저심도철도용 선형유도전동기의 공극 불균일 과도특성 분석 연구

A Study on Transient Analysis of Linear Induction Motor with Ununiform Airgap for Shallow-depth Underground Train

이 형 우* · 박 찬 배** · 원 성 홍†
 (Hyung-Woo Lee · Chan-Bae Park · Sunghong Won)

Abstract - This paper presents an parallel type Linear Induction Motor with ununiform airgap for a shallow-depth underground train with 100% grade and 15 m curvature. This parallel type LIM has enough gradability but has inherently ununiform airgap between center and end parts. Consequently, performance when the train passes curved section should be considered with transient analysis. Moreover, general parallel operation, 1C2M which is usually used for train operation, deteriorates LIM performance because of different line velocity between inner and outer LIMs. Transient analysis has many problems such as huge model, lots of meshes, very long calculation time, truncation error and so on. This paper has presented a novel technique using equivalent linear rotating model in order to solve these problems and has analyzed parallel type LIM by using the proposed technique. Finally, LIM performance according to independent operating control has been investigated.

Key Words : Equivalent linear rotating model, Linear induction motor, LIM, Shallow-depth underground train, Ununiform airgap

1. 서 론

도시 발달 및 대도시화로 인하여 도심지내 다양한 교통수단이 발달하고 있으며, 수요 증가에 따라 기존 지하철을 피해 후발로 건설되는 철도시스템은 고심도화 추세이다(서울 지하철 1기 역사 평균심도 : 14.5 m, 2기 역사 평균심도 : 22.1 m). 그러나 고심도화는 운영사의 건설비가 크게 증가할 뿐만 아니라, 기존 지하철과의 환승 거리 및 시간이 증가하여 이용객의 불편 및 사회적 비용이 가중되고 있다. 이러한 도시 교통 상황과 수요에 부응하기 위하여, 도심지내 도로하부 저심도 지하공간에 적용 가능한 철도시스템의 개발이 요구되어 진다. 그림 1과 같이 저심도 철도(shallow-depth underground train)는 도로를 따라 노선이 정해지므로 약 100%의 급구배 등판능력 및 약 15 m의 도심내 급곡선 주행능력이 필요하다. 기존의 점착구동방식(wheel-on-rail)은 등판 가능 최대 구배가 약 40%이므로 100%의 급구배 등판을 위해서는 비점착 구동방식의 추진이 반드시 필요하다[1]. 이를 위하여 그림 2와 같이, 선형유도전동기(LIM)를 열차 대차의 측면에 취부하고 2차축 리액션플레이트를 노선을 따

라 설치하는 병렬식 선형유도전동기 방식이 고려되어진다.

하지만, 병렬식 선형유도전동기는 충분한 급구배 등판능력에도 불구하고, 곡선부 주행시 1차축의 양 끝단부와 중앙부와의 공극 불균일로 추력 손실이 불가피하며, 이에 대한 정확한 해석이 필요하다. 본 논문은 일반적인 선형유도전동기와 달리, 공극이 불균일한 병렬식 선형유도전동기의 과도특성을 분석하기 위한 모델링과 해석기법을 제시하고, 제안된 방법을 통하여 병렬식 선형유도전동기의 성능을 분석하였다.

표 1은 설계된 병렬식 선형유도전동기의 사양을 나타낸다. 연속 정격은 90kW, 정격슬립은 0.2이며, 기계적 공극은 11 mm이다. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 공극이 현저히 크므로, 자속 누설로 인하여 효율은 약 70%, 역률은 약 60%이다.

