



접지압력이 얇은 아스팔트포장 표층 인장 변형률에 미치는 영향 분석

Effect of Tire Contact Stresses on Tensile Strains in the Surface of Thin Asphalt Pavement

박 대 옥* 박 준 규**
Park, Dae Wook Park, Joon Kyu

Abstract

In this paper, comparisons are presented on the predicted tensile strains which can affect the fatigue life of a thin asphalt concrete (AC) pavement near the surface of pavement from three-dimensional (3D) finite element (FE) using 3D measured tire contact stresses of a radial tire and a bias ply tire and a layered linear elastic program (BISAR). The objective was to analyze the stress distributions for a 11R22.5 radial tire and a 10x20 bias ply tire, and to compare the predicted tensile strains at the top and bottom of AC surface using different analysis methods. The results show that the stress distributions of two tires are similar but the 11R22.5 radial tire has much higher vertical contact stress than that of the 10x20 bias ply tire. The predicted tensile strains at the bottom of AC layer under the center of tire showed higher value by BM (BISAR with the measured contact area) method, which the measured tire contact area is used in a layered elastic program, while the tensile strain at the top of AC surface of 3.5cm offset distance from tire edge by 3D FE analysis showed the highest values among three analysis methods.

Keywords : thin asphalt pavement, tire contact stress, 3D FE, tensile strain, layered linear elastic program

요 지

본 논문에서는 3차원 유한요소법과 층탄성프로그램인 BISAR를 통해 얇은 아스팔트 콘크리트 표층의 피로균열 수명에 영향을 줄 수 있는 아스팔트 표층에서의 예측 인장변형률 결과를 광폭타이어와 바이어스 프라이 타이어를 이용하여 비교하였다. 본 논문에서는 11R22.5와 10x20 bias ply 타이어의 접지압력 분포도를 분석하였으며, 서로 다른 해석방법을 이용하여 아스팔트 표층 하단부와 상단부에서의 예측 인장변형률을 비교하였다. 분석결과, 두 타이어의 접지압 분포는 유사했지만 11R22.5광폭타이어가 10x20 bias ply타이어와 비교해 상당히 큰 연직방향 접지압력을 보였다. 타이어 중앙에서 아스팔트 콘크리트 표층 하단부에서의 예측 인장변형률은 타이어 접지면적을 측정하여 층탄성프로그램인 BISAR에 적용한 BM해석법이 컸으며, 타이어 가장자리로부터 3.5cm 떨어진 곳에서의 상층부 예측 인장변형률은 3차원 접지압을 이용한 3차원유한요소법에 의한 해석이 가장 큰 값을 보였다.

핵심용어 : 얇은 아스팔트포장, 접지압력, 3차원 유한요소, 인장변형률, 층탄성프로그램

* 정회원·군산대학교 토목환경공학부 조교수
** 비회원(교신저자)충남대학교 대학원 토목공학과 박사수료



1. 서론

1960년대 후반부터 층탄성프로그램을 통해 역학적인 포장해석을 수행하여 왔으며 균등한 연직방향의 타이어 내부압력을 하중조건으로 이용되었으나 최근 포장면과 타이어의 접지압력을 측정하여 분석한 결과 비균등성이며 연직방향 뿐만 아니라 수평방향과 차량진행방향 에서도 접지압력이 존재하는 것으로 알려졌다(1, 2). 최근 이러한 수평방향과 차량진행방향의 접지압력이 차량의 타이어 부분에서 하향(top-down) 피로균열을 유발할 가능성이 있는 것으로 판단되고 있다(3, 4).

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 활용하여 3차원 접지압을 재하하여 포장체의 변형율중 표층하단과 표면에서의 인장 변형율을 분석하여 상향(bottom-up)과 하향 피로균열 대한 영향을 조사하였다. 3차원 접지압력에 대한 결과와 비교하기 위하여 역학-경험적 포장 설계에서 많이 사용하고 있는 다층탄성 프로그램인 BISAR를 이용하였다. 사용된 타이어 종류는 Bias ply와 광폭타이어 두 종류는 사용하였으며 두께에 대한 영향을 분석하기 위하여 30cm 쇄석기층위에 5cm의 아스팔트 표층 두께를 사용하였다. 하중은 두 가지 형태를 사용하였으며, 일정한 하중에서 타이어 내부압력을 증가시켰고 일정한 타이어 내부압력에서 하중을 증가시키는 형태를 이용하였다. 다음과 같이 비교 분석을 위하여 3가지 방법을 사용하여 포장의 반응 분석을 실시하였다.

- 1) 3차원 유한요소법에 3차원 접지압력 적용
- 2) 접지면적을 측정한 후 하중을 실측 접지면적으로 나누어 접지압력을 구하여 접지압력과 실측 접지면적을 층탄성 프로그램에 적용(BM (BISAR with Measured Tire Contact Area))
- 3) 일반적인 방법으로 하중을 내부압력으로 나누어 접지면적을 구한 다음 타이어 내부압력과 계산 접지면적을 층탄성 프로그램에 적용(BC (BISAR with Conventional Tire Inflation Pressure))

2. 접지압력

일반적으로 다층탄성 프로그램에 의한 해석 시 접지압력이 균일하다고 가정하고 있으나 실제 접지압력을 측정해서 분석해보면 하중과 내부압력 크기에 따라 그 형태가 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한, 연직방향의 접지압력 뿐만 아니라 차량진행방향과 횡방향에도 압축과 인장의 접지압력이 존재하는 것을 알 수 있다(1, 2). 본 절에서는 본 논문에서 사용한 접지압력 측정 장비, 와 하중 형태에 대해서 간략히 소개한다.

VRSPATA (Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array)는 남아프리카 공화국에서 개발한 것으로서 움직이는 타이어에 대한 접지하중을 3차원으로 측정이 가능하다. 일반적으로 150Hz의 주기로 데이터를 취득하고 2 mm 간격으로 데이터가 얻어졌다(2). VRSPATA를 이용하여 여러 하중조건에서 측정된 접지압 데이터를 이용하여 데이터베이스를 구축하였으므로 측정범위내에서 보간법으로 원하는 하중과 내부압력하에서 3차원 접지압력을 얻을 수 있다. 접지압과 하중의 영향을 분석하기 위하여 일정한 하중상태에서 접지압력을 증가하였으며, 일정한 내부압력상태에서 하중을 증가시켜 포장반응을 분석 하였다. 표 1에 사용된 하중 조건을 나타내었다.

