

# 조화응답해석을 이용한 변압기의 소음저감 방법에 관한 연구

## A study on the noise reduction method of transformer using harmonic response analysis

김창섭,<sup>1</sup> 김원진<sup>2†</sup>

(Chang-Seop Kim<sup>1</sup> and Won-Jin Kim<sup>2†</sup>)

<sup>1</sup>계명대학교 기계공학과, <sup>2</sup>계명대학교 진동소음연구실

(Received February 16, 2024; revised April 15, 2024; accepted April 18, 2024)

**초 록:** 본 연구에서는 변압기 설계에 활용하기 위해 조화응답해석을 이용하여 소음저감 대책에 따른 소음 저감 예측 방법을 제안한다. 변압기 부품들의 재질을 간단한 형상의 시편으로 제작하고, 실험과 해석의 모드 비교분석을 통해 실제 변압기를 구성하는 부품들의 동적 탄성계수를 규명하였다. 변압기의 유한요소모델을 구현하고 변압기의 가진력을 도출하여 조화응답해석을 수행하였다. 그리고 조화응답해석 결과에서 변압기의 음향파워레벨(Sound power level)을 이론적으로 도출하였다. 마지막으로 소음저감 대책을 수립하고, 적용 전·후에 따른 실험과 해석의 소음 저감량을 비교하였다. 대책별 소음저감 비교분석을 통해 실험과 해석의 경향이 일치하는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 조화응답해석, 구조기인소음, 소음저감 방법, 소음 예측

**ABSTRACT:** This study proposes a method to predict noise reduction based on noise-reduction measures, using harmonic response analysis, for transformer design. The dynamic elastic coefficients of the components comprising the actual transformer were determined by manufacturing the materials of the transformer components into simple-shaped specimens, followed by a comparison of the modes between the experiments and the analyses. A finite element model of the transformer was implemented, and harmonic response analysis was performed by deriving the exciting force of the transformer. Subsequently, the theoretical sound power level of the transformer was derived from the results of the harmonic response analysis. Finally, noise reduction measures were established, and the noise reduction amounts were compared between the experiments and the analyses, before and after applying the measures. Through the comparison and analyses of the noise reduction measures, it was confirmed that the trends in the experiments and analyses matched.

**Keywords:** Harmonic response analysis, Structure borne noise, Noise reduction method, Noise prediction

**PACS numbers:** 43.20.Ye, 43.40.At, 43.50.Jh

### 1. 서 론

최근 4차 산업 기반의 발전에 따른 전기에너지에 대한 수요가 급격히 증가되고 있다. 이에 따라 송전 효율을 높이기 위해 변압기의 전압은 초고압 및 대용량화되는 추세이며, 특히 변압기는 주거지역에서 24시간 운전되는 제품으로 소음에 대한 민원이 증가

하고 있는 추세이다.<sup>[1]</sup>

변압기 소음과 관련된 연구동향을 살펴보면, Park *et al.*<sup>[2]</sup>은 변압기의 부하에 따른 권선소음과 냉각팬 소음이 전체 소음에 미치는 영향을 분석하고, Kim과 Kim<sup>[3]</sup>은 철심과 권선의 결합 구조를 규명하기 위하여 변압기의 진동특성을 파악하고 모드해석을 통해 철심과 권선의 고유진동수 및 모드형상을 확인하였다.

†Corresponding author: Won-Jin Kim (wjkim@kmu.ac.kr)

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, 1095 Dalgobeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Republic of Korea

(Tel: 82-53-580-5265, Fax: 82-53-580-5165)



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Choi와 Kim<sup>[4]</sup>은 철심에 틈새가 존재할 때의 전자력을 평가하고, 철심을 고정하는 단철 조임볼트의 체결강도 조절을 통해 소음을 저감하였다. Choi *et al.*<sup>[5]</sup>은 실험을 통해 변압기 외벽의 공진을 확인하고, 보강을 통한 해당부위의 강성을 증가시켜 외벽의 진동을 저감하였다. Yu *et al.*<sup>[6]</sup>은 변압기의 방화벽 사이에 흡음형 방음벽을 설치하여 외부로 전달되는 소음을 저감하였다.

