

요-마크 생성초기 형상을 이용한 교통사고 원인규명 고찰

A Study on the Cause Analysis of Traffic Accident from Beginning Aspects of Yaw Mark

정 현 영

(부산대학교 도시공학과 부교수)

구 장 회

(도로교통안전협회 교통사고조사 연구원)

목 차

-
- | | |
|--------------------|-------------------|
| I. 서론 | 2. 실험의 목적 |
| II. 요-마크에 관한 이론고찰 | 3. 실험의 방법 및 절차 |
| 1. 요-마크의 기본개념 | IV. 요-마크 초기 특성 고찰 |
| 2. 요-마크를 특성 | 1. 마찰계수 측정 |
| 3. 요-마크를 이용한 속도 추정 | 2. 요-마크 생성 초기 특성 |
| 4. 차량에 작용하는 운동역학 | 3. 실험 결과 고찰 |
| III. 실험의 개요 | V. 결론 |
| 1. 문제 제시 | 참고문헌 |
-

ABSTRACT

정상 주행 중에 핸들을 급조향하여 요-마크가 생성되면서 일어난 사고들은 핸들 급조향의 원인을 파악해야 대책 수립이 가능하다. 즉 이들 사고의 속도산정과 차량의 운동과정 및 요-마크 생성 이전의 급 조향 당시 위험 요소를 분석해야 대책에 연결될 수 있으나, 아직 정확한 원인규명이 어려운 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 정상 주행중 핸들을 급조향하는 실험을 통하여 요-마크 생성초기 형상의 특성과 선회과정 및 속도 등을 분석하여 교통사고의 원인에 관하여 고찰하였다.

1. 서론

1996년 6월부터 1998년 2월까지 20개월간 부산시 전역에서 발생한 교통사고 중, 관할경찰서와 도로교통안전협회 부산시지부가 합동 조사한 200여건 중에 사망자수가 3명 이상인 대형교통사고만을 선별하여 현황과 특성을 분석한 결과, 요-마크 생성사고가 전체의 82% 이고, 속도계산이 가능한 사고 모두가 100km/h 이상으로 주행 중에 사고가 발생한 것으로 나타난 바, 요-마크 생성과 과속은 대형교통사고의 중요한 인자로 보고되었다.

요-마크 생성사고는 생성 이전의 급 조향 당시 위험 요소를 분석해야 하므로 인적요인 해석이 절대적으로 필요하지만, 운전자를 비롯한 탑승자 전원의 사망으로 인해 원인분석의 한계에 직면하고 있다. 따라서 충분한 실험 데이터를 통하여 분석해야 하지만, 아직 국내의 경우 연구가 부진하며, 일부 자동차 제조사에서 시행하는 실차 실험은 일반적인 주행상황의 과도상태에서 차량에 나

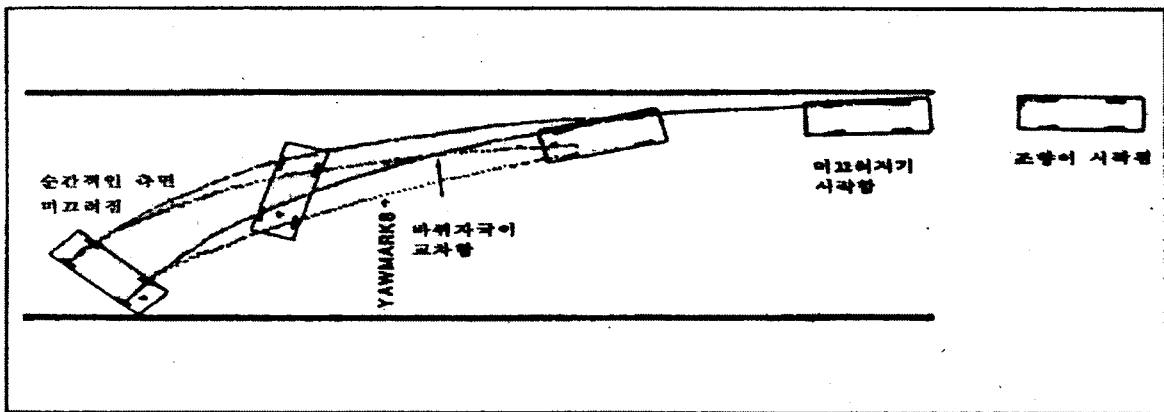
타나는 특성치를 평가할 뿐, 한계상황에서의 요-마크 실험은 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 정상 주행 중에 핸들을 급조향하므로써 생성되는 요-마크 발생 실험을 통하여 핸들 급조향에 따른 교통사고의 원인분석에 대해 검토하고자 한다.

