

## Prediction of the Plastic Deformation of the Transformer Tank at the Time of Vacuum Oiling

李 禎 勳<sup>†</sup> · 金 正 贊<sup>\*</sup> · 崔 在 弼<sup>\*\*</sup>  
(Junghoon Lee · Jungchan Kim · Jeapil Choi)

**Abstract** - The transformer tank is pressurized by atmosphere at the time of vacuum oiling and, plastic deformation occurs at the section of stress concentration on transformer tank at this time. It is important to predict where the sections of stress are in order to prevent deformation and to add reinforcement. This paper presents prediction results where the sections of stress are occurred and whether plastic deformation occur or not, using structure analysis program(ANSYS-design program).

**Key Words** : Transformers, Stress Analysis, Deformation, Finite Element Method, Design

### 1. 서 론

변압기 절연유의 주유 시 절연물 틈새, 유도 등 협소한 공간에 대한 원활한 절연유의 침유와 탱크내부의 수분제거를 위해 탱크내부의 공기를 진공펌프로 제거하는 진공주유공정이 있다. 이때에 변압기는 내부 공기 제거로 인한 압력의 차로 인하여 외부의 대기압을 받게 되는데, 이 공정 중에서 응력이 집중되는 부위에 소성변형이 발생하는 경우가 있다. 이럴 경우 압력을 제거한 후에도 영구변형이 발생하여 이를 다시 원형상태로 복구하여야 하는데, 복구 시에는 많은 작업공수가 들어가게 되며 원형으로 복구하는 해결방안 또한 원활하지 않다.

이러한 소성 변형의 예측을 위해 변압기 설계자는 각 취약부분을 찾아내는 강도 계산을 반드시 수행하여야 하며, 이러한 과정 또한 많은 시간이 소요되며, 많은 계산을 사람의 손으로 수행하여야 하므로 오류가 발생할 수 있는 가능성이 높다. 따라서 현재 대부분의 변압기 제작과정에서는 예상되는 취약부분 뿐만 아니라 변형과 상관없는 부분에도 과도하게 보강하여 이러한 소성변형에 대비하는 경우가 많다. 그러므로 과도한 보강으로 인한 재료비와 공수의 절감 및 품질의 향상을 위하여 변형발생의 위치를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 상용 구조 해석 프로그램인 ANSYS-Design Space를 이용하여 154kV 변압기를 대상으로 소성변형을 예측하였다.

### 2. 변압기 탱크의 해석

#### 2.1 일반사항

일반적으로 재료의 탄성영역을 넘어 영구변형(소성 변형)을 일으키는 응력조건을 항복조건이라고 한다.[1] 재료가 취성 재료인가 연성재료인가에 따라 해석시 적용하는 항복조건이 다르므로 재료의 특성에 적합한 항복조건을 선택하여야 한다. 변압기 탱크의 재료는 전부 단일 재료이며, 이종재료간의 특성으로 인한 응력의 분포 변화는 발생하지 않는다. 재료는 일반 강판 재료인 SS400를 사용한다. SS400은 연성재료이므로 전단변형 에너지설(Von Mises)과 최대 전단 응력설을 택하여 해석에 적용하는 것이 적합하다.[2] SS400의 물성치는 표 1과 같다. 각 물성치는 온도에 좌우되지 않는다. 이는 변압기의 온도의 최대 상승 값은 65℃이므로, 이 온도 값의 변화로 인한 재료의 물성치 변화 값은 무시할 정도로 작기 때문이다.

표 1 SS400의 물성치  
Table 1 Properties of SS400 [3]

Name	Value*
Density	7.85 g/cc
Tensile Strength, Ultimate	460 Mpa
Tensile Strength, Yield	250 Mpa
Modulus of Elasticity	200Gpa
Compressive Strength, Yield	250 Mpa
Poisson's Ratio	0.26

