

CarSim-MATLAB/Simulink 연동을 통한 4륜구동 차량의 동력 배분 장치 제어기에 따른 성능에 대한 연구

전재훈*, 김영춘**, 김옥환**

*공주대학교 기계공학과, **공주대학교 기계자동차공학부

e-mail:yckim59@kongju.ac.kr

A study on the performance of each controller of the power distribution device of a four-wheel drive vehicle through the connection of CarSim-MATLAB/Simulink

Jae-Hoon Jeon*, Ok-Hwan Kim**, Young-Choon Kim**

*Dept. of Mechanical Engineering, Kongju National University

**Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University

요약

본 논문에서는 MR 유체 마찰 클러치를 활용한 동력 분배 시스템을 개발하기 이전에 차량 주행 상황에 맞는 동력을 전·후륜으로 분배 가능한 제어기를 설계하고 차량의 종 방향 동적 성능을 확인하였다. 차량 동역학 시뮬레이션(CarSim)을 사용하여 도로 마찰 계수를 변경하여 모의 차량 주행 실험을 진행하였다. 종 방향으로 주행하는 사륜구동 차량의 동력 배분 장치 제어기별 제어 값 비교, 타이어와 노면 사이의 슬립율을 비교 및 분석하였다.

1. 서론

사륜구동(4WD) 차량은 엔진의 구동력을 전·후륜으로 분배하여 노면 상태 변화에 따른 종 방향의 구동성능과 횡방향의 주행 안정성이 우수한 차량을 일컫는다. 4WD 차량에는 Transfer Case로 인해 엔진과 변속기로부터 발생된 동력을 내부 클러치의 체결을 통해 후륜까지 전달해주는 역할을 한다. 이와 같은 장치를 사륜구동 장치라고 하며 구동 방식에 따라 Part Time, Full Time, On-Demand 4WD로 분류 할 수 있다.[1]

Part Time 4WD는 다양한 작동 범위를 제공하는 것이 특징으로 운전자가 도로 상태에 따라 수동으로 모드를 설정할 수 있다. Full Time과 On-Demand 4WD 방식은 운전자의 조작 없이 항상 구동되는 방식이다. Full Time 4WD는 항상 엔진 출력을 네 바퀴에 전달하며, 전·후 차축에 고정된 동력을 배분하는 것이 특징이다. On-Demand 4WD 방식은 기본적으로 이륜구동으로 작동되며 Transfer Case가 후륜 차축에 직접 연결되어 있어 동력 분배가 필요한 상황을 감지해 자동으로 전륜 또는 후륜으로 동력을 분배한다. 하지만 동력 분배를 위한 클러치 체결 과정에서 충격이 발생하게 되며 이는 승차감 및 구동계의 내구성을 저해하는 요소로 많은 지적을 받고 있다.[2]

본 논문에서는 MR 유체 다판 클러치를 제안하여 동력 분배

가 가능하고 응답이 빠르면서 체결 시 충격 발생이 작은 MR 유체 마찰 클러치를 적용하고자하여 MR 유체 마찰 클러치를 활용한 동력 분배 시스템을 개발하기 이전에 차량 주행 상황에 맞는 동력을 전·후륜으로 분배 가능한 제어기를 설계하고 차량의 종 방향 동적 성능을 확인하였다.[3] 제어기 설계를 위해 MATLAB/Simulink를 사용하였으며, Full-Car 모델에 적용하기 위해 차량 동역학 시뮬레이션 프로그램(CarSim)을 사용하였다.

2. 제어기 설계

주행 시 변화하는 도로 노면 상황에 맞는 전·후 구동력 전달을 제어의 목적으로 설정하였다. 제어기 설계 시 CarSim으로부터 출력된 동력 배분 장치의 전·후 축의 속도차(ΔS)를 통해 도로 노면 마찰계수를 판단하였으며 이를 제어기의 입력으로 사용하였다. 각 제어기의 출력값인 Torque Ratio에 의해서 전·후륜 토크 분배비가 결정된다. Torque Ratio는 0에서 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 후륜 구동, 0에 가까울수록 전륜 구동을 의미한다.[4]

2.1 수식 기반 제어기

식 1과 같이 ΔS 가 양수이면 전·후 축에서 슬립이 일어난 것

이기 때문에 값이 커질수록 후 축으로 전달되는 토크량이 증가하도록 구성하였다. 차량이 극한상황에 빠졌을 경우를 대비하여 ΔS 가 일정 값을 초과하면 최대값이 출력되도록 하였다.

$$\Delta S \geq 0, \text{TorqueRatio} = K_{\Delta S}(\ln \Delta S + a) \quad (1)$$

$$\Delta S < 0, \text{TorqueRatio} = 0.9 - K_{\Delta S}(\ln |\Delta S| + a) \quad (2)$$

2.2 PID 제어기

PID 제어기는 구조가 간단하며 제어이득 조정이 비교적 쉬워 최적화가 잘 된다면 제어 성능이 뛰어나 산업 현장에서 많이 사용되고 있다.

