

154 kV급 변압기 절연물 앵글링과 캡의 최적성형 기술 개발

서왕벽¹, 김종원¹, 유정수², 배동호^{2,a}

¹ 일진전기(주) 중전기연구소

² 성균관대학교 기계공학과

Development of Optimum Shape Forming Technology of Angle Ring and Cap for 154 kV Transformer Insulation

Wang-Byuck Suh¹, Jong-Won Kim¹, Jung-Soo Ryu², and Dong-Ho Bae^{2,a}

¹ Department of R&D, Iljin Electric Co.,Ltd, 112-83 Hwasung, Korea

² Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received May 3, 2010; Revised October 9, 2010; Accepted October 21, 2010)

Abstract: The Angle Ring and Cap which is called pressboard are settled at the primary and secondary coil winding of 154 kV transformer that can reduce effectively distance of insulation. As it has not manufactured pressboard of Angle Ring and Cap for high voltage grade, insulation components industry especially high voltage transformer has not participate in a competition with worldwide yet. That's why is difficult to make an specialized shape of insulation components of high voltage grade. Therefore it has finally completed to make an deformation manufacturing utility using an bellowed special analysis tools. This study that uses various analysis program determining optimum shape about insulation of Angle Ring and Cap which is related life of high voltage transformer. In addition to develop forming equipment with an specialized five steps pressing. That is also based on the mechanical strength evaluation and test, it is investigated optimized processing components.

Keywords: Angle ring and cap, Pressboard, Hydraulic deformation utility, High voltage transformer

1. 서 론

154 kV 초고압 변압기는 자로를 형성하기 위한 철심과 전로를 형성시키기 위한 권선으로 구성되어 있으며, 운전 중 또는 이상전압이 인가되는 경우에도 정상적으로 운전될 수 있도록 절연물 등으로 구성되어 있다. 절연물에는 액체와 고체로 구분되어지고, 고체절연 부품에는 절연지와 프레스보드류, 목재 등으로 이루어져 있다. 권선에는 1차 권선과 2차 권선으로 구성되어 있으며 철심에 코일 상태로 감겨져 있다. 코일에는 절연된 원형 또는 평각의 단면적을 갖

는 권선을 사용하며 권선기로 각 층마다 종이 형태의 절연물이 삽입 되어져 있는데, 코일의 권선 상호간 그리고 권선과 철심 사이에는 앵글링 (angle ring)과 캡 (cap)이라고 불리는 프레스보드를 사용하여 충분히 절연을 유지 시켜준다.

초고압 변압기 권선은 평각선으로 권선을 하여 권선의 저항 손실 이외에 발생하는 와전류손실이 있으며 이는 평각선 두께의 제곱에 비례하여 커지므로 도체의 두께를 크게 할 수 없다는 단점이 있다. 이에 따라 평각선 모서리의 곡률 반경은 전계집중을 완화시킬 정도의 곡률 반경을 얻을 수 없기 때문에 평각선 모서리부는 전계집중으로 절연이 취약해 질 수 있으며, 이에 주어진 절연레벨에 견딜 수 있도록 앵글

링과 캡 형태의 절연물을 변압기의 1차권선과 2차권선, 필요시 탭 권선 부의 상·하단에 각각 취부 하여 사용하게 되고, 이를 통하여 초고압 권선과 타 권선 및 대지 간의 전계 집중을 완화시켜 절연 거리를 효과적으로 줄일 수 있게 하여 준다 [1,2].

운전 중인 초고압 변압기의 주요한 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전, 이상 단락 전류 유입에 의거한 현상, 절연물에 대한 부분방전 열화현상, 진동에 의거한 기계적 마모 현상 등으로 구분할 수 있다. 이러한 현상 중에 열화현상은 초고압 변압기의 절연물로 사용되어지는 절연유와 절연재의 기계적, 전기적 성능이 점진적으로 저하되어 고장으로 발전하게 되는 주요 원인이 되기도 한다 [3]. 따라서 초고압 변압기의 성능에 직접적인 영향을 미치는 열화 메카니즘 분석에 의한 물리적 특성 연구로서 그 중요성이 높아지고 있는 추세이기도 하다 [4].