#### 2.2 요소 및 메쉬 조밀도(Mesh Density)의 선택

유한 요소 해석을 위해서는 우선 해당 모델의 특성에 맞

<sup>†</sup> 교신저자, 學生會員 : 日進重工業 變壓機設計 Team  
E-mail : junghoon.lee@iljin.co.kr

<sup>\*</sup> 學生會員 : 日進重工業 變壓機設計 Team

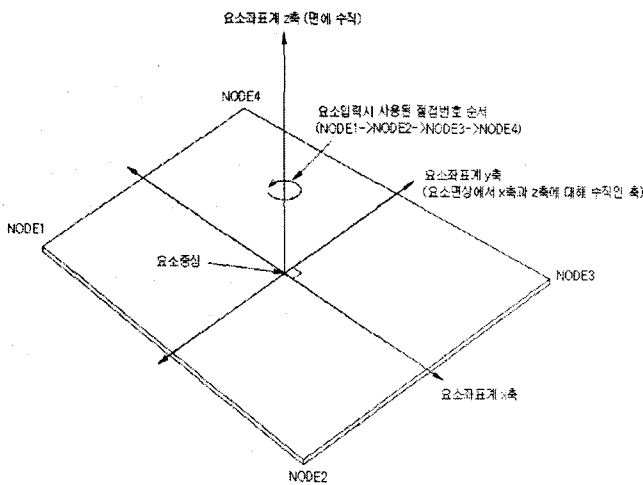
<sup>\*\*</sup> 學生會員 : 日進重工業 變壓機設計 Team

接受日字 : 2005年 9月 21日

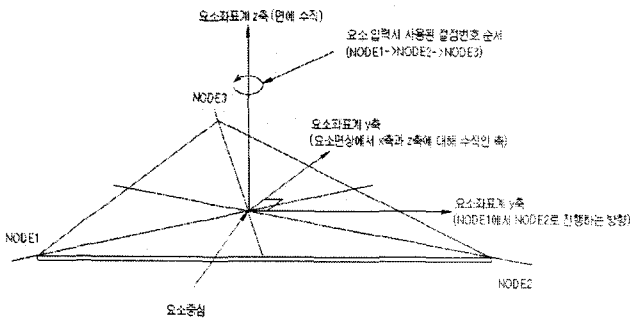
最終完了 : 2005年 10月 7日

계 요소를 선택하여야 하며 메쉬 조밀도(Mesh Density) 또한 적절하게 선택해야 한다.[4][5] 그 이유는 해석 시간과 해석의 정밀도를 최적화해야 하기 때문이며, 요소 선택을 잘못하는 경우 해석의 신뢰성이 떨어짐은 물론, 자유도가 다른 요소들의 연결 시 힌지(Hinge)현상이 발생할 위험이 있기 때문이다. 따라서 해석에 앞서 변압기 탱크가 어떠한 요소들로 구성되어 있는지에 대해서 선택할 필요가 있다.

일반적으로 변압기의 탱크는 강판의 벽과 이를 지지하기 위해 취부 되는 보가 복합된 구조물이다. 강판은 판 요소(3D plate element)로 볼 수 있으며, 평면 및 두께 방향으로 압축, 인장, 전단거동을 할 수 있다. 요소자유도 및 좌표계는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 사각형 요소의 요소좌표계



(b) 삼각형 요소의 요소좌표계

그림 1 판 요소 좌표계

Fig. 1 Plate element coordinates

그리고 벽에 취부되는 보강은 보요소로서 그림 2와 같은 좌표계를 가지게 된다. 보요소는 인장 및 압축, 전단, 굽힘, 비틀림 등의 거동을 할 수 있으며, 두 개의 요소가 동일하게 6개( $U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$ )의 자유도를 가지고 있으며, 3축 응력이 발생한다. 따라서 두 종류의 요소가 결합된 구조물의 경우, 자유도가 일치하여 모델링시 별도의 힌지(Hinge) 효과를 방지하는 결합조건을 추가할 필요가 없다.

