

論文

고무 블록의 마찰 거동 해석

김두만*, 유현승*

Analysis of the Frictional Behavior of Rubber Block

Doo-Man Kim*, Hyun-Seung Yoo*

ABSTRACT

The friction and wear of tire determined by frictional behavior of tire tread that translate driving force, cornering force and braking force between automobile and road as a result of frictional behavior of each tread block. The tire tread block is representative case of rubber block doing frictional behavior.

In this paper, frictional behavior of rubber block under compressive force and shear force was analytically obtained by using slip starting position parameter instead of friction coefficient which is uncertain to express exact value between rubber and other surfaces yet. And local coefficients of friction were calculated as a function of compressive force, shear force, shear modulus of rubber, shape factor and slip starting position.

Key Words : Rubber Block(고무 블록), Friction Coefficient(마찰 계수), Frictional Energy(마찰 에너지), Contact Pressure(접지압), Slip(미끄러짐)

1. 서 론

마찰거동을 하는 고무 블록의 대표적인 경우로 타이어의 트레드 고무를 꼽을 수 있다. 타이어 트레드 고무 블록은 차량의 운동 및 타이어의 회전에 따라 수직 압축력과 전단력을 받게 되며 제동력과 견인력을 지면과 차량사이에서 전달하는 역할을 한다. 이러한 하중상태에서 트레드 고무 블록은 노면과 접촉 중에 일반적으로 국부적인 슬립 또는 블록 전체가 움직이는 미끄럼 현상이 나타나며, 과도한 견인력 또는 제동력이 주어지는 경우 트레드 고무 블록의 뒷부분(trailing edge)이 떠오르는 디테칭(detaching) 현상이 발생

한다. 이러한 문제의 해석으로서는 트레드 블록의 고무를 평면변형 문제로 취급하여 Hook's law를 사용한 해석 결과가 실험값과 비교되어 보고⁽¹⁾되었으나 슬립의 영향에 대해서는 언급된 바가 없다. 슬립의 영향을 고려하여 트레드 고무 블록의 거동을 해석하기 위해서는 고무와 접지면 간의 마찰에 대한 규명이 우선되어야 한다. 그러나 고무의 마찰계수는 속도, 온도, 접촉면적, 재료 물성 및 접지면 종류 등에 따라 달라지는 특성으로 인하여 타이어 트레드 고무를 마찰 거동 및 마모의 연구에서 고무와 접지면 간의 마찰계수는 일정한 상수값으로 표현하는 것이 부적절하다는 것이 잘 알려져 있다. 또한 마찰계수에 대한 정확한 수식화 역시 연구가 진행 중이며 실험적으로 구해진 실험식에 의존하여 제한된 범위에서의 적용만이 가능한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 고무와 접촉면 사이의 마찰계수를 도입하는 대신 변위함수에 슬립 시작위치를 도입하여 접지압과 전단응력을 해석하였다. 이러한 해석을 통해 본 연구에서는 마찰계수 즉, 수직응력에 대한 전단응력의 비는 상수값이 아닌

† 2006년 월 일 접수 ~ 200년 월 일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
김두만, dmkim@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1
한국항공대학교

수직하중, 전단하중, 고무 블록의 형상, 고무 재료 및 슬립 시작위치의 함수 형태로 고무 블록의 위치에 따라 달라지는 국부적 마찰계수를 계산하였다. 또한 접지면에서의 슬립의 영향을 고려하여 압축력과 전단하중이 작용하는 경우의 고무 블록의 마찰거동에서 나타나는 뒷부분(trailing edge)의 떼어짐(detaching) 현상과 고무 블록의 미끄러짐(sliding) 현상 및 압축력이 작용하는 경우 고무 블록의 겹보기 강성계수 값의 변화 등 고무 블록의 마찰 거동을 해석하였으며 접지면에서 발생하는 마찰에너지를 재료 물성, 형상계수, 슬립시작위치, 수직하중 및 전단하중의 함수로 구하였다.

II. 고무 블록의 마찰 거동 해석

2.1 해석 모델

고무 블록에 대한 마찰 거동을 해석적으로 구하기 위해서는 고무 블록의 변형 형상을 실험적으로 관찰한 후 변위 함수를 수립하고, 에너지 방법을 사용하여 접지압 및 접지면의 slip /stick 분포를 해석한다. 여기서 구한 접지압 및 접지면의 slip/stick 분포는 마찰에너지를 계산하는데 사용된다.