변압기 소음을 저감하기 위한 동향을 살펴보면, 실험적 방법을 통한 개선방법에 대한 연구로, 해석적 방법을 통한 변압기 소음저감 효과 예측에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 조화응답 해석을 통해 변압기에서 발생하는 음향파워레벨을 이론적으로 계산할 수 있는 방법을 제안하고, 제안된 해석적 방법을 이용하여 소음저감 대책에 대한 효과를 분석 후, 실험결과를 통해 검증하고자 한다.

## II. 변압기 부품 물성치

변압기는 크게 부품을 구성하는 금속류와 절연을 위해 사용되는 절연물로 구성되어 있다. 먼저 변압기를 구성하는 주요 재료인 강철, 전기기기의 전열용으로 사용되는 프레스보드, 합성 플라스틱인 베이클라이트의 재료로 시편을 제작하였다. 시편들의 크기 정보는 Table 1에 정리하였다. 그리고 주파수응답 함수를 이용한 실험적 모드해석과 유한요소모델을 이용한 모드해석 결과의 비교분석을 통하여 해석모델에 적용할 부품들의 물성치를 도출하였다.

Single Input/Single Output(SISO) 방법을 사용할 때, 입력 신호  $x(t)$ 와 출력 신호  $y(t)$ 에서 발생하는 외부 잡음을 고려하여 주파수응답 함수를 평가하여야 한다. Fig. 1은 SISO 시스템에서 외부 잡음 신호가 포함된 시스템의 특성을 나타낸다. 여기서  $m(t)$ ,  $n(t)$ 는

Table 1. Size of transformer part specimens.

Material	Size [mm]		
	Height	Width	Depth
Steel	375	120	3.2
Pressboard	170	90	2
Bakelite	170	90	3

각각 입력과 출력에서의 외부 잡음이며, 이들이 서로 비상관성을 가진다면 충격 망치로 가진하는 경우에는 입력 노이즈가 적기 때문에 절하평가 방법이 가능하다.

절하평가 주파수응답 함수  $H_1(f)$ 는 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$H_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \quad (1)$$

여기서  $S_{xx}(f)$ 는 입력부의 자기스펙트럼 밀도 함수를 의미하며,  $S_{xy}(f)$ 는 입력과 출력사이의 상호스펙트럼 밀도 함수이다.

측정방법은 Fig. 2와 같은 기준점에서 충격망치를 이용하여 0Hz~3200Hz의 주파수를 가진하고, 3축 가속도계를 이용하여 15 지점의 응답을 측정하였다. 측정 중 상관도 함수를 분석하여 입력의 응답에 대한 기여도의 평가가 가능하다. 상관도 함수는 입력과 출력 간의 선형성을 나타내는 평가방법으로서 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \leq 1, \quad \forall f. \quad (2)$$

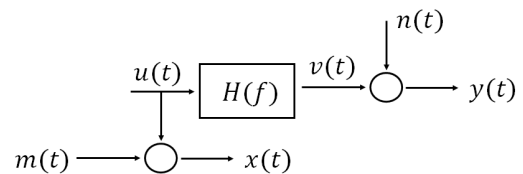


Fig. 1. Single-input/single-output system with extraneous noise at input and output stages.

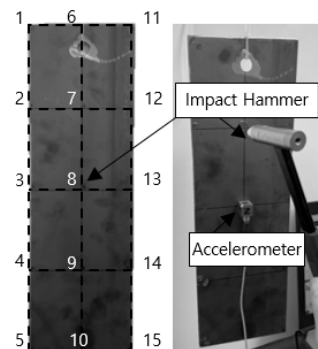


Fig. 2. Experimental setup of modal test.

