

고무블록의 수직 하중 및 수평 속도에 따른 마찰에너지 연구[§]

김진규** · 유새롬* · 이일용* · 김두만**†

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Study on Friction Energy of Rubber Block
Under Vertical Load and Horizontal Velocity

Jin Kyu Kim** , Sai Rom Yoo* , Il Yong Lee* and Doo Man Kim**†

* School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received December 28, 2012 ; Revised April 18, 2013 ; Accepted April 19, 2013)

Key Words: Friction(마찰), Friction Energy(마찰에너지), Wear(마모), Rubber(고무), ABAQUS(아바쿠스)

초록: 고무는 독특한 점탄성적 성질로 인하여 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 고무의 마찰은 지속적인 지면과의 접지로 인하여 발생되고, 결과적으로 마모가 발생한다. 이때 마찰에 의해 발생하는 마찰에너지는 마모 메커니즘의 중요 요인으로, 마찰에너지는 온도, 지면의 거칠기, 형상, 하중, 물성 등의 조건에 영향을 받는다. 본 연구에서는 마찰에너지에 대한 수직 하중과 수평 이동속도의 영향을 ABAQUS/explicit을 이용하여 해석하였고, 접지압, 전단력과 슬립 거리를 이용하여 마찰에너지를 계산하였다. 또한 실제 고무의 거동에 대한 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다.

Abstract: Rubber is one of the most commonly used materials in various fields because of its unique viscoelastic properties. Friction occurs when a tire constantly makes contact with the ground. As a result, friction causes wear. The frictional energy caused by friction is a primary factor in the wear mechanism. The frictional energy is affected by various conditions (temperature, roughness of ground, shape of rubber, load, and materials). In this study, the analysis was preceded by considering the vertical load and the horizontal velocity to the rubber using ABAQUS/explicit. The contact pressure, and friction energy are derived using the shear force and slip distance. The actual behavior of the rubber test data were compared with the analysis results.

1. 서 론

고무는 타이어 전반에 쓰이는 재료로서 타이어의 성능을 결정짓는 중요한 재료이다. 특히 고무로 이루어진 타이어 트레드의 마찰 마모 성능은 타이어 수명에 직결되는 중요한 인자이다.

트레드는 타이어가 회전할 때 지면과 접촉 접촉하는 부분으로서 타이어의 뼈대를 이루는 카카스를 보호할 뿐만 아니라 타이어와 노면간의 접지력을 확보하여 유효한 제동력과 차량의 동력을 노면에 전달하는 중요한 역할을 수행한다. 이러

한 타이어의 수명을 결정하는 중요 요소인 트레드의 마모 예측을 위해서 고무의 마찰 및 마모에 대한 다양한 연구가 진행되어져 왔다.

고무 마모의 연구는 1950년대에 Shallamach에 의해 시작되었고 이후 마찰거동 및 마찰에 의한 마모연구도 활발히 진행되어 왔다.^(1,2)

1990년대에 들어 마찰접촉과 트레드 블록의 편마모가 타이어 수명을 좌우함이 인식되어 집중적으로 연구되고 있다. Shiraishi 등은 FEM을 이용한 수치해석을 통해 코너링시 타이어 트레드에 발생하는 마찰에너지를 구하였으며,⁽³⁾ Knisley는 타이어의 마찰에너지와 실내 마모 실험 결과의 관계를 실험적으로 연구하여 마찰에너지와 마모의 상관 관계를 제시하였다.⁽⁴⁾

D.M.Kim은 상단이 고정된 경우 압축력과 전단

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, dmkim@kau.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

력이 작용하는 사각형 고무 블록의 접지압에 대한 해석을 하였으며,⁽⁵⁾ T.Akasaka는 상하 양단이 고정된 경우 압축력과 전단력이 작용하는 슬립을 고려하지 않은 사각형 고무 블록 접지면 응력의 해석해를 구하였다.⁽⁶⁾

Y.A.Khandhia는 압축력을 받는 실린더형 고무의 응력분포를 Mooney-Rivlin Model로 고려하여 FEM을 이용한 비선형 해석을 진행하는 등 고무의 마찰거동 및 마모연구가 실험적 방법 및 유한요소를 이용한 수치해석까지 활발한 연구 활동이 이루어지고 있다.⁽⁷⁾

타이어의 마모현상은 고무의 표면과 노면 사이에 작용하는 마찰력이 고무의 강도보다 클 때 표면의 고무입자가 떨어져 나가는 현상이다. 이러한 마모현상은 고무의 성능과 타이어의 구조, 노면의 상태, 거칠기 등 여러 인자들이 상호 복잡적으로 나타나는 복잡한 현상이다.⁽⁸⁾

