

고정자 권선용 F종 주절연 테이프의 전기적 특성

김태희*, 강명국**, 이재권**, 손삼용**
 두산중공업(주) 기술연구원, 터빈발전기BG

Electrical characteristics of class-F groundwall insulation tapes for stator windings

Tae Hee Kim*, Myung Guk Kang**, Jai Kwun Lee**, Sam Young Son**
 R & D Center, Turbine BG**, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - Class-F and B resin-rich type insulating tapes are generally used for the groundwall insulations of respective air-cooled and water-cooled stator windings in larger turbine generators. In this paper, their electrical properties coupled with aging times in higher temperature than designed one in normal condition were experimentally investigated and the results of two comparative tests were presented on the existing class-F resin-rich type tape and a developed one after curing. The resin-rich tapes currently used are composed of six and a half 3-layer sheets that are structured with mica paper, the top and bottom supports of it respectively, and the epoxy resin to bind them tightly. The results for breakdown voltage and strength on the cured specimens were presented, which were composed of the unaged, the aged accelerated for one, two, and three thousand hours at 180 °C. The surface and volume resistivities on them were measured and the results are also presented to make a comparative test for the initial electrical characteristics.

1. 서 론

전 세계적으로 대형전력 설비에 대한 안정성이 중요시 되고 있는 가운데 특히 발전기의 안정성은 많은 부분이 고정자 권선의 절연성에 의존하는 바가 크다. 그로 인하여 On-line과 Off-line 절연 감시나 수명 평가에 대한 국내외 기술개발이 주로 고정자 절연에 대한 감시나 평가에 초점을 두고 수행되고 있다[1].

발전기의 주요 핵심 소재 중 하나인 고정자 권선용 주절연 테이프에 대한 기술 개발은 국내외 기술적, 경제적 현실로 인하여 일부 학교나 정부기관에서는 주로 연구 수준으로 그치고 있으며 산업체에서의 개발이 부진하여 그 결과 대형 발전기용 주절연재의 개발은 지금까지 거의 전무한 실정이었다[2].

두산중공업에서는 현재 국내의 중소형 전동기 절연 테이프 제작업체와 함께 터빈 발전기용 F종 및 B종 레진 리치형 절연 테이프를 개발을 진행 중에 있다. 본 논문에서는 개발 중인 F종 레진 리치 테이프와 기존에 발전기 고정자 주절연용으로 사용 중인 F종 레진 리치 테이프에 대한 비교 시험을 수행한 결과 중에서 전기적인 특성 시험 결과를 소개한다.

2. 전기적 특성 시험

2.1 시편 준비

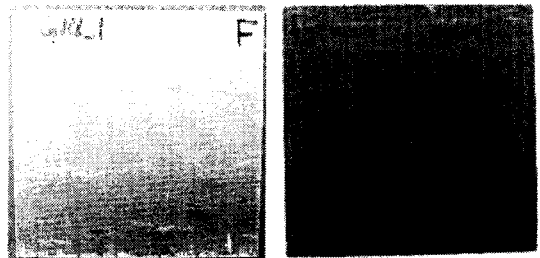
시험 대상으로 사용한 레진 리치형 F종 절연 테이프는 국내외의 발전기 제조사에서 기존에 사용하고 있는 테이프와 새로이 개발한 테이프이다. 절연 테이프는 3층 구조로 이루어져 있으며 마이카지, 그 상부와 하부에는 보강재 층이 있으며 각 층은 무용제 에폭시 수지로 마이

카지와 접착되어 있다.

시편을 제작하기 위하여, 먼저 절연 테이프를 금속판 위에 일정한 압력으로 당기면서 6번 반을 감았다. 판에 감긴 테이프 위로 보호용 필름 및 테이프를 다시 감은 후 진공 가압 컴파운드 탱크에 넣고 경화를 시킨 다음 보호재는 벗겨 낸다. 이 보호재는 경화공정에서 열전달 매체로 사용되는 아스팔트로부터 주절연을 보호하기 위하여 사용되며 본 레진 리치형 테이프의 경화 공정에서는 16시간의 가열 진공 공정과 약 12시간의 가열 가압 공정이 연속적으로 이루어진다[3]. 경화가 끝나고 보호재를 제거한 후 테이프에 감싸여 있는 시편 제작용 금속판을 제거한다. 최종 시편 형상으로 미리 정해진 일정한 크기로 자르고 절단면과 표면은 가공한다. 절연저항 측정용 시편의 크기는 100 mm × 100 mm이고 절연파괴 시험용 시편의 크기는 150 mm × 150 mm이다.

