

## 저상굴절차량의 주행해석을 이용한 전차륜 조향 알고리즘 개발

전 용 호<sup>1)</sup> · 박 태 원<sup>\*2)</sup> · 이 수 호<sup>1)</sup> · 김 덕 기<sup>3)</sup> · 문 경 호<sup>4)</sup>

아주대학교대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 아주대학교 기계공학공부<sup>2)</sup> · (주)우진산전<sup>3)</sup> · 한국철도기술연구원<sup>4)</sup>

### Development of the All-Wheel-Steering Algorithm using Dynamic Analysis of the Bi-modal Vehicle

Yong-Ho Jeon<sup>1)</sup> · Tae-Won Park<sup>\*2)</sup> · Soo-Ho Lee<sup>1)</sup> · Duk-Gie Kim<sup>3)</sup> · Kyung-Ho Moon<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

<sup>3)</sup>Woojin Industrial System Company, 1108-6 Namchon-ri, Oksan-myeon, Cheongwon-gun, Chungbuk 363-911, Korea

<sup>4)</sup>Korea Railroad Research Institute, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

(Received 26 June 2007 / Accepted 24 August 2007)

**Abstract :** The bi-modal vehicle is composed of two car-bodies and three axles. Each axle of the vehicle has an independent suspension and all wheels are steerable. Since the bi-modal vehicle has longer wheelbase than most urban buses, the All-Wheel-Steering(AWS) system is adapted for to ensure safe driving and proper turning radius on a curved road. This paper proposes an AWS control algorithm for stable driving of bi-modal vehicle. Steering angles and directions of each axle of bi-modal vehicle changed according to the driving environment and steering modes. In the case that front and rear axles should be steered in opposite directions is a negative mode, and the other case that the axles should be steered in the same direction is a positive mode. For example, in the positive mode, front and rear axles are steered in the same direction, while in the negative mode, they are steered in the opposite direction. A multibody model of the vehicle is used to verify the performance of the steering algorithm and simulation results of 2WS are compared with those of AWS under the same condition.

**Key words :** All wheel steering(전 차륜 조향), Bi-modal vehicle(바이모달 저상굴절차량), Vehicle dynamic analysis(차량 동역학 해석)

#### Nomenclature

- $\alpha$  : articulation, rad
- $\delta_1$  : axle1 steering angle
- $\delta_2$  : axle2 steering angle
- $\delta_3$  : axle3 steering angle
- L1 : distance between axle2 and articulation point
- L2 : distance between axle3 and articulation point
- P1 : distance between body1 virtual rigid axle and axle2

- P2 : distance between body2 virtual rigid axle and axle3
- d : distance between axle 1 and body1 virtual rigid axle

#### 1. 서론

최근 자동차와 전동차의 장점을 갖춘 하나의 통합적 모델로써 새로운 저상굴절차량이 검토되고 있다. 저상굴절차량은 2량 1편성으로 연결하여 운행하는 차량이고, 버스 및 전동차수송량의 중간규모이며, 정밀 정차가 가능한 특징을 가지고 있다. 조향 방식은 2WS(2 wheel steering), 4WS(4 wheel steering)

\*Corresponding author, E-mail: park@ajou.ac.kr

AWS(All wheel steering)으로 나눌 수 있다. 현재 국내에서 운행되는 대부분의 차량은 2WS(2 wheel steering)를 사용하고 있고, 외국의 경우에는 일부 고급 승용차 및 다량 편성 차량에서 AWS(All wheel steering)가 사용되고 있다. 저상 굴절차량의 경우 축거가 길기 때문에 선회 시 회전반경이 커져 운전자가 원하는 선회 반경을 얻을 수 없다. 따라서 시내 주행을 하는 저상굴절차량의 경우 안전한 선회를 위해 AWS(All wheel steering)이 반드시 필요하게 된다. 4WS시스템의 대부분은 자동차의 주행속도, 핸들 조향각, 요우속도(Yaw Velocity) 등의 함수로서 후륜 조향각을 제어하는 방법을 사용하고 있다.<sup>1,4)</sup> 그리고 이러한 후륜조향각의 제어를 통해서 저속주행에서의 조종성과 고속주행에서의 직진안전성을 대폭으로 향상시켰고, 그에 대한 연구결과도 많이 발표되었다.<sup>5-7)</sup> 또한 6WS시스템은 고속주행에서 조종안전성을 향상시키고 저속주행에서는 선회반경을 최소화함과 동시에 전 방향으로 직진주행이 가능하다는 점과 하중을 배분함으로써 급가속이나 급제동시 피치각을 감소시키는 구조적인 안전성을 가진다는 연구가 수행된 바 있다.<sup>8,9)</sup> 그러나, 기존의 4WS/6WS 차량과 달리 본 연구 대상인 저상굴절차량은 2량을 1편성으로 구성되어 있고, 첫 번째 차체에 2축, 두 번째 차체에 1축, 총 3축으로 이루어져 있다. 저상굴절차량의 전 차륜 조향 주행모드는 후륜이 전륜의 방향과 반대로 조향되는 역위상 조향(Negative mode)과 후륜의 방향이 전륜과 같은 방향으로 조향되는 동위상 조향(Positive mode)으로 나누어져 있다. 저상굴절차량은 속도에 따라 저속의 경우 차량의 조작성 향상을 위해 역위상 조향으로, 고속의 경우 차량의 안전성 향상을 위해 동위상 조향으로 한다. 또한 다량편성으로 인해 각 차체 간에 굴절각이 발생하고, 굴절각은 후륜의 조향뿐만 아니라 굴절차량 전체 조향에 중요한 역할을 한다. 따라서 저상굴절차량의 AWS(All wheel steering)는 차량속도, 주행모드, 차체간의 굴절각 등의 주행상황에 따라 후륜을 조향하는 시스템이다. 그러나 국내의 전 차륜 조향 알고리즘을 적용한 저상굴절차량의 주행 특성에 관한 연구 실적은 미비하다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 저상굴절차량에

적용되는 AWS 제어 알고리즘을 제안하고, 범용 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS<sup>10)</sup>를 이용하여 모델링한 차량 모델을 통해 AWS 알고리즘을 검증하였다. 또한 동일한 조건하에서 전 차륜 조향 알고리즘을 적용한 모델(AWS)과 적용하지 않는 모델(2WS)의 주행특성을 해석 및 비교하고, 전 차륜 조향방식을 적용한 차량에 대한 실효성을 검증하였다.

## 2. 저상굴절차량의 제원

본 연구의 대상인 저상굴절차량은 현재 국내에서 운행 중인 굴절버스보다 약 2.9~3.2m 긴 축거를 가지고 있다. 축거를 포함한 저상굴절차량의 전체제원은 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Bi-modal vehicle specification

Division		Bi-modal vehicle
Overall length (mm)		17990
Overall width (mm)		2540
Overall height (mm)		3120
Wheelbase (mm)	Front section	7700
	Middle section	-
	Rear section	7575
Over hang (mm)	Front	1190
	Rear	1525
Wheel tread (mm)	Front	2204
	Rear	2161
Tire	1st Axle	275/70R22.5
	2nd Axle	385/65R22.5
	3rd Axle	385/65R22.5
Gross Vehicle Weight (kg)		16850

## 3. 전 차륜 조향 알고리즘

저상 굴절 차량에 적용되는 AWS 알고리즘을 제안하였고, 2축 조향각은 1축 조향각에 의하여 결정되어지고, 3축 조향각은 가상 고정 축을 포함한 각 축간거리 및 굴절각에 의해 결정됨을 나타내었다. Fig. 1은 저상 굴절 차량의 관절(Articulation) 부분까지 고려한 저상굴절차량의 자전거 모델을 나타낸다. 여기서, 가상 고정 축(Virtual rigid axle)의 경우 차량의 선회 각도에 관계없이 일정하다는 가정이 포함되어 있다. 전, 후 차체에 존재하는 가상 고정축 연장선의 중심이 선회 중심으로 정의된다.

