

구조 공진회피에 의한 변압기 소음저감

A Study of the Low Noise Transformer by Avoiding the Structural Resonance

崔沅鎬[†] · 金振^{*} · 石皓壹^{**}
 (Wonho, Choi · Jin, Kim · Hoil, Suk)

Abstract : Demands for the noise reduction of a transformer has been becoming an common issue because it has been used mainly at the residence area such as an apartment complex. This paper shows 2 trouble shooting examples that high noise sources were found out structural resonance of a transformer by 120Hz exciting frequency caused from magnetostrictive vibration of core. This paper presents that vibration data are very important to find noise source and how to avoid natural frequency of core and tank wall

Key words : Transformer, Magnetostrictive Vibration, Flux Density, Resonance, Core, Sound Intensity

1. 서 론

최근 전력공급의 효율을 높이기 위해 변압기 전압이 초고압화 및 대용량화 되는 추세에 따라, 도심의 변전소 또는 인구밀집지역에 설치되는 열병합 발전소등에서 변압기의 소음저감이 매우 중요한 문제가 되고 있다. 변압기의 소음을 낮추기 위하여 철심의 자속밀도를 낮추는 방법이 있으나 이는 변압기 제작비용이 높아지는 문제가 있다[1-3]. 변압기 저소음을 위하여 방음용 엔클로저(enclosure)를 사용할 경우, 소음저감 효과는 크나 설치면적과 비용이 증가된다[2,3]. 변압기의 탱크를 이중 탱크로 사용하는 방법도 널리 이용되나, 외측 탱크의 고유진동수를 가능한 낮게 설계해야 하는 제작상의 어려운 점과 운송이 곤란한 단점이 있다[3,4]. Hori는 이 같은 단점을 보완하기 위해 변압기 탱크 외측에 진동 절연을 고려한 차음판을 사용하여 작은 설치 면적으로 변압기 소음을 저감시켰다[5]. Yannucci는 능동 소음제어 시스템(active noise control system)을 최초로 변압기에 적용하였다[6]. 최근에는 이 시스템이 일부 변압기에서 상용화가 되고 있다.

이와 같이 변압기 저소음화를 위하여 많은 연구가 진행되고 있지만 의외로 변압기 코어에서 발생하는 가진력에 의해 변압기 구조물이 공진하는 사례가 많고 이로 인한 소음이 매우 커지는 경우가 많다. 따라서 변압기의 저소음화를 위하여 먼저 변압기 구조물의 공진 회피가 매우 중요하다. 본 논문에서는 변압기 구조물의 공진 회피를 통하여 소음을 저감시킨 2가지 사례를 소개한다.

2. 변압기의 소음특성

변압기 철심은 0.3mm 정도의 얇은 규소강판을 적층하여 제작된다. 변압기 권선에 전류가 흐르면, 자속이 발생하여 철심이 자화되어 매우 작은 탄성변형이 발생하는데, 이를 자왜라 하며, 변형을 ϵ 로서 다음과 같이 표현되며, 그 크기는 10^{-6} 정도이다[1-4].

$$\epsilon = \Delta l / l \tag{1}$$

여기서 Δl 는 탄성 변형량이며, l 은 초기 길이이다. 이 변형량은 자속밀도 B 와 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{\Delta l}{l} = CB^2 \tag{2}$$

여기서 C 는 비례상수이다.

그림 1과 같이 철심을 통과하는 자속밀도의 변화를 사인정현파로 가정하면, 식 (2)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta l}{l} = CB^2 \sin^2 \omega t = C_1 B_1^2 \cos 2\omega t \tag{3}$$

여기서 ω 는 진원주파수를 나타내며, 만약 60Hz일 경우 진원주파수 2배의 진동이 발생함을 알 수 있다. 그러나 실제 자속밀도의 변화가 정확한 정현파가 아님에 따라 2ω 의 하모닉스 성분들이 나타나게 된다. 박판의 철심이 자왜현상으로 인해 변형이 발생하면, 그림 2(a)와 같이 종방향으로 진동이 일어나고, 이 철심을 적층하여 클램프 상태로 만들면 그림 2(b)처럼 횡방향으로 진동이 발생한다. 횡 방향의 진동은 종 방향의 진동에 못지않게 많은 소음 에너지를 발생시킨다. 철심의 자기 변형현상에 의한 소음 이외에 변압기에서 발생할 수 있는 소음 원인은 다음과 같다.