Table 2. Comparison of natural frequency modes of experimental and analysis results for steel specimen.

Mode	Natural frequency [Hz]		Difference [Hz]	Error [%]
	Experiment	Analysis		
1st	115.5	115.3	0.2	0.2
2nd	212.7	219.2	6.5	3.1
3rd	320.6	319.2	1.4	0.4

Table 3. Comparison of natural frequency modes of experimental and analysis results for pressboard specimen.

Mode	Natural frequency [Hz]		Difference [Hz]	Error [%]
	Experiment	Analysis		
1st	271.7	272.1	0.4	0.2
2nd	332.9	303.3	29.6	8.9
3rd	692.3	677.8	14.5	2.1

Table 4. Comparison of natural frequency modes of experimental and analysis results for bakelite specimen.

Mode	Natural frequency [Hz]		Difference [Hz]	Error [%]
	Experiment	Analysis		
1st	235.1	233.0	2.1	0.9
2nd	242.0	254.3	12.3	5.1
3rd	543.2	568.9	25.7	4.7

Table 5. Material properties of transformer part specimens.

Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Steel	7,750	175,000	0.3
Pressboard	1,135	7,250	0.4
Bakelite	1,997	21,000	0.4

일반적으로 상관도함수의 값이 0.95 이상인 경우에 측정된 주파수응답함수를 신뢰할 수 있고, 0.9 이하인 경우에는 신뢰도가 떨어진다.

Tables 2~4과 Figs. 3~5에 각 시편에 대한 실험과 해석의 모드 형상을 나타내고, Table 5에 모드해석에 적용한 부품들의 물성치를 나타내었다.

### III. 유한요소모델

변압기를 구성하는 부품은 외함, 커버, 호흡기, 철

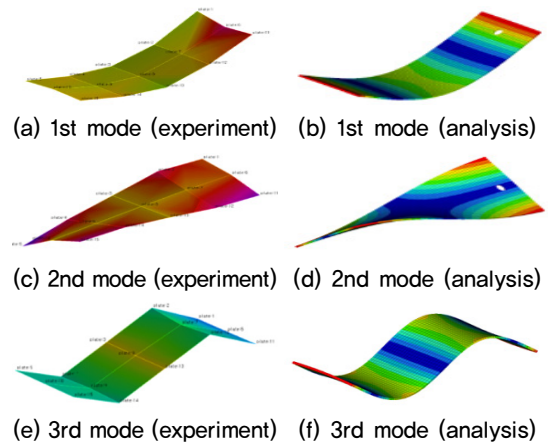


Fig. 3. (Color available online) Comparison of mode shapes from experiment and analysis results for steel specimen.

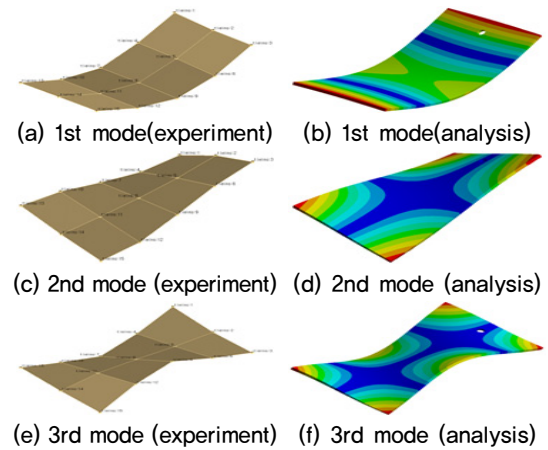


Fig. 4. (Color available online) Comparison of mode shapes from experiment and analysis results for pressboard specimen.

