

굴절차량의 자동안내제어 성능향상을 위한 전향보상기 설계

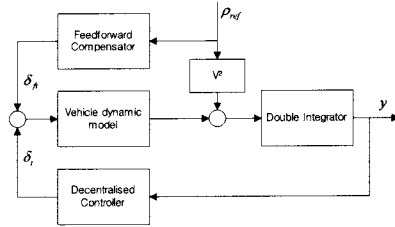
민경득\*, 윤경한\*, 김영철\*, 변운섭\*\*  
 충북대학교 전자공학과\*, 한국철도기술연구원\*\*

Design of Feedforward Compensator for Guidance Control of an Articulated Vehicle

Kyung-Deuk Min\*, Kyoung-Han Yun\*, Young-Chol Kim\*, Yun-Seob Byun\*\* and Jai-Kyun Mok\*\*  
 Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Korea\*  
 Bimodal Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea\*\*

**Abstract** - 전 차륜 조향 굴절차량의 자동안내제어를 위한 기준경로와의 편차 되먹임 방식은 곡선경로에서 발생하는 정상상태 오차를 줄이기 어렵다. 본 논문은 이 차량의 자동안내제어의 성능향상을 위한 전향보상기 설계에 대해 기술한다.

를 포함한 안내제어 시스템의 블록다이어그램이다.



〈그림 3〉 안내제어 성능개선을 위한 전향보상기의 블록다이어그램

1. 서론

바이모달 트램(Bimodal Tram)은 버스와 열차의 장점을 살린 새로운 개념의 도시형 교통수단이다. 이 차량은 두 개의 버스형 객차가 연결된 굴절 형태이다. 또 모든 차륜이 조향 가능한 구조로 자동으로 차선을 따라 안전하게 주행하게 하는 안내제어 시스템이 적용된다. 그런데 이러한 자동안내제어를 위해 차량 내부의 3개의 센서로부터 측정되는 기준경로와의 편차를 되먹임 하는 방식을 적용하면 기준경로와의 횡 방향 편이량은 곡률이 큰 커브를 운행할수록 커진다[3]. 또 커브가 지속되는 동안 일정한 정상상태 오차도 발생한다. 이러한 오차의 발생은 기준경로의 곡률의 변화에 따라 발생하는 것으로 곡률의 정보를 미리 알고 있다면 전향보상 방법으로 오차를 효과적으로 줄일 수 있다.

기준경로와의 횡방향 편이량은 곡률이 큰 커브를 운행할수록 커지는 이유는 식 1의 KRRI 바이모달 트램의 횡 방향 선형모델에서 기준경로의 곡률( $\rho_{ref}$ )이 외란입력에 해당하기 때문이다. 이처럼 직선보다 커브를 주행할 때 더 큰 횡방향 편이가 발생하는 것은 필연적이지만 전체 기준경로에 대한 곡률 정보를 미리 알고 있다면 곡률에 따른 외란을 전향보상기를 통해 보상할 수 있다.

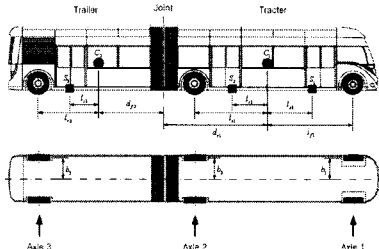
본 논문에서는 전 차륜 조향 굴절차량의 자동안내제어의 성능향상을 위해 주어진 기준경로의 정보를 입력으로 하는 전향보상기 설계하고 KRRI 바이모달 트램 모델에 적용한 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증한다.

2. 굴절차량의 비선형 동적 모델 및 안내제어 시스템

기준경로의 곡률이 트램의 동역학에 어떠한 영향을 미치는지를 해석하기 위해서는 차량의 수리적 모델이 필요하다. 본 논문에 적용된 차량 모델은 Lagrange 방정식을 통해 얻은 KRRI 바이모달 트램 비선형 동적 모델[1,2]이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_r \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q_r \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} + B\delta_t + W\rho_{ref} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \\ y_{r3} \end{bmatrix} = Cq_r$$



〈그림 1〉 KRRI 바이모달 트램

그림 3의 전향보상기를 상태방정식 형태로 표현하면 식 1의 상태 방정식에 전향보상기의 출력( $W\rho_{ref}$ )을 추가한 식 2와 같다.

바이모달 트램의 형태는 그림 1과 같이 두 개의 객차로 구성되어 있다. 각각 조향이 가능한 세 개의 축(Axle 1-3)을 갖고 있고 세 개의 센서(s1-s3)로부터 기준경로와의 편차( $y_{r1}, y_{r2}, y_{r3}$ )를 측정한다. 안내제어 시스템은 이 편차를 줄이는 것을 목적으로 하며 아래의 그림 2와 같은 분산제어기 형태의 안내제어 시스템을 설계하였다[3].