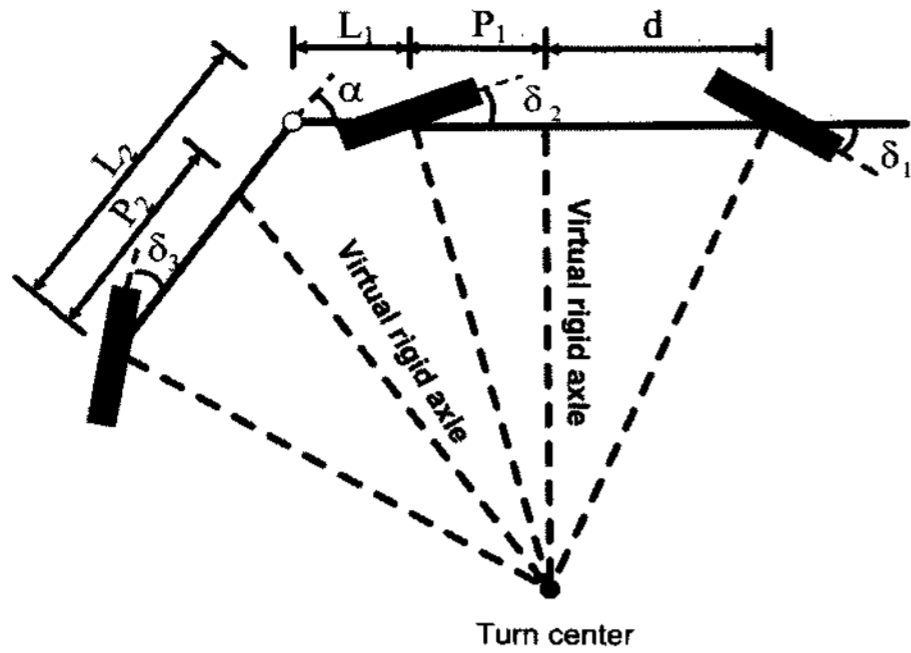


Fig. 1 Bicycle model of bi-modal vehicle

### 3.1 2축 조향각

일반적으로 후륜 2축의 조향각( $\delta_2$ )은 Fig. 2와 같이 1축 조향각에 의해 정해진다. 2축의 조향각은 식 (1)과 같이 선회 중심으로부터 앞 차체까지의 거리 ( $R_1$ )와 가상 고정축과 후륜 2축까지의 거리( $P_1$ )에 의해 결정되게 된다.

$$\tan \delta_2 = \frac{P_1}{R_1} \quad (1)$$

여기서,  $P_1$ 은 상수이다. 따라서  $R_1$ 값을 계산할 수 있으면, 2축의 조향각을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 2에서 1축의 조향각은 식 (2)와 같이 정의할 수 있게 된다.

$$\tan \delta_1 = \frac{d}{R_1} \quad (2)$$

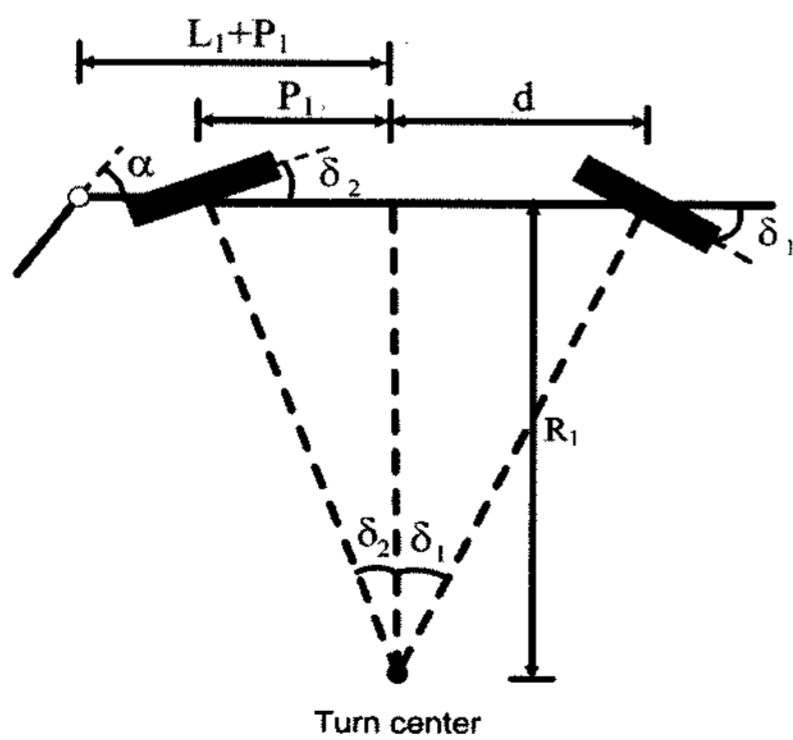


Fig. 2 Bicycle model of the 2nd axle steering angle

식 (2)에서  $R_1$ 에 대한 식으로 정리하여 식 (1)에 대입하면, 식 (3)을 얻을 수 있다.

Table 2 Bi-modal vehicle specification

Variable	Description	Value (mm)
$\alpha$	Articulation angle	-
$\delta_1$	Axle1 steering angle	-
$\delta_2$	Axle2 steering angle	-
$\delta_3$	Axle3 steering angle	-
$L_1$	Distance between axle 2 and articulation point	1123
$L_2$	Distance between axle 3 and articulation point	6452
$P_1$	Distance between body1 virtual rigid axle and axle2	2900
$P_2$	Distance between body2 virtual rigid axle and axle3	3200
$d$	Distance between axle 1 and body1 virtual rigid axle	5400

$$\delta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_1}{R_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{P_1 \times \tan \delta_1}{d}\right) \quad (3)$$

식 (3)의 상수값은 Table 2 굴절차량의 제원으로 부터 얻을 수 있으며, 2축의 조향각( $\delta_2$ )은 전륜 조향각( $\delta_1$ )에 대한 함수의 형태로 나타나게 된다.

### 3.2 3축 조향각

3축의 조향각은 가상 고정 축(Virtual rigid axle)을 포함한 각축간 거리, 굴절각에 의해 결정된다. Fig. 3에서 3축의 조향각( $\delta_3$ )은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

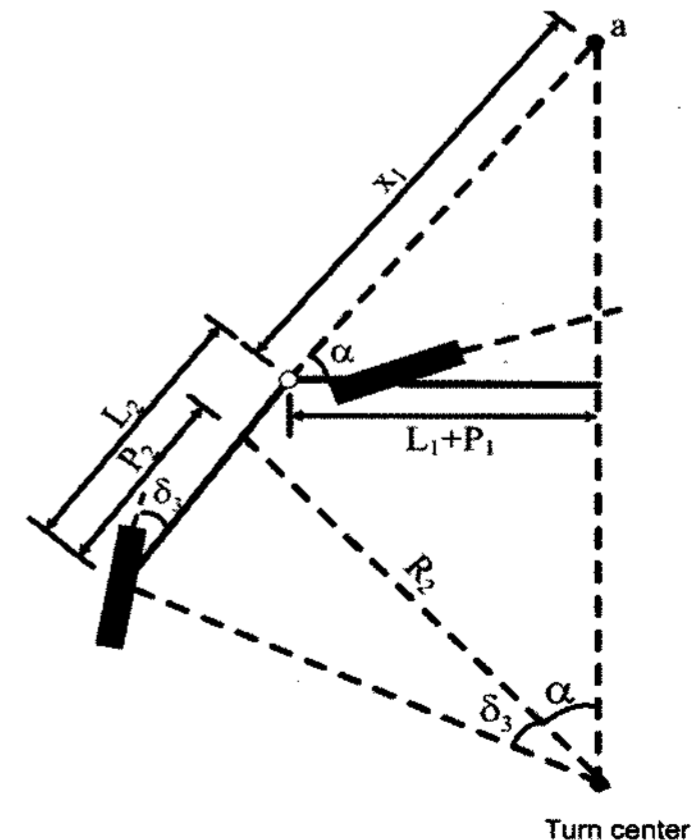


Fig. 3 Bicycle model of the 3rd axle steering angle

$$\tan \delta_3 = \frac{P_2}{R_2} \quad (4)$$

선회 중심으로부터 뒤 차체까지의 가상 고정축의 길이( $R_2$ )를 알면 3축의 조향각도 알 수 있게 된다. 뒤 차체의 연장선과 앞 차체 가상 고정 축 연장선의 교점을 a점이라 할 때, 굴절점과 a점 사이의 거리를  $x_1$ 라고 가정하면, Fig. 3으로부터 식 (5), (6)를 정의할 수 있게 된다.

