

## 포장체의 강성이 강상판의 거동에 미치는 영향

### Effects of Pavement Stiffness on the Structural Behavior of Orthotropic Steel Plate Deck

이 환 우\*  
Lee, Hwan-Woo

박 순 호\*\*  
Park, Soon-Ho

이 동 준\*\*  
Lee, Dong-Jun

---

#### ABSTRACT

The stiffness of pavement is scarcely considered in structural analysis of the superstructure bridge. It will be reasonable in the case of asphalt concrete pavement over concrete deck plate because stiffness of the pavement compared with concrete deck plate can be ignored. Additionally, it is considered correct to do a design with a safety. However, various pavement materials which have even value reaching to the elastic modulus of concrete are applied to the orthotropic steel deck plate which has a relatively less stiffness comparing with the concrete deck plate.

In this paper, the steel plate deck of the bridge of real project was modeled considering the pavement stiffness for the FEM analysis and the linear elastic analysis was performed. It was assumed to be perfectly bonded between the steel plate deck and the pavement and the temperature effect was ignored. It was analyzed on the vertical deflection of steel deck plate influencing to the serviceability of pavement and the bending stress of steel deck plate related to the fatigue life. As a result, It was indicated that the structural behavior of the orthotropic steel deck plate could be affected by the stiffness of pavement in some cases.

---

#### 1. 서 론

사용되는 재료인 강재의 강도 신뢰성이 높고 재료의 역학적 거동도 상당부분을 명확히 파악할 수 있으며, 공장제작으로 품질관리가 용이하다는 장점으로 인하여 우리 나라에서도 1990년대 이후부터 장대교의 수요가 늘어나면서 여러 가지 형식의 강교량이 설계, 시공되고 있다.<sup>(1)</sup> 특히 강상판(orthotropic steel plate deck) 교량은<sup>(2),(3)</sup> 용접기술의 발달과 고도화된 구조해석 기술의 발전에 힘입어 최근에는 건설사례가 점점 더 증가하고 있는 교량 형식중 하나이다.<sup>(4)</sup>

한편, 교량의 교면포장체는 차량의 주행성을 양호하게 하고, 차량의 축하중을 상판에 고르게 분포시켜 교량 상판에서 발생될 수 있는 과도한 응력집중을 저감시키는 역할을 하며, 마모나 우수로부터 상판을 보호하는 역할을 한다. 이러한 교면포장체의 기본적인 역할은 강상판의 경우에도 마찬가지로 요구되어 진다. 그러나 강상

---

\* 정회원 · 부경대학교 토목공학과 교수

\*\* 부경대학교 토목공학과 석사과정

판의 경우는 콘크리트 상판에 비해서 강성이 매우 작으므로 차량의 축하중에 의하여 국부적인 변형이 상대적으로 크게 발생한다. 이는 포장체로서 요구되는 여러 가지 성능유지에 유해한 요인이 될 수 있다. 따라서, 우수한 공용성을 확보하기 위한 다양한 강상판 교면포장 공법들이 개발 적용되고 있다. 현재 강상판에 적용되는 대표적인 교면포장 재료들은 표 1에서 보는 바와 같이 개질 아스팔트, 구스 아스팔트, 매스틱 아스팔트, 에폭시 아스팔트 등이 있다.

표 1 국내·외의 대표적인 강상판 교면 포장의 시공 사례<sup>6)</sup>

	종류	개소	평균포장두께	비고
국내	개질 아스팔트	4	35mm	서강, 정산 1, 청담, 성수, 영종대교 등의 상부층
	구스 아스팔트	3	43mm	정산 1, 청담, 영종대교 등의 하부층
	매스틱 아스팔트	5	45mm	진도, 굴현, 형산대교
국외	개질 아스팔트	7	55mm	미국-Luling Bridge 등
	매스틱 아스팔트	9	43mm	영국-The Forth Bridge 등
	구스 아스팔트	4	40mm	하부-구스아스팔트, 상부-개질아스팔트의 형식이 주류, 일본 Yokohama Bay Bridge 등
	에폭시 아스팔트	16	50mm	중국-Second Yangtze Bridge 등

