

폐콘크리트 분진을 첨가한 아스팔트의 특성평가

Evaluation of the Physical Properties of Asphalt Binder Modified by Waste Concrete Dust

김재현* · 이관호**

1. 서 론

우리나라의 건설폐기물 발생량은 1995년 건설교통부 통계에 의하면 37,199,625m³이고, 이렇게 발생한 건설폐기물의 상당 부분이 단순매립에 의해 주로 매립장에서 처리되고 있는 실정이다. 그러나, 산지가 많은 우리나라의 경우 사용 가능한 매립장의 크기가 매우 제한되어 있고, 또한 새로운 매립장의 건설이 상당히 어려운 상황이다. 건설폐기물의 주된 종류는 토사, 폐콘크리트, 폐아스팔트콘크리트 등이 있다. 1995년 기준으로 이들의 재활용률은 토사 62%, 폐콘크리트 35%, 폐아스팔트콘크리트 48%로서 주로 대형 건설업체를 중심으로 건설폐기물의 재활용이 증가되고 있는 상황이다. 이에 본 연구진은 도심에서의 재건축 및 콘크리트포장의 보수공사 등으로 발생하는 폐콘크리트의 도로포장에의 재활용연구를 수행중에 있으며, 본고에서는 1차 연구결과인 폐콘크리트 분진을 이용한 아스팔트콘크리트의 특성 평가를 소개하고자 한다.

2. 실험재료의 특성

본 연구에서는 국내에서 보편적으로 이용되고 있는 AP-3와 AP-5 중 지역적 특성, 즉 온화한 기후를 보이는 부산지역을 고려하여 국내OO사의 AP-5 아스팔트 시멘트(AC, Asphalt Cement)를 선택하여 실험을 실시하였다. 본 연구에 이용된 아스팔트의 기본 물성치는 표 1에 나타나있다.

본 연구에 이용된 개질재는 폐콘크리트 분진이고 이의 결과를 비교하기 위하여 슬래그 분진, 플라이애쉬 및 소석회를 이용하였다. 개질재의 비중을 확인하기 위해 ASTM(1993) 표준시험법을 이용하였고, 입도 분석을 위해 기존의 비중계시험 대신 빛의 산란현상을 이용한 입도분석기를 사용하였다. 각각의 개질재의 입도시험결과는 그림 1에 나타내었다. 일반적으로, 입도 분포는 흙 분류에 있어서 입자의 크기와 누가통과량 또는 잔류량을 이용한다. Sivakugan이 제안한 확률밀도곡선(Probability Density

* 경성대학교 토목공학과 석사과정

** 경성대학교 토목공학과 조교수



Function)을 적용하여 그림 2에 나타내었다. 그림 1의 결과로 보면 폐콘크리트 분진, 플라이애쉬, 슬래그 분진 및 석회의 입도가 유사한 것으로 나타나지만, 그림 2의 결과를 적용해 보면 빈도수가 높은 입자의 크기 등이 상당히 차이가 있음을 보여준다. 그림 2의 확률밀도분포곡선에서 보면 슬래그 분진과 폐콘크리트 분진이 비교적 비슷한 경향을 보이고, 플라이애쉬와 석회가 비슷한 경향을 보이고 있다. 비중 및 입도 분석결과는 표 2에 나타나 있다.

표 1. 아스팔트의 기본물성치

실험항목	물성치	실험항목	물성치
침입도 (0.1mm, 25℃, 100g, 5초)	56	단기노화후 침입도	36
밀도 (g/cm ³ , 150℃)	1.034	단기노화후 연화점	53
인화점(℃)	348	열손실(wt.%)	0.10
연화점(℃)	50	장기노화 후 침입도	21
신도 (cm, 5cm/분, 15℃)	150	장기노화 후 연화점	56

표 2. 개질재의 비중 및 입도분석결과

	폐콘크리트 분진	슬래그	플라이애쉬	소석회
비중	2.100	3.660	2.173	2.199
입자크기(μm)	29.08	16.02	111	232.4
표면적(cm ² /μl)	7,528	14,023	5,902	4,686
분산(μm ²)	556	187	1.83e+004	5.98e+004
표준편차(μm)	23.6	13.7	135	244
CV*(%)	81.8	85.5	122	100
Skewness**	1.05	0.856	1.75	0.975
Kurtosis***	0.89	-0.142	3.65	-0.0517

