

직교이방성 강바닥판 피로와 구조부재의 관계에 대한 연구

A Study for Relation Between Fatigue and Structural Members on Othotropic Steel Deck

박종인¹⁾ 홍성남^{2)*} 김태원³⁾ 박선규⁴⁾
Park, Jong In Hong, Sung Nam Kim, Tae wan Park, Sun Kyu

Abstract

Improvement of steel material quality made fatigue problems more critical than failure of the material itself. In many cases, cracks on the welded parts of steel deck bridges are reported against the failure of steel materials. And the cracks are caused by alternate stress on the welded parts due to live loads on the bridge. The range of alternate stress on the welded part is related to property of the sections which compose orthotropic steel deck. Orthotropic steel deck is mainly composed of deck plate, ribs and floor beams, wearing surface, etc. In this paper, a methodology to estimate the alternate stress for orthotropic steel deck using Pelikan-Esslinger method and signed Von-Mises equivalent stress is proposed first. Parametric study served references for fatigue stresses when designing or repairing orthotropic steel deck bridges, by analyzing relationship between alternate stress range and properties of steel deck members.

Keywords : Orthotropic steel deck, Fatigue stress, Pelikan-Esslinger method, Von-mises equivalent stress

1. 서론

직교이방성 강바닥판은 횡리브, 종리브, 데크 플레이트 등으로 구성된 강교형식으로 초장대 사장교나 현수교 등 지간이 긴 교량 뿐만 아니라 일반 교량에서도 널리 사용되고 있는 형식이다. 강재는 제조 기술의 발달로 비교적 우수한 품질을 안정적으로 확보할 수 있다. 이러한 재료로 건설된 교량 중 강재 자체의 파괴나 변형으로 인하여 교량의 안정성이나 사용성에 문제가 발생하는 경우는 현재 거의 보고되고 있지 않다. 하지만 차륜하중의 반복작용으로 발생하는 피로응력에 의하여 강바닥판을 구성하는 부재들간 용접부에 크랙이 발생하는 경우는 자주 보고되고 있다(경갑수 등, 2006). 이런 피로균열이 강바닥판 형식 교량의 안정성 및 사용성을 저하시키는 주요원인으로 부각되고 있다. 따라서 강바닥판의 설계에 있어서 주 거더의 항복에 대한 검토뿐만 아니라 피로 균열의 발생여부를 신빙성 있게 평가하는 것이 매우 중요하다.

하지만, 강바닥판 용접부의 피로응력을 평가하는 방법은 아직까지 중요설계 기준(도로교 설계기준, 2005, 강

도로교 상세부 설계지침, 2006)에 명확하게 명시되어 있지 않아 구조기술자의 능력이나 설계 시 참고되는 문헌에 따라 산정치가 달라져 산정값에 대한 신뢰도가 높지 않은 실정이다. 피로응력 산정치에 대한 신뢰도가 낮아지면 안전확보를 위해 더 많은 보강재를 사용하게 되어 재료비나 시공비의 절감 기회를 잃게 되는 결과를 초래한다.

강바닥판의 최적설계 및 피로균열 방지를 위한 피로와 강바닥판 구성요소들의 관계에 대한 연구(최동호, 최항용, 2002, 전진수 등, 2002, 경갑수 등, 2010)는 지속적으로 이루어지고 있다. 하지만 대부분 실험 모형을 활용한 실험이나 FEM 등의 방법으로 피로를 판정하고 있어 표준화된 방법이 없으며 비교적 많은 시간이 소요된다.

Pelikan-Esslinger method(이하 P-E method)는 직교이방성 강바닥판 형식이 도입된 후 강바닥판 구조 해석 방법으로 널리 사용된 방법으로 FEM 등의 컴퓨터 해석 기법이 보급된 현재에도 계속해서 사용되고 있다(전성수 등, 2008). 직교이방성 강바닥판 형식이 도입된 당시에는 피로균열에 대한 인식이 없었기 때문에 P-E method에서 피로응력 계산방법이 직접적으로 제시되어 있지는

1) 정회원, 삼성물산 토목사업팀 대리, 공학석사
2) 정회원, 성균관대학교 과학기술연구소 공학박사, 교신저자
3) 정회원, 삼성물산 토목Eng.팀 과장, 공학박사
4) 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

* Corresponding author : cama77@skku.edu 031-290-7530
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

않지만 차륜하중에 의해 각 부재 용접부에 발생하는 응력을 계산하는데 적용 가능하므로 피로응력 또한 같은 방법으로 계산할 수 있다. 게다가 횡리브와 종리브가 만나는 지점에서는 용접부에 교축방향 응력뿐만 아니라 교축직각 방향의 응력이 작용하므로 다축방향으로 응력이 작용하는 경우 등가응력으로 환산하여 계산하는 방법인 Von-mises 등가응력법의 적용이 가능하다(이학주 등, 2003).

직교이방성 강바닥판에서 주로 균열이 발생하는 부분은 데크플레이트와 종리브의 용접부 및 횡리브와 종리브의 연결 용접부 하단이다(경갑수 등, 2006). 따라서 차륜하중에 의해 각 부분에 작용하는 교변응력의 범위를 P-E method 및 Von-Mises 등가응력법으로 산정하고 교면포장의 두께 및 종류, 데크플레이트의 두께, 횡리브의 형상 및 간격 등 강바닥판 구성요소들의 구성형태 및 성질을 변화시켜 교변응력의 범위의 변화와 어떤 상관관계가 있는지 연구하였다.

본 연구에서는 직교이방성 강바닥판의 구성요소들의 구성형태 및 성질 등이 피로응력에 어떤 영향을 미치는지를 분석하여 향후 직교이방성 강바닥판 설계 및 피로균열 발생부 보수 보강 시에 참고할 사항들을 제시하였다.

