

◆ 특집 ◆ 철도차량 인터페이스부의 성능향상 기술

도시철도용 전기기계식 제동장치의 특성시험

Characteristic Test of the Electro Mechanical Brake Actuator for Urban Railway Vehicles

김민수^{1,✉}, 오세찬¹, 권석진²

Min Soo Kim^{1,✉}, Seh Chan Oh¹, and Seok Jin Kwon²

¹ 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 (Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute)

² 한국철도기술연구원 신교통연구본부 (New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: ms_kim@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5205

Manuscript received: 2016.5.9. / Revised: 2016.6.17. / Accepted: 2016.6.20.

The braking device in railway vehicles decelerates or stops the train by dissipating the thermal energy converted from kinetic energy into the air. Therefore, the brake system is crucial for safety. In this paper, we performed a study on an electromechanical brake actuator using an electrical motor as an alternative to pneumatic air cylinders to reduce the idle running time in braking, which subsequently increases braking distance, and to ensure reliable response characteristics. Especially, to analyze the response characteristics of the electromechanical brake actuator, we measure the delay time, response time and power consumption compared to the air cylinder. It is confirmed that the electromechanical brake actuator can reduce reaction time by 0.1 seconds (Braking Action) and 0.46 seconds (Brake Release) compared to the air cylinder.

KEYWORDS: Railway vehicle (철도차량), Brake system (제동시스템), Electro mechanical brake (전기기계식 제동), Idle running time in braking (공주시간), Electric control unit (전자제어장치)

기호설명

F_b = Instantaneous contact force per disc

1. 서론

열차가 목적지까지 안전하게 도착하도록 속도를 감속시키거나 운행과정에서 차량의 속도를 제어하기 위한 기능을 담당하는 것이 제동이다. 이

러한 제동은 열차를 정지하기 위해 정상적인 속도 제어로 열차를 감속시키는 상용제동과 돌발적인 상황에서 신속하게 열차를 정지시키는 비상제동으로 구분된다.¹

특히, 비상제동 체결 시 열차가 정지하는데 소요되는 비상제동거리는 승객의 안전 및 신호체계, 열차방호체계를 수립하는 중요한 고려사항이다. 일반적으로 열차의 제동거리는 제동형식, 축중량, 마찰계수, 공주시간, 제동배율 등이 영향을 미치게

되는데 공주시간은 제동조작을 개시한 순간부터 유효한 제동력이 작용하기까지의 시간으로 정의되며 고응답성 제동연구를 통해 공주시간을 줄이는 연구가 수행되고 있다.²

제동초속도가 100 km/h일 때 열차는 1초에 약 27.8 m를 주행하며, 제동초속도가 150 km/h일 때는 1초에 약 41.7 m를 주행하게 된다. 따라서 공주시간을 단축시키기 위한 빠른 응답특성 및 높은 신뢰도를 갖는 제동장치개발을 통해 비상제동거리를 단축시킬 필요가 있다. 이를 위해 공압식 제동장치에서 벗어나 고응답성을 갖는 전기기계식 제동장치를 철도차량에 적용하는 연구가 수행되고 있다. 특히, 철도차량은 2층열차, 저상대차화에 따른 전장품의 소형화와 경량화가 필요하며 유지보수비용 절감을 위한 모듈형 설계가 수행되어야 한다. 이러한 필요성을 반영하여 고응답성 및 고신뢰성을 확보하기 위해 전기기계식 제동장치는 제동전자제어장치(ECU: Electric Control Unit)의 전기출력을 전공/공전 변환장치 없이 곧바로 제동장치(캘리퍼, 액츄에이터, 패드 등)로 전달하는 방식이다.

본 논문에서는 차량의 비상제동거리에 영향을 미치는 공주거리를 감소시키고 활주방지장치의 성능을 향상시키기 위해 공압방식이 아닌 전기모터를 이용하는 전기기계식 제동장치에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 전기기계식 제동장치의 특성을 분석하기 위해 제동 압부력, 반응시간, 응답 반복특성, 전력사용량 등을 측정하여 공압제동실린더 방식의 제동장치와 성능특성을 비교하였다.

