

영구자석형 횡자속 선형전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구

이지영, 류호길, 홍정표, 정수진\*, 강도현\*  
 창원대학교 전기공학과, \*한국전기연구원

Calculation of Inductances in Permanent Magnet Type Transverse Flux Linear Motor

Ji-Young Lee, Ho-Gil Ryu, Jung-Pyo Hong, Soo-Jin Jung, Do-Hyun Kang\*  
 Changwon National University, KERI\*

**Abstract** - The design and analysis of electrical machines often require analytical models for performance assessment and system simulation. Inductances are important parameters of these models. In this paper, the methods of calculating apparent and incremental inductances are introduced for a transverse flux linear motor, which has a peculiar coil shape. The computation is accomplished by nonlinear three dimensional finite element method(FEM) and equivalent magnetic circuit network(EMCN). The improved method has been verified by a test result.

1. 서 론

전기기기의 자기회로를 설계하고 해석하는데 있어서, 성능을 평가하고 시스템 시뮬레이션을 하기 위해서는 해석적 모델이 필요하다. 이러한 해석적 모델에 있어서 인덕턴스는 중요한 파라미터 중의 하나이며, 대상 기기의 특성을 고려한 다양한 인덕턴스 계산 방법이 [1]에 소개되어 있다. 그러나 일반적으로 자성재질의 포화특성을 고려할 때, 권선의 인덕턴스는 자기자장에너지 또는 권선의 채교자속에 기초한 유한요소법(Finite Element Method, FEM)에 의해서 보다 정확하게 산정될 수 있으며, [2]와 [3]에 소개된 에너지 섭동법(energy perturbation) 또는 전류 섭동법(current perturbation)에 의한 방법은 대표적인 예이다.

에너지 또는 전류 섭동법에 의한 방법은 인덕턴스의 정의로부터 이끌어진 하나의 행렬방정식으로서 다상 권선의 인덕턴스를 계산하고, 회전자의 위치함수로서 상세한 인덕턴스의 변화를 볼 수 있으나, 전류변화에 따른 많은 해석을 위한 노력과 시간이 요구된다. 따라서, 이러한 불편함을 줄이기 위하여 [4]에서는 보다 간단한 인덕턴스 산정 방법을 제시하고 있다.

[4]에서 제시하는 인덕턴스 산정법은 상용소프트웨어인 ANSYS에서 사용하는 방법으로서 권선의 미분 또는 증분인덕턴스로 제한해서 설명을 하고 있다. 그러나, [5]에서는 실험적으로 구할 수 있는 겉보기 인덕턴스(apparent inductance)를 미분인덕턴스와 같은 개념으로 보고 ANSYS를 이용하여 인덕턴스를 산정하고 있다. 이는 해석 모델이 선형성을 가지기 때문에 가능하다. 선형적이고, 포화가 거의 없는 자기회로에 대해서는 겉보기 인덕턴스, 유효인덕턴스(effective inductance), 증분 인덕턴스의 값은 동일하다고 볼 수 있으며, 포화가 발생한 경우에는 겉보기 인덕턴스가 다른 두 인덕턴스에 비해 큰 값을 가지며, 증분 인덕턴스가 가장 작은 값을 가지게 된다[3].

이와 같이 참고논문에서 정리된 인덕턴스 산정 방법들은 변압기 또는 동기기와 같은 종자속 전동기에 대해서 그 응용 예가 제시되어져 있다. 이를 종자속 전동기와는 다른 권선법을 가지는 횡자속 전동기에 효과적으로 응용하기 위해서는 횡자속 전동기 특성을 고려한 인덕턴스 산정 방법에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 가전기용으로 제작된 영구자석형 횡자속 선형전동기의 겉보기 인덕턴스와 증분인덕턴스를 산정하기 위하여 해석모델을 먼저 3가지로 분리하고, 각각의 인덕턴스 산정법에 대해서 종자속 전동기에서 산정하는 방법과 비교하여 정리하도록 한다. 3차원 등가자기회로망법(EMCN)과 FEM을 이용하여, 정리된 인덕턴스 산정법에 의해 인덕턴스를 계산하고, 측정으로부터 얻은 인덕턴스 값과 비교, 분석하여 인덕턴스 산정의 타당성을 검토한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

