

# 장경간 강바닥판 교량용 에폭시 아스팔트 혼합물의 적용성 평가

## An Evaluation of Epoxy Asphalt Mixtures for Long-Span Steel Bridge Deck

백유진\* · 박창우\*\* · 김낙석\*\*\*

Baek, Yu Jin · Park, Chang Woo · Kim, Nakseok

### Abstract

The main objective of the research is to evaluate the laboratory performances of epoxy asphalt mixtures for long-span steel bridge decks. The aggregate gradations were recommended for field applications. The laboratory performance test results showed that the durability of epoxy asphalt mixtures was more noticeable than that of conventional ones. The structural analysis was conducted using resilient modulus and bond-shear test results. The analysis results revealed that just 9% out of total bond-shear stress was enough for the entire required bond-shear stress in the pavement system. The tensile stresses in the bridge decks were within limits compared to the laboratory test results from the Nanjing Grand Bridge in China. As a result, the laboratory performances of the epoxy asphalt mixtures for long-span steel bridge decks were better than those of conventional asphalt mixtures. However, the laboratory performance tests of epoxy asphalt mixtures for long-span steel bridge decks should be conducted precisely since the strengths of the mixtures are sensitive to the temperatures and curing times.

**Keywords** : long-span steel bridge decks, epoxy asphalt mixtures, durability, performance, curing

### 요 지

본 연구의 목적은 장경간 강바닥판 교량의 교면포장 재료로서 에폭시 아스팔트 혼합물을 평가하고, 현장에 적용하는 것에 있다. 에폭시 아스팔트 혼합물의 국내 적용을 위한 골재입도를 제시하였고, 실내 공용성 실험을 수행한 결과 내구성 면에서 매우 우수함을 알 수 있었다. 또한, 온도에 따른 회복탄성계수와 전단부착강도 시험결과를 활용하여 구조해석을 실시 후 전단응력 검토결과 전단부착강도의 9%로도 충분한 접착 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 에폭시 아스팔트 교면 포장에 발생하는 인장응력의 경우 중국에 시공되어 검증된 난징대교 실내시험결과와 비교 시 유사하거나 작은 값을 나타내어 충분한 공용 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 에폭시 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트에 비해 매우 우수한 내구성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 현장에서 장경간 강바닥판 교량의 교면포장 재료로서 에폭시 아스팔트 혼합물을 적용할 경우 온도와 양생기간에 따른 강도발현에 차이가 있을 수 있으므로 현장 적용 시, 생산 시료로 제작한 혼합물에 대한 평가가 이루어져야 한다.

**핵심용어** : 장경간 강바닥판 교량, 에폭시 아스팔트 혼합물, 내구성, 공용성, 양생

### 1. 서 론

교량 건설 기술의 발전에 따라 장경간 교량의 건설이 늘어나고 있다. 2000년 11월 영종대교, 2000년 12월 서해대교, 2002년 12월 평안대교의 개통을 시작으로 강바닥판 장대교량의 건설이 증가되고 있는 추세이며 최근에는 중앙경간이 1,545m인 여수시 묘도와 광양시를 연결하는 현수교가 건설되고 있다.

교량설계 및 시공기술이 발전하면서 도로포장분야에서도 교면포장에서 요구되는 조건을 충족시키고자 다양한 방식으로 교면포장공법을 연구 개발하였다. 최근 들어 많이 사용되는 교면포장공법으로는 SB라텍스(Styrene Butadiene Latex)

를 콘크리트에 혼합한 LMC 교면포장 공법과 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)를 사용한 포장 공법이 있으나, 이런 강성포장공법은 휨 추중성이 작아 강바닥판의 변형에 유연하게 대처하기 힘들고 강바닥판과 강성포장사이의 부착강도가 부족하여 장경간 강바닥판 교량에 적용하기에는 무리가 있다(이광호 등, 2000).

국내에서 주로 시공되어지는 강바닥판 교면포장공법으로 하부층에 구스 아스팔트를 시공한 뒤 상부층에 개질 아스팔트 또는 SMA 포장을 실시하는 공법이 있으나 구스아스팔트는 고온에서 시공되어 강바닥판의 열에 의한 변형을 초래할 수 있고, 고온에서의 유동저항성이 작아 소성변형에 취약하다는 단점이 있다(김낙석, 2004).

\*경기대학교 대학원 토목공학과 · 석사과정 (E-mail : lemon8738@naver.com)

\*\*정희원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 · 승화명품건설 · 박사과정 (E-mail : cwpark@newsh.co.kr)

\*\*\*정희원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : nskim1@kgu.ac.kr)

국내에서는 아직 본격적인 시공 경험이 없으나 국외에서 적용 중에 있는 장경간 강바닥판 교면포장으로 박층 교면포장공법인 에폭시 아스팔트 포장에 있다. 에폭시 아스팔트는 방수성능이 뛰어나며, 소성변형 저항성이 우수하다. 또한 기존 기술은 구스아스팔트와 개질아스팔트 등을 사용하여 약 80mm 내외의 포설두께를 확보하는 반면에 에폭시 아스팔트 포장은 50mm 이하로 시공할 수 있어 그에 따른 포장하중을 줄일 수 있으므로 교량의 장경간화를 위한 고정하중의 감소에 유리하다(조종석, 2011).

