

교면포장의 파손유형 예측을 위한 유한 요소 해석

Finite Element Analysis Study for Prediction of Failure Mechanism in Bridge Deck Pavement

우영진* · 이현종**

Woo, Young Jin · Lee, Hyun Jong

1. 서론

교면포장의 기능은 단순히 차량의 소통을 위한 포장층의 역할뿐만 아니라 교량상판을 보호하는 기능도 동시에 수행되어야 하기 때문에 교량의 내구성 확보 측면에서도 교면포장의 내구성 확보는 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 포장 재료로 포장을 시행하고 있다. 또한, 현재 국내의 일반교면포장의 설계 및 시공은 대부분 과거의 경험을 바탕으로 이루어지고 있어 기관별 설계기준이 마련되어 있지 않을 뿐만 아니라 교량별 적용되는 설계 및 시공기준도 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. 본 연구에서는 교면포장의 파손 메커니즘을 유한 요소 해석을 바탕으로 규명하여 포장체의 두께선정과 공용성 예측 그리고 적절한 포장공법 선정등의 기초적인 자료를 제공하는데 가장 큰 목적이 있다.

2. 강상판 교면포장의 방수층에 발생하는 응력해석

교면포장의 파손은 크게 변형과 균열, 수분손상 등이 있으며, 교면포장과 방수층 또는 방수층과 교량상판의 접착력 상실로 인한 포장의 밀림은 교면포장의 파손을 가속화 시키는 주된 요인으로 작용한다. 교량상판과 방수층 그리고 교면포장이 완전히 부착되어 일체로 거동하여야 이러한 밀림현상을 억제할 수 있다. 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 차량의 제동하중에 의해 교량상판과 교면포장의 경계면에 발생하는 전단응력을 분석하여 포장의 두께와 대기온도 등이 미치는 영향에 대해 분석하였다.

본 연구에서는 상업용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용해서 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 하중과 경계치 조건은 그림 1과 같다. 표 1은 수치해석에서 사용된 강상판, 방수시트 및 교면포장체의 재료물성치를 나타내고 있다. 교면포장에 사용되는 아스팔트는 온도에 따라 강성이 변화되는 점탄성 재료이다. 따라서, 본 연구에서는 Witczak(2001)의 실험 데이터와 이현종 등(2000)의 실험 데이터를 사용하여 온도에 따른 아스팔트 혼합물의 탄성계수값과 방수시트의 탄성계수값을 표 1과 같이 변경하여 해석에 적용하였다. 수치해석에 적용되는 접지압은 7.03 kg/cm^2 이며 접지폭 50cm와 접지길이 20cm인 직사각형으로 가정하여 사용되었다. 강상판, 방수층 및 교면포장은 완전한 부착(perfect bonding)으로 가정하였고, 그림 2는 유한요소해석에 사용된 모델을 나타낸다.

*세종대학교 건설기술연구소 전임연구원 · 공학박사 · 02-2205-3812(E-mail:ywoo9@hanafos.com)

