

## 廢타이어 再活用 아스팔트 콘크리트의 力學的 特性

金洛錫\* · 李雨烈\*\*

京畿大學校 工科大学 土木工學科, \*助教授, \*\*碩士課程

### Mechanical Properties of Hot Mix Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete Using Waste Tire

Nak Seok Kim and Woo Yeol Lee

Department of Civil Engineering, Kyonggi University

#### 요 약

본 연구는 페타이어 고무분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 성질에 대한 실험적 연구결과를 나타내고 있다. 기존의 채래식 아스팔트 혼합물과 페타이어 고무분말 첨가 아스팔트 혼합물의 성상을 비교하기 위하여 다양한 물성시험을 실시하였다. 고온에서 아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 저항성 평가인 휠트래킹 시험결과 고무분말을 함유한 아스팔트 혼합물이 기존의 채래식 아스팔트 혼합물보다 약 50% 정도 상회하는 결과를 보였다 또한, 표층용 아스팔트 혼합물을 유사한 기상조건과 하중을 가하여 아스팔트 혼합물의 내구성을 측정하는 라벨링시험을 실시하였다. 시험결과 고무분말을 함유한 아스팔트 공시체가 채래식에 비하여 약 15%정도 우수하였다. 따라서, 향후 페타이어의 적극적인 도로용 재료로서의 활용은 공학적인 측면에서 뿐만 아니라 폐자원의 리사이클링 측면에서 고려될 때 향후 커다란 이득이 될 수 있을것으로 예상된다.

#### ABSTRACT

Wheel tracking and ravelling tests were conducted on the hot mix crumb rubber modified asphalt concrete using waste tire to evaluate the mechanical properties in comparison with conventional asphalt concrete. According to the test results, the modified product was superior to the conventional one by 50% in the resistance of permanent deformation and by 15% in the resistance of durability. The experimental results should recommend that the waste tire is positively recycled for asphalt concrete.

#### 1. 서 론

1980년대 중반이후 자동차 보유대수가 급격하게 증가함에 따라 페타이어 발생량 또한 급격한 증가세를 보이고 있으며 타이어 판매량을 기준으로 페타이어 발생량을 추산한 결과 1992년도 975만개에서 1996년도 1,854만개로 연평균 17.4%씩 증가하고 있다. 국내의 페타이어 재활용 현황을 살펴보면 원형이용(수출, 토목공사) 69.7%, 열이용(건류소각) 2.8%, 가공이용(채생타이어, 고무분말이용, 밧줄등 기타) 27.5% 등으로 이용되었다. 1996년도 1,854만개 페타이어중 65.6%가 회수되어 그중 58.1%가 재활용으로 사용되었다.<sup>1)</sup> 특히, 페타이어는 토목공사에 재활용되는 비중이 65.6%로

점진적으로 증가하는 추세에 있다. 그러나, 이러한 증가추세는 페타이어의 균진지 구축용으로 인한 일시적인 현상이며 향후, 지속적이고 다량의 페타이어 재활용을 유도할 수 있는 새로운 용도가 강구되어야 한다.

페타이어의 발생량은 자동차 교통의 진전에 따라 매년 급속히 증가하고 있고, 재활용율은 다른 산업 폐기물과 비교하여 높은 수치로 되어 있으나 상당한양이 불법 투기와 야적되어 있어 사회문제를 일으키고 있다 또한, 페타이어는 쉽게 썩지도 않고, 태우더라도 심한 매연과 악취를 유발하며, 아황산가스와 분진을 발생시켜 대기오염을 유발하고 산성비의 원인이 되기도 한다. 특히, 매립처분할 경우 매립지가 한정되어 있는 국내의 실정을 감안할 때 페타이어의

재활용에 관한 사회적 관심은 점점 증대되고 있다.<sup>2,3)</sup> 이에 본 연구의 주 목적은 페타이어 고무분말을 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장에 실용화하는 방안에 대한 연구를 수행하는 것이며 페타이어로 인한 환경오염 문제를 해결함과 동시에 아스팔트 콘크리트의 성상을 개선한 새로운 아스팔트 콘크리트 혼합물을 개발하여 도로의 수명연장에 기여하고자 한다.

