

# 비정질 코아 변압기의 설계 및 해석 기술

신 판 석

(홍익대학교 과학기술대학 전기공학과 조교수)

## 1. 개 요

비정질(Amorphous) 코아를 이용한 변압기는 종전의 규소강판 코아에 비하여 철손과 와류손이 30 % 정도 밖에 안되는 우수한 특성을 가지고 있으므로 규소강판 변압기의 대체 재질로서 많은 실용화 연구를 하고 있다. 비정질 재료의 전력용 변압기 코아에의 적용연구는 1980년대 초반부터 미국 일본을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 2 MVA 급이하의 배전용 주상 변압기는 실용화되어 미국의 경우 비정질 변압기가 신규시장의 5%(1992년 기준)를 점유하고 있으며 에너지절약정책, UR이나 Green Round 등의 영향으로 그 비율이 점차 확대될 것으로 기대되고 있다[1,2].

그러나, 비정질재료 ribbon의 두께가 25  $\mu\text{m}$  정도로 얇고 경도가 높아 가공이 어려우며 자기이방성을 형성하기 위하여 자장중 열처리를 하여야 하는 코아제작 공정상의 어려움이 있다. 또한 포화자속밀도가 1.6 Tesla 정도로 규소강판에 비해 상대적으로 낮아 10 ~ 20 % 정도의 철심이 더 소요되고 거기에 따라서 변압기 크기도 기존것보다 다소 커지며 경제적인 면에 있어서도 현재 상태로는 수요가 크지않아 생산규모가 적어서 비정질 ribbon의 가격이 규소강판에 비해 약 2배 정도 비싸다는 단점도 있다. 그러나 에너지절감면에서 손실 평가제도를 도입할 경우 변압기 수명 동안의 에너지절감액이 비정질 변압기를 채용함으로써 인한 초기투자비용을 상회한다는 판단하에 비정질 코아를 채택하는 전력회사가 증가하고 있다. 비정질 변압기 가격에서 큰 비중을 차지하고 있는 비정질 ribbon 가격도 수요확대에 따라 대량생산 체제로 전환될 것으로 기대되며 ribbon 제조공정의 단순성으로 비추어 볼 때 향후 단기간내에 규소강판 가격에 근접할 것으로 예상된다.

이와같은 추세로 볼때 국내에서도 멀지 않은 장래에 비정질 코아 변압기의 적용이 불가피할 것으로 예상되어

한국전력기술 연구원을 중심으로, 한국전기연구소, 중전기기 제조업체, 학계 등에서 연구를 진행하고 있으며, 특히 비정질 코아의 최적설계 및 해석기술, winding, cutting 등의 가공기술, 자기특성향상을 위한 toroidal 방식의 적용연구 등을 수행하고 있으며 보다 경제적이고 상품성있는 비정질 코아 변압기를 제작하기 위하여 노력하고 있다.

## 2. 비정질 코아 변압기의 Core-coil 형태

비정질변압기는 일반 변압기와 마찬가지로 적철심형과 권철심형으로 나눌 수 있겠으며, 주로 권철심형이 많이 사용되고 있으나 Core-coil의 형상에 따라 여러가지 형태가 존재한다. 그림 1 과 같이 Core-coil의 형태가 원형과 사각형의 조합으로 용량과 제작방법 등에 따라 다르며 최적의 형상을 찾는 것도 연구의 한 분야를 이루고 있다. 현재 비정질 변압기의 권철심 코아에 대한 연구는 주로 미국(G.E., Westing House, A.B.B 등)과 일본에서 수행되고 있으며, 코아 제작 상 가장 고려해야 할 점은 절단부위에 따른 손실과 경제적인 면이다. 코아 ribbon의 접속방법은 그림 2에서와 같이 리본 한 장의 개념을 도입하여 적층법을 도식화 한 것이며 step의 마지막장은 다음 step의 첫번째 리본까지만 연장하고 group의 마지막장은 다음 group의 첫번째 리본까지만 연결시킨 예를 보여주고 있다.