[†] 교신저자, 正會員 : (주)효성 중공업연구소 구조진동팀 팀장
 E-mail : choiwh@hyosung.com

^{*} 正會員 : (주)효성 중공업연구소 구조진동팀 책임연구원

^{**} 正會員 : (주)효성 중공업연구소 구조진동팀 선임연구원
 接受日字 : 2005年 9月 21日

最終完了 : 2005年 10月 12日

- 1) 철심 부품간의 틈새에 의한 진동·소음
- 2) 철심과 단철간의 조립오차에 의한 틈새 발생부 진동·소음
- 3) 조임볼트(tie rod)의 진동·소음

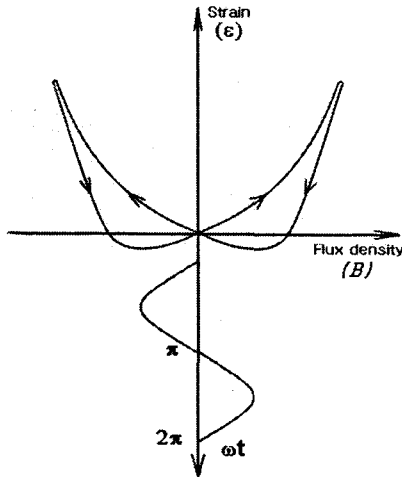
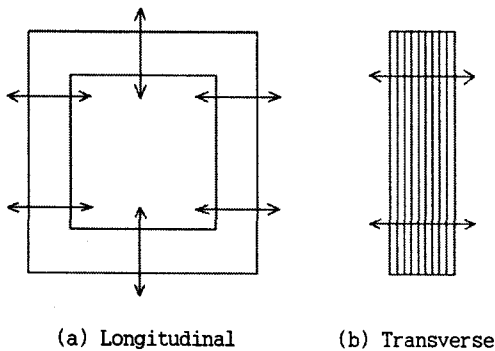


그림 1 자속밀도 변화에 의한 철심의 자왜곡선
 Fig. 1 Magnetostriction curve under a sinusoidal flux density variation



(a) Longitudinal (b) Transverse
 그림 2 철심의 자왜 진동
 Fig. 2 Vibration of core by magnetostriction

3. 철심공진 사례

3.1 진동소음의 주파수 분석

소음원인 분석에 사용된 몰드(mold) 변압기의 외형도와 변압기 사양을 그림 3과 Table 1에 각각 나타냈다. 소음이 정상인 변압기와 높은 소음이 발생하는 변압기의 진동과 소음의 주파수 특성을 측정한 결과를 그림 4와 5에 각각 나타냈다. 본 연구에서 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 마이크로폰을 변압기에서 1.5m 떨어진 지점에서 측정하였다. 진동주파수 분석 결과, 두 변압기 모두에서 전류 주파수 2배의 하모닉스 성분이 나타났다. 이는 앞에서 언급한 변압기의 소음 특성과 잘 일치한다.

