

자기부상열차 이중화 마그네트 드라이버의 실차 적용 연구

Study on Application of Dual Magnet Driver for Maglev Train

김창현*[†], 김봉섭*, 김동성*, 한형석*Chang-Hyun Kim*[†], Bong-Seup Kim*, Dong-Sung Kim*, Hyung-Suk Han*

Abstract A maglev train can move without any contact while keeping a constant airgap from the guideway using magnetic force of the electromagnet. A magnet driver is the device which regulates the current through an electromagnet for levitation force control, and is one of the core components. A dual magnet driver is developed to cope with system failure and to increase the reliability of the overall system. The control and power units of the magnet driver are duplicated, and the application of the developed dual magnet driver to the full-scale maglev train will be studied in this paper.

Keywords : Magnetic levitation, Maglev, Levitation control, dual

초 록 자기부상열차는 전자석의 자기력으로 궤도와 의 간격을 일정하게 유지하며 비접촉으로 주행하는 열차이다. 마그네트 드라이버는 부상력 조절을 위해 전자석에 흐르는 전류를 조절하는 장치로 자기부상의 핵심 구성품 중 하나이다. 고장상황에 대비하여 시스템 신뢰성을 높이기 위해 이중화된 마그네트 드라이버를 개발하였다. 마그네트 드라이버의 제어부와 전력부가 이중화 되었으며, 본 논문에서는 개발된 이중화 자기부상 마그네트 드라이버를 실차에 적용하여 시험한 결과에 대해 다루고자 한다.

주요어 : 자기부상, 자기부상열차, 부상제어, 이중

1. 서 론

자기부상열차는 전자석의 자기력을 이용하여 궤도와 일정한 간격을 유지하며 떠서 가는 열차이다. 자기부상열차를 포함하는 경전철은 시스템 고장에 대비하여 전력, 통신 등 주요 부품을 이중화하여야 한다. 자기부상열차에서 부상이 제대로 이루어지지 않는 경우 궤도와 의 충돌이 발생하여 차량이 움직일 수 없을 뿐만 아니라 승객의 생명을 위협할 수 있기 때문에 무슨 일이 있어도 이러한 상황을 막아야 한다.

자기부상열차의 부상실패를 방지하기 위한 방안은 다양한 수준에서 고려가 된다. Transrapid는 부상프레임 앞과 뒤에 연결된 전자석의 힘으로 지지되어 하나의 전자석이 고장이 나더라도 나머지 전자석에 의해 정상 부상되는 구조를 가진다. 도시형 자기부상열차도 부상전자석 코일이 이중으로 되어 있어 한쪽 코일이 손상되더라도 다른 코일을 이용하여 부상을 유지한다든가, 제어 알고리즘 측면에서 고장에 안전한 설계가 적용되기도 한다 [1].

[†] 교신저자: 한국기계연구원 자기부상연구실(chkim78@kimm.re.kr)

* 한국기계연구원 자기부상연구실

전자석 간격을 측정하는 공극 센서 또한 궤도 이음매 사이를 부드럽게 넘어가기 위해 이중화되어 있다 [2]. 자기부상열차의 제어기를 이중화하기 위한 연구도 수행된 바 있으며, 전자석을 구동하는 마그네트 드라이버의 제어부와 전력회로부를 이중화하기 위한 방안이 제시되었고 그 가능성을 탐색하였다 [3]. 마그네트 드라이버의 제어부를 이중화하여 정지형 시험기에 적용한 연구가 진행되었지만 실제 자기부상열차에 적용한 실험이 수행된 바는 없다 [4].

본 논문에서는 자기부상열차 마그네트 드라이버의 제어부와 전력회로부를 이중화하여 부상안정성과 신뢰성을 높이고자 하였다. 설계된 이중화 마그네트 드라이버를 제작하여 자기부상열차에 적용하여 주행 중 고장 발생시에도 정상인 부품으로 전환이 이루어져 안정적인 부상이 이루어짐을 확인하였다.

