

# 노화에 따른 아스팔트 혼합물의 특성과 노화에 영향을 미치는 요인 분석

## Asphalt Mixture Properties by Aging and Analysis for Influential Factor

김광우\* · 김성운\*\* · 이상범\*\*\* · 이기호\*\*\*\* · 홍상기\*\*\*\*  
Kim, K. W. · Kim, S. U. · Li, X. F. · Lee, G. H. · Hong, S. K.

### 1. 서론

아스팔트 포장층은 결합재로 사용된 아스팔트(개질아스팔트 포함)의 노화로 취성이 증가하여 조기 균열 등 파손의 원인이 된다. 따라서 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물 제조시 골재의 종류, 입도 및 결합재로 사용된 아스팔트의 노화가 혼합물의 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하는 것이다. 본 연구에서는 일반아스팔트와 개질아스팔트(polymer-modified asphalt: PMA)를 사용하였고, 노화 정도에 따른 특성변화를 고찰하기 위하여 혼합물을 인공적으로 노화 처리하고 그에 따른 간접인장강도(Indirect Tensile Strength: ITS), 강성지수(Stiffness index: SI) 및 회복탄성계수(Resilient modulus:  $M_R$ ) 변화를 측정하여 이를 노화 전 상태의 값과 비교 분석하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

#### 2.1 재료

본 연구에서는 S사의 침입도 등급 AC 80-100(AP-3), AC 60-80(AP-5)인 아스팔트 2종류와, 개질재 3종류(SBS, LDPE, 공업용 Rosin)로 개질한 아스팔트를 사용하였다. 골재는 화강암과 편마암을 사용하여 밀입도와 갭입도로 혼합물을 제작하였다. 또한 갭입도 혼합물의 침강현상을 방지하기 위한 충전용 섬유재로 Waste paper(2×2mm)를 바인더 중량의 3% 함량으로 사용하였다.

#### 2.2 실험방법

##### 2.2.1 배합설계

바인더, 개질재, 골재, 입도별로 총 32종류의 혼합물에 대하여 마샬방법으로 배합설계를 수행하였다. 최적 아스팔트함량은 양면 50회 다짐으로 제작된 공시체의 물성과 마샬특성치를 이용하여 건설교통부 배합설계 규정에 근거하여 결정하였다. 최적 아스팔트함량으로 각각의 공시체를 제작하고 강도 특성을 확인하였다.

##### 2.2.2 아스팔트 혼합물의 인공노화

아스팔트 혼합물내의 바인더는 제조와 포설, 다짐, 공용중에 노화가 진행된다. 본 연구는 아스팔트 혼합물의 현장 단기노화와 장기노화를 모사하기 위해 SHRP(Strategic highway research program)에서 제시된 방법을 응용하였다.

현장 포설시 공극 8%를 모사하기 위해, 예비시험에서 결정된 12회 다짐으로 장기노화 혼합물 공시체를 제작하였다. 또한 현장에서의 노화 상태를 실험실에서 모사하기 위해서 다음과 같은 방법을 이용하여 노화시킨 후 25°C에서 24시간 보관한 뒤  $M_R$ 과 ITS 시험을 수행하였다.

\*정회원 · 강원대학교 농업공학부 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)

\*\*정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 · 공학석사 · 033-250-6460 (E-mail: sungun2001@hanmail.net)

\*\*\*정회원 · SK(주) · 공학박사 · 033-250-7284 (E-mail: lx1106@mail.kangwon.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284



### 가. No aging (NA)

공시체를 제작하여 노화를 시키지 않고, 물성 측량 후 양생시켰다.

### 나. 단기노화 (STA)

혼합물을 제조하여 호트러진 상태로 강제 송풍되는 135℃ 오븐에서 1시간마다 1회 교반시키며 4시간동안 노화시켰다. 이후 마샬 다짐으로 공시체를 제작하여 실험에 사용하였다.

### 다. 장기노화 (LTA)

실험실에서의 장기노화는 현장에서 5년 정도의 공용을 거친 후의 노화 상태를 모사하기 위한 것이다. 단기노화를 거친 혼합물을 다짐하여 공시체를 제작한 후에 강제 송풍되는 85℃ 오븐 속에서 48시간 동안 노화시켰다. 노화가 끝나면 공시체의 손상을 방지하기 위해 오븐을 끄고, 최소 12시간 기다린 후에 꺼내어 물성 측량을 수행하였다.