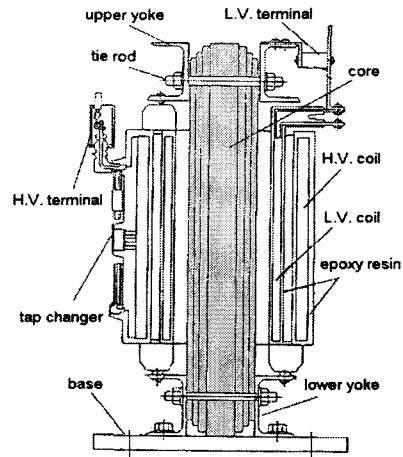


그림 3 몰드변압기의 구조
 Fig. 3 Structure of mold transformer

표 1 몰드 변압기의 사양

Table 1 Specification of mold transformer

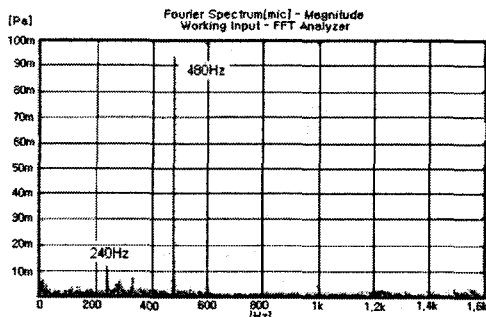
Phase	3Φ
Capacity	200kVA
Voltage ratio	22900/ 380 (Voltage)
Core weight	6566(N)
Core material	Silicon steel grade 10

정상 변압기 및 높은 소음 변압기 모두 주성분은 480Hz임을 알 수가 있으며, 높은 소음 변압기의 소음은 480Hz 성분이 증가함으로써 높은 소음이 발생함을 판단할 수 있다. 진동소음 주파수 분석결과도 마찬가지로 480Hz 성분이 탁월함을 알 수가 있다. 따라서 480Hz 성분의 진동이 소음의 원인임을 알 수가 있다. 여기서 진동성분에는 120, 240, 480Hz 성분이 나타나지만, 소음성분은 480Hz만 탁월하다. 이는 변압기 소음은 기계의 상태보다는 환경 측면에서 측정이 이루어지기 때문에 소음측정시 A- 웨이팅을 취하여 비교적 저주파수인 120, 240Hz 성분의 소음이 작게 나타난 것이다.

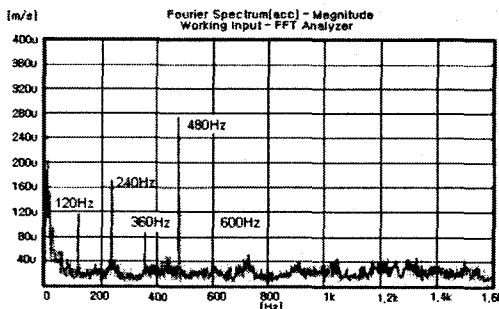
3.2 음향 인텐시티 분석

소음의 차이를 규명하기 위하여 철심간의 적층 상태, 단철과 철심간의 밀착상태 등 두 변압기간의 조립상태를 확인하였으나, 차이점을 발견할 수가 없었다. 또 절연관과 코일의 진동을 측정된 결과 역시 큰 차이는 없었다. 따라서 소음원을 정확히 파악하기 위하여 음향 인텐시티를 측정하였다.

측정 장소의 압소음은 61dB(A)이며, 변압기의 크기에 비해 측정공간이 매우 크기 때문에 반사음의 영향은 없었다. 소음 주파수 분석 결과, 1kHz 이상의 소음성분은 나타나지 않았기 때문에 음향 인텐시티 탐침자의 스페이서는 50mm를 사용하여 저주파수 측정한계를 크게 하였고, 인텐시티 탐침자는 덴마크 B&K사의 Type 3548을 사용하였다. 그림 6은 이를 측정 한 결과이다. 두 변압기에서 공통점은 모두 U, W상보다 V상의 소음이 높음을 알 수가 있다.

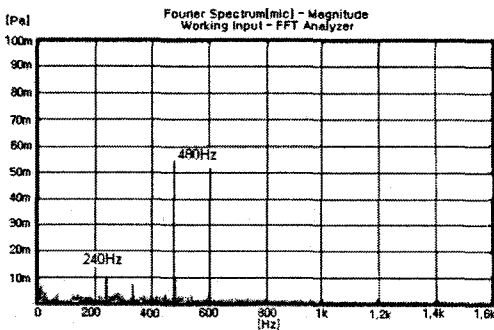


(a) Sound spectrum

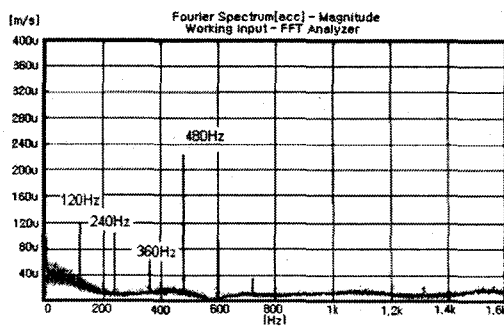


(b) Vibration spectrum

그림 4 비정상 변압기의 소음진동 특성
Fig. 4 Sound and vibration characteristic of abnormal condition



