

# 아스팔트 혼합물의 마샬 특성과 소성변형 관련성 평가

## Evaluation of Rut Resistance Based on Marshall Properties of Asphalt Mixture

이상범\* · 이문섭\*\* · 이기호\*\* · 김광우\*\*\*

Li, Xiang Fan · Lee, Moon Sup · Lee, Gi Ho · Kim, Kwang Woo

### 1. 서 론

1997년 국도 아스팔트 포장에 대한 현장조사자료를 근거로 분석한 파손형태별 분포를 살펴보면 균열 등의 파손은 전체 도로의 약 50%인 반면에 소성변형은 대략 74% 정도로 소성변형이 가장 심각한 상태에 있음을 알 수 있다.

이러한 소성변형을 제어하기 위해 일본의 경우 반복주행시험, 미국과 유럽에서는 정적, 동적 크리프 시험을 통하여 소성변형을 최소화하기 위한 연구를 수행하고 있다. 최근 국내에서는 소성변형 제어를 위하여 미국의 Superpave 배합설계에 관심을 보이고 있다. 하지만 이러한 시험방법은 시험장비가 고가이고 실험시간이 비교적 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 현재 국내 실정을 살펴보면 이러한 시험은 극히 일부 대학 및 연구기관에서 연구용으로만 수행되고 있다.

현재 국내에서 아스팔트 혼합물 배합설계방법으로 마샬시험법을 사용하고 있다. 이 배합설계 방법은 시험장치가 간단하고 경제적이지만 경험적인 시험방법이므로 혼합물의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서 공사 담당기관의 시방기준을 통과하는 배합으로 제조한 혼합물에서도 소성변형이 많이 발생하고 있다.

이러한 국내 실정을 감안하여 본 연구에서는 짧은 시간에 쉽고 빠르게 구할 수 있는 혼합물의 마샬 특성을 이용하여 혼합물의 소성변형과의 상관성을 평가하는 데 그 목적이 있다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 사용재료

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 우리나라에서 널리 사용되고 있는 AC 85~100,

\* 정희원 · 강원대학교 석재복합신소재센터 박사후연구원 · 033-250-7284 (E-mail: lxf1106@mail.kangwon.ac.kr)

\*\* 정희원 · 강원대학교 대학원 석사과정 · 033-250-7284

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



AC 60~70(AP3, AP5) 아스팔트이다. 골재는 전국적으로 분포가 많은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 앞에서 기술한 것처럼 골재는 소성변형에 영향을 미치는 주요인자이므로 본 연구에서는 골재의 종류, 입도를 변화시켜 굵은골재 최대치수를 밀입도는 19mm, 갭입도 혼합물은 13mm로 사용하였다. 밀입도 혼합물의 입도는 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도를 선정하였으며, 갭입도는 본 강원대학교 연구실에서 개발한 입도를 사용하였으며, 골재들의 입도분포 곡선은 Fig. 1에 나타내었다. 또한 골재들은 KS 규정에 따라 품질시험을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 폴리머는 수년간의 연구(김광우 등 1997)로부터 국내에서 생산된 여러 종류의 폴리머 가운데 아스팔트 개질제로서 그 성능의 효과가 비교적 우수하고 좋은 것으로 판명되고 외국에서도 많이 사용되는 LDPE(Low-density polyethylene)와 SBS(Styrene-butadiene-styrene) 두 가지를 사용하였다. LDPE는 국내에서 생산되는 No. 50 체에 거의 다 통과하는 비교적 고운 분말(통과량 99.5%)이고, SBS 역시 국내산으로 No. 8 체를 거의 다 통과하고(약 99.5%) No. 50 체에 거의 다 남는(통과량 약 1%) 가루형태의 분말형태로 Fig. 2에 확대한 모습을 보여주고 있다.

갭입도 아스팔트 혼합물은 고온에서 아스팔트의 침강현상이 발생하는 것을 제어하기 위하여 기존 연구결과에 따라 섬유재로 폐신문지를 2×2mm로 잘게 절단하여 아스팔트 양의 3%를 첨가하여 혼합물을 제조하였다.

