

## 후륜 현가장치 지오메트리 변화에 따른 대형 버스의 조종 안정성 연구

### A Study on the Handling Performances of a Large-Sized Bus with the Change of Rear Suspension Geometry

서 권 희\*, 국 중 영\*, 천 인 범\*  
Kwonhee Suh, Jongyoung Kuk, Inbum Chyun

#### ABSTRACT

It is difficult to find out the kinematic characteristics of a vehicle suspension without the usage of CAE software. The application of CAE software into suspension kinematics and dynamics yields the more precise knowledge on the chassis design. In this study, the influence of the suspension geometry on the handling performances of a large-sized bus is investigated using the DADS software. The front and rear suspension of a large-sized bus are a rigid axle suspension with the four control links. The elastokinematic analysis is performed to evaluate the roll characteristics of the front and rear suspension. The elastokinematic responses are evaluated in terms of the roll center height and roll steer for various geometric parameters. The roll center height is mainly dependent on the vertical displacement of a panhard rod and the vertical displacements of lower control links affect the roll steer of a rear suspension. The parameter study with the change of rear suspension geometry is conducted to investigate the vehicle handling performances. This parameter study shows that the vertical displacement and orientation of a panhard rod influence the handling performances of a large-sized bus significantly.

주요기술용어 : Panhard rod(팬하드 로드), Roll center height(롤 중심 높이), Roll steer(롤 스티어), Understeer gradient(언더스티어 구배), Roll gain(롤 이득)

#### 1. 서 론

차량의 현가장치는 스프링상 질량과 스프링하 질량사이에 수직방향 유연 요소를 제공하여 스프링상 질량의 운동을 저감시킴과 동시에 불규칙한

---

\* 회원, 기아자동차 상용연구소

노면과 타이어의 접촉을 유지시키는 기능을 한다. 또한, 현가장치는 차량과 노면에 대한 바퀴들의 자세를 적절하게 제어하면서 구동력, 제동력, 횡력, 그리고 토오크 등을 타이어로부터 차체(Chassis)로 전달하는 기능을 수행한다. 일반적으로 중대형 차량의 현가장치들은 판 스프링 현가장치와 공기 스프링 현가장치로 구분된다. 판 스프링은 판간 마찰에 기인한 이력 감쇠(Hysteretic damping)를 보이는 반면, 공기 스프링은 강성이 하중에 따라 증가하는 고유한 비선형 스프링으로서 휠 홉(Wheel hop) 주파수가 하중이 변화됨에 따라 대체로 일정함을 유지할 뿐만 아니라 감쇠 현상도 거의 보이지 않는다. 따라서, 고급 중대형 차량의 현가장치는 공기 스프링을 채용하고 있는 추세에 있다.

한편, 차량의 운동은 롤 중심(Roll center)과 피치 중심(Pitch center)과 같은 회전 중심을 매개로 현가장치의 각 링크들이 복잡한 상호 작용을 하게 되므로 그 운동 메커니즘을 파악하기가 매우 어렵다. 그러므로, 신차개발시 현가장치의 운동 해석을 위해 이미 그 유효성이 입증된 범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 DADS 또는 ADAMS 등을 이용하고 있는 게 현실이다. Kaminaga 등은 DADS를 이용하여 비선형을 고려한 차량 롤 메커니즘을 검토하였으며, 차량 거동에 대한 롤 중심의 영향이 현가장치에 따라 다름을 보였다.<sup>1)</sup> Sohn 등은 각기 다른 휠 얼라인먼트 특성을 갖는 차량들에 대한 준정적 및 동역학 해석을 통해 현가 지오메트리 변화로 인해 차량 동역학 특성이 매우 달라짐을 보였다.<sup>2)</sup> Xia와 Willis는 4인자 평가법을 이용하여 다른 4종류의 타이어를 장착한 차량에 대해 조종 안정성 해석을 수행하여 코너링 강성이 조종 안정성에 미치는 영향을 평가하였다.<sup>3)</sup> Kawagoe 등은 바람직한 롤 거동을 얻기 위해서는 적절한 롤 중심 특성, 비선형 하중 변화 및 감쇠 계수 설계에 의해 후륜에 대한 전륜의 피칭 운동을 저감시켜야 함을 보였다.<sup>4)</sup> Yin 등은 펜하드 로드 구속 링크를 결합한 빔-액슬 현가장치의 롤 평면 모델에 비선