(a) Sound spectrum

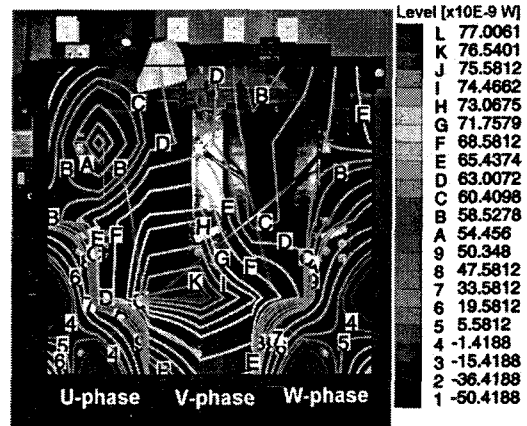


(b) Vibration spectrum

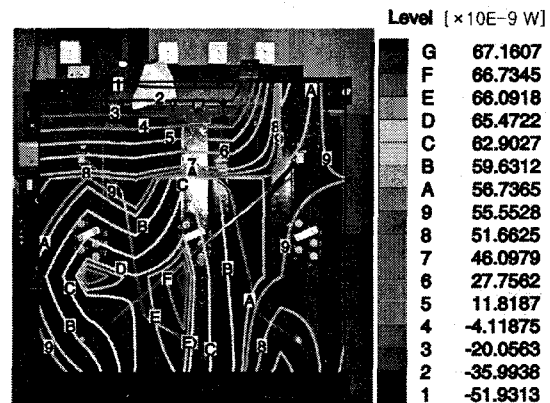
그림 5 정상변압기의 소음진동 특성
Fig. 5 Sound and vibration characteristics of normal condition

3.3 고유진동수 측정

음향 인텐시티를 측정된 결과, 모두 V상의 소음이 크게 나타남에 따라, V상의 공진여부를 확인하기 위하여 충격시험을 수행하였다. 충격시험 결과, 소음이 높은 변압기 V상의 고유진동수는 480Hz로 측정되었고, 정상 변압기의 V상은 472Hz로 나타났다.



(a) Abnormal transformer



(b) Normal transformer

그림 6 소음 강도 지도
Fig. 6 Sound intensity map

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 똑같은 변압기 철심의 고유진동수가 약간씩 다른 점에 착안하여 철심 조립방법을 통하여 공진 문제를 해결하고자 검토하였다. 철심을 고정하는 단철의 조임볼트 체결토크에 따른 V상의 고유진동수 변화를 측정된 결과는 그림 8과 같다. 체결토크가 300N·m 이상에서는 고유진동수가 포화되어 V상의 고유진동수를 높이는 것은 불가능하다. 그러나 체결토크를 240N·m까지 낮추어도 철심의 구조적 안전성에는 문제가 없으므로 단철의 체결토크를 낮추어 V상의 공진을 회피하는 것이 가능하였다. 조치 후 소음을 측정된 결과, 소음 값은 74dB(A)에서 65dB(A)로 낮아져 정상 수준이 되었다. 이와 같이 같은 모델의 변압기에서 소음크기가 크게 차이가 발생하였던 것은 V상이 공진 영

역 근처에 있었기 때문에 철심과 단철을 고정하는 조임 볼트의 체결강도에 따라 공진이 발생된 경우에는 높은 소음이 발생하였던 것으로 판명되었다.