본 연구에서는 이를 위하여 아스팔트 콘크리트 혼합물의 표준용으로 사용하는 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물과 페타이어 고무분말을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물(CRM, crumb rubber modifier)의 특성을 비교분석하여 새로운 아스팔트 포장용 재료의 보다 광범위한 활용화에 기여 하고자 다음과 같은 내용으로 연구를 수행하였다.

첫째, 사용된 두 가지 아스팔트 콘크리트 혼합물의 최적 아스팔트 함량과 페타이어 고무분말 함량을 결정하기 위하여 마샬(Marshall) 배합설계를 각각 실시하였다.

둘째, 고온에서 두 가지 아스팔트 콘크리트 혼합물의 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위하여 휠트래킹(wheel tracking) 시험을 실시하였다.

셋째, 저온에서 두 가지 아스팔트 콘크리트 혼합물의 내마모성을 비교분석하기 위하여 라벨링(ravelling) 시험을 수행하였다.

## 2. 사용재료 및 배합설계

### 2.1. 사용재료

아스팔트는 AP-3(침입도 85-100) 아스팔트 시멘트를 사

**Table 1.** Properties of the asphalt cement used for the experimental

Type	Specific Gravity, 25°C	Penetration, 15°C, 100 g, 5sec	Ductility, cm	Flash Point, °C	Solubility in Trichloroethylene, %
AP-3 (85-100)	1.033	92	min 150	314	99.96

용하였다. 굵은골재는 쇄석(20 mm, 13 mm)을 그리고, 잔골재는 굵은 강모래와 체질모래(6 mm이하)를 병용하였고, 충전재는 석회석분을 사용하였다. 사용된 아스팔트와 골재의 특성은 각각 Table 1 및 2와 같다. 골재의 예정입도는 건설부 도로포장 설계시공 지침<sup>4)</sup>(② 밀입도 아스팔트 콘크리트 (19))을 채용하여 그 범위의 중간입도로 하였다. 각 골재의 배합비를 도표법으로 구한후 결정된 배합비로 합성입도를 계산하였다. 입도곡선을 그리면 13 mm는 예정입도보다 크고 #4체는 예정입도보다 작으며 #8 이하는 예정입도보다 상당히 큰 결과를 나타내므로 예정입도와 일치시키기 위하여 #67(20 mm)과 체질모래(6 mm이하)는 높이고 #78(13 mm)과 강모래 그리고 충전재는 줄여서 예정입도와 가깝게 조정하였다. 따라서 최종결정배합비 및 합성입도는 Table 3과 같이된다.

### 2.2. 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계

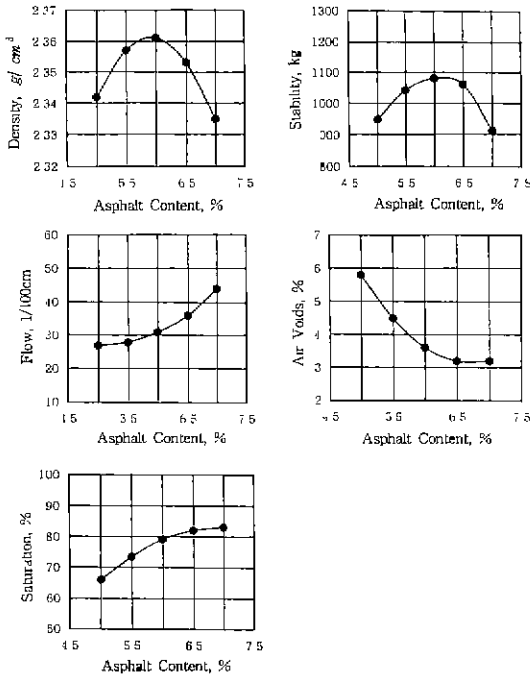
건설부 도로포장 설계지침에 의하면 설계아스팔트량의 범위는 5.0~7.0%이므로, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0%의 아스팔트량을 넣어 공시체를 각각 3개씩 준비하였다. 공시체 제작

