

# 몰드변압기의 소음 원인 분석

## Analysis of Noise Source for Mold Transformer

최 원 호 · 김 원 철

W. H. Choi and W. C. Kim

**Key Words** : 자왜진동(Magnetostrictive Vibration), 자속밀도(Flux Density), 공진(Resonance), 철심(Core), 음향인텐시티(Sound Intensity), 몰드변압기(Mold Transformer)

**Abstract** : Especially, demands for the noise reduction of mold transformer has been becoming an common issue because it has been used mainly at the residence area such as building and ship. So, this paper investigates the noise source and countermeasure of mold transformer radiated high noise abnormally. The result of impact hammering test for core of transformer ascertains the core resonance by harmonics of line frequency and high noise can be reduced to avoid core resonance by changing torque strength of tie rod. Magnetic field analysis is performed to identify the reason that noise of V-phase is higher than U and W-phase in the normal condition. It is the cause that flux density and magnetic force of V-phase is higher than the other phase respectively.

### 1. 서 론

최근 송전 효율을 높이기 위해 변압기의 전압이 초고압화 및 대용량화되는 추세에 따라 도심의 변전소 또는 인구밀집지역에 설치되는 열병합 발전소 등에서 변압기의 소음 저감이 매우 중요한 문제가 되고 있다. 변압기의 소음을 낮추기 위하여 자속밀도를 낮추는 방법이 있으나 이는 변압기 제작비용이 높아지는 문제가 있다<sup>1,3)</sup>. 변압기 저소음을 위하여 방음용 엔클로져(enclosure)를 사용할 경우 소음저감 효과는 크나 설치면적과 비용이 증가된다<sup>2,3)</sup>. 변압기의 탱크를 이중 탱크로 사용하는 방법도 널리 이용되나, 외측탱크의 고유진동수를 절연이 가능한 주파수로 설계해야 하는 제작상의 어려운 점과 운송이 곤란한 단점이 있다<sup>3,4)</sup>. Hori<sup>5)</sup>는 이 같은 단점을 보완하기 위해 변압기 탱크 외측에 진동절연을 고려한 차음판을 사용함으로써 작은 설치면적으로 변압기소음을 저감시켰다. Yannucci<sup>6)</sup>는 능동소음제어 시스템(active noise control system)을 최초로 변압기 부분에 적용하였고, 최근에는 이 시스템이 일부변압기에서 상용화가 되고 있다.

일반 변압기는 권선(winding)과 철심(core)이 절

연유가 채워진 탱크 속에 내장되는 유입식 변압기이다. 그런데 변압기 사고가 발생할 경우 절연유에 의한 화재의 위험성이 높음에 따라 건물이나 사람이 밀집된 곳에서는 안정성이 문제가 되며, 부피가 크기 때문에 선박과 같이 좁은 공간에서 사용이 곤란하다. 이같이 유입식 변압기가 가지고 있던 문제점을 해결하기 위하여 권선을 전기적, 기계적 특성이 우수한 에폭시 수지(epoxy resin)를 사용하여 고체 절연화시켜 절연유가 필요 없는 건식 타입의 몰드변압기가 개발되었다. 그러나 탱크가 없기 때문에 철심에서 발생된 소음이 바로 공기 중으로 발산되고 사람이 거주하는 건물 내에 많이 설치됨에 따라 소음이 자주 문제가 되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 높은 소음을 자주 일으키는 몰드 변압기의 한 모델을 대상으로 하여 그 원인을 분석하였다. 소음원인의 분석 대상으로 선정된 변압기는 같은 모델임에도 불구하고 측정된 소음크기가 일정하지 않고 제품마다 소음크기의 산포가 62~75dB(A)로 넓게 나타났다. 따라서 소음이 가장 높은 제품과 양호한 제품의 2 대를 비교하여 소음의 원인을 규명하였다. U, V, W의 각 상(phase)중에서 모든 변압기가 V상의 소음이 가장 높게 측정되어, 전자계해석을 실시한 결과, V 상의 자속밀도가 다른 상에 비해 높음에 따라, 그리고 자왜현상에 따른 변형이 큼에 따라 소음이 증가하는 것을 확인하였다.

