

전기 자동차용 Brake-By-Wire 시스템을 위한 전자식 브레이크 구현

Implementation of Electro-Mechanical Brake(EMB) for Brake-By-Wire System of Electric Vehicle

류혜연¹, 정기민¹, 김만호², 이경창^{1*}

Hye-Yeon Ryu¹, Ki-Min Jeong¹, Man-Ho Kim², Kyung-Chang Lee^{1*}

〈Abstract〉

As vehicles become more intelligent this is focused on ways to enhance safety and convenience for both drivers and passengers. In particular, x-by-wire systems that replace rigid mechanical components with dynamically configurable electronic elements are being developed to expand intelligent functions, such as adaptive cruise control or lane departure warning system. Because the malfunction of safety-related modules controlling critical functions, such as brakes, throttle, and steering in x-by-wire systems, can cause injury or death, safety and reliability are the most critical issue for automotive vendors and parts manufacturers. In an effort to develop better and effective brake-by-wire system, this paper presents EMB system by using the low speed electric vehicle, which is not required large braking force, with motor controller. In addition, we design performance evaluation system of EMB with 1/4 low speed electric vehicle model and suggested EMB is evaluated through the performance evaluation system.

Keywords : Performance evaluation system, Motor type EMB, Braking force, Intelligent vehicle, Brake-By-Wire(BBW) system, EMB(Electro-Mechanical Brake)

1* 소속

E-mail: 메일내용

2 소속

1* 영문소속

2 영문소속

1. 서론

최근 들어, 자동차는 단순한 운송 수단에서 운송, 정보, 업무 및 휴식 공간으로 발전할 수 있는 지능형 자동차(intelligent vehicle) 기술 개발에 대한 관심이 증대되고 있다[1-3]. 특히, 교통사고 위험을 사전에 경감하는 능동 안전 시스템(active safety system)이나 사고가 발생한 후 운전자를 위험에서 최소화하는 수동 안전 시스템(passive safety system)에 대한 수요가 급격히 증가되고 있다.

2000년을 기점으로 자동차 회사 및 브레이크 시스템 제조사는 x-by-wire 시스템 개념을 도입한 Brake-By-Wire(BBW) 시스템을 개발하기 시작하였다. 초기의 BBW 시스템은 유압을 완전히 배제한 시스템이 아니라, 제동력을 인가하는 유압 시스템은 유지하면서 유압 시스템을 디지털 제어 시스템으로 변경하는 형태로 개발되었다. 일반적으로, 이와 같은 형태의 BBW 시스템을 wet-type의 BBW 시스템 또는 EHB(Electro-Hydraulic Brake)라고 부른다. Wet-type의 BBW 시스템은 2002년 독일 Benz사의 SL500 Roadster 양산 제품에 적용되었으며, 일본 Toyota 사의 하이브리드 차량인 Estima의 EHB 기반 브레이크에 적용되었다. 그러나, 기존의 wet-type의 BBW 시스템은 유압 시스템을 사용함으로써 기존의 시스템이 갖고 있는 복잡한 구조와 누출에 대한 취약성 등과 같은 단점들을 그대로 갖고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 완전한 형태의 전자식 브레이크 시스템인 dry-type의 BBW 시스템에 대한 관심이 집중되고 있다. 특히, dry-type의 BBW 시스템은 wet-type의 BBW 시스템이 극복하지 못하는 문제점을 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다[7-11].

그러나, dry-type의 BBW 시스템은 유압 시스

템과 같은 충분한 제동력을 확보하는데 문제점을 가지고 있다. 즉, 기존의 12V 전원 체계에서 모터가 발생시킬 수 있는 제동력에는 한계가 있기 때문이다. 또한, 기계적인 보완 없이 전자 시스템으로 구성할 때 고장에 대한 결함 허용(fault tolerant) 능력과 같은 신뢰성 문제도 함께 고려되어야 한다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여, 자동차의 전원 체계를 12V에서 42V로 변경하기 위한 연구와 강력한 제동력을 발휘하는 모터의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 전자 시스템의 고장에 적극적으로 대처하기 위한 방법으로 중복 구조에 대한 연구도 진행되고 있다[12].

따라서, 본 논문에서는 72V 전원을 사용하는 그런 환경의 저속 전기 자동차(low speed electric vehicle)에 적용할 수 있는 dry-type의 EMB(Electro-Mechanical Brake)와 제어 시스템을 제안 한다. 특히, 본 논문에서는 dry-type의 BBW 시스템에서 발생될 수 있는 부족한 제동력을 확보하는 방법을 제안한다. 그리고, 제안된 EMB 시스템의 성능을 검증하기 위하여 성능 평가 시스템(performance evaluation system)을 제작하고, 성능 평가 시스템에서 EMB의 성능을 검증한다.

