

連結車輛의 재크나이프 현상에 影響을 미치는 因子에 대한 연구 A Study on the Factors that Influence Jack Knife Phenomenon of Articulated Vehicles

강대민 · 안승모

D. M. Kang and S. M. Ahn

Key Words : Jack knife(연결각의 이상 증대 현상), Articulated Vehicle(연결 차량), Articulation Angle(연결 각), Swing out(연결 차량의 관성 회전 현상), Roll Over(차체 전복 현상)

Abstract : Vehicular safety and occupant injury have been of considerable interest to the public. The dynamic response of an articulated vehicle is different from that of single body vehicle due to its geometric and inertia properties. Articulated vehicles have the tendency to jackknife if they lose driving safety. Influence of factors for driving safety of an articulated vehicle(Tractor-Semitrailers) has been analysed by the EDVTS, a kinetic analysis program for an articulated vehicle. EDVTS permits an analyst to investigate the effect of many variables in a short period of time, and enables to obtain an accurate explanation of driving safety. The factors used in the analysis include the load, friction coefficient, tire flat, increase of braking force, and trailer geometry. Based on the results, the articulation angle and driving safety were influenced remarkably by the load, coefficient of friction, increase of braking force. However, trailer geometry, such as length and width, did not affect articulation angle and driving safety

1. 서 론

자동차 산업의 급속한 발전과 더불어 자동차 사고도 이와 상관적으로 증가하였고, 자동차 사고로 인한 인명 피해 또한 심각한 사회문제로 대두된 지 오래이다. 산업화 사회의 발전은 물류의 증대를 가져왔고, 육상 물류에 있어 컨테이너 차량 등 트랙터-트레일러(tractor-trailer) 차량은 큰 부분을 차지하고 있다.¹⁾ 트랙터-트레일러 등 물류 운송용 화물 차량은 대형 차량이 주종이며 트랙터-트레일러 등 대형 차량이 사고 발생 시 야기되는 물적·인적 피해는 승용 차량 등 소형 차량에 비해 큰 피해가 야기된다. 트랙터-트레일러 등 연결 차량의 운동 특성은 단일 차량의 운동 특성과 상이하게 연결부인 커플러를 중심으로 연결체 간의 요잉(Yawing) 운동이 가능하게 설계되어져 있으므로 관절체로 연결된 다물체 운동을 하며 트랙터-트레일러가 거동 불안정

상황의 야기 시 재크나이프(Jack knife) 현상으로 불리는 연결각의 이상 증대 현상이 발생된다.²⁾

재크나이프 현상 발생 시 차량은 후부에 부가된 트레일러의 관성에 의해 횡미끌림 각이 증대되어 조향륜에 의한 코너링 포스 감소로 인해 조종 불가능한 상태가 되고, 이는 대형 교통사고를 초래하여 막대한 물적·인적 피해가 수반되므로 이를 방지하기 위한 방안이 현실 문제로 대두되었다. 그러나 현재 트랙터-트레일러의 재크나이프 현상에 대한 발생 원인, 증대 인자, 재크나이프 현상을 감소시키기 위한 방안에 대한 노력들이 불충분한 상태이다.

본 연구에서는 트랙터-세미 트레일러의 이상 거동인 재크나이프 현상의 해석을 위해 간단한 연결 차량의 모델링으로 연결 차량의 거동에 관한 다중 변수 인자의 변화 시 연결 차량의 거동 해석 결과가 신속하게 도출되며 연결 차량의 거동에 다양한 결과 값 도출이 가능한 연결 자동차의 충돌 해석 및 거동 해석 전용 소프트웨어인 EDVTS를 활용하였으며,³⁾ 차량의 하중, 무게 중심 위치, 노면 마찰계수, 타이어 플랫, 트레일러의 제동력 증가, 트레일러의 기하 구조 등의 차량의 운동에 관련된 여러 인자들을 일정한 범위 내에서 값을 변화시키면서 연결

접수일 : 2007년 2월 4일, 채택확정 : 2007년 4월 20일
안승모(책임저자) : 부경대학교 대학원
E-mail : car0749@RTSA.or.kr Tel : 051-629-9127
강대민 : 부경대학교 기계공학부

차량 거동에 있어, 인자들이 연결각의 증대($\Delta\phi$, change of articulation angle)에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보았다.

