

지상도체 변화에 따른 초전도 반발식 자기부상 특성 해석

배덕권\*, 조한욱\*\*, 이종민\*\*, 한형석\*\*, 이창영\*\*\*, 고태국#  
 충주대학교\*, 기계연구원\*\*, 철도기술연구원\*\*\*, 연세대학교#

Analysis on the Characteristics of the Superconducting Electrodynamic Suspension According to the Variation of the Ground Conductor

Duck Kweon Bae\*, Han-Wook Cho\*\*, Jongmin Lee\*\*, Hyung-Suk Han\*\*, Chang Young Lee, Jongmin Lee\*\*,  
 Jongmin Lee\*\*, Jongmin Lee\*\*, and Tae Kuk Ko#  
 Chungju National University\*, KIMM\*\*, KRRI\*\*\*, Yonsei University#

**Abstract** - This paper presents the numerical simulation results on the superconducting electrodynamic suspension (EDS) simulator according to the variation of the ground conductor. The levitation force of the EDS system is formed by the reaction between the moving magnet and the fixed ground conductor. The possible way to simulate the EDS system were simulated in this paper by using finite element method (FEM). The static type simulator which consists of the fixed magnet, the fixed ground conductor and the ac current supply system. To verify the characteristics of high speed EDS system with the moving type simulator heavy, large and fast moving ground conductor is needed. The static type simulator can get the characteristics of the high speed EDS system by applying equivalent ac current to velocity, therefore it does not need large moving part. The static type EDS simulator, which can consist of an HTS magnet, the fixed ground conductor(s), an AC power supply and the measuring devices, also test the effect of the shape of the ground conductor easily. The plate type ground conductor made stronger levitation force than ring type ground conductor. Although the outer diameter 335 mm ring type ground conductor (Ring3) was larger than the outer diameter 235 mm ground conductor (Ring2), the levitation force by Ring2 was stronger than that by Ring3. From the calculation results on this paper, the consideration of the magnetic flux distribution according to the levitation height should be included in the process of the ground conductor design.

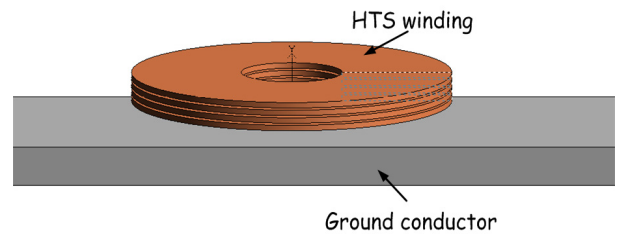
그림 1은 본 연구의 해석에 사용된 자기부상 해석의 3차원 모델을 나타내고 표 2는 해석에 사용된 지상코일의 사양을 나타낸다. 그림 1의 (a), (b)는 각각 판형태의 지상도체를 가진 자기부상 해석 모델과 고리형 지상도체를 가진 해석 모델을 나타낸다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 두께 35mm의 알루미늄 판으로 만들어진 지상도체와 3가지 알루미늄 링으로 만들어진 지상도체를 모델링하고 부상자석에 교류전류를 인가한 상태에서 3차원 유한요소 정상 시뮬레이션을 통하여 반발식 자기부상력을 구하였다.

1. 서 론

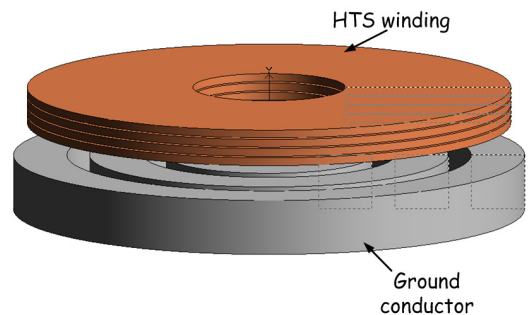
인류의 문명이 시작된 이래 마차, 차량, 열차, 비행기 등의 개발과 더불어 승객 이송수단의 속도는 인류의 역사와 함께 증가해왔다. 열차는 철레일 위에서 동작하는 철차륜으로 차량을 추진시키는 시스템인데 이 시스템은 차륜과 레일 사이의 접촉에 의한 가속과 감속의 한계, 차륜과 레일에 의한 고속운행의 안전성 확보가 어려운 점, 차륜과 레일에서 생기는 소음과 진동, 접촉식 집전방식의 속도 한계 등의 단점을 가지고 있어 350km/h의 속도를 기술적 한계로 보고 있다 [1]. 자기부상열차는 차량이 공중에 떠서 운행되는데 이 시스템은 철차륜과 철레일에 의한 기존 철도의 문제점을 해소시킬 수 있다. 일본의 초전도 자기부상열차의 시제 열차인 MLX01로써 세계 최고속도인 581km/h를 달성하였다. 상전도 흡인식의 고속자기부상열차인 독일의 TR08의 가속력은 2003년에 17.5km를 주행하여 500km/h를 달성하였으므로 최고속도 뿐 아니라 가속능력에서도 반발식 부상열차의 성능이 흡인식 부상열차의 성능보다 더 우수하다. 일본은 이 시스템에 9조 엔을 투자하여 2025년 동경과 오사카 사이의 제2 신간선을 건설할 계획이다. 우선 2015년까지 동경과 나고야 사이의 구간을 먼저 건설하여 운영할 계획이다 [2]-[6].