2. Brake-By-Wire 시스템

일반적으로, BBW 시스템의 구조는 그림 1과 같이 구성된다. BBW 시스템은 운전자로부터 입력을 받는 브레이크 페달부, 입력 받은 신호에 따른 출력을 제어하는 제어부와 제어 신호에 따라 출력을 발생시키는 구동부로 구성된다. 또한, 페달부, 제어부와 구동부는 서로의 정보를 공유하기 위하여 네트워크로 연결되어 있다. 여기서, 각각의 모듈과 네트워크는 결함 허용을 위하여 중복 구조로 설계된다.

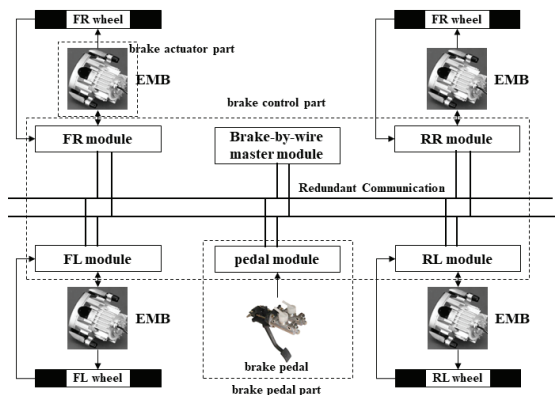


Fig. 1 Structure of brake-by-wire system

브레이크 페달부는 운전자로부터 입력 받은 제동 정보를 측정하여 아날로그 정보로 제공하는 센서가 내장된 전자식 페달과 마이크로 컨트롤러가 내장된 페달 모듈로 구성된다. 전위차계 (potentiometer)와 같은 센서는 페달의 변위를 저항의 변화로 측정하여 아날로그 값으로 출력하는 기능을 담당한다. 페달 모듈은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 ADC 기능, 입력 신호의 연산 기능, 통신을 위한 통신 기능을 담당한다. 최근에는, 센서 기능과 페달의 기능을 통합한 전자식 페달이 개발되고 있다.

브레이크 제어부는 페달부의 입력 정보에 따른 출력을 제어하기 위하여 중앙 제어 모듈과 브레이크 휠의 EMB를 제어하기 위한 4개의 모듈로 구성된다. 중앙 제어 모듈은 입력 받은 브레이크 페달 정보를 바탕으로 각 브레이크 휠에 가해질 제동력을 연산하여 각 모듈에 제공하는 기능을 가진다. 또한, 각 휠 모듈의 상태 정보를 감시하여 각각의 모듈 고장에 대비하는 기능도 추가로 가진다. 각 모듈은 중앙 제어 모듈로부터 제공된 제동력 정보를 바탕으로 제동력을 발생시키는 구동부를 제어하는 기능을 가진다. 또한, 각 휠의 제동 상태를 중앙 제어 모듈에 피드백(feedback)시키는 기능도 가진다.

브레이크 구동부는 제어 모듈로부터 입력 받은 정보에 따라 브레이크 휠의 디스크에 제동력을 인가시키는 기능을 수행한다. 일반적으로, 구동부를 구성하는 EMB는 디스크 패드를 모터로 전진시켜 디스크와 패드 사이의 마찰력으로 제동력을 인가시키는 구조로 구성된다. 특히, 모터 방식의 EMB를 비롯하여 모서리(edge)방식과 같은 다양한 제동 방법이 연구되고 있다.

특히, BBW 시스템을 위한 페달부, 제어부, 구동부는 결함 허용(fault-tolerant)을 위하여 중복 구조(redundancy)로 구성되어야 한다. 즉, 브레이크 시스템에서 결함을 허용하기 위하여 페달 입력 신호를 비롯한 센서, EMB 제어 모듈과 제동력을 인가하는 액츄에이터가 중복으로 설계되어야 한다. 또한, 브레이크 제어 정보를 전달하는 통신부는 결함 허용이 가능하도록 중복 네트워크 구조로 설계된다. 현재, 일부 자동차 부품 회사는 대표적 차량용 통신 프로토콜인 CAN(Controller Area Network) 통신을 이용한 BBW 시스템 개발을 진행하고 있다. 또한, X-by-wire 시스템을 비롯한 새시 시스템의 중복 네트워크 구조에 대한 프로토콜로서, TTTech사에서 개발된 TTP와 FlexRay 컨소시엄에서 개발된 FlexRay가 사용되고 있다.

BBW 시스템은 유압을 사용하지 않기 때문에 유압을 사용함에 따라 발생될 수 있는 환경적인 문제에 능동적으로 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 유압의 누수에 따른 제동력 상실을 방지하여 브레이크 시스템의 신뢰성과 유지 보수 기능의 향상을 가져온다. 브레이크 시스템의 제동력을 ECU로 제어함으로써 효율성을 증대시킬 수 있으며, 브레이크 시스템의 무게를 줄여 차량 주행의 효율성을 증대시킬 수 있다. 특히, 브레이크 시스템과 같은 복잡한 구조를 표준화된 형태로 구성함으로써, 공간에 따른 재설계의 어려움을 줄여 차량 개발 기간을 줄이는 효과를 가지고 있다.

