

# 아스팔트 혼합물의 공극률에 근거한 최적다짐온도 사전결정

## Preliminary determination of optimum compaction temperature based on air void of asphalt mixture

이문섭<sup>\*</sup> · 김현환<sup>\*\*</sup> · 김광우<sup>\*\*\*</sup>

Lee, Moon sup · Kim, Hyun Hwan · Kim, Kwang Woo

### 1. 서 론

아스팔트 혼합물의 다짐온도는 공시체의 용적특성에 차이를 유발하여 혼합물의 최적아스팔트함량 (Optimum asphalt content: OAC) 결정에 영향을 미친다. 이렇게 배합설계에서 OAC는 다짐온도에 영향을 받으므로 높은 온도에서 다짐한 혼합물은 작업성이 좋아 낮은 OAC가 얻어지고 같은 바인더라도 다짐 온도가 낮으면 그 반대가 된다. 그리고 실험실에서의 OAC와 플랜트에서의 OAC가 차이가 나는 이유도 배합설계 시 온도가 플랜트 온도와 다르기 때문이다. 게다가 온도가 너무 낮으면 혼합물 제조가 어렵고 OAC 결정도 불가능 하다. 따라서 배합설계시 혼합물의 적정온도를 사전 결정하는 것이 필요하며, 그 온도를 일정하게 유지하기 위해서는 비벼진 혼합물을 일정시간 단기노화 시킨 후 바로 다짐을 하는 것이 필요하다.

그동안 아스팔트 혼합물의 적정 다짐온도는 아스팔트의 점도(viscosity)가  $280 \pm 30 \text{mm}^2/\text{s}$  ( $280 \pm 30 \text{cSt}$  또는  $280 \pm 30 \text{cP}$ ) 이내로 유지되는 온도 범위로 제시되었다(AASHTO, 1998). 이 기준은 일반 아스팔트(Unmodified asphalt)를 사용한 혼합물의 다짐온도를 결정하는데 효과적으로 사용되어 왔다. 그러나 폴리머 개질 아스팔트 (polymer-modified asphalt: PMA)는 일반(비개질) 아스팔트보다 점도가 높기 때문에 상기의 점도를 유지하려면 상당히 높은 온도를 요하게 된다(Bahia, 2000). 예를 들어, Novophalt와 같은 PMA는 온도가  $190 \pm 25^\circ\text{C}$  되어야 상기의 점도범위를 만족한다. 하지만 이 같은 고온에서는 아스팔트는 변질되며 그 징후로 연기가 나기 시작 한다(Shenoy, 2001). 따라서 개질 아스팔트의 경우에는 새로운 다짐온도 결정 방법이 필요하다.

Bahia (2000)는  $0.28 \sim 6.0 \text{Pa} \cdot \text{s}$  ( $280 \sim 6,000 \text{cSt}$ )의 점도 범위에 맞는 다짐온도는 용적 특성에서 무시해도 될 정도로 영향이 적다고 하였다. 이는 앞서 제시된 기준보다 약 20배 높은 점도까지도 허용가능성이 있음을 암시한 것이다. 슈퍼패브 선회 다짐기(Superpave gyratory compactor; SGC)에 의한 다짐은  $280 \pm 30 \text{cSt}$ 보다 더 높은 점도에서 수행해도 된다고 하였다(AASHTO 1998). 그러므로 SGC가 보급되고 개질아스팔트 사용이 늘면서 일반 아스팔트를 기준으로 제시한 상기 점도에 근거한 다짐온도의 결정방법은 현실에 맞도록 개선할 필요가 있다. 그러므로 특정 용적특성이 만족되는 다짐온도를 실제 혼합물의 실험을 통해 정할 수 있다면 현실적인 다짐온도를 결정 할 수 있을 것이다. 이에 본 논문의 목적은 다짐온도에 따른 공극률 변화 분석을 통해 바인더 별로 필요한 다짐온도를 정식 배합설계 전에 결정하는 방법을 실험적으로 제시하는 것이다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 사용 재료

