

## 건조한 노면에서 Non-ABS 차량의 제동시점 속도계산 방법

김기남<sup>1)</sup> · 옥진규<sup>2)</sup> · 김민석<sup>2)</sup> · 문원길<sup>2)</sup> · 박수진<sup>3)</sup> · 유완석<sup>\*4)</sup>

K&K 자동차충돌공학기술<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계설계공학과<sup>2)</sup> · 국방기술품질원<sup>3)</sup> · 부산대학교 기계공학부<sup>4)</sup>

### Calculation of Brake Onset Velocity for Non-ABS Vehicle on Dry Asphalt Pavement

Keenam Kim<sup>1)</sup> · Jinkyu Ok<sup>2)</sup> · Minseok Kim<sup>2)</sup> · Wonkil Mun<sup>2)</sup> · Sujin Park<sup>3)</sup> · Wansuk Yoo<sup>\*4)</sup>

<sup>1)</sup>K&K Automobile Crash Engineering Technology, 96-26 Sinseol-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-811, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>3)</sup>Defense Agency for Technology and Quality, Changwon PO Box 24, Changwon-si, Gyeongnam 641-600, Korea

<sup>4)</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 19 July 2006 / Accepted 9 October 2006)

**Abstract** : Skid mark and coefficient of friction are usually utilized to calculate the velocity and behavior of vehicles. For a critical case such as traffic accident reconstruction, however, the initial velocity of the car should be calculated precisely. In this study, the skid marks on dry asphalt pavement were measured, and the velocity at brake onset was precisely recovered. A passenger car with new tires and non-contact optical speedometer were set up for the tests. A new methodology to determine the more precise velocity for Non-ABS vehicle at braking onset were suggested.

**Key words** : Coefficient of friction(마찰계수), Tire(타이어), Dry asphalt pavement(건조 아스팔트 포장노면), Skid mark(스키드마크), Vehicle velocity(차량속도), ABS(브레이크 잠김 방지 장치)

### 1. 서 론

도로상을 주행하는 차량 운전자들은 위험을 인지하면 충돌을 피하거나 충격력을 완화하기 위해서 조향조작과 함께 브레이크 페달을 강하게 밟게 되며, 노면에는 타이어자국이 생겨나게 된다. 직선으로 발생된 타이어자국을 스키드마크(skid mark)라 하고, 곡선의 타이어자국을 요마크(yaw mark)라 한다.

교통사고 조사 시 스키드마크가 있으면, 차량의 속도는 스키드마크 길이와 타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰계수(coefficient of friction)를 적용하여 계산하고 있다. 그러나 스키드마크가 선명하

게 나타나지 않을 경우에는 길이를 측정하는데 큰 오차가 발생할 가능성이 많다. 운전자가 위험을 인지하고 근육이 반응하여 브레이크 페달을 밟을 때, 스키드마크는 브레이크 페달을 밟은 지점에서 곧바로 발생되지 않고 일정거리를 진행한 다음 발생된다. 따라서, 교통사고 분석에서 차량의 과속 판단 기준은 스키드마크 시작지점이 아닌 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 시점의 속도로 계산되어야 한다.

만약, 수사기관이나 교통사고를 조사하는 사람들이 브레이크 페달을 밟은 지점에서 바퀴가 고착된 지점까지 속도가 감속되지 않는 것으로 가정하고 스키드마크 시작지점의 속도를 브레이크 페달을 최초 밟은 지점의 속도로 적용한다면 많은 운전자

\*Corresponding author, E-mail: wsyoo@pusan.ac.kr

들이 과속 부분에 대해서는 무혐의 처분을 받거나 억울한 피해자들이 많이 양산하게 된다. 따라서 교통사고 조사자가 스키드마크의 길이와 마찰계수만으로 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도를 계산할 수 있는 새로운 방법이 필요하다.

