

페타이어/폐윤활유 열분해 잔류물의 아스팔트 활용기술

김상국 · 손성근 · 김동찬

한국에너지기술연구소

A Study on the Utilization of Waste Tire/Waste Motor Oil Pyrolytic Residue for Asphalt

Sang-Guk Kim, Sung-Geun Son, Dong-Chan Kim

Korea Institute of Energy Research

요 약

페타이어/폐윤활유를 열분해 하면 대부분이 가스화되고 남은 부분은 카본블랙을 주성분으로 하는 잔류물로서 페타이어량의 약 30%가 된다. petroleum oil로 조립한 카본블랙을 아스팔트에 분산시킨 결과 아스팔트혼합물의 내구성, 내마모성, 온도-점도 감용성이 크게 향상되었다는 외국의 연구결과를 토대로하여 페타이어/폐윤활유 열분해 잔류물을 아스팔트 보강재로 활용하기 위한 연구를 수행하였다. 카본블랙이 주성분으로 표면에 오일피막이 형성되어 아스팔트와의 친화력이 높은 잔류물을 아스팔트 보강재로 활용하기 위하여 배합설계, 휠트래킹, 라벨링등의 실험을 한국에너지기술연구소, 한국도로공사, 국토관리청등에서 반복실험한 결과 마찰실험값이 KS규격을 만족하였고 동적안정도가 현저히 향상되며 한냉조건에서 내마모성이 증가한다는 것을 알았다. 환경에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용출실험을 하여본 결과 잔류물을 아스팔트 보강재로 활용한 아스팔트콘크리트를 시공하였을때 주변의 토양에 영향을 미치지 않은것으로 확인되었다.

Abstract

When waste tire/waste motor oil is pyrolyzed, most of them become gaseous products, and the remaining one, whose weight is about 30% of the waste tire, is pyrolyzed residue mostly composed of carbon black. A research was carried out to utilize the pyrolyzed residue of waste tire/waste motor oil as reinforcing agent of asphalt concrete, based on foreign research report. This shows that the properties of asphalt concrete including durability, resistance to wear, temperature-viscosity susceptibility are greatly improved when the pelletized form of carbon black using petroleum oil as a binder for the pellets is used with asphalt. The surface of the pyrolyzed residue is covered by oil film and this makes good compatibility with asphalt. In order to utilize pyrolyzed residue as a reinforcing agent of the asphalt concrete, various tests such as Marshall test, wheel tracking, and labelling test has been carried out at KIER, Korea Highway Cooperation, and TCMO. Test results satisfy KS standard, show improvements on the dynamic stability, and increase resistance to wear at cold temperature. Investigation was carried out to study the possibility of soil pollution when pyrolyzed residue is used as a reinforcing agent. Experimental results show the residue contained in the asphalt does not cause environmental problems.

1. 서론

국가 경제가 발전함에 따라 차량대수는 매년 증가하여 페타이어 및 폐윤활유 발생량이 꾸준히 증가추세에 있다. 방치된 페타이어는 해충의 서식지가 되고 화재의 위험점이 있으며 도시미관에도 나쁜 영향을 준다. 또한 도시 주변에는 페타이어를 저장할 수 있는 야적장 마련에도 어려움이 있어 페타이어 처리기술은 시급한 상태에 있다.

타이어의 주성분은 천연고무, S.B.R, B.R., I.R. 등 합성고무, 합성고무의 내마모성을 보강해 주기 위한 카본블랙, 충전제, 산화방지제, 연화제, 가황제, 가황촉진제, 점착제, 착색제, 타이어코드, Processing oil 등으로 구성되어 있으며 가연성 성분이 많아 발열량이 약 9,000Kcal/kg로 좋은 에너지원이며, 타이어 무게의 약 30%에 달하는 카본블랙은 재료의 물성을 강하게 변화시켜주는 보강제로 활용되어 왔다. 페타이어 활용기술은 크게 시멘트킬른에 연소하는 것과 같은 직접연소방법, 건류소각방법, 그리고 열분해방법이 있다. 페타이어 열분해 방법은 타이어로부터 에너지를 회수하고 잔류물을 활용할수 있는 유일한 방법으로써 한국에너지기술연구소에서 기술을 개발해 오고 있다. 페타이어를 열분해 하여 생성된 열분해 잔류물 조성은 아래 Table 1과 같다.

