

초고속 자기부상열차용 선형 동기 전동기의 추력 및 부상력 특성 개선을 위한 연구

(The research to improve Thrust and Levitation Force characteristic of Linear Synchronous Motor for High-speed Maglev train)

홍현석* · 오세영 · 한정호 · 이 주**

(Hyun-Seok Hong · Se-Young Oh · Jung-Ho Han · Ju Lee)

Abstract

A linear synchronous motor (Linear Synchronous Motor, under LSM) is suitable for Maglev train. This is 500km/h or more for running high-speed propulsion system of high-efficiency, high-output characteristics. Also, as high-speed running, it is needed solution to reduce output ripple component cause bad riding like noise and vibration. So this paper was designed 500km/h-class Maglev train and analyzed characteristics of the LSM base model using finite element analysis method. Further, improved model is designed to improve characteristics of thrust and levitation force by enforcing design parameters analysis and sensitivity analysis. And it was applied skew on field in order to reduce the ripple component still remaining. Skew interpretation of the two-dimensional is proposed and this is verified by carrying out three-dimensional finite element analysis comparing two values. It proved to be valid of skew of the two-dimensional analysis.

Key Words : Linear Synchronous Motor(LSM), Skew

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 혁신적인 대중교통 수단에 대한 요구가 끊이지 않고 있다. 고유가 시대에 지속적으로 증가하는 인구와 생활 범위의 확대 때문이다. 따라서 차세대 교통시스템은 고속, 내구성 등 여러 요구사항을 만족하여야 한다. 자기부상열차는 이러한 요구조건을 만족하는 가장 적합한 시스템 중 하나로, 1960년대부터 연구개

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 한양대학교 전기공학과 교수
* Main author : Doctor's course Electrical Engineering, Hanyang University
** Corresponding author : Professor Electrical Engineering, Hanyang University
Tel : 02-2220-4349, Fax : 02-2295-7111
E-mail : hhs0321@gmail.com
접수일자 : 2014년 3월 11일
1차심사 : 2014년 3월 13일
심사완료 : 2014년 4월 16일

발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서 대부분의 시험이 이루어졌다. 특히 독일의 Transrapid는 2003년 12월 중국 상하이에 상용노선을 건설하여 세계 유일의 상용 시스템이 되었으며, 몇몇 프로젝트들(일본, 독일, 미국 등)이 정부승인을 기다리고 있다[1].

한국의 경우는 110km/h급 중저속 자기부상열차는 실용화 준비가 진행 중이며, 500km/h 이상의 초고속 자기부상열차의 연구도 활발히 이루어지고 있다[1].

일반적으로 중저속 자기부상철도의 경우 추진용으로 선형유도전동기를 사용하고 있으나 집전장치의 어려움 및 단부효과 등으로 인하여 약 300km/h 이하에서 사용되고 있다[2-3]. 따라서 초고속 자기부상열차의 경우 추진 시스템의 핵심 기술인 선형기 중에서 선형유도전동기보다 고효율, 고풍력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 더 적합하다[2-3].

1.2 연구의 목적 및 방법

초고속 자기부상열차는 추진과 자기부상을 동시에 수행하기 때문에 열차를 견인할 수 있는 충분한 추력과 부상력이 필요하고 추력과 부상력의 리플 성분을 저감하기 위한 설계가 요구된다. 특히 출력 리플 성분은 제어 시, 외란성분으로 작용하여 제어에 악영향을 주고 소음과 진동을 동반한다[4-5].

본 연구는 550km/h급 초고속 자기부상열차용 LSM 기초 모델을 분석하고, LSM의 추력과 부상력 특성에 영향을 미치는 설계 파라미터를 선정하여 민감도 해석을 통해 개선 모델을 도출하였다. 또한 추력과 부상력의 리플 성분의 원인이 되는 고조파 저감을 위해 계자(이동자)의 치 부분에 스큐를 적용하였다. 스큐가 적용된 모델의 특성을 분석하기 위해서 본 논문은 2차원 스큐 해석법을 제시하였고, 이 해석법의 타당성을 검증하기 위해 스큐가 적용된 3차원 모델을 모델링하여 2차원 모델과의 비교·분석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 LSM 기초 모델

LSM의 기초 모델은 그림 1과 같이 11극의 형태로 철심은 S08(35PN230)재질을 사용하여 설계하였다. LSM의 고정자와 계자 설계를 위해서는 우선 부하산정을 해야 하는데 이를 위하여 기동 인장력, 주행저항, 구배저항, LSM 출력을 고려하였다. 설계된 LSM의 기초 설계 사양은 다음 표 1과 같다.