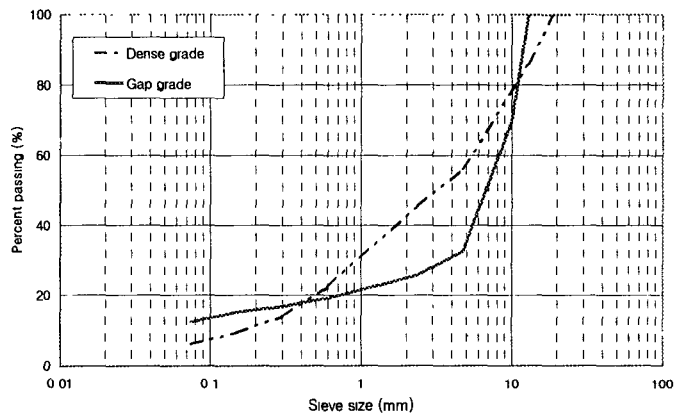
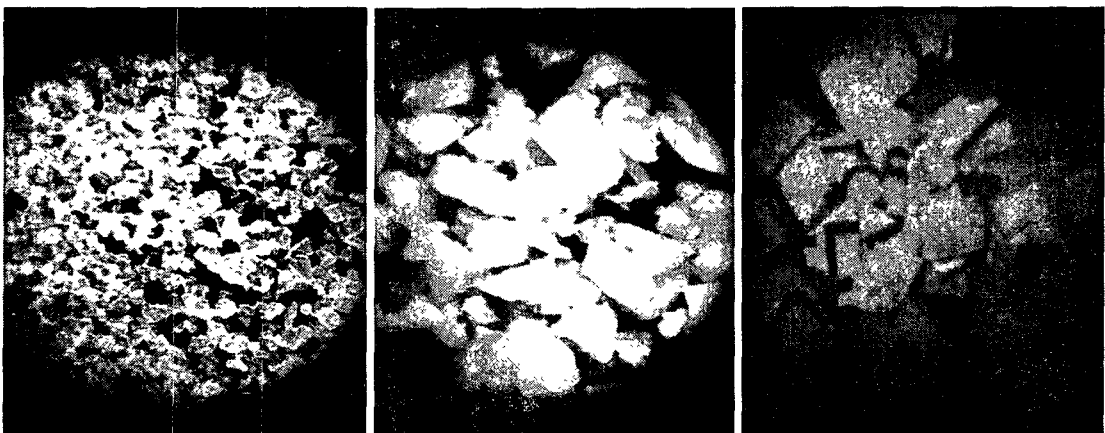


Fig. 1. Gradation curves of aggregates



(a) LDPE (×20)

(b) SBS (×20)

(c) waste papers (×10)

Fig. 2. Photograph showing LDPE, SBS, waste papers as fiber for gap-grade mixture



## 2.2 배합설계

### 2.2.1 폴리머 개질 아스팔트의 제조

본 연구에서는 두 폴리머 재료 (LDPE, SBS)를 아스팔트 양의 중량비로 각각 LDPE는 4%, 6%, SBS는 3%, 5% 비율로 AP3 아스팔트에 혼합하여 개질 아스팔트를 제조하였다. 아스팔트 바인더 특성시험은 침입도 시험은 KS M 2201, 절대점도시험은 ASTM D 2171에 따라 수행하였다.

혼합 방법은 아스팔트를 용기에 담아 먼저 오븐 속에 넣어 180~190℃로 충분히 가열한 후 꺼내어 일정량의 폴리머를 아스팔트에 서서히 넣고 같은 온도를 유지하면서 믹서로 혼합하였다. 이때 믹서는 고성능 전단을 일으키는 Homogenizer로서 혼합 속도는 약 6,000rpm으로 가능한 한 일정한 속도를 유지하도록 조절하였으며 한번에 2리터 정도씩 제조하였다. 혼합 시에는 여타 첨가제를 넣지 않았으며, 아스팔트 내의 폴리머가 완전히 혼합되도록 충분한 시간동안 혼합시켰다. 제조된 개질 아스팔트는 다음과 같이 명명하였다.