Table 1. Composition of Waste tire/Waste motor oil Pyrolytic Residue.

성분	회 분					VM	S	고질 탄소
	Zn	Fe	Mg	Si	기타			
조성(Wt.%)	3.76	0.12	0.11	2.1	7.91	5.0	2.85	78.15

열분해하는 방법을 세분화하면 페타이어만 열분해하는 방법 그리고 폐유를 열매로하여 페타이어를 열분해하는 방법이 있다. 당 연구소에서는 다음과 같은 이유로 폐유를 열매로 이용하는 후자에 속하는 공정을 개발하였다. 폐유를 열매로 하면 열분해 반응기내의 온도를 일정하게 유지할 수 있기 때문에 페타이어의 일부분이 국부 가열되어 생기는 열분해 잔류물의 탄화를 방지할 수 있어 생성된 잔류물이 부드럽고, 입자를 고온분말로 쉽게 분쇄가 가능하기 때문에 아스팔트 보강재로서의 기능을 발휘할 수 있다. 또한 잔류물 표면에 얇은 오일 피막이 형성되어 아스팔트와의 친화력이 좋아 아스팔트에의 분산성이 우수하고 일단 분산되면 흡사 아스팔트의 일부처럼 거동하

여 아스팔트콘크리트(아스콘)의 품질을 향상시킬수 있다. 열분해 방식에 따라 잔류물이 아스콘에 미치는 영향을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of Characteristics of Pyrolytic Residues generated by two different types.

열분해 Type	페타이어/폐윤활유 열분해잔류물	페타이어 열분해잔류물
아스콘에 미치는 영향	공 통 · 내마모성 향상 · 온도-점도 감응성(Temperature Susceptibility) 향상 · 산화(Oxidative aging)에 의한 노화방지	
Type별 특징	· 동적안정도 향상 · 수분에 의한 파손감소 · Embrittlement 감소	· 부분탄화에 의한 품질저하 · 입자의 균일화 분산이 어려움

2. 실험 및 고찰

발표된 자료등에 의하면 카본블랙을 아스팔트에 분산시켜 실험한 결과 내구성, 내마모성, 온도-점도 감응성등이 향상되었다고 발표되었다. 이때 카본블랙에 의하여 아스팔트가 뻣뻣하여지는 것을 방지하기 위하여 혼합 가능한 petroleum oil로 카본블랙을 조립하여 사용하였다. 카본블랙으로 보강된 아스팔트를 결합제로 사용하여 아스콘을 제작하였을때 카본블랙은 내마모성의 증진, 저온에서의 균열, 고온에서 동적안정도의 향상을 가져온다고 보고되었다. 이러한 특징을 지닌 카본블랙을 주성분으로 하는 열분해 잔류물을 아스팔트 보강제로 활용하기 위하여 다음과 같이 국토 표준 및 고속도로 표준을 대상으로 잔류물이 아스콘에 미치는 영향을 조사한 다음 최적 배합 설계 조건을 도출하였다

2.1. 밀입도 아스팔트콘크리트 13에 대한 실험결과 및 고찰

골재의 입도배합비는 국토용 표준으로 일반적으로 사용되는 밀입도 13을 선택하였다. 잔류물의 아스콘 배합에는 2가지 사항이 고려되어야 한다 첫째는 잔류물과 아스팔트의 혼합비 (잔류물/(잔류물+아스팔트)= ν) 이며 둘째는 잔류물과 아스팔트가 아스콘 전체무게에서 차지하는 비율이다. 적정 잔류물의 혼합비를 결정하기 위하여 한국에너지기술연구소에서 값을 0.06에서 0.18까지 변화시키면서 배합설계를 하여보았다. 실험결과 값이 0.13일때 최적 마찰실험값을 나타내었다. 따라서 혼합비를 13%로 하

여 아래 Table 3과 같이 잔류물+아스팔트의 양을 5%에서 7%까지 변화시키면서 국토관리청에 배합설계를 의뢰하여 실험하여 보았다.

