

반도체 제조장비용 무접점 Inductive Coupler의 성능개선을 위한 연구

김현우\*, 반상호\*, 권호\*, 박재범\*, 이주\*, 이철직\*\*, 김석태\*\*\*, 김준호\*\*\*  
 \* : 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 \*\* : 대림대학 \*\*\* : 기술 표준원

A Study on the Performance improvement of Contactless Inductive Coupler for the Stocker System

Hyun-Woo Kim\*, Sang-Ho Ban\*, Ho Kwon\*, Jae-Bum Park\*, Ju Lee\*,  
 Chul-Jik Lee\*\*, Suk-Tae Kim\*\*\*, and Jun-Ho Kim\*\*\*

\* : Dept. of Electrical Engineering at Hanyang Univ.  
 \*\* : Daelim Univ. \*\*\* : Korean Agency for Technology and Standards(KATS)

**Abstract** - The existing contactless inductive coupler has many problems because of its large volume and high level of exciting current, so a new contactless inductive coupler is being required under the circumstances and the load requirement. For a contactless inductive coupler in the manufacturing equipment of semiconductor, the coupler's efficiency is low because of its small magnetic inductance and large leakage inductance. Moreover, the high frequency switching to increase energy density per unit volume increases the iron loss and the eddy current loss, so it must be considered deeply when selecting core materials. Therefore, this paper presents core materials and shape to improve the performance of the contactless inductive coupler according to the coil positions.

1. 서 론

기존의 전원공급장치용 Inductive Coupler는 에너지 변환시스템의 일부로서 단순히 전기에너지를 변환장치로 사용되어져 왔다. 그러나 최근 사용 환경이나 부하특성에 따라 추가적인 기능이 요구되고 있는 실정이다[1]. 예를 들어 습한 환경에 노출되어 있거나 부하단의 이동이 있는 기기 등에서 유선으로 전원 공급시 단선 및 면적 증가로 인한 품질사고 및 생산성의 저하를 초래하기 때문에 이에 대한 대책으로 무접점 전원공급 장치의 개발이 요구되고 있는 실정이다[2]. 특히 반도체 제조업체에서 무접점 전원공급장치 채용시 작업공간의 효율성 증가와 기기의 진동 소음의 감소로 인한 수요의 증가와 품질의 향상이 기대된다. 이러한 장점은 반도체 제조업체에 큰 관심을 불러일으키고 있으며 많은 연구가 진행되고 있는 추세이나 상용화는 미약한 실정에 있다.

무접점 전원공급 장치의 성능개선에 있어 가장 중요한 요인은 효율과 안정성이다. 그런데 무접점 Inductive Coupler는 공극에서의 누설과 고주파 스위칭에 의한 열 발생의 해결이 큰 문제로 대두되고 있어 이에 대한 해결 방법이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 Line Wafer Trans용 Stocker System에서의 전원공급장치용 Inductive Coupler 개발에 있어 성능 향상을 위한 코어의 재질과 형상, 코일의 위치에 따른 특성을 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 설계조건 및 고려사항

표 1은 무접점 전원 공급장치의 Inductive Coupler 해석에 사용한 제원이다. 무접점 Inductive Coupler의 특성상 효율증대를 위해 전원 주파수는 30[kHz]로, 상당한 고주파 스위칭이 요구된다[2]. 만약 무접점

Inductive Coupler의 코어 재질로서 규소강판을 사용한다면 고주파 전원에 의한 전력 손실이 열 발생으로 나타나기 때문에 전기 기기의 효율과 절연에 영향을 줄 수 있다[2]. 따라서 고주파 스위칭과 와전류의 영향을 줄일 수 있는 코어 재료로서 페라이트를 사용하도록 한다.

표 1. 무접점전원 공급장치용 inductive coupler 제원

구 분		제 원
1 차측	1차측 전압	AC 300V(Peak)
	1차측 전류	AC 140A(Peak)
1차측 코일 Flat Cable	권선저항	1.8[Ω]
	코일직경	1.5[mm]
	권선수	병렬 12가닥, 2(turns)
2차측 코일 Conducting Bar	권선저항	1.8[Ω]
	코일면적	30[mm <sup>2</sup> ]
	권선수	2(turns)
코 어	재질	페라이트
스위칭주파수		30 [KHz]
출 력		21[KW]급
변환효율		90%이상

