

굴절차량에 대한 조향알고리즘 개발 및 검증

Development and Verification of the Steering Algorithm for Articulated Vehicles

문경호* · 이수호* · 목재균** · 박태원***

Kyeong-Ho Moon · Soo-Ho Lee · Jai-Kyun Mok · Tae-Won Park

Abstract AWS (all wheel steering) is applied to improve the stability and the turning performance. Most automotive cars are mainly controlled by FWS (front wheel steering) system except some cars which are made to improve their stability by using AWS. Articulated vehicles with a pivoting joint for easy turn are difficult to make a sharp turn because of the long body and long wheelbase. Therefore applying AWS to the articulated vehicles is effective to reduce the turning radius. The AWS control method for the articulated vehicles is currently applied to only Phileas vehicles which were developed by APTS. The paper on the design of a controller to guide an articulated vehicle along the path was published but control algorithm for manual driving has not been reported. In the present paper, steering characteristics of the Phileas vehicles have been analyzed and then new algorithm has been proposed. To verify the AWS algorithm, Commercial S/W, ADAMS was used for validity of the dynamic model and algorithm.

Keywords : Articulated vehicle, All wheel steering, Virtual rigid axle

요 지 축간거리가 긴 트럭이나 굴절차량과 같이 차량이 길이가 길고 2량 이상 편성된 차량은 회전반경을 줄여 원활하게 곡선을 주행할 수 있도록 전 차륜 조향방식(AWS)을 적용한다. 굴절차량에 도입된 방법은 네덜란드 APTS사의 Phileas 차량이 유일하며 자동으로 운전하기 위한 제어방법에 대한 논문은 발표되었지만 수동으로 조향되어 운전되는 경우에 대한 알고리즘은 소개되거나 공개되어지지 않았다. 따라서 본 연구에서 네덜란드의 APTS사의 차량에 대한 수동운전시의 조향장치 특성을 분석하고 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한 개발된 알고리즘을 상용 동역학 프로그램인 ADAMS를 이용하여 적용성을 알아보았다.

주요어 : 굴절차량, 전차륜조향, 가상고정축

1. 서 론

차량을 조향하는 조향 방식을 구분하면, 앞 차륜 조향(front-wheel steering), 후 차륜 조향(rear-wheel steering), 전체 차륜 조향(all-wheel steering)으로 나눌 수 있다. 보통 자동차는 앞 차륜 조향방식(FWD)을 적용하여 전륜만 조향되며 후륜은 고정된 상태로 곡선을 선회하지만 고급 승용차는 안정성을 높이기 위하여 AWS 시스템을 적용한다[1,2]. 또한 축간거리가 긴 트럭이나 굴절차량과 같이 차

량이 길이가 길고 2량 이상 편성된 차량에도 전 차륜 조향 방식을 적용하는데 회전반경을 줄여 원활하게 곡선을 주행하기 위하여 적용하고 있다[3,4]. 굴절차량에서 AWS를 적용하면 곡선반경이외에도 부가적으로 정거장 정차길어도 줄어든다는 장점이 있다.

차륜 조향을 위하여 후륜을 제어하는 방식으로 전륜 조향각 비례 방식, 조향력 피드백 방식, 요각속도 피드백 방식, 옆미끄럼각 제로 제어 방식 등이 있다[5]. 이러한 제어 방식은 승용차와 같은 4륜차를 제어하는 방식으로 굴절장치가 있는 굴절차량과 같이 2량 이상 편성된 차량에 대해서는 다른 제어방법을 도입해야 한다. 현재 굴절차량에 도입된 방법은 네덜란드 APTS사의 Phileas 차량이 유일하며 자동운전으로 운전하기 위한 제어방법에 대한 논문은 발표되었지만 수동으로 조향되어 운전되는 경우에 대한 알고리즘은 소개되거나 공개되어지지 않았다[6,7].

* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 바이오달수송시스템연구단
E-mail : khmoon@krti.re.kr

TEL : (031)460-5211 FAX : (031)460-5024

* 정희원, 아주대학교 기계공학과 대학원 박사과정

** 정희원, 한국철도기술연구원 바이오달수송시스템연구단 책임연구원

*** 정희원, 아주대학교 기계공학부 교수

본 연구에서는 네덜란드의 APTS사의 차량에 대한 수동운 전시 조향장치 특성을 분석하고 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한 상용 동역학 프로그램인 ADAMS를 이용하여 개발된 알고리즘의 적용 가능성을 검증하였다. 제안된 가상 고정축에 의한 방법은 전륜만 조향될 때 후륜이 고정되는 고정축 역할을 하는 것에 착안하여 움직이지 않는 가상의 축을 설정하고 이를 기준으로 제어하는 방법을 제시한 것으로 APTS사 차량에 적용된 방법과 유사하지만 애커만각[8]을 추종할 수 있도록 하였고 가상고정축 역시 기하학적 구조에 맞도록 제안하였다. 이러한 가상 고정축에 의한 방법은 다축차량으로 확장이 가능하고 차량의 기하학적 구조에 맞게 설정되어 구조적 오류를 사전에 제거시킬 수 있으며 도로의 여건에 따라 가상고정축을 변경하여 적용할 수 있다.

2. 기존 알고리즘 분석

2.1 알고리즘 분석을 위한 시험

2량 1편성의 굴절차량은 Fig. 1과 같이 총 3축으로 구성되어 있으며 AWS 장치를 구비한 굴절차량의 경우, 2축과 3축에 각각 조향장치를 제어하는 ECU(Electronic Control Unit)가 설치되어 있다. APTS사의 Phileas 차량의 조향장치에 사용된 알고리즘을 파악하려면 ECU에 대한 시험을 하여야 하며 Fig. 2와 같이 실제 개발될 차량에 사용되는 조향장치 및 유압시스템으로 시험장치를 구성하였다. Fig. 3에 나타낸 AWS ECU 테스트에 대한 계략도를 보면 작동유의 압력, 밸브의 위치신호 및 2축(또는 3축)의 조향각도 신호는 직접 ECU로 입력되며 차량 속도는 속도 생성 프로그램(Emulator)과 DAQ 보드를 거쳐 차속에 따라 주파수가 변하는 사각파로 ECU에 입력된다. 또한 소프트웨어에 의해 생성되는 전륜 조향각(또는 굴절각)은 DAQ 보드를 거쳐 ECU에 아날로그 신호로 입력된다.

차량의 주행과 선회 상황을 ECU에 입력 신호로 부여하여 AWS 시스템에 대한 테스트를 수행하였다. 차량의 속도는 0~80km/h까지 1km/h의 단위로 입력되며 2축 ECU에는 0~35도 범위로 전륜 조향각이 입력되고, 3축 ECU에는 0~43도 범위로 굴절각이 입력된다. 차속 신호와 전륜 조향각(또는 굴절각) 신호를 제외한 다른 입력 신호들은 시스템의 정상 작동을 위한 일반적인 조건으로 입력하였고 차속과 전륜 조향각(또는 굴절각)을 다양한 조건으로 변화시키면서 테스트를 수행하였다.