접수일 : 2000년 10월 5일

최원호 : (주)효성중공업 연구소

김원철 : 경상대학교 수송기계공학과(해양산업연구소)

## 2. 변압기의 소음특성

변압기 철심은 0.3mm 정도의 얇은 규소강판을 적층하여 제작된다. 변압기 권선에 전류가 흐르면, 자속이 발생하여 철심이 자화되어 매우 작은 탄성 변형이 발생하는데, 이를 자왜(magnetostriction)라 하며 변형을  $\epsilon$  로서 다음과 같이 표현되며 그 크기는  $10^{-6}$  정도의 크기이다.<sup>1, 4)</sup>

$$\epsilon = \Delta l / l \quad (1)$$

여기서  $\Delta l$ 는 탄성변형량이며,  $l$ 은 초기 길이이다. 이 변형율은 자속밀도(flux density)  $B$ 와 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{\Delta l}{l} = CB^2 \quad (2)$$

여기서  $C$ 는 비례상수이다.

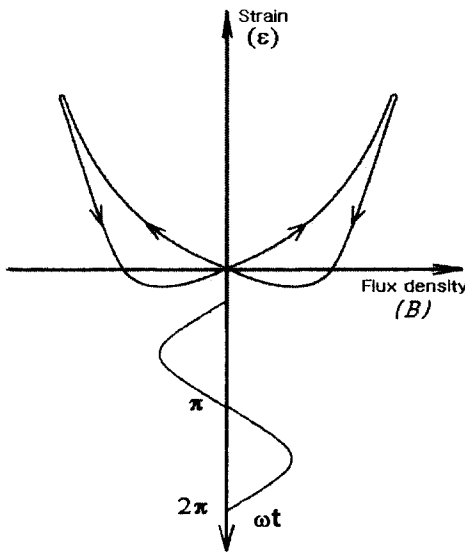


Fig. 1 Magnetostriction curve under a sinusoidal flux density variation

Fig. 1에서와 같이 철심을 통과하는 자속밀도의 변화를 정현파로 가정하면, 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= CB^2 \sin^2 \omega t \\ &= C_1 B_1^2 \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\omega$ 는 전원주파수를 나타내며, 만약 60Hz 일 경우 전원주파수 2배의 진동이 발생함을 알 수가 있다. 그러나 실제 자속밀도의 변화가 정확한 정현파가 아님에 따라  $2\omega$ 의 조화성분들이 나타나게 된다

박판의 규소강판이 자왜로 인해 변형이 발생하면, Fig. 2(a)와 같이 종방향으로 진동이 일어나고, 이 규소강판을 적층하여 클램프 상태로 만들면 Fig. 2(b)처럼 횡방향으로 진동이 발생한다.<sup>1)</sup> 횡방향의 진동은 종방향의 진동에 못지 않게 많은 소음 에너지를 발생시킨다. 규소강판의 자기 변형현상에 의한 소음 이외에 몰드변압기에서 발생할 수 있는 소음 원인은 다음과 같다<sup>8)</sup>.

- 1) 철심 부품간의 틈새에 의한 진동 · 소음
- 2) 철심과 단철(yoke)간의 조립오차에 의한 틈새 발생부 진동 · 소음
- 3) 조임볼트(tie rod)의 진동 · 소음
- 4) 절연관의 진동 · 소음
- 5) 부하시 고 · 저압 권선 상호간 Lorenz력

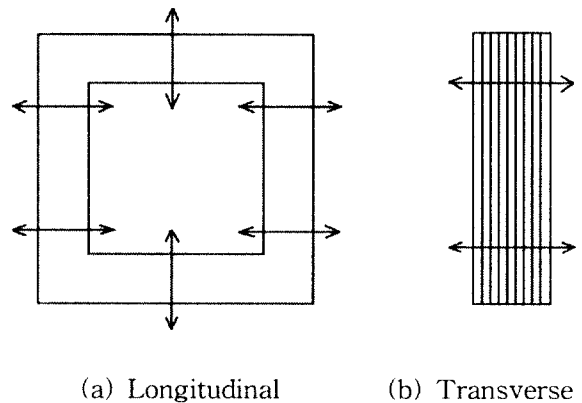


Fig. 2 Vibration of core by magnetostriction

## 3. 몰드변압기의 소음발생원인 분석

### 3.1 진동소음의 주파수 분석

소음원인 분석에 사용된 몰드변압기의 외형도와 변압기 사양을 Fig. 3과 Table 1에 각각 나타냈다. 소음이 정상인 변압기와 높은 소음이 발생하는 변압기의 진동과 소음의 주파수특성을 측정한 결과를 Fig. 4와 5에 각각 나타냈다.