**정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)

표 1. 해석에 사용된 교면포장재료의 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

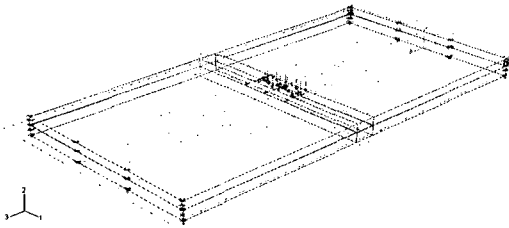


그림 9. 해석에 사용된 하중과 경계치 조건

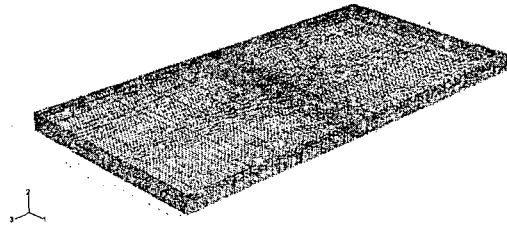


그림 10. 차량 제동하중에 의한 포장체와 상판의 거동해석을 위한 유한요소모델

2.1 바닥판 강성에 따른 전단응력의 변화

강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 3과같이 두 다른 하중조건에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 여기서 두 다른 하중조건은 차량 접지압만 적용한 경우(s)와 차량 접지압과 제동하중을 같이 적용한 경우(s+v)를 뜻한다. 바닥판의 강성이 증가함에 따라 전단응력은 급격히 감소하다가 2×105MPa 이후 완만한 기울기로 감소함을 알 수 있다. 즉, 강상판의 강성이 일정한 값에 도달한 이후에는 강성이 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 현재 국내에 사용되는 강상판의 탄성계수는 대부분 2×105MPa 이상이 되기 때문에 강상판의 탄성계수 변화에 따른 영향을 무시하고 해석을 수행하였다. 물론, 이 결과는 교면포장과 방수시트의 다른 물성치나 두께에 따라 조금은 다른 결과를 낼 수는 있으나 기본적인 경향은 같을 것으로 예상된다.

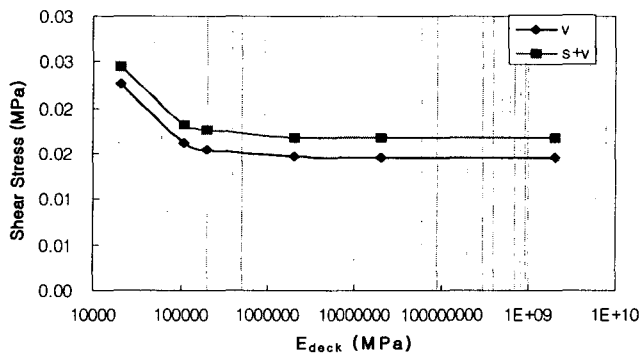
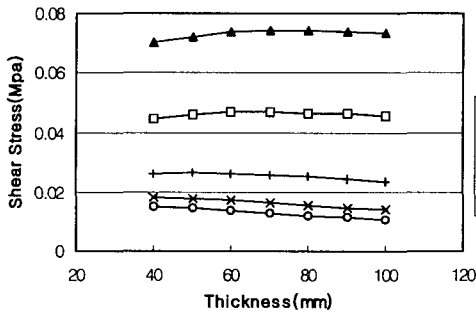


그림 11. 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영향

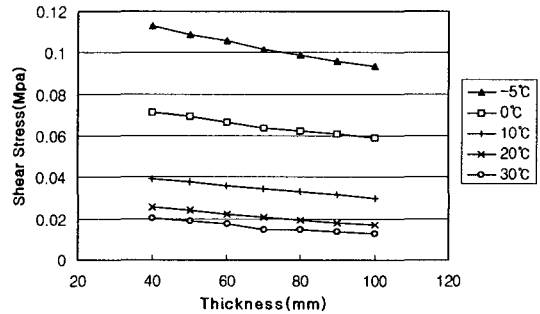


2.2 온도와 두께에 따른 전단응력의 변화

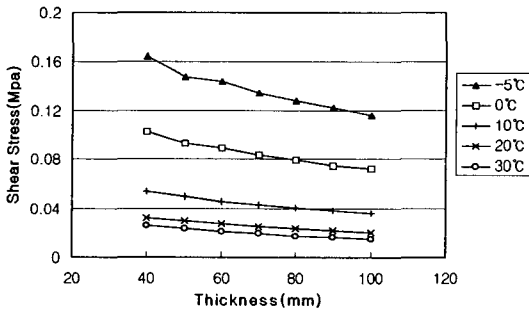
차량하중의 급제동, 급출발에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 밀립에 대한 방수층의 저항성을 조사하기 위해서 전단응력에 대한 분석을 실시하였으며, 결과는 그림 4에 수록하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 포장층의 온도가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가함을 알 수 있다. 한국도로공사에서 수행한 실내시험결과에서도 비슷한 경향을 보인 것으로 나타났다. 또한 교면포장의 두께가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가하였으며 따라서, 포장층이 너무 얇을 경우에는 이러한 전단응력에 의해 포장층과 교량상판사이의 분리가 발생하여 밀립현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 활용하면 실험을 통한 방수시트의 전단강도와 수치해석 결과를 비교해 방수시트의 밀립현상 발생 유무를 확인 할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 5는 전단응력 분포도를 나타낸다.



