굴절차량의 전 차륜 조향시스템 적용에 관한 검토
Application of all-wheel steering system to articulated vehicles

문경호* 목재균** 장세기** 박우성***
Moon Kyeong-Ho Mok Jai-Kyun Chang Seky Park Woo-Sung

ABSTRACT

Steering systems are classified as FWS(front-wheel steering), RWS(rear-wheel steering) and AWS(all-wheel steering) according to steering position. AWS is effective to reduce turning radius and platform length because all wheels are steered. In this study, we have reviewed effects of application, turning radius, and operating conditions when appling all-wheel steering system to articulated vehicles. As a result, it was concluded that AWS must be applied to reduce turning radius and alternative plans are needed to fit the differences of the sense of operation.

1. 서 론

자기안내 굴절차량은 철도레일을 따라서 주행하는 철도 차량과 달리 자기궤도의 안내를 받으며 도로를 주행하는 차량으로 2량을 한 편성으로 연결하여 운행하는 차량이다. 철도차량에서는 캔트 및 차륜의 답면구배로 인하여 차축의 내측 차륜과 외축 차륜의 직경을 달리함으로서 속도의 차를 보상해 주기 때문에 곡선구간을 운행할 때 별도의 조향장치가 불필요하지만 자기안내 굴절차량의 경우, 정해진 자기궤도를 따라 주행하기 위해서 차량 자체에 조향장치를 구비하여야 한다. 이러한 조향장치는 차량의 진행방향을 바꾸기 위하여 바퀴의 회전축 방향을 바꾸어서 차량의 회전 능력을 확보하며 주행 안전상 매우 중요한 장치 중의 하나이다.

조향 방식으로는 앞 차륜 조향(front-wheel steering), 후 차륜 조향(rear-wheel steering), 전 차륜 조향(all-wheel steering)으로 나눌 수 있다. 외국의 경우, 일부 고급 승용차 및 다량 편성 차량에서 전 차륜 조향 방식을 사용하지만 국내에서 운행하는 자동차 및 버스는 앞 차륜 조향 방식을 사용하고 있다. 그러나 굴절차량과 같이 2량 이상 편성된 차량의 경우, 긴 차량 길이로 인하여 회전반경이 길어지므로 원활하게 곡선을 주행하려면 전 차륜 조향 방식을 선택해야만 한다. 전 차륜 조향이 가능한 자기안내 굴절차량은 운전모드가 1개인 앞 차륜 방식과 달리 여러 가지의 운전모드가 존재하게 된다. 휠체어 등이 접근성이 쉽고 용이하기 위해서 굴절차량은 정밀한 정차가 요구되고 경제적인 측면에서 정거장 거리도 짧아야 한다. 이러한 조건에 맞는 운전모드는 전 차륜의 동일한 조향각도를 가지게 해서 평행하게 정거장에 접근하도록 해야 한다. 곡선을 주행할 때 운전모드는 곡선반경에 따라 전 차륜의 조향각도가 달리 적용해야 하므로 복잡하게 된다.

본 연구는 전 차륜 조향 시스템을 굴절차량에 적용할 때의 효과, 회전반경, 운전조건 및 해결사항 등의 고려사항들을 검토하였다. 검토 결과, 축거가 긴 굴절차량에서는 최소회전반경을 맞추기 위하여 적용해야 하며 수동으로 운전하여 곡선 선회할 때 일반적인 차량과 운전 감각이 다르기 때문에 운전자 교육 및 이에 대한 개선책이 필요할 것으로 판단된다.

* 한국철도기술연구원 미래기술실용화사업단 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 미래기술실용화사업단 책임연구원, 정회원
*** 건설교통부 물류혁신본부 사무관, 비회원

2. 조향시스템 적용 효과 검토

2.1 선회 메카니즘(Cornering mechanism)

고속으로 선회할 때 횡가속도에 의한 원심력이 발생하게 되고 이에 대응하는 선회력(cornering force)이 나타나게 된다. 이 선회력인 횡력은 그림 1 및 2와 같이 전진방향(direction of heading)과 진행방향(direction of travel)의 차이로 인하여 발생하는 미끄럼각(Slip angle)에 비례하게 된다.

