

## 발전소 주변압기 운전중 진동 기준치 설정에 관한 연구

이육륜\*, 이준신\*\*

W. R. Lee and J. S. Lee

**Key Words:** 주변압기(Main Transformer), 자왜현상(Magnetostriction), 진동등급(VR, Velocity Rating)

### ABSTRACT

Main transformer's integrity assessment in nuclear power plant is estimated by the electrical test of electrical core and wire and the chemical analysis of insulating oil. Mechanical test or analysis has not been so far. So this study makes it with the vibration velocity rating. The vibration velocity rating in main transformer which is based on the real data of vibration velocity measurement under operating and other machinery vibration code such as ISO code is renewed.

### 1. 서론

발전소 주변압기는 발전소에 생산되는 전력을 계통에 공급하는 중요한 기기로서 높은 신뢰성이 요구되나 고장으로 발전정지를 유발하는 사례가 빈번한 실정이다. 이에 대한 원인분석을 한 결과, 전기적인 원인 외에 기계적인 문제점으로 인한 고장발생이 상당부분을 차지하고 있었다. 그러나 현재 발전소 주변압기의 건전성 판단 기준은 권선의 전기적인 절연특성 및 절연유의 화학적인 평가에만 의존하고 있으며 기계적 파손 현상에 관한 원인규명 및 근본적인 대책이 매우 미흡한 실정이다. 특히 명확한 기준이 없는 관계로 문제발생 우려에 따른 사전조치를 취할 수 있는 판단을 할 수 없게 되어 있다.

관련 내부자료에 따르면 현재 운전중인 원자력 발전소 주변압기 고장원인의 약 40%가 기계적 결합에 의한 고장으로 추정되고 있으며, 이러한 고장은 향후 운전년수 증가에 따라 지속적으로 발생될 수 있으므로 그에 따른 기준값을 설정하여 체계적

인 관리가 필요로 하게 되었다.

따라서 현재 운전중인 발전소 주변압기의 진동 측정 및 평가에 대한 데이터베이스를 구축하고, 이것을 기초 자료로 삼아 진동기준치를 설정하고자 한다. 이 기준을 바탕으로 관리 및 평가를 하는 한편 점차적인 진동저감방안을 수립하여 설비의 신뢰성 제고와 안전 운영을 도모하고자 본 연구가 실시되었다.

본 연구의 진행과정은 국내에 무수한 발전소가 산재되어 있고 각 발전소별로 특징을 내포하지만, 그 중에서도 출력가변형과 출력불변형을 나누어 볼 때 발전소중에서 최대출력을 유지하며 출력불변형인 원자력발전소를 대상으로 하여 주변압기의 자료취득 및 적용을 하는 것이 좀 더 포괄적인 적용으로 판단된다.

따라서 전체 원자력발전소 주변압기들의 운전 중에 진동값을 조사하여 데이터베이스를 만들고, 관련 규격들 및 자료들을 근거로 하여 진동레벨 측정 방법에 대해 규정하고 측정된 레벨을 통한 기준안 적용을 제시하고자 한다. 이 기준안을 통하여 제작사와 사용자 모두가 제작 및 운영에 안정을 도모할 수 있으며 상호협의를 속에서 진동 기준값을 줄여 나가면 정량적인 기술발전을 이루어낼 수도 있을 것이고 이를 바탕으로 기술수출에도 이바지 할 것으로 판단된다.

\*책임저자 : 한전 전력연구원 원자력연구실

E-mail : maerong@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5663

\*\* 한전 전력연구원

## 2. 연구배경 및 이론적 기초

### 2.1 연구배경 및 현황

원자력발전소의 주변압기는 1978년 기동을 이후로 본 연구가 추진되는 시기인 2002년까지 총 32건의 발전정지를 포함한 그와 유사한 결과를 나타낸 중대한 고장이력들이 발생되었다.

고장이력들의 내용을 보면 크게 3가지 원인으로 분류할 수 있는데 전기적인 문제, 화학적인 문제 그리고 기계적인 문제로 나눌 수 있다. 그 내용들은 아래 표 1과 같이 분류하여 정리하였다.