II. 요-마크 이론 고찰

1. 요-마크의 개념

정상 주행 중에 핸들을 급조향하면 차량은 관성에 의해 직진하려 하고, 타이어는 조향된 방향으로 주행하려 한다. 차량의 속도가 충분히 높으면 차량을 직선방향으로 진행시키려는 힘인 원심력이 너무 커지기 때문에 타이어와 노면간의 마찰력으로는 이를 감당하지 못하게 되며, 타이어는 옆으로 미끄러지기 시작한다. 이 때 차량의 무게중심은 전체적인 곡선을 이루면서 미끄러지고, 뒷부분은 앞부분보다 미끄러짐이 많이 나타나, 수직축을 중심으로 자동차가 회전하게 된다. 이러한 현상을 요-잉(yawing)이라고 하고, 이 때 생성된 타이어 자국을 요-마크라고 한다. 이를 그림으로 나타내면 다음의 <그림 -1>과 같다.



<그림 -1> 핸들 급조향에 의해 옆으로 미끄러지는 운동상태

2. 요-마크의 특성

요-마크는 곡선을 이루며 선회외측 차륜에 중량이 전이되어 하중이 증가하므로 선회외측 타이어 흔적이 내측보다 진하게 나타나고, 때로는 내측 타이어 흔적이 나타나지 않아 3달 동안 남아 있는 것도 있고, 3분만에 사라지기도 한다. 외측의 전·후륜 마크의 횡거리는 좁게 시작하여 점점 넓어지며 90°를 회전하였을 때 최대가 되어 차량의 축간 거리만큼 넓은 폭으로 나타나기도 한다. 이 때 바퀴가 순간적으로 완전히 멈추게 되어 스키드 마크가 발생하기도 하는데 이럴 경우 요-마크와 스키드 마크의 구분이 어려운 경우도 있다.

특히 중요한 것은 요-마크가 나선형 곡선을 이룬다는 사실이다. 즉, 요-마크는 진행하면 할수록 점점 더 심하게 구부러지는 특성이 있으므로 첫 시작점부터의 이동궤적 측정은 신중해야 한다. 선회반경이 갑자기 작아지고 원심력이 커져 롤링(rolling) 현상이 발생하게 되므로 짐을 실은 화물차는 전도되기 쉽지만, 승용차는 무게중심이 낮으므로 전도되기 전에 타이어가 노면에서 미끄러진다. 이 때 타이어가 구르고 있는 상황에서 노면과 타이어와의 마찰에 의해 생성되는 타이어 자국인 요-마크가 생성되는 것이다.

3. 요-마크를 이용한 속도 추정

요-마크의 초기는 직선에 가까워서 곡선반경이 무한히 크지만, 진행하면 할수록 곡선반경이 점점 줄어드는 포물선 형상을 나타내므로 요-마크의 곡선반경이란 말은 사실상 논리적으로 맞지 않다. 구심력은 네 바퀴에 발생하지만 원심력은 차량의 무게중심에 작용하므로 무게중심 이동궤적을 측정하여 요-마크 생성 시작점에서의 속도를 추정할 수 있다.

급선회 시작점에서 측정하고자 하는 임의의 지점까지 이루는 호에서 현의 길이와 중앙 종거를 이용하거나 급선회 시작점과 측정하고자 하는 임의의 끝지점에 접선을 각각 긋고, 두 접선이 만나는 교각을 이용하여 이동궤적의 반경 산정이 가능하다.

차량이 옆으로 미끄러지기 시작할 때의 속도를 한계속도라 하며, 선회 중에 원심력이 마찰력인 횡방향 저항력과 같으면, 자동차가 선회할 수 있는 한계속도가 된다. 즉 $mg\mu = mV^2/r$ 가 되는데 질량(m)을 소거하고 속도(V)에 대해 다시 쓰면 $V = \sqrt{gr\mu}$ 가 되며, 경사(G)를 고려하여 $V = \sqrt{gr(\mu + G)/(1 - \mu G)}$ 로서 산정할 수 있다. 단, μ 은 횡마찰 계수, r은 곡선반경이다.

