

IEEE Std 693-1997을 적용한 전력용 변압기 내진 해석

論 文

54C-12-3

Seismic Qualification Analysis for the Power Transformer with IEEE Std 693-1997

梁在哲[†] · 盧孝哲^{*} · 金浩榮^{*} · 朴均洙^{*}
(J.C. Yang · H.C. Roh · H.Y. Kim · K.S. Park)

Abstract - Because of increasing demand for safety of the power transformer, the seismic qualification process in accordance with the standard of IEEE Std 693-1997 is essentially required by customer. Dynamic analysis method and static analysis method were used to qualify the seismic withstanding of the power transformer at high seismic level. Maximum stress was detected at the connection between the main structure and appendages, and maximum displacement was detected at the point of appendage's end tip. Load path and substructure system can be considered as important elements to prevent over stress and over displacement.

Key Words : Seismic Analysis, Power Transformer, Qualification Level, Response Spectrum, Acceleration, FEM.

1. 서 론

안전에 대한 중요도가 높아지면서, 미국 서부지역을 중심으로 대부분의 지진 발생지역에 설치되는 변압기의 경우에는 내진성능의 보증을 요구하는 경향이 커지고 있다. 자중이 큰 변압기의 경우 시험에 의한 보증방법의 한계로 해석에 의한 보증방법이 사용되며, 특히, 115kV 이상의 용량을 가지는 변압기나 리액터(Reactor)에는 정해석(Static analysis)에 의한 보증방법이 사용된다[1].

미주의 경우 내진해석과 관련한 규격의 다양성으로 인해 같은 지역(Site)에 설치되는 변압기라도 감리 업체(Engineering Company)의 요구에 따라 적용되는 규격이 다를 수 있으며, 해석에 적용되는 하중이나 경계조건, 해석 방법 등에도 약간의 차이를 가지고 있다.

미주지역의 변압기 내진 적용 규격으로는, IEEE C57.114-1990[2], ANSI/IEEE Std 344-1987[3], IEEE Std 693-1997, ANSI/ASCE7-95[4] 및 Building Codes(UBC, NBC, SBC, CBC 등)이 있으며, 근래에 와서는 IEEE Std 693-1997에 의한 내진 보증이 많이 요구되고 있는 추세이다.

이에 본 논문에서는 IEEE Std 693-1997에 의한 해석 적용 조건 및 방법을 서술하고, 이를 적용하여 상용 FEM Code인 ANSYS를 이용한 변압기의 내진해석에 대해 연구하였다[5]. 또한, 해석진행 과정과 결과에서 규격이 가지는 특징을 검토하였다.

2. 내진 설계

내진 설계란, 정상 운전 조건은 물론, 지진 조건에서 구조물에 발생한 변형이나 손상이 제품의 기능 수행에 영향을 주지 않아야 한다는 기능 수행 수준과, 그로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것이 방지될 수 있어야 한다는 붕괴 방지 수준을 만족하는 설계를 말한다[6]. 이를 위하여 내진 설계 보증 방법 및 설계 적용변수 등이 연구되었으며, 여러 규격에 반영되어 명시되었고, 제작자는 이러한 규격의 준수 및 이행 여부를 증명해야 한다.

2.1 지진의 특성 변수

지진의 특성과 관련된 변수로는, 보증 수준(Qualification level), 응답 스펙트럼(Response spectrum), 감쇠율(Damping ratio) 및 제품 특성(Equipment characteristic) 등이 있으며, 해석 또는 시험에 중요 변수로 취급된다. 여기서 보증 수준은 지진의 발생 지역과 강도에 따라 High, Moderate, Low level로 구분하고 있다. 응답 스펙트럼은 가진되는 물체의 주파수에 따른 응답 가속도의 스펙트럼으로 보증 수준과 감쇠율에 따라 제시된다. 또한 감쇠율은 가속도의 증폭을 감소시키는 변수로 2~5% 사이의 값이 주로 적용된다.