Table 3. Composition of Asphalt Binders Containing different amount of Pyrolytic Residue
기준 = 3600g (잔류물 + 아스팔트 + 골재)

성분	투입량	5 0%	5 5%	6 0%	6 5%	7 0%
잔 류 물		23 4g	25 7g	28 1g	30.4g	32.8g
아 스 팔 트		156.6g	172.3g	187.9g	203.6g	219.2g
Bmder (잔류물+아스팔트)		180 0g	198.0g	216 0g	234.0g	252 0g
골 재		3420g	3402g	3384g	3366g	3348g

이때 사용된 잔류물은 100mesh체 통과분이며, 골재는 충남 금산에서 채취하였다. KS F 2349(가열혼합, 가열포설 역청포장용 혼합물)방법에 의하여 표층혼합물의 표준배합에 따라 작성한 골재의 통과율표(gradation table)는 Table 4와 같다.

Table 4. Gradation Table for Highway.

	배합비%	13mm	# 4	# 8	# 30	# 50	# 100	# 200
쇄석 13 mm	36.0	100	17	0.6				
인공모래	40.0	100	89.9	56.0	27.2	19.3	14.4	8.5
천연모래	20.0	100	98.9	91.9	56.2	15.9	5.2	0.9
석 분	4.0					100	97.4	83.8
시방입도		95-100	55-70	35-50	18-30	10-21	6-16	4-8
합성입도		100	60.4	45.0	26.1	14.9	10.3	7.0

잔류물과 아스팔트를 교반하기 위하여 잔류물을 건조기에서 100℃ 건조하고 아스팔트는 150℃로 가열한 다음 heater가 부착된 교반기에서 교반하였다. 혼합된 잔류물 + 아스팔트를 골재와 교반하는 방법은 마샬시험방법에 나와있는 방법과 동일하다 KS F 2337(마샬시험기를 이용한 역청혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법)방법에 의하여 실험한 결과 Table 5와 같은 배합설계 값을 얻었다. 실험결과 잔류물을 포함한 아스콘의 최적 배합설계 값은 6.3%이며 이는 안정도, 흐름값, 공극율, 체울을 공히 만족시키는 Binder(잔류물+아스팔트) 투입량 범위중 중간 값을 선택한 결과로 설계값 6.3%에서 최대 강도(안정도)를 나타내었다는 의미는 아니다. Table 5에서 나타난바와

같이 잔류물을 포함한 아스콘 품질이 KS 규격을 만족시키고 있으나 잔류물 첨가에 의한 특별한 안정도 증가는 나타나지 않았다.

Table 5. Marshall Test Results.

시험종목	단 위	성 적	기준(표층)
최적 아스팔트 혼합물	%	6.3	
인 정 도	kg	830	500이상
흐 름 값	1/100cm	36	20-40
공 극 율	%	5.0	3-6
체 울 율	%	73	70-85
밀 도	g/cm ³	2.357	

2.2 밀입도 아스팔트콘크리트 19에 대한 실험결과 및 고찰

고속도로는 특히 대형차의 교통량이 많으므로 표층의 아스팔트 혼합물이 횡방향으로 움직여 소성변형(plastic deformation, rutting)이 생기는 수가 많으므로 이를 적극방지할수있는 내유동포장이 요구되며, 이를 위해서는 동적안정도(dynamic stability)가 높아야한다. 고속도로 표층용 아스콘에 대한 잔류물 첨가효과를 조사하기 위하여 배합설계, 필트릭킹 실험, 라벨링 실험을 한국도로공사에 의뢰하여 시험하였다. 골재는 충남 아산군 석산골재를 사용하였으며 고속도로 표층용 아스콘을 대상으로 실험하기 위하여 골재의 합성입도를 아래 Table 6과 같이 밀입도 19에 맞추어 체가름 작업을하여 준비하였다¹⁾.

Table 6. Gradation Table for Interstate

	배합비 (%)	19mm	13mm	# 4	# 8	# 30	# 50	# 100	# 200
쇄석 19-13mm	20	100.0	23.5	1	1	0	0	0	0
쇄석 13-8mm	19	100.0	96.2	5	4	0	0	0	0
쇄석 8mm	34	100.0	100.0	86.0	56.4	35.9	18.4	12.8	7.3
모래	22	100.0	100.0	100.0	90.2	48.6	17.7	4.9	1.8
석 분	5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.8	81.8
골재혼합인도(중인치)		100.0	84.0	56.3	44.1	24.5	15.2	10.4	7.0
시방입도		95-100	78-90	48-65	38-50	20-30	12-21	7-16	4-8
%		0.0	16.0	27.7	12.2	19.6	9.3	4.8	3.4