4. 차량에 작용하는 운동역학

제동, 급출발 등으로 인해 차량의 전후 방향으로 작용하는 피칭(pitching)과 회전이나 기타 상황에서 무게 중심의 전이현상으로 차체가 기울어지는 롤링(rolling) 그리고, 평면상에서 회전모멘트를 일으키는 요-잉(yawing) 등 운동하는 차량에는 세 가지 힘이 작용한다.

정상 선회 시 내측으로 작용하는 구심력과 외측으로 작용하는 원심력이 균형을 이루게 되는데, 이때 구심력 $F_{cent} = w v^2/gr$ 가 된다. 여기서 곡선반경(r)이 작아지거나 차량속도(v)가 높아지면 원심력이 커지게 되어 구심력과의 균형이 깨어진다. 만약 구심력도 원심력만큼 커지면 차량은 계속해서 안전하게 선회하고 그렇지 못하면 차량은 정상궤도를 이탈하면서 요-마크를 생성하게 된다.

III. 실험의 개요

1. 문제 제시

일반적으로 정상 주행 중에 급조향하면, 조향 방향으로 선회하려는 성질과 관성에 의한 직진성이 공존하므로 바퀴가 구르면서 옆으로 미끄러지고 차량의 뒷 뽕무니가 외측으로 벗어나는 오버스티어링 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 경험적으로 살펴보면 실제사고에서 동일측의 전·후륜 요-마크는 중첩되지 않으며, 전·후륜 횡거리는 최소한 0.3m 이상으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라 실제속도와 요-마크에 의한 계산속도의 일치 여부가 규명되지 못하고 있다. 따라서 차량의 뒷 뽕무니가 외측으로 이탈하는지와 전·후륜의 중첩성 및 급조향 시작점과 요-마크 생성 시작점간의 속도별 거리, 계산속도와 실제속도간의 오차 등이 검증되지 못하고 있다.

2. 실험의 목적

본 실험은 크게 다음과 같은 목적으로 실시되었다.

첫째, 차로와 평행한 방향 혹은 엇갈린 방향의 주행 중에 급조향 시, 외측 후륜이 조향전 외측 전·후륜 진행궤적의 연장선에서 외측으로 벗어나는지의 여부 검증이다.

둘째, 외측 전·후륜 중에 먼저 생성되는 자국 확인이다.

셋째, 급조향 시작점과 요-마크 생성 시작점간의 속도별 거리 확인이다.

넷째, 실제 주행속도와 요-마크에 의한 계산속도간의 오차 검증 등이다.

3. 실험의 방법 및 절차

차체의 조향 성능 결함으로 인한 오차를 줄이기 위해 실험 차량의 휠얼라인먼트(wheel alignment)와 토인(toe-in) 및 캠버각(camber angle)을 사전에 조절하였다. 실험은 2차에 걸쳐서 실시하였는데, 타이어 공기압을 적정수준보다 조금 높여 요-마크 생성을 용이하게 하였다. 차량에는 실험 장비만 탑재하여 하중으로 인한 오차를 최대한 줄였다. 1차 실험장소는 길이 1km 이상, 폭 약 40m 내외의 교통량이 극히 희박한 아스팔트 포장으로, 경사는 0%이다. 2차 실험장소는 왕복 6차로의 길이 약 500m, 폭 약 22m 내외의 신설 미개통 아스팔트로 경사는 역시 0%이다. 먼저 속도계산 시 필요한 마찰계수를 측정하기 위해 베리콤(VC2000PC)을 이용하여 길이방향의 급제동 테스트(skid mark test)를 속도별로 세 번에 걸쳐 실시한 후, 같은 장소에서 다시 급조향 실험을 실시했다.