적층법은 step-lap 방법과 step-but 방식이 있는데, 미국에서의 joint 방식은 주로 butt-lap-step joint 방식을 사용하고 있다. 이것은 종래의 방법에 비해 손실과 가공 측면에서 유리하며, 특히 ribbon을 감은 후 절단하여 다시 코아 형태를 만들때 간편하다는 장점을 갖고있다. Butt-lap-step joint를 제작하는 방법에는 대체로 2 가지가 있으며, winding--one-cut--core 재구성법과 winding--다윈주상cut--재조합하는 방법이 있다. One-cut 방식의 장

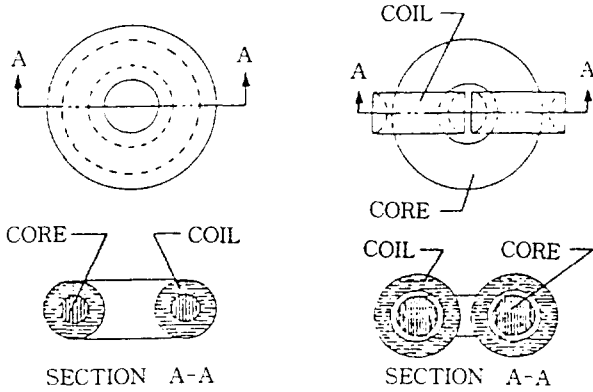


그림 1 비정질 코어 변압기의 Core-coil 형태의 일반적인 조합

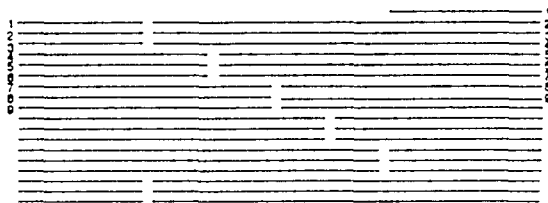


그림 2 리본한장의 개념을 도입한 적층 model

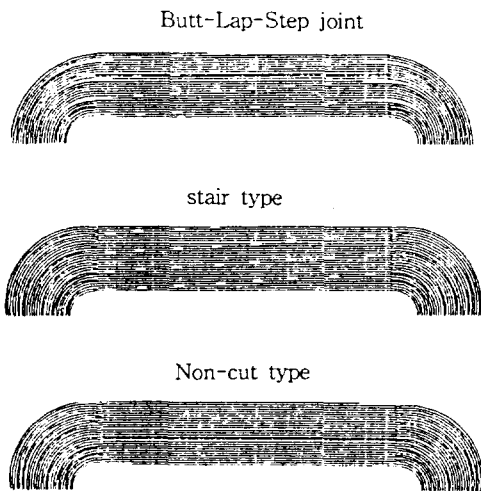
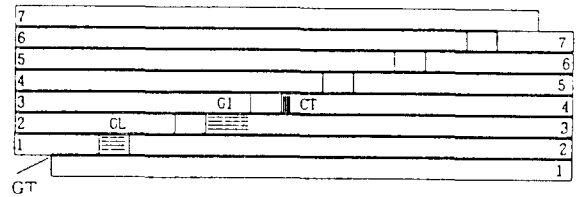


그림 3 비정질 코어 Joint의 여러가지 방법

점은 자로의 연속성을 유지할 수 있으며(손실감소) 작업성이 양호한 점이다. 반면에 제조립 시에 정확히 설계에 맞추는데 시간이 소요되고 복잡해지며 공극의 크기가 증가하므로 점적음이 감소하여 조립(build-up)코어가 커지는 단점이 있다. 여러원주에서 cutting 후 재조립하는 방식은 겹치는 부위의 길이가 감소함으로써 조립(build-up)의 커짐과 점적음의 감소를 최소화하는 장점이 있으나



GI : gap사이의 간격(gap interval)  
 GL : gap의 길이 (gap length)  
 CT : 적층 두께(core thickness)  
 GT : 적층간의 air gap 두께(gap thickness)

그림 4 Joint 부분의 simulation model

작업시간이 더 길어지는 단점도 있다. 현재 국내의 연구는 one-cut 방식을 채택하여 joint부위의 겹침에 의하여 build-up 이 일어나므로 ribbon의 손실과 점적음의 감소가 발생된다. 따라서 build-up을 최소화하면서 자기손실을 낮추기 위하여 ribbon/group 수와 group/ribbon 수에 따른 코어의 자기특성을 해석하고 실험하여 코어형상을 최적화하는 연구를 진행하고 있다.

### 3. 유한요소법을 이용한 비정질 코어의 자계해석

비정질(Amorphous) core를 이용한 배전용 변압기를 초적설계하기 위하여 여러가지 해석 기법들이 연구되고 있으며, 최적화기법과 유한요소법을 조합한 Algorithm들도 개발되고 있다.

