

EPS 시스템 fail 시 편 제동 제어를 활용한 조향 보조 유효성 분석

이 규 백¹⁾ · 류 정 환²⁾ · 김 진 수³⁾ · 조 영 은⁴⁾ · 고 상 진⁵⁾

HL 만도 SW Campus^{1~5)}

Feasibility Analysis of Differential Braking Control for EPS System Failover

Gyubaek Lee¹⁾ · Jeonghwan Ryu²⁾ · Jinsoo Kim³⁾ · Youngeun Cho⁴⁾ · Sangjin Ko⁵⁾

HL MANDO SW Campus^{1~5)}

Key words : Electric-Power-Steering, Differential braking, Scrub radius, Mitigation, Integrated chassis control

E-mail: Gyubaek.lee@hlcompany.com, jinsoo4.kim@hlcompany.com, sangjin.ko@hlcompany.com

EPS 시스템은 steering wheel 조작시 요구되는 힘을 스티어링 칼럼에 장착된 모터 제어를 통해 운전자를 보조하는 목적으로 개발되었다. 그러나 모터의 출력은 영구적이지 못하며, 특히 비포장도로와 같은 부하가 큰 험한 주행이 빈번한 경우에는 모터의 출력 저하 혹은 fail 상황이 발생하게 된다. 이러한 경우 모터의 조향 보조력이 생성되지 않아 steering wheel 이 무거워지고 운전자에 요구되는 조향 토크는 증가하여 운전자의 의지대로 차량을 조작할 수 없는 위험한 상황이 유발된다. 본 연구에서는 이러한 상황에 “조향성(steerability) 확보” 및 “조향 토크 보조(mitigation)”를 위한 기능을 편 제동(differential braking) 제어를 활용하여 그 유효성을 파악하고자 한다.

EPS 모터 출력이 상실된 경우에는 충분한 조향 모션(yaw 모멘트 및 횡력)을 생성하기 매우 어렵지만, 좌우 휠의 편 제동 기반 종방향 힘 차이를 통해 yaw 모멘트를 활용하면 어느정도 조향성 확보와 운전자의 조향 torque 보조가 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 조향 목표에 따른 편 제동력 생성을 위해 기존에 우리 연구진이 개발한 SbB(Steer-by-Brake) 시스템 [“Steer-by-Wire redundancy 확보를 위한 Steer-by-Brake 시스템 개발”, 2022 한국자동차공학회 추계학술대회 및 저널지]에서 개발한 제어를 활용하였다. 본 제어기는 주행 중 EPS 로직을 fail 시킨 상황에서 steering wheel 의 SAS 신호를 기반으로 목표 yaw rate 와 이를 따르는 편 제동력을 state-feedback 제어를 통해 실시간으로 생성한다.

편 제동을 활용한 조향성 확보 및 운전자의 조향 토크 보조 효과는 “조향기구 설계 구조”, “제동압 분배 방식”, “초기 제동력 크기”에 따라 밀접할 것이 예상된다. 그리하여 본 연구에서는 이 세 가지 조건에 따른 다양한 설정으로 test cases 를 구성하였고, 실차 시험을 통해 그 유효성을 분석하였다. Scrub radius(SR)의 크기는 “조향기구 설계 구조”에 해당하는 주요 파라미터이다. 편 제동력 작용 시 타이어나 지면 사이에는 SR 영향으로 wheel angle 이 자연스럽게 발생하게 되는데, 이 작은 양의 SR 설계(Psr)에서는 편 제동력이 인가된 동일 방향으로, 음의 설계(Nsr)에서는 반대 방향으로 생성된다. 보통 scrub radius 는 음으로 설계되는데, 본 연구에서 양의 조건을 추가적으로 고려하기 위해 좌우 전륜 휠에 35mm spacer 를 추가적으로 장착하였다. “제동압 분배 방식”은 좌우 편 제동력 결정되면 전, 후륜에 분배할 제동압력 비율 설정을 의미한다. 이는 전륜에 작용하는 제동력 부담을 후륜으로 이동시켜 앞서 설명한 전륜의 scrub radius 설정으로 영향을 조절하기 위함이다. “초기 제동력 크기”는 EPS 가 fail 상태의 steering wheel 을 조작시 초기에 충분한 편 제동력을 제공하기 위해 가중치를 조절하기 위한 조건이다. 만약 steering wheel 조작 초기에 편 제동 모멘트가 충분치 못한 경우에 보조 조향 토크 영향에 미비할 수 있다. 그리하여 이 조건은 SAS (Steer Angle Sensor) 값에 비례(interpolation)하여 가중치를 적용하여 제동 토크의 크기를 조절하도록 설계하였다. 이 세 가지 조건의 조합으로 “EPS 정상”, “EPS fail 시 편 제동 제어 미 적용”, “EPS fail 시 편 제동 제어(DBC: Differential Braking Control) 적용” 상태에 따라 총