그림 1 저심도 철도시스템

Fig. 1 Concept of the shallow-depth underground train

* Dept. of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

** Advanced traction and noncontact feeding system research team, Korea Railroad Research Institute, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical System Engineering, Dongyang Mirae University, Korea

E-mail : sagewide@dongyang.ac.kr

Received : January 2, 2013; Accepted : January 28, 2013

그림 2 병렬식 선형유도전동기 및 대차 취부

Fig. 2 Parallel type linear induction motor and installation on bogie

표 1 병렬식 선형유도전동기 사양

Table 1 Main specification of the parallel type linear induction motor

항목	단위	주요 사양	항목	단위	주요 사양
만차 총중량	ton	34	정격슬립	-	0.2
가속도	km/h/s	3.5	매극매상 슬롯수	ea	4
연속정격	kW	90	기계적 공극	mm	11
DC_Link 전압	V	750	정격추력	N	8325
상전압	V	337.75	효율	%	68.7
상전류	A	220	역률	%	59.45
정격 주파수	Hz	30	요크두께	mm	35

2. 선형유도전동기의 유한요소해석

최근 유한요소해석을 이용하여 선형유도전동기(Linear Induction Motor, LIM)를 해석하는 방법은 여러 가지 다양한 형태로 시도되었으며, 그 결과로서 얻을 수 있는 해석결과의 정확도는 아직까지도 어느 정도 경험 있는 엔지니어에 의해 세심하게 모델링된 것이 아니라면 결과의 신뢰성이 많이 떨어지는 것이 사실이다. 유한요소해석법의 경우 일반적으로 정적인 모델의 자속분포나 정지력의 계산, 포화정도를 알아보기 위해 정자계해석을 실시할 수 있고, 정현적으로 변화하는 자계를 포함하는 모델의 경우는 복소수근사법을 이

용하여 간편하게 해석이 가능하며, 이런 방법을 사용할 수 없거나 모델의 이동을 고려해야 하는 경우 과도상태 해석을 이용하게 된다[2-4]. LIM은 기본적으로 유도모터이기 때문에 시간적으로 변화하는 입력전류를 가지며, 그 결과로서 만들어진 이동자계와 그 이동자계에 의해 1차측과 2차측의 상대적인 이동을 고려해야 하기 때문에 과도상태 해석을 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 과도상태 해석은 시간간격에 따라 매우 많은 해석을 수행해야 하므로 차량용 LIM과 같이 모델의 크기가 큰 경우는 한번 해석에 소요되는 시간도 길게 되어 과도상태 해석을 실시하게 되면 매우 긴 해석시간이 필요하다. 과거에는 LIM 해석을 위해서도 복소수근사법을 적용하고자 하는 시도가 많이 있었으나, 실질적으로 단부효과 등으로 인해 정현적으로 변화한다고 보기 힘든 전류 및 자계가 형성되기 때문에 그 결과의 정확도를 신뢰하기 힘들고, 이동까지 포함하게 되는 경우 신뢰도는 더욱 떨어진다. 또한 유한요소해석법을 이용하여 견인용과 같은 대형의 LIM을 해석하는 경우는 다극을 가지고 슬롯수와 권선이 매우 많이 사용되기 때문에 모델링이 일반모터에 비해 매우 어렵고, 매 해석마다 독특한 모델이 되는 경우가 많아 일반적으로 전형적인 모델링 방법을 적용하기가 어려우며, 회전형 모터와 다르게 단부효과가 존재하는 점 또한 모델링을 어렵게 하므로 이러한 여러 가지 사항을 고려하기 위해서는 유한요소해석법과 전기기기, 리니어모터에 대한 많은 경험이 있는 엔지니어가 해석상의 여러 가지 제약조건을 고려하여 해석을 실시해야 한다[5-8].

3. 급곡선 주행시 선형유도전동기 유한요소해석 모델

선형유도전동기의 병렬식 추진에 있어서 급곡선 주행 시 2차측 리액션 플레이트와 모터의 1차측 이동자가 일정한 공극을 이루지 못하고 곡선부 내측 모터에는 1차측의 양 끝단부가 중심부보다 공극이 커지는 공극의 불균일이 일어나며, 반대로 곡선부 외측 모터에서는 1차측 중심부가 양 끝단부에 비해 공극이 작아지는 공극 불균일이 일어나게 된다. 또한 하나의 선형모터를 이용한 추진방식에 비해 병렬식 추진의 경우는 곡선부에서 양측에 장착된 모터의 선속도가 달라지기 때문에 하나의 드라이버를 이용하여 양측의 모터를 동시에 구동하는 1C2M의 경우, 양 모터의 슬립이 달라져 추력에 차이가 나게 되어 이런 문제점을 극복하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 병렬식 선형유도전동기의 급곡선 구간에서 나타날 수 있는 다음의 두 가지 문제점을 고려한 적합한 해석모델을 개발하고, 그 결과에 따른 영향을 분석하였다.

