

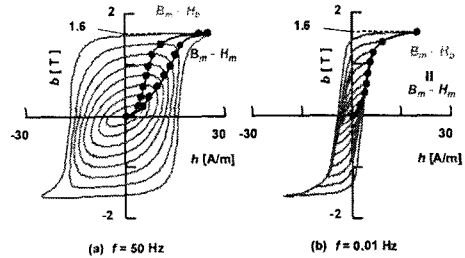
Ring-type Bulk Steel의 철손측정

음영환, 함승진, 고창섭  
 충북대학교 전기공학과

Experimental Iron loss Measurement of Ring-type Bulk Steel

Young Hwan Eum, Seung Jin Ham, Chang Seop Koh  
 Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University

**Abstract** - 일반적으로 전기강의 특성측정에는 Epstein frame과 Single sheet tester를 이용한 측정법이 사용된다. 그러나 위의 방법은 시료의 규격이 매우 제한적이며 Sheet 형태의 시료를 요구하기 때문에 측정이 용이하지 못한 경우가 많다. 이러한 경우를 위한 측정법이 Ring test 측정법으로 시료에 제한이 적기 때문에 그 활용도가 매우 높으며 특히 Bulk 형태의 시료에 대해서는 거의 유일한 측정법이라 하겠다. 본 논문에서는 0.2Hz의 교번자제 여자를 통해 Bulk형 전기강의 특성측정을 하였으며, 정현파 자속밀도 조건과 정현파 여자전류 조건에서의 B-H특성과 철손을 측정, 비교하였다.



〈그림 1. Hysteresis loops〉

1. 서 론

전기강(Electric steel)은 변압기, 전동기, 그리고 발전기를 비롯한 거의 모든 전기기기를 구성하는 가장 중요한 부분이다. 따라서 전기강을 이용하여 제작된 전기기기의 특성은 전기강의 특성에 따라 달라진다. 이러한 관점에서 볼 때 전기강의 특성을 정확히 측정할 수 있는 기술은 우수한 품질의 전기강을 생산하기 위해서는 물론, 그 측정결과를 전기기기의 설계과정에 적용함으로써 고효율, 고성능의 우수한 전기기기 개발을 위한 핵심기술이라 할 수 있다.

일반적으로 전기강판의 자기특성은 Epstein frame 또는 Single sheet tester를 이용하여 측정 한다. 그러나 Epstein frame과 Single sheet tester에서는 규격화된 판형(Strip sheet)의 시료를 요구하는 반면 실제적인 제품의 개발 내지는 제품의 특성 측정에 있어 그 크기 및 규격의 준수가 어려운 상황이 발생함에 따라 측정이 용이하지 못할 경우가 많으며, 이러한 상황에서 전기강의 특성 측정을 위하여 Ring test 측정법을 사용한다. 이 측정법은 시료에 제한이 적기 때문에 그 활용도가 매우 높으며 특히 Bulk 형태의 시료에 대해서는 거의 유일한 측정법이라 하겠다.

본 논문에서는 Bulk강의 와전류에 의한 영향을 최소화하기 위해 0.2Hz의 교번자제 특성을 측정하였으며, 와전류에 의한 손실을 비교하기 위하여 60Hz의 정현파 여자전류 조건에서의 측정을 병행하였다. 더불어 교번자제 여자에서의 정현파 자속밀도 조건과 정현파 여자전류 조건에서의 특성을 비교함으로써 자기특성 및 철손의 측정방법에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경 및 측정법

2.1 전기강의 자기 특성

B와 H의 관계는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$B = \mu_r \mu_0 H \tag{1}$$

여기서  $\mu_0$ 와  $\mu_r$ 는 각각 공기 중에서의 투자율과 매질에서의 비 투자율을 나타낸다.

그림 1은 일반적인 Hysteresis loops를 나타내며 B가 최대가 되는 점에서의 H값을 연결한 선이 B-H curve이며 이 곡선의 기울기가  $\mu_{rh}$ 인 것이다. 그림에서  $B_m$ 은 B가 최대가 되는 순간이며  $H_b$ 는 B가 최대인 순간의 H이고,  $H_m$ 은 H가 최대일 때의 값이다.

자기특성을 측정할 때 이상적으로는 직류여자에 의한 측정을 하여야 하나 시료의 Virgin stated 신뢰도 문제와 직류여자 조건에서 자속밀도 측정에 어려움으로 교류여자에 의한 유기전압을 통해 자기특성을 측정하게 된다.