결국 운전 중 주기적으로 교체하는 절연유와는 달리 열적응력, 수분, 산도 등에 점진적으로 열화되는 앵글링과 캡의 프레스보드 절연물은 주기적으로 교체를 시행할 수 없기 때문에 열화적 메카니즘에 의거한 기계적 내력을 잃지 않도록 가장 좋게 검증된 성형 제조 공정을 거친 제품이어야 하며 이를 위해서는 제조 전에 최고의 성능을 갖는 설계 및 해석 검증작업이 필요하게 된다.

본 연구에서는 국내제도가 전혀 이루어지고 있지 않은 초고압 절연물이자 변압기의 수명과 직접적으로 연관되어 있는 앵글링과 캡의 프레스보드 절연물에 관하여 전산모사 해석을 통해 앵글링과 캡의 최적형상을 결정하고, 특화된 성형 설계 및 금형설계를 통해 최적화된 앵글링 과 캡의 프레스보드 제조공정을 제시하며, 본 연구에서 개발된 특화된 성형 제조 공법에 따라 성형된 제품을 인장강도 평가시험을 통해 최적의 성형 공정을 찾아내는 154 kV급 초고압변압기용 프레스보드 제조 공법을 제안하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 굴곡반경 변화에 따른 응력강도

이전의 절연물질의 주 관심사는 전기적 특성에 집중 되었기 때문에, 구조적인 강도에 대해서는 설계 입력 단계 시 중요한 포인트가 아니었다. 하지만

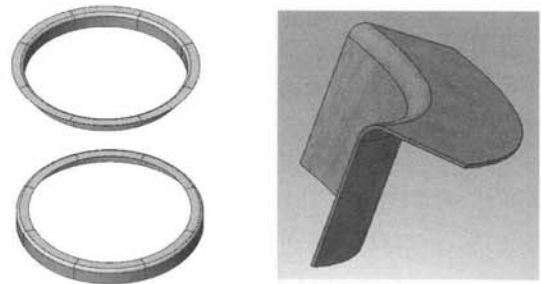


Fig. 1. Angle ring and cap.

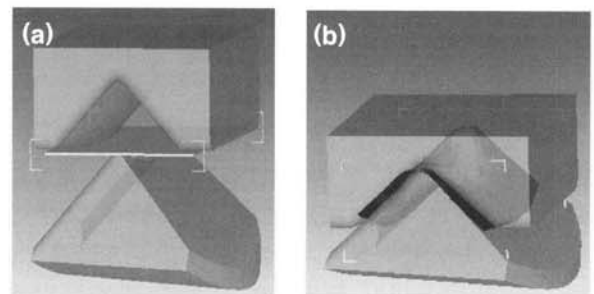


Fig. 2. The position of mold in DEFORM-3D analysis. (a) Before and (b) After.

초고압 변압기 운전 중 발생할 수 있는 이상 단락전류 유입 시 기계적인 내력을 견디지 못한다면 변압기 수명에 막대한 지장을 초래할 수 있기 때문에 설계입력 단계에서의 구조강도도 중요한 인자로 고려해야하는 추세로 바뀌었다 [5,6]. 따라서 그림 1과 같은 앵글링과 캡은 90°로 접혀진 부분에서의 응력강도 값을 분석하여 최적의 굴곡반경을 갖는 형태로 외형 설계가 이루어져야 하며, 제조 개발 시 성형조건에도 동시에 만족 하는 굴곡반경을 구하고자 하였다.

2.2 전계해석

앵글링과 캡의 외형을 결정하는데 있어서 강도 값 이외에 전압이 높아짐에 따라 증가하는 절연비용의 최소화를 위한 기기의 최적 절연설계를 하고자 전계 해석을 실시하여 전기적인 스트레스 값을 분석하였다. 응력해석을 통해서 도출 된 앵글링과 캡의 수량 변화를 가지고 전계집중 여부를 유한요소법으로 검증하고자 하였다.

