

# 국내 아스팔트 포장의 소성변형 원인 및 대책

박 태 순\*

## 1. 머리말

최근 국내 아스팔트 포장은 교통하중 및 정체 구간의 증가, 환경이상으로 인한 여름철 온도의 상승으로 인하여 과거에 비하여 매우 심한 소성 변형이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 아스팔트 포장의 소성변형은 위에서 언급한 외부적인 요인 이외에도 아스팔트 시멘트, 골재 및 아스팔트 혼합물의 품질관리와도 밀접한 관계를 가지고 있다.

아스팔트포장의 소성변형(plastic deformation) 또는 영구변형(permanent deformation)은 아스팔트포장의 파손의 일종으로 차량하중에 의해 주로 발생하고, 포장표면이 차량의 진행방향을 따라 바퀴자국이 발생될 경우 포장 공학적인 용어로 러팅(rutting)이라고 부르고 있다. 가까운 일본에서는 소성변형을 유동(流動)이라고 부르고 있다. 본고에서는 용어를 통일하고자 소성 변형이라는 용어를 선택하여 쓰기로 한다.

소성변형은 아스팔트의 재료의 특성상 차량하중 및 빈도, 지속시간 등에 의해 발생하는 현상이다. 그러나, 설계년수 이전에 소성변형이 발생하거나 설계년수 이후라 하더라도 지나치게 큰 양으로 발생하는 소성변형은 불안정 소성변형으로 아스팔트 포장에서는 파손의 한 형태로 규정

하고 있다. 우리 나라의 대부분의 소성변형은 불안정 소성변형으로 아스팔트 혼합물의 품질과 소성변형을 방지하기 위한 노력과 연구가 시급한 실정이다.

미국 교통국에서는 평균 소성변형 깊이가 1.2cm 이하일 경우에는 소성변형이 그다지 심하지 않은 것으로 분류하며, 1.2cm에서 2.5cm(1인치) 사이인 경우에는 보통, 2.5cm 이상인 경우에는 매우 심각한 것으로 분류한다. 소성변형이 심하게 발생하게 되면 바퀴자국을 따라 차량이 진행하기 때문에 핸들조작이 어려워지고, 바퀴자국을 이탈할 경우에는 핸들이 좌우로 심하게 쏠리게 되어 안전에 큰 영향을 미치게 된다. 더욱이 강우시에는 빗물이 바퀴자국을 따라 고이기 때문에 차량운행의 안전을 크게 위협하게 된다.

본고에서는 아스팔트 소성변형으로 인한 유지보수 비용 및 안전관련 문제점, 소성변형 영향인자, 소성변형 방지대책, 국내 설계기준의 문제점, 마찰시험 장치의 문제점을 조사한 결과로서 1999년 11월 및 12월 대한토목학회지에 투고한 내용과 2000년 3월 전자재시험 연구소 주최 아스콘 품질관리 기술교육에서 강의한 내용을 바탕으로 그 이후에 새로이 조사된 내용을 정리하여 서술하였다.

\* 서울산업대학교 토목공학과 조교수  
tpark@duck.snut.ac.kr

## 2. 소성변형으로 인한 문제점 조사

### 2.1 아스팔트포장의 유지보수 비용

건설교통부 도로유지 보수비용 중 여름철 높은 기온으로 인한 아스팔트 포장의 소성변형 보수비용이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 1997년도 건교부 집계자료에 의하면 도로포장 유지 보수비용에 사용된 예산은 1987년에는 약 300억원이었으며 1996년에는 약 700억원으로 매년 꾸준히 증가하고 있는 실정이며, 그림 1에 나타난 것과 같이 1993년까지는 다른 토목구조물에 비하여 월등히 높은 것을 알 수 있다.

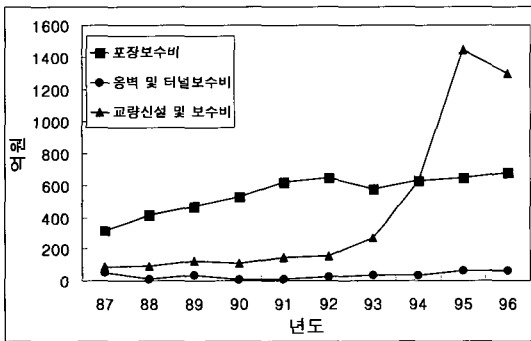


그림 1. 과거 10년간 포장 및 교량, 옹벽, 터널 관련 도로 유지보수비용(건설교통부, 도로손상비 부과기준 개발, 1997)

교량신설 및 보수비는 성수대교 사고가 발생한 이후 1995년부터 일시적으로 증가하였으나, 교량 신설로 인한 비용을 감안하면 유지보수비가 차지하는 비율은 도로포장 유지보수가 차지하는 비용에 비하여 크게 낮은 것으로 분석된다. 또한, 교량 신설 및 보수비는 1996년부터 다시 감소하기 시작하지만 도로포장 보수비는 87년부터 96년까지 매년 꾸준히 증가하고 있으며 향후 교통량의 증가로 인하여 더욱 크게 늘어날 전망이다.

### 2.2 도로 안전관련 문제

소성변형이 발생하면 강우시 도로면 배수가 원활하지 못하게 되어 주행 차량에 의하여 물보라를 일으키고, 수막현상(Hydroplaning)이 발생되어 노면 마찰력 감소로 교통안전에 문제가 발생한다. 또한 동절기의 결빙이 쉽게 발생되어 미끄러운 노면을 형성하여 사용자에 많은 불편과 교통사고의 위험성을 초래하게 되고 도로의 횡단면이 설계시 위치를 더 이상 유지할 수 없게 되므로 조향성과 주행성이 불량하게 되어 승차감이 떨어지며 사용자에 불쾌감을 준다. 또한 도로의 기능을 상실함으로써 사용자에 원활한 사용성(Serviceability)을 제공하지 못하게 된다.