Table 1. Binder designation

Designation	AP3N0	AP5N0	AP3L4	AP3L6	AP3S3	AP3S5
Combination	AP3 without polymer	AP5 without polymer	AP3 plus LDPE 4%	AP3 plus LDPE 6%	AP3 plus SBS 3%	AP plus SBS 5%

### 2.2.2 배합설계

본 연구의 배합설계는 그 중 국내에서 사용되는 Marshall 방법을 사용하였다. 아스팔트 콘크리트의 배합설계는 아스팔트 함량별로 제조된 공시체에 물성 실험과 마찰안정도 시험을 통하여 최적 아스팔트함량으로서 수행된다. 본 연구에서는 아스팔트 함량을 변화시켜 가면서 각 함량당 3개씩의 공시체를 제조하여 물성 실험과 마찰안정도 시험을 수행하였다. 이것을 아스팔트 함량에 따른 물성별 곡선으로 표시한 후에 밀입도 19mm 규정을 적용하였다.

본 연구에서는 아스팔트 AP3, AP5 두 종류, 골재 편마암, 화강암 두 종류, 폴리머 LDPE, SBS 두 종류를 두 가지 첨가함량으로 결정하고 배합설계를 수행하여 Table 2와 같이 명명하였다.

Table 2. Mixture designation

	A	D	3	L	4	
A: Gneiss	x	x	x	x	x	
B: Granite						
D: Dense grade						Polymer content (0, 3, 4, 5, 6%)
G: Gap grade						
3: AP3						Polymer type (N, L, S)
5: AP5						
N: without polymer						AP type (3, 5)
L: LDPE						
S: SBS						Aggregate grade (D, G)
						Aggregate type (A, B)



공시체는 KSF 2337과 ASTM D 1559의 마살식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 먼저 준비된 골재를 오븐에 넣어 175℃로 최소 5시간 이상 충분히 가열하였다. 그리고 약 180±5℃의 온도에서 60~80분간 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 혼합하여 몰드에 넣고 다짐온도(일반 아스팔트 혼합물 : 135 ~145℃, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물 : 145 ~155℃)를 유지하면서 마살다짐기를 이용하여 공시체의 양면을 각각 50회씩 다짐하였다.

### 2.3 역학시험

#### 2.3.1 마살안정도 시험

다짐 몰드에서 약 4시간 식힌 후 탈형한 공시체를 상온에서 20시간 보관 후 60℃의 수조에 30분 동안 수침시킨 후 수조에서 꺼내어 표면의 물기를 마른 수건으로 제거한 후 하중재하 속도는 50mm/min으로 시험을 실시하였다. 최대하중과 흐름값을 이용하여 안정도-흐름 지수를 구하여 소성 변형과의 상관성을 추정하기 위한 자료로 사용하였다.

#### 2.3.2 간접인장강도 시험

아스팔트 콘크리트 혼합물의 인장강도는 간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS) 시험으로 측정할 수 있다. 간접인장강도는 25℃에서 측정되었으며 공시체 상하에 직경 101.6mm인 마살공시체의 반경과 같은 곡률의 오목한 표면을 가진 폭 13mm의 금속 하중 띠를 통해 50mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

### 2.4 반복주행시험

아스팔트 콘크리트의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험방법이 반복주행(Wheel tracking) 시험이다. 본 연구에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트함량으로 305×305×70mm의 슬래브 공시체를 공극률 8, 6, 4, 2%의 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 반으로 잘라 시험온도 40, 50, 60℃에서 6시간 이상 저장 후 반복주행 시험기로 시험을 수행하였다.

반복주행 시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 53mm로 하였으며 바퀴의 반복주행에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 또한 강재와 아스팔트 콘크리트의 직접 접촉에 의한 골재의 파손 등을 방지하기 위하여 폴리프로필렌 부직포를 공시체 표면에 덮었다. 차륜 축하중은 70kgf, 1차 주행 거리는 200mm로 하고 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 변형량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하였다.

이 시험을 통하여 혼합물의 동적안정도(Dynamic stability : DS)와 침하량을 구하였다. 반복주행시험 중 LVDT로 읽어들이는 침하량을 컴퓨터를 통하여 기록하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 아스팔트 특성

개질 아스팔트는 폴리머 함량이 증가함에 따라 점도는 증가하고 침입도는 감소하였다. 따라서 아스



팔트 콘크리트의 Flushing 현상을 감소시키고 아스팔트 종류별로 폴리머 첨가에 따른 약간의 차이는 있겠지만 아스팔트의 온도 민감성을 저하시킴으로서 전단변형에 대한 저항성이 증가하여 소성변형 저항성을 증가시켰다.

