



아스팔트 콘크리트의 노화 후 추출한 바인더의 물리적 특성 변화

Change of Physical Properties of Binder Extracted from after Artificial Aging of Asphalt Concretes

김광우* · 도영수** · 김성운***

Kim, Kwang-Woo · Doh, Young-Soo · Kim, Sung-Woon

Abstract

Asphalt binder characteristics in asphalt mixture are changed due to aging. However, depending upon aggregate and binder used, asphalt mixture dose not show the same level of stiffness and brittleness under the same ageing level. The factors affecting physical properties change of the asphalt binder within aged asphalt concrete are not well known and there is limited study which is dealing with this topic. This study dealt with evaluation of physical properties of asphalt binder recovered from the mixtures after short-term and long-term aging. Two asphalts, two aggregates, two gradations and four polymers were used to make 32 mixture combinations. The mixtures were prepared and aged artificially in a forced draft oven. The measured physical properties included absolute viscosity, kinematic viscosity and penetration. Statistical analyses were carried out to find out the factor(s) having a significant effect on change of physical property of asphalt binder due to asphalt mixture aging. The results of study shown that aggregate, gradation and polymer had a significant effect on change of physical properties of asphalt binder.

Keywords : asphalt, aging, polymers-modified asphalt, absolute viscosity, kinematic viscosity, penetration.

요 지

아스팔트는 노화에 따라 물리적 특성변화가 일어난다. 하지만 같은 수준으로 노화시킨 아스팔트 혼합물들임에도 골재와 결합재 등에 따라 서로 다른 강성이나 취성을 보인다. 이는 노화에 의한 바인더 특성 변화의 차이에 기인한 것인데 이와 같이 혼합물 내에서 바인더의 물리적 특성 변화 차이에 영향을 주는 요인에 대한 연구는 별로 없다. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 노화 후 추출한 바인더의 물리적 특성을 측정하고 물성 차이에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 폴리머 3종류와 골재 두 종류, 두 가지 입도, 두 종류의 아스팔트를 사용하여 32종류의 혼합물을 제조하고 이를 장·단기 노화 처리하였다. 각 혼합물의 노화 후 Abson recovery 방법으로 바인더를 추출·회생하고 바인더 물성 시험(침입도, 동점도, 절대점도)을 수행하였다. 이를 SAS를 이용하여 통계 분석하였다. 바인더 시험에서 골재 종류와 폴리머가 노화시 물성변화에 차이를 가져오는 심각한 요인임을 알 수 있었고 입도는 점도 변화에 큰 영향을 미치는 인자인 것임을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과, 혼합물 내의 바인더 물성은 골재 종류, 입도, 개질제의 종류, 바인더의 종류 등의 다양한 요인에 의해 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 아스팔트 혼합물, 단기노화, 장기노화, 침입도, 동점도, 절대점도.

*정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수

**고속도로관리공단 기술개발팀 포장연구과장

***강원대학교 지역기반공학과 조교



1. 서론

아스팔트 포장은 결합재로 사용된 아스팔트의 노화로 인하여 강도의 증진을 가져오기도 하지만 취성의 증가를 수반하여 균열 등 파손의 원인이 된다. 그리고 동일기간 같은 조건으로 노화된 아스팔트 혼합물임에도 사용된 골재와 결합재 등에 따라 서로 다른 강성이나 취성을 보인다. 이는 노화에 의한 바인더 특성변화에 차이가 생기기 때문인데 이렇게 혼합물 내 바인더의 물리적 특성 변화 차이에 영향을 주는 요인은 잘 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물의 노화에 따른 바인더의 물성 변화를 측정하고 이 물성 변화 차이에 영향을 미치는 요인을 분석하는 것이다.

많은 연구자들이 아스팔트의 종류에 따른 노화 특성 변화를 측정하고 이를 토대로 혼합물의 특성 변화를 여러 가지 방법으로 규명하고자 하였다. 하지만 대부분의 연구(김광우 등 1996, 1999; 김남호 등 1997)는 결합재인 아스팔트만을 인공 노화시켜 바인더 특성변화를 측정하였다. 그러나 본 연구에서는 단기 및 장기 인공 노화시킨 아스팔트 혼합물로부터 바인더를 추출하여 바인더의 물리적 특성 변화를 측정하였고, 이를 이용해 물성 차이에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 하였다.

왜냐하면 아스팔트는 포장체내에서 골재와 결합되어있고 같은 바인더라도 골재 종류는 물론 골재 입도에 따라서도 같은 노화조건 하에서 바인더의 노화정도에 차이가 발생하기 때문이다. 예로서 같은 규격의 혼합물일지라도 골재가 다르면 아스팔트-골재의 결합특성에 따라 표면흡착에 차이가 나기 때문에 바인더의 노화정도에도 차이가 나타날 것이다.

하지만 실험실에서 현장과 같은 조건을 모사하기는 어렵고 이들의 모든 변수를 모두 포함하면

너무 방대하여지므로 본 연구에서는 사용재료에 따른 변수만으로 한정하여 연구를 수행하였다. 이를 위하여 아스팔트, 골재, 입도 및 개질 아스팔트로 총 32가지 혼합물을 제조하였다. 혼합물의 노화에 따른 바인더의 물리적 특성 변화를 고찰하기 위하여 혼합물을 인공적으로 단기 노화와 장기노화 처리 후 Abson recovery 방법으로 아스팔트를 추출·회생하여 노화정도에 따른 물성 변화를 보기 위하여 절대점도, 동점도 및 침입도를 측정하고 이를 노화 전 상태의 값과 비교하였다. 또한 장단기 노화된 혼합물로부터 추출·회생된 바인더의 물성 자료에 대해 통계 프로그램을 이용하여 요인을 분석하였다.

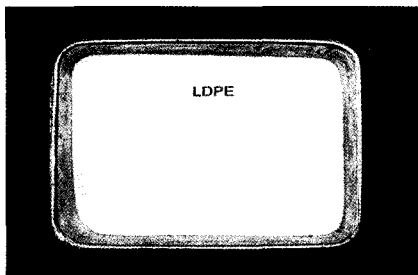
2. 재료 및 방법

2.1 재료

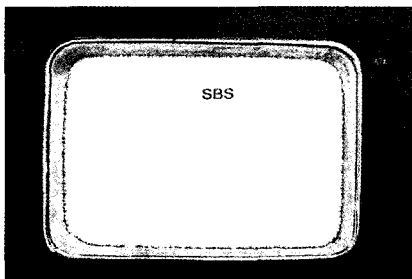
본 연구에서는 S사의 아스팔트 2종류(AC 60-70, AC 85-100)와, 첨가제 3종류(SBS: styrene-butadiene-styrene, LDPE: low density polyethylene, 공업용 송진: rosin)로 개질한 바인더를 사용하였다. 골재는 강원 영서지역의 편마암(gneiss)과 경기도 북부지역의 화강암(granite) 두 종류를 사용하였고, 각 골재별로 밀입도(dense grade: D), 갭입도(gap grade: G)로 혼합물을 제조하였다. 본 연구에서 사용된 S사의 AC 60-70, AC 85~100의 아스팔트는 표 1과 같은 물리적 특성을 지니고 있다.