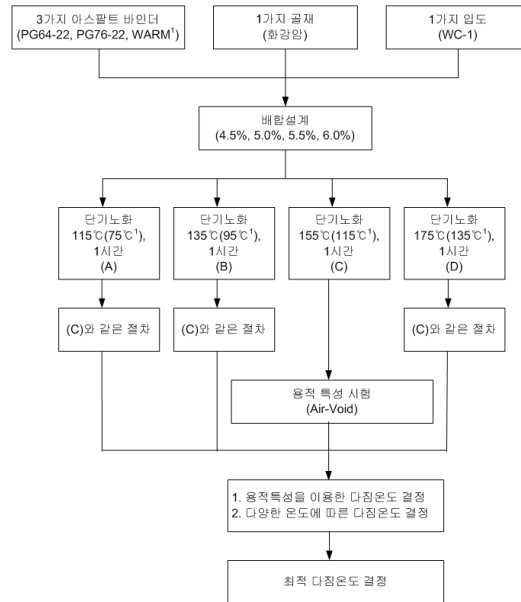
본 논문에서는 3가지 아스팔트 바인더를 사용하여 혼합물을 각각 4가지 온도에서 혼합 및 다짐하여 직경

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원 · 공학박사 · 031-910-0690 (Email: trupath@kict.re.kr)

\*\* 정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-7284 (Email: numgi@hanmail.net)

\*\*\* 정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자 · 033-250-6467 (Email: asphalt@hanmail.net)

100mm 공시체를 제조하고 용적특성을 분석하였다. 3가지 바인더는 가열아스팔트 혼합물(hot-mix asphalt: HMA)용 PG64-22와 PG76-22, 준고온 아스팔트 혼합물(warm-mix asphalt: WMA)용 PG70-22이다. 골재 품질에 따른 아스팔트 혼합물의 영향이 크므로, 골재에 대한 영향을 최소화하기 위하여 편장석(flat and elongated particles) 비율이 낮은 골재를 선정하였다. 굵은골재 최대치수 13mm에 잔골재, 채움재와 혼합하여 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 실험을 수행하였다. 그림 1은 본 논문의 연구 절차를 보여주고 있다.



1 : PG70-22 WMA binder

그림 1. 연구의 흐름도

## 2.2 시험 방법

표 1은 각각의 아스팔트 바인더 생산자가 제시하고 있는 다짐온도를 보여준다. 이를 바탕으로 HMA 용인 PG64-22와 PG76-22는 각각 135°C와 155°C를 적정온도로 보고 그 위 아래로 각각 20°C를 가감하여 제조하였다. 그리고 준고온화 바인더인 PG70-22는 135°C를 최고의 다짐온도로 보고 그 밑으로 얼마나 낮은 온도에서의 다짐이 가능한지를 보기 위해 20°C 3단계를 낮추어 제조하였다. 상기 각각의 온도로 아스팔트 함량을 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%까지 4단계로 변화시켜가며 다짐 횟수 100회로 혼합물을 다짐하였다. 비빈 혼합물(loose-mix)은 다짐 전 1시간동안 각 온도의 오븐에서 단기노화(short-term aging) 시켰다. 각 바인더별로 표 1의 다짐온도별, 아스팔트 함량별로 공극률이 4% 정도 얻어지는 다짐온도를 분석하여 허용다짐온도 범위를 선정하였다. 그리고 이를 실용성과 경험적 근거에 의해 현실적으로 조정하고, 이를 이용하여 소요 혼합물의 적정 다짐온도를 사전에 결정하는 방법을 제시하였다.