$$\tan \alpha = \frac{(L_2 - P_2) + x_1}{R_2} \quad (5)$$

$$\cos \alpha = \frac{L_1 + P_1}{x_1} \quad (6)$$

식 (6)에서  $x_1$ 에 대해 식을 정리하여 식 (5)에 대입하면  $R_2$ 를 식 (7)과 같이 표현할 수 있게 된다.

$$R_2 = \frac{(L_2 - P_2) + \frac{L_1 + P_1}{\cos \alpha}}{\tan \alpha} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (4)에 대입하면, 식 (8)과 같이 3축의 조향각을 구할 수 있게 된다.

$$\delta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{P_2}{R_2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{P_2 \times \tan \alpha}{(L_2 - P_2) + \frac{L_1 + P_1}{\cos \alpha}} \right) \quad (8)$$

3축의 조향각은 굴절각( $\alpha$ )에 대한 함수로 표현될 수 있으며 식 (8)의 상수들은 Table 2에서 알 수 있다.

## 4. 저상굴절차량의 동역학 모델

### 4.1 동역학 모델링

본 연구에서는 앞에서 언급한 후륜 조향각에 의해 차량이 어떤 거동을 보이는지 확인하기 범용 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS<sup>10)</sup>을 이용하여 동역학 모델을 구성하였다. 본 연구 대상인 저상굴절차량의 1축은 독립식 현가장치로 더블 위시본형식이며, Fig. 4와 같이 모델링하였다. 조향장치는 링크기구인 피트만 암, 타이로드, 너클 암을 거쳐 너클 스피들로 전달된다. 너클 스피들은 그 움직임에 의해 킹 핀을 중심으로 한 회전 운동을 하기 때문에 차륜의 움직임을 바꾸게 된다. 그리고 좌/우의 너클은 너클 암을 통해 타이로드와 연결되어 한쪽바퀴의

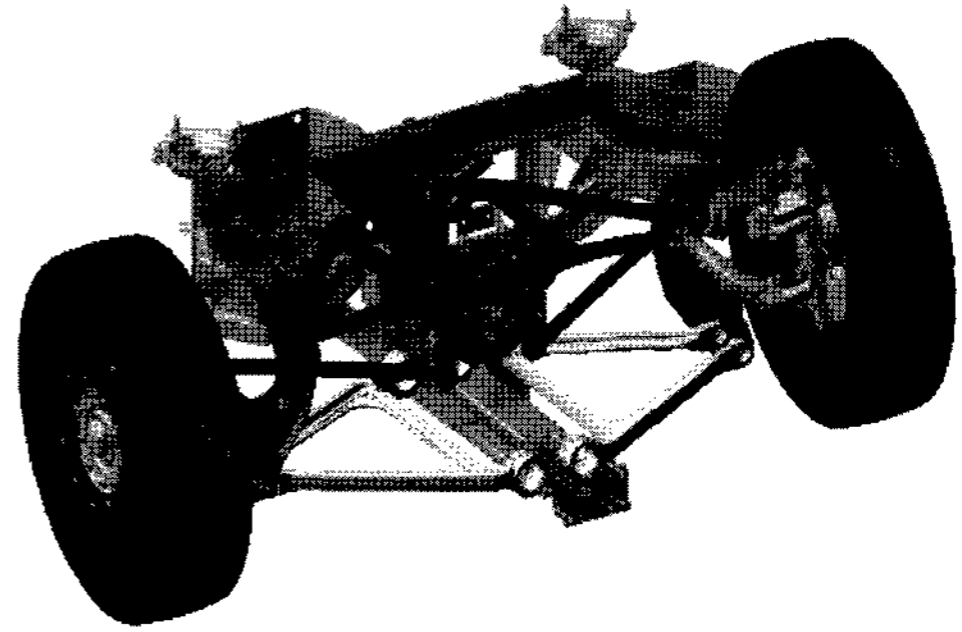


Fig. 4 1st axle suspension model

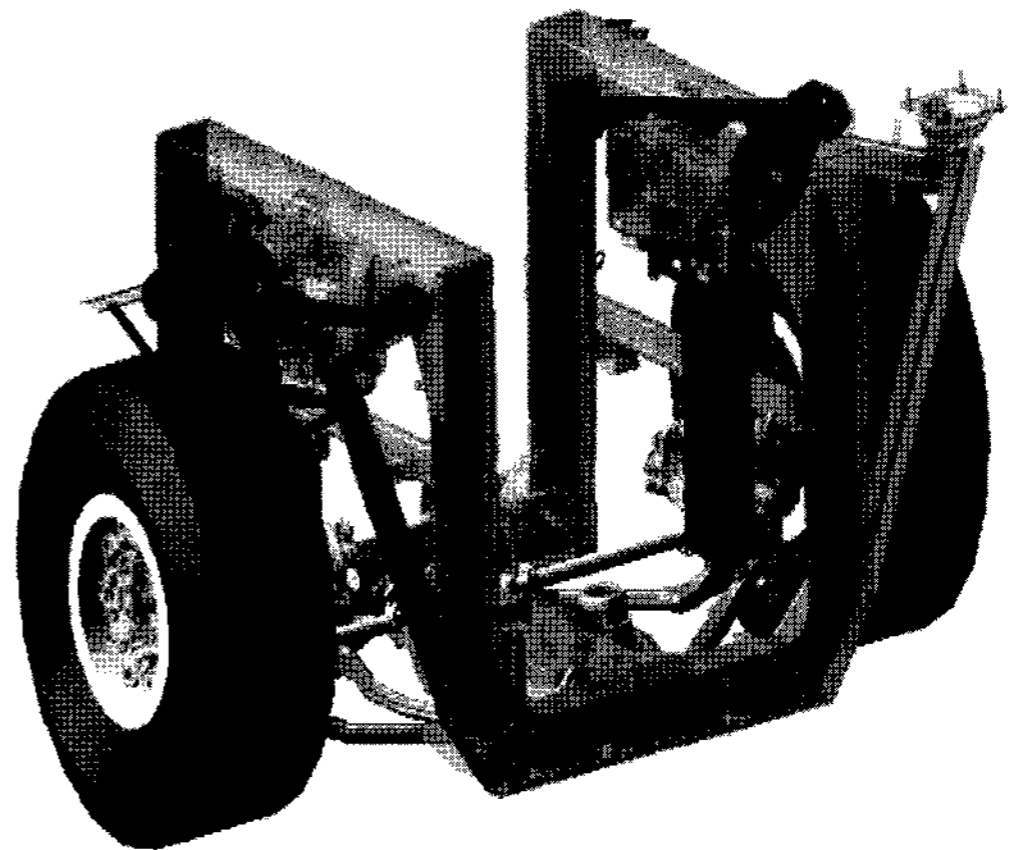


Fig. 5 2nd, 3rd axle suspension model

움직임을 반대쪽 바퀴로 전달하도록 되어 있다.

2축과 3축 역시 독립식 현가장치로 더블 위시본형식이며, Fig. 5와 같이 모델링하였다. 조향장치는 링크기구인 전륜과 달리 2개의 피트만 암과 타이로드, 너클 암을 거쳐 너클 스피들로 연결되어 있고, 서브 프레임과 피트만 암에 사이에 연결되어 있는 실린더의 병진방향 변위에 의해 킹 핀을 중심으로 한 회전 운동을 하기 때문에 차륜을 움직인다. 그리고 좌/우 너클은 너클 암을 통해 타이로드와 커넥팅 로드와 연결되어 한쪽 바퀴 움직임을 반대쪽 바퀴로 전달한다. 이렇게 구성한 차량모델은 74개의 강체, 93개의 조인트, 3개의 힘 요소로 구성되며, 전체 19 자유도를 갖는다. 타이어는 수학적 모델인 Magic Formular 계산식을 사용하였다.<sup>5)</sup>

Fig. 6에서와 같이 각 축의 조향, 현가 및 차체를 고려하여 저상굴절차량의 전체 동역학 모델을 구성하였다.