표 2. 여러 가지 해석모델

Model Name		공극길이	적층길이
Model 1.	Model 1-1	20 mm	400 mm
	Model 1-2	20 mm	500 mm
	Model 1-3	20 mm	650 mm
Model 2.	Model 2-1	25 mm	400 mm
	Model 2-2	25 mm	500 mm
	Model 2-3	25 mm	650 mm

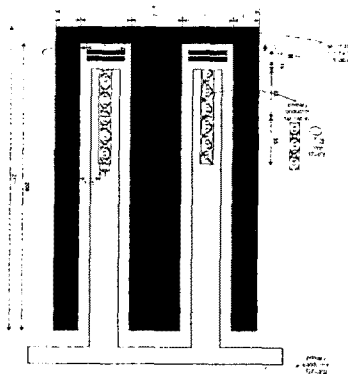


그림 1. 단면도

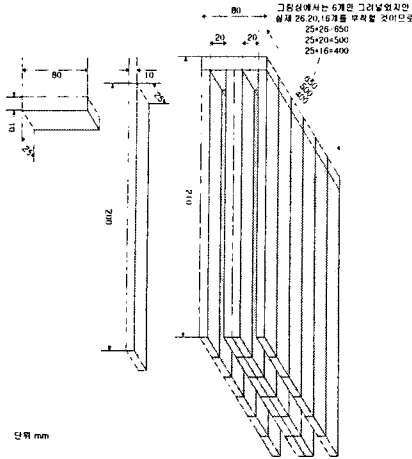


그림 2. 적층길이 변화

표 2와 같이 공극 길이에 따라 2개의 모델로 나누고, 각 모델에서 적층 길이에 따라 다시 3개의 모델로 다시 분류하여 해석하였다. 그림 1과 그림 2는 이러한 해석 모델들 중 공극 길이 변화에 의한 경우와 적층 길이 변화에 의한 경우의 모델들이다. 누설 인덕턴스를 감소시키기 위한 코어형상으로 잘 알려진 Coaxial Winding Type의 형상을 선택했으며 부하의 원활한 이동을 고려하여 큰 공극을 두었다.

## 2.2 해석방법

본 논문은 Line Wafer Trans용 Stocker System에서의 전원공급장치용 Inductive Coupler의 자화 인덕턴스를 분석하기 위해 먼저 설계모델은 요구조건을 만족하도록 형상의 다변화와 재료의 다변화 기타 설계변수의 다변화를 통해 설계형상 최적화 모델을 선정하고 최적화모델을 기본으로 개선된 다수의 모델을 대상으로 정사계 유한 요소 해석을 실시하였다.

### 2.2.1 이방성 재질을 고려한 지배방정식 정식화

2차원 유한요소법을 이용한 해석을 위해 자기벡터 포텐셜과 전류밀도가 Z축 성분만 존재하고, 모든 물리적이 양이 Z축에 대하여 일정하다고 가정하고, 히스테리시스 손실과 코어 내부의 eddy current는 무시하기로 한다.

Inductive Coupler코어에 있어서 위치에 따른 자속분포의 불균일성을 고려하기 위해서는 수치해석 기법인 유한요소법에 의한 해석이 필요하지만, 이방성 재질처럼 인위적으로 위치에 따라 투자율을 가변할 경우 유한요소법을 통해 해석하기 위해서는 투자율의 등가 이방화가 필요하다. 따라서 페라이트의 등가 이방화 모델링을 통하여 이방성재질을 고려한 지배방정식을 유도하였다[3][4].

【기본 방정식】

$$\nabla \times H = J, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

$$B = \mu H \quad (4)$$

H : 자계의 세기 [A/m]

J : 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]

B : 자속밀도 [Wb/m<sup>2</sup>]

A : 자기벡터 포텐셜

$\mu$  : 재료의 투자율

위의 Maxwell 방정식으로부터 지배방정식을 유도하면 식 (5)와 같다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_0 \quad (5)$$

자기 벡터포텐셜 A와 여자전류밀도  $J_0$ 는 z축 성분만이 존재한다고 보고 재료의 투자율  $\mu$ 를 이방성으로 고려하여 페라이트 코어를 2차원 해석할 경우 지배방정식은 식 (6)와 같이 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_0 = 0 \quad (6)$$

한편, 권선을 쇄교하는 자속량  $\phi$ 는  $\phi = N\psi$ 의 관계를 가지고 있으며, 1 turn의 쇄교 자속량  $\psi$ 를 자기벡터 포텐셜로 나타내기 위하여 아래의 식을 사용한다.