표 1. 11R22.5 광폭타이어와 10x20 bias ply타이어의 하중조건

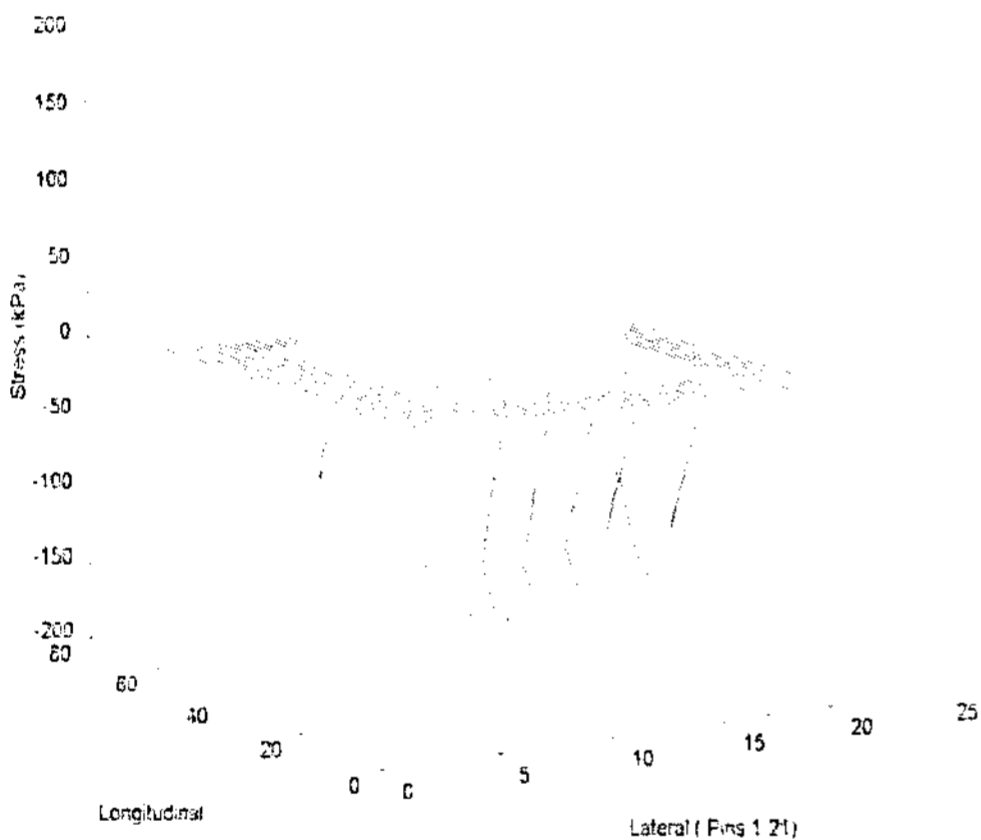
11R22.5 광폭타이어		10x20 bias ply	
하중(kN)	내부압력(kPa)	하중(kN)	내부압력(kPa)
26	517	26	517
26	689	26	689
26	820	26	820
31	820	31	820
36	820	36	820

2.2 데이터 분석

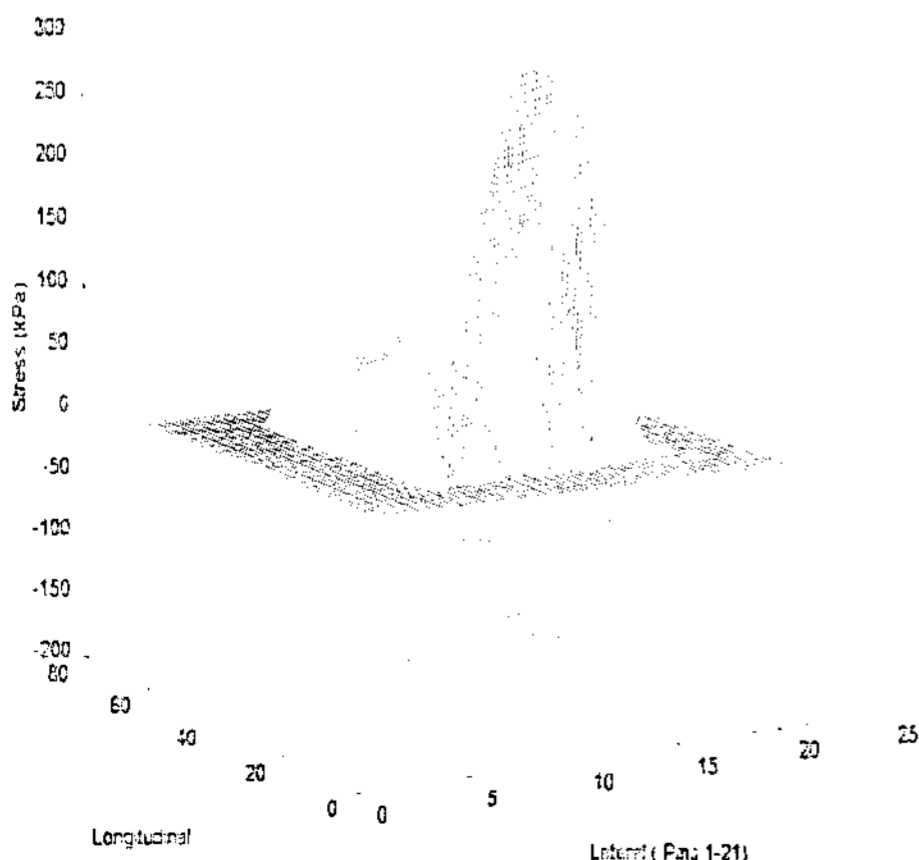
타이어 접지압력은 차량진행 방향으로 2mm 간격으로 취득되므로 계산시간과 메쉬크기를 고려할 때



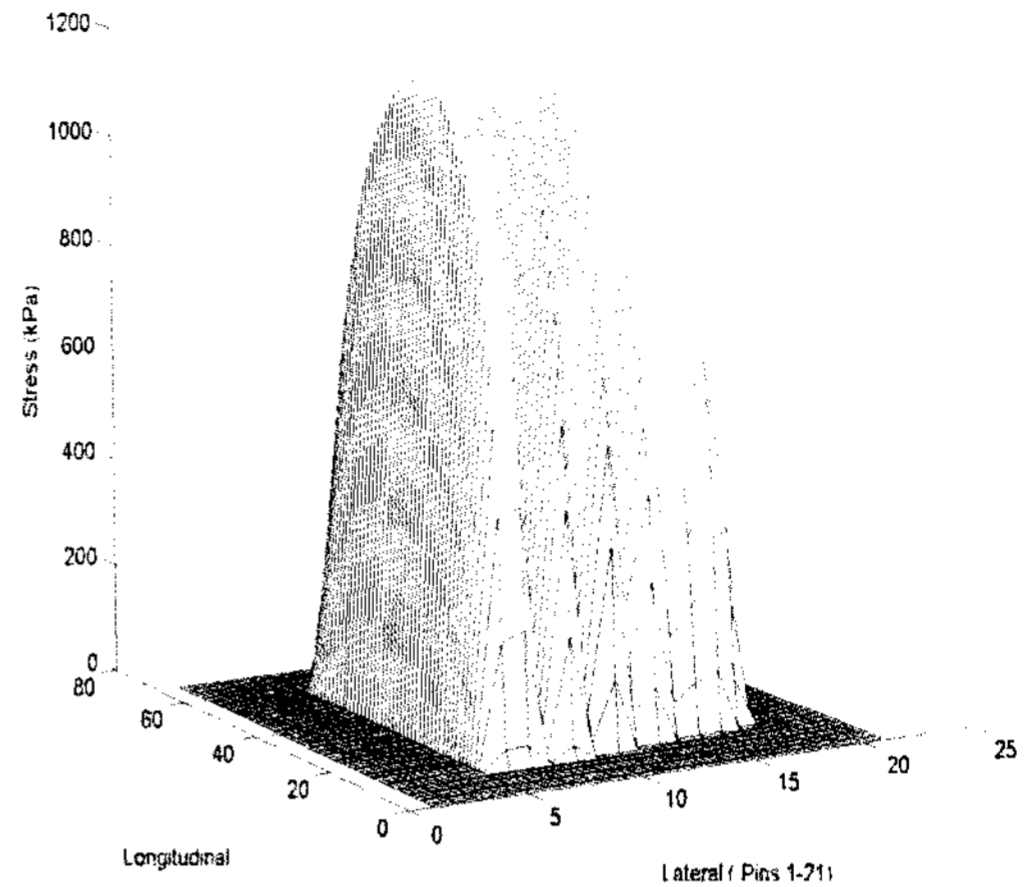
3차원 유한요소법에 적용하기에 어려운 점이 있다. 따라서 신호처리의 Decimation 기법을 이용하여 정확도의 손실 없이 접지압력의 데이터 취득간격을 5 mm로 증가시켰다(5). Decimation 기법은 데이터 취득주기를 조절하는 방법으로써 150Hz로 취득된 250개의 데이터를 68Hz의 68개로 감소시켰다. 그림 1에서 11R22.5 광폭타이어 타이어 내부압력 820kPa 과 하중 26kN 상태에서의 3차원 접지압력을 나타내었다. 그림 1에서와 같이 횡방향과 차량진행방향 압축과 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 연직방향 접지압력은 타이어 내부압력인 820kPa보다 상당히 큰 압력값을 보이는 것으로 나타났다.