비정질 Core의 재료는 리본의 형태(폭: 약 10cm, 두께 평균 23  $\mu\text{m}$ )로서 소재의 절단기술, 적층기술및 열처리 등의 제작기술에 대한 연구와, 적층방법에 따라 Core내부의 자속밀도분포, Eddy current, Coil의 누설 Inductance 등이 영향을 많이 받으므로, 시제품 제작의 전단계에서 기본설계 및 사양에서 주어진 조건을 이용하여 변압기 특성의 검증, 최적형상의 설계, 최적전조건 등을 도출해야하며, 이를 위하여 여러가지 형태의 적층법에 따라 Core내부의 자기적 특성을 수치해석 방법을 이용하여 해석하는 것이 필요하다.

코어의 형상에 대한 언급을 보면 거의 대부분이 Allid Signal사의 특허권으로 묶여져 있고 이외 General Electric사, Asea Brown Boveri사, Daihen Corporation사 ABB Power T&D사, Electric Power Research Institute Westinghouse Electric, Isolcell Europa S.r.l 등이며 거의 대부분의 적층부의 특허권을 미국이 소유하고 있으며 그중 80-90 % 정도는 G.E사에서 소유하고 있다. Step group에서의 리본 수와 step수의 의미는 마디 부분(꺾여진 부위)마다 리본 수와 step들이 이동하여 처음 위치로 되돌아올 때까지의 수를 group의 step수로 정의한다. 본 형상에 관한 특허는 많이 존재하지만 실질적인 내용은 GE사의 Albert C.Lee 등에 의해서 발표된 US Patent 4814736에 상세히 설명하고 있으며 먼저 되감는

작업을 하여 요구하는 크기만큼으로 측정하고 자르는 작업, 층간의 gap문제에 따른 위치 이동, 잘려진 부위의 위치 이동 등을 행하면서 적절한 용량을 점검한다.

비정질 변압기의 코아 형상을 보면 10-50장 정도의 리본을 한 묶음으로 하여 하나의 step을 형성하고 5-15 정도의 step들이 하나의 group을 형성하며 이러한 group들이 모여 하나의 변압기 코아가 얻어진다. 본 절에서는 비정질 코아의 적층법으로 가장 보편화되어 있는 방법인 Butt-lap-step joint 형태(그림 3 참조)에 대한 코아의 자계 해석방법에 대하여 기술한 것이며, 이 적층법은 작은 자화 전류, 저손실 및 저소음 등의 장점을 갖고 있다.

### 3.1 유한요소법에 의한 해석

비정질코아 변압기의 자계해석방법으로 유한요소법을 많이 이용하고 있다. 유한요소법의 정식화과정 등의 수치적 기술은 보편화 되어있으므로 본 소고에서는 생략하기로 한다. 그림 4는 비정질 변압기 코아 적층법의 주요단면을 표시하고 있으며, 가는 선은 하나의 group을 나타낸다. 이것은 5 - 25겹의 23 μm 두께 비정질 리본으로 적층한 것이고, 4 개의 step-lap joint group와 2 set의 butt-lap joint로 구성되어 있다. 유한요소 simulation을 하기위하여 joint부분을 간략화하였고, 중첩길이(GI), 공극길이(GL), Group 두께(CT)를 표시하고 있다. 각 group은 비정질 core와 공극이 반복되고, but joint는 중간에 1-2 mm의 공극이 반복되는 특수한 구조를 가지고 있으므로 기존의 방법으로 해석 하기에는 많은 절점이 필요하며, 계산시간도 많이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 기법에 대한 연구들도 진행되고 있으며 대표적인 접근방법의 하나로 복합구성된 재료의 등가물성치를 산출하고, 이 균질화된 물성치를 이용하여 단순화된 경계치 문제의 해를 해석적 또는 수치적 방법을 통하여 구하는 방식을 들 수가 있다 [3-6]. 균질화 기법을 이용하는 해석 방법에 대해서는 다음 절에서 간단히 설명하도록 한다.

그림 5는 ribbon사이의 공극이 존재하고 step의 간격, overlap의 길이 등이 자속의 흐름에 어떻게 영향을 주는가를 관찰하기 위해서 simulation 하기 위한 model중 하나의 해석결과에 대한 자속선도를 보여 주는 것이다. Step간의 공극이 자속의 흐름에 크게 방해하고 있으며 overlap되는 ribbon에 자속이 집중되고 있음을 알 수 있다.