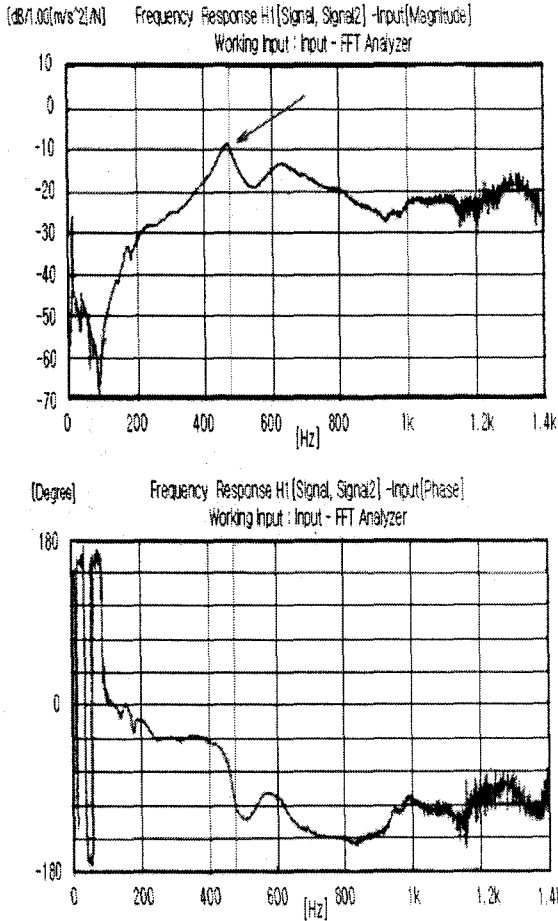


그림 7 V상 철심의 고유진동수
Fig. 7 Natural frequency of V-phase core

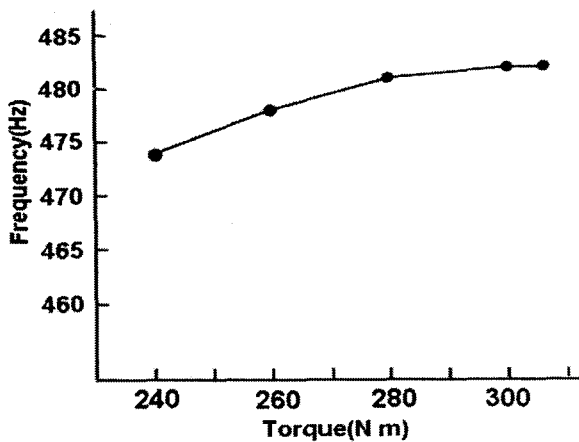


그림 8 조임볼트 토크 변화에 따른 공진주파수 변화
Fig. 8 Comparison of resonance frequency with changing tying torque

4. 탱크 월 공진 사례

변압기의 특정 면에서 소음이 높아 탱크 월의 진동을 측정하여 진동이 가장 높은 부분의 진동 주파수 분석을 한 결과, 그림 9와 같은 전원 주파수의 2배수인 120Hz 진동이 나타났다.

4.1 진동현상

변압기의 진동이 높은 부분은 그림 10과 같이 압력판과 수직 브레이스에 의해 만들어지는 사각 철판에서 발생하고 있으며, 내부 압력판 부근의 탱크 월에서 진동이 가장 높다. 다른 변압기의 진동크기는 표 2와 같고, 진동의 주파수 성분은 120Hz 성분이다.