3. 저속전기자동차용 Eleto Mechanical Brake 개발

우선, 저속 전기자동차용 EMB를 개발하기 위하여 차량 제동력은 차량의 무게 및 가속범위를 고려하여 계산되어야 한다. 여기서, 저속 전기자동차의 제동력을 계산하기 위한 입력 변수 및 입력 값은 표 1과 같이 정의한다. 또한, 건조한 아스팔트 노면을 기준으로 앞바퀴에 디스크 타입의 EMB 두 개로 구성하는 것으로 가정한다. 타이어와 노면간의 전축 중 최대 제동 토크 T_r 은 식 (1)을 이용하여 계산한다.

$$T_r = R \times (W_f + \alpha \times \frac{H}{L} \times \frac{W}{g}) \times \mu_{tire} \quad (1)$$

여기서, R 은 타이어의 유효 반경, W 는 전륜의 정하중, α 는 감속도, H 는 무게중심의 높이, L 은 축간 거리, W 는 차량 총 중량, μ_{tire} 는 노면과 타이어 사이의 마찰계수를 의미한다.

Table. 1. Vehicle parameter for calculating maximum braking force

Vehicle variable	value
Coefficient of ground friction	0.8
Disc pad coefficient of friction	0.4
Gross vehicle weight	690kgf
All axle weight	345kgf
Vehicle braking deceleration	0.5g
Distance between vehicle axes	1565mm
Braking efficiency	0.9-0.95
distance(center of wheel-ground)	250mm
distance(center of wheel-pad)	90mm
Vehicle speed	max 40km/h

그리고, 최대 제동력을 얻기 위하여 브레이크가 작용해야 하는 제동토크는 식 (2)를 이용하여 계산한다. 여기서, 타이어에 작용하는 수직력은 타이어 중심을 향해 작용하는 것으로 가정하고 타이어의 변형은 고려하지 않는다.

$$r \times (\mu_{disk} \times f) = R \times (W_f + \alpha \times \frac{H}{L} \times \frac{W}{g}) \times \mu_{tire} \quad (2)$$

여기서, 노면과 타이어 사이의 마찰계수 μ_{tire} 는 슬립율이 0.2 일 때 0.9를 가지며, 브레이크 패드와 브레이크 디스크 사이의 마찰계수 μ_{disk} 는 0.4로 가정하여 계산한다. 식 (2)에 따라 전축의 제동력은 0.593kgf, 전축에 필요한 제동력은 375kgf로 계산되었다. 따라서, 브레이크 패드에 작용되어야 하는 최대 제동력은 629kgf로 계산된다.

EMB의 제동 메커니즘은 모터를 이용하여 발생하는 회전력을 스크루에 연결하여 회전 운동을 직선 운동으로 변형하는 방법을 선택한다. 또한, 스크루의 직선 운동은 EMB의 패드를 직선 운동 시킴으로써 디스크와 접촉하여 마찰되며 제동력을 발생한다. 이와 같은 제동 메커니즘을 가지고 EMB 시스템을 제작하여 위하여 필요한 요소 부품을 제작하고 일부 요소 부품은 상용 제품을 사용하여 제작한다. EMB 시스템을 제작하기 위한 요소 부품은 회전 운동 에너지를 제공하는 모터 및 기어 박스, 회전 운동하는 모터와 스크루를 체결하는 커플링(coupling), 회전 운동을 직선 운동으로 전환시켜주는 스크루(screw)와 마찰력 인가를 위한 패드로 구성된다.

모터 및 기어박스는 모터 타입의 EMB 시스템에서 요구되는 빠른 응답 성능과 큰 제동력을 동시에 만족하는 전용 모터 시스템을 제작할 수 없기 때문에 EMB 시스템에서 요구되는 최대 제동력을 만족하는 상용 제품을 선정하였다. EMB 시스템에 사용된 모터는 성신 모터사의 S9D

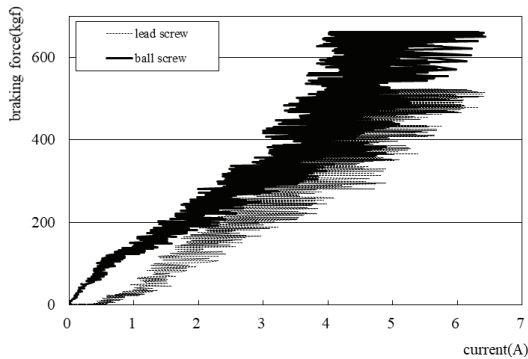


Fig. 2 Comparison of braking force transmission efficiency of lead screw and ball screw

120-24CH DC 모터를 선정한다. 회전 운동 에너지를 발생시키는 모터와 회전 운동 에너지를 직선 운동 에너지로 변환시켜주는 스크루를 연결하는 커플링은 모터의 회전축과 스크루의 회전축이 서로 정확하게 맞지 않을 경우를 고려하여 flexible 커플링을 선정한다.

