

열분해 카본블랙 사용량에 따른 밀입도 아스팔트 혼합물 성능 평가

이관호*

¹국립공주대학교 건설환경공학부

Performance Evaluation of Dense Graded Asphalt Mixture Modified by Pyrolysis Carbon Black

Kwan-Ho Lee^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요약 본 페타이어로부터 추출한 열분해 카본블랙(PCB)을 13mm 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물 공용성을 평가하였다. 최적배합설계를 시행하였고, 최적아스팔트 함량은 5.8%을 이용하였다. 아스팔트 혼합물의 탄성계수 평가를 위해 자유단 공진주 시험하였다. PCB 사용량이 증가하면, 측정된 탄성계수는 감소하였다. 다만, 감쇄비 변화는 미미한 것으로 나타났다. 평가시험은 간접인장강도시험, 소성변형시험 및 포장설계법을 이용한 전산해석을 이용하였다. PCB 사용시 수침 전과 후의 강도감소율이 평균 10% 이하로 나타났다. 소성변형의 경우 PCB 10% 이상 사용시 오히려 소성변형이 크게 발생하였다. 포장설계법 전산해석으로부터, PCB 5% 사용시 Top-Down 및 Bottom-Up 균열 저항성이 증가하였고, 소성변형 저감 효과가 크게 나타났다. 열분해 카본블랙 10% 및 15% 사용시 소성변형은 적게 나타났지만, 내구성은 크게 저하되는 것으로 나타났다. 전체적으로 PCB 5%를 이용한 표층용 아스팔트 혼합물의 공용성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

Abstract Using the pyrolyzed carbon black (PCB) from waste tires, the performance of 13 mm dense-graded hot mix asphalt was evaluated. The Marshall mix design was carried out and the measured optimal asphalt content was 5.8%. The impact resonant test was conducted to obtain the elastic modulus and damping ratio of the hot mix asphalt. The elastic modulus of HMA increased with increasing amount of PCB. On the other hand, there was no significant change in the damping ratio. The Marshall mix design, indirect tensile test, permanent deformation test, and program analysis were carried out. The strength ratio of the PCB modified asphalt mixtures was within 10%. More 10% of PCB was not good for the permanent deformation of hot mix asphalt. From the pavement design program, the use of 5% PCB in hot mix asphalt showed a decrease in the top-down crack, bottom-up crack, and permanent deformation. Judging from the limited test and analysis, the use of 5% PCB is good for enhancing the pavement performance.

Keywords : Pyrolozed Carbon Black, Permanent Deformation, Top-Down Crack, Pavement Design

1. 서론

국내에서 발생하는 고형폐기물중 페타이어는 2012년 에 약 305,877톤이 발생한 것으로 보고되고 있다 [1]. 발생하는 페타이어는 주로 사용중인 차량의 타이어 교체시 약 80%가 발생하고, 나머지는 폐차시 약 20%가 발생한다. 이와같이 발생하는 페타이어는 우리의 생활환경을

위협하는 사회적 문제를 발생시키고 있다. 차종별로는 승용차에서 발생하는 페타이어가 전체의 약 55% 수준인, 165,000개 정도이고, 두 번째로는 약 30%가 트럭 및 버스용 페타이어가 발생하고 있다[1].

환경부가 산정 및 고시한 2004년 타이어 재활용 의무량은 193,580톤으로 발생량 대비 71.4%이고, 전체 재활용공법 중 약 84.2%를 열에너지 등으로 이용하고 있다.

*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee(Kongju National University)

Tel: +82-10-9932-4798 email: kholee@kongju.ac.kr

Received January 8, 2016

Revised March 2, 2016

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

페타이어의 열에너지 이용은 주로 시멘트 제조공장에서 활용되고 있다. 페타이어의 처리중 분말가공 처리방법이 투자자금 회수 기간과 경제성을 고려할 때 가장 잠재성이 있는 방법으로 보고되고 있다 [2][3][4].

도로포장 분야에서 페타이어 재활용은 주로 파쇄한 페타이어를 골재로 이용하거나, 고무분말 형태로 가공하여 아스팔트 바인더의 탄성을 높여주는데 이용하였다. 그러나, 이러한 방법은 주로 페타이어의 물리적인 성능을 이용하는 것으로, 경제적으로 그 활용도가 크지 못한 것도 사실이다. 최근에는 페타이어 재활용을 좀더 고부가가치화 하기 위하여 열분해 공법을 이용하여 페타이어로부터 각종 오일 및 철 성분을 회수하고, 잔류물인 열분해 카본블랙을 적극적으로 활용하기 위한 연구가 수행되고 있다. 미국 워싱턴도로국(WADOT)의 카본블랙을 이용한 아스팔트 바인더 성능시험 결과로 부터 아스팔트 바인더의 점탄성성질을 개선하는데 도움이 되는 것으로 보고되고 있다 [5][6][7].