표 1. Physical properties of asphalt

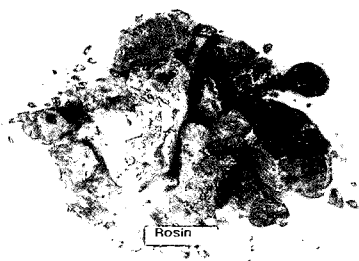
Property	AC 85-100	AC 60-70
Penetration at 25°C (0.1mm)	94	67
Absolute viscosity at 60°C (Poise)	962	2,075
Kinematic viscosity at 135°C (cP)	285	425
Softening point (°C)	44.0	50.0
Ductility 25°C (cm)	150	138
Flash point (°C)	317	334
Specific gravity	1.022	1.024



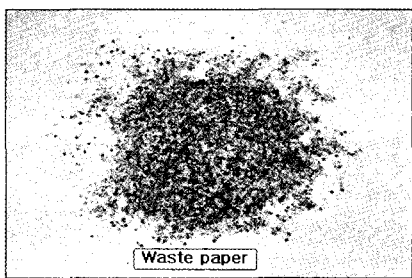
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1. Photograph of (a) LDPE, (b) SBS, (c) Rosin and (d) Waste paper

개질재는 국내에서 생산되고 있는 SBS, LDPE, Rosin으로서 약자로 각각 SB, PE, RO로 표기하였으며, 그 동안의 연구 결과(김광우 등, 1996, 1997, 1999)를 통하여 중량비 3%, 6%, 10%의 비율로 각각 첨가하였다. 또한 갭입도 혼합물의 경우 바인더의 침강현상을 방지하기 위해서 충전용 섬유재로 waste paper(2×2mm)를 사용했고, 적절한 함량은 김광우(1998)의 선행 연구에 의해 아스팔트 량의 3%를 사용했다. 그림. 1에 개질재와 충전재로 쓰인 waste paper를 보여주고 있다.

골재들은 KS 규정에 따라 품질 시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 또한 각각의 골재를 KS F 2502에 의해 체가름하여 밀입도(dense grade)와 갭입도(gap grade)로 혼합물을 제조하였고, 입도분포는 그림 2와 같다.

표 2. Properties of aggregate

Classification	Coarse aggregate			Fine aggregate		Filler
	Spec. limit	Gneiss	Granite	Gneiss	Granite	
Apparent specific gravity	>2.45	2.55	2.56	2.64	2.63	2.75
Abrasion (%)	<35	24.3	32.1	-	-	-
Absorption(%)	<2.5	1.50	0.76	1.69	1.23	-
Fineness modulus		6.44	6.27	2.65	2.32	

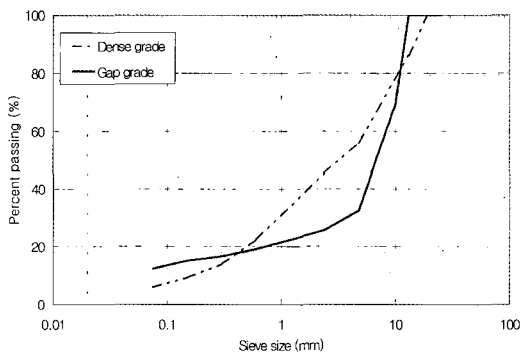


그림 2. Gradation of aggregate



2.2 개질 아스팔트(PMA)의 제조 및 배합설계

개질 아스팔트의 제조는 바인더의 중량비로 6, 3, 10%의 LDPE, SBS, Rosin을 180℃로 가열된 아스팔트 속에 서서히 넣으면서 고속회전전단믹서(Homogenizer)를 6000rpm으로 회전시켜 제조하였다.

두 가지 아스팔트, 두 가지 입도와 두 가지 골재, 그리고 비 개질 아스팔트와 3종류의 개질 아스팔트 바인더를 사용하여 총 32종류(2×2×2×4)의 혼합물에 대하여 마샬설계법으로 배합설계를 수행하였다. 32가지 혼합물의 각 골재별 혼합물의 명칭을 표 3과 같이 구분하여 명명하였다.

최적 아스팔트 함량(OAC)은 양면 50회 다짐하여 제작된 공시체의 물성(공극) 및 마샬 특성을 이용하여 건설 교통부 배합설계 규정에 근거하여 결정하였다. 배합설계를 통해서 결정된 각각의 개질 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량은 표 4와 같다.

표 3. Designation of mixtures for each agg.

Mixture	Description	Remark
D30	Dense grade, AP-3, (Without Polymer)	Gradation D: dense G: gap
D3L6	Dense grade, AP-3, LDPE 6%	
D3R10	Dense grade, AP-3, Rosin 10%	
D3S3	Dense grade, AP-3, SBS 3%	Asphalt 3: AP-3 5: AP-5
G30	Gap grade, AP-3, (Without Polymer)	
G3L6	Gap grade, AP-3, LDPE 6%	
G3R10	Gap grade, AP-3, Rosin 10%	Modifier L: LDPE S: SBS R: Rosin
G3S3	Gap grade, AP-3, SBS 3%	
D50	Dense grade, AP-5, (Without Polymer)	
D5L6	Dense grade, AP-5, LDPE 6%	Modifier content 0: 0% 3: 3% 6: 6% 10: 10%
D5R10	Dense grade, AP-5, Rosin 10%	
D5S3	Dense grade, AP-5, SBS 3%	
G50	Gap grade, AP-5, (Without Polymer)	
G5L6	Gap grade, AP-5, LDPE 6%	
G5R10	Gap grade, AP-5, Rosin 10%	by wt of binder
G5S3	Gap grade, AP-5, SBS 3%	

표 4. Optimum asphalt content(OAC)