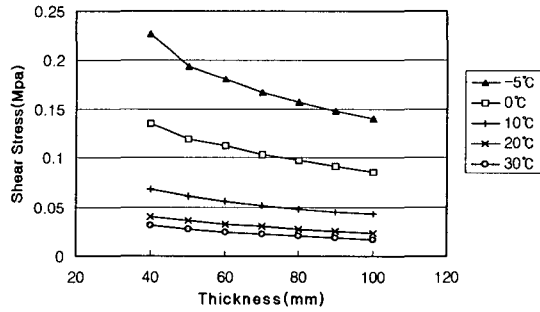
(a) 연직하중만을 고려



(b) 연직 차량하중과 수평 제동하중(차량하중의 10%)을 동시에 고려



(c) 연직 차량하중과 수평 제동하중(차량하중의 20%)을 동시에 고려



(d) 연직 차량하중과 수평 제동하중(차량하중의 30%)을 동시에 고려

그림 4. 하중조건에 따라 방수층에 발생하는 최대 전단응력

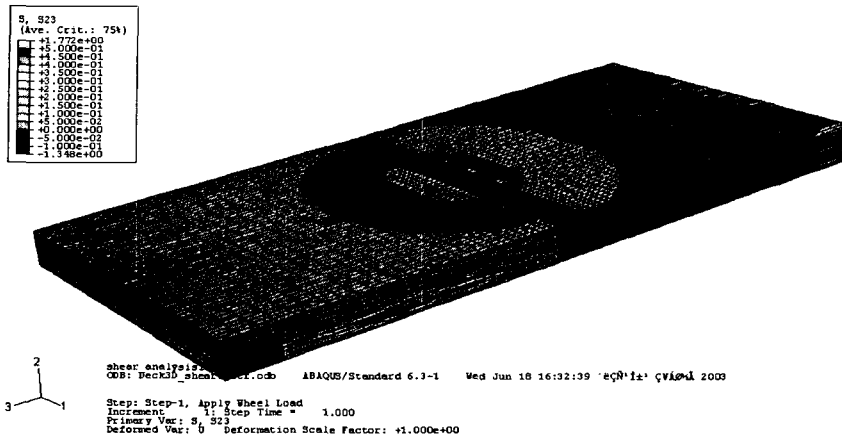


그림 5. 전단응력 분포도

2.3 깊이와 온도에 따른 전단응력분포

그림 6은 하중이 접지압만 작용할 경우에 대한 깊이와 온도에 따른 전단 응력의 변화를 보여준다. 포장체 내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 방수층의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 포장체내에서 최대전단응력은 중간 깊이 지점에서 발생함을 알 수 있다.

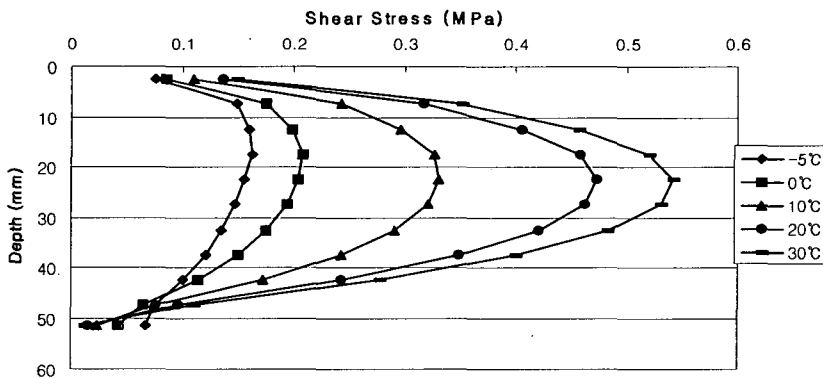


그림 6. 수직하중(접지압)에 대한 전단응력분포

2.4 포장체 바닥면의 인장 변형률

차량의 반복하중에 의한 교면포장체의 피로균열에 대한 민감도를 분석하기 위하여, 교면포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률을 조사하였다. 그림 7은 두께와 온도에 따른 최대 인장변형률을 보여준다. 그림 7 (b)는 그림 7 (a)에서 관찰하기 힘든 영역인 온도 -5°C, 0°C, 10°C에서 두께에 따른 최대 인장변형률을 확대하여 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.