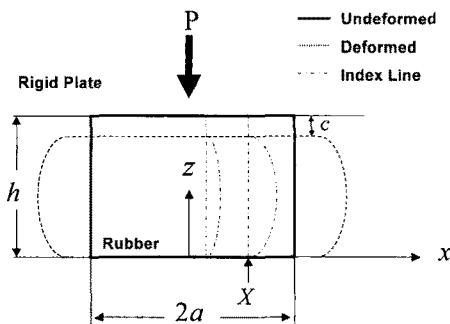


Fig. 1 Analysis model under compressive force

해석 모델은 수직하중이 작용하여 고무 블록이 압축된 후에 전단하중이 작용하는 경우를 고려하였으며 고무 블록과 접지면 사이의 슬립을 고려하였다, 압축하중이 작용하는 경우의 해석에 사용된 모델은 두개의 rigid plate사이에서 수직하중 P가 작용되어 수축량 C가 발생하는 사각형 고무블록으로 X 위치에서 슬립이 발생한 것으로 설정 하였다. 압축하중이 증가함에 고무블록의 측면은 볼록하게 부푸

는 현상이 발행하며, 이러한 변형은 슬립이 발생하지 않은 곳에서 포물선 형태로 곡률이 증가하다가 슬립이 발생한 X 위치부터는 순수전단(pure shear) 형태로 발생하는 것으로 가정하였다.

압축하중이 작용되고 있는 상태에서 전단하중이 작용하는 경우의 해석 모델은 Fig. 2와 같이 수축량 C가 유지되는 상태에서 전단변형이 발생하는 것으로 가정하였으며, 압축하중 작용 시에 발생하였던 슬립 시작위치의 변화는 무시하였다.

합성고무는 일반적으로 비압축성 재료이므로 본 연구에서의 고무 블록 또한 등방성이며 비압축성인 재료로 고려하였다. 접지면의수직압력 변화를 고려하기 위해 유한변형률을 적용하였고, y방향으로 무한히 긴 고무블록을 가정하여 평면변형률 문제로 취급하였다.

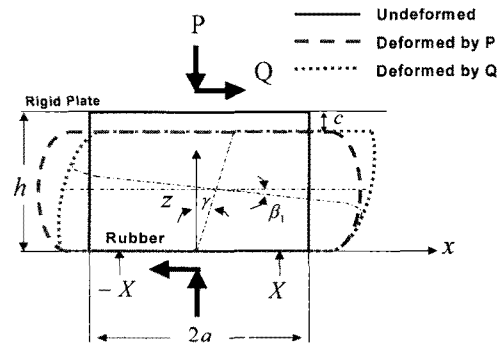


Fig. 2 Analysis model under compressive and shearing force

2.2 변위 함수

x방향의 변위 함수 u와 z 방향의 변위함수 w를 슬립이 발생하지 않는 구간(-X ≤ x ≤ X, 이후 stick구간)과 슬립이 발생하는 구간(-a ≤ x ≤ -X, X ≤ x ≤ a, 이후 slip구간)을 구분하여 가정하였다.

$$u_{st} = \alpha_1 x \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) + \gamma z \quad (-X \leq x \leq X)$$

$$u_{sl} = \alpha_1 X \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) + \gamma z + \alpha_2 (x - X) \quad (-a \leq x \leq -X, X \leq x \leq a)$$

$$w = -\frac{cz}{h} - (\beta_1 x + \frac{\beta_2}{4a^2} x^3) \sin(\frac{\pi z}{h}) \quad (0 \leq z \leq h) \quad (1)$$

여기서 h 는 고무 블록의 높이, c 는 압축하중 P 에 의한 수축량이며 $\alpha_i, \beta_i, \gamma$ 는 미정 계수이다. 고무는 비압축성 재료로 고려되었으므로, 수직하중에 의한 수축량 c 에 의해 감소된 체적과 x 방향으로 늘어난 체적이 같아야 하므로 수축량 c 는 아래와 같이 표현된다.