Table 1 원자력발전소 주변압기 고장이력 분류

분류	주요내용(횟수)	건수	관리기준
전기적 문제	- 태풍 등 자연재해(1) - 권선소손(2) - 작업자 실수(2) - 전력계통 사고(1) - 기기 오동작(4) - 설계불량 (1) - 제품불량(1) - 제품노후화(1)	13	절연특성 평가
화학적 문제	- 오일 열화(1) - 권선내 이물질(1) - 제품불량(1) - 가연성 가스 증가(3)	6	절연유 평가
기계적 문제	- 설계불량(1) - 제품불량(1) - 부품부식(3) - 연결부 접촉 불량(3) - 이완, 크랙 및 마모(5)	13	

여기서 전기적인 문제 및 화학적인 문제들은 변압기의 건전성 평가기준이 있어 지속적인 관리와 조치를 취하고 있는 실정이나 기계적인 문제는 사후조치 외에는 현재로는 평가기준 및 사전조치를 하지 못하는 실정에 있다. 표 1과 같이 전체 주변압기 고장원인 중에 기계적인 원인이 40% 정도가 되고 그중에서도 연결부 접촉 불량과 이완, 크랙 및 마모로 인한 원인이 가장 많은 부분을 차지하였다. 이것은 진동에 의한 원인으로 발생되거나 진동을 상시 모니터링 한다면 사전조치를 할 수 있거나 정확한 원인을 밝히고, 향후개선 등을 통한

기계적 건전성 확립에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

그래서 주변압기의 운전중 진동기준치 설정을 통한 점검관리를 한다면 좀더 안정적인 발전소 운영을 할 수 있을 것이라 생각되어 이 연구를 시작하게 되었다.

### 2.2 변압기 진동의 이론적 기초

변압기에 일정한 주파수의 교류가 인가되면 변압기 철심 내에 자기장이 형성되며 자기장의 변화에 따라 진동이 발생한다. 진동 발생의 원인은 자왜현상(Magnetostriction) 때문인데, 자왜현상이란 자기장에 의해 기계적 변형이 일어나는 것이라 할 수 있다.

변압기의 철심은 교류 전류에 의해 자화되며 그림 1 과 같이 한 번의 교류 주기 동안 자기장의 크기가 두 번 최대가 되므로 자왜현상에 의한 진동은 교류 주파수의 두 배의 주파수로 발생한다.

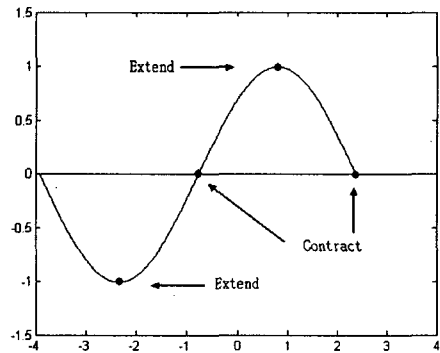


Fig. 1 Extend and Contract in Wave

그림 2 은 주변압기 진동을 주파수 스펙트럼으로 120Hz 하모닉에서 진동이 발생함을 볼 수 있다. 일반적으로 자왜변형은 매우 작은 양으로 길이 방향으로  $2.1 \times 10^{-5}$ 의 변형을 일으키므로 소형 변압기에서는 진동에 의한 소음이 문제가 될 뿐, 진동에 의한 기계적 고장은 심각한 고려의 대상이 아니다. 그러나 원전 주변압기는 변압기의 크기와 중요성 때문에 자왜현상에 의한 기계적 진동을 이해하고 진동 저감을 위한 방안이 반드시 필요하다