본 논문에서는 시편으로 제작된 이후에 인위적이거나 자연적인 온도상승이 일어나지 않은 시편을 비열화 시편이라 칭하고 이 시편들을 대상으로 절연저항과 절연파괴 특성을 시험하였다. 그리고 인위적인 가속 열화를 발생시키기 위하여 공기가 순환되는 건조로 속에 시편을 두고 시편의 표면 온도를 180 °C로 유지시킨 상태에서 총 3012 시간 35분을 유지시킨 시편을 대상으로 절연파괴 특성을 시험하였다. 이때 매 1000 시간 경과한 후 시편을 꺼내어 각각 절연파괴 시험에 사용하였다. 즉 절연파괴 시험에는 비열화, 1000 시간, 2000 시간, 3000 시간 열화시편을 대상으로 시험이 수행되었다.

절연저항 측정용 비열화 시편을 그림 1 (a)에는 나타내었으며, 그림 1 (b)에는 180 °C에서 2천 시간동안 가속 열화된 절연파괴전압 측정용 시편을 나타내었다. 저항 측정용 시편과 절연파괴용 시편은 두께가 동일하며 크기는 위에서 서술한 것과 같이 다르다.



(a) 비열화 시편 (b) 180°C, 2천 시간 열화
 그림 1. 절연저항 측정용 시편(비열화 상태)과 열화 후 절연파괴전압용 시편.

2.2 절연저항 측정 시험

ASTM D257[4]에 따라 제작된 비열화 상태 시편을 대상으로 표면저항률과 체적저항률을 측정하였다. 절연저항 측정을 측정기는 일본 TOA Electronics사의 절연저항 측정기 SM 8210과 판형 시편용 전극 SME-8310

(주전극 및 가드 전극의 크기: 각각 $\phi 19.6$, $\phi 24.1$)을 사용하였고 그림 2에 나타내었다. 시편의 두께 측정에는 Mitutoyo사의 마이크로미터를 이용하였다. ASTM D257에서는 도전성 도료나 은 도료 재질의 전극을 시편위에 제작하도록 명시되어 있으나 본 시험에서 사용한 SME-8310에는 전극이 장착되어 있고 시험시 시편을 넣은 상태에서 일정하게 힘이 주어지도록 설계되어 있기 때문에 별도로 시편에 전극을 만들 필요는 없었다.

시편을 전처리하기 위하여, 시편을 건조로에 넣고 150 °C에서 30분간 유지시킨 후 꺼내어서 데시케이터에 넣고 2시간동안 방랭시켰다. 표면저항률과 체적저항률을 측정하기 위하여 1 kV_{DC}의 시험전압을 시편에 인가한 다음 60초간 유지한 후에 지시된 저항치를 판독하였다. 최대한의 시험정밀도를 높이기 위하여 1회 측정 후 일정 시간동안 기다린 다음 그 다음의 시험을 수행하였다. 시험실의 온도는 24.9 °C에서 28.1 °C로 유지되었고 습도는 평균 22 %이었다.

시험기를 통하여 측정한 값은 표면저항(R_s)과 체적저항(R_v)으로 이를 각각 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 표면저항률(ρ_s)과 체적저항률(ρ_v)을 구한다.

$$\rho_s = 30 R_s [\Omega] \quad (1)$$

$$\rho_v = \frac{30}{t} R_v [\Omega \cdot cm] \quad (2)$$

여기서 t 는 시편의 두께[mm]이다.



그림 2. 저항 측정기 및 판형시편용 전극

2.3 절연파괴강도 시험

열화 여부와 열화의 정도에 따른 절연 테이프의 절연 파괴 특성을 분석하기 위하여 비열화 시편과 가속 열화된 시편을 대상으로 절연파괴 시험을 수행하였다. 시편에 고전압을 인가하는 방법은 ASTM Std D149[5]에 명시된 방법 중에서 단시간 상승법(Short-time rise method)을 적용하였으며 약 20 초 이내에서 시편에 절연 파괴가 일어나도록 전압상승 속도를 조절하였다. 시편과 전극은 절연유 내에 충분히 담기도록 하였으며 시험에 사용한 AC 고전압 인가장치는 고정자 권선용 바의 제조 공정상 제작 후에 바에 대한 Hi-pot 시험용으로 제작된 설비를 이용하였다. 전원인가 설비의 고전압 발생부 모습을 그림 3에 나타내었다.