타이어의 트레드와 같은 고무재료에서의 마찰력의 증가는 고무의 내마모성을 떨어뜨리기 때문에 마찰거동에 따른 마모현상은 함께 고려되어야 하며 마모를 설명하기 위해서는 마찰특성을 알아야 한다.⁽⁹⁾

실제 타이어 트레드는 차량 무게에 의한 압축력 및 회전, 가속, 감속, 조향 등에 의해 수직하중 및 수평하중으로 마모가 발생하게 되는데 본 연구에서는 이와 같은 운동조건을 고무 블록에 적용하여 수직하중 및 수평하중이 작용하는 고무 블록의 마찰에너지 실험값과 FEM(ABAQUS)해석을 비교 검토 하였다.⁽¹⁰⁾

2. 연구내용 및 방법

2.1 유한요소모델

해석 모델로서 복잡한 트레드의 형상을 작은 단일고무블록으로 단순화하여 직육면체의 형태로 모델링하였다. Fig. 1과 같이 가로 30mm, 세로 30mm, 높이 20mm 로 실제 실험에 사용되었던 시편과 같은 크기로 모델링하였으며, 본 연구에서는 유한요소 해석 상용프로그램인 ABAQUS / explicit을 사용하였다.^(11,12)

모델링된 고무는 밀도는 $1100kg/m^3$ 이고, ogden 3차식을 이용한 Hyperelastic 물성치는 Table 1과 같다.⁽¹³⁾

Table 1 Ogden coefficients of rubber material

	μ	α
1st order	13356000	1.633
2nd order	-6631000	1.9
3rd order	58000	-2.456

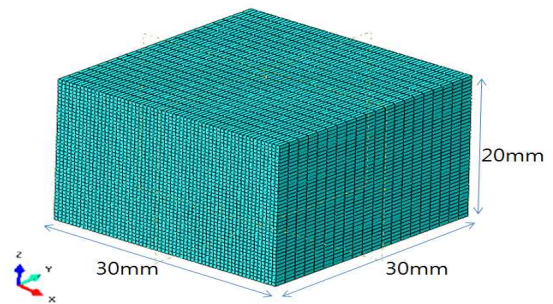


Fig. 1 The meshed rubber block

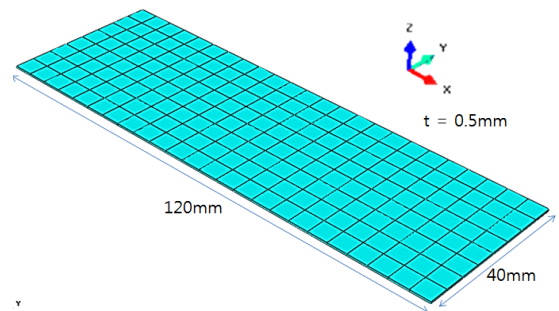


Fig. 2 The meshed ground

고무의 접지면과 맞닿게 되는 Ground는 Fig. 2와 같이 가로 120mm 세로 40mm 두께 0.5mm의 크기로 모델링 하였다. 밀도는 $2200kg/m^3$, 탄성계수 E는 $30GPa$, Poisson's ratio 는 0.4이며, 마찰계수는 0.47이다.

실제 차량이 운행될 때 트레드에는 차체의 중량에 의한 압축력과 가속, 감속, 조향 등으로 인한 전단하중이 트레드에 가해지게 된다.⁽¹⁴⁾

본 연구에서는 타이어 트레드가 차체중량과 속도에 의한 전단하중만 받는다고 가정하고, 총 두 가지 단계로 나누어 해석을 진행하였다.

Fig. 3과 같이 Step1에서는 고무블록이 정지된 상태에서 수직하중만 받게 되고, Step2에서는 수직하중을 받는 동시에 x방향으로 고무블록을 수평

Table 2 Conditions of analysis

	Fixed factor	Applied factor
Normal force	5mm/s	98.1N, 495N, 981N, 1500N, 2000N
Velocity	495N	1mm/s, 5mm/s, 10mm/s, 30mm/s