본 연구에서는 에폭시 아스팔트 포장의 실내 공용성 실험과 구조해석을 수행하여 국내 장경간 강바닥판 교량의 교면포장 재료로서 적용성을 평가하고자 하였다. 연구수행에 있어서 선행사례와 연구결과를 바탕으로 검토하였으며, 시공성 분석을 통해 현장 적용성을 평가하였다.

## 2. 에폭시 아스팔트

에폭시 아스팔트는 1950년대 미국 California주 Bay Bridge의 교면포장에 최초로 적용된 불투수성 포장재료로 안정성과 균열에 대한 저항성이 크고 부착성이 뛰어나다. 에폭시 아스팔트 바인더는 일반 아스팔트 바인더와 에폭시를 배합하여 제작한 열경화성 바인더로 아스팔트 혼합물을 열경화성으로 바꾸어 우수한 물리역학적 특성을 갖게 한다(Huang 등, 2003).

에폭시 아스팔트 혼합물은 일반적인 아스팔트 플랜트에 별도의 바인더 공급장치 정도의 개조만으로도 생산이 가능하다. 115~130°C의 온도로 생산되며 현장으로 운반한 혼합물은 일반 포설장비를 이용해서 포설한 후 롤러를 사용해서 공극률이 3% 이하가 되도록 전압하고 양생온도와 기간에 따른 강도의 차이가 생기므로 이를 고려하여야 한다. 에폭시 아스팔트 교면포장은 주로 미국에서 많이 적용되었고, 최근 중국에서도 미국 Chemco systems의 기술을 받아 들여 시공되고 있으며, 브라질, 캐나다, 베트남에서도 적용된 사례가 보고되고 있으나 국내에서는 시험포장과 같은 소규모이거나 장대교량이 아닌 곳에만 적용된 사례가 있다(김병헌, 2011).

## 3. 에폭시 아스팔트 혼합물의 재료적 특성

에폭시 아스팔트 혼합물의 실내 공용성 평가 및 현장 적용을 위하여 에폭시 아스팔트 바인더의 특성을 파악하고, 국내골재 현황에 적합하며 기준 물성을 만족하는 골재입도를

검토 하고자하였다.

### 3.1 에폭시 아스팔트 바인더

에폭시 아스팔트 바인더는 2액형의 반응형 재료로 A재(에폭시 레진)와 B재(아스팔트 + 경화제)를 혼합하여 사용하는 데 혼합물용과 본드 코트용이 있으며 각각의 배합비율과 경화특성이 다르다(Yu 등, 2009).

대표적인 에폭시 타입은 비스페놀 A(Bisphenol A)형이고, 촉매로는 NaOH가 사용된다. 제조 방법에는 직접법과 간접법이 있는데, 직접법은 비스페놀 A와 에피클로로하이드린(epichlorohydrin: ECH)을 저온(100°C)에서 반응시켜 제조하는 방법으로 고히에폭시수지를 얻을 수 있다. 간접법의 경우 액상에폭시수지에 촉매를 넣고 비스페놀 A를 추가 반응시켜 고온에서(160°C 이상) 고분자량화한 고히에폭시수지를 얻을 수 있다(이창훈, 2009).

제조반응을 화학식으로 나타내면 그림 1과 같다. 에폭시수지는 액상 또는 고체상으로 존재할 수 있는 다양한 물성을 가진 물질이나 경화제와 반응하여 경화가 일어나야 사용할 수 있다. 경화제는 가사시간, 점도, 경화온도, 발열, 경화물의 성질 등에 따라 선택하여야 하며 에폭시와 혼합 시 적합한 배합비를 찾는 것이 중요하다(이창훈, 2009).

#### 3.1.1 에폭시 아스팔트 바인더 경화반응 실험

본 연구에 사용된 에폭시 아스팔트 바인더는 혼합물용과 본드 코트용 두 종류인데 성분 및 배합비율에 차이가 있다. 혼합물용 바인더는 A재(에폭시 레진)와 B재(아스팔트 + 경화제)가 100:290의 비율로 혼합되며, 본드 코트용 바인더는 A재(에폭시 레진)와 B재(아스팔트 + 경화제)가 100:245의 비율로 혼합된다. 이와 같이 에폭시 아스팔트 바인더는 2액형의 반응형 재료로 에폭시와 경화제의 화학적 반응에 의한 경화와 아스팔트 바인더의 온도저하로 인한 경화가 발생한다. 본 연구에서는 경화특성을 알아보기로 에폭시 아스팔트 바인더를 120°C에서 A재와 B재를 혼합하여 80°C, 100°C, 120°C에 보관 후 일정시간이 지나면 경화반응을 정성적으로 평가하였다.

실험결과 혼합물용 에폭시 아스팔트 바인더는 80°C, 100°C에서 보관시켰을 경우 시간이 지나도 경화반응이 나타나지 않았으나 120°C에서는 60분이 경과하자 경화반응을 보이기 시작하였으며, 90분 이상 양생한 에폭시 아스팔트 바인더를 상온에서 24시간 보관 후 살펴보면 매우 단단한 상태를 확인할 수 있었다. 또한 본드 코트용 에폭시 아스팔트