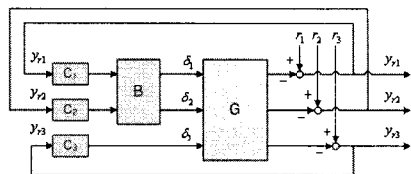
$$\begin{bmatrix} \dot{q}_r \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q_r \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} + B(\delta_t + \delta_{ft}) + W\rho_{ref} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \\ y_{r3} \end{bmatrix} = Cq_r$$

그러므로  $\rho_{ref}$ 의 영향을 상쇄 시키기 위한  $\delta_{ft}$ 는 식 3과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} B\delta_{ft} + W\rho_{ref} &= 0 \\ \delta_{ft} &= -B^{-1}W\rho_{ref} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에 차량의 속도가 7m/s일 때의 계산값인 식 (4),(5)



〈그림 2〉 전 차륜 조향 굴절차량의 안내제어를 위한 분산제어 시스템

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2.7257e+001 & 3.3400e+001 & -2.4232e+000 \\ 6.4381e+000 & -8.4930e+000 & 1.3093e+000 \\ -1.8358e+000 & 1.6230e+001 & -1.2266e+001 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.4281e+001 \\ 5.6441e+001 \\ -5.8726e+001 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 전향보상기 설계

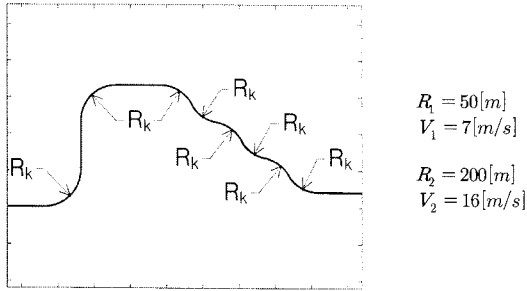
전향보상기는 곡률입력이 안내제어 시스템의 조향입력과 기준경로 편차 출력 관계에 미치는 영향을 보상하기 위해 설계된다. 그림 3은 전향보상기

를 대입하여 최종적으로 구해진  $\delta_{ft}$ 는 아래의 식 6과 같다.

$$\delta_{ft} = \begin{bmatrix} -4.5039e+000 \\ 3.2628e+000 \\ 2.0347e-001 \end{bmatrix} \rho_{ref} \quad (6)$$

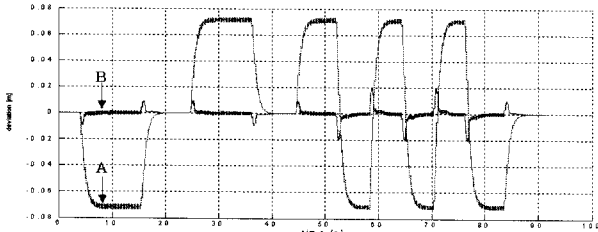
#### 4. 시뮬레이션

전향보상기를 포함한 안내제어 시뮬레이션을 위해 2가지의 기준경로를 생성하였다. 그림 4는 생성된 기준경로의 형태이다.



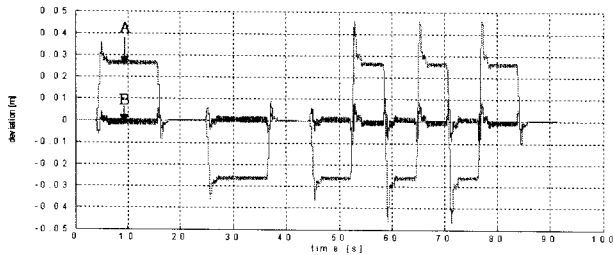
〈그림 4〉 전향보상기의 시뮬레이션을 위한 기준경로 : 세 가지 곡률의 기준경로 생성

그림 5-7은 전향보상기의 적용 전과 후의 안내제어 시뮬레이션 결과를 기준경로  $R_1$ 에서의 편차( $y_{r1}, y_{r2}, y_{r3}$ )에 대하여 각각 비교한 것이다.



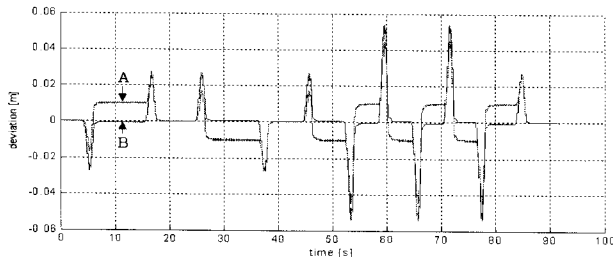
〈그림 5〉 전향보상기 적용 전(A), 후(B)의 안내제어 시뮬레이션 결과 비교 (yr1, R1)

그림 5에서 보듯이 전향보상기를 적용 후  $s_1$ 에서의 기준경로 편차( $y_{r1}$ )가 70%이상 감소하였고 최대 편차는 20mm 이내로 측정되었다. 특히 완전히 커브에 들어섰을 때의 편차는 적용 전 70mm, 적용 후 2mm의 결과를 보여 곡률에 따른 외란이 전향보상기에 의해 완전히 보상됨 보였다.