2상 가전기용으로 제작된 횡자속 선형전동기 한 상의 3차원 형상은 그림 1과 같다. 이동자는 철심 7개와 영구자석 8개로 이루어져 있으며, 2개의 코일은 20쌍의 극을 가지는 고정자에 감겨져 있다. 표 1은 횡자속 선형 전동기의 해석을 위해, 고정자와 이동자에 대한 기차력과 재질 정보를 나타낸 것이고, 제작된 선형 전동기의 세부치수는 그림 2와 같다. 이동자 철심과 영구자석은 각각 10[mm]이며, 고정자 극간격은 40[mm]이다.

그림 3은 코일의 정확한 인덕턴스를 산정하기 위해서 코일을 3개의 영역으로 분할한 것을 나타낸 것이다. PM 부분은 이동자 하단에 위치한 코일을 나타내며, PL은 이동자의 영향을 받지 않는 부분이다. PE는 코일단(end coil)을 나타낸다. 각 영역에 따라서 해석 모델링이 달라지며, 표 2와 같이 해석 후에 반영되는 비율 또한 달라진다. 영구자석과의 상호 인덕턴스가 고려되는 부분 PM과 권선의 자기 인덕턴스만 있는 부분 PL의 실제적인 길이는 약 5배정도 차이가 난다.

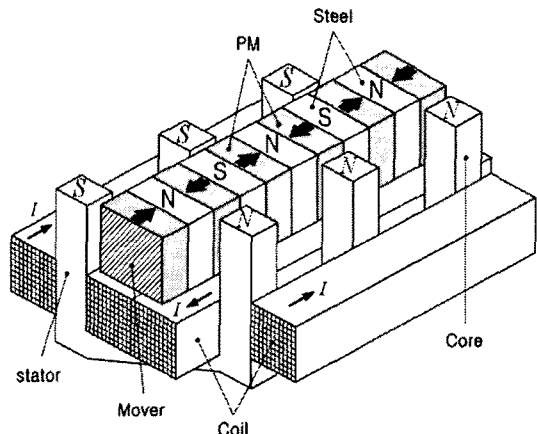


그림 1. 횡자속 선형전동기의 3차원 형상

표 1. 가진기용 횡자속 선형 전동기

고정자	극 수	20 쌍
	권선	140 turn
	정격전류	20A
	재질	S12
이동자	극수	7개
	영구자석 재질	$B_r = 1.2T$ $\mu_r = 1.05$ S20C

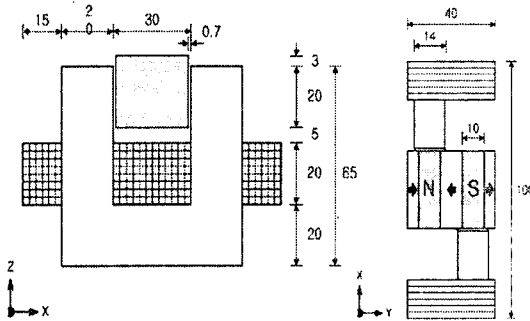


그림 2. 해석 모델의 상세 치수

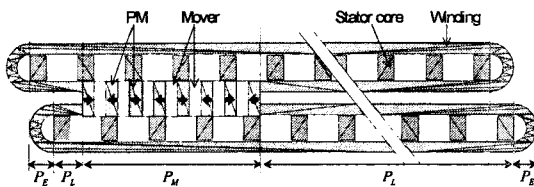


그림 3. 인덕턴스 산정을 위한 코일의 분할도

표 2. 해석 모델과 실제 길이 비

	해석 모델 길이	실제 길이	반영 비율
$P_M$	40 mm	150 mm	3.5 배
$P_L$	40 mm	714 mm	18 배

해석 모델과 실제 길이의 비를 그대로 반영 비율로 사용하지 않고, 표 2에서와 같이 약간 다른 값을 사용하였다.  $P_M$  영역에서 영구자석의 자속 경로는 철심 사이에서 이루어지고, 해석 모델 영역에서 철심이 2개 포함되어 있는데 비해 실제 이동자의 철심 수는 7개이므로 이 비율 이용하여 3.5배를 하도록 한다.  $P_L$  영역에서는  $P_M$  영역에서 제외된 부분을 고려하여, 해석 모델과 실제 길이 비인 17.85배를 정수로 취하여 18배로 고려하였다.