## 2.2.3 회복탄성계수 실험

본 연구에서는 만능 재료시험기를 사용하여 ASTM D 4123 규정에 의해 실험을 수행하였다. 각각의 혼합물에 대해 배합설계를 통해 결정된 최적 아스팔트 함량으로 시료별, 노화단계별로 공시체를 3개씩 제작하고, 공시체 내의 골재맞물림(Interlocking)의 영향을 최소화하기 위해서 직각으로 두 번씩 측정하여 평균값을 구하였다.

## 2.2.4 간접인장강도 시험

간접인장강도는 회복탄성계수 실험이 끝난 공시체를 25℃의 항온·항습기에 24시간 놓아두었다가 50.8mm/min의 하중재하속도로 측정하였다. 혼합물의 강성지수는 파괴시의 하중과 변형량의 비로 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

회복탄성계수는 상기 3단계의 노화정도에 따라 3개의 공시체를 직각으로 두 번씩 측정하여 평균값을 구하였다. 또한 회복탄성계수 실험시 측정된 Poisson's ratio를 이용하여  $M_R$  값을 계산하고자 하였으나, 실험에 따른 오차와 혼합물의 종류에 따라 각각 다른 특성으로 인하여 그 값이 0.04~0.81까지로 변화가 심하고 일관성을 찾기 어려워 일반적으로 25℃에서 추천되는 Poisson's ratio 0.35를 이용하여 계산한  $M_R$  값을 분석에 이용했다.

$M_R$  값에 영향을 미치는 인자들을 파악하기 위해서 SAS(Statistical analysis system)의 GLM(General linear model)을 이용하여 통계분석을 시험한 결과는 Table 1과 같다. Table 1의 결과를 보면  $M_R$ 은 Aging과 Polymer 두 가지에 의해서만 유의차가 있고, 나머지 모든 변수와 교호작용(Interaction)에서는 유의차가 없었다. Fig. 1~7에서는 유의차를 보여준 두 가지 요인들을 이용한  $M_R$ 값의 차이를 보여준다. 그림에서 골재(Aggregate) 종류에 A는 편마암, B는 화강암이고, 입도(Grade) 종류에 D는 밀입도, G는 갭입도를 나타낸다.

Fig. 1~3에서 보면 노화단계가 단기에서 장기로 가면서 전반적으로  $M_R$ 값이 커지는 것을 알 수 있었고, 같은 노화단계에서는 AP3보다는 AP5가, 갭입도 보다는 밀입도의  $M_R$ 값이 컸다. 한편 노화전이나 단기노화 단계에서는 편마암보다 화강암의  $M_R$ 값이 컸으나, 장기노화 후에는 반전되었다.

Fig. 4~7에서 나타낸 것처럼 폴리머 별로 보면 Rosin의  $M_R$ 값이 가장 컸고, 나머지는 무개질과 비교하여 볼 때 큰 차이가 없었다. 같은 폴리머 내에서 볼 때 Rosin을 제외하고는 편마암보다 화강암의  $M_R$ 값이 컸고, SBS를 제외하고는 밀입도가 갭입도의  $M_R$ 값이 컸다. 노화단계에 따른 폴리머간  $M_R$ 값의 차이를 보면, 무개질이 노화단계간의 차이가 가장 적게 나타났고, LDPE와 Rosin은 단기·장기노화에서의  $M_R$ 값 차이가 SBS에 비해 상대적으로 크게 나타났다.



Table 1. Result of analysis of variance for  $M_R$

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr>F
Aging	2	313733248.89	156866624.44	6.40	0.0027 *
Asphalt	1	26036458.59	26036458.59	1.06	0.3060
Aggregate	1	2839720.01	2839720.01	0.12	0.7345
Grade	1	66641669.01	66641669.34	2.72	0.1033
Polymer	3	892397746.03	297465915.34	12.14	0.0001 *
Asphalt*aging	2	6190530.06	3095265.03	0.13	0.8815
Aggregate*aging	2	20150970.27	10075485.13	0.41	0.6644
Grade*aging	2	34164270.89	17082135.44	0.70	0.5013
Polymer*aging	6	76240005.68	12706667.61	0.52	0.7926