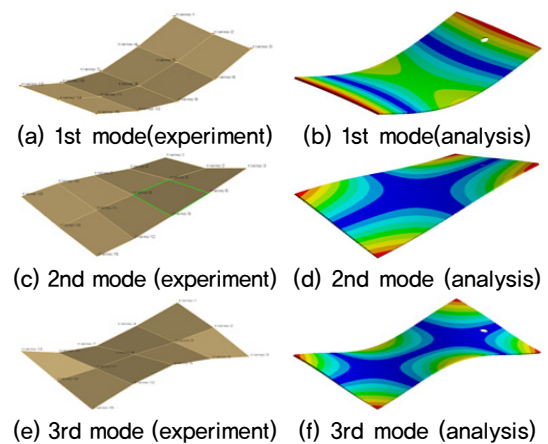


Fig. 5. (Color available online) Comparison of mode shapes from experiment and analysis results for bakelite specimen.

심, 권선, 요크빔, 하부 베이스, 탭변환장치, 절연물 등으로 구분할 수 있다.

Fig. 6은 유한요소모델로, 총 절점 수는 503,523개, 요소 수는 122,373개이다. 해석모델에 적용한 물성치는 Table 6에 정리하였으며, 경계조건은 Fig. 7에 나타내었다.

하중조건은 Fig 8(a)과 같이 V상 철심 중심부에 적용하였으며, 조화응답해석에 적용한 가진력을 Table 7에 나타내었다. 가진력은 Fig. 9와 같이 해석의 가속도 응답과 측정된 가속도 응답의 오차가 최소화 되

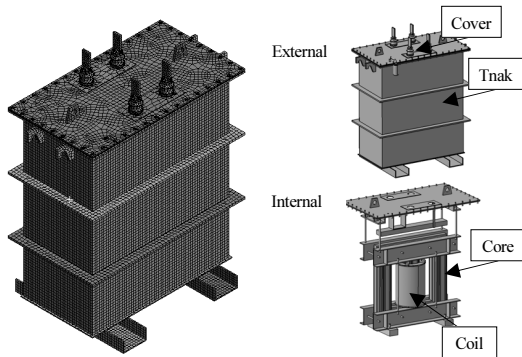


Fig. 6. Finite element model of overall transformer.

Table 6. Material properties of transformer parts used to analysis.

Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Steel	7,750	175,000	0.3
Pressboard	1,135	7,250	0.4
Bakelite	1,997	21,000	0.4
Wood	1,174	10,000	0.34
Cooper	4,700	110,000	0.35
Cork rubber	850	94.8	0.49

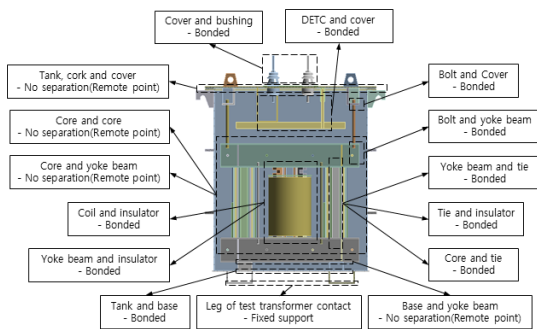


Fig. 7. (Color available online) Boundary condition of transformer.

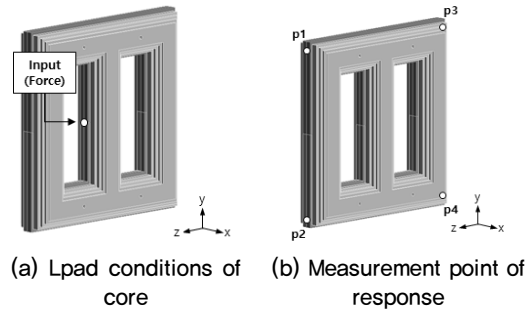
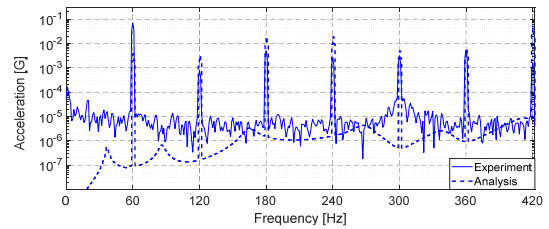