형 대수 방정식을 구성하여 링크 지오메트리 변화에 따른 롤 특성을 평가하였다.<sup>5)</sup> Ahn은 차량의 무게중심, 휠 베이스(Wheelbase), 휠 트레드(Wheel tread), 타이어 특성 등과 같은 차량의 제원 변화에 따른 중형 버스의 조종 안정성을 검토하였다.<sup>6)</sup> Jones는 힘-모멘트법을 이용하여 차체에 전달되는 힘과 모멘트를 검토하였고, 롤 중심에 의해 고려되지 않는 하중 이동과 트레드 변화의 효과들을 보였다.<sup>7)</sup> Suh 등은 실험계획법을 이용하여 전륜 범프 스티어 특성을 최적화하였으며, 전륜 현가 지오메트리 변화에 따른 차량 동역학 특성을 고찰하였다.<sup>8)</sup>

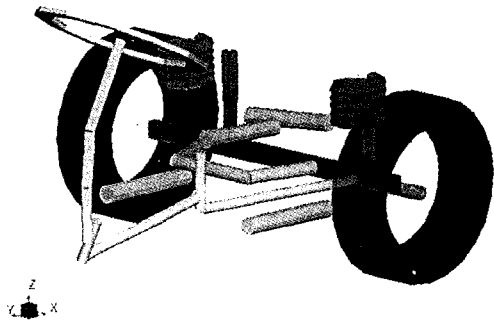
본 논문에서는 전후륜 모두 4링크식 공기 스프링 현가장치를 장착하고 있는 대형 버스를 연구 대상으로 하여 후륜 현가장치의 지오메트리 변화에 따른 전체 차량의 조종 안정성을 고찰하였다. 즉, DADS를 이용하여 전륜과 후륜 현가장치에 대한 기구 정역학 모델을 구성하여 기본적인 롤 특성을 파악하였다. 또한, 각 설계점 변화에 따른 후륜 현가장치의 롤 중심 높이와 롤 스티어 특성을 분석하기 위해 실험적 민감도 해석을 수행하였으며, 이를 통해 롤 중심 높이와 롤 스티어 변화에 민감한 설계점들을 추출하였다. 그리고, 대형 버스에 대한 전체 차량 모델을 구성하여 차신 변경 해석을 수행한 후 시험 결과와의 비교를 통해 전체 차량 모델의 신뢰성을 검증하였다. 검증된 전체 차량 모델에 스텝 조향 입력을 가하는 J-선회(J-turn) 해석을 실시하여 선택된 설계점들의 변화에 따른 조종 안정성 파라미터 연구를 수행하였다.

## 2. 대형 버스의 기구 정역학 해석

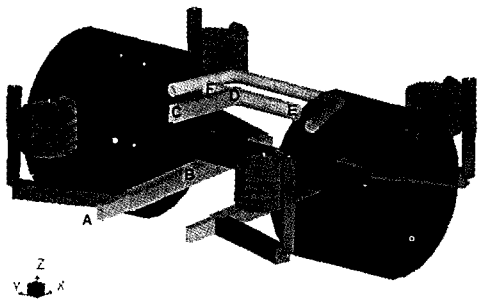
### 2.1 현가장치의 모델링

본 연구 대상 차량인 대형 버스의 전륜과 후륜 현가장치는 공기 스프링을 장착한 4링크식 차축 현가장치로서, DADS를 이용하여 Fig. 1의 (a), (b)와 같이 모델링하였다.<sup>9)</sup>

대형 버스 차량의 조향계는 스티어링 상부와 하부 칼럼, 기어박스, 피트만 암(Pitman arm), 전후 드래그 링크(Drag link), 그리고 아이들러 암(Idle arm)으로 구성되어 있으며, 기어비는 20.5:1이다. 전후륜 현가장치는 제동력과 구동력을 담당하는 2개의 로어 링크 및 1개의 어퍼 링크, 횡방향 하중을 담당하기 위한 팬하드 로드(Panhard rod), 롤 운동을 제어하기 위한 엔티롤 바(Anti-roll bar)로 구성되어 있다. 또한, 공차에서 적차까지의 하중 변화에 대해 일정한 차량 자세 유지 및 승차감 향상을 위해 판 스프링 대신 공기 스프링을 장착하고 있다.