\* significant at  $\alpha = 0.01$

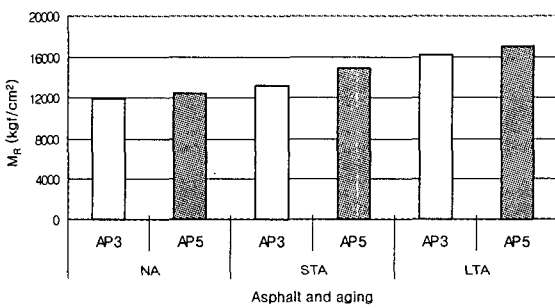


Fig. 1  $M_R$  by asphalt and aging

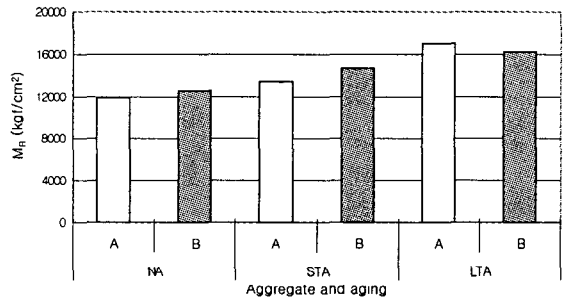


Fig. 2  $M_R$  by aggregate and aging

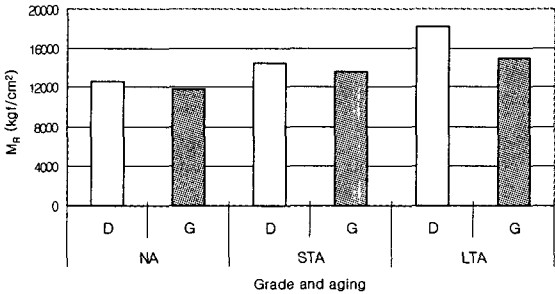


Fig. 3  $M_R$  by grade and aging

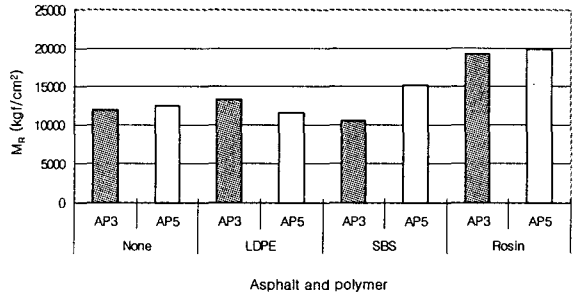


Fig. 4  $M_R$  by asphalt and polymer

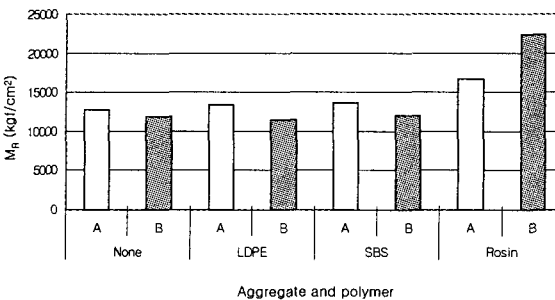


Fig. 5  $M_R$  by aggregate and polymer

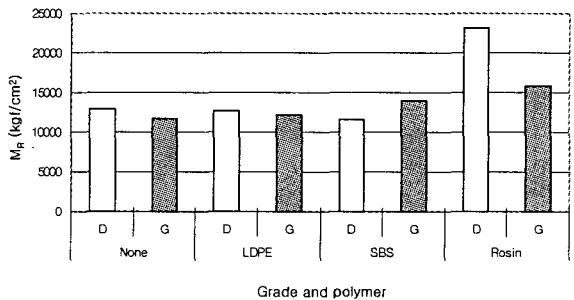


Fig. 6  $M_R$  by grade and polymer

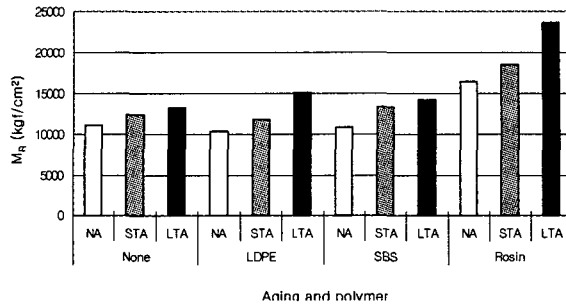


Fig. 7 M<sub>R</sub> by aging and polymer

회복탄성계수실험이 끝난 공시체를 25°C에서 24시간 양생시킨 후 간접인장강도시험을 수행하였다.