2.1 절에서 논의 하였던 바와 같이 혼합비와 아스팔트 + 잔류물 양을 배합설계를 통하여 결정되어야 한다. 이를 위하여 시험항목을 혼합비(φ)가 (1) 0%, (2) 6%, (3) 12%, (4) 18% 에 해당되는 4가지로 하였으며, 각각의 시험항목에 해당되는 배합설계를 (1),(2)번의 경우는 아스팔트+잔류물량을 5%, 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%로 변화시키면서 실험하였고, (3),(4)번의 경우 4.5% - 6.5% 범위 내에서 0.5%만큼 증가시키면서 실험하였다. 실험결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Properties of Asphalt Concrete 19 Containing Pyrolytic Residues.

시험항목 (Test Item)	시 험 설 과				기준 (표준)	
	AP-3	AP-3+	AP-3+	AP-3+		
배 합 설 계	최적 AP함량(%)	5.6	5.4	5.3	5.7	
	밀도(g/cm ³)	2.361	2.376	2.379	2.374	
	안정도(kg)	1135	1065	980	1140	750이상
	흐름값(1/100cm)	31.0	30.0	34.0	31.5	20-40
	공극율(%)	3.6	3.4	3.4	3.4	3-5
	포화도(%)	78.0	79.0	76.0	78.0	75-85
휠 트 러 킹	밀도(g/cm ³)	2.415	2.413	2.386	2.402	
	변형율(mm/분)	0.1627	0.0740	0.0685	0.1167	
라 벨 링	동적안정도(회/mm)	258.1	567.6	613.1	359.9	
	밀도(g/cm ³)	2.236	2.184	2.179	2.203	
	미모링(μm)	1.939	1.481	1.847	1.514	

실험결과 잔류물을 함유한 공시체의 마찰실험값은 KS 품질기준을 상회하고있으나 특별히 잔류물 첨가에 의한 안정도 증가는 나타나지 않았다. 마찰실험값인 안정도, 흐름값, 공극율, 포화도를 동시에 만족하는 잔류물 + 아스팔트량의 범위는 혼합비가 0.06일때 가장 넓어 적절 혼합비는 0.06으로 하였다. Table 7에서 보는 바와 같이 휠트러킹 실험에서 동적안정도는 잔류물이 포함된 공시체의 경우 기존의 아스콘에 비하여(1번) 현저히 증가한 것으로 나타났다. 잔류물의 혼합비=0.06인 경우 2.2배 증가한 것으로 나타났다. 따라서 열분해 잔류물이 아스팔트혼합물의 반복차륜하중에 대한 동적안정도를 높이는데 크게 기여하였음을 알 수 있다. 아스팔트콘크리트 혼합물의 한냉조건에서 cham에 의한 마모저항성을 측정하기 위한 모형적 시험방법인 라벨링 시험을 하였다. 잔류물 혼합비가 0.06인 (2)번 공시체의 경우 마모량은 약 24%감소하였음을

보여주어 내마모성이 증가하였음을 나타내었는데 이는 잔류물의 주성분인 카본블랙의 타이어에 대한 내마모성 증진효과를 고려하여 볼때 당연한 결과라 사료된다.

2.3 환경영향분석

폐기물중 유기화합물은 자연상태에서 독성이 덜한 상태로 분해되어 안정화 되지만 열분해 잔류물중에 함유된 성분중 아래 Table 8과 같이 미량존재하는 중금속은 분해가 불가능 하기 때문에 비에 의하여 일부가 용출되어 침출될 경우 주변의 토양이 오염된다. 일반 산업폐기물의 경우 이를 방지하기 위하여 고형화 방법을 통하여 용출속도를 감소 시키는 것처럼 잔류물은 아스팔트와의 친화력이 좋고 아스팔트콘크리트라는 최종 산물을 통하여 고형화 되기 때문에 문제시 되지 않으리라 전망하지만 실험을 통하여 주변환경에 대한 영향을 평가 하기 위하여 용출에 의한 중금속 농도를 측정하였다

