

유한요소해석을 사용한 강상판 교면포장의 방수층 응력해석

Stress Analysis in Waterproof Layer on Steel Bridge Deck Pavement Using Finite Element Analysis

이현종 * · 김명재 ** · 우영진 *** · 박희문 ****

Lee, Hyun Jong · Kim, Myoung Jae · Woo, Young Jin · Park, Hee Moon

1. 서론

교면포장의 기능은 단순히 차량의 소통을 위한 포장층의 역할뿐만 아니라 교량상판을 보호하는 기능도 수행되어야 하기 때문에 교면포장의 내구성 확보는 교량의 내구성 측면에서도 중요한 문제이다. 특히 교면포장은 진동 및 충격, 혹독한 기상조건에 그대로 노출이 되어 일반 토공부 포장보다 더 큰 파손요인이 상존하고 있으며, 유지 보수시 교통이 심하게 정체되는 문제 등으로 인하여 일반 토공부에 비해 고가인 공용성이 우수한 포장재료를 사용하고 있다. 또한, 현재 국내 교면포장의 설계 및 시공은 대부분 과거의 경험을 바탕으로 이루어지고 있어 기관별 설계기준이 마련되어 있지 않을 뿐만 아니라 교량별로 적용되는 설계 및 시공 기준도 상이한 실정이다. 이러한 요인들로 인하여 현재 국내 교면포장의 공용성은 선진국에 비해 현저히 떨어지는 것으로 파악되고 있어 교면포장의 공용성 개선을 위한 연구가 시급히 수행되어야 할 것으로 판단된다. 교면포장의 파손은 크게 변형과 균열, 수분손상 등이 있으며, 교면포장과 방수층 또는 방수층과 교량상판의 접착력 상실로 인한 포장의 밀림은 앞서 언급한 교면포장의 파손을 가속화 시키는 주된 요인으로 작용한다. 교면포장을 구성하는 각층들이 일체거동을 할 경우 이러한 밀림현상을 억제할 수 있으나 시공상의 문제로 인하여 초기 부착이 완전하지 않은 경우가 자주 발생한다. 현재 국내외적으로 교면포장과 교량상판의 부착성을 검증하기 위하여 주로 실내시험에 의존하고 있으나 이러한 현상이 발생하는 메커니즘에 대한 해석적인 노력은 거의 전무하다할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 포장체와 방수시트에 발생하는 응력을 포장의 두께와 대기온도 등에 따라 분석하여 교면포장의 파손 메커니즘을 규명함에 따라 포장체의 두께선정과 공용성 예측 그리고 포장재료의 품질기준 설정을 위한 기초적인 자료를 제공하는데 가장 큰 목적이 있다.

2. 유한요소 프로그램을 이용한 포장하부와 상판사이에 발생하는 전단응력의 해석

본 연구에서는 포장하부와 상판사이에 발생하는 전단응력의 해석을 위하여 상업용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Hibit et al. 2000)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 하중과 경계치 조건은 그림 1과 같이 연직방향의 차량하중(DB24)을 차량의 접지면적만큼 적용하였으며 교축방향으로 제동하중을 식 (1)과 같이 적용하였다. 제동하중에 관한 국내 규정에 의하면 제동하중은 차량 속도와 제동거리에 무관하게 차량하중의 10%를 교면 상 1.8m 위치에 차량의 진행방향으로 적용하도록 규정하고 있으나 이는 미국 도로교통시방서 기준에 비해 낮은 수준이기 때문에 다양한 경우의 해석을 위하여 연직 차량하중의 10, 20, 30%를 적용하였다.

$$F_b = bW \quad (1)$$

*정회원 · 세종대학교 토목환경공학부 부교수 · 공학박사 · E-mail:hlee@sejong.ac.kr
**학생회원 · 세종대학교 토목환경공학부 석사과정 · E-mail:modern95@hotmail.com
***비회원 · 대림건설기술연구소 · 공학박사 · E-mail:ywoo9@hotmail.com
****정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · E-mail:hpark@kict.re.kr

여기서, W 는 차량의 중량이며 b 는 제동하중계수이다.