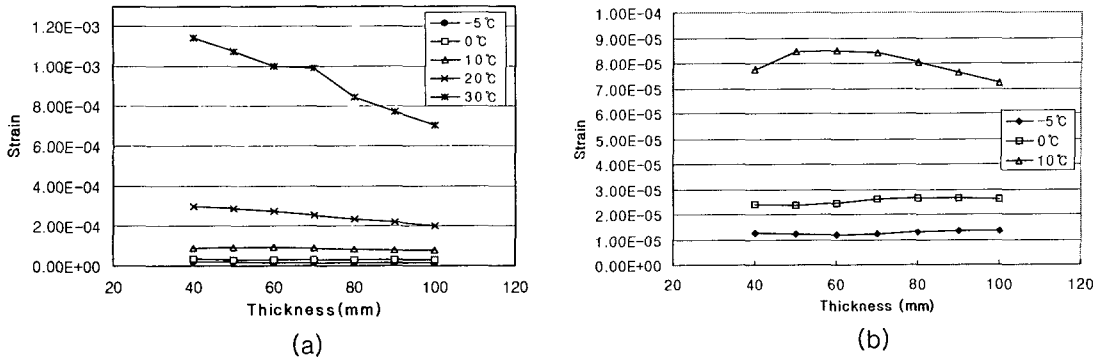


그림 7. 연직 차량하중만 고려했을 때 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률

3. 교면포장의 균열억제를 위한 해석적 검토

강상판 교면포장에서의 일반적 파괴양상으로 종방향 균열의 발생을 들 수 있다. 이와 같은 종방향 균열은 하중 재하 시 과도한 처짐 또는 변형의 발생으로 유발된다. 따라서 이러한 문제점의 해결과 방지를 위하여 사전에 교면포장의 거동특성 분석이 필요하다. 따라서 앞장과 마찬가지로 상업용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용해서 유한 요소 해석을 통하여 강상판의 거동특성을 분석하였다. 일반적 상대 처짐(리브와 리브사이)의 경향을 분석하기 위해서 해석에 사용된 하중 조건은 그림 8과 같이 3대의 차륜하중을 각각 다른 위치에 재하 하였다. 강상판, 리브, 세로보는 shell element (S4R)를 사용하였으며, 포장체는 solid element(C3D8R)를 사용하였다. 강상판과 아스팔트의 물성은 각각 탄성계수는 2100000kg/cm², 50000kg/cm²이며, 포아송비는 0.30, 0.35이다. 아스팔트층 하부와 강상판의 사이의 interface는 Tied Contact의 개념을 사용하여 연결하였다. Tied Contact 개념은 Tied Contact 면을 이루는 요소들이 완전히 접촉되는 perfect bonding 상태이다. 그림 8의 상대 처짐 결과를 통하여 리브간의 최대 처짐은 그림 8 (d)와 같이 차량 하중이 한쪽에만 가해졌을 때 가장 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 최대 상대 처짐이 발생하는 지점의 포장체는 여름철 고온에서의 소성변형과 겨울철 저온에서의 전단응력에 의한 균열이 집중적으로 일어날 수 있음을 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 교면포장의 파손메커니즘을 규명하기 위하여 유한 요소 해석에 의한 교량상판의 거동특성을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 강상판의 강성이 일정한 값(2×10^5 MPa)에 도달한 이후에는 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
2. 포장체와 방수층의 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 교량사이의 분리가 발생하여 밀림현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 특히 강상판, 방수층 및 교면포장은 완전한 부착(perfect bonding)으로 가정 하여 구조해석을 수행하였으나 공용에 따른 실제 교량상판에서 접촉층은 노화와 손상으로 인해 방수층의 전단강도를 완전히 발휘하지 못하므로 저온에서의 파괴발생 가능성이 크다고 볼 수 있다.
3. 포장체내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 반대로 방수층의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소하였다.
4. 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률은 고온에서 최대가 되고 두께가 증가할수록 감소함을 알 수