유한요소법을 이용한 전자계 해석 프로그램이 발달할수록 생산성 향상을 위한 설계 비용의 절감, 설계 시간 단축 등 경제적, 시간적 효과를 얻을 수 있다. 설계자에게 모델을 향상시킬 수 있는 물리적 실험과 반응을 예측해 주는 것은 물론 재료 변화에 대한 영향, 실행 전류와 변형된 형상 그리고 변수들의 상관관계를 해석할 수 있다. 1960년대 중반까지 유효한 결과를 얻지 못하던 설계 문제에서도 FEM이용 기술의 진보, 최적화기법의 도입, 컴퓨터의 고속화 및 대형화가 이루어져 현재는 실생활에 쓰이고 있는 가전제품, 산업용 및 군사용 장비에 이르기

까지 전자기를 응용한 장치의 설계 및 해석에 중요한 역할을 담당하고 있다. 현재 국내에서 소개되고 있는 전자계 해석 package를 보면 FLUX2D/3D, EMAS, MAXWELL 2D/3D, SYSMAGNA, Vector Field, Inpolitica 등이 있으며, 본 소고에서는 FLUX2D를 이용하여 비정질 코아의 여러가지 model을 해석한 것이다[7].

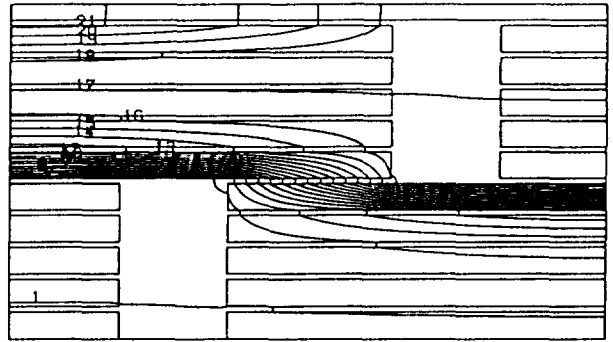


그림 5 비정질 코아 Ribbon과 공극주변의 자속선 흐름

### 3.2 균질화 기법을 이용한 비정질 코아 자계해석

비정질 코아 변압기는 적층의 pattern이 반복적이며 joint부분에 대한 전자계해석이 microscopic하게 이루어져야하므로 균질화 기법을 적용하기에 좋은 조건을 갖추고 있다. 자계분포에 대한 지배방정식과 그에 대한 유한요소 weak form은

$$\nabla \cdot (\nu \nabla A) = -J \tag{1}$$

$$\int_{\Omega} (\nabla \bar{A})^T \nu \nabla A \, d\Omega = \int_{\Omega} \bar{A} J \, d\Omega \tag{2}$$

으로 쓸 수 있는데, vector potential A와 weighting function A는 충분히 작은 양의 실수 ε를 이용하여 macroscale의 A<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>와 microscale의 A<sub>1</sub>, A<sub>1</sub>로서 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$A = A_0(\underline{x}) + \epsilon A_1(\underline{x}, \underline{y}) \tag{3}$$

$$\bar{A} = \bar{A}_0(\underline{x}) + \epsilon \bar{A}_1(\underline{x}, \underline{y}) \tag{4}$$

위에서  $\underline{y} = \frac{\underline{x}}{\epsilon}$  미세구조에서의 좌표계를 뜻하고 있으며 A와 A의 구별은 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla A = \nabla_x A_0 + \epsilon \nabla_x A_1 + \nabla_y A_1 \tag{5}$$

$$\nabla \bar{A} = \nabla_x \bar{A}_0 + \epsilon \nabla_x \bar{A}_1 + \nabla_y \bar{A}_1 \tag{6}$$

식(4)-(6)을 식(2)에 대입하면 ε에 관한 항과 ε<sup>2</sup>에 관한 항, ε에 무관한 항들의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_0} + \nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_1})^T \nu (\nabla_{\mathbf{x}} A_0 + \nabla_{\mathbf{x}} A_1) d\Omega \\ & + \varepsilon \int_{\Omega} ((\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_0})^T \nu \nabla_{\mathbf{x}} A_1 + (\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_1})^T \nu \nabla_{\mathbf{x}} A_0) d\Omega \\ & + \varepsilon^2 \int_{\Omega} (\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_1})^T \nu \nabla_{\mathbf{x}} A_1 d\Omega = \int_{\Omega} (\overline{A_0} + \varepsilon \overline{A_1}) J d\Omega \quad (7) \end{aligned}$$