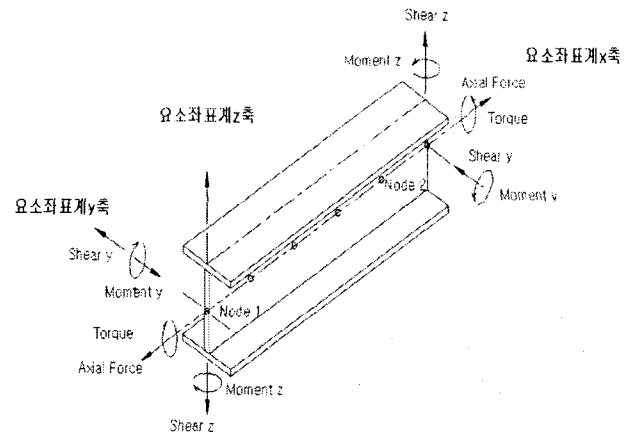


그림 2 보 요소 좌표계

Fig. 2 Beam element coordinates

따라서 변압기 탱크와 같이 판재와 보강이 결합된 구조물의 경우에는 각 요소들이 결합(Bonding)이 되어 있으며 상용 모델러를 이용이 가능하다. 이에 따라 해석 대상의 모델링을 위하여 3D 모델러인 솔리드 워크스(Solidworks)를 이용하여 그림 3과 그림 4와 같이 탱크의 형상(Geometry)를 구성하였다.

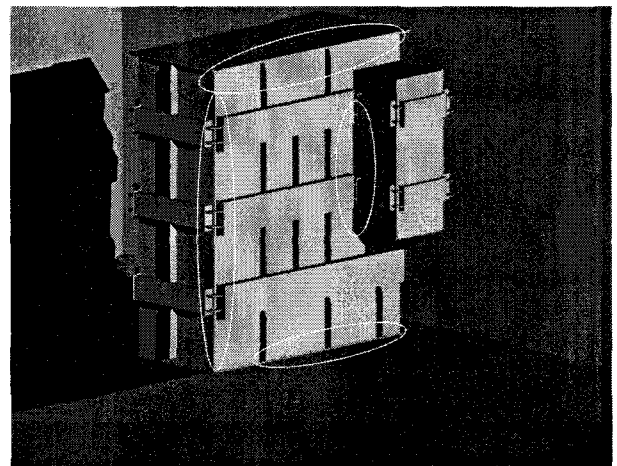


그림 3 탱크의 형상(A)

Fig. 3 Geometry of tank(A)

본 연구에서의 변압기는 그림 3, 4에서 D보강 형태의 종보강, 판형태의 횡보강 및 종보강을 연결해주는 보조보강, 뚜껑, 탱크벽, O.L.T.C(On Load Tap Changer)가 취부되는 탱크벽에서 돌출된 부분 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으며, 외부의 응력이 가해질 경우 각 요소간 복합된 형태의 변위와 응력분포가 발생하기 때문에 서두에서 언급된 바와 같이 수식 계산은 불가능하며, 다만 메쉬(Mesh)의 조밀도(Density)를 결정하기 위하여 응력집중이 발생하는 부분과 경계조건을 결정하기 위한 조건들을 가질 수 있다.

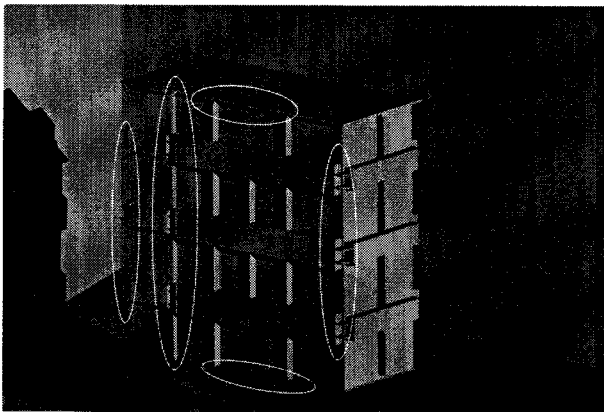


그림 4 탱크의 형상(B)  
Fig. 4 Geometry of tank(B)

그림 3, 4와 같이 원 타원형의 부분이 응력집중이 예상되는 부분이다. 보강을 일반 보의 거동으로 단순화할 경우 분포하중이 보에 작용하게 되면 길이방향으로 각 요소를 나누어 볼 때 변형율의 변화가 제일 급격하게 발생하는 곳이 고정되어 있는 양단 부분이므로, 그림 4와 같이 저판 및 뚜껑과 탱크벽이 연결된 부분에 응력 집중이 발생할 가능성이 크며, 이를 기초로 하여 메쉬 조밀도(Mesh Density)를 조절하게 조정한다.