$$c = \frac{2\beta X h}{a\pi} + \alpha h (1 - \frac{X}{a}) \quad (2)$$

2.3 구성방정식

고무 재료의 응력과 변형율의 관계는 일반적으로 시간과 주파수의 함수로 표현되며 비선형적으로 거동함에도 비례한계를 넘어선 이후에 탄성적인 성질을 유지한다^{(2), (3)}. 따라서 일반적으로 고무 재료의 변형률이 큰 경우에 있어서는 변형률 불변량을 고려한 에너지 함수에 기초하여 Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh 모델 등과 같은 비선형 구성방정식을 사용한 해석을 수행하기도 한다. 그러나 이러한 모델을 직접 본 연구에 적용하기에는 수식화의 효율성이 저하되어 부적합 하였으며, 압축 상태가 주요 관점인 해석에서는 상기 모델에 큰 차이가 나타나지 않으므로, Hooke's Law를 구성방정식으로 적용하였다. Kuhn, Wall 등의 실험에서 고무 재료의 체적 변화는 극히 작아 무시할 수 있는 것으로 알려져 있으며 이 경우 포아송의 비, ν 는 0.5이며, 강성계수와 전단강성계수는 $E = 3G$ 의 관계를 갖게 된다. 따라서 구성방정식은 아래의 식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2G\varepsilon_x + \bar{\sigma} \\ \sigma_z &= 2G\varepsilon_z + \bar{\sigma} \\ \tau_{xz} &= G\gamma_{xz} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 정수압, G 는 트레드 고무의 전단강성 계수이다.

2.4 포텐셜 에너지 최소화 정리

변위 함수의 미정계수를 구하기 위하여 비선형 탄성계에서도 적용이 되는 에너지 방법인 포텐셜 에너지 최소화 정리⁽⁴⁾를 사용하였다. 여기서 총 포텐셜 에너

지, Π 는 식(4)와 같이 내부 변형에너지, U 와 load potential, L_p 의 합으로 구성된다.

$$\Pi = U + L_p \quad (4)$$

고무의 비압축성 ($\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$)을 고려한 변형 에너지 밀도는 다음과 같다.

$$\bar{u} = \frac{1}{2}(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xz} \gamma_{xz}) = G(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\gamma_{xz}^2}{2}) \quad (5)$$

따라서 체적적분을 통해 변형에너지는 다음과 같이 구해진다.

$$U = G \int_a^b \int_0^h (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\gamma_{xz}^2}{2}) dz dx \quad (6)$$

수직하중과 전단하중에 의한 load potential, L_p 는 수직하중과 전단하중에 의한 영향으로 식(7)과 같이 표현되며 굽힘변형 영향의 고려 여부를 비교하였다.

$$L_p = Ph(\frac{X}{a} - 1)\alpha - \frac{2hPX}{a\pi}\beta - Q\gamma h - \frac{1}{2}P\gamma h^2 \quad (7)$$

총 포텐셜에너지, Π 는 $\alpha_i, \beta_i, \gamma$ 에 대해 정류조건을 가지므로 다음 조건식의 연립방정식을 계산하면 미정계수를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \alpha_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha_2} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \beta_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \beta_2} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma} = 0 \quad (8)$$

포텐셜 에너지 최소화 정리를 통하여 구해진 미정계수는 식(9)과 같이 구해지며 $\Lambda_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 는 트레드 고무의 형상과 슬립 시작 위치의 함수로 구성된다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (\frac{P}{aG})\Lambda_1, \quad \alpha_2 = (\frac{P}{aG})\Lambda_2 \\ \beta_1 &= (\frac{Q}{aG})\Lambda_3, \quad \beta_2 = (\frac{Q}{aG})\Lambda_4, \quad \gamma = (\frac{Q}{aG})\Lambda_5 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 압축하중만 작용하는 경우 미정계수는 α_1, α_2 만 남으며 $X = 0, X = a$ 인 경우는 각각 다음의 결과가 얻어진다.

$$\alpha_1 = \left(\frac{p}{2aG}\right) \frac{1}{\pi + \frac{4}{\pi} + \frac{\pi^3}{48} \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \quad (X = a \text{ 일때}) \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \frac{P}{8aG} \quad (X = 0 \text{ 일때}) \quad (11)$$

2.5 접지면에서의 응력 성분

수직하중을 받는 트레드 고무 블록 접지면에서 수직응력의 합은 식(12)와 같이 가해진 수직하중과 같아야 한다.

$$\int_{stick} \sigma_{z,stick} dx + \int_{slip} \sigma_{z,slip} dx = P \quad (12)$$

또한, 슬립 시작 위치인 $x = \pm X$ 에서 slip 구간의 수직응력과 stick 구간의 수직응력이 같다는 조건으로부터 미소변형률을 적용한 경우의 정수압은 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{\sigma} = G \left\{ \frac{4X}{\pi} \alpha_1 + 2\alpha_2 \left(1 - \frac{X}{a}\right) \right\} - \frac{p}{2a} \quad (13)$$

따라서 slip 발생에 따른 접지면($z=0$)에서 미소변형률을 적용한 경우 트레드 고무 블록의 응력은 식(1), (2), (7)을 (3)식에 대입함으로써 다음과 같이 구해진다.

