

# 아스팔트 도로 표면에서 발생하는 균열에 관한 유한 요소 해석

## Finite Element Investigation of Surface-Initiated Cracking in Flexible Pavements

박동엽\* · 서영찬\*\*

Park, Dong Yeob · Suh, Young Chan

### 1. 서론

하중이 가해졌을 때 표층, 기층, 노상층 위에서 발생하는 압축 응력 혹은 압축 변형률이 바퀴패임 (rutting)의 한 요인으로 알려져 있다. 마찬가지로 표층 아래에 가해지는 인장 응력 혹은 인장 변형률이 피로 균열(fatigue cracking)을 발생시키는 요인 중에 하나로 생각하고 역학적 설계법에서 이를 설계의 기준으로 삼기도 한다. 그러나 최근에 여러 조사에서 표층의 표면에서 발생하는 피로균열이 발견되었다(Myers et al., 1998; Uhlmeier et al., 2000). 그러나 이러한 기존의 (탄성) 해석법으로는 아스팔트 도로의 표층 표면에서 발생하는 피로 균열을 설명하기에는 부족하다. 즉 표층 아래에서 발생하는 인장 응력이나 변형률로는 표층 표면에서 발생하는 피로 균열을 설명하기 힘들다. 따라서 이 현상을 구조적으로 설명하려는 노력이 이루어졌다(Myers 등, 1998; Rowe and Brown, 1997). 그러나 아직 도로의 실제 온도 분포와 동적하중을 고려한 점탄성을 이용한 광범위한 매개변수 연구(parametric study)는 아직 이루지지 않았다. 본 연구에서는 표면에서 발생하는 균열의 현상을 구조적으로 설명하기 위해 아스팔트 표층의 점탄성과 도로의 온도 분포, 동적 하중 등을 고려한 유한요소 해석을 하였다.

### 2. 유한 요소 모델

아스팔트 표층만 점탄성 거동을 한다고 가정한다. 그리고 다른 층은 탄성 거동을 한다고 가정한다. 유한요소 해석을 위해 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

\* 정희원 · 한양대학교 첨단도로 연구센터 박사후연구원 · 031-501-4240 (E-mail: parkdong@msu.edu)

\*\* 정희원 · 한양대학교 교통공학과 부교수 · 031-400-5155 (Email: suhyc@hanyang.ac.kr)



### 2.1 아스팔트 표층의 점탄성

점탄성의 특성값인 master relaxation modulus와 shift factor는 다른 참고 문헌에서 발표된 자료를 이용하였다(Kim et al., 1996). 해석에 이용하기 위해 master relaxation 곡선은 Prony series를 이용한 회귀 분석식을 구하였다. 아래는 그 회귀 분석식을 이다. R<sup>2</sup> = 99%이었다.

$$E(t) = 14285 - 2209 \times (1 - \exp(-t_r/1.1447957)) - 4427.6 \times (1 - \exp(-t_r/0.0006052)) - 4454.6 \times (1 - \exp(-t_r/0.0173438)) - 2637.2 \times (1 - \exp(-t_r/0.0000131)) \quad (1)$$

### 2.2 경계 조건(온도)

온도는 수직 방향에서만 고려하였다. 그리고 하중 시간이 짧으므로 (30 milliseconds) 하중이 가해지는 동안의 변화는 고려하지 않고 균일하다고 가정하였다. 온도 분포는 이전의 연구에서 구해진 것을 이용하였다(Buch et al. 1999). 여기서는 4가지의 다른 온도 분포(아침, 낮, 낮 평균(균일한 온도 분포), 밤)를 고려하였다(그림1).

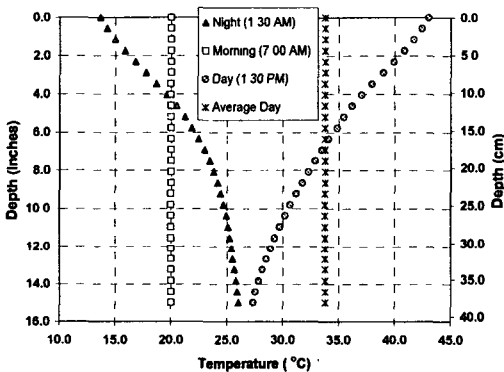


그림 1. 해석에 이용된 아스팔트 표층의 4가지 온도분포

이 하중을 simulation하기 위해 pulse는 여러 step으로 나뉘어졌고 각 step에서 해당하는 하중을 증가시켰다. 여기서 동적 하중임에도 불구하고 그 가해지는 시간이 극히 짧으므로 damping의 효과는 고려하지 않았다. 그리고 등분포 하중 이외에 nonuniform 분포 하중도 적용하여 보았다.

### 2.4 모델

본 연구에서는 2-D 선대칭 (Axisymmetric) 모델을 가지고 표층의 온도분포, 표층의 두께, 기층의 강성도, 그리고 하중의 재하 조건 등을 고려한 매개변수 연구(parametric study)를 했다. 온도는 앞에서 언급한 온도 분포와 표층의 두께는 7.6~38cm, 기층의 강성도는 138~6895MPa, 그리고 하중은 등분포 하중과 하중의 중심과 끝에서 각각 큰 압력이 이 가해지는 nonuniform 하중 등을 가지고 매개변수 연구를 했다. 그림 2와 3은 본 연구에서 사용된 단면도와 요소망을 보여준다.

