



통계적 근거에 의한 표층 아스팔트 혼합물 변형강도의 배합강도 설정연구

Statistical Inference for Process Mean of Deformation Strength of Asphalt Mixtures

라 일 호*

김 진 철*

도 영 수**

김 광 우***

Ilho La

Jin C. Kim

Young S. Doh

Kwang W. Kim

Abstract

This study was performed to establish the process mean which is statistically satisfying the critical limit of deformation strength (S_D), which is found to reflect rutting characteristics of asphalt mixture relatively well. The process means were determined using the critical S_D values (3 MPa for local highway and 4 MPa for arterial highways), which were obtained from correlation analysis of APA and S_D test data of actual highway projects, and coefficient of variation of 32 combinations of domestic mixtures. The process means of 3.2 MPa for local highway and 4.25 MPa for arterial highways were suggested when using 3 specimens (diameter of 100mm). However, since these values are based on the loading speed of 30mm/min, the higher values, 3.5 MPa for local highway and 4.5 MPa for arterial highways, were suggested, respectively, if the loading speed of 50mm/min is applied using the old Marshall machine, which should give higher test values.

Keywords : rutting, deformation strength, APA, coefficient of variation, process mean, local highway, arterial highway, Marshall machine

요 지

본 연구는 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 비교적 잘 반영하는 변형강도치가 안정적으로 배합설계시 기준강도를 만족할 수 있는 배합강도를 통계적 분석에 의해 제시하기 위하여 이루어졌다. 따라서 실제의 도로 혼합물의 APA 시험과의 변형강도의 상관관계로부터 얻어진 혼합물의 임계치 (일반도로 3MPa, 간선도로 4MPa)와 국내 32개 조합의 아스팔트 혼합물의 변형강도 값을 통해 변동계수(V_C)를 계산하고 이를 이용하여 배합강도를 산정하였다. 공시체를 3개 사용할 경우 직경 100mm 공시체의 일반도로와 간선도로의 혼합물의 배합강도는 3.2MPa와 4.25MPa로 설정되었다. 또한, 이 값은 재하속도 30mm/min의 장비에서 얻어진 값이므로 재하속도가 50mm/min로 고정된 마샬안정도 시험기 사용시에는 더 높은 값인 3.5MPa와 4.5MPa이 각각의 기준으로 설정되었다.

핵심용어 : 소성변형, 변형강도, 변동계수, 배합강도, 일반도로, 간선도로, 마샬안정도 시험기

* 정회원 · 강원대학교 대학원 지역건설공학과 석사과정

** 정회원 · 강원대학교 석재복합건설신소재연구소 연구교수

*** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수, 교신저자



1. 서론

마살 배합설계 방법은 아스팔트 포장의 소성변형에 대처할 수 있는 방법이 되지 못하며, Superpave 설계법은 국내는 물론 유럽 등에서도 적용에 어려움을 겪고 있어 보다 현실적인 방법의 개발이 필요한 실정이다. 이를 위해 일부 단순한 시험법 및 변수의 평가 연구(Hafez,1997; Kaloush,2001; Krutz et al,1991; Witzack et al,2002)가 있었으나 실용적으로 제시된 바는 없어 여전히 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 반영할 수 있으며 실용적인 배합설계법의 개발·적용이 필요한 실정이다.

따라서 한국형 포장설계법 연구(건설교통부, 2007)에서는 아스팔트 포장의 배합설계법을 개선하여 그간 무용론이 제기되어온 마살안정도 및 흐름을 제외하고 이를 변형강도(Deformation strength: S_D)와 골재간극률 (Void in mineral aggregate: VMA)로 대체토록 하였다. 변형강도의 임계치는 선형연구에서 제시되었으며 VMA는 미국의 미국 아스팔트협회(AI) 기준을 도입하였다. 그리고 그간 사용되어온 공극률은 4%로, 포화도(Void filled with asphalt: VFA)는 기준치를 다소 조정하였다. 즉, 국내의 VFA 기준은 혼합물에 따라 다소 다르지만 미국 아스팔트협회(AI) 기준에 비해 대략 5-10% 포인트 정도가 높게 설정되어있어 최적 아스팔트 함량이 다소 높게 결정되는 근거가 될 수 있으므로 다소 낮추어 조정하였다.