소성변형이 발생한 포장의 전형적인 보수방법으로 평삭을 실시한 후 그대로 교통을 개방시키거나 또는 구아스팔트면과 신규 아스팔트면과의 탄성계수 차이가 발생하여 조기파손 및 잦은 보수의 원인이 되고 있다.

절삭한 아스콘은 건설 폐자재로 처리비용 및 환경문제를 야기하며, 자동차의 타이어 등 부품의 마모 및 차량소통을 저해하므로 이로 인해 발생하는 사회적 비용 역시 상당히 큰 것으로 판단된다.

## 3. 소성변형 형태 및 영향인자

### 3.1 소성변형 형태

Dawley(1990)의 연구에 의하면 아스팔트 포장의 소성변형의 세 가지 형태는 다음과 같다.

#### ① 표면의 소성변형(Wear rutting)

표면 소성변형은 아스팔트포장 표면의 아스팔트로 코팅된 골재 입자가 아스팔트 시멘트를 지속적으로 손실함으로써 발생하는 현상으로 온도

와 교통의 영향으로 인하여 발생한다.

### ② 구조적 소성변형(Structural rutting)

구조적 소성변형은 반복 교통하중하에서 포장 구조의 영구수직 변형에 의해서 발생한다. 영구 수직 변형이 발생하는 원인으로서는 초기다짐이 부족하여 지속적으로 다짐압착이 발생하거나 포장층 또는 노상에서 소성변형이 발생하는 것을 들 수 있다.

### ③ 불안정 소성변형(Instability rutting)

불안정 소성변형은 아스팔트 포장층내의 재료의 측방향 유동에 의해서 발생하게 된다. 불안정 소성변형은 배합설계가 잘못된 아스팔트 혼합물의 소성유동에 의해서 주로 발생하게 된다.

국내에서 발생하고 있는 소성변형의 형태는 주로 불안정 소성변형으로 일반적인 소성변형 발생과정은 다른 과정을 보이고 있다. Dawley와 Anderson(1990)은 아스팔트 포장의 러팅이 불안정 소성변형으로 발생한다는 것을 그들의 연구로부터 다시 확인하였는데, 국내 포장의 공극률과 러팅과의 관계는 매우 밀접한 관계가 있다. 즉, Brown(1990)에 의하면 아스팔트 포장은 시공직후 약 7~8%정도의 공극률을 지니고 있지만 이후 교통하중에 의하여 공극률이 감소하게 된다고 하였으며, 아스팔트포장의 안정성은 교통하중의 다짐(traffic densification)에 의해서 증가하게 된다. 이렇게 안정성이 증가하게 되면 러팅 저항력은 약 4%의 공극률에서 평형에 도달하게 된다. Sousa(1994)에 의하면 공극률이 2~3%로 감소하게 되면 아스팔트 바인더는 골재사이에서 윤회재로서 작용하게 되어 골재간의 접촉력을 상실하게 되고, 내부에서 흐름이 발생하게 된다는 것을 보고하였다. 국내 포장에 대한 공극률을 공식적으로 측정할 자료는 없으나 육안 상태 및 아스팔트량을 추정해 볼 때 교통

량과 정체구간을 동시에 고려해 볼 때 공극률이 매우 저하되어 있을 것으로 추정된다.

## 3.2 혼합물 구성인자의 영향

혼합물 구성인자가 소성변형에 미치는 영향은 크게 아스팔트 시멘트의 영향, 골재의 입형, 골재의 입도, 필러의 영향, 현장조건, 실내시험 결과와 현장의 불일치로 나눌 수 있다. 국내에서는 아직 이러한 인자에 대한 직접적인 시험이나 연구가 구체적으로 수행되지 않고 있어서 외국의 연구 결과를 이용하고 있는데 국내의 상황과 도로의 조건이 다른 외국의 연구 결과를 무분별하게 인용하여 국내의 소성변형에 대한 원인을 밝히는 데는 한계성과 문제점이 따르게 되어 자칫 오류가 발생하게 되어 매우 주의를 하여야 한다.

## 4. 소성변형 방지대책

### 4.1 새로운 시험법의 도입

현재 국내 아스팔트 시멘트 분류시험으로 침입도시험을 사용하고 있는데, 침입도시험은 경험적인 시험으로 시험자의 숙련도와 시험조건에 따라 시험결과와 오차가 매우 크게 나타남은 물론 25°C에서 실시하기 때문에 아스팔트 포장의 전 온도영역에서 나타나는 아스팔트 시멘트의 성능을 알 수 없다는 큰 단점이 있다.

혼합물 배합설계방법으로 사용하고 있는 마샬 시험법은 시험장치가 간단하고 경제적이기 때문에 국내는 물론 여러 국가에서 사용하고 있는 배합설계 방법이다. 그러나, 이 방법 역시 매우 경험적인 방법으로 시험장치는 실제적인 현장조건을 제대로 반영하고 있지 못하여 실내시험 결과와 실제 현장에서 발생하는 현상과는 매우 큰 차이가 발생하게 된다.

우선, 아스팔트 시멘트의 시험법은 침입도시험을 여러 다양한 온도에서 측정하여 온도 변화에 따른 아스팔트 시멘트의 민감도를 측정하거나, 신도시험을 동시에 측정하여 침입도지수(Penetration Index) 또는 점도시험법과 침입도시험 결과를 사용하는 PVN(Penetration Viscosity Number) 분석등을 사용하는 방법이 현 단계에서는 적절할 것으로 판단되며, 보다 개선된 방법으로 최근 미국에서 시방으로 사용하고 있는 슈퍼페이브 바인더 제 1단계 바인더 시험을 도입함으로써 아스팔트 시멘트의 고온 및 저온 특성, 공용기간 후의 특성에 대하여 상세하게 알 수 있다. 따라서 정유회사로부터 공급되어 오는 아스팔트를 성능등급으로 시험하여 사용할 아스팔트의 감온특성으로부터 적절한 아스팔트 시멘트를 선별하여 사용할 수 있다. 이 시험 역시 국내 시방규정내에서 운영할 수 있기 때문에 선정시험을 이 시험법으로 정하여 실시할 수도 있다.