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{V^2}{gs} \right) \quad (2)$$

표 1 해석에 사용된 교면포장 재료의 역학적 물성

Temperature (°C)	E_1 (MPa); 포장체	E_2 (MPa); 방수시트	E_3 (MPa); 강상판
-5	20000	600	210000
0	17000	180	210000
10	11000	30	210000
20	6000	6	210000
30	2000	1.2	210000
포아송비	0.35	0.4	0.3

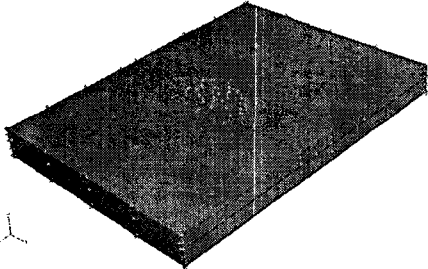


그림 1 해석에 사용된 하중과 경계치 조건

2.1 해석을 위한 조건과 포장재료의 역학적 물성

아스팔트는 온도에 따라서 강성이 변화하는 점탄성재료이기 때문에 각 온도별로 아스팔트 혼합물과 방수시트의 탄성계수 값을 달리하여 해석에 적용하였다. 해석에 사용된 탄성계수는 Witzack(2001)의 실험데이터와 이현중(2000)의 실험데이터를 사용하여 온도에 따른 아스팔트 혼합물의 탄성계수 값과 방수시트의 탄성계수 값을 표 1과 같이 변경하여 해석에 적용하였다.

2.2 유한요소 모델링

직교이방성(orthotropic) 강상판형교(steel plate deck bridge)는 바닥강판, 종리브, 횡리브로 이루어진 강상판과 여러 형태의 주형부재들에 의해 구성된 형교로써, 포장층과 방수층에 발생하는 응력해석을 위한 유한요소해석에 있어서 강상판의 복잡한 기하학적 특성, 경계조건과 하중조건을 완전히 모델링 하는 것은 비효율적이며 해석시간의 낭비를 초래한다. 따라서 강상판형교와 같이 종방향과 횡방향으로 강성강화 부재를 갖는 판 구조물을 그림 2와 같이 적절한 등가판(equivalent plate)으로 모델화하여 유한요소해석을 수행하였다. 등가판의 등가두께(t_e , equivalent thickness)산출을 위하여 판 이론에 의한 강상판의 종방향 휨 강성과 등가판의 종방향 휨 강성을 식 (3)의 우항과 좌항과 같이 각각 나타낼 수 있다. 여기서 비틀림 강성은 무시하였다. 표 2는 리브의 종류에 따라 식 (3)을 이용하여 산정된 등가판의 등가두께를 나타내고 있다.

$$\frac{E_{deck} t_e^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{E_{deck} t^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{E_{deck} t e_y^2}{(1-\nu^2)} + \frac{E_{deck} I_n}{a} \quad (3)$$

여기서, a 는 리브 간격, e_y 는 판의 중앙면으로부터 단면 중립축까지의 거리, I_n 은 중립축에 대한 보강재(종리브)의 단면 2차 관성 모멘트, E_{deck} 은 강상판의 탄성계수, ν 는 강상판의 포아송비를 나타낸다. 등가판의 횡방향(교축직각방향) 길이는 그림 2와 같이 주형거더의 위치에 따라 주형 사이의 거리만큼, 종방향(교축방향) 길이는 횡리브 간격 길이만큼만 모델링 함으로써 횡리브 휨 강성의 영향은 고려하지 않아도 되게 하였다. 등가판 산출을 위한 유한요소해석모델은 그림 3과 같다. 또한 연직하중 작용시와 연직하중과 제동하중이 동시에 작용할 때에 있어 실제모델과 등가판의 방수시트내 발생하는 최대전단응력을 표 3과 같이 비교하였다. 여기에서 제동하중은 차량 접지압의 10%를 적용하였다. 두 하중조건에서 모두 등가판 모델이 실제모델에 비해 발생하는 전단응력이 각각 8%(연직하중)와 6%(연직하중+제동하중) 큰 것으로 나타났으나 비틀림 강성을 무시한 것을 고려한다면 적당한 모델이라고 할 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 응력 해석에 영향을 미치지 않는 범위(오차율: 10%) 내에서 그림 1과 같은 적절한 등가판 크기와 경계치 조건을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