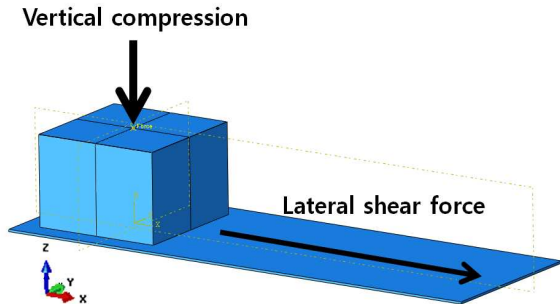


Fig. 3 The schematic of the analysis

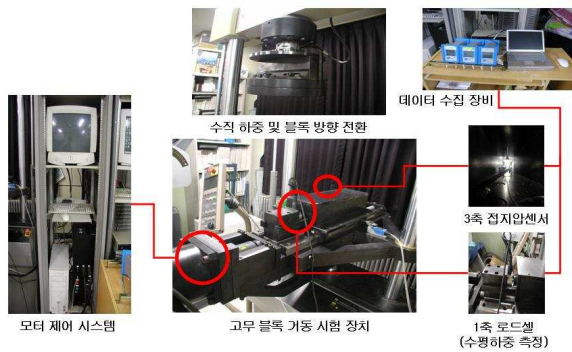


Fig. 4 Rubber block test system

이동 시킨다.

- step1 : 수직하중 적용
- step2 : 수직하중 및 x방향 수평이동속도 적용

실험조건으로 적용되는 수직하중과 수평이동속도는 Table 2와 같다.⁽¹⁵⁾

3. 결 과

3.1 접지면 위치에 따른 고무블록의 거동

FEM모델의 타당성을 검증하고 실험결과의 결과를 비교하기 위해 수직하중이 495N, 속도 5mm/s의 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같은 실험 장비를 이용하여 실험하였다. 위 실험 장비는 MTS 810의 프

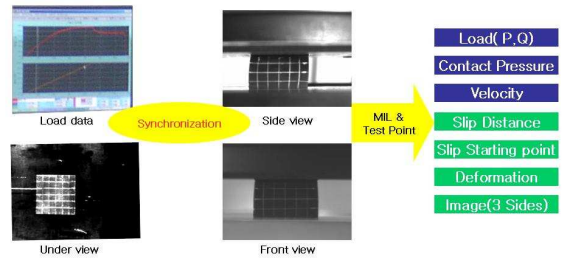


Fig. 5 The concept of image processing

레이스를 이용하여 바닥면의 수평을 유지하는 가이드를 두었으며, 접지면에서의 접지압 및 전단응력의 측정을 위하여 50 kgf 용량의 3축 로드셀을 제작하여 사용하였고, 수직하중만 가한 후 로드셀에서 측정된 각 지점의 하중을 적분한 값과 MTS 810의 유압 실린더에서 가해지는 하중을 MTS 810의 로드셀에서 측정된 데이터와 비교하여 센서의 높이를 교정하였다. 3축 접지압센서, 수평하중 로드셀, 수직하중 로드셀은 앰프를 거쳐 PC에서 데이터를 수집할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 영상 처리를 위한 장비의 구성 및 데이터 처리 개념도로서 본 연구에서는 고무 블록의 거동을 관찰하고 접지면에서의 슬립을 측정하기 위해서 영상 장비를 이용하여 고무 블록의 거동을 관찰하였다.

영상처리 보드(Image grabber)는 Matrox사의 Meteor2-mc4를 사용하였으며, 카메라는 Sony사의 HR50을 사용하였다. Meteor2-mc4는 4개 채널을 이용하여 초당 60프레임의 영상을 최대 659 X 494 크기로 저장할 수 있다. 각 카메라는 고무 블록의 측면, 전면, 접지면을 촬영할 수 있도록 설치하였으며 각 위치에 따라 거리에 맞는 렌즈를 선택하였다. 렌즈의 선택은 영상 처리에서 매우 중요한 요소로서, 실제 촬영거리에 맞는 렌즈를 선택해야 화질이 우수한 영상을 얻을 수 있다.

각 해석 조건에 따라 실험과 FEM해석 결과를 비교하여 살펴 본 결과, 접지압은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 0mm ~ 4mm구간에서 고무 블록이 지면과 떨어지는 Detaching 영역에서는 0이 되고, 4mm 이후 점차 증가하여 Stick현상이 일어나는 28mm ~ 30mm 영역에서는 급격하게 증가하였다.

Detaching이 일어나는 영역은 Fig. 7과 같이 바닥면 절점들의 z방향 수직변위로 알 수 있다.