교류여자 특성은 와전류에 의한 손실을 포함하여 직류여자 특성과는 차이를 보이게 된다. 와전류에 의한 손실은 여자전류 주파수의 제곱에 비례하므로 여자전류의 주파수는 가능한 낮은 것이 좋으나 Flux coil에서의 유기전압은 주파수에 비례하여 작아지기 때문에 신호대 잡음의 비를 위해서는 주파수가 높은 것이 좋다.

일반적인 교류여자 특성곡선이 그림 1에서  $B_m-H_m$ 이며 이에 대한 오차를 보완한 것이  $B_m-H_b$ 의 곡선이다.  $B_m-H_b$ 의 순간에서는 철판내의 평균자속밀도의 시간변화가 0이므로 와전류가 0에 근접하기 때문에 직류특성에 근접하게 된다. 따라서 본 논문에서는  $B_m-H_b$ 특성을 기준으로 측정하였다.

2.2 철손의 계산

철손의 표현은 다음 식과 같이 나타낸다.

$$P_{total} = \frac{1}{\rho T} \int_T \vec{H} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} dt \text{ [W/kg]} \tag{2}$$

여기서  $\rho$ 는 철의 무게 밀도,  $T$ 는 자속밀도 파형의 주기를 나타낸다. 이때 전체 손실은 교번자제에 의한 손실과 회전자제에 의한 손실로 나뉘고 이들은 각각 다음과 같이 표현한다.

$$P_T = P_a + P_r \tag{3}$$

$$P_a = \frac{1}{\rho T} \int_T |\vec{H}| \left| \frac{d\vec{B}}{dt} \right| \cos \alpha dt \tag{4}$$

$$P_r = \frac{1}{\rho T} \int_T \frac{d\theta}{dt} (\vec{H} \times \vec{B})_z dt \tag{5}$$

여기서  $a$ 는  $B$ 와  $H$  사이의 각이며,  $\theta$ 는  $B$ 의 위상각이다. 본 논문에서 측정된 Ring-type 시료의 경우에는 교번자계만이 인가되므로, 식 (2)에 의하여 측정된 손실은 식 (4)으로 표현되는 교번자계에 의한 손실이 된다.

### 2.3 자기특성의 측정

#### 2.3.1 자속밀도(B)의 측정

자속밀도는 통상 Flux coil을 이용하여 측정된다. Flux coil의 양단에 유기되는 전압(induced voltage)은 다음과 같으며,

$$e = \oint_{coil} \vec{\epsilon} \cdot d\vec{l} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d(NAB)}{dt} \quad [V] \quad (6)$$

이로부터 연산되는 자속밀도는 다음과 같다.

$$B(t) = -\frac{1}{AN} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

여기서  $\vec{\epsilon}$ 는 전계의 세기,  $\lambda$ 는 전체 쇄교자속,  $A$ 는 Flux coil로 둘러싸인 면적,  $N$ 은 Flux coil의 권선수를 각각 나타낸다.

#### 2.3.2 자계의 세기(H) 측정

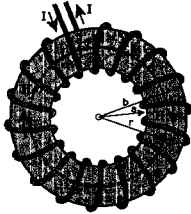
자계의 세기는 여자전류법(exciting current method)을 사용하여 측정하였다. 이 방법은 Ampere의 주회법칙을 이용하여 다음과 같이 표현되고,

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad [A] \quad (8)$$

Ring-type의 시료에 대하여 위의 식을 적용하면, 자계의 세기와 인가전류의 관계는 다음과 같이 구해진다.

$$H(t) = \frac{Ni(t)}{l} = \frac{Ni(t)}{2\pi r} \quad [A/m] \quad (9)$$

여기서  $l$ 은 유효자속의 길이  $r$ 은 Ring-type 시료의 유효 반경으로 그림 2에서의  $r$ 과 같다.



(그림 2. Ring-type core에서의 여자전류와 자계세기)

#### 2.4 자속밀도 파형의 제어

일반적으로 측정하고자 하는 시료의 자기적인 특성이 비선형이기 때문에, 정현파 여자전압을 인가하면 비정현파의 자속밀도( $B$ )를 얻게 된다. 그러나 통상적으로 전기강판의 철손 특성은 특정주파수에서 자속밀도의 파형을 정현파로 유지하는 조건하에서 측정되어야 한다. 따라서 자속밀도의 파형을 정현파로 유지하기 위해서는 정현파 자속밀도가 얻어지도록 여자전압의 파형을 조절해야 하며, 이 과정을 자속밀도의 파형제어(B-waveform control)라고 한다.

