

곡선 형태의 타이어 자국으로부터 차량사고시 속도추정

김민석¹⁾ · 이지훈¹⁾ · 유완석^{*2)} · 김기남³⁾

부산대학교 기계설계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾ · K&K AceTECH³⁾

Speed Estimation from Tire Marks for Vehicle Accident Reconstruction

Minseok Kim¹⁾ · Jihoon Lee¹⁾ · Wansuk Yoo^{*2)} · Keenam Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³⁾K&K Automobile Crash Engineering Technology, 96-26 Sinseol-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-811, Korea

(Received 30 January 2008 / Accepted 10 April 2008)

Abstract : In this paper, a new technique was suggested to estimate vehicle speed for the traffic accident reconstruction, and accident investigators can estimate initial vehicle speed based on this suggested technique. Turning tests with several vehicle speeds were executed and compared with the motion of the vehicle and the shape of the tire marks. A new method for estimating the coefficient of friction is suggested by using the longitudinal and lateral components of tire marks. And also, a speed calculation graph is suggested to estimate vehicle speed for traffic accident reconstruction.

Key words : Tire mark(타이어 자국), Coefficient of friction(마찰계수), Speed estimation(속도추정), Accident reconstruction(사고 재구성), Speed calculation graph(속도 계산 그래프)

1. 서론

운전자가 사고의 위험을 인지하면, 조향핸들을 돌리면서 급제동 조치를 취하는 경우가 많이 있는데, 이 때 노면에는 곡선의 타이어 자국이 발생된다. 곡선으로 타이어 자국이 발생하는 모양은 운전자가 순수하게 핸들만 돌린 경우, 핸들을 돌리면서 제동 조치를 취한 경우, 핸들을 돌리면서 가속하는 경우에 따라 다르게 나타난다.

본 연구에서는 급선회 후 곧바로 급제동 조치를 취할 때 발생하는 타이어 자국, 정지거리, 마찰계수 등을 분석하였다. 일반적으로 곡선으로 발생한 타이어 자국을 모두 요마크(yaw mark)라고 지칭하고 있지만¹⁾, 본 연구에서는 차량이 선회 궤적을 이탈하지 않고, 후륜이 전륜을 따라 진행한 경우에 발생한

것을 곡선의 타이어 자국(tire mark)이라고 하였다.

본 연구에서는 일정한 속도로 직진으로 주행 중 운전자가 급격하게 핸들을 한쪽 방향으로 돌려 차량을 급선회시켜 노면에 곡선의 타이어 자국이 발생하도록 하였다. 급선회하는 과정에서 생겨나는 속도 변화, 타이어 자국의 종방향과 횡방향 성분, 자국의 시작지점에서 정지한 지점까지 마찰계수의 변화와 자국이 발생되기 전 지점에서 차량의 운동특성을 분석하여 곡선의 타이어 자국이 발생하였을 때 속도를 추정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험차량

실험차량은 Fig. 1과 같이 배기량 2,000cc급의 자동변속기가 장착된 승용차량을 사용하였다. 급선회 조향각은 도로상을 주행하는 운전자가 사고를 피하

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

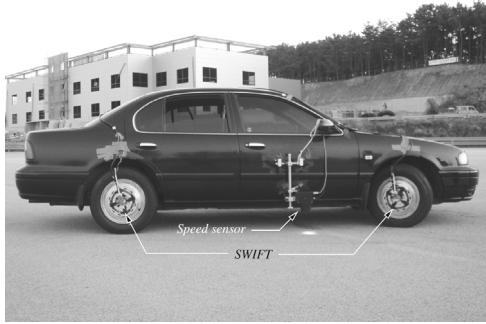


Fig. 1 Test vehicle with test equipments

기 위해 최대로 조향할 수 있는 110°로 설정하였으며 이때 운전석 앞바퀴는 약 7°회전하였다. 급선회 속도는 실제 도로상에서 차량사고가 발생하는 속도를 고려하여 60, 80, 100, 120km/h에서 실시하였다. 운전자는 실차 테스트 경력 15년 이상의 전문운전자가 급선회 실험을 실시하였고, 실험차량에는 운전자 1인과 장비관리자 1인이 승차하였으며, 탑재된 측정 장비를 포함하여 차량 전체 질량은 약 200kg 증가되었다. 실험차량의 속도를 측정하기 위해 질량중심과 동일한 선상에 위치한 조수석 문에 광학 스피드 센서를 부착하였다.