2. 전기기계식 제동장치 연구동향

2.1 자동차 분야

자동차 분야에서는 차량 안전성 향상을 위한 ABS (Anti-Lock Brake System)와 차량자세제어(ESC; Electronic Stability Control)와 함께 제동시스템도 기계적 제어방법에서 전기/전자기술을 적용한 제어방법에 대한 연구가 수행되고 있다. 즉, 자동차분야의 제동시스템은 하이브리드 차량에 적용된 전기유압식 제동장치 (EHB; Electro Hydraulic Brake)와 전기모터를 이용한 전기기계식 제동장치(EMB: Electro-Mechanical Brake)로 구분되며, EHB는 기존 기계장치를 이용한 유압식 제동기술을 토대로 개발이 시도되었으나, 기계장치를 이용한 물리적인 제어를 전자부품과 신호로 대체함에 따라 EHB를 구성하는 전자부품이 가지는 내구성과 복

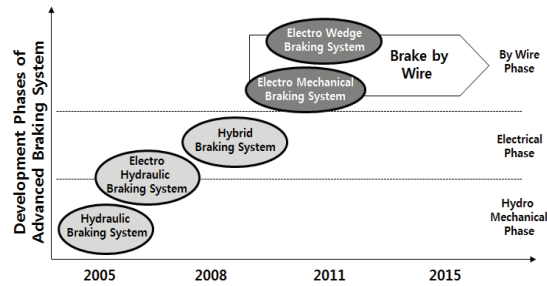


Fig. 1 Technical roadmap for the brake system^{3,4}

잡한 구조로 인하여 전기기계식 제동장치인 EMB 또는 EWB (Electronic Wedge Brake) 기술개발이 진행되고 있다.^{3,5,6} Fig. 1은 차량분야 제동시스템의 기술로드맵을 보여주고 있다.

전기기계식 제동장치 (EMB: Electro Mechanical Brake)는 제동력 생성방식을 유압 대신 전기모터를 이용한 제동장치로 각 바퀴마다 설치된 제동용 모터가 발생시킨 토크를 축방향 힘으로 변환하여 브레이크패드를 브레이크디스크에 압착시켜 제동력을 발생하는 방식이다. 친환경을 위한 차량기술 수요와 발전이 점진적으로 증가함에 따라 전기모터를 이용한 구동 및 제동장치의 요구가 증가하고 있기 때문에 안전한 EMB의 적용방법이 연구되고 있으며, 전륜에는 EHB, 후륜에는 EMB으로 구성하여 Fail-Safe 및 주 제동장치인 전륜의 높은 요구제동력 문제에 대응할 수 있는 하이브리드 제동시스템 연구가 진행되고 있다.⁷

EWB는 EMB가 높은 제동력을 생성하기 위해 필요한 고전압 문제점을 해결하기 위해 연구되었다. 즉, EMB는 모터가 발생한 토크를 입력받아 제동력을 생성하는 방식이나, EWB는 캘리퍼 부분에 웨지 (Wedge)를 사용하여 디스크회전력을 제동력으로 활용함으로써 EMB보다 적은 소비전력으로 동일한 제동력을 확보할 수 있는 방법이다.

2.2 철도분야

철도차량의 제동장치는 제동력 발생방식과 제동지령방식에 의해 분류할 수 있는데, 제동력 발생방식은 공압식, 유압식, 전기기계식 등으로 구분되며 제동지령방식은 진공식, 직통식, 전자직통식, 전기지령식 등이 있다. 전기기계식 제동장치는 전기모터를 사용하고 전기 및 전자장치로 제동까지 체결하는 전기지령 방식으로 공압식에 비해 응답성, 유지보수성 및 경량화에 장점을 가진다.⁸

해의 Siemens사에서는 차량에 적용한 EWB를 철도차량에도 적용하여 소형화 및 경량화, 모듈화를 위한 연구를 수행하였다.⁹ 또한, Raco사에서는 전기모터식 제동액츄에이터 (SLBS, Spring Loaded Brake System)를 개발하여 실제 철도차량에 적용하였는데 500 ms이내의 고응답특성을 가지며 유지보수가 거의 필요 없는 장점이 있다. 또한, SLBS는 스프링과 결합된 구조로 설계되어 전원 차단 시에도 안전하게 제동이 체결되도록 제작되었다.¹⁰ SLBS는 트램 (Düsseldorf, Wien, Calgary 등) 및 모노레일 (Wuppertal, H-bahn 등)에 적용되어 운행 중에 있다.^{11,12}