특히 탱크 저판의 경우 아래 방향으로 하중이 작용하며, 조상(Lifting)시 변형이 없이 중심의 하중을 전달 수 있도록 저판에 기초가 보강되어 있다. 따라서 대기압에는 충분히 견딜 수 있다고 가정하였으며, 실제로 대기압에 의한 응력변화가 없으며, 자유도가 모두 구속되어 있는 부분이라고 볼 수 있다. 이는 해석의 효율성을 위하여 메쉬 조밀도(Mesh Density)를 고려하지 않아도 됨을 의미하며, 그림 5와 같이 조밀도(Density)를 여유롭게 고려하여 선택하였다.

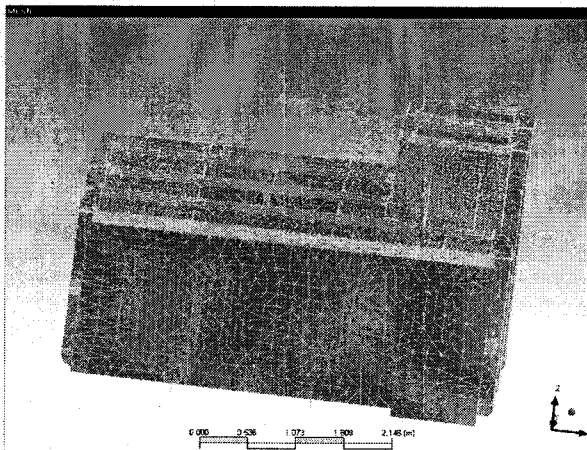


그림 5 저판의 메쉬  
Fig. 5 Mesh at tank bottom

### 2.3 경계조건(Boundary condition)의 결정

#### 2.3.1 구속조건

경계조건을 결정하는 것은 경계조건이 해석 결과를 결정

적으로 바꿀 수 있다는 점에서 매우 중요하며, 특히 구속조건에 따라 전혀 다른 결과를 얻을 수 있기 때문에 구속조건이 단순접촉인지 자유도를 모두 구속하는 완전구속인지 볼트 조임구속인지 등을 결정하는 것이 중요하다. 자유도에 따라 반력이 응력에 따른 반력의 유무가 결정되기 때문이다. 따라서 실제의 모델과 근접하게 구속조건을 결정해야 하나, 해석시간의 단축, 해석의 효율성을 위하여 가능하면 단순화할 필요가 있다.

만약 경계조건을 실제와 동일하게 선택하게 되면 저판에 변압기 중심의 하중과 이를 지지해주는 차대의 보강, 그리고 지면으로부터 하중에 반하는 반력조건을 경계조건으로 선택할 수 있으며, 이때에는 지면과 단는 차대면이 접촉되어 있는 조건을 가진다. 이와 같은 경우에 하중이 매우 크므로 그림 6과 같은 좌표계에서 x방향 및 z방향의 거동은 거의 없으며 두께 방향, 즉 y방향의 거동도 거의 없다. 이는 저판의 완전 구속과 동일하게 작용할 것이다. 만약 실제와 같이 이러한 경계조건을 모두 적용시키려고 한다면 모델링시 저판의 차대를 모델링하여야 하며, 하중과 지면으로부터의 반력 두 가지의 조건이 추가된다. 이를 적용하여 해석을 수행할 경우 모델링 시간과 해석시간이 증가한다.

이에 따라 변압기의 저판은 그림 6과 같이 완전구속이라고 가정할 수 있다. 상기에서 언급한 바와 같이 변압기 중심의 하중이 저판을 완전 구속된 것과 같게 효과를 발생시키기 때문이다.