SI 및 ITS 값에 영향을 미치는 인자들을 파악하기 위해서 SAS의 GLM을 이용하여 통계 분석한 결과는 Table 2, 3과 같다.

이 결과에서 보면 SI는 Aging, Asphalt, Aggregate, Grade, Polymer의 모든 요인에 의해  $\alpha = 0.05$  수준에서 유의차가 있고, 입도\*노화 (Grade\*aging) 교호작용에 의해서도 유의차가 있었다. ITS 값에 영향을 미치는 인자들을 분석한 결과는 Aging, Asphalt, Grade 및 Polymer 요인에 의해  $\alpha = 0.05$  수준에서 유의차가 있었고, 골재와 입도\*노화 교호작용에 의해서도  $\alpha = 0.01$  수준에서 유의차가 있었다. SI와 ITS는 모든 요인들에 의해서 심각한 차이를 보여주고 있으므로 별도의 그림으로 보여주지는 않았다.

Table 2. Result of analysis of variance for SI

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr>F
Aging	2	738109.94	369054.97	79.60	<.0001 *
Asphalt	1	197835.04	197835.042	42.70	<.0001 *
Aggregate	1	48600.00	48600.00	10.50	0.0018 *
Grade	1	156332.04	156332.04	33.70	<.0001 *
Polymer	3	1034726.71	344908.90	74.36	<.0001 *
Asphalt*aging	2	3302.15	1651.07	0.39	0.7016
Aggregate*aging	2	22030.19	11015.09	2.38	0.0999
Grade*aging	2	40215.40	20107.70	4.34	0.0165
Polymer*aging	6	58856.98	9809.50	2.12	0.0612

\* significant at  $\alpha = 0.01$

Table 3. Result of analysis of variance for ITS

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr>F
Aging	2	105.40	52.70	32.40	<.0001 *
Asphalt	1	62.57	62.6	38.50	<.0001 *
Aggregate	1	5.46	5.46	3.36	0.0708
Grade	1	67.50	67.50	41.50	<.0001 *
Polymer	3	198.08	66.03	40.60	<.0001 *
Asphalt*aging	2	2.11	1.05	0.65	0.5261
Aggregate*aging	2	2.02	1.01	0.62	0.5392
Grade*aging	2	7.85	3.93	2.41	0.0964
Polymer*aging	6	7.02	1.17	0.72	0.6351

\* significant at  $\alpha = 0.01$



상기 3가지 특성들은 혼합물의 강도 및 탄성적 성질을 나타낸다. 따라서 이들이 같은 조건하에서 어떻게 변화해 가는지를 비교하기 위해 Fig. 8~16에서 노화상태에 따라 각각의 아스팔트, 골재, 입도, 폴리머별로  $M_R$ , SI 및 ITS를 나타내었다.

Fig. 8은 노화단계별로 아스팔트 및 개질재가  $M_R$ 에 미치는 영향을 분석한 그림이다. 전반적으로  $M_R$ 값은 노화단계별로 다소 증가되는 것으로 나타났으나, 주로 Rosin(R)의 증가가 두드러졌고, AP5가 AP3보다 크게 나타났다.

Fig. 9의 강성지수는 노화에 따라 점진적으로 그 값이 커졌는데 아스팔트별로는 AP5가 AP3보다 컸고, 폴리머별로는 RO, PE, SB 순이었다. 또한 강성지수는 같은 노화상태에서 AP5가 AP3보다 전반적으로 크게 나타남을 보여준다.

Fig. 10의 간접인장강도는 강성지수와 유사한 변화 패턴을 보였다. 폴리머별로 볼 때 노화 전에는 RO, SB, PE 순이었으나 단기노화부터는 PE와 SB가 바뀌어 SBS의 간접인장강도가 노화 후 덜 증진됨을 알 수 있었다.