**Table 2.** Size distribution and physical properties of aggregates used for the experimental

Type		Coarse Aggregate		Fine Aggregate		Filler
		#67(20 mm)	#78(13 mm)	Screened	River Sand	Limestone Powder
Percent Passing Weight	25 mm	100				
	20 mm	99.2	100			
	13 mm	53.2	96.4	100	100	
	#4	5.4	14.7	95.3	99.5	
	#8	0.9	6.2	72.6	91.2	
	#30		0.0	38.8	37.6	100
	#50			21.4	17.6	98.2
	#100			12.7	7.2	95.3
	#200			6.4	2.3	91.5
	PAN			0.0	0.0	0.0
Apparent Specific Gravity		2.695	2.691	2.682	2.642	2.715
Absorption, %		0.83	0.90	1.05	1.00	0.30
Durability, %		5.5	4.2	2.9	3.3	-
Abrasion, %		22.5	21.7	-	-	-

**Table 3.** Mixing ratios of the raw materials for the modified asphalt concrete

	Aggregate Type				Mixing Ratio, %					
	Coarse Aggregate	#67 (20 mm) #78 (13 mm)				34 13				
Fine Aggregate	Screenings (less than 6 mm) River Sand				35 14					
Filler	Limestone Powder				4					
Sieve Size	25 mm	20 mm	12 mm	#4	#8	#30	#50	#100	#200	PAN
Combined Gradation, %	100	99.4	83.6	55.0	43.3	22.9	13.9	9.2	6.2	0.0



**Fig. 1.** Physical properties of asphalt concrete without rubber crumb versus asphalt content.

후 배합설계를 위한 시험 방법으로는 KSF 2337 마찰시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험 방법에 따라 수행되었다. 또한 혼합물의 혼합 및 다짐온도는 사용된 아스팔트의 온도와 점도 관계로부터, 혼합온도와 다짐온도는 각각 150°C로 하였다. 설계 아스팔트량을 결정하기 위하여 Fig. 1의 각 그림에서 건설부 도로포장 설계 시공지침(②밀입도 아스팔트 콘크리트(19)) 기준치를 만족하는 아스팔트량의 범위를 고려하여 설계 아스팔트량을 결정하였다. Fig. 1에 나타난 아스팔트량에 따른 혼합물의 성질을 고려하여 설계아스팔트량이 6.0%일때 혼합물 성질이 건설부 도로포장 설계 시공지침에 매우 만족하므로 이 배합을 최종 배합설계의 기준으로 정하고, 설계 아스팔트량에

**Table 4.** Physical properties of the asphalt concrete without rubber crumb

Test		Conventional Asphalt Concrete	Modified Asphalt Concrete	Spec.
Marshall	Density, kg/cm³	2.352	2.376	-
	Stability, kg	1,034	1,214	500
	Flow, 1/100 cm	32	31	20~40
	Air Voids, %	3.9	3.0	3~6
	Saturation, %	77.6	82.1	70~85

따른 아스팔트 혼합물의 성질은 Table 4와 같다. 이 표에서 보는바와같이 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계시 요구되는 기준치를 충분히 만족시키고 있다.