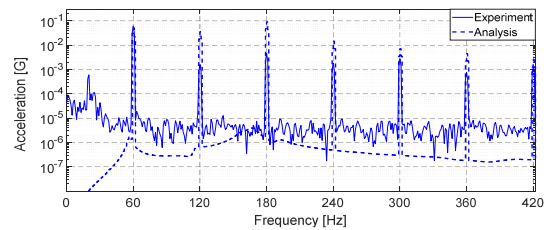
Fig. 8. Load conditions and measurement point of response.

Table 7. Excitation force obtained from harmonic response analysis.

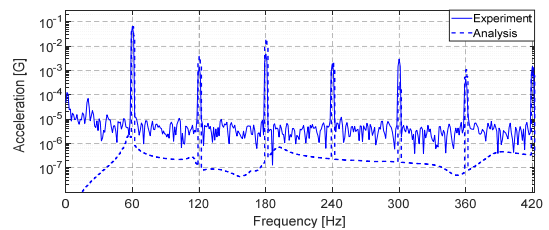
Direction	X	Y	Z	
Force [N]	60 Hz	0.40	1.25	0.50
	120 Hz	0.20	0.75	0.25
	180 Hz	0.13	0.50	0.10
	240 Hz	0.12	0.37	0.10
	300 Hz	0.10	0.25	0.10
	360 Hz	0.06	0.20	0.05
	420 Hz	0.06	0.13	0.05



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 9. (Color available online) Comparison of core vibration level.

도록 시행착오를 통해 주파수의 성분별, 방향별로 가진력을 조정하여 도출하였다.

#### IV. 조화응답해석을 이용한 소음저감 효과분석

변압기에 전압이 인가되면 Fig. 10과 같이 철심과 외함의 표면적에서 수직방향의 속도가 발생하며, 표면의 떨림에 의해 소음이 발생한다. 이때, 음향파워는 Eq. (3)으로 정의된다.

$$W = \rho c \sum_{i=1}^n S_i v_i^2, \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $c$ 는 음속,  $S_i$ 는 표면적,  $v_i^2$ 는  $i$ -표면적의 모든 절점에서 발생하는 수직방향 진동 속도의 제곱 평균을 의미하며, 계산에 이용된 변압기의 표면적은 Table 8에 정리하였다.

음향파워레벨은 음원에서 방사되는 음향파워를 데시벨 단위로 나타낸 값이며, 구조물의 방사소음을 평가하는 중요한 요소이다. 음향파워레벨은 다음의 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$PWL = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right), \quad (4)$$

여기서  $W$ 는 음향파워,  $W_0$ 는 음향파워레벨의 기준 값으로써  $10^{-12}$  이다.

변압기의 소음은 외함의 표면진동으로 인하여 발생하는 구조전달음과 철심의 진동으로 인한 소음이 공기로 전달되는 공기전달음으로 구분된다. Eqs. (3)

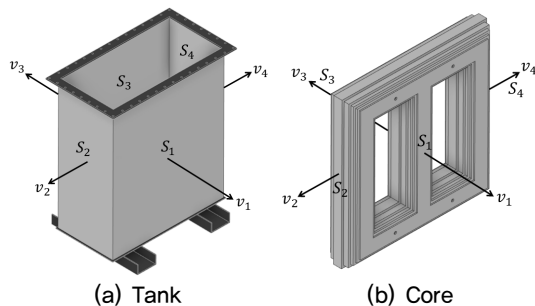


Fig. 10. Notation of normal velocity and surface areas of the transformer.

과 (4)의 과정으로 조화응답해석 결과에서 얻은 각 표면의 진동속도로 변압기의 구조전달음과 공기전달음을 계산할 수 있다.