Table 8. Heavy Metals Contained in Pyrolytic Residue

성 분	Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(%)	Cd(ppm)	Fe(%)	Cr(ppm)
합 량	40.0	95.0	3.76	5.0	0.12	< 1

용출실험은 폐기물관리법 (법률 제 4363호, 1991.3.8) 제 11조에 의하여 제정된 폐기물공정관리법에 따라 수행하였다. 시료는 아스콘에 포함된 적정 잔류물 양보다 많은 양의 잔류물이 포함된 공시체를 취하여 만들었다. 공시체를 분쇄 하여 9.5mm체를 통과하고 2.0mm체에 남는 시료 10g을 취하여 250ml 삼각플라스크에 넣었다. 증류수에 염산을 넣어 pH를 5.8-6.3으로 조절한 용출수를 시료의 10배 되는 부피만큼 취하여 넣고 진탕회수가 분당 200회, 진폭이 4cm되게 진탕기를 사용하여 6시간 진탕하였다. 여액을 Whatman No 40 여과지로 여과한 다음 여액을 원자흡광 광도계를 사용하여 정량분석 하였다. 상기 과정에 따라 행한 실험결과는 Table 9와 같다.

Table 9. Heavy Metals Leached from Asphalt Concrete Containing Pyrolytic Residues.

시 료	(Unit : ppm)					
	Cu	Pb	Cr	Cd	As	Zn
잔류물 60g/아스콘 6kg	0.0084	None	None	None	None	0.022
잔류물 9g/아스콘 6kg	0.0146	None	None	None	None	0.078

상기표에서 보는 바와 같이 여액중 중금속 농도는 기준치에 비하여 아주 낮거나 검출되지 않았다. 이와 같은 이유는 잔류물중의 일부 중금속 농도가 아주 낮았고, 중금속의 일반적인 처리방법인 시멘트 고형화 처리방법과 같이 잔류물이 아스팔트시멘트에 의하여 고형화 처리되었기 때문이라 사료된다.

3. 활용전망 및 기대효과

3.1 활용전망

국내에서 발생하고 있는 페타이어, 폐윤활유는 매년 증가 추세에 있어 심각한 환경공해가 야기되고 있어 처리공정의 개발이 시급한 상황에 있다. 페타이어를 열분해시 오일로의 변환량이 중량비로 약 50%이며 잔류물로 배출되는 양은 약 30%이다. 1993년도 기준으로 하여 국내에서 배출되는 모든 페타이어를 처리 하였을때 잔류물 배출량은 약 54,000톤에 달한다. 이상의 여건을 고려할때 페타이어 열분해 잔류물의 활용전망은 다음과 같다.

- (1) 열분해 잔류물이 플랜트에서 부산물로 배출되고 가공공정이 건조, 분쇄등으로 비교적 간단하다. 또한 아스팔트, 골재와의 혼합공정은 기존의 믹싱플랜트를 이용한다. 잔류물은 광물성 채움재와 같이 방습설비가 되어 있는 싸이로에 저장하여 믹서(pug mill)에 자동 계량 투입 되도록 한다. 따라서 잔류물을 저렴하게 공급할 수 있으며, 잔류물 사용에 따른 추가 시설비 부담을 최소로 할수 있어 도로 포장비가 기존 제품과 동일하게 공급할 수 있다.
- (2) 잔류물로 보강한 아스팔트콘크리트는 특히 고온에서 동적안정도가 향상되고 아스팔트의 노화를 감소하여 주므로 도로포장 수명이 연장된다.
- (3) 잔류물로 보강된 아스팔트는 아스팔트콘크리트 표층공에 binder로 사용됨이 적절하다.
- (4) 국내에서 필요로 하는 아스팔트량을 고려할때, '93년을 기준으로 하여 페타이어 전량을 열분해 하여도 생산될 잔류물량이 54,000톤에 불과하여 열분해 잔류물을 국내에서 소비할 수 있는 충분한 시장여건이 형성되어 있다.
- (5) 열분해 잔류물을 도로포장 재료로 사용하여도 전술한 용출실험 결과에서 보는 바와 같이 빗물에 의하여 주변 토양을 오염시킬 위험성이 없어 환경적인 측면에서 안전하다

위와 같은 여건을 고려할때 잔류물로 보강된 아스팔트 콘크리트의 품질,가격면에서 유리하여 도로포장재료의 활용이 촉진되리라 사료된다.