2. 차량 모델링

차량의 모델링은 EDVTS 시뮬레이션 프로그램 내에 제시된 차량 모델 중에서 트랙터는 미국 Mack 사의 CH 603계열의 트랙터 모델을 채택하였다, 전 1축 단륜, 후 2축 복륜 구조이며 트레일러는 전륜이 없이 커플러로 연결되는 후 2축 복륜 구조의 44피트 컨테이너 운반용 세미 트레일러 모델을 채택하였다.

트랙터와 트레일러의 길이, 너비, 높이 및 중심 위치 등 차량 제원에 관한 데이터는 Table 1과 같으며, 트랙터와 트레일러의 운동 특성과 결부되는 타이어 강성 계수 및 마찰계수에 관한 모델링 데이터는 Table 2와 3에 제시되어져 있다.

Table 1 Modeling data of vehicle

Dimension	Tractor	Semitrailer
Overall Length (cm)	626.74	1333.50
Overall Width (cm)	243.84	243.84
CG to Front End (cm)	180.34	640.08
CG to Rear End (cm)	-446.40	-693.42
Wheelbase (cm)	365.76	1097.28
Front Overhang (cm)	73.66	91.44
Rear Overhang (cm)	-187.32	-144.78
CG to Front Axle (cm)	106.68	548.64
CG to Rear Axle (cm)	-259.08	-548.64
Front Track width(cm)	201.93	
Rear Track width (cm)	182.88	182.88
Inter-tandem Dist (cm)	130.81	130.81
CG Height (cm)	115.19	155.83
Conn. Height (cm)	122.81	
Mass (kg)	7025.02	6152.55
Weight (N):	68947.44	60384.62
Yaw Inertia (kg-m ²)	6779.09	123591.61

3. 해석 방법

연결각의 이상 증대 현상인 재크나이프 현상의 증대 인자에 관하여 재크나이프 현상을 발생시키는 비교 조건을 선행하여 시뮬레이션 한 후, 비교 조건의 거동 특성 관련 인자를 변화시켜 거동 특성 관련 인자를 변화시킨 상태가 비교 조건에 비해 연결각의 변화정도, 연결각의 변화 속도, 연결

각의 변화가속도의 증대 정도 및 롤 오버 여부에 어떠한 영향을 미치는지 여부를 해석한다. 비교 조건의 운동 상황 입력 데이터는 Table 4와 같으며, 연결 차량의 연결각의 변화 정도, 변화 속도는 각각 Fig. 1, Fig. 2에 나타내었다. 비교 조건의 초기 거동 상태는 연결 차량의 연결각이 () 상태로 급 조향에 의한 회전 운동이 발생하나 트레일러의 하중에 의한 원심력과 관성력에 의해 트레일러 차체가 회전 원의 바깥 방향으로 회전되는 스윙아웃 현상⁴⁾이 발생되어, () 연결각이 감소되는 현상이 발생되었다. 이후 트레일러의 하중에 의한 원심력과 관성력에 의하여 트레일러의 연결각이 (+)로 전환하는 연결각 전환 현상이 나타났으며, 트레일러의 횡방향 미끄러짐이 가속되어 연결각이 47°로 최대가 된 후 연결각의 가속도가 트레일러의 전방 진행 거동에 따라 감속·가속 상태가 교차되는 불안정 상태에서 트랙터의 토잉(Towing) 토크가 트레일러의 스윙 아웃을 감소시켜, 재크나이프 현상이 소멸되는 상황으로 설정하였고 이 경우 롤오버와 같은 극한적인 위험 거동 상황은 발생치 않았다. 비교조건의 거동 해석에 관한 결과 자료는 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

Table 2 Modeling data of tire(tractor)

Tire Modeling Data	Tractor		
	Axle 1	Axle2	Axle3
Peak Friction	0.76	0.76	0.76
Slide Friction	0.54	0.54	0.54
Cornering Stiffness(N/deg)	2584	2584	2584
Slip @ Peak Mu(%/100)	0.3	0.3	0.3

Table 3 Modeling data of tire(semitrailer)

Tire Modeling Data		Semitrailer	
		Axle 1	Axle2
Peak Friction	Right	0.76	0.76
	Left	0.76	0.76
Slide Friction	Right	0.54	0.54
	Left	0.54	0.54
Cornering Stiffness(N/deg)	Right	2584.35	2584.35
	Left	2584.35	2584.35
Slip @ Peak Mu (%/100)	Right	0.3	0.3
	Left	0.3	0.3

