

# 몰드형 건식 계기용 변압기 진동 특성 분석

김무선<sup>1\*</sup>, 장동욱<sup>2</sup>, 김승모<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구소, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 무선급전연구팀, <sup>3</sup>한국기술교육대학교 기계공학부

## Analysis of Vibration Characteristics for a Molded Dry-type Potential Transformer

Moosun Kim<sup>1\*</sup>, Dong Uk Jang<sup>2</sup>, Seung Mo Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>Wireless Power Transfer System Research Team, Korea Railroad Research Institute

<sup>3</sup>Korea University of Technology and Education, School of Mechanical Engineering

**요약** 현재 철도 차량에 쓰이고 있는 대부분의 계기용 변압기는 장치 내부에 절연유가 충전되어 있는 유입식 계기용 변압기 방식으로서, 내구 연한 도래와 더불어 차량 운행 중 내부 압력 상승에 의해 폭발의 위험성이 있다. 이에 대한 해결책으로 절연 수지를 사용하여 방압 기능이 탁월한 몰드형 건식 계기용 변압기 개발이 필요하다. 이에 제품의 국산화가 가능하도록 한국철도기술연구원에서는 몰드형 건식 계기용 변압기를 개발 진행 중에 있다. 그 연구의 일환으로 개발 제품의 진동 특성 분석과 함께, 진동 환경하에서 변압기의 성능 유지 여부를 확인하여야 한다. 이번 연구에서는 철도 차량 부품의 진동 시험 방법 규격인 KS R 9144 및 IEC 61373 에 따라서 개발 제품의 공진시험과 모의 장기 수명 시험을 진행하였다. 고유 진동수는 해석을 통한 모달 분석과 공진 시험을 병행하여 결과를 비교 분석하였으며 규격 조건을 만족함을 확인하였다. 또한 모의 장기 수명 시험 후 성능 시험을 통해 오랜 시간 진동 환경 하에서도 개발 변압기의 기능에 문제가 없음을 확인하였다.

**Abstract** Most of the present potential transformers of train vehicles are of the oil-type filled with insulating oil and are susceptible to problems such as explosion due to the increase in the internal pressure during train operation and poor reliability near the end of their life cycle. As a solution to this problem, it is necessary to develop a molded dry-type potential transformer with excellent pressure-resistance performance using insulating resin. In order to localize the product, the Korea Railroad Research Institute has been developing a molded dry-type potential transformer. As part of this research, it is necessary to analyze the vibration characteristics of the developed product and to check the transformer performance in a vibration environment. In this study, a resonance test and simulated long-term life test of the developed product were conducted according to the KS R 9144 and IEC 61373 standards, respectively, which are vibration test methods for railway vehicle parts. Their natural frequencies were analyzed by comparing the results of the numerical modal analysis and resonance test, in order to confirm their adherence to the standards. Also, the performance test after the simulated long-term life test confirmed that the operation of the developed transformer was not problematic even in a long-time vibration environment.

**Keywords** : Dry-type transformer, FEM, Modal analysis, Simulated long-life test, Vibration test

### 1. 서론

최근 20년이 넘는 교류 급전시스템의 전동차에서 적

용되고 있는 유입식 계기용 변압기의 내구연한 도래로 인해, 전동차 사고 발생에 따른 운행 지연 문제가 발생하고 있다. 유입식 계기용 변압기는 하우징이 자기체 재질

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

\*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krri.re.kr

Received November 25, 2016

Revised (1st February 17, 2017, 2nd February 20, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

로 구성되고, 내부는 절연유로 채워져 있는 형태인데 내부에서 절연열화 및 절연 파괴 등으로 과전류가 흐를 경우 내부 압력 상승으로 인해 폭발이 발생할 수 있다. 또한 2차 사고로 외부 절연물이 비산되어 전차선로 주변의 건물이나 사람들에게 피해를 줄 수 있으므로, 주기적으로 절연유 유지보수 작업 등이 필요하다. 변압기 장애는 연간 2~3건이 발생하고 있으며, 코레일은 2014년부터 해외에서 개발된 비폭발성 건식 계기용 변압기의 성능검증을 진행하여 기존 유입식 계기용 변압기를 대체 중에 있다.