식(7)에서  $\varepsilon$ 을 0에 접근시키면  $\varepsilon$ 에 관한 항들과  $\varepsilon^2$ 에 관한 항들은 없어지고  $\varepsilon$ 에 무관한 항들만 남게된다. 또한, weighting function  $A = A_0 + \varepsilon A_1$ 은 임의적이므로  $A_0$ 와  $A_1$ 도 임의적이게 되어 macroscale과 microscale에 관한 두개의 식으로 분리되며 서로 독립적이 아니고,  $(\nabla_{\mathbf{x}} A_0 + \nabla_{\mathbf{x}} A_1)$ 을 통하여 결합되어 있음을 알 수 있다. 반복되는 작은 단위구조체로 이루어진 일반적인 Y-주기함수  $\Phi(\mathbf{y}) = \Phi(\mathbf{y} + \mathbf{Y})$ 에 대한 적분은 아래와 같이 미세구조에서의 평균화된 크기로 나타낼 수 있는 점을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{\Omega} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} [(\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_0})^T \nu (\nabla_{\mathbf{x}} A_0 + \nabla_{\mathbf{x}} A_1) - \overline{A_0} J] d\mathbf{Y} d\Omega = 0 \quad (8)$$

$$\int_{\Omega} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} (\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_1})^T \nu (\nabla_{\mathbf{x}} A_0 + \nabla_{\mathbf{x}} A_1) d\mathbf{Y} d\Omega = 0 \quad (9)$$

식(9)에서  $A_0(\mathbf{x})$ 와  $A_1(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 의 선형적 특성을 고려하여  $A_1(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 를 변수분리형으로 나타내면

$$A_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = -x_i(\mathbf{y}) \frac{\partial A_0(\mathbf{x})}{\partial x_i} \quad (10)$$

이 되고, 이것을 다시 식(9)에 대입하면

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \frac{\partial \overline{A_1}}{\partial y_i} \nu_{ij} \left( \frac{\partial A_0}{\partial x_j} + \frac{\partial A_1}{\partial y_j} \right) d\mathbf{Y} d\Omega \\ & = \int_{\Omega} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \left( \frac{\partial \overline{A_1}}{\partial y_i} \nu_{ij} - \frac{\partial \overline{A_1}}{\partial y_i} \nu_{ik} \frac{\partial x_j}{\partial y_k} \right) d\mathbf{Y} \\ & \frac{\partial A_0}{\partial x_j} d\Omega = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

을 얻는다. 다음의 식(12)은 위식을 만족시키는 충분조건이므로 그로부터 microscale 변수  $\mathbf{x}$ 를 산출한다.

$$\int_{\mathbf{Y}} \frac{\partial \overline{A_1}}{\partial y_i} \nu_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{Y} = \int_{\mathbf{Y}} \frac{\partial \overline{A_1}}{\partial y_i} \nu_{ik}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \frac{\partial x_j}{\partial y_k} d\mathbf{Y} \quad (12)$$

일단  $x_i$ 가 결정되어 microscale과 macroscale이 공존하는

원래의 weakform(2)은 macroscale만의 weakform(13)을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \overline{A_0}}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} (\nu_{ij} - \nu_{ik} \frac{\partial x_j}{\partial y_k}) d\mathbf{Y} \frac{\partial A_0}{\partial x_j} \right] d\Omega \\ & = \int_{\Omega} \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \overline{A_0} J d\mathbf{Y} d\Omega \quad (13) \end{aligned}$$

식(13)은 균질화된 reluctivity  $\nu^H$  (14)와 전류밀도  $\mathbf{J}^H$ (16)을 사용하여 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega} ((\nabla_{\mathbf{x}} \overline{A_0})^T \nu^H \nabla_{\mathbf{x}} A_0) d\Omega = \int_{\Omega} A_0 J^H d\Omega \quad (14)$$

$$(\nu^H)_{ij} = \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} (\nu_{ij} - \nu_{ik} \frac{\partial x_j}{\partial y_k}) d\mathbf{Y} \quad (15)$$

$$\mathbf{J}^H = \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \mathbf{J} d\mathbf{Y} \quad (16)$$

또한, vector potential  $A$ 에 대한  $i$ 방향 구배는 식(5)와 식(10)로부터 다음처럼 구할 수 있다.

$$A_{,i} = \frac{\partial A_0}{\partial x_i} - \frac{\partial x_i}{\partial y_i} \frac{\partial A_0}{\partial x_i} \quad (17)$$

자속밀도  $B$ 는 식(17)의 결과를 이용하여 계산할 수 있다. 그림 6은 비정질 코어의 균질화 simulation model의 일 예를 보여주고 있다. 1개의 group은 4개의 ribbon으로 구성되어 있으며, ribbon 사이의 공극과 joint로 표시된 부위의 길이는 변수로하여 여러가지의 경우를 simulation하게된다.