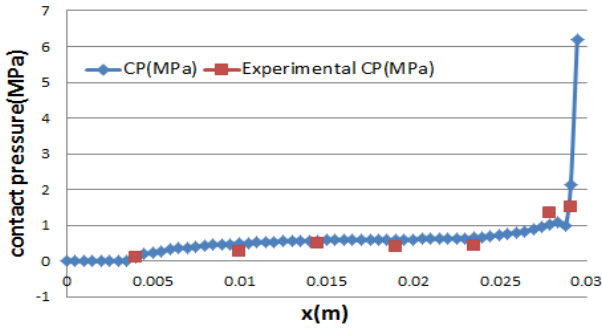


Fig. 6 The contact pressure of the ground plane

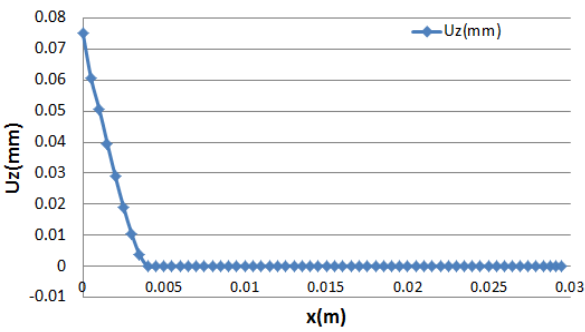


Fig. 7 The vertical displacement of the ground plane

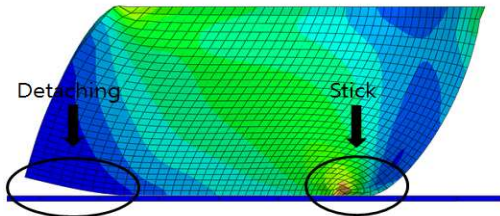


Fig. 8 Stick and detaching

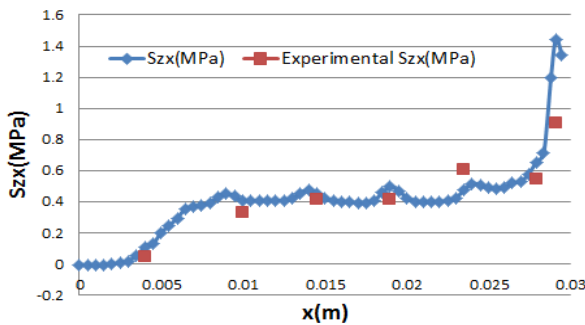


Fig. 9 The shear stress of x direction

Fig. 9는 고무바닥면의 진행방향에 대한 전단응력 그래프로서, 바닥면의 뒷부분에서는 고무블록 뒷부분이 지면과 떨어지는 Detaching 현상으로 인해 전단응력이 작은 값을 가지고 중간부분에서는

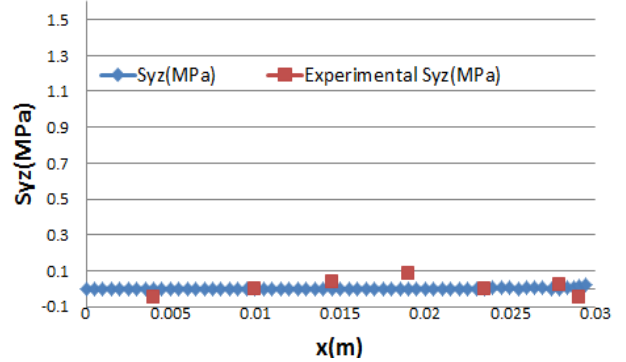


Fig. 10 The shear stress of y direction

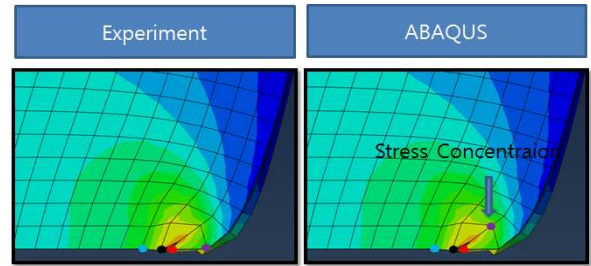


Fig. 11 The difference of the measurement positions

일정한 값을 유지한다. 고무의 끝단부분에서는 Fig. 8과 같이 고무가 안쪽으로 말려들어가는 Stick 현상으로 인해서 전단응력이 급격히 상승한다.

Fig. 10은 고무바닥면의 횡방향 전단응력에 대한 그래프로서 y방향으로 수평하중이 작용하지 않아 해석결과와 실험결과 모두 진행방향전단응력과 접지압에 비해서 그 값이 작고, 전 영역에 걸쳐서 0에 가까운 값을 갖고 있다. 또한 슬립거리 역시 y방향 수평하중이 없어 횡 방향 슬립거리가 0에 가까운 값을 갖게 되고 횡방향 마찰에너지 역시 0에 가까운 매우 작은 값을 갖게 된다.

