

# 회생제동 및 EWB/EMB 시스템 신뢰성 평가용 Test Bench 개발

전 광 기<sup>\*1)</sup> · 황 현 수<sup>1)</sup> · 최 성 진<sup>1)</sup> · 최 정 훈<sup>2)</sup> · 황 성 호<sup>2)</sup> · 박 희 략<sup>3)</sup> · 최 세 범<sup>3)</sup>

자동차부품연구원 차체사시기술연구센터<sup>1)</sup> · 성균관대학교 기계공학과<sup>3)</sup> · 한국과학기술원 기계공학과<sup>3)</sup>

## Development of Test Bench for Reliability Evaluation for EWB/EMB with Regenerative Brake

Kwangki Jeon<sup>\*1)</sup> · Hyunsoo Hwang<sup>1)</sup> · Sungjin Choi<sup>1)</sup> · Junghoon Choi<sup>2)</sup> · Sungho Hwang<sup>2)</sup> · Heeram Park<sup>3)</sup> · Seibum Choi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Body & Chassis System Research Center, KATECH, 74 Yongjung-ri, Pungse-myun, Cheonan, Chungnam,330-912, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Chunchun-dong, Suwon, 440-746, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

**Abstract** : The key technology which can enlarge the energy efficiency in green cars such as hybrid electric vehicle, fuel cell electric vehicle and pure electric vehicle is the regenerative braking. Electronic brake systems which can be easily controlled with the regenerative brake system have been developed along with the advance of the electronic control technology. The reliability of the electronic braking system is very important because the braking system is concerned with the safety of vehicle directly and the functional safety of the electronic braking system is becoming the important issue due to the ISO 26262. But the test standard is not sufficient yet, so the researches to make a new test standard regarding to the electronic brake system and regenerative braking system are increasing. The design of test bench to test reliability and performance of electronic brake system as well as regenerative brake system was proposed in this study .

**Key words** : Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV, 연료전지자동차), Reliability(신뢰성), Regenerative Braking(회생제동), Electronic Wedge Brake(EWB, 전자 썬기 제동장치), Electro-Mechanical Brake(EMB, 전기기계식 제동장치), Brake-by-Wire(BBW, 전자제동시스템), Test Bench(테스트 벤치)

### Nomenclature

$F_{damping}$  : clamping force, N

$I_{Test Bench}$  : test bench inertia, kg · m<sup>2</sup>

$m_{vehicle}$  : vehicle mass, kg

$r_{tire}$  : tire radius, m

$T_{brake}$  : braking torque, Nm

$\mu_{diskvs pad}$  : disk-pad friction coefficient, -

$r_{disk}$  : effective disk radius, m

### 1. 서론

최근 하이브리드전기자동차, 연료전기자동차, 전기자동차 등과 같은 그린카에 대한 정부와 소비자들의 관심이 높아지고 있으며, 이러한 수요를 충족시켜주기 위해 전세계 거의 모든 자동차 메이커들은 그린카 연구 개발을 활발히 진행하고 있다.

이러한 그린카에서 에너지 효율을 높이는 가장 중요한 기술 중 하나로 제동 시 운동에너지를 전기

\* 전 광 기, [kkjeon@katech.re.kr](mailto:kkjeon@katech.re.kr)

에너지로 저장하는 회생제동이 있다.

이와 함께 전자 제어 기술의 발달로 브레이크 시스템에서도 EMB(Electro-Mechanical Brake), EWB(Electronic Wedge Brake) 와 같은 전자식 브레이크 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

브레이크 시스템은 탑승자의 안전에 직접적인 영향을 미치는 장치로서 신뢰성이 매우 중요하다. 2010년 초기 Toyota의 가속페달과 제동장치 결합에 따른 리콜 사태는 자동차 부품 신뢰성의 중요도를 입증하고 있다.

최근 ISO 26262와 같이 전자 장치도 도입되는 자동차 시스템의 기능성 안전 및 신뢰성 검증을 위한 규정이 마련되어 개발 초기단계부터 최종 생산 단계까지 전과과정에서 제품의 기능성 안전과 신뢰성을 보장하기 위한 노력이 자동차 업계에서 시도 중에 있다.

본 연구에서는 전자 브레이크시스템과 회생제동 시스템을 대상으로 기본 성능, 기능성 안전 및 신뢰성을 시험하고 검증하기 위한 test bench의 설계 및 구축 방법을 제안하였으며, 이를 이용한 기본성능 시험을 수행하였다.