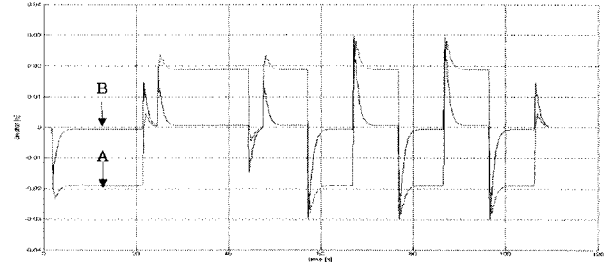
〈그림 6〉 전향보상기 적용 전(A), 후(B)의 안내제어 시뮬레이션 결과 비교 (yr2, R1)

그림 6은  $s_2$ 에서의 횡방향 편차( $y_{r2}$ )이다. 시뮬레이션 결과 전향보상기를 적용 후 그 편차가 75%이상 감소하였고 최대 편차는 10mm 이내로 측정되었다. 특히 완전히 커브에 들어섰을 때의 편차는 적용 전 27mm, 적용 후 2mm의 결과를 보여 곡률에 따른 외란이 전향보상기에 의해 완전히 보상됨 보였다.



〈그림 7〉 전향보상기 적용 전(A), 후(B)의 안내제어 시뮬레이션 결과 비교 (yr3, R1)

그림 7의 A는 전향보상기의 적용 전, B는 적용 후의  $s_3$ 에서의 횡방향 편차( $y_{r3}$ )이다. 시뮬레이션 결과 전향보상기 적용 후 완전히 코너에 들어섰을 때의 오차는 1mm 이내의 오차를 보였으나 코너에 진입하거나 탈출할 때에는 오히려 전향보상기를 적용한 후 편차가 더 커지는 것으로 나타났다. 이러한 현상의 원인은 두 번째 객차가 앞 객차에 비해 코너에 진입하는 시기가 늦기 때문으로, 이로써 두 객차에 전향보상기가 적용되는 시점이 달라야 함을 보여준다.



〈그림 8〉 전향보상기 적용 전(A), 후(B)의 안내제어 시뮬레이션 결과 비교 (yr1, R2)

그림 8은  $R_2$ 에서의 전향보상기 전후의 시뮬레이션 결과이다. 전향보상기가 적용된 B를 보면 정상상태 오차가 1mm 이내이다. 이 결과로 7m/s에서 설계한 전향보상기가 16m/s의 속도에서도 잘 동작함을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 전 차륜 조향 굴절차량의 안내제어기 성능향상을 위한 전향보상기를 설계하고 KRRI 바이모달 트램 모델에 적용한 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였다. 그 결과 설계된 전향보상기는 곡률입력에 따른  $y_{r1}, y_{r2}, y_{r3}$ 의 편차를 줄이는데 효율적으로 동작하였고 특히 차량이 일정한 곡률의 기준경로를 주행할 때 생기는 정상상태 편차를 줄이는데 훌륭한 성능을 보였다. 또 7m/s에서 설계한 전향보상기가 16m/s의 속도에서도 잘 동작함을 확인함으로써 속도에 관계없이 동일한 전향보상기를 적용할 수 있음을 보였다. 이러한 결과들은 경로와의 편차가 큰 수밖에 없는 코너 주행 시간단축 전향보상기의 추가로 확실한 안내제어 성능향상을 얻을 수 있음을 보여준다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 2008년도 위탁과제 (과제명 : 굴절차량의 자동 안내/추진제어 기술 개발)의 지원으로 수행된 결과입니다.

#### [참고 문헌]

- [1] Y.C. Kim et al. 3, "A Lateral Dynamic Model of an All Wheel Steered Bimodal Vehicle," *Proc. of ICCAS 2007*, Seoul Korea, 2007.
- [2] Y.C. Kim et al. 3, "A Linear Model of Lateral Dynamics of the KRRI All Wheel Steered Vehicle," *Proc. of ICS*, pp. 230-231, Seoul, Korea, 2008.
- [3] 김영철, "굴절차량용 자동안내제어 알고리즘 개발," 한국철도기술연구원, 국가교통핵심기술개발사업 연구보고서, 2008.
- [4] Lihua Jin and Y.C. Kim, "Fixed, Low-Order Controller Design with Time Response Specifications using Non-Convex Optimization," to be published in *the ISA Transaction*. 2008.
- [5] Y.S. Byun et al. 3, "Longitudinal Control of Bimodal-tram using Sliding Mode Control," *Proc. of ICCAS 2008*, Seoul, Korea, 2008.
- [6] D. de Bruin and P.P.J. Bosch, "Modeling and control of a double articulated vehicle with four steerable axles," *Proc. of American Control Conf.*, pp.3250-3254, San Diego, USA, June 1999.
- [7] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer, 2006.
- [8] Meihua Tai and Masayoshi Tomizuka, "Robust Lateral Control of Heavy Duty Vehicles" California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2003-24.
- [9] Chieh Chen and Masayoshi Tomizuka, "Lateral Control of Commercial Heavy Vehicles" *Vehicle System Dynamics*, v.33 no.6, pp. 291-420, 2000.