표 1. LSM 기초 설계 사양
Table 1. LSM Based Design Specifications

항 목	수 치
정격 용량(MW)	13
기동 추력(kN)	178
정격속도(km/h)	260
최대속도(km/h)	550
최대가속도(m/s ²)	1.1
입력 상 전압(V)	3Φ 4500
계자 코일 전류(A)	20
적층 길이(mm)	220
공극 길이(mm)	10
극간 길이(mm)	240

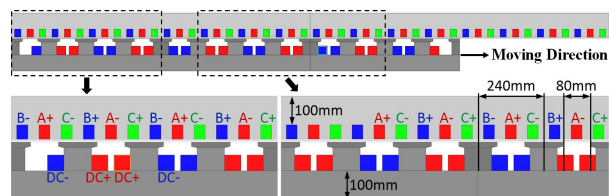


그림 1. 기초 모델
Fig. 1. Base Model

2.2 LSM 기초 모델 특성 해석

계자의 이동속도는 정격속도 260km/h, 최고속도 550km/h이 3가지 속도에 대하여 해석을 실시하였으며, 각각의 속도에 대한 입력전류 및 주파수는 표 2와 같다.

표 2. LSM 이동 속도에 따른 입력 전류와 주파수
Table 2. Input Current and Frequency by the speed of the LSM

이동 속도(km/h)	입력 전류(A_{rms})	주파수(Hz)
260	1486	150.463
550	823	318.287

기초 모델의 유한요소 해석을 위한 기본 조건을 설정하고, 무부하 해석 및 이동 속도별 전류원 해석을 실시하였다.

무부하 해석은 계자 권선에 20A의 직류 전류를 인가하고 계자를 일정한 속도로 이동시키며 진행하였다. 이를 통해 그림 2와 같이 LSM이 타행으로 운전될 때, 부상력의 크기와 리플 성분 및 고정자 권선에 발생하는 역기전력, 디텐트력을 알 수 있다.

무부하시 부상력은 약 36.8kN이며, 부상력 리플은 약 4.6kN, 디텐트력은 약 2.3kN이다.

역기전력 파형이 정현파에 가까울수록 추력과 부상력 리플 성분의 크기가 작고, 제어성이 뛰어난 특성을 갖는다. 그러나 이 LSM의 경우 그림 3처럼 기본과 성분에 많은 고조파 성분들이 포함되어 정현파에서 많이 왜곡된 파형으로 나타난다. 그림 3의 역기전력 파형은 계자가 260km/h의 속도로 이동할 때 고정자 권선에 유기되는 전압을 나타내며, 최대값은 약 109.8V이다.

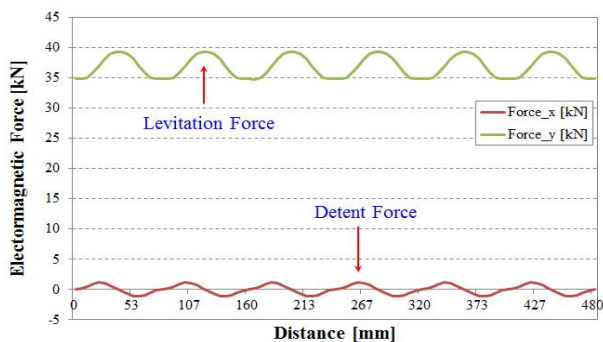


그림 2. 기초 모델의 부상력과 디텐트력 (무부하)
Fig. 2. Levitation Force and Detent Force of Base Model

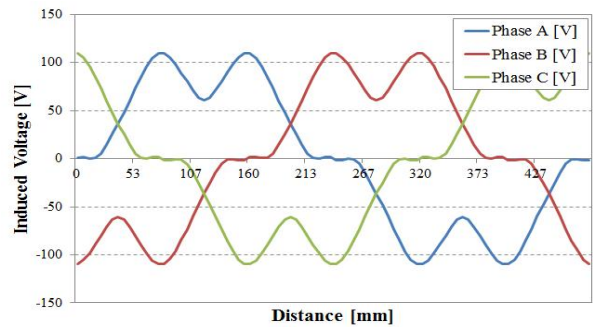


그림 3. 기초 모델의 역기전력
Fig. 3. Back EMF of Base Model

이번에는 고정자 권선에 3상 정현파 전류를 인가하고, 계자의 속도를 바꿔가면서 출력 특성을 해석하였다. 그림 4는 계자를 260km/h와 550km/h로 속도에서의 추력과 부상력 특성을 나타낸 그래프이다. 각각의 속도에 따른 입력전류의 크기와 주파수는 표 2와 같다.

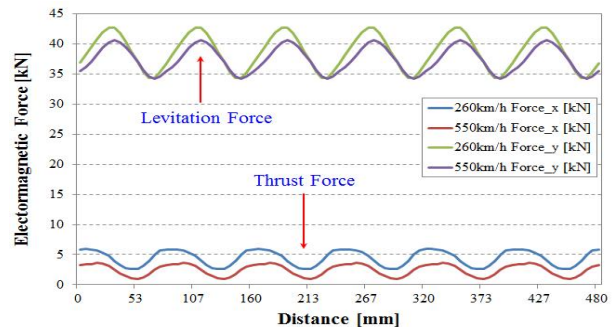


그림 4. 기초 모델의 속도별 추력과 부상력
Fig. 4. Thrust Force and Levitation Force by the speed of Base Model

표 3. 속도별 추력, 부상력, 역기전력 특성
Table 3. The characteristic of Back EMF Thrust Force and Levitation Force by the speed

속도(km/h)	1 Module	
	260	550
추력(kN)	4.44	2.47
추력 리플(kN)	3.34	2.62
부상력(kN)	38.60	37.36
부상력 리플(kN)	8.64	6.43
역기전력(V_{peak})	133.41	260.21

표 3의 결과에서 46 모듈일 경우를 계산해보면, 정격 속도 260km/h에서 약 204kN의 추력이 발생하고 최대 속도 550km/h에서 약 113kN의 추력이 발생한다. 그러므로 설계 요구 조건인 260km/h에서 178kN, 550km/h에서 83.6kN의 추력 조건을 만족한다.