본 연구에서는 열분해시 발생하는 잔류물인 열분해 카본블랙을 이용하여 아스팔트 혼합물의 공용 성능 개선 효과를 평가하고자 한다. 이를 위해 열분해 카본블랙의 사용량을 아스팔트 사용량 대비 0%, 5%, 10%, 및 15%를 혼합한 개질아스팔트 시편을 제작하였다. 이를 이용하여 열분해 카본블랙을 혼합한 개질아스팔트 혼합물의 기본배합설계, 간접인장강도, 소성변형 시험 및 전산해석을 통해 열분해 카본블랙을 활용한 아스팔트 혼합물의 공용성능을 평가하였다.

2. 아스팔트 혼합물 기본물성

2.1 아스팔트 바인더 기본물성

본 연구에는 AP-3 아스팔트 바인더를 기본으로 열분해 카본블랙 혼합량을 0%, 5%, 10%, 15% 및 20%로 만든 개질아스팔트 바인더를 이용하였다. 열분해 카본블랙의 주요 성분은 Fixed Carbon 62.1%, Ash 23.1%, Volatiles(VM) 11.3% 등이다. 열분해 카본블랙의 비중은 1.000 g/cm³, 비표면적은 35.249 m²/g, 평균 직경은 0.43 μm로 측정되었다 [1][4]. 실험에 사용된 개질 아스팔트 바인더의 기본물성은 Table 1에 나타난 것과 같다.

Table 1. Properties of AP-3 Binder

Type		Specification	Test Results
Test Method	Units		
Penetration (25℃)	1/10mm	over 80 -less 100	97 to 99
Softening Point	℃	42-50	43 to 44
Density (15℃)	g/cm ³	over 1.000	1.032
Flash Point (℃)	g/cm ³	over 260	350

2.2 골재의 기본 물성

골재는 파쇄한 화강암 골재를 이용하였다. 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 표준용 밀입도 아스팔트 혼합물 13mm 표준입도를 적용하였다. 사용한 입도는 Table 2와 같다.

Table 2. Gradation of Aggregate

Size of Sieve		13mm Dense Graded HMA	
		Specification	Target Gradation
% passing weight	19mm	100	100
	13mm	90-100	95
	10mm	76-90	76
	4.75mm	44-74	55
	2.36mm	28-58	35
	0.6mm	11-32	15
	0.3mm	5-21	12
	0.15mm	3-15	8
	0.075mm	2-10	4

13mm 표준용 밀입도 아스팔트 혼합물에 사용된 골재의 기본물성은 KS 표준시험법을 이용하였고, 실험결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of Aggregate

Test	Spec.	Test Result	
		Fine	Coarse
Apparent SG	> 2.45	2.657	2.683
Bulk SG		2.555	2.649
Effective SG		2.594	2.661
Absorption (%)	< 3.0	1.50	0.48
Abbreviation (%)	< 30	n/a	27.2

SG : Specific Gravity

2.3 아스팔트 혼합물 배합설계

표준배합설계 절차에 따라 실내실험을 수행하였고, 13mm 표준용 밀입도 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량은 5.8%로 결정하였다. 최적아스팔트 함량을 이용하여 제작한 13mm 표준용 밀입도 아스팔트 혼합물의

기본물성은 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Properties of HMA

Type of Tests		Results
AC Binder	OAC (%)	5.80
	Density	1.032
Hot Mix Asphalt	Bulk SG	2.370
	Maximum Theoretical SG	2.469
	Effective AC Content (%)	4.24
Volumetric Properties	Air Voids (%)	4.71
	VMA (%)	14.46
	VFA (%)	72.27

OAC : Optimum Asphalt Content
 VMA : Void in Mineral Aggregate
 VFA : Void Filled Asphalt

Table 5는 아스팔트 혼합물의 시편높이를 보정한 후의 최대 안정도(kN) 및 흐름값(mm)을 정리한 것이다.

Table 5. Marshall Stability and Flow

Test \ PCB %	0%	5%	10%	15%
Max. Stability (kgf)	10.08	11.18	7.96	7.72
Flow (0.1 mm)	3.43	3.90	3.46	3.47

자유단 공진주 시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 탄성계수와 감쇄비를 측정하였다. 측정결과는 Table 6과 같고, 열분해 카본블랙의 함량이 커질수록 탄성계수와 감쇄비가 작아지는 경향을 나타내었다.