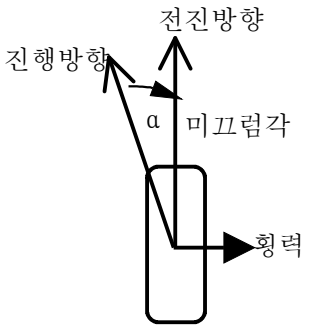

그림 1 횡력과 미끄럼 각

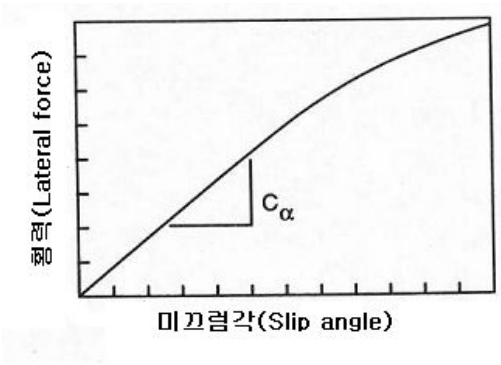

그림 2 선회 계수

그림 3과 4는 원심력에 대항하는 선회력을 나타낸 것으로 원심력과 선회력이 균형을 맞추기 위하여 미끄럼각이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 전륜의 선회력은 차륜을 조향시킴으로서 얻어지는데 후륜은 각도를 가지고 미끄러지며 달리면서 얻어진다. 속도가 더 커지면 $원심력 = 질량 \times \frac{속도^2}{곡률반경}$ 이므로 이에 대응하는 선회력을 가지기 위해서 후륜이 더 많이 미끄러지며 달리게 되고 이로 인하여 불안한 거동을 나타나게 된다. 차륜의 궤적을 살펴보면, 원심력 즉, 횡가속도가 무시할 수 있을 정도로 작을 때는 후륜이 전륜의 안쪽으로 지나가게 되지만 횡가속도가 증가하면 후륜에서도 선회력에 대한 미끄럼각을 형성하기 위하여 바깥쪽으로 움직이게 되어 후륜은 전륜이 바깥쪽을 지나가게 된다.

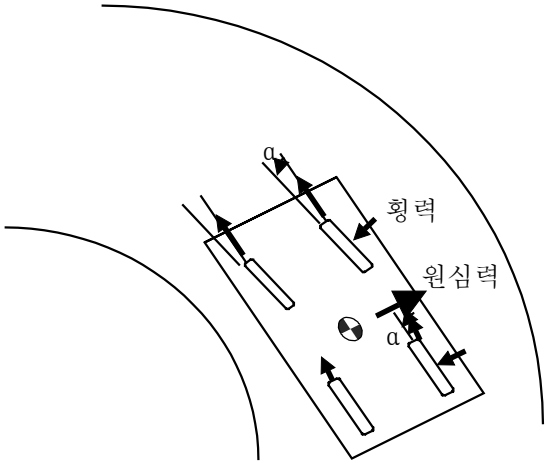

그림 3 원심력에 따른 선회력(저속)

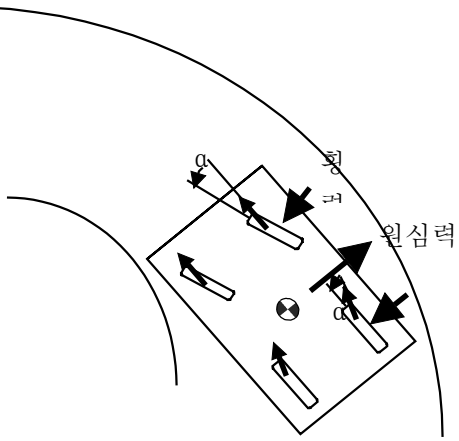

그림 4 원심력에 따른 선회력(고속)

2.2 적용 효과 검토

전 차륜 조향은 전 차축과 후 차축의 모든 차륜에서 조향이 되는 방식으로 AWS(all-wheel steering)이라 하며 1량에 적용될 경우를 4WS(4-wheel steering)이라 한다. 소회전, 기동성을 목적으로 하여 특수차량에 채용되었으나 현재는 고속선회능력 향상을 위하여 고급 승용차 등에도 채택하고 있다.