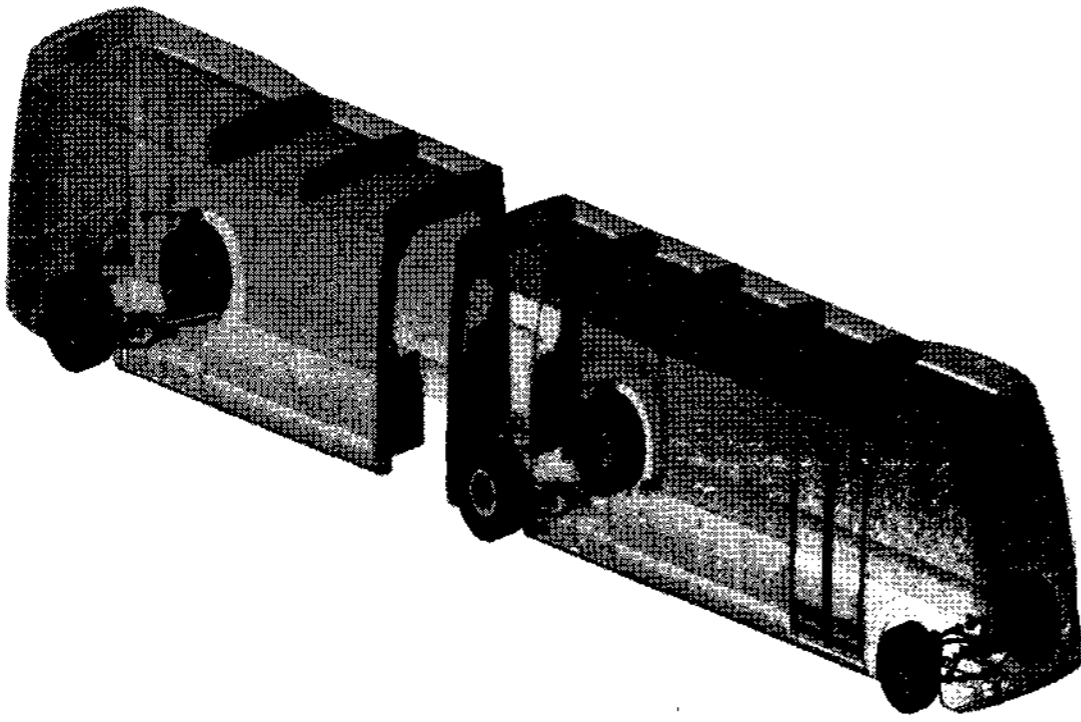


Fig. 6 Full car model of bi-modal vehicle

### 4.2 축하중 해석

축하중 해석은 차량동역학 모델의 정확성 및 신뢰성을 검증하기 위해 실시하였다. 축하중 해석을 하기 위해 서스펜션이 지지하는 스프링 상부 질량(Sprung mass)과 서스펜션을 지지하는 스프링 하부 질량(Unsprung mass)으로 나누었다. 차체 및 바디는 스프링 상부 질량(Sprung mass)으로 모델링하였고, 각 축의 차축과 타이어의 질량은 스프링 하부 질량(Unsprung mass)으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 축하중 해석 결과는 Table 3을 통해 알 수 있다. 실차 축하중과 동역학 해석에 의해 나온 축하중 결과가 1축, 2축, 3축 모두 오차 범위 내에 있음을 알 수 있었고, 또한 저상 굴절차량의 정적 하중 배분이 적절함을 알 수 있고, 축하중 해석을 통해 차량 동역학 모델이 신뢰성 있는 모델임을 확인 할 수 있다.

Table 3 Axle weight comparison

	1st Axle	2nd Axle	3rd Axle	Sum
Real weight (kg)	3470	5730	7650	16850
Analysis result (kg)	3425.6	5497.7	7926.8	16850
Error	(1.3%)	(4%)	(3.5%)	(0.0%)

## 5. 저상굴절차량의 주행특성 해석

차량 동역학 모델에 AWS 알고리즘을 적용하면 저상 굴절 차량의 주행 특성을 알 수 있게 된다.