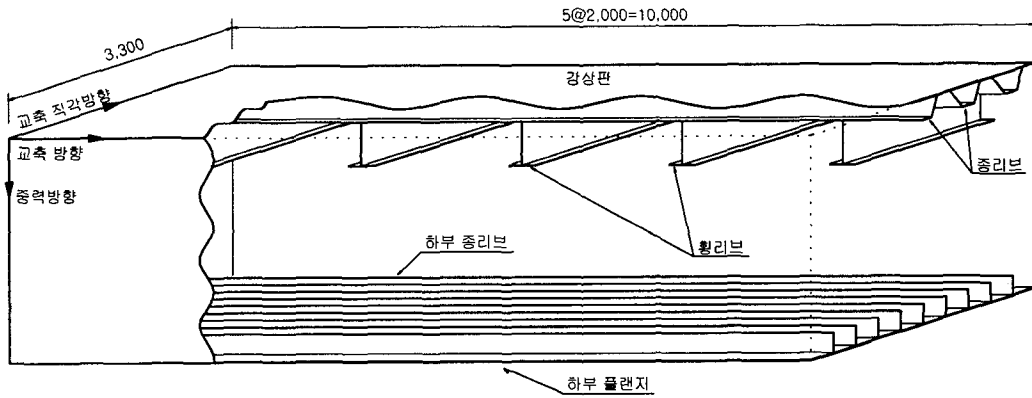
일반적으로 바닥판의 구조설계 시 포장체는 그 강성이 고려되지 않고 비구조체로 간주되고 단지 고정하중으로서 고려된다. 그러나 강상판의 교면포장에 적용되는 포장체의 탄성계수는 콘크리트에 비해 약 1/100 정도에 지나지 않는 것부터 콘크리트와 비슷한 수준에 이르는 것까지 있다. 평균포장 두께도 표 1에서 보는바와 같이 강상판의 두께(보통 12mm 혹은 14mm 정도)에 비해 3~4배 크다. 따라서 포장체의 강성이 강상판의 거동에 미치는 영향을 무시할 수는 없을 것으로 본다. 또한 대부분의 포장재료는 온도에 매우 민감한 점탄성체로서 온도에 따라 강성이 변한다. 이는 강상판의 구조해석 시 포장체의 강성을 고려하였다면 실제 발생하는 강상판의 응력수준 등이 상당한 폭을 갖고 변할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 영향은 결국 강상판의 여러 용접부위 등의 피로수명에 영향을 줄 수 있게 될 것이다. 본 논문에서는 실제 교량의 강상판 단면을 대상으로 모델링하여, 포장체의 강성이 강상판의 거동에 미치는 영향을 알아보았다.

## 2. 수치해석모델

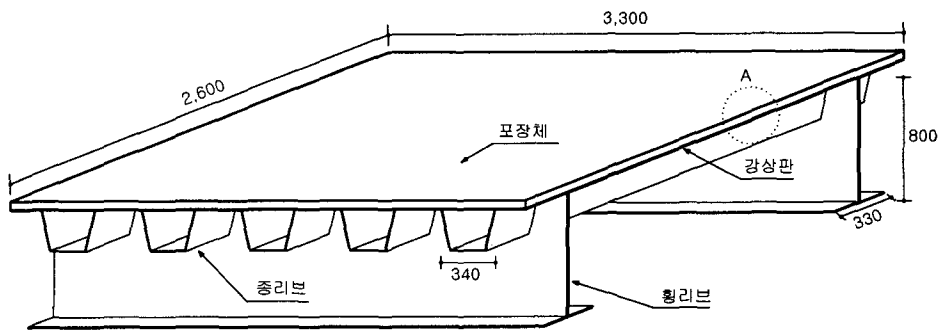
### 2.1. 구조모델

수치예제 대상의 강상판 단면은 현재 시공중인 K 교량의 그림 1(a)와 같은 강상판 박스거더를 대상으로 하였다. 구조모델의 크기는 본 연구의 목적을 감안하여 교축직각 방향으로 박스의 웹사이클, 교축방향으로는 예비 해석을 통하여 종방향 거동 오차를 최소화하는 범위로 확인된 횡리브 사이의 단면으로 그림 1(b)와 같이 간소화 하였다. 그리고 그림 1(c)에 보이는 바와 같이 포장체와 강상판 사이의 접촉층(1mm), 포장층(50mm)을 모델링 하였다.