4륜 자동차에서는 안정성에 주안점을 두고 AWS를 적용하는 측면이 강하다. AWS를 적용할 경

우, 선회 메카니즘에서 알 수 있듯이 고속 주행 중 차선을 변경할 때 앞바퀴와 뒷바퀴를 같은 방향으로 조향하기 때문에 코너링력 발생이 동시에 이루어지고 차체의 방향이 선회방향과 일치하여 안정된 선회가 가능하기 때문이다. AWS 차량에서 저속에서의 선회시 차량의 회전성을 향상시키기 위하여 앞바퀴를 조향할 때 뒷바퀴를 일순간 반대방향으로 조향한 후 다시 같은방향으로 조향함으로써 선회의 초기에 뒷바퀴의 바깥쪽으로 코너링력을 발생시켜 안정된 선회성능을 얻기도 한다. 이 처럼 일순간의 반대방향 제어와 함께 자동차의 회전을 검출할 수 있는 요율(yaw rate) 신호를 사용할 경우, 갑작스러운 횡풍에 노출된 경우나 눈 길 등에서 일순간 횡방향으로 미끄러져 자동차의 진행방향이 갑자기 변경되는 경우 자동적으로 후륜을 조향하여 안정된 방향으로 차량을 주행시켜 차량의 안정성을 향상시키는 능동제어형 4륜 조향시스템이 적용도 가능하다.
4WS는 선회반경을 작게 할 수 있는 효과를 갖는다. 즉, 차량의 휠베이스를 길게 하면 주행시 안정성과 승차감을 향상시켜며 실내공간을 넓게 사용할 수 있지만 저속에서의 선회반경이 크게 되어 조종성이 나쁘게 되지만 4WS를 사용하여 앞바퀴와 뒷바퀴가 반대로 조향하면 선회반경을 줄일 수 있다.

일반적으로 리무진을 제외한 승용차의 축거는 3m가 넘지 않지만 일부 굴절차량의 경우 7m(phileas 7.7m)가 넘는 경우도 있으므로 회전성능 측면에서 AWS를 적용해야 한다. 이 경우, 모든 차축이 독립된 조향기능을 갖게 되므로 차량길이에 비하여 선회반경이 작고 정거장에서 모든 차륜이 동시 조향되므로 정거장 길이가 짧아도 안전한 접안이 가능하다. 보통 세가지 모드로 운행하게 되는데 저속이거나 주차 시에는 중간륜, 후륜이 전륜의 방향과 반대로 돌아가는 역위상 조향(네가티브 모드)으로 작동하여 회전반경이 작아지는 효과가 있으며 보통의 속도에서는 중간륜, 후륜의 방향이 직선 또는 중립을 유지하는 중립 모드에 놓는다. 고속 또는 정류소 진입 시에는 중간륜, 후륜의 방향이 전륜과 같은 방향으로 돌아가는 동위상 조향(포지티브 모드)으로 작동하므로 차선변경 등을 유리하게 한다. 조종 안정성 측면에서 보면 차선 변경시 전 차륜을 동시에 동위상으로 조향하기 때문에 코너링력 발생이 동시에 이루어지고 차체의 방향이 선회방향과 일치하기 때문에 안정된 선회가 가능하다.