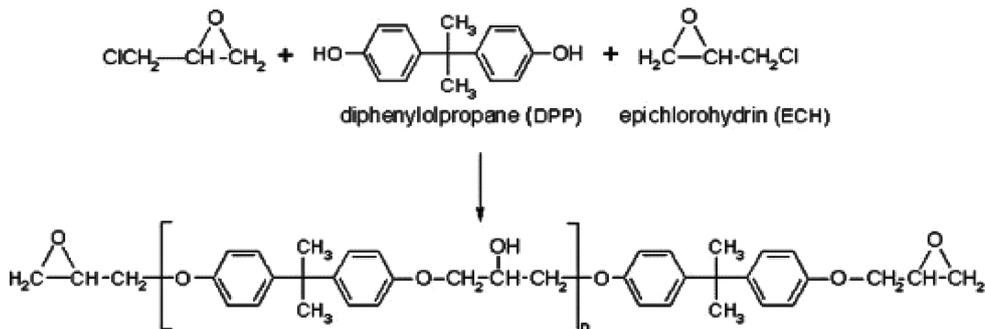


그림 1. 에폭시 수지의 제조반응

바인더는 120°C에서 30분후 경화반응이 나타났으며 상온에서 24시간 경과 후 매우 단단한 상태가 된 것을 확인할 수 있었다.

### 3.1.2 회전점도 실험

에폭시 아스팔트 바인더를 운송하고 혼합하기 위해 충분한 유동성이 필요하며 시공을 위한 워커빌리티의 확보를 위해서는 바인더의 점도를 관리해야만 한다. 본 연구에서는 SHRP (Strategic Highway Research Program)에서 채택한 회전점도실험을 통해 에폭시 아스팔트의 점도증가 경향을 분석하여 가사시간(작업가능시간)을 알아보고자 하였으며, 측정방법은 AASHTO TP 48(Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus) 규정에 따라 실험을 수행하였다.

에폭시 아스팔트 바인더의 경화반응은 서서히 진행되며 1,000cP는 유동성을 확보하고 있는 단계로 생산과 포설이 이루어지는 점도이다. 그림 2에서 나타나듯이 점도가 1,000 cP에 도달하는 시간을 각 온도별로 비교하였을 때 130°C는 43분, 120°C는 49분, 100°C는 50분으로 나타났으며, 온도의 변화에 따른 도달 시간의 차이는 크지 않았으나 1,000cP 도달 이후 온도가 높을수록 급격하게 점도가 증가하는 것으로 보아 경화반응이 본격적으로 시작되면 온도에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 가사시간을 결정하기 위해 미국의 SUPERPAVE 시방에서 제시한 3,000cP(3Pa.s)를 기준으로 하였다. 3,000cP(3Pa.s)는 SUPERPAVE 시방에서 규정한 펌핑과 고온 혼합이 가능한 최대 점도이다(McGennis 등, 1994). 이 점도를 시공 기준으로 하면 130°C는 약 58분, 120°C는 68분, 100°C는 약 90분의 가사시간을 확보할 수 있으며 이를 생산관리에 적용하면 효과적인 시공이 가능 할 것이다.

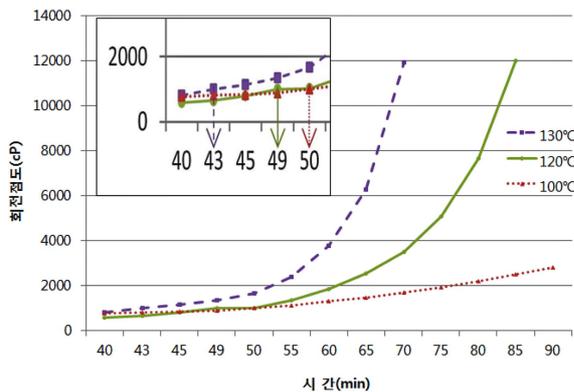


그림 2. 회전점도실험 결과

### 3.2 골재

에폭시 아스팔트 혼합물은 주로 강바닥판 교량의 교면포장으로 사용되므로 불투수층 포장으로 강바닥판을 보호해야 한다. 때문에 일반적인 골재 입도보다 매우 고운(Fine) 입도를 필요로 하며, 골재에 대한 특별한 품질 평가와 입도 관리가 요구된다.

에폭시 아스팔트 포장은 주로 미국과 중국 등 해외에서는 시공 경험이 있으나 국내에서의 본격적인 시공 경험이 없기

때문에 에폭시 아스팔트 포장에 적합한 골재 합성입도가 없다. 그러나 국내의 골재의 사정이 각각 다르기 때문에 국외 입도 기준을 그대로 적용 시킬 수 없으므로 본 연구에서는 국내 골재 현황을 고려한 입도를 제시하고자 그림 3과 같이 회피구역을 설정하여 에폭시 아스팔트 포장에 적합한 입도로 배합설계를 하도록 유도하였다. 회피구역은 SUPERPAVE 골재 입도의 회피구역과 비슷한 개념으로 가능한 이를 피해 합성입도를 선정하는 것이다. 산지가 다른 굵은골재 2종, 잔골재 4종을 사용하여 배합입도에 대하여 검토하였으며 기준 공극률 3% 이하를 만족시킬 수 있는 표 1과 같은 합성입도를 제시하였다.