Table 6. Elastic Modulus and Damping Ratio

Test \ PCB %	0%	5%	10%	15%
Density (ton/m ³)	2.029	2.035	2.016	2.014
Elastic Modulus (MPa)	9454	8357	7492	7042
Damping Ratio (%)	6.43	6.12	5.95	6.34

3. 아스팔트 혼합물 실험 및 결과분석

3.1 간접인장강도 시험

아스팔트 혼합물의 균열저항성을 평가하기 위하여 간접인장강도를 주로 이용한다. 간접인장강도는 상온에서

수침전 및 후의 간접인장강도와 강도감소율(KS기준 : 25% 이내)를 결정한다. Table 7은 간접인장강도 시험 결과를 보여주고 있다. PCB 사용량에 따라 간접인장강도는 감소하는 경향을 나타내었고, 수침 전 및 후의 강도감소율은 개선되는 것으로 나타났다.

Table 7. Indirect Tensile Strength (MPa)

Test \ PCB %	0%	5%	10%	15%
5°C at air	39.72	33.45	32.17	30.05
25°C at air	7.69	7.40	7.31	7.17
25°C at water	6.70	6.78	6.58	6.50
strength ratio	13.0	8.0	10.0	9.0

3.2 소성변형 시험

소성변형은 아스팔트 혼합물의 압축과 전단변형 (shear deformation)에 의해서 주로 발생한다. 삼축압축 반복재하시험의 전형적인 결과로서 소성변형률과 하중 재하횟수의 관계는 1단계에서는 초기압밀이 진행되고, 2단계(Secondary) 변형 구간까지는 압밀화에 의한 변형이, 3단계(Tertiary) 구간부터는 전단에 의한 변형이 지배적으로 작용한다. 또한 3단계 구간이 시작되는 점을 흐름점이라 하며, 이때의 하중 재하횟수를 흐름값(Flow Number : FN)이라고 한다.

소성변형 측정 시험시스템은 Fig. 1과 같이 하중재하 프레임, 온도챔버, 측정시스템 그리고 삼축셀로 구성된다. 온도조절챔버(Environmental chamber)는 시험에 필요한 온도로 시편의 온도를 조절하기 위한 챔버로서, 온도조절챔버는 ±0.5°C의 정밀도로 실온에서 60°C로 조절할수 있어야 한다. 재하하중은 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 가지는 반사인파를 이용하여 현장에서 발생하는 교통하중을 구현하였다. 시험에 이용한 구속응력은

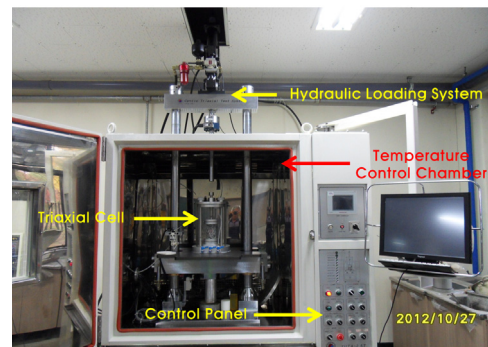


Fig. 1. Testing Machine

138 kPa, 축차응력은 551 kPa를 이용하였다. 시험온도는 45도를 적용하였다. 시험에 필요한 시편은 SHRP의 슈퍼패브 다짐장비를 이용하여 중규모 교통량 조건을 구현하는 50회 선회다짐조건을 적용하였다.

3.3 소성 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 PCB를 0%, 5%, 10% 및 15% 혼합한 13mm 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형시험결과를 보여주고 있다. PCB 사용시 5%를 이용하는 것이 소성변형을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다. 열분해 카본블랙 10% 및 15% 사용시 소성변형은 적게 나타났지만, 내구성은 크게 저하되는 것으로 나타났다. 이는 기존의 13mm 표층용 아스팔트 혼합물용 최적 아스팔트 함량에 열분해 카본블랙을 아스팔트 중량대비 5%, 10% 및 15%를 이용해서, 아스팔트 혼합물의 점착력을 감소시켜서 발생한 효과로 판단된다. 즉, 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 경우 배수성 포장 혼합물에 비해 작은 골재 및 채움재가 많이 사용되므로, 열분해 카본블랙을 혼합하여 사용시 골재 및 채움재에 코팅되어야 하는 아스팔트 바인더의 두께가 감소하게 된다. 코팅된 아스팔트 바인더 두께의 감소는 아스팔트 혼합물의 내구성에 상당히 큰 영향을 주게 되므로, 이러한 이유로 10% 및 15% 열분해 카본블랙을 이용한 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 내구성이 저하되는 것으로 판단된다.