2.2 타이어

신품 타이어를 실험차량 네 바퀴에 모두 장착하여 시내와 고속구도를 약 300km 이상 주행하여 타이어 표면의 코팅을 완전히 벗겨낸 상태에서 실험을 실시하였으며, 타이어 규격은 205/65R15 91H이다. 타이어 공기압은 제작사에서 표시한 표준 규정압력 206.7kPa의 공기압으로 설정하였다. 급선회 후 급제동 실험에서 선회한 외측 앞바퀴의 타이어 트레드가 마모된 상태를 Fig. 2에 나타내었으며, 노면과 접지된 부분은 과도한 힘의 작용으로 타이어 트레드가 심하게 마모되어 벨트(belt)가 노출되어 있다.

2.3 시험도로

차량 진행방향과 측면으로 경사가 있는 도로에서 급선회시 오르막은 저항계수가 증가되고, 내리막에서는 저항계수가 감소되는 효과가 발생한다. 그리고 차량이 불규칙하게 움직일 수 있고, 바퀴에 작용



Fig. 2 Tire condition after emergency turn and braking test



Fig. 3 Tire mark after turning test

하는 힘과 차량의 운동방향을 정확하게 측정할 수 없게 된다. 도로 폭이 좁으면 급선회 도중 노면의 고정물체와 충돌될 수 있으므로 실험도로는 충분한 공간이 확보되어 있고 진행방향과 측면이 수평하며, 아스팔트로 포장된 도로에서 실험을 실시하였다. 급선회 후 급제동 실험에서 노면에 발생된 곡선의 타이어 자국의 한 예를 Fig. 3에 나타내었다.

3. 곡선 형태의 타이어 자국 및 속도계산

3.1 실차실험에 의한 차량 운동특성

선회주행 시 차량은 핸들조작에 의해 타이어 진행방향과 타이어 회전면 사이에 옆미끄럼각이 발생되어 원심력에 대항하여 선회운동을 유지한다. 차량사고 조사와 분석에서 직진으로 주행하는 차량의 운전자가 사고의 위험을 인지하고 조향핸들을 급격히 한쪽 방향으로 돌렸을 때 차량에 요가 발생되어 노면에 요마크가 생성된다. 그러나 최대 조향각도

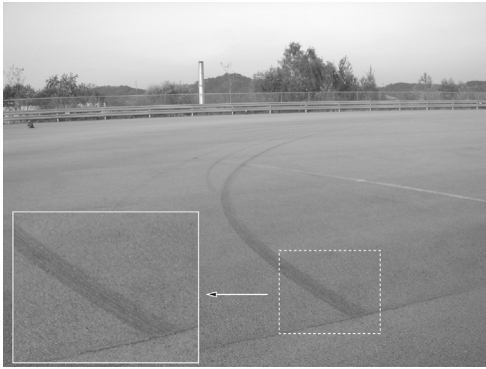


Fig. 4 Tire marks after turning test equipped ABS

110°로 급격히 돌렸을 때 모든 실험 속도 범위에서 차량은 조향핸들을 돌린 방향으로 선회하였고, 후륜이 전륜의 이동경로를 이탈하지는 않았으며, 조향을 시작한 지점부터 정지한 지점까지 곡선의 타이어 자국이 연속적으로 발생하였다.

운전자가 110°로 핸들을 돌리면서 급제동 조치를 취하였을 때 코너링력과 원심력이 거의 비슷하기 때문에 실험차량이 경로를 이탈하지 않고 선회한 것으로 판단된다. 직진으로 진행 중 약 110°로 조향 핸들을 돌렸을 때 바퀴가 돌아간 지점부터 회미한 타이어 자국이 발생하였으며, 급제동 조치를 취한 지점은 조향핸들만 조작하여 진행한 지점보다 진한 타이어 자국이 발생되었다. 급선회 후 급제동에서는 Fig. 4에서 보는바와 같이 바퀴가 돌아간 방향 쪽으로 차량이 선회하였기 때문에 타이어 트레드의 리브와 그루브의 줄무늬를 확인할 수 있는 자국이 발생되었다. 급선회 후 급제동은 동일한 속도로 3회씩 실시하였다.