2.3 LSM 개선 모델

설계된 기초 모델은 요구사항을 모두 만족시킨다. 그러나 추력 및 부상력 리플이 각각 75%, 14%로 과도하게 발생하였다. 이는 추진과 부상을 동시에 하는 자기부상열차 시스템에 소음과 진동을 유발하게 되고, 이에 따라 열차의 승차감이 저하된다[6]. 또한 과도한 리플은 부상력 제어 시 외란 성분으로 작용하고 제어성을 떨어뜨리기 때문에 이에 대한 개선 설계 및 대안이 필요하다.

2.3.1 설계변수 및 민감도 분석

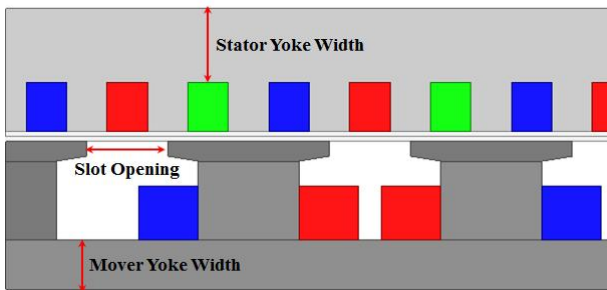


그림 5. 성능 개선을 위한 설계 변수 선정
Fig. 5. Selected design parameters for performance improvement

LSM 성능 개선 설계를 위하여 그림 5와 같이 3개의 변수를 선정하였다. 설계변수는 고정자와 이동자 코어의 자속 포화 밀도와 공극 자속 밀도를 고려하여 계자 요크 폭(Mover Yoke Width), 고정자 요크 폭(Stator Yoke Width), 슬롯 개구 폭(Slot Opening)을 선정하였다. 선정된 변수들의 크기를 변화시키며 특성을 파악하는 민감도 분석을 실시하여, 표 4와 같이 10mm씩 사이즈를 변경하면서 특성의 변화를 비교 분석 하였다.

표 4. 설계 변수의 범위
Table 4. The range of design variables

설계 파라미터	범 위	Step
Mover Yoke Width(mm)	20~100	10
Stator Yoke Width(mm)	50~100	10
Slot Opening(mm)	20~120	10

그림 6은 계자 요크 폭을 100mm부터 20mm까지 10mm씩 줄여가면서 추력과 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 50mm보다 얇아지면서 부상력이 상당히 감소하고, 40mm부터는 추력이 감소하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이는 자속이 흐르는 길이 좁아져 자기 저항이 증가하여 손실로 나타나게 되는 것이다. 요크 폭을 얇게 만들수록 재료비를 저감할 수 있지만 손실이 증가하므로 부상력이 급격히 감소하기 직전인 50mm를 설계 포인트로 정하였다.

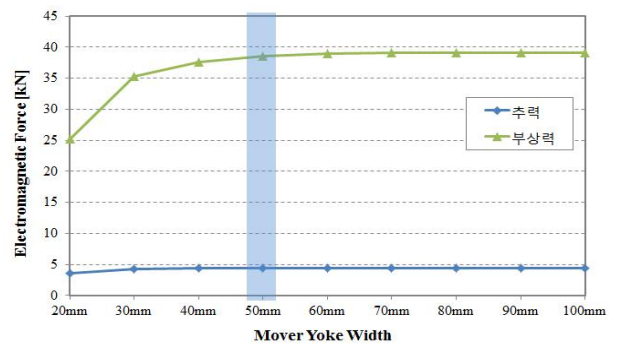


그림 6. 계자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기
Fig. 6. The magnitude of Thrust Force and Levitation Force by Field Yoke Width

그림 7은 고정자 요크 폭을 100mm부터 50mm까지 10mm씩 줄여가면서 추력과 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 100mm부터 60mm까지는 추력과 부상력의 변화가 거의 없으나, 요크 폭이 50mm일 때 추력과 부상력의 급격한 저감 현상이 발생하였다. 따라서 고정자 요크 폭은 최소한 60mm이상 확보해야 한다. 여기서는 고정자와 선로 구조물과 체결 홈을 파내야 하므로 15mm의 여유를 두어 75mm로 정하였다.

