초전도 부상자석을 이용한 동적 및 정지형 반발식 자기부상 시험기의 수치해석

Numerical Analysis of Moving Type and Static Type Electrodynamic Suspension Simulator with Superconducting Levitation Magnet

이응로[1], 배덕권[2,*], 정윤도[3], 윤용수[4], 고태국[5]

E.R. Lee[1], D.K. Bae[2,*], Y.D. Chung[3], Y.S. Yoon[4], and T.K. Ko[5]

Abstract: This paper presents the numerical simulation results on the moving type electrodynamic suspension (EDS) simulator and static type EDS simulator using high-Tc superconducting (HTS) levitation magnet. The levitation force of the EDS system is formed by the reaction between the moving magnet and the fixed ground conductor. The possible two ways to simulate the EDS system were simulated in this paper by using finite element method (FEM). The first way was the moving type simulator which consists of the fixed HTS magnet and the moving ground conductor. The second way was 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.

[1]정 회 원 : 연세대학교 박사과정
[2]정 회 원 : 충주대학교 안전공학과 조교수
[3]정 회 원 : 수원대학교 전기공학과 겸임교수
[4]정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수
[5]정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 정교수
*교신저자 : dkbae@cjnu.ac.kr
원고접수 : 2009년 03월 05일
심사완료 : 2009년 03월 10일
게재확정 : 2009년 03월 10일

Key Words: electrodynamic levitation, moving type electrodynamic levitation simulator, static electrodynamic simulator, superconducting levitation magnet.

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 점착에 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. 1934년 독일의 Herrmann Kemper가 처음으로 자기부상열차에 대한 아이디어로 특허를 냈다. 이를 바탕으로 독일, 일본, 영국, 미국, 캐나다, 한국, 중국 등에서 자기부상열차를 개발해왔으며 2004년 독일이 개발한 고속자기부상열차인 Transrapid가 중국에서 세계 최초로 상용화되었다. 이 시스템을 SMT라고 하는데 SMT는 최고시속 430km/h로 상해 푸동공항과 도심을 운행하고 있다. 세계에서 두 번째로 상용화된 자기부상노선은 일본의 나고야에 설치된 Linimo인데 이 시스템은 경전철의 역할을 하는 중저속형 자기부상열차이다. 일본은 중저속형 자기부상열차 이외에 고속형 자기부상열차도 개발하였는데 이 시스템은 초전도 반발식 자기부상방식을 사용하고 있다. 일본의 초전도 자기부상열차의 시제 열차는 MLX01로써 세계 최고속도인 581km/h를 달성하였다. MLX01은 2003년에 이미 8.5km를 주행하여 시속 580km/h를 달성하였는데 이는 신간선의 약 3배에 달하는 가속능력이다. 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 9조엔을 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 위한 동적 및 정지형 시험기의 해석을 수행하였다. 해석에는 유한요소법을 사용하였으며 3차원 해석을 통하여 각 시험기의 특성을 분석하였다.

2. 초고속 자기부상열차의 방식

일본 및 독일의 자기부상열차 성능을 능가할 수 있는 시속 600km/h 이상의 초고속 자기부상열차를 개발하기 위해서는 먼저 부상높이 선정 및 선형동기전동기를 이용한 실현 가능 속도에 대한 기본 개념 설계가 있어야 한다.

독일의 상전도 흡인식 자기부상열차의 부상높이는 10mm이고 일본의 초전도 반발식 자기부상열차는 80mm 이상의 부상 높이를 구현할 수 있다. 미국 전기전자공학회(IEEE)에 발표된 속도 500km/h를 능가하는 초고속자기부상열차에 전망에 대한 논문에서는 지진, 매우 빠른 속도 등의 상황을 고려하여 초고속 자기부상열차에 대해서 80mm 이상의 부상높이를 제안하고 있다 [7]. 따라서 초고속에 적절한 자기부상열차의 방식은 매우 강력한 자석의 힘으로 80mm 이상의 부상높이를 구현할 수 있는 초전도 반발식 자기부상 방식이라고 할 수 있다.