전방에서 진행방향전단응력의 실험결과는 값이 감소 후 증가하고 해석상에서는 반대의 경향을 보이는 이유는 측정위치에 따른 차이이다. 실제 실험에서는 Stick 현상이 일어난 후에 바닥면에서 측정을 하므로 응력이 집중되는 부분의 전단응력을 측정할 수가 없다. 반면 해석상에서는 변형전의 설정한 절점에서 전단응력을 측정하므로 Fig. 11과 같이 응력이 집중되는 지점에서 측정이 가능하다. 따라서 해석 값이 실제 실험값보다 더 크고, 끝단에서 전단응력이 증가 후 감소하는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 12는 고무바닥면의 진행방향 마찰에너지

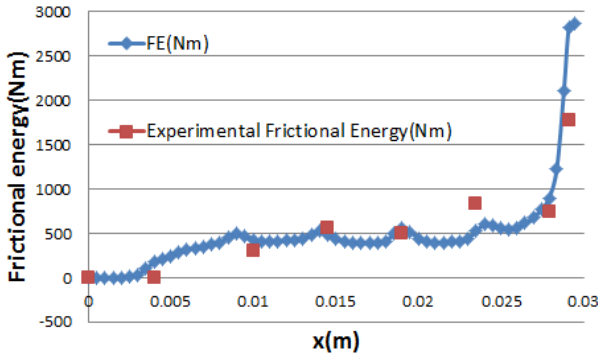


Fig. 12 The Friction energy of x direction

그래프로서, 진행방향마찰에너지는 진행방향전단 응력 S_{zx} 과 진행방향 슬립거리와 바닥면 면적의 곱으로 계산된다. 또한 슬립거리는 원래 설정한 속도 V_{set} 과 이동한 시간 t 를 곱한 거리에서 실제 해석된 x방향 각 절점의 변위 U_x 를 뺀 값으로 계산하였다.^(15,16)

- Slip distance = $(V_{set} \times t) - U_x$ (1)
- Friction Energy = $S_{zx} \times \text{Area} \times \text{Slip distance}$ (2)

마찰에너지는 전단응력의 경향과 매우 유사하며, Detaching 구간에서는 슬립거리가 0이므로 마찰에너지 역시 모두 0이다. 반면 Stick 현상이 일어나는 구간에서는 전단응력과 슬립거리가 급격히 증가함에 따라 마찰에너지 역시 급격히 증가하게 된다.

3.2 수직하중에 따른 고무블록의 거동변화

모델링한 고무블록에 속도는 5mm/s로 고정하고 수직하중을 98.1N, 495N, 981N, 1500N, 2000N으로 변화시키면서 고무블록의 거동을 분석하였다.

Fig. 13은 수직하중에 따른 고무블록의 접지압 그래프로서, 수직하중이 증가함에 따라 접지압이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 실험에 의한 데이터와 전체적인 경향이 유사함을 알 수 있다.

Fig. 14는 수직하중에 따른 진행방향 전단응력 그래프로서, 진행방향 전단응력은 접지압에 비해서 규모가 작지만 전체적인 경향은 실제 실험과 FEM을 통한 해석값 모두 수직하중에 따라 선형적으로 증가한다.