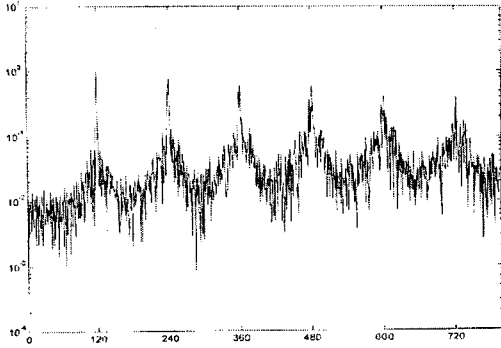


Fig. 2 Vibration in transformer

### 3. 원전 주변압기 진동 데이터베이스

#### 3.1 진동 측정 대상 및 방법

현재 운전중인 전체 원자력발전소 (총 19개 호기) 주변압기를 대상으로 하였으며, 각 발전소 호기별로 변압기 타입 및 제작사가 다르므로 3상일체형 변압기가 아닌 단상형 변압기는 3상중 B상을 기준으로 하여 측정하였으며 현장 관계자의 요청으로 다른 상을 측정할 경우도 있다. 또한 측정은 그림 4, 5와 같이 접근 가능한 3상일체형의 경우 변압기의 정면과 단상형의 경우 변압기 우측면 전체를 약 1~2m 등간격으로, 16~40개소에 가속도계를 사용하여 정밀 측정하였다.

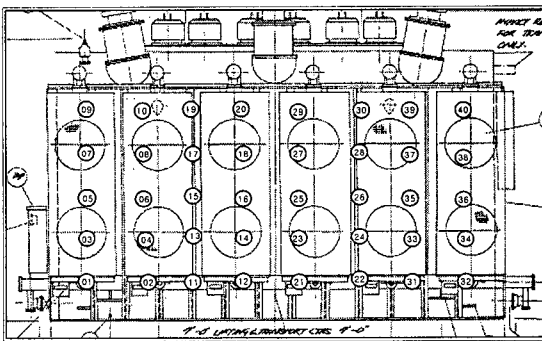


Fig. 3 Measuring points on 3 phase main transformer

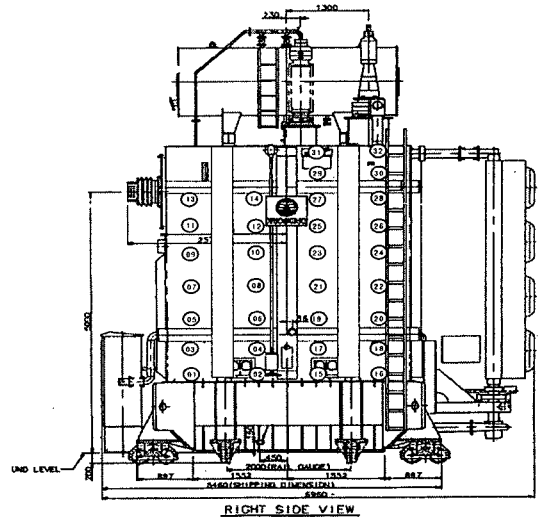


Fig. 4 Measuring points on single phase main transformer

#### 3.2 발전소 호기별 주변압기 진동값 결과

주변압기 진동을 측정하여 FFT(Fast Fourier Transform) 한 결과 그림 5에 나타난 바와 같이 전체 진동값은 120Hz성분의 진동값이 대표적으로 작용하여 그 오차가 10% 내외였다. 앞서 이론 설명에서 같이 주변압기의 진동원인인 철심의 진동값이 120Hz 하모닉성분으로 나타남에 따라 그중에서 가장 큰 성분인 120Hz 진동값을 중점적으로 비교하였으며, 측정된 자료에서도 나머지 성분들은 미비한 역할을 한 것으로 나타났다.

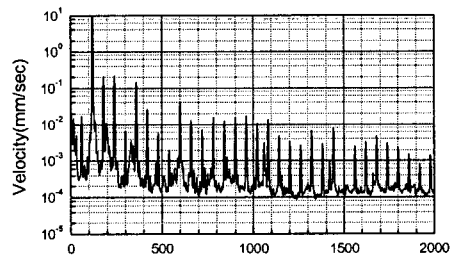


Fig. 5 FFT analysis of main transformer

그림 6은 전체 원자력발전소 주변압기의 진동값에서 120Hz 성분만을 정리한 것으로 많은 편차를 보이고 있다. 특히 그림 6(b)에서 나타난 것과 같이 최대진동값은 아주 큰 편차를 보이는데 이것은