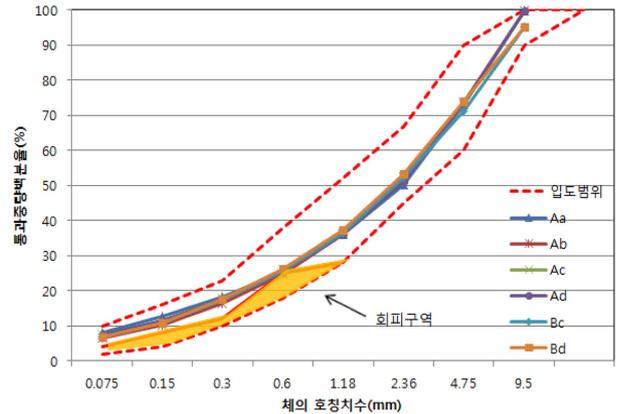


그림 3. 제안 입도 및 회피구역

표 1. 에폭시 아스팔트 혼합물의 제안입도

체크기	범위(%)	회피구역(%, 이상)
13mm	100	
10mm	100-90	
4.75mm	90-60	
2.36mm	67-45	
1.18mm	52-28	
0.6mm	38-18	25
0.3mm	23-10	12
0.15mm	16-4	8
0.075mm	10-2	4

## 4. 실내공용성 평가

### 4.1 배합설계

배합설계의 목표 공극률은 2% 이하로 결정하였다. 바인더는 A재와 B재를 배합비율에 맞도록 혼합하였고, 굵은 골재는 KS F 2357 기준에 만족하고 편장석 함유율 10% 이하의 화강암 골재를 사용하였으며, 잔골재는 KS F 2357 잔골재 품질기준을 만족하는 부순모래를 사용하였다. 골재입도는 본 연구에서 제안한 표 1의 입도를 적용하였다. Huang 등 (2003)과 Lou 등(2007)의 연구를 참고하여 바인더의 함량 범위를 6.5%, 7.0%, 7.5%으로 정하였고 기초 물성과 마찰 안정도 실험을 수행하였다.

공시체는 바인더 함량에 따라 제작한 후 양생기간에 따른 강도발현 경향을 알아보기 위해 60°C 오븐에서 무 양생, 1일, 4일, 7일 양생을 실시한 후, KS F 2337(마찰 시험기를

사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법)에 따라 공시체를 60°C 항온수조에서 30분간 수침 후 안정도와 흐름값을 측정하였으며 실험결과는 그림 4와 같다.

무 양생, 1일 양생에서는 강도가 약 1.7배~2.0배 증가하였으나, 4일 양생을 실시한 에폭시 아스팔트 혼합물에서는 모든 에폭시 바인더 함량에서 1일 양생에 비해 약 4.1~4.6배 높은 안정도를 나타냈으며, 그 이상 양생기간이 늘어나도 강도 값은 유사하게 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

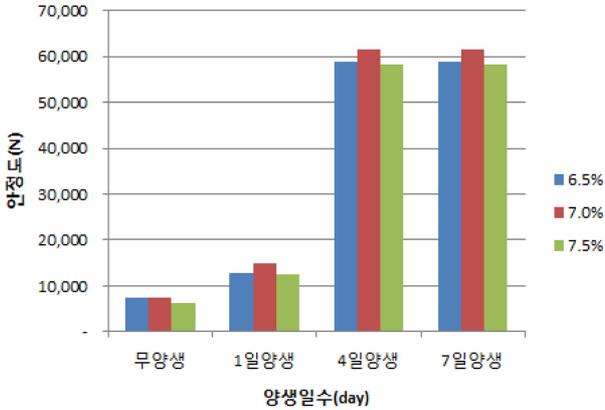


그림 4. 배합설계를 위한 안정도 결과

마찰 안정도 실험결과 최적아스팔트 함량은 최대 안정도를 나타내는 6.8%로 결정되었고 아스팔트 혼합물의 기초물성과 안정도 및 흐름값은 표 2와 같다.

최적 아스팔트 함량을 적용하여 제조한 에폭시 아스팔트 혼합물을 60°C 오븐에서 4일 양생시킨 후 마찰 안정도 실험을 수행한 결과 65,916N의 안정도와 흐름값 42(0.1mm)가 측정되었다. 이는 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물의 안정도가 약 7,000N~15,000N임을 고려했을 때 4~9배, 국외 선행 연구 결과 40,000N 보다 1.65배 높은 안정도를 나타내었다(上海江大理公室第理, 2009).

#### 4.2 간접인장강도

간접인장강도 실험은 혼합물의 수직인 직경면을 따라 평행하게 작용하는 압축 하중을 가함으로써 에폭시 아스팔트 혼합물의 공용성 평가 및 온도에 따른 균열저항성을 측정하는 실험이며, 실험 방법은 KS F 2382(아스팔트 혼합물의 간접인장강도 시험방법)에 따라 수행하였다.

에폭시 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 평가하고자 하였으며, 본 연구에서 제한한 함성입도에 일반 스트레이트 아스팔트를 사용한 혼합물을 제작하여 비교 분석하였다. 실험온도는 에폭시 아스팔트 혼합물은 0°C, 25°C, 35°C, 45°C, 58°C, 70°C, 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물은 0°C, 25°C, 45°C, 70°C 온도에서 각 온도 별로 3회 수행하였다.

실험결과는 표 3과 같다. 에폭시 아스팔트 혼합물은 0°C에서 시험기의 최대하중인 10ton을 초과하여 간접인장강도를 구할 수 없었고, 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물은 70°C에서 완력으로 손상될 정도로 혼합물의 강도가 저하되어 실험이 불가능 하였으므로 성능을 비교할 수 있는 25°C와 45°C강도를 비교하였다. 비교한 결과 25°C에서 에폭시 아스팔트 혼합물은 4.63MPa, 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물은 1.45MPa로 약 3.1배, 45°C에서는 각각 2.41MPa과 0.3MPa로 측정되어 약 8배 정도 크게 측정되어 에폭시 아스팔트 혼합물의 간접인장강도가 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 또한 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물은 45°C에서 0.3MPa로 45°C 이상의 온도에서는 강도를 측정할 수 없었으나, 에폭시 아스팔트 혼합물의 경우 70°C에서도 0.93MPa를 나타내어 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물에 비해 저온과 고온에서 균열저항성이 우수한 것으로 나타났다.