다음으로, 회전 운동 에너지를 직선 운동 에너지로 전환시켜주는 스크루는 일반 상용 제품을 선정한다. 여기서, 리드 스크루는 에너지 변환 시 손실이 많고 실제 EMB 시스템을 제작할 때 잠김 현상이 발생할 수 있기 때문에 볼 스크루를 선정한다. 그림 2는 리드 스크루와 볼 스크루의 에너지 변환 손실과 잠김 현상의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 같은 전류를 인가할 때 볼 스크루가 리드 스크루에 비하여 현저하게 높은 제동력을 전달하는 것을 볼 수 있다. 또한, 리드 스크루는 제동력을 제거할 때 잠김 현상이 발생하는 데 반하여 볼 스크루는 제동력을 제거할 때 잠김 현상이 전혀 발생하지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 볼 스크루를 이용하여 회전 운동 에너지를 직선 운동 에너지로 변환시키는 방법을 적용하였다.

그림 3은 EMB 제동 메커니즘을 바탕으로 제작한 EMB 시제품을 나타내고 있다. 그림에서, 휠과 마찰을 하는 브레이크 패드를 구성하는 캘리퍼 구

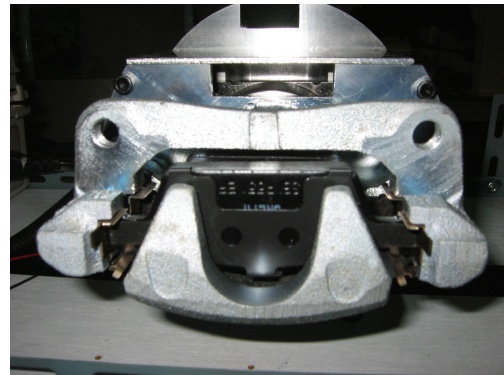


Fig. 3 Schematic diagram of EMB system

조는 주물 제작의 어려움과 주물 제작의 비용 문제로 인하여 상용 제품에서 필요한 부분을 절단하여 사용하였다. EMB는 장착 시 무게를 고려하여 알루미늄 재질을 사용하였으며, 모터를 이용한 EMB 시스템의 구현 및 성능 평가를 목적으로 하여 크기를 고려하지 않고 제작하였다.

4. EMB 시스템 제어기 설계

EMB 시스템 제어기의 설계 사양은 최대 오버슈트는 5% 이하, 정착 시간은 0.2sec 이하, 오차 성능은 5kgf로 설정하고, 시스템의 샘플링 시간은 20ms로 선정하였다. EMB 시스템의 제어기 설계는 비선형 변수를 가지는 error squared 비례 제어 알고리즘을 사용하였다. Error-squared 비례 제어 알고리즘은 식 (3)과 같이 이득을 기준 입력의 전체 범위에 대한 오차의 비에 비례하도록 설계하여 오차의 크기에 이득이 변화하도록 설계하였다[12].

$$K_c = \frac{|e|}{p} \quad (3)$$

여기서, K_c 는 비례 이득을 나타내고 P 는 백분율로 표시된 비례를 나타낸다. 그리고, $|e|$ 는 전체 기준 입력의 범위에 대한 백분율로 표시된 오차를 나타내고 변화에 따른 K_c 의 변화폭을 결정한다.

일반적으로, error-squared 제어기는 작은 오차에서는 게인 값이 작아지고 큰 오차에서는 게인 값이 커지도록 하기 때문에 빠른 응답 성능을 얻을 수 있다. 하지만 기준 입력의 급격한 변화나 큰 오차는 급격한 변수 값의 변화를 가져올 수 있으며 시스템의 진동을 증가시켜 오버슈트를 크게 할 수 있다. 또한, 시스템을 불안정하게 만들어 발산할 우려가 있다. 따라서, 비선형 계수 L 을 사용하여 식 (4)와 같이 제어기를 설계하였다.

$$K_c = K_p \left[L + \frac{(1-L)|e|}{100} \right] \quad (4)$$

여기서, K_p 는 $100/P$ 를 나타내고, K_p 는 실험적으로 2의 임계값을 가짐을 확인하였고 안전성 (stability)을 고려하여 1.5의 값으로 선정하였다. 또한, 비선형 계수 L 은 실험적으로 0.8의 값으로 선정하였다.

그림 4는 수정된 error squared 비례 제어기를 사용하여 실험적으로 브레이크를 제어한 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 급격한 기준 입력의 변

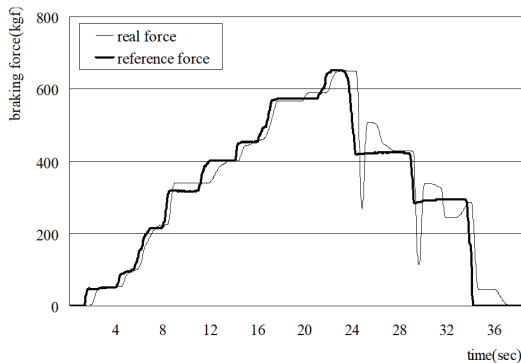


Fig. 4 Braking force control result of P controller

화가 있는 부분에서는 큰 오버슈트가 발생하고 5kgf 이상의 큰 오차가 발생함을 확인하였다. 따라서, 식 (5)와 같은 사다리꼴 적분기를 추가하여 오차를 줄이면서도 급격한 기준 입력과 출력의 변화에 둔감할 수 있도록 제어기를 다시 설계하였다.