Mixtures	OAC	Mixtures	OAC
AD30	5.1	AG30	5.2
AD3L6	5.2	AG3L6	5.3
AD3S3	5.3	AG3S3	5.1
AD3R10	5.0	AG3R10	5.2
AD50	5.1	AG50	5.2
AD5L6	5.2	AG5L6	5.0
AD5S3	5.2	AG5S3	5.2
AD5R10	5.3	AG5R10	5.2
BD30	5.0	BG30	5.2
BD3L6	5.2	BG3L6	5.4
BD3S3	5.4	BG3S3	5.2
BD3R10	4.8	BG3R10	4.9
BD50	5.4	BG50	5.0
BD5L6	5.7	BG5L6	5.4
BD5R10	5.2	BG5R10	5.2
BD5S3	5.5	BG5S3	4.9

* A - 편마암(Gneiss) * B - 화강암(Gramite)

2.3 아스팔트 혼합물의 인공노화

아스팔트 혼합물 내의 바인더는 제조와 포설, 그리고 공용 중에 산화작용(oxidation), 휘발작용(volatilization), 중합작용(polymerization), 의액성(擬液性:thixotropy), 상승작용(syneresis), 분리작용(Separation) 등에 의하여 노화가 진행된다. 본 연구는 플랜트에서 아스팔트 혼합물의 제조와 시공 시 바인더의 단기노화와 시공 후 공용 중의 장기노화를 모사하기 위해 실험실에서 기존의 연구(Kliwer 등 1995, Huang 등 1996)들에서 제시된 방법을 응용하여 다음과 같이 혼합물을 인공노화시켰다.



그림 3. Stirring of asphalt mixtures during SA.

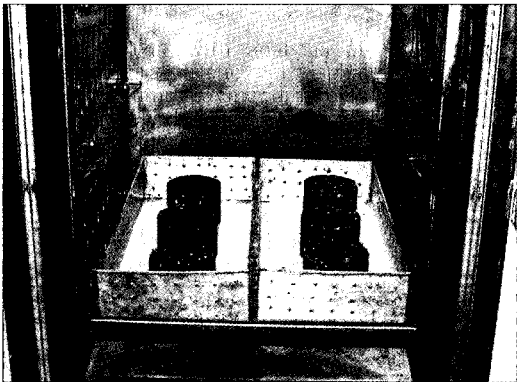


그림 4. The process of LA

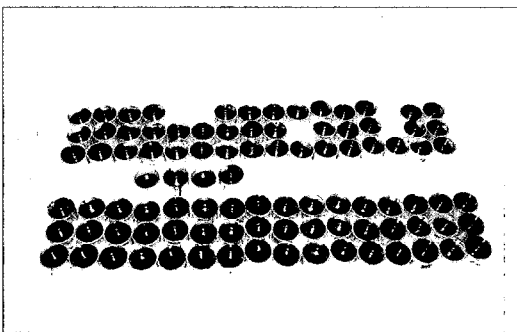


그림 5. Specimens in sample cans after recovery

가. 노화 전 (No aging: NA)

공시체를 제작하여 장·단기노화를 시키지 않고 혼합물의 역학적 특성을 측정 후 바인더를 추출하였다.

나. 단기노화(Short term oven aging: SA)

혼합물을 제조하여 흐트러진 상태로 강제 송풍되는 135°C 오븐에서 1시간마다 1회 교반 시키며 4시간 노화시켰다. 이후 마샬 다짐으로 공시체를 제작한 후 공극을 확인하고 25°C에서 24시간 양생 후 필요한 역학적 시험을 수행 후 바인더를 추출하였다.

다. 장기노화(Long term oven aging: LA)

실험실에서의 장기노화는 단기노화를 거친 혼합물을 다짐하여 공시체를 제작한 후에 강제 송풍되는 85°C 오븐 속에서 48시간 동안 노화시켰다. 현장 다짐이 이론최대밀도의 92% 정도되는 것을 모사하기 위하여 예비실험을 통해 양면 12회 다짐으로 공극 8%의 공시체를 제조하였다. 총 32가지 혼합물로 공시체를 제작하여 노화처리 하였으며, 이는 기존의 연구(Kliewer 등 1995)에서 제시한 방법을 현재의 실험실 실정에 맞게 수정한 것이다. 노화가 끝나면 공시체의 손상을 방지하기 위하여 오븐을 끄고 최소 12시간이 지난 후에 꺼내었다. 이때도 공시체를 팬에 담긴 채로 옮겼다. 이후 25°C에서 24시간 후 역학적 시험을친 후 바인더 추출을 하였다. 그림.3, 4는 혼합물에 대하여 각각 단기노화 교반과 장기노화 과정을 보여준다.

2.4 아스팔트 혼합물의 추출·회수(Recovery)

본 연구에서는 노화처리 되지 않은 혼합물과 단기노화, 장기노화 처리된 혼합물의 바인더를 KS F 2572에 의해 추출·회생하여 침입도, 동점도, 절대점도를 측정하였다. 추출·회수 과정은



표 5. Test result of physical properties

Mixtures	Aging level	PEN (0.1mm)		KVS 135℃(cp)		AVS 60℃(ps)		Remark
		Gneiss	Granite	Gneiss	Granite	Gneiss	Granite	
D300	NA	53	62	500	450	2,608	2,485	
	SA	34	55	625	550	3,072	4,186	
	LA	28	31	725	750	4,954	7,549	
D3L6	NA	54	85	500	400	2,950	1,675	
	SA	45	61	675	675	5,284	5,276	
	LA	30	33	1,000	800	7,775	10,056	
D3S3	NA	51	55	700	825	5,806	4,891	
	SA	41	46	925	1,000	8,270	7,336	
	LA	30	35	1,025	1,200	11,285	15,116	
D3R10	NA	41	46	550	400	4,789	2,303	
	SA	20	36	925	775	16,758	6,506	
	LA	16	21	1,125	925	27,937	18,349	
G300	NA	49	75	500	450	3,430	2,433	
	SA	41	55	575	550	4,305	3,934	
	LA	31	41	700	675	7,072	7,242	
G3L6	NA	71	81	525	500	2,851	2,469	
	SA	57	60	625	700	4,228	5,129	
	LA	23	41	725	825	3,708	8,281	
G3S3	NA	53	55	875	600	4,913	2,508	
	SA	45	37	1,000	900	7,241	9,875	
	LA	29	24	1,225	1,250	13,247	19,815	
G3R10	NA	39	67	575	450	4,925	2,424	
	SA	26	40	850	550	12,142	5,835	
	LA	19	32	800	625	11,521	8,320	
D500	NA	52	62	625	475	2,978	2,220	
	SA	51	47	750	575	4,856	4,057	
	LA	28	35	1,125	675	15,434	7,275	
D5L6	NA	67	83	425	650	1,675	2,915	
	SA	39	67	725	925	6,013	5,234	
	LA	22	42	875	1,250	10,578	11,283	
D5S3	NA	31	71	1,475	1,050	15,462	5,139	
	SA	28	41	1,875	1,100	30,877	11,252	
	LA	25	35	1,900	1,025	36,235	11,035	
D5R10	NA	39	74	800	450	11,508	2,311	
	SA	23	26	1,225	775	16,525	10,616	
	LA	17	17	1,226	1,100	16,526	10,987	
G500	NA	42	62	625	425	2,102	2,220	
	SA	39	47	725	575	4,096	4,057	
	LA	38	35	700	675	4,987	7,275	
G5L6	NA	50	71	675	650	6,004	2,769	
	SA	46	56	725	850	6,420	4,520	
	LA	35	45	875	975	11,359	6,862	
G5S3	NA	60	70	675	825	4,595	3,740	
	SA	39	54	1,225	1,100	8,414	4,130	
	LA	26	41	1,575	1,350	20,488	10,208	
G5R10	NA	39	43	625	625	4,611	5,533	
	SA	22	27	900	750	10,641	8,438	
	LA	17	26	925	925	14,393	9,763	