2.2 기존 알고리즘 시험 결과

차량 속도 전 영역에 걸친 전륜 조향각 입력에 따른 후륜(2축) 조향각의 변화 결과는 Fig. 4와 같으며 굴절각에

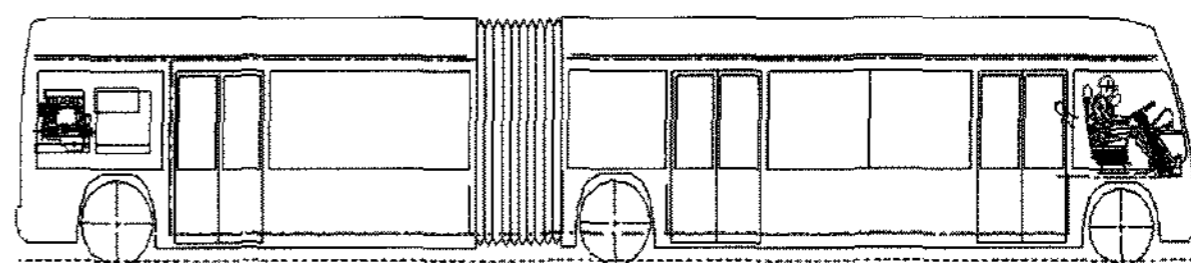


Fig. 1. Articulated vehicle

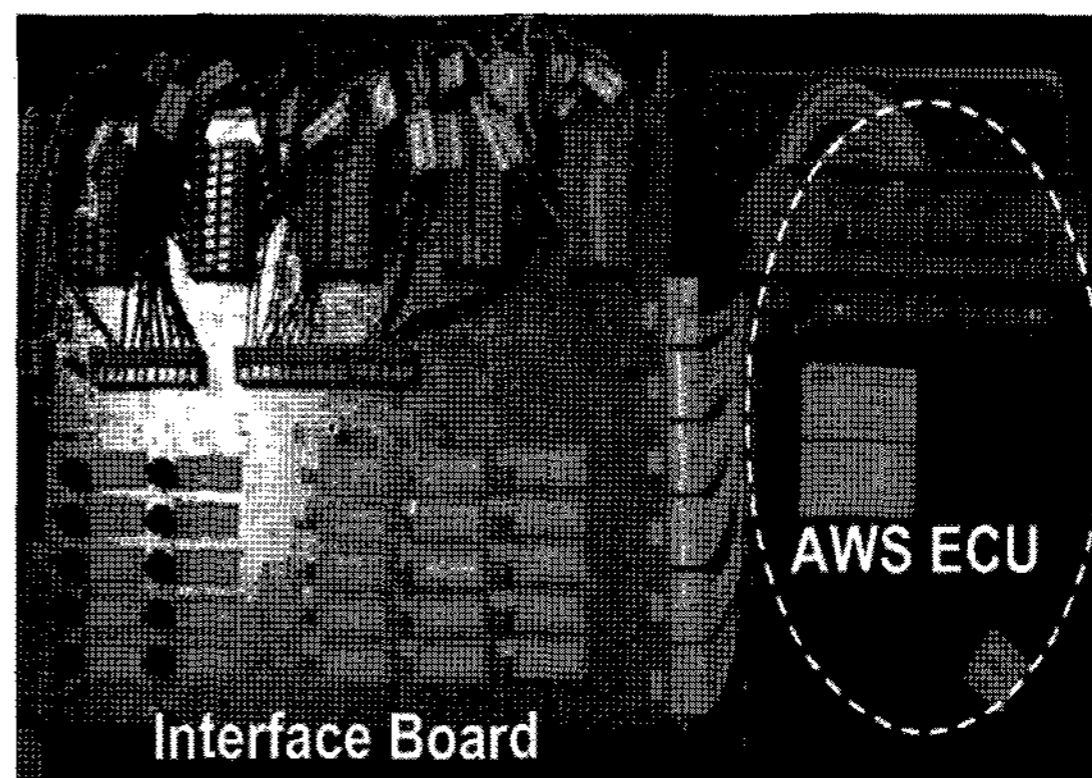
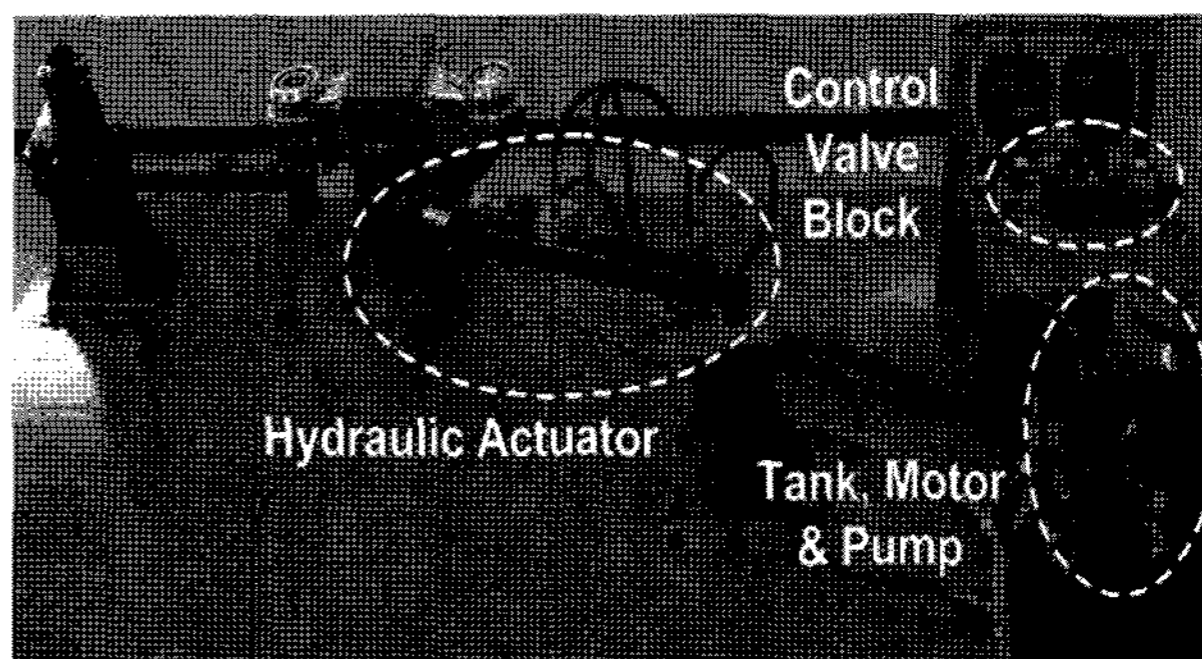