초고속 자기부상열차의 추진에는 현재 개발되어 있는 독일과 일본의 자기부상열차의 추진방식과 같은 선형동기전동기가 사용되는데 전동기의 폴 피치(pole pitch)와 전원주파수의 곱이 속도에 비례한다. 독일의 TR08의 폴 피치는 0.25m이고 일본의 MLX01의 폴 피치는 1.35m로써 강력한 자장을 발생할 수 있는 초전도 자기부상을 이용한 일본 자기부상열차의 폴 피치가 상전도 자기부상을 이용한 독일식 보다 5.4배 길다. 이 말은 초전도 자기부상열차는 5.4배 낮은 주파수로써 상전도 자기부상열차와 같은 속도를 낼 수 있다는 의미이다. 0.25m의 폴 피치로 600km/h 이상의 속력을 내기 위해서는 수십 MVA의 용량을 가진 수백 Hz의 인버터 시스템이 필요한데 이는 기술적으로 매우 어려운 문제점을 안고 있는데 상전도 자석은 발생시킬 수 있는 자장에 한계가 있으므로 폴 피치를 늘리는 데에도 한계가 있다. 따라서 고자장을 발생시킬 수 있는 자석을 채용하여 선형동기전동기의 폴 피치를 늘리는 것은 열차의 속력을 높이는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다 [7].

3. 수치해석을 위한 시험기의 모델링

3.1. 고온초전도 부상자석 및 자장분포

반발식 자기부상은 지상도체 상부에서 부상자석이 움직임에 따른 지상도체와 부상자석사이의 상대적 속도에 의해 발생된다. 이 때 지상도체에 쇄교되는 자장의 변화가 생겨 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 지상도체에 전류가 유도되고 이 유도된 전류는 렌츠의 법칙(Lenz's law)에 의해 지상도체의 자장과 반대방향의 자장이 발생되기 때문에 부상자석과 지상도체 사이에 반발력이 발생하게 되고 부상자석이 탑재된 물체(차량)는 중력의 반대방향으로 부상하게 된다 [8], [9].

표 1은 본 연구에 적용된 고온초전도 부상자석의 제원을 나타내고 있고 그림 1은 부상자석의 해석형상을 나타낸다. 내경 100mm, 외경 317mm인 두 개의 더블 팬케익형 고온초전도 코일을 직렬로 연결한 형상을 부상자석으로 하였으므로 311턴의 팬케익형 코일 4개가 적층된 형상이고 총 턴 수는 1244턴이었다. 사용된 초전도선의 길이는 총 800m이었으며 인덕턴스는 279.4 mH이었다.

반발식 자기부상에서 발생되는 자기부상력 F(t)는 지상코일에서 유기된 자장과 움직이는 고온초전도 부상자석 사이의 상호작용에 의한 것으로 아래 식 (1)로 표현할 수 있다 [9].

$$F_{(t)} = [i(t)]^2 \frac{dM(x,\vec{y},t)}{d\vec{y}} \quad (1)$$

여기에서 i(t)는 초전도 부상자석에 흐르는 전류이고 M (x, y, t)는 고온초전도 부상자석과 지상코일 사이의 상호인덕턴스이다. y 방향은 지상코일 표면에 수직한 방향이고 x 방향은 초전도 부상자석의 진행방향이다. 식 (1)에서 부상력은 시간에 따른 y 방향의 자속변화(B_y)에 대한 함수라는 것을 알 수 있다. 다시 말하여 초전도 부상자석에서 발생한 이동자장 중 y 방향 성분의 크기가 부상력에 크게 관여한다. 따라서 지상코일에 쇄교되는 B_y의 크기를 계산하는 것이 부상자석의 최적 설계를 위해 필요하다.

그림 2는 부상자석 하부 20mm 지점에서의 자장분포를 나타낸다. 반발식 자기부상에서는 지상도체의 표면과 수직이 되는 B_y가 부상력에 큰 영향을 미치는데

Table 1. Specification of HTS levitation magnet.

	Specification
Inner diameter	100 mm
Outer diameter	317 mm
Number of double-pancakes	2 ea
Number of turns	1244 turns
Inductance	279.4 mH
Wire length	800 m

Fig. 1. 3D analytic model of levitation magnet.