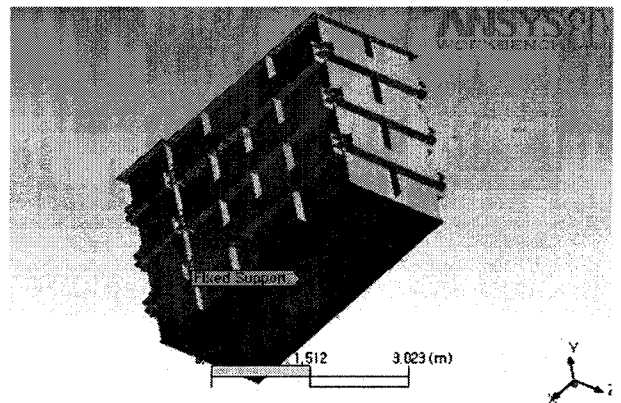


그림 6 구속부 (저판)  
Fig. 6 Fixed support (bottom plate)

#### 2.3.2 응력조건

변압기 내부의 공기를 제거할 경우 파스칼의 원칙에 따라 외부 대기의 압력이 그림 7과 같이 탱크 외 전면에 작용한다. 각 압력은 요소에 수직 방향으로 작용하게 되며, 내부의 공기를 완전히 제거했다고 가정하면, 압력은 101008.5Pa(1기압)이 된다. 그림 7에서와 같이 판재 형태의 종보강과 ㄷ보강을 연결하는 판재 횡보강들은 직접 압력의 영향에 의한 변형은 없으나 탱크벽과 횡보강들의 변형에 영향을 받는다. 특히 각 모서리 부는 응력이 집중되는 부위이므로 이 부분의 메쉬 조밀도(Mesh Density) 또한 조밀하게 구성한다.

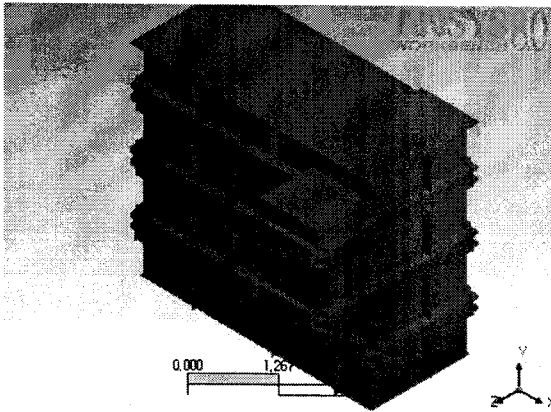
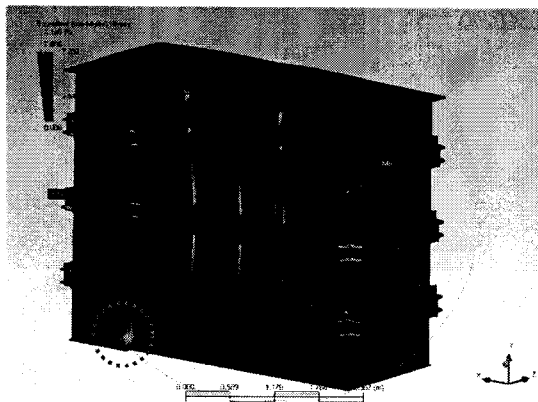


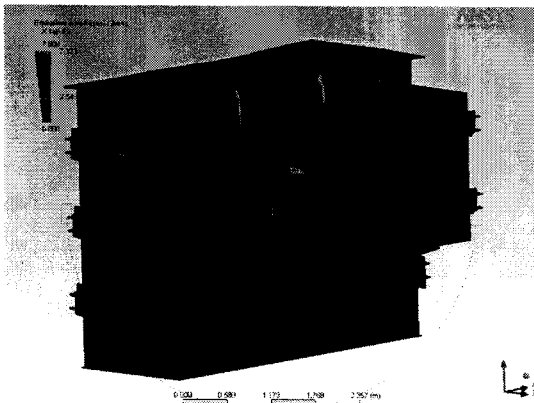
그림 7 작용하는 압력  
Fig. 7 Applied pressure

### 3. 해석결과 및 적용

해석 결과를 그림 8에 나타내었다. 항복조건은 전단변형 에너지설(Von Mises)과 최대전단응력설 2가지를 기준으로 잡았다. 앞에서 예상한 바와 같이 모서리부분과 저판과 탱크벽의 접합부분, 그리고 탱크벽과 뚜껑 부분의 접합부에서 응력의 집중현상이 발생함을 그림에서 보는 바와 같이 알 수 있다.