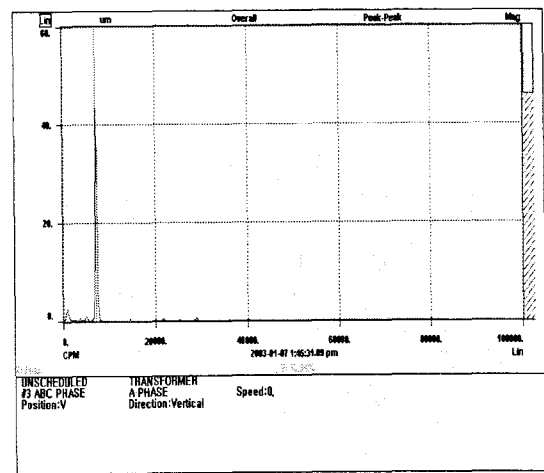


그림 9 주파수 분석 결과
Fig. 9 Frequency analysis result

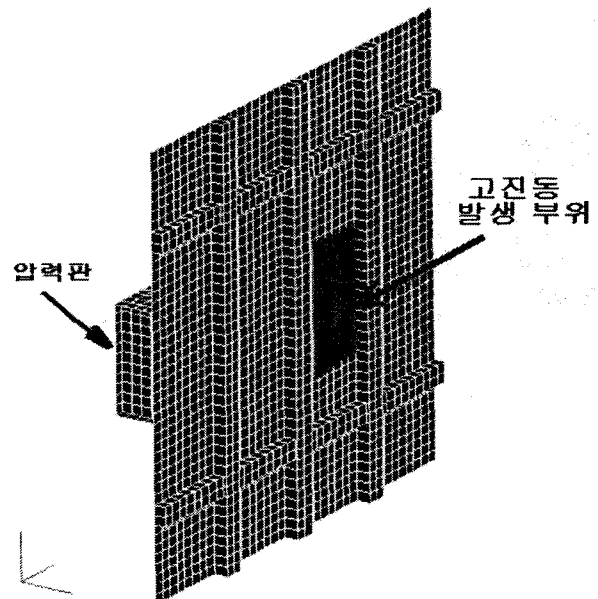


그림 10 고진동 위치
Fig. 10 Position of high vibration

4.2 진동원인

고진동의 원인은 그림 10에서 나타난 사각 철판의 고유진동수(2차)와 변압기에서 발생하는 120Hz 성분의 가진 주파수와와의 공진에 의한 것이다. 그림 11은 고진동이 발생하는 변압기 월 부분의 고유진동수를 해석한 결과이다. 보기가 용이하도록 고진동 발생부위만 그림 12에 다시 나타내었다. 해석 결과, 탱크 월의 2차 고유진동수가 변압기 발생주파수 120Hz와 일치함을 알 수가 있다. 실제 고진동이 발생하는 부분의 진동모드를 측정한 결과는 그림 12와 같은 모드형상을 하고 있다.

표 2 진동 데이터
Table 2 Vibration data

3호기			4호기		
A상	B상	C상	A상	B상	C상
45 μ m	52 μ m	253 μ m	71 μ m	171 μ m	60 μ m

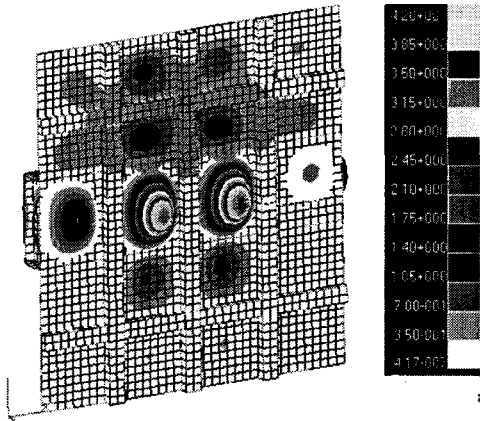


그림 11 1차 고유진동수
Fig. 11 1st. Natural frequency

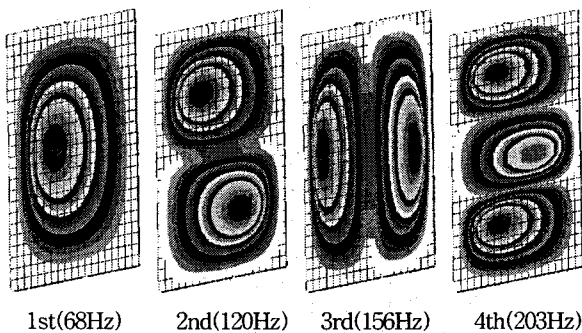


그림 12 고유진동수 분석 결과
Fig. 12 Results of natural frequency analysis

4.3 진동 억제 대책

그림 13은 120Hz의 공진을 회피하기 위하여 50×150의 사각철판(부가질량)의 두께를 9, 21, 32mm로 각각 변경하였을 때 1차에서 4차까지의 고유진동수 변화를 해석한 결과이다. 0t는 부가질량이 없는 경우이다. 32mm의 부가질량을 부착하

였을 경우, 120Hz의 2차 고유진동수가 116Hz로 변경되어 공진 현상은 사라질 것으로 판단되며, 다른 고유진동수의 변화는 문제가 되지 않음을 알 수가 있다.