Fig. 11의  $M_R$  값은 노화단계별로 다소 증가하나 화강암(B)의 경우는 Rosin만이 크게 변화하고 나머지 개질재는 별 차이가 없었다. 또한 골재별로 보면 Rosin을 제외하고는 편마암이 크게 나타났다. 강성지수(Fig. 12)는 노화단계별로 증가되면서 골재별로는 편마암이 화강암보다 높다는 것을 알 수 있었다. 그리고 폴리머별로는 모두 RO, PE, SB 순으로 나타나 Fig. 8의 결과와 매우 유사하였다.

간접인장강도(Fig. 13)의 변화 또한 노화단계별로 점차 증가하였고, 골재별로는 같은 노화 상태 내에서 편마암이 다소 높으며 이는 RO값이 상대적으로 큰 것에 기인하는 것으로 보인다. 한편 폴리머별로는 노화 전에 RO, SB, PE 순이던 것이, 노화 후 PE와 SB가 바뀌어 Fig. 10과 유사하였다. 결과적으로 두 골재 모두에서 Rosin을 제외하고는 간접인장강도에서 유사했으나,  $M_R$ 과 강성지수에서는 편마암이 다소 큰 것을 알 수 있었다.

Fig. 14는 노화단계별로 입도, 개질재별  $M_R$  값의 변화를 보여준다. 입도 차이에 따라서는 마찬가지로 RO를 제외하고  $M_R$ 값의 차이가 거의 없어 보이나, RO에 있어서는 밀입도가 월등히 높았다. 반면에 SB의 경우는 노화 전이나 노화 후 갭입도에서 더 큰  $M_R$ 값을 보여 대조적이었다.

Fig. 15의 강성지수는 노화단계 내에서, 밀입도가 갭입도보다 컸다. RO는 물론 그 외 개질재에서도 마찬가지로, 노화 전 보다는 노화 후가 더 컸다. 그리고 폴리머별로는 RO, PE, SB 순이 거의 그대로 유지되었다.

Fig. 16은 밀입도의 ITS가 갭입도보다 훨씬 높은 것을 보여준다. 이는 모든 폴리머에서 동일하였으며 폴리머 순서도 Fig. 15와 매우 유사했다. 따라서 밀입도 혼합물이 노화 상태에 상관없이 강성지수와 간접인장강도에서 갭입도 보다 크기는 하나,  $M_R$ 에서는 Rosin 첨가 혼합물을 제외하고는 그 차이가 별로 나타나지 않음을 알 수 있었다.