2.2 내진 해석의 종류

내진 설계 보증 방법으로는 시험에 의한 방법, 해석에 의한 방법 및 인증된 경험자료 제시에 의한 방법이 있으며[7], 제품의 큰 자중 및 다양성으로 인해 전력용 변압기의 경우 해석에 의한 방법이 사용되고 있다.

해석에 의한 보증 방법으로 동적 해석(Dynamic analysis method) 및 정적 해석(Static analysis method)이 많이 사용

† 교신저자, 正 會 員 : 現代重工業(株) 變壓器 設計部

E-mail : jacy@hhi.co.kr

* 正 會 員 : 現代重工業(株) 變壓器 設計部

接受日字 : 2005年 9月 21日

最終完了 : 2005年 11月 2日

되고 있다. 동적 해석은 제품의 고유진동수를 계산하고 가속도 응답스펙트럼을 인가하여 제품의 안정성을 판단하고, 정적해석은 최대 가속도를 입력하여 안전성을 판단하는 방법이다.

2.3 적용 하중

내진 설계에 적용되는 하중은 지진에 의한 영향을 위한 가속도는 물론이고, 정상 운전상태의 하중인 바람(Wind pressure), 변압기 내부의 절연유에 의한 정수압(Hydrostatic pressure, 변압기 자체의 무게(Dead weight) 등도 설계 하중으로 고려하여야 한다.[1],[8]

2.3.1 가속도

내진 해석에 가장 직접적으로 영향을 주는 변수이며 동적 해석에서는 보증 수준에 따른 응답 스펙트럼 및 감쇠율이 입력 가속도를 결정하는 변수가 된다. 보증 수준 및 감쇠율은 설치 지역의 환경에 의해 결정되고, 응답 스펙트럼은 그림 1과 같이 보증 수준별로 IEEE Std 693-1997에 제시되어 있다.

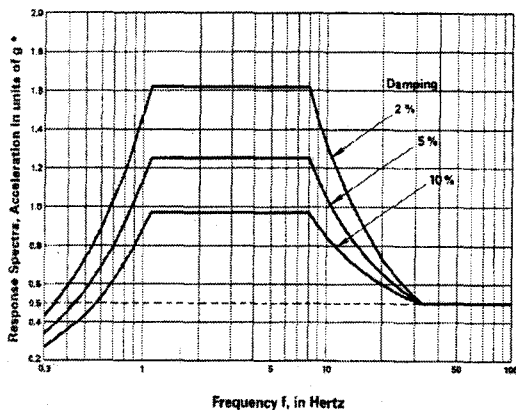


그림 1 응답 스펙트럼 (High Level)
Fig. 1 High Required Response Spectrum

표 1 보증 수준별 ZPA.
Table 1 ZPA of each Seismic Level

Seismic Level	Zero Period Acceleration (g)
High	0.5
Moderate	0.25
Low	0.1

정적 해석의 경우 표 1과 같이 보증 수준별로 ZPA(zero period acceleration)에 해당되는 가속도를 적용하여 해석하며, 직교좌표계에서 수평방향 2축으로 가속도를 인가하고, 수직방향으로 수평방향 가속도의 80% 가속도를 인가한다.[1]

표 2 부위별 적용 가속도.

Table 2 Application of acceleration by part.

Part	for main structure		for appendages	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Acceleration	a_{hmax}	$0.8 \cdot a_{hmax}$	$2 \cdot a_{hmax}$	$1.6 \cdot a_{hmax}$

지반(Ground)에 구속되어 있는 주 구조물(Main structure)의 경우에는 ZPA값을 인가하지만, 주 구조물에 부착되어 있는 부속 구조물(appendages)의 경우에는 표 2와 같이 주 구조물의 영향을 고려하여 2배의 ZPA를 수평 2방향, 수직 1방향으로 인가하여 해석한다.