**2.3. 폐타이어 고무분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계**

가열 혼합물에 폐타이어 고무분말을 첨가하는 방식에는 건식과 습식이 있으며, 습식은 골재와 아스팔트를 혼합하기 전에 아스팔트에 고무분말을 미리 첨가 혼합하는 것이고, 건식은 아스팔트와 혼합에 앞서 골재에 고무분말을 골재의 일부로 첨가 혼합하여 고무첨가 아스팔트 혼합물을 제조하는 방식이다. 본 연구에서는 건식방법을 채택하였고 혼합기술 방식에는 McDonald기술방식, 연속 블렌딩 기술방식, 비특히 일반기술방식 등이 있으나 이중 비특히 일반 기술방식으로 실험을 실시하였다. 본 배합설계의 주 목적은 폐타이어 고무분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 설계 아스팔트량 결정과 적정 폐타이어 고무분말의 규격 및 함량을 결정하는데 있다. 따라서, 설계 아스팔트량은 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계에서 6%로 결정되어 6~8%로 각 1%씩 변화시켜 배합하였고 골재의 결정배합비 및 합성입도는 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계시와 동일하게 사용되었다.

공시체의 혼합된 골재온도와 아스팔트 가열온도는 각각

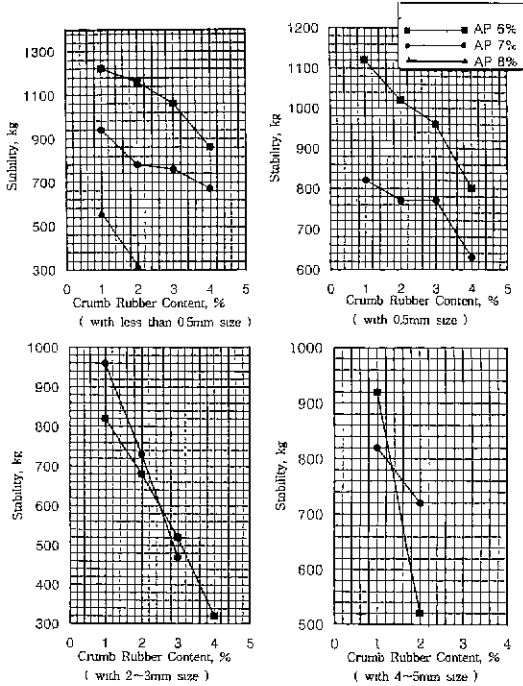


Fig. 2. Stability of CRM asphalt concrete specimen.

150°C로 관리하여 고무분말을 규격별(0.5 mm이하, 0.5 mm, 2~3 mm, 4~5 mm)로 아스팔트 중량비의 1~4%로 1%씩 각각 변화시켜 가열된 골재-고무분말-가열된 아스팔트 순서로 믹서용기에 넣어 90초간 혼합한 다음 혼합물을 혼합팬으로 옮겨 소정의 혼합온도 150°C를 유지하여 30초간 추가 혼합한다. 공시체 제작후 고무분말을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계를 위한 시험방법으로는 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계시 사용된 방법과 동일한 KSF 2337 마샬 시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성 흐름에 대한 저항력 시험방법에 따라서 수행되었다. 본 배합설계를 위하여 제작된 고무분말 규격과 아스팔트량에 따른 안정도의 시험결과는 Fig. 2와 같다. 본 연구의 수행범위 내에서, 페타이어 고무분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계 결과, 고무분말 첨가 아스팔트 콘크리트는 아스팔트량 6%, 고무분말 규격 0.5 mm 이하, 고무 첨가량

의 공시체 무게비는 아스팔트 중량기준 1%로 배합하였을 경우, 가장 만족한 시험값을 얻었다. 최종 배합설계에 따른 두 가지 혼합물의 물성시험 비교결과는 Table 5와 같다.

### 3. 휠트래킹(wheel tracking), 라벨링(ravelling) 시험방법 및 결과분석

#### 3.1. 휠트래킹(wheel tracking) 시험

소성변형은 아스팔트 도로층이나 하부기층에 있어서 차량의 반복하중으로 인한 점진적인 재료의 이동에 의하여 발생하는 현상으로 널리 알려져 있다. 따라서 이러한 현상은 점차적인 압밀 또는 소성흐름을 통하여 야기된다. 여기서 압밀이란 도로건설후 교통하중에 의한 고온 아스팔트 혼합물의 추가적인 다짐을 말한다. 도로 시공시 다짐이 충분치 못하면 교통하중의 반복된 압축작용에 의하여 차량의 바퀴자국을 따라서 추가적인 압밀이 발생하게 되는 것이다. 특히, 두꺼운 아스팔트층이 반복된 교통하중에 의하여 압밀될때에는 상당한 양의 소성변형이 발생하게 된다.