3.2 회전반경에 의한 속도계산

차량사고 현장에 곡선의 타이어 자국이 발생되어 있을 때 자국의 시작지점 속도는 Fig. 5에서 보는바와 같이 자국의 시작지점에서 끝 지점까지 또는 특정한 구간에서 차량의 질량중심이 이동된 경로의 현거(chord) l 과 중앙중거(middle ordinate) h 를 측정하여 회전반경 r 을 식 (1)로 구한 다음, 식 (2)로 자국의 시작지점 속도를 계산하고 있으며, 여기서 v_T 는 타이어 자국 시작지점 속도, G 는 노면 경사도, μ 는 마찰계수이다.²⁾

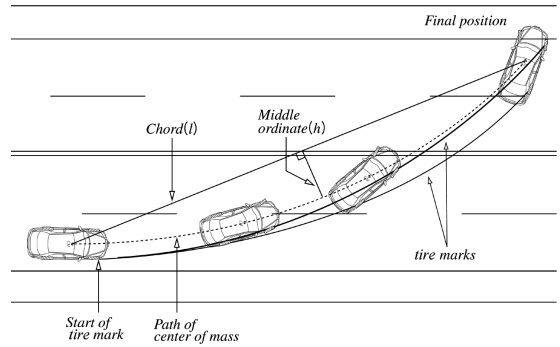


Fig. 5 Middle ordinate and chord of tire marks

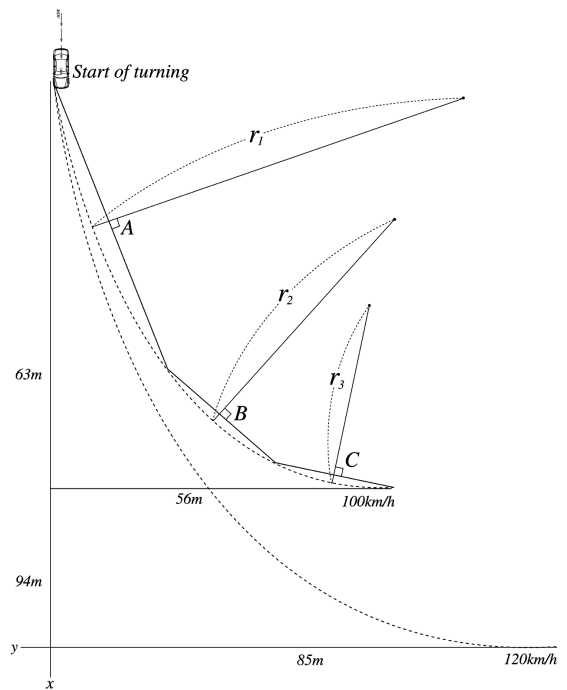


Fig. 6 Change in radius of turn

$$r = \frac{l^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{gr(\mu + G)}{1 - \mu G}} \quad (2)$$

차량사고 현장에 발생하는 곡선의 타이어 자국은 급선회한 지점에서 정지한 지점 쪽으로 이동하는 과정에서 차량의 운동방향과 노면과 타이어 사이에 작용하는 마찰계수가 변한다. 또한, 운전자의 추가적인 조향조작 및 제동조치에 의해 Fig. 6에 나타낸 바

와 같이 타이어 자국의 시작지점에서 정지한 지점까지 회전반경이 일정하지 않기 때문에 특정한 구간의 현거와 중앙중거리로부터 회전반경을 구하여 속도를 계산하면, 측정된 구간에 따라 속도의 편차가 나타난다. 그리고 차량사고 현장에 곡선의 타이어 자국이 발생되어 있을 때 차량의 질량중심이 이동된 경로의 회전반경을 측정하기 위해서는 측간거리와 운간거리, 급선회 및 급제동에 의한 하중의 이동량을 알고 있어야 하고, 질량중심이 표시된 특수한 장비가 필요하다. 현실적으로 사고현장에서 회전반경을 측정하는 것은 거의 불가능하기 때문에 회전반경을 측정하여 속도를 추정하는 것은 실제 차량사고에 적용할 수 없는 경우가 대부분이다. 타이어 자국의 길이 및 특성을 신속하고 정확하게 조사하여 타이어 자국의 시작지점 속도와 운전자가 취한 반응을 판단할 수 있는 새로운 방법이 필요하다.

