

열분해 카본블랙을 이용한 배수성 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성

이관호*

¹국립공주대학교 건설환경공학부

Permanent Deformation Properties of Porous Pavement Modified by Pyrolysis Carbon Black

Kwan-Ho Lee^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요약 국내에서 발생하는 폐타이어량이 증가하고 있다. 폐타이어의 효율적인 재활용 방법중 하나가 열분해공이다. 본 연구에서는 열분해 공법을 이용하여 폐타이어로부터 추출한 열분해 카본블랙을 배수성 아스팔트 혼합물에 혼합하여 소성변형특성을 평가하였다. 시험에 이용한 구속응력은 138 kPa, 축차응력은 551 kPa를 이용하였다. 시험온도는 45도를 적용하였다. 시험에 필요한 시편은 SHRP의 슈퍼페이브 다짐장비를 이용하여 중규모 교통량 조건을 구현하는 50회 선회다짐조건을 적용하였다. 열분해 카본블랙 10%를 사용한 아스팔트 혼합물의 안정도 값이 3.41 kN으로 가장 크게 나타났다. 열분해 카본블랙을 이용하지 않은 경우에 비해 50% 이상의 안정도(kN) 증가 효과를 나타내었다. 전체적으로 PCB를 사용하지 않은 시편의 소성변형이 PCB를 사용한 시편의 소성변형에 비해 크게 나타났다. PCB 사용시 5%에서 10%를 이용하는 것이 소성변형을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract The number of waste tires is increasing. One effective recycling method is the pyrolysis of waste tires. Using the pyrolyzed carbon black from waste tires, the characteristics of permanent deformation for PA-13mm porous mixture were evaluated. The confining pressure of 138 kPa and deviatoric stress of 551 kPa were adopted. The testing temperature was 45° and 50 gyrations of the gyratory compactor was used to simulate the medium traffic level. The mixture modified by 10% PCB showed the largest Marshall Stability of 3.41 kN. The stability of the mixtures with PCB was 50% higher than that of mixture without PCB. The limited laboratory test showed that the use of PCB in a porous pavement decreases the permanent deformation and will be an effective alternative method to reducing the permanent deformation of a porous pavement.

Key Words : Confining Pressure, Marshall Stability, Permanent Deformation, Pyrolyzed Carbon Black

1. 서론

국내에서 발생하는 고형폐기물중 폐타이어는 2012년에 약 305,877톤이 발생한 것으로 보고되고 있다[1]. 발생하는 폐타이어는 Table 1과 같이 주로 사용 중인 차량의 타이어 교체 시 약 80%가 발생하고, 나머지는 폐차 시 약 20%가 발생한다. 이와 같이 발생하는 폐타이어는 우리의

생활환경을 위협하는 사회적 문제를 발생시키고 있다. 차종별로는 승용차에서 발생하는 폐타이어가 전체의 약 55% 수준인, 165,000개 정도이고, 두 번째로는 약 30%가 트럭 및 버스용 폐타이어가 발생하고 있다. 폐타이어 발생을 지역별로 구분해 보면, 경기 및 인천에서 가장 많이 발생하고, 부산 및 경남, 그리고 서울 등에서 주로 발생하는 것으로 보고되고 있다.

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

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

Received February 19, 2014

Revised (1st April 8, 2014 2nd May 8, 3rd 2014 June 11, 2014)

Accepted June 12, 2014

페타이어 처리가 사회적 환경적 이슈로 부각되면서 정부는 2003년부터 “생산자 책임재활용제”를 시행하고 있다. 이는 생산자가 회수해 재활용해야할 폐기물량을 고시하고 생산자는 목표량을 달성하지 못하면 재활용 비용의 30%에 해당하는 재활용부담금을 납부해야한다. 타이어는 1911년 3월 폐기물 관리법 및 1992년 12월 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 제정에 따라 재활용이 용이한 제품 및 포장재의 제조/수입업자에게 회수/처리를 예치하게 한 후, 재활용 실적에 따라 예치금을 반환해주는 예치금납부대상 품목으로 분류되어 타이어 제조/수입업자가 페타이어 회수/처리무를 이행하도록 규정하고 있다. 그러나 타이어 제조/수입업자는 자기 제품만 선별하여 회수/처리하는 것이 불가능하기 때문에 공동회수/처리를 위하여 대한타이어공업협회를 통해 1991년 6월부터 페타이어 회수/처리업무를 처리하고 있다. 환경부가 산정 및 고시한 2004년 타이어 재활용 의무 사용량은 193,580톤으로 발생량 대비 71.4%이고, 전체 재활용공법 중 약 84.2%를 열에너지 등으로 이용하고 있다. 페타이어의 열에너지 이용은 주로 시멘트 제조공장에서 활용되고 있다. 페타이어의 처리 중 분말가공 처리방법이 투자 자금 회수 기간과 경제성을 고려할 때 가장 잠재성이 있는 방법으로 보고되고 있다[2,3].