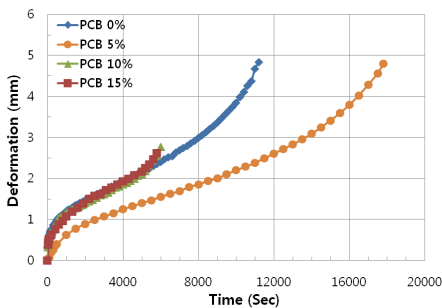


Fig. 2. Permanent Deformation

Table 8은 PCB 사용량에 따른 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 소성변형 단계별 특성을 평가한 것이다. 일반적으로 소성변형 1단계 구간은 아스팔트 포장 시공 직후부터 초기 공용기간을 모사한 것이다. 소성변형 1단계에서는 시공직후 초기 공극률이 6-8% 수준에서 차량하

중에 의한 다짐 효과가 발생하는 구간이다. 소성변형 2단계 구간은 아스팔트 포장체의 공극률이 4% 내외로 포장체가 교통하중에 충분히 견딜수 있는 실질적인 공용기간을 의미한다. 따라서, 아스팔트 포장체의 성능은 2단계 steady-state 상태에 따라 크게 영향을 받는다. PCB 5%를 사용한 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났다. 아스팔트 포장체의 공용성은 주로 2단계에서 3단계로 진행하면서 급격하게 저하된다. 즉, 2단계 시작부터 3단계 시작점까지의 구간길이 및 구간의 기울기를 이용하여 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 상호 비교 평가할 수 있다. 구간의 기울기를 이용하여 비교해보면, PCB 5%를 이용한 13mm 표층용 아스팔트 혼합물이 가장 작은 기울기를 나타낸다. 이는 소성변형에 대한 저항성이 가장 좋은 혼합물임을 의미한다. PCB 10% 및 15%를 이용한 아스팔트 혼합물의 기울기는 PCB를 이용하지 않은 13mm 표층용 아스팔트 혼합물과 유사한 경향을 나타냈으나, 내구성 부분에서는 앞에서 언급한 것과 같이 상당히 저하되는 것으로 나타났다. 따라서, 소성변형 특성을 평가한 결과로부터 PCB의 사용량을 5% 전후로 이용하는 것이 가장 좋은 효과를 나타내는 것으로 나타났다.

Table 8. Permanent Deformation(mm) for Each Stages

Stage PCB	Stage 1		Stage 2		Stage 3	
	mm	cycle (sec)	mm	cycle (sec)	mm	cycle (sec)
0%	0.94	0	1.21	800	3.09	8400
5%	0.55	0	0.81	1600	2.62	13000
10%	0.87	0	1.12	800	2.16	5180
15%	0.81	0	1.08	1000	2.22	5200

4. 포장설계법을 이용한 성능평가

AASHTO에서 개발한 포장설계법을 이용하여 포장단면의 적정성을 평가하였다. 동일한 하부조건(기층, 보조기층 및 노상)에 본 연구에서 이용한 13mm 밀입도 아스팔트 혼합물 표층층, PCB 0% 및 5% 혼합물을 이용하여 전산해석을 하였다. 전산해석에 사용한 물성치는 아스팔트바인더, 표층용 혼합물은 본 연구결과를 이용하였고, 하부조건은 국내 국도포장의 표준단면을 적용하였다. 전산해석은 평탄성(IRI), Top-Down 균열, Bottom-Up 균열, 온도균열, 표층의 소성변형 및 포장층 전체의 소성변

형 등의 공용성 지표값을 얻을 수 있다.

13mm 표층용 아스팔트 포장(일반구간, PCB 0%)의 해석결과를 Table 9에 나타내었다. 프로그램 해석을 통해 결정된 파손예측값은 평탄성 82, Top-Down 피로균열 524, Bottom-Up 피로균열 1, 온도균열 1, 아스팔트 표층 소성변형 0.55, 포장체 전체 소성변형 0.71등으로 나타났다. 평탄성, 2종의 피로균열, 온도균열, 포장체 전체 소성변형 등 5가지 항목은 기준값 이상으로 나타났다. 다만, 아스팔트 표층에서의 소성변형이 기준값을 만족시키지 못했다. 이는 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 경우 중규모 교통량 조건에 이용할 수 있는 혼합물로서, 본 해석에서 사용한 년평균일교통량(AADT) 15,150 대의 교통하중에 대한 아스팔트 혼합물의 내구성이 떨어지는 것을 의미한다.