(a) 해석결과 (전면부)



(b) 해석결과 (후면부)

그림 8 해석 결과 (Von Mises)  
Fig. 8 Result of Solution (Von Mises)

특히 횡보강을 지지하는 종보강이 변형 발생을 억제하기 위하여 응력을 받고 있음을 볼 수 있다. 그림 8에서 청색 이외의 부분(그림에서 밝은 부분)은 재료의 인장응력보다 더 큰 응력이 발생하는 부분이다. 그림 8을 살펴보면 예상된 바와 같이 장경방향의 긴보강과 짧은 보강이 연결되는 부위에 집중응력이 발생하며, 변형량의 변화가 가장 큰 부분인 저판과 탱크벽의 연결부분에 집중응력이 크게 발생한다. 또한 횡보강과 종보강 접합부위에서도 변형으로 인하여 집중응력이 발생한다. 만약 위와 같은 보강형태에서 대기압을 받게 되면 보조 횡보강과 종보강에 영구변형이 발생되며, 그림 8 (a)의 점선 원 내에서도 영구변형이 발생된다. 이런 경우 보조보강은 쉽게 교체하거나 보강을 덧대는 것이 가능하나, 탱크 벽 자체의 경우는 원상복구가 어렵게 된다. 이러한 경우를 방지하기 위해 그림 8 (a)에 보강을 더 취부해야 한다.

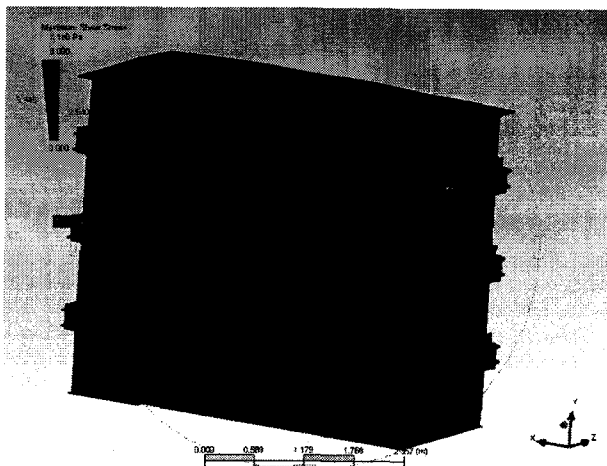
각각의 항복조건하에서 해석으로 구한 응력의 최대 값을 아래와 같다. 탱크의 재질인 SS400의 인장강도가 표 1에서와 같이  $2.5 \times 10^8 \text{Pa}$ 이므로, 이 수치를 벗어날 경우에 항복이 일어나는데, 표 2와 같이 최대응력점의 경우에는 재료의 인장강도보다 약 1.6~3배 정도 큰 응력이 발생한다. 전단 변형 에너지설(Von-Mises)보다는 최대 전단응력설에 기초한 해석이 그림 8, 9 및 표 2와 같이 더 작은 값을 가지므로 설계의 안전성을 위해 전단 변형 에너지설(Von Mises)의 값을 취하고, 이에 대한 안전 계수를 해석하였다.

표 2 각 항복조건 하에서의 최대응력 값  
Table 2 Maximum stress within each yield criteria

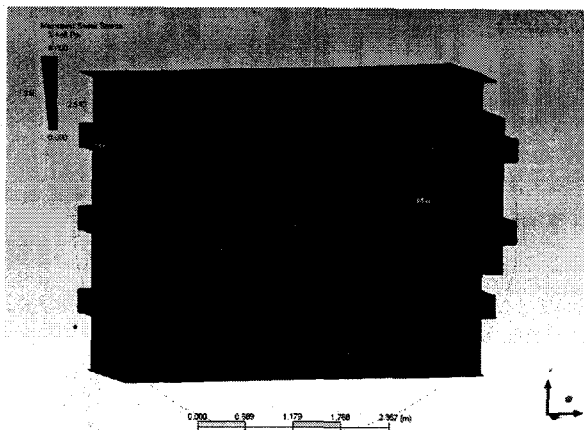
구 분	최대응력값
Von Mises (Equivalent Stress)	$7.61 \times 10^8 \text{Pa}$
최대 전단응력설	$3.95 \times 10^8 \text{Pa}$

그림 10과 같이 응력집중이 발생하는 곳의 안전계수가 1보다 낮은 0.33의 값을 얻을 수 있었으며, 하부를 중심으로 단경의 종보강과 장경의 종보강이 연결되는 부위에 응력집중이 발생함을 알 수 있다. 이는 만약 진공을 걸면 이 탱크가 안쪽으로 휘어지는 변형이 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 그림 11과 같이 종보강을 추가하여 소성변형을 방지하였다.