### 3.2 아스팔트 혼합물의 역학적 특성

위의 배합설계 결과로부터 결정된 각 혼합물의 최적 아스팔트함량 (OAC)으로 공시체를 제조한 혼합물들의 강도 특성은 Table 3과 같다. 최적 아스팔트함량 (OAC)은 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 혼합물보다 다소 높게 나타났다.

### 3.3 반복주행시험

반복주행시험은 최적 아스팔트함량으로 혼합물을 제조하여 시험온도 40, 50, 60℃에서 70kgf 하중하에 반복횟수 5,000회로 실험하였다. 온도에 따른 소성변형을 예측하기 위하여 세 종류 온도범위에서 반복주행시험을 수행한 결과 40℃에서의 결과는 혼합물 별로 큰 차이가 없어 향후 연구에서는 50, 60℃만을 사용하였다. Table 4에서는 반복주행시험에 따른 동적안정도 값을 보여주고 있다.

Table 3. Marshall and ITS properties of each mixtures at OAC

Mixture types	OAC (%)	Stability (kgf)	Flow (0.01mm)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformation in ITS test (mm)	Mixture types	OAC (%)	Stability (kgf)	Flow (0.01mm)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformation in ITS test (mm)
AD5N0	5.1	1054	29	8.1	1.80	BD5N0	5.0	803	24	7.4	1.73
AD3L4	5.2	1239	34	8.9	1.77	BD3L4	5.3	1040	30	7.8	1.70
AD3L6	5.2	1219	33	9.5	1.63	BD3L6	5.2	1079	25	8.7	1.43
AD3S3	5.3	1155	35	8.6	1.93	BD3S3	5.4	981	27	8.2	1.80
AD3S5	5.3	1221	35	10.1	1.77	BD3S5	5.0	1034	27	9.5	1.67
AG5N0	5.2	888	31	8.2	1.97	BG5N0	5.0	757	32	8.3	1.90
AG3L4	5.1	1002	26	9.1	1.93	BG3L4	5.3	902	29	9.0	1.70
AG3L6	5.3	1058	26	10	1.70	BG3L6	5.4	1041	28	10	1.73
AG3S3	5.1	896	33	8.9	1.83	BG3S3	5.2	749	28	8.2	1.87
AG3S5	5.3	1137	34	9.9	1.93	BG3S5	5.7	987	27	9.2	1.81

Table 4. DS of gneiss aggregate mixtures at 60℃

Mixture types	DS by air void (cycles/mm)				Mixture types	DS by air void (cycles/mm)			
	8 %	6 %	4 %	2 %		8 %	6 %	4 %	2 %
AD5N0	312	370	666	416	BD5N0	909	833	1111	769
AD3L4	278	270	455	666	BD3L4	1666	2000	1666	1429
AD3L6	666	625	625	1111	BD3L6	2500	5000	5000	5000
AD3S3	179	345	385	3333	BD3S3	833	1250	1111	1000
AD3S5	400	833	833	1111	BD3S5	2000	3333	5000	5000
AG5N0	714	769	909	909	BG5N0	1250	1429	1666	2000
AG3L4	345	769	1000	2000	BG3L4	3333	3333	2500	1666
AG3L6	1666	2000	2500	2500	BG3L6	3333	5000	5000	5000
AG3S3	588	769	1000	2000	BG3S3	1000	1666	3333	2000
AG3S5	1666	2000	3333	3333	BG3S5	1250	2000	2000	2500



### 3.4 마샬 특성과 소성변형 관계

마샬안정도시험은 고온에서 아스팔트 혼합물을 평가하는 실험으로 고온특성을 나타낼 것으로 사료 되어 마샬안정도, 흐름값과 소성변형 상관성을 고찰하였다. 또한 마샬안정도 시험에서 얻어진 마샬안정도-흐름값 그래프에서 최대하중시의 흐름값과 이루어지는 사선의 기울기 Stability/flow 지수(S/F index)max 및 그래프에서 직선구간이 끝나는 점에서의 Stability/flow 지수 (S/F index)i 와 소성변형과의 상관성을 알아보았다.