[Table 1] Amount of Waste Tires(unit : *1000)

year type	07	08	09	10	11	12
Change	250	253	235	260	245	244
Waste	48	54	58	56	65	61
Sum	298	307	293	316	310	305

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 크기 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 결과로부터 아스팔트 바인더의 점탄성성질을 개선하는데 도움이 되는 것으로 보

고되고 있다[4-7].

본 연구에서는 열분해시 발생하는 잔류물인 열분해 카본블랙을 이용하여 아스팔트 혼합물의 소성변형 성능 개선효과를 평가하고자 한다. 본 연구에서 사용하는 열분해 카본블랙은 부산지역의 페타이어 열분해 공정을 이용한 공장에서 생산되는 것으로, 기존의 페타이어 고무분말과는 완전히 다른 형태로, 덩어리로 배출되는 카본블랙을 밀링 처리하여 0.075mm 이하의 미분말로 밀링한 것을 이용하였다. 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 및 소성변형 시험을 통해 열분해 카본블랙을 활용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저감 효과를 평가하고자 한다.

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[3]. 실험에 사용된 개질 아스팔트 바인더의 기본물성은 Table 2에 나타난 것과 같다.

[Table 2] 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. 배수성 포장용 골재 입도는 국내에서 사용하는 13mm 배수성 포장

표준입도를 적용하였고, 입도는 Table 3과 같다.

[Table 3] Gradation of Aggregate

Size of Sieve		PA-13 HMA	
		Specification	Target Gradation
% passing weight	19mm	100	100
	13mm	92-100	96
	10mm	62-81	70
	4.75mm	10-31	20
	2.36mm	10-21	15
	0.6mm	4-17	10
	0.3mm	3-12	8
	0.15mm	3-8	5
	0.075mm	2-7	3

PA-13mm 배수성 포장에 사용된 골재의 기본물성은 KS 표준시험법을 이용하였고, 실험결과는 Table 4와 같다.

[Table 4] 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

배수성 아스팔트 혼합물의 배합설계는 국토해양부에서 제안하는 배수성 아스팔트 혼합물의 표준 배합표에 명시된 PA-13으로 배합설계를 시행하였다. 본 실험에서는 일반 혼합물과 다르게 PA-13의 최적 아스팔트 함량을 구하기 위해 바인더의 양을 4%에서 6%까지 0.5%씩 증가 시켜가며 배합을 하고 170°C 정도에서 1시간 방치 후 아스팔트가 용기에 흘러내린 정도를 판정하였다. 아스팔트 함량의 변화에 따라 각각의 손실률을 결정하고 아스팔트 함량과 흐름율과의 관계에서 변곡점을 나타내는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하게 되는 침강 손실률 시험을 시행하여, 최적 아스팔트 함량은 5.1%로 결정하였다. 최적 아스팔트 함량을 이용하여 제작한 배수성 아스팔트 혼합물의 기본물성은 Table 5에 나타내었다.

[Table 5] Properties of HMA

Type of Tests		Results
AC Binder	OAC (%)	5.06
	Density	1.032
Hot Mix Asphalt	Bulk SG	2.012
	Maximum Theoretical SG	2.522
	Effective AC Content (%)	4.24
Volumetric Properties	Air Voids (%)	20.2
	VMA (%)	26.8
	VFA (%)	24.6

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

Table 6은 아스팔트 혼합물의 시편높이를 보정한 후의 최대 안정도(kN) 및 흐름값(mm)을 정리한 것이다. PA-13 아스팔트 혼합물의 경우 열분해 카본블랙양이 양이 많을수록 최대 안정도값이 커지는 경향을 나타냈다. 열분해 카본블랙 10%를 사용한 아스팔트 혼합물의 안정도 값이 3.41 kN으로 가장 크게 나타났다. 열분해 카본블랙을 이용하지 않은 경우에 비해 50% 이상의 안정도(kN) 증가 효과를 나타내었다. 배수성 아스팔트 혼합물의 경우 주로 굵은 골재가 많이 이용되므로, 굵은골재들 간의 접촉면에서 열분해 카본블랙을 첨가한 아스팔트 바인더의 결합력이 커져서 안정도 값이 증가되는 것으로 나타났다.