Fig. 2. AWS ECU test apparatus

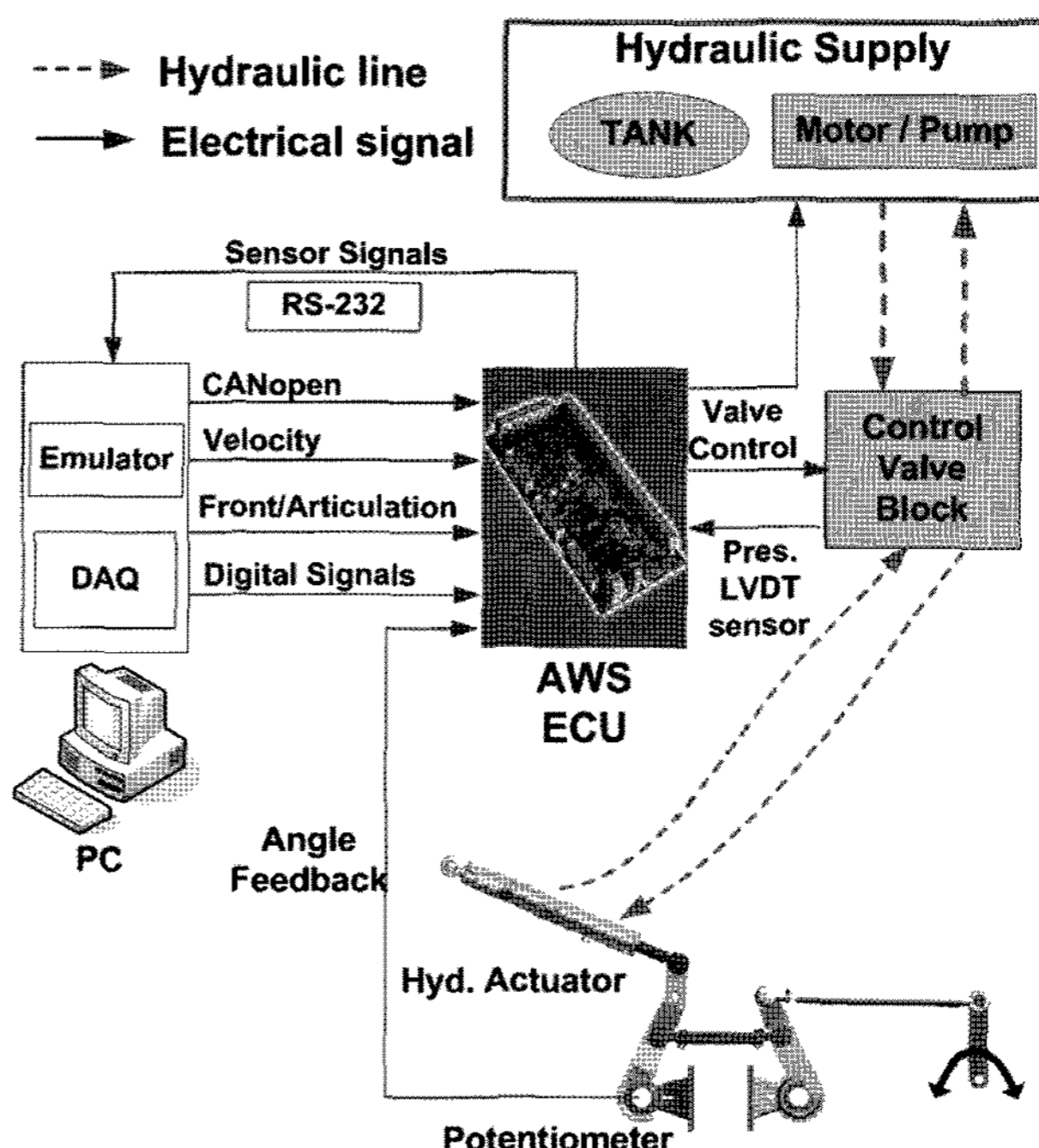


Fig. 3. Schematic of AWS ECU test apparatus

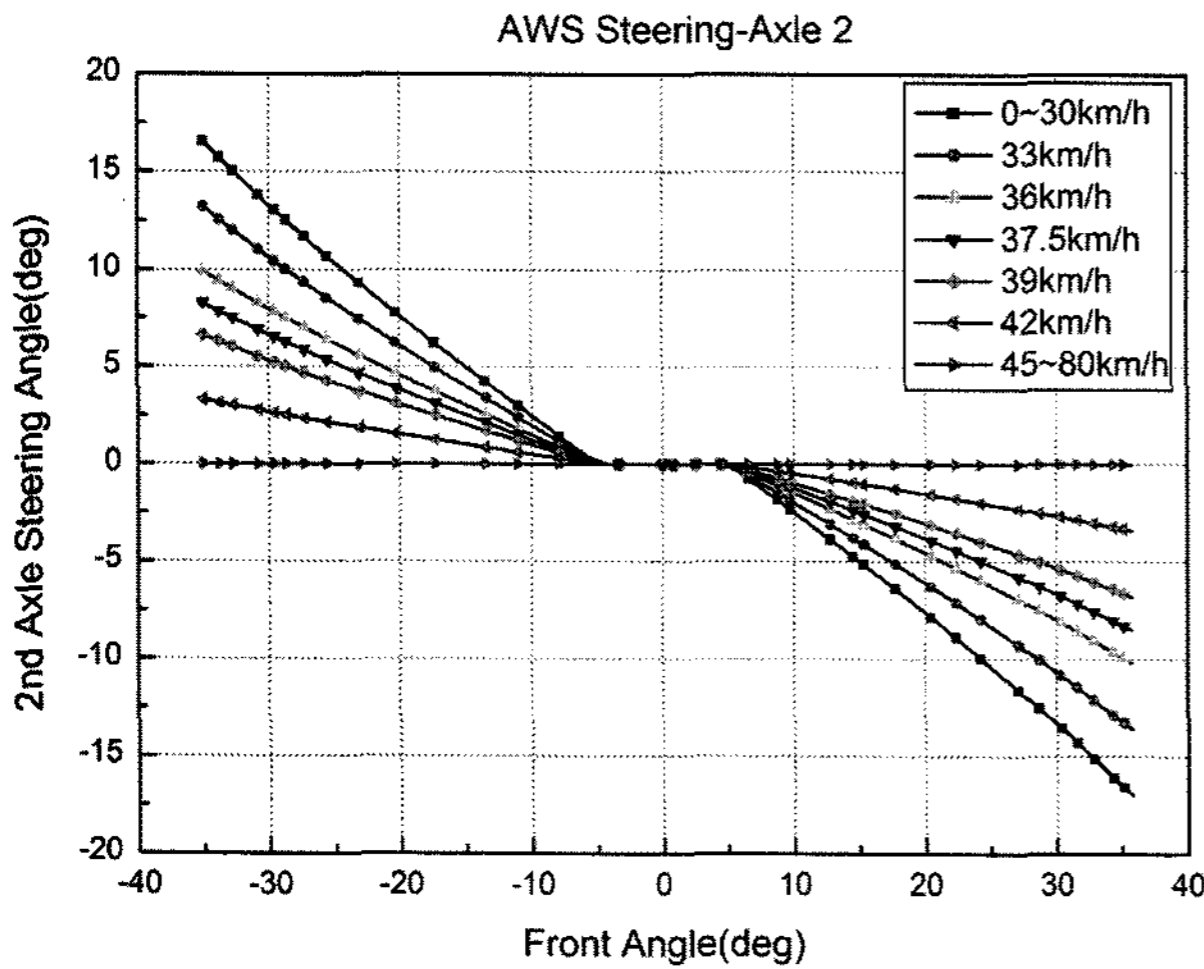


Fig. 4. Test results of second axle angle

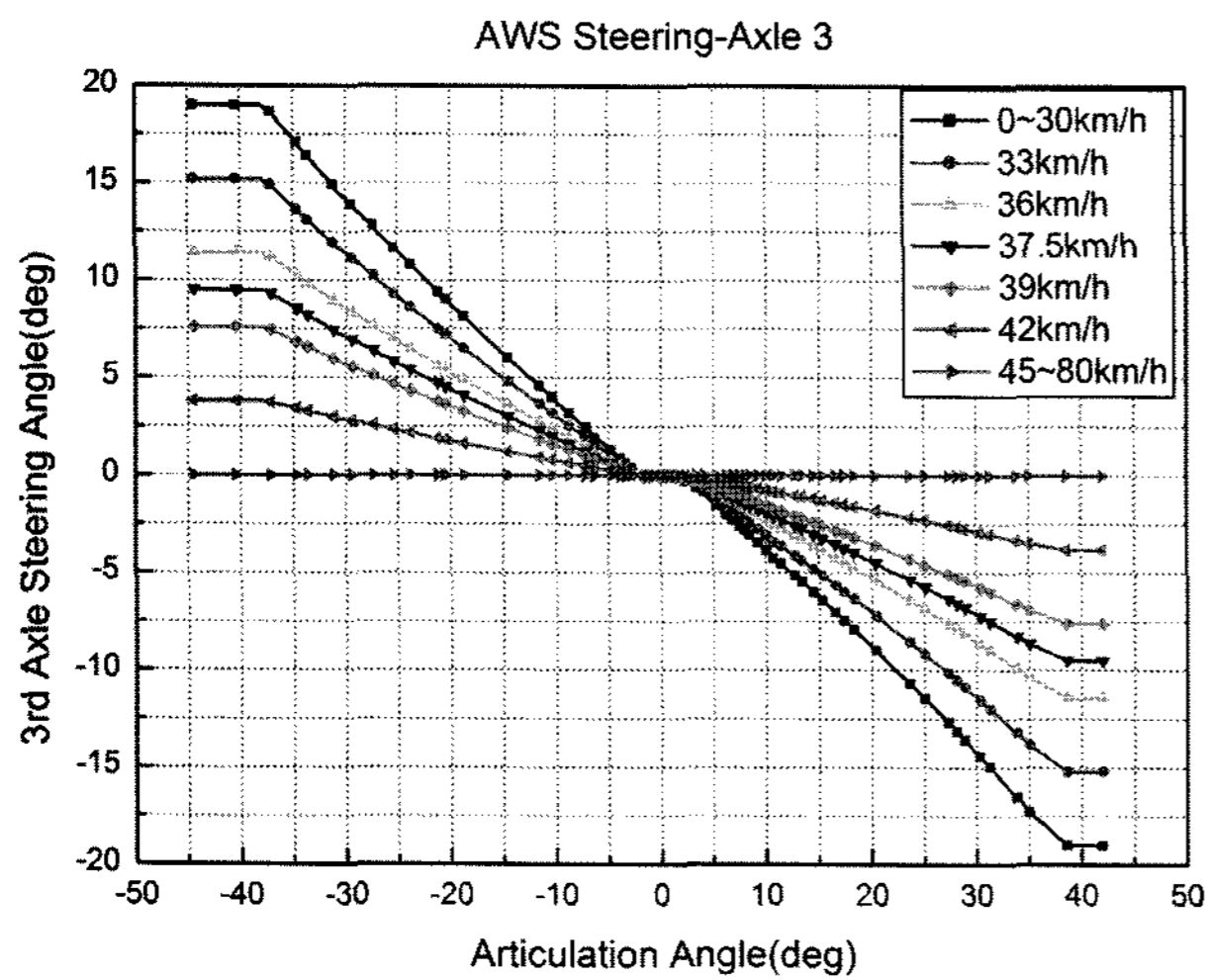


Fig. 5. Test results of third axle angle

대한 3축의 조향각은 Fig. 5와 같다. 시험 결과를 보면 작은 조종각에 대하여 2축은 5도, 3축은 2도로 제한하고 있으며 이후 최대 조향각까지 선형적으로 증가하도록 하고 있다. 속도에 따른 제한은 차속 30km/h까지는 최대로 조향되게 하고 30km/h부터 45km/h까지 후륜 조향각은 줄어 들고 있으며 45km/h 이상의 속도에서 후륜은 조향되지 않고 0도를 유지하고 있다.

2.3 가상고정축 방법 및 기존알고리즘 계산식

전륜만 조향될 때 후륜은 조향되지 않으므로 후륜은 고정축의 역할을 하며 이 고정축을 지나는 한점에서 회전중심이 일치한다. 가상고정축에 의한 후륜 조향각 제어 방법은 고정축의 역할을 하도록 움직이지 않는 가상의 고정축을 설정하고 이 가상고정축을 지나는 한점에서 회전중심이 일치하도록 제어하는 것이다.

