

## 제동 직전 자동차 주행 속도 추정에 관한 연구

한 창 평<sup>1)</sup> · 박 경 석<sup>2)</sup> · 최 명 진<sup>\*2)</sup>

경희대학교 대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 경희대학교 테크노공학대학<sup>2)</sup>

### An Estimate of Vehicle Velocity of Braking Starting Point

Chang Pyoung Han<sup>1)</sup> · Kyoung Suk Park<sup>2)</sup> · Myung Jin Choi<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyung Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

<sup>2)</sup>College of Advanced Technology and Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

(Received 7 March 2007 / Accepted 4 May 2007)

**Abstract** : The transient brake time or distance is one of very important factors to guess the vehicle speed to inspect an automobile accident. But, it is usual that the vehicle speed is estimated by using only skid mark without considering the transient brake distance. Deceleration and the friction coefficients of tire and road surface play an important role in calculating the brake distance. In this paper, a scheme is presented to estimate more accurate automobile speed. The scheme contains the effect of the transient brake distance on the speed. Experiment was carried out on the asphalt, unpacked road to get relationships between the speeds and the skid mark distances, and to get the transient brake time. The experimental results were utilized to construct the equation to approximate more realistic vehicle speeds.

**Key words** : Transient brake distance(과도제동거리), Friction coefficient of tire and road(타이어와 도로의 마찰계수), Skid mark(활주흔적), Automobile accident(자동차 사고), Estimated automobile speed(추정자동차속력)

### 1. 서 론

차량 성능 향상 및 도로환경이 개선됨에도 불구하고 자동차 사고는 갈수록 대형화되고 있다. 시거는 전방에 있는 장애물 또는 위험요소를 인지하고 제동을 걸러 정지하거나 장애물을 피해서 주행할 수 있는 요소로서 도로의 기하학적 설계에 영향을 준다. 특히 정지시거는 도로의 종단선형이나 평면선형을 설계하는데 중요하다.<sup>1-3)</sup> 이러한 설계의 기준이 되는 시거를 산출하기 위해서는 노면마찰계수가 중요한 역할을 한다. 타이어와 노면마찰계수는 적정 황색신호 시간을 결정하는데 필요하며, 특히 자동차사고의 원인해석 및 재현에 필수적이다.

마찰계수는 타이어의 종류 및 타이어의 트레드

마모상태, 주행속도, 브레이크 작동 조건 등의 여러 변수에 따라 달라진다.<sup>4-6)</sup> 현재 국내에서는 미국에서 사용 중인 마찰계수를 적용하고 있으며, 우리 현실에 적합하지 않다고 지적되고 있다. 이러한 마찰계수는 차량의 주행 속도를 추정하는 데에 매우 중요한 인자이다.

차량의 속도는 운동량 보존의 법칙, 사고재현 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램, 제동상태에 따른 스키드마크를 근거한 에너지 보존법칙, 핸들조작에 의한 요-마크(yaw mark)응용 방식, 차체 손상깊이에 따른 충돌유효속도추정, 추락속도, 전복속도 등을 고려하여 추정하여야 한다.<sup>8)</sup> 그러나 우리 현실은 육안으로 확인되는 스키드 마크의 길이만 가지고 속도를 추정하고 있다. 스키드마크에 의한 속도추정 방법에서 있어서 도로조건, 제동상태 등을 고려하

\*Corresponding author, E-mail: mjchoi@khu.ac.kr

여 주행 속도를 추정하고 있으나 현실에 적합하지 않아, 제동감속이 시작되어 육안으로 식별되기 전까지의 손실 에너지 부분을 보정한 속도추정 방식에 대해 많은 연구가 수행되었다.<sup>9,10)</sup>

본 연구에서는 실차 주행시 우리 현실에 적합한 도로와 타이어의 상태, 도로 구배, 제동 순시간 등을 고려한 측정 데이터로부터 노면과 타이어간의 마찰 계수를 해석하였다.

## 2. 제동이론

### 2.1 활주흔적에 의한 주행속도 추정

주행중인 자동차는 제동감속을 하지 않더라도 가속페달에서 발을 떼면 공기저항과 구름저항에 의하여 일부 감속된다. 제동 급감속을 하는 경우 최소정지거리를 얻기 위해 최대 감속도를 사용한다.

