



폴리머 개질 건식혼합 CRM 아스팔트 콘크리트의 특성 연구

Characteristics of Dry-processed Polymer-modified CRM Asphalt Concrete

김광우*, 고동혁**, 정승호***, 이상범****, 백성현*****

1. 서 론

페타이어 분말을 습식으로 사용한 아스팔트 혼합물이 소성변형에 저항성이 크다는 여러 연구가 발표되었다. 또한 국내에서도 이 기법이 도입되어 적용되고 있다. 하지만 건식법에 의한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항특성은 많이 연구되어 있지 않다. 습식법은 아스팔트 결합제에 페타이어 분말을 첨가하는 것이어서 골재 대응으로 페타이어를 사용하는 건식혼합법에 비하여 그 사용량이 제한적이다. 본 연구의 목적은 페타이어를 아스팔트 콘크리트의 골재에 첨가하고 더 많은 양의 페타이어를 재활용하기 위하여 혼입량의 증가에 따른 혼합물의 특성을 평가하는 것이다. 게다가 개질특성이 우수하다고 입증된 폴리머 개질제를 첨가하여 페타이어의 혼입량 증가에 따른 소성변형 저항성을 비교하였다. 그리고, 이를 국내에서 사용할 경우 국내의 일반적인 규정에 적합한지 여부를 파악하기 위하여 제조한 후 다양한 물성실험을 수행하여 일반 공시체와 비교·분석하여 그 사용가능성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 아스팔트 시멘트

본 연구에 사용된 결합제는 우리 나라에서 가장 많이 사용되고 있는 AP-3(침입도 85-100)아스팔트 시멘트로써 이것의 품질 시험 결과는 Table 1과 같다.

*정회원 · 강원대학교 농공학과 부교수

**정회원 · 강원대학교 농공학과 대학원 석사과정

***정회원 · 강원대학교 농공학과 대학원 석사과정

****정회원 · 강원대학교 농공학과 대학원 박사과정

*****정회원 · 강원대학교 농공학과 대학원 석사과정

Table 1. Properties of asphalt cement

Classification	AP-3	
	Spec.	Measured Value
Penetration 25°C (mm)	85-100	94
Ductility 25°C (cm)	> 100	> 150
Flash point (°C)	> 230	317
Specific Gravity		1.029

2.1.2 골재

본 실험에 사용된 굵은 골재 및 세골재는 강원도 홍천군에서 생산되고 있는 편마암 쇄석이다. 이들을 굵은 골재의 최대치수를 13mm로 하여 굵은골재와 잔골재, 채움재(Filler)로 분류하였고 KSF에 규정된 방법에 따라 품질시험을 수행하였으며, 비중 및 흡수율 마모율등이 규정내에 만족하였다.

2.1.3 페타이어 입자 (CRM)

본 실험에 사용된 페 타이어 입자(Crumb Rubber Modifier : CRM)는 기존 연구(김광우 1996, 최영규 1997)에서 품질이 우수한 것으로 입증된 국내제품을 사용하였다. 이것에 대한 품질 시험 성과는 Table 2와 같다. 본 실험에서는 한 가지의 CRM을 가지고 첫 번째 입도는 #30을 통과하는 입자들 두 번째 입도는 #4를 통과하고 #8에 남는입자와 #8를 통과하고 #16에 남는 입자로 구분하여 이것의 비율이 1:3이 되도록 합성하였고 세 번째 입도는 #4를 통과하고 #8에 남는 입자와 #8를 통과하고 #30에 남는 입자를 사용하여 이것의 비율이 1:3이 되도록 합성하였다. 조정된 입도는 Table 3과 같다.

Table 2. Properties of CRM

Test Item	Specification Requirement	CRM
Specific Gravity	1.10-1.20	1.16
Mineral Contaminants (%)	< 0.25	-
Particle Length (cm)	< 0.47	0.4
Fiber Content (%)	< 0.1	-
Metal Contaminants	None	None

Figure 1. Figure of CRM

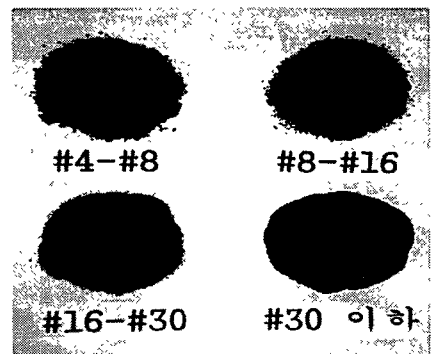




Table 3. Gradation of CRM Particles

TYPE	Content ¹ (%)	% Passing in each sieve			
		#4	#8	#16	#30
CRM 1	5%	100	100	100	100
CRM 2	3%	100	75	0	0
CRM 3	2%	100	75	19	0