3. 도시철도용 전기기계식 제동액츄에이터

3.1 전기기계식 제동액츄에이터 시제품 제작

전기기계식 제동액츄에이터 및 성능을 분석할 수 있는 시험장비를 Fig. 2와 같이 제작하여 제동력 및 응답특성을 시험하였고 구조는 Fig. 3과 같다. 전기기계식 제동액츄에이터는 표 1의 사양을 갖는 기존 공압실린더 및 제동캘리퍼 구조에서 공압실린더를 탈거한 후에 곧바로 장착 가능하도록 제작하였으며, 전기기계식 제동액츄에이터, 제동캘리퍼, 제동압부력 측정부, 제어기 및 프레임부 구성된다.

공압식 제어기는 제동 ECU로부터의 제동지령에 따른 공기압축기 및 40리터 용량의 공기탱크의 공기압력을 제어하여 공압실린더를 제어하도록 제작하였다. 그리고 전기기계식 제동액츄에이터 제어기는 제동 ECU로부터 다양한 제동지령(상용제동 1 - 7단, 비상제동) 및 제동해제 지령에 맞추어 전기기계식 제동액츄에이터의 서보모터를 제어하도록 설계하였다. 또한, 마찰재간 간격, 모터 상태등을 실시간 감시하여 이를 제동 ECU로 전송하도록 하였으며, 마찰면과 마찰재의 간격을 자동으로 조절하는 자동간극조정 기능 및 패드를 손쉽게 교체 가능하도록 하는 패드교체 모드를 내장하였다. Fig. 4(a)에는 기존 캘리퍼에 장착된 공압실린더의 외형을 나타내었으며 Fig. 4(b)에는 공압실린더를 탈거 후 전기기계식 제동액츄에이터를 장착한 모습이다.

전기기계식 제동액츄에이터 시제품 중량을 측정된 결과 14.2 kg였으며, 이는 단순히 기존 공압식 제동실린더(약 21.5 kg)에 비해 33% 정도 경량화되었음을 알 수 있다. 실제 철도차량에 전기기

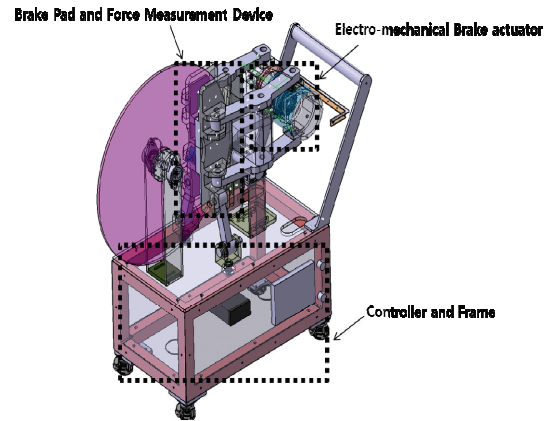


Fig. 2 Schematic views of the electro-mechanical actuator with the brake caliper and disc

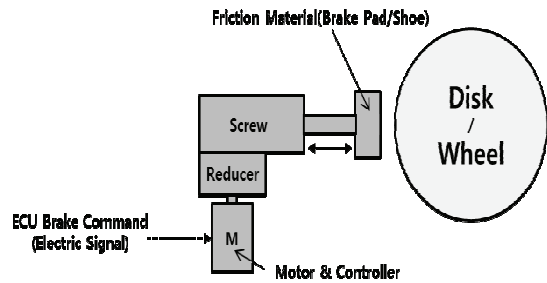


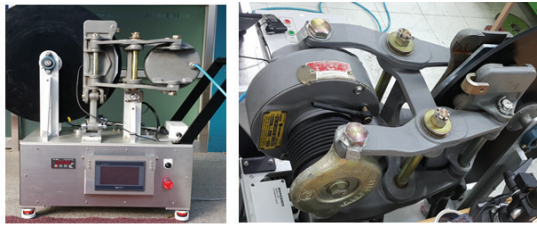
Fig. 3 Functional block diagram of the electro-mechanical actuator

