

폴리머 콘크리트 포장을 적용한 강바닥판의 피로응력에 관한 해석적 연구

Analysis Study on Fatigue Stress on the Orthotropic Steel Deck Applied Polymer Concrete Pavement

한 범 진¹⁾ 윤 상 일²⁾ 최 병 진³⁾ 최 진 웅⁴⁾ 박 선 규^{5)*}
Bum-Jin Han Sang-Il Yoon Byung-Jin Choi Jin-Woong Choi Sun-Kyu Park

Abstract

In this study, polysulfide epoxy polymer concrete was chosen as an ultra thin bridge deck overlay, and the effect of polymer concrete pavement on the fatigue stress range of the orthotropic steel deck was analyzed through the comparative analysis with epoxy asphalt pavement and SFRC pavement. Abaqus was used to estimate the fatigue stress range, and signed von-mises stress was used to estimate fatigue stress range according to pavement materials and thickness, considering there were multi axis stresses which have longitudinal and lateral direction on the welded parts of the steel deck.

Keywords : Fatigue stress range, Orthotropic steel deck, Polymer concrete, Signed von-mises, Ultra-thin bridge deck overlay

1. 서론

최근 교량의 장대화·장기간화에 따라 최대주경간은 점차 증가하는 추세이며, 장대교량의 경우 경간장이 길어질수록 전체 하중에서 고정하중이 차지하는 비율이 지배적이게 되므로 장대교량 관련 기술들은 교량의 자중을 줄이는 것에 초점을 맞추고 있다. 이에 따라 교량의 자중을 줄이고자 하는 노력의 일환으로 초박층 교면포장재의 연구개발도 이루어지고 있다 (Oh et al., 2009; Kim, 2012).

한편 기존 설계기준이나 해석에서는 교면포장은 하중으로만 반영이 되어 포장의 강성이 전체 시스템에 기여할 수 있는 부분이 고려되지 않아 보수적인 설계가 이루어져 왔다. 이에 조금 더 합리적인 설계를 위한 노력으로 교면 포장의 강성 및 하중분배효과가 강바닥판에 미치는 영향에 대한 연

구 (Lee et al., 2003; Kyung et al., 2006; Lee et al., 2010; Park, 2011)가 지속적으로 이루어지고 있으며, 최근 도로교 설계기준 (Limit State Design, 2012)에서는 일정한 조건하에서 포장의 강성에 대한 영향을 설계에서 고려하는 것을 허용하고 있다. 하지만 초박층 교면포장이 강바닥판 구조에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 강바닥판의 피로응력을 산정하기 위해 Abaqus를 이용한 유한요소해석을 사용하여 비교 평가하였고, 최근 국내에서 초박층 교면포장 재료로 개발 중인 폴리설파이드 에폭시 폴리머 콘크리트 포장 (Polysulfide Epoxy Polymer Concrete) 과 비교대상으로 설정한 에폭시 아스팔트 (Epoxy Asphalt), SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) 포장의 비교 분석을 통해 폴리머 콘크리트 포장이 강바닥판의 피로응력에 어떤 영향을 미치는 지 분석하고자 하였다.

1) 정회원, 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사
2) 정회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정
3) 정회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정
4) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정
5) 정회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : skpark@skku.edu

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 유한요소해석 모델

2.1 구조 모델

2.1.1 모델 교량 개요

본 연구에서는 2012년 완공된 M 교량을 모델 교량으로 하였다. 모델 교량은 총 연장 900m로 3경간 연속 3-WAY 케이블 사장교 형식으로 경간구성은 $L = 200 + 500 + 200 = 900\text{m}$ 이다. 거더 형식은 Fig. 1과 같이 유선형 Box 형태의 폐합단면을 가진 강바닥판이며, 종리브, 횡리브를 비롯한 강바닥판의 제원은 Table 1과 같다.

2.1.2 유한요소해석 모델링

본 연구에서는 정밀한 해석을 위해 상용 프로그램인 Abaqus를 이용하여 Fig. 1의 단면을 기초로 수치해석모델을 Fig. 2와 같이 구현하였다. 유한요소해석을 위해 모델교량의 거더 중 지점 간의 간격이 가장 긴 중앙부 21m 구간을 선택하였으며, 경계조건을 만족시키기 위해 양쪽으로 3m씩을 연장하여 모델링하고 케이블 지점을 고정단으로 설정하였다.

1) 요소 선정 및 접촉면 설정

유한요소모델은 Fig. 3, Table 2와 같이 강바닥판, 접착(방수)층 그리고 포장층으로 구분되며, 세 가지 구조를 통합해 구축한 강바닥판 모델링으로 정밀한 유한요소해석을 수행하였다. 접착(방수)층과 포장층을 제외한 모든 구조물은 쉘요소(shell element)를 사용하였으며, 머지(merge) 기능을 이용하여 하나의 일체화된 구조물로 모델링 하였다. 접착

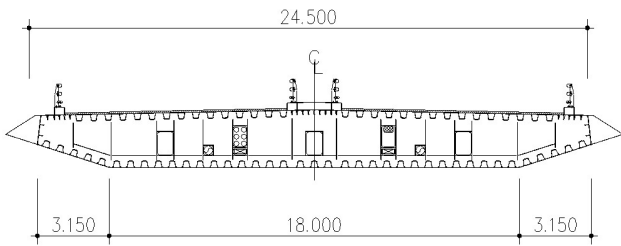


Fig. 1 Cross Section of the Girder for Analysis

Table 1 Initial Value of the Girder

Wearing surface	Thickness	12 mm
	Type	Polymer Concrete
Deck plate	Thickness	14 mm
	Rib span	3000 mm
Floor beam	Length of web	800 mm