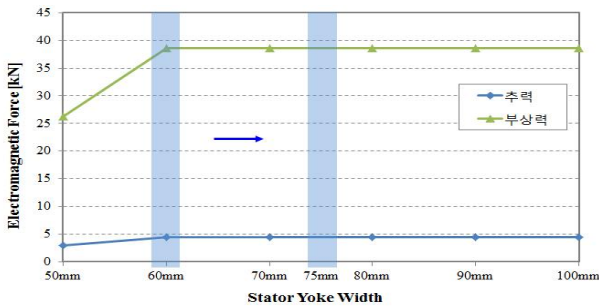


그림 7. 고정자 요크 폭에 따른 추력 및 부상력의 크기
Fig. 7. The magnitude of Thrust Force and Levitation Force by Stator Yoke Width

그림 8은 슬롯 개구 폭을 20mm부터 120mm까지 10mm씩 늘려가면서 추력과 추력 리플, 부상력의 변화를 나타낸 그래프이다. 슬롯 개구 폭이 80mm일 때 추력이 가장 크고, 50mm일 때는 부상력이 가장 크며, 90mm일 때는 추력 리플이 가장 작게 나타난다. 추력이 최대인 슬롯 개구 폭 80mm를 설계 포인트로 정하였다.

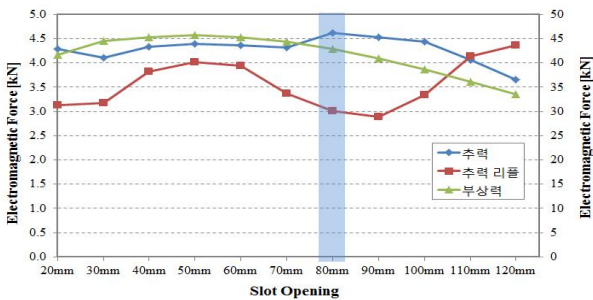


그림 8. 슬롯 개구 폭에 따른 출력 특성 비교
Fig. 8. The output characteristic comparison by Slot Opening

각각의 설계 변수는 교호 작용이 없다고 가정하였으며, 계자 요크 폭은 50mm, 고정자 요크 폭은 75mm, 슬롯 개구 폭은 80mm로 그림 9와 같이 개선 모델을 설계하였다.

2.3.2 LSM 개선 모델 특성 해석

이 개선 모델이 기초 모델에 비하여 어느 정도의 성능 향상이 되었는지를 알아보기 위해서 기초 모델과 동일한 방식으로 유한요소 해석을 진행하였다.

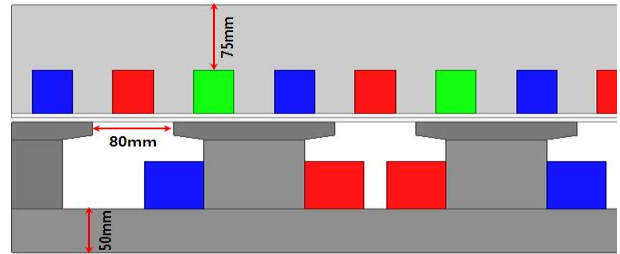


그림 9. 개선 모델
Fig. 9. Improved Model

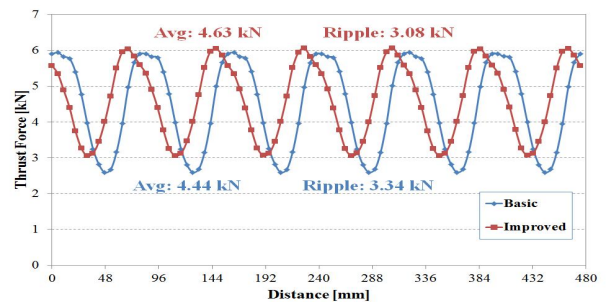


그림 10. 기초 모델과 개선 모델의 추력 파형 비교
Fig. 10. The comparison of Thrust Force waveform between Base Model and Improved Model

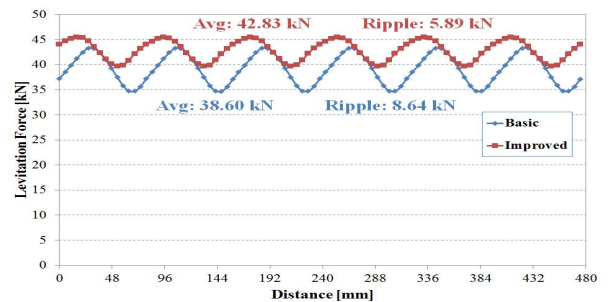


그림 11. 기초 모델과 개선 모델의 부상력 파형 비교
Fig. 11. The comparison of Levitation Force waveform between Base Model and Improved Model

그림 10과 그림 11의 그래프는 LSM이 정격속도 260km/h로 운전 시, 기초 모델과 개선 모델의 추력과 부상력 파형을 나타낸다. 이에 대한 내용을 표 5에 정리하여 나타내었다.

평균 추력은 4.44kN에서 4.63kN으로 약 4.2% 증가하였고, 추력 리플은 3.34kN에서 3.08kN으로 약 7.8%

저감되었다. 그리고 평균 부상력은 38.6kN에서 42.83kN으로 약 11% 증가하였고, 부상력 리플은 8.64kN에서 5.89kN으로 약 31.8% 저감되었다. 하지만 추력에 과도한 리플 성분이 포함되어있고, 부상력도 추력보다는 상대적으로 작지만 여전히 리플 성분이 있음을 확인하였다. 따라서 추력과 부상력에 존재하는 리플성분을 저감하기위해 개선 모델에 스큐를 적용하기로 하였다[7].