소성변형은 또한 차량의 바퀴자국 부위에서 고온 아스팔트 혼합물의 소성흐름으로부터 야기되기도 한다. 과도한 아스팔트 시멘트의 사용은 이러한 현상에 대한 직접적인 원인이 되기도 한다. 혼합물내의 과도한 아스팔트 시멘트는 골재 상호간의 내부 마찰력 손실을 초래한다. 소성흐름을 골재의 크기를 증가시키거나 각지고 표면이 거친 골재를 사용함<sup>5,6,7)</sup>과 동시에 도로시공시 충분한 다짐을 실시함으로써 최소화될 수 있는 것으로 알려지고 있다. 그 외에, 아스팔트 콘크리트 도로포장에 있어서 소성변형을 최소화 하기 위한 최근의 연구동향<sup>5,8,9)</sup>으로는 아스팔트 시멘트의 점도를 증가시킬수 있는 개질제의 사용이 활발히 논의되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 최근의 연구동향의 일환으로서 페타이어 고무분말을 기존의 재래식 아스팔트 콘크리트에 첨가시킴으로서 페타이어 고무아스팔트 콘크리트의 소성변형에 대한 저항성을 평가하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존의 재래식 아스팔트 콘크리트와 페타이어 고무 아스팔트 콘크리트에 대하여 휠트래킹 시험을 각각 실시한 후, 시험결과를 통하여 비교 분석하였다.

아스팔트 혼합물을 30×30×5 cm 규격으로 혼합물 다짐기를 이용하여 55회 다짐한후, 공시체를 제작하였으며, 공시체 양생을 위하여 상온에서 15시간 양생한 후 휠트래킹 시험실시 6시간 전부터 60°C에서 양생하였다. 휠트래킹 시험방법에서 아스팔트 콘크리트의 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위하여 60분간 주행후 공시체 중앙부의 45~60분 사이의 소성변형량을 측정하였다. 휠트래킹 시험결과

Table 5. Marshall properties of asphalt concretes

Physical Properties		Marshall Criteria
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.361	-
Stability, kg	1081	min, 500
Flow, 1/100 cm	31	20~40
Air Voids, %	3.6	3~6
Saturation, %	79.2	70~85

에 의하면, 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 변형율이 0.613 mm/분. 동적 안정도가 264.5회/mm 이며, 고무 분말 첨가 아스팔트 콘크리트 혼합물의 변형율이 0.0813 mm/분, 동적 안정도가 525.7회/mm로써 고무분말 사용 아스팔트 콘크리트 혼합물의 소성변형에 대한 저항성이 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 저항성보다 약 50% 정도 상회하여 대단히 우수한 것으로 판정되었다.

앞에서 간단히 언급하였듯이, 아스팔트 콘크리트 혼합물은 고온에서 외부 하중에 의하여 쉽게 형태변형이 발생하기 때문에 소성변형의 원인이 되는 문제를 해결하기 위한 연구개발이 수행되고 있다. 더구나, 국내의 급속한 차량 증가로 인한 교통량의 증가 및 차량의 증량화와 더불어 우리나라 여름철 기후특성인 고온 환경하에서는 아스팔트 콘크리트 도로포장의 소성변형 문제는 매우 심각하여지고 있는 실정이다. 그러나, 본 연구에서 수행된 시험결과에 의하면, 페타이어 고무분말 사용 아스팔트 콘크리트 혼합물은 기존의 아스팔트 콘크리트 혼합물보다 소성변형에 대한 저항성이 우수하여 아스팔트 콘크리트 도로포장에서 발생하는 소성변형의 문제를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 아스팔트 콘크리트 표층에 페타이어를 사용하므로써 향후 아스팔트 콘크리트 혼합물의 성능개선, 도로의 수명연장으로 인한 도로의 공용성증대, 유지보수비의 감소 및 환경문제 등이 개선될 것으로 사료되며,<sup>10,11)</sup> 페타이어의 적극적인 도로용 재료로의 활용은 공학적인 측면에서 뿐만 아니라 페타이어 처리에 의한 환경 보존이라는 측면에서 고려될 때 막대한 이득이 될 것으로 예상된다. 두 가지 아스팔트 콘크리트의 소성변형에 대한 저항성 시험결과를 종합적으로 정리하면 Table 6과 같다.