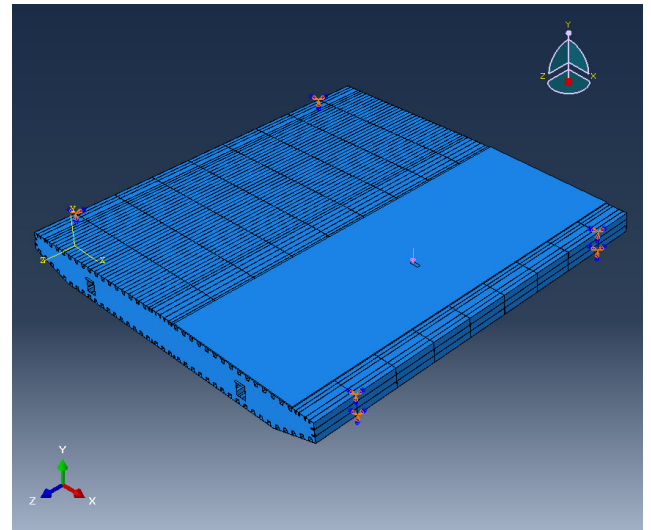


Fig. 2 Modeling for Finite Element Numerical Analysis

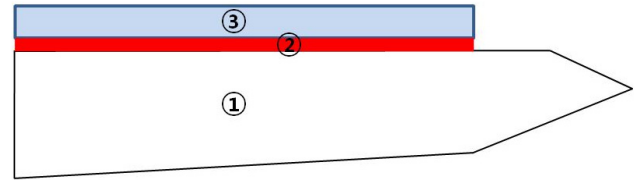


Fig. 3 Cross Section of Modeling Layers

Table 2 Element Types of the Layers

No.	Layer	Element Type	Interaction
①	Deck plate	shell	
②	Adhesive layer	cohesive	tied
③	Wearing surface	continuum shell	tied

(방수)층은 강바닥판과 포장층 사이의 접착을 고려할 수 있으면서 접착(방수)층 자체의 두께도 고려할 수 있는 코히시브 요소(cohesive element)를 사용하였으며, 포장층은 두께를 실질적으로 고려하며 해석시간을 절약할 수 있는 컨티늄 쉘 요소(continuum shell element)를 사용하여 모델링하였다. 그리고 강바닥판-접착(방수)층, 접착(방수)층-포장층 각각의 접촉면은 타이(tie)연결로 모델링하였고, 각각 접촉면의 미끄럼 영향은 본 해석에서 고려하지 않았다.

2) 메쉬(mesh)

강바닥판은 4절점 요소인 S4R, 접착(방수)층과 포장층은 각각 6면체 요소이면서 8절점 요소인 COH3D8와 SC8R를 적용하였다. 강바닥판의 경우 사전에 간략한 모델링을 통해 운하중의 영향이 미치는 범위를 설정하여 Fig. 4와 같이 해

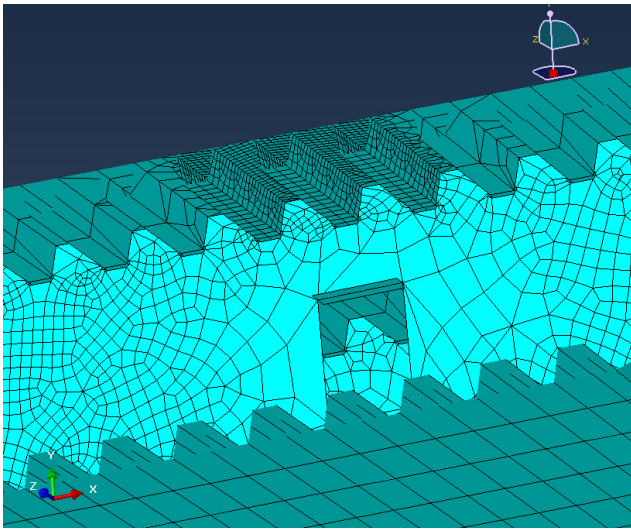


Fig. 4 Mesh for the Deck Plate in ABAQUS

당 범위에 대하여 50mm~100mm 간격으로 조밀하게, 그 외의 범위는 300mm~1500mm으로 메쉬를 구성하였다. 포장층과 접착 (방수)층 역시 윗하중의 전달에 중요한 역할을 하므로 한변이 100mm인 정사각형에 두께를 가진 육면체 요소로 조밀하게 메쉬를 구성하였다.

2.2 재료 모델

본 해석에서 사용된 재료는 강바닥판에 사용된 강재와 접착 (방수)층에 사용된 에폭시 수지, 포장층에서는 초박층 포장재료로 쓰이는 폴리머 콘크리트, 그리고 비교대상으로 설정한 에폭시 아스팔트 (Epoxy Asphalt)와 SFRC가 있으며 주요 재료의 특성치는 Table 3과 같다. 에폭시 아스팔트의 경우 일반적으로 많이 사용되는 교면포장 재료이며, SFRC의 경우 높은 강성으로 인하여 여러 연구에서 피로균열의 대책으로 거론되고 있어서 비교 대상으로 선정하였다. 포장의 두께는 폴리머 콘크리트의 두께 12mm를 기준으로 하여, 20mm 이하에서는 4mm 간격, 20mm 이상에서는 에폭시 아스팔트와 SFRC의 두께를 고려하고자 20mm 간격으로 100mm까지

Table 3 Properties of Materials

Materials	Mass Density (t/m ³)	Poisson Ratio	Modulus of Elasticity (GPa)
Steel	7.85	0.3	210
Polymer	1.9	0.3	4.1
Epoxy	2.4	0.3	2.62
S F R C	2.3	0.2	29.2

설정하여 분석하였다. 그리고 각 포장재료의 실제 시공두께를 고려하여 폴리머 콘크리트 포장, 에폭시 아스팔트 포장, SFRC 포장 순으로 12mm, 60mm, 80mm를 대표두께로 설정하였다. 본 연구에서는 재료의 점성이나 온도에 따른 비선형성은 고려하지 않았으며, 모든 재료들은 등방성의 선형탄성 재료로 가정하였다.

2.3 적용 하중

2.3.1 적용하중 및 재하위치

적용하중은 충격계수를 고려한 DB-24하중의 후륜 축하중 (96kN)을 포장체 상부의 접지면적 (230mm×580mm)에 분포시켜 면하중으로 작용시켰다. Fig. 5는 하중의 횡방향 재하 위치를 보여주고 있다. 횡단면에서는 종리브 위치의 데크플레이트에 뒤틀림 응력이 최대한 발생할 수 있도록, 종방향에서 살펴보면 응력측정위치에 따라 영향선에 의해 가장 불리한 위치를 결정하여 하중을 재하하였다.

