

요마크 분석을 통한 사고 재구성

하정섭*(한양대 대학원 자동차공학과), 이승종(한양대 기계공학과)

Accident reconstruction using yaw mark analysis

J. S. Ha (Automotive. Eng. Hanyang Univ. Graduate School), S.J. Yi(Mechanical. Eng. Hanyang Univ.)

ABSTRACT

A vehicle oversteered or cornering at excessive speed leaves tire yaw mark on the road surface. A yaw mark is a sign that the tire was sideslipping and exceeded its frictional limit because of centrifugal force. Problems exist with the traditional equation, "critical speed formula (CSF)", that limits its practical use in traffic accident reconstruction. A major problem is that the equation does not account for vehicle dynamics and interface between tire and road. The literature refers to that the accuracy of the critical speed formula varies with several factors. New equations that account for vehicle dynamics are introduced in this paper. A comparison of the accuracy of the new method and the traditional method in the calculation of speed is conducted.

Key Words : Critical speed formula (요마크속도 추정식), Sideslip (횡 방향 미끄럼), Accident reconstruction (사고 재구성), Centrifugal force (원심력), Oversteer (오버스티어), Critical speed (한계 속도)

1. 서론

타이어 마크는 차량의 미끄러지는 방향에 따라 진행반향으로 미끄러질 때 발생하는 스키드마크와 차량의 진행 반향 측면으로 미끄러질 때 발생하는 요마크로 분류할 수 있다. 스키드마크가 브레이크 조작에 따른 바퀴의 잠김으로 발생하는 종 방향 흔적이란 면 요마크는 브레이크 조작이 아닌 핸들조작에 의해서 발생하는 횡 방향 미끄럼 흔적이다. 따라서 요마크는 선해하기 위한 핸들 조작 시에 원심력을 이기지 못해 발생한다[1,2,3,4].

요마크의 특징은 타이어의 흔적이 사선방향으로 빗살무늬 형태를 가진다. 이 흔적은 타이어의 트레이드 측면 고무와 노면의 접촉으로 노면에 새겨진 흔적이다. 이것은 감속중일 때, 등속중일 때, 가속중일 때 각각 다르게 나타난다. 요마크의 사선(saturation) 방향이 타이어의 축의 앞쪽방향이면 감속중이고, 평행하면 등속 중이고, 뒤쪽방향이면 가속중이다. 또한 이 사선방향은 조향각(steering angle)과 무관하게 나타난다[2].

기존의 요마크 해석 방법은 원심력과 차량의 구심력이 같다는 조건으로부터 다음과 같은 요마크속

도 추정식(critical speed formula)을 만들었다[1,2,3,4].

$$v = \sqrt{fgR} \quad (1)$$

f : tire/road coefficient of friction

R : path radius

g : gravitational acceleration

위의 요마크속도 추정식은 속도를 마찰력과 차량의 진행 궤적 반경의 함수로만 보고있다. 실제로 요마크는 타이어의 형태와 크기, 타이어의 공기압, 노면의 상태, 차량의 무게, 현가 장치의 기하학, 차량 거동특성의 함수이다. 참고문헌을 살펴보면 위의 비교적 단순한식은 차량의 거동 특성에 따라 다양한 오차를 보인다. Dickerson 는 차량의 높은 슬립각(slip angle)에서나 높은 횡 방향 가속도(lateral acceleration)에서는 위의 요마크속도 추정식이 실험결과와 많은 오차를 보임을 증명하였다[3]. Brach 는 가속상태, 등속상태, 감속상태 중에서 감속상태에서 위의 식(1)이 많은 오차를 보임을 증명하였다[4]. 따

라서 차량의 거동특성이 요마크 형성에 큰 영향을 미치고 있다고 말할 수 있다.

그래서 우리는 차량의 거동 상태를 포함하는 새로운 요마크 해석 방법을 제안한다. 이 요마크속도 추정식은 기존의 식이 고려하지 않았던 슬립각과 요잉속도(yawing velocity)를 고려하여 만들어졌다. 또한 계산을 위한 데이터들은 현장에서 측정할 수 있는 것들이다.

2. 요마크속도 추정식 유도

2.1 곡선반경 측정

차량의 요마크는 곡선 형태이며 시작 부분에서 끝부분으로 갈수록 반경이 작아지는 나선형을 보인다. 몇 개의 구간으로 나누어서 곡선의 반경을 측정할 때, 이 반경은 차량의 무게 중심의 궤적이다. 이러한 측정을 위하여 지그가 사용된다[1,2,3,4].

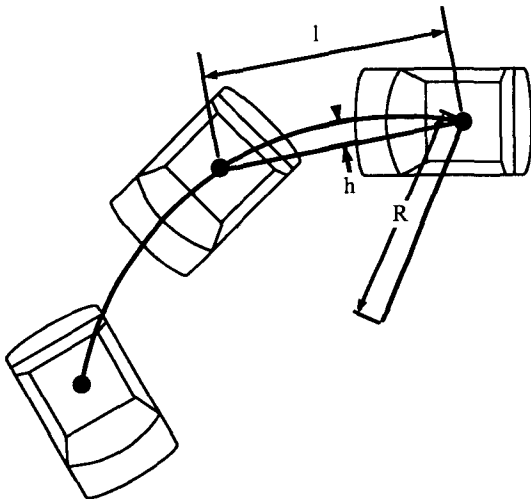


Fig. 1 Geometric relationship of vehicle radius

여기서 곡선 반경은 아래의 식을 이용하여 구해진다[2].