## 2. Test Bench 개발

### 2.1 Test Bench 구성

대상 연료전지 차량의 제원은 Table 1과 같다. 100 kW 급 모터를 사용하여 구동 및 회생제동을 하는 SUV급 차량으로 전륜 EWB 후륜 EMB 시스템이 장착되었다.

Table 1 Specification of the target FCEV vehicle

구분	제원
차량 중량	1,950.5 kg
타이어 반지름	0.322 m
기어비	10.03
모터 용량	100 kW
모터 최대 토크	300 Nm

대상 차량 전륜 한 휠의 구동, 회생제동 및 브레

이크 시스템의 모사를 위해 Fig. 1과 같이 test bench를 구성하였다. 대상 차량과 같이 구동부인 모터에서부터 구동축, 제동 디스크, 구/제동 부하 inertia 순으로 대상 차량에서의 구동 및 제동 에너지의 흐름에 부합되도록 test bench가 설계되었다.

회생제동이 아닌 순수 기계적 제동력을 측정하기 위해 구동 모터와 디스크 브레이크 사이 전자식 클러치를 배치하여 기계식 브레이크를 사용하여 제동력 측정 시에는 전자식 클러치 제어를 통해 동력을 해제할 수 있도록 하였다. Fig.2는 구축된 test bench의 실제 모습이다.

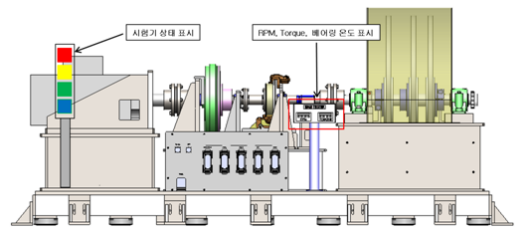


Fig. 1 Sketch of the test bench

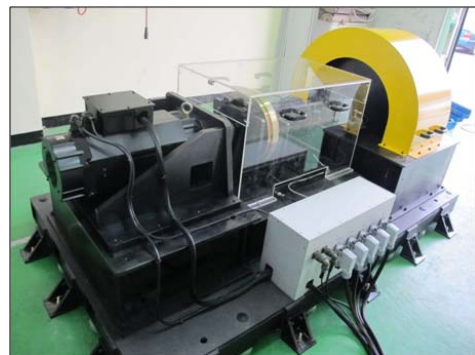


Fig. 2 Picture of the Test Bench

### 2.2 Test Bench 기구부

Test bench의 구동 및 제동 부하인 inertia는 식(1)을 통해 구할 수 있다. 전후륜의 하중 비인 7:3에 따라 전체 차량 inertia의 전륜 한 축의 비인 7/20을 취하여 전륜 한 휠의 inertia를 구할 수 있다.

$$I_{Test\ Bench} = \frac{7}{20} m_{vehicle} r_{tire}^2 \quad (1)$$

식 (1)을 통해 구해진 대상 차량의 전륜 한 휠의 inertia 값을 Fig. 3과 같이 상용 동역학 시뮬레이션 프

로그래밍인 AMESim 과 차체 사시의 동적 거동이 포함된 CarSim 해석 모델을 통해 검증하였다. 세 가지 해석 모델에 동일 초기 속도 및 동일 제동 토크 조건에서 속도 비교 그래프를 Fig. 4에 나타내었다.

또한 추후 다른 차종의 시험을 위해 inertia를 3 등분하여 승용차 및 소형 전기차 등에 대해서도 시험이 가능하도록 설계하고 제작하였다.

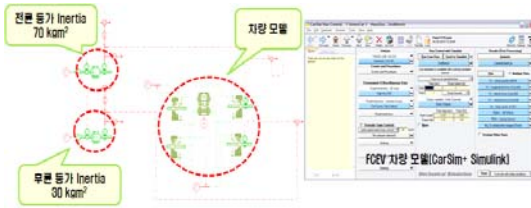


Fig. 3 Commercial analysis models to verify inertia

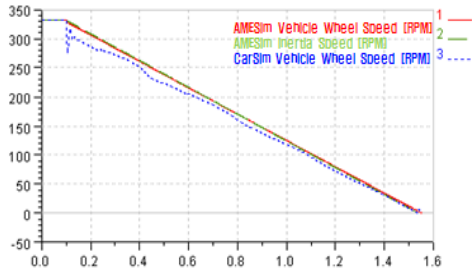


Fig. 4 Comparison of speeds along with each model

대상 연료전지자동차의 구동 모터 용량은 100 kW이며, 전륜 한 축의 해당하는 모터의 용량은 50 kW이다.