2.3.2 피로응력산정방법 및 평가위치

강구조에서 응력이 반복적으로 작용하면 피로균열이 피로손상에 의해 발생하여 성장·진전되며 파괴에 이르게 되지만, 작용하는 응력범위가 허용 레벨보다 작으면 피로손상이 발생하지 않는 피로한계가 존재한다. 이에 도로교 설계기준에서는 반복응력을 받는 부재와 이음부의 경우 규정된 허용 피로응력범위를 초과하지 못하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 피로응력범위를 측정대상으로 하였으며, 유한요소 해석을 통해 각 부위에서의 최대 정·부 모멘트를 구한 후 다축 응력하에서의 피로응력범위 산정에 비교적 많이 사용되고 있는 Signed von-Mises 응력을 사용하여 피로응력범위를 산출하였다.

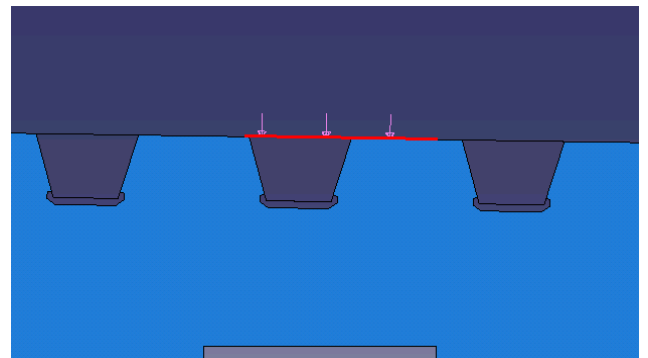


Fig. 5 Transverse Location of Wheel Load

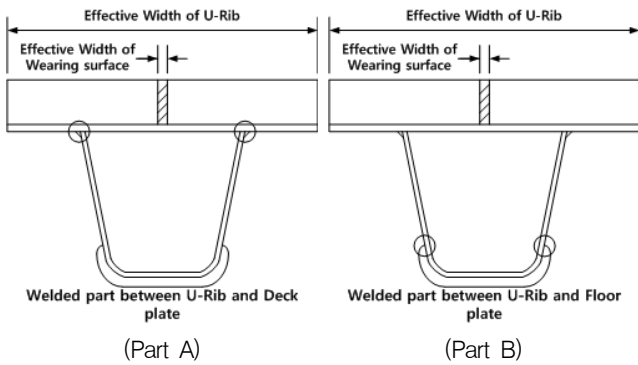


Fig. 6 Location of Analysis for Fatigue Stress

피로응력범위 평가위치는 Fig. 6과 같이 피로균열이 자주 보고되는 종리브와 데크 플레이트 사이의 필렛용접부 (이하 A 부분), 종리브와 횡리브 사이의 필렛용접부 (이하 B 부분)의 위치로 선정하였으며 각각 종리브의 중앙부와 지점부에 위치한다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 포장두께에 따른 영향 검토

3.1.1 폴리머 콘크리트 포장

교면포장 재료로 폴리머 콘크리트를 사용했을 경우 포장두께를 0mm에서 100mm로 변화시키면서 얻어진 피로응력범위를 Table 4와 Fig. 7에 정리하였다.

먼저 포장두께가 0mm일 경우를 살펴보면 A 부분과 B 부분 모두 해당 교량의 설계 당시 설계기준의 허용피로응력범위인 112MPa와 70MPa보다 작은 값을 나타내고 있다. Limit State Design (2012)의 기준인 110MPa와 69MPa 역시 만족시키고 있는데 이는 기존 설계가 포장두께의 강성을 반영하지 않는 보수적인 설계를 하고 있기 때문이다.

A 부분과 B 부분 모두 포장두께가 증가함에 따라 피로응력범위가 감소하는 모습을 나타내었는데, B 부분의 경우 포장두께가 증가함에 따라 선형적으로 완만하게 감소하는 반면, A 부분의 경우 포장두께 40mm 이하에서 급격하게 감소하는 모습을 보이고 있다. A 부분과 B 부분은 포장두께가 0mm일 때와 비교하여 포장두께가 100mm일 때 각각 64.4%, 23.6% 피로응력범위가 감소하였다. 이를 통해 A 부분이 B 부분에 비해 포장두께에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Table 4 The Thickness of Wearing Surface and Fatigue Stress for Polymer Concrete

Thickness (mm)	0	12	16	20	40	60	80	100	
A	Range of Stress (MPa)	85.6	76.8	71.3	65.6	46.5	39.2	34.3	30.5
	Rate of change (%)	0.0	-10.3	-16.8	-23.4	-45.7	-54.3	-59.9	-64.4
B	Range of Stress (MPa)	50.9	49.3	48.9	48.4	45.8	43.3	41.1	38.9
	Rate of change (%)	0.0	-3.2	-4.0	-4.9	-10.0	-14.9	-19.2	-23.6

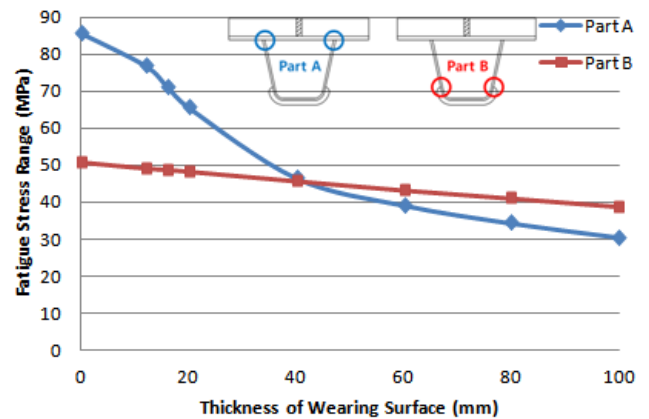


Fig. 7 Fatigue-Wearing Thickness Curve for Polymer Concrete

3.1.2 에폭시 아스팔트 포장

교면포장 재료로 에폭시 아스팔트를 사용했을 경우 포장두께를 0mm에서 100mm로 변화시키면서 얻어진 피로응력범위를 Table 5와 Fig. 8에 정리하였다. 에폭시 아스팔트 포장 역시 A 부분과 B 부분 모두 포장두께가 증가함에 따라 피로응력범위가 감소하는 모습을 나타내고 있으며, 그 패턴도 폴리머 콘크리트 포장의 패턴과 비슷하였다. A 부분과 B 부분은 포장두께가 0mm일 때와 비교하여 포장두께가 100mm일 때 피로응력범위가 감소율이 각각 58.7%, 18.6%로 폴리머 콘크리트에 비해 다소 적은 감소율을 보였다.