충격에너지를 이용하는 마찰다짐 방법도 로울러를 이용하는 현장 다짐방법과 많은 차이가 있다. 특히, 다짐에 의한 골재의 배열상태(particle orientation)가 매우 다르게 나타나고, 이는 포장의 성능 또는 공용성에 상당한 차이를 나타내는 원인이 된다. 이러한 마찰배합설계의 문제점은 현장다짐 방법을 모사할 수 있는 선회다짐시험기를 사용함으로써 어느 정도 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이 다짐장치는 주로 정적 하중과 로울러의 다짐횟수 즉 선회 다짐횟수에 따라 혼합물의 내부에서 변화하는 밀도를 측정할 수 있기 때문에 입도 분포의 변화 및 아스팔트비의 변화에 따라 혼합물 내부의 체적 구성(공기량, VMA) 상태를 그 자리에서 바로 예측할 수 있다. 현재 선회다짐시험장비에 의한 다짐은 매우 적절한 다짐방법으로 평가되고 있다. 따라서, 아스팔트포장이 시공될 지역의 교통특

성과 장래의 교통량을 예측하여 해당 다짐횟수로 다짐한 혼합물의 밀도를 측정하고, 이때의 시료를 관련시험법으로 사용하여 혼합물의 특성을 분석하여 소성변형에 저항성이 큰 혼합물을 제작할 수 있다. 관련 시험법으로는 마찰안정도 시험 이외에 혼합물의 소성변형과 관계있는 휠트래킹시험 및 크리프시험을 추가하여 혼합물의 물리적 특성뿐만 아니라 역학적 특성을 시험, 분석함으로써 소성변형을 최소화 할 수 있다.

#### 4.2 골재선정시험의 도입

현행 아스팔트 혼합물 시험법에서는 골재 선정시험에 대한 엄격한 규정이 미비한 실정이다. 아스팔트 혼합물의 구성요소중 골재는 혼합물의 약 90% 이상을 차지하는 중요한 구성인자이기 때문에 소성변형에 저항이 큰 혼합물을 제조하기 위해서는 일련의 골재 선정시험방법의 도입이 매우 시급한 실정이다. 이러한 사실은 미국의 신도로연구계획에서도 강조되고 있으며, 많은 포장전문가들에 의해 확인된 바 있다. 특히, 국내의 암석의 성질상 편평 세장한 골재가 많은 비율을 차지하고 있기 때문에 이에 대한 적절한 조치가 필요하다 골재 선정시험은 일치성질과 근원성질의 두 가지 영역으로 나누어 평가하도록 한다.

골재 선정시험중 일치성질은 다음과 같은 시험방법을 사용할 수 있다.

- ① 굵은골재의 입형
- ② 잔골재의 입형
- ③ 세장편평입자의 함유율 시험 - ASTM D 4791
- ④ 점토세립분의 함유율 - KS F 2430

여기서, 굵은골재와 잔골재의 입형은 골재의 높은 내부마찰각과 소성변형에 대한 저항성을 보장하기 위한 것이다. 또한, 혼합물 내에 세장

편평한 입자가 함유될 경우 아스팔트 포장의 시공중과 시공후 교통하중에 의해 입자가 부수어지기 때문에 골재와 골재간의 접촉력이 상실되어 소성변형의 원인이 되기 때문이다. 일치성질은 각 포장관련기관의 경험과 지역특성에 따라 정해진다. 근원성질 시험법으로는 다음과 같은 시험법을 사용한다.

- ① 마모시험 - KS F 2505
- ② 안정성 시험 - KS F 2507
- ③ 유해물 함유량 시험 - AASHTO T 112

위에 열거한 시험법의 일부는 국내에서도 운영하고 있다. 특히, 잔골재의 입형과 표면조직은 굵은골재에 비하여 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성에 영향을 크게 미치기 때문에 잔골재 입형시험은 소성변형 방지를 위하여 국내에 우선적으로 도입해야 할 시험방법이다. 잔골재의 입형과 표면조직은 ASTM C 1252나 AASHTO TP 33(다지지 않은 잔골재의 공극률)을 사용하여 양적으로 측정할 수 있다. 미국 국립아스팔트기술센터의 연구에 의하면 이 시험은 아스팔트 혼합물의 소성변형 가능성을 추정하는데 매우 유용하게 사용된다.

잔골재 입형시험 방법은 다음과 같다. 잔골재의 입형은 실린더에 잔골재를 부었을때 측정되는 공극의 양으로 결정된다. 즉 잔골재를 실린더의 상단에 부어 넣으며 느슨해진 골재 사이에 존재하는 공극의 양이 결정된다. 이 때 공극의 양이 크면 클수록 모가 난 골재의 양이 많아진다. 이 시험법은 "NAA(National Aggregate Association) 흐름시험(flow test)" 이라고도 불리우는데 이 시험은 AASHTO TP 33 A 방법 "다지지 않은 잔골재의 공극률 시험법"의 규정에 맞추어 실행하여야 한다. 실린더 내부 골재의 다지지 않은 공극의 양은 다음 식으로 계산된다.

$$U = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100 \quad (1)$$

- U : 다지지 않은 공극
- V : 실린더(강철몰드)의 부피 (ml)
- W : 실린더(강철몰드)에 채워진 느슨한 잔골재의 무게(g)
- Gsb : 잔골재 겉보기비중(bulk)

- 다지지 않은 높은 공극(U): 더 높은 능각(稜角, angularity)과 더 거친 조직(texture)를 갖는다.
- 다지지 않은 낮은 공극(U) : 더 둥근 모래를 많이 함유
- 이 방법은 쉽고 빠르며 반복적인 결과를 나타냄.