2. 이중화 마그네트 드라이버

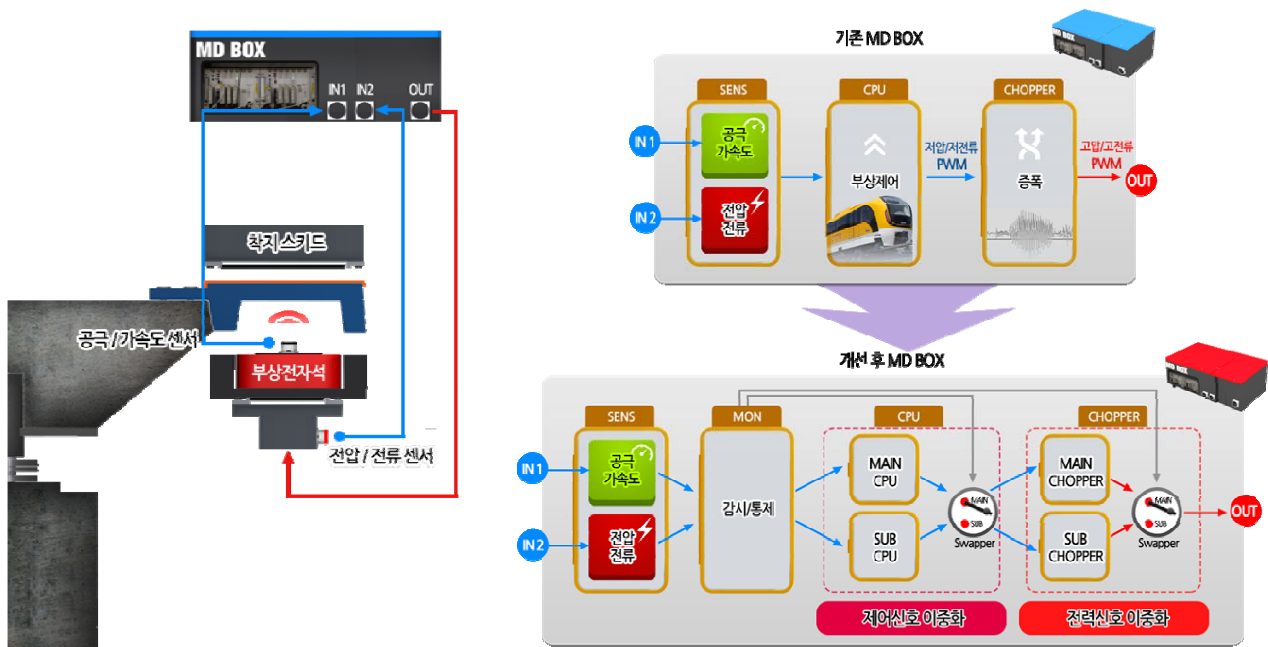


Fig. 1 The levitation system of an urban maglev train and the concept of the proposed dual magnet driver

마그네트 드라이버는 부상력 조절을 위해 부상전자석에 흐르는 전류를 조절하는 장치로 자기부상열차의 핵심 구성품 중 하나이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 공극/가속도 센서와 부상전자석의 전압/전류를 입력으로 하여 부상전자석으로 전류를 출력하는 기능을 한다.

마그네트 드라이버는 크게 제어부와 전력회로부로 나뉜다. 제어부에서는 센서로부터 전자석과 궤도와의 간격을 감지하여 필요한 전류를 계산하고 전력회로부는 계산된 지령에 따라 전자석에 전류를 흘려주는 역할을 한다. 기존 마그네트 드라이버는 제어부와 전력회로부가 하나로 구성되어 있었으나 본 논문에서는 제어부와 전력회로부 각각에 대하여 이중화 방안을 제시하고 구현하였다.