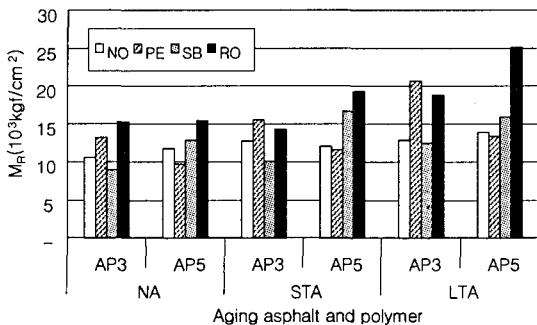


Fig. 8 Comparison of  $M_R$  by aging, asphalt and polymer

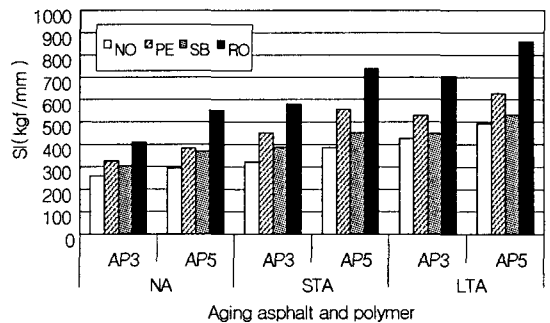


Fig. 9 Comparison of SI by aging, asphalt and polymer

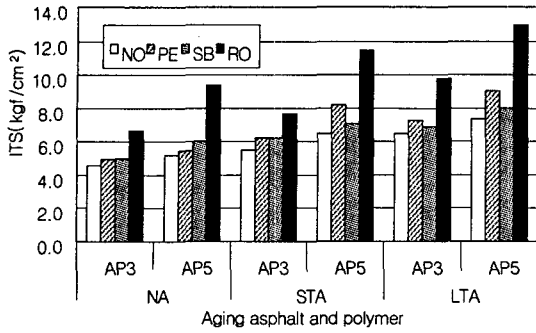


Fig. 10 Comparison of ITS by aging, asphalt and polymer

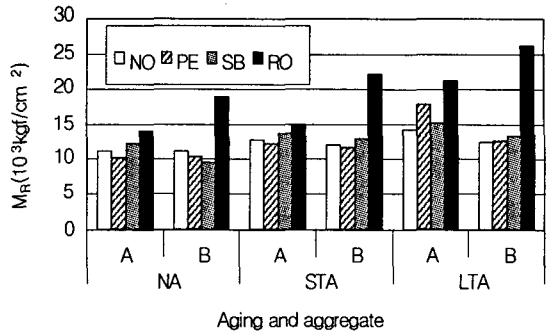


Fig. 11 Comparison of M<sub>R</sub> by aging, aggregate and polymer

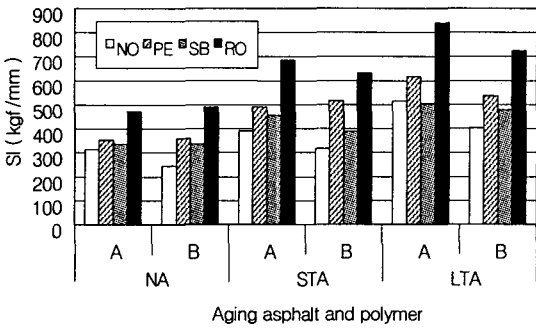


Fig. 12 Comparison of SI by aging, aggregate and polymer

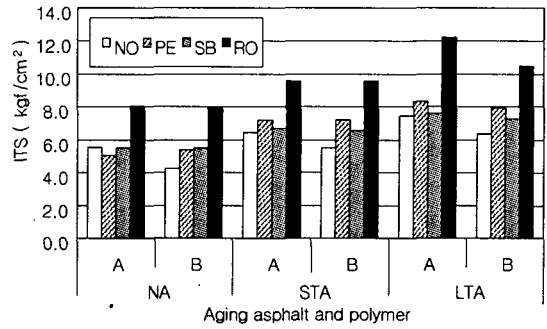


Fig. 13 Comparison of ITS by aging, aggregate and polymer

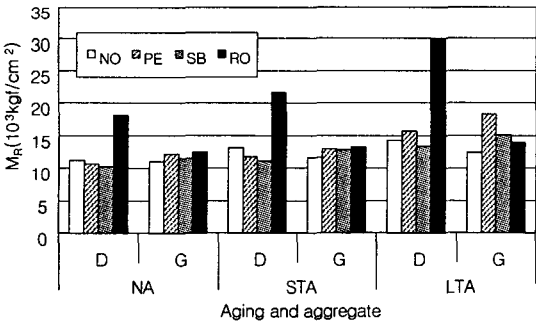


Fig. 14 Comparison of M<sub>R</sub> by aging, grade and polymer

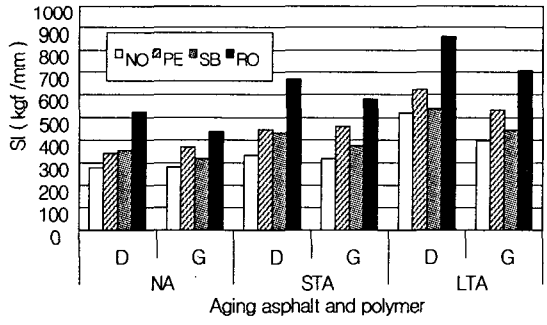


Fig. 15 Comparison of SI by aging, grade and polymer

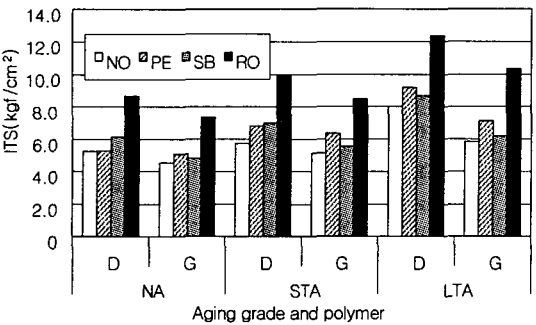


Fig. 16 Comparison of ITS by aging, grade and polymer



Fig. 17, 18은 세 가지 강도특성들간의 상관성을 보기 위한 것이다. 이 그림에서 회복탄성계수와 강성지수, 간접인장강도의 상관성을 보면 결정계수  $R^2 < 0.4$ 로 나타나 비교적 상관성이 적은 것으로 보였다. 회복탄성계수와 간접인장강도는 비록 같은 온도에서 같은 모드의 하중 재하 기법에 의한 것이기는 하나, 회복탄성계수의 크기나 이때 측정된 강성지수의 크기가  $M_R$ 과 상관성이 높지는 않다는 것을 나타낸다.