## 2.2 인덕턴스 산정 방법

해석을 위해서 횡자속 선형 전동기의 코일 전체를 모델링 할 수 없으므로, 그림 1에서 나눈  $P_M$ ,  $P_L$ ,  $P_E$  부분에 대해서 각각의 인덕턴스를 계산하도록 한다.

### 가. 주력 발생 영역 ( $P_M$ )에서의 인덕턴스

본 논문의 해석 모델인 횡자속 선형 전동기는 이동자에 영구자석을 가지므로, 권선의 기자력이 0일 때에도 이동자의 위치에 따라 자기회로가 포화상태에 있다. 그림 4(a)는 권선의 기자력이 0이고, 이동자와 고정자가 정렬 위치에 있을 때 해석모델의 자속밀도 분포를 나타내고 있다. 이동자와 이동자 부근의 자기회로는 전체적으로 포화되어 있으며, 극부적으로는 2[T] 정도까지 심하게 포화되고 있다. 따라서, 결보기 인덕턴스가 증분 인덕턴스보다 크게 나타나는 모델이므로, 이  $P_M$ 영역에서는 두 인덕턴스를 각각 산정하도록 한다.

### (1) 결보기 인덕턴스 산정 방법

[2], [3]에서 제시하는 전류, 에너지 섭동법에 의해서 인덕턴스를 산정할 때, 결보기 인덕턴스와 증분인덕턴스는 동일한 수식을 사용하고 있고, 단지 사용되는 투자율(또는 자기저항율)의 차이만 있다. 따라서, 전류, 에너지 섭동법보다 간략한 방법을 제시하고 있는 [4]의 증분 인덕턴스 산정방법을 이용하여 계산하고, 자기저항률에 대해서는 결보기 자기저항율(apparent reluctivity, [2])을 이용하도록 한다. 따라서, 결보기 인덕턴스를 산정하는 방법은 다음과 같다.

- step 1 : 영구자석과 권선의 기자력을 모두 인가하여, (단, 무부하 상태에서 권선의 기자력=0) 비선형 해석에 의해서 자기회로의 각 요소들이 운전상태의 투자율을 가지도록 한다.
- step 2 : 운전상태의 각 요소의 투자율을 저장한다.
- step 3 : 권선의 자기 인덕턴스를 산정하기 위하여, 영구자석의 기자력을 0로 만들고, 선형해석을 수행한다.
- step 4 : 선형해석에서 산정된 인덕턴스는 세 가지 값이 모두 동일하므로, 결보기 인덕턴스를 유효 인덕턴스 계산 수식을 이용하여 계산한다.

### (2) 증분 인덕턴스 산정 방법

결보기 인덕턴스가 권선의 실제적인 자기 인덕턴스를 나타내고, 계측기에 의해 측정되는 인덕턴스 값과 비교될 수 있는 값이라면, 증분 인덕턴스  $L_{diff}$ 는 식 (1)에 의해서 정의되는 값으로 시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 파라미터이다. 집중권선을 가지는 대부분의 돌극기는 상호인덕턴스가 적고, 따라서 한 상의 전압방정식은 전류와 그 상의 쇄교자속에 의해서 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 횡자속 전동기의 이동자는 그림 1과 같은 영구자석과 철심의 배치에 의해서 자기 회로적으로는 이중 돌극 구조이며, 집중권을 사용하므로, 종자속 돌극기와 같은 전압방정식 (1)의 형태를 사용할 수 있다. 이 때 쇄교자속  $\lambda$ 는 상전류  $i$ 와 이동자의 위치  $x$ 의 함수로 표현된다.

