

# 마찰에너지율을 이용한 타이어 제동거리 예측

전도형\* · 최주형\* · 조진래† · 김기전\*\* · 우종식\*\*

## Braking Distance Estimation using Frictional Energy Rate

Do-Hyung Jeon, Joo-Hyung Choi, Jin-Rae Cho, Gi-Jeon Kim and Jong-Shik Woo

**Key Words:** Braking Distance(제동거리), Finite Element Method(유한요소법), Frictional Energy Rate(마찰에너지율), Slip Ratio(슬립율), Disk Pad(디스크 패드)

### Abstract

This study is concerned with the braking distance estimation using frictional energy rate. First, steady state rolling analysis is performed, and using this result, the braking distance is estimated. Dynamic rolling analysis during entire braking time period is impractical, so that this study divides the vehicle velocity by 10km/h to reduce the analysis time. The multiplication of the slip rate and the shear stress provides the frictional energy rate. Using frictional energy rate, total braking distance is estimated. In addition, ABS(Anti-lock Brake System) is considered, and two type of slip ratios are compared. One is 15% slip ratio for the ABS condition, and the other is 100% slip ratio which leads to the almost same braking distance as the elementary kinematic theory. A slip ratio is controlled by angular velocity in ABAQUS/Explicit. A 15% slip ratio gives the real vehicle's braking distance when the frictional energy occurred at disk pad is included. Disk pad's frictional energy rate is calculated by the theoretical approach.

### 1. 서론

타이어는 자동차와 지면을 연결시켜주는 유일한 장치이며, 또한 마찰력으로 자동차의 구동과 제동을 일으키는 역할을 한다. 지면의 상태는 타이어 상태에 직접적인 영향을 주며, 타이어 자체적으로는 자동차의 안정성과 주행성능면에서 영향을 미친다. 타이어에 문제가 생기면 이는 인명에 직결되는 위험함을 가지고 있기 때문에, 타이어의 강도 증가가 이루어지고 있으며, 또한 주행 중 타이어 펑크시에도 일정속도하에서 주행할 수 있는 타이어가 출시되고 있다. 그리고 이러한 요

구를 만족시키기 위해 타이어는 고무와 섬유재질 및 철심이 들어가는 복합재료로 구성되어 있다.

타이어에서 주행성능에 많은 영향을 미치는 것은 트레드 패턴이며, 사용용도에 맞는 다양한 패턴을 가진 타이어가 출시되고 있다. 그리고 타이어에 관한 연구가 많이 진행되고 있는데 예전의 경우는 패턴의 복잡함으로 인해서, 패턴을 고려하지 않은 단순모델을 사용하였다. 그러나 외국의 유명 타이어 제조업체들의 경우 이미 패턴형상에 관한 모델링 기법이 완성되어 있으며 국내의 경우도 차츰 이러한 모델링 기법이 완성되어 가고 있다.<sup>(1)</sup>

이번 연구에서 다루고자 하는 주요 목적은 타이어 제동거리 예측이다. 이전의 연구<sup>(2)</sup>에서는 단지 정상상태 주행일 경우의 슬립(slip)량을 구한뒤 이를 동역학적 이론으로 구한값을 이용하여 전체 제동거리를 구하였다. 그러나 이러한 방법은 이론을 통해서 이미 값을 구해야 하는 한계를 가지고

† 책임저자, 회원 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* (주)금호타이어 연구소

있다. 따라서 이번 연구에서는 유한요소해석을 통해 타이어 패턴에서의 마찰에너지율을 구한뒤<sup>(3)</sup> 이를 통해서 제동거리를 예측하는 방법을 다룬다.

타이어의 유한요소해석은 기본적으로 비선형해석<sup>(4)</sup>을 기반으로 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 상용유한요소 코드인 ABAQUS/Explicit<sup>(5)</sup>를 사용하였다. 그리고 실제 차량의 제동거리 실험에서는 ABS차량을 이용한다. 이것을 유한요소 해석상에서 구현하기 위해 타이어의 각속도를 이용한다. 또한 디스크 패드에서의 마찰열에너지는 상당하므로 이 값을 이용하여 최종적인 제동거리를 예측해본다. 그리고 본 연구에서는 기초 동역학 이론을 사용하여 구한 값을 기준으로 하였으며 이를 유한요소해석을 통해서 나온 값과 비교하였다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 타이어 모델링