그림 4는 등가판의 두께에 따른 전단응력의 변화를 보여준다. 이 결과를 통해 등가판의 두께가 100mm이



상일 경우에 등가판의 두께가 전단응력에 미치는 영향은 미미하고 또한 표2에서 처럼 리브의 종류에 따른 등가두께도 100mm이상이므로 본 연구에서는 방수층에 발생하는 응력해석에 150mm의 등가두께를 사용하였다. 하지만 그림 4 결과를 통해 강상판의 두께가 얇을 경우 방수층에 미치는 영향이 크게 증가하므로 점하중(point loading)과 같은 큰 집중하중이 보강재가 없는 지점에 작용할 경우를 고려해서 등가판의 두께가 150mm이 아닌 실제 강상판의 두께($t=14\text{mm}$)만을 갖는 판의 경우 또한 고려될 필요가 있다.

표 2 리브의 종류에 따른 등가두께(t_e)

Closed rib	t_e	Open rib	t_e
320*240*6	156.43	180*9.5	109.94
320*260*6	162.76	200*10	117.44
320*240*8	156.43	230*11	128.26
320*260*8	162.76	250*12	135.23

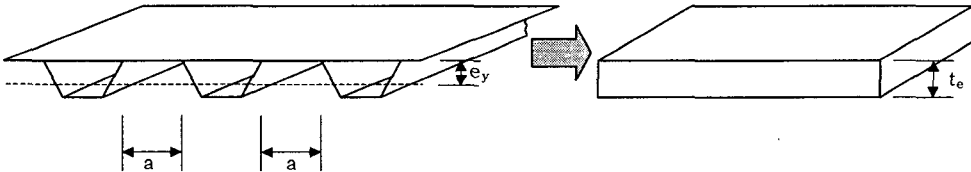


그림 2 등가판(Equivalent plate) 산출

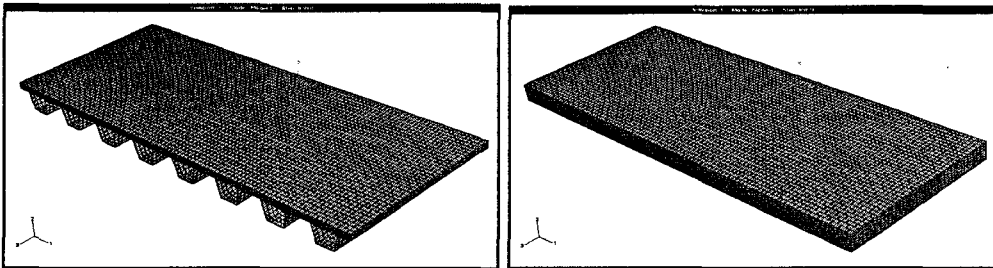


그림 3 등가판(Equivalent plate) 산출을 위한 유한요소해석모델

표 3 실제모델과 등가판의 방수시트내 최대 전단응력 비교

하중조건	방수시트내 최대전단응력	
	실제모델(320*240*6)	등가판($t_e=150\text{mm}$)
연직하중	7.3625E-03 MPa	7.9547E-03 MPa
연직하중+계동하중	8.9928E-03 MPa	9.5363E-03 MPa