변압기의 소음저감 방안을 수립하여 해석 항목을 Table 9과 같이 설정하였다. Case 1은 하부의 진동절연으로, 하부 베이스와 변압기 외함의 바닥면 사이에 10 mm 두께의 코르크 패드를 삽입한 상태이다. Case 2는 하부 진동절연 상태에서 상부 고정 볼트를 제거한 상태로 실제 적용은 불가능하지만, 상부절연을 통한 저감 효과를 확인하기 위한 방안이다. Case 3은 Compressed Layer Damper(CLD)를 적용하는 방법이며, 변압기의 외벽에 10 mm 두께의 코르크 패드, 3.2 mm 두께의 강판 순으로 부착하여 진동의 감쇠 효과를 통해 소음을 저감하는 방법이다. Case 4는 Fig. 11에 나타난 소음저감 방안들을 모두 적용한 조건이다.

조화응답해석 결과에서 음향파워레벨을 계산하기 앞서, CLD로 인한 추가적인 공기전달음의 투과손실을 고려하였다. CLD는 구조상 변압기의 전체 벽면에 빈틈없이 설치하는 것이 불가능하며, CLD를 적용 하였을 때 외벽의 면적에 약 80 % 정도만 설치가 가능하였다. 투과손실은 재료에 조금의 틈이 존재한다면 그 틈으로 인해 상당량의 소음이 외부로 전달되며 방음벽에 의한 소음효과는 현저하게 저해된다.<sup>[7]</sup> 따라서 CLD 적용으로 인한 공기전달음의 투과손실은 기존 상태에 비해 1 dB의 추가적인 차음효과가 있다고 가정하였다.

Table 8. Surface areas of the transtomer.

Parts	Surface areas [m <sup>2</sup> ]			
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
Tank	0.923	0.456	0.923	0.456
Core	1.291	0.203	1.291	0.203

Table 9. Cases of harmonic response analysis to reduce noise and vibrations.

No.	Case
Ref	Existing condition
1	Vibration isolation of bottom
2	Vibration isolation of top and bottom
3	CLD
4	Vibration isolation of top and bottom + CLD

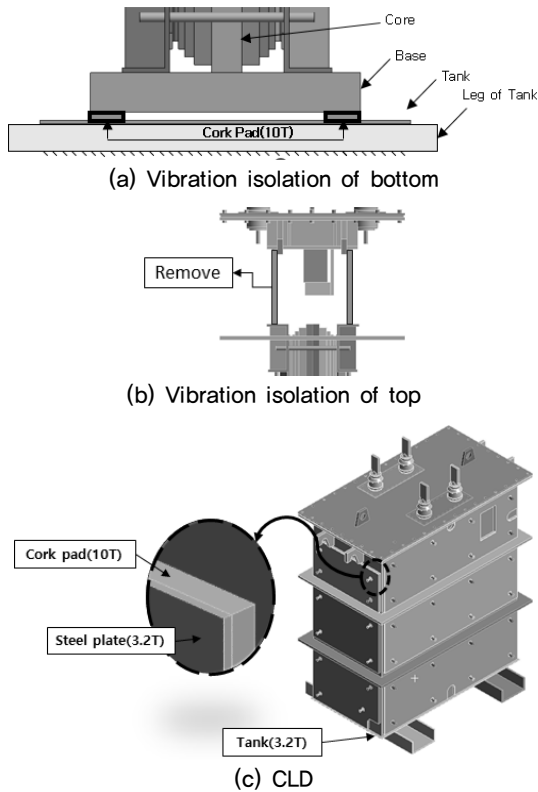


Fig. 11. Sketch of case 1, 2, and 3 to reduce noise and vibrations.