변형강도의 임계치(Critical deformation strength: S_{DC})는 선정연구(김광우 등 2007)에 의하면 일반적으로 아스팔트 혼합물은 직경 100mm 공시체 사용시 3.0MPa, 대형차 교통량 1일 일방향 1000대 이상, 또는 20년 설계 ESAL > 10⁷인 중교통도로 포장 (이하 간선도로 포장) 혼합물의 경우 4.0MPa 이상이다. 하지만 이 임계치는 설계기준강도의 개념이고 배합강도는 안정적으로 혼합물들이 소정의 임계치를 넘기 위해 더 높은 값으로 설정되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 그간의 시험 data

와 통계적 이론을 적용하여 변형강도의 배합강도를 선정하는 방법을 연구하고 실제 적용치를 제시하는 것이다.

2. 변형강도 배합강도의 개념

아스팔트 혼합물의 변형강도가 일정치 이상이면 소성변형 저항성시험에서 특정기준을 만족하는 성능을 나타낸다(김광우 등 2007). 이와 같은 근거하에서 다양한 밀입도시험 data를 이용하여 변형강도의 임계치(Critical deformation strength: S_{DC})가 결정되었다 (한국형.. 2007). 대부분의 공학적 특성치가 그렇듯이 아스팔트 혼합물의 각종 특성치의 통계적 분포는 정규분포를 따르는 것으로 가정하며, 특정 혼합물의 변형강도나 rut depth 평균이 m 이라면 그 점에서 해당 특성치의 분포는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 각 분포도는 해당 변수의 정규분포 확률밀도함수(Probability density function: PDF)의 개략도이다. 또한 주곡선은 미국 South Carolina(SC)주의 주간(전국망)고속도로(Interstate highway)와 주도로(State highway)에 사용된 혼합물의 APA와 S_D 시험에서 얻어진 data의 회귀분석을 통해 그려진 것이다.

아스팔트 혼합물의 변형강도는 Wheel tracking (WT) 시험은 물론 Asphalt pavement analyzer (APA) 시험결과와의 상관관계와도 높다(Doh et al 2007, Kim et al 2008). 그림 1에서 보면 직경 100mm 공시체의 변형강도가 3 MPa 이상이면 APA 시험에서 Rut depth가 미국 South Carolina 도로국에서 제시한 일반도로 포장 기준인 5mm(Hot-Mix Asphalt... 2007) 이하를 만족한다. 하지만 변형강도의 평균이 3MPa이라고 해서 항상 APA 기준을 만족하는 것은 아니다. 즉, 평균이 3이라는 것은 여러 data가 모여 만들어진 것이므로 그림 1의 " S_D 평균 3에서의 통계적 분포"와 같이 하나의 분포를 가질 것이다. 또한 만일 $m=5$ MPa이 되도록 제조한 혼합물의



변형강도를 측정하면 반은 5이하 반은 5이상을 보이는 혼합물을 얻을 것이다. 따라서 임계치가 특정 값으로 주어진 경우 혼합물의 대부분이 임계치를 넘으려면 그 평균은 임계치보다 높게 책정되어야 한다. 즉, 혼합물을 제조할 때 배합설계에서 얻어지는 강도(이하 배합강도)가 임계치보다 높도록 제조되어야 한다.