3. 결과 고찰

경화된 비열화 시편을 대상으로 표면저항과 체적저항, 절연파괴전압을 측정하였고 180 °C에서 1천 시간, 2천 시간, 3천 시간 가속 열화시킨 시편을 대상으로 절연파괴전압을 측정하였으며 그 결과를 다음에 제시한다. 그림 4와 그림 5의 범례에서 Sp1(◆)은 개발 중인 F종 레진 리치형 절연 테이프를 Sp2(■)는 기존에 상용화되어 적용중인 F종 레진 리치형 절연 테이프의 시험 결과를 가리킨다.

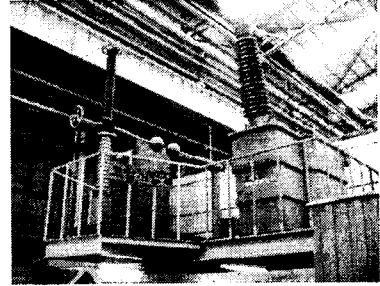
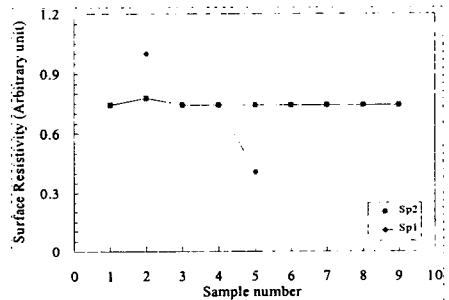


그림 3. AC 고전압 발생장치

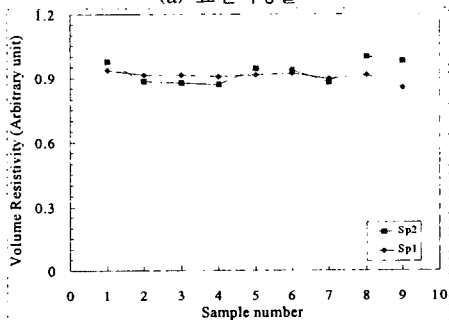
3.1 비열화 상태의 절연저항

9개의 시편을 대상으로 측정한 표면저항과 체적저항을 각각 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 표면저항률과 체적저항률을 구하였고 Normalize한 결과를 그림 4의 (a)와 (b)에 도시하였다.

시험 결과 두 테이프는 전반적으로 유사한 저항특성을 가지고 있다. 그러나 Sp2 시편의 표면저항률과 체적저항률이 각각 1.7 %, 2.2 %로, Sp1 시편보다 높았다. 본 시험에 사용된 저항측정기의 경우 시편에 1 kV_{DC}를 인가하여 $10^7 \Omega$ 보다 작은 측정범위에서는 오차율이 $\pm 10 \%$ 이 내이고 $10^8 \Omega$ 보다 높은 범위에서 측정시 $\pm 20 \%$ 이내임을 감안한다면 이러한 차이는 기기의 오차 범위 내에 있는 수치임을 알 수 있다.



(a) 표면저항률



(b) 체적저항률

그림 4. 표면저항률과 체적저항률 시험 결과

3.2 열화 조건에 대한 절연파괴 특성 변화

비열화 시편과 각 시간별 열화 시편을 대상으로 절연 파괴 시험을 수행하여 절연파괴 전압을 측정하였으며 절연파괴강도는 절연파괴 전압에 시편의 평균 두께를 나누어 구한다. 그 결과를 그림 5의 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림 5에서는 데이터에 대한 MS-EXCEL®의 지수함수 curve fitting 기능을 이용하여 추세선을 표시하였으며 이를 통하여 전반적인 가속열화 시간 변화에 대한 절연 파괴특성 변화를 유추할 수 있다.

그림 5에서 절연파괴전압 특성은 두 시편이 유사한 값

을 보이는 반면에 절연파괴강도는 Sp1이 일정한 차를 보이며 우수한 특성을 나타내었다. 이것은 시편을 경화한 이후에 시편 두께를 측정하였을 때 Sp2 시편이 진반적으로 Sp1 시편보다 두껍기 때문이다.