Table 1 Specification of pneumatic cylinder and caliper

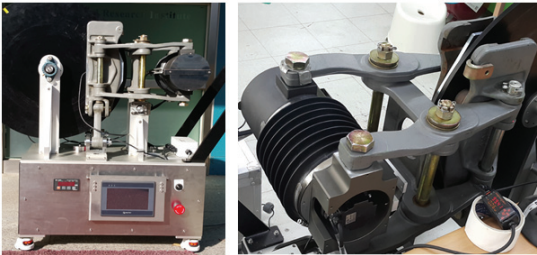
Max. air pressure	500 [kPa]
Cylinder size	229 [mm]
Effective cylinder area	412 [cm ²]
Caliper efficiency	95 [%]
Caliper lever ratio	0.976
Max. slack adjuster capacity	75 [mm]
Weight	Approx. 65kg

계식 제동장치가 장착될 경우에는 부가적인 공압장비(공기압축기, 건조기, 공기탱크, 공압관, 각종 밸브류 등)의 탈거로 인해 보다 경량화 및 소형화가 가능할 것이다.

전기기계식 제동액츄에이터의 상용제동(1단 - 7단)과 비상제동 명령 시 한쪽 패드홀더에서 측정(5회 측정)된 제동압부력의 평균값 (Fb/2)을 Fig. 5에



(a) Pneumatic cylinder and caliper



(b) Electro-mechanical actuator and caliper

Fig. 4 Comparison of the electro-mechanical actuator and the pneumatic cylinder

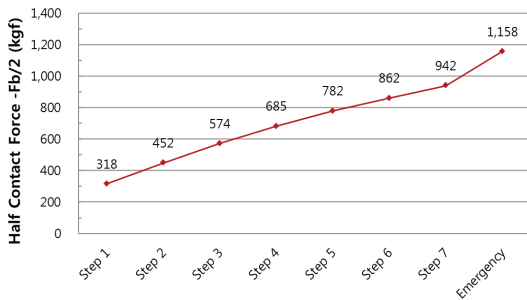


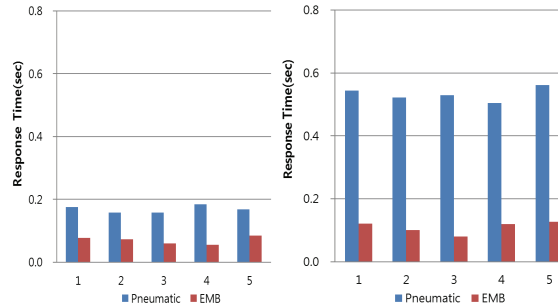
Fig. 5 Average contact force of the electro-mechanical actuator

나타내었다. 압부력 측정은 한쪽 브레이크 패드 중심부에 장착된 로드셀값을 측정하여 기록하는 방법을 사용하였다.

3.2 전기기계식 제동액츄에이터 특성시험

전기기계식 제동액츄에이터 시제품의 성능을 확인하기 위해 공압식 제동실린더와 비교시험을 수행하였다. 비교시험은 제동패드홀더의 변위를 이용한 제동인가/해제에 따른 반응시간, 반복 응답 특성, 전력사용량이며 NI Labview를 이용하여 데이터를 수집/분석하였다.

첫째로, 전기기계식 제동액츄에이터와 공압식 제동실린더의 명령에 대한 반응시간을 비교하였다.



(a) Brake command (b) Release command

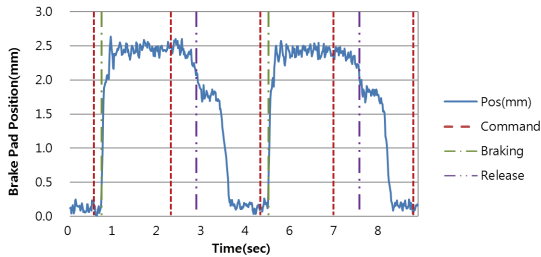
Fig. 6 Comparison of the response time of the electro-mechanical actuator and the pneumatic cylinder

비교시험은 상용전제동 (FSB: Full Service Brake)에 대응되는 제동명령을 공압식 및 전기기계식에 동일하게 지령하였을 때 각각의 반응시간을 측정하였다. 반응시간 측정 방법은 레이저 변위센서를 제동패드 홀더에 설치하여 제동명령 인가 시점부터 제동패드 홀더의 변위가 발생하는 지점까지의 반응시간을 측정하였다. 제동인가명령 및 제동해제명령에 따른 패드홀더의 변위발생 시험을 10회씩 수행하여 평균값을 기록했으며, 이를 5회 반복 수행하여 Fig. 6에 나타내었다.