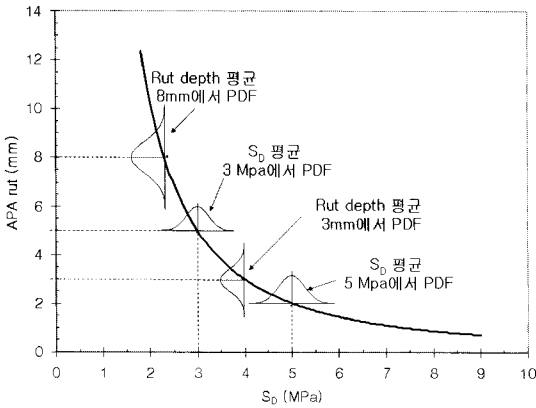


그림 1. APA rut depth vs. S_0 relationship and PDF at each point for each variable

따라서 배합강도의 설정을 위해서 다음과 같이 통계적 품질관리 기법을 도입하였다. 통계적으로 불량한 혼합물이 도로에 포설되어 소비자(시민)가 사용하게 되는 확률을 소비자 위험(Consumer risk: CR) 확률이라 하고 우수한 혼합물이 생산되었음에도 불합격되는 확률은 생산자 위험(Producer risk: PR) 확률이라 한다. 즉, 생산자 위험확률이란 좋은 물건을 생산하고도 불합격판정을 받을 확률(α)이고, 소비자 위험확률이란 나쁜 생산품이 합격되어 소비자가 불량품을 쓰게 될 확률(β)이다. 일반적으로 CR과 PR의 값은 각각 10% ($\beta = 0.1$)와 5% ($\alpha = 0.05$)를 사용한다(박성범 2002). 이때 α 에 해당하는 품목집단(Lot)의 불량률을 P_0 , β 에 해당하는 Lot의 불량률을 P_1 이라 한다. 일반적으로 P 값은 생산품의 종류에 따라 다르나 P_0 는 합격품질수준(Acceptable Quality Level: AQL)과 일치하고 P_1 은 Lot의 허용불량률(Lot tolerance percent defective: LTPD)과 일치한다. 즉 AQL은 소비자가

만족하는 불량률 중 최대치이고, LTPD는 불합격 품질 수준(Rejectable Quality Level: RQL)이라 할 수 있다. 이를 검사특성곡선(Operation characteristics (OC) curve)에서 나타내면 그림 2와 같다(박성범 2002).

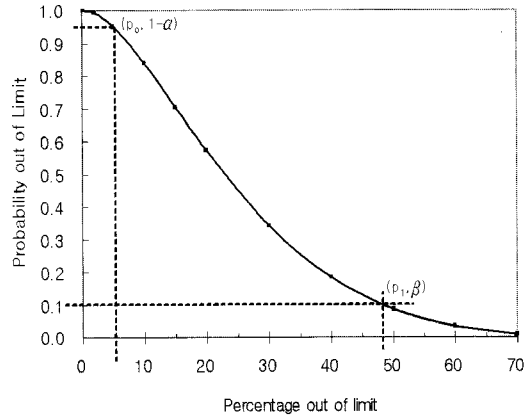


그림 2. Operation characteristics (OC) curve에서의 생산자 위험률(α)과 소비자 위험률(β), 그에 해당하는 합격 품질수준(P_0)과 허용불량률(P_1).

따라서 소비자 위험확률 개념을 아스팔트 혼합물의 변형강도에 적용하면 생산되는 아스팔트 혼합물이 어느 정도의 배합강도(공정평균: Process average, m) 수준을 유지해야 안정적으로 이 확률을 만족할 수 있는지 알 수 있다. 그림 3에서와 같이 전체혼합물의 10%가 기준치를 넘어날 확률로 공정 평균을 유지하면 소비자 위험확률은 10%이다. 즉, 임의로 배치한 혼합물의 변형강도가 임계치 이하일 확률(Probability of failure: P_f)을 0.1 이하로 유지하려면 배합강도를 더 높여 혼합물의 합격률(신뢰도)을 0.9 (90%) 이상으로 유지해야 할 것이다. 다시 말해 $P_f \leq 0.1$ 이어야 한다. 혼합물의 변형강도는 정규분포를 따른다고 가정하고 표준편차를 알 경우 일반적으로 3개 또는 그이상의 공시체($n \geq 3$)를 제조해 측정될 배합강도의 평균 값 m 을 제시할 수 있다.

그림 3은 변형강도의 PDF에서 통계적으로 임계치와 평균치와의 관계를 나타내며, 임계치(S_{DC})와 $\beta(P_f)$ 가 주어지면 공정평균으로 표현되는 배합강도



(m)은 S_{DC} 보다 sz/\sqrt{n} 만큼 커야함을 알 수 있다. 여기서 s 는 표준편차, n 은 공시체 수, z 는 표준정규 분포 표에서 구하고자 하는 확률 값에 따른 함수로서 $z = \frac{\bar{x} - m}{s/\sqrt{n}}$ 이다.