2.3.2 기타 고려해야 할 하중

우선, 바람에 의하여 발생한 하중을 내진 해석시 정상 운전 상태의 하중 조건 중 하나로 고려하여야 하며, 사용자 요구 건축 법규(Building Code)를 사용하거나, 구체적인 요구 법규(Code)가 없을 경우 ASCE7-95를 이용하여 바람을 계산하고, 이를 해석시 하중으로 적용한다. 미국 동부 지역의 경우 지진대와 벗어나 있으므로 지진의 영향은 적은 반면, 허리케인 영향 지역이어서 바람의 영향이 상대적으로 크므로, 중요한 하중으로 취급된다.

둘째, 변압기 내부에는 절연유로 채워져 있으므로 절연유에 의한 정수압이 외함 내벽 및 절연유 보존 장치(Conservator) 내벽에 작용하고 있다. 이 또한 정상 운전 상태의 하중 조건 중 하나로 고려하여야 한다.

셋째, 비에 의한 하중으로 변압기 상부에 빗물이 고이지 않는 구조일 경우는 무관하나, 그렇지 않은 경우에는 비에 의한 하중도 고려하여야 한다.

그 외, 제품 자체의 무게(Dead load), 운동부분이 있어서 변동 하중(Live load)의 영향이 있는 경우 및 눈에 의한 하중도 반영하여 해석되어야 한다.

2.3.3 허용 변위 및 응력

IEEE Std. 693-1997에서 변압기는 고주파제품(High frequency equipment)로 분류되며 표 3과 같이 전압별로 내진조건에 의한 최대 허용 변위가 명시되어 있다.[8]

허용응력은 AISC에 의해 정의하고 있으며, 인장/압축 응력, 전단응력, 굽힘응력 및 조합응력의 모든 조건을 동시에 만족해야 한다.[9]

표 3 최대 허용 변위. (unit : mm)

Table 3 Typical equipment displacements in millimeters.

Voltage	138 kV	230 kV	500 kV
Displacement	25-50	25-75	100-300

2.4 내진 해석(Seismic Qualification Analysis)

IEEE Std 693-1997에 의해 상기 하중조건으로 정적해석 및 동적해석을 각각 진행시켰으며, 최대 발생 변위 및 응력

을 산출하였다.

2.4.1 정적 해석

정적 해석은 기 제작된 변압기를 모델로 하여 상용 FEM Code를 사용하여 진행하였으며, 구체적인 사양 및 내진해석 조건은 아래와 같다.

- Spec. : 3PH 60Hz 150/200/250MVA (532/13.8-13.8kV)
- Seismic Level : High level 0.5g ZPA of RRS
- FEM Program : ANSYS 6.0
- Dead weight/Wind Pressure/Hydrostatic Pressure

해석은 구조물의 종류에 따라 인가하는 가속도가 다르므로, 외함(Main assembly part)과 부속 구조물(Appendages ; Conservator assembly, Radiator assembly, Bushing assembly)로 나누어 진행하였다.

그림 2, 그림 3, 그림 4 및 그림 5는 각 구조물의 해석 결과를 나타낸 것이다.

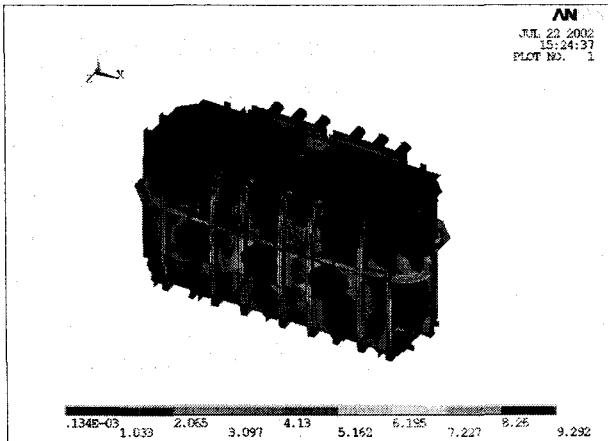


그림 2 외함의 응력분포(kgf/mm²)
Fig. 2 Stress distribution of tank assembly(kgf/mm²)