Table 4 Input data of comparative simulation

Factor	Input data					
Velocity	60 km/h					
Steering Angle	Tractor	15 deg				
	Trailer	No Steering				
Acceleration	No acceleration					
Braking	Time	Tractor			Trailer	
		Ax1	Ax2	Ax3	Ax1	Ax2
	Starting	0	0	0	0	0
	2 sec	0	0	0	-0.6g	-0.6g

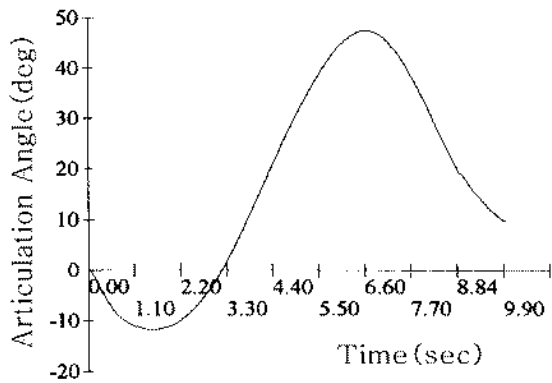


Fig. 1 The change of articulation angle

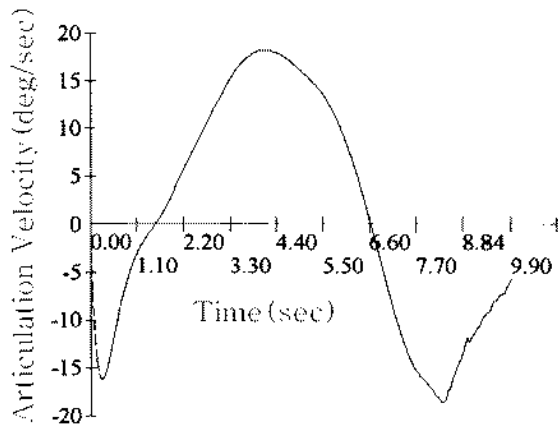


Fig. 2 The change of articulation velocity

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 트레일러의 하중 부가에 따른 $\Delta\phi_t$ 의 관계

트레일러의 하중을 비교 조건에 비해 5000kg 증가 시킨 결과, 부가된 하중은 트레일러의 관성력과 원심력을 증대시키고, 부가 하중에 의해 후방으로 이동된 무게 중심 위치는 모멘트 암을 증대시키는 역할을 하여, 요잉 모멘트가 급격히 증가되는 상태로 나타났다.⁶⁾ Fig. 3, 4는 각각 트레일러의 하중

부가 조건에서 연결 차량의 거동에 관하여 연결각의 변화 정도, 연결각의 변화 속도를 나타낸 것이다. 그래프에서 연결 차량의 초기 거동 상태는 비교 조건과 동일하게 급 조향에 의해 연결각이 (-) 상태로 증가하다가, 거동 시작 1.2초를 기준으로 트레일러의 하중에 의한 원심력과 관성력에 의한 스윙아웃 현상이 발생되어 (-) 연결각이 감소되는 현상이 발생되었다. (-) 연결각이 지속적으로 감소되어 거동 시작 2.7초경에는 트랙터와 트레일러의 연결각이 0의 상태인 일렬 정렬 상태가 나타났다. 이후 트레일러의 하중에 의한 원심력과 관성력에 의하여 연결각이 (+)로 전환하는 연결각 전환 현상이 나타났으며, 3.60초경에 연결각이 급선회 시 트레일러의 하중에 따른 원심력 과대로 인해 롤 오버되는 상황으로 도래되어 연결각이 13.9°에서 연산이 종료되었다. 트레일러의 하중 부가 및 중심 이동 조건과 비교조건의 거동 해석에 관한 결과 자료는 Table 5와 같다. 비교 조건의 상황의 최대 연결각은 47.5°인데 반해 하중 부가와 중심 이동 상황의 최대 연결각은 13.9°이며, 비교적 작은 연결각에도 안정성을 상실하고 롤 오버되는 상황으로 해석되었다.⁶⁾

Table 5 Comparison of trajectory simulation(load supplement in trailer)