표 5. 기초 모델과 개선 모델의 특성 비교
Table 5. The characteristic comparison between Base Model and Improved Model

	기초 모델	개선 모델
평균 추력(kN)	4.44	4.63
추력 리플(kN)	3.34	3.08
평균 부상력(kN)	38.6	42.83
부상력 리플(kN)	8.64	5.89

3.1 LSM 스큐 모델

3.1.1 2차원 스큐 해석법

고정자 슬롯 및 이동자 자극 형상, 철심의 포화 및 제한된 길이, 양단부의 형상 등의 영향으로 공극의 자기저항이 일정치 않게 되면 공극 자속밀도와 역기전력의 맥동을 일으키고 운전 시, 디텐트력, 소음 및 진동 등을 유발시키게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 슬롯수 증가, 폐슬롯 구조 도입, 스큐 인가 등이 있는데 본 논문은 계자에 스큐를 적용하고 이에 대한 특성을 분석하였다[7].

보다 정확한 스큐 해석을 위해서는 3차원 접근이 필요하다. 그러나 3차원 유한요소법으로 시뮬레이션할 경우, 컴퓨터의 연산 시간이 상당히 많이 소요된다. 해석의 정확성을 높이기 위해 요소의 크기를 세밀하게 나누면, 전체 요소의 개수가 증가하여 컴퓨터의 메모리 부족으로 결과를 보기가 어렵다. 따라서 그림 12와 같이 2차원으로 스큐 해석을 실시하였다.

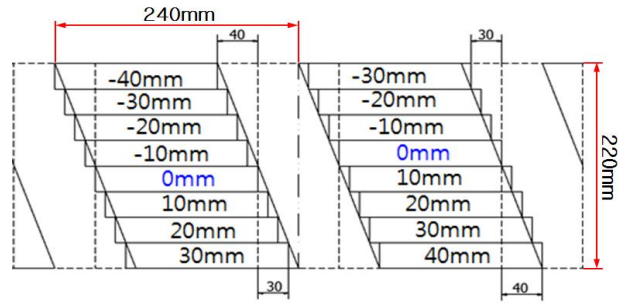


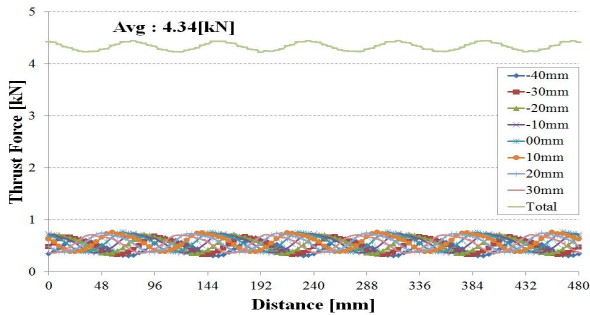
그림 12. 2차원 스큐 해석법
Fig. 12. 2-dimensional Skew analysis

2차원 스큐 해석법은 그림 12와 같이, 적층방향을 8등분하여 실 모델의 1/8 크기의 모델 하나를 시뮬레이션하여 추력과 부상력을 구하고, 스큐각을 따라 이동된 만큼 변경된 8개의 결과값의 총 합을 스큐 해석치로 보았다. 스큐각은 유한요소 해석을 통하여 고조파 자속에 의한 유도전압이 동일한 치 내에서 서로 상쇄시킬 수 있도록 한 슬롯 피치만큼 적용하였다[8].

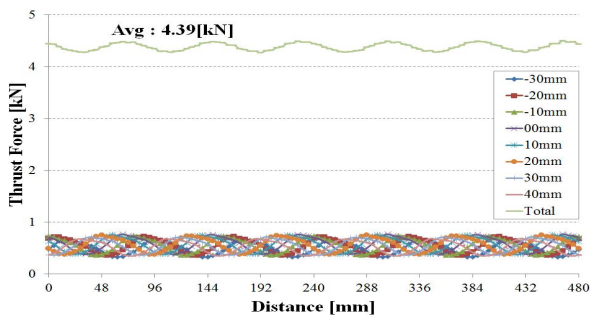
그림 13에 2차원 스큐 해석을 통해 계산된 추력 파형이 나타난다. 그림 13의 (a)와 (b)는 LSM의 초기 위치를 각각 -40mm부터 30mm, -30mm부터 40mm까지 10mm 간격으로 이동시키며 얻은 각각의 추력 파형과 이를 모두 더한 파형을 나타낸다. 8개의 분할 모듈의 추력을 모두 더함으로써 리플 성분들이 서로 상쇄되어 추력 리플이 대부분 사라지는 것을 확인할 수 있다. 8개의 분할 모듈로 나뉘기 때문에 약간의 리플 성분이 존재하지만, 분할 모듈을 아주 얇은 두께로 무한히 나눌 경우 이론상 추력 리플은 0이 된다. 0mm 위치를 중심으로 전체적인 위치가 그림 (a)보다 조금 앞서게 되어 평균 추력의 크기가 약간의 차이를 보인다. 실제로 스큐 인가 시, 전체적인 위치는 그림 (a)와 (b)의 중간 지점이므로 그림 (a)의 추력 합과 그림 (b)의 추력 합의 평균을 실제 추력 값으로 간주하였다.