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

2.2 차량 운동학 모델

급 핸들 조작시 차량은 오버 스티어링이 되고 안정성을 잃고 발산하는데 이때 요마크가 발생한다. 등속시에 차량의 앞 바퀴의 요마크의 사선방향은 조향각에 상관없이 앞 바퀴 축에 평행하다는 사실로부터 요마크 발생시의 차량의 운동 방정식을 식

(3)과 같이 쓸 수 있다. 여기서 차량의 횡력(lateral force)과 요잉 모멘트는 무게 중심에서의 슬립각과 각속도의 함수이다.

$$Y = f(\beta, \omega) = \left(\frac{\partial Y}{\partial \beta} \right) \beta + \left(\frac{\partial Y}{\partial \omega} \right) \omega \quad (3)$$

$$N = f(\beta, \omega) = \left(\frac{\partial N}{\partial \beta} \right) \beta + \left(\frac{\partial N}{\partial \omega} \right) \omega$$

Y: Lateral force

N: Yawing moment

β : Slip angle

ω : Yawing velocity

요마크 분석을 위하여 차량을 그림 2 와 같이 모델링 하고 이것을 뉴턴 법칙을 이용하여 풀면 식 (4)을 구할 수 있다.

$$Y = C_F \tan^{-1} \left(\beta + a \frac{\omega}{v_x} \right) + C_R \tan^{-1} \left(\beta - b \frac{\omega}{v_x} \right)$$

$$C_F, C_R : \text{Conering stiffnesses} \quad (4)$$

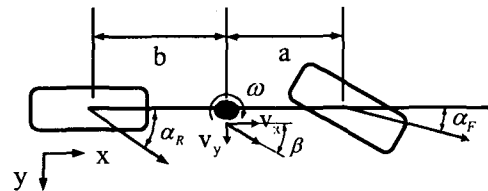


Fig. 2 The "bicycle" model at the critical speed

2.3 임계속도(critical speed)

임계속도는 차량이 안전성을 잃고 발산하는 속도이다. 이 속도가 요마크를 발생시키는 속도이다.

$$N = N_\beta \beta + N_\omega \omega$$

$$m \frac{v_x^2}{R} = Y_\beta \beta + Y_\omega \omega$$

$$N_\beta = aC_F - bC_R, Y_\omega = \frac{1}{v_x} (aC_F - bC_R) \quad (5)$$

$$N_\omega = \frac{1}{v_x} (a^2 C_F + b^2 C_R), Y_\beta = C_F + C_R$$

임계 속도를 구하기 위한 단순화된 차량 운동방정식은 식(5) 와 같다. 이것들을 조합하여 ω/N 의 값을 무한대로 보내기 위한 조건은 식(6)과 같다[5].

$$N_{\beta} Y_{\omega} - m v_x N_{\beta} - Y_{\beta} N_{\omega} = 0 \quad (6)$$

여기서 Y_{ω} 은 아주 적은 값이다. 따라서 무시하고 다시 정리하면 식(7) 과 같다.

$$\beta N_{\beta} \approx -\omega N_{\omega} \quad (7)$$

2.4 요마크속도 계산식

각속도와 차량의 속도 비는 회전각도와 차량의 이동거리 비와 같다고 보고 식(7) 과 식(5) 그리고 식(4)을 조합하면 아래와 같은 새로운 방식의 요마크속도 추정식이 만들어지게 된다.

$$\frac{\omega}{v_x} \approx \frac{\theta}{S} \quad (8)$$

$$\beta = -\frac{\omega}{v_x} \frac{a^2 C_F + b^2 C_R}{a C_F - b C_R}$$

$$v_x = \sqrt{\frac{R}{m} \left(C_F \tan^{-1} \left(\beta + a \frac{\omega}{v_x} \right) + C_R \tan^{-1} \left(\beta - b \frac{\omega}{v_x} \right) \right)}$$

횡력(lateral force)은 슬립각이 작은 구간에서는 슬립각과 선형적인 비례관계를 보이지만, 슬립각이 큰 구간에서는 일정한 값을 가진다[6]. 그래서 슬립각이 최대 횡력을 갖는 슬립각보다 큰 경우에는 식(8)의 세 번째 식을 다음과 같이 쓴다.

if $\beta > \beta_{\max}$ then

$$v_x = \sqrt{\frac{R}{m} \left(C_F \tan^{-1} \left(\beta_{\max} + a \frac{\omega}{v_x} \right) + C_R \tan^{-1} \left(\beta_{\max} - b \frac{\omega}{v_x} \right) \right)}$$

β_{\max} : Slip angle at the maximal lateral force

3. 요마크속도 추정식 검증

우리가 만든 새로운 요마크속도 추정식의 정확성을 검증하기 위하여 Brach의 순방향 시뮬레이션 자료를 이용하였다[4]. 표 1은 새로운 요마크속도 추정식의 계산에 적용될 입력 값들이다. 또한 실제

로 요마크 발생 현장에서 쉽게 측정할 수 있는 값들이다.