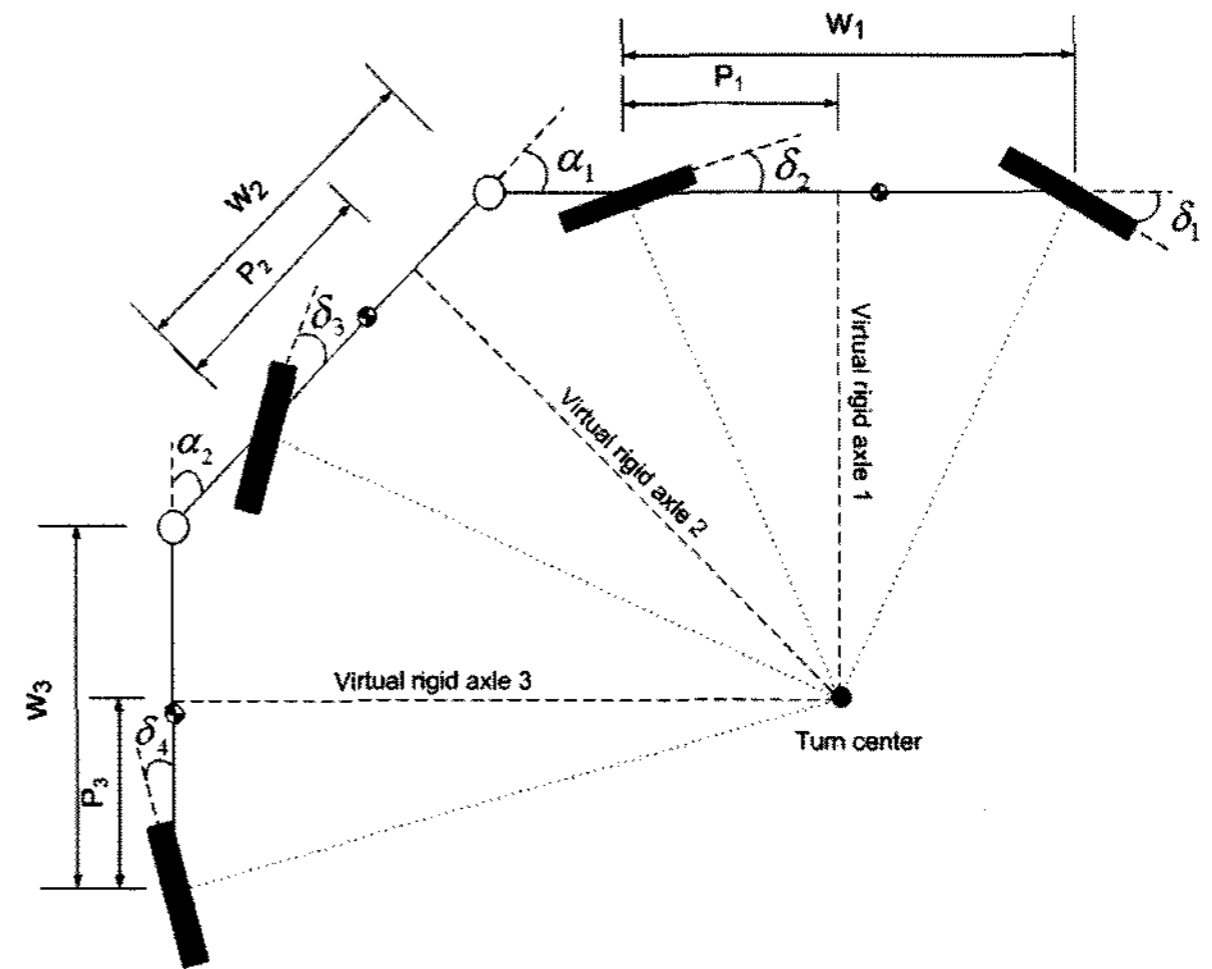


Fig. 6. Bicycle model for existing algorithm

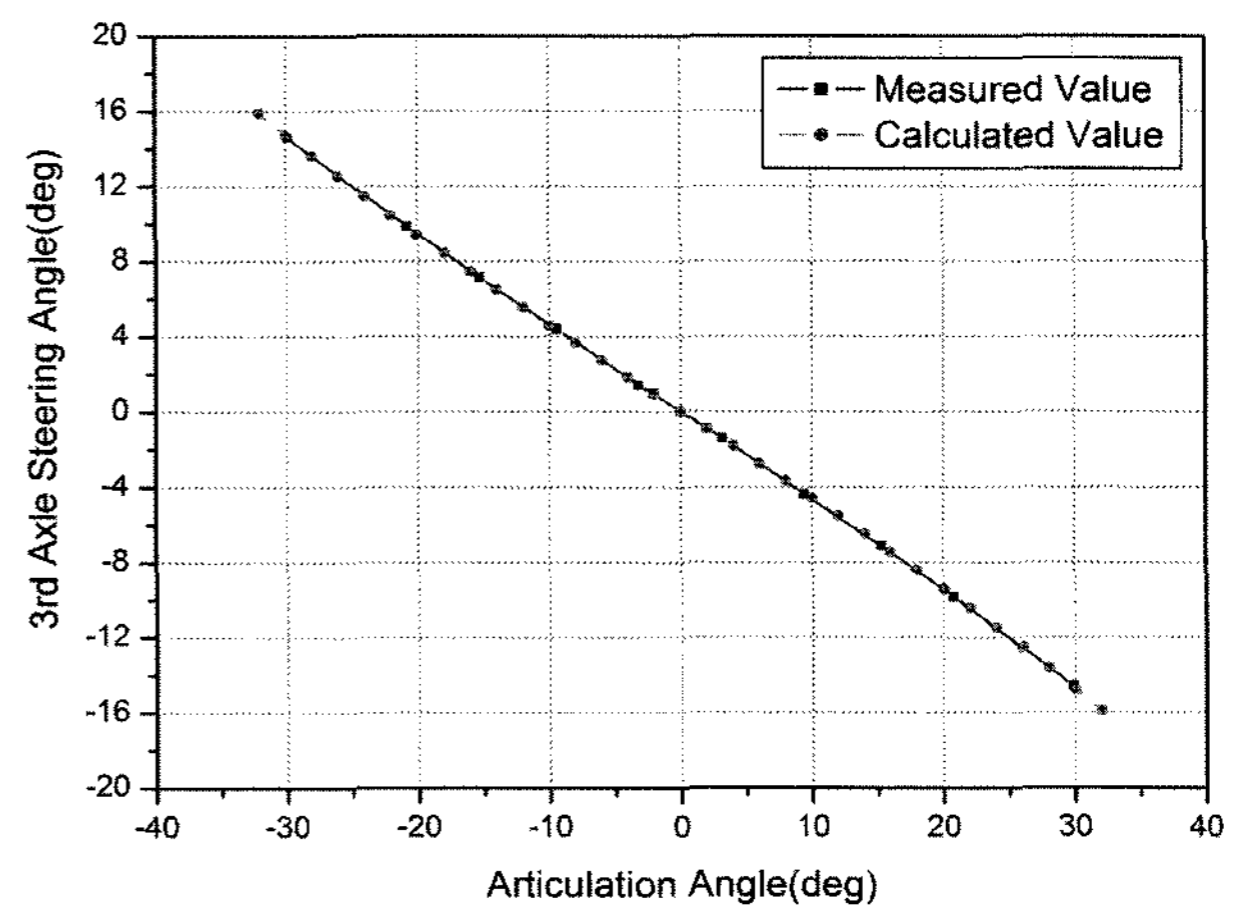


Fig. 7. Comparison of third axle angles

가상고정축을 이용한 1축의 조향각에 의한 2축의 조향각 식 (1)은 Fig. 6의 자전거 모델에 의해서 유도되어진다. 기하학적인 일치를 고려하여 3축 조향각을 계산하지 않고 식 (1)을 단순하게 3축에 대해서 확장하면 식 (2)와 같다. 식 (2)에 의해서 계산된 결과와 3축에 사용된 기존 AWS ECU에 대하여 시험한 결과를 Fig. 7에 비교하였다. 결과가 정확하게 일치하는 것으로 보아서 식 (1)을 그대로 3축에 확장하였음을 알 수 있었다. 할 수 있다. 이는 식 (3)과 같이 다굴절차량으로 확장이 용이하도록 하기 위하여 단순화한 것으로 추정된다.

$$\delta_2 = -\tan^{-1}\left(\frac{P_1 \times \tan \delta_1}{w_1 - P_1}\right) \quad (1)$$

$$\delta_3 = -\tan^{-1}\left(\frac{P_2 \times \tan \alpha_1}{w_2 - P_2}\right) \quad (2)$$

$$\delta_{n+1} = -\tan^{-1}\left(\frac{P_n \times \tan \alpha_{n-1}}{w_n - P_n}\right), \quad \alpha_0 = \delta_1 \quad (3)$$

Table 1. Specification of articulated vehicle

Variable	Description	Value (mm)
α	Articulation angle	-
δ_1	Axle1 steering angle	-
δ_2	Axle2 steering angle	-
δ_3	Axle3 steering angle	-
w_1	Wheel base between axle 1 and axle 2	7700
w_2	Distance between axle 3 and articulation point	6385
P_1	Distance between body1 virtual rigid axle and axle2	2300
P_2	Distance between body2 virtual rigid axle and axle3	2000

알고리즘에 사용된 제원은 Table 1과 같으며 여기에 사용된 가상고정축값 P_1, P_2 는 사용자에게 의하여 결정되는 값이다.

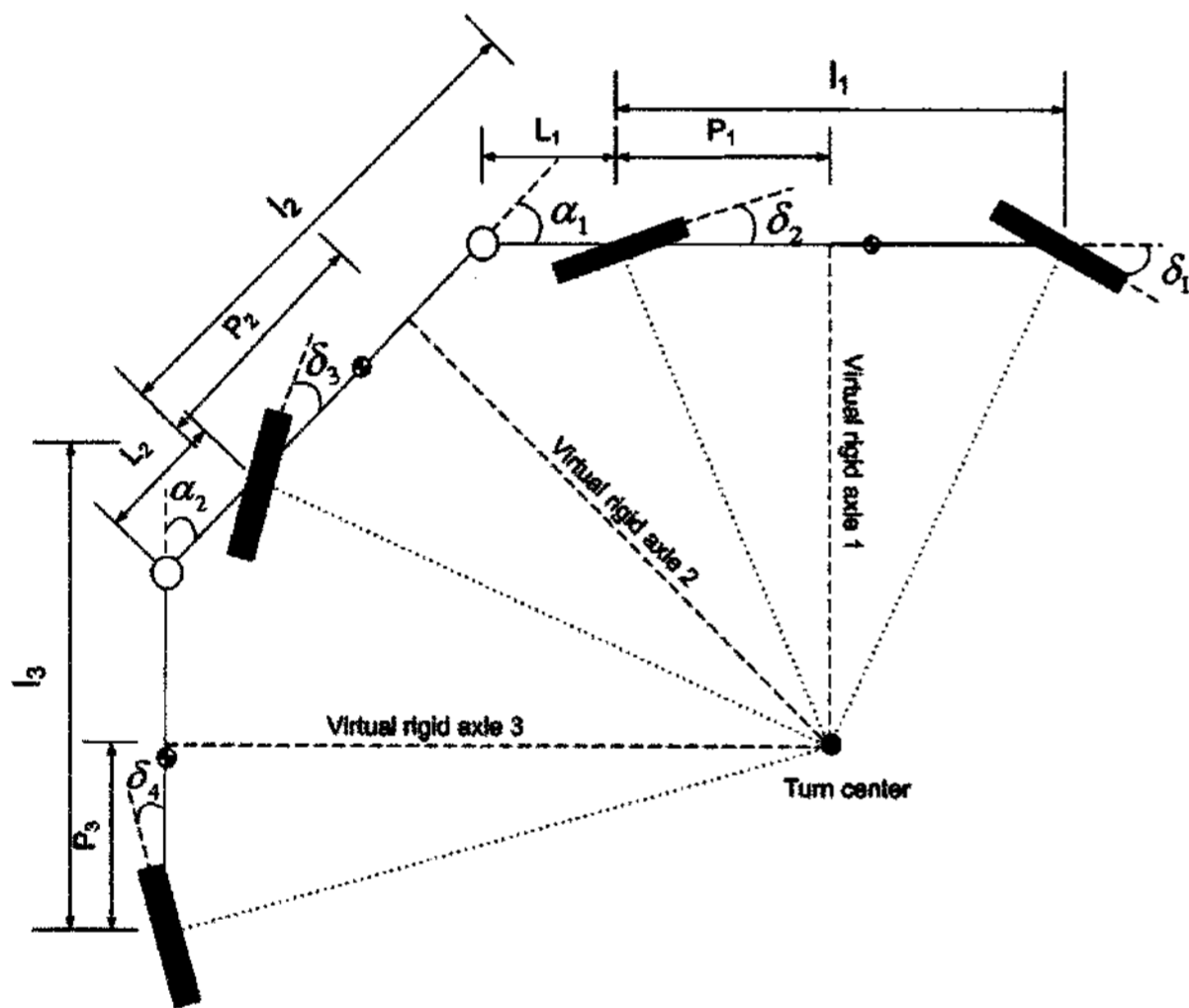


Fig. 8. Bicycle model for proposed algorithm

3. AWS 알고리즘 제안

기존 알고리즘에 대해서 3축에 대한 계산식은 2축의 계산식을 단순확장한 결과로 회전중심의 일치성을 고려하지 않았다. 이를 보완하기 위하여 회전중심을 일치시키고 가상고정축 값(P)을 최적으로 설정할 수 있도록 새로운 AWS 알고리즘을 제안하였다.

3.1 후부 조향각에 대한 계산식

후부 조향각에 대한 계산식으로서 Fig. 8의 자전거모델을 바탕으로 식 (5) 및 (6)을 제안하였다. 제안된 계산식에서 2축의 조향각에 대한 식 (4)는 기존의 알고리즘과 비슷하지

만 3축의 조향각은 식 (5)와 같이 변경하여 제안하였다. 제안된 식은 기존 알고리즘에 비하여 변수가 2개 늘어나지만 기하학적으로 회전중심이 일치하게 되며 이 식도 역시 최종적으로 식 (6)과 같이 표시되어 다굴절차량으로 확장이 가능하도록 하였다.

$$\delta_2 = -\tan^{-1} \left(\frac{P_1 \times \tan \delta_1}{(l_1 - L_0) + \frac{L_0 + P_0}{\cos \delta_1} - P_1} \right) \quad (4)$$

$$\delta_3 = -\tan^{-1} \left(\frac{P_2 \times \tan \alpha_1}{(l_2 - L_1) + \frac{L_1 + P_1}{\cos \alpha_1} - P_2} \right) \quad (5)$$

$$\delta_{n+1} = -\tan^{-1} \left(\frac{P_n \times \tan \alpha_{n-1}}{(l_n - L_{n-1}) + \frac{L_{n-1} + P_{n-1}}{\cos \alpha_{n-1}} - P_n} \right) \quad (6)$$

여기서 $\alpha_0 = \delta_1, l_0 = L_0 = P_0 = 0$ 이다.

3.2 가상고정축 설정 방법

가상고정축은 기하학적으로 각축의 조향각 및 굴절각과 연관이 되어 있다[9,10]. 승용차와 같은 2축 차량은 1축이 조향할 수 있는 최대각도 및 트렁크의 공간 등을 고려하여 2축의 허용각도 범위에서 가상고정축을 설정하면 된다. 그러나 굴절차량의 경우, 각축의 조향각 이외에도 굴절각이 있어서 기하학적으로 복잡하므로 가상고정축을 설정하는 것이 쉽지 않다. 우선 강제조향에 의해서 파손되기 쉬운 부분이 굴절장치이므로 굴절각을 기준으로 가상고정축을 설정하여야 한다. 그 후에 각 축에서 최대 조향할 수 있는 조향각도를 고려하여 기하학적으로 회전중심이 일치하도록 한다. 가상고정축 설정에 따른 순서도는 Fig. 9와 같다.