몰드형 건식 계기용 변압기는 1946년에 유럽에서 처음 개발된 후, 일본에서는 1952년에 11[kV]/110[V]단상 200[VA]급 계기용 변압기가 개발되어 실용화 된 이후로 에폭시 성형 또는 배합기술의 발달에 의해서 전기 절연재료로서 우수한 전기적 특성 및 기계적 강도가 뛰어나 기존의 유입식 계기용 변압기의 대체물로 급격하게 증가하였다.[1]

몰드를 구성하는 에폭시 수지는 소재 개량에 따라 다양한 물리적, 화학적 성질을 지닌 재료로 만들 수 있어 전기적으로 회전기, 변압기 및 변성 기류의 절연과 부식 및 절연판 등의 전기 절연재료로 널리 쓰이고 있다.[2,3] 위와 같이, 몰드형 건식 계기용 변압기의 장점과 소재 개선 등으로 인해 그 적용은 확대될 것이며, 그런 추세에 맞춰, 국산화를 할 수 있는 기술 개발이 절실히 요구된다. 계기용 변압기를 비롯한 철도 차량에 쓰이는 부품 개발을 위해 고려되어야 할 주요 사항 중 하나는 제품의 진동 특성 분석과 함께, 진동 환경 하에서의 제품 성능 유지 여부를 확인하는 것이다. 대표적인 진동 시험 규격으로는 KS R 9144[4], KS R 9146[5] 및 IEC 61373[6] 등이 있다.

진동 시험에 관한 연구로, Kim[7]은 앞서 언급한 대표적인 진동 시험 규격들을 대상으로 각 규격의 상대적 비교 분석을 수행하였으며, Choi[8]는 UIC 518에 따른 고속철도 차량 진동가속도 분석을 연구하였다. 또한 Kim[9]은 복합재 철도차량 차체를 대상으로 고유진동수 해석과 시험을 수행하였다. 전력 장비의 진동 관련 연구로 Cho[10]는 발전기 변류기를 대상으로 공진 특성에 관한 분석 연구를 진행하였다.

이번 연구에서는 현재 개발 진행 중인 몰드형 건식 계기용 변압기 시작품을 대상으로 FEM 해석을 통한 모달 해석 결과와 철도 차량 부품의 진동 시험 방법 규격인

KS R 9144 기준으로 측정된 고유 진동수 측정값 비교 및 IEC 61373 기준으로 진동 내구 시험에 따른 개발품의 성능 시험 결과에 관한 연구를 진행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 몰드형 건식 계기용 변압기 구성

현재 개발 진행 중인 변압기의 기본 사양은 단상 25000/120V, 60Hz, 60VA 를 목표로 한다. 변압기 구성은 권선 코어를 절연용 에폭시 수지 몰드에 함침 및 경화하여 제작된 코어부를 복합소재 및 폴리머 재질의 외부 하우징과 알루미늄 재질의 하부 플레이트 및 스테인레스 스틸 재질의 상부 플레이트로 보호하게 된다. Fig. 1에 변압기 형태를 나타내었다.

변압기 주요 부분에 사용된 소재 물성을 Table 1에 정리하였다. 이 중 FRP는 복합소재로서 방향성을 가지는데, 적층 각도를 고르게 배열하기 때문에 물성도 평면 방향으로 준등방성을 가진다고 가정하였다.

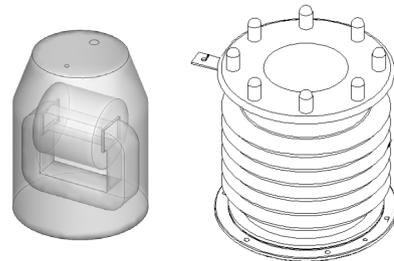


Fig. 1. Core and housing of transformer

Table 1. Material properties of main parts

	Elastic Modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Stainless steel	19300	0.29	8000
Aluminum	7170	0.29	2810
FRP	2000	0.3	1830
Epoxy	700	0.3	1840

### 2.2 고유치 해석

개발 변압기의 고유치 예측을 위해 수치해석 모델링을 진행하였다. 탄성체의 고유치 계산식은 식 (1)과 같다.

$$(-\omega^2 M^{mn} + K^{mn})\Phi^n = 0 \quad (1)$$

이 때,  $\omega$ ,  $M$  및  $K$ 는 각각 고유치, 질량 행렬, 강성 행렬을,  $\Phi$ 는 고유벡터를 나타내며  $m$ 과  $n$ 은 해석시 자유도와 모드 차수를 의미한다.