### 5.1 정상원 선회 해석

AWS 적용에 따른 동역학 모델의 적합성 여부를

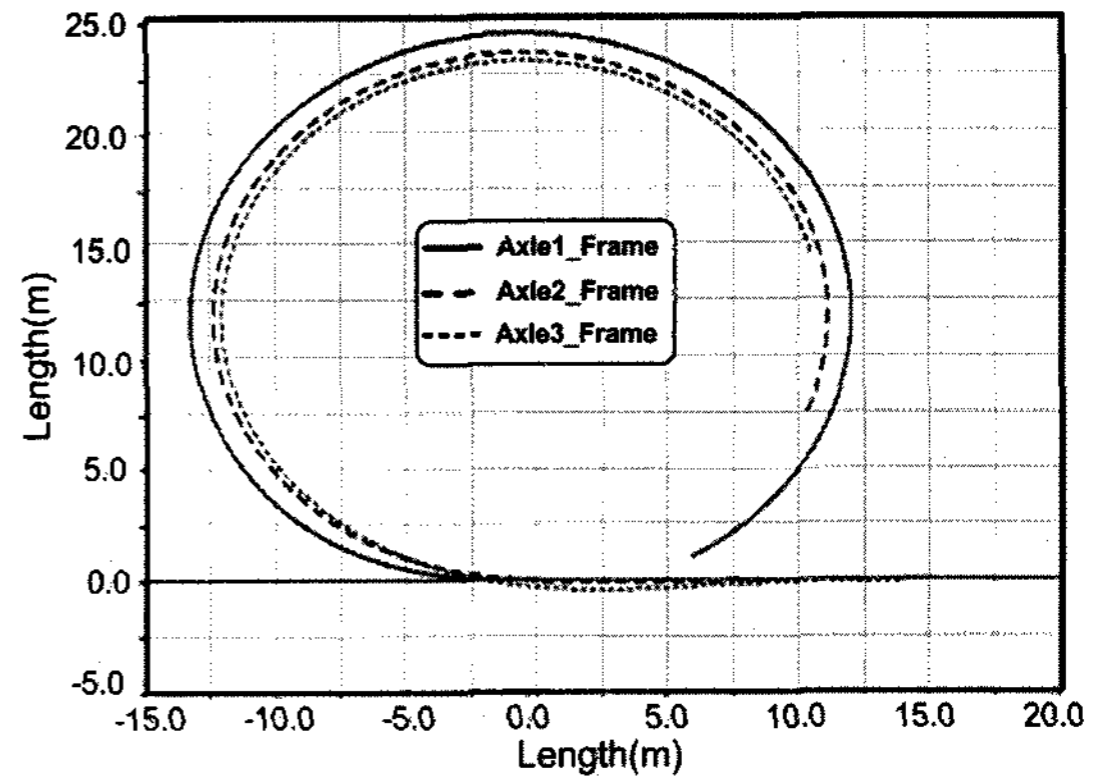


Fig. 7 Vehicle trajectory during constant radius turn

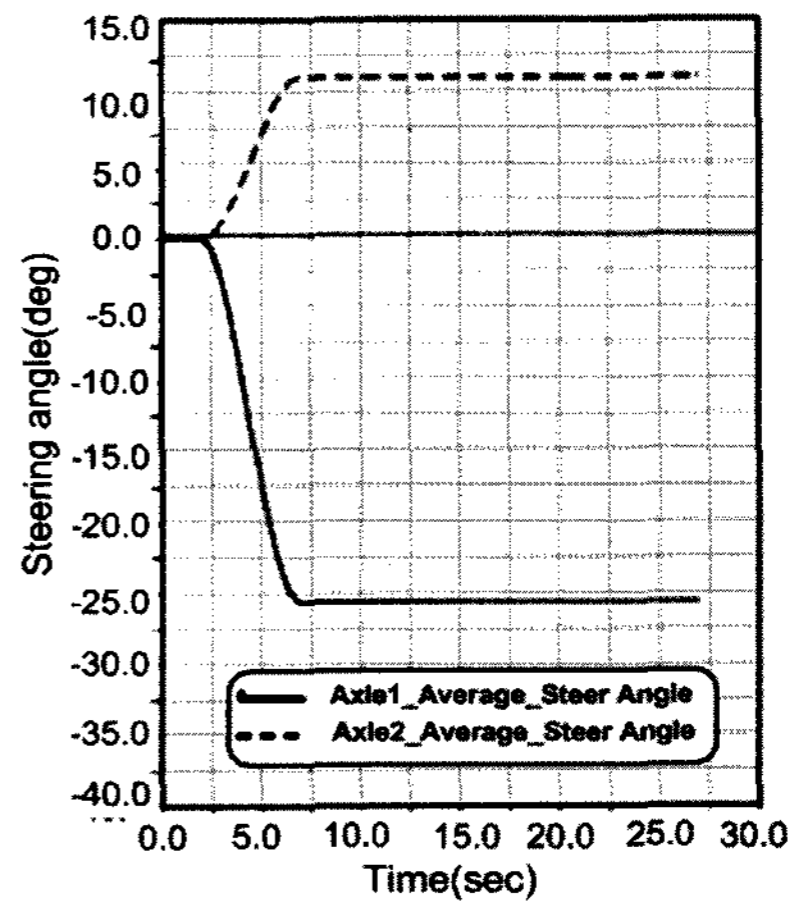


Fig. 8 1st,, 2nd axle steering angle

판단하기 위해 차량선회 해석 시 가장 많이 사용하는 정상원 선회 해석을 실시하였다. 동역학 모델에서 차량의 선회 궤적은 차속, 전륜 조향 입력각에 따라 차이가 난다. 정상원 선회 해석은 차속 10km/h의 일정한 속도로 주행되도록 하였고, 평균 전륜 조향각은 25.5°가 되도록 계단함수를 이용하여 입력하였다. 이 때 타이어와 지면과의 미끄럼각(Slip angle)은 거의 발생하지 않는다. Fig. 7은 각축 중심점의 궤적을 보여주고 있다. 각 축이 동심원을 그리며 선회하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 1축과 2축의 평균 조향각의 변화를 나타내고 있고, Fig. 9는 굴절각(Articulation angle)과 3축 조향각의 변화를 보여주고 있다. 2축은 1축에 의해, 3축은 굴절각에 의해 조향되는 것을 확인할 수 있다.

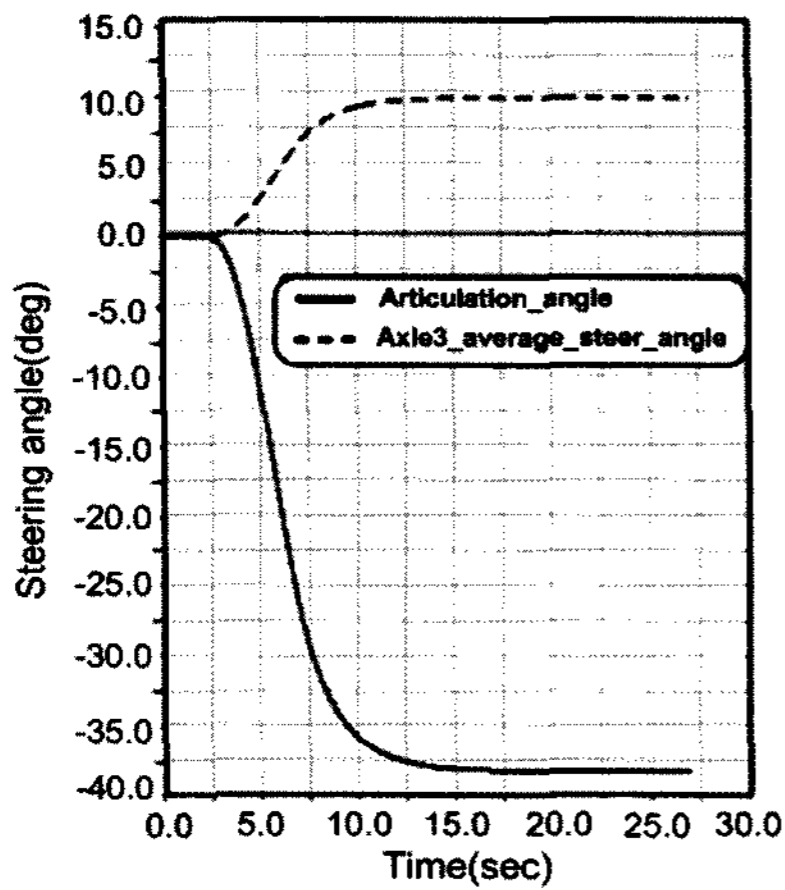


Fig. 9 3rd axle steering angle and articulation angle

### 5.2 교차로 주행 해석

저상 굴절 차량 AWS 채택의 가장 큰 목적은 회전 반경 축소를 통한 원활한 시내 주행에 목적이 있다. 교차로 주행 상황에서 일반적인 2WS 차량의 경우 긴 축거와 차체 간의 굴절각으로 인해 선회하기 곤