표 1. 아스팔트 혼합물의 다짐온도

혼합물 종류	아스팔트 바인더 등급	다짐온도 (°C)		다짐 실험 온도
		기준온도	제조사 제시 온도	
HMA	PG64-22	140±2		115°C, 135°C, 155°C, 175°C
	PG76-22	150±20	145~155	115°C, 135°C, 155°C, 175°C
WMA	PG70-22	-	115±10	75°C, 95°C, 115°C, 135°C

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 회전점도 시험결과

아스팔트 혼합물의 적정 다짐온도 결정을 위해 바인더에 대한 회전점도계(Rotational viscometer)로 점도시험을 수행한다. 이에 본 논문에서는 회전 점도계로 동점도(Kinematic viscosity: KV) 시험을 수행하여 회귀분석 및 추정 모델 식을 구하였다(그림 2). 각 추정모델 식으로부터 점도 KV=280 mm<sup>2</sup>/s이 얻어지는 온도를 계산을 통해 추정하였다.

즉, HMA용 PG64-22의 경우 최적온도(x)는  $x = \ln(280/354,393)/(-0.05) = 142.87$  이며 같은 방식으로 나머지 값들도 구하여 이에 근거한 실용적인 적정온도도 제시하였다(표 2).

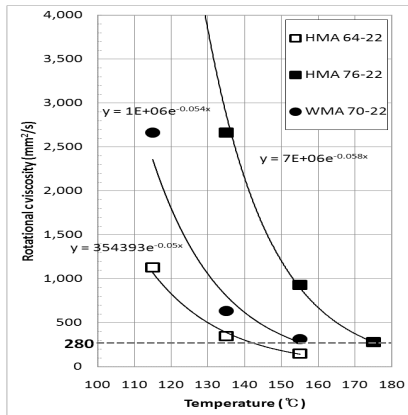


그림 2. 온도에 따른 회전점도 시험결과

표 2. 회전점도를 이용한 다짐온도

아스팔트 바인더	회전점도 (mm <sup>2</sup> /s)	예측된 다짐온도 (°C)	적정 다짐온도 (°C)
HMA PG64-22	280	142.9	143
HMA PG76-22	280	174.6	175
WMA PG70-22	280	151.5	152

#### 3.2 공극률 특성 분석

각 바인더별로 4가지 온도에서 아스팔트 함량별로 선회 다짐기를 사용하여 100mm 공시체를 6개씩 제조하여 표 3과 같이 용적특성을 구하였다. 그리고 국토해양부 지침의 아스팔트 혼합물의 용적특성 기준 중 Air-void 4%를 이용하여 data를 분석하였다.

표 3. 선회다짐기를 이용한 배합설계 결과

바인더	다짐온도 (°C)	OAC (%)	G <sub>mb</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	공극률 (%)	VMA (%)	VFA (%)
HMA 64-22	115	4.8	2.409	4.0	15.4	72.9
	135	4.9	2.412	4.0	15.4	74.6
	155	4.7	2.414	4.0	15.2	72.6
	175	4.5	2.428	4.0	14.5	73.1
HMA 76-22	115	-	-	-	-	-
	135	5.3	2.411	4.0	16.4	75.6
	155	5.3	2.414	4.0	16.3	76.4
	175	5.1	2.422	4.0	15.9	75.9
WMA 70-22	75	-	-	-	-	-
	95	5.1	2.406	4.0	16.0	74.5
	115	5.0	2.410	4.0	15.8	74.0
	135	4.8	2.415	4.0	15.4	73.2

일반적으로 최적 아스팔트 함량(OAC)은 공극률이 4%에 해당하는 아스팔트 함량에서 다른 기준 값들이 만족하면 그 값으로 결정한다. 따라서 본 연구에서는 공극률 4%를 기준으로 하였다. HMA 76-22의 115°C와 WMA 70-22의 75°C에서 4%의 공극률을 얻을 수 없었다. 이것은 온도가 낮아 다짐량의 부족하기 때문이다.