그림 14는 개선 모델과 스큐 적용 모델의 추력 파형을 비교한 것이다. 그림 10에서 알 수 있듯이, 개선 모델의 추력 리플은 3.08kN이며, 스큐를 적용한 경우에는 0.22kN으로 나타났다. 따라서 스큐를 적용함으로써 추력 리플이 거의 사라졌다. 그러나 평균 추력은 개선 모델이 4.63kN이고, 스큐를 준 모델은 4.36kN의

로 약 5.38% 감소하였다. 추력의 평균값과 리플값은 트레이드 오프 관계가 있어서 리플값을 줄이면 평균값도 줄어들게 된다.



(a) -40mm부터 30mm



(b) -30mm부터 40mm

그림 13. 2차원 스큐 결과 추력 파형
Fig. 13. Thrust Force waveform of 2-dimensional Skew result

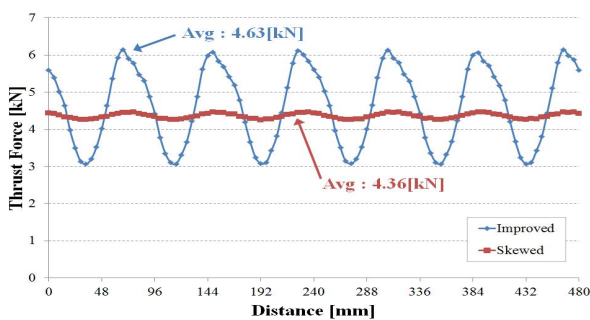
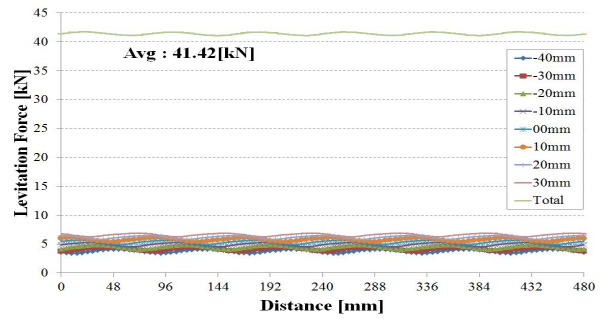
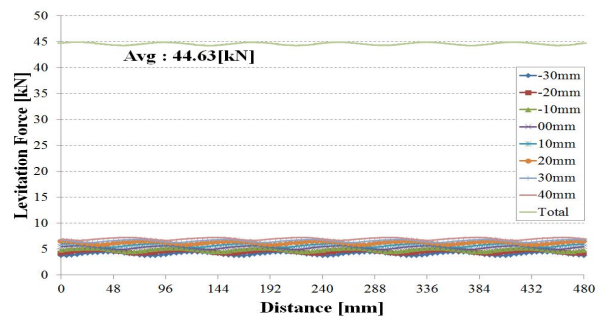


그림 14. 개선 모델과 스큐 모델의 추력 파형
Fig. 14. Thrust Force waveform of Improved Model and Skew Model

그림 15 또한 그림 13과 같은 방식으로 2차원 스큐 해석법을 적용하여 부상력 파형을 나타낸 그림이다.



(a) -40mm부터 30mm



(b) -30mm부터 40mm

그림 15. 2차원 스큐 결과 부상력 파형
Fig. 15. Levitation Force waveform of 2-dimensional Skew result

그림 16은 그림 14와 마찬가지로 개선 모델과 스큐 적용 모델의 부상력 파형을 비교한 것이다. 개선 모델의 부상력 리플은 5.89kN이고 스큐를 적용한 모델은 0.64kN으로 추력 리플과 상동하게 거의 사라졌다고 볼 수 있다. 또한 추력과 달리 평균 부상력은 42.83kN에서 43.02kN으로 소폭 증가하였다.

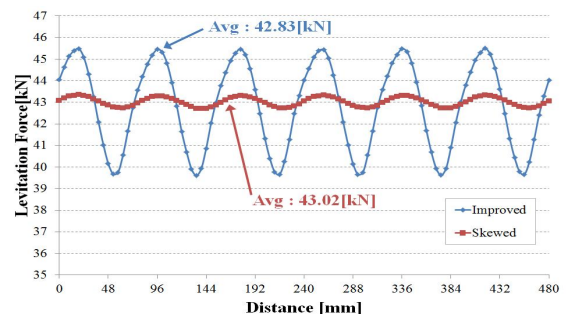


그림 16. 개선 모델과 스큐 모델의 부상력 파형
Fig. 16. Levitation Force waveform of Improved Model and Skew Model

3.1.2 3차원 스큐 모델

2차원 스큐 해석법으로 구한 결과치는 실험치나 3차원 모델링을 통한 유한요소법 해석 결과치와 비교해 보지 않으면 그 타당성을 검증하기 어렵다. 제작된 모델이 없기 때문에 실험이 불가능하여 그림 17과 같이 3차원 모델에 대한 해석을 실시하였다.