본 연구에서 사용된 타이어는 (주)금호타이어의 205/60R15이다. 제동상태를 정확히 구현하기 위해서는 패턴이 고려된 타이어가 필수적이다. 하지만 이러한 패턴이 결합된 타이어를 직접 모델링 하기가 어려우므로 패턴형상만 따로 모델링하였다. 그 다음 패턴이 없는 형상의 타이어와 패턴형상을 결합시켜 최종 모델링을 완성하였다. Fig. 1은 이러한 방법을 사용하여 완성된 유한요소모델링을 보여주고 있다. 완성된 모델링에서 총 절점수는 56882개, 요소수는 35363개, 요소 type은 solid element, shell element, mass element를 복합적으로 사용하였다.

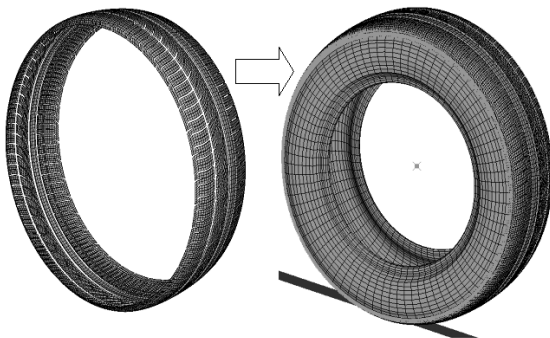


Fig. 1 Finite element modeling

### 2.2 경계조건

타이어의 제동상태를 구현하기 위해서 정상상태 해석은 필수적이다. 먼저 타이어의 내면에 30psi 내압을 부여한 뒤 지면에 축하중을 주어 접지(footprint)과정을 구현해낸다. 그 다음 타이어에 속도를 부여하는데 여기서는 80km/h에서 0km/h까지 속도를 10km/h의 구간으로 나눈 뒤 정상상태의 속도가 나올때까지 해석하였다. 이렇게 속도를 나누어서 해석하게 되면 전체 해석시간을 상당히 줄일 수 있는 효과가 있다. 또한 한번에 전체시간에 대해 해석하게 되면 해석과정동안 심한 변형이 일어나게 되어 해석이 종료되게 될 가능성이 높다. 그러나 이러한 속도구간별 해석을 사용하게 되면 심한 변형이 일어나기 전까지 원하는 해석을 할 수 있는 장점이 있다.

자동차의 제동상태 효과를 구현하기 위해서 먼저 위와 같은 방법으로 속도가 일정하게 나오는 정상상태해석을 수행한다. 그 뒤 실제 자동차처럼 제동을 시키는 과정이 필요하다. 이 때 2가지 방법이 있는데 하나는 휠이 완전히 락(lock)되어 미끄럼 상태가 되는 경우이며, 다른 하나는 슬립이 있으면서 구름마찰상태가 되는 경우이다. 또한 타이어 하나만을 가지고 해석하고 있으므로, 타이어 하나의 상태가 나머지 다른 3개의 타이어의 상태와 같다는 가정이 필요하다. 또한 타이어의 중심에 자동차의 총 중량을 부여함으로써 제동시 전체 자동차의 운동에너지가 타이어의 마찰에너지로 변화할 수 있게 한다. 여기서는 타이어가 1개이므로 실제 마찰에너지 계산시 4배의 값이 필요하다.

### 2.3 슬립율(Slip ratio)

자동차 동역학에서 주로 사용되는 용어중의 하나는 슬립율이다. 슬립율은 차량의 속도와 타이

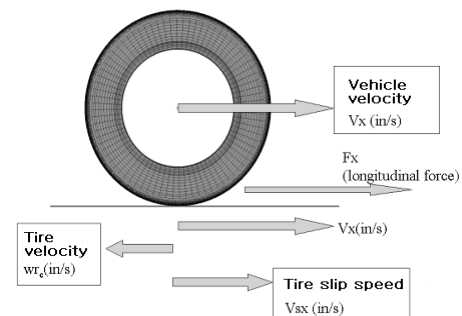


Fig. 2 Slip ratio

어의 속도와의 차이를 나타내는 비율이다. 주행 상태일 경우 타이어의 속도가 자동차의 속도보다 빠르며, 제동상태인 경우에는 자동차의 속도가 타이어의 속도보다 빠르게 된다. 이러한 슬립율에 대해서는 연구자의 정의하에서 여러 가지 종류가 있을 수 있으나 본 연구에서는 SAE에서 정의된 슬립율을 이용한다. Fig. 2는 슬립율에 대한 개념을 나타내주는 그림이다.<sup>(6)</sup>