ΔS 를 제어기의 입력으로 하며 이를 0으로 수렴하도록 제어기를 설계했다.[4]

$$\text{TorqueRatio} = K_p u(t) + K_d \frac{du}{dt} + K_i \int u(t) dt \quad (3)$$

$$u(t) = v_{fs} - v_{rs} \quad (4)$$

3. 실험 방법

3.1 실험 도로 조건

제어기를 검증하기 위해 차량 동역학 시뮬레이션 프로그램(CarSim)을 사용하여 실험을 진행하였다. 차량 모델은 총 600m의 종 방향 도로를 주행하게 되며 부분적으로 150~300m 구간의 도로 마찰 계수 [M_u]를 Rainy Asphalt [$M_u = 0.5$], Snowy Asphalt [$M_u = 0.2$]로 설정하였다. 이와 같은 인위적인 주행 환경을 조성하여 동력 배분 장치의 제어기 성능을 확인하였다. 차량 동역학 시뮬레이션 프로그램(CarSim)에 사용된 차량 모델의 주요 특징은 표 1과 같다.[5-8]



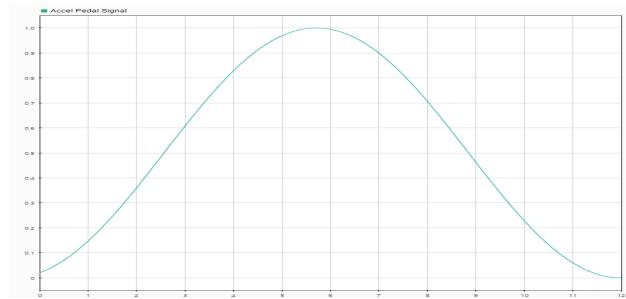
[그림 1] 모의 주행시험 대상 차량모델

[표 1] 차량 모델의 주요 특징

Sprung Mass	1590 kg
Unsprung Mass	100 kg
Front Wheel - Rear Wheel	2950 mm
Internal Engine Model	200 kW

3.2 운전 조건

Steering Wheel의 별도의 조작을 하지 않은 조건에서 Wide Open Throttle(WOT) 상황으로 실험을 진행했으며 아래 그림 2와 같이 Accel Pedal 값인 0~1 사이 값의 반복적인 입력을 통해 실제 운전자의 조작처럼 구현하였다. 신호 값이 1에 근접할수록 Full Throttle에 가깝다.

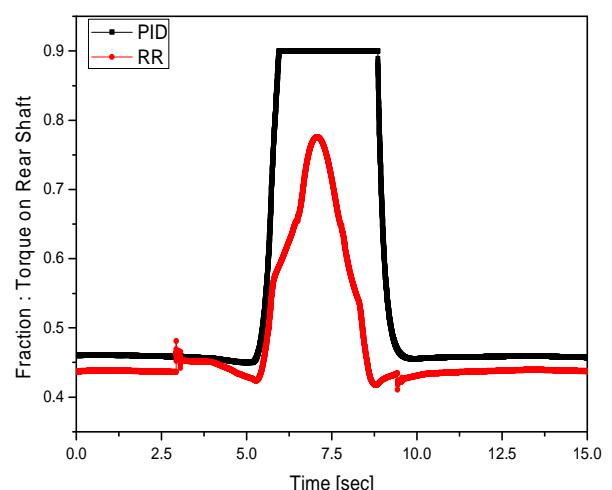


[그림 2] Accel Pedal 신호 인가 그래프

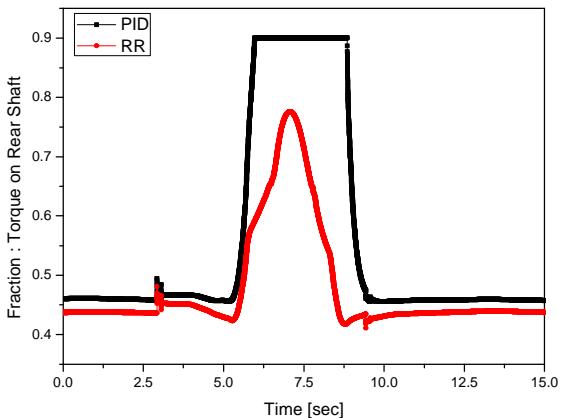
4. 모의 주행시험 결과

수식 기반 제어기와 PID 제어기별 제어 값과 차량 모델의 타이어와 노면 사이의 슬립율을 비교하였다.