(a) Front suspension

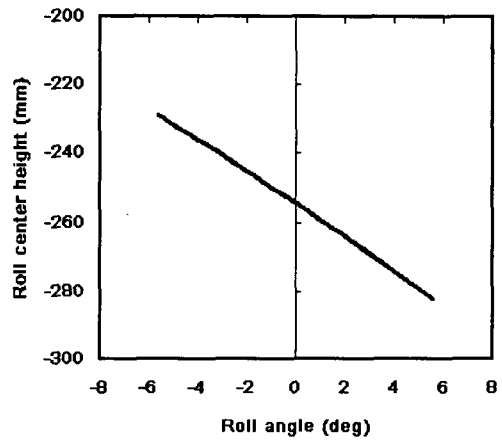


(b) Rear suspension

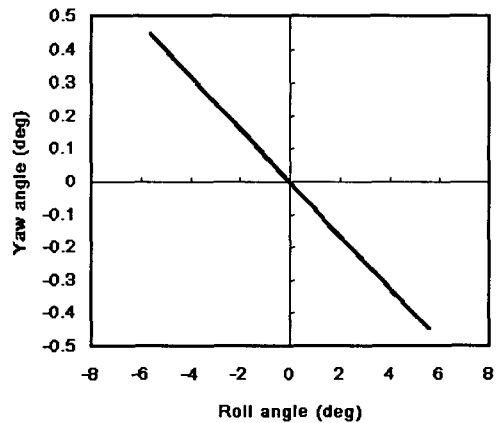
Fig. 1 Suspension models of a large-sized bus  
 (A : lower link to frame mount, B: lower link to axle mount, C: upper link to frame mount, D: upper link to axle mount, E : panhard rod to axle mount, F: panhard rod to frame mount)

## 2.2 현가장치의 롤 특성 검토

전후륜 현가장치의 롤 운동을 위해 내측과 외측 바퀴의 노면 접촉부에  $-100\text{mm} \sim +100\text{mm}$ 의 정현파 변위를 역위상으로 각각 입력시켰으며, 롤 해석을 통해 중요 롤 특성 파라미터인 롤 중심 높이와 롤 스티어 특성을 검토하였다. 롤 중심 높이는 4링크와 바퀴 중심의 기하학적 관계로부터 구해지며, 롤 스티어 값은 현가 액슬의 롤 각에 대한 요 각의 비로 정의된다.<sup>10,11)</sup> 해석을 통한 전륜 현가장치와 후륜 현가장치의 롤 특성은 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다.

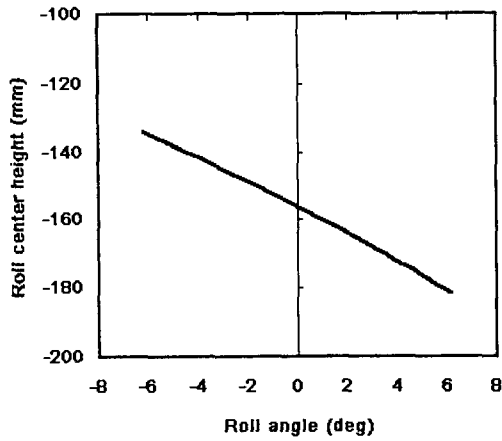


(a) Roll center height

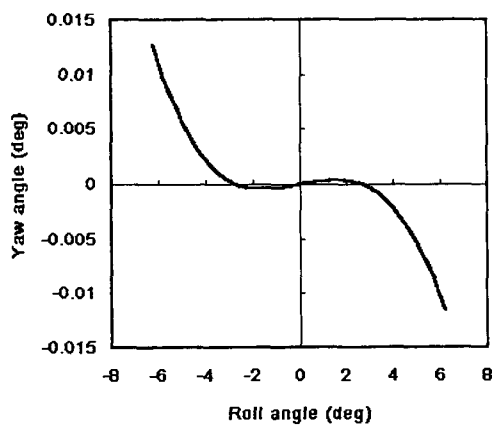


(b) Roll steer

Fig. 2 Roll characteristics of front suspension



(a) Roll center height



(b) Roll steer

Fig. 3 Roll characteristics of rear suspension

Table 1 Kinematic roll characteristics

Suspension	Roll center height (mm)	Roll steer (%)
Front	-254.3	-7.94
Rear	-156.0	-0.19