$$V_{sx} = V_x - wr_e \quad (1)$$

$$s = -\frac{V_{sx}}{V_x} = -\frac{V_x - wr_e}{V_x} \quad (2)$$

여기서  $V_{sx}$ 는 타이어 미끌림 속도이며,  $w$ 는 각속도,  $r_e$ 는 타이어 유효반경이다. 그리고  $V_x$ 는 차량의 속도이며,  $F_x$ 는 종방향 힘(longitudinal force)으로써 운전(driving)시에는 0보다 크며, 제동(braking)시에는 0보다 작은 값을 가진다.

### 2.4 ABS(Anti-lock brake system)

ABS장치를 구현하기 위해서 실제 자동차의 ABS장치에 대한 이해가 필요하다. Fig. 3에서 보듯이 실제 자동차의 경우 페달압력이 마스터 실린더를 지난후 유압호스를 지나서 휠실린더에 도달한다.<sup>(7)</sup> 이 때 휠실린더는 디스크 방식의 브레이크의 경우 양쪽에서 밀어주어 제동을 시킨다. ABS 미장착 차량일 경우 제동시 락되게 되면 차량이 미끄러져 사고의 위험이 있다. 이를 방지하기 위해서 ABS에서는 유압이 높아져 휠이 락되게 될 경우 유압을 낮춤으로써 락을 방지한다. Fig. 4에서 보듯이 일반도로의 경우 슬립율이 15%정도에서 최고의 마찰력을 얻을 수 있다. 이를 이용해서 유한요소해석에서도 정상상태 해석에서 나온 각속도값을 이용하여 실제 슬립율을

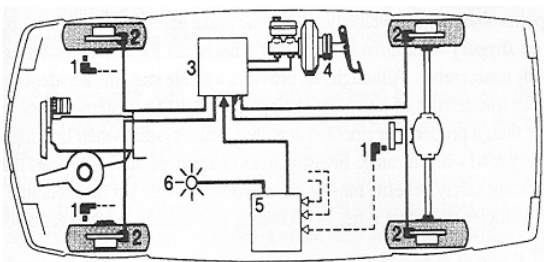


Fig. 3 Structure of the vehicle

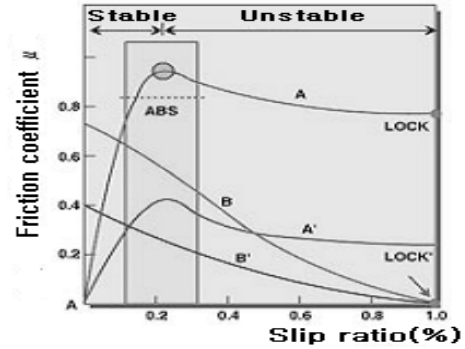


Fig. 4 Correlation of slip ratio and friction coefficient

15%정도가 나오게 맞출 수 있다.

## 3. 해석결과

### 3.1 기초동역학이론

유한요소해석을 통해 나온 값과 비교대상으로 사용하기 위해 기초동역학 이론을 사용한다. 먼저 해석대상은 차량무게가 3638lb<sub>f</sub>이며, 지면과의 마찰계수는 0.8이며 80km/h에서 급제동시라고 가정한 후 해석하였다. 기초동역학 이론을 사용하면 제동시간과 제동거리를 다음과 같은 공식을 통해서 쉽게 구할 수 있다.

$$F = ma = \mu mg \quad (3)$$

$$t = \frac{v}{a} \quad (4)$$

$$S = \frac{V^2}{2a} \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 차량의 질량이며 9.42lb<sub>f</sub>×s<sup>2</sup>/in이다.  $\mu$ 는 마찰계수,  $g$ 는 중력가속도,  $a$ 는 감가속도이다. 그리고  $t$ 는 제동시간,  $V$ 는 초기속도,  $S$ 는 제동거리이다.

위와 같은 공식을 사용하면 제동시간은 2.832초, 제동거리는 1238in의 값을 얻을 수 있다.