1. by wt of mixture

2.1.4 폴리머 (LDPE)

본 실험에 사용된 폴리머는 국내에서 생산되는 폴리머인 LDPE이다. LDPE는 50번 체에 거의 다 통과하는 비교적 고운 분말이다. 이 폴리머는 사전에 조사·연구되어진 결과를 바탕으로 국내에서 생산되는 여러 종류의 폴리머 가운데 아스팔트 개질재로서 그 성능이 우수하다고 판단되어 선택하였다. 이들에 대한 물리적 성질은 Table 4와 같다.

Table 4. Physical properties of LDPE

Material	Volatility (%)	Color	Tensile strength (kg/cm ²)	Extendibility(%)
LDPE	0.62	White	233	1,020

2.2 CRM 아스팔트 혼합물 제조

CRM을 아스팔트 콘크리트에 혼입하는 방법에는 크게 두가지가 있는데, 첫번째는 CRM을 아스팔트 자체에 가열·혼합하여 고무 아스팔트 시멘트를 제조하여 사용하는 습식법(Wet Process : CRM을 아스팔트 시멘트의 개질재로 사용하는 방법)이고, 두번째는 고무조각을 골재에 넣고 가열하여 아스팔트 콘크리트의 제조시 사용하는 건식법(Dry Process : CRM을 골재의 일부로 사용하는 방법)이다 (Heitzman 1992).

습식법에서는 CRM을 아스팔트 시멘트에 혼입하여 개질 아스팔트 시멘트를 제조한다. 163~232°C의 고온으로 아스팔트 시멘트를 가열하면서 아스팔트 중량의 5~30%정도의 고운 분말 CRM을 혼입하고 30분에서 2시간 동안 고온을 유지하면서 섞어준다. 이 때, 점도를 감소시켜 작업성을 좋게 하기 위해 희석제를 사용하기도 한다. 제조된 CRM 아스팔트 시멘트는 현장시공을 위해 저장하여 둔다.

건식법에서는 아스팔트 혼합물속에서 0.5~6.4mm의 비교적 큰 고무조각을 중량의 약 2~4%정도 첨가하여 골재의 일부를 대체하도록 하는 것이다. 이 방법에서는 고무입자가 골재의 일부를 대체할 수 있도록 갭(gap)입도로 조정된 골재를 사용해야 한다(Veizer 1993). 본 연구에서는 페타이어 입자의 사



용량을 크게 하고 플랜트에서 별도의 시설없이도 사용이 가능하도록 하여 실용성을 높이기 위해 건식혼합법으로 표3에 제시된 CRM을 소정량씩 실험실에서 골재와 아스팔트 혼합시 첨가하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 배합설계

본 연구에서는 페타이어 혼입량에 따라 배합설계를 하였는데 폴리머 개질아스팔트 혼합물의 간접인장강도와 강성을 이용하여 결정된 최적 폴리머 함량(LDPE6%)을 가지고 배합설계를 통해 CRM 첨가량에 따라 OAC를 결정하였다. 결정되어진 폴리머 및 최적 아스팔트 함량을 이용하여 각 2%, 3%, 5% CRM 공시체를 제조하였다.

예비실험에서 CRM 10~20%를 #4-#8과 #8-#16의 입도로 건식혼합 하였을 때 마샬다짐기에 의한 다짐이 불가능하고 마샬안정도실험 시 최대하중에 대한 안정도값을 읽을 수 없어 CRM 5%와 7%로 각각 배합설계를 하였으나 고온(60°C)에서 부풀어 오르는(Swelling) 취약성이 발견되어 CRM입도를 #30이하의 가는 분말을 사용하고 CRM함량을 5%이하로 제한하여 사용기로 결정하였다. CRM2%와 3%는 #4-#8과 #8-#16의 입도로 예비실험을 하였을 때 별다른 문제점이 발견되지 않았다. 따라서, CRM의 혼입량은 예비실험결과 2%, 3%, 5%로 결정되었다. 아스팔트 시멘트의 사용량은 예비실험을 통해 결정했는데, CRM 2%, 3%공시체는 4.5~6.5%를 사용하였고 5%공시체는 6~9.5%를 사용하였다. 2%와 3%는 KSF 2337과 ASTM D1559의 마샬식 아스팔트 혼합물 공시체 제작 방법을 사용하고 5%는 슈퍼페이브 선회다짐장치를 사용하여 CRM 공시체를 제조하였다.