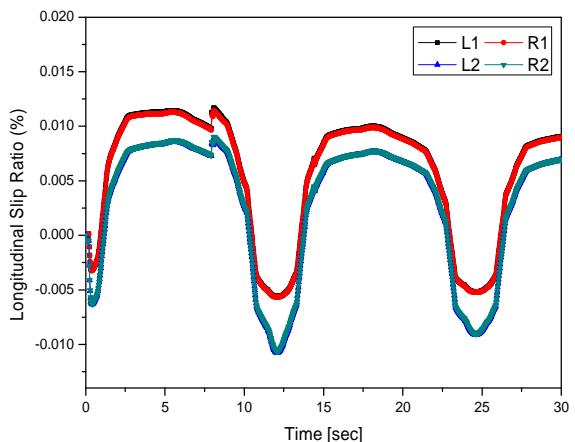
4.1 제어기별 제어량 비교



[그림 3] 노면 마찰계수 [M_u] 0.9→0.5 변화 시 제어기별 제어량 비교 그래프

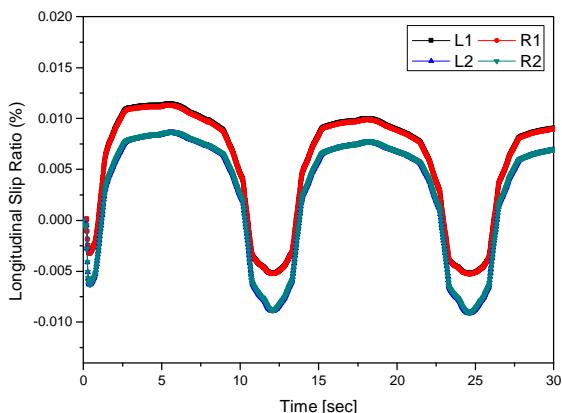


[그림 4] 노면 마찰계수 $[M_u]$ 0.9→0.2 변화 시 제어기별 제어량 비교 그래프

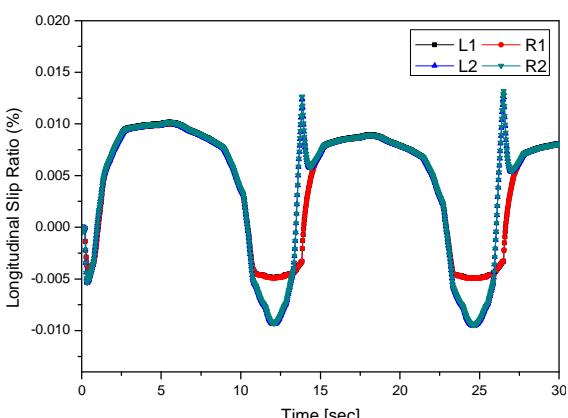


(a) 수식기반 제어기 적용 시 종방향 슬립율 결과

4.1 제어기에 따른 타이어와 노면 사이의 종방향 슬립율 비교

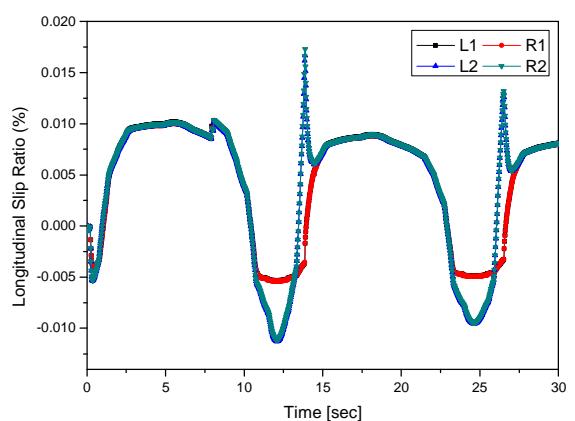


(a) 수식기반 제어기 적용 시 종방향 슬립율 결과



(a) PID 제어기 적용 시 종방향 슬립율 결과

[그림 5] 노면 마찰계수 $[M_u]$ 0.9→0.5 변화 시



(a) PID 제어기 적용 시 종방향 슬립율 결과

[그림 6] 노면 마찰계수 $[M_u]$ 0.9→0.2 변화 시

두 가지 조건의 노면 마찰계수 $[M_u]$ 변화 실험시, 두 제어기의 응답 속도 차는 0.001[sec]로 매우 미소하였으며 수식 기반 제어기는 PID 제어기에 비해 제어 량이 평균 13%정도 적은 것을 확인하였다. 또한 도로 마찰 계수가 변화되는 시점에서 제어기의 출력 값이 변화할 때 두 제어기 모두 언더, 오버슈트가 약 1.03% 정도 발생하는 것을 확인하였다. 수식기반 제어기는 정상상태 도달 시간이 0.033[sec], PID 제어기는 0.018[sec]가 소요되는 것을 확인하였다.