3.3 타이어 자국 길이 측정 및 속도계산

타이어 자국이 시작된 지점에서 정지한 지점까지 곡선의 타이어 자국을 종방향과 횡방향 성분으로 측정하는 방법을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서, l_x 와 l_y 는 각각 타이어 자국의 종방향 및 횡방향 성분의 거리이고, l 은 l_x 와 l_y 의 합벡터 거리 즉 현거리이며, θ 는 l 과 l_x 의 사이각이다.

본 연구에서 제안한 거리측정 방법은 사고현장에서 타이어 자국의 종방향과 횡방향 성분의 거리만을 측정하므로 간단하고 정확하게 측정할 수 있다.

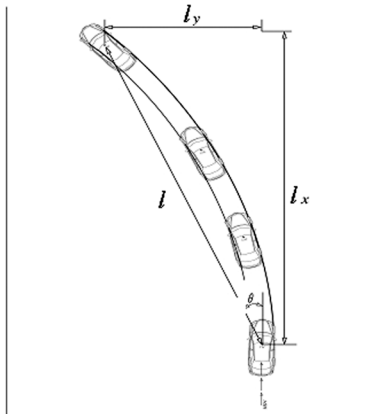


Fig. 7 Chord length in traffic accident scene

곡선으로 발생한 자국의 시작지점 속도를 계산하기 위해 식 (3)을 사용하였으며, 여기서 v_T 는 타이어 자국 시작지점 속도, v_C 는 끝 지점 속도, a 는 가속도이다.

$$v_T = \sqrt{v_C^2 - 2al} \quad (3)$$

3.4 마찰계수 계산

Fig. 8에 타이어 자국 시작지점, 정지한 지점의 위치, 타이어 자국의 종방향과 횡방향 성분의 거리를 나타내었다. 급선회 후 급제동에서 타이어 자국 시작지점에서 실험차량이 최종 정지한 지점까지 종방향과 횡방향의 성분의 거리 비(ratio)는 약 1:0.9로 나타났다. 차량사고 현장에 곡선의 타이어 자국이 발생되어 있는 경우, 사고 조사자는 선회를 시작한 지점과 제동조치를 취한 지점을 구분하지는 않고, 자국의 시작지점에서 끝 지점까지의 거리만을 측정한다. 동일한 속도에서 급선회 후 급제동 조치를 취하였을 때 발생하는 곡선의 타이어 자국은 스키드마크보다 길게 발생하는 것으로 나타났다. 그러므로 곡선의 타이어 자국이 발생되었을 때 마찰계수를

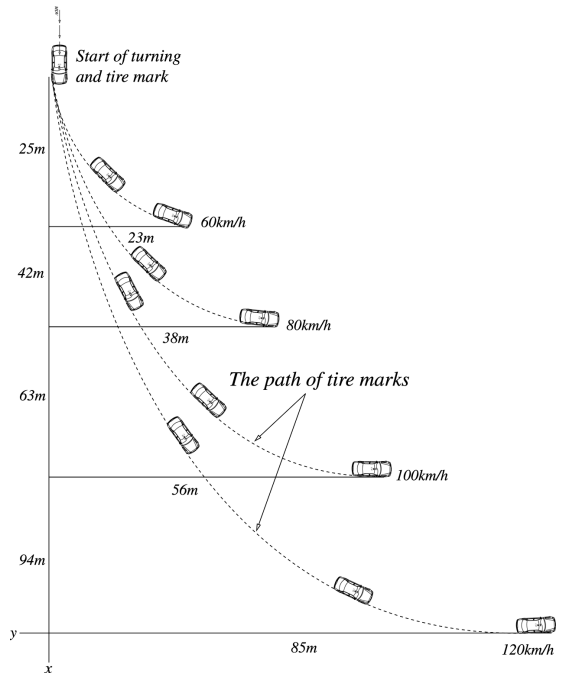


Fig. 8 Start of tire mark and final position of test vehicle

계산하는 새로운 방법이 필요하다.