문헌 1, 3에 상세히 제시되어 있으며 그림. 5는 회수된 아스팔트를 샘플 캔에 넣어놓은 모습이다.

2.5 바인더의 물리적 특성 시험

노화된 혼합물로부터 추출·회수된 아스팔트 바인더를 KS M 2252에 의한 침입도(penetration) 시험, KS M 2247에 의한 절대점도(absolute viscosity)시험 및 SHRP 시험법에 의한 동점도(kinematic viscosity)시험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바인더 특성

단기노화 및 장기노화된 혼합물의 역학적 시험을 마친 공시체로부터 바인더를 추출·회수하여 바인더의 물성 시험을 수행하였으며 그 결과는 표 5와 같다.

3.2 요인별 분석

바인더의 절대점도에 영향을 미치는 인자들을 파악하기 위하여 SAS(statistical analysis system)의 GLM(general linear model) 절차를 이용한 통계분석한 결과를 표 6에 나타내었다. 이 결과에서 보면 절대점도(AVS)는 노화(aging), 골재, 입도 및 폴리머 요인에 의하여 $\alpha=0.05$ 유의차가 있었다. 따라서 절대점도는 아스팔트를 제외하고는 거의 모든 요인들에 의해 심각한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 노화와 폴리머의 교호작용에 의해서도 유의차가 있는 것으로 나타났다. 이는 노화에 따라 아스팔트의 점도가 크게 증가되는

것을 의미하며 이 증가는 또한 골재의 종류, 입도 및 폴리머의 차이에도 심각한 영향을 받는 것을 의미한다.

표 6. Result of analysis of variance for AVS

Source	DF	Type III SS	Mean square	F	Pr>F
Aging	2	805024183	402512091	69.91	<.0001*
Asphalt	1	4677164	4677164	0.81	0.3707
Agg.	1	67883374	67883374	11.79	0.0010*
Grade	1	26238721	26238721	4.56	0.0365*
Polymer	3	330684836	110228278	19.15	<.0001*
Aging*ap	2	912986	456493	0.08	0.9239
Agi*agg	2	5256558	2628279	0.46	0.6355
Agi*gra.	2	26964860	13482430	2.34	0.1041
Agi*poly	6	83093311	13848885	2.41	0.0366

* Significant at $\alpha=0.05$

표 7. sult of analysis of variance for KVS

Source	DF	Type III SS	Mean square	F	Pr>F
Aging	2	1974371.8	987185.9	72.8	<.0001*
Asphalt	1	286188.2	286188.2	21.1	<.0001*
Agg.	1	86186.5	86186.5	6.4	0.0140*
Grade	1	48770.1	48770.1	3.6	0.0621
Polymer	3	1568593.9	522864.6	38.5	<.0001*
Aging*ap	2	11400.6	5700.3	0.4	0.6587
Agi*agg	2	7878.0	3939.0	0.3	0.7490
Agi*gra.	2	54504.4	27252.2	2.0	0.1419
Agi*poly	6	113593.1	18932.2	1.4	0.2288

* Significant at $\alpha=0.05$

표 7은 동점도에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 통계분석 결과이다. 이 결과에서 보면 동점도(KVS)도 역시 노화에 따라 차이가 심각하게 나타남을 알 수 있었다. 아울러 아스팔트와 골재 그리고 폴리머도 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 나타났다. 입도에서는 유의차가 없었다. 그리고 모든 교호작용에서는 유의차가 나타나지 않았다. 이는 노화에 따라 아스팔트의 동점도가 크게 증가되는 것을 의미하며 이 증가는 또한 아스팔트의 종류, 골재의 종류 및 폴리머의 차이에도 심각한 영향을 받지만 입도에는 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

표 8은 침입도에 영향을 미치는 인자를 파악하



기 위한 통계분석 결과이다. 이 결과에서 보면 침입도도 역시 노화에 따라 차이가 심각하게 나타남을 알 수 있었다. 아울러 골재와 폴리머도 $\alpha = 0.05$ 수준에서 유의차가 나타났고 아스팔트와 골재 입도에서는 유의차가 없었다. 그리고 골재 및 폴리머와 노화와의 교호작용에서도 유의차가 나타났다. 이는 노화에 따라 아스팔트의 침입도가 크게 감소되는 것을 의미하며 이 변화는 또한 골재의 종류 및 폴리머의 차이에도 심각한 영향을 받는 것을 의미한다.

따라서 유의차를 보여준 각각의 요인들을 이용한 물성별 그림을 그림 6~11에서 보여 준다. 전반적으로 노화에 따라 절대점도 및 동점도는 크게 향상되며 침입도는 크게 낮아지는 양상을 보였다. 그러나 이것들의 차이는 앞의 통계분석 표에서 보았듯이 각종 요인인 아스팔트 종류, 골재의 종류 및 입도, 폴리머 유무 및 종류에 따라 크게 차이가 나타났다.