<표 -2> 요-마크 생성 실험 방법

주행 방향	속도	조향 방향
차로에 평행한 방향	50	직진중 좌급조향
	60	우조향후 좌급조향
	70	직진중 좌급조향
차로에 엇갈린 방향	50	우조향후 좌급조향
	60	직진중 좌급조향
	70	우조향후 좌급조향

속도는 50~70km/h로 10km/h씩 높였으며, 케이스별 비교를 위하여 전부 좌조향하였다. 급조향전후 가속하거나 제동으로 인한 감속 등 인위적인 속도변화는 없게 하였다. 차로와 엇갈린 방향 주행 실험에서는 좌측으로 가볍게 조향한 후, 우측으로 조향하였다가 다시 좌측으로 급조향하는 방법을 취했다. 이 때 차량은 롤링 현상을 일으키므로, 요-마크 생성이 용이

해지기 때문이다. <표 -2>는 실험시 속도별 조향 방향을 나타낸다. 또한, 시작점부터 3m 간격으로 지그 카를 이동시키면서 네 바퀴자국과 무게중심 이동궤적을 측정하였다.

IV. 요-마크 생성 초기의 특성 고찰

1. 마찰계수 측정

제동직전속도 산정에 필요한 마찰계수를 구하기 위하여 베리콤을 이용하여 급제동 테스트를 실시하였다.

<표 -2> 급 제동 테스트 결과의 마찰계수값

	제동직전속도 (km/h)	제동거리 (m)	마찰계수
1차	61.2	21.8	0.68
	72.8	33.3	0.63
	82.4	41.6	0.64
2차	61.5	21.6	0.69
	69.3	25.0	0.76
	79.2	36.0	0.68

1차 실험에서는 0.63~0.68, 2차에서는 0.68~0.76으로 나타났다. 1차에서는 우천으로 인해 당시 노면이 다소 젖어 있었지만, 2차 때는 건조하기 때문에, 1차에 실험에 비해 다소 높게 나타난 것으로 판단된다. <표 -2> 급제동 테스트 결과이다.

2. 요-마크 생성 초기 특성

첫째, 차량이 차로와 평행한 방향으로 주행 중에 급조향할 경우, 외측 후륜이 조향전 전·후륜의 연장선을 외측으로 이탈하는지 여부는 세 가지 속도 모두에서 이탈하지 않는 것으로 나타났다.



<사진 -1>은 70km/h의 속도로 차로와 평행한 상태에서 급조향했을 때 생성된 요-마크와 지그-카를 이용하여 측정하는 모습이다.

<사진-1> 차로와 평행한 방향 주행중의 급조향 실험

둘째, 차량이 차로와 엇갈린 방향으로 주행 중에 급조향 했을 경우에도 첫째와 마찬가지로 조향전 전·후륜 진행궤적의 연장선을 이탈하지는 않으나 차로를 기준으로 하여 본다면 후륜이 차로 외측으로 이탈하였다가 다시 복귀하여 내측으로 진행하는 형상으로 나타났다. 즉 급조향에 의해서 외측륜이 밖으로 나가지 않고 초기 상태에서 전륜이 지나간 궤적 위로 답지하는 것으로 나타났다.



<사진 -2>는 차로와 엇갈린 상태로 주행중에 급조향 할 때, 요-마크는 차로를 이탈하지만 조향전 전·후륜 연장선을 이탈하지는 않는 것을 나타내며, 차량이 위치한 지점이 요-마크 생성 시작점이다.

<사진-2> 차로와 엇갈린 방향 주행중의 급조향 실험

셋째, 차로와 평행 및 엇갈린 방향 모두 요-마크가 생성될 때 전·후륜이 중첩되어 나타나기 시작했다. <사진 -1,2> 의 생성 초기의 요-마크는 전·후륜이 중첩되어 있으며, 앞으로 진행하면 할수록 횡거리가 점점 더 커지고 있다.

넷째, 급조향 시작점과 요-마크 생성 시작점간의 거리는 급조향 시작점 확인이 어려워 두 지점 사이의 속도별 거리과약은 곤란했다.

다섯째, 실험에서 요-마크 시작점의 속도는 급제동 테스트에서 구한 마찰계수 0.68~0.76의 중간값인 0.72를 이용하여 횡마찰계수 0.78을 구하고, 실험 시 <사진 -1>과 같은 방법으로 구한 무게중심의 이동궤적의 중앙 종거와 현의 길이를 적용하여 계산하였다. 계산속도는 6회에 걸친 실험에서 설정한 속도보다 다소 낮게 나타났으나 큰 오차는 없었다.

이러한 실험결과를 정리하면 <표 -4>와 같이 나타낼 수 있다.