Fig. 15는 수직하중에 따른 횡방향 전단응력 그

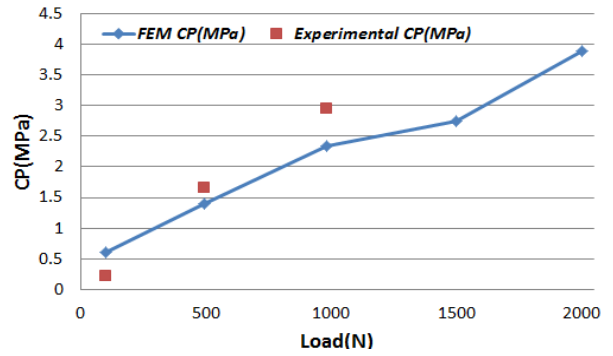


Fig. 13 Effect of compression load for contact pressure

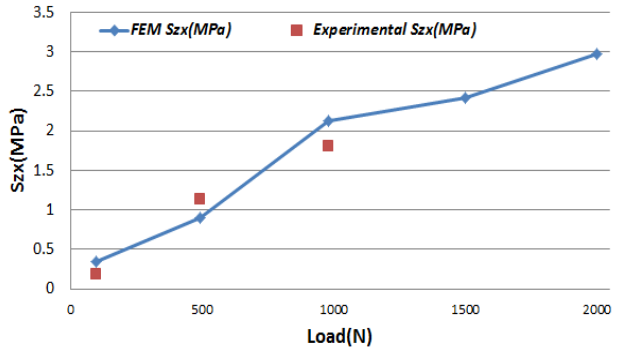


Fig. 14 Effect of compression load for shear stress of x direction

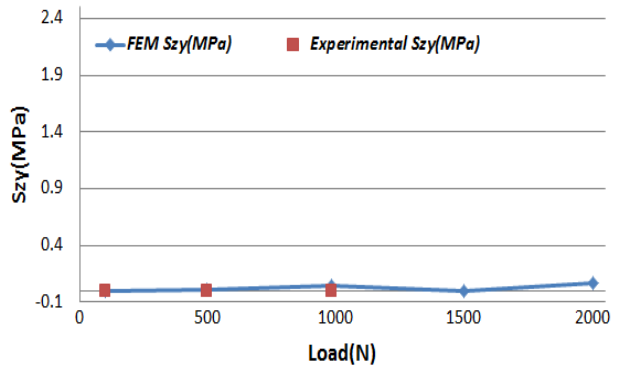


Fig. 15 Effect of compression for shear stress of y direction

래프로서, 횡방향 전단응력은 수평방향으로 하중이 존재하지 않으므로 실험결과와 FEM값 모두 0에 가까운 값을 보였다. 또한 횡방향 전단응력이 0에 됨에 따라 횡방향 마찰에너지 역시 수직하중과는 무관하게 0에 가까운 값을 보인다.

Fig. 16은 수직하중에 따른 마찰에너지에 대한 그래프로서, 진행방향 마찰에너지는 수직하중이 증가함에 따라 실험값과 FEM에 의한 해석값 모두 증가하는 경향을 볼 수 있다.

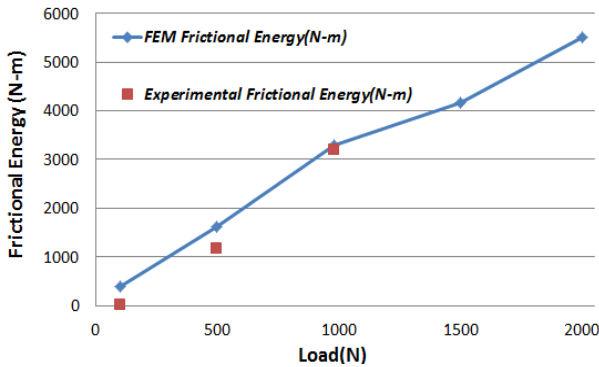


Fig. 16 Effect of compression for friction energy

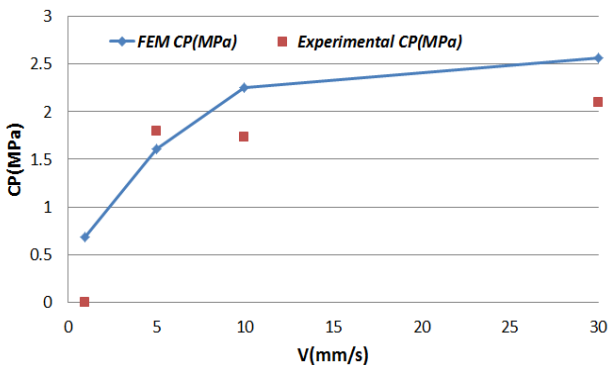


Fig. 17 Effect of horizontal velocity for contact pressure

3.3 수평이동속도에 따른 고무블록의 거동변화
 수평이동속도에 따른 고무블록의 거동변화를 관찰하기 위해서 수직하중을 495N으로 고정하고 1mm/s, 5mm/s, 10mm/s, 30mm/s로 변화시키면서 해석을 진행하였다.

Fig. 17은 수평이동속도에 따른 접지압을 실제 실험 데이터와 비교하였다.

수평이동속도가 10mm/s까지는 급격히 증가하는 경향을 보이다가 그 이후 증가율이 작아지고 접지압의 크기가 서서히 증가하게 된다. 아바쿠스 상의 값들이 실제 실험의 값보다 큰 이유는 실제 실험에서는 Stick현상으로 인해 응력집중현상이 일어나는 지점의 접지압을 측정 할 수 없는 반면 FEM상에서는 그것이 가능하기 때문이다.

Fig. 18은 수평이동속도에 따른 진행방향 전단응력에 관한 그래프로서, 진행방향 전단응력은 수평이동속도가 증가함에 따라 접지압 보다는 전체적으로 크기는 작지만 유사한 경향으로 비교적 저속에서는 급격히 증가한 후 점차 증가한다.