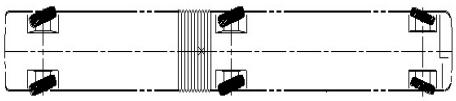

그림 5 역위상 조향제어

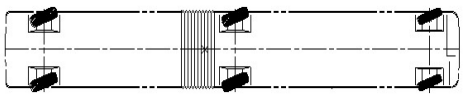

그림 6 동위상 조향제어

3. 회전반경 검토

3.1 회전 반경

원심력이 없어서 타이어의 횡력이 발생하지 않는 저속에서는 기하학적 구조에 의해서 조향각도가 정의된다. 전륜과 후륜이 동시에 조향되는 2축 차량을 기준 기하학적으로 그리면 그림 7과 같다. 그림에서 좌표의 원점 O를 후륜의 트레드 중심으로 하고, 선회 중심의 좌표를 P(x_0, y_0)로 할 때 외륜과 내륜의 평균각도를 적용하여 x_0, y_0를 구하면 다음과 같다.

$$x_0 = \frac{l}{\tan\delta_f + \tan\delta_r} \quad \text{----------} \quad (1)$$

$$y_0 = l - \frac{l \cdot \tan\delta_f}{\tan\delta_f + \tan\delta_r} \quad \text{----------} \quad (2)$$

외륜과 내륜의 각도는 다르지만 내륜과 외륜의 평균각도로서 차륜의 윤거의 중심에서 단순화하여 회전반경을 구할 수 있고 전륜의 선회반지름을 R, 후륜의 이탈궤적(전륜과의 차이)을 △R은 아래의 식(3)과 (4)로 표현할 수 있다.

$$R=\overline{PQ}=\frac{l}{\sin\delta_f+\cos\delta_f\tan\delta_r} \quad \text{----------} \quad (3)$$

$$\triangle R=\overline{PQ}-\overline{PO}=\frac{l}{\sin\delta_f+\cos\delta_f\tan\delta_r}-\frac{l}{\sin\delta_r+\cos\delta_r\tan\delta_f} \quad \text{----------} \quad (4)$$

여기서, δ_f: 전륜 조향각(내륜과 외륜(좌우륜) 평균), δ_r: 후륜 조향각(내륜과 외륜(좌우륜) 평균), b_f:전륜의 윤거(차륜간 거리), b_r: 후륜의 윤거(차륜간 거리), l: 축거(축간 거리)이다.

2량 모델인 경우 관절각(Articulation angle)에 의해서 복잡해지게 된다. 좀 더 단순화하기 위해서 내륜과 외륜의 중심점을 기준으로 자전거 모델을 만들면 그림 8과 같다. 여기서 첫 번째 축의 차륜위치를 W_1, 두 번째 축의 차륜위치를 W_2, 세 번째 축의 차륜위치를 W_3라 하고 관절(Articulation) 위치를 A라 놓았으며 W_2을 원점으로 하였다. 우선 전륜만 조향 될 때(W_2, W_3가 조향되지 않음)는 관절각(Articulation angle)에 의해서 제한되며 이 때 관절각은 차량의 구조에 의해서 최대로 꺾일 수 있는 각도가 정해진다. 최대로 꺾일 수 있는 관절각도를 β라고 하였을 때 최대회전반경이 정해지며 이 때 최대조향각도도 구할 수 있다.