* Coefficient of Variation, ** 자료의 좌우분포정도,

*** 자료의 상하분포정도

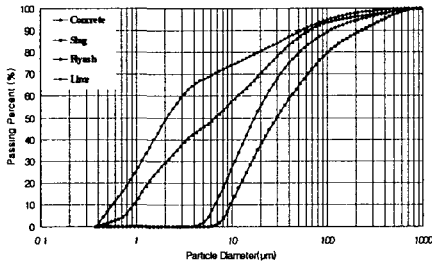


그림 1. 개질재의 입도분포곡선

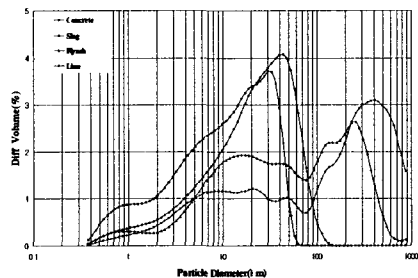
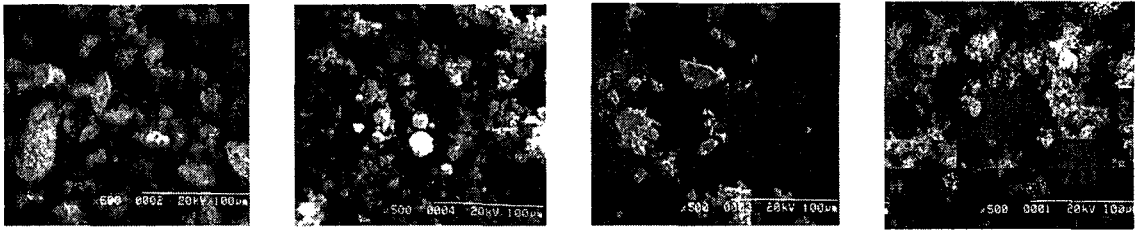


그림 2. 확률밀도곡선을 이용한 입자크기별 빈도수

그림 3은 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 이용하여 촬영한 폐콘크리트 분진, 슬래그 분진, 플라이애쉬, 석회의 입자모양을 나타낸 것이다. 폐콘크리트 분진의 입자 형상은

비교적 각이진(angular) 형태를 보이고 있고, 이는 골재와의 혼합물 배합에 이용시 입자간의 맞물림 현상이 크게 발생하여 하중에 대한 저항력이 크게 나타나게 된다. 슬래그 분진은 폐콘크리트 분진과 비슷한 특성을 보여주고 있다. 플라이애쉬와 석회는 대체적으로 구형이고, 같이 미세한 구형입자들이 서로 결합한 형태로 존재한다.



(a) 폐콘크리트 분진 (b) 플라이애쉬 (c) 슬래그 (d) 석회
 그림 3. SEM을 이용한 각 시료의 입자 형상

3. 침입도 및 연화점 시험

침입도 시험은 포장용 아스팔트의 컨시스턴시를 측정하는 시험이며, 연화점은 고온에서 아스팔트의 내유동성을 확보하기 위하여 사용되는 물성으로써, 25℃이상의 고온에서 아스팔트의 거동을 파악하기 위한 물성으로 간주되고 있다. 각각 ASTM D5 및 KS M 2252와 ASTM D36 또는 KS M 2250에 따라 측정하였다. 표 3은 실험에 이용된 아스팔트의 노화정도와 개질재의 사용량에 따른 그 결과값을 보여준다. 침입도의 경우 그림 4와 같이 원아스팔트의 침입도 값에 비해 개질재를 첨가한 아스팔트의 침입도 값이 전체적으로 작아지는 경향을 보이고 있으며, 특히 폐콘크리트 분진과 슬래그 분진을 첨가한 원아스팔트의 침입도 감소효과가 가장 크게 나타났다. 이는 입자형상이 각이진 형태이기 때문으로 판단된다. 개질재를 이용한 단기노화 아스팔트의 침입도 값 역시 비슷한 경향을 보였다. 그러나, 장기노화 아스팔트의 침입도 감소효과는 거의 없는 것으로 판정되었다. 이는 산화 및 경화현상에 의해 아스팔트의 경도가 크게 증가된 것으로, 개질재의 효과가 상대적으로 작은 것으로 나타난 것으로 판정된다. 연화점의 경우 그림 5에서와 같이 침입도의 결과와는 달리 개질재의 첨가량에 따른 연화점의 차이가 미미함을 보여준다.