$$\mu_1 = K_i \Delta t \left[\frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right] \Delta t \left[\frac{1}{1 + 10 \left(\frac{e(i)}{100} \right)^2} \right] \quad (5)$$

그림 5는 사다리꼴 적분기를 추가한 error-squared 비례 적분 제어기의 제동력 제어 성능 결과를 나타내고 있다. 적분기를 사용한 제어기는 큰 오차에 대한 민감도를 줄여 오버슈트를 제거하고 오차도 상당히 줄일 수 있었다. 하지만, 기준 입력에 대한 실제 제동력의 반응 속도가 늦음을 확인하였다. 즉, 기준 입력에 대한 반응 속도를 높일 수 있는 제어기 설계가 필요함을 확인하였다.

반응 속도를 향상시키기 위한 방법으로 기준 입력을 사전에 예측하여 입력하는 방법을 사용하였다. 예측 방법은 지수평활법을 이용하였고, 제어기는 기존의 error squared PI 제어기를 동일하게 사용하였다. 지수평활법은 시계열이 생성되는 시스템에 변화가 있는 경우에 과거의 모든 자료를 동일하게 취급하지 않고 최근의 자료에 더 큰 비중을 주는 예측방법이다. 즉, 최근의 자료에 더

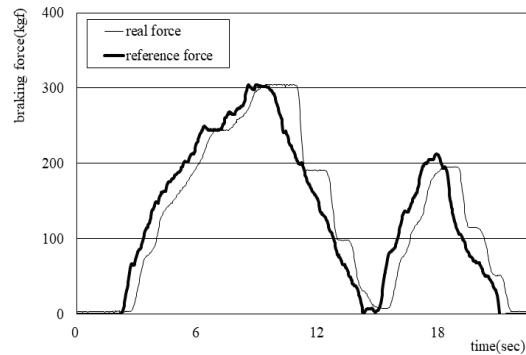


Fig. 5 Braking force control result of PI controller

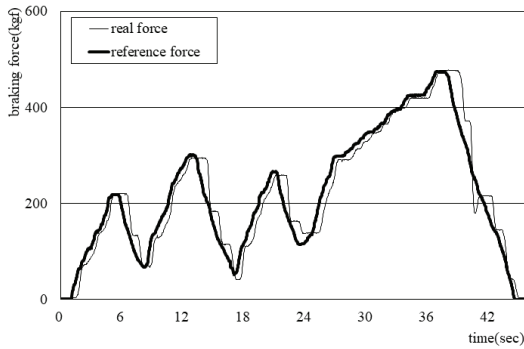


Fig. 6 Braking force control result of PI controller with exponential smoothing

큰 가중값을 주고 과거로 갈수록 가중값을 지수적으로 줄여나가는 방법이다. 최근의 자료를 주로 이용하여 미래를 예측해주므로 시계열이 생성되는 시스템에 변화가 있을 경우 이 변화에 쉽게 대처할 수 있으며 그 계산법이 쉽고 많은 자료의 저장이 필요 없다는 장점이 있다. 제어기에는 제어 입력과 같이 경향을 가지는 시계열 자료를 보다 잘 예측하는 것으로 알려진 식 (6)과 같이 이중 지수 평활법을 사용하였다[13].

$$T^{11}(k) = \alpha RT(k) + (1 - \alpha) T^{11}(k-1) \quad (6)$$

$$T^{12}(k) = \alpha T^{11}(k) + (1 - \alpha) T^{12}(k-1)$$

$$T(k) = (2 + \frac{\alpha}{1-\alpha}) T^{11}(k) - (1 + \frac{\alpha}{1-\alpha}) T^{12}(k)$$

여기서, RT(k)는 k번째의 실제 입력되는 제어 입력을 나타내고, T(k)는 k번째의 예측된 입력값을 나타낸다. 또한, α 는 이중지수 평활화 상수를 나타내고 실험에는 0.3을 실험적으로 선정하였다.