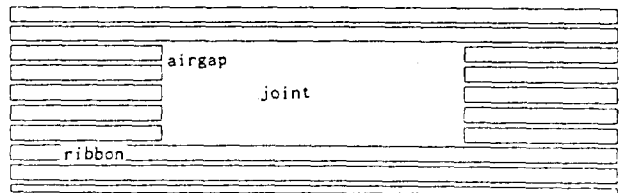


그림 6 비정질 코어의 균질화 Simulation Model

## 4. 비정질 코어의 설계 parameters

### 4.1 Core의 Step당 ribbon 수의 영향

Core의 step당 ribbon 장수를 증가시키면 본 모델의 실제 두께가 증가하여 전체의 코어 부피가 커지게 되어 코어에 인가되는 자기장의 크기도 증가되어야 하므로 실

에 입력하는 코일의 전류량을 증가시켜야 한다. 본 simulation 에서는 코아에 인가하는 코일 부위의 중심점을 기준으로 하여 거의 균일한 코일부 내부의 코아 자속의 값을 일정 값, 즉 1.3 T의 설계자속 밀도로 하였다. 이것은 실제 코아에 인가되는 최대값과는 상당한 오차를 가지고 있으나 전체 코아의 량에서 가장 큰 비중을 차지하는 부분이므로 이부분이 전체 코아의 특성값으로 고정된 뒤 core joint부위의 값의 변화를 분석한 결과 최적의 모델을 결정하려 한다.

다음 그림 7는 코아의 가장 우측의 연결부에서의 자속 밀도를 등고선식의 분포도로 나타내었으며 이때 인가 자속은 1.2 T, step당 리본의 수는 10 배 이었다. 본 그림에서와 같이  $30.9 < x < 33$ ,  $23 < y < 25.3$ 의 범위에서 코아 연결부 위 부근에서는 간격이 좁은 등고선 모양을 알 수 있는데, 이것은 자속의 변화가 심함을 알 수 있으며 공기틈의 부위가 시작되는 부위에서 가장 격심한 자속밀도의 변화가 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 손실 부분을 최대한 줄여서 최적의 설계 모델을 개발하는데 목적을 두고 있으나 아직 국내에서 완전히 규격화된 모델이 선정되지 않고 있는 실정이고 아직 상용 설계 작업이 이루어 지지 못해 연구모델로서 평가하고 있다.

또한 step당 리본수의 변화에 따른 자속밀도의 최대값 변화를 보면 도식상으로도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 곡률부에서는 이러한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 설계 상의 자속밀도 이상의 자속 밀도를 가지는 부위는 step당 리본 장수가 증가함에 따라 감소하지만 자속밀도의 최대값은 step당 ribbon 장수가 증가함에 따라 상당히 증가함을 알 수 있다. 즉 step당 리본 장수의 증가에 따라 자속 밀도의 최대값도 증가하고 전체적이 flux density의 분포 역시 큰 편차를 가지므로 설계 상으로서는 리본의 장수가 작은 쪽이 유리하다고 할 수 있을 것이다.