2. P-E method를 활용한 피로응력 산정

P-E method에는 피로응력범위 산정에 대한 내용이 포함되어 있지 않은데, 당시에는 직교이방성 강바닥판 시공이나 운용 실적이 없어 피로응력에 대한 인식이 부족했기 때문인 것으로 보인다. 이 평가방법의 주요 개념은 강바닥판이 바닥판으로 기능을 할 때 작용하는 국부응력과 주형의 플랜지로서 기능을 할 때 작용하는 응력을 함께 고려하여 강재의 허용응력이내로 들어오는지 확인하는 것이다.

P-E method에서 직교이방성 강바닥판에 작용하는 국부응력을 해석하는 방법은 Table 1과 같이 횡리브를 강지점으로 가정하고 해석하는 1단계와 탄성지점 영향을 고려하는 2단계로 나뉘며 마지막으로 각 단계에서 산정된 모멘트를 중첩하는 것이다.

일반적으로 피로응력범위는 차륜하중이 강바닥판 위를 한번 지나갔을 경우 용접부에 작용하는 최대응력과 최소응력 변화 폭의 개념으로 산정할 수 있다.

P-E method를 사용하여 주요 부재 용접부에 작용하는 최대응력과 최소응력을 각각 계산할 수 있으며, 최대

Table 1 Pelikan-Esslinger Method

Wheel Load	
Stage 1 (Rigid Support)	
Stage 2 (Elastic Support)	
Superposition	

한 보수적인 관점에서 피로응력을 산정하기 위하여 차륜하중 재하 시 각 부재에 최대, 최소응력을 유발하는 위치를 선정하였다. 피로응력범위는 피로균열이 자주 보고되는 데크 플레이트와 종리브 사이의 용접부, 종리브와 횡리브 사이의 용접부의 위치에서 산정하였다. 그리고 교면포장과 데크플레이트는 일체 거동을 한다고 가정하였다.

2.1 단면계수의 산정 및 응력계산 위치

P-E method로 용접부에 작용하는 응력을 평가하기 위해서는 종리브와 횡리브의 유효폭을 산정하고 그에 따른 단면계수를 결정하여야 한다.

일반적으로 교면포장은 아스팔트 계열이 주로 사용되며 재료의 점탄성 성질에 의하여 고온시에는 탄성계수가 급격히 낮아져 구조체로서의 역할을 못하게 되기도 한다. 따라서 강바닥판을 설계하는 경우 포장의 강성을 무시하고 단면계수를 산정하는 경우가 많다.

그러나 SFRC와 같은 콘크리트 계열의 교면포장이 피로균열 방지 등에 효과가 있다는 사실이 알려지면서 점점 많이 도입되고 있는 추세이다. 콘크리트 계열 교면포장은 온도에 따른 탄성계수의 변화가 크지 않으므로 구조체의 강성에 기여할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강성 포장의 효과를 함께 알아보고자 일반적으로 알려진 아스팔트 계열의 탄성계수와 SFRC의 탄성계수를 적용하여 유효 단면 산정 시 반영하였다.

교면포장과 강재로 구성된 단면이 등가의 단면계수를 가질 수 있도록 교면포장의 폭을 교면포장과 강재의 탄성계수비에 따라 감소시켰으며 그 형상은 Fig. 1과 같다.

피로응력은 피로균열이 자주 보고되는 횡리브와 종리

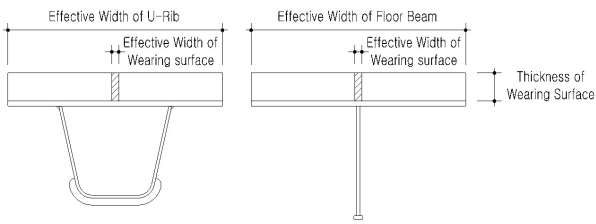


Fig. 1 Cross-Section of U-Rib and Floor Beam

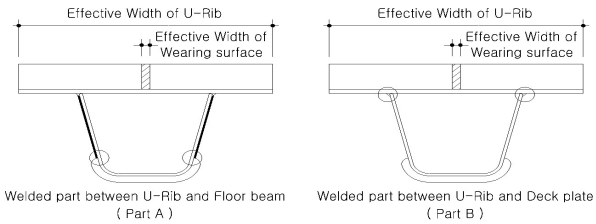
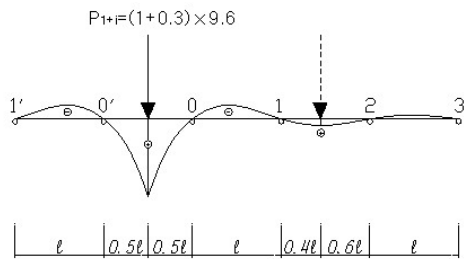


Fig. 2 Location of Analysis for Fatigue Stress

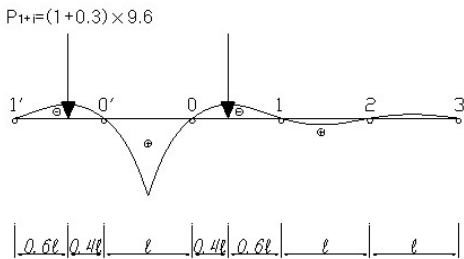
브 사이의 용접부 하단(이하 A 부분) 및 종리브와 데크 플레이트 사이의 용접부(이하 B 부분)에서 계산하였으며 Fig. 2에 나타낸바와 같다.

2.2 종리브와 데크플레이트 용접부 피로응력

Fig. 3에는 강바닥판 횡리브의 간격을 l이라고 했을 때



Location of Wheel load for positive moment



Location of Wheel load for negative moment

Fig. 3 Influence Line of Moment for Middle of 0-0' Span

종리브 중앙에서의 모멘트 영향선도와 피로응력 평가 위치에 가장 큰 정모멘트와 부모멘트를 발생시키는 차륜 하중의 재하위치를 나타내었다. 정모멘트를 유발하기 위한 차륜하중 재하 시 점선으로 표시되어 있는 하중은 횡리브를 강지점으로 가정하고 계산하는 1단계에서는 0'-0 구간에 정모멘트를 발생시키지만, 탄성처짐을 고려한 2단계 계산과 중첩할 경우 부모멘트를 발생시키는 결과가 되어 고려하지 않았다.