(a) 횡방향 접지압력



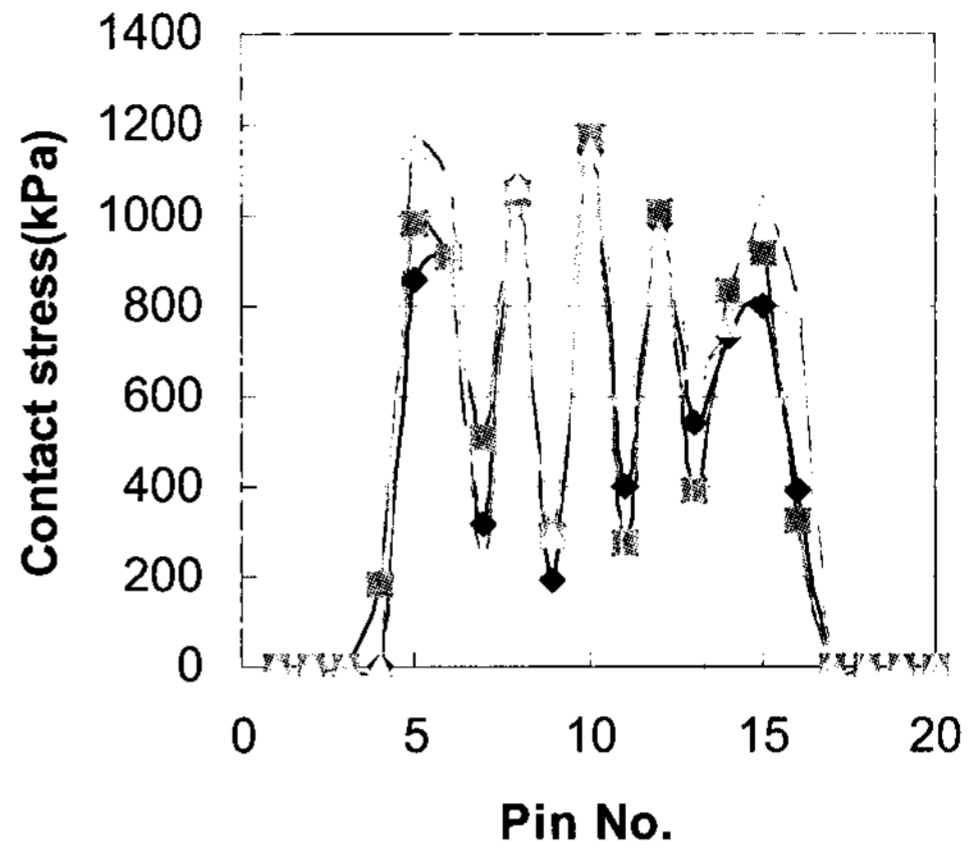
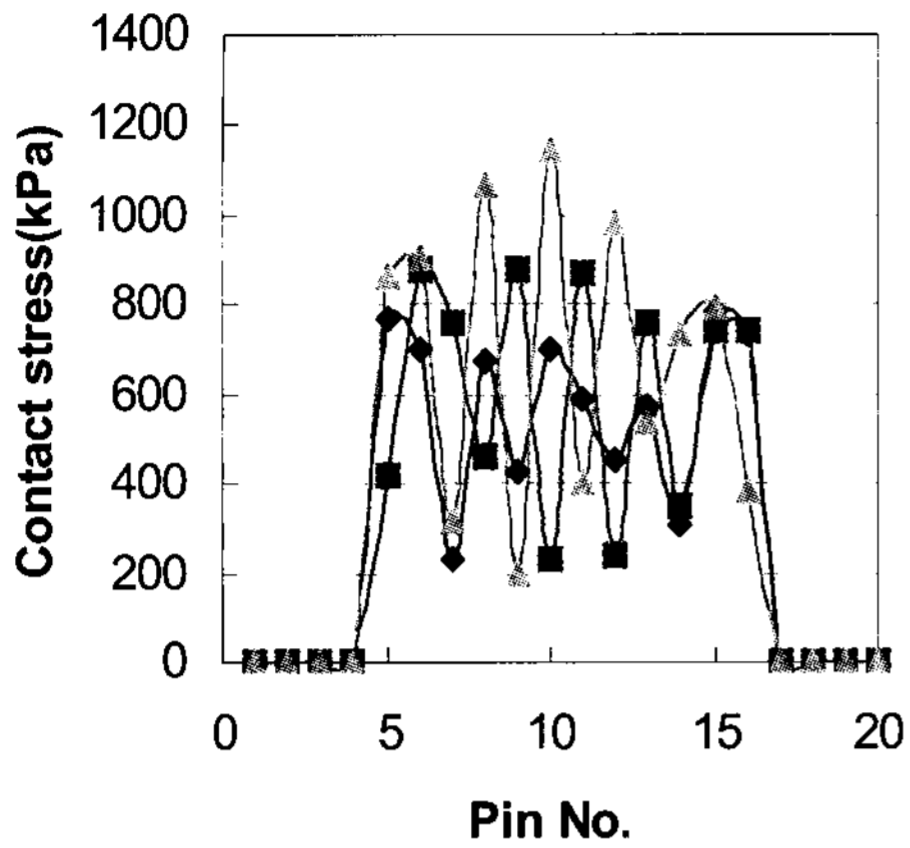
(b) 차량진행방향 접지압력