Case별 해석 결과를 통해 계산된 구조전달음과 공기전달음을 Table 10에 정리하였다. Table 10에 계산된 음향파워레벨은 60 Hz~420 Hz의 각 조화성분 대역에서 계산된 소음의 합이다. 그리고 Table 11에 소음저감 방안들의 구조전달음과 공기전달음의 저감량을 정리하였다.

변압기의 구조 특성상 외함 내부 진동은 측정이 불가능하며, 소음측정 결과만으로는 변압기의 구조 전달음과 공기전달음의 기여도 확인이 어렵다. 따라서 구조전달음과 공기전달음이 비슷한 수준이라 가정하여 기여도를 각각 50 %로 설정하였다. 그리고 Eq. (5)를 활용하여 해석결과에서 계산된 구조전달음과 공기전달음의 소음저감량을 합산하여 Table 12에 Case별 소음저감 효과를 정리하였다.

$$\Delta L_{total} = -3 + 10 \log \left( 10^{\frac{-A}{10}} + 10^{\frac{-B}{10}} \right). \quad (5)$$

여기서 A는 구조전달음의 저감량, B는 공기전달음

Table 10. Calculated sound power level of cases.

Case no.	Sound power level [dB]	
	Structure borne noise	Air borne noise
Ref	47.9	39.2
1	40.8	39.0
2	29.4	38.6
3	46.7	37.4
4	29.3	37.6

Table 11. Noise level reduction of each case.

Case no.	Noise level reduction [dB]	
	Structure borne noise	Air borne noise
1	7.1	0.2
2	18.5	0.6
3	1.2	1.8
4	18.6	1.6

Table 12. Comparison of noise level reduction from analysis results.

Case no.	Noise level reduction [dB]
1	2.4
2	3.6
3	1.5
4	4.6

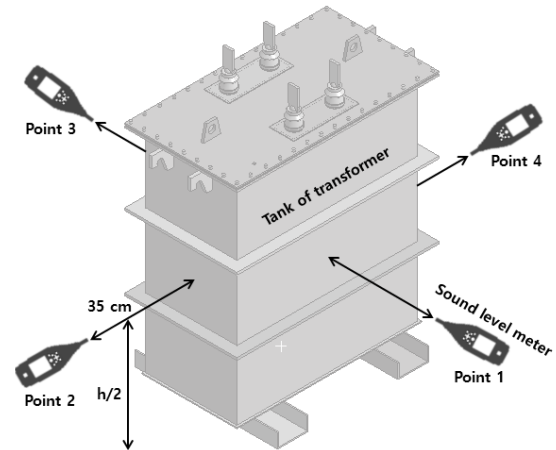


Fig. 12. Sound level meter positions.

의 저감량이다.

조화응답해석을 통해 계산된 소음저감 효과를 실험적으로 검증하기 위하여 각각의 Case별로 변압기의 소음을 측정하였다. Fig. 12와 같이 변압기 외함의 전방 35 cm, 변압기 높이의 중간 지점에 소음

Table 13. Experimentally measured sound pressure level at each case.

Case no.	Sound pressure level [dB]				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Average
Ref	66.5	60.3	60.7	66.6	64.5
1	62.9	58.5	59.6	64.0	61.8
2	64.8	57.4	56.3	60.8	61.1
3	62.8	61.1	59.9	65.2	62.7
4	61.3	61.8	57.6	57.3	60.0

Table 14. Comparison of noise level reduction from analysis and experiment results.

Case no.	Noise level reduction [dB]		Difference [dB]
	Analysis	Experiment	
1	2.4	2.7	0.3
2	3.6	3.4	0.2
3	1.5	1.8	0.3
4	4.6	4.5	0.1

계를 설치하여 5분 동안 음압레벨을 측정하였다. 측정결과는 Table 13에 정리하였으며, Point 1~Point 4의 소음레벨에 대한 평균 소음레벨을 Eq. (6)으로 계산하였다.

$$L_{ave} = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=0}^n 10^{\frac{L_i}{10}}}{n} \right) \tag{6}$$

마지막으로 소음저감 대책에 대한 해석의 소음저감량을 실험으로 측정된 개선안의 소음저감량을 상대비교 하였으며, Table 14에 정리하였다. 변압기의 소음저감 대책은 해석과 실험 모두 Case 4, Case2, Case1, Case3 순으로 소음저감 효과가 뛰어났다. 각 조건에서 해석과 실험의 오차가 0.3 dB 이하로, 해석으로 예측된 개선안의 소음저감 효과는 실험과 경향이 상당히 일치하는 것을 확인하였다.