일부 변압기에 노후화 진행과 함께 변압기 외함의 국부적인 공진발생으로 특정지역에 고진동이 측정되었다. 또한 전체 측정부분의 평균값은 3.48 mm/sec 이고, 각 주변압기의 최대값에 대한 평균은 17.4 mm/sec로 나타났다. 여기서 최대진동값 중에 국부적 공진발생으로 인하여 고진동이 발생된 것들을 제외한 평균값은 10.4 mm/sec 로 나타났다.

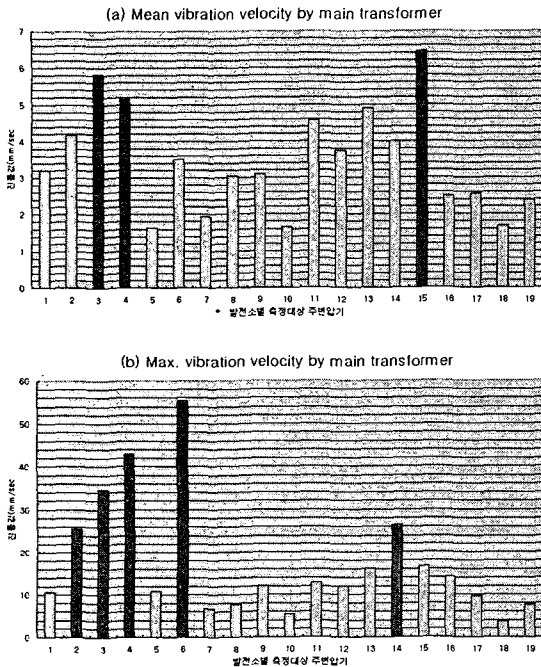


Fig. 6 Vibration velocity by main transformer in nuclear power plant

#### 4. 원전 주변압기 진동레벨 측정 및 평가 방법

##### 4.1 표준 측정 방법

###### 4.1.1 측정 조건

온도 및 습도에 대해서는 측정에 쓰이는 진동레벨계의 사용온도 범위 및 사용 습도 범위에 유의하여야 한다. 또한, 진동 센서의 형식에 따라 바람·전자기장 등의 영향을 받을 수 있으므로, 적당한 차단, 측정점의 변경 등을 고려하여야 한다.

###### 4.1.2 배경진동 보정

배경진동이란 어떤 장소에 있어서 특정 진동을

측정 대상으로 할 경우, 대상의 진동이 없을 때 그 위치에서의 진동을 의미하며, 배경 진동은 측정이 이루어지는 동안 전 주파수 대역에서 측정레벨과 10dB 이상의 차이를 유지하는 것이 바람직하다. 단, 배경 진동과 측정레벨의 차이가 10dB 미만이라도 표 2에 따라 지시값을 보정하여 진동레벨을 추정할 수 있다.

Table 2 배경 진동에 대한 지시값의 보정 (단위:dB)

대상 진동이 있을 때와 없을 때 지시값의 차이	3	4	5	6	7	8	9
보정값	-3	-2				-1	

##### 4.1.3 측정값

진동속도의 RMS(Root-mean-square) 레벨을 mm/sec 단위로 계측한다.

##### 4.1.4 측정 주파수 및 측정값

협대역 진동의 측정에는 측정 주파수 범위가 최소 0 ~ 2000 Hz를 포함하고, 2.5 Hz 간격의 협대역(Narrow band) 진동 측정으로 주파수별 측정값을 나타낸다. 그리고 합성값(Overall Values)의 측정은 측정 주파수 범위내의 합성(Overall) 진동속도(mm/sec)를 나타낸다.

##### 4.1.5 측정 위치 및 방향

측정점은 주변압기 표면에서 최대 1m 이내의 등간격으로 선정한다. 유사 주변압기의 측정 경험으로 최대 진동속도가 발생하는 위치를 예측할 수 있는 경우에는 그림 3, 4에 나타낸 모든 위치에서의 측정을 고려할 필요는 없다. 단, 수탁 또는 승인시험에서 더 적은 개수의 측정위치를 고려할 경우에는 제조업체 또는 의뢰자 사이에 사전 동의가 있어야 한다.