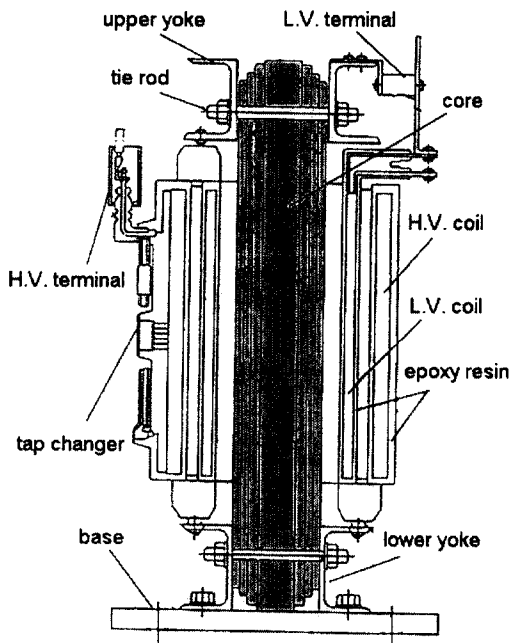


Fig. 3 Structure of mold transformer

Table 1 Specification of mold transformer

Phase	3 $\phi$
Capacity	200kVA
Voltage ratio	22900/ 380 (Voltage)
Core weight	6566(N)
Core material	Silicon steel grade 10

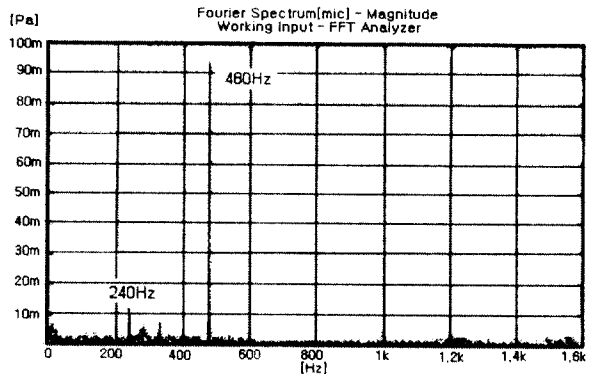
진동은 철심에서 측정하였다. 변압기에는 고압의 전류가 흐름에 따라 접촉식 진동변환기는 사용이 불가능하므로 비접촉식 레이저 속도계(모델명: VH300, 영국 Ometron사)를 사용하여 철심의 진동을 측정하였고, 소음은 마이크로폰(모델명: 4165, 덴마크 B&K사)을 변압기 정면에서 1.5m 떨어진 지점에서 측정하였다.

진동주파수 분석 결과, 두 변압기 모두에서 2×전원주파수의 조화성분이 나타났다. 이는 앞에서 언급한 변압기의 소음특성과 잘 일치한다. 정상 변압기 및 고소음 변압기 모두 주 소음성분은 480Hz임을 알 수가 있으며, 고소음 변압기의 소음은 이 480Hz 성분이 증가함으로써 높은 소음이 발생함을 판단할 수 있다. 진동소음 주파수분석결과도 마찬가지로 480Hz 성분이 탁월함을 알 수가 있다. 따라서 480Hz 성분의 진동이 소음의 원인임을 알 수가 있다. 여기서 진동성분에는 120, 240, 480Hz 성분이