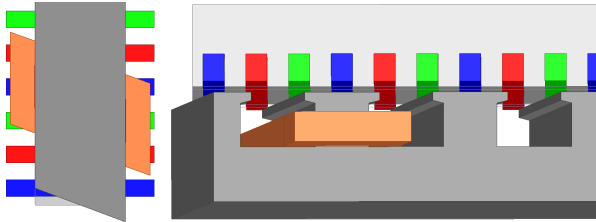


그림 17. 3차원 스큐 모델
Fig. 17. 3-dimensional Skew Model

일반 회전기와 마찬가지로 선형기의 경우에도 공극 부분의 특성 분석이 매우 중요하다. 따라서 공극 부분의 나뉜질 요소의 길이를 5mm로 제한하여 세밀하게 나뉜 해석을 진행하였다. 나머지는 2차원 해석 조건과 동일하다.

그림 18은 요소분할도와 자속밀도 분포도를 나타낸다. 나뉜질 요소의 총 개수는 164,529개, 1주기를 90개로 나뉜 시뮬레이션을 한 결과, 총 시뮬레이션 시간은 12시간 21분 21초가 소요되었다.

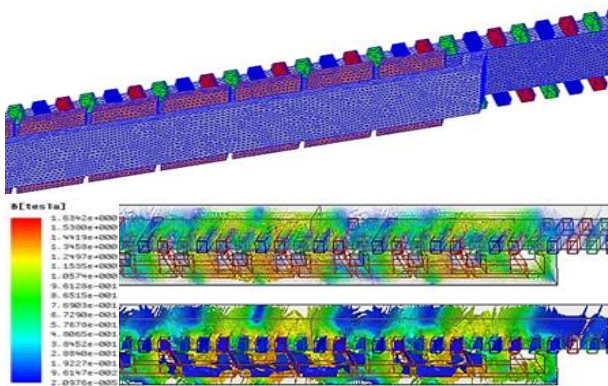


그림 18. 3차원 모델의 유한요소도(上)와 자속밀도 분포도(下)
Fig. 18. Finite Element Figure(up) and Magnetic Flux density distribution Figure (down) of 3-dimensional Model

이때의 LSM에 분포되는 자속밀도와 자속 벡터의 값을 0부터 1.8T로 스케일을 조정하여 분석한 결과, 최대 자속밀도는 이동자 치 부분에 약 1.3T로 분포됨을 확인하였다.

그림 19의 파형과 같이 3차원 모델의 시뮬레이션 결과, 추력은 4.1948kN, 부상력은 41.2658kN로 2차원 스큐 해석법 결과치인 추력 4.36kN, 부상력 43.02kN보다 소폭 낮은 결과가 나왔다.

파형에는 고조파에 의한 심한 일그러짐이 보인다. 2차원 모델에서 고려하지 못한 자속의 누설성분 및 나뉜질 유한요소의 개수와 크기에 따른 오차, 유효 공극 길이에 대한 고려 등 여러 가능성에 대한 차이가 발생하였다. 하지만 3차원 해석치와 2차원 해석치를 비교한 결과, 오차가 발생하는 원인에 대한 것을 감안한다면, 결과값에 대한 차이가 크지 않기 때문에 본 논문에서 제안하는 2차원 스큐 해석법으로 스큐를 인가한 선형 전동기에 대하여 시뮬레이션을 실시하여도 타당한 결과를 얻을 수 있다.

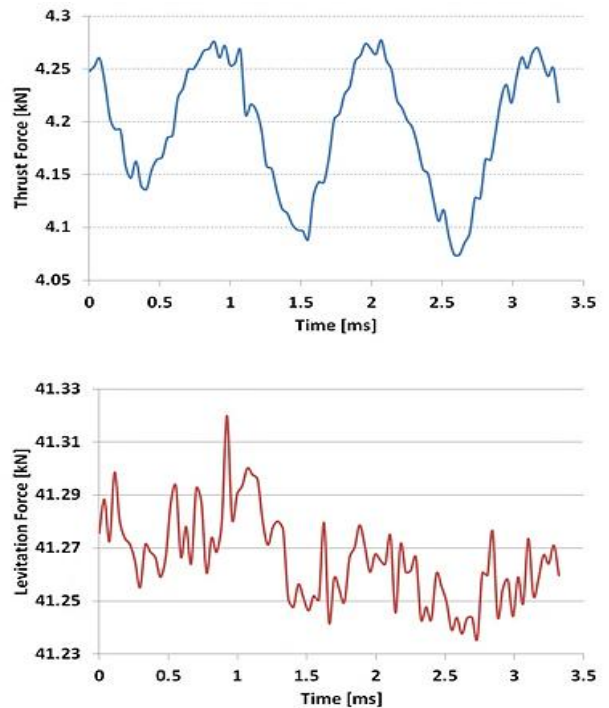


그림 19. 3D 모델의 추력(上) 및 부상력(下) 파형
Fig. 19. Waveform of Thrust Force and Levitation Force of 3D Model