<표 -5> 실험 결과

주행 방향	실험속도 (km/h)	차선 이탈 여부	전·후륜 연장선 이탈 여부	전·후륜 중첩 여부	조향점과 생성점 사이의 거리	계산속도 (km/h)
차로와 평행한 주행	50	비이탈	비 이 탈	중 첩	실 패	48.2
	60	비이탈	비 이 탈	중 첩	실 패	58.6
	70	비이탈	비 이 탈	중 첩	실 패	66.4
차로와 엇갈린 주행	50	이 탈	비 이 탈	중 첩	실 패	47.1
	60	이 탈	비 이 탈	중 첩	실 패	59.9
	70	이 탈	비 이 탈	중 첩	실 패	68.8

3. 실험 결과 고찰

사고 분석 시 오버스티어링 현상이 발생하여 외측 후륜이 조향전 외측 전·후륜 진행궤적의 연장선을 외측으로 이탈되는 것으로 분석하는 경우가 있지만, 외측으로 이탈하는 경우는 없었고, 6번의 실험 모두에서 선회 내측으로 선회하는 것으로 나타났다. 차로와 엇갈린 방향의 주행에서는 외측 후륜이 조향전 외측 전·후륜의 연장선을 외측으로 이탈한 것처럼 보이지만, 사실은 차로의 외측으로 진행하여 이탈한 것으로 보일 뿐, 조향전 외측 전·후륜의 연장선을 이탈하지는 않은 것으로 검증되었다.

또한, 요-마크 시작지점에서는 전·후륜이 중첩되는 바, 이는 차량의 속도가 낮고 조향 각도가 크기 때문일 것으로 판단된다. 그러나, 실제 교통사고에서는 한계 상황에 도달하기 전에 이미 짧은 순간이나마 조향에 따라 정상적으로 선회하게 되므로 요-마크 생성 시작점에서 차량은 이미 어느 정도 회전되어 있기 때문에 동일측의 전·후륜 요-마크가 중첩되어 생성되지는 않는 것으로 본다.

그리고, 실험속도와 계산속도간의 큰 차이가 발생하지 않았는데, 이는 요-마크가 지워지기 전에 측정하였기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 사고분석에서는 시간이 지남에 따라 요-마크가 지워질 수 있기 때문에 이 점을 충분히 감안해야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 정상 주행 중에 핸들을 급조향하면, 외측 후륜이 조향전 외측 전·후륜의 연장선을 외측으로 이탈하는 경우는 없으며, 만일 이탈하는 형상으로 나타날 때는 차로 변경중이거나 원심력 등으로 인해 차량의 무게중심의 이동방향이 차로에 평행한 방향이 아니라 엇갈린 방향이기 때문인 것으로 검증되었다.

둘째, 실제 사고에서는 경험적으로 전·후륜의 횡거리가 최소한 0.3m 이상을 유지하지만, 실험에서는 전·후륜의 요-마크 시작점이 중첩되면서 생성되는 바, 이는 차량의 속도와 조향 각도에 따른 유동적인 결과일 것으로 보이며, 원인분석 시 중첩 여부는 명확히 검토되어야 하는 것으로 나타났다.

셋째, 차량의 무게중심 이동궤적을 이용한 계산속도는 실제 주행속도보다 다소 작게 나타났으며, 실제사고 분석에서는 이러한 오차를 감안하여야 한다.

넷째, 급조향 시작점과 요-마크 시작점간의 속도별 거리 확인은 핸들을 급조향하기 시작하는 지점이 어디인지를 명확하게 측정할 수 있는 방법이 없어 공학적인 산정이 불가능하였다. 향후 연구에서는 핸들 급조향 시작점을 측정할 수 있는 장비나 기타 방법이 고안되는 등 심층연구가 요구되어진다.

참고문헌

1. Cooper, Gary W., Fricke, Lyne B., "Steering Overcorrection in Traffic Accident Reconstruction", Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute, 1990.
2. Bellion, Peter, "Project Y·A·M (Yaw Analysis Methodology) Vehicle Testing and Findings", SAE Paper. No. 970955, Society of Automotive Engineers. Inc, 1997.
3. Limpert, Rudolf, Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, The Michie Company, 1994.
4. Brach, Raymond M, "An Analytical Assessment of the Critical Speed Formula", SAE Paper. No. 970957, Society of Automobile Engineers, Inc. 1997.