그림 6은 error-squared 비례 적분 제어기에 기준 입력에 대한 예측 기능을 추가한 제어기의 제동력 제어 성능 결과를 나타내고 있다. 그림에서, 제어기는 반응 속도, 추종 성능 및 오버슈트에 대해서 제어기 설계 사양을 만족함을 확인하였다. 특히, 제어기의 반응 속도가 예측기를 사용함

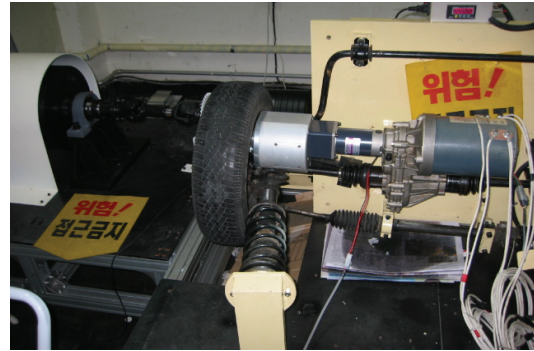


Fig. 7 Performance evaluation system of EMB

에 따라 상당히 개선됨을 확인하였다. 따라서, 예측기를 포함한 error-squared 비례 적분 제어기가 제안된 EMB를 제어하기에 적절함을 확인하였다.

5. EMB 성능 평가

본 논문에서는 제안한 EMB 시스템과 제어기의 제동 성능을 평가하기 위하여 그림 7과 같이 저속 전기 자동차의 1/4 모델의 성능 평가 시스템을 구성하였다. 그림에서, 성능 평가 시스템은 자동차의 운동 에너지를 구현하기 위한 플라이 휠, 회전 수를 검출하는 센서, 타이어와 마찰을 위한 드럼, 타이어의 하중을 부가하는 하중 제어기와 바퀴를 구동하기 위한 구동용 모터로 구성되어 있다[14][15].

EMB 성능 평가 시스템에서 하중 제어기는 타이어에 수직 하중을 부여하기 위해 핸들을 조작함으로써 하중을 조정할 수 있도록 설계하였으며 핸들은 스크류와 연결된 로드 셀을 통해 현재 상태에서 가하고 있는 하중을 알 수 있도록 설계하였다. 드럼은 리니어 가이드와 유니버설 조인트를 이용해 하중에 따라 전/후진이 가능하도록 설계하였다. 구동용 모터는 저속 전기 자동차에 사용된

모터를 사용하였으며 구동용 모터의 회전 에너지는 타이어를 통해 플라이 휠을 회전시키는데 사용되도록 설계하였다. 바퀴 휠의 회전수를 검출하기 위한 센서는 톱니 모양의 수프라켓과 근접센서로 구성하고 36pulse/rev의 분해능을 가지는 근접 센서를 이용하여 바퀴 휠의 가속도를 계산하였다 [16][17].

플라이 휠은 전기자동차가 40km/h의 속도로 주행하고 있을 때의 운동에너지를 발생시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 우선, 정 적재 상태에서 전기 자동차의 운동에너지는 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(500kg + 68 \times 2) \left(\frac{40 \times 1000}{3600}\right)^2 \quad (7)$$

$$= 39,259J$$

성능 평가 시스템의 플라이 휠을 설계하기 위하여 엔진 모터의 최고 회전수는 약 424.41rpm로 계산된다 왜냐하면, 전기자동차가 40km/h로 주행하고 자동차의 바퀴 직경은 500mm이므로 1회전 당 진행 거리는 약 1.57m로 계산되기 때문이다. 하지만, 엔진 모터가 424.41rpm으로 회전하는 경우의 운동에너지를 발생시키기 위해서는

플라이 휠의 크기가 상당히 커져야 한다. 따라서, 본 논문에서는, 플라이 휠의 속도를 높일 수 있도록 드럼의 크기를 조정하는 방법을 선택하였다. 즉, 드럼과 타이어의 속도비가 5:2가 될 수 있도록 하여 최고 속도 주행 시 플라이 휠은 약 1061rpm으로 회전이 가능하도록 설계하였다. 또한, 제동 시 앞 바퀴의 브레이크가 전체 운동 에너지의 70%를 담당한다고 가정하고 1/4 모델 플라이 휠의 운동에너지는 전기 자동차의 전체 운동 에너지의 약 35%에 해당하는 운동에너지를 발휘할 수 있도록 설계하였다. 따라서 안전율을 고려하여 축의 직경은 40mm 이상으로 하고 축의 길이는 600mm 이하로 설계하여 4개의 축을 결합시켜 플라이 휠을 제작하였다.

그림 8은 freescale사의 MC9S12DP256B를 이용한 EMB 제어기 모듈을 나타내고 있다. 제어기 모듈은 브레이크 페달의 변위 신호를 측정하는 변위차계의 아날로그 신호를 얻기 위한 ADC 기능, 브레이크 모듈 사이의 통신을 위한 CAN 통신 기능, CAN 통신에 따른 CAN 통신 인터럽트, 모터 제어 입력을 위한 PWM 기능과 기본적인 연산 기능으로 구성된다. 특히, 실험 결과를 획득하기 위해 PC와 연결이 가능한 시리얼 통신 포트를 추가하였으며 통신 라인의 편의성을 위하여 USB 타입