$$\psi = \int_S B \cdot ds = \oint_l A \cdot dl \quad (7)$$

해석모델의 적층폭이 D이고 전류가 흐르는 권선의 면적을 S, 한 상당 Turn수가 N일 때, 한 상의 권선에 쇄교하는 자속량은 아래의 식 (8)에서처럼 각각의 요소의 자기벡터 포텐셜로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi &= \pm \frac{N}{S} \int_S \psi_e ds \\ &= \pm \frac{N}{S} \int_S D \left( \sum_{i=1}^3 A_{ie} \right) ds \\ &= \pm D \frac{N}{S} \sum_{e=1}^m \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{3} A_{ie} \\ \therefore \phi &= \frac{N \times D}{3S} \times \int (A_+ - A_-) ds \quad (8) \end{aligned}$$

여기서,  $A_e$ 는 권선면적 S내의 각 요소면적이고,  $w_m$ 은 요소수이다.

### 2.2.2 등방성 재질과 이방성 재질을 고려한 해석

이방성 재질은 자화 용이 방향이 결정되어 있으며, 그 방향으로 자속을 발생시켜 자속 밀도를 높일 수 있다. 따라서 자화 방향으로의 고투자율, 코어 내 누설자속의 감소 등의 특성을 갖게 되어 고효율, 고품성의 장비에 많이 이용되고 있다[3].

그림 3과 그림 4는 Model 1-1을 표본으로 하여 등방성 재질과 이방성 재질의 등포텐셜 분포를 나타내었다. 여기서 이방성 재질의 Coupler 하단을 보면 등방성 재질에 비해 포텐셜 간격이 넓게 퍼져있는 것을 볼 수 있는데 이는 이방성 재질의 자기 저항이 등방성 재질보다 큼을 의미한다. 왜냐하면 등방성 재질의 경우 코어 하단 이외 중단부에서 많은 자속의 이동이 있으나 이방성 재질은 그 특성상 코어 중단에서 자속의 이동이 어려워 자속이 주로 Coupler 하단부분의 공극으로 이동된다. 그러므로 상대적으로 큰 자기저항을 갖게되어 인덕턴스를 감소시키는 요인으로 작용한다.

표 4는 등방성 재질과 이방성 재질의 평균 쇄교자속량과 1차측 자기 인덕턴스를 보여주고 있다. 등방성 재질의 쇄교자속이나 인덕턴스가 이방성 재질의 경우보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이방성 재질에 비해 등방성 재질의 인덕턴스는 약 24.9% 크게 나타났다.

표 4. 등방성 재질과 이방성 재질 비교

	평균쇄교 자속량 ( $\mu Wb$ )	1차측 자기 인덕턴스 ( $\mu H$ )
등방성 재질	2461.043500	24.85903
이방성 재질	1970.966501	19.90875

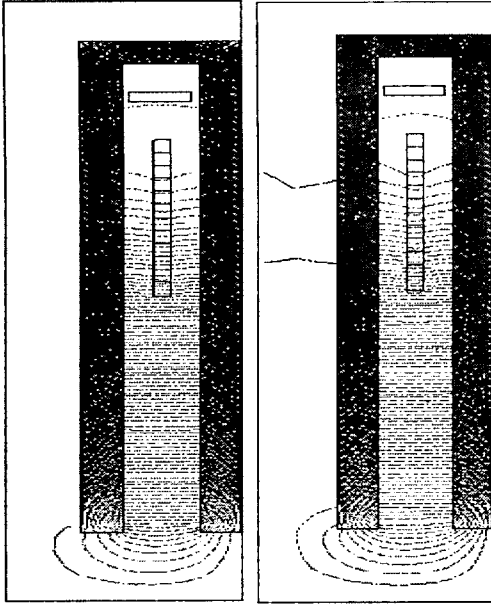


그림 3. 등방성 재질의 자속선도

그림 4. 이방성 재질의 자속선도

고성능의 무접점전원 공급장치용 Inductive Coupler의 개발을 위해 더욱 개선된 특성을 얻고자 이방성 재질에 대해 해석해 보았으나 등방성 재질에 비해 개선된 특성은 없고 오히려 성능의 저하 특성을 보였다. 이러한 이유는 부하단의 이동을 고려시 큰 공극이 필요한데 이 공극에 의한 영향 때문이다. 따라서 앞으로 해석 및 설계 모델에 대한 재질은 등방성 재질로 제한한다.