본 시험 결과를 고찰할 때 고려해야 할 점은 비열화 시편이나 가속열화 초기 시편과 가속열화를 오랫동안 지속한 시편간의 방전 형태가 상당히 다르다는 점이다. 비열화 시편과 열화 초기 시편에서는 주로 Flashover가 발생한 반면에 가속열화를 지속할수록 Puncture 발생이 빈번해진다는 점이다. 이러한 현상은 가속 열화가 장시간 지속될수록 시편의 내전압이 상대적으로 약해짐을 의미하는 것이지만 시편의 열화 시간에 따른 절연파괴특성을 규명하기에는 정밀도가 현저히 저하될 수 있다는 것을 내포한다. 즉 시편의 수가 정해진 상황에서 절연파괴전압은 각 시편의 평균값으로 결정되는데 Flashover가 발생한 시편의 평균치를 제외한 경우 대상 시편의 수가 작아져서 측정값의 신뢰성이 그만큼 저하되기 때문이다. 특히 Flashover가 대다수인 경우 Flashover로 인한 절연파괴의 경우는 제외하고 Puncture 발생시의 절연파괴값만을 취하게 되므로 오히려 절연특성이 상대적으로 취약한 시편의 절연파괴전압이 전체 시편의 대푯값이 되는 불합리가 발생할 수 있다.

따라서 비열화 시편이나 열화 초기의 시편에 대한 절연파괴전압은 상대적으로 가속 열화가 어느 정도 진행된 시편과 비교하여 그 정확도가 저하될 것으로 판단된다.

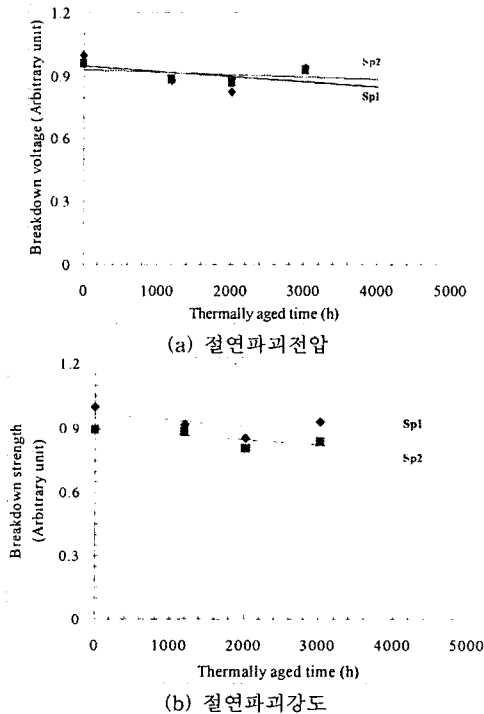


그림 5. 가속열화 시간에 따른 시편의 절연파괴전압과 절연파괴강도의 변화

4. 결 론

본 논문에서는 대형 터빈 발전기 고정자 권선 주절연용 F종 레진 리치형 절연 테이프에 대하여, 기존에 사용 중인 외국 선전사의 테이프와 개발 중인 테이프의 전기적 특성을 국제규격에 따라 비교 시험한 결과를 제시하였다.

비열화 시편을 대상으로 표면 및 체적저항률, 절연파괴전압, 절연파괴강도를 측정하였으며 180 °C에서 1천

시간, 2천 시간, 3천 시간동안 가속 열화시킨 시편을 대상으로 절연파괴전압과 절연파괴강도를 측정하였다.

시험 결과 비열화 상태에서나 가속열화가 일정시간 진행된 경우에서나 두 종류의 테이프가 유사한 전기적인 특성을 보였으며 절연파괴강도는 개발 중인 테이프가 더 우수한 결과를 보였다. 단, 두 테이프 모두에게서 비열화나 열화의 진행이 작았던 시편에 대하여 Flashover의 발생이 상대적으로 많았음을 고려하면 초기 절연파괴 측정치에는 다소 많은 오차가 있을 것으로 추정된다.

다양한 온도와 시험이 현재 진행 중에 있으며 이러한 시험 결과를 바탕으로 테이프의 품질 개선 및 수명 예측에 대한 연구가 진행될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Zhu, V. Green, M. Sasic, and S. Halliburton, "Increased sensitivity of capacitive couplers for in service PD measurement in rotating machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1184-1192, Dec., 1999.
- [2] 박정후, 마이카/에폭시 복합재료의 개발에 관한 연구 (최종 보고서), 부산대학교, 1988.; 김용주, "대형 발전기 고정자 권선의 제작 기술", 전기기술동향, 1995년 8월호 pp. 9-17, 1995.
- [3] 김태희외 6인, "대형 발전기 고정자 권선 주절연용 절연 테이프의 시험 방법", 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 12-15, 2003. 4.
- [4] ASTM D 257 92, Standard test methods for D C resistance or conductance of insulating materials.
- [5] ASTM D 149 92, Standard test methods for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies.

본 연구는 산업자원부 전력산업기술개발사업으로 수행되었습니다.