(c) 연직방향 접지압력

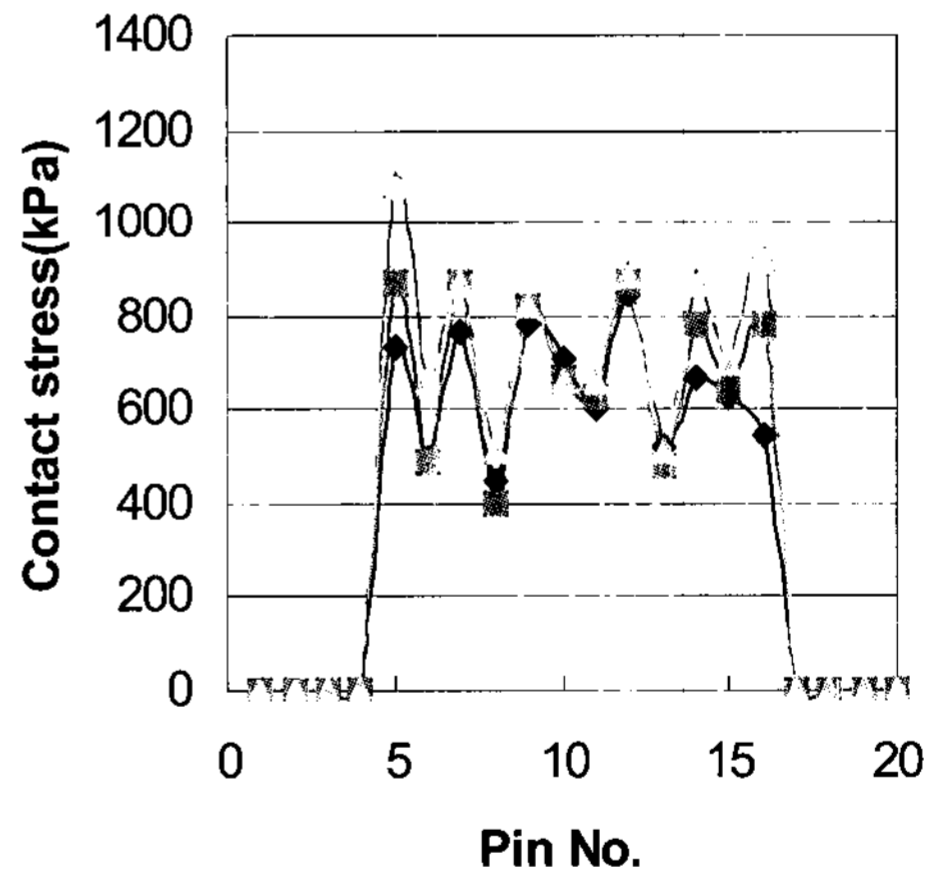
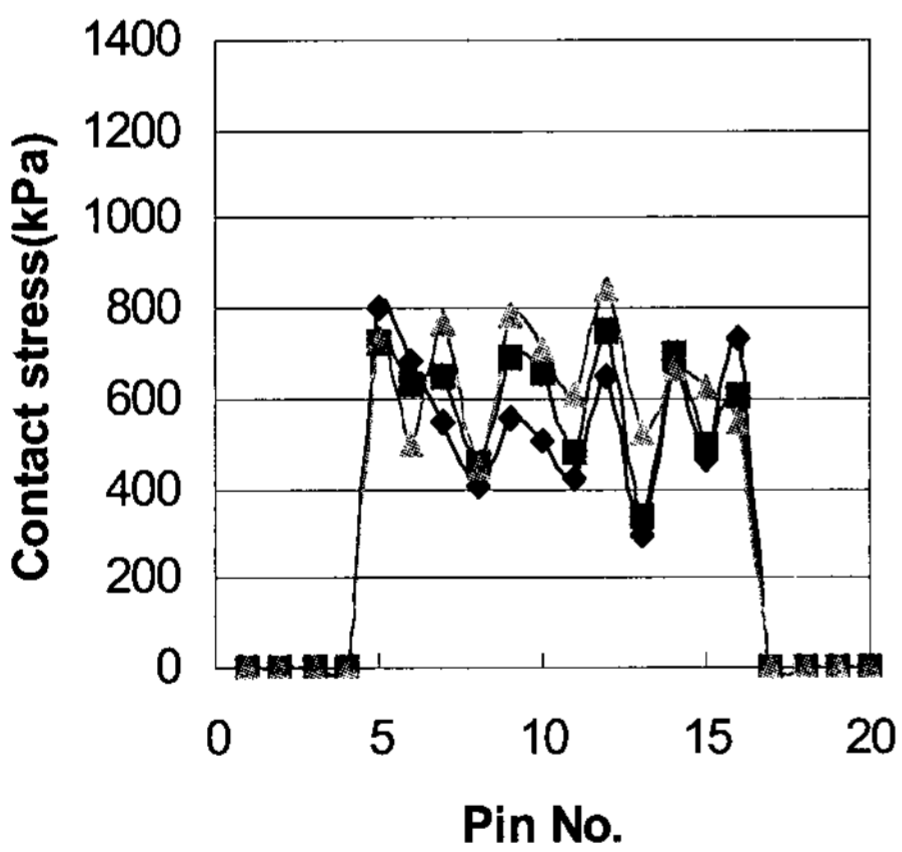
그림 1. 11R22.5 광폭타이어의 3차원 접지압력(하중: 26kN, 타이어 내부압력: 820kPa)

타이어 접지압력은 하중과 타이어 내부압력에 따라 그 분포 특성이 달라진다. 그림 2는 10x20 bias ply와 11R22.5 광폭타이어에 대한 접지압 분포 형태를 나타낸 것이다. 일정한 하중에서 타이어 내부압력이 증가 할수록 중간부분의 접지압력이 가장자리 접지압력보다 큰 것으로 나타났으며, 일정한 타이어 내부압력에서 하중이 증가 할수록 가장자리 접지압력이 중간부분 접지압력에 비해서 증가하는 것으로 나타났다. 같은 하중조건하에서 광폭타이어의 접지압력이 bias ply 타이어보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. 현재 선진국 및 국내에서는 bias ply 타이어는 거의 사용되지 않는 실정이며 11R22.5와 같은 광폭타이어 또는 초광폭 타이어의 사용이 대부분인 현실에서 포장 해석 시 타이어 내부압력의 사용은 재 고려 되어야 할 사항이라 판단된다(6).



- ◆ 26kN-517kPa
- 26kN-689kPa
- ◆ 26kN-820kPa
- 31kN-820kPa
- ▲ 26kN-820kPa
- 36kN-820kPa

(a) 11R22.5 연직방향 접지압 분포도



- ◆ 26kN-517kPa
- 26kN-689kPa
- ◆ 26kN-820kPa
- 31kN-820kPa
- ▲ 26kN-820kPa
- 36kN-820kPa

(b) 10x20 bias ply 연직방향 접지압 분포도

그림 2. 하중조건에 따른 접지압력 분포도

충탄성 프로그램 분석을 위해서 하중을 측정된 타이어 접지 면적으로 나눈 후 접지압력을 구하여 충탄성 프로그램에 적용하였다. 충탄성 프로그램에 편리하게 사용하기 위하여 타이어 종류에 따른 타

이어 접지면적과 타이어 하중조건 (타이어 하중 및 타이어 내부압력)의 관계를 그림 3과 같이 도출하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 타이어 접지면적은 타이어 하중이 증가할 수록 증가하며, 타이어 내부압력이 증가할 수록 타이어 면적이 감소하였다.