Fig. 19는 수평이동속도에 따른 횡방향 전단응력 그래프로서, 횡방향으로는 수평하중이 작용하지 않았으므로 횡방향 전단응력이 매우 작은 값

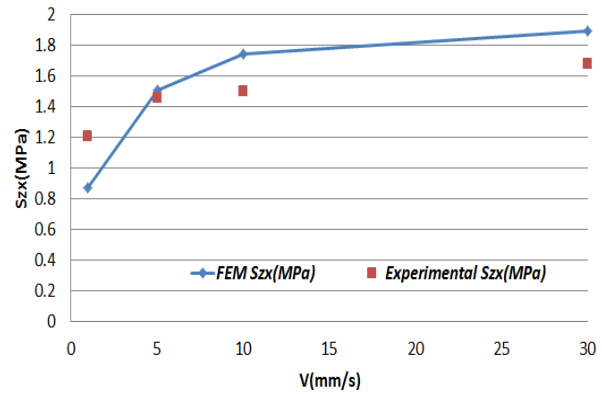


Fig. 18 Effect of horizontal velocity for shear stress of x direction

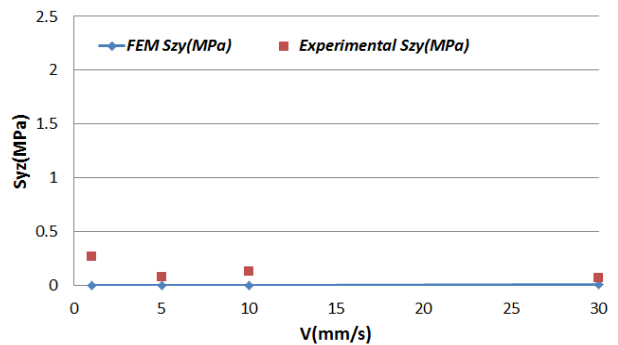


Fig. 19 Effect of horizontal velocity for shear stress of y direction

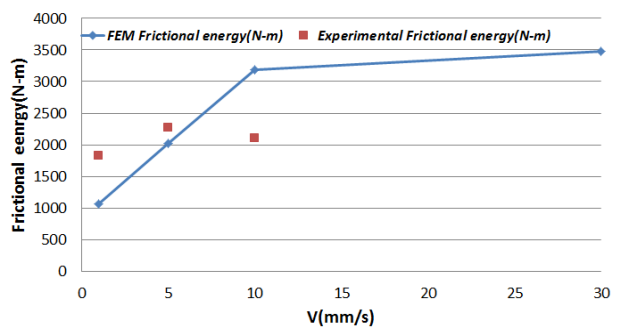


Fig. 20 Effect of horizontal velocity for friction energy

을 갖는다. 이에 따라 횡방향으로 작용하는 마찰에너지 역시 매우 작은 값을 갖는다.

Fig. 20은 수평이동속도에 따른 마찰에너지 그래프로서, 마찰에너지는 실험값에선 5mm/s 이후에 약간의 감소를 보이고, FEM값에서는 10mm/s 이후 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다.

해석 및 실험 결과를 종합하여 분석한 결과, 수직하중을 변화시켜 해석을 한 경우, 접지압과 전단응력의 경우 실제 실험값보다 크기는 더 크

지만 전체적으로 Detaching구간에서는 크기가 작고 고무블록의 앞전으로 갈수록 급격히 증가하는 경향이 매우 잘 맞는 것으로 확인하였다. 이때, FEM 해석 결과의 값들이 더 큰 이유는 Stick현상으로 인해 응력이 집중되는 부분을 실제 실험으로는 측정할 수 없었으나 FEM에서는 응력집중되는 영역이 측정 가능하기 때문이다.

슬립거리의 해석 결과에서 전진하려는 고무블록과 지면과의 마찰 때문에 고무가 더 이상 전진하지 못하고 안쪽으로 말려들어가는 현상으로 인해 발생하게 되는데, 앞쪽으로 갈수록 Stick현상이 두드러지며 슬립거리도 증가하게 된다. 이는 마찰에너지 역시 고무블록의 앞쪽에서 급격히 증가하는 현상으로 나타난다. 또한 전체적으로 횡방향으로 수평하중이 존재하지 않기 때문에 횡방향 전단응력, 횡방향 슬립 및 횡방향 마찰에너지 역시 매우 작은 값을 갖게 되며, 총 마찰에너지에 큰 영향을 주지 못한다.

수평이동속도를 변화시키며 해석한 결과 전단응력과 접지압이 속도의 증가에 따라 증가를 하나 어느 한계치가 있는 것으로 보이고 증가율이 감소하며 점차 일정한 값으로 수렴해나가는 것을 볼 수 있다. 접지압과 전단응력이 10mm/s를 기점으로 급격히 상승한 후 증가율이 감소하는 이유는 고무블록이 운동마찰 구간에서 움직이기 전 최대정지마찰력을 넘어야 하기 때문인데, 10mm/s 이전에는 최대정지마찰력을 넘기 위한 고무의 진행방향으로의 수평하중이 부족하기 때문이다. 또한 마찰에너지는 전단응력과 슬립거리, 그리고 바닥면 면적의 곱이므로 전단응력과 비슷한 경향으로 10mm/s까지는 급격히 증가하며 그 이후엔 어느 일정값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 차량의 이동속도가 무한정 빨라진다고 해서 마찰에너지가 증가하지 않고 어느 일정 한계에 도달하면 마찰에너지는 더 이상 속도의 영향을 받지 않을 것이라고 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 트레드 패턴의 기초가 되는 고무블록을 FEM(유한 요소 해석)을 이용하여 연구에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있었고 연구 결과를 실제 실험의 데이터와 비교분석함으로써 FEM을 통한 결과 값들이 유효한지 확인할 수 있었다.