일반적으로 다지지 않은 공극이 높은 입도 분포가 양호한 골재는 다지지 않은 공극이 낮은 골재보다 비교적 강하고 영구변형 저항성이 크다. 표 1은 슈퍼페이브의 다양한 교통조건과 포장표면으로 부터의 깊이에 대한 잔골재 입형의 시방기준이다.

표 1. 잔골재 입형에 대한 시방조건

(수퍼페이브 규정)

교통조건 ESALs(백만대)	표면으로부터의 깊이	
	100mm 이하	100mm 이상
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

그림 2는 현재 시험중인 결과의 일부이다. 현재 연구중에 있는 자료를 일부 발췌하여 잔골재의 입형이 소성변형에 미치는 영향을 시험 분석한 자료이다. NAA(National Aggregate Association) 흐름시험(flow test) 값의 변화가 소성변형 저항성에 미치는 영향을 직접 알아보기 위해 크리프시험을 실시한 결과이다. 크리프시험은 60°C에서 비구속반복시험으로 실시하였다. 시험실시 전에 공시체를 2시간 동안 온도 양생실에서 양생하여 공시체의 온도가 전체적으로 평행이 되도록 하였다. 공시체에 140kPa의 수직하중을 3,600초 동안 하중을 재하하고 이후 4,500초까지 하중을 풀어 이때 발생한 영구변형량을 측정하였다. 시험 결과 NAA값이 클수록 영구변형이 작게 나타나서 잔골재의 입형이 소성변형에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다.

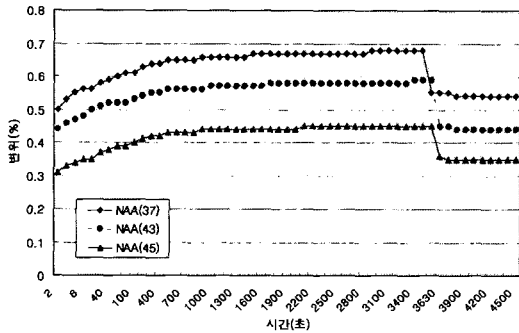


그림 2. NAA시험 값의 변화에 따른 크리프 시험결과 (고석범·박태순·김수삼 미발표자료)

### 4.3 체적구성비율 개념 도입

미국 아스팔트협회의 혼합물 설계 지침서인 MS-2의 경우 약 5년 전부터 체적구성비율 개념을 도입하여 지침으로 정하고 있다. 다져진 아스팔트 혼합물 내에 골재표면에 코팅된 아스팔트와 공기가 차지하고 있는 공간을 골재간극률이라고 부르고, VMA로 표시한다. 현재 국내규

정도 VMA에 대한 규정이 언급되어 있으나, 체적구성 비율개념이 도입된 배합설계를 도입함으로써 소성변형과 관련된 문제점을 최소화 할 수 있을 것이다. 많은 경우에 있어서 배합설계시 가장 어려운 부분은 골재내의 최소 VMA를 결정하는 것이다. 최소 VMA를 결정하는 가장 중요한 목적은 아스팔트 콘크리트에 충분한 공극을 생기게 함으로써 적절한 부착력이 발생되게 하여 골재입자를 견고하게 아스팔트와 부착시키는 물론, 온도가 상승하여 아스팔트가 팽창할 때 블리이딩 현상이 발생치 않도록 하는 것이다.

아스팔트 혼합물에 있어서 공극률은 밀도와 직접적으로 관련되어 있다. 따라서, 초기 현장 공극률이 허용범위 안에 들어올 수 있도록 밀도 관리를 철저히 해야 한다. 밀입도 혼합물인 경우 초기 현장 공극률은 대략 8% 이상 되어서는 안되고 포장의 공용기간동안 3% 이하가 되지 않아야 한다는 많은 연구자료들이 있다. 공극률이 높을 경우 혼합물 내로 물과 공기가 침투하게 되어 물로 인한 손상, 산화, 라벨링, 균열 등이 발생하게 된다. 공극률이 낮으면 아스팔트 혼합물에 소성변형과 밀림(shoving)이 발생할 수 있다. 이와 같이 추천한 현장 공극률의 범위는 밀입도 아스팔트 혼합물에만 적용된다. 특히 높거나 낮은 공극률이 되도록 특별히 설계된 혼합물의 경우에는 그 기능을 고려하여 적절히 설계되었을 때 공용성능을 충분히 확보할 수 있다.

Zube는 밀입도 아스팔트 혼합물이 대략 8%의 공극률에서 매우 투수성이 높아짐을 밝힌 바 있다. 8% 이하의 공극률에서는 투수성이 문제가 되지 않으나 공극률이 8% 이상일 경우 투수성이 급격히 증가함을 알 수 있다. Brown, Collins, Brownfield도 조지아주의 재료 분리된 혼합물에 대한 연구에서 아스팔트 혼합물의 공

극률이 대략 8% 이하일 때 불투수성이라는 것을 밝혔다. 투수성이 8% 이상에서 급격히 증가한다는 것을 보여준다. Santucci 등은 아스팔트 시멘트의 잔류침입도가 아스팔트 포장의 공극률에 영향을 받는다는 것을 밝혔다. 공극률이 8%를 초과함에 따라 아스팔트 시멘트의 침입도의 손실이 급격히 증가한다는 것을 보여준다. 따라서 밀입도 아스팔트 혼합물이 공극률 8% 이하에서 시공된다면 균열과 라벨링을 조기에 유발케 하는 빠른 경화를 방지하고 양호한 공용성과를 보이게 된다. 이와 같은 연구결과로부터 밀입도 아스팔트 혼합물은 8% 이하의 초기 공극률을 갖도록 시공하여야 하며, 교통개방후 최종 공극률이 3% 이상 되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 제한 조건을 만족시키고 양호한 골재와 아스팔트 시멘트를 사용한다면 좋은 공용성과를 기대할 수 있을 것이다.