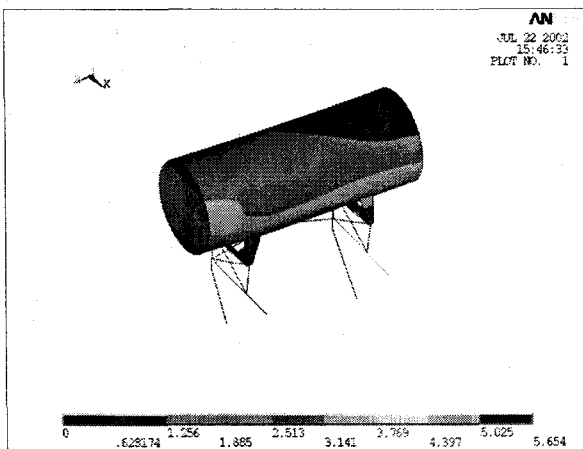


그림 3 절연유 보존 장치의 변위분포(mm)
Fig. 3 Displacement distribution of conservator assembly(mm)

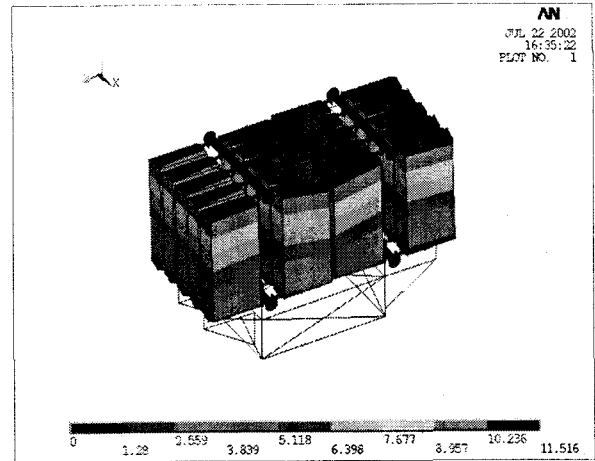


그림 4 냉각기(Radiator Assembly)의 변위분포(mm)
Fig. 4 Displacement distribution of radiator assembly(mm)

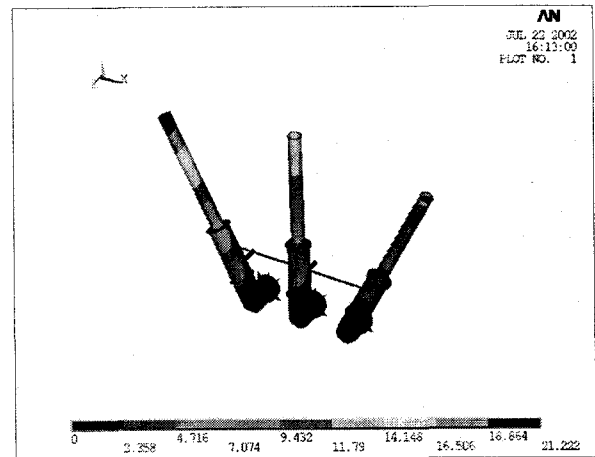


그림 5 부싱구조물(Bushing Assembly)의 변위분포.
(mm)
Fig. 5 Displacement distribution of bushing assembly. (mm)

표 4와 같이 해석에 의해 최대 발생 응력 및 변위량을 산출하였으며, 이 값은 AISC의 허용 응력 및 IEEE Std. 693-1997의 변위량 조건을 만족하고 있다.

표 4 최대 발생 응력 및 최대 발생 변위량 요약

Table 4 Summary of Maximum stress and displacement

Result	Assembly	Location	Computed value
Maximum Stress*	Radiator	Radiator ~ Pipe	17.7 (kgf/mm ²)
Maximum Displacement	Bushing	Tip of Bushing	21.2 (mm)

* : Von-mises stress

2.4.2 동적 해석

동적 해석은 기 제작된 변압기를 모델로 하여 상용 FEM Code를 사용하여 해석하였으며, 구체적인 사양 및 내진해석 조건은 아래와 같다.