3.1 급곡선 추진시의 양측모터의 공극간격 변화

그림 3에서 볼 수 있듯이 직선주행구간에서는 양측의 모터공극이 일정하게 유지되고 있으므로 추력특성에 문제가 없지만 곡선 주행시에는 양측의 공극이 달라지며 그뿐 아니라 곡선부 외측과 곡선부 내측이 서로 다른 공극패턴을 가지게 된다. 특히 곡선부 외측모터는 모터의 중앙부에서 공극길이가 길고 양 끝단부에서 공극길이가 짧아 자속쇄교량이 비교적 적은 단부가 작은 공극을 유지하고 자속쇄교량이

많은 중앙부에서 공극이 커서 곡선부 내측모터에 비해 적은 추력을 발생할 가능성이 크다.

(a) 직선부에서의 병렬식 LIM
(a) Parallel type LIM on straight section

(b) 급곡선부에서의 병렬식 LIM
(b) Parallel type LIM on curved section

그림 3 병렬식 LIM의 직선부와 곡선부에서의 공극변화

Fig. 3 Airgap distortion comparison in a straight section and curved section of the parallel type LIM

3.2 곡선부에서 양측 모터의 선속도 차이에 의한 슬립 변화

병렬식 LIM의 곡선부 외측모터는 내측모터에 비해 선속도가 빠르게 되므로 하나의 인버터를 이용한 병렬운전을 할 경우 내측모터의 슬립이 외측모터의 슬립보다 커지는 현상이 발생할 수 있고, 수하특성을 나타내는 제어용 LIM과 다르게 주행용의 LIM에서는 운전구간에서의 토크변화가 크기 때문에 외측모터의 추력은 더욱 작아질 가능성이 커진다. 따라서 급곡선의 원심력 방향으로 밀어내는 힘이 커지는 효과가 발생할 수 있기 때문에 설계에 주의해야 하는 문제가 발생하며 1개의 제어기로 양측의 모터를 동시에 제어하는 1C2M방식의 경우 추력발생에 문제가 생길 수 있다.

이러한 문제점을 시뮬레이션 하기위해 유한요소해석법을 이용한 LIM 해석모델을 개발해야 하는데 몇 가지 기술적인 문제점이 있다. 우선 일반적인 유도모터의 경우는 복소수근사법을 적용할 수 있지만, 단부효과의 존재와 공극이 일정하지 않은 본 해석모델의 특성상 정현적으로 변화한다고 가정할 수 없기 때문에 복소수근사를 이용한 빠른 해석을 적용할 수 없고 과도해석법을 적용해야 하므로 하나의 해석모델의 결과를 얻는데 대단히 많은 해석시간이 소모된다. 또한

다극 다슬롯 모델이므로 권선적용이 복잡하여 모델링에도 많은 시간이 소모되며 일반적인 리니어모터의 해석과는 다르게 빠른 속도로 이동하는 모델이기 때문에 과도현상시 어느 정도 일정 시간 이상을 해석해야 안정상태로 들어가게 되는데 그 기간 동안을 계속 해석을 해야 하며, 또한 그 과정에서 매우 긴 거리를 이동하게 되어 유한요소해석의 특성상 회전기와 같은 주기조건의 적용이 불가능하기 때문에 시작위치에서부터 안정상태에 이르는 거리를 모두 해석모델에 넣어야 하므로 해석모델이 지나치게 길어져 실질적으로는 해석이 불가능한 상태가 되어버린다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위한 등가 직선모델을 적용해야 하는데, 이 또한 많은 기술적인 어려움이 존재한다. 우선 회전의 중심과 실제 모터가 존재하는 지점간의 거리가 최소곡선구간인 15 m 인 경우, 유한요소를 위한 요소의 크기가 일반적으로 1~5 mm 정도로 설정될 때, 메쉬의 최소 크기와 최대 크기간의 비율이 10000배 가까이 되는 결과를 가져오므로 해석과정에서 트렁케이션 에러(truncation error)를 발생시킬 가능성이 대단히 커져서 해석결과의 불안정성을 가중시키게 되며, 이는 곡선부를 완만하게 하면서 영향을 살펴 볼 경우 곡선구간의 반경이 더욱 커지므로 더 큰 에러를 발생시킬 가능성이 커지는 문제가 존재한다.