Fig. 1은 평편한 직선구간에서 자동차가 정지할 때, 직선구간에서의 제동전위치부터 최종정지거리를 나타내고 있으며 식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$x_f - x_i = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2a} \quad (1)$$

$x, v$ 는 각각 위치 또는 변위와 속도이며,  $a$ 는 가속도이다. 아래첨자  $f$ 와  $i$ 는 최종상태와 초기상태를 나타낸다.  $f$ 와  $i$ 는 최종상태와 초기상태는 Fig. 1에서  $t_r$ 와  $t_s$ 와 같다. 위 식 (1)은 지표면과 수평한 방향에 관한 것이며, 지표면에 수직인 방향은 자동차의 중량과 수직항력에 의해 도로의 경사도에 따라 균형을 이루게 된다. 자동차가 도로를 주행 시 운동방정식은 마찰력과 도로 경사도를 고려하여, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-W\sin\alpha - \mu W\cos\alpha = \left(\frac{W}{g}\right)a \quad (2)$$

여기에서  $W$ 는 자동차의 중량,  $\mu$ 는 도로면과 타이어의 마찰계수,  $\alpha$ 는 도로의 경사도,  $a$ 는 가속도, 즉, 자동차의 감속도를 나타낸다.

지표방향 제동거리  $d$ 는 수평방향을 기준으로 하면 다음과 같다.

$$d = x\cos\alpha \quad (3)$$

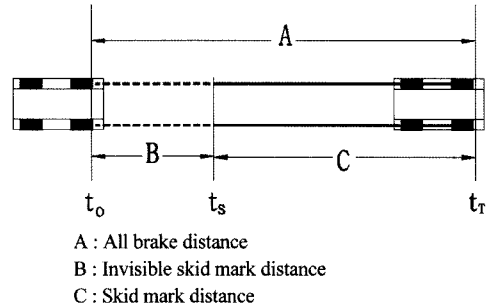


Fig. 1 The behavior of vehicle movement on breaking

가속도가 일정하다고 가정할 경우, 가속도  $a$ 는

$$a = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2(x_f - x_i)} = (v_f^2 - v_i^2) \frac{\cos\alpha}{2d} \quad (4)$$

따라서 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{W}{g}(v_f^2 - v_i^2) \frac{\cos\alpha}{2d} + W\mu\cos\alpha + W\sin\alpha &= 0 \\ \frac{v_f^2 - v_i^2}{2gd} + \mu + \tan\alpha &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\tan\alpha$ 는 도로의 구배이므로 구배를  $G$ 로 나타내면 제동거리  $d$ (m)는 다음 식 (8)과 같다.

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2g(\mu \pm G)} \quad (6)$$

$G : \pm \tan\alpha$  (종단구배/100)

$g$  : 중력가속도

즉,

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{254(\mu \pm G)} \quad (7)$$

육안으로 식별되는 Fig. 1의  $t_s$  구간부터 발생한 활주흔적(skid mark)로부터 실측된 제동직전 주행 속도 추정식은 다음 식 (8)과 같다.<sup>7)</sup>

$$V = \sqrt{254 \times (\mu \pm G) \times d} \quad (8)$$

$V$  : 주행속도(km/h)

### 2.2 제동직전 시간을 고려한 주행속도 추정

우리 현실에서는 육안으로 식별되는 타이어 활주흔적(skid mark)과 도로 구배 인자를 가지고 제동직전 속도를 추정하고 있고, 육안으로 식별되는 활주

혼적 구간은 Fig. 1의 C구간이다. Fig. 1의 B구간은 브레이크 페달을 밟는 순간부터 바뀌가 완전히 고정되기 전까지 회전하며 희미하게 활주흔적을 발생시키는 구간이다. 식 (8)은 Fig. 1의 C구간을 말하며 식 (8)은 Fig. 1의 B구간의 운동에너지에 대한 속도손실 부분이 전혀 고려되지 않고, 육안으로 식별가능한 활주흔적 거리를 기준으로 추정된 속도이다. Fig. 1의 A구간을 구하려면 실차실험 결과를 가지고 식 (7)에서 마찰계수를 구한다. 그리고 Fig. 1의 B구간에 대한 운동 에너지 손실 부분을 보정하기 위해서 실차에 가속도계를 장착하고, 타이어 슬립 실차실험으로 실측값을 수집한다. 제동직전시간과 속도를 나타내는 시간과 감속도의 제동 특성은 Fig. 3과 같다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 삼각형 영역과 사각형 영역으로 구분할 수 있다. 삼각형 영역은 Fig. 1의 B구간에 해당되고, 사각형 영역은 Fig. 1의 C구간이며, 식 (8)의 속도추정의 영역에 해당한다.