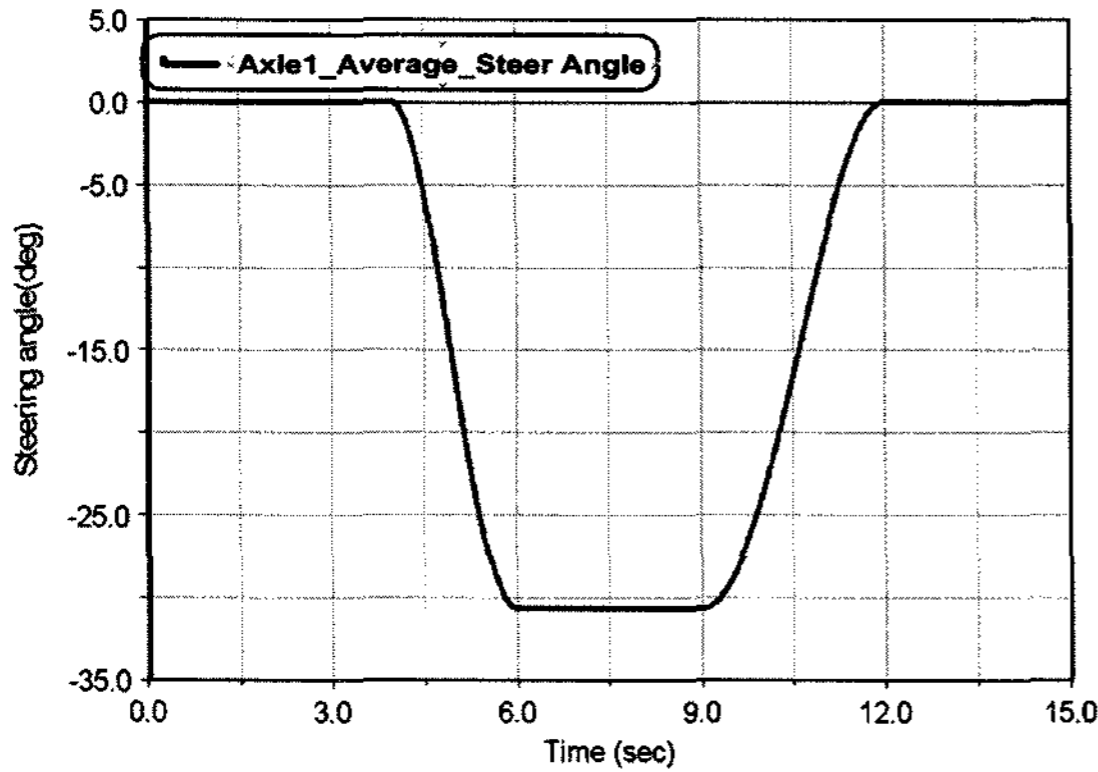


Fig. 10 Front steering angle input

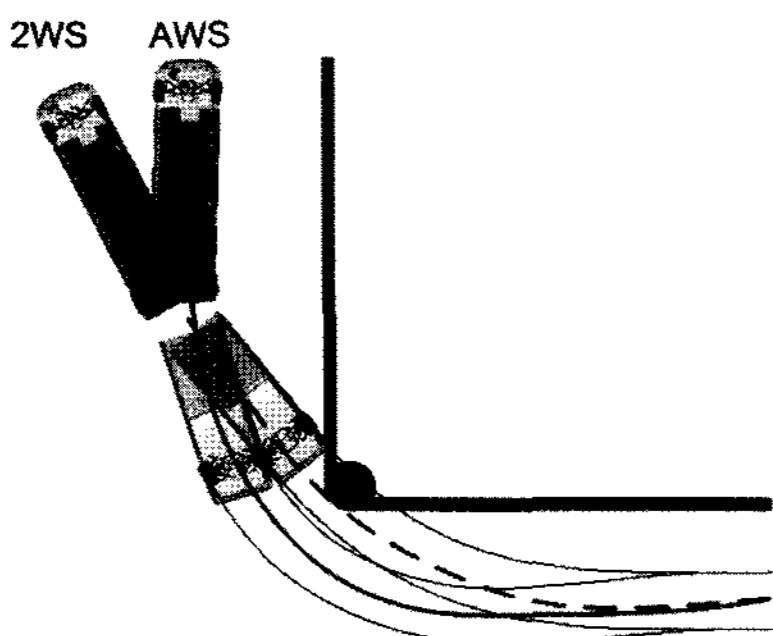


Fig. 11 Vehicle trajectory comparison

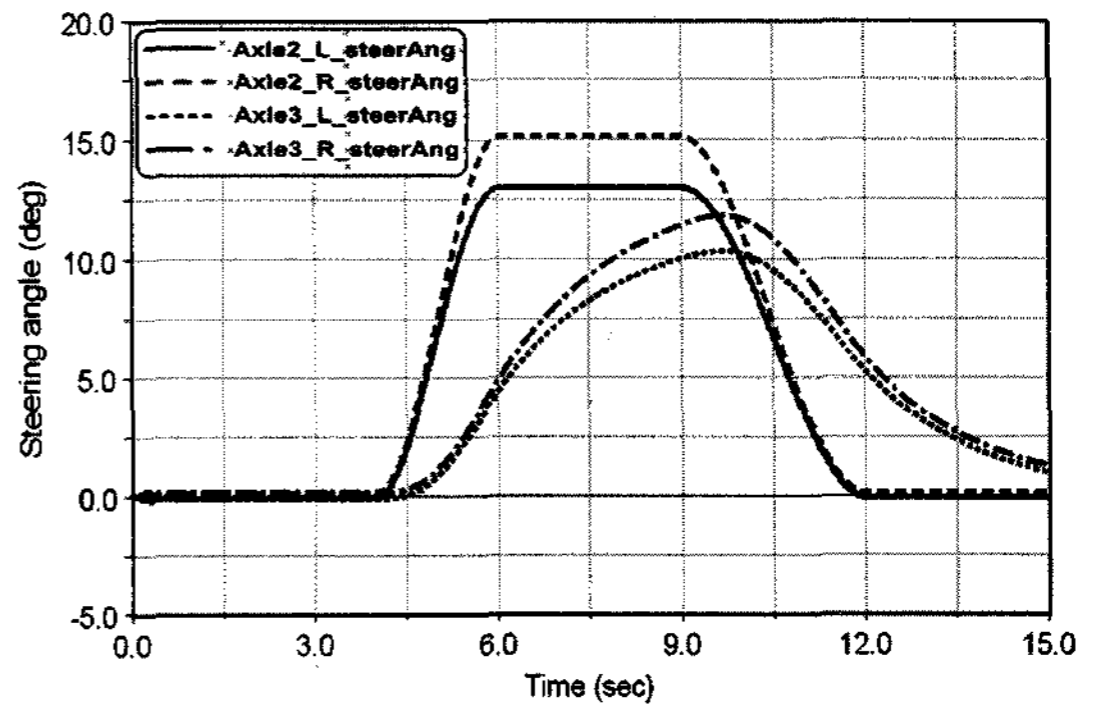


Fig. 12 2nd, 3rd axle steering angle

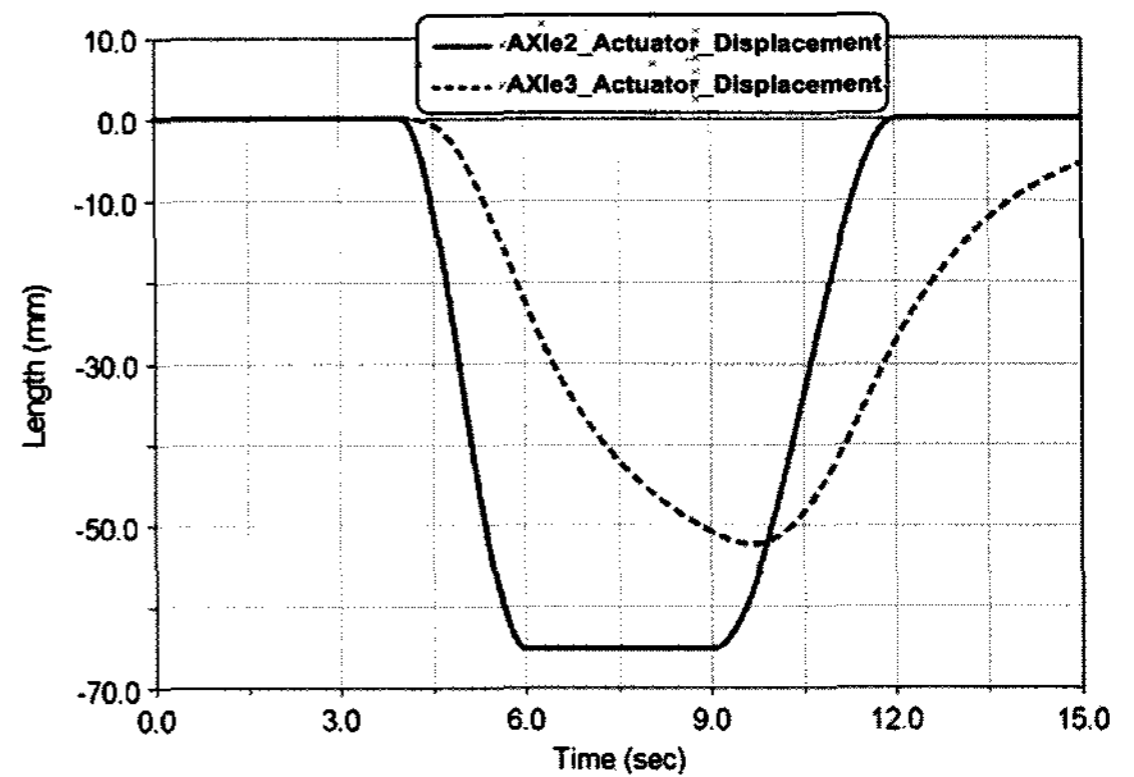


Fig. 13 2nd, 3rd axle cylinder stroke

란하다. 그러나 AWS 장착 차량의 경우 회전 반경이 작기 때문에 큰 무리 없이 선회가 가능하게 된다. 동일한 조건하에 AWS가 적용된 차량과 2WS 적용 차량의 비교 해석을 통해 AWS의 실효성을 검증하였다. Fig. 10은 전륜 조향각 입력 그래프를 보여주고 있다. 차량 설계상 최대 전륜 조향각은 약  $32.5^\circ$ 이며, 교차로 선회 해석에서의 최대 조향 입력각은 약  $30.7^\circ$ 이다. Fig. 11은 동일 차속 동일 조향 입력 조건하에 두 차량이 교차로를 선회하는 모습을 보여주고 있다. 또한 Fig. 11은 3축의 좌, 우 중심점의 궤적을 보여주고 있는데, AWS 장착차량의 경우 큰 무리 없이 교차로 선회가 가능하지만, 2WS 장착차량의 경우 교차로의 모서리부분과 접촉이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 AWS 장착차량에서 2, 3축의 좌, 우 조향각 변화를 보여주고 있다. Fig. 13은 2, 3축의 조향을 위한 유압 실린더의 변위 변화를 보여주고 있다. 2축의 경우 6초와 9초 사이에서 차량의 최대 조향이 이루어짐을 확인할 수 있다.