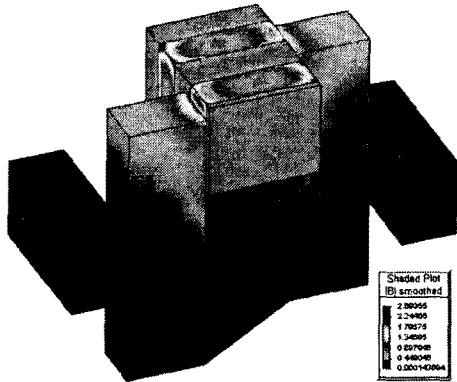
$$\begin{aligned}
 V &= iR + \frac{d\lambda}{dt} \\
 &= iR + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \\
 &= iR + L_{diff} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \dot{x}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

이 식에서  $V$ 는 단자전압,  $R$ 은 상저항을 나타낸다.

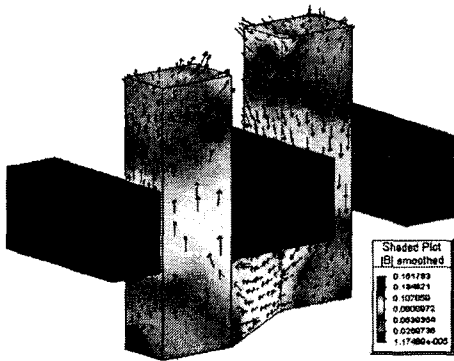
종자속 회전을 대상으로 전류, 에너지 섭동법에 의해서 증분인덕턴스를 산정한 논문에서는 증분인덕턴스의 정의를 그대로 이용한 쇄교자속에 의한 직접적 계산을 피하는 이유를 계산의 번거로움으로 들고있다[6]. 그러나, 해석에 사용된 상용프로그램인 Magnet6에서는 Post Processor에서 시스템의 에너지와 코일의 쇄교자속을 동시에 보여주고 있으며, 컨투어(contour) 좌표를 직접 입력하여 자속을 산정하는 EMCN에서도, 이동자의 위치에 관계없이 일정한 좌표에서 자속을 산정하므로, 횡자속 전동기 모델에 대해서는 전류, 에너지 섭동법보다 증분인덕턴스의 정의를 그대로 이용한 산정이 보다 간단하고 정확한 방법이라 하겠다.

### 나. 누설자속 영역 ( $P_L$ )에서의 인덕턴스

그림 4(b)에서 보듯이, 이동자의 영향을 받지 않는  $P_L$  부분은 권선의 누설자속만 존재하게 된다. 따라서, 정격 기자력이 모두 인가되어도, 포화가 거의 일어나지 않는 선형 재질 상태를 유지하므로 결보기 인덕턴스와 증분인덕턴스의 값이 같다. 따라서, 앞서 언급된 두 가지 인덕턴스의 산정 방법 중 한가지를 선택하여 계산 할 수 있다.



(a) 그림 1의 (P<sub>M</sub>)부분의 해석모델



(b) 그림 1의 (P<sub>I</sub>)부분의 해석모델  
그림 4. 3차원 해석 모델의 자속밀도 분포

다. 코일단 (P<sub>E</sub>)에서의 인덕턴스

코일단부의 누설인덕턴스는 전체 인덕턴스에 비해 적은 값이고 자성체의 포화를 전혀 일으키지 않으므로, 이를 산정하기 위해서 유사한 권선 방식을 가진 기기의 실험식을 이용하여 계산한다[7].

2.3 인덕턴스 계산 결과

해석 모델의 증분인덕턴스를 산정하기 위해서 먼저 권선의 자속을 계산하였다. 그림 5는 권선의 P<sub>M</sub> 부분만을 해석했을 때의 자속 값이다. 0[mm]와 20[mm]는 고정자와 이동자 극이 각각 다른 극과 같은 극으로 정렬되는 위치이고, 권선의 기자력 0[AT]과 정격 기자력 2800[AT]을 각각 0[%]와 100[%]로 보았을 때, 10[%] 간격 변화에 따른 자속 양상을 보았다.

그림 6(a)에서는 P<sub>I</sub> 부분의 누설자속을 기자력 변화에 따라 산정하여 동일한 해석 모델 길이 40[mm]에 대해서 영구자석 만에 의한 자속 값과 비교하였다. 이 때의 코일 기자력에 의한 누설자속 값은 기자력 변화에 대해 선형적으로 증가하며, 영구자석 만에 의한 자속 값보다 적음을 알 수 있다. 그러나, 실제 길이를 고려하여 표 2의 반영 비율을 각각에 대해서 적용하여 비교하면 그림 6(b)와 같다. 이동자에 비해 고정자의 길이가 길기 때문에 코일에서의 누설자속 값이 크게 나타난다. 따라서, 그림 5의 누설자속을 고려하지 않은 자속에 대해 그림 6(b)의 누설자속 값을 합산하여 코일의 총 자속을 산정하게 되면 그림 7과 같다.