Trajectory State		Swing Out	Parallel State	Max ϕ_t
Load Supplement In Trailer	sec	1.2	2.7	3.6
	ϕ_t (deg)	- 9.2	0	13.9
Comparative Situation	sec	1.6	3.2	6.7
	ϕ_t (deg)	- 11.6	0	47.5

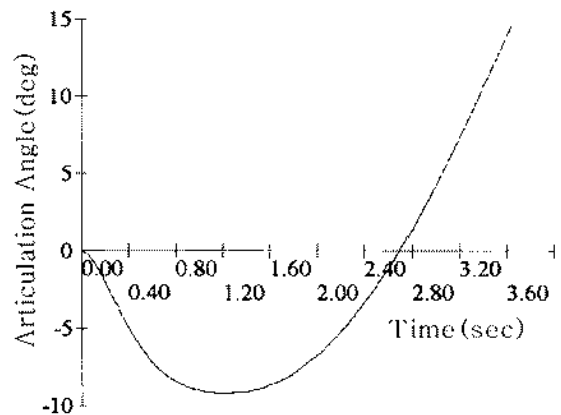


Fig. 3 The change of articulation angle

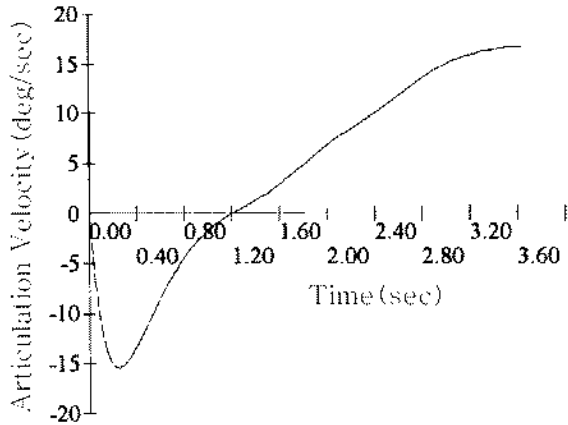


Fig. 4 The change of articulation velocity

4.2 트레일러 타이어의 최대 마찰계수 감소에 따른 $\Delta\phi_t$ 의 관계

연결 차량의 거동 특성과 상관하는 인자인 트레일러의 최대 마찰계수를 1축과 2축 모두 0.1로 하향 조정하여, 타이어 마찰계수 변화가 연결 차량의 거동 특성에 어느 정도의 영향을 미치는 가에 관해 시뮬레이션 해석한 결과, 타이어 최대 마찰계수 감소에 따른 성능 저하로 인해 트레일러에 발생하는 요잉 모멘트를 억제하지 못하여 트레일러의 연결각 증대 속도가 증대되는 상태로 나타났다. Fig. 5, 6은 각각 타이어의 최대 마찰계수 감소 조건에서 연결각의 변화 정도, 연결각의 변화 속도를 나타낸 것이다. 트레일러 타이어의 최대 마찰계수 감소 조건과 비교조건의 거동 해석에 관한 결과 자료는 Table 6과 같다.

Table 6 Comparison of trajectory simulation (reduction of tire friction force in trailer)

Trajectory State		Swing Out	Parallel State	Max ϕ_t
Reduction Of Friction Force	sec	0.8	1.6	496
	ϕ_t (deg)	-8.1	0	86.1
Comparative Situation	sec	1.6	3.2	6.7
	ϕ_t (deg)	-11.6	0	47.5

4.3 트레일러 후축부 제동력 증가에 따른 $\Delta\phi_t$ 의 관계

트레일러의 후축부 제동력을 0.6g에서 0.8g로 증대시켜 인자의 변화에 따른 연결 차량의 거동 특성을 해석한 결과, 후륜부의 파대한 제동력에 의해

트레일러의 스윙이 증대되고, 트레일러 스윙이 트랙터의 코너링 포스에 의한 자세각을 증대시켜 요잉 모멘트 및 연결각이 증대되는 상태로 나타났다.^{7,8)} Fig. 7, 8은 각각 후축부 제동력 증가 조건의 연결각의 변화 정도, 연결각의 변화 속도를 나타낸 것이고, 트레일러의 후축부 제동력 증가 조건과 비교조건의 거동 해석에 관한 결과 자료는 Table 7과 같다.