타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰계수는 타이어 특성과 노면상태에 영향을 받는다. 브레이크 페달을 최초 밟은 시점에서 스키드마크 시작지점까지 감속도는 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도와 차량의 제동능력에 영향을 받는다. 차량의 제동능력은 운전자가 브레이크 페달을 밟는 힘과 브레이크 페달을 밟은 지점에서 바퀴가 고착될 때까지 노면의 마찰계수와 관련 있다. 일부 기관의 조사에서 젖은 아스팔트 포장 노면의 마찰계수가 0.46~0.88, 건조한 노면은 0.56~1.20까지 나타내고 있다.<sup>1)</sup>

Overgaard<sup>2)</sup>는 브레이크 페달을 밟은 지점에서 정지한 지점까지 전체 구간의 마찰계수 및 가속도를 적용하여 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도를 구하는 연구를 하였다. 그의 연구는 운전자가 브레이크 페달을 밟은 지점을 정확히 알 수 없는 일반적인 교통사고에서는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 실험속도가 10~55km/h로 도로상에서 발생하는 대부분의 심각한 교통사고가 발생하는 속도보다 매우 낮아 실제 사고분석에 적용하기 어려운 점이 있다.

Heinrichs<sup>3)</sup>는 타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰계수를 측정하고 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도를 구하기 위해 공주거리를 적용하였다. 그러나, 사고차량의 속도를 알지 못한 상태에서는 공주거리를 구할 수가 없으며, 브레이크 유압장치의 마찰을 감소하기 위해 제동장치를 개조하였으므로 연구결과를 일반차량에 적용하기에는 무리가 있다. 또한, 스키드마크 측정방법과 속도계산에 필요한 정확한 기준을 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 바퀴가 고착되는 지점까지 차량의 감속도를 측정하여 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점의 속도를 계산할 수 있는 새로운 방법을 제안하였으며, 노면 마찰계수 측정에 관한 실험을 하였지만, 속도계산에 적용한 마찰계수는 다른 연구 기관

의 측정 자료를 적용하였다. 운전자가 브레이크 페달을 밟은 지점에서 바퀴가 완전히 고착되는 지점까지 시간과 진행거리를 측정하기 위해 앞바퀴에 바퀴 회전속도를 측정할 수 있는 센서를 장착하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 실험차량

실험차량은 국내에서 제작된 배기량 2,000cc 자동변속기가 장착된 중형급 차종을 사용하였고, 변속기어가 들어간 상태에서 브레이크 페달을 밟았다. ABS(Anti-lock Brake System)가 장착된 차량은 바퀴가 완전히 고착되지 않으므로 노면에 육안으로 확인 가능한 스키드마크가 발생되지 않아 제동거리를 측정할 수 없기 때문에 실험차량은 Non-ABS 차량으로 선정하였다. 기계적인 장치를 이용하여 브레이크 페달에 균일한 압력을 가할 수 있지만, 실제 운행조건을 반영하기 위해서 체중 80kg의 성인 남자가 브레이크 페달을 빠르고 강하게 밟도록 하였다. 실험차량에는 운전자 1인과 동승자 1인이 승차하였으며, 탑재된 장비를 포함하여 차량중량은 약 160kg 증가되었다.

#### 2.1.2 타이어

신품 타이어를 실험차량에 장착하여 타이어의 코팅을 벗겨내기 위해서 시내와 시외 도로를 약 100km 주행한 다음 실험을 실시하였다. 타이어는 국내에서 제작된 것을 사용하였고, 형식은 205/60R15 91H이다. 공기압은 표시된 표준 규정압력(240 KPa)을 적용하였다.

#### 2.1.3 속도센서

“자동차안전기준에관한규칙”에서 차량의 속도는 -10%, +15%를 허용하고 있고, 실제 차량의 속도와 속도계 지침이 지시하는 속도가 일치하지 않는 경우가 많다. 본 연구에서는 실험차량의 속도를 정확하게 측정하기 위해서 비접촉 광학식 속도센서를 사용하였고, Fig. 1과 Table 1에서는 각각 차량에 장착된 모습과 주요 사양을 표기하였다.