CRM2%와 3%는 골재와 페타이어 고무 입자를 용기에 넣고 골고루 혼합한 후 160~170°C로 24시간 가열하였다. 그리고 약 140~150°C의 온도에서 45~60분간 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 손비빔으로 혼합하여 몰드에 넣고 다짐온도(135~145°C)를 유지하며 마샬 햄머로 공시체 상하를 각각 75회씩 다짐하였다.(ASTM D1559).

가는 입자의 페타이어 분말은 골재와 같이 가열할 때 연소하기 때문에 CRM5%는 골재를 먼저 160~170°C로 24시간 가열한 후 가열하지 않은 페타이어 분말을 골재와 혼합한 후 아스팔트를 넣은 다음 손비빔을 한 후 선회다짐장치를 사용하여 선회 50회로 다짐하였다. 이 때, 공시체의 높이는 63.5 ± 1.3mm 이고 중량은 약 1160g을 목표로 하였다

비교용 공시체는 CRM 입자를 같은 크기의 골재로 대체하여 동일한 입도를 나타내도록 하였고 아스팔트 시멘트 혼입량은 4.0~6.0%로 결정되었으며 제작과정은 마샬방법을 사용하였다. 제조된 각각의 공시체에 마샬특성시험을 통하여 배합설계를 수행하였다.

2.3.2 간접인장시험

아스팔트 콘크리트 혼합물의 인장강도는 간접인장강도(Indirect Tensile Strength : ITS) 시험으로 측정할 수 있다. 간접인장강도는 25°C에서 측정되었으며 공시체 상하에 직경 101.6mm인 마샬공시체의 반경과 같은 곡률의 오목한 표면을 가진 폭 13mm의 금속 하중 띠를 통해 공시체에 50mm/min의 속도로 하중을 재하하여 최대하중과 이때의 수직변형을 측정하였다.

간접인장강도시험은 공시체의 직경면을 따라 수직으로 작용하는 일정한 인장력에 의한 활열인장과



피로 결정된다. 따라서 간접인장강도 S_t 는 식 1과 같이 계산된다(Yoder and Witczak 1975).

$$S_t = \frac{2P}{\pi tD} \quad (1)$$

강성지수(Stiffness modulus)는 재하된 최대 하중에 대한 변형량의 비로서 나타내었다. 아스팔트와 같은 점탄성재료에서는 상온에서 탄성계수의 측정이 매우 어려우므로 최대하중시의 변형량을 그 재료의 강성지수로 보고 이를 측정하여 사용하였다. 낮은 강성지수를 보일 경우 하중에 의한 변형도는 매우 크게 되며 같은 응력수준에서 변형이 커지므로 영구변형 등의 발생확률이 높아지는 것으로 볼 수 있다.

2.3.3 반복주행시험(Wheel Tracking Test)

본 시험에서는 배합설계를 통해 결정된 최적 아스팔트 함량으로 롤러 콤팩터로 목표 공극율 $4.0 \pm 0.5\%$ 로 하여 $340 \times 240 \times 65$ mm의 슬래브 공시체를 제조한 후 강원 대학교에서 자체 개발한 휠 트랙킹 시험기를 사용하여 일반 아스팔트 혼합물과 CRM 혼합물의 수직 변형을 측정하고 그 결과를 비교 분석하였다. 공시체에 작용된 휠 트랙킹용 바퀴는 재질이 일반 강철인 직경 200mm, 폭 53mm로서 왕복 거리 200mm, 속도는 30 회/min이다. 시험은 우리 나라 기후 여건을 감안하여 60°C 에서 수행되었고 가해진 윤하중은 70kg으로 왕복 2700 cycle(5400 Passes)동안의 변형량이 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배합설계

3.1.1 최적아스팔트 함량

아스팔트 콘크리트의 배합설계는 아스팔트 함량별로 제조된 공시체에 물성시험과 마찰안정도시험을 통하여 최적 아스팔트 함량(Optimum Asphalt Content : OAC)을 구함으로서 수행된다(Asphalt institute 1984).