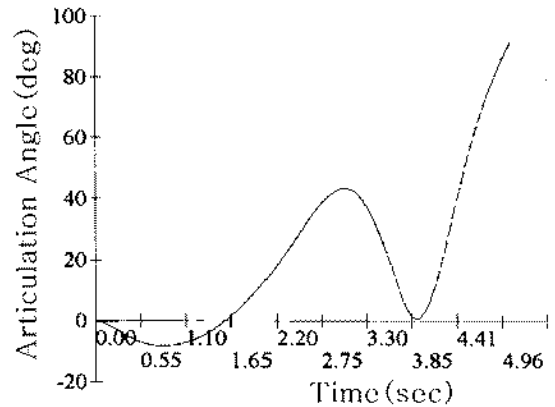


Fig. 5 The change of articulation angle

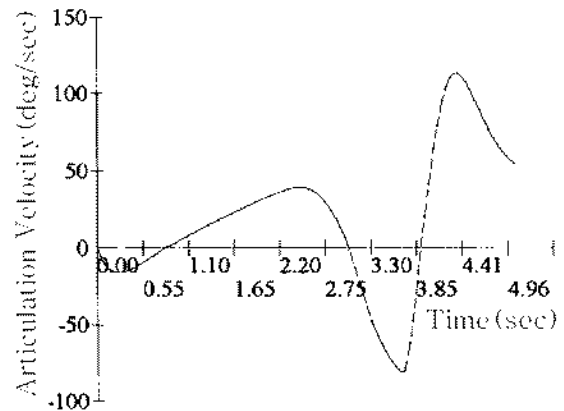


Fig. 6 The change of articulation velocity

Table 7 Comparison of trajectory simulation (brake force supplement in trailer)

Trajectory State		Swing Out	Parallel State	Max ϕ_t
Brake Force Supplement In Trailer	sec	1.3	2.6	4.05
	ϕ_t (deg)	-11.1	0	28.7
Comparative Situation	sec	1.6	3.2	6.7
	ϕ_t (deg)	-11.6	0	47.5