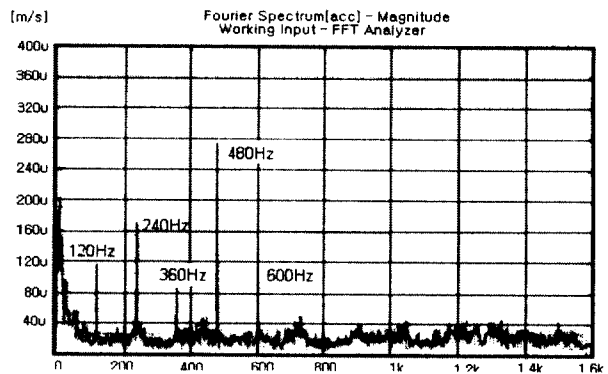
나타지만, 소음성분은 480Hz만 탁월하다. 이는 변압기 소음은 기계의 상태보다는 환경적인 측면에서 측정이 이루어지기 때문에 소음 측정 시 A가중치(weighting)를 취하였기 때문에 비교적 저주파수인 120, 240Hz성분의 소음이 작게 나타난 것이다.

### 3.2 Sound Intensity 분석

소음의 차이를 규명하기 위하여 규소강판간의 적층 상태, 단철와 철심간의 밀착상태 등 두 변압기간의 조립상태를 확인하였으나, 차이점을 발견할 수가 없었다. 또 절연판과 코일의 진동을 측정할 결과 역시 큰 차이는 없었다. 따라서, 소음원을 정확히 파악하기 위하여 음향 인텐시티를 측정하였다. 측정장소의 암소음은 61dB(A)이며, 변압기의 크기에 비해 측정공간이 매우 크기 때문에 반사음의 영향은 없었다. 소음주파수분석 결과 1kHz 이상의 소음 성분은 나타나지 않았기 때문에, 음향인텐시티 탐침자(probe)의 스페이서(spacer)는 50mm를 사용하여