Fig. 1 Non-contact optical sensor, speedometer



Fig. 2 Attachment of wheel rotation speed sensor

Table 1 The specification of speedometer

Item	Specification
Speed range	0.5 to 400km/h
Braking / Coasting	to 0.1km/h
Measuring deviation	< ±0.1%
Working range of the sensor	300±60mm
Analog output	25mV / km/h

Table 2 Specification of wheel rotation speed sensor

Item	Specification
Resolution	600pulse/rev
Output phase	A, B, Z
Response speed	1μs
Maximum response frequency	180KHz
Supply voltage	12-24V DC ±5%

### 2.1.4 바퀴 회전속도 측정센서

운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 바퀴가 회전하지 않고 고착된 지점까지 진행거리와 시간을 측정하기 위해 바퀴 회전속도 측정센서를 제작하여 차량에 장착하였다. 승용차량은 급제동시 차체 앞쪽이 아래쪽으로 내려가는 노즈다운(nose down) 현상으로 대부분 앞바퀴에서만 스키드마크가 발생되므로 Fig. 2와 같이 바퀴 회전속도 측정센서를 우측 앞바퀴에 부착하였으며, Table 2에 주요 사양을 나타내었다.

## 2.2 노면 상태

실험한 노면은 Fig. 3과 같은 종방향으로 수평한 아스팔트 포장노면이며, 브레이크 페달을 밟은 지점의 노면 상태와 주행한 방향에 따라 스키드마크 길이가 다르게 발생될 수 있으므로 본 연구에서는 동일한 실험속도에서는 스키드마크가 겹치지 않도록 주의하며 동일한 지점에서 시행하였다.

## 2.3 실험속도와 제동방법

속도 변화에 따른 마찰계수와 브레이크 페달을



Fig. 3 Dry asphalt pavement road for vehicle test

밟은 지점에서 바퀴가 고착될 때까지 진행거리를 확인하기 위해 실험차량의 속도를 40km/h, 60km/h, 80km/h, 100km/h에서 각각 시행하였다.

40km/h 이하의 속도는 노면 굴곡상태, 바퀴가 고착되는데 소요되는 시간, 노즈다운과 완충장치의 영향에 따라 마찰계수의 변화가 많으므로 시행하지 않았다. 차량의 속도가 가속과 감속되는 과정에서 브레이크 페달을 밟으면 스키드마크의 길이가 다르게 발생될 수 있으므로 브레이크 페달을 밟기 전에

차량의 속도를 일정하게 유지하였다. 브레이크 페달을 밟은 지점에서 바퀴가 고착된 지점까지 거리와 스키드마크 길이는 바퀴 회전속도 측정센서가 설치된 우측 바퀴에 의해 발생한 것과 센서에 기록된 자료를 사용하였다. 운전자는 속도센서에 나타난 속도를 보고 급제동조치를 취하였으며 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도는 속도센서에 기록된 속도를 사용하였다.

### 3. 속도변화와 속도계산 방법

#### 3.1 속도 추정법

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 브레이크 작동시점의 속도  $v_A$ , 스키드마크 발생지점의 속도  $v_B$ , 차량의 정지속도를  $v_C$  라 하고, 구간  $AB$ 와 구간  $BC$ 에서의 마찰계수와 거리를 각각  $\mu_{AB}, s_{AB}, \mu_{BC}, s_{BC}$ 라 두고, 중력가속도를  $g$ 라 하면, 각 속도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$v_B^2 - v_A^2 = -2 \mu_{AB} g s_{AB} \tag{1}$$