점도나 침입도 측정시의 아스팔트에는 폴리머의 입자들이 첨가되어 있어 점도 측정 시 유동성 및 침입도 측정 시 경도에 영향을 준다. 따라서 이러한 물성은 아스팔트가 노화되어 굳어지는 것보다도 굳어진 아스팔트에 섞여 있는 폴리머의 영향이 더 클 수도 있을 것이다. 또한 아스팔트가 노화되면서 오일성분 등의 휘발로 인해 폴리머의 첨가 농도가 최초보다 더 높아질 수도 있어 폴리머의 영향이 더 커진다고도 볼 수 있다.

한편 아스팔트가 산화(oxidization)에 의해 공용 중에 장기간에 걸쳐 노화되는 반면에 폴리머는 아스팔트 내에서 자체 특성이 거의 변화되지 않고 그대로 유지되어 아스팔트 내에서 본래의 역할을 수행하는 것으로 추정할 수 있다. 따라서 점도 및 침입도는 폴리머 유무는 물론 그 종류에 따라서도 노화단계에 따라 차이가 다양하게 나타난다.

표 8. Result of analysis of variance for PEN

Source	DF	Type III SS	Mean square	F	Pr>F
Aging	2	11966.2	5983.1	130.35	<.0001*
Asphalt	1	33.1	33.1	0.72	0.3985
Agg.	1	2668.9	2668.9	58.15	<.0001*
Grade	1	129.8	129.8	2.83	0.0969
Polymer	3	4558.5	1519.5	33.11	<.0001*
Aging*ap	2	143.7	71.8	1.56	0.2160
Agi*agg	2	397.4	198.6	4.33	0.0167*
Agi*gra.	2	36.4	18.2	0.40	0.6740
Agi*poly	6	681.4	113.5	2.47	0.0311*

* Significant at $\alpha = 0.05$

그림 6에서 보면 절대점도는 같은 노화단계에서 아스팔트의 종류보다는 폴리머의 종류에 따라 차이가 크다. PE는 무개질(NO)과 함께 상대적으로 SB나 RO에 비해 점도가 낮아 덜 노화된 것으로 판단된다. 그림. 7의 동점도는 아스팔트 별로도 차이가 났으며, 폴리머 중에서는 SB가 전반적으로 가장 높게 나타났다. KVS가 135°C에서의 성질인 점을 고려한다면 SB는 가장 작업성(workability)이 떨어지는 재료라 할 수 있을 것이다(그림. 7). 침입도는 노화 전(NA)이나 단기노화에서는 AP3와 AP5에 차이가 있으나 장기노화 후에는 그 차이가 거의 없다(그림 8). 또한 폴리머 종류별로 보면 PE는 노화 전이나 단기노화 시 오히려 무개질(NO) 보다도 침입도가 더 높았고 장기노화 후에도 무개질과 거의 같다. 반면 RO가 전반적으로 가장 낮아 상온에서 가장 딱딱한 재료임을 알 수 있다.

그림. 9~11의 골재의 종류에 따른 차이는 편마암이 AVS, KVS에서 모두 더 높고 PEN에서는 더 낮아 편마암이 화강암보다 노화가 더 일어나는 것으로 보여진다. 또한 같은 노화상태에서도 절대점도는 노화에 따라 송진이 편마암 혼합물에서 가장 노화에 따른 차이가 크게 증가되는 반면, 동점도에 경우는 SBS가 두 가지 골재 모두에서 가장 크게 증가되는 것으로 나타났다. 한편 침입도는 PE가 모든 골재에서 노화전이나 후에도 모두 가장 높게 나타나 노화가 덜 되는 것으로 나타났다.

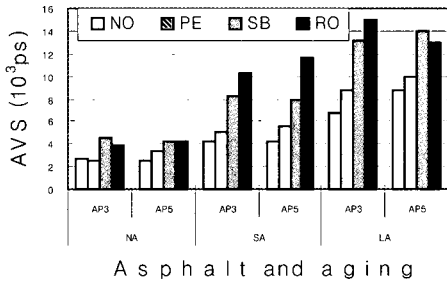


그림 6. Comparison of AVS by asphalt and aging.

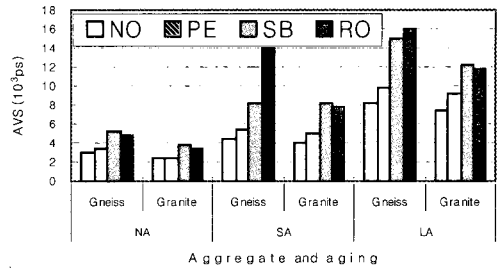


그림 9. Comparison of AVS by agg. and aging.

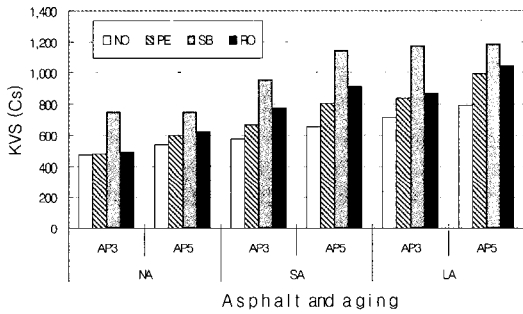


그림 7. Comparison of KVS by asphalt and aging.

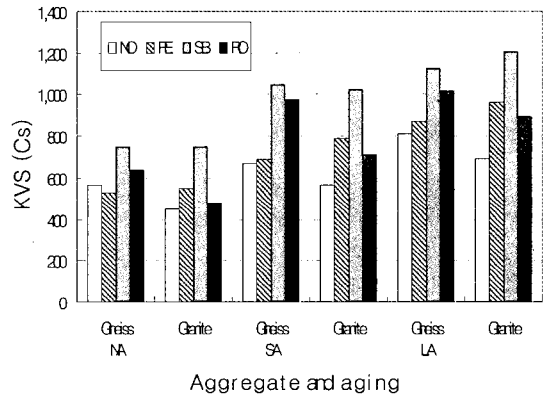


그림 10. Comparison of KVS by agg. and aging.