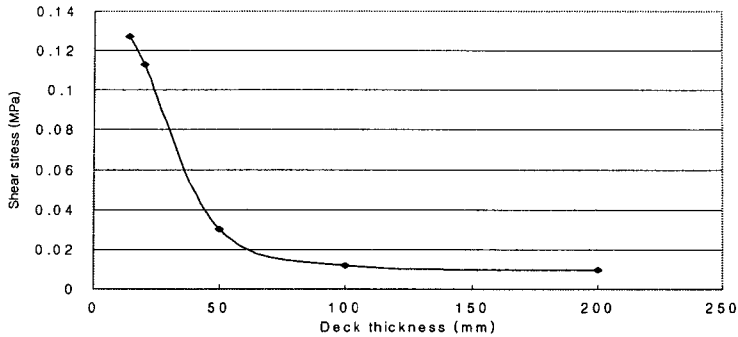


그림 4 강상판 두께의 영향

강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 차량 접지압만 적용한 경우(s)와 차량 접지압과 제동하중을 같이 적용한 경우(s+v)의 하중조건에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 여기서 제동하중은 차량 접지압의 10%를 적용하였다. 그림 7은 강상판 탄성계수에 따른 방수시트에 발생하는 최대전단응력을 나타내고 있다. 바닥판의 강성이 증가함에 따라 최대전단응력은 급격히 감소하다가 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 이후 완만한 기울기로 감소하여 일정해짐을 알 수 있다. 즉, 강상판의 강성이 적절한 값에 도달한 이후에는 강상판의 강성이 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 현재 국내에 사용되는 강상판의 탄성계수는 대부분 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 이상이 되기 때문에 강상판의 탄성계수 변화에 따른 영향을 무시하고 해석을 수행하여도 무방하다고 사료된다. 물론, 이 결과는 교면포장과 방수시트의 다른 물성값이나 두께에 따라 조금은 다른 결과를 낼 수는 있으나 기본적 경향은 같을 것으로 사료된다.

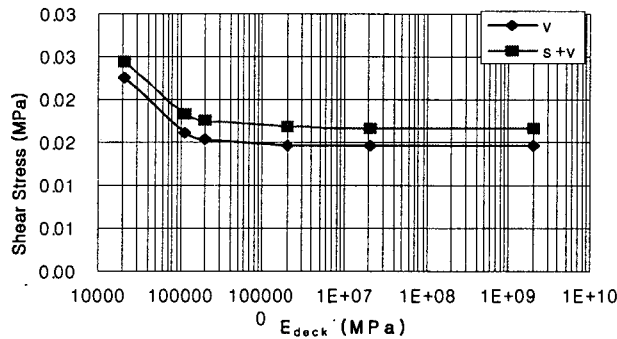


그림 7 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영향

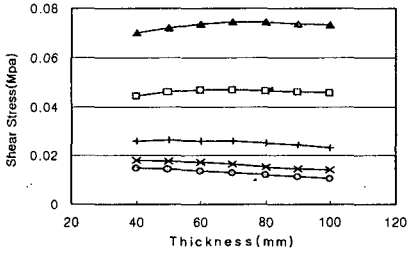
3. 수치해석 결과

3.1 제동하중 비율에 따른 전단응력의 변화

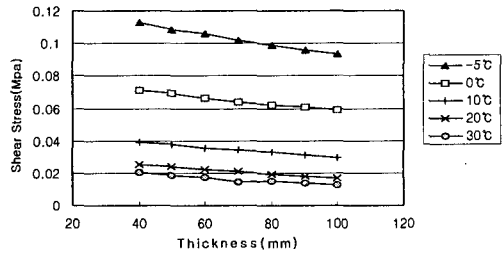
차량하중의 급제동, 급출발에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 밀립에 대한 방수층의 저항성을 조사하기 위해서 4가지 다른 하중 조건을 고려하여 전단응력에 대한 분석을 실시하였다. 그림 8(a)는 포장 표면에 연직인 방향으로 차량하중만 작용하는 경우의 결과로써, 두께에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그림 8(b), 8(c), 8(d)는 포장 표면에 연직인 방향으로 작용하는 하중과 수평방향으로 작용하는 차량의 제동하중을 작용시켰다. 차량 급제동 정도를 고려하기 위하여 앞에서 언급 하였던 수치적으로 연직하중의 10%, 20%, 30%를 각각 제동하중으로 사용한 결과 그림 8(b), 8(c), 8(d)에서 보는 바와 같이 포장층의 온도가 감소할수



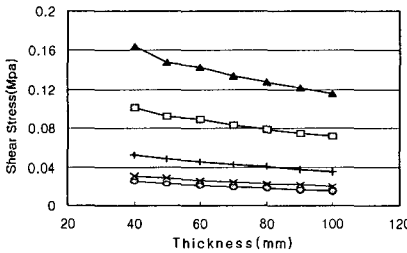
록 방수층에 발생하는 최대전단응력은 증가함을 확인하였다. 이러한 결과는 한국도로공사에서 수행한 실내시험에서도 비슷한 경향을 보인 것으로 나타났다. 또한 교면포장의 두께가 감소할수록 방수층에 발생하는 최대전단응력은 증가하였다. 따라서, 포장층이 너무 얇을 경우에는 이러한 전단응력에 의해 포장층과 교량상판 사이에 분리가 발생하여 밀림현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다.