$$v_C^2 - v_B^2 = -2 \mu_{BC} g s_{BC} \tag{2}$$

$$v_B = \sqrt{v_C^2 + 2 \mu_{BC} g s_{BC}} \tag{3}$$

$$v_A = \sqrt{v_B^2 + 2 \mu_{AB} g s_{AB}} \tag{4}$$

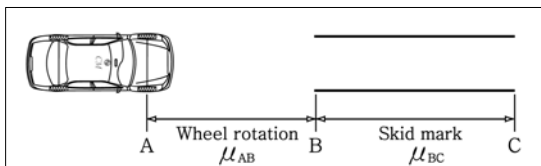


Fig. 4 Brake pedal onset position to stop location

#### 3.2 노면에 발생한 스키드마크 특성

본 연구에서 80km/h와 100km/h의 속도에서 바퀴가 고착되기 전에도 스키드마크가 희미하게 발생된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 80km/h의 속도에서 급제동조치를 취하여 발생한 스키드마크이다. A는 스키드마크가 희미하게 시작된 지점, B는 바퀴가 고착된 지점, C는 실험차량이 정지된 지점이다.

80km/h 이상의 속도에서 브레이크 페달을 밟았

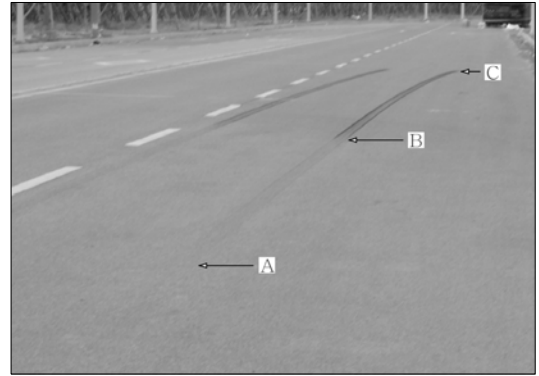


Fig. 5 Skid mark according to skid test

을 때 바퀴가 고착되기 전 지점부터 스키드마크가 희미하게 발생된 이유는 차체의 진행하는 속도와 바퀴의 원주 속도 차이 때문으로 판단된다.

#### 3.3 속도변화

Fig. 6에 건조한 노면의 경우 약 102km/h의 속도에 대한 브레이크 페달을 밟은 지점, 바퀴가 고착된 지점, 정지한 지점을 나타내었다. 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 정지한 지점까지 속도는 선형적으로 감소하고, 바퀴가 고착되기 전과 후에 마찰계수는 크게 변화가 없는 것으로 나타났다.

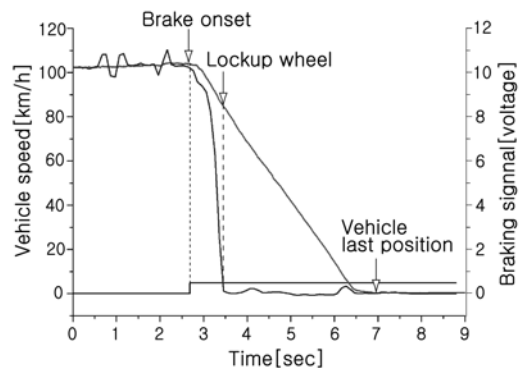


Fig. 6 Speed change from brake onset to stop

#### 3.4 바퀴가 고착될 때까지 속도변화

Table 3에 실험속도, 바퀴가 고착될 때 속도와 소요된 시간, 스키드마크 길이와 정지거리, 스키드마크 구간의 마찰계수를 표시하였다. 40km/h 속도 범위에서는 약 70%의 속도가 감속된 상태로 바퀴가

Table 3 Measured data on dry pavement with wheel rotation speed sensor

Test	Test speed [km/h]	Lockup speed [km/h]	Time to lockup [s]	Lockup to stop distance [m]	Total length [m]	$\mu_{BC}$
1	41.9	27.80	0.634	3.41	9.83	0.892
2	44.1	32.26	0.526	4.84	10.65	0.845
3	43.8	31.99	0.548	4.68	10.73	0.861
4	59.6	44.43	0.654	9.50	19.25	0.818
5	61.4	47.86	0.634	10.97	21.01	0.822
6	81.0	64.45	0.763	20.78	36.66	0.787
7	82.2	66.55	0.665	22.73	36.80	0.767
8	102.0	82.40	0.801	33.93	54.89	0.801
9	103.8	84.55	0.778	35.89	56.72	0.778
10	103.3	83.45	0.866	31.73	54.90	0.866

고착되었고, 60km/h에서는 76%, 80km/h는 84%, 100km/h는 82% 정도로 나타났다. 40~60km/h 속도 범위에서 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 바퀴가 고착된 지점까지의 감속도는 약  $5.9\text{m/s}^2$ 이며, 80~100km/h에서는 약  $6.3\text{m/s}^2$ 로 나타났다.