Fig. 3의 삼각형 영역 및 식 (9)에 속도감속 부분을 감안하면 삼각형의 넓이는 다음과 같다.

$$a(t) = \frac{a}{t_s} \cdot t \quad (t_0 \leq t \leq t_s, t_0 = 0)$$

Fig. 3의 사각형 영역  $a(t) = a(t_0 \leq t_s \leq t_T, t = 0)$ 이다. 제동 구간은 삼각형 영역 및 사각형 영역이다.

Fig. 1의 C구간의 활주흔적에 의한 속도는 다음의 식 (9)와 같다.

$$v_i = \left( \sqrt{v_f^2 + (-) 2 \times a \times d} \right) \quad (9)$$

여기서, 아래첨자  $f$ 와  $i$ 는 최종속도와 초기속도

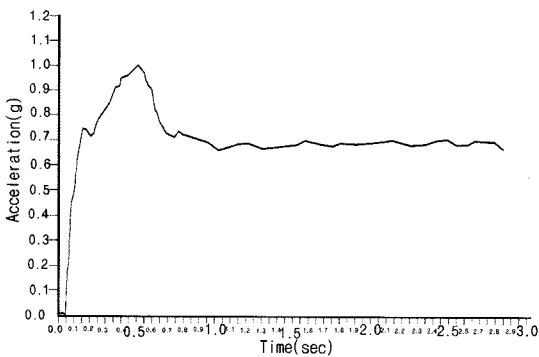


Fig. 2 Characteristic deceleration curve for locked wheel braking

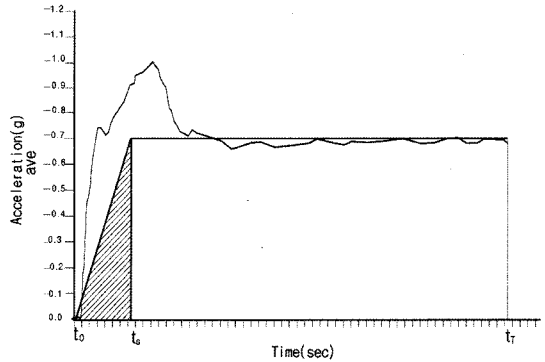


Fig. 3 The new model for locked wheel braking

육안으로 선명하게 식별되지 않는 Fig. 1의 B구간에 해당되는 Fig. 3의 삼각형 영역을 포함하면 식 (10)과 같고,

$$v_i = \left( \sqrt{v_f^2 + (-) 2 \times a \times d + \frac{1}{2} a \times t_s} \right) \quad (10)$$

식 (10)의  $a = -\mu g$  ( $\mu = f$ ),

나중속도  $v_f^2 = 0$  인 경우 식 (11)과 같다.

$$v_i = \left( \sqrt{254 \times d \times (f \pm G) + \frac{1}{2} a \times t_s \times (3.6)} \right) \quad (11)$$

### 3. 실험방법

실차실험을 위해 노면마찰계수 측정기를 사용하였다. VC-2000 마찰계수 측정기는 급제동시 중력센서에 의해 마찰계수를 측정하는 장치로 Fig. 4와 같이 전면유리에 장착하고 기포 수평계이로 측정기의 수평을 유지한 상태에서 실측한다.

Non contact system 방식은 VC-2000과 달리 브레이크 페달 위에 전자 감지센서를 연결하여 브레이크 페달을 밟을 때 센서가 동시에 밝혀 브레이크 페달 압력에 의해 제동되는 것을 감지하여 후미 범퍼에 장착된 센서에서 빛을 지면으로 발사하고 되돌아오는 반사파를 감지하여 제동순간속도, 제동거리, 제동슬립 시간 등의 데이터를 수집한다. 실차에 브레이크 페달의 자유간극, 유효간극, 밀판간극, 브레이크 라이닝 또는 패드의 마모, 간극 등에 따라 다소 차이가 있을 수 있어 브레이크 라이닝 및 패드를 신제품으로 교체하고 자동차검사기준에 적합한 실차로 실험하였고, VC-2000 마찰계수 측정기의 제원은