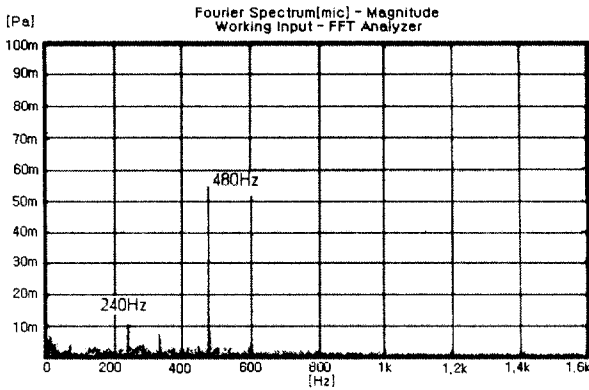


(a) Sound spectrum

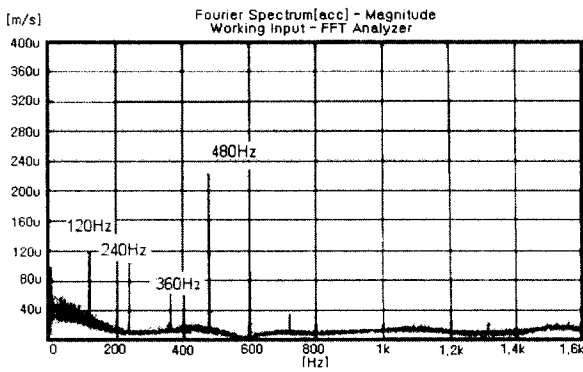


(b) Vibration spectrum

Fig. 4 Sound and vibration characteristic of abnormal condition



(a) Sound spectrum



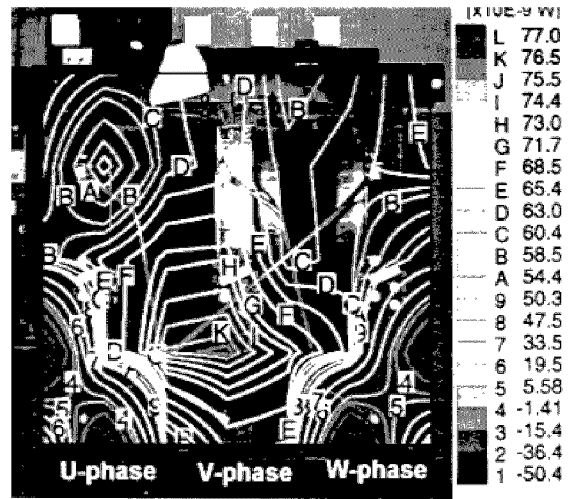
(b) Vibration spectrum

Fig. 5 Sound and vibration characteristics of normal condition

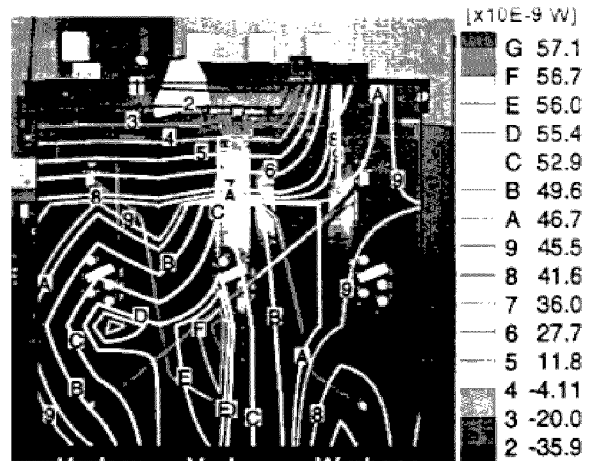
저주파수 측정한계를 크게 하였고, 인텐시티 탐침자는 덴마크 B&K사의 Type 3548을 사용하였다. Fig. 6은 이를 측정한 결과이다. 두 변압기에서 공통점은 모두 U, W 상보다 V상의 소음이 높음을 알 수가 있다.

### 3.3 고유진동수 측정

모두 V상의 소음이 크게 나타남에 따라서 V상의 공진 여부를 확인하기 위하여 충격시험을 수행한 결과, 소음이 높은 변압기 V상에서 고유진동수가 480Hz로 측정되었고, 정상 변압기의 V상은 472Hz로 나타났다. 따라서 높은 소음의 원인은 V상의 공진으로 판명되었다. 그러나 공진을 회피하기 위하여 철심의 형태를 변경해야 하나, 이는 전기적인 성능 및 원가와 같은 여러 가지 문제가 발생하여 철심의 형상 변경은 어려웠다. 그런데 똑 같은 변압기 철심의 고유진동수가 약간씩 다른 점에 착안하여 철심 조립방법을 통하여 공진 문제를 해결하고자 검토한 결과, 철심을 고정하는 단철의 조임볼트 채



(a) Abnormal transformer



(b) Normal transformer

Fig. 6 Sound intensity map

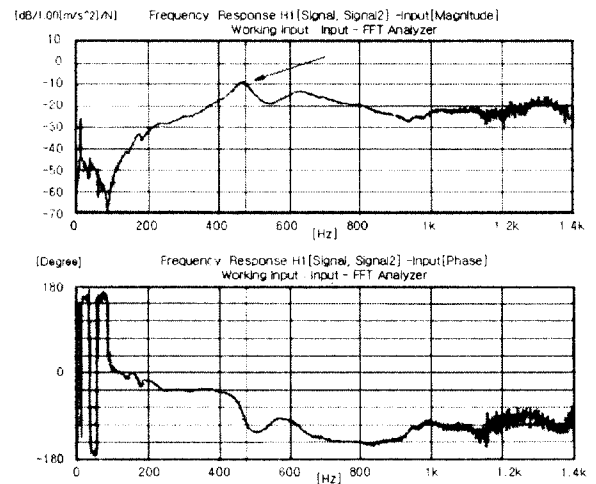


Fig. 7 Natural frequency of V-phase core

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \frac{B^2}{\mu} dv \quad (4)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율이며,  $v$ 는 철심의 체적이다. 이때 철심에 작용하는 힘  $F$ 는

$$dW_H = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} A dL = F dL \quad (5)$$

의 관계로부터 다음과 같이 구해진다. 여기서  $A$ 는 철심의 단면적,  $dL$ 은 철심의 요소 길이이다.