Stick 구간

$$\sigma_{z,stick} = G \left(-\frac{2\pi\beta_1}{h} x - \frac{\pi\beta_b}{2a^2h} x^3 \right) - \frac{P}{2a} \quad (14)$$

$$\tau_{xz,stick} = G \left(\gamma + \frac{\pi\alpha_1}{h} x \right)$$

Slip 구간

$$\sigma_{z,slip} = G \left(-\frac{2\pi\beta_1}{h} x - \frac{\pi\beta_b}{2a^2h} x^3 \right) - \frac{P}{2a} \quad (15)$$

$$\tau_{xz,slip} = G \left(\gamma + \frac{\pi\alpha_1}{h} X \right)$$

위 식을 무차원 계수를 사용하여 다시 표현하면 식(16)과 (17)로 나타낼 수 있다.

Stick 구간

$$q_{stick} = -\sigma_{z,stick} = \sigma_0 + G\pi s(2\beta_1\xi + \beta_b\xi^3) \quad (16)$$

$$\tau_{xz,stick} = \tau_0 + G\pi s\alpha_1\xi$$

Slip 구간

$$q_{slip} = -\sigma_{z,slip} = \sigma_0 + G\pi s(2\beta_1\xi + \beta_b\xi^3) \quad (17)$$

$$\tau_{xz,slip} = \tau_0 + G\pi s\alpha_1 f$$

단, $\sigma_0 = P/(2a)$, $\tau_0 = G\gamma$, $f \equiv \frac{X}{a}$, $s \equiv \frac{a}{h}$, $\xi \equiv \frac{x}{a}$ 으로, f 는 슬립 시작 위치의 무차원량, s 는 형상계수, ξ 는 무차원화 된 x좌표를 나타낸다.

2.6 접지면 응력 분포

Fig. 3은 형상계수 1, 수직하중에 대한 전단하중의 비가 0.5일때, 평균응력으로 무차원화 된 접지압을 무차원화 된 접지폭에 대해 나타낸 그래프로 무차원화 된 슬립시작위치, f 가 0.5, 0.75, 1.0인 경우에 대하여 식(14)와 식(15)로 계산한 결과이다. Fig. 4는 동일한 경우 접지면에서의 전단응력을 계산한 결과를 나타낸 그래프이다.

일정한 형상계수를 갖는 트레드 고무 블록의 경우 접지면의 조건에 따라서 변화하는 슬립 시작 위치에 의하여 접지면적은 넓어지며 이에 따라 접지압이 평균 접지압에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 또한 전단응력의 경우에서도 슬립 시작 위치가 고무 블록의 중심에 가까워질수록 기울기가 감소하는 경향을 보이며 국부적인 슬립이 발생한 구간에서는 일정한 전단응력 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