2.1 제어신호 이중화

하드웨어적으로 제어부는 기존 마그네트 드라이버의 부상제어기와 호환성을 유지하는 보드형태로 동일하게 설계하였으며 기능적인 자기부상 제어 프로그램 구조는 Fig. 2에 나타내었다. Main과 Sub로 구분되는 2개의 부상 제어기 모듈이 존재하며 모니터링 모듈이 전체 시스템을 조정하는 역할을 한다.

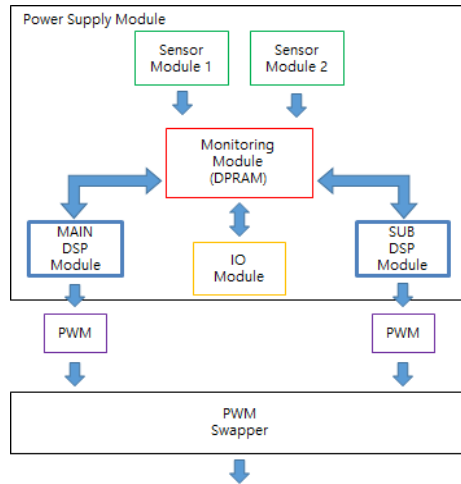


Fig. 2 The functional architecture of the proposed dual magnet driver

Main과 Sub 제어기 모듈이 자기부상 제어 알고리즘에 따라 PWM(Pulse Width Modulation) 출력을 생성하며 PWM 스와퍼(Swapper) 회로에서 두 신호간 선택을 통해 실제 전력회로를 구동하는 출력을 내보낸다. PWM 스와퍼가 이중화 기능을 구현하는 핵심이 되며 FPGA(Field-Programmable Gate Array)를 이용하여 신호 전환 알고리즘은 수정 가능한 구조를 가진다. Fig. 3에 제작된 이중화 제어부와 PWM 스와퍼의 동작을 나타내며 Main 제어기의 신호가 감지가 안 되면 제어주기 2 cycle (제어주파수 5kHz로 0.4ms에 해당) 이내 전환이 이루어짐을 알 수 있다.

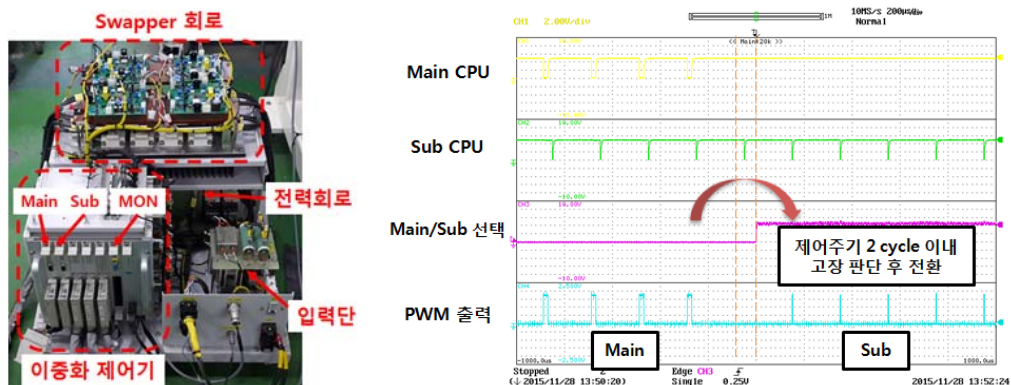


Fig. 3 The control unit of the proposed dual magnet driver and switching waveforms of the PWM swapper

2.2 전력신호 이중화

전력부는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)소자를 사용하기 때문에 단순히 이중화 하는 경우 제어부에 비해 상대적으로 크기와 무게가 많이 증가하게 된다. 따라서 기존 소자 개수를 유지하며 절체를 위한 최소한의 스위치 2개를 추가하고 회로 결선을 변경하는 방안을 사용하였다. IGBT의 게이트 신호를 감시하여 단락(Short)이나 개방(Open) 검출 되는 경우 FPGA 디지털 로직을 통해 스위치를 절체하게 된다.

