

아스팔트포장의 소성변형 방지를 위한 설계 기준 개발

Development of Design Criteria for Reducing Rutting in Asphalt Concrete Pavement

고석범* · 박태순** · 김수삼***

Ko, Seok Beom · Park, Tae Soon · Kim, Soo Sam

1. 서 론

우리 나라 전체 도로의 약 90%를 차지하고 있는 아스팔트 포장은 최근 교통하중 및 정체구간의 증가, 환경이상으로 인한 여름철 온도의 상승으로 인하여 과거에 비해 매우 심한 소성변형(rutting)이 발생하고 있다. 국내 여름의 온도 특히, 포장체의 온도는 왜관 및 오산지역에서 실측한 결과 최고온도가 60℃~65℃까지 기록되고 있으며 과거에 비해 교통량도 크게 증가하여 정체 구간이 점차 늘어남은 물론 증차량 및 교통량의 폭주에도 불구하고 설계기준은 20여년 전의 방법에 비하여 다짐횟수와 안정도를 증가시켰으나 증가한 교통량과 수정된 설계기준과는 상관관계가 없으며 특히, 온도변화와 하중지속시간에 의한 실제 포장의 점탄성 특성을 전혀 고려하지 못하고 있어서 도로의 파손과 이로 인한 유지보수비용도 해마다 증가하고 있다.

특히, 마찰시험법이 지니고 있는 시험법의 한계성과 아스팔트포장의 역학적 성능평가 방법의 부재로 인하여 현재 사용하고 있는 성능평가 방법 및 설계 기준으로서는 안정된 아스팔트 혼합물을 제공할 수 없는 한계점에 이른 것으로 보고되고 있다. 따라서 소성변형을 방지하기 위해서는 현재 사용하고 있는 역학적 성능평가 방법의 한계를 보완할 수 있으며 국내의 포장온도 및 교통인자를 고려한 우리 실정에 맞는 아스팔트혼합물의 설계 기준에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 소성변형 주요 인자에 관한 실내실험을 통해 소성변형 저항성 향상을 위한 최적의 조건과 각 인자의 조건을 변화시킨 혼합물에 대한 반복 크리프시험 결과를 근거로 소성변형 방지를 위한 설계기준을 제시하였다. 설계기준은 반복크리프시험을 실시하여 구한 크리프 계수와 크리프 기울기에 바탕을 둔 것이다. 또한, 국내 최고 포장온도를 고려하였으며, 교통량은 Little과 Button(1993) 등이 설계기준 개발을 위하여 사용한 4 등급의 교통량을 적용하였다.

2. 소성변형의 수학적 모델

* 정희원 · 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사 · 02-820-5259 (E-mail: sb_ko@hanmail.net)

** 정희원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수 · 02-970-6506 (E-mail: tpark@duck.snut.ac.kr)

*** 정희원 · 중앙대학교 건설환경공학과 교수 · 02-820-5259 (E-mail: kimss@cau.ac.kr)



소성변형은 시간이나 하중 재하수의 함수로서 Power law 관계(Findley, 1976)와 근접하다. 그 기본 이론은 일정범위의 하중 작용횟수내에서 반복하중의 작용횟수와 소성변형률 사이에는 대수적 관계가 있으며 식 (1)로 설명될 수 있다. Power law 모델은 반복크리프시험을 통하여 개발된 모델이므로 아스팔트포장의 반복되는 교통하중 조건을 잘 모사할 수 있기 때문에 소성변형 방지 기준 개발을 위한 모델로 선정하였다. Little(1988)과 Button(1993) 등은 Power Law 모델을 사용하여 실내 혼합물 설계와 현장의 구조적 설계를 통합하기 위한 과정 연구를 통해 표 1에 나타난 바와 같이 소성변형 방지를 위한 크리프 계수를 제시하였다. Little과 Button(1993) 등의 연구에 의하면 크리프시험에서 구한 크리프 계수와 정상상태영역의 크리프기울기는 아스팔트 포장의 소성변형 잠재성을 평가하는 데 있어서 타당성이 있는 것으로 증명되었다.

$$\epsilon_p = aN^m \tag{1}$$

여기서, ϵ_p : 누적 소성 변형률, a : 소성변형률 축
 N : 반복 하중재하수, m : 대수적 관계에서 직선 기울기

크리프 계수는 크리프 시험결과로부터 식(2)와 같이 계산된다. 표 1에 제시된 기준은 국내와 다른 환경조건 및 재료들을 사용하여 개발된 것이므로 국내에 적용하기 위해서는 국내의 아스팔트 및 골재 재료 특성, 최고포장온도를 고려한 설계기준을 개발해야 할 것으로 사료된다.