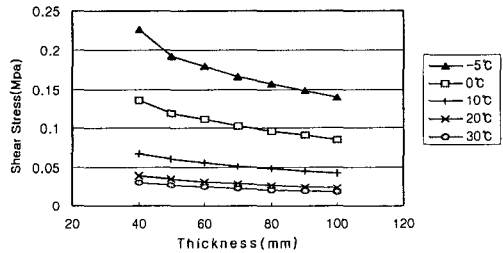
(a) 차량하중



(b) 차량하중과 제동하중(차량하중의 10%)



(c) 차량하중과 제동하중(차량하중의 20%)



(d) 차량하중과 제동하중(차량하중의 30%)

그림 8 방수층에 발생하는 최대 전단응력

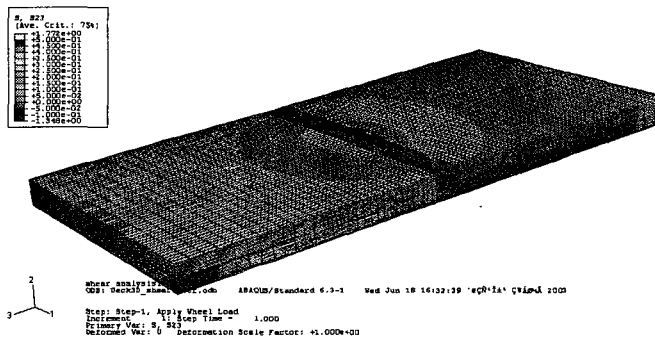


그림 9 전단응력 분포도

3.2 접지압하에 온도 변화에 따른 전단응력의 변화

그림 10은 하중이 접지압만 작용할 경우에 대한 깊이와 온도에 따른 포장체와 방수시트에 발생하는 전단응력의 변화를 보여준다. 포장체내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 방수층의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 포장체내에서 최대전단응력은 중간지점임을 확인 할 수 있다.

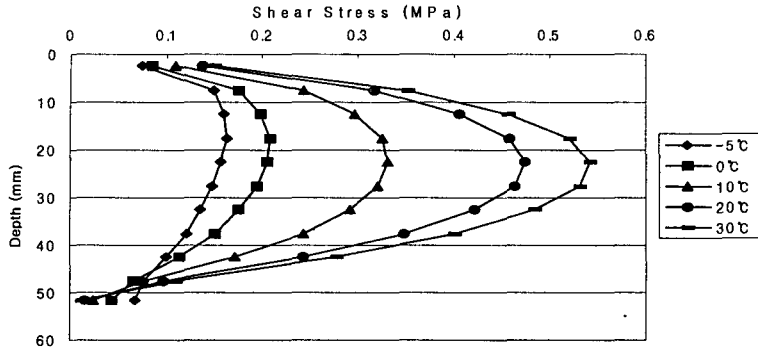
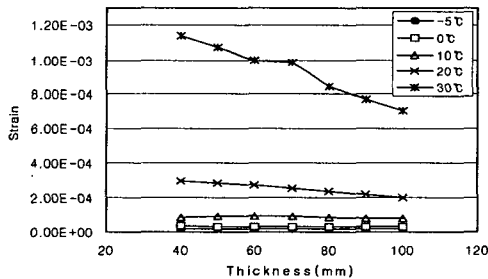


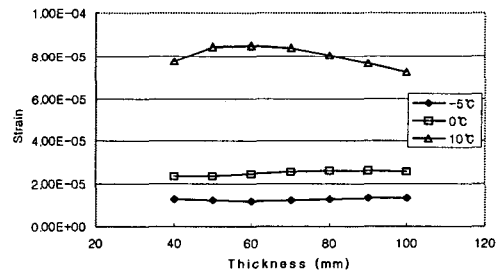
그림 10 수직하중(점지압)에 대한 전단응력분포

3.3 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장 변형률

차량의 반복하중에 의한 교면포장체의 피로균열을 조사하기 위하여, 교면포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률을 조사하였다. 그림 11은 두께와 온도에 따른 최대 인장변형률을 보여준다. 그림 11(b)는 그림 11(a)에서 관찰하기 힘든 영역인 온도 -5°C , 0°C , 10°C 에서 두께에 따른 최대 인장변형률을 나타내고 있다. 이 그림들을 통해 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률은 온도가 증가할수록 증가하고 두께가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 또한 저온(-5°C , 0°C)에서는 두께에 따른 최대 인장변형률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 11 연직 차량하중과 수평 제동하중(차량하중의 10%)을 동시에 고려했을 때 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률