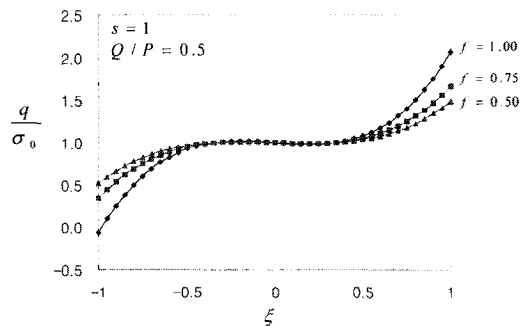


Fig. 3 Contact pressure distribution at $s=1$, $Q/P=0.5$

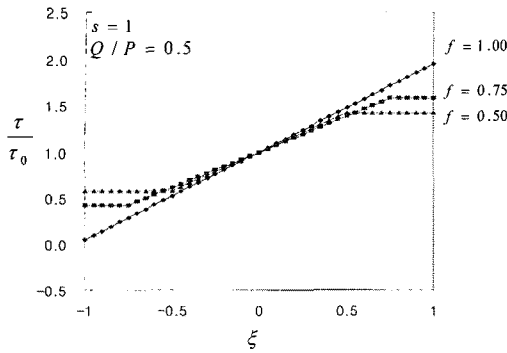


Fig. 4 Sear stress distribution at $s=1$, $Q/P=0.5$

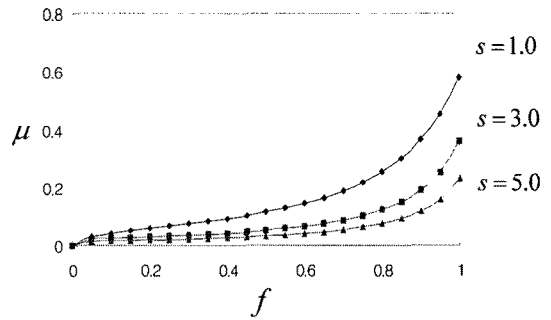


Fig.5 Relationship between slip starting position and friction coefficient with respect to the shape factor

2.7 마찰계수와 슬립시작위치의 관계

고무 블록의 마찰거동을 해석하기 위하여 슬립시작 위치를 변위함수에 도입하였으며 앞에서의 해석 과정을 통해 고무 블록 접지면에서의 접지압과 전단응력을 계산하였다. 따라서 마찰계수를 수직하중에 대한 전단 하중의 비, 또는 수직응력에 대한 전단응력의 비로 정의 하는 경우 마찰계수는 식(18)과 식(19)와 같이 표현될 수 있다. 이는 접지면에서의 국부적 마찰계수를 나타낸다.

$$\mu_{lp} = \frac{\tau_{xz,slip}}{q_{slip}}, \quad (Q=0) \tag{18}$$

$$\mu_{lq} = \frac{\tau_{xz,slip}}{q_{slip}}, \quad (Q \neq 0, \text{ assume } f = f_p = f_q) \tag{19}$$

여기서 μ_{lp} 는 수직하중만 작용하는 경우의 국부 마찰계수이며, μ_{lq} 는 수직 및 전단하중이 작용하는 경우의 국부 마찰계수이다.

수직하중이 작용하는 경우 고무 블록에는 압축력이 작용하므로, 고무 블록 측면의 부풀음 현상과 함께 나타나는 접지면에서의 슬립 시작위치는 접촉하고 있는 면과의 마찰특성에 따라 다르게 나타나는 압축량에 반영되게 되며 그 결과로 슬립시작위치가 결정되므로 슬립 시작위치를 반영하여 마찰계수를 표현하는 것이 가능하다.

Fig. 5는 형상계수에 따른 슬립 시작 위치와 마찰계수와의 관계를 나타낸 그래프이다.

2.8 슬립시작위치에 따른 겔보기강성계수

압축력을 받는 고무를 겔보기 강성계수, E' 는 평균응력에 대한 수직 변형율의 관계이므로 식(20)과 같이 정의 되며, 전단강성계수, 형상계수 및 슬립시작 위치의 무차원량의 함수로 표현된다.

$$E' = \frac{\sigma_0}{\bar{\epsilon}} = \frac{P/2a}{c/h} \tag{20}$$

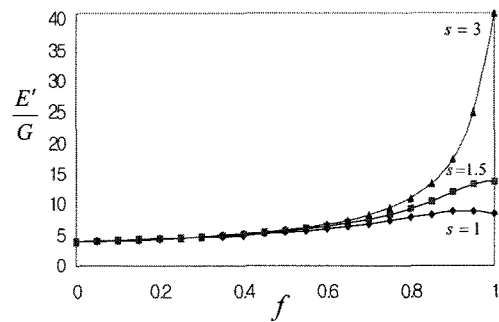


Fig. 6 Variation of normalized apparent modulus with various values of shape factor

Fig. 6은 슬립 시작 위치의 무차원량과 형상계수의 변화가 겔보기 강성계수에 미치는 영향을 나타낸 그래프로 형상계수가 클수록 접지면에서의 슬립 정도에 따라 압축강성의 저하가 크게 나타나며 접지면의 50% 이상 슬립이 발생하는 경우 형상계수의 영향이 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