다음과 같이 주어지는 정현파 자속밀도를 얻고자 하는 경우,

$$B(t) = B_m \sin(\omega t) \quad [T] \quad (10)$$

Flux coil에서 측정되는 유기전압은 다음과 같은 파형을 가져야 하며,

$$e_T(t) = NA \omega B_m \cos(\omega t) \quad [V] \quad (11)$$

여기서  $A$ 와  $N$ 은 각각 Flux coil의 면적과 권회수이다. 따라서 정현파의 자속밀도가 측정되기 위해서는, Flux coil의 유기기전력이 식 (11)과 같이 측정되어야 하고, 이를 위해 본 논문에서는 Digital feedback method를

사용하였으며, 그 방법은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 컴퓨터에서 발생된 정현파와 초기 여자전압( $v_c^{(1)}$ )을 D/A converter를 통하여 여자권선에 인가하고,
- (2) Flux coil에 유기되는 출력전압  $v_b$ 를 측정한다.
- (3) 여자전압과 유기전압을 FFT하여 각각의 기본파 성분  $v_{c1}$ 과  $v_{b1}$ 을 구한다.
- (4) 자속밀도 제어의  $(i+1)$ 번째 단계에서 입력전압의 파형  $v_c^{(i+1)}$ 은 다음 식에 의해 결정된다.

$$v_c^{(i+1)} = v_c^{(i)} - K \frac{v_c^{(i)}}{v_{b1}^{(i)}} (v_b^{(i)} - e_T^{(i)}) \quad (12)$$

여기서  $K$ 는 Feedback coefficient이고,  $e_T$ 는 식 (11) 도 정의되는 유기기전력이다.

### 3. Ring-type Bulk Steel의 자기특성 측정

#### 3.1 측정 시스템의 설계

##### 3.1.1 시료의 규격

측정에 사용한 시료는 두께 7mm의 강판을 내경 4mm, 외경 5mm로 가공하였고, 여자용 1차 권선과 측정용 2차 권선을 하였다. 또한 열알에 의한 오차를 최소화 하고 여자권선의 절연 유지를 위하여 냉각장치를 하였다. 여자권선은 직경 0.9mm의 단선으로 80turn을 감았으며, 측정권선은 직경 0.1mm의 단선을 35turn 기준으로 주파수에 따라 가감하였다.

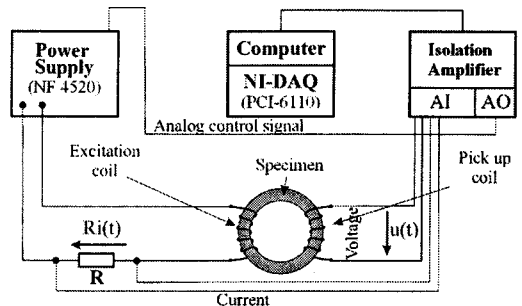
##### 3.1.2 측정 시스템

그림 3은 본 논문에서 개발된 Ring-type bulk 강의 자기 특성 측정 시스템이다.

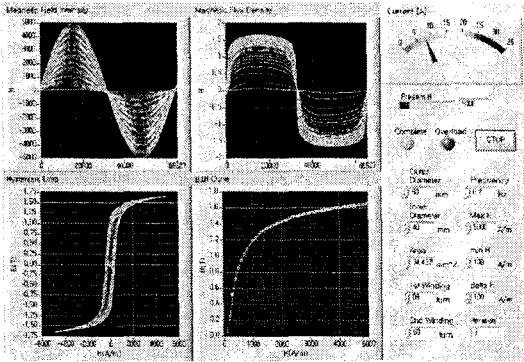
측정 시스템은 신호처리용의 컴퓨터와 아날로그 신호의 발생 및 수집을 처리할 DAQ보드, 여자용 전력증폭기, 전류측정용 직렬저항 및 원형의 시료에 감겨진 1차 및 2차 권선으로 구성된다.