그림 12와 그림 13은 실제로 제작한 변압기 탱크이며, 초기에는 그림 12와 같이 종보강만을 더 추가하여 취부되었으나, 본 연구결과에 따라 그림 13과 같이 보강을 추가하여 제작하였다. 그림 13은 실제로 보강 취부후 진공주유를 실시한 후의 모습이다. 그림 13과 같이 보강은 횡보강 위에 종보강을 연속적으로 취부하였다. 이를 통하여 변형이 방지되고, 영구변형이 발생하지 않은 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 해석결과 (전면부)



(b) 해석결과 (후면부)

그림 9 해석 결과 (Maximum shear stress)  
Fig. 9 Result of Solution (Maximum shear stress)

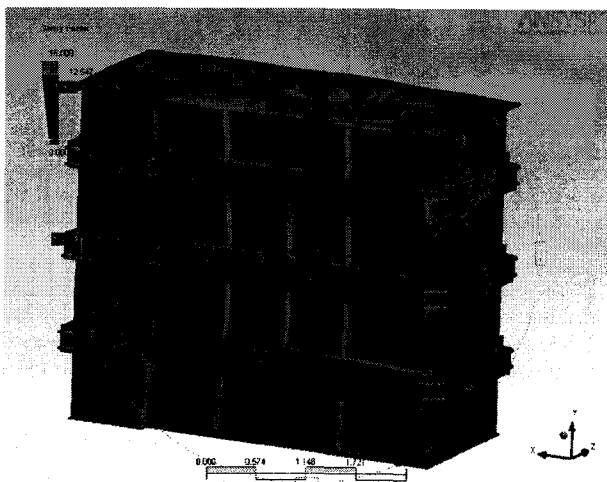


그림 10 안전율 (Von Mises)  
Fig. 10 Safety factor at Von Mises

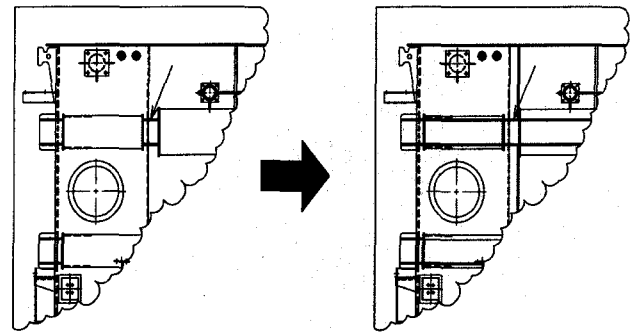


그림 11 안전율을 감안한 설계 변경  
Fig. 11 Re-design with considering safety factor

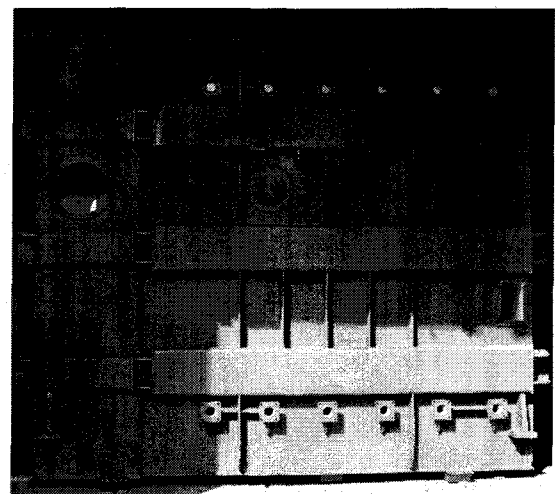


그림 12 초기 제품  
Fig. 12 Initial product

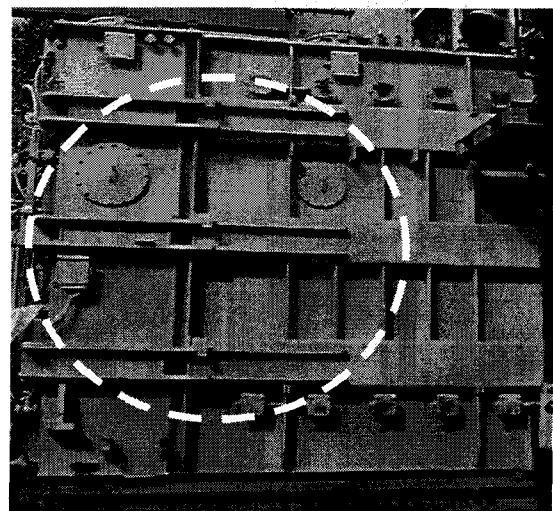


그림 13 설계변경을 제작에 적용  
Fig. 13 Applying redesign to production

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실제의 변압기를 모델링하여 진공주유 공정에 의한 응력 작용 시 응력 집중부위를 상용 해석 프로그램

램을 이용하여 해석하였고, 이러한 해석 결과를 바탕으로 하여 취약부위를 예측하였다. 또한 이러한 예측결과를 설계에 반영하였으며, 이를 기초로 실제 제작품에 적용하여 보강강도를 증가시켰다. 특히 해석 시 효율적인 해석과정을 위해 경계조건과 메쉬(Mesh)의 결정을 전처리 과정에서 수행하였다.