그림 3은 13mm 입도에 PG64-22 일반 아스팔트 바인더를 사용한 실험결과를 보여주고 있다. 공극률을 기준으로 보면 115, 135, 155℃에서는 AC≈4.7% 부근에서 기준 공극률 4%를 만족하고 있다. 175℃에서는 다른 다짐온도보다 아스팔트 함량이 다소 낮은 4.5%에서 4% 정도의 공극률을 나타내어 다짐 온도가 높은 편이기는 하지만 최적아스팔트 함량을 결정 할 수 있었다. 하지만, 다른 아스팔트 함량을 고려한 전체적인 추세로 보았을 때는 다른 다짐밀도와 유사한 경향을 나타낸다고 볼 수 있다.

PG64-22 아스팔트는 135℃ 이상에서 다짐온도를 권고하고 있고 표 2의 점도를 이용한 추천 온도는 143℃이다. 이에 비해 다짐온도별 분석 결과 권장이나 추천 다짐온도보다 20-25℃ 낮은 115℃ 이상에서도 제대로 다짐이 되는 것으로 나타났다.

그림 4는 13mm 입도에 PG76-22 개질아스팔트를 사용한 혼합물의 공극률 및 포화도의 변화를 다짐온도와 아스팔트 함량변화를 통해 분석하였다. 공극률을 살펴보면 135, 155, 175℃는 아스팔트 함량 약 5.2% 부근에서 기준 공극률 4%를 만족하고 있었다. 하지만, 115℃의 경우에는 아스팔트 함량 6%에서도 약 5%의 공극률을 보여주고 있다. 이는 다짐온도가 낮아서 다짐량을 확보할 수 없기 때문에 발생한 결과이다.

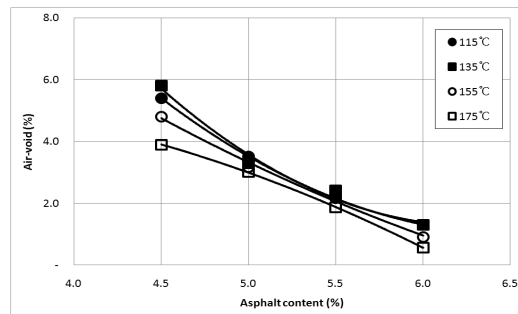


그림 3. 다짐온도와 아스팔트 함량에 따른 공극률의 변화 (HMA 64-22)

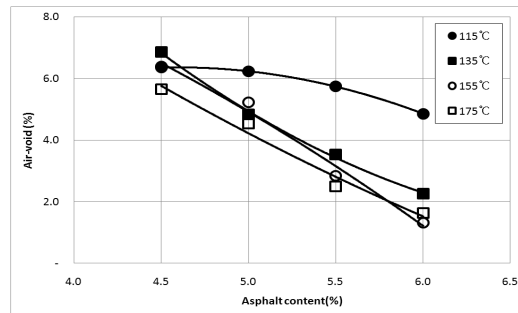


그림 4. 다짐온도와 아스팔트 함량에 따른 공극률의 변화 (HMA 76-22)

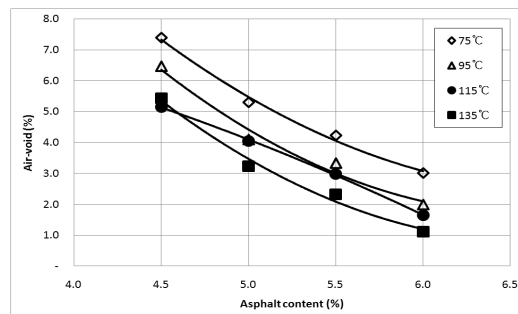


그림 5. 다짐온도와 아스팔트 함량에 따른 공극률의 변화 (WMA 70-22)

그림 5는 13mm 입도에 PG70-22 준고온 바인더를 사용한 혼합물의 공극률의 변화를 다짐온도와 아스팔트 함량변화를 통해 분석하였다. 공극률을 보면 75℃에서는 아스팔트 함량 5.5%에서 공극률 4%를 만족하였으나 그보다 낮은 아스팔트 함량에서는 만족치 못하였다. 이는 다짐온도가 낮아서 다짐 량을 확보하지 못하기 때문에 발생한 결과이다. 반면 95, 115, 135℃는 약 5.0% 부근에서 공극률 4%를 만족하였다.