[Table 6] Marshall Stability and Flow

Test	PCB %			
	0%	5%	10%	15%
Max. Stability (kgf)	2.12	2.97	3.41	3.11
Flow (0.1 mm)	5.03	5.46	5.46	4.66

3. 소성변형 실험 및 결과분석

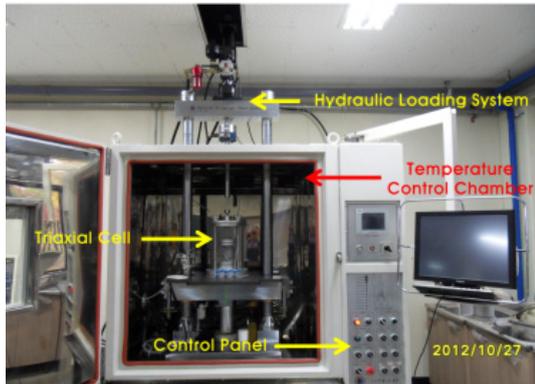
3.1 소성변형 기본개요

소성변형은 아스팔트 혼합물의 압밀화(densification)와 전단변형(shear deformation)에 의해서 주로 발생한다. 삼축압축 반복재하시험의 전형적인 결과로서 소성변형율과 하중재하횟수의 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.

3.2 소성 실험 장비 및 시편제작

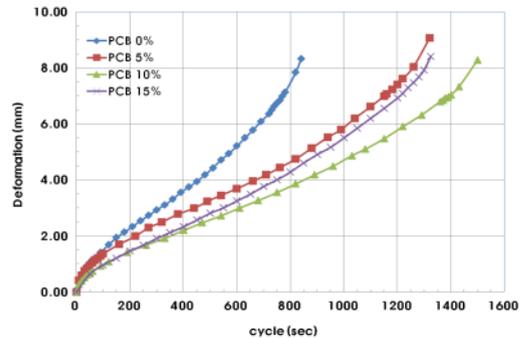
소성변형 측정 시험시스템은 Fig. 1과 같이 하중재하 프레임, 온도챔버, 측정시스템 그리고 삼축셀로 구성된다. 온도조절챔버(Environmental chamber)는 시험에 필요한 온도로 시편의 온도를 조절하기 위한 챔버로서, 온도조절챔버는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도로 실온에서 60°C 로 조절할 수 있어야 한다. 재하하중은 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 가지는 반사인파(Haversine)로 이용하여 현장에서 발생하는 교통하중을 구현하였다. 시험에 이용한 구속응력은 138 kPa, 축차응력은 551 kPa를 이용하였다. 시험온도는 45도를 적용하였다. 시험에 필요한 시편은 SHRP의 슈퍼패브 다짐장비를 이용하여 중규모 교통량 조건을 구현하는 50회 선화다짐조건을 적용하였다.



[Fig. 1] Testing Machine

3.3 소성 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 PCB를 0%, 5%, 10% 및 15% 혼합한 배수성 포장용 혼합물의 소성변형시험결과를 보여주고 있다. 전체적으로 PCB를 사용하지 않은 시편의 소성변형이 PCB를 사용한 시편의 소성변형에 비해 크게 나타났다. PCB 사용 시 5%에서 10%를 이용하는 것이 소성변형을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다.



[Fig. 2] Permanent Deformation of PA-13

Table 7은 소성변형 단계별로 변형 및 하중재하시간을 분석한 결과이다. 하중을 재하 한 직후 발생하는 초기 변형의 경우 0.6에서 1.2mm 정도로 나타났고, PCB를 사용할 경우 초기변형을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

초기소성변형이 끝나고, 이후 2단계 Steady-State 상태 구간이 시작되는 변형 크기는 평균적으로 1.2mm 정도이고, 이는 시편의 높이 100mm를 기준으로 보면 약 1.2% 변형수준에서 2단계 Steady-State 구간에 진입하는 것으로 해석할 수 있다.

2단계 구간이 끝나고 3단계 소성변형과 파괴구간에 진입하는 변형량의 크기는 평균 4.5mm 정도이고, 시편의 높이 기준으로 보면 약 4.5% 변형시 소성변형 파괴가 시작되는 것으로 해석할 수 있다.

모든 시편이 2단계 시작 및 3단계 시작시의 변형량의 크기는 거의 차이가 없으나, 실제 1.2% 변형 및 4.5% 변형에 도달하는 하중재하 시간의 차이는 큰 것으로 나타났다. 이를 근거로 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하는 것이 의미있는 것으로 판단된다. 4.5% 변형률에 도달하는 하중재하시간을 기준으로 보면 PCB 0% 시편이 520초, PCB 5% 시편은 830초, PCB 10% 시편은 965초, PCB 15% 시편은 800초로 나타났고, 이를 근거로 보면 PCB 10%를 사용한 시편의 소성변형 저항성이 가장 큰 것으로 나타났다.