Fig. 3에서와 같이 각각 최대 정모멘트와 부모멘트를 발생시키도록 차륜하중을 재하하고 P-E method를 사용하면 종리브의 중앙에서의 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 계산할 수 있다. 그리고 종리브 유효단면의 단면2차 모멘트와 중립축에서 용접부까지의 거리를 사용하여 최대 압축응력 및 최대 인장응력을 계산하면 두 응력간의 차이가 피로응력 범위가 된다.

2.3 횡리브와 종리브 용접부 피로응력

종리브와 횡리브 사이의 용접부에서는 피로 균열이 자주 보고되고 있어 피로응력범위 산정에 대한 신뢰도가 특히 중요하다. 횡리브를 종리브의 지점이라고 가정하고 지점에 대한 모멘트 영향선도 상에 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 유발할 수 있는 위치에 차륜을 재하한 뒤 P-E method를 적용하면 피로응력을 산정할 수 있다. 이 경우 피로응력 산정에는 종리브의 지점부에 작용하는 교축방향 응력들이 사용된다. 하지만 종리브에 차륜하중을 재하할 경우 그 하중은 횡리브에도 반력을 발생시켜 횡리브에는 교축직각방향의 응력을 발생시키게 된다. 따라서 종리브와 횡리브 사이의 용접부에는 교축방향 응력과 교축 직각방향 응력이 동시에 작용하는 상태가 된다.

다축방향으로 응력이 작용하는 경우 한쪽 방향으로만 응력이 작용할 때보다 합성작용에 의해 더 빨리 항복점에 도달하게 되는데 Von-Mises는 등가응력 개념을 사용하여 다축방향 응력 하에서 재료의 항복점을 계산하는 방법을 제시하였으며 2축 응력일 경우 다음 식과 같다.(이학주 등, 2003)

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

σ_v : 등가 응력 σ_x : x축 방향 응력

σ_y : y축 방향 응력 τ_{xy} : 전단 응력

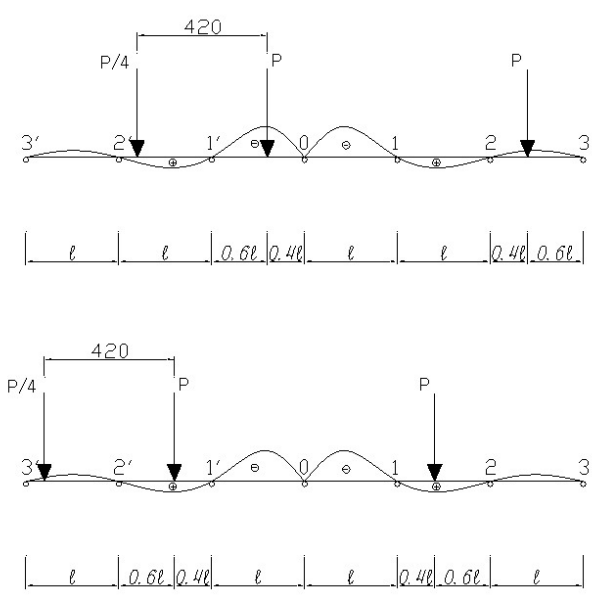


Fig. 4 Influence Line of Moment for Support 0

그러나 Von-Mises의 등가 응력은 항복에 도달하는 응력의 크기만 산정할 뿐 부호가 없으므로 피로응력범위 산정에는 Von-Mises 등가응력에 부호를 부여한 Signed Von-Mises 응력을 사용하며 2축 응력일 경우 다음 식으로 계산된다.(이학주 등, 2003)

$$\sigma_e = \sigma_1 \times \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}$$

평면응력 상태에서 주응력을 계산한 후 절대값이 큰 주응력을 σ_1 이라 하고 절대값이 작은 주응력을 σ_2 라 하면 등가응력은 위와 같이 계산하고 부호는 σ_1 을 따르게 된다. Signed Von-Mises 등가응력은 기계공학 등에서 다축 응력 하에서의 피로응력범위 산정에 널리 사용되고 있다. 차륜하중은 Fig. 4와 같이 종리브의 지점부에 최대 정모멘트와 최소 정모멘트를 유발하는 곳에 재하 하였으며 Fig. 5에 나타난 바와 같이 각각의 경우 횡리브에 발생시키는 반력을 계산하여 횡리브에 발생하는 모멘트와 응력을 산정하였다.

횡리브에 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 발생시키는 차륜재하위치를 선정하여 종리브에 발생하는 모멘트를 산정하는 경우도 생각해 볼 수 있다. 하지만 횡리브에 최대 정모멘트를 발생시키는 경우는 횡리브 상 중앙에 차륜이 위치할 때이며 이 경우 P-E method 1단계에서 중

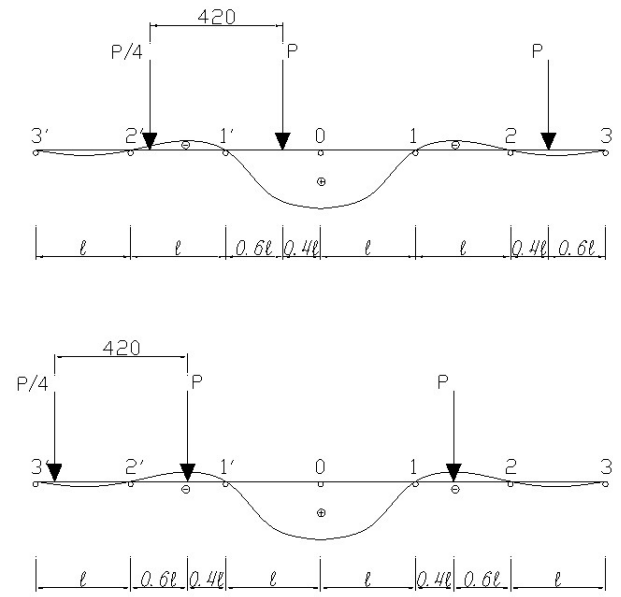


Fig. 5 Influence Line of Reaction Force for Middle of Floor Beam

리브에 작용하는 모멘트가 0이 되어 합성응력의 크기가 앞서 언급한 재하 위치에 비해 작게 산정되었기 때문에 고려하지 않았다.