이러한 해석과정을 통해, 본 연구에서는 변압기 제작 시 발생할 수 있는 불량을 미연에 방지하고자 하였으며 이를 통해 품질을 향상시키고자 하였다. 이러한 해석과정을 통하여 추후에는 보강의 형태, 크기, 두께 등을 선택하여 최적의 설계를 할 수 있으며, 변압기 내부 절연유의 유체거동 및 열전달해석을 통하여 좀 더 효율적인 방열 시스템의 설계가 가능할 것이다. 또한 다양한 형태의 변압기에 적용하기 위하여 치수기입을 통한 표준 모델을 개발하여 해석에 적용할 것이며, 이를 통하여 단축된 시간 내에 변압기의 해석이 가능하게 될 것으로 생각된다.

**참 고 문 헌**

- [1] 재료역학, 반도출판사, 황충렬 외, pp. 9-19, Feb. 1995
- [2] 신기계설계학, 청문사, 박재춘 외, pp. 74-78, Jan. 1998
- [3] 일반구조용 압연강재, KS규격, KS-D-3503 : 1998
- [4] 유한요소해석 입문과 선형해석, 태성 에스엔이, pp. 145-150, Aug. 2003
- [5] "ANSYS 피로해석 모듈을 이용한 CANDU 6 핵연료 채널 응력해석 및 ASME Code에 따른 해석 절차 개발", 한국원자력학회지, 0372-7327, 제27권 3호, pp. 419-420, 1995

**저 자 소 개**



**이 정 훈 (李 禎 勳)**

1976년 9월 14일생. 2001년 성균관대 기계공학과 졸업. 2003년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학). 2004년~현재 일진중공업 변압기설계팀.

Tel : 032-770-2224, Fax : 032-761-2326  
E-mail : junghoon.lee@iljin.co.kr



**김 정 찬 (金 正 贊)**

1974년 2월 11일생. 1998년 서울산업대 기계공학과 졸업. 2004년 인하 대학원 기계공학과 졸업(공학). 2005년~현재 일진중공업 변압기설계팀.

Tel : 032-770-2219, Fax : 032-761-2326  
E-mail : jungchan.kim@iljin.co.kr



**최 재 필 (崔 在 弼)**

1977년 4월 30일생. 2005년 인하 대학원 기계공학과 졸업. 2005년~현재 일진중공업 변압기설계팀.

Tel : 032-770-2217, Fax : 032-761-2326  
E-mail : jaepil.choi@iljin.co.kr