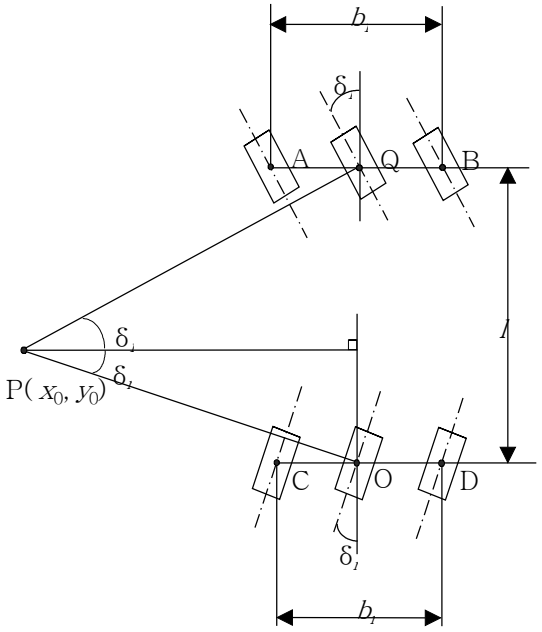

그림 7 전 차륜 조향 2륜 모델의 기하학

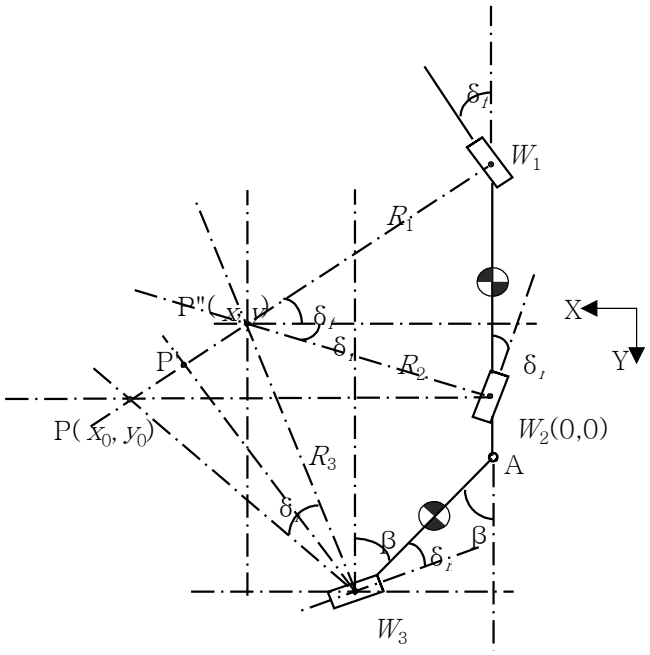

그림 8 전 차륜 조향시 2량의 자전거 모델 기하학

AWS(W_2, W_3가 조향될 때)는 W_2 또는 W_3 둘 중에 하나가 결정되면 다른 하나가 결정된다. W_2를 먼저 결정할 때는 1량의 AWS 조향시와 같은 방법으로 하면 되지만 W_2는 W_1과 W_3사이에 있으므로 셋 중에 회전반경이 가장 작다. 그러므로 W_3를 먼저 결정하는 것이 바람직하다. 그림 3.13에서 W_2, W_3가 조향되지 않을 때의 회전중심은 P점이 된다. W_3가 최소가 되는 점은 $\overline{AW_1}$에서 W_3에 수직이 되는 지점은 P'이지만 W_1의 반경이 길어지기 때문에 조금 더 안쪽 지점인 P"(x, y)이 되어야 한다. 수식으로 나타내면

$$x=(\overline{AW_2}+\overline{AW_3}\cdot\cos\beta+y)\cdot\tan(90°-\beta-\delta_{r2})+\overline{AW_3}\cdot\sin\beta \quad \text{----------} \quad (5)$$

$$y=\overline{W_1W_2}-x\cdot\tan\delta_f \quad \text{----------} \quad (6)$$

y를 x에 대입하면

$$x=\frac{(\overline{AW_2}+\overline{AW_3}\cdot\cos\beta+\overline{W_1W_2})\cdot\tan(90°-\beta-\delta_{r2})+\overline{AW_3}\cdot\sin\beta}{1+\tan\delta_f\tan(90°-\beta-\delta_{r2})} \quad \text{-------} \quad (7)$$

그러므로 W_1의 회전반경 R_1과 W_3의 회전반경 R_3를 구하면 다음과 같다.

$$R_1 = \frac{x}{\cos\delta_f} \quad \text{----------} \quad (8)$$

$$R_3 = \frac{y + \overline{W_2A} + \overline{W_3A}\cdot\sin\beta}{\cos(90° - \beta - \delta_{r2})} \quad \text{----------} \quad (9)$$

3.2 회전반경 및 이탈궤적

자동차 안전기준에 관한 규칙에 의하면 자동차의 최소회전반경은 바깥쪽 앞바퀴자국의 중심선을 따라 측정할 때에 12미터 이내이어야 한다. 이를 기준으로 회전반경을 계산할 최대 가능한 축간거리를 계산할 수 있다. 또한 자동차 안전기준에는 없지만 차선의 폭에 맞게 원활하게 회전할 수 있는가를 검토하려면 전륜과 후륜의 회전반경의 차인 이탈궤적을 알아야 한다.