#### 4.4 아스팔트함량의 조정-철저한 배합설계

현재 국내의 아스팔트포장은 다소 아스팔트 함량이 과다하다는 국내 전문가들의 지적이 있어 왔다. 그 이유로는 공극률을 3~6%로 맞추어야 하는데 어떤 이유에서인지는 몰라도 현장 공극률을 3%로 정하는 경향이 있기 때문에 다짐에너지가 불충분한 상태에서 공극률 3%를 맞추려면 아스팔트량을 증가시켜서 이 규정을 맞추는 방법만이 현장에서 손쉽게 실시할 수 있는 방법이기 때문이다. 아스팔트 함량이 증가하면서 어떤 점에 도달하게 되면(U자형 곡선의 아랫부분) VMA는 증가하기 시작한다. 왜냐하면 조밀한 재료(골재)가 조밀하지 않은 재료(아스팔트 시멘트)에 의해서 밀려나고 그 자리를 아스팔트 시멘트가 차지하게 되므로 VMA는 증가하게 되는 것이다. 최소 공극비와 VMA 기준에 가까스로 만족하더라도 아스팔트 시멘트량이 VMA곡선의 오른쪽으로 증가하는 측의 아스팔트량은

피해야 된다는 것이다. 이 범위 내에 있는 설계 아스팔트량으로 현장에서 포장하였을 때 소성흐름이 발생하거나, 블리딩 현상이 자주 나타나는 경향이 있다. 교통하중으로부터 발생하는 추가적인 다짐은 아스팔트 팽창시 혼합물 내에 부적절한 공간과 골재와 골재간의 접촉의 상실을 발생케 하고 결과적으로, 교통량이 많은 지역에서는 소성변형과 밀림현상이 발생하게 된다. 이상적으로, 다른 기준을 위반하지 않는 한 설계 아스팔트량은 VMA곡선 최저점의 약간 왼쪽에서 결정토록 한다.

#### 4.5 시방기준의 재조정

현재 국내에서 사용하고 있는 마샬 시방기준은 미국 아스팔트협회(Asphalt Institute : A.I)의 기준을 사용하고 있다. 미국의 경우 각 주의 교통국에서는 각 주의 교통 및 기후특성에 맞게 이 기준을 근간으로 각 주의 실정에 맞는 설계 및 시방기준을 운영하고 있다. 국내에서는 고속도로, 국도, 도심지 도로 및 주택 단지내 도로의 구분이 없이 일정한 기준을 적용하고 있다.

국내의 여름 온도가 특히 포장체의 온도는 1997년에 60~65°C까지 기록되고 있으며, 교통량도 크게 늘어나서 정체 구간이 점차 늘어남은 물론 교통량의 폭주로 인하여 우리 실정에 맞는 합리적인 시방기준을 제정하여야 한다. 그림 3, 그림 4 및 그림 5는 교통량의 증가와 이로 인한 서울시내 교통 정체 구간 현황을 조사한 자료이다.

##### ① 교통량 증가

그림 4의 년도별 전국의 자동차 증가현황을 살펴보면 1980년에 약 80만 대이었으나 매년 증가하여 1999년도에는 약 1천 1백만 대로 약 13배 이상 증가비율을 보여 급격한 자동차 증가현상이 나타나고 있다. 특히 서울시의 경우, 자동

차 대수는 그림 4에 나타난 것과 같이 1980년에 약 25만 대이었으나 매년 증가하여 1999년도에는 약 240만 대로 약 10배 정도의 급격한 증가 비율을 보였다.

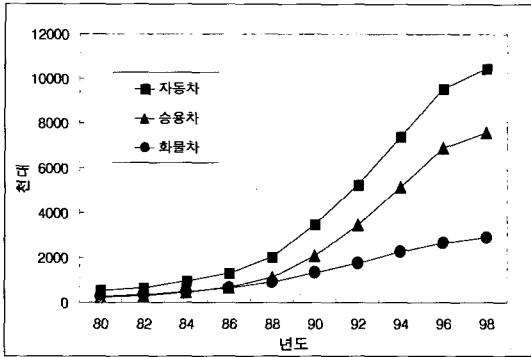


그림 3. 전국 년도별 자동차 증가현황(건설교통부, 한국 자동차공업협동조합, 1999)

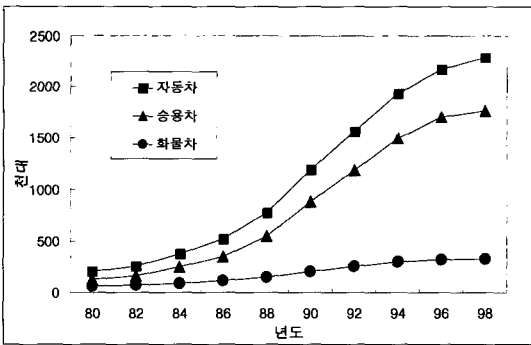


그림 4. 서울시 년도별 자동차 증가현황(서울시청, 통계청, 1999)

② 정체구간 증가

서울시 교통개선센터 조사자료에 의하면 서울시내 도로는 출근시간대인 오전 8~9시 월요일에 가장 정체가 심한 것으로 나타났다. 운행속도가 시속 10km 이하인 정체구간수가 221구간이나 되며 목요일에는 171구간, 화요일 169구간보다 30%정도 많고, 다른 요일 120여 구간의