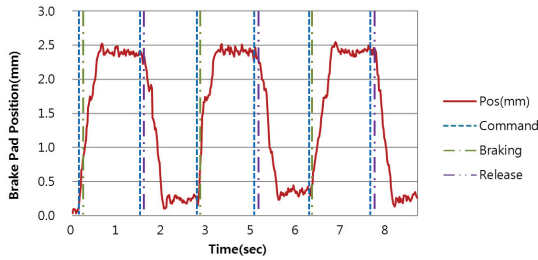
측정 데이터를 분석한 결과, 공압식 제동실린더의 경우에는 제동인가명령 인가 후 평균 0.17초에 반응하였으며, 제동해제명령 인가 후 평균 0.57초에 동작하였다. 전기기계식 제동액츄에이터의 경우에는 제동인가명령은 평균 0.07초 이후에 반응하였으며 제동해제명령은 평균 0.11초가 반응시간으로 소요되었다. 즉, 전기기계식 제동액츄에이터는 공압식 제동실린더에 비해 제동인가 명령은 0.1초, 제동해제 명령은 0.46초 빠른 반응시간이 측정되었다.

Fig. 7에는 DAQ를 통해 측정된 제동패드 홀더의 변위를 나타내었는데, 제동인가-제동해제를 2회 반복하여 공압식 제동실린더의 변위 변화값을 측정하였으며, 전기기계식 제동액츄에이터는 제동인가-해제를 3회 반복하여 측정된 결과이다.

둘째로, 공압식 실린더와 전기기계식 액츄에이터의 반복응답특성에 대한 비교시험을 수행하였다. 시험결과, 전기기계식 제동액츄에이터를 3회 반복하는데 소요된 시간은 5.6초로 공압식 제동실린더 방식의 8.6초에 비해 약 35% 빠른 반복응답특성을 보여주었다.



(a) Displacement of the pneumatic cylinder



(b) Displacement of the electro-mechanical actuator

Fig. 7 Experimental results: Comparison of the displacement of the brake pad holder

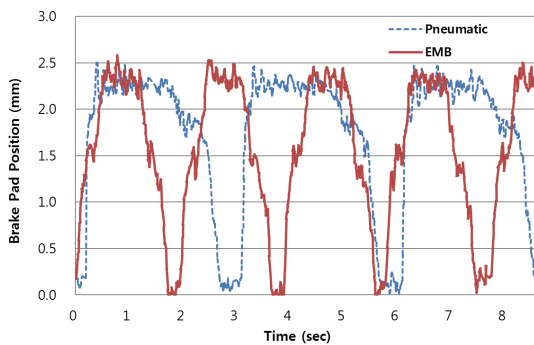


Fig. 8 Experimental results: Comparison of the braking response

반복응답에 대한 측정값을 주파수로 환산하면, 공압식 제동실린더의 주파수는 0.35Hz, 전기기계식 제동액츄에이터는 0.54Hz이며, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

셋째로, 공압식 제동실린더와 전기기계식 제동액츄에이터의 전력사용량을 비교하였다. 즉, 철도차량이 120 km/h 속도에서 비상제동 체결 후 정차 시까지 소요되는 30초 동안 제동체결을 1회 제동체결 과정으로 모사하였다. 공압식의 경우에는 제동작용 시 필요한 공기를 압축하여 40리터의 공기탱크를 충전시킬 때 사용되는 전력사용량을 측정

하였고, 1회 충전으로 약 16회 제동을 체결할 수 있었다. 전기기계식 제동액츄에이터는 비상제동에 필요한 30초 동안 전기기계식 제동액츄에이터를 연속적으로 구동할 때 소모된 전력 사용량을 측정하였다. 단, 전기기계식 제동액츄에이터의 경우에는 제작된 시제품에 포함된 전력변환장치, LCD 및 PLC 제어기의 사용전력량이 포함되어 있다.