2.9 임계 마찰계수, μ_{cr}

압축 및 전단하중을 받는 고무 블록은 접지면 조건에 따라 일정한 전단하중 상태를 지나면서 접지부의 끝부분이 들어 올려지는 *detaching* 현상이 나타나거나 혹은 고무 블록 전체가 미끄러지는 *sliding* 현상이 발생하게 된다. 따라서 위의 두 현상의 경계가 되는 마찰계수 값을 임계 마찰계수, μ_{cr} 로 정의하여 지배 인자를 분석하였다. *Detaching* 현상이 발생하는 전단하중은 Fig. 2의 해석모델과 같이 하중이 작용하는 경우, $x = -a$ 에서 접지압, q 가 영이 되는 경우의 전단하중 값으로 정의할 수 있으며, 슬라이딩 현상이 나타나는 경우 접지면의 전단응력의 합은 마찰력과 같게 된다. 여기에서 *detaching* 현상이 일어나는 임계 전단하중과 슬라이딩이 일어나는 임계 전단하중의 값이 같아지는 경우의 마찰계수를 임계 마찰계수로 정의하였으며, 식 (21)과 같이 형상 계수만의 합으로 구해진다.

$$\mu_{cr} = \frac{105 + 90\pi^2 s^2 + 4\pi^4 s^4}{40s(21 + 4\pi^2 s^2)} \quad (21)$$

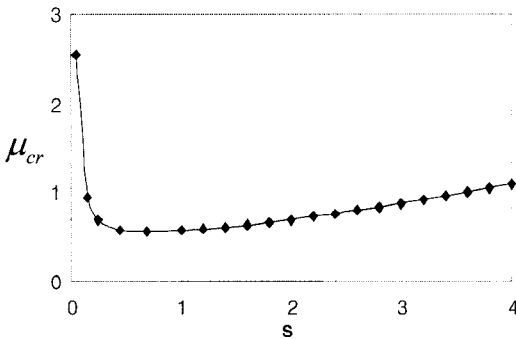


Fig. 7 Critical friction coefficient along the shape factor

Fig. 7에서 보이는 임계 마찰계수 값 이상의 마찰계수를 갖는 경우에는 전단 하중이 증가함에 따라 고무 블록의 후연이 떠오르는 현상이 미끄러지는 현상보다 먼저 나타나며 형상계수가 클수록 미끄러짐 현상이 지배적으로 나타나는 것을 보이고 있다.

2.10 마찰에너지

접지면에서의 국부적인 마찰에너지는 전단응력과 미끄럼 량의 연산으로 표현할 수 있으며 마찰계수를

적용하는 경우에는 수직응력의 항과 미끄럼 량을 도입하여 계산할 수 있다. 이러한 국부적인 마찰에너지의 합은 블록 전체에서 발생하는 마찰에너지가 된다. 아래의 마찰에너지는 고무 블록 전체가 움직이는 미끄럼이 발생하기 전 상태에 대한 것으로, 국부적인 마찰에너지는 슬립 현상이 나타나는 영역에 한정된 값이며 슬립현상이 나타나지 않는 고무 블록의 안쪽에서는 마찰에너지 값은 나타나지 않는다.

$$\text{Friction Energy} = \int (\text{Tangential Stress} \times \text{Sliding Distance})$$

$$\text{여기서, 전단력은 } \tau_{x, slip} = G\pi s\alpha_1 f + G\gamma,$$

$$\text{미끄럼 량은 } d_{slide} = \alpha_2(x - X) \text{이다.}$$

$$\text{Friction Energy} = \int (\mu_c \text{ Contact Stress} \times \text{Sliding Distance})$$

여기서, 접지압은

$$q_{slip} = -\sigma_{z, slip} = \frac{P}{2a} + G\pi s(2\beta_1\xi + \beta_b\xi^3),$$

$$\text{미끄럼 량은 } d_{slide} = \alpha_2(x - X) \text{이다.}$$

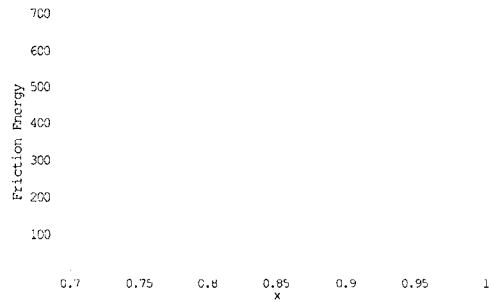


Fig. 8 Frictional energy calculated by shear stress(bold line) and by contact pressure(dashed) at P=3kN, Q=1.16kN, G=2.0MPa, s=0.78, $f = 0.699$