1.8배 수준이다(서울시 교통개선센터 조사자료, 4차로 이상 도로 5,068구간의 승용차 평균통행속도 조사). 출근이 끝나도 1백여 곳에선 정체가 지속된다. 오후 1시면 정체구간수가 점차 늘기 시작하여 오후 3시면 230여 구간으로 증가한다. 저녁 6시에는 270여 구간이 정체되어 피크를 이룬다. 퇴근 때 훨씬 더 어려운 서울 교통의 실상을 보여주는 조사 결과이다. 그림 5에서 보듯이 토요일엔 정체 상황이 더욱 심각해진다. 오전 10시부터 밀리기 시작해 점심시간 때가 되면 정체구간 수가 300여 곳으로 늘고, 저녁 6시에 400여 구간이 넘게 된다. 평일 보통 때보다 막히는 곳이 3~4배에 이르러 토요일 오후의 혼잡은 매우 심각한 실정이다.

97년 2,194,000대이던 서울의 자동차 등록대수는 99년 2,400,000대로 증가되었다. 서울주변 도시는 차량증가율이 이보다 더 높게 나타나는데, 정체원인이 이 같은 '교통수요증가' 때문만은 아니다. 그림 5에서 보듯 정체구간은 군데군데 뭉쳐있다. 이 같은 모습은 '교차로 하나가 막히면 주변 교차로까지 정체가 연쇄적으로 파장을 이루는 형태'임을 보여준다.

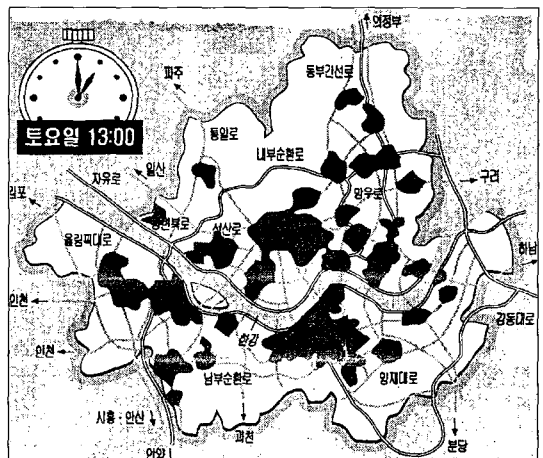


그림 5. 서울시 운행속도 10km/h이하 정체구간(중앙일보 2000. 1. 15)



이 혼잡은 곧 +자형으로 주변 교차로에 물결처럼 퍼져 상당수 구간이 시속 10km도 낼 수 없는 정체구간으로 변한다. 따라서 설계속도를 60~70km로 설계한 경우 실제로는 10km 미만의 속도로 주행하기 때문에 아스팔트 포장에 가해지는 하중은 60~70km에 비하여 훨씬 커지기 때문에 소성변형에 미치는 영향은 더욱 커질 수 밖에 없는 실정이다.

#### 4.6 마찰시험장치의 개선

서울산업대학교 건설기술연구소(박태순, 1999, 미발표) 연구결과에 의하면 국내 마찰시험 장치의 규격, 제원, 재질 및 시험장치의 설치방법이 서로 상이하여 배합시험 결과에 많은 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 특히, KS공장의 시험실은 마찰다짐 장치를 전시하고 있을 뿐 거의 사용을 하지 않고 있는 것으로 조사되었다.

이 연구에 의하면 현재 국내에 활발하게 연구, 배합시험 및 품질시험을 수행하고 있는 대학시험실 2개소, 연구소 2개소, 관련기관 2개소 및 서울, 경기지역의 플랜트를 방문하여 다짐장비의 규격(해머의 무게, 해머의 자유낙하고, 안정도 헤드) 다짐받침대의 크기, 받침목의 종류와 크기, 바닥판(supporting floor), 기초판의 설치방법을 조사하였으며, 다짐해머의 타격시 시료에 가해지는 다짐에너지를 측정하기 위해서 다짐판과 기초 바닥판에 전달되는 가속도를 가속도계(accelometer)를 부착하여 측정하였다. 조사된 결과를 요약하면 다음과 같다.

##### ① 안정도 헤드

마찰안정도 시험의 원리는 공시체에 하중이 작용하면 공시체 내부에 응력이 발생하면서 파괴된다. 이러한 파괴 형상은 포장의 파괴를 시뮬레이션한 것으로 안정도값은 시료 내부의 전단평면에 발생한 공시체의 저항력을 측정된 것

이다. 이 저항력은 시료 내부에 형성하고 있는 골재입자 및 역청재료의 결합도에 직접적인 관계가 있기 때문에 시료의 한쪽으로 편심하중이 가해지지 않도록 안정도 헤드의 내부 형상은 시료의 표면에 등분포 하중이 가해지도록 정확한 규격으로 제작되어야 한다.

현재 국내에서 사용되고 있는 안정도 헤드중 대표적인 3가지의 안정도 헤드를 수집하여 헤드의 규격, 상부 및 하부 궁형의 이격거리, 시편의 안정도 및 흐름치를 측정 비교하였다. 수집된 안정도 헤드의 종류는 다음과 같다.

- 1) 자동안정도 시험기용 안정도 헤드(국내 제품)
- 2) 국내산 안정도 헤드
- 3) 국외산 안정도 헤드

상기의 안정도 헤드가 안정도 및 흐름치값에 미치는 영향을 시험하기 위해서 아스팔트 함량 4.5%, 5%, 5.5% 시편을 각각 5개씩 제작하여 안정도 시험을 실시하여 비교하였다. 비교 결과 국내에서 사용하고 있는 세 종류의 대표적인 안정도 헤드의 상하부의 내경, 내부지름, 높이 및 시료 설치 후 상 하부의 이격거리를 측정된 결과 세 종류의 안정도헤드 모두 역시 각각 다르게 측정되었다.