[Table 7] Permanent Deformation(mm) for Each Stages

Stage \ PCB	Stage 1		Stage 2		Stage 3	
	mm	cycle (sec)	mm	cycle (sec)	mm	cycle (sec)
0%	0.9	0	1.4	98	4.6	520
5%	0.8	0	1.4	100	4.8	830
10%	0.7	0	1.0	100	4.3	965
15%	0.6	0	1.1	105	4.4	800

Table 8은 2단계 steady-state 구간의 종료시 하중재하 횟수 및 3단계 파괴구간에 진입한 후 8% 수준의 변형이 생겼을 때의 하중재하 횟수를 나타낸 것이다. 전체적으로 PCB를 사용한 아스팔트 혼합물의 4.5% 및 8% 변형에 도달하는 하중재하 횟수가 크게 나타났다.

3단계 구간의 기울기의 경우 PCB 0% 아스팔트 혼합물은 0.0113 mm/sec 이고, PCB 5%, 10% 및 15% 아스팔트 혼합물은 평균 0.0071 mm/sec 이다. PCB를 혼합한 아스팔트 혼합물의 경우 2단계 구간이 완료된 이후 3단계 구간에서 PCB를 사용하지 않은 아스팔트 혼합물에 비해 소성변형 발생이 작게 발생함을 의미한다.

[Table 8] Load Repetitions at 4.5mm & 8mm Deformation

Deformation \ PCB	4.5 %	8.0 %	Slope
0%	520	830	0.0113
5%	770	1260	0.0071
10%	960	1490	0.0066
15%	840	1305	0.0075

일반적으로 2단계 steady-state 상태 구간이 교통하중을 개방하였을 때, 도로포장체가 안정적인 공용성(performance)을 보여주는 구간으로 이 구간의 기울기가 작을수록 교통하중에 의한 소성변형이 작게 발생하고, 도로 포장체의 수명이 커짐을 의미한다. Table 8과 같이 PCB를 사용하지 않은 아스팔트 혼합물의 2단계 구간 기울기는 0.0076 mm/sec 이고, PCB를 혼합한 아스팔트 혼합물의 평균기울기는 0.0044 mm/sec 정도이다.

[Table 8] Slope of Stage 2 (Steady-State) and Stage 3 (failure)

Stage \ PCB	Stage 2	Stage 3
0%	0.0076	0.0113
5%	0.0047	0.0071
10%	0.0038	0.0066
15%	0.0047	0.0075

3. 결론

(1) PA-13 배수성 아스팔트 혼합물의 경우 열분해 카본블랙양이 양이 많을수록 최대안정도값이 커지는 경향

을 나타냈다. 열분해 카본블랙 10%를 사용한 아스팔트 혼합물의 안정도 값이 3.41 kN으로 가장 크게 나타났다. 열분해 카본블랙을 이용하지 않은 경우에 비해 50% 이상의 안정도(kN) 증가 효과를 나타내었다.

(2) 소성변형 특성 평가를 위해 반복삼축압축시험을 이용하였다. 구속응력은 138 kPa, 축차응력은 551 kPa, 시험온도는 45도를 적용하였다. PA-13 배수성 아스팔트 혼합물의 경우 전체적으로 PCB를 사용하지 않은 시편의 소성변형이 PCB를 사용한 시편의 소성변형에 비해 크게 나타났다. PCB 사용 시 5%에서 10%를 이용하는 것이 소성변형을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다.

(3) 초기소성변형이 끝나고, 이후 2단계 Steady -State 상태 구간이 시작되는 변형 크기는 평균적으로 1.2mm 정도이고, 이는 시편의 높이 100mm를 기준으로 보면 약 1.2% 변형수준에서 2단계 Steady-State 구간에 진입하는 것으로 평가되었다. 2단계 구간이 끝나고 3단계 소성 변형과파괴구간에 진입하는 변형량의 크기는 평균 4.5mm 정도이고, 시편의 높이 기준으로 보면 약 4.5% 변형 시 소성변형 파괴가 시작되는 것으로 판단된다.

References

- [1] The Association of Korean Tire Rubber (2014), <http://kotma.or.kr/main/index.asp>
- [2] National Institute of Environmental Research (2011), "Guideline of Eco-Friendly Mngement for Waste Tires", pp. 209
- [3] Lee, Y.S. (2013), "A Study of Modified Asphalt Binder with Pyrolyzed Carbon Black from Waste Tires", Master Thesis, Kongju National University.
- [4] 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.
- [5] Livingston, J. (1989), "Carbon Black Additive in Asphalt Experimental Project No. 3, WA-84-04", Washington State Department of Transportation, WA-RD 198.1.
- [6] 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
- [7] Park, J.M., Jung, 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”, 2011
Korean Society of Information Technology, Conference.

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