측정 방향은 직교하는 3개의 방향으로 측정하고, 반드시 한 개는 변압기 면의 수직 방향으로 측정하도록 한다. 이때 면의 수직방향을 Z, 수평방향을 X, Y 로 하여 방향을 명시하도록 한다.

#### 4.1.6 진동 센서의 설치

진동 센서는 원칙적으로 평탄하고, 단단한 면에 설치하고, 가속도계는 가능한 부가적인 mounting block을 사용하지 않고 측정 위치에 단단히 고정한다. 기타 언급되지 않은 상세한 설치 방법은 KS B 0714(2001, 기계적 진동 및 충격-가속도계의 기계적인 설치)에 따른다.

#### 4.1.7 측정 방법

변압기는 보조 냉각장치 유무에 관계없이 정격 주파수의 정격전압으로 여자되어야 한다. 그리고 시험 대상 변압기에 전압을 갑자기 인가하였을 경우, 스위칭 순간 후 몇 분 동안은 진동측정을 하지 않는 것이 바람직하다. 강제 공랭 보조장치, 유압 펌프 등 변압기 표면 진동에 영향을 줄 수 있는 부가적 진동원을 포함하고 있으면, 측정시 모두 작동시켜야 한다.

마운트 및 하부 지지구조물이 변압기의 진동에 영향을 주지 않도록, 단단한 지지 구조물 또는 유연한 마운트를 이용하여 대상 변압기를 지지한다.

### 4.2 평가방법 및 판정기준

#### 4.2.1 평가방법

각 측정 위치에서의 진동속도 중 최대값을 기준으로 측정치의 진동속도(RMS, mm/sec)를 그림 7을 참조하여 진동등급(VR: Velocity Rating)을 정한다.

결정된 진동 등급으로부터 주변압기의 정격용량 및 그림 8을 참조하여, 대상 주변압기의 허용기준과 비교한다.

#### 4.2.2 판정기준

주변압기의 특성에 따라 다음의 5가지 등급으로 허용기준을 나눌 수 있다.

Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Grade E
← 양호		→ 불량		

여기서 Grade E는 Grade D를 초과하는 진동속도의 등급을 말한다.

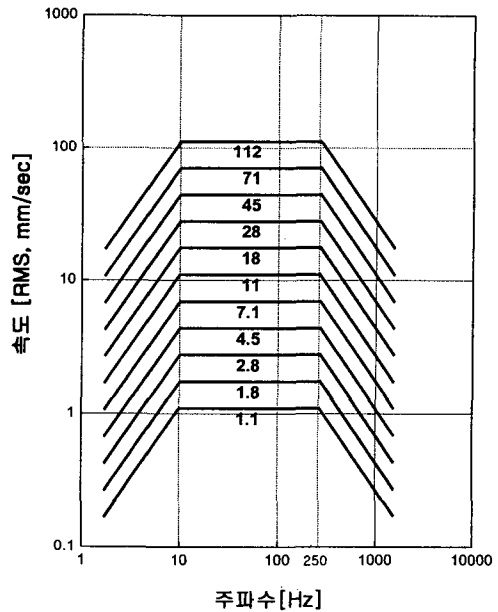


Fig. 7 Velocity Rating curve in narrow band  
(In case of under 10 Hz and over 250 Hz, increase and decrease by the slope of 20 dB/decade)

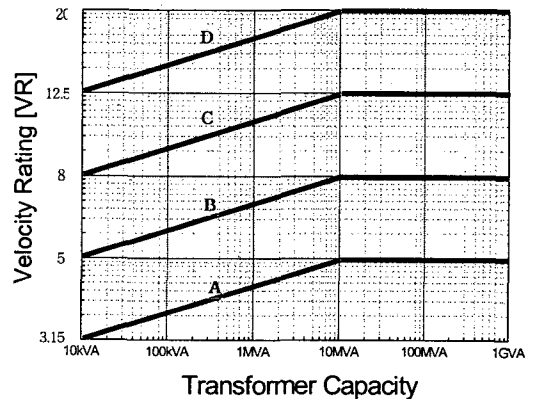


Fig. 8 Allowed VR by transformer capacity

### 4.3 판정결과

원전 주변압기의 측정 데이터를 판정기준에 의해 정리하면 표 3와 같다.