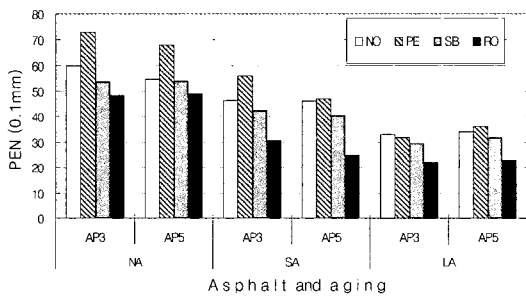


그림 8. Comparison of PEN by aging, asp. and polymer

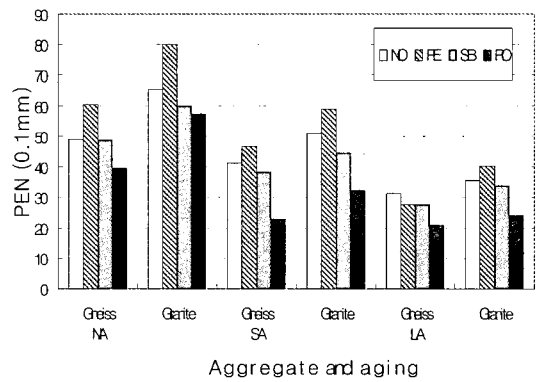


그림 11. Comparison of PEN by agg. and aging.



그림. 12~14의 골재의 입도에 따른 차이를 보면 밀입도가 AVS, KVS에서 모두 평균적으로 더 높게 나타나고 PEN에서는 더 낮아 밀입도가 갭 입도보다 노화에 따른 경화가 더 일어나는 것으로 보여진다. 일반적으로 갭입도가 공극이 높다면 더 빨리 산화된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 하지만 본 연구에 사용된 갭입도에는 섬유재를 첨가하여 혼합물의 공극을 밀입도와 같은 수준으로 유지하여 공극의 차이에 따른 영향은 배제되었다. 그럼에도 갭입도 혼합물이 덜 노화되는 현상에 대해서는 향후 보다 많은 연구를 통해 조사해 볼 필요가 있으며 섬유재가 어떤 영향을 미치는지도 조사해 볼 연구과제이다.

또한 같은 노화상태에서 절대점도의 변화를 보면 송진 첨가 밀입도 혼합물에서 노화에 따른 차이가 가장 크게 증가되는 반면 장기노화 후 갭입도 혼합물에서만 SB가 가장 크게 나타났다. 동점도 경우는 SB가 두가지 입도 모두에서 가장 크게 증가되는 것으로 나타났다. 한편 침입도는 PE가 모든 입도에서 노화전이나 후에도 모두 가장 높게 나타나 폴리머 중 가장 노화가 덜 되는 것으로 나타났다. 그러나 입도상의 차이는 노화전에는 밀입도, 노화 후에는 갭입도에서 더 크게 나타나 구분이 어려웠다.

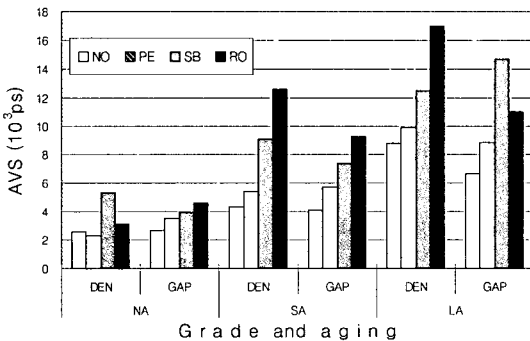


그림 12. Comparison of AVS by grade and aging.

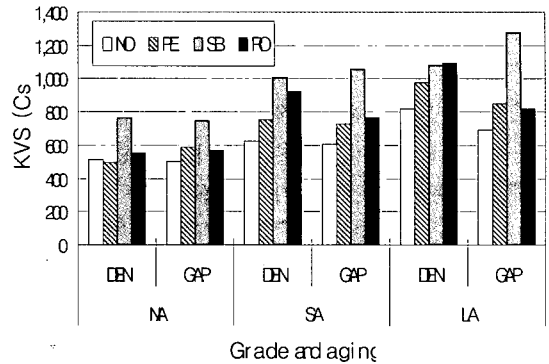


그림 13. Comparison of KVS by grade and aging

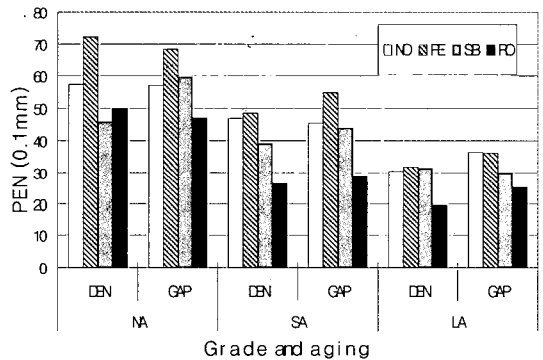


그림 14. Comparison of PEN by grade and aging

이미 예측했듯이 아스팔트는 AC60-70이 AC85-100에 비해 노화에 따라 점도가 더 높아지고 침입도는 낮아지는 현상이 대부분 나타났다. 하지만 골재 종류 및 입도 차이에도 혼합물 내에서 바인더가 노화에 따른 차이를 보인다는 것은 매우 흥미로운 일이다. 따라서 그림. 15, 16에서는 절대점도, 동점도 및 침입도에 있어서 골재간 및 입도 간의 차이를 보다 구체적으로 보여주고 있다.

특히 이를 폴리머 별 노화 단계에 따라 구분하

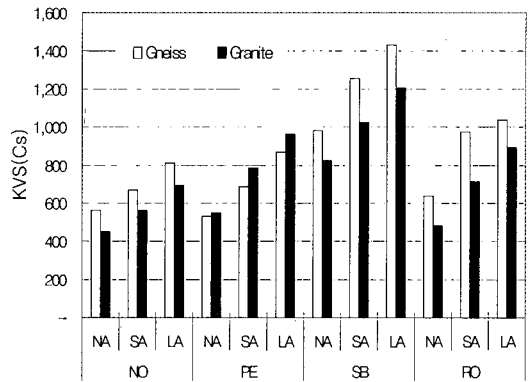


여 어떤 골재 및 입도가 어떤 폴리머와 교호작용을 하여 노화에 차이를 내는지를 잘 보여준다. 이는 골재의 표면상태, 아스팔트와의 친화력, 섬유재의 사용 등이 결합재의 노화에 영향을 미친다는 근거이며, 향후 이를 보다 다양하게 연구한다면 매우 흥미로운 소재가 될 것이다.