$$F = \frac{dW_H}{dL} \quad (6)$$

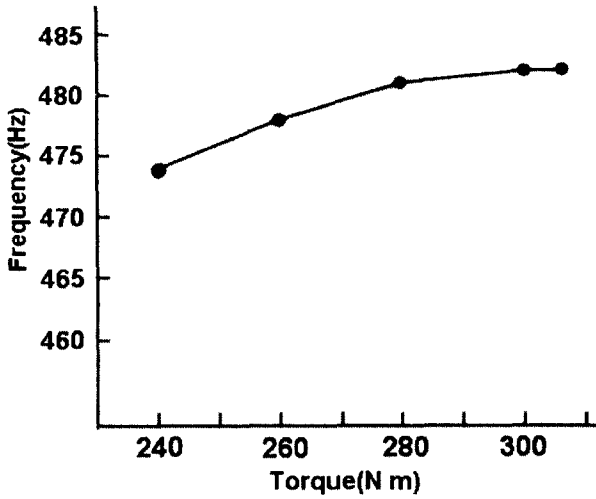


Fig. 8 Comparison of resonance frequency with changing tying torque

결토크에 따른 V상의 고유진동수 변화를 측정한 결과는 Fig. 8과 같다.

체결토크가 300N·m 이상에서는 고유진동수가 포화되어 V상의 고유진동수를 높이는 것은 불가능하다. 그러나 체결토크를 240N·m까지는 낮추어도 철심의 안정성에는 문제가 없다. 따라서 단철의 체결토크를 낮추어 V상의 공진문제를 회피하는 것이 가능하고, 소음은 74dB(A)에서 65dB(A)으로 낮아져 정상 수준이 되었다. 이처럼 같은 모델의 변압기에서 소음크기가 크게 차이가 발생하였던 것은 V상이 공진 영역 근처에 있었기 때문에 철심과 단철을 고정하는 조임볼트의 체결강도에 따라 공진이 발생된 경우에는 높은 소음이 발생하였던 것으로 판명되었다.

### 3.4 V상의 소음 원인

변압기의 소음은 부하에 관계없이 거의 일정하다. 이는 권선의 전자력이 권선보다는 철심에 집중되기 때문이다<sup>3)</sup>. 3상 변압기에서 각 상의 자기회로는 평행하다는 가정에서 설계가 되고 있으나, 철심 구조상 동일조건이 아니며 이는 여자전류에 대한 시험결과와 일치한다. 이로 인해 음향인텐시티분석 결과, 두 변압기 모두에서 V상의 소음이 U, W상 보다 높게 나온 것으로 판단되어 각 상의 철심에 틸새가 존재할 때의 전자력을 평가하였다.

변압기 철심이 선형적인 특성을 갖을 때, 자기회로 내에 축적되는 에너지  $W_H$ 는 다음과 같다.

몰드 변압기 철심의 전자력을 계산하기 위해 철심의 틸새가 0.2mm인 것으로 가정하여 3차원 FEM을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 가정은 다음과 같다.

- 1) 전류의 크기는 3상 120도 위상차를 갖는 동일한 크기의 전류이다.
- 2) 철심의 투자율은 자속 밀도에 관계없이 동일하다
- 3) 철심은 절연되어 적층되기 때문에 철심의 와전류에 의한 Lorentz력은 무시한다.

Fig. 9는 해석결과로 몰드 변압기 철심의 전자력의 분포도를 나타낸 것이다. 해석결과에서 나타내듯이 각 상의 전자력은 이상적인 변압기는 V상에서의 전