3.1.3 모델 별 특성 해석치 비교 분석

표 6. 세 모델의 출력 특성 비교
Table 6. Comparison output characteristic each of the Models

	기초 모델	개선 모델	스큐 모델
추력(kN)	4.44	4.63	4.36
추력 리플(kN)	3.34	3.08	0.22
추력 리플률(%)	75.23	66.52	5.05
부상력(kN)	38.6	42.83	43.02
부상력 리플(kN)	8.64	5.89	0.64
부상력 리플률(%)	13.75	13.75	1.49

표 6은 개선 모델과 스큐 적용 모델의 해석치를 비교한 결과, 추력 리플률은 61.47%, 부상력 리플률은 12.26%만큼 저감되었음을 보여준다. 또한 그림 20은 기초 모델, 개선 모델, 스큐 적용 모델 각각에 대한 역기전력 파형을 한 눈에 비교해 볼 수 있도록 나타내었다. 스큐 적용 모델이 다른 두 모델에 비해 역기전력 파형이 훨씬 더 정현적이다. 고정자 고조파 자속에 의한 이동자 치의 유도전압에서 고조파 영향을 억제하였기 때문이다[8].

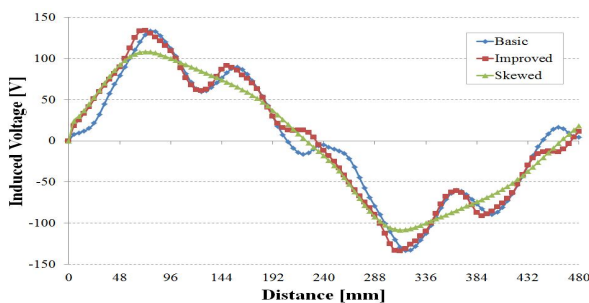


그림 20. 세 모델의 역기전력 파형 비교
Fig. 20. Comparison Back EMF of each of the Models

4. 결 론

본 논문은 550km/h급 초고속 자기부상열차용

LSM의 추진력 및 부상력 특성 개선을 위해 전동기 설계 파라미터 선정 및 민감도 분석을 실시하였고, 3차원 FEM 해석의 단점을 보완한 2차원 해석법을 제안하였다. 제안한 해석법은 3차원 모델링의 FEM 해석치와 비교함으로써 2차원 해석법의 타당성을 검증하였다.

기초 모델과 개선 모델, 스큐 적용 모델 해석치 결과를 비교해 본 결과, 스큐 적용 모델의 추력과 부상력에 대한 리플 성분이 거의 다 저감되었음을 알 수 있다. 이는 추력과 부상력의 리플 성분을 발생시키는 불필요한 고조파 성분들을 상쇄시켜 크게 줄임으로써, 13MW 급의 대용량 LSM의 구동 시, 제어 용이성을 높이고 기동과 정속 주행 중의 소음과 진동 문제를 해결하는 데 큰 효과를 보여줄 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No.2013R1A2A1A01015171)

References

- [1] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, Ju Lee, "Review of Maglev Train Technologies", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.42, No.7, pp.1917-1925, 2006.
- [2] I. Boldea and S. A. Nasar, "Linear motion electromagnetic devices", New York: Taylor & Francis, pp. 103-143, 2001.
- [3] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, "Linear synchronous motors : transportation and automation systems", Boca Ration: CRC Press LLC, pp. 85-121, 2000.
- [4] Kajioka, M., Oka, K., Watada, M., Torii, S., and Ebihara, D.: 'Optimal drive control timing in discontinuous arranged linear synchronous motor transfer system'. Proc. Conf. on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, 2000, pp. A2-25-A2-30.
- [5] Endou, A., Watada, M., Torii, S., Ebihara, D.: 'The various characters by the establishment angle of the carriage course of the PM-LSM with discontinuous arrangement primary', IEE Japan, Papers of Technical Meeting on Linear Drives, LD-00-91 (2000)(in Japanese).
- [6] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park, Ju Lee, 'Improvement of Thrust Force Properties of Linear Synchronous Motor for an Ultra-High-Speed Tube Train', IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.47, No.11, pp.4629-4634, 2011.

- [7] Yong-Jae Kim, Jae-Hong Kim, "The Analysis of Skewed Amature Effect for Reduction of End Edge Cogging Force of Stationary Discontinuous Amature PMLSM", The Journal of Korea Information and Communications Society(J-KICS), Vol.9, No.2, pp.243-248, 2014.
- [8] Sung-Mun Cho, Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung, Jang-Sung Chun, "Skew Effect of Core Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", KIEE The Journal of Institute Electrical Machinery and Energy Conversion System, pp.78-80, 2001.

◇ 저자소개 ◇



홍현석(洪賢碩)

1986년 3월 21일생. 2012년 단국대 전기공학과 졸업. 2014년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 박사과정.



오세영(吳世泳)

1980년 11월 4일생. 2006년 한양대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008~2011년 (주)비츠로시스 연구원. 2011년~현재 한양대 대학원 박사과정.



한정호(韓政濤)

1980년 11월 2일생. 2006년 순천향대 정보물리학과 졸업. 2005~2008년 한백디시스템(주) 연구원. 2010년~현재 한양대 대학원 석박사통합과정.



이 주(李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.