Table 1에서 전륜 현가장치는 음의 롤 스티어 값으로 전형적인 토우-아웃 특성을 보이고, 롤 중심 높이는 후륜 현가장치에 비해 100mm 가량 낮다. 또한, 후륜 현가장치의 롤 스티어 특성은

거의 0%에 가까운 토우-아웃 특성을 보이고 있다. 따라서, 전체 차량의 거동은 전경사화된 롤 축과 언더스티어 조향 특성을 통해 안정된 선회 특성을 보일 것으로 판단된다. 일반적으로 롤 중심 높이는 전후륜 현가 모두 낮은 것이 유리하며, 특히 전륜 현가에서는 접지성 확보를 위해 더욱 낮아야 한다. 낮은 롤 중심은 잭업력(Jack-up force)과 롤 각 위상을 지연시키는 작용을 하는 엔티롤 모멘트를 감소시키므로 롤 응답 특성의 향상은 물론 롤 감도 개선시키는 역할을 한다.

### 2.3 현가장치의 롤 민감도 해석

선회시 차량의 거동은 후륜 현가장치의 롤 특성에 의해 영향을 받게 된다. 따라서, 후륜 현가장치의 롤 특성 변화를 검토하기 위해 Fig. 1 (b)의 점 A부터 F까지 총 6개 설계점에 대해 섭동법(Perturbation method)을 이용하여 실험적 민감도 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Kinematic roll sensitivity in rear suspension

Hard points	Roll center height (mm)	Roll steer (%)
Original	-156.0	-0.19
A(x)	-156.0	-0.19
A(y)	-156.0	-0.37
A(z)	-156.2	-0.05
B(x)	-156.0	-0.19
B(y)	-156.0	-0.01
B(z)	-155.8	-0.32
C(x)	-156.0	-0.19
C(y)	-156.0	-0.19
C(z)	-156.0	-0.19
D(x)	-156.0	-0.19
D(y)	-156.0	-0.19
D(z)	-156.0	-0.19
E(x)	-156.0	-0.19
E(y)	-156.0	-0.19
E(z)	-156.5	-0.18
F(x)	-156.0	-0.19
F(y)	-156.0	-0.19
F(z)	-156.5	-0.18

Table 2에서 롤 중심 높이는 설계점 E와 F의 z방향 위치 즉, 팬하드 로드의 높이와 각도에 의존하는 경향을 보였으며, 롤 스티어 특성은 롤 중심 높이의 경우와 달리 로어 링크의 설계점 A의 z방향과 설계점 B의 y방향에 주로 의존하는 경향을 보였다. 따라서, 설계점 B의 y방향 위치는 실제 설계 변경이 어려우므로 제외하고, 설계점 A의 z방향 위치, 팬하드 로드의 설계점인 E와 F의 z방향 위치를 차량의 운동 특성 평가를 위한 설계 변수로 선정하였다.

### 3. 대형 버스의 선회 특성 해석

#### 3.1 전체 차량 모델

실제 차량의 운동을 모사하기 위한 대형 버스의 전체 차량 모델은 Fig. 4에서와 같이 총 44개의 강체, 7개의 원통 조인트(Cylindrical joint), 9개의 회전 조인트(Revolute joint), 3개의 구면 조인트(Spherical joint), 7개의 만능 조인트(Universal joint), 39개의 부싱, 6개의 스프링-댐퍼, 초기 속도조건 26개, 조향 구동조건 1개, 상대 회전조건 1개로 구성되어 있으며, 전체 자유도 수는 126개이다. 한편, 타이어는 DADS의 타이어 모델을 이용하였으며, 스프링 상수 데이터는 타이어 제작사의 실측값을 이용하였다.

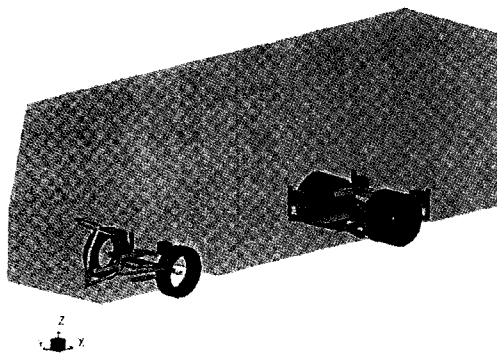


Fig. 4 Full vehicle model of a large-sized bus

#### 3.2 전체 차량 모델의 신뢰성 검증

차선 변경 해석과 실차 시험은 80km/hr의 속도로 주행중 길이 30m, 폭 3.5m 구간에서 4초 동안 실시하였으며, 전체 차량 모델의 차선 변경 해석과 실차 시험의 평가항목은 롤 각, 롤 레이트, 요 레이트, 횡가속도이다. Figs. 5~8은 전체 차량 모델의 해석결과와 시험결과를 나타낸다. 여기서 점선은 시험결과, 실선은 해석결과를 나타낸다. 해석 결과와 시험 결과를 비교해 보면 각 평가항목의 절대값 면에서는 약간의 차이가 나지만 전체적인 경향은 거의 유사하므로 전체 차량 모델의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