표 2. 포장두께와 재료물성

Case	층 두께(cm)		층 탄성계수(MPa)		
	아스팔트 표층	쇄석기층	아스팔트 표층	쇄석기층	노상층
1	5	30	4482	690	52
2	5	30	2758	345	103

3.2 다층탄성 프로그램 분석

다층탄성 프로그램은 역학-경험적 포장 설계에서 포장체의 역학적인 응력과 변형율을 구하기 위해서 가장 널리 사용하는 프로그램이다. 본 연구에서 다층탄성 프로그램을 이용한 두 종류의 분석이 수행되었다. 첫째 방법으로는 하중을 측정된 접지면적으로 나누어 등가균등 원형 접지압력을 결정하여 층탄성 프로그램에 적용하며(BC 방법), 둘째 방법으로는 일반적으로 사용하는 방법으로써 타이어 내부압력이 접지압력이라 가정하여 하중을 내부압력으로 나누어 면적을 구하여 면적과 내부압력을 층탄성 프로그램에 적용하는 방법이다(BM 방법). 압력과 반경을 구하는 방법은 BM은 식(3)과 (4)과 같으며, BC는 식(5)와 (6)과 같다.

$$p_e = \frac{P}{A_m} \quad (3)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{A_m}{\pi}} \quad (4)$$

여기서, P = 타이어 하중(lbs),

A_m = 접지면적(in^2),

p_e = 등가 균등 원형 접지압력(psi),

r_e = 등가 균등 원형 접지면적의 반경(in).

$$A_c = \frac{P}{p_i} \quad (5)$$

$$r_c = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \quad (6)$$

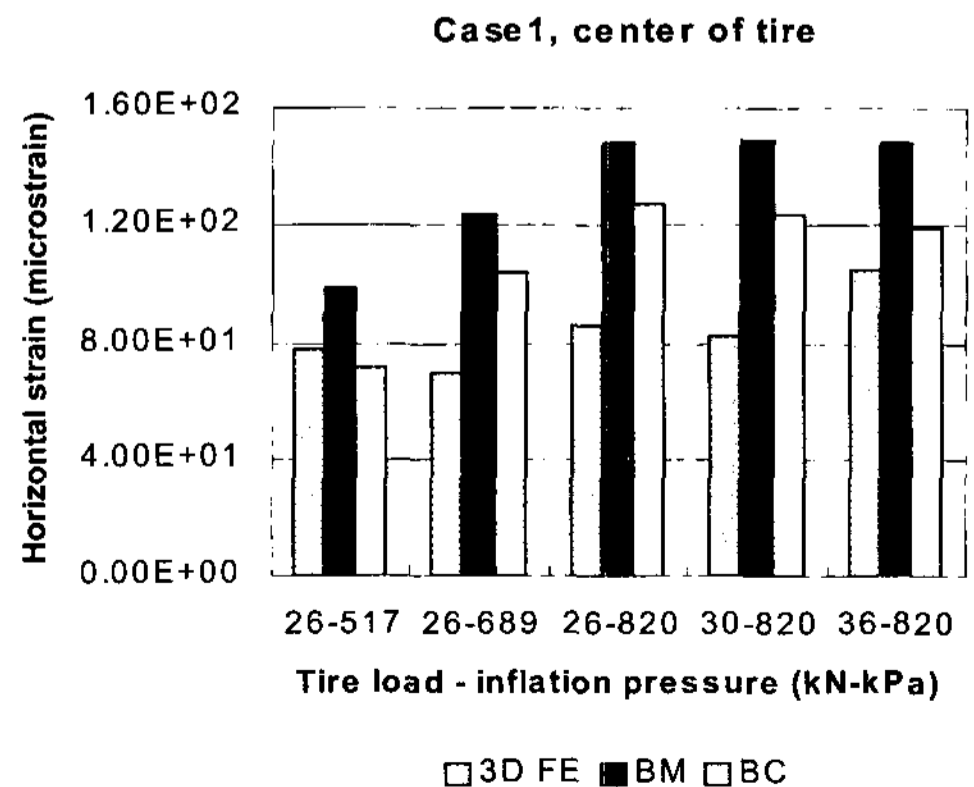
여기서, A_c = 계산 접지면적(in^2),

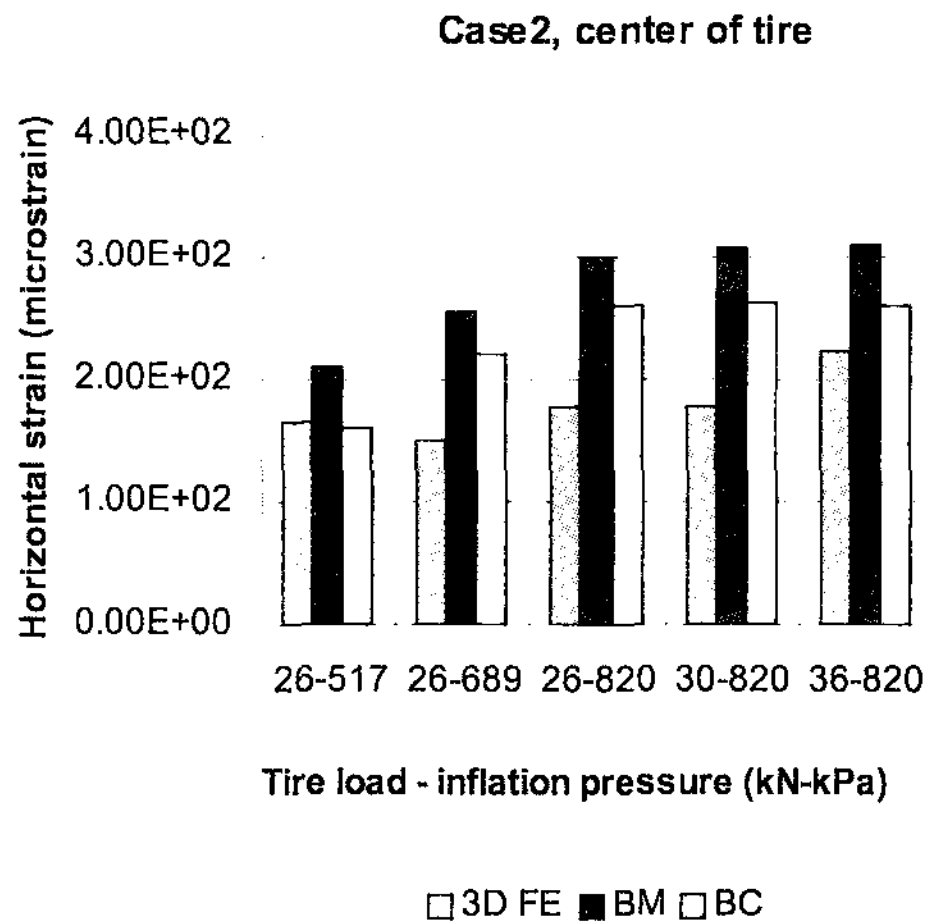
p_i = 타이어 내부압력(psi),

r_c = 원형접지면적의 반경(in)