### 5.3 차선변경 주행 해석

저상 굴절 차량이 장애물을 피하거나 원형 교차로를 주행할 경우 차선 변경과 같은 거동을 보이게 된다. 고속에서의 차선변경은 조종 안전성을 목적으로 전륜 조향만 이루어지지만, 저속에서의 차선변경은 장애물 회피 및 원형 교차로 안전 주행을 위해 AWS 알고리즘이 적용되게 된다. 차선변경을 위해 입력된 전륜 평균 조향각은 Fig. 14와 같다. 차속은 시속 20km/h로 일정하게 진행되도록 입력하였다. Fig. 15는 2, 3축의 평균 조향각과 굴절각, Fig. 16은 2, 3축 유압 실린더의 변위 변화를 보여주고 있다. 같은 조향입력을 2WS에 적용할 경우, AWS와 2WS 조향 시스템이 가지는 고유한 특성을 비교할 수 있다.

Fig. 17은 3축 중심점의 선회 궤적을 보여 주고 있다. 원형과 같은 장애물 회피를 위한 저속 주행이라면 AWS와 달리 2WS는 장애물과 충돌할 가능성이 있다.

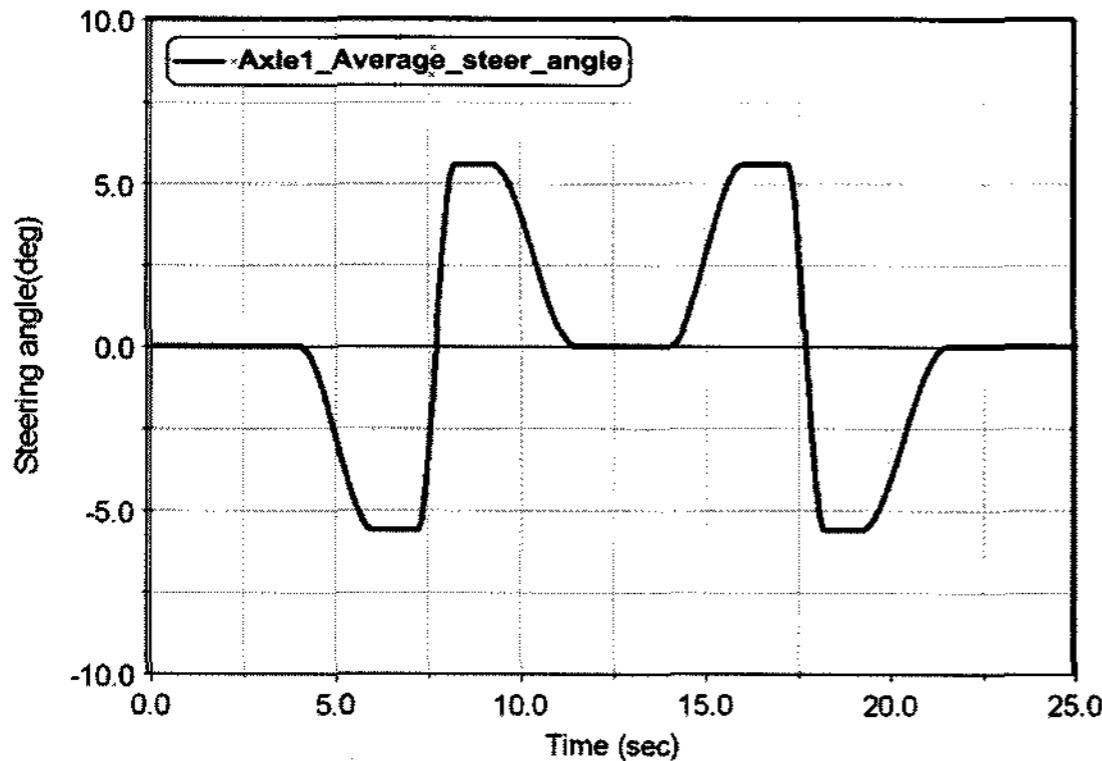


Fig. 14 Front steering angle input

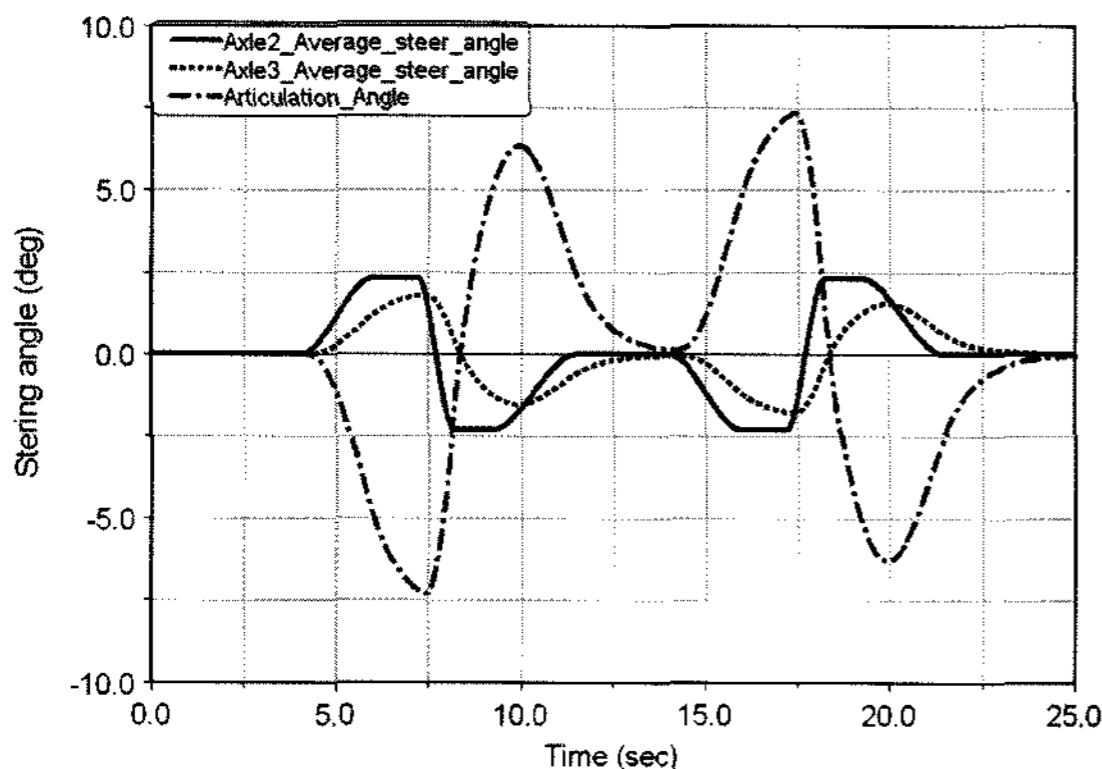


Fig. 15 2nd, 3rd axle steering angle and articulation angle

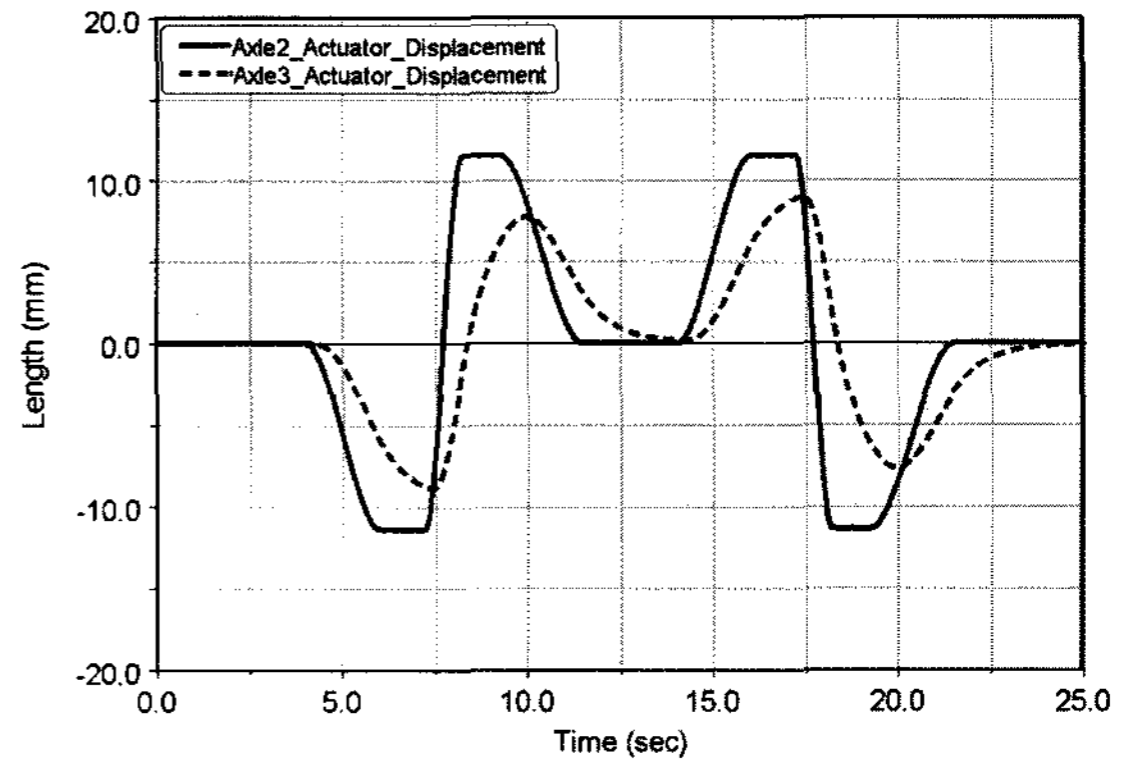


Fig. 16 2nd, 3rd axle cylinder stroke

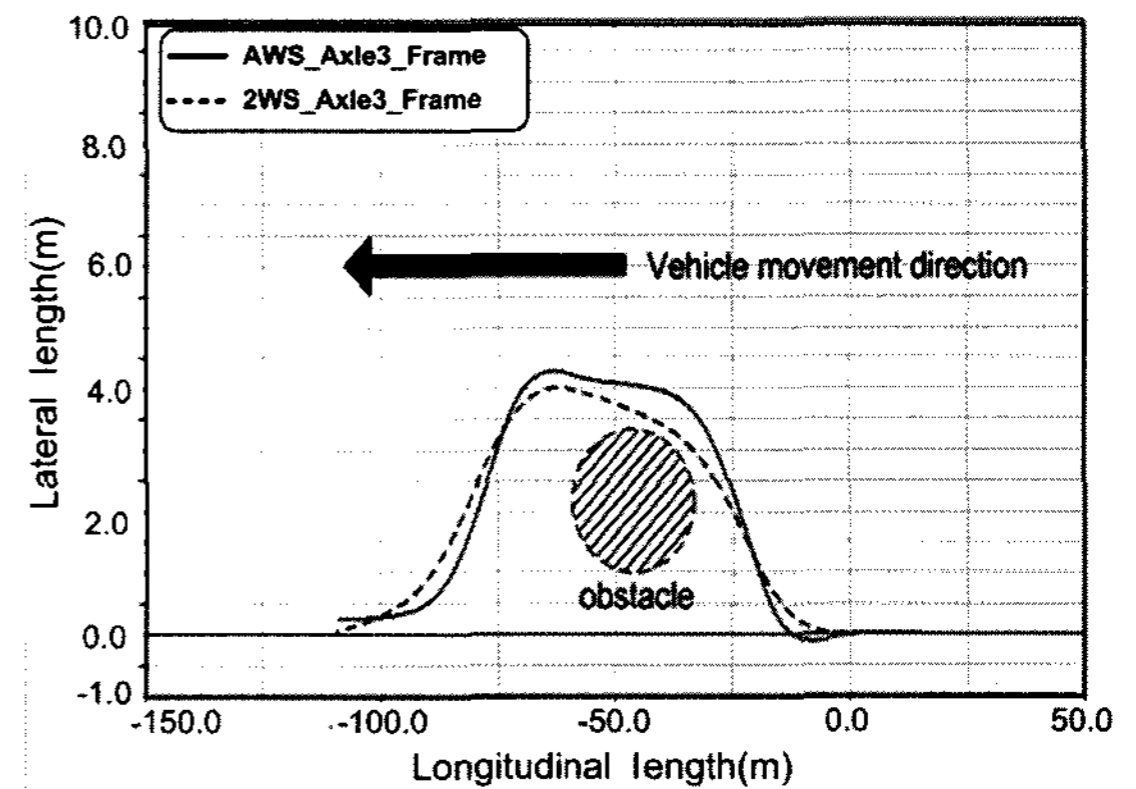


Fig. 17 3rd axle trajectory comparison of AWS and 2WS

## 6. 결론

본 논문에서는 AWS를 장착한 저상굴절차량의 주행특성에 대해 검토하였다.

- 1) 저상 굴절 차량에 적용되는 AWS 알고리즘을 제안하였고, 2축 조향각은 1축 조향각에 의하여 결정되어지고, 3축 조향각은 가상 고정 축을 포함한 각 축간거리 및 굴절각에 의해 결정됨을 알 수 있었다.
- 2) 축 하중 해석을 실시하여 정적인 차량 하중의 배분의 타당성 및 차량 동역학 모델의 신뢰성을 검증하였다.
- 3) AWS 알고리즘을 검증하기 위해 차량 동역학 모델에 전 차륜 조향 알고리즘 적용하여 정상원 선회, 교차로 선회해석, 차선변경 해석을 실시하여 AWS 알고리즘을 검증하였다. 또한 교차로 선회 해석 및 차선변경 해석에서는 동일한 해석조건

으로 2WS와 장착차량과 AWS 장착 차량의 궤적을 비교하여 AWS 장착차량의 타당성을 검증하였다.

### References

- 1) Y. H. Lee, S. I. Kim, M. W. Suh, H. S. Son and S. H. Kim, "Linearized Dynamic Analysis of a Four-Wheel Steering Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.2, No.5, pp.101-109, 1994.