Fig.2 에 해석을 위한 모델링을 나타내었다. 각 파트에 해당하는 물성은 Table 1의 값을 적용하였다.

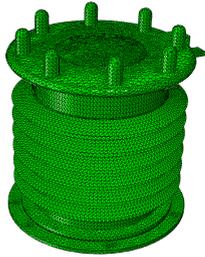


Fig. 2. Modeling for numerical modal analysis

해석을 위해 유한요소 전용 해석프로그램인 ABAQUS를 활용하였다. 적용한 요소는 C3D4 사면체 요소이며, 메시 생성 방법은 free meshing을 적용하여, 총 요소수는 33,200개이다. 그리고 고유치 계산 방법으로 LANCZOS eigensolver를 적용하였다.

해석에 적용된 경계조건은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 하부면의 볼트 체결부위에  $u_x = u_y = u_z = u_{xy} = u_{xz} = u_{yz} = 0$  와 같이 모든 변위 구속조건을, 하부면에는  $u_z=0$ 의 구속조건을 부여하였다.

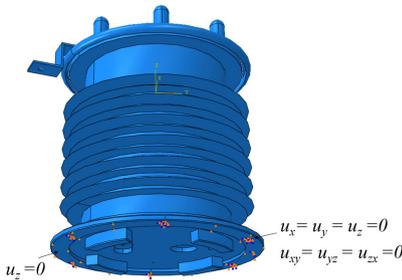


Fig. 3. Boundary condition for numerical modal analysis

Fig. 4에 해석결과로부터 얻어진 1차 굽힘 변형 모드와 수직 변형 모드 형태를 나타내었다. 1차 굽힘 변형 모드의 해석 결과값은 305Hz이며 1차 수직 변형 모드 결과값은 719Hz를 나타낸다.

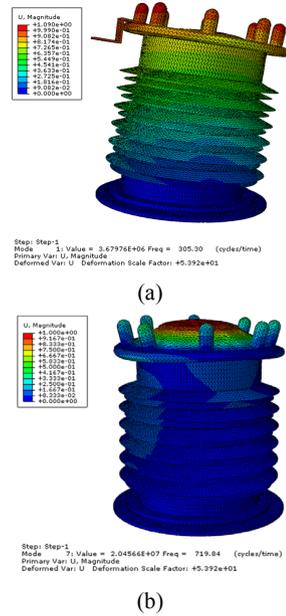
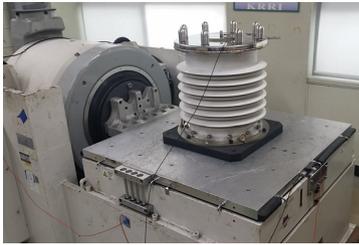


Fig. 4. Numerical modal shape of (a) 1st bending mode and (b) 1st vertical mode of transformer

### 2.3 공진 시험

변압기 고유치 해석 결과 검증을 위해 공진시험을 진행하였다. 공진시험은 KS R 9144 규격 기준을 따랐다. 변압기는 차체에 부착되는 부품으로서 KS R 9144 규격에서 정의하는 1종 부품에 해당하며 그에 따른 가진 진동수 범위는 1~30Hz 이다. 이 범위 이내에 공진이 없으면 공진회피 설계를 만족하는 것으로 고려할 수 있다. 해석상으로 1차 굽힘 변형 모드 주파수가 30Hz 이상에서 발생될 거라 예상되므로 최고 주파수 범위를 500 Hz까지 지정하여 시험을 진행하였다. 이 때 1~5Hz까지는 온진폭 5mm 기준으로, 5Hz 이상에서는 가속도 온진폭 기준 0.5G로 지정하여 정현파 가진을 진행한다. KS R 9144 규격에서는 제품의 전후, 좌우 및 상하의 직교 3방향으로 가진하게끔 되어 있는데, 이번 경우에는 제품의 대칭형태로 인해 전후 및 상하 가진, 2가지 경우에 대수행하였다. 전후 공진 시험과 상하 공진 시험을 위하여 진동 시험기에 변압기를 각각 Fig.5의 (a)와 (b)와 같이 장착하였다. 진동 측정을 위한 가속도 센서는 상부 플레이트의 중앙에 장착하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Equipment installation for vibration test in (a) x-axis and (b) z-axis

전후 가진 시험에서는 Fig. 6과 같이 1차 굽힘 변형 모드의 고유진동수는 약 316Hz에서 가짐을 알 수 있었다. 이 값은 수치해석을 통해 얻어진 305Hz 값과 약 3%의 오차를 보인다. 상하 가진 시험 결과에서는 전후가진 시험과 달리 500 Hz 이내에서는 수직 변형 모드에 해당하는 특이 공진점이 나타나지 않았다.