과도상태해석에는 이외에도 다른 문제점이 존재하는데, 상미분방정식과 편미분방정식을 동시에 풀어야 하는 문제에 있어서 시간차분법을 적용하게 되고 1차 근사되는 시간차분의 특성상 유한요소 메쉬의 1개의 요소거리를 차분된 시간 동안 지나치면 안되는 제약조건이 발생한다. 예를 들어 10 m/s의 속도로 이동하는 모터를 모델링한다고 하면 1개의 공극메쉬 길이가 슬롯폭의 1/2인 5 mm라고 하면 시간간격은 0.0004초 이상이 되어버리면 선형근사되고 있는 1개의 메쉬 거리를 넘어버리므로 해가 수렴하지 않는 조건이 발생할 수 있다. 따라서 이런 문제가 발생하지 않도록 시간간격을 충분히 작게 설정해야 하므로 해석시간이 지나치게 길어져 버리는 결과를 가져오게 된다.

그림 4 병렬식 LIM의 곡선부 내외측 모터 슬립에 의한 추력차이

Fig. 4 Thrust force discrepancy between inner-part and outer-part motor in a curved section due to slip change

4. 시뮬레이션을 위한 선형유도전동기 모델개발 및 과도특성 해석

4.1 급곡선 해석을 위한 등가직선 회전모델

본 연구에서 적용하려고 하는 90kW모델의 경우, 모델의 복잡성이 지나치게 커서 2차원해석의 경우에도 약 백만개의 요소수를 사용하여 해석해야 하는데, 실질적으로 3차원 해석을 시도하면 어느 정도 신뢰할 수 있는 해석을 위한 최소요소수를 적용한다 해도 거의 해석이 불가능할 정도의 많은 요소를 가지게 된다. 더구나 과도상태 해석을 위해 적용해야 할 반복시간을 고려하면 3차원 해석은 거의 불가능하므로 2차원 해석을 수행하였다.

급곡선 구간의 최소곡선반경 15 m에서 약 2 m 길이의 1차측 모터를 해석하면, 실제의 공극변화가 눈에 띌 정도로 크며 이런 곡률을 적용했을 때의 추력 변화도 상당히 클 것으로 예상되므로 급곡선 구간의 영향을 분석하기 위해서는 직선구간의 기본모델과 급곡선 구간의 곡선 반경 별 모델을 구성하여 비교 분석 할 필요가 있다.

4.1.1 직선구간 기본모델

직선구간의 기본모델을 위해서는 유한요소해석 시에도 선형으로 모델링하여 직선운동을 설정하는 리니어모델을 구성하여 해석하는 것이 바람직하지만 전술한 바와 같이 경속도인 10 m/s에서 안정상태에 이르기까지 해석을 하기 위해서는 매우 긴 길이의 해석영역이 필요하게 되며 실질적으로 해석이 불가능하게 된다. 과거에는 이런 직선운동구간의 리니어 모터 해석에 있어서도 주기경계조건을 이용하여 등가적으로 해석하는 경우가 많이 있었지만, 유사한 경우의 모델링일 뿐 실제의 경우를 반영한 것이 아니다[9].