바퀴가 고착된 지점에서 정지한 지점까지 스키드마크 발생 구간에서 마찰계수 범위는 약 0.77~0.89 이고, 저속에서 마찰계수는 고속보다 조금 높은 것으로 나타났다. 80km/h의 속도 범위에서 마찰계수가 100km/h보다 낮은 이유는 앞바퀴에 장착된 바퀴 회전속도를 0.1초 단위로 측정하였기 때문에 제동 거리가 다소 길게 나타난 이유로 판단된다.

Fig. 7에서 브레이크 페달을 최초 밟은 시점의 속도, 바퀴가 고착된 시점의 속도, 바퀴가 고착되는데 소요된 시간을 실험 속도별로 비교하였다. 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 바퀴가 고착될 때까지 감속도는 저속과 고속에서 거의 비슷한 것으로 나타났지만(저속  $5.9\text{m/s}^2$ , 고속 약  $6.3\text{m/s}^2$ ), 시간은 저속보다 고속에서 많이 소요되는 것으로 나타났다.

### 3.5 브레이크 페달 밟은 지점의 속도 계산

브레이크 페달을 최초 밟은 시점과 바퀴가 고착되는 시점의 속도를 Fig. 8에 나타내었다. 각 속도별로 구해진 자료를 바탕으로 브레이크 페달을 밟은 지점의 속도계산을 위한 수학적인 관계식을 유도하면 식 (5)와 같다.

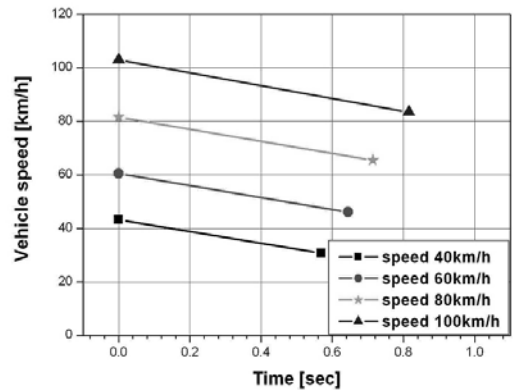


Fig. 7 Brake onset speed and lockup speed

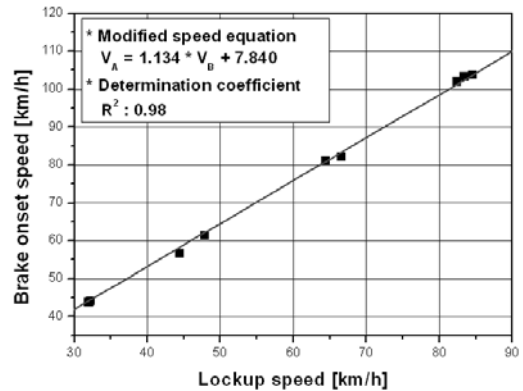


Fig. 8 Brake onset speed vs. Lockup speed

$$v_A = (1.134 \times v_B) + 7.84 \quad (5)$$

스키드마크 길이와 마찰계수로부터 계산된 스키드마크 시작지점의 속도  $v_B$ 는 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟았을 때의 실제 속도  $v_A$ 보다 훨씬 낮게 나타났다.