### 2.3 하중

도로에 가해지는 하중은 동적인 하중이다. 이 하중을 모사하기 위해 30 msec의 FWD 하중 pulse를 이용하였고 다른 참고문헌에 발표된 자료를 이용하였다(Uddin 1998). 하중 pulse의 절정에서는 707.9cm<sup>2</sup>의 면적에 40kN의 하중이 가해졌다.

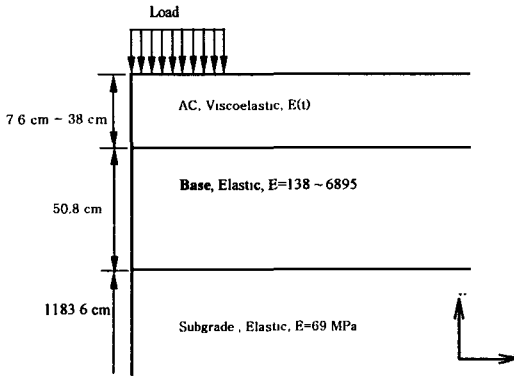


그림 2. 해석에 이용된 도로의 단면도

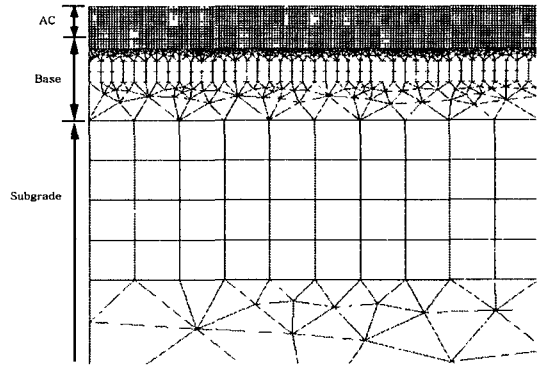


그림 3. 요소망

### 3. 유한 요소 해석 결과

그림 4와 5는 18cm 두께의 표층과 345MPa의 기층 탄성 계수, 아침 온도 분포, 그리고 균일한 하중 분포 경우의 도로 표층에서의 시간과 깊이에 따른 전형적인 응력 분포를 나타낸다.

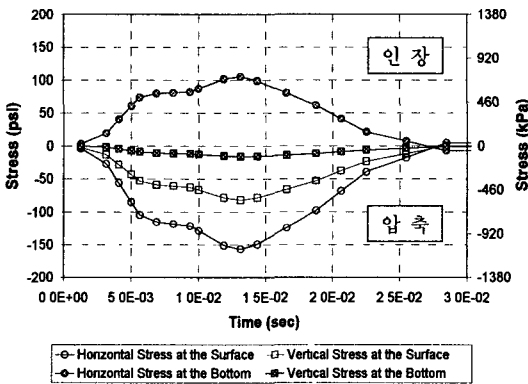


그림 4. 시간에 대한 응력 분포 (아침 온도, 균일 하중)

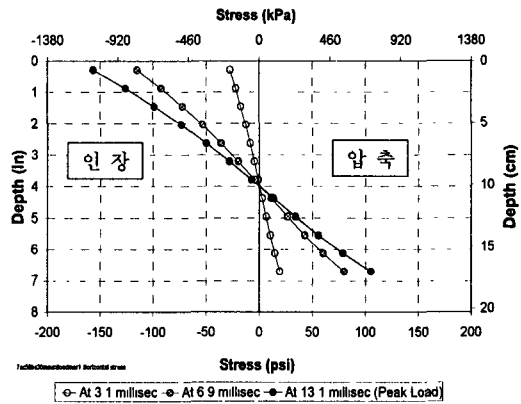


그림 5. 표층 깊이에 따른 횡방향에서의 응력 분포 (균일 온도, 균일 하중)

여기서 보면 최대 응력은 표층 표면에서 발생한다. 그리고 휨 현상 (Bending effect) 때문에 표층의 표면에서 횡방향에서 압축 응력이 표층의 바닥에서 인장 응력이 발생한다. 그러나 기층의 강성도가 증가하면서 표층의 표면에서 종방향의 응력은 변화가 없는 반면 횡방향에서의 압축 응력이 감소한다 (그림 6). 이것은 결국 표층 표면에서 인장 변형률을 야기하게 된다. 반면에 표층 바닥의 횡방향의 인



장 변형률은 기층의 강성도가 증가함에 따라 감소하게 된다(그림 7)