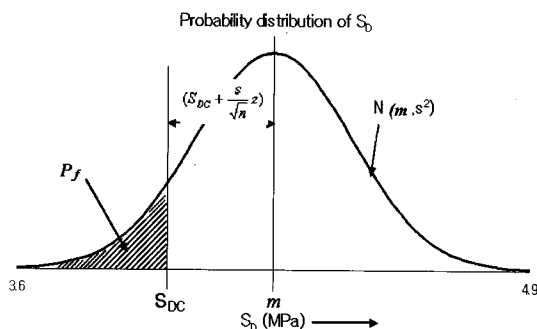


그림 3. 아스팔트 혼합물의 임계변형강도(S_{DC})와 배합강도(m)의 관계

3. 배합강도 산정

3.1 이론적 근거

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 최근 변형강도 시험치를 이용하여 변동계수(Coefficient of variation: V_C)를 구하고 이를 통계적으로 적용하는 방법을 연구하였다. 여기서 V_C 는 표준편차의 평균에 대한 비율로서

$$V_C = \frac{s}{m} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, s = 표준편차, m = 평균이다.

평균 m 은 구하고자하는 수치(공정평균: n 개 공시체의 변형강도 평균)로 미지수이며, 표준편차는 식 (1)로부터 $s = m \times \frac{V_C}{100}$ 이다. 이를 이용해 기준치를 벗어날 확률에 대한 z 값을 표준정규분포 표에서 찾아 이를 $z = \frac{\bar{x} - m}{s/\sqrt{n}}$ 로 놓고 여기에 위의 s 를 대입하면

$$z = \frac{100(\bar{x} - m)\sqrt{n}}{mV_C}$$

이 수식의 \bar{x} 에 그림 3의 변형강도 임계치인 S_{DC} 를 대입하면 $z = \frac{100(S_{DC} - m)\sqrt{n}}{mV_C}$

이다. 이 식을 구하고자 하는 m 에 대한 수식으로 다시 정리하면 $zmV_C = 100S_{DC}\sqrt{n} - 100m\sqrt{n}$ 이고, $m(zV_C + 100\sqrt{n}) = 100S_{DC}\sqrt{n}$ 에서 식 (2)를 얻는다.

$$m = S_{DC} \left[\frac{100\sqrt{n}}{zV_C + 100\sqrt{n}} \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 대괄호 안의 값은 증가계수(Increment factor)에 해당한다. 즉, 임계치에 증가계수를 곱하면 구하고자 하는 공정평균이 얻어진다. 이 증가계수를 변동계수와 P_f 의 함수로 나타내면 그림 4와 같이 되며 이때 주어진 P_f 와 변동계수에 따라 y 축에서 얻어지는 수치를 임계치에 곱하면 구하고자 하는 배합강도를 얻을 수 있다. 품질관리를 철저히 하여 허용 P_f 를 5%로 설정하면 변동계수가 약 10%일 경우 증가계수는 약 1.106, 품질관리를 낮게 하여 허용 P_f 를 20%로 설정하면 증가계수는 약 1.05이어서 원하는 품질관리 수준에 따라 차이가 많이 남을 알 수 있다.

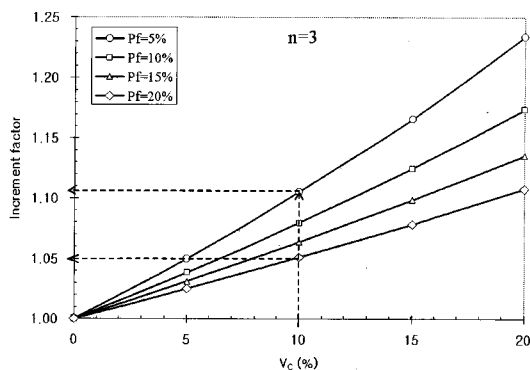


그림 4. 공시체의 수가 3일 경우 변동계수 (V_C)와 변형강도가 임계치 이하의 확률 (P_f)에 따른 증가계수의 변화

3.2 배합강도의 계산

본 연구에서는 최근의 변형강도 성능평가시험에 사용된 32개 조합혼합물의 국내 data(건설교통부,



2007)를 이용하였다. 이 변동계수 자료와 앞서 제시한 일반도로용 아스팔트 혼합물(선회다짐 75회로 공시체 제조)과 간선도로 혼합물(선회다짐 100회로 공시체 제조)의 변형강도 임계치(Critical $S_D : S_{DC} = 3.0$ 과 4.0 MPa)를 이용하여 배합강도를 구하였다. 이 임계치는 아스팔트 혼합물의 배합설계 지침(안)(2007)의 연구에서 사용된 것으로 변형강도와 APA 시험결과와의 상관성 분석으로부터 100mm 공시체에 대하여 산정한 것이다.