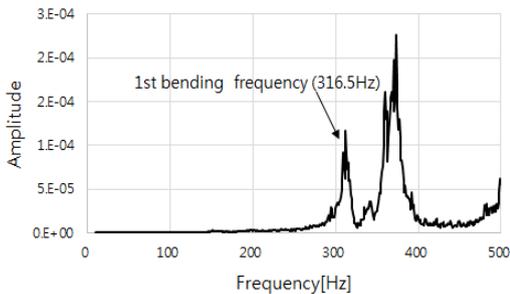


Fig. 6. Natural frequency of the 1st bending mode of transformer

시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 개발품의 고유진동수가 1종 부품에 해당하는 공진점 30Hz 이상에서 존재하므로 공진회피 설계를 만족함을 알 수 있다.

## 2.4 모의 장기 수명 시험

변압기 성능 내구 시험을 위해 IEC 61373에서 정의한 모의 장기 수명 시험을 우선 진행하였다. 이 때 가진 조건으로 주어지는 진동 스펙트럼을 Fig.7에 나타내었다.

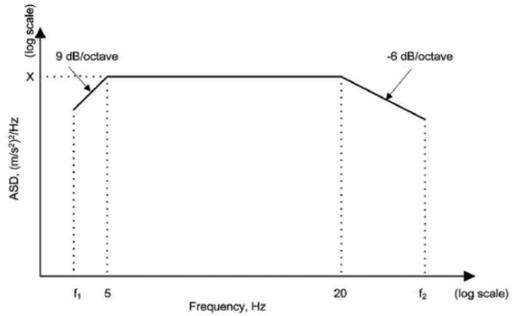


Fig. 7. Spectrum of excitation in IEC 61373 test

IEC 61373 규격에 따라서 변압기는 1종 A 등급에 해당하며 500kg 미만이기 때문에 주파수 범위를  $f_1=5$  Hz와  $f_2=150$  Hz로 정의하고 진동 가속도는 전후 방향으로  $0.234 (m/s^2)^2/Hz$ , 좌우 방향으로  $0.131 (m/s^2)^2/Hz$ , 상하 방향으로  $0.532 (m/s^2)^2/Hz$ 로 가진조건을 정의하였다. 시험 시간은 3개 방향으로 각 5 시간씩 가진하였다. 시험 전후 기능 확인을 위해 주요 기능인 충격절연강도, 상용주파 내전압 시험, 유도 내전압 시험, 절연저항 측정 시험 및 권선저항 측정 시험을 진행하였다. 각 시험에 관한 실시방안을 아래와 같이 정리하였다.

### Test 1) 충격절연강도 (IEC 61869-3) :

170kV/(1.2/50 $\mu$ s)의 충격전압을 정/부 각각 15회 인가했을 때 이상이 없을 것

Test 2) 상용주파 내전압 시험(IEC 61869-3) : 정격주파수의 정현파에 가까운 교류전압을 인가하여 작동 이상 없을 것

Test 3) 유도 내전압 시험(IEC 61869-3): 1차 권선 단자간에 시험 주파수 50~500Hz에서 시험전압 75kV를 유도시켜 정해진 시간동안 이상 없을 것

Test 4) 절연저항 측정 시험 : 1차권선-접지간, 1차권선-2차권선간, 2차권선-접지간 1,000V 전압에서 절연저항 2,000M $\Omega$  이상일 것

Test 5) 권선 저항 측정 : 저항계에 의해 1차 권선과 2차 권선의 저항을 측정함, 도통 및 저항 치기준과의 상이 여부 확인

기능 시험 결과, Test 1, 2, 3 항목에 관하여 시험 조건에서 작동 이상이 없음을 확인했으며, Test 4항목은 진동시험 이전과 이후에 1,000V 전압에서 2,000M $\Omega$  이상의 저항치를 가짐을 확인하였다. 마지막으로 Test 5 항목에서 1차 권선과 2차 권선의 저항치는 진동시험 이전에는 각 24.44 k $\Omega$ 과 1.0 $\Omega$ 을 보였으며, 진동 시험 이후 24.72k $\Omega$ 과 1.3 $\Omega$ 의 값을 가짐을 확인하였다. 따라서 개발 변압기의 작동이 필요 기능 시험 항목에서 이상 없음을 보였다. Fig.8은 각 항목 시험 실시 장면을 보여준다.