Fig. 10과 같이 가상고정축이 후부축과 일치할 때는 P값이 0이며 이 때 회전중심은 O점이 되며 가상고정축 P값이 설정되면서 O'으로 이동되게 된다. 굴절각에 대한 1축의 최대조향각은 2, 3축이 조향되지 않을 때를 기준으로 구해야 하며 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 식 (8)은 2축이 최대 조향할 수 있는 값을 기준으로 P값을 구한 것이며 식 (10)은 3축이 최대 조향할 수 있는 값을 바탕으로 구한 것이다. 구해진 P값을 기준으로 기하학적으로 회전중심이 일치하게 하여 구한 것이 식 (9)과 식 (11)이 된다. 가상고정축을 구하기 위해서 사용된 조향각은 방향에 상관없이 양수로 하여 계산되었다.

$$\delta_1 = f_1(\alpha) = \tan^{-1} \left(\frac{l}{w \times \sin \alpha + \frac{L_1 + w \times \cos \alpha}{\tan \alpha}} \right) \quad (7)$$

$$P'_1 = f_2(\delta_1, \delta_{2max}) = \frac{l \times \tan \delta_{2max}}{\tan \delta_1 + \tan \delta_{2max}} \quad (8)$$

$$P'_2 = f_3(\alpha, \delta_1, P'_1) = w + \cos \alpha \times \left(\frac{\tan \alpha + \tan \delta_1}{\tan \delta_1} \times P'_1 - \frac{l \times \tan \alpha}{\tan \delta_1} + L_1 \right) \quad (9)$$

$$P''_2 = f_4(\alpha, \delta_1, \delta_{3max}) = \frac{\cos \alpha \times w + L_1 + \frac{\tan \delta_1}{\tan \alpha + \tan \delta_1} \times \left(\frac{l \times \tan \alpha}{\tan \delta_1} - \frac{w}{\cos \alpha} - L_1 \right)}{\frac{\tan \alpha \times \cos \alpha}{\tan \delta_{3max}} + \cos \alpha - \frac{\tan \delta_1}{(\tan \alpha + \tan \delta_1) \times \cos \alpha}} \quad (10)$$

$$P''_1 = f_5(\alpha, \delta_1, P''_2) = \frac{\tan \delta_1}{\tan \alpha + \tan \delta_1} \times \left(\frac{l \times \tan \alpha}{\tan \delta_1} - L_1 - \frac{w - P''_2}{\cos \alpha} \right) \quad (11)$$

Table 2에 기재된 각축의 최대 조향각은 왼쪽과 오른쪽의 조향각 값을 평균한 것이다. Table 1과 Table 2 및 $L_1(1,190\text{mm})$ 를 바탕으로 설정할 수 있는 최대가상고정축의 위치를 구하면 $P_1=2,14 \text{ mm}$, $P_2=2,802\text{mm}$ 가 된다. 구해진 가상고정축 P값을 제안된 식 (6)에 대입하여 구한 값과 Table 1의 값을 기존의 식 (3)에 대입하여 구한 결과를 Fig. 11에 나타냈으며 굴절각이 최대로 조향되었을 때 기존 알고리즘은 3축의 최대조향각 범위를 넘는 것으로 계

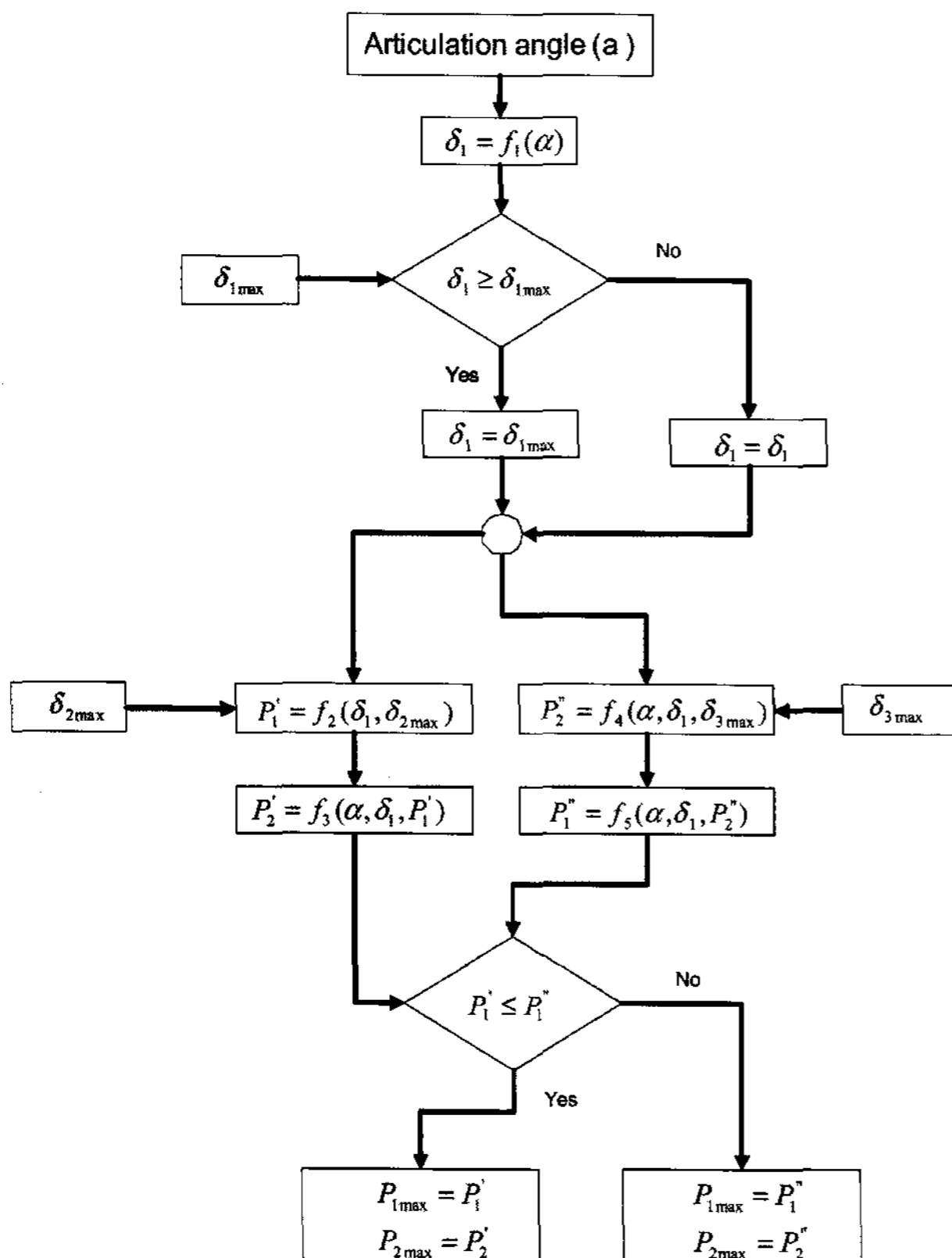


Fig. 9. Flow chart for setting virtual rigid axles

산되었으며 이는 앞의 시험결과 Fig. 5와 부합한다.