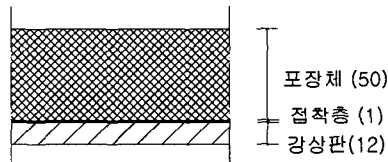
사용된 유한요소는 범용구조해석 프로그램인 SAP2000<sup>6)</sup>에 내장된 4절점 쉘(shell)요소로 강상판을, 8절점 고체(solid)요소로 접촉층과 포장층을 5cm×5cm 크기로 모델링 하였으며 강상판과 접촉층의 중심면 사이는 강체(rigid)요소로 연결하였다. 경계조건은 박스거더 웹과 강상판의 접합선을 따라 힌지(hinge)로 처리하였다.



(a) 박스거더의 단면도



(b) 해석범위



(c) 강상판과 포장층 (상세도 A)

그림 1 수치해석 모델 (단위, mm)

## 2.2. 재료 모델

본 해석에서 사용된 재료는 강상판과 리브들에 사용된 강재(s)와 포장층에 사용된 아스팔트 콘크리트(p), 그리고 강상판과 포장층 사이의 접착층에 사용된 접착재료(b)가 있다. 본 연구는 포장체의 강성정도에 따른 상대적인 효과를 분석할 목적에 있었으므로 모든 재료들을 등방성의 선형탄성 재료(isotropic linear elastic material)로 가정하였다.

강재는 탄성계수  $E_s$  가  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  이고 포아슨비  $\mu_s$  는 0.3를 갖는 것으로 고정하였다. 그러나 아스팔트 콘크리트의 재료상수 값은 강상판의 교면포장에 사용되는 재료 중에 탄성계수가 가장 높은 에폭시 바인더(epoxy binder)를 사용한 폴리머 콘크리트(polymer concrete)가 낮은 온도에서 가지는 값을 기준으로 약 50% 더 상회하는 값( $E_p = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ )에서부터 일반 개질 아스팔트가 높은 온도에서 가지는 탄성계수

표 2 해석에 적용된 포장체의 탄성계수  $E_p$

탄성계수비 $n$ ( $= E_s / E_p$ )	$E_p$ ( $kg/cm^2$ )	탄성계수비 $n$ ( $= E_s / E_p$ )	$E_p$ ( $kg/cm^2$ )	탄성계수비 $n$ ( $= E_s / E_p$ )	$E_p$ ( $kg/cm^2$ )
10	$2.1 \times 10^5$	60	$3.5 \times 10^4$	250	$8.4 \times 10^3$
20	$1.05 \times 10^5$	80	$2.625 \times 10^4$	300	$7.0 \times 10^3$
30	$7.0 \times 10^4$	100	$2.1 \times 10^4$	400	$5.25 \times 10^3$
40	$5.25 \times 10^4$	150	$1.4 \times 10^4$	500	$4.2 \times 10^3$
50	$4.2 \times 10^4$	200	$1.05 \times 10^4$	600	$3.5 \times 10^3$

값을 약 50% 이상 하회하는 값( $E_p = 3.5 \times 10^3 kg/cm^2$ )까지 15단계에 걸쳐 변화시키면서 적용하였다. 표 2에는 본 연구의 수치해석에서 고려된 포장층의 탄성계수값을 탄성계수비( $n = E_s / E_p$ )와 함께 정리하였다. 그리고 포장재료가 점탄성체임에도 불구하고 재하하중의 전달효과를 극대화하고 해석변수를 감소시킬 목적으로 포아슨비는 0.0으로 적용하였다. 접착층은 실제 시공에서 얇은 막으로 도포되어 포장체와 강상판 사이의 완벽한 접착여부를 좌우할 뿐 직접적인 구조체로서 볼 수는 없을 것이다. 따라서, 접착층의 탄성계수( $E_b = 0.0$ )는 고려하지 않았고 접착정도에 따른 효과를 고려하기 위하여 전단탄성계수  $G_b$ 만을 적용하였다. 본 연구에서는 포장체의 접착정도를 완전 접착되는 것으로 가정하여 접착체의 전단탄성계수  $G_b$ 는 포장체의 전단탄성계수  $G_p$ 값과 같은 값을 적용했다.