그러나 국내 제동 패턴의 90% 이상은 0.3g 이하, 80kph 이하에서 제동이 이루어진다. 이 중 최대 0.15g를 회생제동이 감당한다고 가정 시 80kph에서의 0.15g 회생제동을 출력으로 환산하면 32 kW이다. 현재 서보 모터로 수급 가능한 30kW급 서보 모터를 구동 및 회생제동의 모사를 위한 모터로 선정하였다. Fig. 5는 test bench에 적용된 서보 모터의 토크 출력 곡선이다.

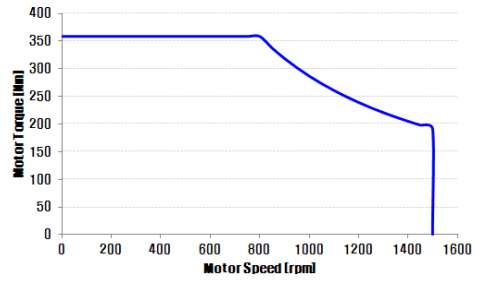


Fig. 5 Performance torque curve of servo motor

### 2.3 Test Bench 제어부

Test bench 제어를 위해 host PC 1대, target PC 2대, ECU interface box, power box, auto BOB (Auto brake out box), UPS 및 power supply로 구성된 control rack이 구성되었다. 각 구성품의 역할은 Table 2에 나열되었으며, Fig. 6은 구축된 control rack이다.

Table 2 Components of the control rack.

구분	역할
Host PC	Target PC 제어 Data 저장
Target PC	실시간 차량 해석 Test Bench 제어 신호 생성 Data 획득
ECU Interface	EWB/EMB 제어기 Interface
Power Box	ECU, 차량 Actuator 및 센서 전원 공급
Auto BOB	자동 전선 open/short 고장 구현
UPS (Uninterruptible power supply)	무정전 예비 전력 장치 (정전 시 파워 공급)
Power Supply	12V 및 24V 전원 제공

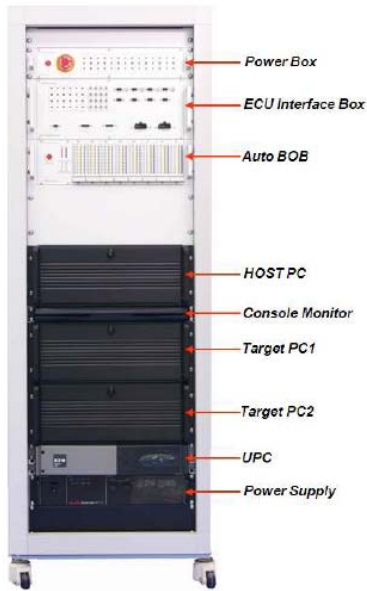


Fig. 6 Picture of control rack

### 3. 시험 절차

본 연구에서는 구축된 test bench를 통하여 전자식 제동장치가 장착되어 회생제동과 협조 제동하는 시스템의 기본 제동 성능, 기능성 안전 및 신뢰성 평가를 위한 시험 절차를 Table 3과 같이 정립하였다.

Table 3 Reliability test process

No.	Test Bench를 이용한 신뢰성 평가 프로세스
1	Static EMB 성능 및 고장 시험
2	Dynamic EMB 성능 및 고장 시험
3	회생제동 단독 제동 성능 및 고장 시험
4	회생제동+ EMB 협조 제동 성능 및 고장 시험
5	온도 및 내구 등 신뢰성 시험

우선 static EMB 테스트 지그를 통하여 EMB의 기초 성능인 clamping force 형성 성능을 평가하는 동시에 시스템 FMEA를 통해 개발된 고장 시나리오에 따라 고장에 따른 성능 및 오작동 시험을 수행한 후, 이를 차량의 구/제동 부하에 적용하여 회전하는 디스크 상에서의 성능 시험과 고장에 따른 성능 및 오작동 시험을 한다.

회생제동 협조 제동을 시험하기 전에 회생제동 자체의 성능을 평가하기 위하여 협조제동의 제어 off 상태에서 회생제동에 대한 성능 및 고장에 따른 성능 및 오작동 시험을 실시한다.