4륜 차량의 바깥쪽 차륜을 기준으로 하고, 윤간거리 2010mm로 할 때 전륜 조향과 전후륜 조향(AWS) 시의 축간거리에 따른 회전반경 및 이탈궤적을 그림 9에 나타냈다. 여기서 전륜만 조향시는 전륜 조향각도 40°, 후륜 조향각도 0°로 하였고 AWS의 경우는 전륜 조향각도 40°, 후륜 조향각도 20°로 하였다. 4륜 차량의 경우, 최대 가능한 축간거리는 7.2m 임을 알 수 있고 AWS를 적용하였을 때 축간거리 7.7m이어도 현재 전륜만 조향하는 버스의 축간거리 5.4m와 같은 약 9.2m의 회전반경이 나온다. 이탈궤적 측면에서 볼 때도 축거 5.4m로 최소회전반경으로 돌 때 4.2m의 도로폭이 필요하지만 AWS를 적용할 때는 축거 7.8m의 차량이라도 도로폭이 4m 이내이면 된다. 축거 5.4m의 전륜조향 차량의 경우, 약 10m의 회전반경이 되어야 4m의 도로폭을 주행할 수 있게 된다. 그러므로 전차륜 조향을 했을 때 곡선 도로를 주행하는 선회 성능 측면에서 많은 잇점이 있음을 알 수 있으며 특히 굴절차량과 같이 차량의 축거 및 길이가 긴 경우에는 효용성이 더 크다고 할 수 있다.

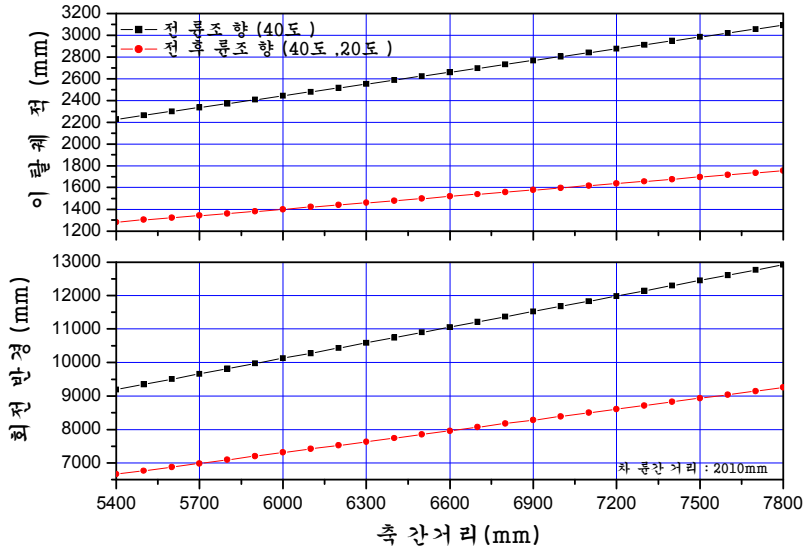

그림 9 축간거리에 따른 회전반경 및 이탈궤적(1량)

굴절차량의 경우, 관절이 꺽이는 각도가 한정적이므로 이를 기준으로 전륜만 조향시의 최대조향각도를 구하여야 하며 이를 기준으로 하여 2륜과 3륜의 최적 조향각도를 찾아야 한다. 최소회전반경은 식(8)과 (9)의 R_1과 R_3가 같아지는 지점을 구하면 된다. Phileas 굴절차량의 제원인 최대관절각도(β) 43°, $\overline{W_1W_2}$ 7700mm, $\overline{W_2A}$ 1470mm, $\overline{W_3A}$ 6105mm를 적용하면 전륜의 최대조향

각도는 38.4°, 3축의 조향각도(δ_{f2})는 30.8°, 회전반경은 R_1은 8429mm, R_3은 8426mm가 되며 2축의 조향각도(δ_{f1})와 R_2은 각각 20.4°와 7045mm가 된다.