- Spec. : 3PH 60Hz 216/288/360MVA (230/70kV)
- Seismic Level : High level 0.5g ZPA of RRS
- FEM Program : ANSYS 6.0
- Dead weight/Wind Pressure/Hydrostatic Pressure

제품의 진압이 115kV가 넘으므로 정적 해석을 통하여 내진 해석이 이루어져야 하나, 이해를 위하여 동적해석이 진행되었다. 동적해석은 하중에 영향을 주는 실질 질량의 90% 이상이 유한요소 모델에 반영되어야 하므로, 부속 구조물을 포함한 전체적인 변압기의 모델링이 이루어졌다.[10]

일차적으로 표 5와 같이 한글(Modal Analysis)를 통해 33Hz 이하 범위의 고유 진동수를 산출하였으며, 응답 스펙트럼을 적용 하여, 그림 6 및 그림 7과 같이 최종 응력 및 변위 분포를 계산하였다.

표 5 해석에 의해 산출된 고유 진동수.

Table 5 Computed natural frequencies with modal analysis.

Order	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th
Frequency (Hz)	2.19	5.14	5.43	6.13	6.75	7.25	8.73	9.18

표 5에서 각 주파수의 모드는 주 구조물인 외함보다는 부속 구조물인 절연유 보존 장치 또는 냉각기, 부속구조물에서 피칭(pitching), 요잉(yawing) 및 롤링(Rolling) 형태의 강제모드가 관찰되었다. 계산된 최대 응력 및 최대 변위량을 표 6에 정리하였으며, 이 값은 AISC의 허용 응력 및 IEEE Std. 693-1997의 변위량 조건을 만족한다.

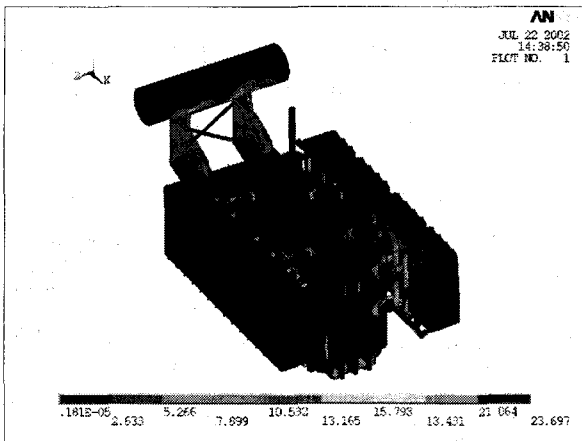


그림 6 변압기의 응력분포(kgf/mm²)
Fig. 6 Stress distribution of transformer(kgf/mm²)

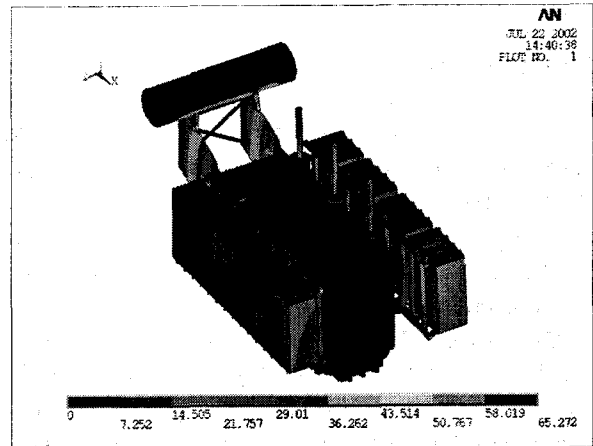


그림 7 변압기의 변위량 분포(mm)
Fig. 7 Displacement distribution of transformer (mm)