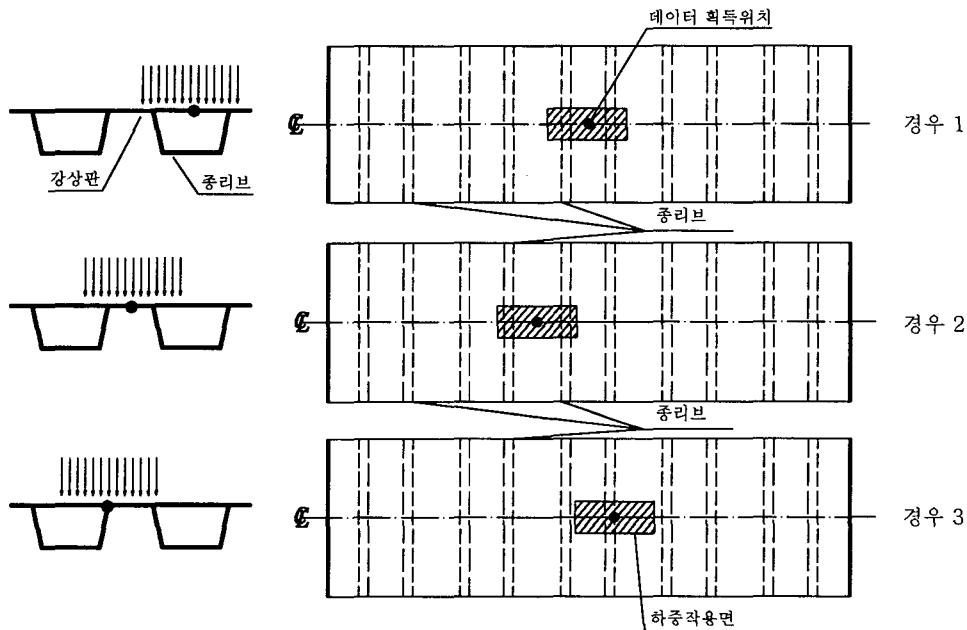


그림 2 하중 재하위치

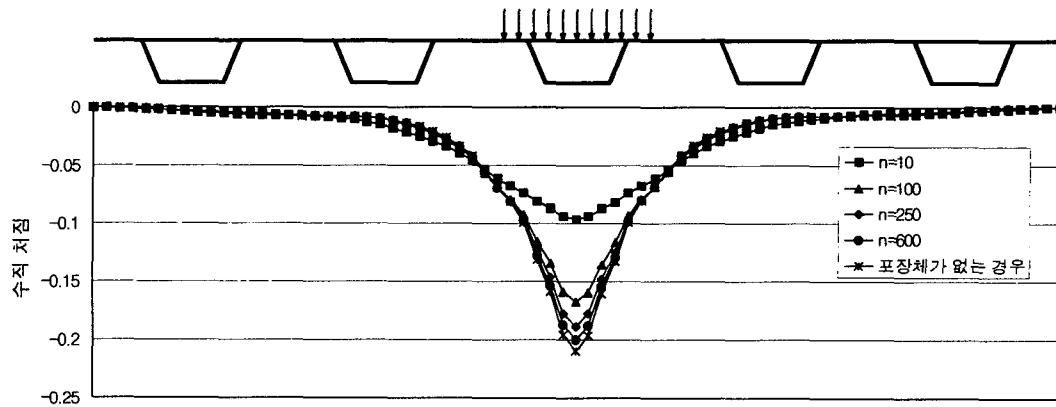
### 2.3. 적용하중

구조모델에는 DB-24 하중의 후륜 축하중(9,600 kg)을 포장체 상부에 접지면적(20cm×50cm)에 분포시켜 면하중으로 적용했다.<sup>(7)</sup> 그 외 온도하중이나 포장체의 자중 등은 적용하지 않았다. 그림 2에는 적용하중의 경우들과 강상판 요소들에 대한 해석결과들의 획득위치를 보여주고 있다. 경우 1은 U형 종리브로 둘러싸인 내부 강상판의 중앙점에, 경우 2는 적용하중의 합력점을 인접 U형 종리브들 사이의 강상판 중앙점에 그리고 경우 3은 U형 종리브의 용접선의 중앙점에 각각 일치시켜 해석하였다.