3. 강바닥판 피로응력에 대한 영향 변수

강바닥판은 교면포장과 바닥판, 종리브 및 횡리브 등으로 구성되어 있으며 각각의 형상 및 제원에 따라 강바닥판의 피로응력범위에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 각 부재들이 강바닥판의 피로응력범위에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다음과 같은 변수들을 고려하였다.

3.1 교면포장의 두께

아스콘 계열 포장 재료의 경우 고온 환경에서는 연화현상이 발생하여 탄성계수가 급격히 저하하고 강성을 거의 발휘하지 못하게 된다.

하지만 강성이 저하되는 경우라도 포장 단면의 두께가 유지되는 이상 Fig. 6에 나타난 바와 같이 차륜하중이 포장체를 통과하며 강바닥판에 더 넓게 분포되어 전달된다.

P-E method에서도 포장체를 통과하며 더 넓어진 접지면적을 사용하여 강바닥판에 작용하는 응력을 계산하기 때문에 교면포장의 두께는 피로응력과 밀접한 연관이 있을 것으로 예상된다.

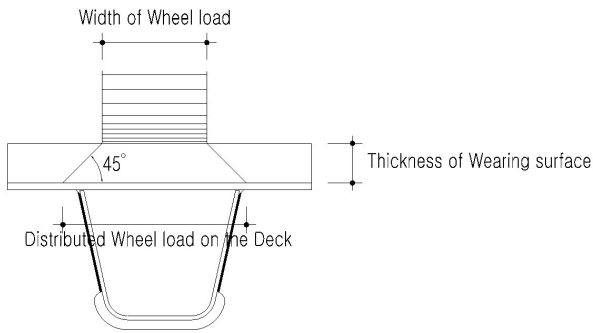


Fig. 6 Distribution of Wheel Load through Wearing Surface

3.2 교면포장의 종류

최근까지 교면포장에는 구스아스팔트 및 에폭시와 같은 아스콘 계열 포장재료가 많이 사용되었으나 피로균열 발생 부위의 피로응력을 줄일 수 있다는 이유로 SFRC등 고강도 콘크리트 계열 포장재료도 사용되기 시작하고 있어 포장의 강성이 피로 응력 범위에 어떤 영향을 미치는지 개략적으로 분석하였다.

3.3 데크플레이트의 두께

교면포장의 박층화 추세로 차륜하중이 보다 직접적으로 강바닥판에 전달됨에 따라 피로응력이 증가하고 있는데 데크 플레이트의 두께를 증가시키는 것이 이에 대한 대안 중의 하나로 제시되고 있다. 따라서 데크 플레이트의 두께와 피로응력 범위사이에서 어떤 영향이 있는지 분석해 보았다.

3.4 횡리브의 간격

횡리브의 간격이 길어질수록 종리브의 한 지간이 길어져 더 큰 모멘트를 발생시킬 것으로 예상되므로 횡리브의 간격과 피로응력과의 관계를 알아보았다.

3.5 횡리브의 복부길이

횡리브의 복부길이를 증가시킬 경우 횡리브의 단면2차 모멘트가 커지기 때문에 종리브와 횡리브 사이의 합성응력에 의한 피로응력 산정 시 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4. 강바닥판 피로응력과 영향 변수들과의 관계

4.1 모델교량의 형상

모델교량의 형식은 Table 2와 Fig. 7에 나타난 바와 같이 사장교이며 주경간 500m, 측경간 각각 200m로 구성된 3경간 연속교이다.

거더는 Fig. 8과 같이 U형 폐단면 종리브와 횡리브로 구성된 직교이방성 강바닥판 형식을 갖춘 유선형 박스거더이다. 거더의 강바닥판 제원을 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Dimension of the Model Bridge

Structural Type	Cable stayed bridge
Span	3Span (200m + 500m + 200m)
Girder	Streamlined girder (Width:24.5m)
Tower	Inverse Y Shape (Reinforced Concrete)
Cable	Fan Type (Steel)

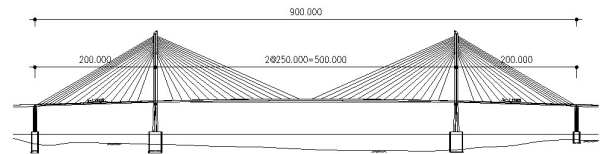


Fig. 7 Longitudinal Section of the Bridge for Analysis

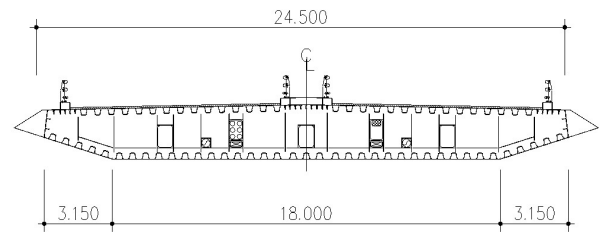


Fig. 8 Cross section of the Girder for Analysis

Table 3 Initial Value of the Girder

Wearing surface	Thickness	80 mm
	Type	Epoxy
Deck plate	Thickness	14 mm
Floor beam	Rib span	3 m
	Length of web	0.8 m

4.2 교면포장의 두께와 피로응력의 관계

모델교량 교면포장의 두께는 초기 80 mm이며 A 부분의 피로응력범위는 55.6 MPa, B 부분의 피로응력범위는 23.5 MPa로 계산되었다.

교면포장의 두께를 초기값에서 20 mm씩 감소시켜 가며 피로응력범위의 변화를 살펴본 결과를 Table 4에 정리하였다. A 부분, B 부분 모두 포장두께가 증가함에 따라 응력범위 및 변화율이 점점 감소하는 경향을 보였다. 이것은 포장두께가 증가하면서 발생하는 사하중 증가에 의한 모멘트 증가량에 비해 하중 분배효과로 인한 활하중의 모멘트 감소량이 더 크게 나타나기 때문이다.