Table 1 Input data for calculation

	θ / s (rad/m)	R(m)
1	0.0041	142.6586
2	0.0113	118.4483
3	0.0162	101.9800
4	0.0230	80.0679
5	0.0236	77.0382
6	0.0212	86.2736
7	0.0246	70.3387
8	0.0258	62.3987
9	0.0278	54.9006

여기서 사용된 오차 계산 방법과 최대 슬립각은 식(10)과 같다. 따라서 음수의 오차 값은 실제보다 작은 계산 값을 의미한다.

$$\beta_{\max} = 6.7^{\circ}$$

$$\text{error} = \frac{(v_{\text{cal}} - v_{\text{meas}})}{v_{\text{meas}}} \times 100 \quad (10)$$

Table 2 Percent errors of each method

	새로운 방법(%)	기존의 방법(%)
1	-18.50	35.33
2	20.86	23.62
3	1.195	15.00
4	0.26	3.64
5	-0.45	2.97
6	3.22	6.52
7	0.52	4.06
8	2.80	6.55
9	7.78	11.91

표 2는 새로운 방법이 기존의 방법보다 정확도가 높고 오차가 적음을 보여주고 있다. 기존의 방법은 항상 계산된 값이 실제적인 값보다 크지만 새로운 방법은 음수 값의 에러를 가질 수 있다.

그림 3과 4를 보면, 새로운 모델과 기존모델 모두 θ/s 가 0.023의 근처의 값을 가질 때는 적은 오차를 보인다. 그러나 새로운 모델은 V자 형태의 기존 모델의 오차 분포를 일자에 가깝도록 조정하고 있는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 박신, 박준해, 장준석, "교통사고 조사분석 실무", pns 출판, 2002
2. Fricke, L., B., "Traffic Accident Reconstruction", Northwestern University Traffic Institute, 1990
3. Dickerson, C., P., Arndt, S., M., Arndt, M., W., Mowry, G., A., "Evaluation of Vehicle Velocity Predictions Using the Critical Speed Formula", SAE 950137
4. Brach, R., M., "An Analytical Assessment of the Critical Speed Formula", SAE 970957
5. Milliken, W., F., and Milliken, D., L., "Race Car Vehicle Dynamics", SAE, 1995
6. Steffan, H., and Moser, A., "The Collision and Trajectory models of PC-CRASH", SAE 960886

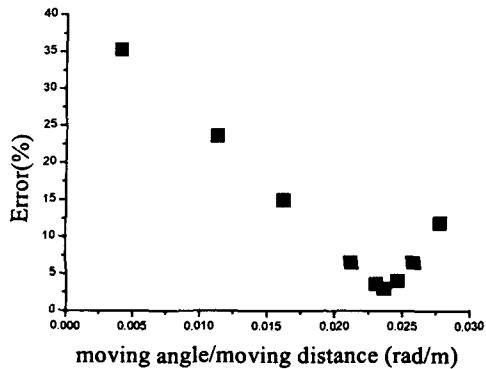


Fig. 3 Errors at the old method

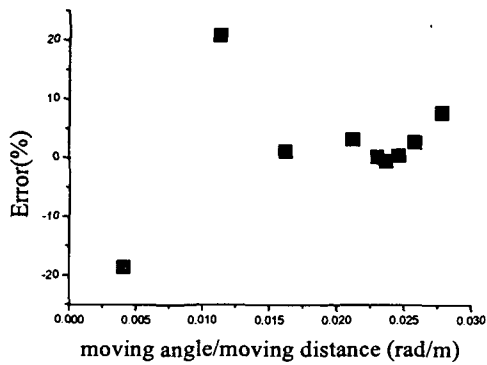


Fig. 4 Errors at the new method

4. 결론

기존의 편리하고 간편한 요마크속도 추정식의 문제점을 많은 문헌들이 지적하고 있다. 이런 문제점들을 줄이고 보다 정확한 계산을 제공하는 새로운 요마크속도 추정식을 유도 하였다. 이 추정식은 차량의 운동학적인 특성을 보다 잘 표현 함으로써 오차의 범위를 줄이고 있다. 두 추정식 사이의 평균 오차를 살펴보면 기존의 것이 12.18% 인데 반하여 새로운 요마크속도 추정식은 오차가 6.18%로 절반 정도 밖에 되지 않는다. 따라서 요마크속도 추정식이 차량의 운동을 얼마 만큼 잘 반영하는 지가 오차에 영향을 미친다. 그러나 제한된 요마크의 형태 만으로는 차량의 운동특성을 파악하는 데는 한계가 있다.