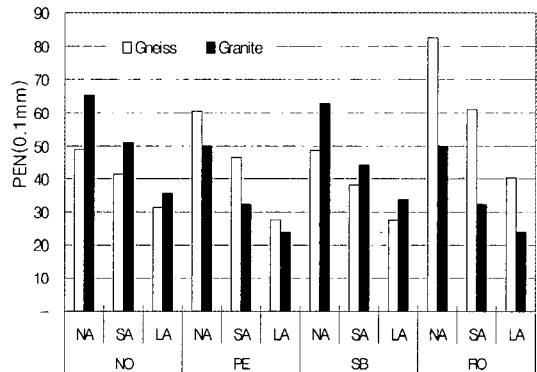
동점도를 보면 PE 개질 혼합물에서만 화강암이 절대점도 및 동점도가 높고 나머지 개질제에서나 원(original:무개질) 아스팔트 혼합물에서는 모두 편마암이 더 높았다. 반면 침입도는 PE와 RO에서는 편마암 혼합물이 높았고 나머지는 낮았다.

입도별로 보면 절대점도와 동점도에서는 밀입도가 노화가 될 수록 그 값이 더 커진 반면 침입도는 더 낮아지는 현상을 보여 밀입도에서 거의 모든 조건에서 바인더가 더 많이 노화됨을 알 수 있었다. 이는 앞서 분석한 것과 같은 현상으로 향후 보다 깊은 연구가 있어야 할 것이다.

이제까지 결과를 종합해보면 인공노화는 세 가지 물성에 심각한 차이를 일으킴을 알 수 있었다. 한편 골재의 종류가 노화시 세 가지 물성의 변화에 심각한 요인임을 알 수 있었고 골재 입도도 침입도를 제외하고는 모든 물성 변화에 심각한 요인임을 알 수 있었다. 그리고 polymer의 종류도 모두 심각한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

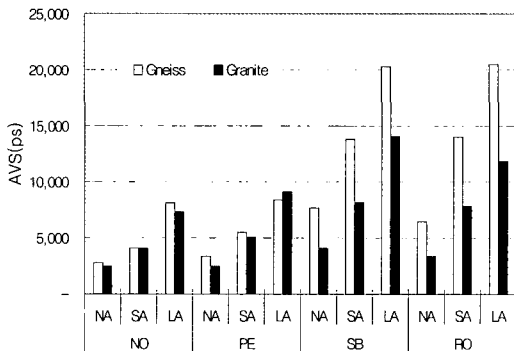


(b)

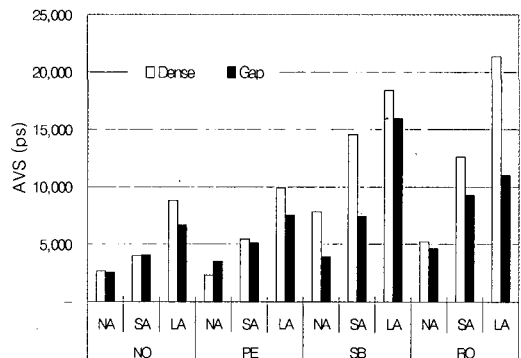


(c)

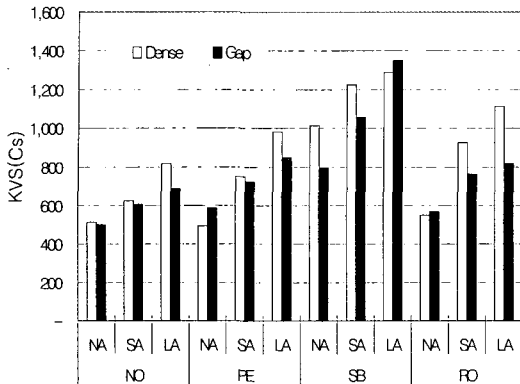
그림 15. Change of
(a) absolute viscosity,
(b) kinematic viscosity
(c) penetration by polymer and aging.



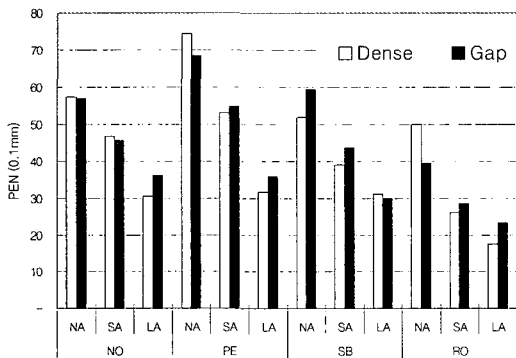
(a)



(a)



(b)



(c)

그림 16. Change of (a) absolute viscosity, (b) kinematic viscosity and (c) penetration by polymer and aging.

한편 노화와 각 요인들의 교호작용(interaction)을 보면 전반적으로 각 요소들이 노화에 따른 교호작용이 크지 않은 것으로 나타났다.

3.3 바인더와 혼합물 특성의 상관성

그림 17~19는 바인더의 노화에 따른 변화가 혼합물의 강도특성 중 회복탄성계수(MR), 간접인장강도(indirect tensile strength: ITS) 및 강성지수(stiffness index: SI) 변화와 어느 정도의 관

계가 있는지를 보기 위해 각각의 물성을 x축에, 그리고 강도특성을 y축으로 하여 그림을 그리고 추세선과 결정계수를 나타내었다. 그림에서 보면 절대절도와 침입도가 세 가지 역학적 특성 변화와 상대적으로 다소 높은 관계에 있으며, 동점도는 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 세 가지 강도 특성 중에서는 강성지수(SI) 값의 변화가 모든 물성들과 가장 관계가 크게 나타났고 다음이 인장강도였다. 하지만 인장강도(ITS)는 R2가 0.3 전후였고 SI도 R2값이 0.5를 넘지는 못해 현재의 데이터 상으로 보면 바인더를 가지고 표준용 아스팔트 콘크리트의 강도 특성을 추정하기는 어려운 것으로 보여진다.

즉 이는 바인더의 노화가 골재 종류, 입도, 개질제 등에 영향을 받는 상태에서 모든 바인더를 한 그룹의 데이터로 하여 혼합물의 강도 특성 변화를 추정하는데 어려움이 있음을 보여주는 한 예라 할 수 있겠다. 하지만 이를 상기에서 제시한 노화에 영향을 미치는 요인인 골재 별, 입도 별, 폴리머 별 등과 같이 구분하여 분석하면 보다 높은 상관성을 볼 수 있을 것이다. 그러나 이를 모두 다 분석하려면 너무 방대하여 본 연구의 범위에서는 제외하였다.