결과적으로 다짐온도 75℃에서는 OAC가 5.7% 정도로 95, 115℃의 5.1%나 135℃의 4.8%보다 0.7% 포인트 가까이 높게 나타나서 문제가 있음을 알 수 있다. 한편, 135℃에서는 과도한 유동성으로 아스팔트 함량이 너무 낮아지므로 적정 다짐온도는 95~115℃인 것으로 판단된다.

이와 같이 바인더별로 아스팔트 혼합물의 공극률 등의 용적특성을 기준으로 다짐온도 범위를 결정 할 수 있었다. 하지만, 실제 플랜트나 실험실의 품질관리 상태, 기후조건 등을 고려하여 과도히 높거나 낮은 온도를 제외하고 이를 적절히 보완한 다짐온도를 표 4와 같이 제시할 수 있다.

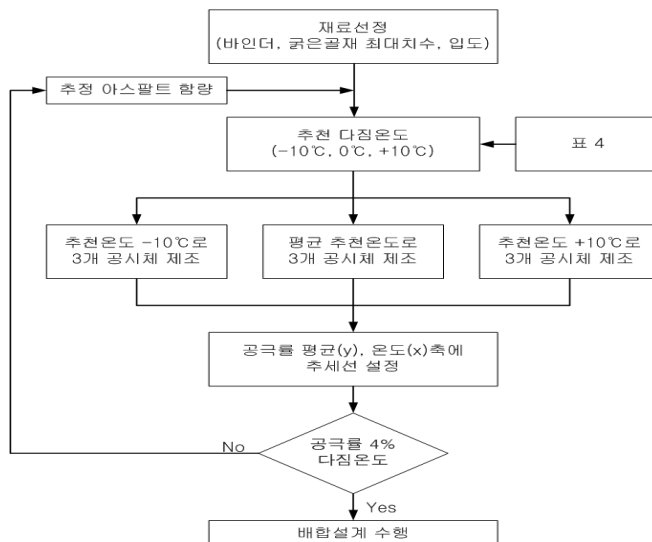
**표 4. 추천 적정다짐온도 범위**

Compactor	Asphalt binder	Suggested compaction temperature (°C)
Gyratory	HMA 64-22	130~150
	HMA 76-22	135~155
	WMA 70-22	115~135

### 3.3 사전 다짐온도 결정방법

표 4를 근거로 아스팔트 혼합물의 배합설계를 위한 다짐온도를 사전 결정하는 방안을 그림 6과 같이 제안하였다. 그림 6의 배합설계를 수행하기 전 추정 아스팔트 함량으로 공시체를 제작하여 다짐온도를 결정하는 방법의 흐름도이다.

이 방법은 쉽고 간단하게 다짐온도를 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 즉, 사전에 제시된 다짐온도 정보가 없는 경우, 주어진 골재입도, 굵은 골재 최대치수 및 사용될 바인더와 다짐기, 추정 OAC를 가지고 본 논문에서 제시하는 표 4를 기준으로 한다.