제어기별 타이어와 노면 사이의 슬립율 비교 시, PID제어기는 제어 목표 값인 ΔS 가 0에 수렴한 것을 확인하였다. 이로 인해 타이어와 노면 사이의 종 방향 슬립율이 전·후륜 대부분의 주행시간에서 같게 출력되었다. 일부 시점에서 전·후륜 슬립율이 큰 차이가 발생한 부분은 도로 마찰 계수가 변경될 때 후륜 측으로 큰 토크 량이 전달되면서 발생된 것을 확인하였다. 하지만 수식 기반 제어기에서는 PID제어기와 달리 ΔS 가 0에 수렴하지 않고 3~3.5[rpm] 사이의 ΔS 값이 출력되었다. 마찬가지로 슬립율 비교 시에도 전·후륜 슬립율은 0.0017 정도의 일정한 차가 계속 유지되는 것을 확인하였다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 MR 유체 마찰 클러치를 활용한 동력 분배 시스템을 개발하기 이전에 차량 주행 상황에 맞는 동력을 전·후륜으로 분배 가능한 제어기를 설계하고 성능을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

수식 기반 제어기는 PID 제어기와 비교하여 응답 속도는 0.001[sec]로 큰 차이를 보이지 않았으며, 언더, 오버슈트의 정도도 비슷한 것을 확인했다. 제어기의 언더, 오버 슈트의 존재는 실제 실험을 진행했을 때 실험 장치에 무리를 줄 수 있는 부분이며 후에 차량 주행 안정성에 있어 저해 요소로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 추가적인 제어기 최적화 또는 후보정을 통해 보완할 필요가 있다고 사료된다.

수식 기반 제어기가 PID 제어기에 비해 정상상태 도달시간이 약 2배 정도 소요됨을 확인하였다. 정상 상태 도달 시간의 차이를 통해 PID 제어기가 비교적 안정적인 제어가 되는 것으로 판단된다.

수식 기반 제어기는 PID 제어기에 비해 ΔS 가 3~3.5[rpm]의 일정한 값이 유지 또는 증가됨을 미루어 보아 이는 매우 미소한 값이지만 차량의 구동력에 있어 ΔS 가 유지되는 것은 차량의 구동력에 있어 저해요소라고 사료된다.

실험을 통하여 PID 제어기의 제어 성능이 우수하다는 것을 확인했으며, 이를 기반으로 향후 경사로 주행 및 횡 방향 동적 성능을 보조하는 제어기를 설계하여 적용한 실험을 하고자 한다.

후기

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.
(No.2018R1D1A3B07050288)

2011.

- [3] 박진영, 김영춘, 오종석, 전재훈, 정준홍. (2020). MR 유체를 적용한 Multi-Plate Clutch의 최적설계. 한국산학기술학회 논문지, 21(5), 77-83.
- [3] 김규태, 김원일, 왕덕현, 강재관, 김병창. (2012). 선사가공 시 배분력 제어를 위한 실용식의 수식화. 한국기계가공학회 춘추계학술대회 논문집, (), 93-93.
- [4] 노근제. "지능형 토크 분배를 이용한 4륜구동 차량의 안정성 제어에 관한 연구." 국내석사학위논문 국민대학교 자동차공학전문대학원, 2009. 서울
- [5] 함형진, 이종국, 전남주, 유재명, 서은석, 이형철. (2009). 4WD 차량의 토크 분배 제어에 관한 연구. 한국자동차공학회 춘계학술대회, (), 795-800.
- [6] 김지혜, 김진호. (2018). CARSIM- Simulink연동 해석을 이용한 전자기 현가장치의 상대변위 해석. 한국산학기술학회 논문지, 19(5), 82-88
- [7] 황태훈, 박기홍. (2006). CarSim과 퍼지제어기를 이용한 차량 동력학 제어기 설계. 한국자동차공학회 춘 추계 학술대회 논문집, (), 1546-1551.
- [8] 이종찬, 한상윤. (2019). 전동화 사륜구동 차량의 구동력 배분을 통한 핸들링 성능 향상. 한국자동차공학회 추계 학술대회 및 전시회, (), 1172-1177.

참고문헌

- [1] 함형진, 이형철. (2013). 경험적 접근법과 동역학적 특성에 기반한 4WD 차량의 제어 전략 개발. 한국자동차공학회논문집, 21(6), 209-217.
- [2] D. Torocsik, "Some Design Issues of Multi-Plate Magnetorheological Clutches", Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprem, Vol39(1) pp 41-44,