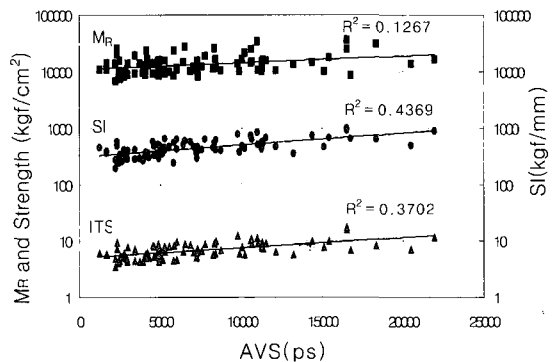


그림 17. MR and AVS relations

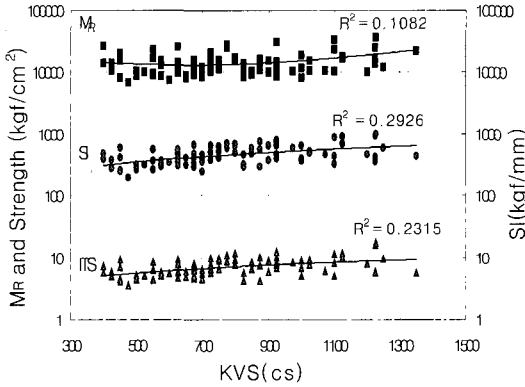
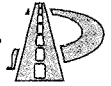


그림 18. MR and KVS relations

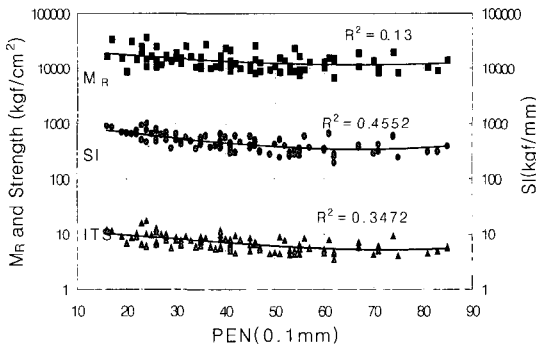


그림 19. MR and PEN relations

5. 결론

1) 바인더 시험에서는 골재의 종류가 노화 시 3가지 물성의 변화에 심각한 요인임을 알 수 있었고 골재 입도도 점도변화에 심각한 요인임을 알 수 있었으며, polymer 개질제도 종류별로 점도 및 침입도 변화에 심각한 차이를 보이는 것으로 나타나 노화의 차이에 영향을 미치는 요인이 다양함을 알 수 있었다.

2) 폴리머별로 보면 LDPE가 다른 두 폴리머에 비해 점도가 낮아 무개질(NO)과 비슷하고 침입도가 높아 덜 노화되는 것으로 나타났다. 반면 SBS와

Rosin은 노화단계가 높아지면서 상대적으로 더 많이 노화가 일어나는 것으로 나타났다.

3) 갭입도 혼합물에서의 바인더 노화 상태가 밀입도에서 비해 덜 진행된 것으로 나타났다. 특히 노화 이전상태는 유사하나 단기노화 및 장기노화로 가면서 그 차이가 더 커지는 특징을 보여 갭입도가 바인더를 덜 노화시키는 것으로 보인다.

4) 절대점도 및 침입도가 혼합물의 강도 특성 변화와 상대적으로 다소 높은 관계가 있으며 동점도는 다소 떨어졌다. 또한 세 가지 강도특성 중에서는 강성지수 값의 변화가 모든 물성들과 가장 관계가 크게 나타났고 다음이 인장강도였다. 그러나 R2값이 0.5를 넘지는 못해 모든 바인더를 가지고 표층 아스팔트 혼합물의 강도 특성을 추정하기는 어려운 것으로 보여진다. 즉 바인더의 노화가 골재 종류, 입도, 개질제 등에 영향을 받는 상태에서 바인더의 특성 변화만으로 혼합물의 강도 특성 변화를 추정하는데 어려움이 있음을 보여주는 증거라 할 수 있겠다.

참고 문헌

1. 김광우, 안경애, 김성운, 이상범, 이순제 (2001). "개질 결합재의 노화특성이 아스팔트 콘크리트의 강도특성에 미치는 연구" 석재연 논문집, 제6집, 강원대학교 석재복합신소재연구센터.
2. 김광우, 안경애, 도영수, 조희원, 정규동, 이상범 (1997). "내변형 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 개발" 석재연 보고서, 제2집, 강원대학교 석재복합신소재연구센터.
3. 김광우, 안경애, 정일권, 이성훈 (1999). "특정 개질 아스팔트의 기본 물성 및 공용성 등급 분석" 대한토목학회 학술 발표회 논문집, 제4집.
4. 김광우, 이명호, 안경애, 최영규 (1996). "개질 아스팔트 결합재의 특성연구" 석재연 보고서, 제2집, 강원대학교 석재복합신소재연구센터.
5. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순제 (2000). "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계규명" 석재연 논문집, 제5집, 강원대 석재 복합 신소재연구센터.
6. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애 (1996) "폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 특성연구" 석재연보고서, 제1집, 강



- 원대학교 석재복합신소재연구센터.
7. 김남호, 황성도, 박용철 (1997), "비용절감을 위한 도로재료 연구사업" 한국건설기술연구원.
8. "수퍼페이브 기술강좌" (2000). 강원대학교 석재복합 신소재 연구센터, 서울 산업대학교, 건설기술연구소.
9. "아스팔트 포장공학원론" (1999), 한국도로포장공학회.
10. "Bituminous Binders and Mixtures" (1998), Ed. by L. Francken, RILEM REPORT 17
11. Huang, S. C. and Ruth, B. E. (1995), "Evaluation of Aging Characteristics of Modified Asphalt Mixtures" Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance. ASTM STP 1265, Gerald A. Huber and Dale S. Decker, Eds., ASTM, Philadelphia.
12. Huang, S .C., Tia, M. and Ruth, B. E. (1996), "Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts" *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol 8, No. 3.
13. Kliewer, J.E., Bell, C.A., and Sosnovske, D.a. (1995), "Investigation of the Relationship Between Field and Laboratory Aging Properties of Asphalt Mixtures" Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance. ASTM STP 1265, Gerald A. Huber and Dale S. Decker, Eds., ASTM, Philadelphia.
14. Kim, K. W., Yeon, K. S., Choi, Y. K and Joh, H. W. (1997), "Tensile characteristics of Polymer- modified asphalt binders" Proceedings of II-EASPIC, Nihon University, Koriyam, Japan.
15. "The Shell Bitumen Handbook" (2000). David Whiteoak, Daegun-sa.

(접수 2002. 10. 22)