Table 1 Specification of VC2000

Power	12V-16V DC(negative ground)
Momentary surge	24V DC (10 seconds)
Nominal current draw	160mA
Temp. Range	-20° F to 160° F
Changing voltage	13V-16V DC
Nominal battery life	5 hours
Accelerometer	
Dynamic range	at least 5G (+3G, -2G)
Minimum resolution	0.00156G
Sample rate	100Hz
Computer Clock speed	11.0592MHz
Right angle Preferred	10mm L
Dimensions	9.25inches long, 2.12 inches high, 4.50inches deep

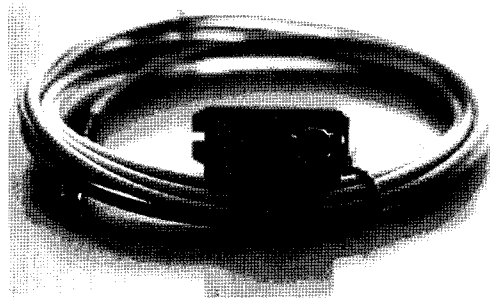


Fig. 4 VC-2000 braking test computer

Table 1과 같다.

본 실험에서는 차량 성능에 따라 제동거리가 다르게 나타나므로 속도별, 타이어 종류 및 마모, 도로 조건 및 종류로 나누어 실차시험을 하였다.

실험차량은 1800cc로 공차상태에서 운전경력은 10년 이상인 운전자와 실험 보조자가 탑승하고, 노면 조건은 상온에서 차량중량 1230kg (65 kg×2명)

Table 2 Experimental conditions for comparison of Tire abrasion state

Classify	Contents	Tire grade	Note
Standard	normal, wide		185mm
Abrasion	High	abrasion 0%	A*
	Medium	abrasion 30~40%	B
	Low	tread height within 1.6mm	C
Air pressure	2.25kg/cm <sup>2</sup>		

Table 3 Experimental conditions for number of measurement with 1800cc (dry and wet)

	Dry · Wet			Total
Road	Asphalt	Concrete	Off road	
Tire grade	A,B,C	AB,C	AB,C	
20km/h	10	10	10	30
40km/h	10	10	10	30
60km/h	10	10	10	30
80km/h	10	10	10	30

A : Tire tread new product

Table 4 Data of traction coefficient (dry and wet)

Tire	Dry				Wet				Road
	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	
A	1.10	1.36	1.40	1.17	0.82	0.85	0.74	0.70	Asphalt
B	0.76	0.98	1.13	1.02	0.70	0.75	0.80	0.70	
C	1.02	1.29	1.12	1.12	0.59	0.56	0.70	0.64	
A	1.10	1.25	1.33	1.22	0.96	0.84	0.84	0.77	Concrete
B	1.04	1.04	1.27	1.12	0.76	0.75	0.81	0.75	
C	1.19	1.44	1.44	1.28	0.83	0.69	0.72	0.66	
A	0.68	0.86	1.02	0.96	0.84	0.88	0.82	0.77	Off road
B	0.68	0.76	0.98	0.92	0.74	0.75	0.82	0.75	
C	0.62	0.78	0.96	0.93	0.74	0.83	0.73	0.73	

이고, 타이어 p185/60-R14 (2.25 kg/cm<sup>2</sup>)에서 실시하였으며, 습윤 조건은 노면이 충분히 젖어 있을 때 실시하였다. 실측 속도는 20, 40, 60, 80 km/h로 구분하였고, 안전을 고려하여 100 km/h의 실험은 배제하였다. 실험 도로는 아스팔트, 콘크리트, 비포장으로 구분하고, 노면상태는 건조와 습윤 상태로 구분하여 실험하였으며, 각 속도 및 도로여건에 따라 1회 조건 실험 시 5회씩 반복 실험하였다. Table 2, 3은 타이어 신품, 중품, 하품조건, 실험속도, 노면조건, 실험 횟수 등을 나타낸 것이다. Table 4는 아스팔트, 콘크리트, 비포장도로에서 타이어 마모상태를 구분하

Table 5 Experimental skid mark and brake distance data

Tire	Dry				Wet				Road
	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	
A	1.43	5.61	15.6	24.5	1.92	8.40	22.1	35.9	Asphalt
B	1.72	6.94	21.2	29.2	2.32	10.8	27.7	41.4	
A	1.43	5.03	14.7	23.6	1.64	7.62	21.5	32.7	Concrete
B	1.65	6.07	18.9	28.9	1.98	9.71	27.2	39.8	
A	1.51	6.22	15.8	26.3	1.87	8.21	21.4	35.2	Off road
B	1.83	7.51	20.1	31.4	2.31	10.6	24.1	38.7	