초기조건하에서는 A 부분의 피로응력범위가 피로허용응력 범위인 70.0 MPa에 어느 정도 근접해 있고 교면포장 두께가 감소함에 따라 피로 허용응력 범위에 더욱 가깝게 근접하므로 용접의 품질 등 변수들에 따라 A 부분에 균열이 발생할 위험이 비교적 높다고 보여 진다.

B 부분의 피로응력범위는 포장두께가 감소함에 따라 A

Table 4 Thickness of Wearing Surface and Fatigue Stress

Thickness (mm)		0	20	40	60	80
A	Range of Stress (MPa)	62.8	60.6	58.7	57.0	55.6
	Amount of change (Rate)	+7.2 (12.9%)	+5.0 (9.0%)	+3.1 (5.6%)	+1.4 (2.5%)	-
B	Range of Stress (MPa)	29.4	27.8	26.2	24.8	23.5
	Amount of change (Rate)	+5.9 (25.1%)	+4.3 (18.3%)	+2.7 (11.5%)	+1.3 (5.5%)	-

A : Welded part between deck plate and U-rib
B : Welded part between U-rib and floor beam

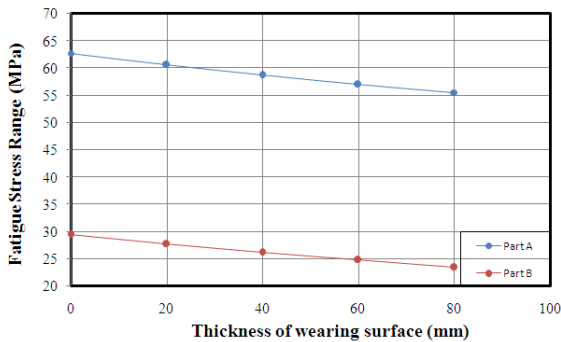


Fig. 9 Fatigue-Wearing Thickness Curve

부분에 비해 비교적 급격히 증가하지만 상대적으로 피로 허용응력범위까지의 여유가 크므로 피로균열이 발생할 위험은 낮은 것으로 보인다.

또한 A, B 부분 모두 교면포장이 없는 경우에도 피로 허용응력 범위 안에서 응력 범위가 형성되므로 모델교량과 같은 설계조건 하에서는 박층 교면포장을 적용하여도 용접 품질만 확보된다면 강바닥판의 피로균열 문제는 크게 발생하지 않을 것으로 예상된다.

따라서 강바닥판의 피로균열보다는 박층화에 따른 교면포장재료 자체의 내구성을 확보하는 것이 교면포장 박층화에 더욱 중요한 요소라고 판단된다.

그러나, 구조해석 결과 B 부분의 균열발생이 우려되는 교량이라면 교면포장의 두께를 감소시키는 것에 대하여 신중히 접근하는 것이 좋을 것 같다.

4.3 데크 플레이트의 두께와 피로응력의 관계

모델교량의 데크 플레이트 초기 두께는 14mm이다. Table 5에서 A 부분을 보면 데크 플레이트의 두께가 A 부분의 피로응력 범위에 큰 영향을 미치지 못하는 반면 B

Table 5 Thickness of Deck Plate and Fatigue Stress

Thickness (mm)		10	12	14	16	18
A	Range of Stress (MPa)	56.2	55.7	55.6	55.7	56.0
	Amount of change (Rate)	+0.6 (1.1%)	+0.1 (0.2%)	-	+0.1 (0.2%)	+0.4 (0.7%)
B	Range of Stress (MPa)	34.2	28.1	23.5	20.0	17.1
	Amount of change (Rate)	+10.7 (45.5%)	+4.6 (19.5%)	-	-3.5 (-14.8%)	-6.4 (-27.2%)

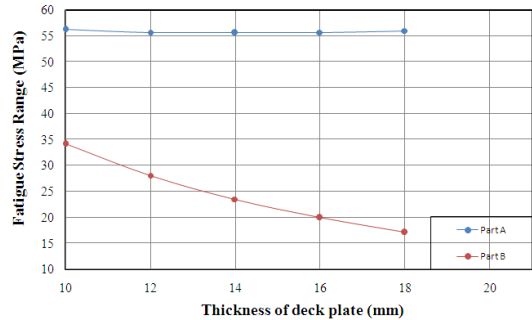


Fig. 10 Fatigue-Deck plate thickness Curve

부분의 피로응력범위에는 비교적 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이것은 A 부분에 작용하는 합성응력의 영향으로 보여진다. 종리브의 단면계수 산정시 사용한 유효단면을 보면 데크 플레이트 부분 및 U리브 등 구성요소들의 단면이 중립축을 기준으로 위쪽과 아래쪽에 고르게 분포함을 알 수 있다. 따라서 데크 플레이트의 두께가 변경되어도 중립축의 이동이 크지 않지만 횡리브의 경우에는 종리브에 비해 단면의 분포가 고르지 못해 데크 플레이트의 두께변화에 따라 중립축이 크게 이동하게 된다. 데크 플레이트의 두께가 증가하면 종리브의 경우 중립축의 위치는 조금 위로 이동하고 단면 2차 모멘트가 증가하여 단면계수가 증가하게 되지만 횡리브의 경우 중립축의 위치가 비교적 많이 위로 이동하여 단면2차 모멘트가 증가함에도 불구하고 단면계수는 감소하게 된다. 따라서 데크 플레이트의 두께가 증가하면 A 부분의 교축방향 응력은 감소하지만 교축 직각방향 응력은 오히려 증가하게 된다.

결과적으로 교면포장 박층화나 그 밖의 이유로 피로균열의 발생이 예상되는 경우 데크 플레이트의 두께를 증가시키는 것은 B 부분의 피로균열 발생을 억제하는데는 도움이 될 수 있지만 A 부분의 피로균열 제어에는 큰 역할을 할 수 없을 것으로 생각된다.