공압식과 전기기계식 제동액츄에이터의 전력 사용량은 16회 사용 시 각각 42.4 kW와 43.4 kW로 측정되었다. 공압식 제동실린더의 경우, 공기압축기의 1회 충전으로 약 16회 정도를 사용할 수 있으므로 1회 평균 약 2.65 kW가 소모되었으며, 전기기계식 제동액츄에이터는 연속 구동 시 30초간 소모된 전력이 약 2.71 kW가 측정되어 전력사용량에서는 큰차이가 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전기기계식 제동장치에 대한 연구동향을 분석하여 제동장치 연구에 대한 흐름을 분석하였으며, 철도차량의 비상제동거리에 영향을 미치는 제동거리를 감소시키기 위해 공압제어에 의해 제동장치를 동작시키는 방식이 아닌 제동ECU로부터 직접 전기신호를 전달받아 전기모터를 구동하여 제동을 체결하는 전기기계식 제동장치에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 전기기계식 제동장치의 응답특성을 분석하기 위해 반응시간, 응답 반복특성, 전력사용량 등을 측정하여 공압제동실린더 방식의 제동장치와 응답특성을 비교하였다. 비교결과, 전기기계식 제동액츄에이터의 반응시간은 공압식 제동실린더에 비해 제동인가 명령은 0.1초, 제동해제 명령은 0.46초 빠른 반응시간이 측정되었으며, 제동체결-제동해제를 3회 반복하는데 소요된 시간은 5.6초로 공압식 제동실린더 (8.6초)에 비해 약 35% 빠른 반복응답특성을 나타내었다. 이러한 반응속도 및 반복응답 특성의 향상은 공주시간 단축으로 인한 제동거리 단축 및 보다 효율적인 활주방지장치의 구현을 가능하게 할 수 있으며, 열차 편성 내 공압관련 부품의 탈거로 인해 제동장치를 소형화/경량화 할 수 있음을 의미한다.

추후 전원차단이나 열차분리 등의 고장에 대한 대처방안에 대한 연구 및 실험실 수준의 성능비교가 아닌 다이내모메타 및 실차 시험을 통한 응답특성 및 신뢰성 비교연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Park, G. B., "Railroad Vehicle Engineering," Samsung Publishing, 1999.
2. Wickens, A. H., "A History of Railway Vehicle Dynamics," in: Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Iwnicki, S., (Ed.), CRC Press, pp. 5-38, 2006.
3. Kim, D.-S., Heo, S.-J., Lee, G.-S., Heo, G.-S., Lee, S.-H., et al., "Next Generation Intelligent Chassis System Technology Research Final Report," Korea Institute for Advancement of Technology, www.mctnet.org/mct/MessageBoard/ArticleFile.do?id=565925 (Accessed 28 June 2016)
4. Frost & Sullivan, "Strategic Analysis of European Markets for X-by-wire Systems," Research No. M0Ff-01-00-00-00, 2007.
5. Yoon, P., "Technology Trends and Perspectives of Brake-by-Wire System," Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 26, No. 1, 2004.
6. Jung, K. H., Kim, D., Kim, H., and Hwang, S.-H., "Analysis of the Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Vehicle Using Electro-Mechanical Brakes," International Journal of Automotive Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 229-234, 2009.
7. Choi, I. S., Lee, J. H., Cho, S. W., Kim, S. S., and Min, K. C., "A Consideration on the Safety Evaluation Method of Braking System with Electric Control Transmission," Proc. of the Korean Society of Automotive Engineers Conference, pp2518-2523, 2011.
8. Limpert, R., "Brake Design and Safety," SAE International, 2nd Ed., 1992.
9. Siemens, "Pinpoint Braking," <http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2012/corporate/2012-12-erfinder/pdf/erfinder-2012-schiffers-e.pdf> (Accessed 2 April 2016)
10. Wilke, R. and Korthaus, H., "Motor-Driven Brake System, Especially for Rail Vehicles," US Patent, Paper No. 4805740, 1989.
11. RACO, "The Flexible RACO Modular System," http://www.racointernational.com/PDF_DS/raco_pm1.pdf (Accessed 3 February 2016)
12. Kim, M.-S., Oh, S.-C, Choi, M.-W., Yoo, H.-K., and Lee, H.-S., "Survey on Electro Mechanical Brake System for the Railroad Vehicle," Proc. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society of Autumn Conference, 2015.