A : Skid mark distance (m)  
 B : Estimated Brake distance (m)

여, 타이어 등급별, 자동차 운행 속도별로 측정된 정지 마찰계수를 나타낸다. Table 5는 아스팔트, 콘크리트, 비포장도로에서 Table 4의 A급 신폴타이어로 Fig. 1의 C 구간과 B구간을 구분하여 실측한 것을 비교하였다.

타이어 트레드 마모 상태를 Table 2와 같이 구분하여 실측한 데이터가 Table 4,5와 같다.

#### 4. 실험 결과

- 1) Fig. 1에서의 스키드마크(C 구간)거리와 전체 제동 거리(A 구간)를 Table 5와 Fig. 5, 6, 7에 나타내었다. 주행속도를 20, 40, 60, 80 km/h로 하여, 아스팔트, 콘크리트, 비포장 도로에서 C구간의 제동거리를 실측하여 Table 4의 A 행에 표시하였고, B행은 식 (11)을 이용하여 추정한 제동 순시 시간(All brake distance)동안 주행한 전체 제동거리이다.
- 2) 아스팔트 건조 노면에서 식별 되는 Fig. 1의 C 구간을 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 실측한 결과 각각 약 1.43, 5.61, 15.6, 24.5 m로 측정되었고, 제동 순시 시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A 구간은 각각 약 1.72, 6.94, 21.2, 29.2 m로 추정되었다. 아스팔트 습윤 노면에서 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 육안으로 식별 되는 Fig. 1의 C 구간을 실측한 결과 각각 약 1.92, 8.4, 22.1, 35.9 m로 측정되었고, 제동 순시 시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A 구간은 각각 약 2.3, 10.8, 27.7, 41.4 m로 추정되었다.
- 3) 콘크리트 건조 노면에서 식별 되는 Fig. 1의 C 구간을 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 실측한 결

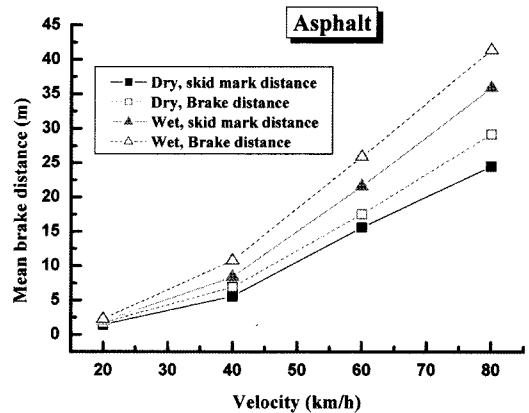


Fig. 5 Mean brake distance depend on velocity and road conditions

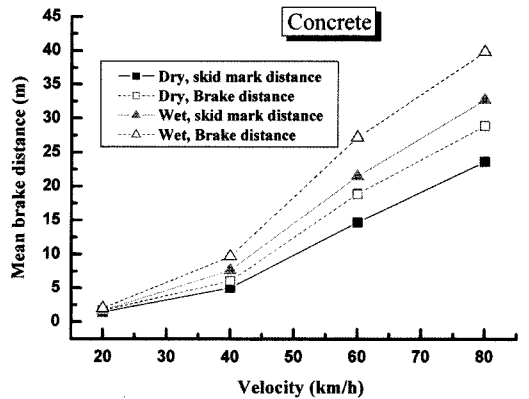


Fig. 6 Mean brake distance depend on velocity and road conditions

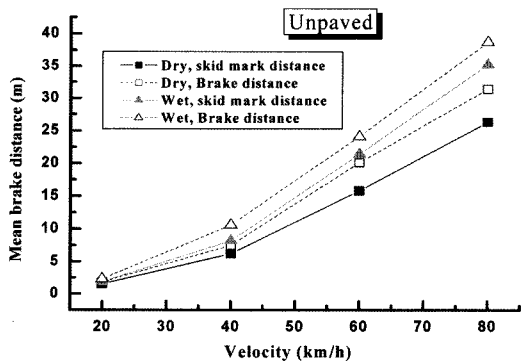


Fig. 7 Mean brake distance depend on velocity and road conditions

과 각각 약 1.43, 5.03, 14.7, 23.6 m로 측정되었고, 제동 순시 시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A 구간은 각각 약 1.65, 6.07, 18.9, 28.9 m로 추정되

었다. 콘크리트 습윤 노면에서 식별 되는 Fig. 1의 C 구간을 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 실측한 결과 약 1.64, 7.62, 21.5, 32.7 m로 측정되었고, 제동 순시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A 구간은 각각 약 1.98, 9.7, 27.2, 39.8 m로 추정되었다.