4.4 횡리브의 간격과 피로응력의 관계

모델교량의 초기 횡리브 간격은 3 m이다. Table 6에 나타낸 바와 같이 횡리브의 간격이 줄어들수록 종리브의 지간이 감소하는 효과가 있어 모멘트의 크기 또한 감소하므로 피로응력 범위도 줄어드는 모습을 보인다. 반면 횡리브의 간격이 늘어나면 반대현상이 발생하므로 피로응력 범위도 증가하게 된다. 횡리브의 간격은 A 부분과 B 부분의 피로응력 범위에 모두 중요한 영향을 미치는 것으로 보인다.

특히 A 부분의 경우 횡리브의 간격이 3.25 m와 3.5 m로 증가함에 따라 피로응력 범위가 급격히 증가하는 모습을 보이는데 이는 횡리브의 간격에 따라 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 유발하는 차륜하중의 재하 위치가 달라지기 때문이다.

DB-24 하중에서 사용하는 트럭의 후륜간 거리는 최소 4.2 m, 최대 9.0 m이다. 예를 들어 종리브의 지점에 최대 부모멘트를 발생시키려면 Fig. 12와 같은 위치에 재하

Table 6 Rib Span Length and Fatigue Stress

Rib span (m)		2.5	2.75	3.0	3.25	3.5
A	Range of Stress (MPa)	48.5	52.2	55.6	68.0	78.4
	Amount of change (Rate)	- 7.1 (-12.7%)	- 3.4 (-6.1%)	-	+12.4 (22.3%)	+22.8 (41.0%)
B	Range of Stress (MPa)	20.2	22.0	23.5	24.8	25.8
	Amount of change (Rate)	- 3.3 (-14.0%)	- 1.5 (-6.4%)	-	+ 1.5 (6.4%)	+2.3 (9.7%)

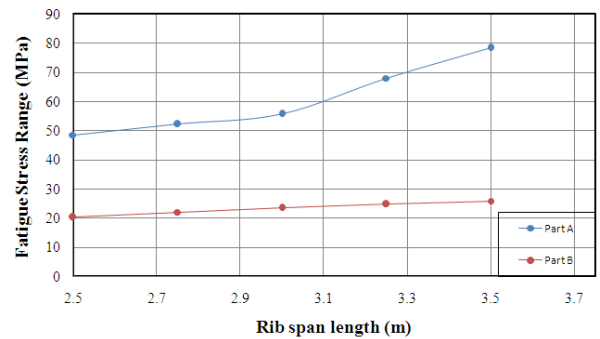


Fig. 11 Fatigue-Rib Span Length Curve

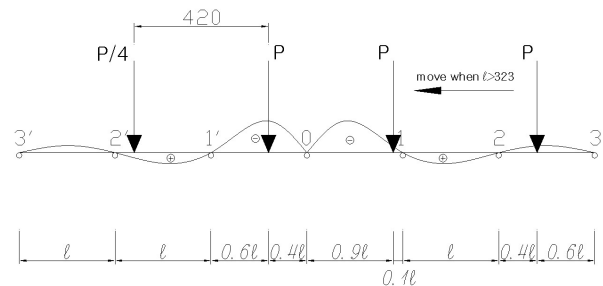


Fig. 12 Movement of Wheel load

하여야 하지만 횡리브의 간격이 3.22 m 이상이 되면 후륜간의 거리인 2.81이 9.0 m를 초과하게 되고 2-3지간에 작용하는 차륜하중의 위치가 0-1지간 사이로 이동하게 된다. 만약 2-3지간의 차륜하중을 0-1지간의 0.9 l 지점에 위치 시킨다면 후륜간 거리는 1.3 l이 되고 이것이 후륜간 거리의 최소값인 4.2 m일 때 횡리브의 간격 l은 약 3.23 m가 되므로 횡리브의 간격이 3.23 m 이상일 경우 0-1 지간에 후륜하중 한 개를 재하할 수 있게 된다. 횡리브의 간격이 커질수록 0-1지간에 재하된 후륜하중은 점점 0지점 쪽으로 이동하여 더 큰 부모멘트를 유발하

게 되고 결국 피로응력 범위의 증가로 나타난다.

이와 같이 횡리브의 간격이 3.23 m를 초과하면 차륜하중 재하 위치의 변동으로 피로응력 범위를 급격히 증가시킬 수 있으므로 가급적 3.2 m 이내로 유지하는 것이 좋을 것 같다.

4.5 횡리브의 복부길이와 피로응력의 관계

모델교량의 초기 횡리브 복부길이는 0.8 m이다. Table 7에서와 같이 횡리브 복부의 길이를 0.05 m씩 증가시켜 보면 A 부분과 B 부분 모두 피로응력 범위가 감소함을 알 수 있다.

그러나 횡리브 복부길이를 0.9 m로 했을 때 A 부분은 약 6.7%의 피로응력 범위가 감소한 반면 B 부분의 피로응력 범위는 1.3% 감소에 그쳤다. 또한 0.65 m로 감소시켰을 경우 A 부분의 피로응력 범위는 34.7% 증가하였으나, B 부분의 피로응력 범위는 2.1% 증가에 그쳐 횡리브 복부길이는 B 부분보다 A 부분에 더 큰 영향을 미친다는

것을 알 수 있다.

특히 A 부분에서는 횡리브 복부길이를 증가 시켜도 피로응력 범위의 감소는 작게 나타나는 반면 횡리브 복부길이를 감소시키면 피로응력 범위가 급격히 감소하고 있다. 이것은 횡리브 복부의 길이가 감소하면 단면2차 모멘트가 작아지고 탄성지점의 영향에 따라 증가하는 모멘트가 증가하여 횡리브에 작용하는 전체 모멘트의 크기가 커지는데 단면2차 모멘트의 증가속도에 비하여 모멘트의 감소속도가 더욱 크기 때문에 복부길이가 작아질수록 더 민감한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

특히 횡리브 복부의 길이가 0.7 m 이하일 경우 복부 길이의 감소에 따른 피로응력 범위가 급격히 증가하므로 복부의 길이는 0.75 m 이상을 유지하는 것이 바람직 할 것으로 보인다.