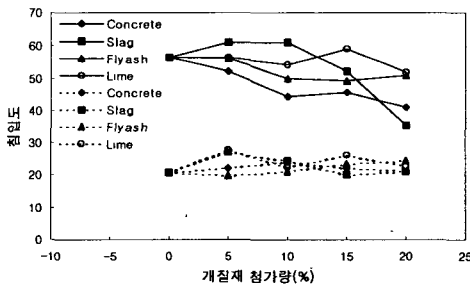


그림 4. 개질재 첨가량에 따른 침입도 변화

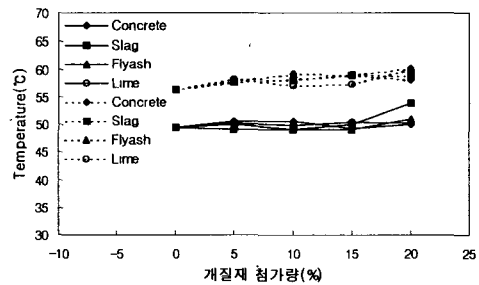


그림 5. 개질재 첨가량에 따른 연화점 변화

감온성은 온도변화에 따른 아스팔트의 경화속도로서, 포장의 공용성과 매우 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 개질재를 혼합한 아스팔트의 감온성을 평가하기 위해 침입도지수(PI), 침입도-점도수(PVN), 점도-감온성(VTS)방법을 이용하였다. 실험결과를 이용한 감온성 평가자료는 표 3에 나타내었다. PI를



이용하여 아스팔트의 감온성을 평가한 결과, 개질재의 사용량과 종류에 따라 그 효과가 비교적 평이하게 나타났다. 하지만 페콘크리트 분진의 경우에 개질재의 양이 증가할수록 감온성이 약간 나빠지는 경향을 보였으며 전체적으로는 개질재에 따라 감온성의 변화는 그리 큰 차이는 나타나지 않았다. 결과적으로는 감온성 개량효과는 거의 없는 것으로 판정되었지만 PI값은 대체적으로 기준(+1~-1)에 만족하는 것으로 나타났고, PVN 값(기준 : +0.5~-2.0)과 VTS값을 이용한 감온성 평가 결과 역시 PI와 비슷한 경향을 보였다.

아스팔트의 stiffness는 하중재하시간과 온도에 따른 응력 및 변형과의 관계를 보여준다. 또한, 응력, 변형 및 시간과의 관계는 아스팔트의 유변학적 특성(Rheology) 평가의 기본이 되는 요소이다. 일반적으로 고온에서는 아스팔트 포장의 소성변형을 억제하기 위해 높은 stiffness를 갖게 하고, 저온에서는 온도균열에 대한 저항성을 높이기 위해 낮은 stiffness값을 이용한다(Roberts et al, 1991). 본 연구에서는 간접법을 이용하여 아스팔트의 stiffness를 결정하였다. 간접법에는 Van der Poel(1954)이 제안한 노모 그래프와 McLeod(1976)가 제안한 방법을 이용하였다. 표 4는 두가지 방법에 의해 결정된 stiffness값을 보여준다. 각각의 개질재를 이용한 아스팔트의 stiffness가 개질재를 이용하지 않은 아스팔트의 stiffness보다 비교적 크게 나타났다. 이중 페콘크리트 분진과 슬래그 분진에 의한 아스팔트 stiffness 증가 효과가 플라이애쉬나 석회보다 상대적으로 크게 나타났다.

표 3. 채움재의 종류에 따른 감온성 평가 결과

개질재	비율	PI	PVN	VTS
사용안함	0%	-0.94	0.12	0.57
페콘크리트 분진	5%	-0.86	0.39	0.44
	10%	-1.23	0.38	0.20
	15%	-1.63	0.57	0.61
	20%	-1.62	0.53	0.55
슬래그분진	5%	-0.99	0.71	0.85
	10%	-0.99	0.76	0.80
	15%	-1.11	0.65	0.58
	20%	-0.39	0.58	0.51
플라이애쉬	5%	-0.94	0.43	0.66
	10%	-1.45	0.36	1.05
	15%	-1.49	0.42	0.66
	20%	-0.91	0.54	0.69
석회	5%	-0.94	0.43	0.71
	10%	-1.02	0.43	0.76
	15%	-0.81	0.58	0.52
	20%	-1.11	0.48	0.51