표 6 최대 발생 응력 및 최대 발생 변위량 요약

Table 6 Summary of Maximum stress and displacement

Result	Assembly	Location	Computed value
Maximum Stress value*	Radiator	Radiator Supporter	0.769
Maximum Displacement	Conservator	Top of Conservator	65.272 (mm)

* : Combined stress value by AISC (must ≤ 1.0)

3. 결 론

본 연구에서는 변압기 내진 해석을 위하여 IEEE Std 693-1997의 내진 보증 방법 중 정적 해석 보증법(Static analysis qualification method) 및 동적 해석 보증법(Dynamic analysis qualification method)을 이용하였다. 변압기의 내진 해석을 통해 내진 적용 설계시 다음 사항이 고려되어야 함을 알 수 있다.

1. 내진 조건 적용시 가장 많은 응력이 발생하는 부위는 주 구조물에서 부속 구조물로 연결되는 부분이다.
2. 하중이 전달되는 연결 구조일 경우, 상대적으로 허용 응력을 작게 선정하므로, 강도 면에서 적절한 연결 구조의 설계 반영이 중요하다.
3. 최대 변형량은 주로 부속 구조물의 끝단에서 발생하므로 가로 및 세로 축 방향으로 변위를 구속할 수 있는 장치가 마련되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] IEEE Std 693-1997 "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substation" Annex D "Transformers and liquid-filled reactors" IEEE Power

- engineering society. pp. 58-62, 1998.
- [2] IEEE C57.114-1990 "IEEE Seismic Guide for Power Transformer and Reactors" IEEE Power engineering society.
 - [3] ANSI/IEEE Std 344-1987 "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations" IEEE Power engineering society.
 - [4] ANSI/ASCE 7-95 "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures" American Society of Civil Engineers. 1996.
 - [5] ANSYS Release 6.0 ; FEM Solution Program that was used for seismic analysis of transformer. ANSYS, Inc. 2001.
 - [6] "내진 설계 성능기준" "Chap 1.2 내진 성능 수준" KEERC 지진공학 연구센터. 1997.
 - [7] IEEE Std 693-1997 "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substation" "Chap.7 Qualification Method: An overview" IEEE Power engineering society. pp. 21-24, 1998.
 - [8] IEEE Std 693-1997 "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substation" "Chap.6 Conductor induced loading" IEEE Power engineering society. pp. 18-20, 1998.
 - [9] "Manual of Steel Construction" 8th edition. 1980. "Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings" American Institute of Steel Construction, Inc. 1978
 - [10] IEEE Std 693-1997 "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substation" Annex A "Standard clauses" IEEE Power engineering society. pp. 36-50, 1998.

저 자 소 개



양재철 (梁在哲)

1970년 3월 7일생. 1995년 부산대 생산 기계공학과 졸업. 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1994년~현재 현대중공업 변압기설계부
 Tel:052-230-8576, Fax:052-230-8228
 E-mail : jacy@hhi.co.kr



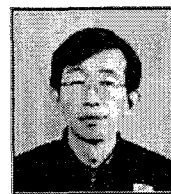
노효철 (盧孝哲)

1973년 1월 27일생. 1998년 부산대 기계공학과 졸업. 2000년 동 대학원 기계설계공학과 졸업(석사). 2000년~ 현재 현대중공업 변압기설계부
 Tel:052-230-8576, Fax:052-230-8228
 E-mail : petrus@hhi.co.kr



김호영 (金浩榮)

1958년 1월 5일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1984년~현재 현대중공업 변압기설계부
 Tel:052-230-8171, Fax:052-230-8228
 E-mail : hoykim@hhi.co.kr



박균수 (朴均洙)

1951년 7월 18일생. 1979년 전남대 전기공학과 졸업. 1978년~현재 현대중공업 변압기설계부
 Tel:052-230-8162, Fax:052-230-8228
 E-mail : parkks@hhi.co.kr