$$S_c = \frac{\sigma_{app}}{\epsilon_{(t)}} \tag{2}$$

여기서, S_c = 크리프 계수(MPa), $\epsilon_{(t)}$ = 축 변형률, σ_{app} = 적용된 응력(KN/m²)

표 1. 교통량에 따른 소성변형 방지를 위한 크리프계수값의 범위(Little and Button, 1993)

교통량 정도(*)	최소 크리프 계수(MPa)
매우 높은 교통량(I)	51.7
높은 교통량(II)	48.3
중간 교통량(III)	34.5
낮은 교통량(IV)	20.7

주) * I - 매우 높은 교통량 : 10⁶ ESAL 이상
 II - 높은 교통량 : 10⁵ ~ 10⁶ ESAL
 III - 중간 교통량 : 10⁴ ~ 5×10⁵ ESAL
 IV - 낮은 교통량 : 10³ ESAL 이하

3. 실험

3.1 사용 재료

아스팔트 바인더는 수퍼패이브 성능 등급으로 PG 58-22, PG 64-22인 바인더를 사용하였다. 골재는 경기도 전라도지역에서 현장시공에 사용될 골재를 실험실에서 체가름을 실시하여 시방입도로 맞추고 각 골재의 비중시험을 실시하였다. 굵은골재, 잔골재, 채움재의 진비중은 각각 2.716, 2.707, 2.657로 나



타났다.

3.2 실험 인자 및 조건

본 연구에서 1시간 재하기간 후 재하곡선의 시간과 크리프변형의 기울기 및 크리프 계수값을 설정하기 위해 200개 이상의 혼합물이 평가되었다. 소성변형 방지 기준 개발을 위해 실험에 고려된 인자는 표 2와 같다. 표 3은 크리프시험 조건을 나타낸 것이며 문헌조사를 통해 국내 조건에 적합한 최적의 조건을 선정한 것이다.

표 2. 소성변형 방지를 위한 설계기준 개발을 위해 고려된 변수

바인더	골재 입도	잔골재 업형	파쇄면 비율	편장석 함유율	배합설계
PG 64-22 PG 58-22	Super-19입도	NAA 45	2면 이상	0%	Marshall Superpave
	LS-25입도	NAA 42		5%	
	SMA입도	NAA 39	1면	10%	
	WC-3입도	NAA 37	1면 이하	17%	

표 3. 본 연구에 적용한 Creep 시험 조건

조건 종류	축용력 kN/m ² (psi)	예타 용력 kN/m ² (psi)	재하 기간 (초)	휴지 기간 (초)
반복 크리프시험	140(20)	20(12)	1	1

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 Creep 시험결과

표 4는 Creep 시험에 의해 구한 대표적인 혼합물의 크리프 계수 및 기울기를 나타낸 것이다. 분석 결과, 혼합물 설계 및 분석체계에서 소성변형 잠재성을 목록화하고 순위를 설정하기 위한 기준을 설정할 수 있다.

표 4. 대표적인 혼합물의 크리프 계수 및 정상상태 크리프기울기

혼합물 분류	정상상태 크리프 기울기	크리프 계수(MPa)
Super-19 혼합물	0.13	74
LS-25 혼합물	0.17	61
SMA 혼합물	0.21	40
개선된 WC-3 혼합물	0.25	31
일반 WC-3 혼합물(I)	0.27	24
일반 WC-3 혼합물(II)	0.33	19
일반 WC-3 혼합물(III)	0.34	11.8(파괴)
일반 WC-3 혼합물(IV)	0.60	7.0(파괴)



- 주) Super-19혼합물 : Super-19입도, NAA(45), 편장석(0%), 파쇄면(2면이상), PG64-22
- LS-25혼합물 : LS-25입도, NAA(45), 편장석(0%), 파쇄면(2면이상), PG64-22
- SMA혼합물 : SMA입도, NAA(45), 편장석(0%), 파쇄면(2면이상), PG64-22
- 개선된 WC-3혼합물 : WC-3입도, NAA(45), 편장석(0%), 파쇄면(2면이상), PG64-22
- 일반 WC-3혼합물(I) : WC-3입도, NAA(42), 편장석(5%), 파쇄면(2면이상), PG58-22
- 일반 WC-3혼합물(II) : WC-3입도, NAA(40), 편장석(5%), 파쇄면(2면이상), PG58-22
- 일반 WC-3혼합물(III) : WC-3입도, NAA(39), 편장석(17%), 파쇄면(1면이하), PG58-22
- 일반 WC-3혼합물(IV) : WC-3입도, NAA(37), 편장석(17%), 파쇄면(1면이하), PG58-22