**3.2. 라벨링 (Ravelling) 시험**

페타이어 고무분말을 함유한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 마모에 대한 저항성을 평가하기 위하여 라벨링 시험을 실시하였다. 일반적으로, 아스팔트 도로포장 표면의 마모는 다음 요소로 인하여 주로 발생하는 것으로 사료된다:

- (1) 아스팔트 시멘트량의 부족,

- (2) 굵은 골재간의 상호 구속을 피하는 세립도 골재의 부족,
- (3) 시공시 다짐 불량,
- (4) 아스팔트 시멘트의 노화 또는 산화.

라벨링의 발생은 궁극적으로 도로의 공용성을 감소시키며 도로의 잦은 보수 및 유지관리 활동의 증가로 인하여 도로의 장기적인 경제성을 고려할 때 지대한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 페타이어 고무분말을 일부 잔골재 대응으로 기존의 재래식 아스팔트 콘크리트에 첨가 사용시 페타이어 고무 아스팔트 콘크리트의 마모에 대한 저항성을 측정하였다. 이를 위하여 기존의 재래식 아스팔트 콘크리트와 페타이어 고무아스팔트 콘크리트에 대하여 라벨링 시험을 실시한 후, 시험결과를 통한 두 가지 아스팔트 콘크리트의 마모저항성에 대하여 논의하였고, 본 연구에서 사용된 라벨링시험의 조건 및 방법은 아래와 같다.

공시체 제작을 위하여 아스팔트 혼합물을 (31.0+51.5)/2×25×5 cm 크기의 사다리꼴 공시체에 2층으로 다짐롤퍼를 사용하여 50~100회 가법계 다져 넣은 다음, 형틀을 압축 시험기에 올려놓은 뒤 혼합물 위에 평평한 판을 올려 놓고 1분에 5~7 ton씩 하중을 증가시켜 진하중이 20 ton이 되도록 하여 5분간 유지하였다. 공시체의 양생을 위하여 -10±1°C의 항온 냉각실 또는 항온 냉각조에 약 24시간 이상 평활한 면에 정치하였다. 아스팔트 콘크리트의 마모에 대한 저항성을 측정하기 위하여 시험시간을 3시간으로 하고 시험시 체인은 1분당 고리의 수를 10개로 하여 체인부착 볼트와 공시체의 상면과의 간격을 10 cm가 되도록 조정한 후 마모량 측정 요령에 따라 마모량을 측정하였다. 라벨링 시험결과에 의하면, 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물의 마모량이 0.891 cm<sup>2</sup>, 고무분말 사용 아스팔트 콘크리트 혼합물의 마모량이 0.752 cm<sup>2</sup>로써 고무분말 아스팔트 콘크리트 혼합물의 마모저항성이 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물을 약 15% 정도 상회하는 것으로 나타났다. 따라서, 아스팔트 콘크리트 표층에 페타이어를 사용하므로써 향후 아스팔트 콘크리트 혼합물의 내구성이 개선될 것으로 기대되며, 도로의 수명연장 및 도로의 공용성 증대 효과가 예상된다. 기존의 재래식 아스팔트 콘크리트와 페타이어 고무분말 사용 아스팔트 콘크리트의 마모에 대한 저항성 시험결과를 종합적으로 비교 정리하면 Table 6과 같다.