표 1. 골재 크기 및 종류별 변형강도 평균치 및 변동계수(V_C)

Variable	Max agg. size	Agg. source	Mean	Note
Mean S_D (MPa)	3.975	3.480	3.728	2 agg sizes \times 2 agg sources \times 4 binders \times 2 tests=32 combinations
V_C (%)	8.008	8.789	8.399	

표 1에서 변형강도의 변동계수 평균은 8.4%로 주어졌으므로 $s = 0.084m$ 이다. 이를 이용해 정규분포 표에서 10% (0.1)가 기준을 벗어날 확률(임계치 미만일 확률)에 해당하는 z 값을 찾으면 $z_{0.1} = -1.28$ 이다. 여기서 식 2의 증가계수를 구하기 위해 $n=3$, $V_C = 8.4\%$ 를 대입하면 $\frac{100\sqrt{n}}{zV_C + 100\sqrt{n}} = \frac{100\sqrt{3}}{-1.28 \times 8.4 + 100\sqrt{3}} = \frac{173.21}{162.45} = 1.066$ 이며, 이로부터 $m = 3 \times 1.066 = 3.198$ 을 얻는다.

이를 소수점 두 자리까지만 표기하면 배합강도는 3.20MPa이다. 즉, 해당 혼합물 90% 이상의 공정 평균(Lot average)이 안정적으로 임계치 3.0을 넘으려면 3개 공시체 측정치의 평균이 3.2MPa 이상이 되어야 한다. 같은 방식으로 간선도로 혼합물의 임계치 4.0MPa의 배합강도를 계산하면 $4 \times 1.066 = 4.26$ MPa이나 알기 쉽게 정리될 수 있는 수치인 4.25MPa로 정할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

또한 식 (2)를 풀기 위해서는 임계치(S_{DC}), 공시체수(n), 표준정규분포 변수 z , 변동계수 (V_C)를 알아야 한다. 여기서 z 는 P_f 의 함수이므로 S_{DC} 와

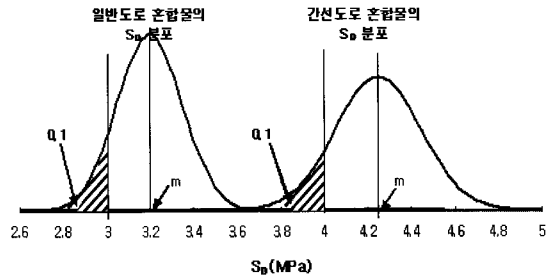


그림 5. 일반도로 아스팔트 혼합물과 간선도로 아스팔트 혼합물의 변형강도(S_D) 분포 및 공정평균(일반도로 $m=3.2$, 간선도로 $m=4.25$).

P_f 가 주어진다면 결국 구하고자 하는 평균값 m 은 V_C 와 n 의 함수이다. 또한 다양한 n 에서 m 을 구하기 위하여 이 두 변수 (V_C 와 n)의 관계를 도표로 나타내면 그림 6, 7과 같다.