2.3 소성 및 성형해석

지금까지 성형공정의 응력과 하중을 결정하는 방법을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행 되었으며 최근에는 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM을 사용하여 유한요소법을 적용하고 금형의 응력 분포가 최소가 되는 트리밍 다이를 설계하는 방법이 제시되었다.

그리고 최근에 와서는 제품의 종류가 다양해짐에 따라 비축대칭 및 비대칭인 것에 대한 관심이 높아지고 있으나 아직까지 비대칭 형상에 대한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 비대칭 형상의 앵글링과 캡의 제조공정 및 최적금형 설계에 관하여 연구 하였다.

앵글링과 캡의 금형을 3D 모델링 프로그램인 Solid Works를 사용하여 설계하고, 이를 강소성 유한요소 해석프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 그림 2와 같이 시뮬레이션 하였다. 해석 결과를 바탕으로 형상을 수정 및 보완하는 방법으로 재해석 과정을 반복하여 최적의 성형 공정 및 금형을 설계, 제작 하였다.

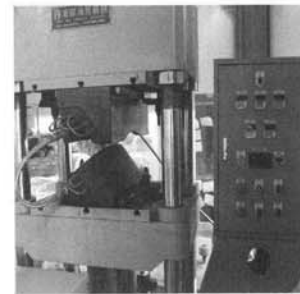
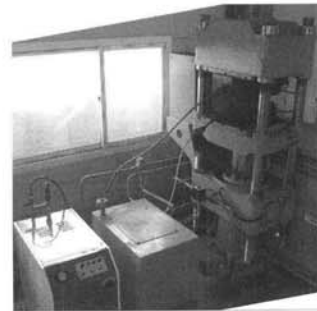


Fig. 3. Hydraulic forming equipment and controller; (a) Hydraulic forming equipment and (b) Hydraulic forming controller.

2.4 로직회로를 적용한 유압 성형장치

앵글링과 캡의 성형 제조 시 압축시간 및 압축압력을 단계별로 제어하여 신뢰성을 갖는 장수명의 초고압 변압기 절연물을 제작 하고자 로직회로를 적용한 스팀 유입형 유압유니트를 설계하고 그림 3과 같이 단계별 압축제어가 가능한 유압유니트 성형장치를 개발하였다.

주요 성형 공정은 그림 4에서와 같이 수분을 함유한 셀룰로오스 펄프를 소정시간 동안 가압하여 셀룰로오스 펄프에 포함된 수분을 제거하는 압착 탈수 단계와 수분 함유 셀룰로오스 펄프를 소정시간동안 가압하여 수분을 증발시키는 압착 증발단계를 거치는 방식으로 진행하였다.

또한 유압 성형장치는 상부 금형부와 하부 금형부 및 상부 금형에 고정된 상부 메쉬와 하부 금형에 고정된 하부 메쉬로 조립되었다. 수분을 함유하는 셀룰로오스 펄프를 가압하기 전에 상부금형과 하부금형은 일정 시간동안 예열 하였다. 상부금형 및 하부금형을 예열하기 위하여 특화된 보일러의 온도와 펌프의 압력을 설정 하였으며 스팀출력을 상부 및 하부 금형에 배출 시키는 구조로 제작하였다.

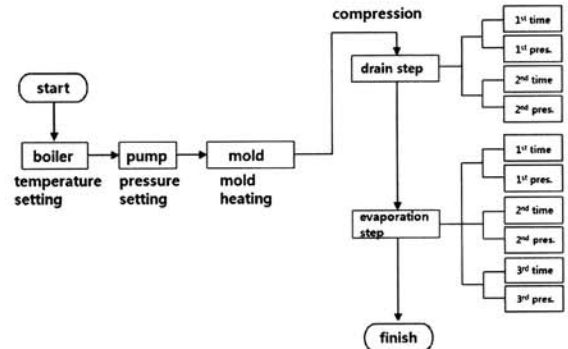


Fig. 4. Deformation manufacturing process with logic circuit.

3. 결과 및 고찰

3.1 굴곡반경 변화에 따른 앵글링과 캡 강도

154 kV급 변압기용 앵글링과 캡의 형상을 도출하기 위해 제한된 공간 내에서 최대의 구조적 강도 값을 갖는 굴곡반경을 설정하고 최대 주응력값의 추이를 분석 하였다. 본 해석에는 Solid Works와 ANSYS 프로그램을 사용하였으며 그림 5와 같은 결과를 얻었다.