4.2 소성변형 방지를 위한 설계기준 개발

4.2.1 교통량이 매우 높은 도로의 설계기준

그림 1의 왼쪽 그래프는 소성변형 방지를 위한 기준을 제시하기 위해 혼합물의 변형률과 반복재하수의 관계를 Log-Log 그래프로 나타내어 정상상태 크리프기울기를 구한 그래프이다. Super-19와 LS-25혼합물은 현재 국내 아스팔트포장에서 사용하고 있는 WC-3혼합물에 비해 소성변형이 상당히 작게 발생하여 이들 혼합물로부터 교통량이 매우 높고 최고 포장온도가 64℃ 이하인 도로에 대한 소성변형 방지 기준을 제시하였다(표 5).

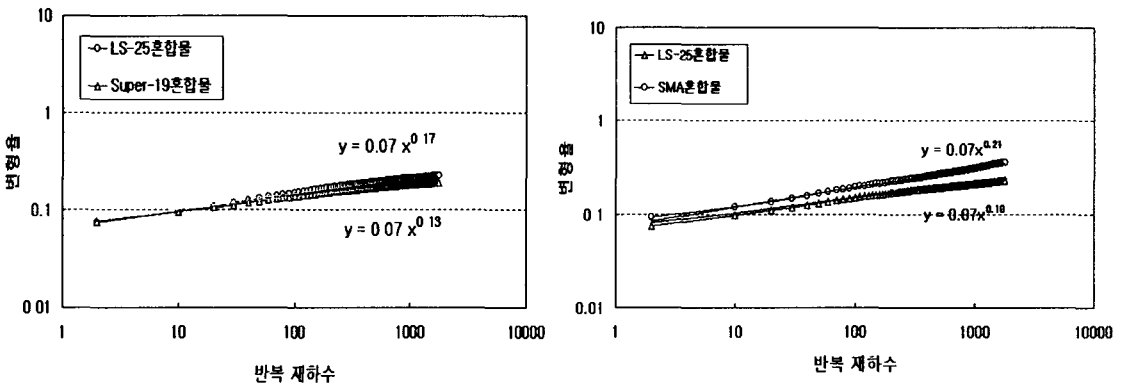


그림 1. Super-19, LS-25, SMA혼합물의 Log-Log 변형률과 반복 재하수의 관계

4.2.3 교통량이 높은 도로의 설계기준

그림 1의 오른쪽 그래프에서 LS-25와 SMA혼합물은 WC-3혼합물에 비해 소성변형이 상당히 작게 발생하여 이 두 혼합물로부터 교통량이 높고 최고 포장온도가 64℃ 이하인 도로에 대한 소성변형 방지 기준을 제시하였다(표 5).

4.2.4 교통량이 중간인 도로의 설계 기준

그림 2의 왼쪽 그래프에서 SMA혼합물과 개선된 WC-3혼합물은 일반 WC-3혼합물에 비해 소성변형이



비교적 작게 발생하여 이 두 혼합물로부터 교통량이 중간정도이고 최고 포장온도가 64℃ 이하인 도로에 대한 소성변형 방지 기준을 제시하였다(표 5).