### 3.2 마찰에너지

ABAQUS해석결과에서 마찰에너지율을 찾기 위해서 다음과 같은 공식이 사용된다.

$$\dot{E}_f = \sum_{i=1}^n \mu \times F_N \times \dot{\gamma} \quad (6)$$

여기서  $E_f$ 는 마찰에너지율이며,  $n$ 은 접지된 면적에서의 전체 노드 개수이다. 그리고  $F_N$ 은 수직 접촉력(contact normal force)이며  $\dot{\gamma}$ 는 슬립율이다.

해석결과에서 접지된 면적에서의 마찰에너지율을 계산한 값은 ABAQUS에서 제공되는 마찰에너지를 미분한 값과 같다. 따라서 본 연구에서는 마찰에너지를 미분한값을 마찰에너지율로써 선정하였으며 값의 변화가 심하므로 가장 선형적으로 나오는 부분을 미분한 기울기값을 취하였다.

### 3.3 정상상태에서의 마찰에너지

제동상태를 구현하기 위해서 정상상태 해석이 우선된다. 정상상태 해석에서의 마찰에너지가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 속도가 증가함에 따라 마찰에너지가 증가하게 됨을 알 수 있다. 본 연구에서 90, 100km/h까지의 해석을 실시하였는데, 짧은 시간에 속도를 증가시킨 결과 큰 변형이 발생하였다. 따라서 여기서는 90, 100km/h의 값을 이용하지 않고 이러한 문제점에 대해서는 차후에 더 연구되어야 할 것이다.

### 3.4 제동상태에서의 마찰에너지

정상상태에서의 각속도를 이용하여 앞의 슬립율 공식에 맞게 15% 슬립율이 나오는 각속도를 구한다. 그리고 이것을 각속도값으로 사용하여 이 때의 마찰에너지를 구해낸다. Fig. 6에서 제동상태에서의 마찰에너지를 보여주고 있다.

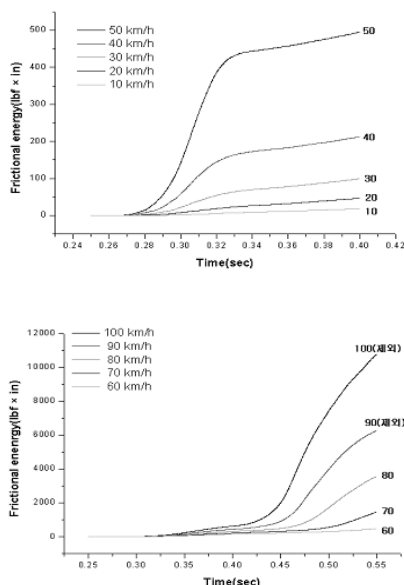


Fig. 5 Frictional energy in the steady state

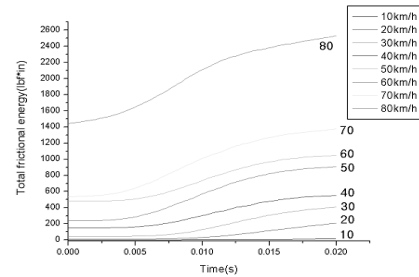


Fig. 6 15% slip ratio's frictional energy in the braking state

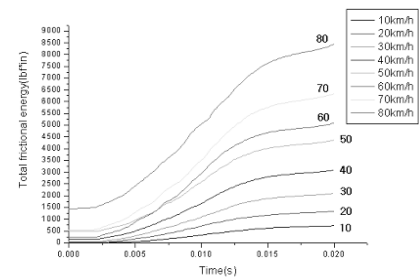


Fig. 7 100% slip ratio's frictional energy in the braking state

Fig. 7에서는 ABS가 구현되지 않고 제동시 완전히 휠이 락되어 미끄럼 마찰이 일어나는 경우의 제동상태 마찰에너지를 나타내고 있다. 미끄럼 마찰인 경우 실제 기초동역학 이론의 값과 거의 일치해야 된다. 왜냐하면 기초동역학 이론은 완전히 미끄럼 마찰이 일어난다고 가정한 후에 계산되는 공식이기 때문이다.