실험과 FEM해석을 비교한 결과 두 연구 결과 모두 수직 하중이 증가 할수록 마찰에너지가 증가 하는 경향을 보였으며, 속도 영향에 의한 마찰에너지의 증가 경향 역시 같은 경향을 보였다.

차후 마찰에너지에 영향을 주는 인자 중 수직하중과 수평이동속도 외에 지면의 거칠기, 트레드의 형상, 미끌림각도, 횡방향 수평하중 등을 추가적으로 고려한다면 실제에 더 가까운 데이터들을 얻을 수 있을 것이며, 마찰에너지와 마모의 상관관계를 밝힐 수 있는 연구의 초석이 될 것이다.

참고문헌

- (1) Schallamach, A. and Turner, D.M., 1960, "Tire Traction and Wear," *Wear*, Vol. 3, pp. 1~3.
- (2) Schallamach, A., 1958, "Friction and Abrasion of Rubber Wear," *Wear*, Vol. 1, No. 5, pp. 384~417
- (3) Shiraishi, M., Yoshinaga, H., Miyori, A. and Takahashi, E., 2000, "Simulation of Dynamically Rolling Tire," *Tire Science & Technology, TSTCA*, Vol. 28, No. 4, pp. 264~276.
- (4) Knisley, S., 2002, "A Correlation Between Rolling Tire Contact Friction Energy and Indoor Tread Wear," *Tire Science & Technology, TCSTCA*, Vol. 30, No. 2, pp. 83~99.
- (5) Kim, D. M. and Park, I. J., 2001, "Analysis of Contact Stresses on the Tread Rubber Blocks with Slip," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol.29, No.4, pp. 216~229.
- (6) Akasaka, T., Kagami, S., Hasegawa, A. and Siobara, H., 1993, "The Contact Pressure Distribution and Detaching Phenomenon of Tire Tread Rubber Under Compressive and Shearing Forces," *Journal of the Society of Rubber Industry of Japan, Nihon Gomu*, Vol.66, No.4, pp. 259~272.
- (7) Khandhia, Y. A., 1990, "Finite Element Analysis of Rubber Problems Nonlinear Stress Analysis," *IOP Short Meeting*, No.24, pp.11~19.
- (8) Desmond, F. Moore, 1980, "Friction and Wear in Rubbers and Tires," *Wear*, Vol. 61, No. 2, pp. 273~282.
- (9) Kim, H. J., Kim, S. N., Kim, S. H. and Kim, D. M., 2010, "Characteristics of Rubber Friction and Wear," *SASE*, Vol. 4, No. 4, pp. 1~10.

- (10) Kim, D. M., Kwon, Y. C. and Shin, D. Y., 1997, "A Study on Stresses Analysis of Tire Tread Block," *Journal of Korea Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 55~61.
- (11) Sridharan, K. and Sivaramakrishnan, R., 2012, "Dynamic Behavior of Tyre Tread Block," *American Journal of Engineering and Applied Science*, Vol.5, pp.119~127.
- (12) Hofstetter, K., Grohs. Ch., Eberhardsteiner, J. and Mang, H. A., 2006, "Sliding Behaviour of Simplified Tire Tread Patterns Investigated by Means of FEM," *Computer and Structure*, Vol. 84, pp.1151~1163.
- (13) Ogden, R. W., 1993, "Large Deformation Isotropic Elasticity - on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solid," *Proc. R. Soc. Lond., Rubber Chem Technol*, Vol. 326, pp. 565~584.
- (14) Rhee, B. G., Oh, S. M., 2008, "Study on the Friction Characteristics for Automotive Tires," *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 9, No. 6, pp. 1535~1540.
- (15) Yoo, H. S., Kim, D. M., Lee, S. J. and Ko, B. J., 2007, "An Analysis of the Friction Energy on the Rubber Block," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.35, No.7, pp.619~626.
- (16) Cho, J. R., Choi, J. H., Yoo, W. S., Kim, G. J. and Woo. J. S., 2006, "Estimation of Dry Road Braking Distance Considering Frictional Energy of Patterned Tires," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.42, pp. 1248~1257.