4. 수치해석 결과를 이용한 교면포장 적정 두께 결정

본 연구에서는 해석결과와 한국건설기술연구원에서 실시한 방수재의 전단강도 측정을 위한 실험 결과를 이용하여 포장체 밀림에 저항하기 위한 적정 두께를 결정하였다. 표 4는 실내시험에 의해 결정된 도막식 방

표 4 도막식 방수재의 전단강도

방수재 종류	전단강도정수	부착력 (c, kg/cm ²)	내부마찰각 (ϕ , °)
크롤로플렌 방수재		1.5	25.6
우레탄 방수재		0.5	16.7



수재의 전단강도 값을 나타낸다. 본 연구에서 수행한 유한요소 해석결과 중 차량하중과 제동하중(10%)을 고려했을 때의 전단응력 그래프에 실내시험 값을 대입하면 그림 12와 같은 결과를 얻을 수 있다.

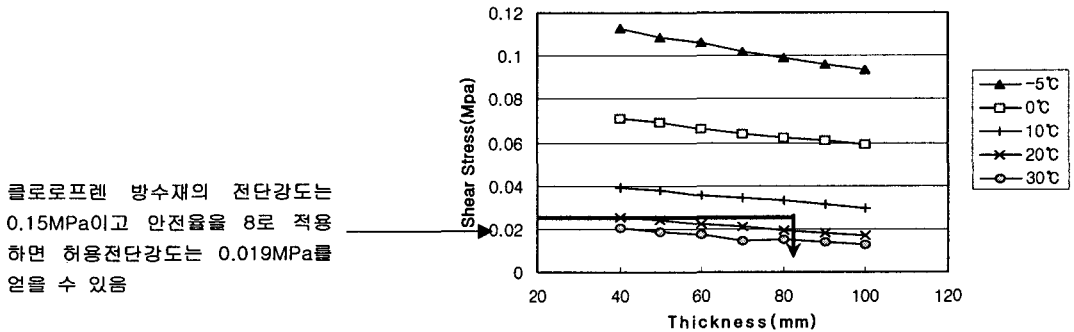


그림 12 포장층의 적정 두께 확인

포장의 적정두께를 결정함에 있어서 교면포장은 일반 구조물과는 달리 손상을 입기가 쉽고 잦은 파손이 발생하기 때문에 안전율을 8로 고려하여 허용전단강도를 결정하였으며, 포장체의 온도는 연평균 온도에 가까운 20°C일 경우를 적용하였다. 그 결과 그림 12와 같이 포장층의 두께는 최소 80mm 이상을 확보해야만 밀림에 저항할 수 있을 것으로 확인되었다.

5. 상판과 포장체 하부 사이에 발생하는 전단응력의 예측

본 연구에서 얻은 결과를 이용하면 다양한 환경조건하에 시공되어진 교량들에 대한 적정 포장두께를 결정할 수 있다. 하지만 해석결과에 의한 접근방식으로 포장두께를 결정하기 위해서는 복잡한 유한요소 해석이라는 과정을 거쳐서 상판과 포장 하부 사이에 발생하는 전단응력을 확인해야 한다. 본 연구에서는 이러한 과정을 생략할 수 있도록 포장 하부에 발생하는 전단응력을 예측 할 수 있는 식을 제시하였다.