결정된 범위내에서 아스팔트 함량을 변화시켜 가면서 각 함량당 3개씩의 공시체를 제조하여 물성시험과 마찰안정도시험과 간접인장강도시험을 수행하였다. 이것을 아스팔트 함량에 따른 곡선으로 표시한 후에 그래프상에서 공극률의 범위 3~5%, 안정도 750kg이상, 흐름 20~40, 포화도 75~85%를 만족하는 각각의 아스팔트 함량을 구하고 이로 부터 최적 아스팔트 함량을 구하였는데, CRM5%는 마찰안정도시험 대신에 간접인장강도시험으로 OAC를 구하였다. 일반공시체는 4.8%로 결정된 반면 CRM5% 공시체는 9.2% CRM3% 공시체는 5.6%로 2%의 경우는 4.8%로 결정된 것으로 보아 건식혼합시 페타이어의 혼입량이 증가할수록 아스팔트함량이 증가하는 것을 알 수 있었고 예비시험에 의해 CRM5%를 CRM입도 #4-#8, 8-#16을 조정하여 사용한 결과 공시체의 팽창율이 2%와 3%에 비해 상대적으로 증가하고 고온에 대한 취약성이 나타나서 CRM입도를 #30이하의 가는분말을 입도조정하여 사용한 결과 CRM5%에서 상대적으로 아스팔트 함량이 많아졌다.



3.2 간접인장강도

윤하중은 포장층 하단에 인장 응력을 유발하기 때문에 아스팔트 혼합물에 대한 인장강도 값은 아스팔트 콘크리트의 강도를 파악하는데 가장 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 이러한 인장강도 값은 간접인장강도 시험으로 측정할 수 있으며, 이 실험을 통하여 구한 인장강도 데이터는 윤하중에 의한 수평 인장응력으로 발생하는 균열 저항의 척도로 이용된다.

Table 5. Indirect tensile strength of CRM mixtures

Mixture Specimen	Indirect tensile strength (kg/cm ²)			
	Dense grade mixture	CRM2% LDPE6%	CRM3% LDPE6%	CRM5% LDPE6%
1	8.5	6.4	4.6	3.9
2	8.6	6.6	4.4	3.8
3	8.1	6.5	4.5	4.0
Avg.	8.4	6.5	4.5	3.9

결정된 최적 아스팔트 함량으로 제조한 밀입도혼합물과 CRM 아스팔트 혼합물의 간접인장강도는 Table 5에 나타난 것처럼 밀입도 혼합물의 간접인장강도에 비해 CRM 혼합물의 간접인장강도는 페타 이어의 함량이 증가할 수록 낮게 나왔다. Table. 6에서 나타난 것처럼 강성의 경우도 마찬가지로의 결과를 보였다.

Table 6. Stiffness modulus of CRM mixtures

Mixture Specimen	Stiffness modulus (kg/mm)			
	Dense grade mixture	CRM2% LDPE6%	CRM3% LDPE6%	CRM5% LDPE6%
1	440	360	220	60
2	460	300	230	62
3	460	350	240	64
Avg.	450	340	230	63

3.3 반복 주행(Wheel tracking)시험

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 소성변형 저항성을 추정하기 위하여 반복주행 시험을 수행하였다. 제작된 공시체는 각종 물성을 측정하고 24시간 양생후 시험에 사용되었다.



반복주행시험을 통하여 혼합물의 동적안정도(Dynamic stability : DS)와 최종 침하량을 구하였다. 반복주행시험 중 LVDT로 읽어들이 침하량을 컴퓨터를 통하여 기록하였으며 동적안정도는 혼합물이 1mm 침하하는데 필요한 반복횟수를 나타내며 이를 같은 구간 내에서 cycle/mm로 구하였다. 이 실험은 동적 윤택중하에서 소성변형(Rut)에 대한 CRM 혼합물의 저항성을 평가하는 일반적인 방법으로 수행되었다.

CRM함량과 폴리머별로 슬래브 공시체를 제조하여 시험온도 60°C에서 70kg 하중 하에 왕복 횟수 2700 cycle로 실험한 결과, 밀입도 혼합물에 비해 CRM 혼합물의 경우 소성변형에 대한 저항성이 증가함을 알 수 있었고 폴리머의 첨가에 따른 저항성의 증가도 확인할 수 있었다. 특히 CRM 함량이 2%일 때의 저항성이 더욱 더 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 휠 트래킹 시험을 통해 총 2700 cycle 반복 주행후 바퀴자국 침하 깊이(Rut depth) 및 동적안정도를 측정된 결과는 Table 7과 같다.