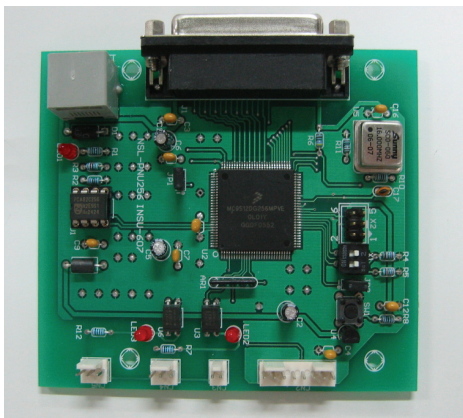


Fig. 8 EMB controller module

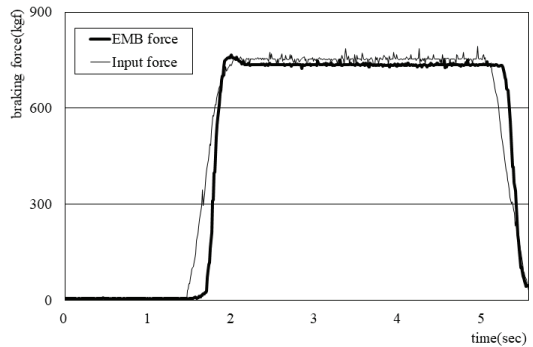


Fig. 9 Experimental result of maximum braking force performance evaluation

의 커넥터를 사용하여 통신 라인을 확보하였다.

EMB 시스템의 목표 성능 지표는 아직까지 국내는 저속 전기 자동차에 대한 성능 규격이 없기 때문에 일반 상용차에서 적용되는 브레이크 모듈의 성능 지표를 차량 중량의 차이를 고려하여 설정하였다. 저속 전기 자동차의 차량 속도를 40km/h 이하로 하고 차량 중량은 600kg로 설정하여 성능 지표를 작성하였다. EMB 시스템은 최고 40km/h에서 10m의 제동 거리를 확보하며 페달에 제동력이 인가되는 시간인 초기 시간 (initial time) 과 원하는 제동력까지 도달하는 시간 (build-up time)을 각각 200ms와 750ms 보장 할 수 있도록 성능 목표를 설정하였다.

그림 9는 본 논문을 위해 제작한 성능 시험 시스템에서 EMB의 모터 제어를 통해 인가되는 최대 제동력을 나타내고 있다. 그림에서, 페달 입력 신호를 기준으로 하여 제동력을 약 1.5초에 인가하여 약 1.9초를 전후로 750kgf 이상의 제동력을 인가할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 저속 전기 자동차 모델을 대상으로 설정한 정적인 상태에서 최대 제동력 성능 지표를 충분히 만족함을 확인하였다. 또한, 그림 9는 EMB의 응답 성능을 결과도 나타내고 있다. 그림에서, 기준 입력 신호가 1.5초에 인가되어 약 1.9초에 목표로 하는 제동력을 확보함을 확인하였다. 즉, 최대 제동력 인가 시험에서 측정된 약 500ms의 응답 시간은 초기 시간과 build-up 시간을 고려한 응답 시간 측면에서 정상적인 성능을 가짐을 확인하였다.

40km/h 차량 주행 상태를 성능 평가 시스템에서 EMB를 이용하여 제동력을 인가할 때 제동 거리를 측정하였다. 그림 10은 제동력을 인가한 상태에서 브레이크 휠과 차량의 속도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 여기서, 차량의 속도(vehicle speed)는 직접 측정할 수 없기 때문에 플라이휠의 회전속도를 이용하여 계산한 차량의 주행속도를

타이어의 반경으로 나누어 나타냈다. 전기 자동차가 40km/h 주행 상태에서 차량 및 브레이크 휠의 RPM 값과 차량의 바퀴 사이즈를 바탕으로 계산한 제동 거리는 약 4.72m로 계산되었다. 즉, 제작된 EMB의 설계의 기준으로 제시한 40km/h 주행 조건에서 10m 이내의 제동 거리를 만족함을 확인하였다. 또한, 제안된 EMB의 감속도는 10m/s^2 으로 미국 고속도로 교통안전 위원회에서 공포한 연방 자동차 안전 표준에서 새 브레이크를 장착한 최대 하중 상태의 승용차는 제동 초속도가 약 50km/h일 때, 5.2m/s^2 이상의 평균 감속도를 가져야 하며 96km/h에서는 약 5.5m/s^2 이상의 감속도를 가져야 한다는 규정을 만족함을 확인하였다[18][19].

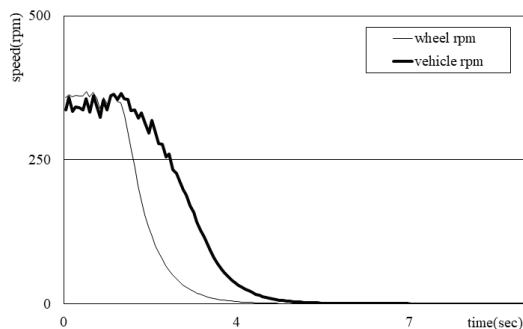


Fig. 10 Comparison of wheel speed and vehicle speed

6. 결론

본 논문은 BBW 시스템을 위한 모터 타입의 EMB를 제안하였으며 EMB 제어를 설계하였다. 또한, 제안한 EMB 제어기의 성능을 평가하기 위해 성능 평가 시스템을 제작하여 그 성능을 검증하였다. 본 논문은 EMB 성능 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 제안한 모터 타입의 EMB의 제어기 설계를 통한 성능 평가 결과에 따라 저속 전기 자동차에 적용 가능성을 확인하였다. 특히, error-squared 비례 적분 제어 알고리즘과 예측 알고리즘을 적용한 제어기의 성능이 성능 평가 기준을 충분히 만족할 수 있음을 성능 평가를 통해 확인하였다.