그림 14는 높은 진동이 발생하고 있는 철판에 단위 가속도 크기로 가진시킬 때 부가질량의 크기에 따른 진동주파수 응답을 나타내는 것이다. 현재 그림 14 a)에서 120Hz 성분의 크기가 약 6×10^{-3} 이나 부가질량 50×150×32 크기의 철판을 사용할 경우, 그 크기가 1×10^{-3} 으로 약 6배 정도로 진동이 낮아짐을 알 수가 있다. 그림 14 d)에서 203Hz의 4차 모드의 진동성분이 부가질량으로 인해 매우 커지나, 이는 변압기에서 203Hz의 가진 주파수가 존재하지 않기 때문에 이 성분의 크기는 문제가 되지 않는다.

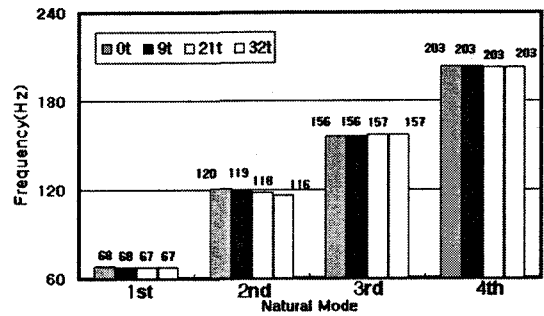
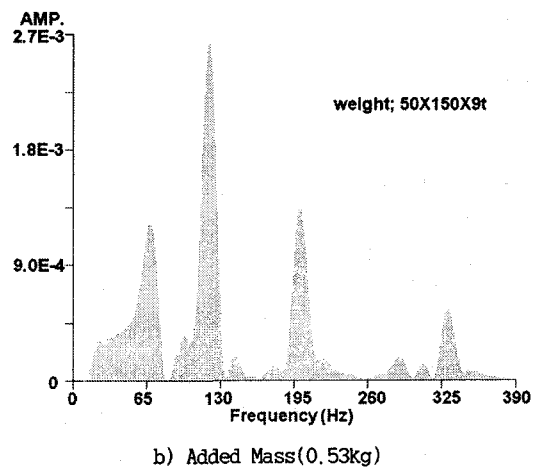
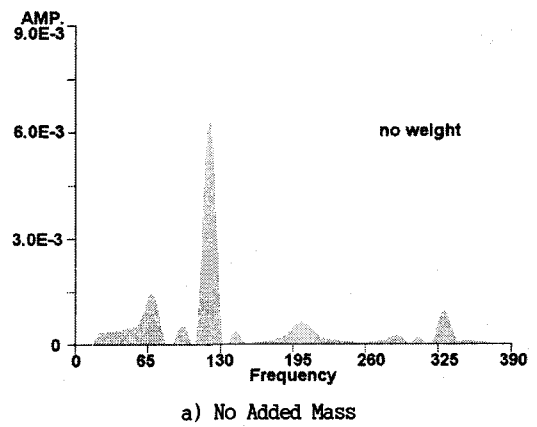


