

유한 요소 해석을 이용한 고주파 변압기 설계

주진홍* 김동훈*
경북대학교*

Design of High Frequency Transformer by using finite element method

Jin-Hong Joo*, Dong-Hun Kim*
Kyungpook National University*

Abstract - 본 논문에서는 연료전지 전력변환장치(PCS) 내의 고주파 변압기 설계시 초기에 빠르게 설계안을 제시 할 수 있는 방법과 제시된 개략 설계의 상세 검증을 통해 알맞은 설계사항을 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 개략 설계의 상세 검증을 통해 설계치수를 찾을 수 있는 기법을 결합한 효율적인 설계 방법을 확인 할 수 있었다.

1. 서 론

연료 전지란 연료의 연소 에너지를 열로 바꾸지 않고 직접 전기 에너지로 바꾸는 전지로서 금속과 전해질 용액을 사용하지 않고 양극에 산소 또는 공기, 음극에 수소·알코올·탄화수소 따위를 사용하는 전지이다, 일종의 발전장치라고 할 수 있으며 값비싼 촉매를 필요로 하기 때문에 우주 로켓이나 등대 등의 특수한 용도에 쓴다. 본 논문에서는 연료전지 전력변환장치(PCS)의 DC/DC 컨버터부에서 핵심 소자로 사용될 고주파 변압기를 모델로 삼아 원하는 출력에 맞도록 설계하는 일련의 체계적인 방법에 대해 기술 하고자 한다. 이를 위해 우선적으로 자기 회로법을 이용한 빠른 개략 모델을 도출하였으며 얻어진 초기 설계 모델에 대한 상세 해석을 수행하기 위하여 유한요소해석 기법을 사용하였다. 이러한 과정을 거쳐서 비교적 신뢰도가 높은 방법으로 모델을 개선하여 원하는 성능의 최적화된 고주파 변압기의 설계안을 도출 하였다.

2. 본 론

2.1 자기 회로법에 의한 개략 설계

본 연구에서 구현하고자 하는 연료전지 PCS의 DC/DC 컨버터는 고주파 변압기 절연 방식을 사용하며 고주파 변압기의 설계 사항은 다음 표1과 같다.

<표 1> 고주파 변압기의 설계 사항

용 량	2kVA	권 선 비	1:17
출력 전압	400V	스위칭 주파수	20kHz

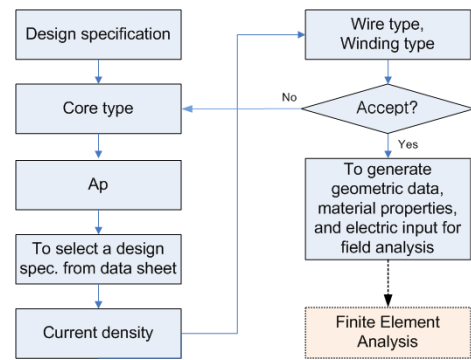
자기 회로법에 의한 설계에서는 주어진 입력 조건과 출력 조건을 기준으로 자기장하와 전기장하를 계산하여야 하는데 본 논문에서는 이러한 기준을 설정하기 위해 면적 곱(Area Product), A_p 개념을 이용하였다. A_p 는 자로의 단면과 코일이 감기는 창 의 단면을 곱한 수치로 각각 자기장하와 전기장하를 고려한 것으로 변압기 시스템의 전체 물리적 크기를 결정하게 된다. 전반적인 설계절차는 McLyman의 방식을 따랐다[1]. 그림 1은 초기 설계변수를 이용하여 최종 개략 설계를 수행하는 과정에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 초기 설계를 위해 페라이트계의 코어를 선정하였으며 이 중에서 포화 자속밀도가 0.3 T근방에서 얻어지는 Mn-Zn 페라이트 코어로 가정 하였다. 이를 토대로 주어진 설계 사양에 대한 공식 A_p 를 계산하여 다음과 같은 면적비를 얻었다.

$$A_p = \left(\frac{P_o}{K \times \Delta B \times f} \right)^{4/3} = 52.9 \text{ cm}^4$$

여기서 P_o 는 출력전력, 스위칭회로에 따른 계수 $K=0.017$, ΔB 는 최대자속밀도차, f 는 스위칭 주파수를 나타낸다. 그리고 면적비에 대응하는 코어를 위해 주로 사용하는 EI 형태를 선정하였다. 본 연구에서는 면적비 50.06 cm^4 의 1-112 EI 코어를 선정하였다[1]. 코어선정 다음으로 전기장하와 관련된 설계파라미터를 결정하여야 하는데 우선 1차측의 턴 수는 다음의 공식으로 계산 되어 진다.