마찰에너지율을 이용해서 속도 구간별로 에너지보존식을 사용하면 제동시간을 구할 수 있다. 따라서 제동시간을 구하게 되면 전체 제동거리도 구할 수 있다. 계산공식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2) = 4E_f \times t \quad (7)$$

$V_2$ 는 초기속도,  $V_1$ 는 나중속도이며  $t$ 는 속도가 감소된 시간이다. 여기서 나온 시간을 이용하여 Fig. 8 (a),(b)에서 보듯이 속도 프로파일을 만들 수 있었으며 이 때의 면적을 구하게 되면 전체 제동거리이다. 그리고 Table 1에서 각각의 경우에 대한 제동거리를 기초동역학 이론값과 비교하였다.

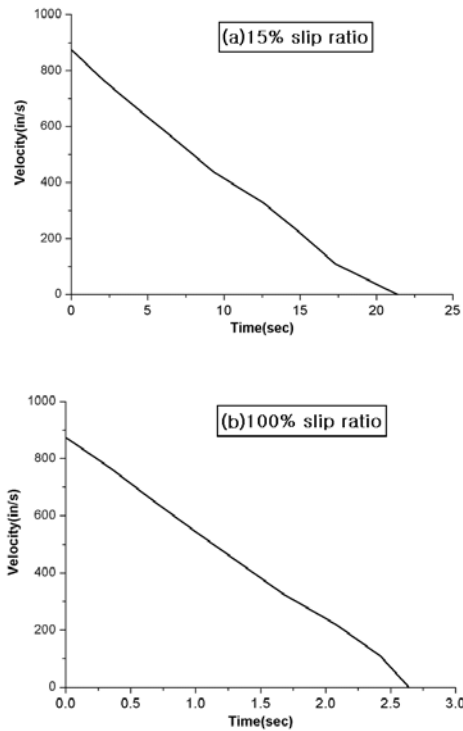


Fig. 8 15%, 100% slip ratio's velocity profile in the braking state

Table 1 Comparison of the braking distance

	Kinematic theory	15% slip ratio	100% slip ratio
Braking distance (in)	1238	8578.6	1183.1
Braking time (sec)	2.832	21.377	2.64

3.5 제동거리 보정

15%슬립율 마찰에너지를 이용한 경우 실제 자동차를 구현한 경우이다. 그러나 이 값은 이론적 동역학 값과 차이가 난다. 이러한 차이가 나는 것은 실제 디스크 패드에서의 마찰열 에너지를 고려하지 않았기 때문이다. 디스크 패드에 작용하는 힘은 휠실린더이다. 본 연구에서는 휠실린더에 걸리는 힘을 30bar라고 가정하였다. 그러나 실제 ABS에서는 슬립율을 유지시키기 위해서 휠실린더의 압력이 변동한다. 본 연구에서는 Fig. 9에서 보듯 단지 80km/h에서 70km/h로 변하는 시간구간  $t_1$ 에서 압력이 증가한후 완전히 제동될때 까지 항상 동일한 압력이 나온다고 가정하였다. 그리고 휠실린더의 압력을 이용하여 디스크 패드

에서의 마찰력을 구한뒤 다시 15%슬립율인 경우의 휠의 속도를 곱해줌으로써 디스크 패드의 마찰열에너지를 구할 수 있다.

$$E_{pad} = 2\mu_p \times FA_d w_s r_p \quad (8)$$

여기서 계수 2는 바퀴 하나당 2개의 휠실린더가 있으므로 사용하였다. 그리고  $\mu_p$ 는 디스크 패드의 마찰계수이며 여기서는 0.4를 사용하였다. P는 휠실린더의 압력,  $A_d$ 는 휠실린더의 면적으로  $3.968in^2$ 을 사용하였다.  $r_p$ 는 휠 중심에서 디스크 패드까지의 거리이며 3.976in을 사용하였다.

Fig. 10은 디스크 패드의 마찰에너지를 15% 슬립율값에 더함으로써 구해낸 제동속도 프로파일이다. 이 때 속도에 따라 다음과 같은 공식을 사용하였다.

$$\frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) = 4(E_{js} + \frac{E_{pad}}{2}) \times t_1 \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) = 4(E_{js} + E_{pad}) \times t \quad (10)$$

(9)식은 80~70km/h에서 사용하며, (10)식은 70~0km/h에서 사용한다. Table 2에서는 기초동역학 이론값과 보정된 제동거리값과의 비교를 나타내었다.