- 2) J. S. Shim, S. J. Heo and Y. M. Yu, "Effect of Four-Wheel Steering System on Vehicle Handling Characteristics," Transactions of KSAE, Vol.12, No.3, pp.21-29, 1990.
- 3) H. Sato, Hirota, H. Yanagisawa and T. Fukushima, "Dynamic Characteristics of a Whole Wheel Steering Vehicle with Yaw Velocity Feedback Rear Wheel Steering," IMechE, C124/83, pp.210-218, 1983.
- 4) D. de Bruin, A. A. H. Damen and A. Pogromsky, "Backstepping Control for Lateral Guidance of All-Wheel Steered Multiple Articulated Vehicles," IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, pp.95-100, 2000.
- 5) H. B. Pacejka, Tire and Vehicle Dynamics, SAE, 2002.
- 6) T. Takiguchi, N. Yasuda, S. Furutan, H. Kamazwa and H. Inoue, "Improvement of Vehicle Dynamic by Vehicle Speed Steering Four Wheel Steering System," SAE 860624, 1986.
- 7) N. Irie and J. Kuroki, "4WS Technology and the Prospects for Improvement of Vehicle Dynamics," SAE 901167, 1990.
- 8) J. Y. Kim, K. G. Kye, K. S. Park, K. S. Huh, K. Y. Chang and J. E. Oh, "Dynamic Performance Analysis for 4WD/ 4WS Electric-Driven Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.4, No.2, pp.209-220, 1996.
- 9) D. E. Smith and J. M. Starkey, "Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Model Development, Validation and Comparison: Vehicle System Dynamic, Vol.24, pp.163-181, 1995.
- 10) ADAMS 2003 User Manual, MSC. Software Corporation, USA, 2003.