- 4) 비포장 건조 노면에서 식별 되는 Fig. 1의 C 구간을 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 실측한 결과 각각 약 1.51, 6.2, 15.8, 26.3 m로 측정되었고, 제동 순시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A 구간은 각각 약 1.83, 7.5, 20.1, 31.4 m로 추정되었다. 비포장 습윤 노면에서 주행속도 20, 40, 60, 80 km/h에서 실측한 결과 각각 약 1.87, 8.2, 21.4, 35.2 m로 측정되었고, 제동 순시간 전체동안 주행거리인 Fig. 1의 A구간은 각각 약 2.31, 10.6, 24.1, 38.7 m로 추정되었다.
- 5) 지금까지 제동시간 전체동안 주행한 제동거리를 추정해 본 결과, skid mark에 의해 발생한 제동거리보다 평균 약 20% 정도 크다. 따라서 이를 추정 주행속도에 적용하려면 다음과 같은 속도 추정 보정식을 사용할 것을 제시한다.

$$V = \sqrt{254 \times (\mu \pm G) \times d(1.17 \sim 1.22)}$$

### 5. 결론

본 연구에서는 우리 현실에 적합한 도로여건 등을 고려하여 실차 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 마찰계수가 아스팔트보다 콘크리트 노면이 약간 높은 것으로 나타났으며 비포장은 노면 굳기 정도에 따라 마찰계수가 달라진다.
- 2) 시험 주행속도범위에서 아스팔트, 콘크리트, 비포장 노면 조건에서 육안으로 식별되는 활주거리(Fig. 1 C구간)가 습윤 노면이 건조노면에 비해 약 28%가량 길어진다.
- 3) 시험 주행속도범위에서 아스팔트, 콘크리트, 비포장의 건조 및 습윤 노면에서 육안으로 식별되지 않는 활주거리가 육안으로 식별되는 활주거리에 비해 약 20%가 발생하였다.

- 4) 바퀴가 완전 고착되어 슬립하기 약 0.17초 ~ 0.22초 전에 새도우 마크(Fig. 1의 B 구간)가 발생한다.
- 5) 우리 현실에 적합한 도로와 타이어의 상태, 도로 구배, 제동 순시간 등을 고려하여 운동에너지에 대한 속도손실부분을 보정하여 주행속도를 추정하는 방법을 제시하였다.

### References

- 1) 江宇一郎, 自動車事故工學, 事故再現の手法, 技術書院, 1993.
- 2) L. B. Fricke, Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute, 1990.
- 3) J. C. Collins, Accident Reconstruction, Charles C. Thomas Publisher, Illinois, 1979.
- 4) M. E. Barzelay and W. L. George, Scientific Automobile Accident Reconstruction, Matthew Bender and Co., New York, 1964.
- 5) J. A. Neptune, F. E. James, A. P. Chaves and U. W. Haward, "Speed from Skids : A Modern Approach," SAE 950354, pp.189-205, 1995.
- 6) R. Limpert, Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, Michile Co. Ltd, Charlottesville, 1978.
- 7) C. W. Gary and F. B. Lynn, "Derivation of Equations for Traffic Accident Reconstruction," Accident Investigation Manual, Vol.2, Northwestern University Traffic Institute, 1987.
- 8) L. B. Fricke, "Traffic Accident Reconstruction," Northwestern University Traffic Institute, pp.62-67, 1990.
- 9) Vericom Computers, VC2000PC Dynamometer and Braking Test Computer Owner's Manual, pp.78-85, 1998.
- 10) W. S. Reed, "A Comparison of Emergence Braking Characteristics of Passenger Cars," SAE 880231, pp.258-265, 1988.
- 14) J. A. Neptune, J. E. Flynn, P. A. Chavez and H. W. Underwood, "Speed from Skids : A Modern Approach," SAE 950354, pp.189-205, 1995.