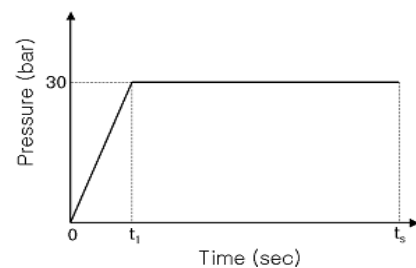


Fig. 9 Assumed braking pressure

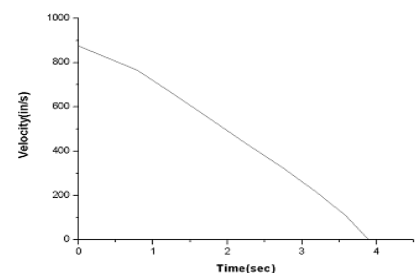


Fig. 10 Corrected braking velocity profile

**Table 2** Correction of the braking distance

	Kinematic theory	Corrected braking distance
Braking distance (in)	1238	1915.7
Braking time (sec)	2.832	3.89

#### 4. 결 론

타이어 제동거리를 예측하기 위해 본 연구에서는 패턴에서의 마찰에너지율을 이용하였다. 또한 정상상태가 아닌 제동상태의 마찰에너지율을 이용하였으며 각속도를 이용하여 ABS장치를 구현할 수 있었다. 그리고, 디스크 패드에서의 마찰열 에너지를 가지고 최종 보정함으로써 비교 대상이 되는 이론적 동역학값에 근접하는 값을 구할 수 있었다.

제동거리를 예측하기 위해서는 타이어 제동상태 유한요소해석이 필수적임을 알 수 있었다. 그리고 이를 위해서 속도구간별 해석을 이용하였다. 속도구간별 해석은 속도 전구간에 대해 한번에 해석하는 것에 비해 오차가 포함되지만, 시간 절약 및 수치에러 감소라는 장점을 가진다.

ABS장치를 구현하기 위해서 각속도를 이용하였다. 실제 ABS장치가 슬립율을 보통 15% 정도로 유지하기 때문에 본 연구에서도 이러한 점을 반영하였다. 그리고 슬립이 있을 경우의 구름마찰의 경우 마찰에너지율이 적기 때문에 이를 적절히 보정할 수 있는 디스크 패드의 마찰에너지율을 이용하였다. 그 결과 이론적 제동거리에 상당히 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 현재 디스크 패드에 압력을 가하는 휠 실린더의 상태를 정확히 구한 것이 아닌 가정에 의한 값이므로 오차가 포함되어 있다. 또한 타이어의 4바퀴가 제동시 처하는 상황이 각기 다를 수 있으므로 이러한 점에 대해서도 다음 연구에서는 고려해야 한다. 그러나 유한요소 해석을 통한 제동거리 해석방법은 타이어 패턴형상, 물성변화등에 대한 값을 제공할 수 있으므로 실질적인 이용가치가 높다. 따라서 유한요소해석을 통한 제동거리 예측방법은 타이어의 제동관련 성능 개선에 대한 방향제시 및 제동시 변화되는 타이어의 특성에 관한 정보를 제공하는 장점이 있다는 것을 알 수

있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대 핵심 환경기술 개발사업지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Jin-Rae Cho, Gi-Hwan Kim, Sang-il Hong, 2003, "3-D Finite Element Mesh Generation of Tires Considering Detailed Tread Pattern", *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, No. 10, pp. 1615~1622.
- (2) Joo-Hyung Choi, Do-Hyung Jeon, Jin-Rae Cho, Gi-Jeon Kim and Jong-Shik Woo, 2003, "A Study on Braking Distance Estimation of Patterned Automobile Tire", *Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting*, pp. 51~56.
- (3) Dong-Jin Lee, Seung-Woo Nam, Hyun-Yong Jeong, Yong-Hee Kim, 2001, "A Study on the Frictional Energy and Contact Forces of Tires by Using a New Friction Model", *Proceedings of the KSAE 2001 Spring Annual Meeting*, pp. 507~513.
- (4) K.J. Bathe, 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall International Editions, New Jersey.
- (5) ABAQUS User's Manual, 2002, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc., Version 6.3.
- (6) Hans B. Pacejka, 2002, *Tire and Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (7) Rudolf Limpert, 1999, *Brake Design and Safety*, 2nd Edition, Society of Automotive Engineers, Inc.