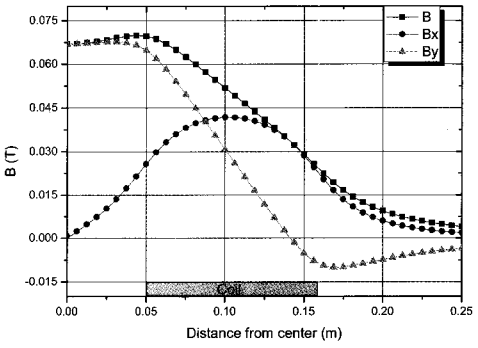
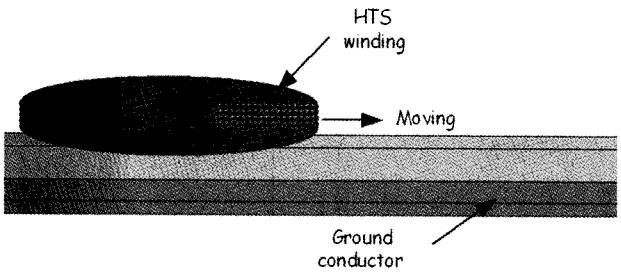
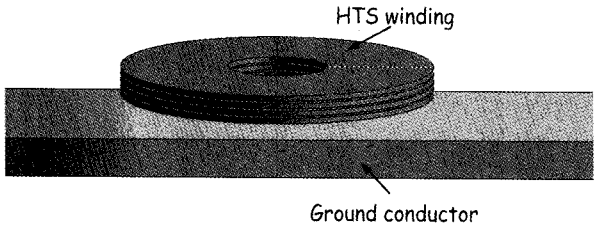


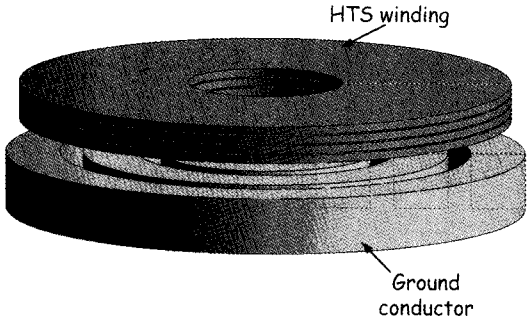
Fig. 2. Distribution of magnetic flux density at 20 mm below the levitation magnet.



(a) Moving type EDS simulator.



(b) Static type EDS simulator with plate ground conductor.



(c) Static type EDS simulator with ring ground conductors.

Fig. 3. Model of moving type and static type EDS simulator.

Table 2. Specifications of ground conductors.

		Specification	
moving type	Plate	Thickness	35 mm
		Width	262 mm
		Length	Finite
Static type	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

부상자석의 외경보다 작은 외경 292mm인 지점에서 B_y가 0이 된다. 식(1)에서와 같이 부상력은 B_y의 변화량에 영향을 받으므로 이 해석은 지상도체의 크기를 결정하는 데에 참고가 될 수 있다. 본 연구에서도 이 해석을 바탕으로 판형태, 고리형태 등의 여러 가지 지상도체를 모델링하여 부상력 변화를 해석하였다. 특히 고리형태의 지상도체에는 그 크기와 조합을 변화시키면서 부상력의 변화를 관찰하였다.

3.2. 동적 및 정지형 반발식 자기부상 시험기의 해석 모델

그림 3은 본 연구의 해석에 사용된 동적 및 정지형 시험기의 3차원 모델을 나타내고 표 2는 해석에 사용된 지상코일의 사양을 나타낸다. 그림 3의 (a), (b), (c)는 각각 판형태의 지상도체를 가진 동적 반발식 자기부상 시험기의 모델, 판형태의 지상도체를 가진 정지형 반발식 자기부상 시험기의 모델, 고리형 지상도체를 가지 정지형 반발식 자기부상 시험기의 모델을 나타낸다. 동적 시험기 해석의 경우 두께 35mm의 알루미늄 판으로 형성된 지상도체 위를 정전류를 흘리고 있는 고온초전도 부상자석이 이동하는 것을 모델링하였으며 3차원 유한요소 과도해석으로 반발식 자기부상력을 구하였다. 정지형 반발식 자기부상 시험기의 해석의 경우 표 2에서 나타낸 바와 같이 동적 시험기의 지상도체와 같은 규격을 갖는 알루미늄 판으로 만들어지 지상도체와 3가지 알루미늄 링으로 만들어진 지상도체를 모델링하고 부상자석에 교류전류를 인가한 상태에서 3차원 유한요소 정상 시변해석을 통하여 반발식 자기부상력을 구하였다.