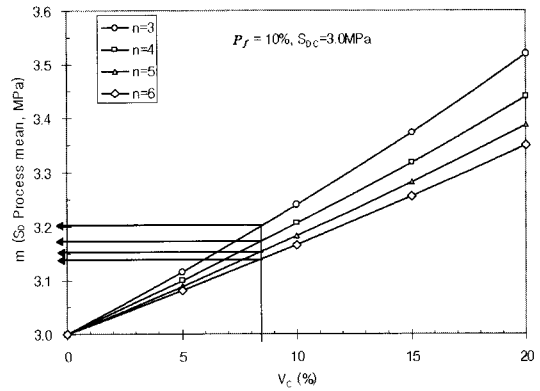


그림 6. 임계변형강도가 3MPa인 일반도로 아스팔트 혼합물의 공시체 개수와 변동계수에 따른 배합강도(process mean)의 변화

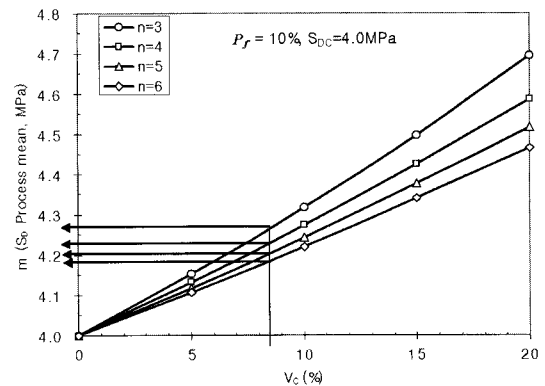


그림 7. 임계변형강도가 4MPa인 간선도로 아스팔트 혼합물의 공시체 개수와 변동계수에 따른 배합강도(process mean)의 변화



그림에서 보듯이 변형강도의 배합강도 평균 m 은 같은 n 에서는 V_c 가 커짐에 따라 높아지며, 같은 V_c 에서는 n 의 증가에 따라 낮아진다. 변동계수가 0이면 n 과 P_i 에 관계없이 증가계수는 0이다. 하지만 모든 재료는 똑같은 품질로 생산될 수 없고 내재되어있는 변동성 때문에 편차가 발생하며 이 편차의 정도가 변동계수의 크기로 나타난다.

일단 변동계수가 커지면 증가계수도 거의 선형적으로 늘어나는데 이는 변동성에 따라 품질에 불확실성이 커지므로 임계치 이하로 내려가는 비율을 P_i 이하로 유지하려면 공정평균 m 을 높여야 하기 때문이다. 따라서 혼합물이 임계치 이상으로 얻어질 확률은 $(1-P_i)$ 이 되며 이를 안전확률이라 할 수 있다.

한편 이는 재하속도 30mm/min의 기준이므로 이를 국내에 많이 보급된 마샬안정도 시험기의 50mm/min 속도의 장비로 측정할 경우에는 전체적으로 더 높은 값이 얻어지므로 이를 다시 조정하여야 한다(건설교통부, 2007). 그동안의 연구에 의하면 이 증가율은 일반혼합물의 경우 약 10%, 개질혼합물의 경우는 약 6%정도 높은 값이 얻어지므로 이를 고려하면 공시체 직경 100mm 일반도로용 혼합물은 10% 증가시켜 임계치 3.3MPa, 배합강도 3.5MPa, 간선도로용 혼합물은 6% 증가시켜 임계치 4.25MPa, 배합강도 4.5MPa 이상이어야 한다(표 2).

표 2. 재하속도별 공시체 직경별 배합변형강도 평균의 최소치 기준

재하속도 (mm/min)	도로 등급	확률 0.1에 대한 z값	임계치 (MPa)	증가 계수	직경 100mm 3개 공시체의 배합강도 평균값 계산치 및 제안치 (MPa)	
					계산치	제안치
30	일반	-1.28	3.00	1.0661	3.19	3.20
	간선	-1.28	4.00	1.0661	4.26	4.25
50	일반	-1.28	3.30	1.0661	3.52	3.50
	간선	-1.28	4.25	1.0661	4.53	4.50

이 값을 정리한 내용과 상세한 배합설계법 지침은 표 3과 같다. 이는 표층에 대한 것이며 기층 및 중간

층에 대한 기준도 같은 방식으로 잠정 지침(아스팔트 혼합물..., 2008)에 제시되어 있다.

표 3. 표층용 가열 아스팔트 혼합물의 시험기준 값

혼합물의 특성치		아스팔트 혼합물의 종류	
		SC-1, SC-2 SC-3, SC-4	SC-5, SC-6
다짐회수별 변형강도 (MPa)	75(50)회	3.20	
	100(75)회	4.25	

(주1) SC= Surface course

(주2) 표의 변형강도 값은 직경 100mm 아스팔트 혼합물 공시체를 60℃ 물에 30분간 수침후 꺼내어 바로 측정된 3개 공시체 측정치의 평균이다.

(주3) 대형차 교통량 1일 한 방향 1000대 이상, 또는 20년 설계 ESAL>10⁷인 경우인 중교통도로 포장에서는 선화다짐 100회, 그 미만 도로에는 선화다짐 75회를 사용하며, 마샬 다짐의 경우 각각 양면 75회와 50를 사용할 수 있으며 ()에 나타내었다.