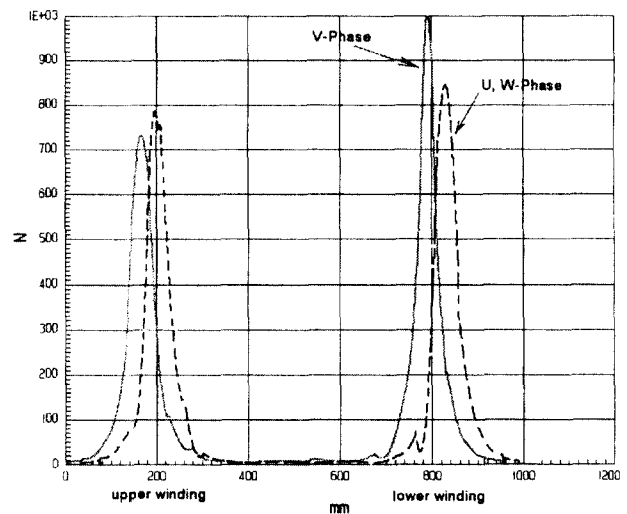


Fig. 9 Magnetic force on each phase

참고문헌

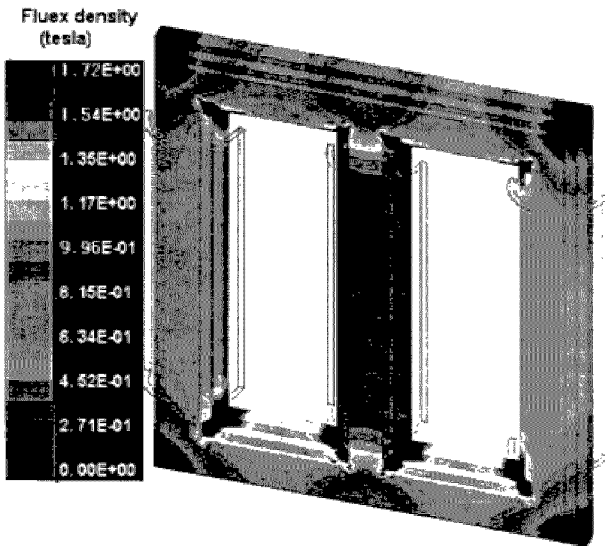


Fig. 10 Flux density distribution of core

자력 분포가 U상의 전자력 분포보다 높다. V상에서의 최대 전자력의 크기는 약 1000N이고 U상에서의 최대 전자력 크기는 840N이다. Fig. 10은 철심의 자속밀도 해석결과이다. 마찬가지로 자속이 V상에 집중하고 있다. 이로 인해 V상이 자왜로 인한 자기 변형량이 크게 된다.

따라서 V상의 소음이 U, W상보다 높은 이유는 V상에 보다 큰 자속밀도의 분포로 인한 자왜현상이 커지며, 철심을 이루는 규소강판에서 접합부에서 발생할 수 있는 작은 틈새에서 발생하는 전자력이 V상에서 더 커지기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 높은 소음이 발생시키는 물드변압기의 소음 원인을 체계적으로 분석하였고, 그 원인이 V상의 공진임을 판명하였다. 그 대책으로서 단철 조임볼트의 체결강도를 조절하여 V상의 공진을 회피시킴으로서 74dB(A)의 소음을 65dB(A)까지 낮출 수가 있었다. 따라서 근본적인 소음문제를 해결하기 위하여, 480Hz의 철심 고유진동수를 변경하는 것이 필요하게 된다. 정상 소음변압기에서도 V상의 소음이 큰 원인은 V상의 자속밀도가 U, W상에 비해 높음에 따라 전자력이 높게되어 소음이 큰 것으로 판단된다. 향후 철심 틈새에서 발생된 전자력에 대한 철심의 응답특성 및 철심의 투자율 조정에 따른 V상의 전자력 변경 등에 관한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

1. C. A. Worth, "The J & P Transformer Book", J & P Books, 11th Edition, Butterworth & Co., 1983
2. 木村久男 外 2人, "變壓器의 設計工作法", 電氣書院, 1984
3. R. L. Bean, "Transformer for the Electric Power Industry", WECO, 1992
4. P. L. Timar, A. Fazekas, and J. Kiss, "Noise and Vibration of Electrical Machines", Elsevier Science Publishing Company, Inc., 1989
5. M. Kanoi, and Y. Hori, "Transformer Noise Reduction with Sound Insulation Panel", Proceedings of IEEE Power Engineering Society, 83 WM 116, December, 1982
6. D. A. Yannucci, "Feasibility Study Of An System For Transformer Noise Abatement", WECO Report, TEM 1750, 1982
7. C. M. Harris, "Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control", McGRAW-HILL, INC., 1991
8. S. Hagiwara, Y. Hori, and Y. Suzuki, "Vibration Analysis of A Large Capacity Shut Reactor", Proceedings of IEEE Power Engineering Society 81 SM 474-6, April, 1981