표층용 13mm 아스팔트 포장(PCB 5%)의 해석결과 결정된 파손예측값은 평탄성 82, Top-Down 피로균열 126, Bottom-Up 피로균열 0.9, 온도균열 1, 아스팔트 표층 소성변형 0.46, 포장체 전체 소성변형 0.61등으로 나타났다. 평탄성, 2종의 피로균열, 온도균열, 아스팔트 표층에서의 소성변형, 포장체 전체 소성변형 등 6가지 항목 모두 기준값 이상으로 나타났다.

동일한 포장단면에서 아스팔트 표층 혼합물 종류에 따른 공용성 평가 결과를 비교해보면, 열분해 카본블랙(PCB)을 사용하지 않은 포장체에 비해 열분해 카본블랙 5%를 이용한 아스팔트 포장체의 피로균열 및 소성변형에 대한 저항이 개선되는 것으로 나타났다. 피로균열의 경우 Top-Down 균열에 대한 저항성이 개선되었다. 아스팔트 표층 소성변형 저항성 역시 개선되는 것으로 나타났다.

Table 9. Distress Results

Performance Items	Spec.	PCB 0%	PCB 5%
Terminal IRI (in/mile)	172	82	82
AC Surface Down Cracking (Long Cracking) (ft/500):	1000	524	126
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	1	0.9
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	1	1
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.5	0.55	0.46
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	1	0.71	0.61

5. 결론

13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 간접인장강도는 저온상태인 5°C에서 시험한 결과, 첨가된 열분해 카본블랙이 많을수록 간접인장강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 25°C에 수침시킨 후 간접인장강도 시험을 시행한 결과, PCB 0% 사용시 6.70MPa 및 PCB, 5% 사용시 6.78MPa로 측정되었다. 수침으로 인한 강도 감소율은 열분해 카본블랙을 사용하지 않은 경우 13%, PCB 사용시 10% 이하로 나타났다. 전체적으로 보면 5% 열분해 카본블랙을 사용한 것이 수침에 의한 강도 감소를 줄여주는 효과가 가장 크게 나타났다.

열분해 카본블랙을 이용하지 않은 13mm 표층용 아스팔트 혼합물의 변형이 열분해 카본블랙을 사용한 혼합물에 비해 크게 나타났다. 열분해 카본블랙 5% 사용시 기존의 13mm 표층용 아스팔트 혼합물에 비해 소성변형이 적게 나타났다. 열분해 카본블랙 10% 및 15% 사용시 소성변형은 적게 나타났지만, 내구성은 크게 저하되는 것으로 나타났다.

동일한 포장단면에서 아스팔트 표층 혼합물 종류에 따른 공용성 평가 결과를 비교해보면 피로균열 및 소성변형에서 차이가 발생함을 알 수 있다. 열분해 카본블랙을 사용하지 않은 포장체에 비해 열분해 카본블랙 5%를 이용한 아스팔트 포장체의 피로균열 및 소성변형에 대한 저항이 개선되는 것으로 나타났다. 피로균열의 경우 Top-Down 균열에 대한 저항성이 개선되었다. 아스팔트 표층 소성변형 저항성 역시 개선되는 것으로 나타났다.

References

- [1] Lee, K.H. (2014), "Permanent Deformation Properties of Porous Pavement Modified by Pyrolysis Carbon Black", J. of Korea Academic-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 6, pp. 3888-3893.
- [2] The Association of Korean Tire Rubber (2014), <http://kotma.or.kr/main/index.asp>
- [3] National Institute of Environmental Research (2011), "Guideline of Eco-Friendly Mngement for Waste Tires", pp. 209
- [4] Lee, Y.S. (2013), "A Study of Modified Asphalt Binder with Pyrolyzed Carbon Black from Waste Tires", Master Thesis, Kongju National University.
- [5] Park, J.M., Jeong, J.H., and Ryu, H.G. (2011), "A Study on Water Tightness of Concrete Mixed with Waste Tires and Carbon Black and Its Mechanical Properties",

Proceeding of Korean Information Association.

- [6] Livingston, J. (1989), "Carbon Black Additive in Asphalt Experimental Project No. 3, WA-84-04", Washington State Department of Transportation, WA-RD 198.1.
- [7] Kim, S. (2009), "Influence of a Flexibilizer on Physical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt Sealants", Korean Society of Roadway Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 32-40

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

도로공학 및 지반공학