그림 5 리니어 모델에서의 주기경계의 문제
Fig. 5 Periodic Boundary Condition in Linear Moving Model

그림 5에서 보듯이 리니어 모델에서 주기경계를 적용하게 되면 실질적으로 1차측이 경계의 외부에서 연달아 주행하고 있는 경우의 모델이 되어버리므로 단부효과 등에 의해 그 영향이 진행방향의 2차측에 나타나게 되고 결과적으로 원래의 모델과 대단히 다른 결과를 만들어 낼 가능성이 커진다. 또한 리니어모델을 이용해서 모델링을 하게 되면 회전모델에 비해서 모델의 메쉬수가 대단히 크게 증가하며, 회전형

모델에서 적용하는 것과 같은 moving surface 기법(모델의 이동이 필요한 경우, 요소분할을 다시 할 필요 없이 회전부와 고정부의 요소들을 재결합함으로써 빠른 시간에 해석을 할 수 있게 하는 해석 기법)을 사용할 수 없기 때문에 실질적으로는 해석에 소모되는 시간이 회전형 모델에 비해 매우 길어진다. 이런 문제 때문에 새로운 해석 방법이 필요하며 따라서 본 논문에서는 등가직선 회전모델을 제시하였다.

4.1.2 등가직선 회전모델

등가직선 회전모델은 모델상에서는 회전기처럼 회전운동을 하도록 모델링하지만 1차측의 공극을 선형모델과 같이 공극이 일정하도록 모델링하여 선형모델과 유사한 해석결과를 얻을 수 있다. 그림 6은 직선부에서의 LIM 모델을 나타내며, 그림 7은 급곡선부에서의 LIM 모델을 나타낸다. 그림 8~9와 같이 등가직선 회전모델을 이용하면 선형모델을 해석하면서도 회전형모델에서 사용하는 여러 가지 편리한 기법을 이용할 수 있고, 요소수의 감소로 인해 더욱 정밀한 해석을 할 수 있는 장점이 있다.

그림 6 원래의 직선모델
Fig. 6 Linear section model

그림 7 급곡선부 실 모델
Fig. 7 curved section real model

그림 8 등가직선 회전모델 Case1
Fig. 8 Equivalent linear rotating model: Case1

그림 9 등가직선 회전모델 Case2
Fig. 9 Equivalent linear rotating model: Case2

그림 10~11의 해석 결과에서 보듯이, 두 가지 등가직선 회전모델 모두 실제 직선모델과 유사한 약 30kNm정도를 나타내어 등가직선 회전모델이 추력으로 환산하면 2kN정도의 추력을 가지는 실제 직선모델을 대체할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 공극이 불균일한 실 모델에서도 위의 해석 기법을 이용하여 해석이 가능하다.

그림 10 등가직선 회전모델 Case1의 해석결과
Fig. 10 Analysis Result of Equivalent linear rotating model: Case1

그림 11 등가직선모델 Case2의 해석결과
Fig. 11 Analysis Result of Equivalent linear rotating model: Case2

4.2 제어방식에 따른 급곡선 해석

곡선부 주행 시 공극 불균일에 의한 추력 변화뿐만 아니라 내측모터와 외측모터의 슬립차이로 인해 발생하는 추력의 변화도 무시할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 양측 LIM의 슬립을 고정된 경우와 양측 LIM의 슬립을 적절히 변경한 경우로 분리하여 해석함으로써 곡선부 주행 시 곡선반경에 의한 추력 저하뿐만 아니라 양측 LIM의 선속도 차이에도 의한 추력 변화도 분석하였다.

4.2.1 양측 LIM의 슬립을 고정된 경우

곡선반경의 변화에 따른 리니어 모터의 추력변화를 알아보기 위해 곡선반경을 변화시켜 가면서 주행할 수 있도록 모델을 수정하였고, 이때 모터의 주행을 보장하기 위해 최소공극을 11 mm로 유지하되, 내측 모터의 경우는 최소공극이 모터의 중심에 있으므로 중심의 최소공극을 11 mm로 두고 양 단부의 공극이 곡선반경감소에 따라 증가하는 양상을 가

지도록 모델링 하였다. 반면 외측 모터의 경우는 양 단부가 최소공극이 되므로 이 양단부의 공극길이를 11 mm로 모델링하고 모터 중심의 공극을 곡선반경감소에 따라 증가하도록 모델링 하였다.