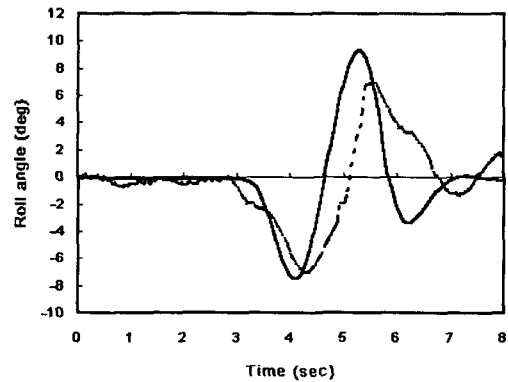


Fig. 5 Roll angle during lane change maneuver

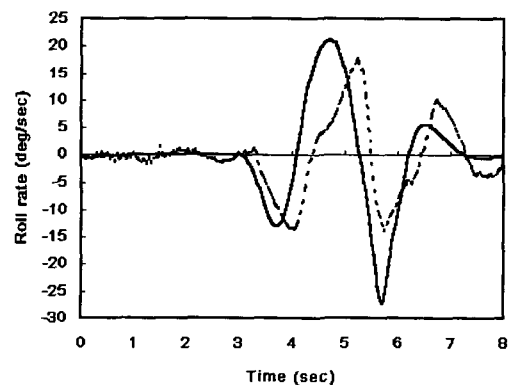


Fig. 6 Roll rate during lane change maneuver

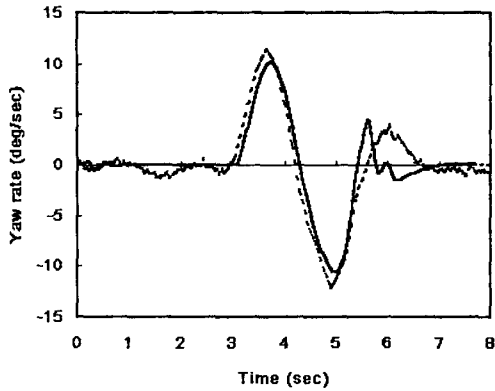


Fig. 7 Yaw rate during lane change maneuver

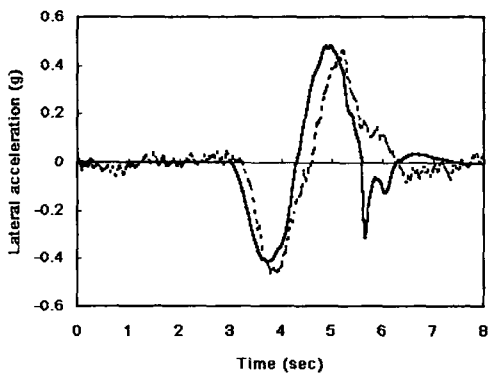


Fig. 8 Lateral acceleration during lane change maneuver

### 3.3 전체 차량 모델의 조종 안정성 파라미터 연구

2.3절의 후륜 현가장치의 롤 민감도 해석을 통해 선정된 4링크에서의 설계 변수들은 설계점 A의 z방향 위치, 팬하드 로드 설계점인 E와 F의 z방향 위치이었다. 특히, 본 연구 대상 차량인 대형 버스의 경우 공기 스프링을 장착하고 있으므로 스프링과 속업소버의 설계점 역시 차량 운동에 영향을 미치게 된다. 따라서, 조종 안정성 파라미터 연구에서는 스프링과 속업소버 설계점들의 y방향 위치를 추가로 고려하였으며, 각 해석 조건은 Table 3과 같다. Case 9와 Case 10의

경우 현 차량은 스프링 트레드(Spring tread)와 속업소버 트레드가 크므로(Wide), 스프링 및 속업소버 트레드가 감소된 경우만을 고려하였다.