반면 B 부분에서는 횡리브의 길이가 종리브의 단면계수에 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 횡리브 탄성지점의 영향이 종리브 중앙에 미치는 영향이 작아 횡리브 복부의 길이에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Table 7 Web Length of Floor beam and Fatigue Stress

Web length of Floor beam (m)		0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
A	Range of Stress (MPa)	74.9	65.7	59.5	55.6	53.3	51.9
	Amount of change (Rate)	+19.3 (34.7%)	+10.1 (18.2%)	+3.9 (7.0%)	-	- 2.3 (-4.1%)	- 3.7 (-6.7%)
B	Range of Stress (MPa)	24.0	23.9	23.7	23.5	23.3	23.2
	Amount of change (Rate)	+5 (2.1%)	+4 (1.7%)	+2 (0.9%)	-	- 2 (-0.9%)	- 3 (-1.3%)

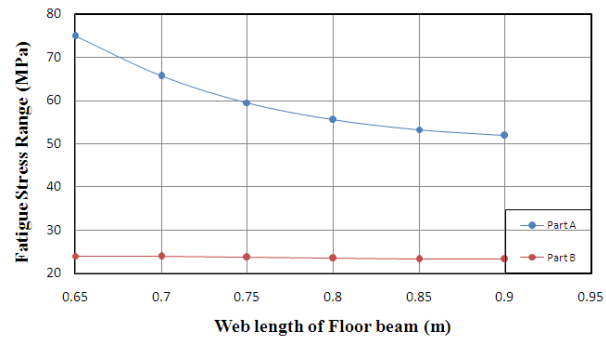


Fig. 13 Fatigue-Web Length Curve

4.6 교면포장의 종류와 피로응력의 관계

아스팔트 계열의 교면포장 재료들은 대체로 탄성계수나 포아송 비의 차이가 크지 않으므로 대표적으로 에폭시 재료와 SFRC를 비교해 보았으며 각 재료의 물성치를 Table 8에 나타내었다.

두가지 교면포장 재료를 적용시켜 피로응력을 검토해 본 결과를 Table 9에 나타내었으며 포장의 강성은 주로 B 부분에 많은 영향을 주었으며 A부분에는 큰 영향을 주

Table 8 Properties of Wearing Surface Material (Lee, 2010)

Property	Unit Weight (t/m ³)	Poisson Ratio	Elasticity (GPa)
Epoxy	2.4	0.3	2.62
SFRC	2.3	0.23	29.2

Table 9 Wearing Surface Material and Fatigue Stress

Wearing surface Material		Wearing surface N/A	Epoxy (80 mm)	SFRC (80 mm)
A	Range of Stress (MPa)	62.8	55.6	57.0
	Range of Stress (MPa)	29.4	23.5	12.0

지 못했다.

교면포장이 전혀 없는 경우와 비교해 보면 에폭시 포장과 SFRC 포장 모두 피로응력을 감소시키는 경향을 보였으나 SFRC의 경우 B 부분에 작용하는 피로응력을 에폭시에 비해 더욱 급격히 감소시키는 경향을 보였다.

SFRC의 탄성계수는 에폭시의 일반적인 탄성계수의 약 10배의 값을 가지고 있다. SFRC와 같이 탄성계수가 높은 포장재료를 사용할 경우 종리브 해석 시에는 포장재의 유효폭이 탄성계수가 낮은 포장재료에 비해 넓어지기 때문에 단면계수가 더욱 증가하고 단면 또한 중립축을 기준으로 상하부에 고르게 분포하므로 중립축의 위치 변동이 크지 않아 강바닥판에 작용하는 응력을 대체로 감소시켜 줄 수 있지만, 횡리브의 경우 중립축을 기준으로 상,하부에 단면이 고르게 분포하지 않아 강성이 높은 포장재가 상부에 추가 될 경우 중립축이 종리브에 비해 더 많이 위쪽으로 이동하게 된다.

따라서 강성이 약한 에폭시 포장에 비해 단면이차계수는 증가하지만 중립축이 더 빠르게 위쪽으로 이동하면서 중립축 아래쪽에 위치하는 용접부와의 거리가 멀어져 단면계수는 더욱 작아지는 결과를 초래한다.

또한 횡리브의 전체 강성이 커짐에 따라 탄성지점의 영향도 커져서 전체 횡리브에 작용하는 모멘트의 총합도 커지게 된다.

횡리브의 단면계수가 작아지고 작용 모멘트는 증가하면서 용접부에 발생하는 교축 직각방향 응력의 폭이 커지게 되므로 signed Von-Mises 등가응력법에 의해 산정한 종리브와 횡리브 용접부의 피로응력 범위는 오히려 증가하게 된다.

반면 종리브의 경우에는 포장의 단면이 추가되어도 중립축의 이동이 크지 않고 종리브와 데크 플레이트 사이의 용접부는 중립축의 위쪽에 위치하므로 용접부와의 거리가 오히려 가까워져 단면계수가 증가하므로 포장의 강성이 강할수록 A 부분 피로응력 범위에는 유리하게 작용함을 알 수 있다.