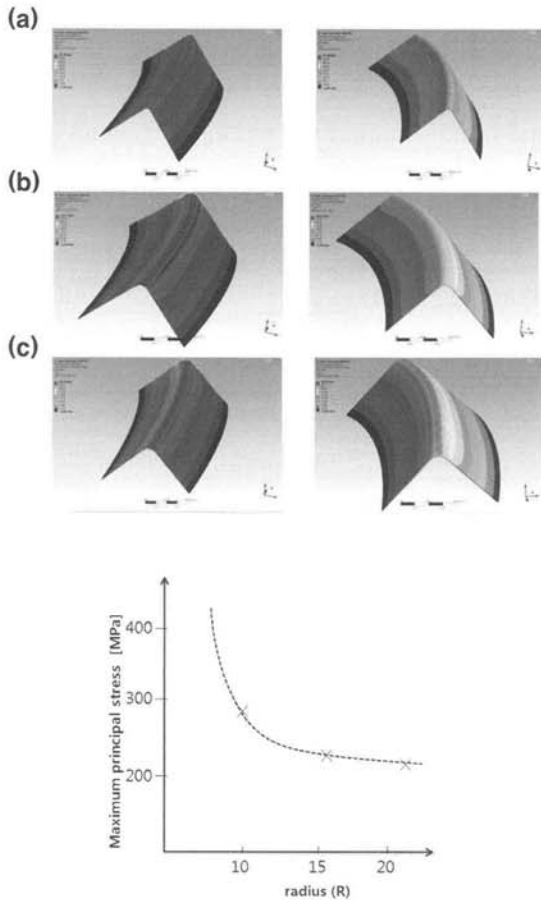


Fig. 5. Relationship between the maximum principal stress and the radius of curvature: (a) R=10, (b) R=15 and (c) R=20

최대 주응력 값은 굴곡반경 R의 변화에 따라서 달라지지만 최적 굴곡반경은 R15~R20 범위로 평가되었다.

3.2 전계해석

초고압 변압기용 앵글링과 캡의 형상에 대한 응력 해석 결과를 가지고 앵글링과 캡의 설치수량 변화에 따른 최대 전계값의 추이를 분석하였다. 해석결과 그림 6과 표 1과 같은 전위와 전계 결과를 얻었으며 굴곡반경이 클수록 최대전계는 0.3% 감소하고 설치개수의 증가에 따라 3% 감소함을 확인하였다.

3.3 소성과 성형해석

유한요소 해석을 통하여 셀룰로스 펄프 소재의 성

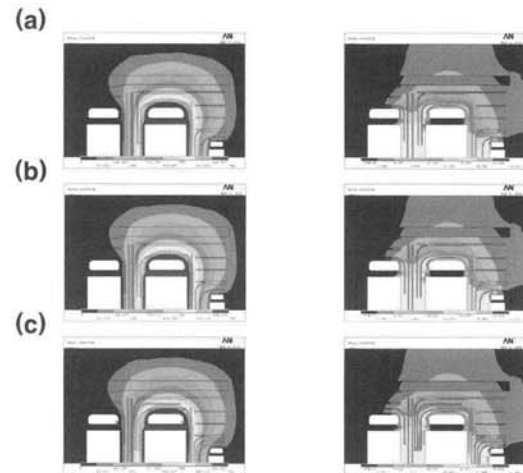


Fig. 6. Electric potential and electric field by the change of amount and radius of angle ring and cap: (a) R=15, Quantity 2, Maximum electric field, (b) R=20, Quantity 2, Maximum electric field and (c) R=20, Quantity 3, Maximum electric field

Table 1. The maximum electric field by the change of amount and radius of angle ring and cap.

Radius (R)	15	20	20
Quantity (pieces)	2	2	3
Maximum electric field(kV)	23.838	23.767	23.101

형 거동을 확인 하였으며, 해석은 금형의 하부고정과 상부 펀치의 속도를 조절하면서 수행 하였다. 전체 해석 과정은 82 스텝으로 구성하였고, 각 스텝에서 금형 이동거리는 0.1 mm로 하여 해석을 진행하였다.