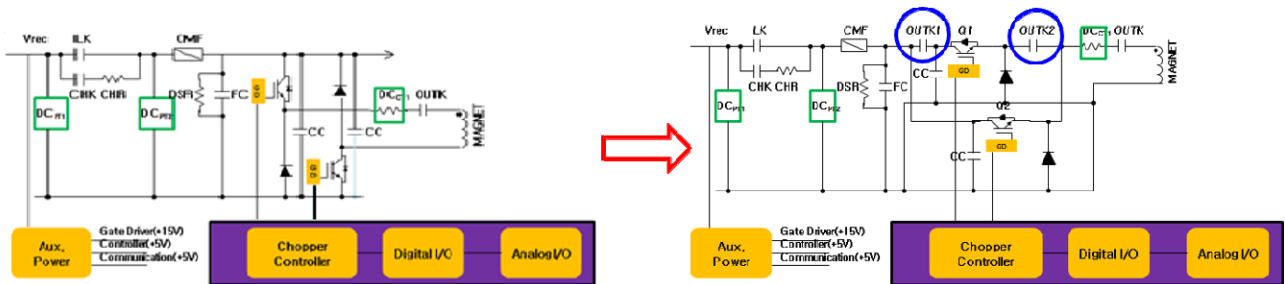


Fig. 4 Schematics of the power unit in the proposed dual magnet driver

Fig. 5에 제작된 이중화 전력부와 디지털 로직의 출력 파형을 나타내었다. Main 전력부의 Fault를 강제적으로 발생시켜 IGBT가 단락된 상태를 만들었을 때 수 us이내로 2개의 스위치가 꺼지며 Sub 전력부로 스위칭이 이루어지고 Sub 전력부의 게이트 PWM 신호가 생성된다. 결과적으로 제어주기 1 cycle (제어주파수 5kHz로 0.2ms에 해당) 이내 전력부 전환이 이루어짐을 알 수 있다.

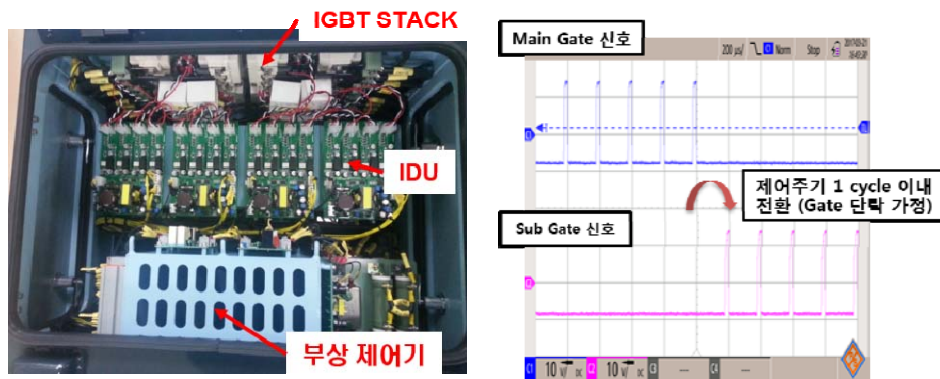


Fig. 5 The power unit of the proposed dual magnet driver and output waveforms of the digital logic circuit

3. 실험결과

제작된 마그네트 드라이버를 적용하여 제어부 이중화 시험과 전력부 이중화 시험을 수행하였다. 한국기계연구원에 있는 시험선의 자기부상열차를 이용하였으며 차량의 최전방 대차의 한쪽 측면에 위치한 각 2개씩의 전자석으로 이루어지는 Front와 Rear 파트를 제어하는 마그네트 드라이버를 교체하여 실험하였다.

3.1 제어부 이중화

우선 마그네트 드라이버의 제어부 이중화 시험을 실시하였다. Fig. 6에 시험 모습과 측정된 실험결과를 나타내었다. 부상이 되고 주행 중인 상태에서 Main 제어부의 고장 상황을 가정한 실험을 수행하였다. 제어부의 고장이 거의 발생하지 않기 때문에 인위적으로 Main 제어부의 PWM 출력 커넥터를 뽑다 꽂아 Main 제어부가 고장이 나고 다시 정상 복귀되는 상황을 만들어 주었다.