Table 3 원전 주변압기 진동등급 적용 결과

등급	A	B	C	D	E
개수	1	4	5	4	5

이처럼 현재 운영중인 주변압기들은 다양한 등급에 분포되어 있으며, 문제시되는 E등급의 5개 주변압기는 현장조사 결과 국부적인 공진발생으로 나타난 고진동으로 나타났으며 그에 대한 현장조치가 이루어지고 있는 실정이다.

참고적으로 평균진동값을 놓고 등급을 적용하였을 시에는 3개의 B등급을 제외한 모든 것이 A등급으로 나타나므로 앞으로 제작사 및 운영자 모두 체계적인 관리를 통한 지속적인 노력을 하면 좋은 성과가 있을 것이다.

#### 4.4 E등급 주변압기 조치사항

표 3에서 나타났듯이 진동데이터를 취득 당시 원전 주변압기에서 5개가 E등급이 적용되는데, 이후 현장관계자 및 제작사의 적극적인 조치로 인하여 국부적인 공진임을 밝혀내고 그에 따른 조치를 취하여 고진동을 해소한 상태이다. 또한 일부 발전소의 주변압기가 진동데이터 취득후에 갑작스런 고진동이 발생하여 추가 진동측정을 실시하였으며 그 결과 국부적인 공진으로 인한 고진동 발생임을 밝혀내고 현재 진동해소방안에 관한 조치가 실시 중에 있으며, 이로 인해 체계적인 관리의 필요성을 인식하고 상시 진동감시시스템을 적용하고 있는 상태이다.

### 5. 결론

이상의 원자력발전소 주변압기 진동 기준치 설정에 관한 연구결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

주변압기의 진동은 주파수분석을 통한 결과 120Hz성분이 가장 크며 전체 진동값에 90%이상 차지함을 알 수 있고 이를 근거로 하여 협대역 진동속도 등급곡선을 적용하여 진동등급을 결정할 수 있다.

본 연구결과로 나타난 진동등급을 적용한다면 지금껏 원자력발전소의 핵심기기 중에 하나인 주변압기의 관리 및 정비측면에서 고려하지 않았던 기계적인 건전성 부분에서도 충분히 고려할 수 있게 되었으며, 제작사 또한 충분한 기술력을 인정받을 수 있는 또 하나의 요인이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서 원전 주변압기 진동등급 적용을 위해 투입된 자료들은 매우 중요한 의미를 가지며 원자력발전소에 사용되는 작은 규모의 기동변압기 및 보조변압기에도 적용가능하며, 또한 화력발전소에는 물론이고 일반 변전소용 변압기에도 확대적용이 가능하여 중대한 역할을 할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- (1) "Acceptance code for gears- part 2 : Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing", ISO Code 8579-2
- (2) "Acoustics- Characterization of sources of structure-borne sound with respect to sound radiation from connected structures- Measurement of velocity at the contact points of machinery when resiliently mounted", ISO Code 9611
- (3) "Mechanical vibration of non-reciprocating machines- Measurements on rotating shafts and evaluation criteria", ISO Code 7919-1
- (4) "Mechanical vibration and shock- Mechanical mounting of accelerometers", ISO Code 5348
- (5) "Acceptance code for gears- part 1 : Determination of airborne sound power levels emitted by gear units", ISO Code 8579-1
- (6) David Jiles, "Introduction to magnetism and magentic materials", *Chapman and Hall*, pp. 89-106, 1991
- (7) M. J. Dapino, R.C. Smith, A. B. Flatau, "An active and structural strain model for magnetostrictive transducers", *SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*, 1998, Paper #3329-24