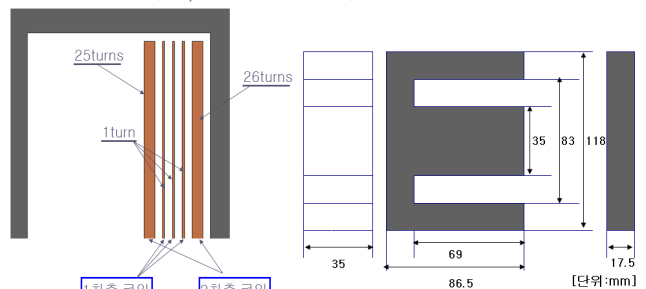
$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f \times B_m \times f \times A_c} = 2.45$$

여기서 V_p 는 대략 27 V ~ 48 V로 인가된다고 가정하면, 입력 범위내 충분한 여유를 두어 설계하기 위해 최대값인 48 V로 설정 하였으며, 구형파인 경우 보정계수 $K_f=4.0$, 최대자속 밀도 $B_m=0.3$, A_p 선정 후 데이터 표로부터 구해지는 코어 중심 자로의 단면적 $A_c=8.17$ 등을 입력하여 구한 결과이다. 턴수 2.45는 정수로 환산하여 여유를 두기위해 3턴으로 지정하였다. 따라서 권선비 1:17을 고려하면 2차측은 51턴의 권선수를 가지게 된다. 한편, 1차측의 최대전류는 효율 100 %인 경우를 감안하더라도 대략 41 A ~ 74 A가 1차측에 인가되는데, 이처럼 큰 전류를 흘리기 위해 제 1차 설계안에서는 Foil 타입을 적용하였다.



<그림 1> 자기 회로법에 의한 개략 설계 흐름도

또한, 근접효과(Proximity Effect)를 최소화 하기 위하여 1차측과 2차측의 권선을 반복하여 겹쳐 감는 형태의 권선법(Interleaved winding)을 적용하였다. 그러나 1차 설계안에 대하여 실제 제조시에는 국내에서 구할 수 있는 코어의 사양이 제약이 있는 관계로 확보 가능한 코어 모델과 현장 제조시의 권선 효율성을 감안하여 계산으로 도출된 코어 크기를 중심으로 국내에서 구할 수 있는 EI 코어를 선택하고 권선수는 그대로 유지하면서 그림2와 같은 2차 수정 설계안을 도출하였다. 그 결과 크기는 1차 설계안에서 2차 설계안으로 바뀌면서 가로 및 세로는 각각 3 cm정도, 두께는 3 mm정도 증가하였다.



(a) 1/4 단면도 (b) 개략설계 단면도(측면도, 정면도)

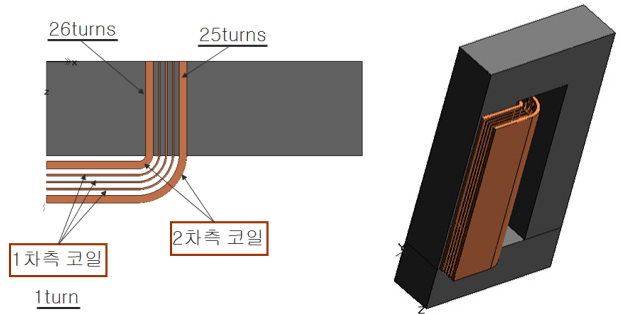
<그림 2> 2차원 권선배치도 및 설계 단면도

그림 2(a)는 중심코어를 중심으로 왼쪽편의 1/4 단면도를 나타낸 것으로서 안쪽과 바깥쪽에 2차측 도선을 감고 그사이에 1차측 코일을 배치하였으며 1차측은 0.3 mm 동판으로 3장을 감고 2차측은 직경 1.4 mm의 에나멜동선으로 처리하여 안쪽, 바깥쪽에 대해 각각 26턴과 25턴으로 총 51턴을 권선처리 하였다. 그림 2(b)는 권선도의 단면을 나타낸 것이다.

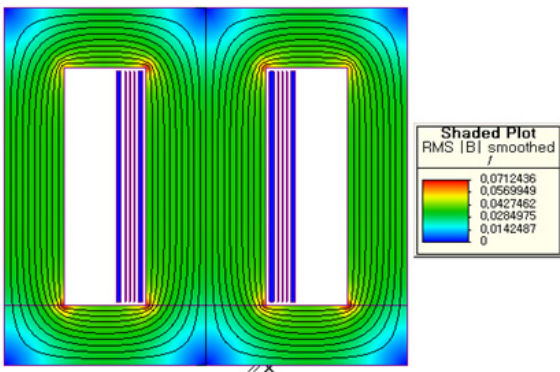
2.2 유한요소법에 의한 설계 검증 (2차원 해석 모델)

해석 프로그램은 infolytica에서 제공하는 전자장 해석 툴인 MagNet 을 사용 하였고 2,3차원 해석의 정밀도를 높이기 위해 각 요소망을 세분화하였다. 해석 시간은 Xeon 3.4 GHz Dual CPU, 2 GB RAM 사양의 work station에서 약 10분간 해석하였다.