결과에서 보듯이 Main 제어부의 PWM 신호가 사라지더라도 스위칭이 이루어져 지속적으로 PWM 출력이 이루어짐을 알 수 있다. 세 번째 파형은 Main과 Sub 중 어떤 것이 선택되었는지 알려주는 신호인데 Main 제어부와 Sub 제어부가 모두 동작하는 동안에는 빈번한 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 부상시스템의 움직임보다 제어주파수가 상대적으로 빠르기 때문에 Main 및 Sub 제어부 모두 1 cycle 이상 PWM 출력이 나오지 않는 경우가 발생하고 이를 고장으로 인식하여 서로 간에 스위칭이 이루어지기 때문이다. 하지만 Main 제어부가 고장이 나서 출력 신호가 완전히 사라지는 경우에도 온전히 Sub 제어부의 신호를 이용하여 안정적인 부상이 이루어짐을 확인할 수 있다.

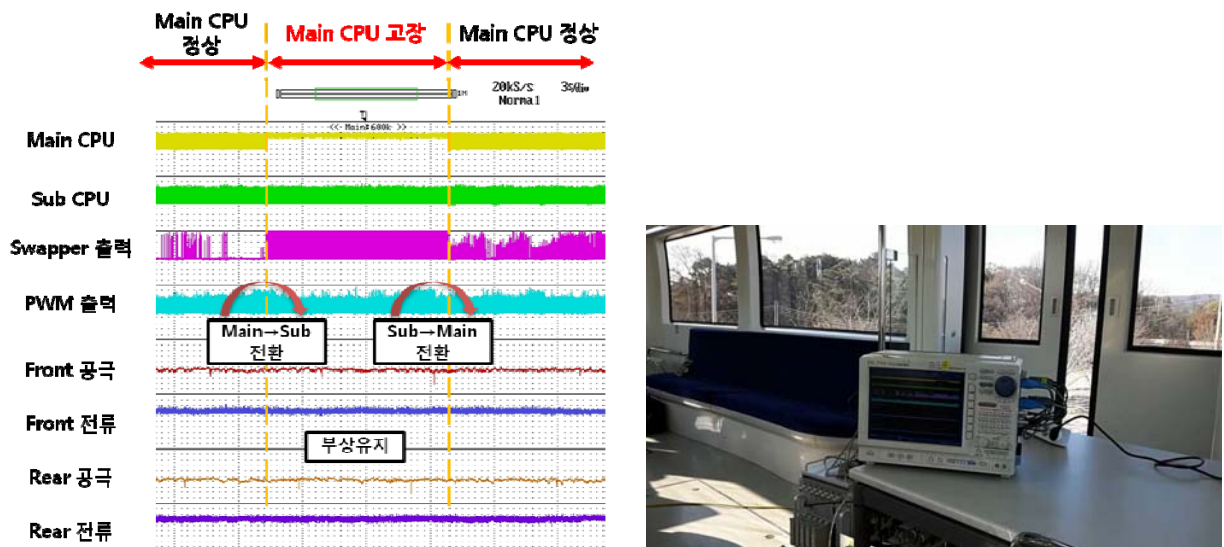


Fig. 6 On-board experimental results during switching between main and sub control units

3.2 전력부 이중화

다음으로 마그네트 드라이버의 전력부 이중화 시험을 실시하였다. Fig. 7에 시험 모습과 측정된 실험결과를 나타내었다. 앞의 경우와 유사하게 고장상황을 가정하여 Main 전력부의 Gate 신호를 단락 시켰다 다시 복귀 시켜주었다. 앞의 경우와 마찬가지로 Main 전력부의 PWM 신호가 사라지더라도 최종 PWM 출력은 정상적으로 이루어지며 부상도 안정적으로 유지함을 확인할 수 있었다.