그림 9은 group당 리본수 변화에 따른 영향을 평가하

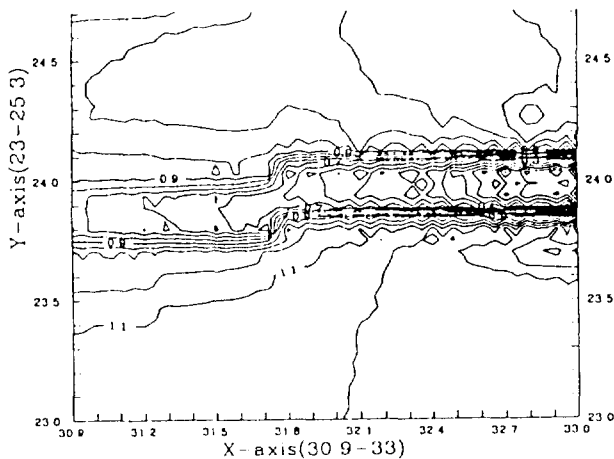


그림 7 Core joint 부위의 자속밀도분포

기 위하여 한 group의 ribbon 수를 증가 시키면서 코아의 보자력과 포화자속밀도를 측정된 것을 도표로 나타낸 것이다. 포화자속밀도는 예상했던 것처럼 크게 변화하지 않고 1.57 Tesla 정도지만 보자력은 ribbon 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

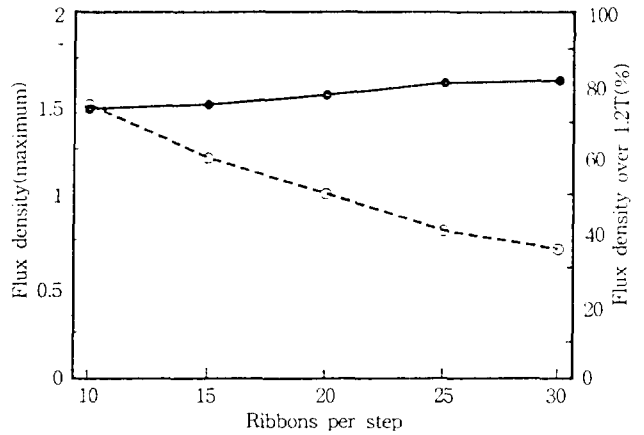


그림 8 Step 당 ribbon수에 따른 자속밀도의, 최대값

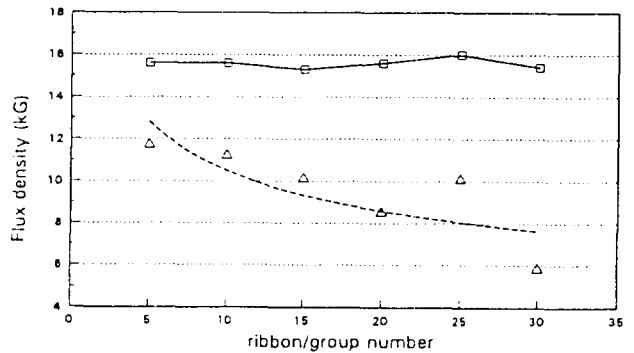


그림 9 Group 당 ribbon 수 증가에 따른 자속밀도 변화

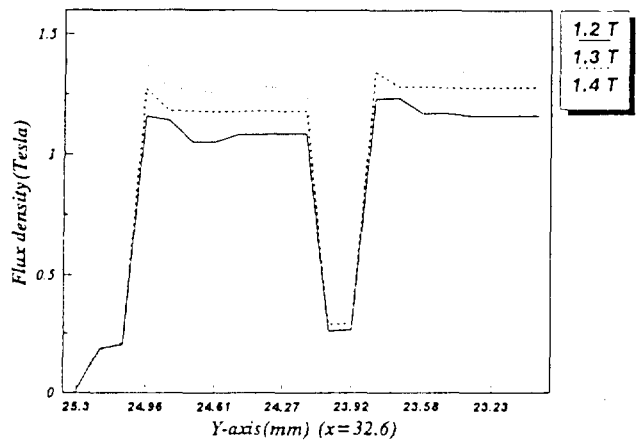


그림 10 설계자속밀도 변화에 따른 airgap 부근의 자속밀도

## 4.2 설계 자속밀도의 증가에 따른 변화

Ribbon의 장수의 변화 측면보다는 설계자속밀도의 변화를 중점적으로 관찰하기 위하여 설계자속밀도를 1.2, 1.3, 1.4 T로 변화시킴에 따라 flux density의 변화를 알아보고 설계자속밀도의 변화와 step당 리본의 장수 변화에 따른 자장의 변화를 검토하였다. 그림 10은 설계자속밀도의 변화에 따른 flux density의 변화로서 해석부위 중 우측 잘려진 부위에서 수직선상을 따라 측정된 결과이다. Step당 ribbon 수를 10 장으로 고정시킨 core부위의 자속밀도이고 설계자속밀도가 증가함에 따라 내부자속밀도도 증가함을 알 수 있다. 그러나, 리본수가 증가되면 core의 두께가 커지게 되어 최대자속밀도의 측정시 동등한 조건하에서의 비교가 되지 못하고 상대적인 비교만이 가능하게 된다. 즉 설계자속밀도의 최대치는 고정시킨 뒤 flux density의 변화를 고찰하는 것이 올바른 방법이라고 할 수 있으며, 변압기전체의 효율이나 코아의 단위체적당 손실 등을 기준으로 정한다면 최적의 자속밀도를 결정할 수 있을 것이다.