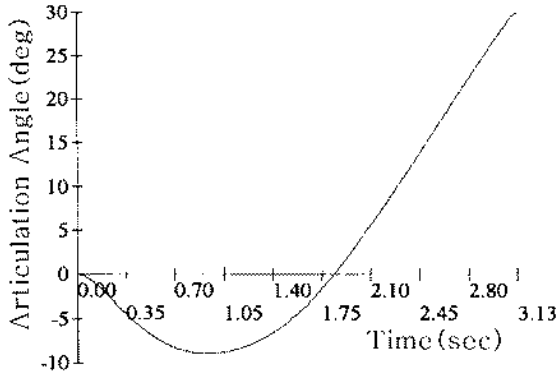


Fig. 7 The change of articulation angle

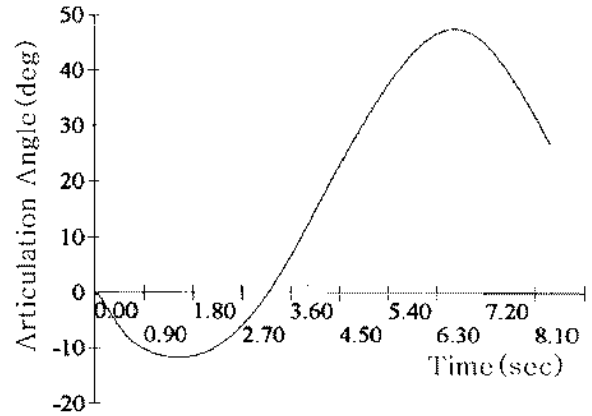


Fig. 9 The change of articulation angle

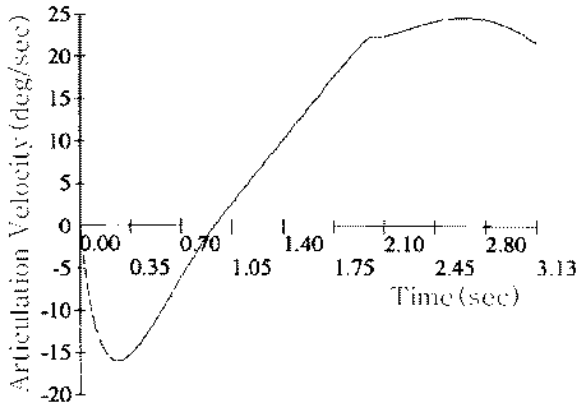


Fig. 8 The change of articulation velocity

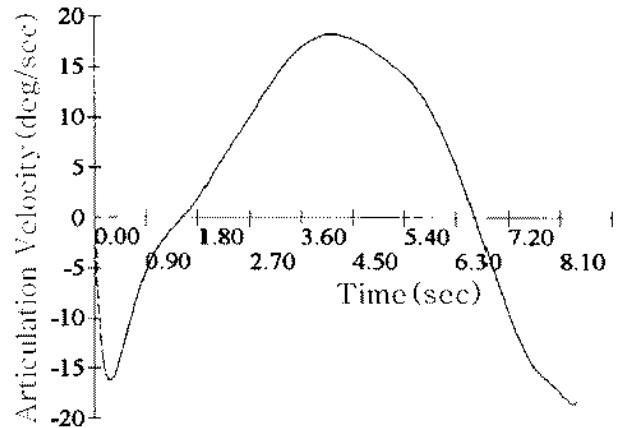


Fig. 10 The change of articulation velocity

4.4 트레일러 중량 변화 없는 기하구조 변화에 따른 $\Delta\phi$ 의 관계

트레일러의 중량 변화는 없고 트레일러 길이 증가 및 폭 감소 등 기하학적 구조와 관련된 인자의 변화에 따른 트레일러 요잉 모멘트의 변화와 이에 따른 연결각의 변화 등 연결 차량의 거동 특성을 해석한 결과, 트레일러의 길이 및 폭 변화는 연결 차량의 거동 특성에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. Fig. 9~10은 각각 중량 변화 없는 기하구조 변화 조건의 연결각 변화 정도, 연결각 변화 속도를 나타낸 것이다.

5. 결 론

EDVTS 연결 차량의 거동 해석 프로그램을 활용하여 차량의 운동에 관련된 여러 인자들이 연결 차량의 연결각의 증대 어떠한 영향을 미치는지에 대해 시뮬레이션을 통한 거동 해석을 실행하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 트레일러의 하중 부가 및 중심 거리를 증가 시,

트레일러의 요잉 모멘트가 급격히 증가되는 결과로 나타났다. 핫 코일과 같은 집중 하중을 발생시키는 화물 트레일러 후축부 적재는 요 관성 모멘트의 증가와 중심 이동에 의한 모멘트 암의 증가를 가져와 제크나이프 및 롤 오버와 같은 제동 불안정 상태를 야기할 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 핫 코일 전용 운반 차량 도입의 법제화 등이 요구된다.

2) 타이어 최대 마찰계수 감소 및 횡 마찰계수 감소, 타이어 플랫 등 타이어 성능에 관련된 인자 변화 시 연결 차량의 거동에 위험 인자로 작용된다.

3) 트레일러 후축부 제동력의 과도한 증가는 후륜부의 제동력이 코너링 포스에 의한 자세 각을 증대시켜 요잉 모멘트 및 연결각을 증대시킨 것으로 나타났으며, 적절한 제동력 조정이 요구된다.

4) 중량 변화가 없는 트레일러의 길이 증가 및 폭 감소 등 트레일러의 기하구조와 관련된 인자는 연결 차량의 거동 특성에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 도로교통안전관리공단 교통사고종합분석센터, 2006, "2005년 교통사고통계분석", 도로교통안전관리공단, 서울, pp. 72~73.
2. 林洋, 1992, "自動車事故鑑定工學", 技術書院, 日本, p. 120.
3. EDC, 1999, "HVE-2D EDVTS Program Manual", USA, chapter 2, pp. 4~11.
4. 日本自動車技術會, 1996, "自動車工學技術大辭典", 圖書出版科學技術, 서울, 基礎理論編. pp. 231~238.
5. William F. Milliken and Douglas L. Milliken, 1995, "Race car Vehicle Dynamics, SAE, USA, pp. 293~343.
6. Lynn B. Fricke, 1990, "Traffic Accident Reconstruction", Northwestern University Traffic Institute, USA. chapter78, pp. 6~22.
7. 景山克三, 景山一郎, 1996, "자동차역학", 일진사, 서울, pp. 183~187.
8. 江守一郎, 1992, "自動車事故工學", 法律新聞社, 서울, pp. 42~50.