표 4. 채움재의 종류에 따른 Stiffness 평가 결과(×106N/m2)

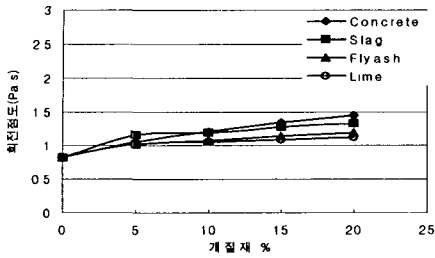
	비율	Van der Poel			McLeod		
		원	단기	장기	원	단기	장기
사용안함	0%	4.80	7.20	11.60	4.12	7.35	12.26
콘크리트	5%	4.25	7.50	17.00	4.12	6.57	15.20
	10%	6.67	16.00	32.00	6.57	16.28	34.33
	15%	5.00	21.00	49.00	4.41	19.62	49.05
	20%	5.20	20.00	48.00	4.90	17.65	47.08
슬래그	5%	2.50	4.80	20.00	2.94	4.90	19.62
	10%	2.50	3.50	20.00	2.94	4.90	19.62
	15%	4.50	5.00	25.00	4.41	6.57	21.58
	20%	4.20	7.20	13.00	4.90	6.86	13.73
플라이애쉬	5%	2.50	3.00	15.00	2.94	3.92	14.71
	10%	4.60	6.20	38.00	4.41	7.35	39.24
	15%	5.00	6.70	40.00	4.90	7.84	44.14
	20%	5.00	10.00	20.00	5.88	11.77	22.56
석회	5%	3.80	8.00	18.00	4.12	8.53	19.62
	10%	4.00	7.00	16.00	4.41	7.35	17.65
	15%	3.00	10.00	15.00	3.43	9.31	14.71
	20%	3.50	3.20	35.00	3.92	3.43	34.33

4. SUPERPAVE 실험

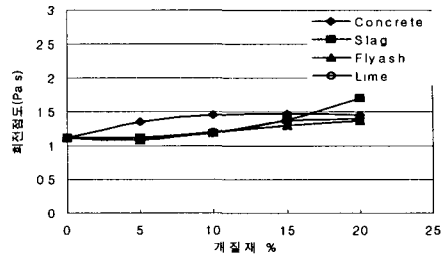
본 연구에서는 회전점도계 및 동적전단유동시험을 수행하였고, 개질재의 종류에 따른 아스팔트의 성질개량 효과에 대한 평가를 수행하였다.

4.1 회전점도계시험 (Rotational Viscometer)

아스팔트의 점도시험은 65oC, 135oC에서 주로 행해지고, 이중 135oC는 아스팔트 혼합물의 혼합온도(145oC~160oC)와 포설시의 온도를 대표한다. 135oC에서 개질재 사용량 및 아스팔트의 노화정도에 따른 아스팔트의 점도의 변화를 그림 6에 나타내었다. 주된 목적은 고온 (135oC)에서의 시공성을 평가하는 것이다(ASTM, 1993). SHRP의 공용성 등급(PG)에 의하면 아스팔트의 등급에 따른 각각의 시험온도에서 최대 점도를 3 Pa.s로 규정하였다. 시험에 사용된 모든 아스팔트의 점도가 SHRP의 공용성 등급기준을 만족한다. 사용된 모든 개질재가 SHRP의 공용성 등급을 만족하는 기준치 이내에서 아스팔트의 점도를 증가시켰다. 이중, 페콘크리트분진 및 슬래그분진을 이용한 아스팔트의 점도 증가효과가 플라이애쉬 및 석회를 이용한 아스팔트의 점도 증가효과 보다 크게 나타났다. 아스팔트의 노화가 증가할수록 개질재에 의한 점도 증가 효과가 크게 나타난 것으로 볼 때, 아스팔트의 점도가 증가할수록 개질재의 혼합으로 인한 개질아스팔트의 점도가 상대적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) 원아스팔트



(b) 단기노화아스팔트

그림 6. 135°C에서의 회전점도 변화

4.2 동적전단유동시험

동적전단유동시험기(Dynamic Shear Rheometer, DSR)는 아스팔트 바인더의 점탄성적인 성질을 확인할 수 있게 개발된 시험장비이다. DSR 실험원리는 일정한 크기의 전단응력을 가했을 때, 생기는 전단 변형 특성을 이용하는 것이다. 실험의 주요 측정치는 복소전단계수(Complex Dynamic Shear Modulus, G^*)와 위상각(Phase angle, δ)이다 (FHWA, 1994, Christensen and Anderson, 1992).