4. 운전조건 및 해결점

주행안정성 등의 주행 성능을 향상하고 기존의 전륜만 조향되는 차량과 비교했을 때 운전감각이 다르지 않도록 설계하기 위해서는 후륜의 조향 각도를 작게 하여야 한다. 승용차와 같은 소형차량은 축간거리가 짧기 때문에 후륜의 경우, 약간의 조정만으로도 회전할 때 별 무리가 없지만 후륜의 조향각도를 크게 하려면 차륜의 조향 공간을 확보해야 하는데 이로 인하여 사용 가능한 트렁크의 공간이 작아지는 단점이 있기 때문에 후륜의 조향각도를 작게 하고 있다. 보통의 경우, 전륜과 역위상으로 후륜을 조향할 때 최대 5°로 제한하고 있으며 후륜을 전륜과 같은 동위상으로 조향 할 때는 최대 1°로 제한하고 있다.

궤도차량의 경우, 주행속도가 80km/h 정도이며 축간 거리가 길어서 안정성 측면에 유리하기 때문에 소형차량과 같은 안정성 측면에서 조향을 제어하기 보다는 선회반경을 작게 하고 정거장을 짧게 빠르게 정차하기 위한 목적이 더 크다. 선회반경을 작게하기 위해서는 후륜의 조향각을 역위상으로 크게 조향되어야 하며 정거장 정차시에도 동위상으로 비교적 큰 조향각도를 가져야 한다. 자기궤도를 따라서 자동운전시에는 문제가 없지만 수동운전시에는 3가지 운전모드에서 운전되어야 한다. 일반적인 운전시에는 전륜만 조향되어야 하고 저속으로 곡선을 선회할 때는 후륜이 전륜과 역위상으로 조향되어야 하며 정차시에는 전륜과 동위상으로 조향되어야 한다. 수동운전시 스위치 조작에 의해서 운행모드를 선택해야 하므로 일반적인 차량과 운전 감각이 다르기 때문에 운전자 교육 및 이에 대한 개선책이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

개선된 분기기에 대한 성능을 배면횡압 측면에서 시험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속주행시 전 차륜 조향시스템을 적용하여 후륜을 전륜과 같은 방향으로 약간의 각도를 가지게 조향하면 안정성이 높아짐을 알 수 있다.

(2) 회전반경 및 이탈궤적이 짧아지므로 회전성능 및 원활한 도로주행이 가능하며 축거가 긴 굴절차량에서는 최소회전반경을 만족하기 위하여 필수적으로 AWS를 적용해야 함을 알 수 있다.

(3) 수동으로 운전하여 곡선 선회할 때 일반적인 차량과 운전 감각이 다르기 때문에 운전자 교육 및 이에 대한 개선책이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Thomas D.Gillespie, “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers Inc, 1992

2. 宅野高明, “車輛 運動 性能と Chassis mechanism”, 1994

3. 문경호, “자기궤도차량의 전 차륜 조향시스템 적용에 관한 기초 연구”, 한국철도기술연구원, 2005. 9.

4. 심정수,“4륜 조향시스템이 차량의 주행역학적 특성에 미치는 영향”, 자동차공학회지 Vol.12 NO. 3, 1990

5. 장진회, “후륜 조향 동역학 모델 및 제어로직 개발”, 한국자동차공학회 논문집 4권 6호, 1996

6. 윤성호, “조향방식 안내궤도 차량들의 주행안정성 비교”, 한국철도학회논문집 5권 1호, 2002.3