Table 5 The Thickness of Wearing Surface and Fatigue Stress for Epoxy Asphalt

Thickness (mm)	0	12	16	20	40	60	80	100	
A	Range of Stress (MPa)	85.6	79.4	75.3	70.8	53.1	44.6	39.4	35.4
	Rate of change (%)	0.0	-7.3	-12.1	-17.3	-38.0	-48.0	-54.0	-58.7
B	Range of Stress (MPa)	50.9	49.5	49.3	49.0	47.0	44.9	43.1	41.4
	Rate of change (%)	0.0	-2.7	-3.2	-3.8	-7.7	-11.8	-15.4	-18.6

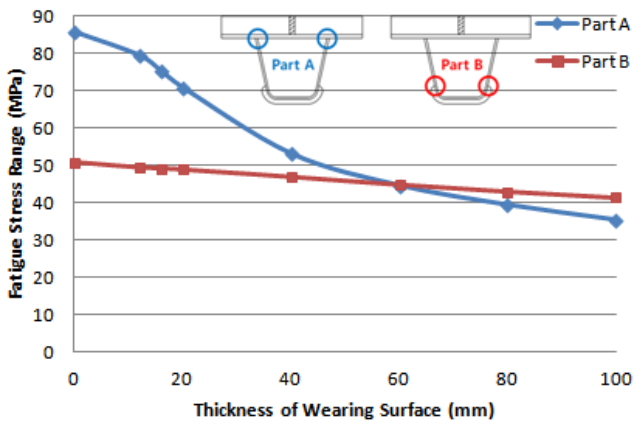


Fig. 8 Fatigue-Wearing Thickness Curve for Epoxy Asphalt

3.1.3 SFRC 포장

교면포장 재료로 SFRC를 사용했을 경우 포장 두께를 0mm에서 100mm로 변화시키면서 얻어진 피로응력범위를 Table 6과 Fig. 9에 정리하였다.

SFRC 포장 역시 A 부분과 B 부분 모두 포장두께가 증가함에 따라 피로응력범위가 감소하는 모습을 나타내고 있으며, 그 패턴 역시 앞의 두 포장 재료의 패턴과 비슷하였다.

Table 6 The Thickness of Wearing Surface and Fatigue Stress for SFRC

Thickness (mm)	0	12	16	20	40	60	80	100	
A	Range of Stress (MPa)	85.6	54.5	44.6	38.5	26.9	21.7	18.0	8.4
	Rate of change (%)	0.0	-36.4	-47.9	-55.1	-68.5	-74.7	-78.9	-90.1
B	Range of Stress (MPa)	50.9	46.9	45.7	44.5	39.8	37.0	35.7	34.9
	Rate of change (%)	0.0	-7.9	-10.3	-12.7	-21.9	-27.2	-29.9	-31.5

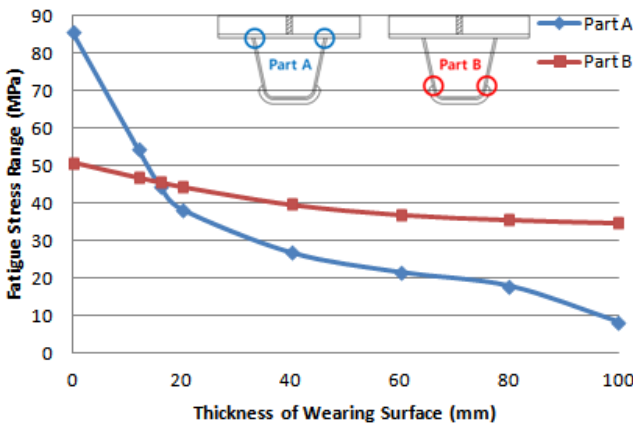


Fig. 9 Fatigue-Wearing Thickness Curve for SFRC

다만 A 부분에서 포장두께 20mm 이하에서 피로응력범위가 급격하게 감소하는 모습을 보이고 있다. A 부분과 B 부분은 포장두께가 0mm일 때와 비교하여 포장두께가 100mm일 때 피로응력범위가 감소율이 각각 90.1%, 31.5%로 앞의 두 포장 재료에 비해 훨씬 큰 감소율을 보였다.

3.2 응력방향에 따른 검토

앞서 살펴보았듯이 A 부분이 B 부분에 비해 포장두께에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이에 대한 원인을 찾기 위해 폴리머 콘크리트 포장에서 종리브 중앙에 윤하중을 재하했을 때의 A 부분의 응력을 Fig. 10과 같이 응력을 교축방향과 교축직각방향으로 구분하여 분석하였다. Fig. 10을 보면 교축직각방향 응력이 교축방향 응력에 비해 포장두께에 더 민감한 양상을 띠고 있으며, 그래프의 패턴 역시 A 부분의 포장두께에 따른 피로응력범위 그래프와 비슷한 패턴을 보이고 있어 교축직각방향 응력에 의해 더 큰 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

교축직각방향 응력은 국부거동에 의해 영향을 받는다. 국부 거동에 의한 응력은 주로 교축직각방향에 작용하여 교축방향에 대한 응력중첩 시 무시되나, A 부분과 같이 교축직각방향 응력에 의해 큰 영향을 받는 위치에서는 지배적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 물론 이러한 국부하중에 의한 국부적인 파괴는 막작용으로 인한 강성증가로 바닥판 전체가 즉시 파괴에 이르는 것은 아니나, 그대로 방치해두면 포장의 손상, 평탄성 결여 등으로 인해 교량으로서의 기능이 저하되고 교량의 내구성이 저하된다 (Jun et al., 2009) 이러한 현상이 벌어지는 원인을 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 Fig. 11과 같이 A 부분의 교축방향, 교축직각방향의 단면 형상을 각각 살펴보았다. 교축방향의 경우 포장, 바닥판, 그리고 종리