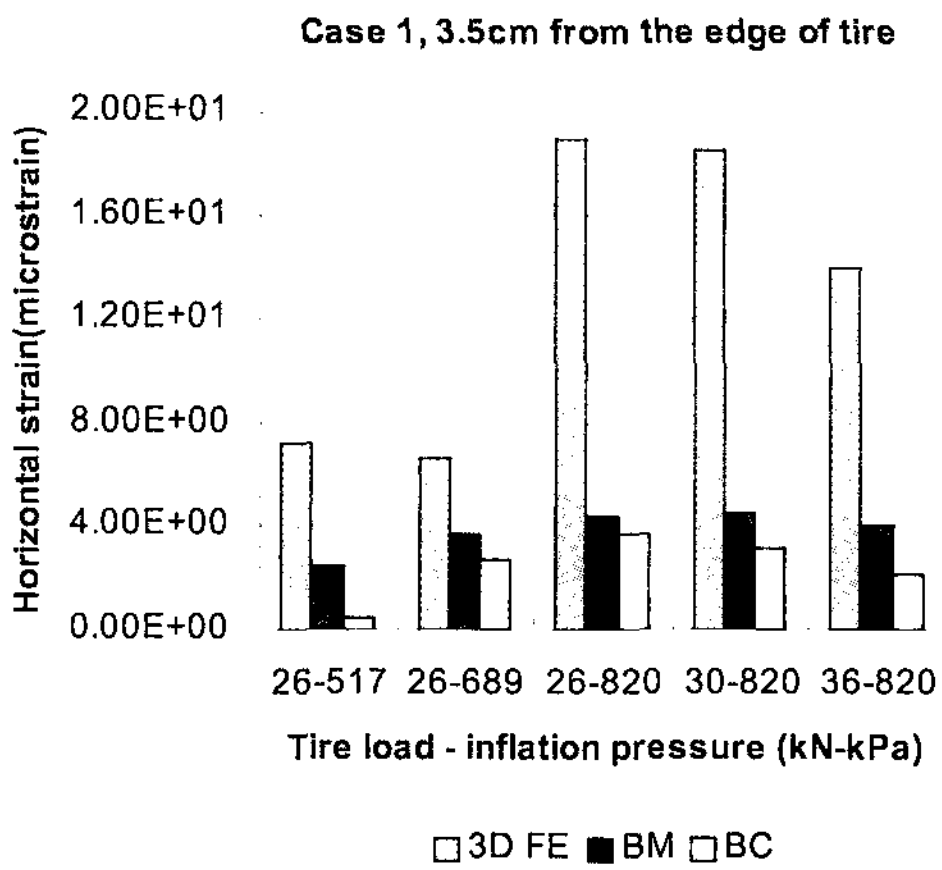
4. 포장 반응분석

11R24.5 광폭 타이어와 10x20 bias ply 타이어를 사용하여 같은 하중조건에서 3차원 유한요소법과 두 가지 종류의 층탄성 프로그램을 이용하여 포장 구조체를 분석하였다. 조사 대상은 상향피로균열(bottom-up fatigue cracking)에 영향을 주는 타이어 중앙의 아스팔트 하단부의 인장변형률과 상향피로균열(top-down fatigue cracking)에 영향을 주는 타이어 가장자리(edge)에서 3.5cm 떨어진 부분의 아스팔트 표층 상층부에서의 인장변형률을 분석하였다. 그림 4에 11R22.5 광폭타이어의 인장변형률 분석자료를 나타내었다. 그림 4(a)에서 보듯이 타이어 중앙의 아스팔트 표층 하단의 인장변형률 분석 결과 타이어 하중을 타이어 실측면적으로 나누어 분석한 BM분석에 의한 인장변형률이 가장 컸으며 3차원 유한요소법에 의한 결과 값이 가장 작은 인장변형률을 보였다. 하지만 그림 4(b)에서 보듯이 3차원 접지압을 사용한 3차원 유한요소법에 의한 결과 값이 수직하중만 재하 하는 층탄성 프로그램에 큰 인장변형률 값을 나타내었다. 특히, 표층과 쇄석기층의 탄성계수가 작은 아스팔트 포장에서는 탄성계수가 큰 포장에 비해 큰 인장변형률을 나타내었다.