해석결과는 그림 7과 같이 최대 응력은 60 MPa 이 나왔지만 이는 완제품과의 거리가 먼 쪽으로 확인되었고, 전체적으로 굴곡진 부분을 중심으로 40~50 MPa로 나타났다. 성형이 완료된 상태에서 그림 8과 같이 앵글링과 캡의 내부의 주름을 확인 할 수 있었으며, 이는 실제 성형과정에서도 동일 한 결과가 있음을 확인 하였다.

3.4 유압 성형장치

본 연구를 통하여 90°로 접혀진 프레스보드 이외에 원통형으로 라운딩된 형상을 동시에 만족하는 앵글링과 캡의 금형을 DEFORM-3D 해석결과를 바탕으로

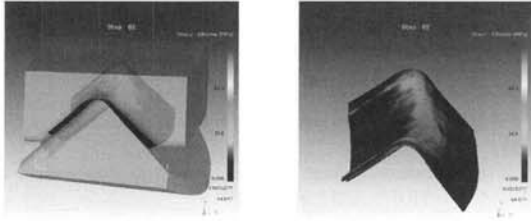


Fig. 7. Equivalent stress of angle ring and cap.

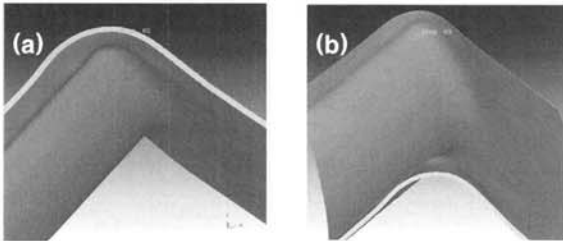


Fig. 8. The wrinkle pattern of angle ring and cap; (a) Inside part and (b) Outside part.

제작하였다. 유압 성형장치의 보일러 온도를 200~250℃로 하였으며, 스팀압력을 5 kg/cm²까지 상승시켜 상하부의 금형을 가열 하였다. 최적의 압력과 시간의 설정은 여러번 시행착오를 거쳐 구하였는데, 그림 9와 같이 성형압축력과 시간은 최저 압축력 18 kg/cm²에서 최고 압축력 110 kg/cm²까지의 5단계의 압축력을 1,250초 기간동안 설정하여 압축시키는 제조공법의 결과를 구하고 앵글링과 캡의 프레스보드 성형제품을 완성하게 되었다.

3.5 인장강도 평가

IEC60641 기준에 따라 성형된 제품의 인장강도를 평가 하기 위하여 성형공정에 의거해 시험편을 제조 하였다. 상부금형과 하부 금형 메쉬의 조건과 초기설정 기준 시간 대비 압력을 변화시키면서 인장강도 시험을 수행함으로써, 성형 적합성 여부를 평가하고 최적의 성형 프로세스를 구하였다.

인장강도는 절단시의 힘을 시험편의 원래 단면적으로 나눈 응력(MPa)으로 나타내었다. 그림 10과 같이 시험 결과는 신규 메쉬를 적용하였을 때 기존 메쉬보다 인장응력은 2%, 파단시간은 18% 증가됨을 알 수 있다.