표 3. 간접인장강도 결과

온도 (°C)	에폭시 아스팔트 혼합물		일반 스트레이트 아스팔트 혼합물	
	간접인장강도 (Mpa)	변위(mm)	간접인장강도 (Mpa)	변위(mm)
0	최대하중 초과로 측정불가		4.72	1.28
25	4.63	2.26	1.45	3.29
35	3.37	2.98		
45	2.41	2.97	0.3	2.92
58	1.38	2.73		
70	0.95	2.22	완력으로 손상	

#### 4.3 잔류인장강도비

아스팔트 혼합물 포장에 있어서 수분은 다양한 파손의 원인이 된다. 아스팔트 혼합물의 공극사이로 물이 침투하게 되면 아스팔트와 골재사이의 부착력이 상실되는 박리 현상이 발생하여 포장체의 균열 또는 골재의 탈리가 발생하게 되고, 강바닥판의 경우 침투수로 인해 부식이 발생할 수 있으므로 수분 민감성에 대한 평가는 매우 중요하다.

본 연구에서는 잔류인장강도를 측정하기 위해 AASHTO T 283(Standard Method of Test for Resistance of Compacted Moisture Induced Damage)에 따라 잔류인장강도를 측정하여 수분 민감성을 평가하였다. TSR은 높을수록 유리한 것으로 알려져 있으며, NCAT에서는 TSR이 0.7 이상이 되도록 권장하고 있다(Brian 등, 2009)

수분의 영향 및 동결융해에 대한 반응을 측정하기 위해 수중 진공 포화기를 이용하여, 25°C 수조에 수침시킨 후 진공처리(55~80%의 포화)하고 온도 챔버를 이용하여 -18°C에서 16시간 동안 1회 동결시켰다. 동결실험을 마친 시료는 60°C의 항온수조에서 24시간 수침하여 용해를 거쳐 25°C

표 2. 아스팔트 혼합물의

AP함량	공시체	밀도 (ton/m <sup>3</sup> )	평균 (ton/m <sup>3</sup> )	이론최대밀도 (ton/m <sup>3</sup> )	공극률 (%)	포화도 (%)	간극률 (%)	안정도 (N)	흐름값 (0.1mm)
6.8%	1-1	2.43	2.43	2.452	1.03	93.6	17.4	65,916	42
	1-2	2.42							
	1-3	2.43							

수조에 2시간 수침시킨 후 간접인장강도를 구하였다. 실험은 동결융해 처리한 혼합물과 처리하지 않은 혼합물 각각 3회 수행하였다.

인장강도비 (TSR)을 구하는 식은 식 (1)과 같으며, 결과는 표 4와 같다. 에폭시 아스팔트 혼합물의 TSR은 0.89로 기준인 0.7보다 높은 값을 나타냈으며, Lou 등(2007)의 연구에서도 에폭시 아스팔트 혼합물의 TSR이 0.81로 나타나 에폭시 아스팔트 혼합물의 수분 민감성이 우수한 것으로 나타났다.

인장강도비(TSR)

$$= \frac{\text{수분포화 후 공시체의 인장강도(N/mm}^2\text{)}}{\text{건조 공시체의 인장강도(N/mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

표 4. 인장 강도비(TSR)

종 류	기준시료	처리시료
ITS	5.139MPa	4.57MPa
TSR (0.7≤)	0.89	

#### 4.4 회복탄성계수

회복탄성계수( $M_R$ )는 반복하중 하에서의 변형특성을 규명하는 것으로 교통하중에 대하여 포장체의 거동특성과 피로 특성을 파악할 수 있다. 아스팔트 혼합물은 점탄성 재료로 온도에 민감하여 기후환경에 따라 특성을 달리하게 되므로 온도에 따라 반복하중 하에서의 변형특성을 평가해야 한다(이경하, 1997).

에폭시 아스팔트 혼합물과 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물을 제작하여 ASTM D 4123-82(Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures)에 따라 실험을 수행하였다. 온도조건은 에폭시 아스팔트 혼합물의 경우 간접인장강도 실험과 동일한 온도에서 실험을 수행하였고, 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물은 0°C, 25°C, 45°C 온도에서 실험을 수행하였다. 재하횟수는 151회, 하중은 간접인장강도의 최대하중의 20%를 재하 하였으며 각 온도에 따라 3회 실험을 수행하였으며 실험결과는 표 5와 같다.

에폭시 아스팔트 혼합물과 일반 스트레이트 아스팔트 혼합물을 비교하면 0°C에서 에폭시 아스팔트 혼합물이 1.75배 높은 회복탄성계수를 보였으며, 25°C에서는 3배 높은 회복탄성계수를 보여 차량의 반복하중에 따른 탄성적인 회복력이 강하며 소성변형 및 피로균열에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 측정된 회복탄성계수는 구조해석을 위한

표 5. 회복탄성계수 실험 결과

온도 (°C)	회복탄성계수( $M_R$ , MPa)	
	에폭시 아스팔트 혼합물	스트레이트 아스팔트 혼합물
0	21056	11979
25	10793	3607
35	4375	-
45	2137	1221
58	1114	-
70	861	-

입력값으로 사용되었다.