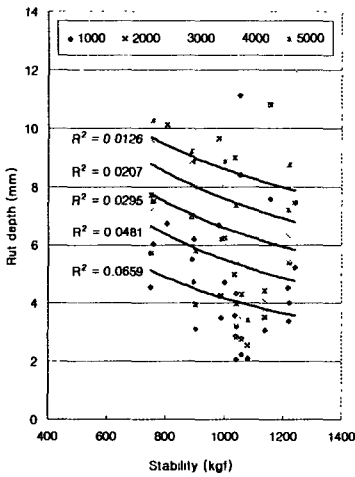


Fig. 3. Correlation between rut depth and stability

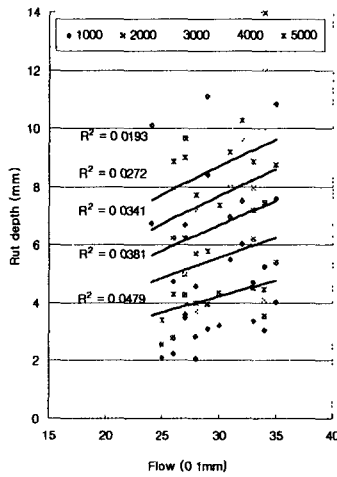


Fig. 4. Correlation between rut depth and flow

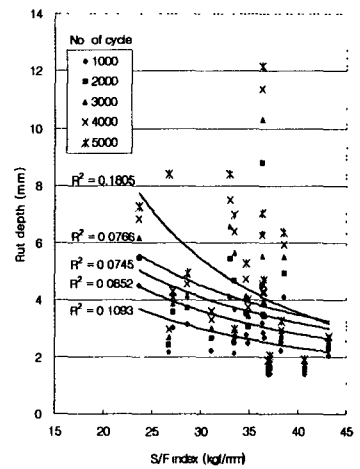


Fig. 5. Correlation between rut depth and (S/F index)max

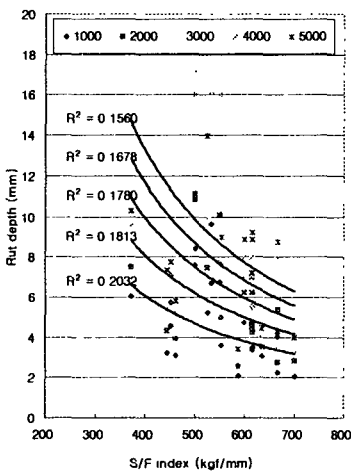


Fig. 6. Correlation between rut depth and (S/F index)i

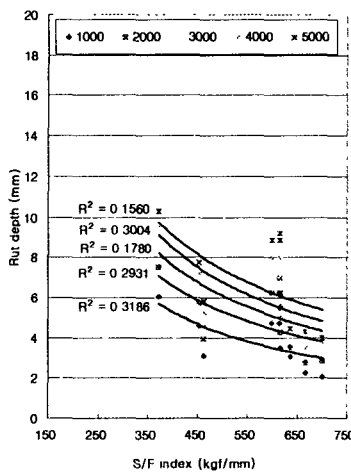


Fig. 7 Correlation between rut depth and (S/F index)i of gap grade mixtures

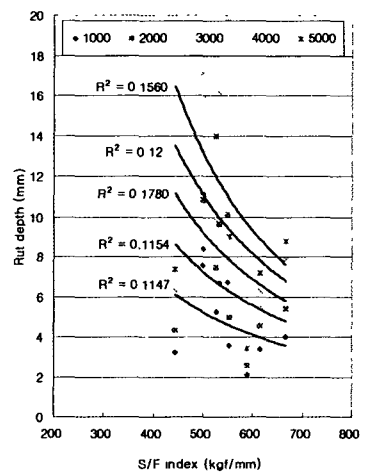


Fig. 8 Correlation between rut depth and (S/F index)i of dense grade mixtures

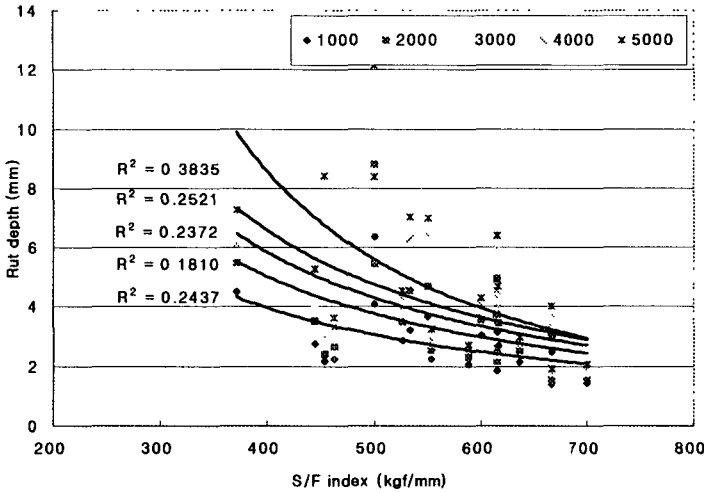


Fig. 9. Correlation between rut depth and (S/F index) at 50°C

상기의 그림으로부터 마찰안정도, 흐름값은 소성변형과 상관관계가 아주 낮아 각각의 값으로는 소성 변형 특성을 파악할 수 없음을 알 수 있었다. 또한 최대 하중점에서 S/F index와 소성변형 깊이 사이의 추세 그래프를 그리고 상관계수를 구하여 상관성에 대하여 알아본 결과 상관계수가 0.1이하로 아주 적게 나타나 상관성이 아주 낮은 것으로 나타났으며, 안정도-흐름 파괴그래프에서 직선구간의 S/F index와 소성변형 깊이는 최대 하중점에서보다는 다소 크지만 소성변형 특성을 파악하기에는 어려울 것이다. 그리고 잦

입도 혼합물과 밀입도 혼합물로 나누어 고찰한 결과 잦입도 혼합물이 밀입도 혼합물보다 다소 높은 상관성을 보여주었는데 이는 잦입도 혼합물의 굵은 골재 맞물림이 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 상기의 결과로부터 60°C에서 마찰특성으로는 소성변형 특성을 파악할 수 없음을 알 수 있었다. 하지만 50°C에서는 60°C에서보다 다소 높은 상관계수 값을 보여주었으나 여전히 R2 이하여서 상관성이 낮다.

#### 4. 결론

본 연구는 혼합물의 마찰특성과 소성변형의 상관성을 평가하기 연구로서 밀입도 및 잦입도 혼합물, 일반 아스팔트 및 개질 아스팔트 혼합물을 사용하여 반복주행시험을 수행하고 사용된 혼합물의 마찰특성과 소성변형 상관성 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 혼합물의 입도 및 개질제, 공극관련 특성에 따라 혼합물의 소성변형 저항성이 크게 변화됨을 확인하였다.