본 연구의 수행과정에서 다양한 제동하중 비율과(0, 10, 20, 30%) 포장두께의 변화(40~100mm), 그리고 온도(-5~30°C)를 변화시켜 140개의 데이터를 확보하였으며 이를 토대로 전단응력을 예측하기 위한 식 (4)를 제시하였다.

$$S = a + b \ln(t) \tag{4}$$

여기서 a와 b의 값을 식으로 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 a &= a_1 + a_2 F & b &= b_1 + b_2 \\
 a_1 &= 0.1009 a_2^{0.1542} & a_2 &= 0.0093 e^{-0.0639 T} \\
 b_1 &= 0.007 - 3.8533 b_2 & b_2 &= 0.0017 e^{-0.0654 T}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 S는 전단응력, F는 제동하중비율, t는 포장온도를 나타낸다. 결국, 식 (4)는 포장두께와 제동하중의 비율, 그리고 온도에 대한 함수를 포함하고 있으며, 포장체의 하부 온도와 포장두께, 그리고 제동하중의 비율을 이용하여 포장 하부에 발생하는 전단응력을 예측 할 수 있다.

식(4)는 각각의 포장두께에서 발생하는 전단응력값을 제동하중 비율에 의해서 나타내고 여기서 결정된 계수 a와 b에 대한 추세식을 만들어서 각각의 계수 a1과 a2, b1과 b2를 확인한 후 이의 최대공약수를 이용하여 a1, a2, b1, b2의 대푯값을 결정하였다. 예측 식에 의해서 구해지는 전단응력 값은 해석값 보다 약 5%가



크게 나타나고 있으나, 이는 포장두께를 결정함에 있어서 보다 안전한 두께 결정을 유도할 수 있으며, 또한 오차 범위가 해석 값에 비해 크지 않기 때문에 예측값을 그대로 사용하여도 무방할 것으로 사료된다. 이러한 예측 값을 이용하여 재료에 따른 적정 포장의 두께를 결정할 수 있으며 기존 포장에 보수를 위해 적용해야 할 재료를 선정함에 있어서 보다 역학적인 접근을 유도할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 교면포장과 교량상판사이에 발생하는 파손메카니즘을 규명하기 위하여 유한요소해석에 의한 포장체와 방수시트에 발생하는 응력을 분석하였으며, 이를 통하여 밀림에 저항하기 위한 교면포장의 최소 단면 두께를 확인 하였고, 이를 일반화시키기 위하여 교면포장 하부에 발생하는 전단응력을 예측 할 수 있는 식을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석을 위한 등가판 모델을 결정하고 등가판의 등가두께를 결정하였으며 등가판의 두께의 영향도 조사하였다.
- 2) 강상판의 강성이 적정한 값($2 \times 10^5 \text{MPa}$)에 도달한 이후에는 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
- 3) 포장체와 방수시트 포장층의 온도가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가함을 알 수 있다. 또한 교면포장의 두께가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가하였으며 따라서, 포장층이 너무 얇을 경우에는 이러한 전단응력에 의해 포장층과 교량상판 사이의 분리가 발생하여 밀림현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 특히 구조해석상에서 강상판, 방수층 및 교면포장은 완전한 부착(perfect bonding)으로 가정 하에 수행되었으나 공용에 따른 실제 교량상판에서 접착층은 노화와 손상으로 인해 방수층의 전단강도를 완전히 발휘하지 못하므로 저온에서의 파괴발생 가능성이 크다고 볼 수 있다.
- 4) 포장체내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 반대로 방수층의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.
- 5) 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률은 고온에서 최대가 되고 두께가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 또한 저온(-5°C , 0°C)에서는 두께에 따른 최대 인장변형률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.
- 6) 밀림에 저항하기 위한 교면포장의 최소두께는 80mm 이상이 되어야 한다.
- 7) 예측식에 의해서 얻어진 전단응력 값을 적용하여 포장 두께를 결정하면 응력값을 얻기 위해 수행되어야 할 복잡한 해석 과정을 생략할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2003년 건설기술 연구개발 사업지원(과제번호:02산학연F02-01)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 남광현, 교면포장의 설계와 시공, 2002.
2. 세종대학교, 교면포장 공용성 예측 및 교량상판과 교면의 상호작용 해석 연구, 2002.11
3. 이현종 등, SBS PMA(슈퍼플트)의 공용성 및 경제성 평가연구, 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소 2000
4. 한국도로공사, 교면포장재료 및 모사시험기 개발 연구, 도로연구소, 도로연00-18, 2000
5. Hibbit, H. D., Karlsson, B., and Sorensen, P., ABAQUS Version 6.1, Inc. Pawtucket, RI, 2000
6. Vibeke Wegan, (2000). "Surfacing of Concrete Bridge" Danish Road Institute Report 106