하지만 SI와 ITS는  $R^2 > 0.87$ 이어서 상관성이 매우 큰 것으로 나타났다. 이처럼 SI가 큰 혼합물은 ITS도 큰 것으로 나타났다.

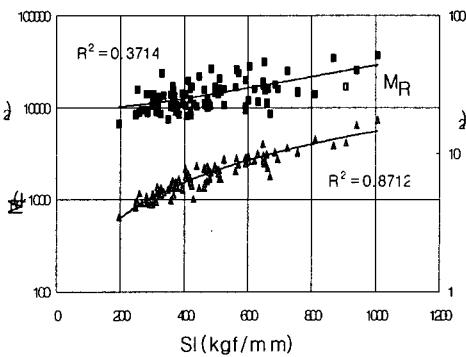


Fig. 17  $M_R$  and SI relations

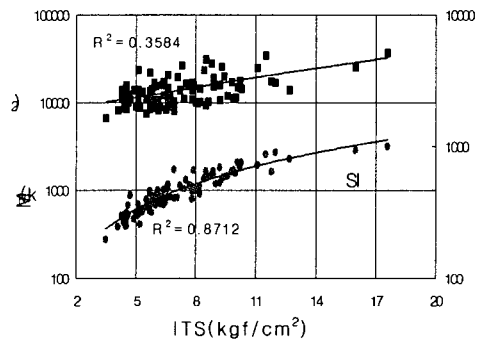


Fig. 18  $M_R$  and ITS relations

#### 4. 결론

- (1) 혼합물의 역학적 특성인 회복탄성계수( $M_R$ ), 강성지수 및 간접인장강도는 노화 상태가 심화됨에 따라 크게 증가되는 모습을 보였다. 그리고 각각의 변화 패턴도 고려 대상별로 유사한 패턴을 보여주었다.
- (2) 아스팔트의 경우는 AP5혼합물이 AP3혼합물보다 모두 더 큰 값을 보였는데, 이 차이는  $M_R$ 에서보다 강성지수와 간접인장강도에서 더 크게 나타났다. 골재별로 보면  $M_R$ 에서는 화강암이 크게, 강성지수와 간접인장강도에서는 편마암이 크게 나타나 상반된 결과를 보였다. 하지만 입도의 경우에는 밀입도가 겹입도보다 모든 강도 특성에서 크게 나타났다.
- (3) 한편 폴리머간의 비교를 보면 Rosin이 모든 특성에서 가장 크게 나타났다. 이 모든 특성들은 25°C에서 측정된 것이므로 Rosin은 상온에서 가장 개질 효과가 큰 것으로 나타났다. 하지만 Rosin은 노화로 인한 강도가 급격히 증진되어 취성이 커질 우려가 있어 보인다. 그리고  $M_R$ 에서는 나머지 개질재간의 차이가 거의 없었고, 강성지수와 간접인장강도에 있어서는 LDPE가 SBS보다 다소 높은 값을 보였다.
- (4) 회복탄성계수와 강성지수나 간접인장강도와의 상관성을 보면 결정계수  $R^2 < 0.4$ 로 나타나 상호간에 비교적 상관성이 적은 것으로 나타났다. 하지만 SI와 ITS는  $R^2 > 0.87$ 이어서 상관성이 매우 높게 나타났다.



## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 지원에 의해 이루어진 연구입니다.

## 참고문헌

1. 김광우, 안경애, 정일권, 도영수 “개질 아스팔트의 노화 특성 분석” 석재연 논문집, Vol. 4, 1999.
2. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순재 “아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계 구명” 석재연 논문집, Vol. 5, 2000.
3. 김광우, 안경애, 정일권, 이성훈 “특정 개질 아스팔트의 기본 물성 및 공용성 등급 분석” 대한 토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 4, 1999. 10.
4. Huang, S.C. and Ruth, B.E., “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, 1995.
5. Kiewer, J.E., Bell, C.A., and Sosnovske, D.a., “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, 1995.