## 5. 요약

비정질 core의 Butt-lap-step joint model의 자계를 유한요소법을 이용하여 해석한 결과, step당 리본 수의 변화, 설계자속밀도의 변화, 코아 연결부의 형상 변화에 따른 특성을 분석하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) Step당 리본 수의 변화에 따른 영향에서 리본수가 작을수록 코아 전체의 flux density의 편차가 작으며 최대값 역시 낮으므로 유리하다.
- (2) 설계자속밀도의 변화에 따른 코아 부위의 자속 변화는 인가하는 설계자속밀도의 값이 높을수록 균일한 자장 분포를 얻을 수 있다.
- (3) 코아의 적층 방법의 변화에서는 Butt-Lap-Step방식이 가장 유리한 결과를 얻을 수 있었지만 코아 곡률부의 형상 변화가 중요한 요소로 작용한다.
- (4) 최적 step수, ribbon/group 수, airgap 길이 등은 전체 model의 특성, 손실, 제작성 등을 고려하여 결정하는 것이 바람직하며, 유한요소법의 해석으로는 전체적인 비정질 코아 변압기의 전기적인 특성과 경향을 도식화하여 설계자에게 좋은 설계방향과 정보를 제공할 수 있게 된다.

또한 비정질 코아의 특성상 종래의 일반적인 유한요소법으로는 많은 계산시간과 큰 computer system을 요구하는 core의 미세부분의 상세한 해석은 새로운 계산기법을 도입하여 계산해야 할 것이다. 이러한 문제해결을 위하여 3 절에서 설명한 Asymptotic Expansion을 이용하여 균질화(homogenized)된 투자율 (또는 reluctivity)를 산출하고, 여기에 유한요소기법을 도입하여 단점을 보완한 새로

운 기법의 algorithm을 개발하고 있으며, 이 기법은 계산시간의 단축과 Microscopic하게 자속밀도 분포를 관찰할 수 있으므로 joint 부분의 자속경로와 손실 등 비정질 코아의 설계 Parameter를 설정하는 결정적인 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] Edward Boyd and John Borst, " Design Concepts for an Amorphous Metal Distribution Transformer", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-103, No. 11, November 1984, pp. 3365-3372
- [2] T. Nakata and et al, IEEE Trans on MAG. Vol. MAG-18, No.6, pp. 1055-1057, 1982
- [3] E. Boyd and J. Borst, IEEE Trans on PAS. Vol. PAS-103, No.11, pp.3365-3372, 1984
- [4] Hashin, Z., 1983, Trans. ASME, J. of Appl. Mech., Vol.50, pp 481-505
- [5] Sanchez de Palencia, E., 1980, Nonhomogeneous media and vibration theory, Lecture Notes in Physics, Nb.127, Springer Verlag, Berlin
- [6] Guedes, J. M., 1990, Nonlinear Computational Models for Composite Materials Using Homogenization, Ph.D. Thesis, University of Michigan
- [7] 한국전력공사, " 에너지 절약형 Amorphous 변압기 설계 및 제조기술 개발", 연구 보고서 1994. 5
- [8] 신 판 석, " 비정질 코아 변압기의 설계 및 해석", 한국자기학회 Symposium Proceeding, P.P.59-66, 1994.9
- [9] 이 진 회, 신 판 석, " 균질화 기법을 이용한 비정질 코아의 자계해석 Algorithm 개발", 1994년 대한전기학회 하계학술대회, p.p. 79-81

## 저 자 소 개



### 신판석(申判錫)

1953년 1월 28일생. 1977년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 12월 미국 Rensselaer Polytechnic Institute 전기공학과 졸업(석사 및 공박). 1980년 2월 -84년 8월 한국전기연구소 연구원. 1984년 9월-89년 11월 RPI 유학(연구조교). 1989년 11월-93년 2월 한국전기연구소 선임연구원. 1993년 3월-현재 홍익대학교 공대 전기공학과 조교수.