**그림 6. 다짐온도 결정 절차**

예를 들어, 선회 다짐기를 사용하여 PG64-22 바인더로 HMA 혼합물을 제조할 경우 표 4에 제시된 다짐온



도 130~150℃를 근거로하여 130, 140, 150℃ 세 가지 온도에서 추정 아스팔트 함량으로 공시체를 3개 이상씩을 제조 한다. 추정 아스팔트 함량은 각 플랜트나 실험실별 사용 재료에 대한 경험적 추정치를 사용한다. 제조된 공시체의 물성시험을 수행하여 각 온도별 공극률 평균값을  $y$ 축에, 온도를  $x$  축으로 하여 추세선을 긋고 공극률 4%가 얻어지는 다짐온도를 적정 다짐온도로 선정한다. 만일 이때 공극률 4%를 만족하는 온도가 없다면 그림 6처럼 추정 아스팔트 함량을 조정하여 다시 수행한다. 그리고 이온도가 결정되면 정식으로 배합설계를 수행하여 추정아스팔트 함량이 아닌 최적아스팔트 함량(OAC)을 얻게 될 것이다.

일반적으로는 다짐온도가 높으면 다소 낮은 OAC가, 다짐 온도가 낮으면 다소 높은 OAC가 결정될 수 있다. 따라서 실험실에서의 임의 온도로 배합설계한 결과와 플랜트에서의 배합설계 결과가 다르게 된다. 하지만 본 논문에서 제시된 방법을 따를 경우 이온도를 플랜트에 제시하여 생산온도를 조절할 수도 있어 온도에 따른 문제가 다소 해결될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문은 3가지 아스팔트 혼합물에 대한 공극률(Air-void)을 이용하여 다짐온도의 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 13mm 밀입도 HMA 76-22의 115℃와 WMA 70-22의 75℃에서 4% 공극률을 얻을 수 없었으나 135℃와 95℃에서는 가능하였다. 이는 선화다짐기가 상당히 낮은 온도에서도 다짐량을 제공함을 의미한다.
2. 공극률 분석을 통하여 얻어진 다짐 가능온도를 현실적으로 보완한 적정다짐온도는 HMA PG64-22는 130~150℃, PG76-22는 135~155℃이며, WMA PG70-22 혼합물은 다짐기 및 골재 입도에 영향을 덜 받으며 다짐은 95℃에서도 가능하였으나 적정온도는 115~135℃로 나타났다.
3. 이상의 연구를 통해 선화다짐기로 일반 아스팔트 혼합물은 물론 PMA 혼합물 및 WMA 혼합물의 적정다짐온도를 결정할 수 있었다. 이는 점도방법으로 얻어지는 값과 비교시 일반 혼합물은 유사하지만 PMA의 경우 40℃까지도 낮은 수준이어서 점도방법의 문제점을 해결 할 수 있다는 결론을 얻었다.
4. 실제 다짐온도를 결정하기 위해서 상기 범위에서 3가지 온도와 추정아스팔트 함량으로 사전에 최적 다짐온도를 결정하는 방안을 제시하였다. 이 최적 온도로 배합설계를 수행하고 같은 온도를 플랜트에 제시하여 생산온도를 조절하면 실험실과 플랜트 배합설계의 차이 문제가 해결될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 강원대학교 석재신소재 연구소의 장비의 지원으로 이루어진 것입니다.

#### 참고 문헌

1. “아스팔트포장공학원론,” (1999), 한국도로포장공학회
2. “아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침,” (2009), 국토해양부
3. 이문섭 (2010), “아스팔트 혼합물의 용적 및 강도특성에 근거한 적정 다짐온도의 결정 연구” 강원대학교 대학원 박사학위 논문
4. AASHTO (1998), “Practice for short and long term aging of hot mix asphalt,” AASHTO Provisional Standard Designation, Washington, D.C., 2-96
5. Bahia, H. U. (2000), “Recommendations for mixing and compaction temperatures of modified binders,” Draft topical report for NCHRP study No. 9-10. National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
6. Shenoy, A. V. (2001), “Determination of the temperature for mixing aggregates with polymer-modified asphalt,” International Journal of Pavement Engineering 2, 1-15
7. Stuart, K. D. (2001), “Methodology for Determining Compaction temperatures for Modified Asphalt Binders,” Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, McLean, VA.