개질아스팔트의 복소전단계수와 하중주파수와의 관계는 그림 7에 나타내었다. 일반적인 경향은 $\log(\omega)$ 가 증가함에 따라 $\log(G^*)$ 가 증가하였다. 25°C에서의 실험결과, 원아스팔트에 페콘크리트 분진 10%를 첨가한 아스팔트의 복소전단계수의 증가 효과가 가장 크게 나타났고, 10%의 슬래그, 플라이애쉬, 석회의 첨가로 인한 복소전단계수의 증가 효과가 비교적 작은 것으로 나타났다. 그림 4와 같이 모난 구조들은 매트릭스를 형성하면서 서로 맞물림작용을 하기때문이라고 할 수 있다. PAV를 이용하여 2차 노화시킨 아스팔트 경우에는 그림 7(b)에 나타나있듯이 첨가재 간의 복소전단계수 값들의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 65°C의 시험결과에서는 슬래그를 첨가한 아스팔트의 복소전단계수 값이 가장 큰 것으로 나타났다. 하지만 페콘크리트 분진을 첨가한 아스팔트 역시 큰 값을 나타내고 있다.

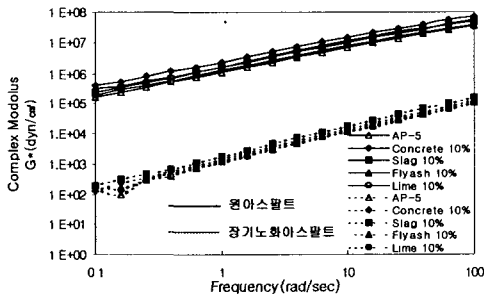


그림 7.(a)원아스팔트+개질재의 G^*

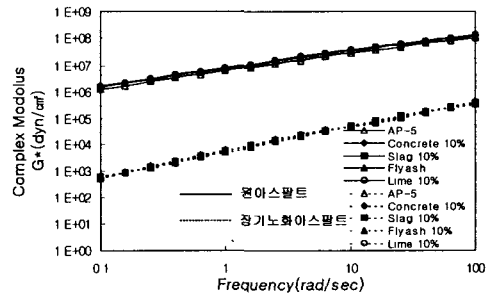


그림 7.(b) 장기노화아스팔트+개질재의 G^*

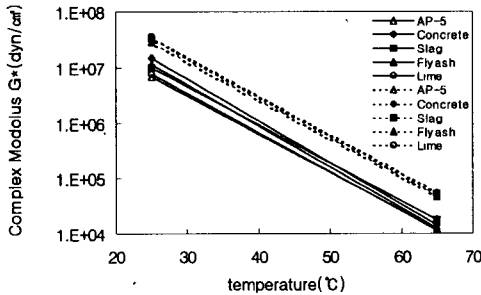


그림 8. 아스팔트+개질재의 G*와 온도의 관계

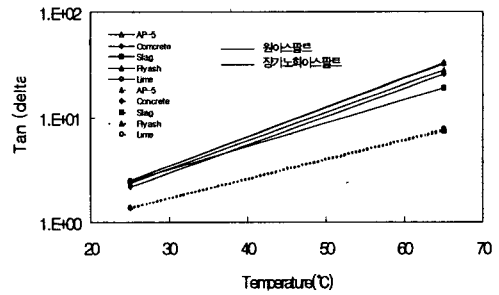


그림 9. 온도와 위상각의 관계

그림 8에 나타난 것과 같이 시험온도가 감소함에 따라 복소전단계수 값이 증가함을 볼 수 있다. 노화시키지 않은 아스팔트 시멘트에 개질재를 혼합하였을 경우 복소전단계수 값의 변화가 비교적 작음을 알 수 있다. 노화정도에 따라 복소전단계수 값의 변화가 큰 것으로 나타났다. 각각의 노화정도에서 미소한 차이지만 페콘크리트 분진을 첨가한 개질 아스팔트의 복소전단계수값이 가장 큰 것으로 나타났다. 그림 9는 아스팔트의 노화정도에 따른 실험온도와 위상각의 관계를 나타낸 것이다.