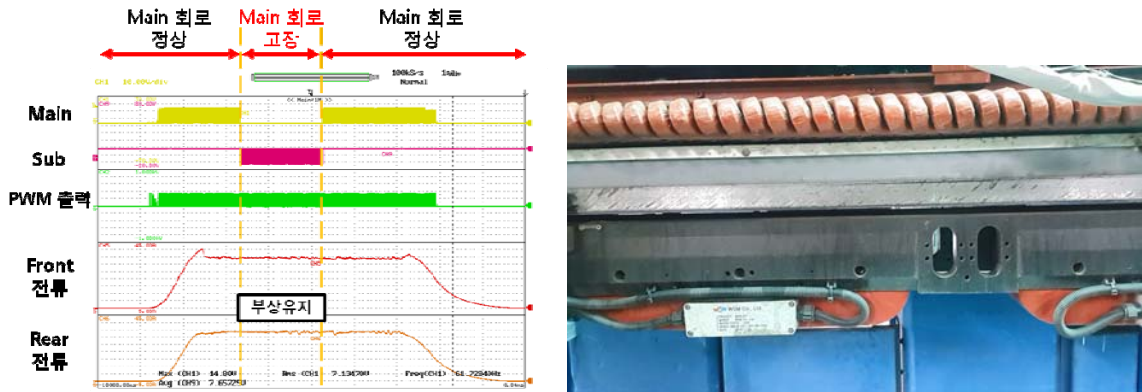


Fig. 7 On-board experimental results during switching between main and sub power units

4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차의 부상 제어 신뢰성을 높이기 위한 이중화 마그네트 드라이버 개발에 대하여 설명하였다. 제어신호 생성을 위한 부상제어부와 전력공급을 위한 전력회로부를 이중화 하였으며, 기존 마그네트 드라이버와 호환이 되며 크기와 무게 증가를 최소화하는 데 중점을 두었다. 마그네트 드라이버를 제작하여 실차에 적용하여 부상 시험을 수행하였으며 고장 상황 발생시 제어신호부와 전력회로부 모두 제어주기 2사이클 이내에 스위칭이 이루어 지며 부상 상태를 안정적으로 유지함을 확인하였다.

제어신호부의 PWM 스위칭에서 빈번한 스위칭이 일어나는 데 이는 전기적 노이즈를 유발하여 전체 시스템에 수명과 특성에 안 좋은 영향을 끼치게 되므로 이를 줄일 수 있는 보완책이 필요하다. 전력회로부는 기존 2개의 IGBT 소자로 2상한 운전을 하던 것을 1개의 소자로 1상한 운전을 하기 때문에 전자석 전류를 재빨리 감소시키기 어려워 전자석 흡착의 위험이 커지게 되는 문제가 있다. 이를 보완하기 위하여 소형 경량화된 최신소자를 기존과 동일한 방식으로 2개 적용하여 이중화하는 방안을 검토 중이다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 주요사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참고문헌

- [1] 장석명, 성소영, 김인근, 성호경 (1999) 자기부상 시스템에서의 내 고장성 제어기 설계, *대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집*, pp. 70-72.
- [2] 김창현, 이종민, 한형석, 김봉섭, 박도영 (2012) 자기부상열차 레일 이음매 통과시 부상 특성 개선 방법, *대한기계학회 춘추학술대회 논문집*, pp. 124-125.
- [3] Y.-H. Cho, S.-H. Lee, K.-H. Jang, S.S. Lee, K.-B. Lee, D.-Y. Park (2015) Development of Redundant Levitation and Guidance Control System of the Urban and Medium to High Speed Magnetic Levitation Train, *International Journal of Railway*, 8(1), pp. 21-29.
- [4] 김창현, 채주병, 김민, 한형석 (2016) 자기부상열차 이중화 부상 제어기, *한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 1026-1027.