**4. 결 론**

본 연구에서는 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물과 페타이어 고무분말 첨가 아스팔트 콘크리트 혼합물의 성상을 비교분석하기 위하여 기계적 물성시험을 실시하여 다음과 같

**Table 6.** Test results on tracking and ravelling

Test		Conventional Asphalt Concrete	Modified Asphalt Concrete
Wheel Tracking	Deformation, mm/min	0.613	0.0813
	Dynamic Stability, cycle/mm	264.5	525.7
Ravelling	Abrasion, cm <sup>2</sup>	0.891	0.752

은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 수행한 시험범위내에서, 페타이어 고무 분말을 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계 결과, 고무분말 첨가 아스팔트 콘크리트는 아스팔트량 6%, 고무분말 규격 0.5 mm 이하, 고무 첨가량의 공시체 무게비는 아스팔트 중량기준 1%로 배합하였을 경우, 가장 만족한 시험값을 얻었고, 밀도와 안정도가 기존 아스팔트 콘크리트 혼합물보다 양호하였다.
2. 고온에서 아스팔트 콘크리트 혼합물의 유동저항성 평가인 휠트래킹시험(wheel tracking test)결과 페타이어 고무분말을 함유한 아스팔트 콘크리트 공시체가 재래식 아스팔트 콘크리트 공시체보다 약 50% 정도 상회하는 결과를 얻었다.
3. 저온에서 타이어체인에 의한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 내마모성을 측정하는 라벨링 시험(ravelling test) 결과 페타이어 고무분말을 함유한 아스팔트 콘크리트 공시체가 재래식 아스팔트 콘크리트 공시체보다 약 15% 정도 상회하는 결과를 얻었다.
4. 위 사항을 종합하여 볼 때, 아스팔트 콘크리트 표층에 페타이어 고무분말을 혼합하여 사용하므로써 향후 아스팔트 콘크리트 혼합물의 성장개선, 도로의 수명연장으로 인한 도로의 공용성증대, 유지보수비의 감소 및 환경문제 등이 개선될 것으로 기대된다. 따라서, 페타이어의 적극적인 도로용 재료로의 활용은 공학적인 측면에서 뿐만 아니라 폐자원의 활용증대 및 환경 보존이라는 측면에서 고려될 때 향후 커다란 이득이 될 수 있을것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. 대한타이어공업협회, "The Tire (타이어)," 제31권, 제1호 (1997).
2. 페타이어 연구회, "페타이어를 이용한 고무 아스팔트의 개발," (1994).
3. 김주원, "페타이어 고무아스팔트 포장," 대한토목학회지, Vol. 42, No. 2, pp. 76-80 (1994).
4. 건설부, "도로포장 설계시공 지침," pp. 216-221 (1991).
5. 김광우, 조희원, 이상범, 최영규, "골재입형에 따른 아스팔트 혼합물의 특성연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 29-32 (1996).
6. 김광우, 최영규, 정규동, "CRM 아스팔트 콘크리트의 특성연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 25-28 (1996).
7. 김낙석, "Uniaxial Incremental Static Creep 시험에 의한 아스팔트 콘크리트의 소성변형에 영향을 미치는 특수인자에 관한연구," 대한토목학회 논문집, 제15권, 제2호, pp. 401-411 (1995).
8. "Crumb Rubber Modifier Workshop Notes (Design Procedures and Construction Practices)," U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, (1993).
9. Malpass, G.A., "The Use of Ground Tire Rubber in Asphalt Concrete Pavements," North Carolina State University 석사논문, (1994).
10. 김낙석, "Recycling of Used-Tire in Asphalt Paving Mixtures," 경기대학교 논문집, 제38 편, 제2호. pp. 181-195 (1996)
11. 김낙석, 델페스, 임정순, "재래식도로와 페타이어 재활용 도로의 수명주기 비용분석," 대한토목학회 논문집, Vol. 16. No. 1-4, pp. 493-502 (1996).