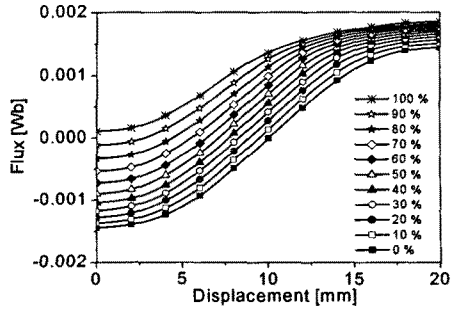
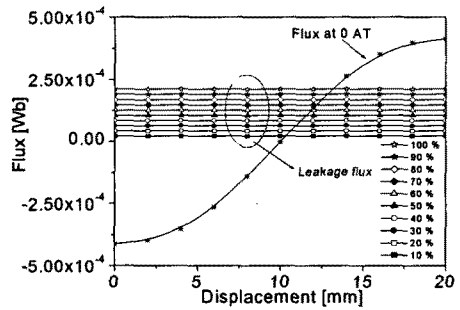
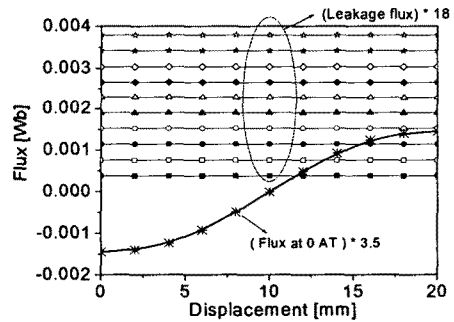


그림 5. 누설자속을 고려하지 않은 경우의 자속



(a) 해석 모델 길이에 대한 값 비교



(b) 실제 길이에 대한 값 비교

그림 6. 영구자석에 의한 자속과 권선 기자력에 따른 누설자속 비교

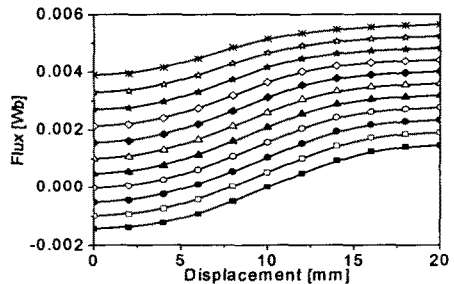


그림 7. 누설자속이 고려된 경우의 자속

$P_M$ 과  $P_L$ 의 합성자속(그림 7)으로부터 권선 기자력 변화에 따른 자속변화율의 증분인덕턴스를 계산하고, 코일 단부  $P_E$ 의 누설 인덕턴스를 고려하여, 그림 8과 같은 한 상 코일의 증분 인덕턴스를 얻을 수 있다.

$P_M$ 부분의 계산은 증분인덕턴스와 다르나, 포화가 발생하지 않는  $P_L$ 과  $P_E$ 의 인덕턴스 값은 증분 인덕턴스와 동일한 값을 이용하여, 권선 기자력이 각각 0, 50, 100[%]에 대한 한 상 코일의 결보기 인덕턴스를 그림 9와 같이 산정하였다.

그림 10에서는 기자력 0[%]에 대해서 해석적으로 산정된 결보기, 증분 인덕턴스와 50[Hz]의 운전주파수에서 측정된 인덕턴스 값을 비교하였다. 이동자가 있는 부분에서 발생하는 포화로 인해 결보기 인덕턴스가 증분 인덕턴스보다 큰 값을 가짐을 확인 할 수 있다. 결보기 인덕턴스와 실험 값의 약간의 차이가 발생하는 것은 영구자석, 자성재질, 기계적인 공극을 평가하는데 있어서 오차가 발생한 것으로 추정할 수 있다. 그러나, 이러한 양상은 참고논문에서도 나타나는데, 2차원 해석 시에는 해석 값이 실험 값보다 적게 평가되며[6], 3차원 해석 시에는 해석 값이 실험 값보다 크게 평가될 수 있다[3].