Table 3 Variations of design variables for J-turn simulation

Cases	Hard points	Variations (mm)
Case 1	A(z)	+50mm
Case 2	A(z)	-50mm
Case 3	E(z)	+50mm
Case 4	E(z)	-50mm
Case 5	F(z)	+50mm
Case 6	F(z)	-50mm
Case 7	E(z),F(z)	+50mm
Case 8	E(z),F(z)	-50mm
Case 9	SPRG(y)	-50mm
Case 10	SABS(y)	-50mm

후륜 현가장치의 지오메트리 변화에 따른 전체 차량의 거동을 고찰하기 위해 Table 3의 10가지 경우에 대한 J-선회 해석을 수행하였다<sup>12)</sup>. J-선회 시뮬레이션을 위해 시속 80km/hr의 주행 상태에서 Fig. 9와 같이 전체 차량의 운동이 안정화된 직후인 3초에서부터 0.2초 동안 54 deg의 스텝 조향 입력을 가하였다.

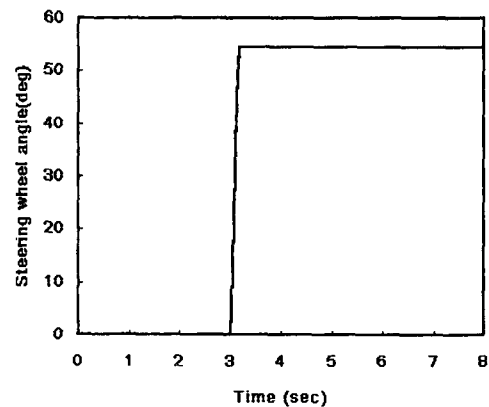


Fig. 9 Steering wheel angle for j-turn simulation

J-선회 해석에서는 조향 민감도(Steering sensitivity), 언더스티어 구배(Understeer gradient), 롤 이득(Roll gain), 그리고 횡가속도 응답시간(Lateral acceleration response time) 과 같은 4가지 항목을 선정하여 조종 안정성을 평가하였다.

조향 민감도는 조향각 변화에 대한 횡가속도의 변화를 나타내며, 횡가속도 0.15g인 점에서 이 값을 구한 후 조향각 100deg에 대한 값으로 환산하여 표시한다. 이 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$SS = 100 \frac{da_y}{d\delta_{sw}} \quad (1)$$

언더스티어 구배는 선회 응답성을 나타내는 값으로 다음 식과 같이 정의된다.

$$K = \frac{1}{G} \frac{d\delta_{sw}}{da_y} - \frac{Lg}{V^2} \quad (2)$$

여기서 G는 조향 기어비,  $\delta_{sw}$ 는 조향각,  $a_y$ 는 횡가속도, L은 휠베이스, 그리고 V는 차속을 나타낸다. 언더스티어 구배는 선형구간에 해당하는 횡가속도 0.15g인 점에서의 값을 측정한다. 이 값이 양의 값이면 언더스티어, 음의 값이면 오버스티어 특성을 갖는다.

롤 이득은 선회시 차량의 횡가속도에 의하여 발생하는 롤 각의 크기를 나타내며, 횡가속도 0.15g인 점에서 구한다. 이 값이 작을수록 승객이 안락감과 안정감을 느낄 수 있다.

횡가속도 응답시간은 방향 응답성을 나타내며, 조향 입력후 정상상태 횡가속도의 90%에 도달하는데 소요되는 시간으로 정의한다. 조종성에 비중을 둔 차량은 이 값이 작고, 승차감에 비중을 둔 차량은 이 값이 크다.

전체 10가지 경우에 대한 J-선회 해석결과는 Table 4와 같다. 본 연구 대상 차량은 조향 민감도는 작으나 언더스티어 구배는 큰 값을 가지며, 롤 이득은 작고 횡가속도 응답시간은 짧은 경향을 보이고 있다. 따라서, 본 연구 대상 차량은 조

종 안정성이 양호한 차량임을 알 수 있다.