정적 및 동적 시험을 통해 성능이 검증된 EMB 시스템과 회생제동 시스템의 협조제어 상황에서 각각의 성능 및 고장에 따른 오작동 여부 시험을 실시한다.

이와 같이 차량에 직접 장착하여 실시하는 실차 성능 시험 이전 단계에서 EMB 및 회생제동의 성능 및 대표적 고장에 따른 오작동 여부를 test bench에서 성능 확인 및 검증 시험을 수행할 경우, 실차시험에서의 위험성을 줄이고 실차 시험의 횟수를 줄일 수 있어 비용 및 시간을 단축하여 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 시험 결과

본 연구에서는 EMB를 적용한 회생제동 시스템의 신뢰성 평가 프로세스에서 고장을 제외한 성능 시험을 실시하였다.

Static EMB 성능 시험 단계에서는 EMB의 패드 위치에 따른 clamping force 선도를 구하여 Fig. 7에 도시하였고, EMB 위치 명령에 따른 clamping force step input response 성능을 구하여 Fig. 8에 도시하였다.

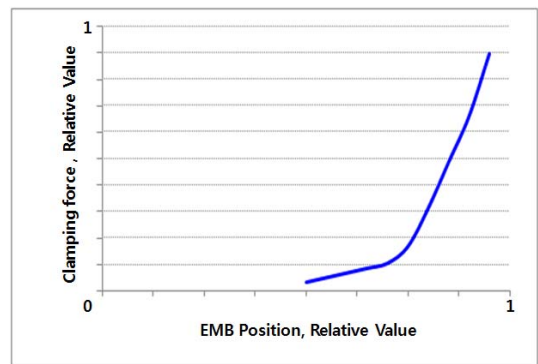


Fig. 7 Clamping force along with EMB pad position at static test

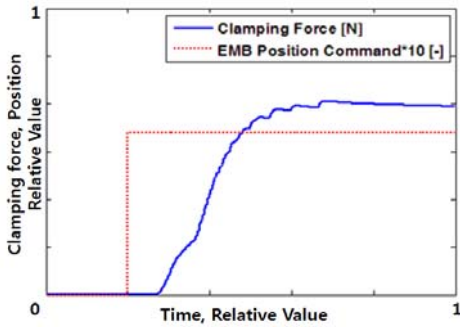


Fig. 8 EMB step input response at static test

차량의 구제동 부하가 포함된 dynamic EMB 성능 시험 단계에서는 차량 초속도 40kph에 상응하는 휠 속도에서 각각의 EMB 위치에 따른 제동성능시험을 수행하였다. Dynamic EMB 성능시험에서 측정된 휠 속도 및 제동토크를 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다.

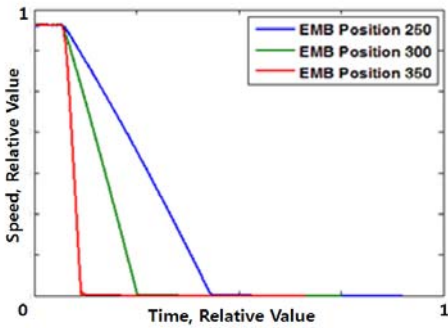


Fig. 9 Comparison of speeds along with the EMB pad position

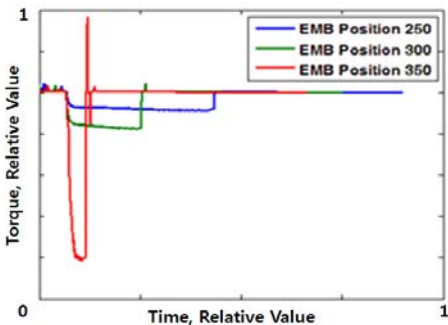


Fig. 10 Comparison of braking torque at dynamic jig

Clamping force와 제동 토크와의 관계식은 식 (2)