#### 4.5 전단부착강도

포장 하부층의 변형이 크게 발생하는 교면포장에서 강바닥판과 포장면간의 부착이 잘 이루어질 경우 포장체는 휨하중에 대한 저항성이 커지지만 포장층간에 부착이 불충분하면 포장체는 휨하중에 제대로 저항하지 못하여 구조적으로 취약해 진다. 때문에 교면포장 설계 시 적절한 전단부착강도의 고려가 필요하다.

실험은 ACI 503R(Use of Epoxy Compounds with Concrete)에 따라 수행하였으며, 전단부착강도용 시험체는 실제 현장조건과 동일하게 제작하기 위해 강바닥판에 슛블라스트 처리를 한 후 그 위에 본드 코트용 에폭시 아스팔트 바인더를 살포하고 미리 제작된 에폭시 아스팔트 혼합물을 부착시켰다. 접착층의 부착강도를 측정하기 위해 그림 5와 같은 45°의 경사로 전단력을 발생 시켰다. 본 연구에서는 45°의 경사를 주어 수평방향과 수직방향 하중을 동시에 고려하여 공용 중에 교량이 받는 하중을 모사하고자 하였다.

하중 속도는 50mm/min의 속도로 재하 하였으며 계절에 따른 교량상판의 온도변화에 대한 접착강도를 평가하기 위해 17°C와 60°C의 온도조건에서 실험을 하였다. 전단강도를 구하는 식은 식 (2)와 같으며 결과는 표 6과 같다. 전단부착강도는 17°C에서 14.06MPa, 60°C에서는 2.44MPa를 나타냈으며, 유한요소 해석을 통해 전단응력과 비교하여 공용 성능을 평가하였다.

$$\text{전단강도} = \frac{\text{하중(N)}}{\text{면적(mm}^2\text{)}} \times \cos\alpha \quad (2)$$

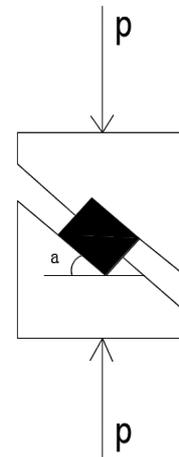


그림 5. 전단부착강도 실험방식

표 6. 온도에 따른 전단부착강도 비교

온도(°C)	하중(N)	면적(mm <sup>2</sup> )	전단강도(MPa)
17	95,090	4,781.6	14.06
60	16,480	4,781.6	2.44

#### 4.6 유한요소 해석

에폭시 아스팔트 혼합물을 사용한 교면포장의 교통하중에 대한 거동을 국내 시공 중인 장경간 강바닥판 교량에 적용

하여 3차원 유한요소 해석을 통해 분석하고, 유사 해외사례의 실험 및 해석결과와의 비교분석을 통해 공용성을 평가하고자 하였으며 해석의 물성인자로는 회복탄성계수와 전단부착강도를 사용하였다. 포장체의 거동분석을 위해서는 구조계의 상세한 모형화가 필요하므로 보강거더 중 강바닥판의 거동을 대표할 수 있는 부위를 선정하여 부분해석을 수행하였다. 이러한 모형화 기법은 중국 난징대교를 비롯한 국내외 장대교량의 포장검토에 적용된바 있는 일반적 형태이다. 본 연구에서 사용한 부분 해석모형은 폭 3.6m, 길이 3m 제한으로 가로보 2개를 포함하고 있다. 해석 프로그램은 LUSAS Bridge v14.5를 이용하였으며 유한요소 해석을 위한 모형 적용 변수는 표 7과 같다.

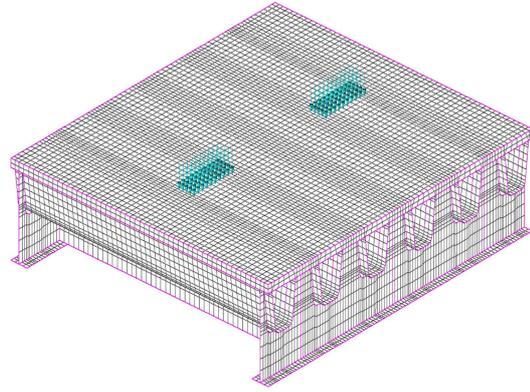


그림 7. 하중 재하 단면도

표 7. 유한요소 해석 모형 적용 변수

구분	재료	탄성계수 (GPa)	요소	두께 (mm)
Web	steel	210	thin shell	10
Diaphragm	steel	210	thin shell	14
U-Rib	steel	210	thin shell	8
Deck Plate	steel	210	thin shell	14
에폭시 아스팔트 혼합물	concrete	0.86~21.06 <sup>1)</sup> (temperature variant)	solid	50

<sup>1)</sup>온도별 탄성계수 실험결과에 근거하여 0°C, 35°C, 45°C, 58°C, 70°C의 탄성계수를 각각 21.06GPa, 4.38GPa, 2.14GPa, 1.11GPa, 0.86GPa로 취함

포장체의 응력분포는 윤택중으로 인한 강바닥판의 국부거동에 의해 지배되므로 강바닥판 및 포장체에 가장 불리하도록 그림 6과 같이 부분해석모형의 중앙에 DB-24 후륜하중 2개에 해당하는 하중을 접지압으로 재하 하였다. 그림 7은 유한요소 해석 시 하중 재하 단면도이다(단위면적당 하중=0.72MPa). 전단응력에 대한 해석 결과는 표 8과 같다. 포장체와 바닥강판 사이에 발생하는 58°C의 전단응력과 60°C의 전단부착강도를 비교한 결과 측정된 교축방향 최대 전단응력은 0.2287MPa로 본드 코트용 에폭시 아스팔트 바인더가 갖는 전단부착강도의 약 9%에 해당하는 매우 작은 응력을 나타냈다.