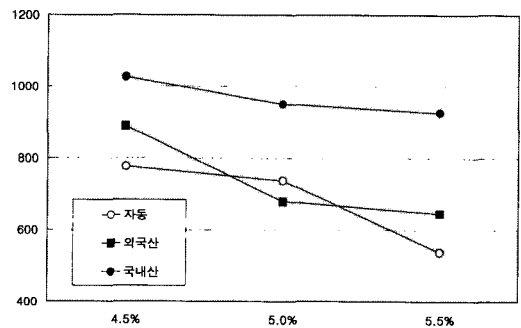


그림 6. 안정도헤드 종류에 따른 안정도 변화(kg)  
(박태순·권순태 미발표 자료)

그림 6은 세 종류의 안정도 헤드를 사용하여 동일한 조건에서 측정한 안정도 시험결과이다. 국내산 안정도를 사용한 시험결과가 가장 크게 나타났으며 자동 안정도헤드의 안정도 값이 가장 작게 나타났다. 안정도 값이 다르게 나타나는 이유는 안정도 헤드의 규격차이에서 발생하는 것으로 예상된다. 자동용 안정도 헤드의 경우 상부 안정도 헤드가 시료 전체를 고르게 누르고 있어서 안정도 값이 작게 나타나고 있으며 국내산 안정도 헤드는 헤드의 규격이 적절하지 못하여 시료 표면에 안정도 헤드가 닿지 않고 시료의 좌우 양편에 닿고 있어서 안정도 헤드가 시료면에 전체적으로 닿을 때까지는 가해지는 압력의 상승과 시간이 소요됨으로서 안정도 값이 측정되는 것으로 밝혀졌다. 한편, 외국산 안정도 헤드는 자동에 비하여 헤드 상부가 시료에 닿는 면적이 자동에 비하여 작고, 국내산에 비하여 크기 때문에 중간값을 보이고 있다.

② 다짐장치의 제원 조사결과

표 2는 다짐장치의 제원을 조사한 결과이다. 조사 결과에 의하면 강판의 두께는 모두 일정하

였으나, 받침목의 높이는 외국산 제품의 경우 425mm에서 457mm로 차이가 있었으며 국내 제품은 440mm에서 450mm로 측정되었다. 특히, 일부 국내 제품은 속이 비어있는 받침목을 사용한 다짐기도 있어서 타격시 발생하는 타격에너지의 흡수와 반동의 발생으로 인하여 다짐시에 혼합물에 전달되는 에너지에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다.

해머의 무게는 규격에 모두 미달하였는데 작게는 12.7g이 크게는 134g이 미도달되었으며, 낙하고의 편차는 외국산의 경우 -4.2mm로 국내산의 경우에는 +12.8mm로 측정되었다. 다짐장치를 설치한 기초바닥 및 설치하는 방법도 각 기관마다 서로 차이가 있었다. A 및 B 다짐기를 사용하고 있는 연구기관의 경우 타격시 건물의 충격을 줄이기 위해서 10mm 두께의 고무판을 두께 120mm 콘크리트 판 위에 설치하였으며, C, D, E장치를 사용하고 있는 기관의 경우에는 두께 22mm 철판을 두께 130mm 콘크리트 판 위에 설치하여 사용하고 있으며, 나머지 장치는 시험실의 콘크리트 바닥에 직접 설치하여 사용하고 있다.

표 2. 다짐장치 제원 조사결과

다짐장치	강판두께	받침목의 높이 (목재질)(mm)	설치 기초판	해머무게의 편차	낙하고의 편차 (mm)
A,B	25mm	457 (미상)	고무판 설치 콘크리트판 12cm	-12.7	453(-4.2)
C,D,E	25mm	425 (미상)	13cm 콘크리트판 위에 철판 22cm 설치	측정 불가능 (분리되지 않음)	측정불가능
F	25mm	490 (속이 비어있음)	콘크리트바닥에 철판1겹 설치	-134	460(+2.8)
G	25mm	440 (바닥에 미부착-양카볼트로 정착하지 않음)	콘크리트바닥에 철판1겹 설치	-80.5	470(+12.8)
H	25mm	440 (바닥에정착-양카볼트로 정착)	콘크리트바닥에 철판1겹 설치	-80	470(+12.8)
I	25mm	440 (속이 비어 있음)	콘크리트바닥에 철판1겹 설치	-127.2	470(+12.8)

### ③ 결과분석

각 제조회사마다 서로 다른 규격을 가지고 있어서 마찰시험 결과에 많은 편차를 주는 것으로 나타났다. 해머의 충격을 완화시키는 역할을 하는 다짐판 목재의 재료와 규격은 많은 상이함을 가지고 있었다. 특히, 다짐기를 설치한 기초 형식이 각 기관마다 달라서 시료에 가해지는 에너지를 매회 타격시마다 크게 다르게 나타나고 있다. 그 중에서도 속이 빈 받침목을 사용하고 있는 다짐기의 경우 차이는 더욱 심하게 나타났다. 반면, 다짐기의 기초를 콘크리트 판 위에 철판 또는 고무판을 설치한 다짐기는 비교적 다짐 에너지의 변화가 심하지 않았다. 이로부터 알 수 있는 사실은 다짐기 설치에 해머의 충격에너지를 충분히 완화시킬 수 있는 설치형식이 고려되어야 한다는 것이다.