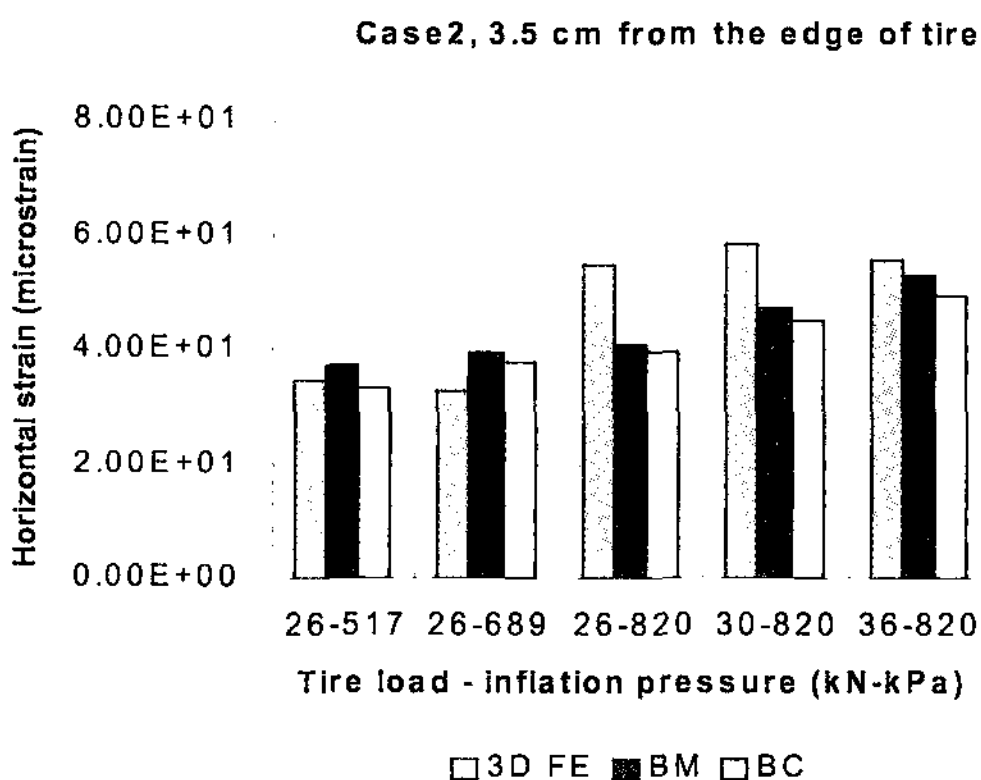




(a) 아스팔트 표층 하단부 인장변형률

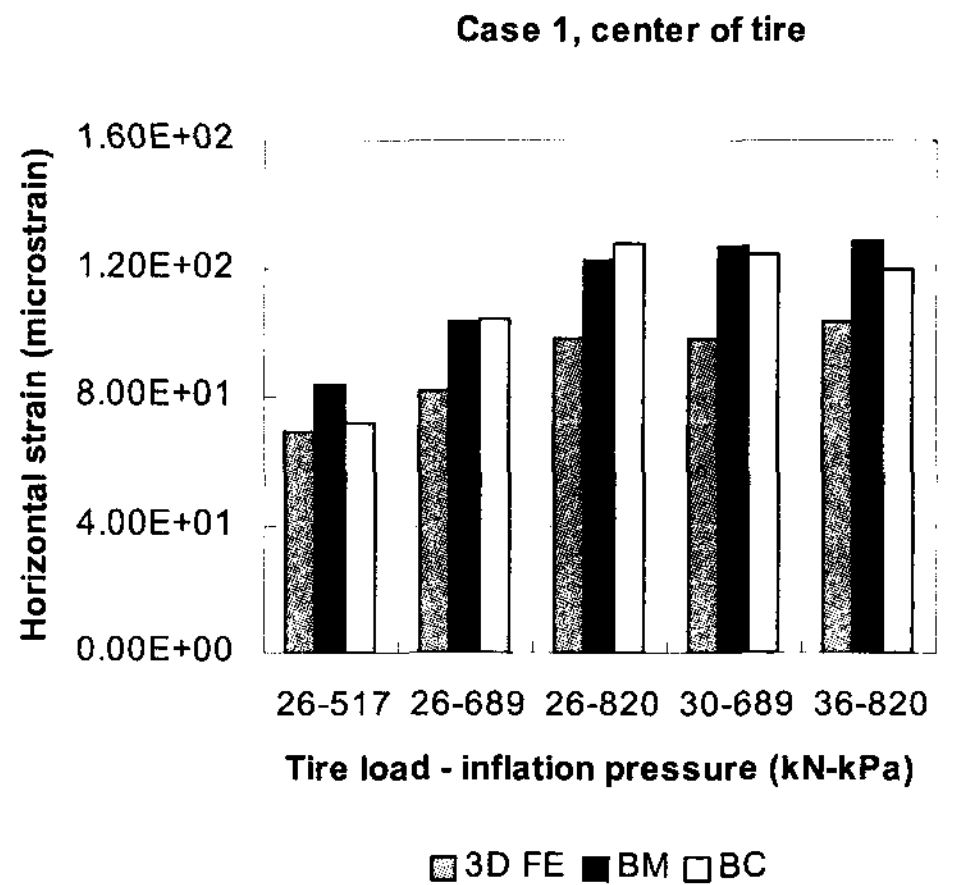


□ 3D FE ■ BM □ BC

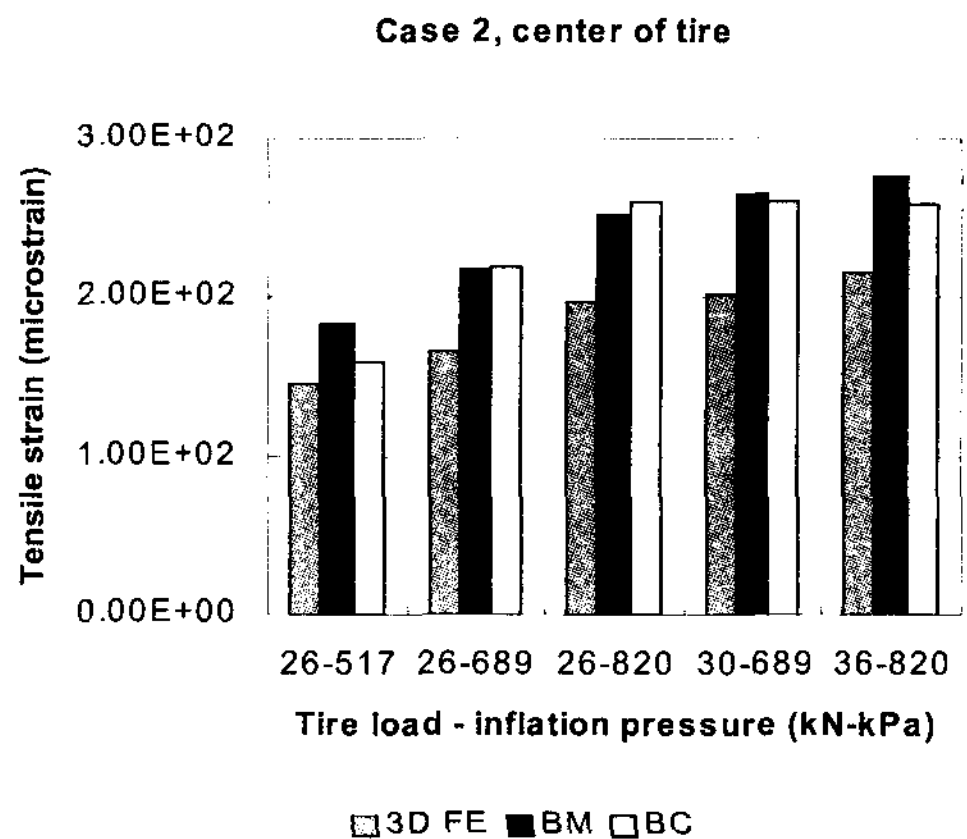


(b) 아스팔트 표층 상단부 인장변형률

그림 5에 10x20 bias ply 타이어의 인장변형률을 분석결과를 나타내었다. 그림 5(a)에서 보듯이 타이어 중앙의 아스팔트 표층 하단부의 인장변형률은 층탄성 프로그램을 이용하여 분석한 BM과 BC 분석 결과가 유사한 결과를 나타내었으며 3차원 유한요소법에 의한 결과는 가장 작은 인장변형률 나타내었다. 10x20 bias ply 타이어의 경우 타이어 내부압력과 하중을 측정 접지면적으로 나눈 접지압력이 유사한 값을 나타내므로 결과 값도 유사한 것으로 판단된다. 그림 5(b)의 아스팔트 표층 상단부의 인장변형률 분석은 3차원 접지압력을 적용한 3차원 유한요소법에 의한 분석이 상당히 큰 결과 값을 나타내었다.