둘째, 저속 전기 자동차의 1/4 모델을 모사한 브레이크 성능 평가 시스템 제작을 통해 EMB의 제어기 제동 성능을 평가할 수 있음을 확인하였다. 특히, 차량을 모사하기 위한 플라이 휠 크기를 계산하여 실제 차량의 운동 에너지를 모사하여 성능 평가 지표에 따라 그 성능을 평가 할 수 있다. 따라서, 다이아모 타입의 대형 브레이크 성능 평가 시스템뿐만 아니라 본 논문에서 제작한 형태의 성능 평가 시스템을 통해 성능을 검증할 수 있음을 의미한다.

본 논문에서 제안한 EMB 시스템은 저속 전기 자동차 차량에 적절한 형태의 EMB 시스템을 제안하였다. 따라서, 일반 상용 차량에 적절한 EMB 시스템 및 제동 메커니즘에 대한 고찰이 필요하며 실차 환경 조건에 따른 제어기 설계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 특히, 제어기 설계 결과를 동일한 환경에서 실험을 할 수 있는 실차 모델의 브레이크 다이아모를 구축하여 비교할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] S. Park, K. Park, M. Kim, "Development of Front Electro Mechanical Brake for Brake by Wire System," 2011 KSAE Conference, pp.1122-1126, (2011).
- [2] J. Bae, S. Lee, D. Shin, J. Hong, J. Lee, J. Kim, "Nonlinear Identification of Electronic Brake Pedal Behavior Using Hybrid GMDH and Genetic Algorithm in Brake-By-Wire System," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 12 no. 3, pp. 1292-1298, (2017).
- [3] B. Jo, J. Jeong, M. Kim, "CBS/ABS control in 4W BBW System," 2012 KSAE Conference, pp. 657-660, (2012).
- [4] M. Kim, B. Son, S. Lee, K. Lee, "Implementation of TTP Network System for Distributed Real-time Control Systems," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.13, No.6, pp. 596-602, (2007).
- [5] W. Hwang, I. Yang, K. Huh, "Model-based Sensor Fault Detection Algorithm for EMB System," Transactions of KSAE, Vol. 20, No. 1, pp.1-7, (2012).
- [6] G. Leen and D. Heffernan, "Expanding automotive electronic systems," Computer, vol. 35, no. 1, pp. 88-93, 2002.
- [7] Jonner, W. D., Winner, H., Dreilich, L. and Schunck, E., "Electrohydraulic Brake System - The First Approach to Brake-By-Wire Technology," SAE 960991, Detroit, 1996.
- [8] R. Isermann, R. Schwarz, S. Stolzl, "Fault-tolerant drive-by-wire systems," IEEE Control Systems Magazine, vol. 22 no. 5, pp. 64-81, 2002
- [9] J. Fox, R. Roberts, C. Baier-Welt, L. M. Ho, L. Lacraru and B. Gombert, "Modeling and Control of a Single Motor Electronic Wedge Brake," SAE 2007-01-0866, 2007.
- [10] P. Yoon, "Technology Trends and Perspectives of Brake-by-Wire System," Auto Journal, vol.26, no.1, pp. 21-28, 2004.
- [11] I. Kim, M. Kim, S. Lee, K. Lee, "Design of Electro-Mechanical Brake(EMB) for Brake-By-Wire System," 2006년 KSAE symposium, pp. 128-133, (2006).
- [12] M. H. Kim, S. Lee, and K. C. Lee, "Predictive hybrid redundancy using exponential smoothing method for safety critical systems," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 6, no. 1, pp. 126-134, 2008.

- [13] F. G. Shinsky, Process Control Systems, 4th ed, MC GrewHill, (1996).
- [14] Korean Standard KSRISO 11157, Road vehicle-brake lining assembly-inertia dynamometer test.
- [15] Korean Standard KS R1139, Electric vehicle brake test.
- [16] C. K. Kim, "A development of hybrid type electric brake system," Department of Mechanical Engineering, Inje University, (2003).
- [17] Jangpyo Hong, Mechanical Design, BooksHill
- [18] Thomas D. Gillespie, Fundamental of vehicle Dynamics, SAE
- [19] "Standard No. 105; Hydraulic brake systems," Code of Federal Regulations, Title 49, Part 571.105, pp. 199-215, (1990).

(접수: 2017.08.07. 수정: 2017.08.22. 게재확정: 2017.09.06.)