## V. 결 론

본 연구에서는 조화응답해석을 이용하여 변압기의 소음을 이론적으로 계산할 수 있는 방법을 수립하고, 개선안을 적용하였을 때, 소음저감 효과를 예

측할 수 있는 방법을 제안하였다. 해석의 정확성 향상을 위해 변압기를 구성하는 부품들의 탄성계수를 규명하고 유한요소모델을 수립하였다. 그리고 조화응답해석 결과를 통해 변압기의 음향파위레벨을 계산할 수 있는 방법과 소음저감 대책을 수립하였다. 해석적 방법을 이용하여 개선안의 소음저감 효과를 예측하고, 실험과 비교하여 검증하였다. 개선안의 소음저감 효과는 Case 4, Case2, Case1, Case3 순으로 뛰어났으며, 해석과 실험결과의 오차는 0.3 dB 이하로 나타났다. 본 연구에서 제안된 조화응답해석을 이용한 변압기의 소음저감 분석방법은 변압기를 포함하여 진동에 기인한 모든 구조물들의 소음저감을 위한 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

1. D. J. Kweon, K. S. Koo, G. T. Kim, and J. W. Woo, "The audible noise prediction of the substation due to transformer audible noise and the field application of the low noise transformer" (in Korean), J. Electrical Engineers. Soc. Kr. **59**, 1382-1387 (2010).
2. K. S. Koo, J. W. Woo, J. S. Kwak, G. T. Kim, and D. J. Kweon, "An analysis on the audible sound due to load and cooling fan for 154kV power transformers" (in Korean), J. Electrical Engineers. Soc. Kr. **59**, 298-304 (2010).
3. K. W. Kim and Y. H. Kim, "The vibration characteristics for noise reduction of mold transformer," Proc. Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. 49-53 (2008).
4. W. H. Choi and W. C. Kim, "Analysis of noise source for mold transformer" (in Korean), J. Power System Engineering. Soc. Kr. **4**, 59-64 (2000).
5. J. W. Choi, C. J. Park, H. S. Go, Y. S. Park, and K. Y. Kweon, "Investigation of reinforcement plan for vibration Reduction of power transformer" (in Korean), Proc. Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. 456-457 (2009).
6. C. S. Yu, U. Y. Jang, and J. H. Kim, "A case on the noise reduction of transformer in power plant" (in Korean), Proc. Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. 324 (2020).
7. J. Y. Chung, J. B. Im, and S. C. Lee, "Acoustic properties of temporary noise barriers on construction site" (in Korean), J. Noise and Vib. Eng. Soc. Kr. **20**, 191-198 (2010).

**저자 약력**

## ▶ 김 창 섭 (Chang-Seop Kim)



2020년 2월: 계명대학교 기계공학과 학사  
2020년 3월 ~ 2022년 8월: 계명대학교 기  
계공학과 석사졸업  
2023년 7월 ~ 현재: LG전자 연구원

## ▶ 김 원 진 (Won-Jin Kim)



1987년 2월: 부산대 정밀기계공학과 학사  
1989년 2월: KAIST 기계공학과 석사  
1993년 8월: KAIST 기계공학과 박사  
1991년 9월 ~ 1997년 2월: 삼성중공업 기  
계전자연구소  
1997년 3월 ~ 현재: 계명대학교 기계공학  
과 교수