장경간 강바닥판 장대교량에 대한 해석의 객관화를 위해 동일한 재료로 시공된 난징 제2, 제3 대교를 비교대상으로 정하였다. 이 대교의 포장층은 1,200만회 이상의 피로시험

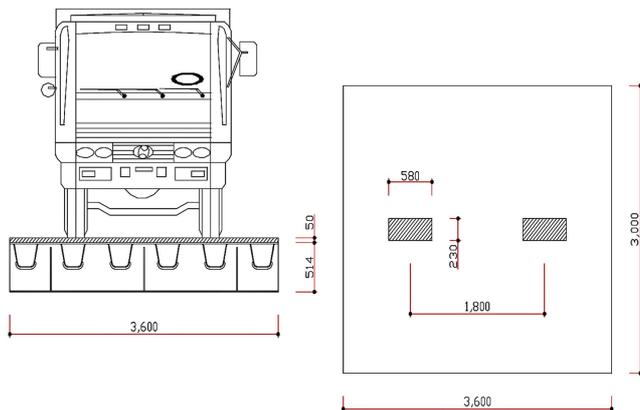


그림 6. 차량하중 재하 위치

결과를 바탕으로 공용수명 5년 이상으로 설계되었다. 포장층의 피로수명은 인장응력에 의해 지배되며 유한요소해석 결과는 표 9와 같다.

본 연구에서 검토한 에폭시 아스팔트 혼합물을 사용한 장경간 강바닥판 교량에 발생하는 최대인장응력은 난징대교의 응력 대비 소폭 적거나 유사한 수준이며, 최대 전단응력이 전단부착강도보다 매우 작은 것으로 나타나 에폭시 아스팔트 혼합물은 장경간 강바닥판 교량의 포장 재료로서 충분한 공용성 확보가 가능한 것으로 나타났다.

표 8. 포장층 유한요소해석 결과

온도 (°C)	탄성계수 (Mpa)	탄성계수비 (n)	교축방향 최대전단응력 (MPa)	교축직각방향 최대전단응력 (MPa)
0	21,056	10	0.6680	1.3507
35	4,375	48	0.4356	0.8448
45	2,137	98	0.3174	0.5658
58	1,114	189	0.2287	0.3684
70	861	244	0.2009	0.3247

표 9. 포장층 유한요소해석 결과

온도 (°C)	에폭시 아스팔트 혼합물 장경간 강바닥판 교량		난징대교(2nd & 3rd)	
	실험 탄성계수비(n)	최대인장응력(MPa)	가정 탄성계수비(n)	최대인장응력(MPa)
45	98	1.114	100	1.257
58	189	0.710	200	0.923
70	244	0.581	500	0.576

## 5. 양생 특성

### 5.1 실외 양생

교량의 교면포장으로 에폭시 아스팔트 혼합물을 사용한 경우 60°C에서 96시간 양생시키는 것은 사실상 불가능하므로, 실외 양생을 실시하는 현장모사를 통해 발현되는 강도의 경향성을 알아보고자 하였다. 그림 8과 같이 에폭시 아스팔트 혼합물을 하절기에 직사광선에 노출되는 실외에 보관하고 매 시간마다 혼합물의 온도와 그날의 최고, 최저 기온을 기록하고 양생일수에 따른 강도를 측정하여 혼합물 표면의 온도증가와 그에 따른 강도발현과의 관계를 알아보고자 하였다.



그림 8. 실외양생

실험결과는 표 10과 같다. 직사광선에 노출되었으며 일 최고기온이 30°C 이상인 날을 기준으로 9일이 지난 공시체는 전면 교통 개방 가능 안정도 40,000N 보다 큰 50,930N의 강도를 발현하는 것을 확인할 수 있었으며 실외양생 21일 이후 강도가 더 이상 증가하지 않고 유사하게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 임시 교통 개방 가능 안정도 25,000N 이상과 전면 교통 개방 가능 안정도 40,000N 이상은 중국 난징대학교에서의 적용기준과 본 연구에서의 결과를 종합하여 결정하였다. 에폭시 아스팔트 혼합물은 기후조건과 온도에 따라 강도발현에 차이가 발생할 수 있으므로 현장에 시공하였을 경우 생산 시료로 제작한 혼합물을 실외 양생을 실시하여 안정도를 확인하고 교통을 개방하여야 한다.

표 10. 실외양생 실험결과

양생조건		마살안정도(N)
실외양생(day)	직사광선 노출(day)	
4	3	7647
10	5	13765
16	9	50,930
18	10	54,770
21	11	58,630
22	12	58,620
임시 교통 개방 가능 안정도		25,000
전면 교통 개방 가능 안정도		40,000

## 6. 결 론

본 연구에서는 장경간 강바닥판 교량의 교면포장 재료로서 에폭시 아스팔트 혼합물을 적용하기 위해 실내 공용성 실험 및 구조해석을 실시하였다. 또한 에폭시 아스팔트 혼합물의 현장 적용을 위한 시공성을 평가하였으며 결과는 다음과 같다.