와 같고, Fig. 7에서 도시한 EMB 위치에 따른 clamping force 선도와 Fig. 11에서 도시한 EMB 위치에 따른 제동 토크 선도를 확인한 결과 실험적으로 밀접한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

$$T_{brake} = \mu_{disk vs pad} r_{disk} F_{clamping} \quad (2)$$

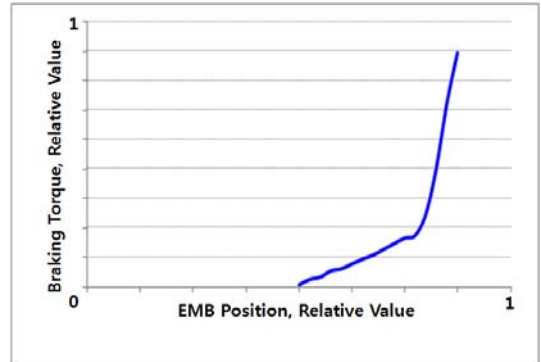


Fig. 11 Braking torque along with the EMB pad position at dynamic test

Fig. 12는 dynamic EMB 성능시험 단계에서 측정된 EMB 위치제어 명령에 따른 step input response 결과를 나타낸다.

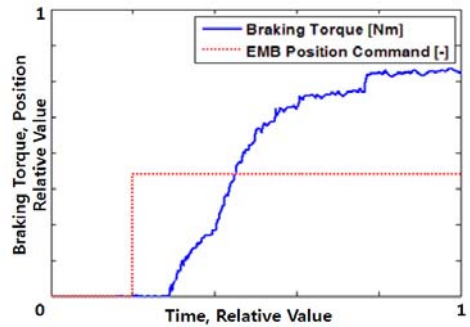


Fig. 12 EMB step input response at dynamic test

또한, EMB 제동이 배제된 회생제동 성능 시험 단계에서는 Fig. 13과 같이 차량 속도 40kph에 상응하는 초속도에서 회생제동 토크에 따른 감속도를 구하여 도시하였고, Fig. 14는 이 때 측정된 각각의 회생제동 토크를 나타낸다.

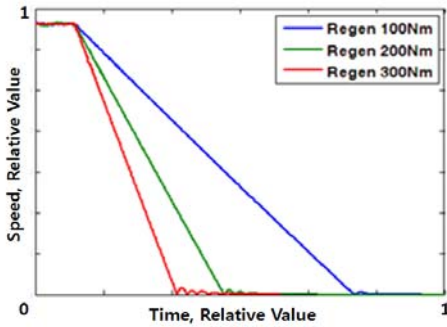


Fig. 13 Comparison of speed along with the regenerative braking torque at dynamic test

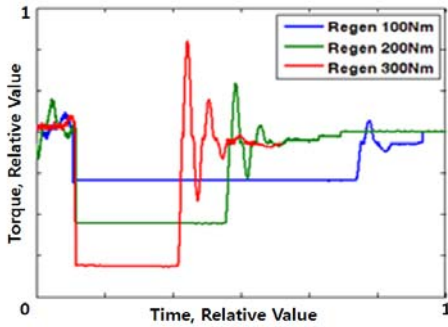


Fig. 14 Comparison of regenerative braking torque

회생제동과 EMB의 협조제동 성능 시험 단계에서는 회생제동이 우선적으로 최대한 수행되도록 하는 간단한 회생제동 협조제어 로직과 차량속도, 모터요구과워 등에 따른 회생제동 제한로직이 포함되었다.

Fig. 15의 (1)은 차량속도, (2)는 회생제동 토크 및 회생제동과 EMB 제동 토크 합산값, (3)은 이 때의 EMB 위치 명령을 각각 나타낸다.

제동 초기에는 요구 감속도가 회생제동 가능량과 비슷하여 초기에는 회생제동만으로 대부분의 제동을 수행하였고 EMB는 간극이 최소한의 위치에서 대기함을 알 수 있다. 또한 회생제동 제한 로직에 따라 차량 속도가 15kph 이하로 감속될 때부터 회생제동력이 줄어들어 10kph 이하에서는 EMB에 의해서만 감속됨을 확인하였다.