Fig. 8은 수직하중 3kN, 전단하중 1.16kN, 전단강성 계수 값이 2.0 Mpa, 형상계수 0.78 인 고무 블록에서 무차원화 된 슬립 시작위치 0.7 일때 마찰에너지를 계산함에 있어 전단하중을 적용하는 경우와 마찰계수 및 수직하중을 적용하는 경우 차이를 보여준다. 슬립이 발생한 영역에서의 전단응력은 위치에 따라 일정한 값을 갖게 됨에 따라 마찰에너지는 미끄럼 량의 영향에 의해 선형적으로 증가하는 분포를 보이나 마찰계수와 접지압을 적용한 경우는 위치에 대한 고차항으로 나타나며 마찰에너지 값은 전단응력을 적용한 경우보다 작은 것으로 나타났다.

III. 결 론

본 연구에서는 압축력 및 전단 하중을 받는 사각형 고무 블록의 접지 거동 특성에 대하여 해석을 수행하였다. 해석을 위해서 접지면에서의 응력 성분들을 사용하였으며, 도입한 슬립 시작위치와 마찰계수와 관계해석하여 마찰계수를 수직하중, 전단하중, 고무 재료의 전단강성계수, 형상계수 및 슬립 시작위치의 함수로 표현하였다.

또한, 압축력 작용시 고무 블록의 횡방향 팽창으로 인하여 접지면에서는 접지압 및 전단응력의 변화가 발생하지만, 슬립이 발생하는 구간에서는 접지압 및 전단응력의 변화가 없는 것으로 나타났으며 슬립이 발생함에 따라 길보기 강성계수는 감소하며, 형상계수가 클수록 슬립 발생에 따른 길보기 강성 계수 값의 저하가 큰 것을 확인하였다.

본 연구의 해석모델은 접지면 전체가 미끄러지기 시작하기 직전까지를 고려하였으므로 해석모델의 거동 한계를 해석하기 위하여 접지면에서 나타날 수 있는 detaching 및 슬라이딩 현상이 발생하는 임계 전단하중 값을 구하였으며, detaching 현상과 미끄럼 현상의 경계가 되는 임계마찰계수 값을 계산하였다. 이러한 마찰거동으로부터 고무 블록 접지면에서의 마찰에너지는 전단응력과 슬립량의 연산, 혹은 마찰계수를 도입하는 경우 접지압과 슬립량의 연산을 통해 계산하였다. 전자의 경우 마찰에너지는 슬립이 발생한 영역에서 위치에 대한 선형함수 형태로 분포하나 후자의 경우 위치에 대한 고차함수 형태로 분포되고 전단응력을 적용한 경우의 마찰에너지가 보다 큰 값을 갖는 것으로 해석되었다.

본 연구에서는 고무 블록의 형상(가로세로비, 형상계수), 슬립율, 미끄럼 방향, 접지면 형태가 반영된 마찰계수 및 마찰에너지 식을 통해 고무 블록이 마찰거동을 예측할 수 있었고, 고무와 노면사이의 마찰계수에 대한 이론적인 접근이 가능하게 되었다.

본 연구의 결과로 얻어진 마찰 계수와 마찰 에너지 등이 고무 블록의 마찰 거동에 관한 결과들은 고무 제품의 마모 연구에 응용될 수 있을 것이며, 자동차와 항공기 타이어의 브레이킹 성능 연구 및 마모 연구 진행에 기초 연구로서의 가치가 있다고 판단된다. 향후 2차원 해석을 발전시켜 3차원 해석을 진행하고, 이를 실험적으로 검증하여 이론의 완성도를 높여야 할 것이다.

참고문헌

1. Akasaka, T., Kabe, K., Koishi, M. and Kuwashima, M., "Analysis of the Contact Deformation of Tread" *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol.20, No.4, pp. 230-253, 1992.
2. I. M. Ward, "Mechanical Properties of Solid Polymers" Wiley-InterScience. pp. 18-19, 1971.
3. L. R. G. Treloar "The Physics of Rubber Elasticity" Oxford University Press., 3rd Ed. pp.60-68, 1975.
4. M.S. El Naschie, "Stress, Stability and Chaos in Structural Engineering: An Energy Approach" McGraw-Hill, pp.104-111, 1992.
5. D. M. Kim and I. J. Park, "Analysis of Contact Stresses on the Tread Rubber Blocks with Slip", *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol.29 No.4, pp.216-229, 2001.