4. 해석 결과

4.1. 동적 반발식 자기부상 시험기의 해석 결과

그림 4는 동적 반발식 자기부상 시험기의 해석결과를 보여준다. 부상자석에 10, 20, 30, 40A를 인가한 상태에서 고정된 지상 도체위를 움직이는 해석을 수행하여 지상도체에 발생되는 부상력을 구하였다. 이 때의 부상높이는 30mm 였다. 부상자석의 속도가 증가함에 따라 부상력은 포화되는 현상을 나타내어 전형적인 반발식 부상자석의 부상특성을 나타내었다. 본 해석결과 부상자석의 속력이 10m/s를 지나면서 부상력의 증가율이 30m/s의 속력까지 점차적으로 둔해지다 속력 30m/s 이후에서는 속력 증가에 따른 부상력의 증가가

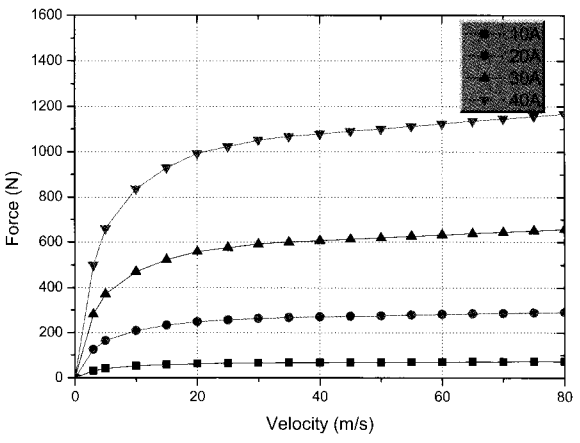


Fig. 4. Results of force calculation on moving type EDS simulator (levitation height: 30mm).

매우 작아진 상태에서 선형적인 증가 양상을 나타내었다. 60m/s의 속력에서 부상자석 전류가 10, 20, 30, 40일 때의 부상력은 각각 약 70, 281, 632, 1123N으로써 부상력은 로렌츠의 법칙을 따라 전류의 제곱에 비례하는 특성을 나타내었다. 본 해석의 속력 80m/s는 288km/h의 속력에 해당한다. 본 해석의 결과는 실제 제작한 동적 반발식 자기부상 시험기의 부상력 측정 결과와도 별다른 차이가 없었으므로 본 해석이 성공적으로 수행됨이 증명되었다 [10].

4.2. 정지형 반발식 자기부상 시험기의 해석 결과

정지형 반발식 자기부상 시험기에 대한 해석은 그림 3, 표 2에 나타낸 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 위하여 피크값 10A, 20A, 30A, 40A의 교번전류를 주파수 5, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200Hz로 부상자석에 인가한 상태에서 정상상태 시변 3차원 유한요소 전자장해석을 수행하여 지상 도체에 작용하는 부상력을 구하였다. 이때의 부상 높이는 20mm이었다.

그림 5는 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 6은 두께 35mm, 외경 135mm의 고리형 지상도체(Ring1)에 대한 해석 결과를 나타내고 있고 그림 7은 외경 235mm의 고리형 지상도체(Ring2)에 대한 해석 결과를 나타내고 있으며 그림 8은 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 미비한 상태에서 선형적으로 증가하는 양상을 나타내었다.

정지형 반발식 자기부상 해석에는 3종류의 고리형 지상도체가 적용되었는데 그 사양은 표 2에 나타낸 바와 같다. 본 해석조건에서 Ring1과 Ring2에 쇄교되는 자장의 크기는 그림 2에 나타낸 바와 같이 B_y의 크기가 0보다 컸으나 Ring3에 쇄교되는 자장의 크기는 0보다 작은 부분이 존재하는데 이러한 원인에 따라 외경이 더 큰 Ring3의 부상력이 Ring2의 부상력보다 작은 결과가 나타났다. 물론 Ring1과 Ring2의 부상력 비교에서는 같은 조건에서 Ring2의 부상력이 더 큰 것으로 나타났다. 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 고리형태의 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.