각 다짐기마다 무게, 낙하높이, 목재의 재질이 서로 달라서 측정된 가속도를 근거로 어떠한 다짐기가 올바른 형식을 가지고 있는지 쉽게 결론을 낼 수 없는 실정이다. 그러나 한가지 분명한 사실은 본 연구에서 도출된 것처럼 국내의 마찰다짐장치는 가까운 시일 내에 규격의 재조사, 다짐기의 기초설치 조건의 명시, 안정도 헤드의 규격 재정의 등 여러 분야에서 국가적인 정비가 실시되어야 한다.

## 4.7 기타

### ① 포장단면의 변경

포장단면에 대한 변경은 일부 선진국가의 예를 살펴보면 우리 나라에 비하여 소성변형을 방지하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔음을 알 수 있다. 유럽국가의 경우 SMA포장, 상온포장 도입은 물론, 프랑스의 경우에는 SMA포장을 기존 SMA포장에 비하여 표층을 매우 얇게 하여 소성변형을 최대한 줄이고자 새로운 단면을 개

발하여 시험포장을 실시, 추적조사를 하고 있다. 영국, 프랑스, 독일, 네덜란드, 이태리는 같은 유럽 대륙 내에 위치하고 있지만 각국의 교통 및 기후 특성, 운전자의 운전 특성까지도 고려하여 서로 독자적인 포장단면을 개발하여 소성변형을 줄이기 위하여 노력하고 있다. 우리 나라에서도 우리의 실정과 특성에 적합한 포장단면을 개발하여 소성변형을 줄일 수 있는 적극적인 방안이 필요하다.

### ② 개질재의 사용

소성변형이 심화됨에 따라 국내에서는 이를 방지하기 위한 개선책으로 여러 가지 개질재를 도입하여 사용하고 있다. 아스팔트 개질재는 주로 아스팔트의 취약성이라고 할 수 있는 고온 특성을 개질한 것으로서 소성변형의 억제에 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 국내에서 그동안 여러 가지 개질재가 외국 수입 또는 자체 개발되어 사용되어 왔다. 그러나, 개질재를 사용할 때는 각 개질재의 특성, 경제성 및 개질로 인한 부작용을 미리 조사하여 개질재 사용의 목적에 알맞는 합리적인 계획을 실시하여야 한다. 특히, 개질재를 사용할 때는 일반 아스팔트 시멘트를 사용할 때와는 달리 플랜트의 아스팔트 공급라인, 생산후의 청소 문제 등이 달라지므로 플랜트 관리자는 사후처리에 각별한 신경을 써야 한다.

## 5. 맺음말

아스팔트 포장의 소성변형과 마모는 포장구조 및 재료의 특성상 시간의 경과에 따라 어느 정도 발생하는 매우 당연한 변화이다. 즉, 자동차의 바퀴와 포장면의 마찰로 인하여 표층에서는 마모가 발생하게 되고 시간이 경과함으로써 마모가 축적되어 변형이 발생하게 되는 것이다. 그러나, 국내에서 문제가 되고 있는 소성변형은

조기 및 심한 소성변형으로 이러한 불안정 소성변형은 배합설계 방법의 개선과 새로운 설계 기준 도입으로 반드시 개선되어야 한다. 유지보수 비용이 타 구조물에 비하여 4~6배 이상이며 도로교통 안전에 크게 영향을 미치고 있기 때문이다.

아스팔트 포장의 소성변형은 앞에서 열거한 원인이 단독적으로 또는 복합적으로 결합되어 발생하기 때문에 발생의 원인이 되는 아스팔트 시멘트와 골재에 대한 선정 절차를 도입함은 물론 배합설계 초기단계에서부터 철저한 관리를 실시하여 소성변형이 발생할 수 있는 가능한 원인을 근본적으로 제거하여야 한다. 특히, 다른 토목분야에 비하여 낙후된 아스팔트 포장분야에 새로운 시험법을 도입하는 노력이 있어야 한다. 그러나, 지금까지는 이러한 낙후성을 이유로 새로운 시험법의 제정이나 도입을 주저하고 있어서 실현이 매우 불가능하였으며 시방조건에 묶여 수동적으로 시험법을 운영하여 왔으나 이러한 장애 요소를 한시 바빠 해결함으로써 국내의 소성변형 문제는 빠른 시일내에 해결될 것으로 기대된다.

본고에서는 언급하지 않았지만 아스팔트 혼합물은 시험실에서의 배합설계, 플랜트제조, 시공의 세 단계를 거치기 때문에 이 세 단계가 모두 일치되었을 때 소성변형이 최소로 발생하는 우수한 품질을 갖춘 아스팔트 포장이 탄생하게 된다. 시간과 연구 여건이 허락되는대로 국내 플랜트의 현황과 시공상에서 발생할 수 있는 상황 및 문제점에 대해서도 연구검토하여 본 학회지를 통하여 투고할 예정이다.

## 참고문헌

1. 고석범, 박태순, 김수삼 (미발표 자료), 잔골재의 입형이 소성변형에 미치는 영향
2. 건설교통부, 한국자동차공업협동조합(1999), 통계편람
3. 박태순, 권순태(1998), 마찰시험장치가 아스팔트 혼합물의 특성에 미치는 영향, 서울산업대학교 건설기술연구소 보고서
4. 박태순, 권순태, 김용주 (미발표 자료), 국내 마찰시험장치 조사분석, 서울산업대학교 산업대학원
5. 서울시청, 통계청(1999), 서울시 통계편람
6. 중앙일보, 2000. 1. 15.
7. Dawley, C. B., Hogewiede, B. L. and Anderson, K. O.(1990), "Mitigation of Instability Rutting of Asphalt Concrete Pavements in Lethbridge, Alberta, Canada", Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 59, pp.481-508.
8. Ford, Miller C.(1988), "Pavement Densification Related to Asphalt Mix Characteristics", Transportation Research Record 1178, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.9-15.
9. Brown, E. R. (1990), "Density of Asphalt Concrete-How much is Needed?", Transportation Research Record 1282, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.27-32.