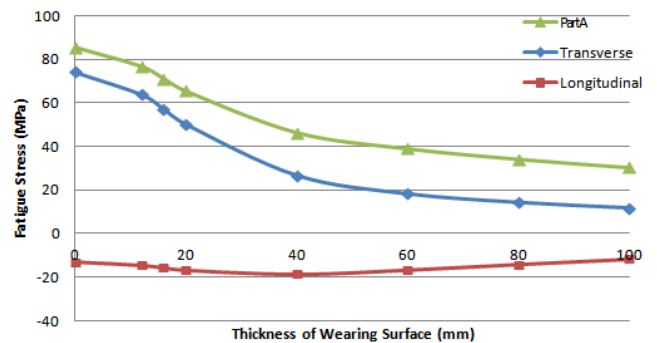


Fig. 10 Fatigue-Wearing Thickness Curve for Part A according to the Directions

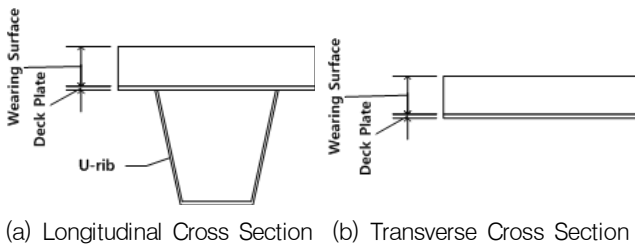


Fig. 11 Cross Section of Part A

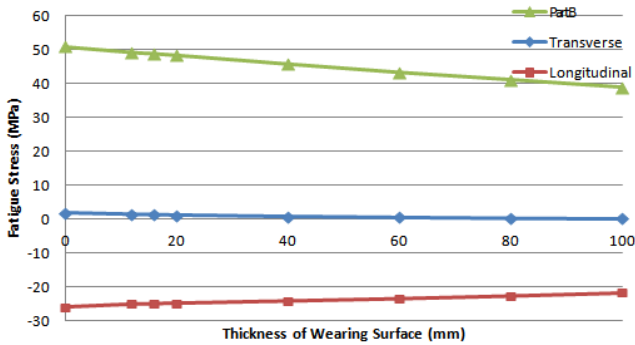


Fig. 12 Fatigue-Wearing Thickness Curve for Part B according to the Directions

브를 포함한 단면이 단면력을 부담하게 되므로 포장의 두께가 줄어들어도 단면2차모멘트가 크게 줄지 않아 단면의 강성에 큰 영향을 받지 않는 반면, 교축직각방향의 경우 오로지 데크 플레이트와 포장으로 구성된 단면이 단면력을 부담하므로 포장 두께가 줄어들 경우 단면2차모멘트가 급격히 줄어들어 단면의 강성에 큰 영향을 받게 된다.

따라서 폴리머 콘크리트 포장과 같은 초박층 교면포장의 경우 포장두께에 민감한 A 부분에서의 피로응력범위 감소효과 측면에서만 보았을 때 두께가 두꺼운 다른 포장재료 들에 비해서 비교적 효과가 적다고 판단된다.

한편 폴리머 콘크리트 포장에서 종리브 중앙에 윤하중을 재하했을 때의 B 부분의 응력을 교축방향과 교축직각방향으로 분리하여 나타내면 Fig. 12와 같다.

Fig. 12의 그래프에서 나타나듯이 B 부분의 경우 교축방향 응력에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 교축방향의 응력의 경우 앞서 살펴본 바와 같이 종리브를 포함한 단면이 단면력을 부담하게 되므로, 결과적으로 B 부분이 A 부분에 비해 포장 두께에 대해서 비교적 덜 민감한 모습을 보였다.

3.3 포장 종류 (탄성계수)에 따른 영향 검토

교면포장 종류에 따른 피로응력범위를 Fig. 13, Fig. 14에

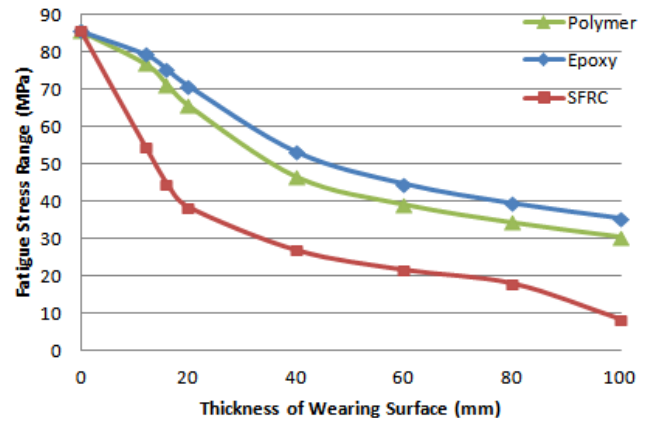


Fig. 13 Fatigue-Wearing Thickness Curve of the Type of Pavements for Part A

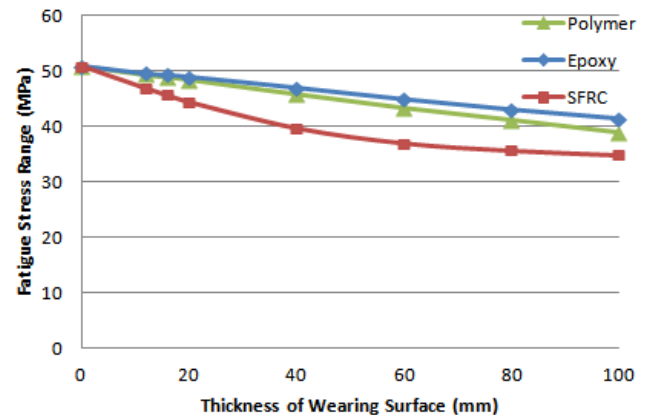


Fig. 14 Fatigue-Wearing Thickness Curve of the Type of Pavements for Part B

정리하였다. Fig. 13과 Fig. 14를 보면 A 부분과 B 부분 모두 에폭시 아스팔트 포장 (2.62GPa), 폴리머 콘크리트 포장 (4.1GPa), SFRC 포장 (29.2GPa) 순서로 탄성계수가 커질수록 피로응력범위의 감소폭이 커지는 것을 확인할 수 있으며, 즉 포장의 탄성계수가 커질수록 강바닥판의 피로응력범위가 줄어들어 피로균열 예방에 도움이 될 것이라 판단된다. 먼저 A 부분을 살펴보면 폴리머 콘크리트 포장과 에폭시 아스팔트 포장의 경우 포장두께 40mm 이하에서, SFRC 포장의 경우 포장두께 20mm 이하에서 피로응력범위가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 포장 재료의 탄성계수에 따라서 피로응력범위가 급격히 감소하는 포장두께의 범위가 존재하는 것으로 보인다. 한편 분석 대상인 포장 재료들의 탄성계수 구간 (2.62~29.2GPa)에서는 비교적 포장두께가 얇은 구간 (40mm 이하)에서 피로응력범위가 급격히 감소하여 설계 기준인 112MPa의 절반 이하가 되는 것으로 보아 A 부