본 연구의 해석에서는 지상도체의 두께는 고정시켰으나 부상높이에 따른 자장분포가 변하기 때문에 지상

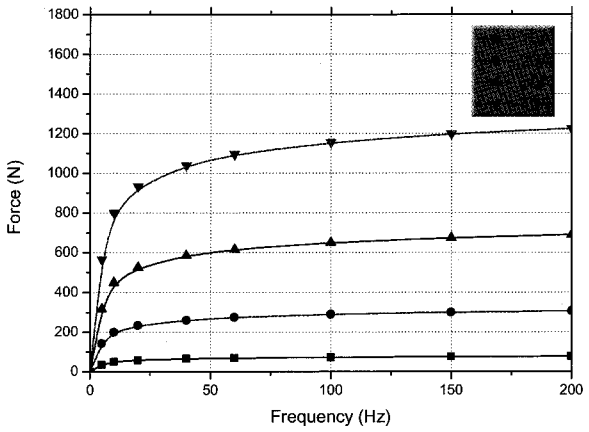


Fig. 5. Results of force calculation on static type EDS simulator with Plate ground conductor (levitation height: 20mm).

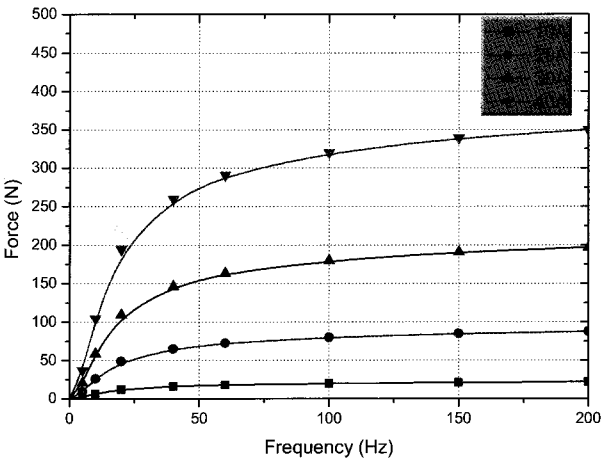


Fig. 6. Results of force calculation on static type EDS simulator with Ring1 ground conductor (levitation height: 20mm).

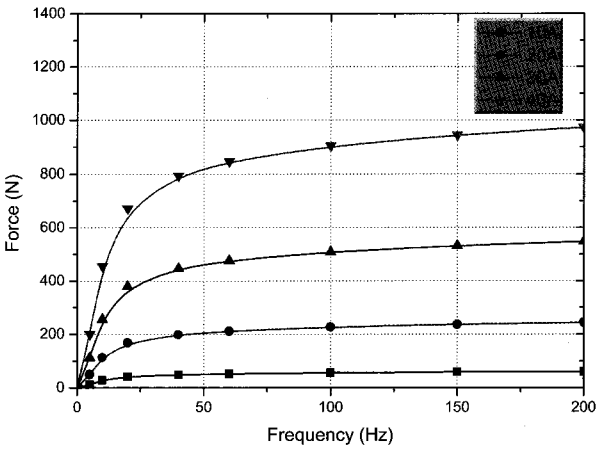


Fig. 7. Results of force calculation on static type EDS simulator with Ring2 ground conductor (levitation height: 20mm).

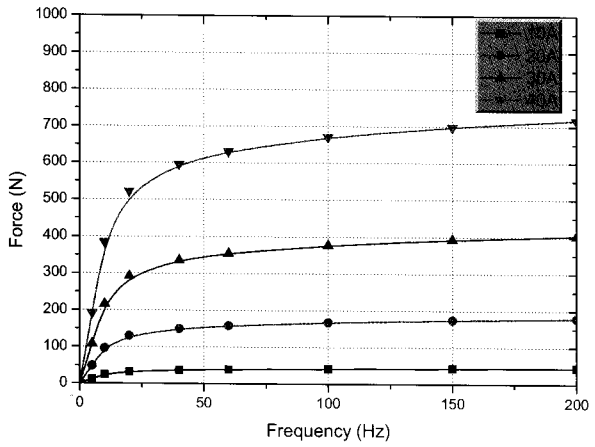


Fig. 8. Results of force calculation on static type EDS simulator with Ring3 ground conductor (levitation height: 20mm).