있다. 또한 저온(-5℃, 0℃)에서는 두께에 따른 최대 인장변형률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

5. 종방향 리브간의 최대 상대 처짐은 차량하중이 주형이 위치한 한쪽에만 가해졌을 때 최대값이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이러한 하중상태에서의 최대상대처짐과 한계상대처짐(일본규정 0.4mm)을 비교함으로써 종방향 균열 발생지점을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

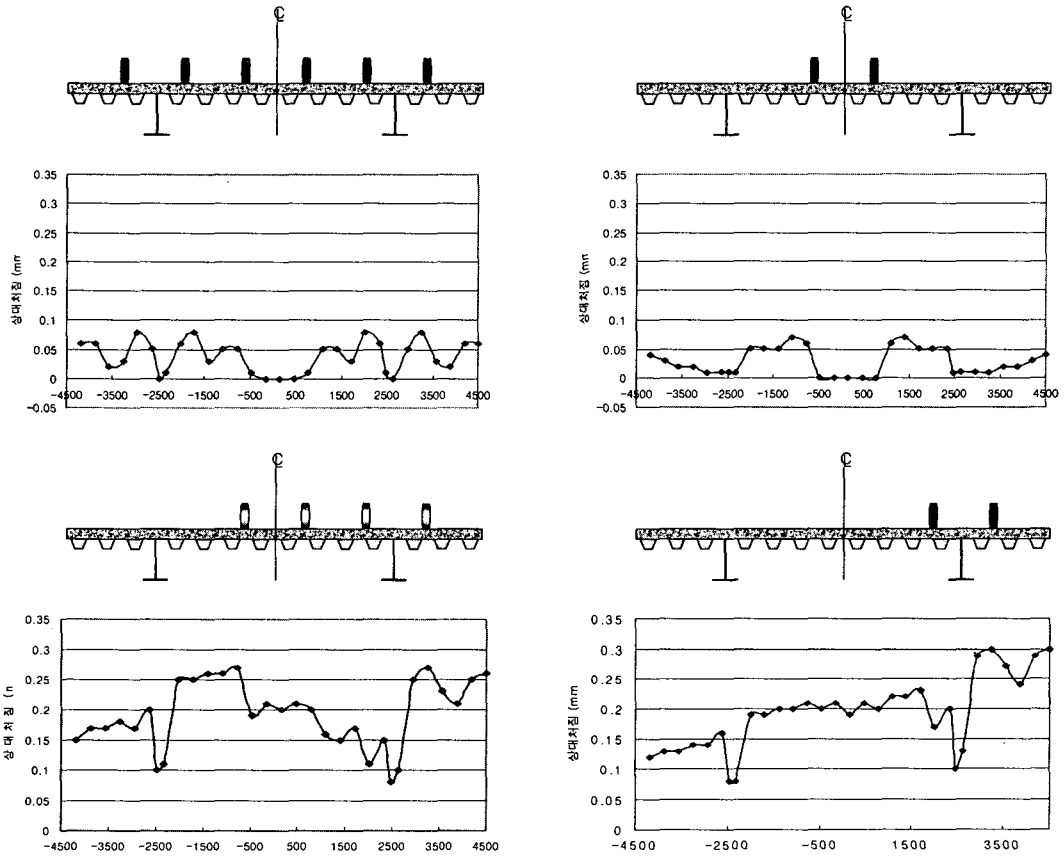


그림 8. 강상판의 상대처짐과 하중재하 조건

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2002년 건설기술연구개발 사업지원(과제번호: C102A2000005-02A0200-00510)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 남광현, 교면포장의 설계와 시공, 2002.
2. 세종대학교, 교면포장 공용성 예측 및 교량상판과 교면의 상호작용 해석 연구, 2002.11
3. 이현종 등, SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구, 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소 2000
4. 한국도로공사, 교면포장재료 및 모사시험기 개발 연구, 도로연구소, 도로연00-18, 2000
5. ABAQUS Version 6.1, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtucket, RI, 2000