조종 안정성 파라미터 연구 결과를 보면, 조향 민감도와 언더스티어 구배는 팬하드 로드의 높이에 가장 민감한 것으로 나타났다. 롤 이득의 경우는 팬하드 로드의 설치 각도에 가장 민감한 것으로 나타났다. 또한, 횡가속도 응답시간의 경우는 로어 링크의 프레임 마운트점과 팬하드 로드의 높이에 가장 민감한 것으로 나타났다. 속업소버 트레드 감소는 차량의 조종 안정성에 거의 영향을 주지 않았으나, 스프링 트레드 감소는 롤 이득 증가로 이어져 차량의 안정감이 다소 떨어짐을 알 수 있다.

본 연구 결과를 토대로 하여 팬하드 로드의 액슬 마운트점을 내리면서 프레임 마운트점을 올리면 차량의 조종 안정성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 Results of j-turn simulation for each case

Items Cases	Steering sensitivity (g/100deg)	U/S gradient (deg/g)	Roll gain (deg/g)	Lat. accel. response time(sec)
Original	0.78	6.17	1.57	0.20
Case 1	0.78	6.16	1.57	0.21
Case 2	0.77	6.19	1.58	0.19
Case 3	0.79	6.05	1.64	0.20
Case 4	0.78	6.18	1.50	0.20
Case 5	0.78	6.14	1.49	0.20
Case 6	0.78	6.17	1.66	0.20
Case 7	0.79	6.08	1.55	0.21
Case 8	0.76	6.28	1.58	0.19
Case 9	0.78	6.18	1.63	0.20
Case 10	0.78	6.17	1.57	0.20

#### 4. 결론

본 연구에서는 전후륜 모두 4링크식 공기 스프

링 현가장치를 갖는 대형 버스의 롤 특성을 분석하기 위해 기구 정역학 해석을 수행하였으며, 그 후 후륜 현가장치 지오메트리가 차량의 조종 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해 126자유도를 갖는 전체 차량 모델을 구성하여 J-선회 시뮬레이션을 수행하였다. 기구 정역학 해석과 J-선회 해석을 통한 조종 안정성 파라미터 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 전후륜 현가장치의 롤 중심을 연결한 롤 축은 전경사화되어 있으므로 요 운동과 롤 운동의 응답 성능 향상에 기여할 것으로 보인다.

2) 후륜 현가장치의 롤 중심 높이는 팬하드 로드의 수직 변위에 의존하며, 롤 스티어 특성은 로어 링크의 수직 변위와 횡방향 변위에 의존함을 알 수 있다.

3) 팬하드 로드의 수직 변위와 설치 각도는 후륜 현가장치의 다른 설계점들에 비해 조종 안정성에 미치는 영향이 크을 알 수 있다. 특히, 전후륜 현가장치에서 팬하드 로드의 설치 각도는 조종 안정성에 영향을 미치므로 상호 적절한 각도를 갖도록 설계해야 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) M. Kaminaga, M. Murata, and Y. Tateishi, "Factoring Nonlinear Kinematics into New Suspension Design: A CAE Approach to Vehicle Roll Dynamics", SAE 940871, 1994.
- 2) H. S. Sohn, et al., "The Influences of Chassis Geometric Characteristics on Vehicle Dynamic Performances", SAE 940872, 1994.
- 3) X. Xia and J. N. Willis, "The Effects of Tire Cornering Stiffness on Vehicle Linear Handling Performance", SAE 950313, 1995.
- 4) K. Kawagoe, K. Suma, and M. Watanabe, "Evaluation and Improvement of Vehicle Roll Behavior", SAE 970093, 1997.
- 5) Q. Yin, I. Stiharu, and S. Rakheja, "Kinetostatic Analysis of a Beam-Axle Suspension with Panhard Rod Restraining linkage", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 19, No.1, pp.108-123, 1998.
- 6) K. W. Ahn, "Analysis of the handling and Ride Comfort Characteristics of a Medium Bus in a Single Lane Change Manoeuvre", SAE 982773, 1998.
- 7) R. A. Jones, "Understanding Vehicle Roll Using Mechanism Simulation Software", SAE 1999-01-0030, 1999.
- 8) K. H. Suh, Y. K. Lee, and H. S. Yoon, "Optimization of Front Bump Steer Using Design of Experiments", SAE 2000-01-1617, 2000.
- 9) DADS User's Guide, Rev 9.5, Computer Aided Design Software, Inc., 2000.
- 10) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, 1992.
- 11) D. C. Jones, Tyres and Vehicle Handling, SAE International, 1995.
- 12) ISO 7401:1988 (E), Road Vehicles-Lateral Transient Response Test Methods, 1988.