그러나 포장의 강성증가가 A 부분에 미치는 부정적인 영향이 크지 않으며 B부분에는 매우 긍정적인 효과를 가져오므로, B 부분에 균열발생이 우려되거나 발생한 교량이라면 강성을 갖는 포장을 시공하는 방안을 고려해 볼만하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 직교이방성 강바닥판을 구성하는 부재들의 성질이나 형태가 피로응력에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 P-E method와 signed Von-Mises 등가응력을 활용하여 피로응력을 산정하고 각각의 영향 변수를 변화시키면서 피로응력의 변화를 관찰하였다. 이번 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 교면포장의 두께는 A 부분과, B 부분의 피로응력을 억제하는데 도움이 된다. 모델 교량의 교면포장 두께를 80 mm에서 20 mm씩 감소시킴에 따라 피로응력은 거의 일정한 비율로 증가하였으며 교면포장이 없어지는 경우 80 mm인 경우에 비해 A 부분의 피로응력은 12.9%, B 부분의 피로응력은 25.1% 증가하는 결과를 보였다.
- (2) 데크플레이트의 두께를 모델교량의 초기치인 14mm에서 2mm 간격으로 증감 시켜본 결과 A부분의 피로응력은 0.2%~1.1%까지 변화하는 반면 B 부분의 피로응력은 -27.2%~45.1%로 변화 폭이 매우 커 데크플레이트의 두께는 주로 B 부분의 피로응력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 횡리브의 간격을 모델교량의 초기치인 0.3 m에서 0.25 m 간격으로 증감 시켜본 결과 A 부분의 피로응력은 -12.7%~41.0%까지 변화하며 B 부분의 피로응력은 -14.0%~9.7%까지 변화하여, 횡리브의 간격은 A 부분과 B 부분에 고른 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 A 부분의 경우 횡리브의 간격이 3.23 m를 초과하는 경우 최대 모멘트를 발생시키는 차륜 재하위치의 변동으로 피로응력이 급격히 증가할 가능성이 있다.
- (4) 횡리브의 복부 길이를 모델교량의 초기치인 0.8 m에서 0.05 m 간격으로 증감 시켜본 결과 A 부분의 피로응력은 -6.7%~34.7%까지 변화하며 B 부분의 피로응력은 -1.3%~2.1%까지 변화하여 주로 A 부분의 피로응력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (5) 교면포장의 재료를 강성이 약한 아스콘 계열의 에폭시와 강성이 강한 콘크리트 계열의 SFRC로 각각 적용하여 피로응력을 계산한 결과 포장의 강성은 B부분에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(6) 본 연구에서 제안된 피로응력 산정 방법은 집합부의 모서리에서 발생하는 응력집중을 고려할 수 없으므로 구조해석 프로그램등과 병행해서 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 활용하여 설계 중인 교량에 피로균열이 예상된다거나 사용 중인 교량에 피로균열이 발생한 경우 균열발생 위치와 예상 피로응력 크기에 따라 교면포장 재료 교체나 횡리브 복부 보강 등 효율적인 대응이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 성균관대학교 Post-Doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 건설교통부, “강도로교 상세부 설계지침”, 2006.
2. 경갑수, 신동호, 김교훈, “구조상세부의 피로거동을 고려한 고성능 강바닥판 개발에 관한 해석적연구”, 한국강구조학회 논문집, vol. 18, No. 4, 2006.
3. 경갑수, 신동호, 박경진, “강바닥판의 피로손상 대책 및 보강

- 방법”, 한국강구조학회 학술지, 제18권 1호, 통권 제66호, 2006.
4. 대한토목학회, “케이블 강교량 설계지침(안)”, 2006.
5. 목포대학교 구조계산서, 강바닥판 설계편, 2005.
6. 이종엽, “포장과 강바닥판 거동 특성과의 해석적 연구”, 한국해양대학교, 공학석사 논문, 2010.
7. 이학주, 강재윤, 최병인, 김주성, “동력학 시뮬레이션에 의한 다축 랜덤하중 하에서의 자동차 서브프레임의 고 되풀이수 피로손상 평가”, 대한기계학회 논문집 A권, 제27권 6호, 2003.
8. 전성수, 유성현, 김문영, “강상관형교의 응력해석 방법에 관한 비교연구”, 대한토목학회 학술대회, vol. 2008, No. 10, 2008.
9. 전진수, 배두병, 오순택, 공병승, 최준호, “내부다이아프램이 설치된 강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도”, 대한토목학회 학술대회, vol. 2002, No. 11, 2002.
10. 최동호, 최항용, “강바닥판 데크플레이트와 종리브 현장연결 스캐립부의 피로강도 평가”, 한국강구조학회 논문집, vol. 14, No. 6, 2002.
11. 한국도로교통협회, “건설교통부 제정 도로교 설계기준”, 2005.
12. 한국도로교통협회, “도로설계기준 및 해설”, 2008.
13. 한태진, “3차원 실물 강바닥판 시험체의 면외거동을 고려한 연구”, 국민대학교, 공학석사 논문, 2011.
14. American Institute of Steel Construction, “Design Manual for Orthotropic SteelPlate Deck Bridges”, 1963.
15. M. S. Troitsky, D.Sc., “Orthotropic Bridges Theory and Design, 2nd ed”, 1987.

(접수일자 : 2011년 11월 22일)

(수정일자 : 2012년 4월 5일)

(심사완료일자 : 2012년 4월 10일)

요 지

강재의 품질향상으로 강교에 있어서 재료자체의 파괴보다는 반복하중에 의한 피로균열 문제가 더욱 중요한 요소가 되었다. 재료의 항복으로 인한 교량의 붕괴 등의 사례는 거의 보고되고 있지 않지만 용접부에 발생하는 피로균열에 대한 사례는 매우 많이 보고되고 있다. 종리브와 횡리브, 데크 플레이트로 구성된 직교이방성 강바닥판의 피로응력은 강바닥판을 구성하는 요소들의 구성 형태 및 물성과 밀접한 관련이 있다. 본 논문에서는 Pelikan-Esslinger method와 signed Von-Mises 등가응력 개념을 활용하여 직교이방성 강바닥판의 피로응력을 산정하는 방법을 제시하고, 직교이방성 강바닥판 구성요소들의 구성형태와 물성을 변화시켜 피로응력에 미치는 영향을 분석하였다. 직교이방성 강바닥판의 피로응력과 구성요소의 상관관계 경향을 분석함으로써 설계 및 유지보수 시에 더 효율적인 대안을 찾는 데 도움이 될 수 있을 것이다.

핵심 용어 : 직교이방성 강바닥판, 피로응력, 펠리칸-에슬링거 방법, 폰-마이세스 등가 응력