한국에서는 일본과 독일의 속도를 능가할 초고속 자기부상열차에 대한 연구기획 및 기초연구가 진행되고 있다. 본 연구는 초고속 자기부상열차의 개발을 위한 기초연구로써 초전도 부상자석을 이용한 반발식 자기부상 특성 시험기의 개발을 해석을 수행하였다.

2. 해석 모델



(a) Model with plate ground conductor.

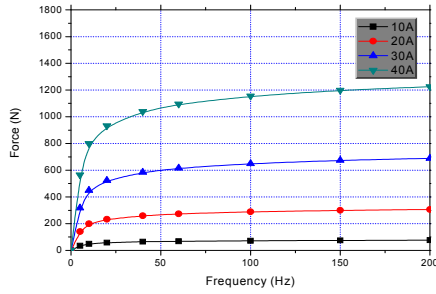


(b) Model with ring ground conductors.

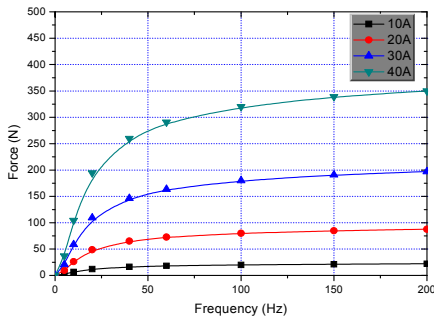
<그림 1> 해석 모델

<표 1> 지상도체의 사양

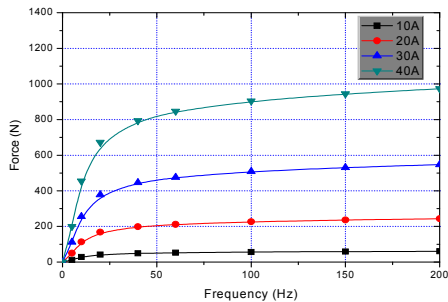
	Specification	
Plate	Thickness	35 mm
	Width	262 mm
	Length	700 mm
Ring1	Thickness	35 mm
	Inner diameter	65 mm
	Outer diameter	135 mm
Ring2	Thickness	35 mm
	Inner diameter	165 mm
	Outer diameter	235 mm
Ring3	Thickness	35 mm
	Inner diameter	265 mm
	Outer diameter	335 mm



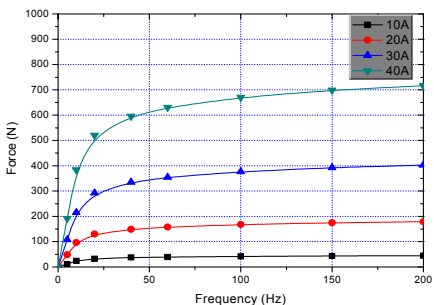
〈그림 2〉 판형 지상 도체를 가진 반발식 자기부상 해석 결과(부상높이 20mm)



〈그림 3〉 Ring1 지상 도체를 가진 반발식 자기부상 해석 결과(부상높이 20mm)



〈그림 4〉 Ring2 지상 도체를 가진 반발식 자기부상 해석 결과(부상높이 20mm)



〈그림 5〉 Ring3 지상 도체를 가진 반발식 자기부상 해석 결과(부상높이 20mm)

### 3. 해석 결과

반발식 자기부상에 대한 해석은 그림 1, 표 1에 나타난 바와 같이 판형 지상 도체 1종(Plate), 고리형 지상도체 3종(Ring1, Ring2, Ring3)으로 총 4종의 조건에 대하여 수행되었다. 각 조건에서 부상자석에 인가되는 전류값은 동적 시험기와 비교하기 위