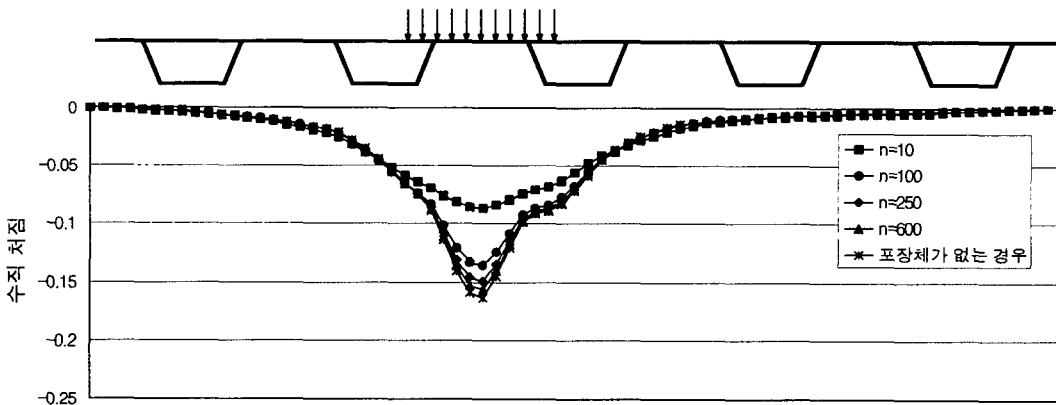
## 3. 수치 해석결과

### 3.1. 강상판의 수직처짐

그림 3은 탄성계수비( $n = E_s/E_p$ )가 10, 100, 250, 600일 때 각 하중 경우 별 교축직각 방향의 수직처짐( $\delta_{ps}$ )을 보여주고 있다. 이때 하중을 포장체가 없는 강상판에 직접 적용시킨 경우( $\delta_{ss}$ )에 대하여도 해석결과와의 비교를 위해 나타내었다. 그리고 그림 4에서는 각 경우의 처짐비( $\delta_{ss}/\delta_{ps}$ )을 정리하였다.

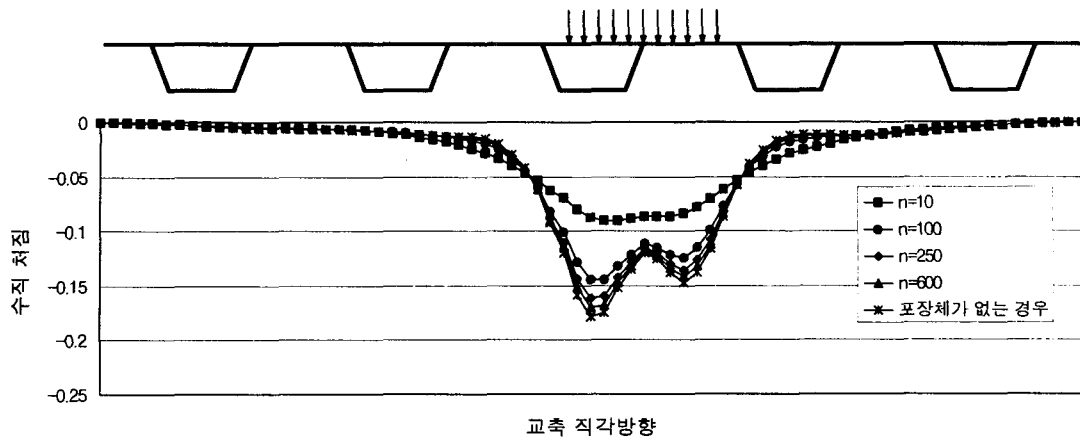


교축 직각방향  
(a) 경우 1 (단위, cm)



교축 직각방향  
(b) 경우 2 (단위, cm)

그림 3 포장체의 강성차이에 따른 수직처짐 (계속)



(c) 경우 3 (단위, cm)