컴퓨터에서 발생된 여자전압의 파형은 저주파 통과 필터를 이용하여 계단파형을 완만하게 만들어 준 후, 전력 증폭기(Power supply)에 연결된다. 증폭된 전압은 시료의 1차 권선에 연결된다. 직렬저항 및 2차 권선에서 측정된 전압은 Isolation amplifier를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 모두 NI사의 DAQ 보드를 사용하여 이루어진다. 직렬저항과 2차 권선의 전압 신호가 들어오면, 이 신호를 이용하여 각각 자계의 세기( $H$ )와 자속밀도( $B$ )를 계산하고, 이로부터 Hysteresis loops를 그린다. 측정에 관여하는 모든 연산은 NI사의 LabVIEW를 기반으로 설계된 프로그램을 이용하여 제어된다.

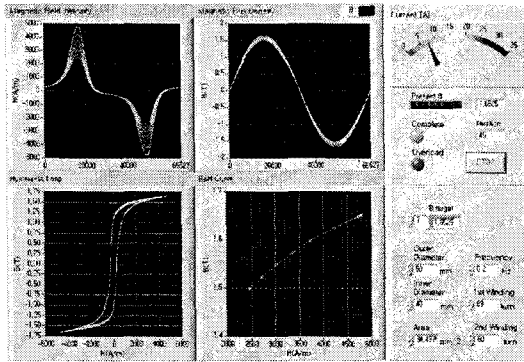
그림 4와 그림5는 측정시스템에서 각각 정현파 여자전류 조건과 정현파 자속밀도 조건에서 측정된 결과이며, 이로부터 자속밀도가 정현파가 되기 위해서 인가자계는 많은 고조파성분을 포함함을 알 수 있다.



(그림 3. Ring-type 시료의 자기특성 측정 시스템)



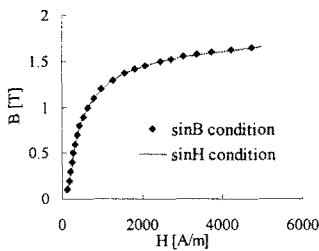
〈그림 4. 정현파 여자전류 조건에서의 특성〉



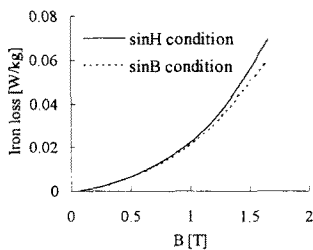
〈그림 5. 정현파자속밀도 조건에서의 특성〉

### 3.2 측정결과

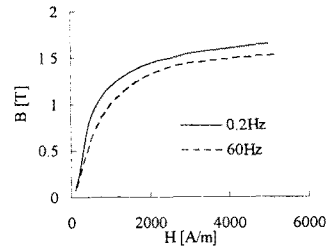
자기특성의 측정은 정현파 여자전류( $\sin H$ ) 조건과 정현파 자속밀도( $\sin B$ ) 조건으로 측정하였으며, 이 결과를 기준으로 강판의 특성을 비교하였다. 실험에서 0.2Hz의 측정결과를 기준으로 하였으며 측정범위는 JIS 규정을 참고하여 5000[A/m]까지로 제한하였다. 또한, 와전류 손실의 비교를 위하여 60Hz의 측정을 병행하였다.



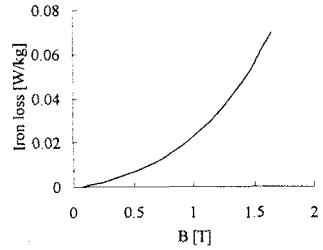
〈그림 6.  $\sin H$ ,  $\sin B$   $B-H$  curve 비교〉



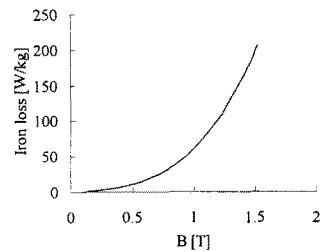
〈그림 7.  $\sin H$ ,  $\sin B$  철손의 비교〉



〈그림 8. 여자 주파수에 따른  $B-H$  curve〉



(a) 0.2Hz



(b) 60Hz

〈그림 9. 여자 주파수에 따른 철손의 비교〉

그림 6은  $\sin H$ 와  $\sin B$  조건에서의  $B-H$  curve를 나타낸다. 측정된 결과를 보면 두 측정값이 거의 일치함을 볼 수 있으며, 이를 통해  $B$ 의 경로와  $B-H$  curve는 큰 연관성이 없음을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 7의  $\sin H$ 와  $\sin B$  조건에서의 철손 곡선을 보면 두 조건에서의 측정값들이 차이가 남을 볼 수 있고  $\sin H$  조건일 때가  $\sin B$  조건일 때에 비하여 1.5[T]에서 약 14.7%가 증가함을 확인할 수 있었다.