3.3 작은 조향각 억제

조그만 변동에도 후륜이 조향하게 되면 오히려 안전성이

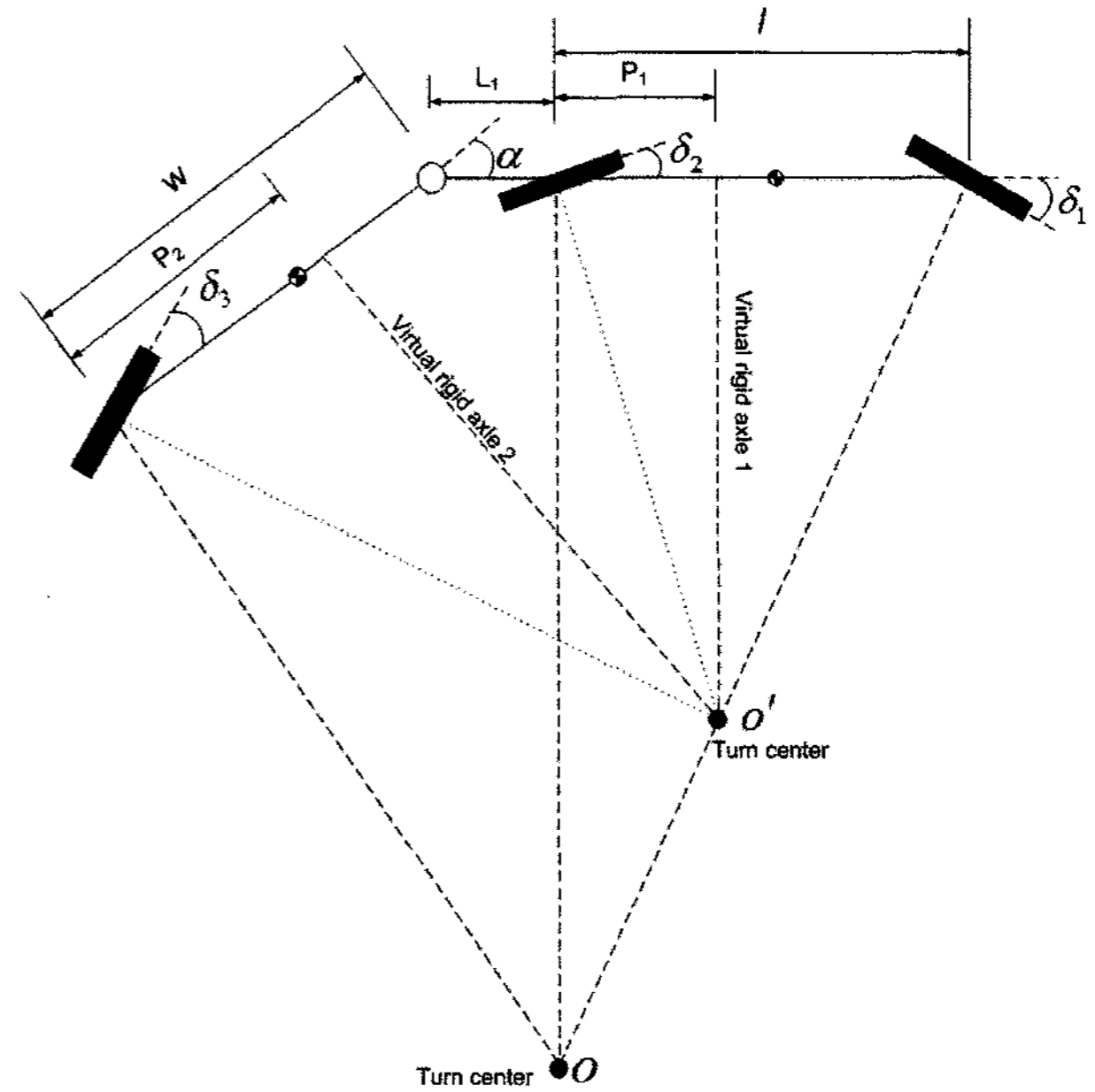


Fig. 10. Movement of turn center according to the virtual rigid axle

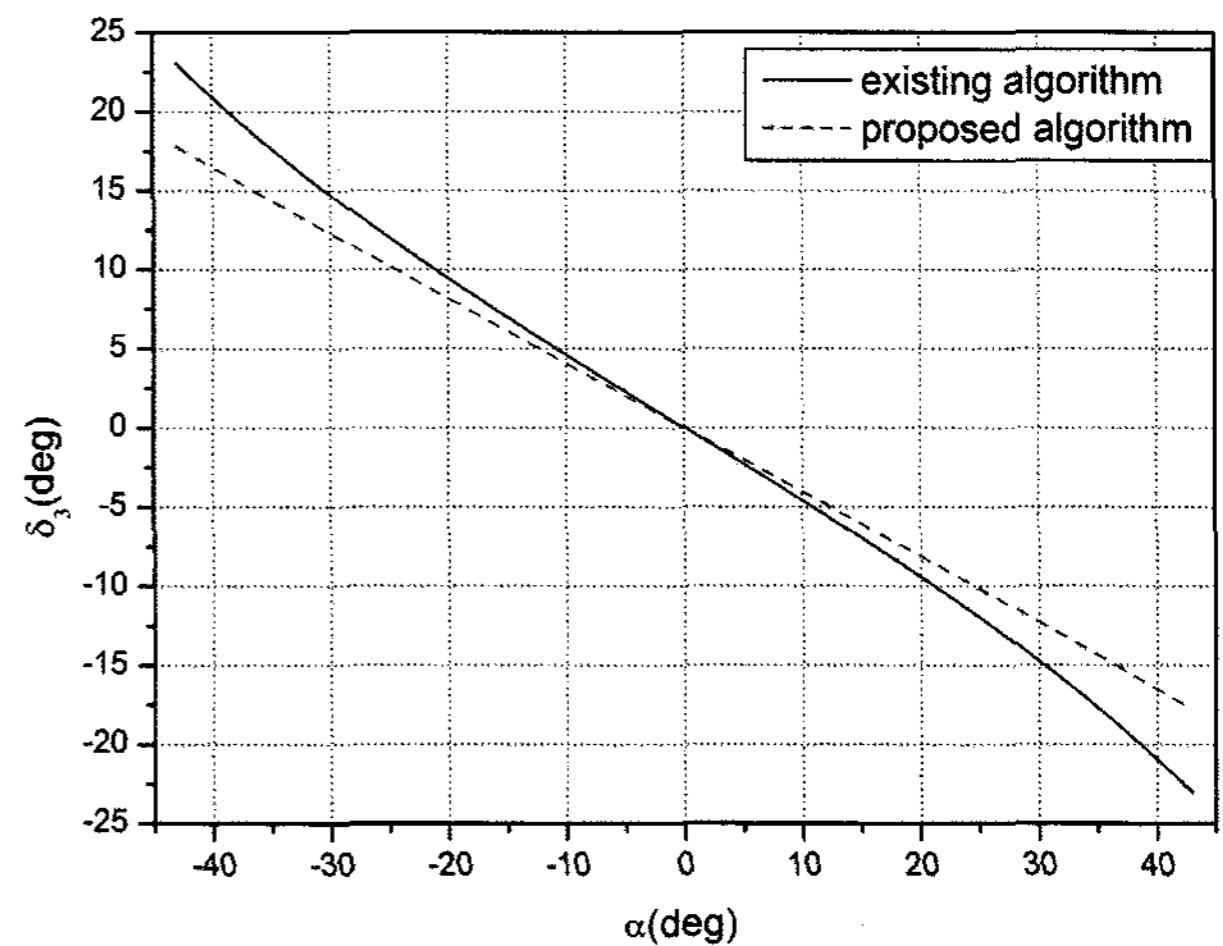


Fig. 11. Comparison of third axle angles depending on the algorithm

Table 2. Maximum angle of articulated vehicle

Variable	Description	Value (degree)
α	Maximum Angle of Articulation	43
δ_{1max}	Maximum Steering Angle of Axle1	32.2
δ_{2max}	Maximum Steering Angle of Axle2	17.8
δ_{3max}	Maximum Steering Angle of Axle3	17.8

나빠지므로 1축의 조향각이 작을 때는 2축은 조향되지 않고 0도를 유지하는 것이 바람직하다. 조향각은 가상고정축에 의해서 변하게 되며 1축이 조향이 되는데 2축이 0도를 유지하려면 가상고정축의 위치값 P 도 0이 되어야 한다. P 가 0에서 설정값까지 갑자기 변동하면 불연속점이 생기므로 식 (12), (13)와 같은 함수를 제안하였다. 허용오차(ϵ)를 10^{-9} 으로 하고 1축의 조향각은 5도, 굴절각은 2도까지 제한을 두었을 때 2축 및 3축의 조향각을 Fig. 12와 Fig. 13에 나타냈다.

$$P = P_{\max}(1 - e^{-a(\theta - \theta_0)}) \quad (12)$$

$$a = \frac{-\log \epsilon}{\theta - \theta_0} \quad (13)$$

여기서 θ 는 조향각, θ_0 는 제한각도, P 는 가상고정축 값, P_{\max} 는 설정된 최대 가상고정축 값이다.