본 연구에서는 마찰계수 계산하기 위해 식 (4)을 사용하였으며, 여기서, v_C 는 끝 지점 속도, v_T 는 타이어 자국 시작지점 속도, g 는 중력가속도이다.

$$\mu = \frac{v_C^2 - v_T^2}{2gl} \quad (4)$$

급선회 및 급제동을 동일한 속도에서 3회씩 실시한 측정 자료에서는 속도가 증가하면 정지거리도 선형적으로 증가하였고, 타이어 자국 시작지점에서 정지한 지점까지 질량중심의 이동각도는 약 42°로 나타났다. 100km/h의 속도에서 종방향과 횡방향 성분의 거리는 각각 63m, 56m이며, 사이각은 40°이고, 현거는 약 84.8m로 나타났다. 선회시점의 속도가 120km/h일 때 종방향과 횡방향 성분의 거리는 각각 94m, 85m이며, 사이각은 42°이고, 현거는 약 126.5m로 나타났다.

100km/h와 120km/h의 실험 자료를 식 (4)에 대입하면, 마찰계수는 0.48과 0.45이며, 동일한 방법으로 80km/h와 60km/h의 속도에서 마찰계수는 각각 0.45와 0.43으로 나타났다. 100km/h 속도에서 사이각은 약 40°로 다른 실험속도보다 2° 작게 이동된 지점에서 정지하였으며, 마찰계수는 최저 마찰계수 0.43보다 약 0.05 높은 0.48로 나타났다. 마찰계수 0.05는 속도계산에서 크게 영향을 받지 않는 값이므로 100km/h의 속도에서도 42°이동된 지점에 정지한 것으로 가정하였다. 급선회 후 급제동에서 곡선의 타이어 자국이 발생되었을 때 마찰계수 범위는 0.43~0.48로 나타났으며, 평균은 약 0.45이다.

건조한 아스팔트 포장노면에 스키드마크가 발생되었을 때 일반적으로 적용하는 마찰계수는 0.8이며,^{3,4)} 차량이 선회를 시작한 지점에서 약 42°이동된 지점에 정지되었을 때까지의 평균 마찰계수는 0.45로 나타났다. 국내 도로 선형구조와 도로 폭에서 진행방향을 기준으로 42°을 벗어나면 중앙분리대 또는 가드레일과 충돌이 발생되므로 종방향으로 진행한 0°에서 42°까지의 범위 내에서 마찰계수가 결정될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 직진으로 진행하였을 때 마찰계수를 0.8로 설정하였고, 42°까지 이동되었을 때 마찰

계수를 0.45로 설정하였으며, 0°와 42°이내에서 정지되었을 때 마찰계수는 0.8과 0.45 사이에 있는 것으로 가정하였다. 마찰계수 0.8과 0.45 사이의 변화량은 0.35이고, 종방향 성분의 거리와 현거의 사이각 변화에 따라 마찰계수는 매우 작게 변화되고 종방향 축에 가까우면 멀리 떨어진 경우보다 마찰계수가 증가할 것으로 예상되지만, 속도계산에서는 무시할 수 있는 정도의 차이이므로 종방향을 기준으로 42°지점까지 마찰계수를 등각 간격으로 구분하여 마찰계수를 계산하였다.

사이각이 작은 경우는 각이 큰 경우보다 종방향 축에 가깝게 진행하였으므로 마찰계수는 높지만, 마찰계수를 등간격으로 구분하였기 때문에 종방향과 합벡터의 사이각 θ 가 0°이면 마찰계수는 0.8이다. 사이각이 1°씩 커질수록 마찰계수는 0.008 감소되며, 곡선의 타이어 자국이 발생되었을 때 마찰계수의 계산방법을 식 (5)에 나타내었다. 예를 들어 종방향 축에서 25° 떨어진 지점에 사고차량이 정지되면, 마찰계수는 약 0.6이다.