### 2.3 형상에 따른 해석결과

그림 5는 다른 공극을 가진 Model 1과 Model 2의 적층 길이별 자기 인덕턴스 값의 추이를 보여주고 있으며 적층 길이의 증가에 따라 선형적인 증가추세를 보이고 있다. 또한 비선형 해석도 선형해석과 비슷한 증가추이를 보이는데, 공극에서의 자기저항이 크기 때문에 자속의 포화에 따른 비선형 특성은 나타나지 않는다. 따라서 적층 길이의 변화에 있어 비선형 해석 또한 선형적인 증가추세를 보이게 된다.

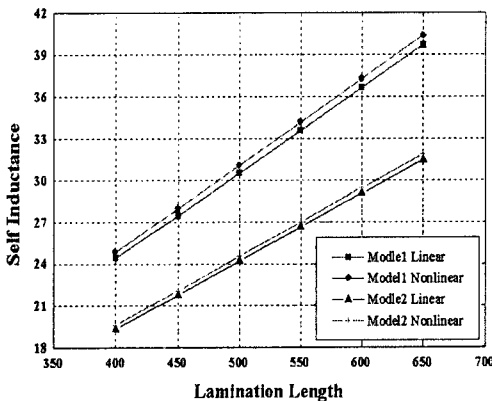


그림 5. Model 1과 Model 2의 적층 길이변화에 따른 자화 인덕턴스 비교

특히 Model 1-3 (공극: 20 mm, 적층길이: 650 mm)의 경우 가장 큰 자기(자화) 인덕턴스 값 (40.3952 μH)을 보여주고 있다.

Model 2의 적층 길이별 자기(자화)인덕턴스 추이를 보면 Model 1에 비해 작은 자기(자화) 인덕턴스 값을 갖는다. 그 이유는 공극이 Model 1보다 5 mm정도 크기 때문에 공극에서의 자기저항이 증가하기 때문이다. 따라서 자기저항의 역수로 표현되는 인덕턴스는 작아지게 된다. 적층길이를 증가시키거나 공극을 감소시키는 방법을 통해 요구 자화(자기) 인덕턴스를 만족하는 모델의 선정이 가능하다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 Line Wafer Trans용 Stocker System에서의 전원공급장치용 Inductive Coupler 개발에 있어 성능 향상을 위한 코어의 재질과 형상 코일의 위치에 따른 특성을 알아보았다. 고주파 전원시스템에 의한 철손의 영향을 줄이기 위해 코어재질을 페라이트로 선정해 주었고 등방성 재질과 이방성 재질을 모두 고려하였으나 이방성 재질이 등방성 재질에 비해 개선된 특성은 없고 오히려 성능의 저하 특성을 보여 등방성 재질을 사용하였다. 공극 길이별, 적층 길이별 총 6개의 모델을 선정하여 자화인덕턴스의 변화를 계산시 해석모델에 있어서 코어 내에서의 1차측 코일의 누설인덕턴스가 1차측 자화 인덕턴스 보다 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 즉, 1차측 코일의 총 자화인덕턴스는 1차측 자기인덕턴스 값으로 볼 수 있다. 이러한 방법을 통해 6개 모델의 1차측 자기인덕턴스를 유한요소 해석을 통해 비교분석 하였다. 따라서 설계 변경시 쉽게 요구 자화(자기)인덕턴스의 값에 적합한 설계가 가능할 것으로 예상되며, 코어가 둘러싼 코일의 자기(자화)인덕턴스 값만을 구하였기 때문에 코어 외의 누설 인덕턴스 값을 고려한다면 1차측 자기 인덕턴스는 크게 증가할 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호: M1-0011-0021) 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 서동현 "Transformer Design of Noncontact Battery Charging System" 서울대학교 공학석사 논문집, 1999.
- [2] K.W.Klontz, D.W. Novotny, D.M. Divan, R.D. Lorenz "Contactless Power Delivery System for Mining Applications" IEEE Transactions Industry Application Vol.31, No.1, pp.27-34, January/february, 1995.
- [3] 권병일, 김성영, "유한요소법에 의한 권철심 변압기의 철손해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.21-23, 1995.
- [4] 임달호, "유한요소법", 동명사, 1995.