그림 3 포장체의 강성차이에 따른 수직처짐

그림 3과 4를 통하여 탄성계수비가 증가함에 따라서 즉, 포장체의 강성이 감소함에 따라서 수직처짐이 포장체가 없는 강상판의 처짐값( $\delta_{ss}$ )에 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 탄성계수비  $n$ 이 작을 때 ( $n=10$ ), 즉 포장체의 강성이 매우 클 경우에 포장체의 강성을 고려하지 않고 평가된 처짐이 경우 1에서는 약 2.2배까지 과대하게 평가되고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 적용된 포장체의 탄성계수는 실제 포장재료들의 값들을 모두 포함할 수 있는 정도의 충분한 범위를 가지고 가정되었다. 실제 교면포장 재료의 한 종류인 에폭시 콘크리트는 탄성계수비가 높고 그 값이 14.5~29<sup>(8)</sup>까지의 범위로 나타나고 일반 개질 아스팔트의 경우는 온도의 증감에 따라서 약 100~200<sup>(9)</sup> 사이의 값을 가진다. 이 값을 기준으로 그림 4의 경우 1에 대하여 살펴보면 에폭시 아스팔트의 경우는 포장체의 강성을 고려하지 않는 경우 강상판의 수직처짐이 약 1.6 배 이상 과대 평가될 수 있고, 일반 개질 아스팔트의 경우는 약 1.2 배 내외의 범위에서 과대 평가될 수 있을 것으로 본다.

강상판의 수직처짐은 포장재료의 공용성능에 큰 영향을 주는 인자이다. 이에 따라 일부 설계기준에서는 축하중에 의한 강상판의 처짐을 제어하기 위하여 강상판의 최소 두께를 일정 값 이상으로 하도록 규정하고 있다. 이 경우 포장체의 강성을 고려하지 않고 추정된 처짐에 의해 최소 두께를 결정할 때는 비 경제적인 단면이 결정될 수도 있을 것이다.

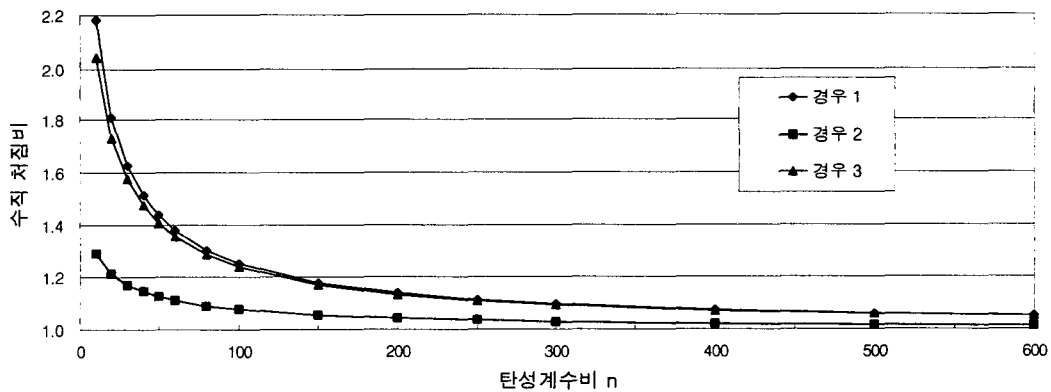


그림 4 각 경우별 수직처짐비

### 3.2. 강상판의 휨 응력

해석된 예제들의 결과에서 교축방향의 최대 휨모멘트(교축직각방향을 휘게하는 모멘트)를 포장체의 강성이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우의 비율(포장체가 시공되지 않은 경우/포장체가 시공된 경우)로써 정리하면 다음의 그림 5과 같다. 강상판의 단면이 일정한 두께를 가졌으므로 휨응력에 대한 결과도 같다.