### 3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 횡자속 선형전동기의 결보기 인덕턴스와 증분인덕턴스를 효과적으로 산정하는 방법을 그에 대한 타당성과 함께 제시하였다. 횡자속 선형전동기의 권선특성을 고려하여 해석모델을 3가지로 나누고, 각 인덕턴스를 보다 신뢰성 있고 간편하게 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 해석적으로 산정된 결보기 인덕턴스 값을 실험 값과 비교하여, 해석 결과의 신뢰성을 보였다. 본 연구 과정에서 산정된 증분 인덕턴스는 가전기용 횡자속 선형전동기를 제어하기 위한 동특성 시뮬레이션에서 신뢰성 있는 파라미터로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] liuchen Chang, "An Improved FE Inductance Calculation for Electrical Machines," IEEE Trans. Magnetics, vol. 32, No. 4, pp. 3237-3245, July, 1996
- [2] T. W. Nehl, F. A. Fouad, and N. A. Demerdash, "Determination of saturated values of rotating machinery incremental and apparent inductances by an energy perturbation method," IEEE Trans. Power Apparatus Syst., vol. PAS-101, pp. 4441-4451, Dec. 1982
- [3] O. A. Mohammed and N. A. Demerdash, "A 3-D Finite Element Perturbational Method for Determining Saturated Valued of Transformer Winding Including Experimental Verification," IEEE, Trans. Magnetics, vol. Mag-21, No. 5, pp. 1877-1879, Sept. 1985
- [4] Miklos Gyimesi and Dale Ostergaard, "Inductance Computation by Incremental Finite Element Analysis", CEFC98, Tucson, p327, 1998
- [5] K. K. Sivasan, "Analysis of Self-Sensing Active Magnetic Bearings Working on Inductance Measurement Principle," IEEE Trans. Magnetics, vol. 32, No. 2, pp. 329-334, March, 1996
- [6] N. A. Demerdash, F. A. Fouad, and T. W. Nehl, "Determination of Winding Inductances in Ferrite Type Permanent Magnet Electric Machinery by Finite Elements," IEEE Trans, Magnetics, vol. Mag18, No. 6, Nov. 1982
- [7] TJE Miller, SPEED Consortium PC-SRD version7.0 Uwer's Manual, University of Glasgow, June, 1999

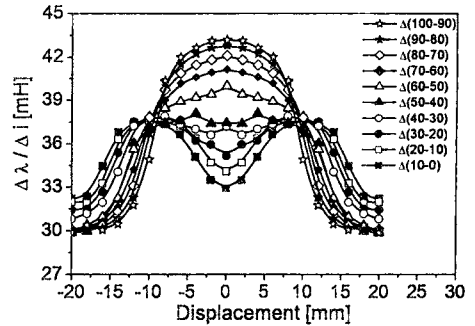


그림 8. 기자력 변화에 따른 증분인덕턴스

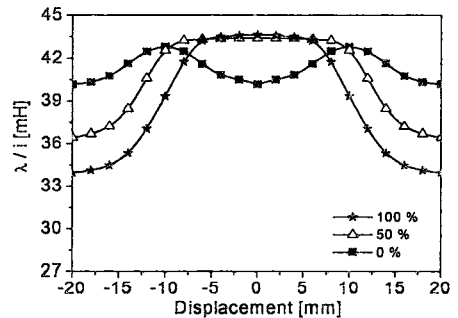


그림 9. 기자력 변화에 따른 결보기 인덕턴스

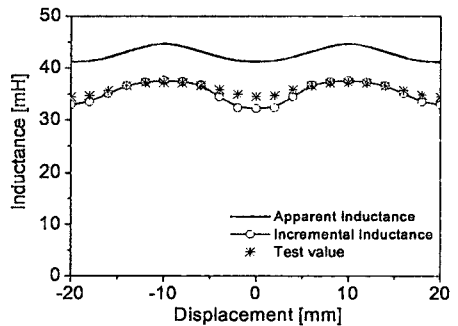


그림 10. 측정된 인덕턴스와 산정된 인덕턴스 비교