(a) test 1



(b) test 2



(c) test 3



(d) test 4



(e) test 5

Fig. 8. Function test after simulated long-life test

### 3. 결론

이번 연구에서는 기존 유입식 계기용 변압기의 폭발 위험성을 제거할 수 있는 몰드형 건식 계기용 변압기 시제품을 제작하여 철도 부품 진동 시험 규격에 따라 진동 특성 및 성능시험을 진행하였다. 이를 토대로 도출된 연구결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. FEM을 통한 모달 해석 결과 1차 굽힘 변형 모드 고유진동수는 305Hz이며, 1차 수직 변형 모드 결과는 719Hz를 나타낸다.
2. KS R 9144 규격에 따라 1~500Hz 범위까지 공진 시험 결과, 1차 굽힘 모드는 316Hz에서 발생하였으며, 수직 변형 모드는 특이점을 보이지 않았다. 1차 굽힘 모드 시험치와 수치해석 결과의 오차는 약 3%이며, 1차 모드 값이 30Hz 이상이므로 공진회피 설계를 만족하였다.
3. IEC 61373 규격 기준으로 진동 내구 시험에 해당하는 모의 장기 수명 시험을 실시한 결과, 변압기

성능을 나타내는 주요 시험 항목에서 이상 없음을 확인하였다.

- 본 연구 결과로부터, 몰드형 건식 계기용 변압기 개발 시작품의 설계 방안이 철도 부품 진동 규격에 적합함을 검증하였다.

## References

- [1] I. Mihosha, Instrument transformers, *Electric Book in Japan*, p.126-128, 1950.
- [2] K. H. Cho, C. H. Jang, "The Design and Test Technology of Metering Out Fit", *KIEE Summer Conference 2003*, p.1803-1805, 2003.
- [3] T. Hasegawa, "Application Technology of Molded products in the Field", *Takaoka Review*, vol. 43, no. 4, p.66-72, 1996.
- [4] Korean Agency for Technology and Standards (1992), Test methods for vibration of parts of railway rolling stock, KS R9144.
- [5] Korean Agency for Technology and Standards (2002) Railway rolling stock parts-Test methods for shock, KS R9146
- [6] International Electrical Commission (2010) Railway application-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests, IEC61373.
- [7] Y. G. Kim, C. Park, J. H. R, "Comparison and Analysis of Vibration and Shock Test Methods for Rolling Stock Equipment", *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 16, no. 4, pp. 246-252, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.4.246>
- [8] I. Y. Choi, N. P. Kim, J. S. Lee, J. Lim, "Analysis of the acceleration measured on Korea and France high speed railways using UIC518 code", *Journal of the Korea Academy-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 12, pp. 8516-8524, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8516>
- [9] J. S. Kim, J. C. Jeong, S. H. Cho, S. I. Seo, "Analytical and Experimental Studies on the Natural frequency of a Composite Train Carbody", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, vol. 30, no. 4, pp. 473-480, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2006.30.4.473>
- [10] C. W. Cho, S. T. Cho, K. H. Yang, K. J. Ann, H. Y. Lee, "Activities to attain integrity of generator current transformer", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 19-23, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2012.16.1.019>

### 김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조 해석

### 장 동 욱(Dong Uk Jang)

[정회원]



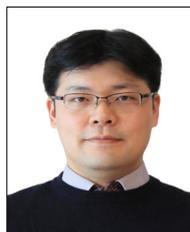
- 1998년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (학사)
- 2000년 2월 : 충북대학교 공과대학 전기공학과 (석사)
- 2000년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전기철도, 절연재료, 고전압

### 김 승 모(Seung Mo Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과 (박사)
- 2007년 9월 ~ 2012년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 책임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조해석