그림 12~13은 곡선반경 15 m와 30 m에서의 내측 모터의 과도특성 해석 결과이다. 결과에서 보듯이, 150 ms이후 모터가 안정영역에 들어가게 되므로 그 이후의 평균치가 모터의 추력이 된다.

그림 14는 곡선반경에 따른 내외측 모터의 추력이다. 최소 곡선반경 15 m에서 최대곡선반경 80 m까지 5 m간격으로 곡선반경을 증가시켰다. 해석 결과로부터, 곡선반경이 커질수록 공극 불균일에 의해 발생하는 추력감소의 영향력이 점차 사라지는 것을 확인할 수 있으며, 모델의 곡선반경 증가에 따른 해석오차가 발생함을 감안해도 곡선반경 50 m 이후로는 직선형 LIM과의 추력 차이가 상당히 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한 내외측 모터의 추력이 다른 이유는 같은 제어기를 사용하여 동기주파수가 같은 상황에서 양측의 2차측이 서로 다른 반경을 가지기 때문에 실제의 슬립은 설정슬립인 0.2와 차이가 나기 때문에 내측모터의 경우 실제 선속도가 작고 슬립이 증가하여 더 큰 추력을 발생하고, 외측모터의 경우 상대적으로 슬립이 감소하여 작은 추력을 발생한다.

그림 12 곡선반경 15 m의 경우 내측모터의 추력
Fig. 12 Inner-motor thrust at radius of curvature : 15 m

그림 13 곡선반경 30 m의 경우 내측모터의 추력
Fig. 13 Inner-motor thrust at radius of curvature : 30 m

그림 14 내외측 모터의 곡선반경에 따른 추력변화
Fig. 14 Thrust of inner and outer-motor transition according to radius of curvature

4.2.2 양측 LIM의 슬립을 변경한 경우

병렬식 LIM의 경우, 양측 모터의 추력이 달라지는 것을 방지하기 위하여 각 모터의 슬립을 일정하게 개별 제어하거나 또는 하나의 제어기를 사용할 경우 두 모터의 추력이 비슷해지도록 동기주파수를 변경해서 사용하는 경우를 가정할 수 있다. 이 경우 내측 모터와 외측 모터는 각각 최악의 경우와 최선의 경우로 나누어 해석할 수 있는데, 두 개의 제어기를 이용하면 양측 모터를 둘 다 최대추력이 나오도록 슬립을 조절할 수 있지만, 하나의 제어기를 사용할 경우는 내외측 LIM이 다른 추력을 발생함을 고려하여 적절히 슬립을 변경하는 경우를 생각할 수 있다. 슬립을 어떻게 변경할 것 인지는 제어기의 운전상태에 따라 달라지므로 본 논문에서 분석하고자 하는 리니어 모터의 특성파악을 위해서는 각각 최악의 경우와 최선의 경우 두 가지로 가정하여 특성을 해석하였다. 그림 15의 해석결과에서 볼 수 있듯이 내측모터와 외측모터는 선속도 차이에 의한 슬립변화에 의해 매우 큰 차이를 보이며, 곡률변화에 따른 추력변화의 양상은 슬립을 개별적으로 제어해 줄 경우 최소화 될 수 있다.

그림 15 내외측모터의 슬립이 감소된 경우 곡선반경에 따른 추력변화
Fig. 15 Thrust of inner and outer-motor transition according to radius of curvature in case of decreased slip

그림 16 내외측모터의 슬립이 증가된 경우 곡선반경에 따른 추력변화
Fig. 16 Thrust of inner and outer-motor transition according to radius of curvature in case of increased slip