예를 들어 건조한 아스팔트 포장노면에서 측정된 스키드마크 길이( $s_{BC}$ ) 25m와 스키드마크 발생 구간의 마찰계수( $\mu_{BC}$ ) 0.8을 식 (3)에 대입하면 스키드마크 시작지점( $v_B$ )의 속도는 약 71.3km/h이며, 스키드마크 시작지점( $v_B$ )의 속도를 식 (5)에 대입하면 브레이크 페달을 최초 밟은 지점의 속도( $v_A$ )는 약 88.4km/h이다. 본 연구에서 제안한 식 (5)을 이용하면 스키드마크 시작지점의 속도가 아닌 운전자가 브레이크 페달을 밟은 시점의 속도를 계산할 수 있다. 타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰계수는 차

중, 타이어 마모 정도, 포장노면 상태 등에 따라 차이가 있으므로 기존의 연구 자료를 참조하여 스키드마크 시작지점의 속도를 계산하면 될 것으로 판단된다.

### 3.6 스키드마크 길이 측정방법

스키드마크는 바퀴가 고착되는 순간에 발생하는 것으로 알고 있지만, 80km/h 이상의 속도에서는 바퀴가 고착되기 전에도 스키드마크가 희미하게 발생되었으므로 교통사고 현장에서 스키드마크 시작지점을 정확하게 결정하는 것은 매우 어렵다고 판단된다.

60km/h 이하의 속도에서는 바퀴가 고착된 지점과 스키드마크 시작지점을 명확하게 구분할 수 없지만 80km/h 이상의 속도에서는 바퀴가 고착된 지점과 스키드마크 시작지점을 명확하게 구분할 수 있었다. 80km/h 이하의 속도에서는 확인 가능한 지점을 시작지점으로 설정하면 되고, 80km/h 이상의 속도에서는 바퀴가 고착된 지점을 스키드마크 시작지점으로 결정하면 된다. 80km/h 이상의 속도에서 희미하게 발생된 지점을 시작지점으로 결정하면 실제 차량의 속도보다 높게 계산될 수 있다.

브레이크 페달을 밟은 지점에서 바퀴가 고착된 지점까지 소요된 시간은 다른 연구들보다 다소 긴 것으로 나타났는데, 이는 실험용 차량이 제동장치를 개조하지 않은 일반차량을 사용하였기 때문으로 판단된다.

## 4. 결론

지금까지 교통사고 조사와 분석에서 차량의 속도를 계산하는데 사용한 식은 스키드마크 시작지점의 속도를 계산하고 있었다. 과속의 판단이 되는 시점인 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점의 속도를 알아내기 위하여, 본 연구에서 새로운 방법을 제안하였으며, 스키드마크 길이와 마찰계수만으로

Non-ABS 차량의 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 시점의 속도가 계산될 수 있도록 하였다.

운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점에서 정지한 지점까지 속도 감속량은 모든 속도구간에서 거의 비슷하였으며, 바퀴가 고착되는 순간에도 마찰은 큰 변화가 없었다.

본 연구에서 제안한 방법을 고려하면, 건조한 아스팔트 포장노면에 발생된 스키드마크로 Non-ABS 차량의 운전자가 브레이크 페달을 최초 밟은 지점의 속도를 계산할 수 있어, 교통사고를 조사하고 분석하는데 있어서 본 연구 결과가 도움이 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 M10400000274-05000027410) 및 교육부의 BK21 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## References

- 1) L. B. Fricke, "Traffic Accident Reconstruction," Vol. 2, Northwestern University Traffic Institute, 1990.
- 2) R. Overgaard, "Relationships between Pre-Skidding and Pre-braking Speed," SAE 2001-01-1281, 2001.
- 3) B. E. Heinrichs, "Vehicle Speed Affects Both Pre-skid Braking Kinematics and Average Tire/Roadway Friction," Accident Analysis and Prevention 36, 829-840, 2004.
- 4) D. W. Goudie, "Tire Friction During Locked Wheel Braking," SAE 2000-01-1314, 2000.
- 5) S. U. Park and I. H. Han, "Braking and Skidding Dynamics, and Inverse Analysis for Vehicle Accident Reconstruction," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.189-202, 1999.