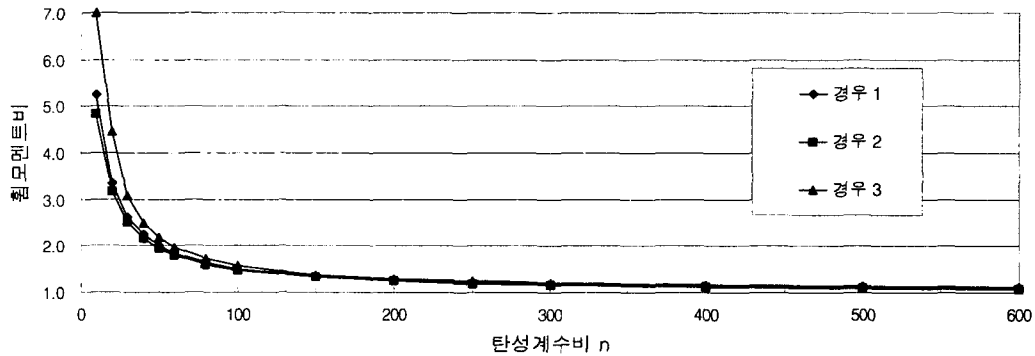


그림 5 각 경우별 최대 휨모멘트비

그림 5에서 보는 바와 같이 강상판에 발생하는 휨모멘트(응력)도 수직처짐과 마찬가지로 포장체의 강성 차이에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 포장체의 강성을 고려하지 않는 경우에 에폭시 아스팔트가 가지는 실제의 강성의 범위에서는 약 1.7 배 이상, 개질 아스팔트의 범위에서는 약 1.3~1.5배 정도로 강상판의 휨응력이 과대 평가될 수 있을 것이다. 이 경우 강상판의 피로수명 평가에 영향을 줄 수 있다. 즉 포장체의 강성을 고려하지 않고 얻어진 강상판의 발생응력으로 추정된 피로수명은 실제보다 과소 평가될 수도 있을 것이다.

### 4. 결 론

일반적으로 교량의 구조해석시에 포장체의 강성은 고려하지 않는다. 이와 같은 구조해석은 콘크리트 상판에 있는 아스팔트 콘크리트 포장체들의 경우에 콘크리트 상판에 비하여 강성을 무시할 수 있을 정도이므로 합리적일 것이다. 특히 기존의 포장체들의 경우 온도에 따라 재료의 성질이 점탄성적으로 크게 변하기 때문에 안전측의 설계를 위해서도 포장체의 강성이 무시되는 일반적인 해석절차는 적절한 것으로 본다. 그러나, 콘크리트의 탄성계수 값에 근접하는 재료를 포함한, 다양한 포장재료가 적용되고, 콘크리트 상판에 비하여 상대적으로 강성이 작은 강상판 교량의 경우에는 구조해석시에 포장체의 강성을 일방적으로 무시할 수는 없을 것으로 본다.

본 논문에서는 현재 시공중인 K 교량의 강상판 단면과 포장체를 모두 유한요소로 모델링하여 포장체의 강성을 변화시키면서 범용구조해석 S/W를 사용하여 DB-24 후륜 축하중을 작용시켜 선형탄성 해석을 수행하였다. 이때 강상판과 포장체는 완전 접촉되는 것으로 가정하였으며 온도의 영향은 무시하였다. 그리고 해석결과 중, 포장체의 공용성능에 영향을 주는 강상판의 수직처짐과 강상판의 피로수명 평가에 영향을 주는 휨응력에 대하여 분석하였다. 그 결과, 포장체의 강성효과는 경우에 따라 강상판의 구조적 거동에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

1. 조선규, "강교 설계시의 주요착안사항 및 대책", 한국강구조공학회지, 제9권 제4호, 1997, pp.107~128.
2. AISC, *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges*, New York, p.223.
3. M.s. Troitsky, *Orthotropic Bridges*, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Ohio, 1987, p.338.
4. 한국강구조학회, *강구조편람 제 4 권 강도로교의 설계*, 동양문화인쇄, 서울, 1995, p.710.
5. 부경대학교 산업과학기술연구소, *강상판 교면포장 공법에 관한 연구*, 2000, p.145.
6. CSI, *SAP 2000 Nonlinear Analysis Reference*, California, 1988, p.419.
7. 대한토목학회, *도로교표준시방서*, 기문당, 서울, 1999, p.1063.
8. Vellore S. Gopalatnam, *Temperature-Dependent Performance of Polymer Concrete Wearing Surface System on the Poplar Street Bridge*, University of Missouri-Columbia, 1999, p.76.
9. 김수일, "아스팔트 콘크리트층의 유효탄성계수 결정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제18권 제III-1호, 1998, pp.31~40.