이는 앞에서 기술한 식(2)에 의하여 철손은  $B$ 와  $H$ 의 경로에 따른 영향을 받기 때문에  $B$ 의 경로가 달라짐에 따라 철손이 변화함을 확인할 수 있다.

그림 8에서는 0.2Hz와 60Hz에서의  $B-H$  curve를 나타내었다. 그림을 보면 와전류의 영향으로 같은 자계세기에서의 자속밀도가 떨어짐을 볼 수 있고 포화 자속밀도 역시도 줄어들었음을 볼 수 있다.

앞서 기술한  $B_m-H_b$ 곡선의 특성에 의하면 그림 8의  $B-H$  curve는 일치하여야 하나 Bulk 형태의 강판에서의 와전류의 영향이 지배적이기 때문에  $dB/dt=0$ 이 되는 점에서도 와전류가 0이 되지 않아서 나타나는 현상으로 해석된다.

그림 9에서는 0.2Hz와 60Hz에서의 철손을 비교하였다. 측정된 자료에 의하면 0.2Hz일 때보다 60Hz일 때 1.5[T]에서 약 88배의 손실을 보이며, Bulk 형태의 강판에서 와전류의 영향이 매우 큼을 보여준다.

일반적으로 임의의  $B$  파형에 대하여 손실을 계산하기 위해서는  $B$  파형을 FFT하여 각각의 고조파 성분으로 분해한 뒤 각각의 주파수 별 손실을 합산하는 방법을 사

〈표 1. sinH 여자시의 손실과 각 고조파별 손실의 비교〉

	frequency	phase (degree)	$B_m$ [A/m]	$H_b$ [A/m]	loss/1period	loss/1sec	total loss
Original B	1Hz		0.993149	986.147	0.186105	0.186105	0.186105
FFT spectrum	1st	0	1.196438	2590.767	0.232240	0.232240	0.494115
	3rd	11.60586	0.289885	214.088	0.049908	0.149724	
	5th	8.67891	0.114318	139.900	0.014979	0.074897	
	7th	-3.53840	0.049945	83.064	0.004099	0.028693	
	9th	5.09336	0.020309	39.982	0.000801	0.007212	
	11th	-18.28070	0.006875	15.823	0.000123	0.001350	

용하였다. 그러나 이 방법은 각각의 고조파 손실이 단순 합산되므로 실제의 손실과는 많은 차이를 보일 것으로 예상되어 이를 실험을 통해 검증하였다.

표 1은 sinH 여자를 통해 1[T]일 때의 얻어진 B파형을 기준으로 각각의 고조파를 구한다음 각 고조파별로 sinB 조건을 만족하도록 측정하여 철손을 구하였고, 이 철손과 본래의 철손을 비교한 것이다. 실험에서 기준 주파수는 1Hz로 하였으며 고조파 분해후의 재합성 결과 11고조파까지의 합성으로 본래 파형과 일치함을 확인하였고, 이를 기준으로 하여 11고조파까지 측정하였다. phase는 기본파에 대한 각 고조파의 위상차이며, loss/1period는 고조파 1주기 당 손실, loss/1sec는 기본파 1주기 동안의 고조파별 손실에 합하다.

그림 9에서는 sinH 조건에서 본래의 Hysteresis loop와 각 고조파별 sinB 조건에서의 Hysteresis loop를 나타내었다. 그림에서 보면 1고조파의 Hysteresis loop가 가장 크고 본래의 Hysteresis loop가 두 번째로 큰 것을 볼 수 있는데 이로 인해 실제적인 철손 보다 1고조파의 철손이 오히려 커짐 확인할 수 있다.

측정된 결과를 보면 기존에 사용하던 연산 방법은 상당한 오차를 보인다. 따라서 정확한 철손의 계산을 위해서는 FFT에 의한 연산보다는 Power spectrum을 이용하여 연산하는 등의 새로운 손실 예측방법이 필요할 것이다.