SHRP에서 제안된 공용성 등급에서는 $G^*/\sin(\delta)$ 의 한계치를 규정하고 있으며 $G^*/\sin(\delta)$ 경우, G^* 가 증가함에 따라 노화를 시키지 않은 아스팔트는 PG등급에 규정된 온도와 10rad/sec의 주파수에서의 최소 $G^*/\sin(\delta)$ 를 1.0 kPa로, 단기노화를 시킨 아스팔트의 경우 최소 2.20 kPa로, 장기노화를 시킨 아스팔트의 경우 최대 5000kPa로 규정하고 있다. 표 10과 11은 각각의 온도에서 개질재에 대한 G' , G'' , G^* 및 ϕ 에 대한 값을 보여주고 있다. 시험에 이용된 모든 시료가 SHRP에서 제안된 공용성 등급(PG 64-22)에 제시된 기준을 만족하였다.

표 10. DSR 실험값 (25oC)

AC	$G'(\times 10^3)$			$G''(\times 10^3)$			$G^*(\times 10^3)$			$\phi(^\circ)$		
	원	단기	장기	원	단기	장기	원	단기	장기	원	단기	장기
원	2.5	7.3	16.1	6.3	13.7	22.6	6.8	15.5	27.7	68.2	61.8	54.6
Con	6.1	10.3	20.3	13.4	17.6	27.7	14.8	20.4	34.3	65.5	59.5	53.8
Slag	3.7	4.2		9.1	9.21		9.8	10.1		68.0	65.7	
Ash	4.3	5.1	19.2	10.2	11.1	26.8	11.1	12.2	33.0	67.3	65.2	54.3
Lime	2.8	6.3	21.0	7.1	12.2	28.6	7.6	13.7	35.4	68.1	62.9	53.7

표 11. DSR 실험값 (65oC)

AC	$G'(\times 10^3)$			$G''(\times 10^3)$			$G^*(\times 10^3)$			$\phi(^\circ)$		
	원	단기	장기	원	단기	장기	원	단기	장기	원	단기	장기
원	3.7	14.4	62.0	120	223	463	120	223	467	88.2	86.3	82.3
Con	5.5	20.2	73.3	142	282	545	142	283	550	87.8	85.8	82.3
Slag	9.4	4.97	68.4	178	124	522	178	124	526	86.9	87.7	82.5
Ash	4.3	6.84	65.5	122	150	505	122	150	509	87.9	87.4	82.6
Lime	3.5	12.0	65.2	112	178	502	112	179	506	88.2	86.2	82.6

5. 결론

페콘크리트 분진을 첨가한 아스팔트의 특성을 평가하였고, 또한 기존에 일반적으로 사용되고 있는 슬래그 분진, 플라이애쉬 분진 및 석회 분진을 첨가한 아스팔트의 물리적 특성과 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 침입도 및 연화점 시험결과를 보면, 침입도의 경우 원아스팔트의 침입도 값에 비해 개질재를 첨가한 아스팔트의 침입도 값이 전체적으로 작아지는 경향을 보이고 있고 특히, 페



콘리트 분진을 첨가한 원아스팔트의 침입도 감소효과가 가장 크게 나타났다. 감온성을 평가한 결과, 개질재의 사용량과 종류에 따라 그 효과가 비교적 평이하게 나타났다. 회전점도계 시험결과와 경우 시험에 사용된 모든 아스팔트의 점도가 SHRP의 공용성 등급기준을 만족하였다. 이중, 폐콘크리트분진 및 슬래그를 이용한 아스팔트의 점도 증가효과가 플라이애쉬 및 석회를 이용한 아스팔트의 점도 증가 효과 보다 크게 나타났다. 동적전단유동시험의 경우 25oC에서 원아스팔트에 폐콘크리트 분진 10%을 첨가한 아스팔트의 복소전단계수의 증가효과가 가장 크게 나타났다

참고문헌

1. 한국도로포장공학회 (1999), 아스팔트 포장공학 원론, 한국도로포장공학회 편저, pp. 571.
2. American Society for Testing and Materials (1993), Road and Paving Materials : Paving Management Technologies, Section 4, Vol. 4.03.
3. Sivakugan, N. (1990), "Inadequacy in the Classification of Coarse-Grained Soils", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 2, pp. 134-137.
4. Christensen, D. W. and Anderson, D. A. (1992), "Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt", AAPT, Vol. 61, pp. 67-116.