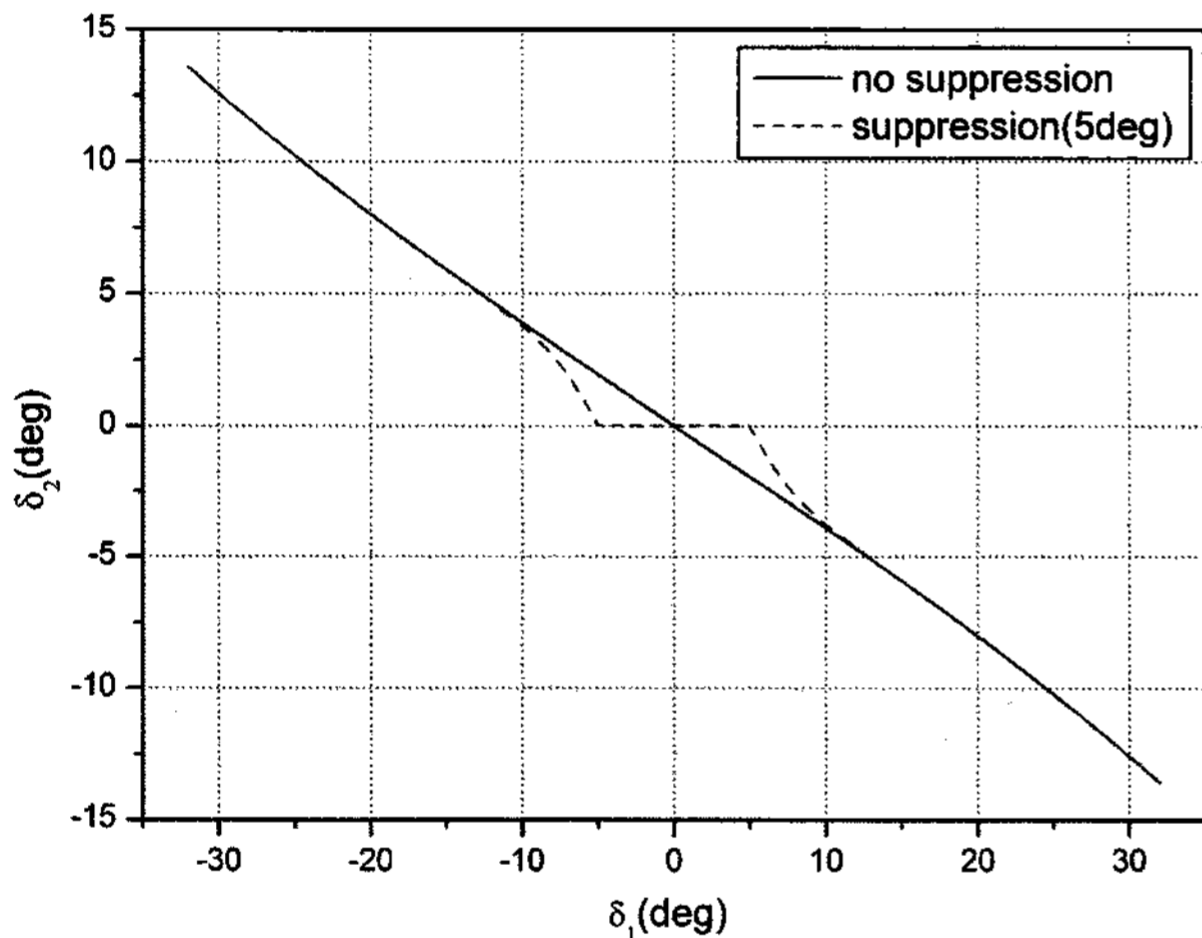


Fig. 12. Second steering angle depending on first steering angle

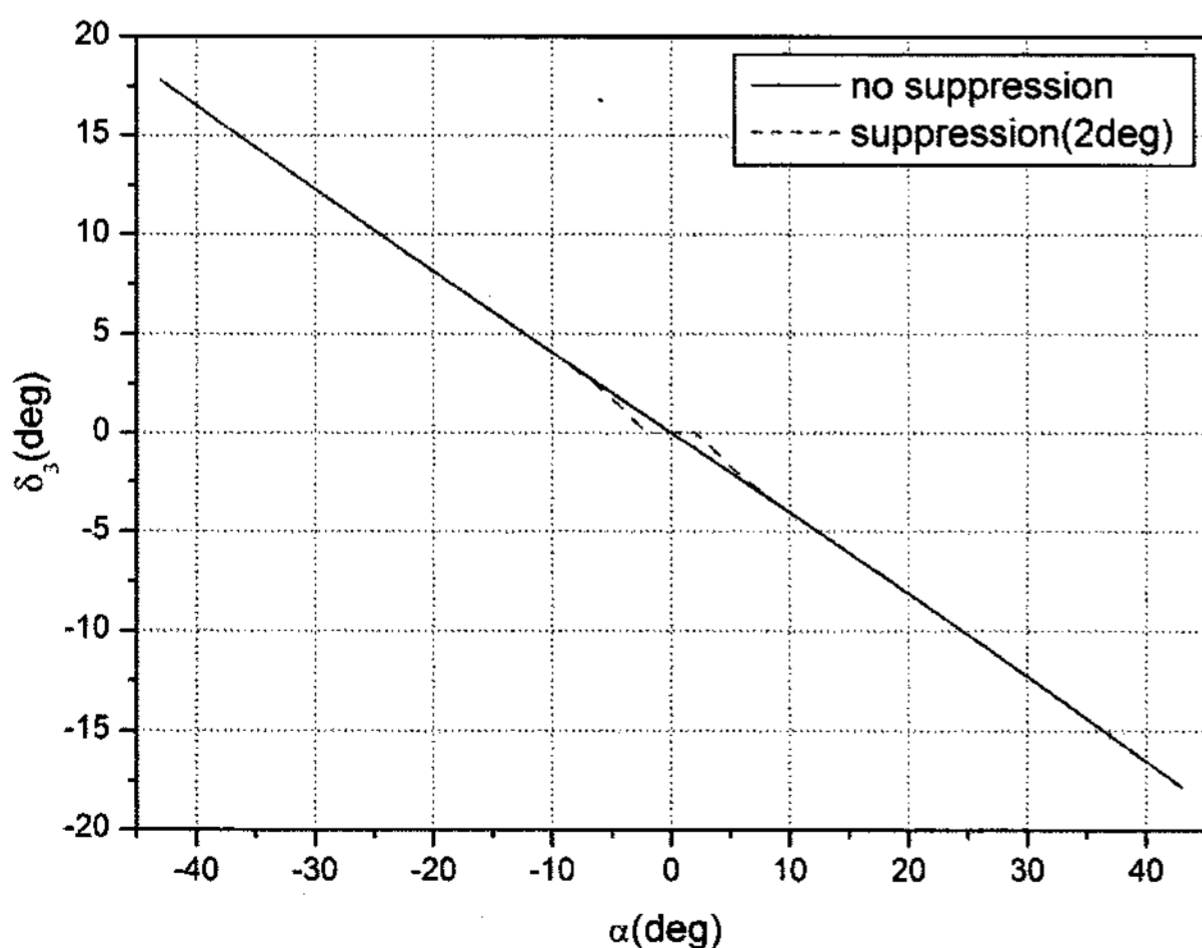


Fig. 13. Third steering angle depending on articulation angle

4. 동역학 프로그램을 이용한 알고리즘 검토

4.1 다물체 동역학 모델

1축의 조향각은 운전자가 조정하지만 굴절각의 경우 각 바퀴의 조향 상태에 따라 기하학적으로 결정되기 때문에 실제에 가까운 조향특성을 얻기 위해서 동역학 프로그램에 적용하는 것이 타당하다. 다물체 동역학을 해석을 수행하기 위해 사용된 프로그램은 상용프로그램인 ADAMS/View를 이용하였으며 Suspension, Steering System, Tire를 각각 모델링한 후 Fig. 14와 같이 Full Vehicle Dynamic Model을 구성하였다. 모델에 사용되는 데이터는 실제 개발되는 차량의 CAD, Damper 특성, 공기스프링 및 타이어 특성 자료 등을 바탕으로 하였으며 타이어의 힘은 Magic Formula 식을 이용하였다[11]. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘에 대한 조향특성을 알아보기 위하여 차량의 조향을 위한 알고리즘을 각각 별도로 적용하였다.

4.2 동역학 프로그램을 이용한 알고리즘 결과 비교

기존 알고리즘과 제안된 알고리즘에 대하여 ADAMS를 이용하여 조향특성을 검토하였다. 차량의 속도를 20 km/h로 하고 전륜의 조향각을 최대로 하였을 때 각 알고리즘에 대한 축의 중심에서의 궤적을 Fig. 15와 16에 나타냈다. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘에 대한 궤적을 보면, 기존 알고리즘의 3축의 궤도가 제안된 알고리즘보다 바깥쪽으로 선회하고 있으며 회전반경은 미소하지만 기존 알고리즘이 짧게 나타나고 있다. 그러나 굴절각과 3축의 관계를 나타