1. 에폭시 아스팔트 포장의 국내 적용을 위해 국내 골재 사정을 감안한 새로운 입도를 제시하였다. 본 연구를 통해 제시한 골재입도는 공극률 기준 3% 이하를 만족하도록 하기 위해 회피구역을 제안하였으며, 이를 적용한 에폭시 아스팔트 혼합물의 실내 실험 결과 마살 안정도는 65,916N으로 매우 높은 값을 나타냈고, 간접인장강도의 경우 25°C에서 4.63MPa로 일반 아스팔트 혼합물에 비해 3.2배 높게 나타났다. TSR은 0.89로 기준 0.7에 비해 우수한 수분 민감성을 보여 일반 아스팔트 혼합물에 비해

에폭시 아스팔트 혼합물이 내구성 면에서 매우 우수한 것으로 나타났다. 이는 일반 아스팔트 바인더와 에폭시를 배합하여 아스팔트 혼합물을 열경화성으로 바꾸어 물리 역학적 특성이 향상되었기 때문이다.

- 반응형이며 열경화성 특성을 갖는 에폭시 아스팔트 콘크리트의 현장 적용에는 가사 시간이 중요하며 이를 평가하기 위해 회전점도 실험을 실시하여 점도 증가 경향을 분석하였다. 에폭시 바인더 교반 후 점도 3,000cP 도달 시간은 생산온도 100°C에서 90분, 120°C에서는 68분, 그리고 130°C에서는 58분으로 측정되었다. 점도 3,000cP는 SUPERPAVE 시방의 바인더 펌핑 및 혼합시 점도임으로 본 가사 시간을 생산 후 최대 포설 가능 시간으로 적용하여도 충분한 다짐 효과를 얻을 수 있으며 이를 기준으로 생산 관리에 적용하여 효과적인 시공이 가능 할 것이다.
- 장경간 강바닥판 교량에 에폭시 아스팔트 포장의 적용성 평가를 위해 온도에 따른 회복탄성계수와 전단부착강도를 사용하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석 결과 접착면에 발생하는 전단 응력이 실험을 통해 측정된 에폭시 아스팔트 바인더 본드 코트의 접착 강도의 9%에 불과하여 충분한 접착강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났으며 이는 바인더 내에 적정 비율로 배합된 열경화성 에폭시 수지와 경화제가 고온에서 화학반응을 일으켜 높은 부착력을 발현한 것으로 판단됨으로 강바닥판 교량에 적용시 충분한 공용 성능을 확보할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2012학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국토해양부(2011) **교면포장 설계 및 시공 잠정치침**.  
 김낙석(2004) 구스아스팔트 혼합물의 교면포장 적용성 개선 연구, **산업기술융합연구소 논문집**.  
 김명재(2004) 서울시 교면포장의 현황분석 및 개선방안 연구, 석사학위논문, 세종대학교.  
 김병현(2011) 비스페놀형 에폭시 아스팔트 혼합물의 물리적 특성 연구, 석사학위논문, 세종대학교.  
 아스팔트포장연구회(1999) **아스팔트 포장공학 원론**, 한국도로포장공학회.  
 이광호, 옥창권(2000) 굴현대교 강상판 쇄석매스티아스팔트 교면포장 시공사례, **한국도로포장공학회지**, 한국도로포장공학회, Vol. 2, No. 1, pp. 64-71.  
 이경하(1997) 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 특성분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, Vol. 17, No. 3-4, pp. 337-348.  
 이창훈(2009) **실용 에폭시 핸드북**, 교우사.  
 조종석(2011) **장대교량 강바닥판의 박층포장 적용성에 관한 연구**, 석사학위논문, 한양대학교.  
 上海江大办公室第理(2009) **理生**, 上海江隆 A14 施工.  
 상해 장강 대교 종합 감리 본부 사무실 VII 관리 그룹(2009) 건강의 요약 보고서의 위원, 상해 장강 삼각주 터널 및 교량 A14 표준 에폭시 아스팔트 아스팔트 공사.  
 Brian D. Prowell, Donald E. Watson, Graham C. Hurley, and E. Ray Brown (2009) **Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for Airfield Pavements**, Prepared for Airfield Asphalt Pavement Technology Program, NCAT.

- Huang, W., Qian, Z., Chen, G., and Yang, J. (2003) Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridge, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 48, pp. 2391-2394.
- Lou, S., Wang, J., and Qian, Z. (2007) Research on the performance of locally developed epoxy asphalt mixes. *26th Annual Southern African Transport Conference(SATC)*, South Africa, pp. 736-744.
- R.B. McGennis, S. Shuler, and H.U. Bahia (1994) *Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods*, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, FHWA.
- Yu, J., Cong, P., and Wu, S. (2009) Laboratory Investigation of Asphalt Modified with Epoxy Resin, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 113, pp. 3557-3563.
- AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Moisture Induced Damage.
- AASHTO TP 48, Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus.
- ACI 503R, Use of Epoxy Compounds with Concrete.
- ASTM D4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.

(접수일: 2011.12.28/심사일: 2012.1.19/심사완료일: 2012.7.9)