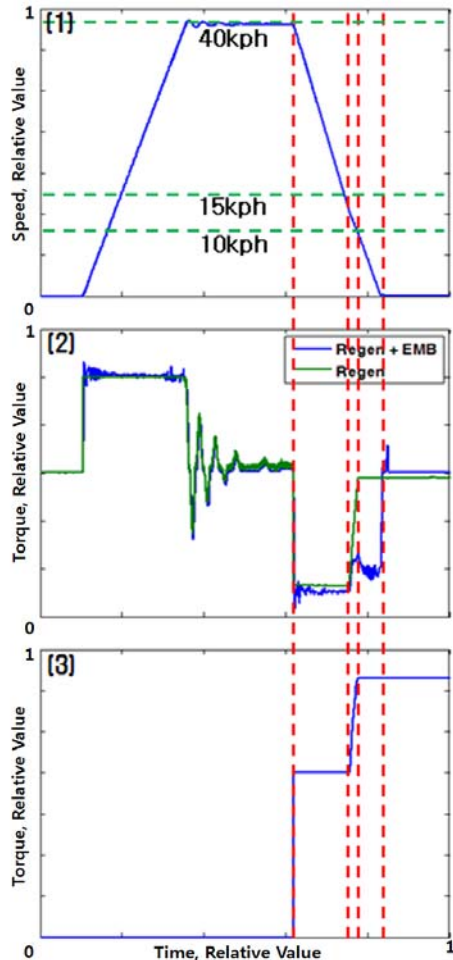


Fig. 15 (1) Speed, (2) Regenerative braking torque and total braking torque, (3) EMB Position

Fig. 15의 (2)번 그래프에서 회생제동이 정지되고 EMB 제동이 발생되기 시작하는 제동천이구간에서 토크 변동이 크게 발생함을 확인하였다. 이는 회생제동을 정지하고 EMB를 작동시키는 순간 각 시스템의 응답 특성이 달라 생기는 것으로 승차감에 악영향을 주는 인자이다. 향후 이러한 제동천이구간에서의 제동 이질감을 줄이는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 EMB/EWB와 회생제동이 적용되

는 그린카를 대상 차량으로 전자제동시스템의 제동 성능, 기능성 안전 및 신뢰성 등의 평가를 위한 test bench의 설계 및 구축 방안을 제안하였다. 또한 구축된 test bench를 통해 EMB 개발 시제품의 정적, 동적 기본 제동성능, 회생제동 협조제동성능 등의 시험을 수행하였다. 향후 EMB, EWB와 같은 전자제동 시스템과 회생제동시스템에 대한 기능성 안전 및 신뢰성 평가를 위한 상세한 시험 방법 및 절차를 정립하고, 표준화하기 위한 연구를 진행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 산업원천 기술개발사업인 ‘그린카 회생제동 시스템’ 과제에 의해 지원되었습니다.

## References

- 1) J.K. Ahn, K.H. Jung, D.H. Kim, H.B. Jin, H.S. Kim, S.H. Hwang, "Analysis of A Regenerative Braking System for Hybrid Electric Vehicles Using An Electro-Mechanical Brake", International Journal of Automotive Technology, Vol 10, No. 2, pp. 229~234, 2009
- 2) K. K. Jeon, H. S. Hwang, S. J. Choi, D. H. Yang, S. H. Hwang, H. R. Park, S. B. Choi, "Development of Reliability Evaluation Technology for Green Car Regenerative Braking System PART-(1)", KSAE 2010 spring conference, 2010
- 3) R. Roberts, B. Gombert, H. Hartmann, D. Lange, M. Schautt, "Testing the Mechatronic Wedge Brake", SAE Technical paper series 2004-01-2766, 2004
- 4) C. H. Jo, S. M. Lee, H. S. Kim, "Analysis of Braking Performance for a Vehicle with Front EWB and Rear EMB", KSAE 2009 conference, pp. 1267~1272, 2009
- 5) S. M. Lee, C. H. Jo, H. L. Song, Y. S. Cho, I. S. Kim, D.Y. Hyun, H. S. Kim, "Analysis of Braking Performance for Electro-Wedge Brake System", KSAE 2009 conference, pp. 641~646, 2009
- 6) S. Y. Kim, S. B. Choi, J. G. Kim, "The Design of Electronic Noncircular Gear Brake and Adaptation Scheme for Pad Friction-coefficient Estimation", KSAE 2008 conference, 2009
- 7) H. R. Park, S. B. Choi, S. J. Choi, K. K. Jeon, H. S. Hwang, "Adaptive Control of Self-energizing Brake System using Noncircular Gear", KSAE 2010 conference, 2010
- 8) J. M. Aan, G. S. Cho, I. S. Choi, M. H. Roh, S. m. Choi, "A Study on Development of Safety Evaluation Technique of Regenerative Braking System", KSAE conference, 2008
- 9) K. G. Chang, H. S. Choi, Y. W. Kim, Y. B. Lee, "Development of the Military In-Wheel Motor Dynamometer for a HEV", KASE annual conference, 2008