2. 사용된 변수 중 마찰특성치인 안정도/흐름지수는 소성변형과 상관관계가 아주 낮게 나타나 소성 변형을 예측할 수 없으며, 따라서 소성변형이 만연하는 현 실정에서 마찰 배합설계시 안정도 및 흐름치에 의존하는 방법은 심도있게 재고되어야 할 것으로 사료된다.
3. 또한 기존 마찰 장비를 이용한 소성변형과 상관성이 높은 데이터를 얻을 수 있는 새로운 시험법의 개발과 중온에서 마찰특성과 소성변형의 상관성에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

1. 건설교통부, (1996), "도로표준설계 시공지침"
2. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), "폴리머 (LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성," 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, p. 252.
3. 박태순, 고석범, 김수삼 (1999), "국내 아스팔트포장의 소성변형으로 인한 유지보수비용 및 문제점 조사에 관한 연구," 한국도로포장공학회 창립기념 '99학술발표회 논문집, pp. 69-74.
4. 허정도, 남영국 (1999), "A New Theory for Temperature Dependence of Rutting," KSCE J. of Civil Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 159-169.
5. Brown, S. F., Bell, C. A., (1997), "The prediction of permanent deformation in asphalt pavement," Proceedings, AAPT, Vol.48, pp.438-476.
6. Franchen L., (1992), "Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression," Proceedings, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, pp. 483-496.
7. Gibb, J. M., (1996), "Evaluation of Resistance to Permanent Deformation in the Design of Bituminous Paving Mixtures," Thesis, the University of Nottingham for the degree of Doctor Philosophy.
8. Harrigan, E. T., Leahy, R. B., (1994), "Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes," Asphalt Research Program Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
9. Harun, M Hizam and G Moriuk (1995), "A study on the performance of various bituminous surfacings for use on climbing lanes," Eighth REAAA Conference, Taipei, 17-21 April, 1995.