그림 13 부가 질량 변화에 따른 고유진동수 변화
Fig. 13 Natural frequency changes by added mass

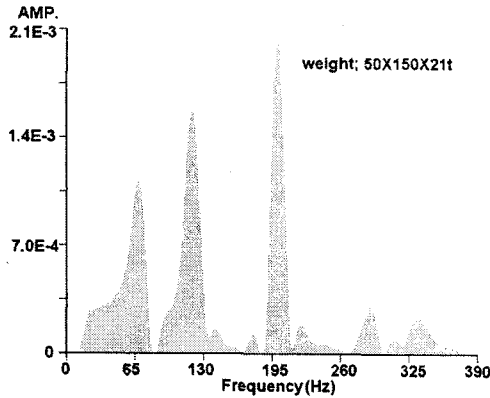


4. 결 론

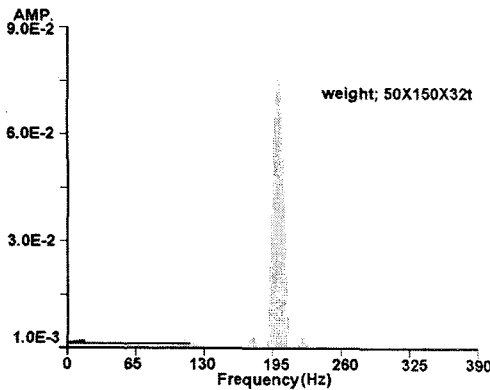
본 연구에서는 높은 소음이 발생하는 몰드 변압기의 소음 원인을 체계적으로 분석하였고, 그 원인이 V상의 공진임을 판명하였다. 소음저감 대책으로 단철 조임 볼트의 체결강도를 조절하여 V상의 공진을 회피시킴으로서 74dB(A)의 소음을 65dB(A)까지 낮출 수가 있었다. 따라서 근본적인 소음문제를 해결하기 위하여, 480Hz의 철심 고유 진동수를 변경하는 것이 필요하게 된다. 탱크 월의 공진에 의한 소음의 경우, 월에 적절한 부가질량을 가함으로써 공진회피가 가능하였다. 본 사례와 같이 변압기의 저소음화를 위하여 변압기 구조물의 공진회피는 매우 중요하며, 공진시 매우 높은 소음을 발생시키기 때문에 변압기 구조물의 설계단계에서 주의를 요한다.

참 고 문 헌

- [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, 83WM116, 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.



c) Added Mass(1.2Kg)



d) Added Mass(1.9Kg)

그림 14 부가 질량 변화에 따른 주파수 응답해석 결과
Fig. 14 Frequency response analysis by added mass

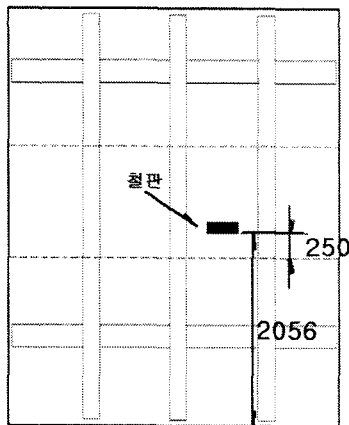


그림 15 부가 질량 부착 위치
Fig. 15 Position of added mass

4.4 부가질량 부착

부가질량은 철판을 사용하며 크기는 50×150×32이다. 부가 질량의 위치는 내부 압력판에서 250mm, 하부탱크로부터 2056mm 위 지점이며, 양쪽 브레이스 사이의 중간이다. 용접은 각장 6mm, 길이 20mm로 철판 위와 아래에 각각 두 곳을 펠렛 용접한다. 부가질량의 부착 위치는 탱크 내부에 압력판이 놓인 위치이기 때문에 용접이 가능하다.

저 자 소 개



최 원 호 (崔 沅 鎬)

1958년 12월 10일생. 1987년 부산수산대 학 대학원 박용기계공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 선박기계과 졸업(공박). 1987년 ~ 현재 (주)효성 중공업연구소 구조진동팀 근무

Tel : 055-268-9910, Fax : 055-268-9926
E-mail : choiwh@hyosung.com



김진 (金振)

1971년 10월 24일생. 1995년 영남대 기계공학과 졸업. 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1997년 ~ 현재 (주)효성중공업연구소 구조진동팀 근무

Tel : 055-268-9938, Fax : 055-268-9926

E-mail : jkim@hyosung.com



석호일 (石皓壹)

1975년 6월 26일생. 2001년 부경대 기계공학과 졸업. 2003년 동 대학원 기계설계학과 졸업(석사). 2003년 ~ 현재 (주)효성중공업연구소 구조진동팀 근무

Tel : 055-268-9937, Fax : 055-268-9926

E-mail : shi626@hyosung.com