그림 3은 제 2차 설계안으로 채택된 2차원 해석모델의 자속밀도 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 인가전원은 최대값 60 A의 교류 전류원을 입력한 것이다. 원회로는 전압원 구형파에 의해 구동되지만 펄스폭 변조방식(PWM)으로 얻어진 20 kHz의 구형파와 전압원을 해석하기 위해서는 시간차분법을 이용하여야 하는데 이 경우 상당한 시간이 소요된다. 따라서 여기서는 입력전류의 범위를 추정하여 각각 85 A, 60 A, 50 A 최대값을 가지는 교류전류원의 시변자장 해석을 수행하여 자속밀도의 분포와 권선비에 따른 전압, 전류 특성을 분석하였다.



(a) 길이방향에서의 단면도 (b) 1/4모델의 3차원 권선 배치
 <그림 4> 3차원 해석모델에 대한 권선 배치도

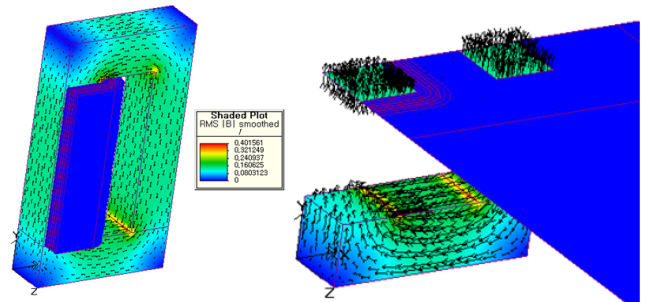


<그림 3> 2차원 해석모델에 대한 자속밀도 분포도

수치해석 결과 각 경우에 대하여 권선비에 따라 전압과 전류는 얻어졌으며 중심 코어단면에 분포하는 자속밀도는 평균값을 기준으로 0.05 T(85 A인 경우), 0.04 T(60 A인 경우), 0.03 T(50 A인 경우)가 각각 얻어 졌다. 이는 설계추정치 포화 자속밀도 0.3 T에 대해 낮은 값으로 충분히 여유를 가진 설계가 되었음을 판단할 수 있다.

2.3 유한요소법에 의한 설계 검증 (3차원 해석 모델)

2차원 해석모델의 경우 두께방향으로 자속밀도의 패턴을 충분히 고려할 수 없으므로 실험모델과 비교하여 필연적으로 오차를 수반하게 된다. 이를 해결하기 위해 3차원 모델에 대한 해석을 수행하여 비교적 정밀도가 높은 자속밀도 분포를 구하였다. 이를 위해 우선 그림 4에 나타낸 바와 같이 3차원 형태의 코어의 배치를 고려하여 해석과정에 도입하였다. 그림 4(a)는 길이방향의 축에서 본 단면도이며 2차원 해석면에 대해서는 서로 수직 관계를 가진다. 그림 4(b)는 3차원 입체도의 1/4모델을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 3차원 해석모델에 대한 전체자속밀도 분포도를 나타낸 것이며, 그림5(b)는 코어중심 단면에서의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림 5(b)에서 얻어진 코어중심 단면에서의 자속밀도는 평균값을 기준으로 0.19 T(85 A인 경우), 0.14 T(60 A인 경우), 0.11 T(50 A인 경우)가 얻어졌다. 2차원의 결과와 비교하여 상당한 값 차이를 보이고 있지만 개략설계에서 선정된 포화자속밀도 0.3 T를 기준으로 보아 평균값은 충분한 여유를 두고 있음을 알 수 있다



(a) 전체 자속밀도 분포 (b) 코어 단면 자속밀도 분포도
 <그림 5> 3차원 해석모델에 대한 자속밀도 분포도

3. 결 론

본 연구는 연료전지 전력변환장치(PCS)의 DC/DC 컨버터부에서 핵심 소자로 사용될 고주파 변압기를 원하는 출력에 맞도록 설계하는 연구로써 상세 검증을 통해 최상의 설계 요건을 찾을 수 있는 기법을 결합한 효율적인 설계 방법론을 제시 하였다. 실제 일반 페라이트 계 코어의 경우 포화 자속밀도가 0.2 T정도, Mn-Zn의 경우 0.3 T 정도 이므로 코어사이즈를 줄이기에는 현실적 어려움이 있으므로 비용적인 측면을 보완하기 위해서 수치해석 결과로 알 수 있듯이 일반 페라이트 코어를 사용하여도 무방함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Colonel Wm. T. McLyman, "Transformer and inductor design handbook," 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc, pp.27-47, 1988.
 [2] A R Abdul Razak, S Taib, I Daut, "Design And Development Of High Power Transformer For Renewable Energy Application", Proceedings of the International Conference on Robotics, PP375-379, 2005.
 [3] L.H.Dixon, "Eddy Current Losses in Transformer and Circuit Wiring", Unitorde/TI Magnetics Design Handbook, pp.17-21, 2000