먼저 침하깊이를 살펴보면 밀입도 혼합물에 비하여 LDPE로 개질한 CRM 혼합물은 3%와 2%CRM에서 각각 소성변형 저항성의 향상이 뚜렷하게 나타났으나 CRM2%와3%는 CRM5%에 비해 각각 30%,50%정도 작다.

Table 7. Wheel tracking test result at 60°C in CRM mixture.

Property	Mixture			
	Dense grade mixture	CRM2% LDPE6%	CRM3% LDPE6%	CRM5% LDPE6%
DS (cycle/mm)	182	673	400	245
Final depth(mm)	30.3	6.2	11.9	20.7

또한 동적 안정도에서는 CRM 2%와 3%혼합물에서 각각 큰 수치를 나타내 60°C에서 소성변형 저항성이 우수하다는 것을 알 수 있었고 5%에서는 밀입도 혼합물보다 약간 크다는 것을 알수 있었다.

4. 결 론

예비실험을 통해 CRM의 혼입량의 증가와 폴리머 첨가량과 종류를 결정하였고 배합설계와 간접인장강도, 반복주행시험을 수행하여 혼합물의 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배합설계결과 CRM 아스팔트 콘크리트는 CRM함량이 증가할 수록 아스팔트 함량이 증가하고 CRM입자가 가늘수록 아스팔트 함량이 증가한다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 간접인장시험에서는 CRM 혼입량이 증가 함에 따라 아스팔트 콘크리트가 전반적으로 낮은 강도를 보여 아스팔트 콘크리트 내부에 있는 고무입자가 강도를 저하시키는 요인이라는 것을 보여주고 있다.



- 3) 휠 트래킹 시험결과 밀입도 혼합물에 비하여 CRM혼합물이 운하중에 의한 소성변형 저감에 효과적인 것으로 나타났고 CRM의 첨가량 및 입도에 따라 저감효과가 다르게 나타났다.
- 4) CRM의 함량을 증가하여 실험한 결과 함량이 다소 적을 때 강도증가 및 소성변형 저항성에 효과적인 것으로 나타났으며 향후 CRM의 입도개선과 골재의 입도조정, 다른 개질제의 사용 등에 대한 연구를 통해 CRM함량을 증가시켰을 때 효과적인 강도증가 및 소성변형에 대한 저항성을 얻을 수 있다면 많은 양의 폐타이어 폐기물을 적극적으로 아스팔트 콘크리트에 이용할 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- 김광우, 최영규, 박용철, (1995), "폐타이어 고무 아스팔트 콘크리트의 배합설계," 대한토목학회 학술 발표회 논문집, 제 1권, 대한토목학회, 10월 21일, pp. 503~506.
- 김광우, 최영규,(1997), "표층재료로 건식혼합 폐타이어 아스팔트 혼합물의 적응성 연구." 대한 토목학회 논문집, Vol.18, No. III-2, 1998.3.
- 김광우, 이지용, 오성균, "폴리머 개질 폐타이어 아스팔트 콘크리트의 특성 연구," 한국 농공학회 학술발표회 논문집, 1998.10.
- 김낙석, (1997), "폐타이어 고무분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 실험적 공용특성," 한국 과학재단 학연산교류회 논문집, 12월 4일 pp. 1~15.
- 김영수, (1995), "수퍼페이브 아스팔트 혼합물의 설계 및 분석," 아스콘 최신기술 개발동향 및 품질 관리 기술세미나, 강원지방공업기술원, pp. 35~61.
- Ihab H. Hafez and Matthew W. Witzack. "Comparison of Mashall and SUPERPAVE Level 1 Mix Design of Asphalt Mixes." Presented at the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board. January 22-28, 1995, Washington D.C.
- G.W.Maupin, Jr.(1995) "Field Trial of Asphalt Rubber Hot Mix in Virginia." Virginia Transportation Research Council
- Amirkhanian, S. N. (1992), "A Feasibility study of the use of waste tires in asphalt concrete mixtures," Report No. FHWA- SC-92-04, Federal Highway Administration, Washington. D.C.
- Carmeiro, F. L. L. B. and Burcellos, A. (1953), "Tensile Strength of Concrete," International Association of Testing and Research Laboratory for Materials and Structures, Paris.