4. 결론

선행 연구에서 APA와 S_b 와의 상관성 분석을 통해 직경 100mm 공시체를 사용할 경우 일반도로포장 아스팔트 혼합물의 변형강도 임계치는 3 MPa, 간선도로포장의 임계치는 4 MPa이 제시된다. 본 논문은 통계적 이론을 적용하여 안정적으로 변형강도가 임계치 이상이 얻어지도록 배합강도를 선정하는 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 공시체의 평균이 임계치와 같으면 혼합물의 1/2은 임계치 이하가 되며 이 경우 통계적으로 보면 50%는 불량한 혼합물이 된다. 따라서 임계치 이하로 내려가는 확률을 줄이기 위해 배합설계시의 변형강도(배합강도 또는 공정평균: Process mean)를 더 높여야 한다.
2. 아스팔트 혼합물(100mm 공시체)의 평균 변동계수(V_c)는 8.4(%) 이었다. 따라서 $V_c = 8.4\%$ 로 하면 $s=0.84m$ 이고, 소비자 위험률 10%(0.1)를



임계치를 벗어날 확률에 해당하는 값으로 정하고 정규분포 표에서 $z_{\alpha_i} = -1.28$ 과 공시체수 $n=3$ 을 이용하여 일반도로포장용 혼합물과 간선도로포장용 혼합물의 배합강도를 계산하면 3.2MPa과 4.25MPa이 설정되었다.

3. 상기의 배합강도는 재하속도 30mm/min를 기준으로 한 값이다. 만일 국내에 많이 보급된 마샬 안정도 시험기의 50mm/min 속도로 변형강도를 측정하면 이보다 더 높은 값이 얻어진다. Data에 의하면 그 증가율은 일반도로포장용 혼합물은 10%, 간선도로포장용 혼합물은 6%이며 이를 공시체 직경 100mm 혼합물에 적용하면 일반도로와 간선도로는 각각 3.5MPa, 4.5MPa의 배합강도가 기준치로 설정된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 자유공모과제의 지원으로 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 시설을 이용하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

김광우, 조병진, 이순제, 도영수 (2007), "고온내변형 아스팔트혼합물 선정을 위한 변형 강도 임계치의 결정 방안," 한국도로학회 논문집, 9(4), pp 193-204.

박성범 (2002), "공업통계학", 박문사

"아스팔트 혼합물의 배합설계 개선 (안)," (2007), 건설교통부

"아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 잠정지침," (2008), 국토해양부

"한국형 포장 설계법 개발과 포장성능개선방안 연구 - 아스팔트 포장의 재료 생산 및 시공관리 정립 연구," (2007) 건설교통부.

Brown S., Gibb J. (1996), "Validation of experiments for permanent deformation

testing of bituminous mixtures," *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, pp 255-299.

Doh Y., Yun K., Amirkhanian S., Kim K. (2007), "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, 21(12).

Hafez, I. (1997), "Development of a simplified asphalt mix stability procedure for use in Superpave volumetric mix design," *Ph.D. Dissertation, University of Maryland*, College Park, MD

"Hot-Mix Asphalt Material Properties," (2007), SCDOT Designation: SC-M-402 (06/07).

Kaloush, K. E. (2001), "Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures," *Ph.D. Dissertation, Arizona State University*, Tuscan, AZ

Kim, H. H., Park, N. W., Doh, Y. S., K. Ahn, Lee, S. J. and Amirkhanian, S. N., Kim, K. W. (2008), "Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength," *Paper presented at 2008 European Asphalt Technology Association Meeting*, Lyon, France.

Kim K., Doh Y., Amirkhanian S. (2004), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, No. 3, pp 303-322.

Krutz N., Siddharthan R., Stroup-Gardiner M. (1991), "Investigation of Rutting Potential Using Static Creep Testing on Polymer-modified asphalt concrete mixture," *Transportation Research Record 1317, TRB*, pp 100-108

Witzack M., Kaloush K., Quintus H. (2002), "Pursuit of the simple performance test for



asphalt mixture rutting.” *Journal of the
Association of Asphalt Paving Technologists*,
Vol. 71, AAPT

접 수 일: 2008. 11. 17

심 사 일: 2008. 11. 20

심사완료일: 2009. 2. 26