Table 7 The Parametric Ratio of Wearing Thickness

Thickness (mm)	0	12	16	20	40	60	80	100
Ratio of Wearing Thickness (n_1)	0.0	1.0	1.3	1.7	3.3	5.0	6.7	8.3

Note: $n_1 = \frac{\text{Pavement Thickness}}{\text{Representative Thickness}}$

Table 8 The Parametric Ratio of Modulus of Elasticity

Type of Wearing Surface	Epoxy Asphalt	Polymer Concrete	SFRC
Modulus of Elasticity (GPa)	2.62	4.1	29.2
Ratio of Modulus of Elasticity (n_2)	0.6	1.0	7.1

Note : $n_2 = \frac{\text{Modulus of Elasticity of Wearing Surface}}{\text{Modulus of Elasticity of Polymer Concrete}}$

분에서는 포장체의 탄성계수가 피로응력범위 저감에 효과적인 역할을 할 것으로 판단된다. B 부분의 경우 특정 포장두께와 상관없이 일정하게 피로응력범위가 감소하고 있으며, 피로응력범위 감소폭이 A 부분 보다 비교적 작게 나타났다.

3.4 포장 두께와 탄성계수에 따른 영향 비교 분석

앞서 3.1절과 3.2절에서 살펴보았듯이 포장의 두께가 증가할수록, 그리고 포장 재료의 탄성계수가 커질수록 강바닥판에서의 피로응력범위는 감소하였다. 이 두 가지 매개변수를 폴리머 콘크리트 포장의 대표두께 (12mm)와 탄성계수 (4.1GPa)를 기준으로 하여 매개변수 비로 변환하여 두 가지 매개변수의 피로응력범위에 미치는 영향을 비교해 보고, 이 두 가지 매개변수 비를 기준으로 폴리머 콘크리트 포장에서의 피로응력범위를 Fig. 15와 Fig. 16에 정리하였다.

Fig. 15와 Fig. 16에서 보면 A 부분과 B 부분 모두 탄성계수에 비해 두께에 더 큰 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있다. 먼저 A 부분에서 살펴보면 매개변수 비가 1에서 7.1로 증가하는 동안 피로응력범위가 두께 비의 경우 56.7%, 탄성계수 비의 경우 29.1% 감소하였다. 이는 포장두께를 7.1배로 늘렸을 때는 피로응력범위가 56.7%로 절반 이상 감소한 반면, 탄성계수 비를 7.1배로 늘렸을 때는 피로응력범위가 29.1%만큼 감소하는 데 그쳤다는 것이다. B 부분의 경우도 마찬가지로 매개변수 비를 1에서 7.1만큼 증가시키는 동안 피로응력범위가 두께 비의 경우 17.8%, 탄성계수 비의 경우 4.8% 감소하여 A 부분과 마찬가지로 탄성계수보다 포장두께가 피로응력범위에 더 큰 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있다.

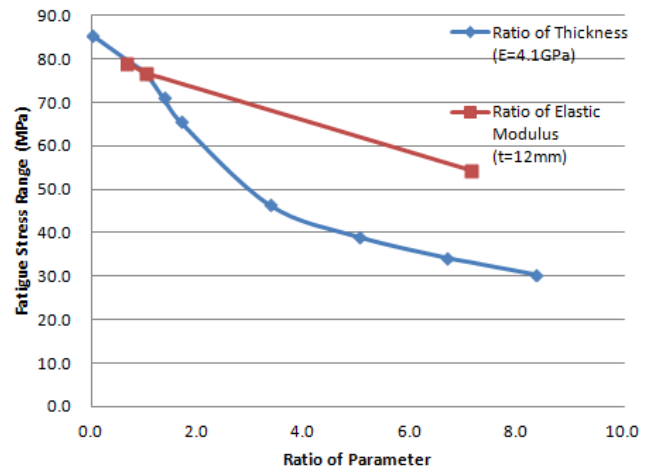


Fig. 15 Fatigue-Parametric Ratio Curve for Part A

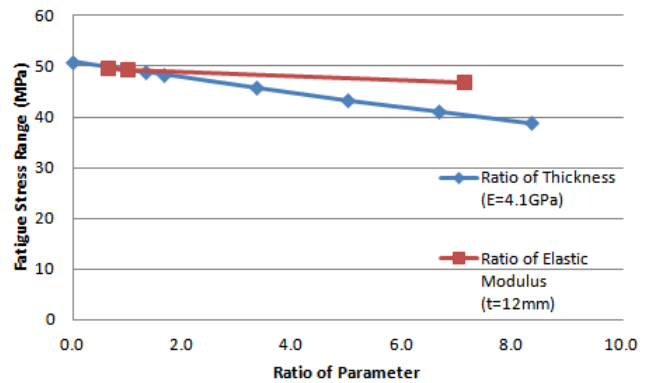


Fig. 16 Fatigue-Parametric Ratio Curve for Part B

Table 9 The Parametric Ratio of Modulus of Elasticity

Type of Wearing Surface	Actual Wearing Surface	Reduction Rate of Fatigue Stress Range	
		Part A	Part B
Polymer Concrete	12	10.3	3.2
Epoxy Asphalt	60	48.0	11.8
SFRC	80	78.9	29.9

3.5 실제 시공두께를 고려한 포장 종류에 따른 분석

앞선 분석에서는 각 포장 재료에 대해서 포장 두께를 변화시켜 가면서 피로응력범위를 검토하였으나, 실제 시공 시에는 포장 재료마다 골재치수 등으로 인해 시공 가능한 포장두께의 범위가 정해져 있다. 이에 따라 각 포장 재료 별로 실제 시공두께를 고려하여 대표두께를 설정, 피로응력범위 감소율을 다음 Table 9와 같이 비교해보았다.