### 3.3 실험결과 및 토의

전기강의 자기 특성을 측정함에 있어서 정현파의 교류 전압을 인가할 때 앞서 논의된 성질에 의해 인가되는 자계는 왜곡되게 되며 이때 측정되는 자속밀도 역시 왜곡된 파형을 나타내게 된다. 이렇게 왜곡된 값은 자계세기 및 자속밀도 모두 신뢰할 수 없는 것이며 정확한 특성측정을 위하여 자속밀도 또는 인가자계를 선형으로 유지하고 이때에 측정값을 기준으로 Hysteresis loops 및 B-H curve를 그리게 된다.

국제 표준은 자속밀도를 선형으로 유지하여 자계세기를 측정하는 것으로 되어있으나 이는 측정되는 자속밀도

를 기준으로 귀환 제어하여 여자 전압을 왜곡시켜야 하기 때문에 측정이 어렵고 소요되는 시간 역시도 길다. 그러나 자계세기는 여자전류에 선형 비례하는 특성을 가지므로 전원증폭기에서 전류 제어모드를 이용하면 간단하게 선형으로 유도할 수 있다.

측정된 결과를 토대로 살펴볼 때, B-H curve만을 얻기 위해서는 정현파 여자전류 조건으로 측정하는 것만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 정확한 철손의 측정을 위해서는 정현파 자속밀도 조건으로의 측정이 필요하며, 이를 바탕으로 정확한 철손을 예측하는 방법 또한 연구 되어야 할 것이다.

## 4. 결 론

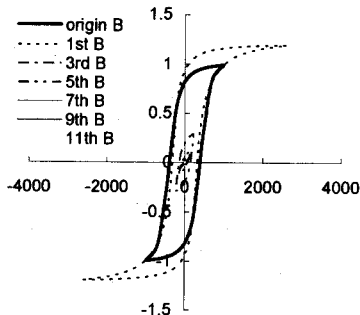
본 논문에서는 전기기기에 널리 이용되는 전기강의 특성을 측정하기 위하여 Ring-type bulk steel의 측정시스템을 개발하여 자기특성과 철손을 비교하였다. 본 논문에서 개발된 측정 시스템은 LabVIEW를 기반으로 하여 PC를 통해 제어되기 때문에 다음과 같은 장점을 갖는다.

- (1) 측정에 관여하는 모든 값들은 PC를 통해 제어되므로 자동화된 측정시스템의 구현이 가능하다.
- (2) 측정치에 대한 모든 Data는 File형태로 저장되므로 Matlab과 같은 다른 프로그램 환경에서의 Data 처리 및 분석이 가능하다.
- (3) 정현파뿐만 아니라 임의에 자속밀도조건에 대해서도 측정이 가능하다.

또한, 시료의 규격이 비교적 자유로우므로 개발된 측정 시스템은 Epstein frame이나 Single sheet tester에 비해 그 활용도가 매우 높을 것으로 예상된다. 그러나 Ring-type Bulk Steel의 측정법은 Epstein frame과 그 측정원리가 동일하여 1차원의 자계특성 측정만이 가능한 단점이 있다. 따라서 보다 정밀한 측정을 위해 2차원 Single sheet tester를 이용한 측정이 필요하며 이때에 두 방법에 의해 측정된 값 사이의 차이점을 분석하고 이를 기기의 설계 및 개발에 활용할 수 있는 모델링 기법을 연구할 수 있을 것이다.

## 〔참 고 문 헌〕

- [1] H. E. Jordan, Energy-efficient electric motors and their application. Plenum Press, 1994
- [2] A. Ikariga, M. Enokizono, H. Shimoji and K. shuto, "Core material design of rotating machines with a new topology," ICEMS2004, Oct. 31 Nov. 3, 2004, OB-1
- [3] K. Fujiwara, T. Adachi, and N. Takahashi, "A proposal of finite-element analysis considering two-dimensional magnetic properties," IEEE Trans. on Magn., vol. 38, no. 2, pp. 889-892, Mar. 2002
- [4] K. Matsubara, N. Takahashi, K. Fujiwara and T. Nakata, "Acceleration technique of waveform control for single sheet tester," IEEE Trans. on Magn., vol. 31, no. 6, pp. 3400-3402, Nov. 1995
- [5] P. Beckley, Electrical Steels for rotating machine. IEE Power and Energy Series 37, May 6, 2002



〈그림 10. 기본파와 고조파의 Hysteresis loops〉