NCHRP(2002), “*NCHRP 1-37A 2002 Design Guide*”

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

접 수 일 : 2011. 11. 19
 심 사 일 : 2011. 11. 13
 심사완료일 : 2011. 11. 24