A 부분과 B 부분 모두 폴리머 콘크리트, 에폭시 아스팔트, SFRC 순서로 피로응력범위 감소율이 커지는 것을 확인할 수

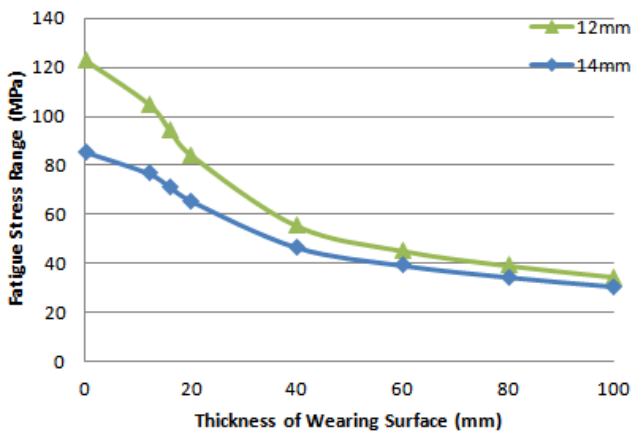


Fig. 17 Fatigue–Wearing Thickness Curve for Part A according to the Thickness of Deck Plate

수 있다. 폴리머 콘크리트가 에폭시 아스팔트에 비해 탄성계수가 1.5배가 넘는 데도 불구하고 피로응력범위 감소율이 훨씬 작은 것을 볼 수 있는데 이는 앞 절에서 분석한 바와 같이 피로응력범위는 탄성계수보다 포장두께에 더 큰 영향을 받기 때문에 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

3.6 데크 플레이트 두께 변경에 따른 검토

국내 도로교설계기준 상 데크 플레이트의 최소두께는 1996년 이전에는 12mm였으나, 종리브와 데크 플레이트의 용접이음이 피로현상에 의해 파손되는 사례가 많이 발생하여 종리브의 강성에 비해 데크 플레이트의 강성을 크게하여 용접이음부의 피로파괴를 막고자 1996년 이후 14mm로 증가시켰고, 이 규정은 한계상태설계법이 제정된 2012년까지도 이어져 오고 있다. 한편 2012년에 제정된 한계상태설계법에서는 이전의 설계기준과 다르게 포장이 직교방향 바닥판 부재들의 강성에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 변경이 되었다. 이렇듯 한계상태설계법의 제정으로 설계기준이 보다 합리적이고 경제적 설계가 가능한 방향으로 변경됨에 따라 포장의 강성에 대한 영향에 추가로 데크 플레이트의 최소두께도 변경될 수 있다고 생각하였고, 이에 12mm 데크 플레이트의 적용성을 검토해보고자 하였다.

Fig. 17, Fig. 18은 폴리머 콘크리트 포장을 적용했을 때 각각 A,B 부분에서 데크 플레이트 두께에 따른 피로응력범위를 나타낸 것이다. Fig. 18을 보면 B 부분의 경우 데크 플레이트 두께가 변경되어도 피로응력범위가 거의 변화가 없는 반면, Fig. 17과 같이 A 부분의 경우 데크 플레이트의 두께가 14mm에서 12mm로 줄어들었을 때 피로응력 범위가

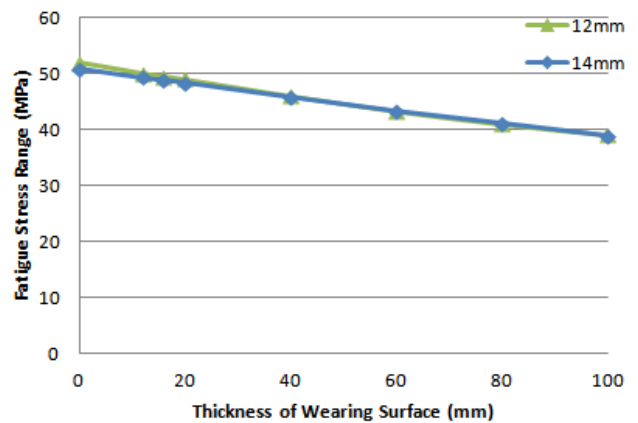


Fig. 18 Fatigue–Wearing Thickness Curve for Part B according to the Thickness of Deck Plate

크게 증가하였다. 특히 포장두께가 0mm일 경우 피로응력범위는 데크 플레이트가 14mm일 때 85.64MPa에서 12mm일 때 122.98MPa로 43.6%가량 증가하여 피로응력범위 기준인 110MPa를 크게 초과하여 A 부분의 경우 강바닥판의 강성이 피로파괴에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 한편 데크 플레이트의 두께가 12mm일 때 폴리머 콘크리트 포장의 대표두께인 12mm를 적용하였을 경우의 피로응력범위는 105.18MPa로 포장두께가 0mm일 때 대비 15% 정도 감소하여 피로응력범위 기준인 110MPa 이하로 규정을 만족시키는 범위에 들어오는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 강바닥판 교량수치해석 모델을 통해 폴리머 콘크리트 포장이 강바닥판에 어떤 영향을 미치는 지 파악하기 위해 교면포장의 두께 및 포장의 종류를 매개변수로 Abaqus를 이용한 유한요소 해석을 이용하여 종리브와 데크 플레이트 필렛용접부 및 중·횡리브 필렛용접부의 피로응력범위를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 포장의 두께가 증가하고 탄성계수가 커짐에 따라 피로응력범위는 감소하였다. 중·횡 부의 경우 포장 두께가 증가하고 탄성계수가 커짐에 따라 피로응력범위가 선형적으로 완만하게 감소한 반면, 중-데크 부의 경우 피로응력범위가 급격하게 감소하는 모습을 보여 중-데크 부가 중·횡 부에 비해 포장 두께와 탄성계수에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 포장의 실제 시공두께를 고려하여 분석한 결과 폴리머

콘크리트 포장에 비해 대상인 에폭시 아스팔트 포장과 SFRC 포장에 비해서 피로응력범위 감소율이 훨씬 작은 것으로 나타났다. 특히 폴리머 콘크리트가 에폭시 아스팔트에 비해 탄성계수가 1.5배 가량 높음에도 불구하고 피로응력범위 감소 효과가 훨씬 작게 나타났는데 이는 앞서 분석한 바와 같이 피로응력범위가 탄성계수보다 포장 두께에 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 하지만 초박층 교면포장재의 경우 보통 20mm 안쪽에서 시공이 되어 지기 때문에 포장 두께를 늘려 피로하중을 경감 효과를 기대하기에는 어려움이 있다.