하여 피크값 10A, 20A, 30A, 40A의 교번전류를 주파수 5, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200Hz로 부상자석에 인가한 상태에서 정상 상태 시뮬레이션 3차원 유한요소 전자장해석을 수행하여 지상 도체에 작용하는 부상력을 구하였다. 이때의 부상 높이는 20mm이었다. 그림 2는 너비 262mm, 두께 35mm의 판형 알루미늄 지상도체와 부상자석으로 해석한 부상력 계산결과를 나타낸다. 판형 알루미늄 지상도체는 고리형 지상도체보다 많은 자장이 쇄교되기 때문에 가장 큰 부상력을 가지는 것으로 계산되었다. 또한 고리형 지상도체에 비해서 보다 낮은 주파수에서 부상력이 포화되는 것으로 관찰되었다. 그림 3은 두께 35mm, 외경 135mm의 고리형 지상도체(Ring1)에 대한 해석 결과를 나타내고 있고 그림 4는 외경 235mm의 고리형 지상도체(Ring2)에 대한 해석 결과를 나타내고 있으며 그림 5는 외경 335mm의 고리형 지상도체(Ring3)에 대한 해석결과를 나타낸다. 본 해석에서도 전류의 주파수가 50Hz를 넘어가면 부상력이 포화되는 현상을 나타내었으며 부상력의 크기도 인가전류의 제곱에 비례하는 특성을 나타내었다. 본 해석에서 부상력의 증가는 주파수 10Hz 이후에서 증가되는 비율이 감소하다가 60Hz 이후에서는 주파수 증가에 따른 부상력의 증가가 매우 미미한 상태에서 선형적으로 증가하는 양상을 나타내었다.

외경이 더 큰 Ring3의 부상력이 Ring2의 부상력보다 작은 결과가 나타났는데 이는 자장이 쇄교되는 양의 차이 때문이다 [7]. 부상자석 전류 피크값 40A, 주파수 100Hz에서 Ring1, Ring2, Ring3의 부상력은 각각 약 350N, 905N, 670N으로 계산되었다. 상호작용으로 반발력을 발생시키는 지상도체의 형상을 고리의 형상으로 설치할 경우 판형에 비하여 재료비용 및 설치·유지 비용이 감소될 수 있을 것이기 때문에 본 연구에서는 고리형의 지상도체에 대한 부상력 계산을 수행하였고 그 결과에 따르면 부상력의 크기는 무조건 지상도체의 크기에 비례하지만은 않았다. 다시 말해 적정 부상높이에서 부상자석에 의한 자장 분포를 계산한 이후 이에 적합한 지상도체를 설계하는 과정을 거쳐야만 경제적이고 최적화된 지상도체의 설계가 가능할 것이다.

### 4. 요약

본 논문에서는 초고속 자기부상열차의 유력한 후보가 될 수 있는 초전도 반발식 자기부상의 특성을 연구하기 위한 반발력을 3차원 유한요소 자기 해석을 통하여 계산하고 분석하였다. 본 해석의 결과에 따르면 움직이는 부분이 없는 정지형 시험기는 반발식 자기부상시험기로써 적용될 수 있다.

### 감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업을 통한 연세대학교 대학전력연구센터의 연구결과입니다.

### 참고 문헌

- [1] Kazuo Sawada, "Superconducting Maglev Developed by RTRI and JP Central," Japan Railway and Transport Review 25, pp. 58-61, 2000.
- [2] Motoharu Ono, Shunsaku Koga, and Hisao Ohtsuki, "Japan's Superconducting Maglev Train," IEEE Instrumental & Measurement Magazine, pp. 9-15, 2002.
- [3] Donald M. Rote and Eddie M. Leung, "Future Prospects for Maglev Technology Applications," Proceedings of MAGLEV'2004 Conference, Shanghai, China, pp. 65- 75, Oct. 26-28, 2004
- [4] A. Cassat and M. Jufer, "MAGLEV Projects Technology Aspects and Choices," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 915-925, 2002.
- [5] Philip Holmer, "Faster Than a Speeding Bullet Train," IEEE Spectrum, pp. 30-34, 2002.
- [6] Available from: [http://news.khan.co.kr/kh\\_news/kh\\_an\\_art\\_view.html?artid=200704271821071&code=970203](http://news.khan.co.kr/kh_news/kh_an_art_view.html?artid=200704271821071&code=970203).
- [7] Duck Kweon Bae, Hungje Cho, and Jongmin Lee, "Characteristic Analysis of HTS Levitation Force with Various Conditions of Ground Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 803-807, 2008.