단순히 압력을 기준으로 비교하여 보았을 때, 기준

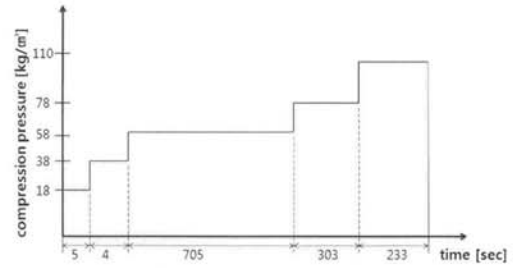


Fig. 9. The relation between compressed and time for processing

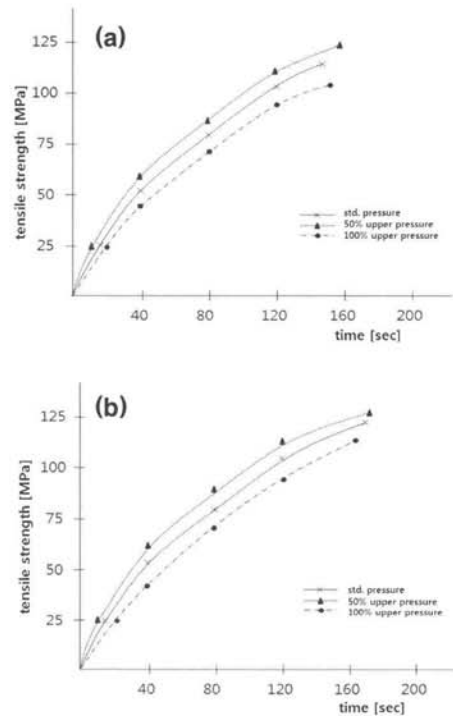


Fig. 10. Tensile strength by the change of mesh condition and forming compression force
(a) Tensile strength result using 100 mesh
(b) Tensile strength result using 200 mesh

압력 대비 50% 증가한 압축력이 가해졌을 때가 최고 인장강도를 나타내며, 그 이상의 압축력에서는 오히려 인장강도가 최고하중 대비 17% 감소함을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 154 kV급 변압기의 수명과 직접적

인 연관 관계가 있는 앵글링과 캡의 프레스보드 절연 부품을 설계입력 단계에서 최적의 형상을 구하고, 금형설계 및 제조, 제어로직 회로를 적용한 다단 압축 제어용 유압 성형장치를 개발하여 제품 성형 제조개발을 실시하였으며, 완성된 시제품을 인장강도 시험 평가를 통하여 제조공정의 적합성 여부를 판단하여 다음과 같은 최적 성형 프로세스를 구하였다

앵글링과 캡의 굴곡반경 R15에서 R20범위 내에서 최대 주응력값을 보여주고 있으며 굴곡 반경이 적을 시 단계적으로 14% 증가하였다.

앵글링과 캡의 굴곡반경 R15에서 R20 범위에서 앵글링과 캡의 설치수량이 증가함에 따라 최대전계값이 3%씩 감소함을 보여 주고 있지만 실제 설치 수량의 변화가 전계값의 영향에 미치는 범위는 극히 미비함을 확인 하였다.

154 kV급 변압기 절연물 앵글링과 캡을 제조하는 프레스보드의 유압성형 장치와 로직회로를 적용한 5 단계 압축성형 제조공정을 개발하였다.

인장강도 평가를 통하여 성형압축 공정에서는 50% 향상된 메쉬를 적용하였을 때 기존메쉬 보다 하중값은 2%, 파단시간은 18% 증가함을 확인하였다. 정해진 기준 압축력과 비교하였을 때 50% 증가한 압축력의 시편이 최고 하중값을 나타내었고, 기준 압축력과 비교하여 최대 100% 증가시 최고하중은 기준 압축력 대비 17% 감소함을 확인하였다.

제조공정의 프로세스에서 1,250초 기간 내에 최저 압축력 27 kg/cm²에서 최고 압축력 165 kg/cm²의 5 단계 압축공정을 수행할 경우 앵글링과 캡의 인장강도가 IEC60641에서 적용된 기준값보다 최대 25% 향상됨을 확인하여 최적 성형 기술임을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원의 전력산업 연구개발사업 (10030077)으로 수행된 과제의 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] H. Herman etc, *IEEE ICSD*, p. 473-476 (2001).
- [2] K. Giese, *IEEE ELECTR INSUL M*, Vol. 12, No. 1, p. 29 (1996).
- [3] M. Ali, C. Eley etc, *IEEE ELECTR INSUL M*, p. 28-34 (1996).
- [4] S. W. Eom and G. Y. Kim, *KIEEME*, Vol. 8, No. 4, pp. 413 (1995).
- [5] *IEEE 60641-2 and IEEE 60641-3* (2003).
- [6] H. Z. Ding and Z. D. Wang etc, *IEEE EID*, p. 497-500 (2006).