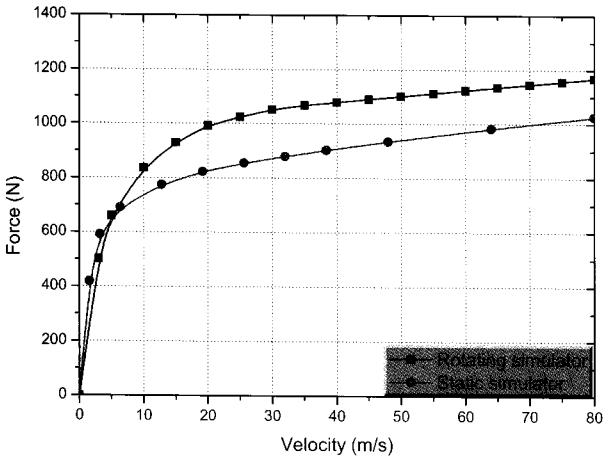


Fig. 9. Comparison of calculation results between moving type and static type EDS simulator (current: 40A, levitation height: 30mm).

도체의 두께에 대한 최적설계도 필요할 것이다. 그러나 이 경우에는 유도전류와 지상도체의 저항에 의한 발열을 함께 고려한 해석이 필요할 것이다.

4.3. 동적과 정지형 반발식 자기부상 시험기의 해석 결과 비교

그림 9는 부상자석 전류 40A, 부상높이 30mm의 동일조건에서 비교한 동적과 정지형 자기부상시험기의 해석 결과 비교를 나타낸다. 본 해석조건에서 지상도체는 두께 35mm, 너비 262mm의 알루미늄 판을 적용하였다. 본 해석에 적용된 부상자석의 외경이 317mm 이었으므로 이를 기준으로 정지형 시험기에 인가한 전류의 주파수를 속력으로 등가 환산하였다. 속력이 작은 경우에는 정지형 시험기의 부상력이 약간 큰 것으로 나타났으나 속력이 5m/s보다 빨라진 이후에는 동적 시험기의 부상력이 더 커진 것으로 계산되었다. 특히 정지형 시험기의 속도에 따른 부상력은 동적 시험기보다 급하게 포화되는 경향을 나타내었다. 해석 결과에 약간의 차이가 보였지만 80m/s의 속력에서 계산된 부상력은 동적 1168N, 정지형 1025N으로써 43N의 차이가 났으며 이를 kgf로 환산하면 약 4.4kg로써 별다른 차이를 나타내지 않았다. 설계 및 제작이 간편하고 제작 비용도 절감할 수 있으면서도 부상조건의 변수를 쉽게 적용할 수 있는 정지형 반발식 자기부상 시험기를 사용한 반발식 자기부상의 특성 해석은 적절하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 초고속 자기부상열차의 유력한 후보가 될 수 있는 초전도 반발식 자기부상의 특성을 연구하기 위한 시험기에 대한 해석을 수행하였다. 반발식 자기부상은 운동에너지가 부상에너지로 변환되는 현상인데 시험기에 운동부를 포함시킬 경우 설계 및 제작에 어려움이 따르고 시험기의 목적 중 하나인 변수 변경을 통한 자기부상 특성의 시험이 어려울 수 있다. 이러한 점을 해결할 수 있는 대안으로써 정지형 반발식 자기부상 시험기를 본 논문에서 제안하였으며 그 특성을 3차원 유한요소 자기 해석을 통하여 계산하고 분석하였다. 본 해석의 결과에 따르면 움직이는 부분이 없는 정지형 시험기는 반발식 자기부상시험기로써 적용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00157).
본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업을 통한 연세대학교 대학전력연구센터의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[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/khan_art_view.html?artid=200704271821071&code=970203.
[7] A. Cassat and M. Jufer, "MAGLEV Projects Technology Aspects and Choices," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 915-925, 2002.
[8] David K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*,

Addison-Wesley Publishing Conpany, Inc., 1992.
[9] P. K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd., 1987.
[10] 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.

저 자 소 개

이응로(李應魯)
1975년 12월 5일생, 2000년 건국대학교 전기공학과 공학사, 2002년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.

배덕권(裵德權)
1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 2005.9-2006.8 한국기계연구원 선임연구원, 2006.10-현재 국립충주대학교 안전공학과 조교수.

정윤도(鄭允道)
1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 겸임교수.

윤용수(尹庸銖)
1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985~1998년 대우전자(주)개발팀장, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.

고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.