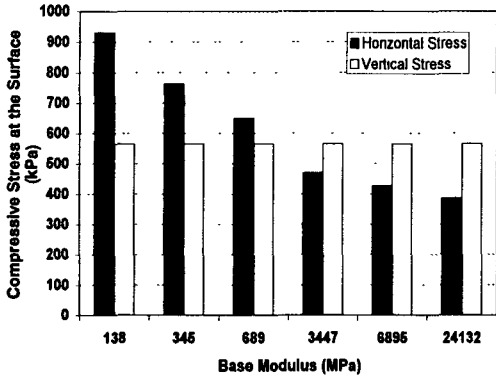


그림 4. 표층 표면에서의 압축 응력 (17.8cm 두께 표층, 낮은도, 균일 하중)

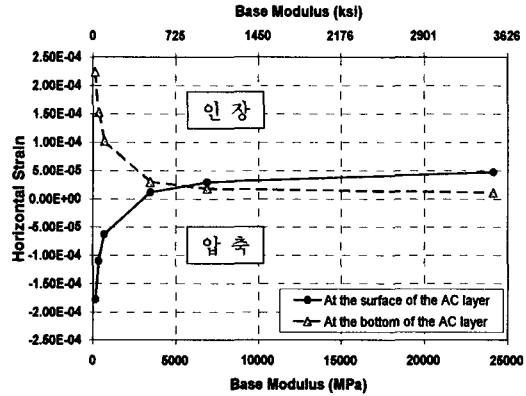


그림 7. 기층의 강성도의 영향 (17.8cm 두께 표층, 낮은도 균일 하중)

기층의 인장 변형률을 이용한 설계 기준에 따르면 위의 결과는 표면에서 균열이 발생할 수 있다는 것을 암시한다. 특히 콘크리트 포장 위에 아스팔트 덧씌우기를 했을 때 발생하기 쉽다는 것을 의미한다.

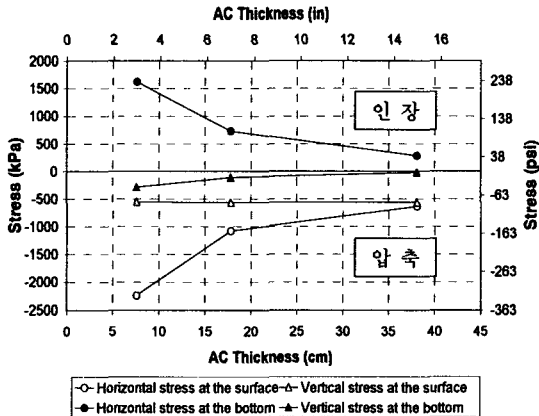


그림 8. 표층의 두께가 응력에 미치는 영향 (345 MPa의 기층, 아침 온도, 균일 하중)

증가함에 따라 감소하게 된다. 이는 표면에서 균열이 발생할 수 있다는 가능성을 암시한다. 표층의 두께가 증가할수록 횡방향 응력은 감소한다. 그러나 종방향 응력은 그리 큰 변화는 없었다. 온도와 하중 분포의 영향 조사에서는 커다란 영향이 발견되지 않았다.

표층의 두께의 영향은 그림 8에서 잘 보여준다. 표층의 두께가 증가할수록 횡방향 응력은 감소한다. 그러나 종방향 응력은 그리 큰 변화는 없다.

이외에 온도와 하중 분포의 영향 조사에서는 커다란 영향이 발견되지 않았다.

#### 4. 결론

도로의 실제 온도 분포와 동적하중을 고려한 점탄성을 이용한 광범위한 매개변수 연구 (parametric study)가 이루어졌다.

기층의 강성도가 증가하면서 표층 표면에서 인장 변형률이 발생하였다. 반면에 표층 바닥의 횡방향의 인장 변형률은 기층의 강성도가



## 감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학 재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

## 참고 문헌

1. Buch, N., R. S. Harichandran, G. Y. Baladi, D.Y. Park, and H. B. Kim, 1999, "Calibration of Michigan's Rut and Fatigue Distress Models and Development of an Overlay Design Procedure in MICHBACK", Michigan Department of Transportation (MDOT) Report (Report No. RC-1383), Michigan State University, East Lansing, MI
2. Kim, Y.R., S.W. Park, and L. Shao, 1996, "Statewide Calibration of Asphalt Temperature Study from 1992 and 1993", NCDOT Report (Project 23241-95-1), North Carolina State University, Raleigh, NC
3. Myers, L.A., R. Roque, and B.E. Ruth, 1998, "Mechanisms of Surface-Initiated Longitudinal Wheel Path Cracks in High-Type Bituminous Pavements", Proceedings, Vol. 67, Association of Asphalt Paving Technologist, pp.401-432
4. Rowe, G.M., and S.F. Brown, 1997, "Fatigue Life Prediction Using Visco-Elastic Analysis", Proc., International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington, pp. 1109-1122.
5. Uddin, W., 1998, "A Micromechanical Model for Prediction of Creep Compliance and Viscoelastic Analysis of Asphalt Pavements", Presented at 77th Annual Meeting, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
6. Uhlmeyer, J.S., K. Willoughby, L.M. Pierce, and J.P. Mahoney, 2000, "Top-Down Cracking in Washington State Asphalt Concrete Wearing Courses", 79th TRB Annual Meeting, TRB, National Research Council, Washington, D.C.