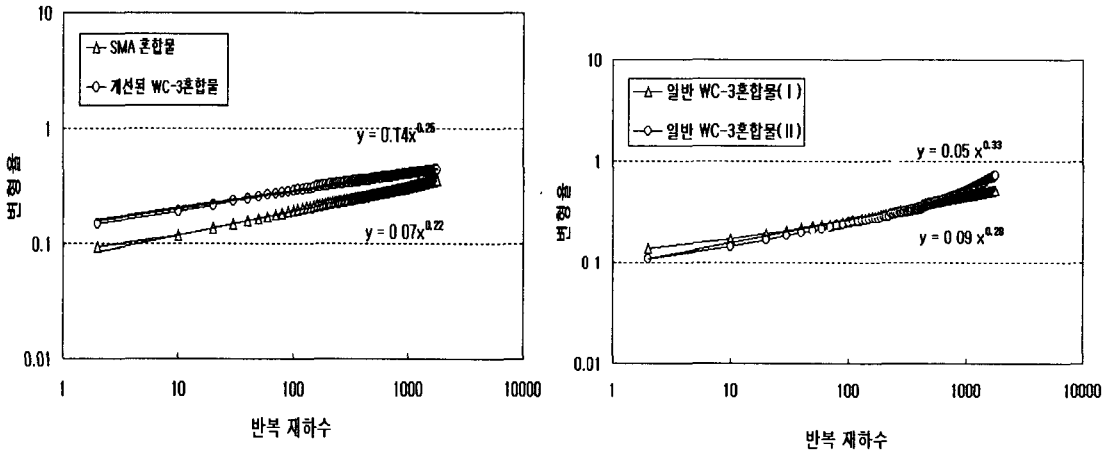


그림 2. SMA, 개선된 WC-3, 일반 WC-3혼합물의 Log-Log 변형률과 반복 재하수의 관계

4.2.5 교통량이 낮은 도로의 설계 기준

그림 2의 오른쪽 그래프에서 일반 WC-3혼합물(I, II)은 Super-19혼합물, LS-25혼합물, SMA혼합물에 비해 소성변형이 크게 발생하여 교통량이 낮은 도로에 한해서 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

소성변형 주요 인자에 관한 실내실험을 통해 소성변형 저항성 향상을 위한 최적의 조건과 각 인자의 조건을 변화시킨 200여개 이상의 다양한 혼합물에 대한 반복 크리프시험 결과를 근거로 소성변형 방지를 위한 설계기준을 제시하였다(표 5). 특히, 포장온도는 국내 지역별 최고 포장온도를 고려하였으며 교통량은 Little과 Button(1993) 등이 설계기준 개발을 위하여 사용한 4 등급의 교통량을 적용하였다.

표 5. 최고포장온도 및 교통량을 고려한 소성변형 방지 설계기준

소성변형 저항성	교통량 정도	최고 포장온도(℃)	정상상태 크리프 기울기(m)	최소 크리프 계수(MPa)
대(大)	I *	64	0.17~0.13	74~61
중(中)	II *	64	0.21~0.18	58~40
소(小)	III *	64	0.25~0.22	37~31
	IV *	58	0.33~0.28	24~19

주) * I - 매우 높은 교통량 : 10⁶ ESAL 이상
 II - 높은 교통량 : 10⁵ ~ 10⁶ ESAL
 III - 중간 교통량 : 10⁵ ~ 5×10⁵ ESAL
 IV - 낮은 교통량 : 10⁵ ESAL 이하



5. 결론

소성변형 영향인자에 관한 실내실험 및 분석을 통해 구한 최적의 조건과 각각 영향인자의 조건을 변화시킨 혼합물의 실험 결과를 근거로 소성변형 방지를 위한 설계기준을 제시하였다.

소성변형 방지를 위한 설계기준은 교통량이 매우 높고(10^6 ESAL 이상), 최고포장온도가 64°C 이내 일 때 크리프계수 및 크리프기울기는 각각 61MPa 이상, 0.17이하여야 한다. 교통량이 높고($10^6 \sim 10^5$ ESAL), 최고포장온도가 64°C 이내 일 경우, 크리프계수 및 크리프기울기는 최소 40MPa 이상, 0.21이하여야 한다. 교통량이 중간($5 \times 10^5 \sim 10^5$ ESAL)이고 최고포장온도가 64°C 인 경우는 크리프계수 및 크리프기울기는 각각 31MPa 이상, 0.25이하여야 한다. 교통량이 적고(10^5 ESAL 이하) 최고포장온도가 58°C 이내인 경우, 크리프계수 및 크리프기울기는 각각 19MPa 이상, 0.33이하여야 한다.

참고문헌

1. 박태순, 고석범, 김수삼(2000) 국내 아스팔트포장의 배합설계 방법 및 기준 변경을 타당성 조사 연구, 2000년도 학술발표회 논문집, 한국도로포장공학회, pp. 125-132.
2. Little and Button. (1993) Development of Criteria To Evaluate Uniaxial Creep Date and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential, Transportation Research Record No. 1416.
3. Hussein, Mohamed and Zhongqi Y. (1994) Criteria for Evaluation of Rutting Potential Based on Repetitive Uniaxial Compression Test, Transportation Research Record No. 1454.
4. Brown, Kee Y.F. (1994) Comparison of Unconfined-Creep Test and Confined-Creep Test for Hot Mix Asphalt, ASCE, ISSN Paper No. 4420.
5. Xicheng, Q. and Matthew W. (1998) Time-Dependent Permanent Deformation Models for Asphaltic Mixtures, Transportation Research Record, 1639.