58 개의 J-Turn, Lane-changing 의 test cases 를 수립하였다. 여러 시험을 거쳐 가장 최적의 “초기 제동력 크기” 를 결정하는 가중치를 선정하였으나 본 연구에서는 그 선정된 하나의 가중치의 시험들에 초점을 두었다. 그리하여 본 연구에서는 최종 대표 여섯 가지 J-Turn cases 에 초점을 두었으며, 이는 아래 표에 정리하였다. 이 시험들은 동일한 운전자가 steering wheel 을 우측으로 어느정도 균일한 속도와 세기 (medium rate)로 25 도까지 조작하고 유지하였으며, 조향 조작을 시작하는 초기 속도는 60kph 로 모두 동일하였다.

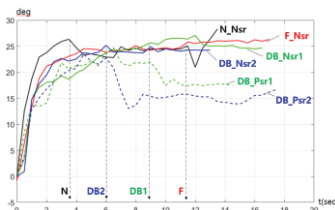
ID	EPS 상태	SR	제동압 분배	ID	EPS 상태	SR	제동압 분배
N_Nsr	Normal	Negative	-	F_Nsr	Fail	Negative	-
DB_Nsr1	Fail/ DBC	Negative	F100 R100	DB_Nsr2	Fail/ DBC	Negative	F50 R100
DB_Psr1	Fail/ DBC	Positive	F100 R100	DB_Psr2	Fail/ DBC	Positive	F50 R100

F100 R100 : 전, 후륜에 동일한 비율로 제어입력 제동압 인가

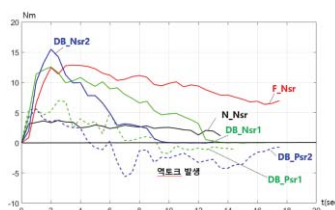
F50 R100 : 50bar 까지 전, 후륜에 동일한 비율로 제어입력 제동압 인가 후, 나머지 제동압 후륜에 부담

시험은 자동차안전연구원(KATRI) 주행시험로에서 Genesis g80 EV 세단을 대상으로 수행되었다. 시험차에서 직접 계측 가능한 Steering wheel 토크는 10Nm 로 제한되어 있어, 본 연구에서는 별도의 토크 센서가 장착된 더미 Steering wheel 과 이를 계측하기 위한 앰프 및 오실로스코프 DL750 장비를 사용하였다. 편 제동 제어기는 D-space 사의 MicroAutoboxII 에 다운로드 하였으며, 차량 상태 정보와 제어 입력 (각 휠의 제동 토크)을 IDB(Integrated Dynamic Brake) ECU 와 CANFD 통신을 통해 실시간으로 송수신하도록 구축하였다.

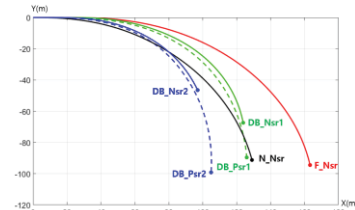
시험을 통한 조향각, 조향토크, 주행궤적 비교 결과는 아래 그림(a, b, c)와 같이 정리된다. 우선 조향각 비교(a)에 따르면 목표 각 25 도에 도달하는데 걸리는 시간이 상이 한 것을 확인하였다. 특히 EPS fail 시 DBC 제어 보조가 없는 경우에 가장 긴데, 이는 무거워진 steering wheel 의 조작성이 매우 어렵기 때문이다. 이에 반해 DBC 제어가 보조하는 경우는 EPS 정상 조향 시간과 거의 흡사한 것을 확인할 수 있다. 또한 SR 설정에 따른 영향은 미비하였다. 조향토크 비교(b)에 따르면, EPS fail 시 DBC 제어 보조를 통해 조향토크가 보조되는 것을 확인 할 수 있다. 여기서 Nsr 의 경우에는 Psr 경우보다 많은 조향토크가 요구되지만, Psr 의 경우는 선회중 반대로 역토크가 생기는 것이 확인된다. 편 제동으로 인해 전륜 휠의 각이 목표 조향각 보다 과하게 생성되기 때문이다. 이러한 영향을 줄이기 위해 F50 R100 인 조건을 고려하였고, 이때 조향토크 보조 및 조향성 확보에 가장 효과적임을 (b)와 주행궤적 비교(c)에서 확인되었다. 본 연구는 EPS fail 과 Nsr, Psr 과 같이 극단적인 상황에서 유효성 분석이 수행되었지만, 편 제동 제어가 어느정도 EPS 고장시 조향 보조에 효과적임을 확인하였다. 이 연구를 초석으로 EPS 모터 성능 저하 정도와 0sr 조향기구 구조 등을 고려하여 EPS failover 기능 개발 연구가 수행 중에 있다.



(a) 조향각 비교 결과



(b) 조향토크 비교 결과



(c) 주행궤적 비교 결과