(3) 데크 플레이트 두께를 12mm로 줄여서 분석한 결과 종-데크 부의 경우 피로응력범위가 크게 증가하였다. 폴리머 콘크리트의 대표두께인 12mm를 적용하였을 때 피로응력범위가 105MPa로 설계기준 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 포장의 강성이 강바닥판의 강성에 미치는 영향을 검토하여 데크 플레이트의 최소두께규정을 줄이는 것도 고려해 볼 수 있을 것이라고 판단된다.

강바닥판은 복잡한 응력거동을 나타내 피로균열의 발생 가능성이 어느 구조물보다도 큰 구조물이라고 할 수 있으므로, 향후 피로시험에 의한 폴리머 콘크리트 포장의 피로내구성 및 강바닥판 피로강도 향상 효과의 확인이 필요하며, 실제 교량에서의 시공을 고려한 검토가 필요하다. 또한 폴리머 콘크리트 포장도 일반 아스팔트 포장과 마찬가지로 여름철 교면포장의 연화로 인한 포장의 강성저하를 방지할 수 있도록 추가적인 연구·개발이 필요할 것으로 사료된다.

References

1. ABAQUS Analysis User's Manual (2010), Ver 6.10.
2. American Institute of Steel Construction (1963), Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges.
3. Hwang, B. H. (2013), F. E. Analysis for Steel Deck Bridges Considering the Wearing Surface through Static Loading Test, Graduation thesis of SungKyunKwan University (in Korean).
4. Jo, J. S. (2011), Study on the application of low-thickness durable pavement on orthotropic steel deck for long-span bridges, Graduation thesis of Hanyang University (in Korean).
5. Jun, S. S. (2009), Comparative Study on the Stress Analysis Method of the Orthotropic Steel Deck, Graduation thesis of SungKyunKwan University (in Korean).
6. Kim, H. J. (2013), The Physical Properties of Polymer Concrete for Ultra Thin Bridge Deck Pavement, Graduation thesis of SungKyunKwan University (in Korean).
7. Korean Society of Civil Engineers (2006), Design Guidelines for Steel Cable-Supported Bridges (in Korean).
8. Korean Society of Civil Engineers (2008), Korea Bridge Design & Engineering Research Center, Interpretation of Bridge Design Specification (in Korean).
9. Korean Society of Steel Construction (2007), Steel Deck Bridge Q & A (in Korean).
10. Kyung, K. S., Sin D. H., Park K. J. (2006), Retrofit and Countermeasures for Fatigue Damages of Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, Issue 1, 18(66), 76-90 (in Korean).
11. Lee, H. J., Kang, J. Y., Choi, B. I., Kim, J. S. (2003), High Cycle Fatigue Damage under Multiaxial Random Loading through Dynamic Simulation for an Automotive Sub-Frame, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 27(6), 946-953 (in Korean).
12. Lee, H. W., Jung, D. H. (2003), A Fundamental Study on the Effects of Pavement Stiffness to the Structural Behavior of Orthotropic Steel Plate Deck, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 7(1), 191-198 (in Korean).
13. Lee, J. Y. (2010), An interpretative study on movement characteristics of pavement and steel floor plate, Graduation thesis of Korea Maritime University (in Korean).
14. Lee, W. H. (2006), Samsung C&T Civil ENG Team, Thermal effect of Steel Deck Bridge for Employees of Modified Asphalt Pavement (in Korean).
15. Lee, Y. B., Kim, H. K., Jung, J. S. (1999), Basic of Fatigue Analysis, Cheong Moon Gak (in Korean).
16. M. S. Troitsky, D.Sc. (1987), Orthotropic Bridges Theory and Design, 2nd ed.
17. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2005), Design code for highway bridge in Korea (in Korean).
18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008), Design code for highway bridge in Korea (in Korean).
19. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), Design code for highway bridge in Korea (in Korean).
20. Mokpo Bridge Structural calculations (2005) (in Korean).
21. Murakoshi, J., Naoki Yanadori, Ui, T., Inokuchi, S., et al. (2008), Research on Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement on Orthotropic Steel Deck, *International Orthotropic Bridge Conference Proceedings*, 2, 359-371.
22. Oh, S. H., Kim, N. S., Kim W. S. (2009), A Study on Paving Technique using Polymer Epoxy Resin Materials, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 29(2D) (in Korean).
23. Park, J. I. (2012), Fatigue behavior of the orthotropic steel deck by wearing surface condition, Graduation thesis of SungKyunKwan University (in Korean).
24. US Department of Transportation Federal Highway Administration (2012), Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges.

요 지

본 연구에서는 초박층 교면포장으로 폴리실라이드 에폭시 폴리머 콘크리트 포장을 선정하여, 에폭시 아스팔트 포장, SFRC 포장과의 비교 분석을 통해 폴리머 콘크리트 포장이 강바닥판의 피로응력범위에 어떠한 영향을 미치는 지 분석하였다. 강바닥판의 피로응력범위를 산정하기 위해 Abaqus를 사용한 유한요소해석을 사용하여 비교평가하였으며, 용접부에 교축방향 및 교축직각방향의 다축응력이 발생하는 점을 감안하여 Signed Von-Mises 응력을 도입하여 피로 검토에 활용하였다. 강바닥판의 피로응력범위를 산정하기 위해 Abaqus를 사용한 유한요소해석을 사용하여 포장 재료 및 두께에 따라 비교평가하였으며, 용접부에 교축방향 및 교축직각방향의 다축응력이 발생하는 점을 감안하여 Signed Von-Mises 응력을 도입하여 피로 검토에 활용하였다.

핵심 용어 : 피로응력범위, 직교이방성 강바닥판, 폴리머 콘크리트, Signed Von-Mises, 초박층 교면포장