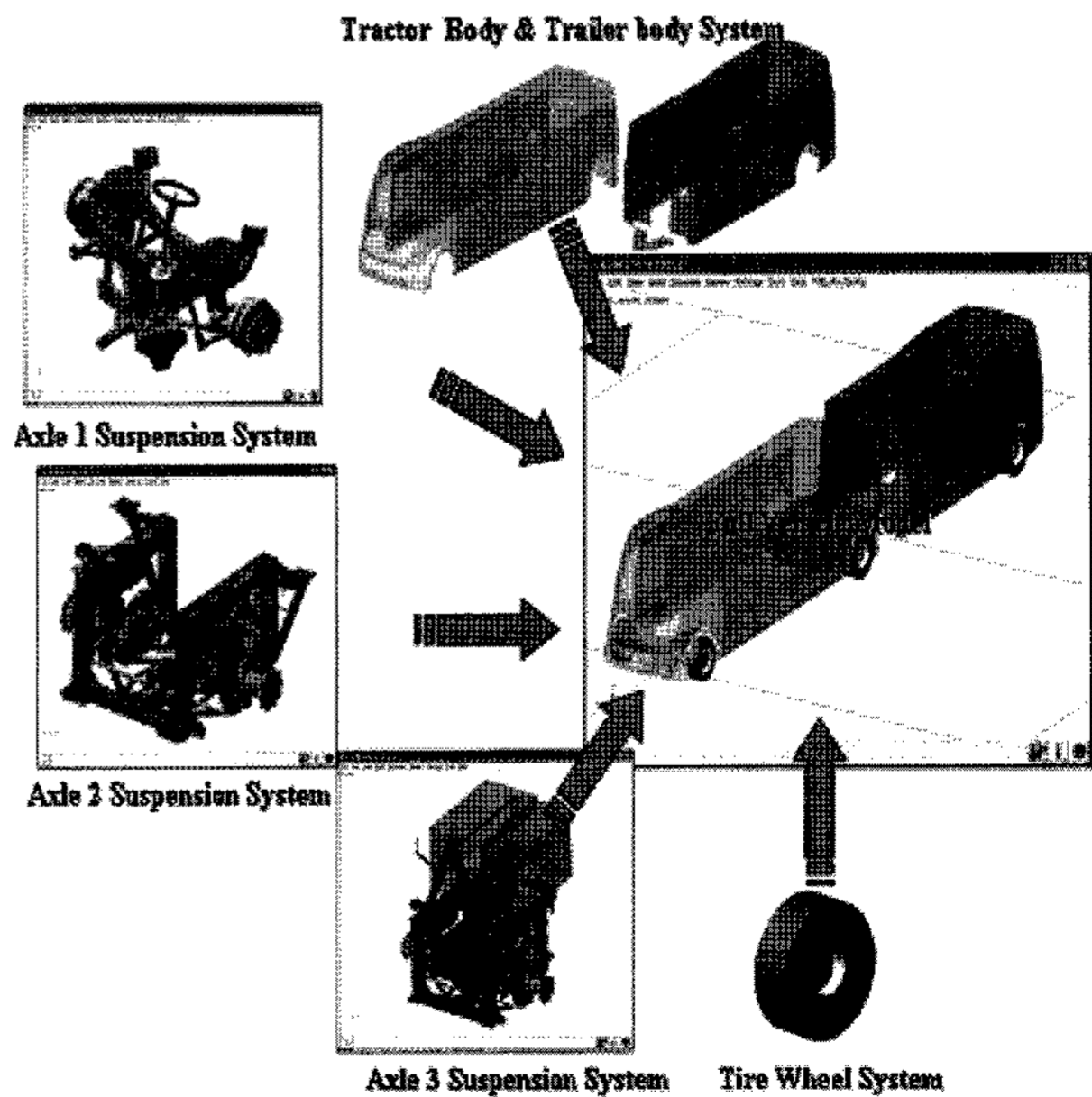


Fig. 14. Dynamic model of full vehicle

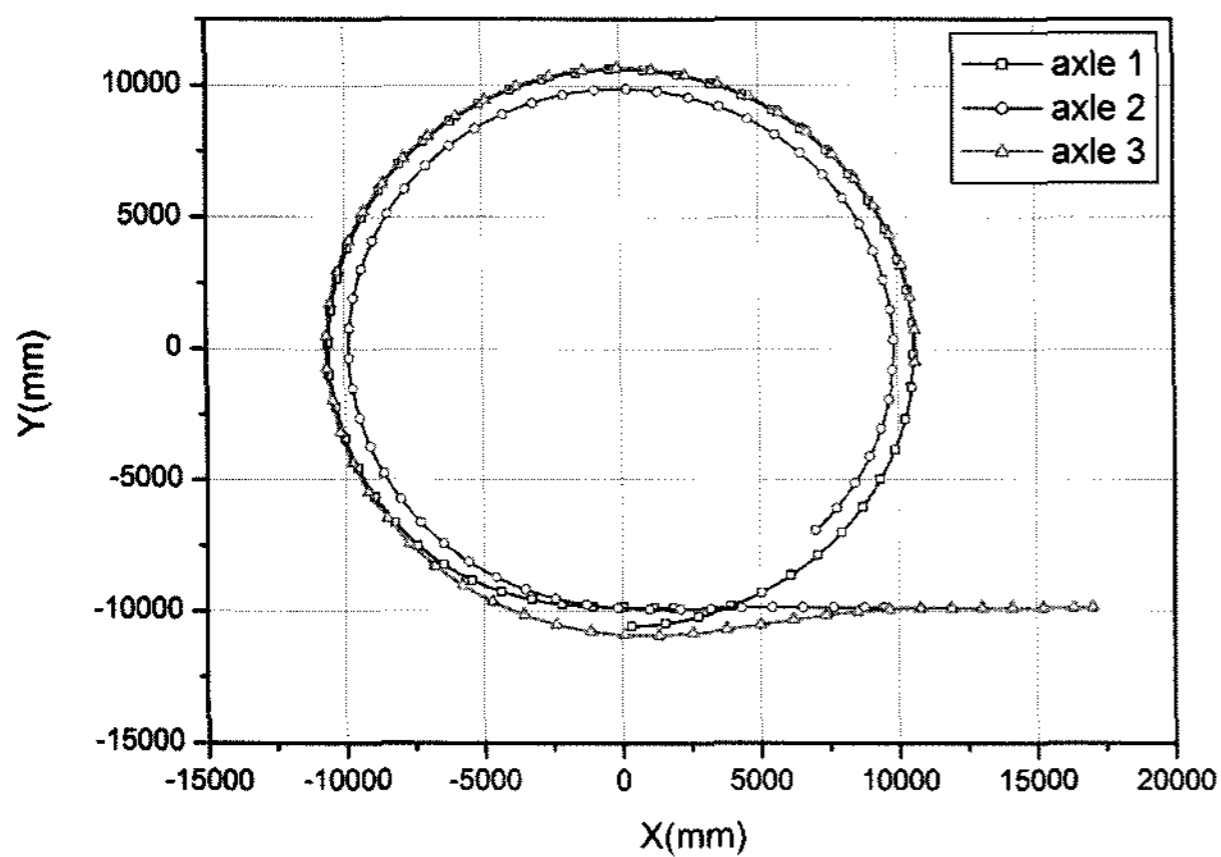


Fig. 15. Trajectory by using existing algorithm

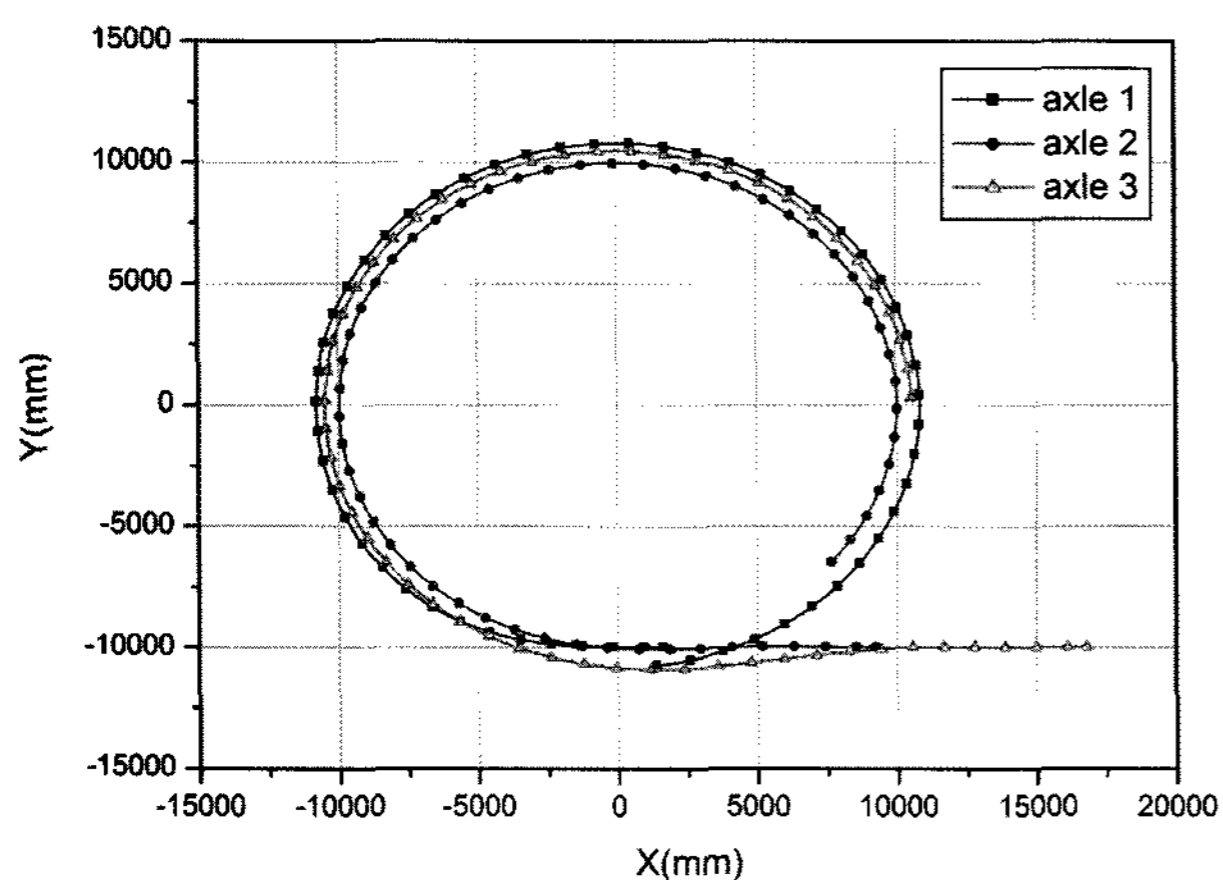


Fig. 16. Trajectory by using proposed algorithm

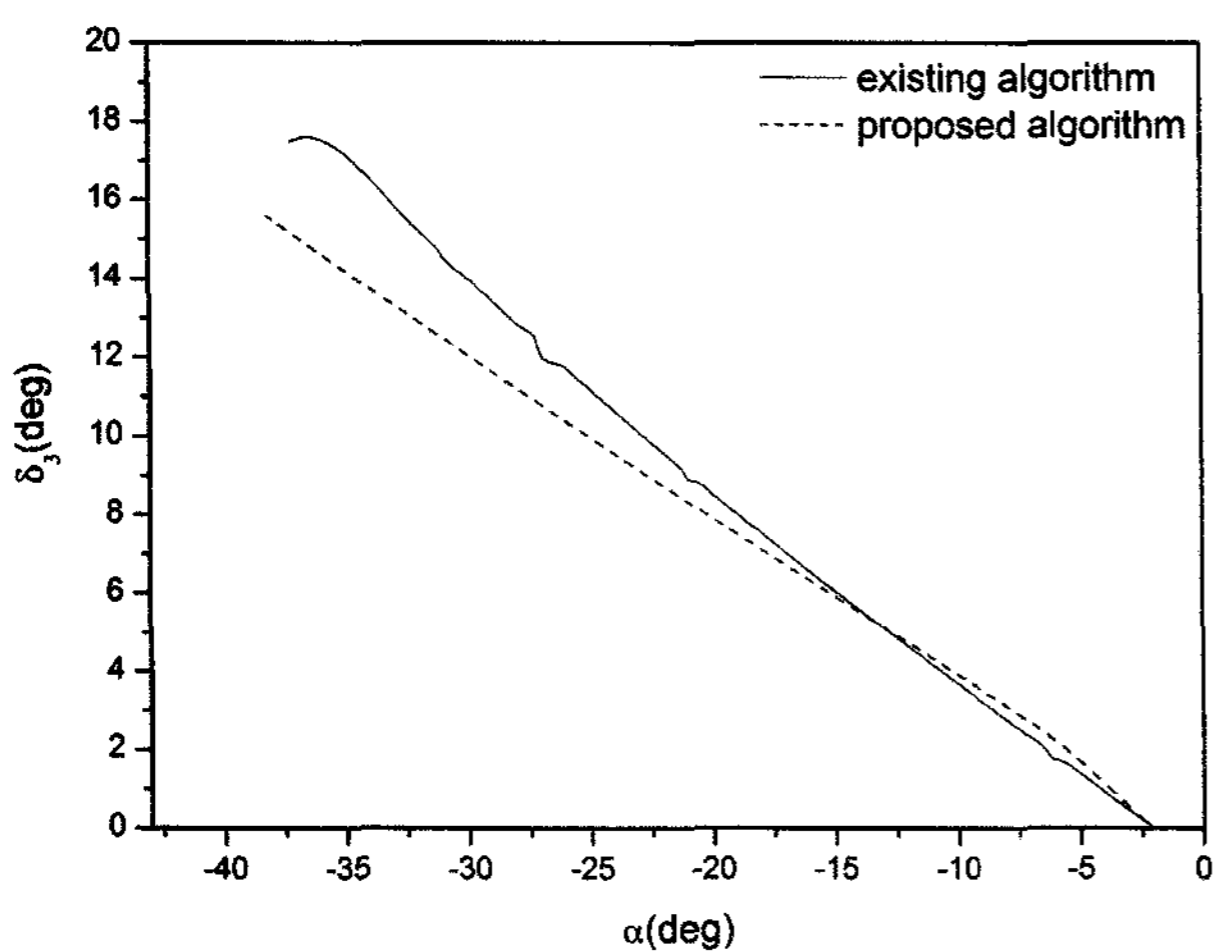


Fig. 17. Comparison of third axle angle depending on the algorithm by using ADAMS

낸 Fig. 17에서 기존 알고리즘의 그래프의 경우, 굴절각이 36도를 넘을 때 3축의 조향각은 더 이상 증가하지 않는 최대값을 유지하고 있고 회전중심을 보정하기 위하여 중간에

변동하는 부분이 보인다. 따라서 기존 알고리즘보다 제안한 알고리즘이 부드럽게 회전을 하고 있음을 알 수 있으며 가상고정축의 값을 차량의 기하학적 구조에 맞게 적용되어 있으므로 구조적 오류에 있어서 안전함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 AWS ECU 시험 및 분석을 통하여 기존 알고리즘을 추론하였으며 이를 바탕으로 차량의 기하배치 및 조종 안정성을 고려한 굴절차량의 가상고정축에 의한 후륜 조향 알고리즘을 제시하였다. 또한 제안된 알고리즘의 유용성 검증을 위하여 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘을 ADAMS에 적용하여 조향특성을 비교하였다. 제안된 알고리즘을 실제 적용차량에 맞게 모델링 후 동역학 프로그램에 적용한 결과, 제안된 알고리즘을 적용하면 곡선 주행시에 기존 알고리즘을 적용할 때보다 안정적으로 원곡선을 잘 추종하고 있으며 기하배치에 맞게 설정되어 있어서 원하는 조향각 범위 내에서 움직임을 알 수 있었다. 따라서 향후 제안된 알고리즘을 굴절차량에 적용하는 것이 더 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 교통체계효율화 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tokihiko Akita, Katsuhiko Satoh (2003). "Development of 4WS control algorithms for an SUV", JSAE Review, Vol. 24, pp.441-448.
2. 宅野高明(1994). "車運動性能とシャシーメカニズム", グランプリ出版, 東京, Japan.
3. Duane R Pillar, Eric E. Braun(1995) "All-Wheel Steering System for Heavy Truck Applications", SAE Technical paper, 952680, pp.89~101.
4. 문경호, 목재균, 장세기, 박우성(2006). "굴절차량의 전 차륜 조향 시스템 적용에 관한 검토", 한국철도학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp.1~6.
5. 자동차기술학회(1996), "자동차 기술 핸드북", 한국자동차공학회 번역 발간.
6. D. de Bruin, A.A.H. Damen, A. Pogromsky (2000). "Backstepping Control for Lateral Guidance of All-Wheel Steered Multiple Articulated Vehicles", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, pp.95~100.
7. D. de Bruin, P.P.J. van den Bosch (1999). "Modelling and control of a double articulated vehicle with four steerable axles", Proceed-

- ings of the American Control Conference, pp.3250~3254.
8. Thomas D. Gillespie (1992). "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, Inc., Warrendale, PA, USA .
 9. 이수호, 박태원, 문경호, 전용호, 이정식, 김덕기(2007). "전차륜 조향장치를 장착한 굴절궤도 차량의 주행특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제10권, 제4호, pp.444~450.
 10. 문경호, 목재균, 장세기, 이수호, 박태원(2007). "조향제어를 위한 가상고정축 설정 방법", 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp.1~8.
 11. Hans B. Pacejka (2002). "Tire and Vehicle Dynamics", SAE, Inc., Warrendale, PA, USA.
- 접수일(2008년 5월 6일), 수정일(2008년 6월 20일), 게재확정일(2008년 6월 20일)