3.2 기대효과

건설교통부, 각 지방자치단체에서는 매년 막대한 예산을 들여 신규도로를 포설하고 수명이 다된 기존도로에 덧씌움 공사를 하고있다. 여기에서 문제가 되는 점은 특히 여름철 중량이 무거운 화물차 및 대형버스에 의한 소성변형으로 요철이 발생하여 차량이 주행시 심하게 떨리게 되어 교통사고의 위험성이 높아진다는 점이다. 차바퀴 페임(rutting)은 아스팔트 파손의 주요원인 중의 하나이며 아스팔트콘크리트 표층과 밀접한 연관이 있어 아스팔트 혼합물의 내유동성, 내구성을 증진하고자 하는 노력이 경주되어왔다. 이러한 문제를 해결할 목적으로 선진국에서는 복합 폴리머를 비롯한 아스팔트 개질제를 개발하여 시험포장과 추적조사를 꾸준히 해오고 있으나 국내에서는 아직 개질제를 자체적으로 개발하지 못하고 있는 실정이다. 잔류물로 보강된 아스팔트콘크리트는 이러한 소성변형을 감소시켜주며 내구성이 증진 되기 때문에 운전자의 안전을 도모하고 도로유지 보수 관리비를 절감할 수 있으므로 기대된다

4. 결론

페타이어/폐윤활유 열분해 잔류물을 아스팔트 보강제로 활용하기 위하여 국도 및 고속도로 표층용 공시체를 제작하여 시험하여 본 결과 마찰시험값이 한국 공업규격을 만족하였으며 동적안정도가 크게 향상되어 특히 여름철 중 하중차량에 의하여 발생하는 차바퀴 페임현상을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

아스팔트 침입도가 85~100인 경우 밀입도13 혼합물에 대하여 열분해 잔류물 최적혼합비는 0.13, 밀입도19 혼합물의 경우는 0.06이었으며, 적절한 투입량은 배합설계 결과 Binder(아스팔트 + 잔류물)량이 잔류물이 포함되지 않은 경우 배합설계에 의한 아스팔트 소요량과 같았다.

잔류물로 보강된 아스팔트를 생산하기 위하여 기존의 아스팔트혼합물 제조 플랜트에 잔류물을 저장할수 있는 방습설비가 갖추어진 싸이로와 자동계량 투입장치가 갖추어져야하며 기타 포장방법은 기존의 포설방법과 동일하다

잔류물을 포함한 아스콘은 기존의 아스콘 가격과 동일하게 공급할 수 있으며 아스팔트의 노화방지, 차바퀴 페임현상의 감소, 수분에 의한 파손 감소등으로 말미암아 포장도로의 수명이 연장되기 때문에 경제적이다.

참고문헌

- (1) B.A. Vallerger, P.F. Gridley : "Carbon Black Reinforcement of Asphalts in Paving Mixtures", ASTM Technical Publication 724, J A.Scherocman ed , 110-128, A Symposium sponsored by ASTM, Committee D-4 on Road and Paving Materials. American Society for Testing and Materials, SanDiego, Calif., Dec. 1979, Barber-Greene Company, Printed in Baltimore, Md., U. S.A. (1980).
- (2) F.S. Rostler, R.M. White, and E M Dannenberg: "Carbon Black as a Reinforcing Agent for Asphalt", Association of Asphalt Paving Technologists. 46, 376-410, (1977).
- (3) Z.Yao, C. Monismith: "Behavior of Asphalt Mixtures with Carbon Black Reinforcement", Association of Asphalt Paving Technologists, 55, 565-585, (1986).
- (4) S.D. Hakes, C.Y. Cha, and H. Plancher: "Recycling Scrap Tires and Waste Oils", Proc. of Energex' 93 Vol. V, 166-180, The 5th International Energy Conference, Environmental Control and Waste Recycling, Seoul, Korea, 18-22 October 1993, Printed in Seoul (1993).
- (5) J.E. Button : "Summary of Asphalt Additives Performance at Selected Sites", Transportation Research Record, No.1342, Materials and Construction, Asphalt and Asphalt Additives, National Research Council, 62-75 (1992).
- (6) 최태진 : "공사용 재료및 자재의 품질기준". 건설공사품질시험 편람, 698-700,한국도로공사 (1989).