$$\mu = 0.8 - (0.008\theta) \quad (5)$$

동일한 속도에서 타이어 자국의 길이는 타이어와 노면 사이에 작용하는 마찰계수에 의해 결정되며, 스키드마크가 생성될 때의 마찰계수는 선회할 경우보다 높으므로 동일한 속도에서 스키드마크는 선회할 때의 타이어 자국보다 짧게 발생한다. 본 연구에서는 스키드마크와 선회시 곡선의 타이어 자국이 발생하였을 때 속도를 쉽게 추정하기 위하여 Fig. 9와 같은 속도 계산 그래프(speed calculation graph)를 개발하였다. Fig. 9에서는 스키드마크와 선회시 발생된 타이어 자국의 속도를 등 속도선(equivalent speed line)으로 연결하였으며, 이 그래프에 따르면 동일한 등 속도선 상에 위치한 지점의 속도는 동일하다. 속도 계산 그래프에서 횡방향 쪽으로 이동된 지점을 찾거나 측정된 거리를 쉽게 적용하기 위해 횡방향 거리를 10m 간격으로 나누어 나타내었다. 본 연구에서 제안한 속도계산그래프를 사용하면, 타이어 자국의 종방향과 횡방향 성분의 거리만으로 스키드마크 시작지점과 선회시 발생된 곡선의 타이어 자국 시작지점 속도를 쉽게 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

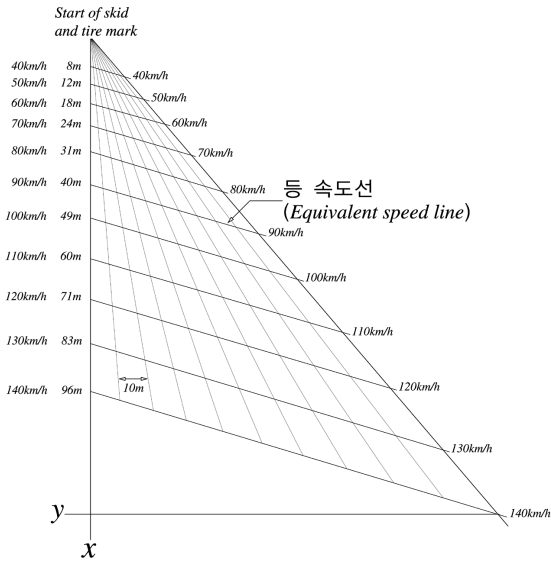


Fig. 9 Speed calculation graph of skid mark and tire mark with different slopes

4. 결론

본 연구에서는 직선주행 중 급선회 후 급제동 조치를 취했을 때 발생하는 곡선 형태의 타이어 자국, 정지거리, 마찰계수 등을 분석하였다. 또한 타이어 자국으로부터 자국이 발생한 지점의 속도를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

- 1) 차량사고 현장에 나타나 있는 곡선의 타이어 자국의 종방향과 횡방향 성분의 거리를 측정하여 현거를 구하고, 종방향 성분의 거리와 현거의 사이각으로 마찰계수를 구한 후, 곡선으로 발생한

타이어 자국의 시작지점의 속도를 계산할 수 있는 수식을 제시하였다.

- 2) 차량이 직진방향에서 횡방향으로 42° 이동하여 정지한 지점까지 등간격으로 구분하여 마찰계수를 추정하는 방법을 제시하였으며, 조향각과 속도를 더욱 세밀하게 나누어 실험하면 보다 정확한 값들을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

References

- 1) J. A. Neptune, J. E. Flynn, P. A. Chavez and H. W. Underwood, "Speed from Skids : A Modern Approach," SAE 950354, 1995.
- 2) L. B. Fricke, "Traffic Accident Reconstruction," Vol.2, Northwestern University Traffic Institute, 1990.
- 3) S. Yamazaki, O. Furukawa and T. Suzuki, "Study on Real Time Estimation of Tire to Road Friction," Vehicle System Dynamics, Vol.27 Supplement, pp.225-233, 1996.
- 4) K. N. Kim, J. K. Ok, M. S. Kim, W. K. Mun, S. J. Park and W. S. Yoo, "Calculation of Brake Onset Velocity for Non-ABS Vehicle on Dry Asphalt Pavement," Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.109-114, 2007.