또한, 양측 모터의 동시제어 경우에는 약 50 m 이상의 곡선반경에서 직선구간과 비등한 추력을 얻을 수 있었으나, 양측 모터의 슬립을 적절히 조정함으로써 그림 16과 같이, 곡선반경 약 30 m 이상에서부터 직선구간과 비등한 추력을 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저심도 철도의 급곡선 선로환경에서 병렬식 선형유도전동기를 채용할 경우 발생할 수 있는 1차측과 2차측간의 공극 불균일에 따른 추력 특성을 분석하기 위해 적용할 수 있는 유한요소해석법에 대한 조사와 여러 가지 문제점 및 그 해결방안에 대해 연구하여 그 결과를 기술하였다. 본 논문에서 제안한 등가직선 회전모델을 이용한 과도특성 해석 기법을 통하여 급곡선 구간에서의 공극불균일에 따른 추력감소에 대하여 분석하였으며, 양측 모터사이의 곡선부 선속도 차이에 따른 슬립 차이 및 이로 인한 추력감소 등이 나타남을 확인하였고, 그 영향력이 최소화 될 수 있는 곡선반경을 산정하였다.

References

- [1] Japan Subway Association, "Linear Metro System," pp.1-28, 2004.
- [2] Hyung-Woo Lee, Sung Gu Lee, Chanbae Park and Hyun-June Park, "Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train according to Various Secondary Schemes," International Journal of Railway, vol.1, no.1, pp.6-11, 2008.
- [3] Sakae Yamamura, "Theory of linear induction motors," University of Tokyo Press, 1978.
- [4] I. Boldea and S. A. Nasar, "Linear motion electromagnetic devices," Taylor & Francis, 2001.
- [5] T. Hirasa, S. Ishikawa and T. Yamamuro, "Equivalent circuit of linear induction motors with end effect taken into account," Electrical Engineering

in Japan, vol.100, no.2, pp.65-71, 1980.

- [6] T. Higuchi, S. Nonaka and M. Ando, "On the design of high-efficiency linear induction motors for linear metro," Electrical Engineering in Japan, vol.137, no.2, pp.36-43, 2001.
- [7] H. Mosebach, "The effects of finite length and width in linear induction motors for both the short primary and the short secondary types," Ph.D dissertation (in German), Technical Technical university of Braunschweig, Germany, 1972.
- [8] H. Lee, C. Park, and B. Lee, "Thrust Performance Improvement of a Linear Induction Motor," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 6, no. 1, pp.81~85, 2011.
- [9] D. Im, H. Kim, C. Lee, and S. Park, "Design of single-sided linear induction motor using finite element method and SUMT," July, Conf.on Korean institute of Electrical Engineers, pp.503~505, 1992.

저 자 소 개

Hyung-Woo Lee

He received the B.S. and M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1998 and 2000, respectively, and the Ph.D. degree from Texas A&M University, College Station, TX, in 2003, all in electrical engineering. In

2004, he was a Post-doctoral Research Assistant in the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, NY. In 2005, he was a contract Professor at the BK division of Hanyang University, Seoul, Korea. From 2006 to 2012, he was a Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea. He is currently an associate Professor of the Department of Railway vehicle system engineering at Korea National University of Transportation since 2013. His research interests include design, analysis and control of motor/generator, power conversion systems, and applications of motor drives such as Maglev trains, conventional railway propulsion systems, and modern renewable energy systems.

Chan-Bae Park

He received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from Chungnam National University, Taejeon, Korea, in 2001, and Seoul National University, Seoul, Korea, in 2003, respectively, and Ph.D degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013. From 2003 to 2006, he worked as Senior Engineer in Digital Appliance R&D Center at Samsung Electronics Co., where he developed various motors for home appliances. Since 2007, he has been a Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea. His research interests include design and analysis of motor/generator, transformer and superconducting devices for energy conversion systems. Currently, he is working for development of linear propulsion systems for railway transit.

Sung-Hong Won

He received his M.S. and Ph.D. Degrees in Electrical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1995 and 2007, respectively. He is currently an associate Professor of the Department of Electrical System Engineering at Dongyang Mirae University since 2009. His main research interests include electric machinery and its drives, electromagnetic field analysis, new applications of spherical motor for robots.