□ 3D FE ■ BM □ BC



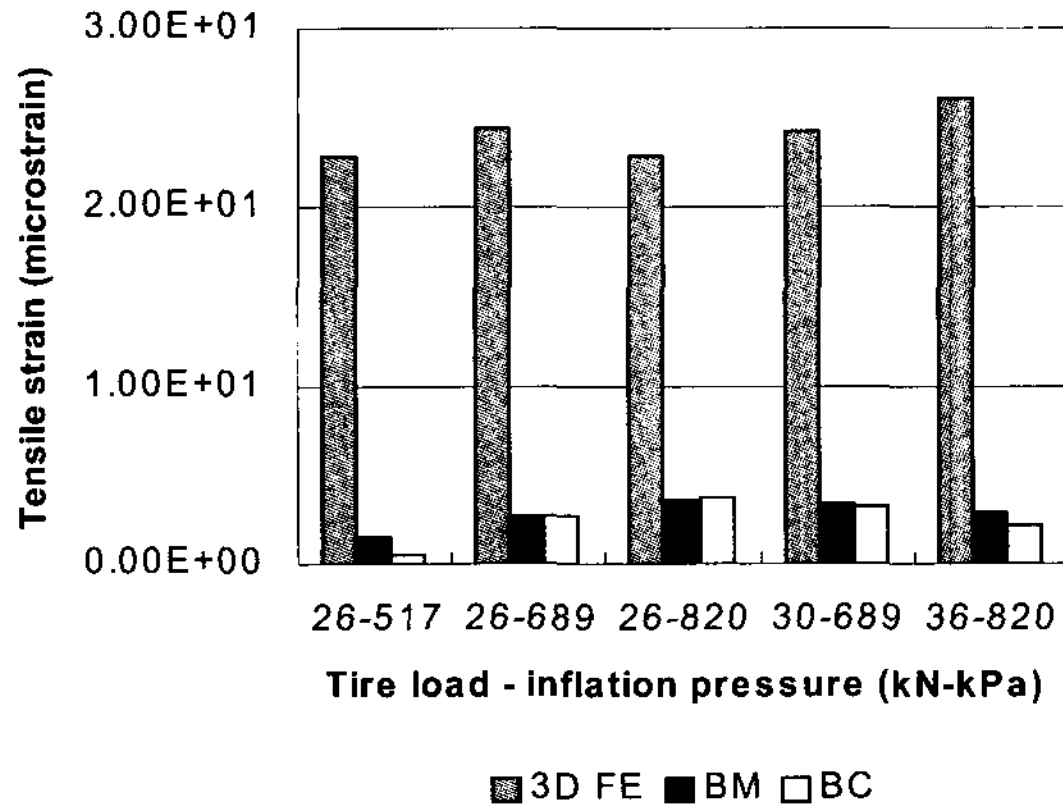
□ 3D FE ■ BM □ BC

(a) 아스팔트 표층 하단부 인장변형률

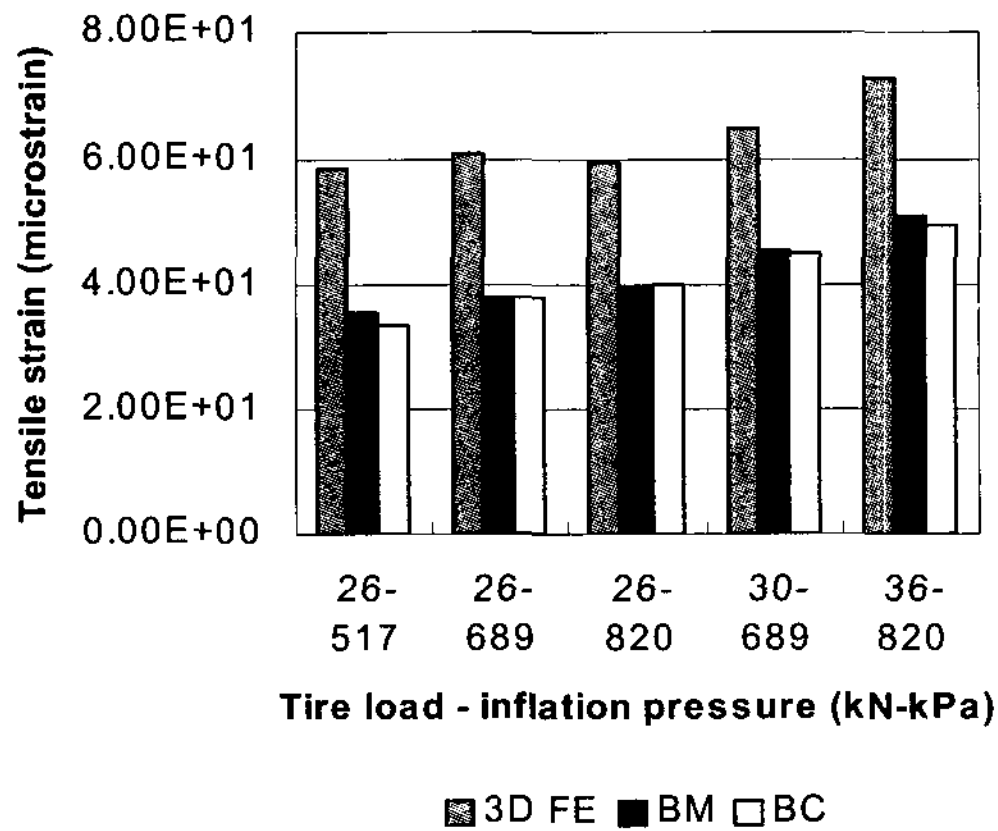
그림 4. 11R22.5 광폭타이어의 인장변형률 분석



Case 1, 3.5cm from the edge of tire



Case 2, 3.5cm from the edge of tire



(b) 아스팔트 표층 상단부 인장변형률
그림 5. 10x20 bias ply 타이어의 인장변형률 분석

5. 결론

3차원 접지압력의 3차원 유한요소법과 층탄성 프로그램(BM, BC)방법을 이용하여 얇은 아스팔트 표층의 하단부와 아스팔트 표층의 상단부의 인장 변형률을 분석하였다. 타이어의 영향을 분석하기 위하여 광폭타이어인 11R22.5와 10x20 bias ply를

사용하였다. 5cm의 아스팔트 표층과 30cm의 쇄석 기층을 이용하여 두 종류의 물성재료를 나타내는 아스팔트 포장을 분석하였다. 타이어 접지압력 분포와 인장변형률 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두타이어의 하중분포도를 분석한 결과 11R22.5 광폭타이어의 경우 타이어 내부압력과 비교해 상당히 큰 접지압력 분포를 나타내었다. 10x20 bias ply 타이어의 경우 타이어 내부압력과 비교하여 유사한 접지압력을 나타내었다. 또한, 하중이 일정할 경우 타이어 내부압력이 증가할 수록 타이어 중앙부분의 접지압력이 증가하였으며, 타이어 내부압력이 일정할 경우 하중이 증가할 수록 타이어 가장자리 접지압력이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 타이어의 중앙에서 아스팔트 표층 하단부의 인장변형률을 분석한 결과 11R22.5 광폭타이어의 경우 층탄성 프로그램의 BM방법에 의한 해석이 가장 큰 결과값을 보였으며, 3차원 접지압력을 적용한 3차원 유한요소법에 의한 해석값이 가장 작은 인장변형률을 나타내었다. 이러한 결과는 접지압력이 타이어 내부압력에 비해 상당히 큰 값을 보이므로 생기는 현상이라 판단된다. 10x20 bias ply 타이어의 경우 층탄성 프로그램의 BM방법과 BC방법에 의한 해석이 유사한 인장변형률을 보였다. 이러한 결과는 접지압력과 타이어 내부압력이 유사함으로서 생기는 현상이라 판단된다.

(3) 타이어 가장자리로부터 3.5cm 떨어진 아스팔트 표층 상단부에서의 인장변형률을 분석한 결과, 11R22.3 광폭타이어의 경우 3차원 접지압력을 적용한 3차원 유한요소법에 의한 해석결과가 가장 큰 인장변형률을 보였으며, BM, BC순으로 인장변형률이 큰 것으로 나타났다. 10x20 bias ply 타이어의 경우 3차원 유한요소법에 의한 해석 결과가 가장 큰 인장변형률을 보였으며 BM과 BC방법에 의한 해석결과는 유사했다. 아스팔트 표층과 쇄석기층의 탄성계수가 클 경우 결과 값이 더욱 뚜렷하게 차이가 남을 알 수 있었다. 이러한 결과는 3차원접지압력을 사용할 경우 횡방향과 차량진행방향의 접지압력도 고려하므로 타이어 가장자리 부분에서 보다 큰 인장변형률을 보이는 것으로 판단된다.



(4) 인장변형률은 아스팔트 포장의 피로균열 공용성 산정시 중요한 입력자료이므로 인장변형률의 차이는 피로균열 공용성과 밀접한 관계가 있다. 광폭타이어가 많이 사용되는 국내 현실을 고려할 때, 구조해석 시 타이어 내부압력 사용보다는 접지압력 사용이 포장 설계와 분석에 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2006학년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원사업에 의해 이루어진 것으로 이 연구를 가능케 한 군산대학교에 감사드립니다.

참고문헌

de Beer, M. "Measurement of Tyre/Pavement Interface Stresses under Moving Wheel Loads." *Int. J. of Vehicle Design. Vol. 3, 1996, pp. 97-115.*

de Beer, M. and C. Fisher. "Contact Stresses of Pneumatic Tires Measured with the Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA) System for the University of California at Berkeley (UCB) and the Nevada Automotive Test Center (NATC)." Confidential Contract Research Report CR-97/053, Transportek, Pretoria, South Africa, 1997.

de Beer M, Fisher C., Jooste, F. "Determination of Pneumatic Tyre/Pavement Interface Contact Stresses under Moving Loads and Some Effects on Pavements with Thin Asphalt Surfacing Layers", *8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, USA, 1997, p.179-227.*

de Beer M, Fisher C., Jooste, F., "Evaluation of Non-Uniform Tyre Contact Stresses on Thin Asphalt Pavements," *9th International Conference on Asphalt Pavements (CD), Copenhagen, Denmark, 2002.*

Samuel D, Ruth A., "Signal processing algorithm in fortran and C," Prentice Hall, New Jersey, USA, 1993.

Fernando, E., Musani, D., Park, D., Wenting, L., "Evaluation of Effects of Tire Size and Inflation Pressure on Tire Contact Stresses and Pavement Response," Research Report FHWA/TX-06/0-4361-1, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, USA, 2006.

접 수 일: 2008. 1. 18
 심 사 일: 2008. 1. 22
 심사완료일: 2008. 5. 9