

고정자 권선용 F종 주절연테이프의 기계적 특성

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

Mechanical 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 Generator BG**, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract - Class-F resin-rich type insulating tapes are generally used for the groundwall insulations of the large turbine generators with air-cooled and hydrogen-cooled stator windings. In this paper, mechanical strength properties degraded over aging time in higher temperature than designed one in normal condition were experimentally investigated and the results of comparative tests were presented on the existing class-F resin-rich type tape and a developed one after curing.

The resin-rich insulating tapes with composite material of Mica/Epoxy/support currently were used in this test. The tests for tensile and flexural strength properties were conducted with the specimens which were composed of unaged and the aged specimens accelerated for one, two, and three thousand hours at 180 °C. The tensional strength was only measured for the unaged specimens and the results are also presented to make a comparative test for their initial mechanical characteristics.

1. 서 론

발전기 구성 요소 중에서 고정자 권선의 안정성은 발전기 전체에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있기 때문에 이 부분에 대한 On-line과 Off-line 절연상태 감시나 수명 평가에 대한 국외는 물론[1]이고 국내에서도 한전 전력연구원에서도나 한국전기연구원에서도 기술개발이 일정 수준까지 진행되고 있다[2]. 그러나 발전기의 주요 핵심 소재인 주절연용 테이프에 대한 기술 개발은 국내의 기술적, 경제적인 현실로 인하여 일부 학교나 정부기관에서는 연구 수준에서 그치고 있으며 산업체에서는 개발이 부진하거나 거의 전무한 실정이다[3].

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 상용화되어 발전기 고정자 주절연용으로 이미 사용 중인 해외 선전사의 F종 레진 리치 테이프에 대한 비교 시험을 수행한 결과 중에서 인장강도 시험과 굽힘강도 시험에 대한 결과를 소개한다.

2. 기계적 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 무용재 에폭시 수지로 마이카지와 접촉되어 있다.

시편을 제작하기 위하여, 먼저 절연 테이프를 금속판

위에 일정한 압력으로 당기면서 6번 반을 감는다. 판에 감긴 테이프 위에 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[4].

경화가 끝난 테이프는 중간의 금속판을 제거한 다음 시험 규격에 규정된 크기로 자르고 절단면과 표면은 가공한다.

본 논문에서는 시편으로 제작된 이후에 인위적이거나 자연적인 온도상승이 일어나지 않은 시편을 비열화 시편이라 칭하고 이 시편들을 대상으로 인장 및 굽힘 강도 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 굽힘 강도를 시험하였다. 이때 매 1000 시간 경과한 후 시편을 꺼내어 각각 굽힘강도를 측정하였다. 즉 굽힘 강도는 비열화, 1000 시간, 2000 시간, 3000 시간 열화시편을 대상으로 그 특성이 측정되었다.

기계적인 특성 시험의 경우 힘의 인가 방향이 매우 중요하므로 상호 수직되는 방향으로 시편을 각기 제작하였다. 여기서 X축 방향은 고정자 권선 바에 전류가 흐르는 방향과 수직되는 방향 즉 절연 테이프가 감기는 방향과 동일한 방향으로 채취한 시편을 가리키며 Y축은 전류가 흐르는 방향과 동일한 방향으로 채취한 시편이다.

2.2 인장강도 측정 시험

경화된 비열화 절연 테이프의 X축과 Y축 방향 시편을 ASTM D638m[5]에 따라 M-I형으로 제작하였다. 크기와 두께는 20 mm × 150 mm, 2.5 mm이고 그 형상을 그림 1에 도시하였으며 실물은 그림 5에 나타내었다.

그림 2에 도시한 INSTRON 5585모델의 만능시험기기를 사용하였고 Mitutoyo사의 디지털 버니어캘리퍼스를 이용하여 시편의 두께를 측정하였다. 시험시 인장 속도는 5 mm/min.으로 설정하였다.

최대 항복점에서 시편의 인장강도는 측정된 최소 단면적으로, 시편에 인가된 최대하중을 나누어서 구한다.

2.3 굽힘강도 측정 시험

비열화 시편과 열화 시편을 대상으로 열화 여부와 열화의 정도에 따른 절연 테이프의 굽힘 강도 특성 변화를

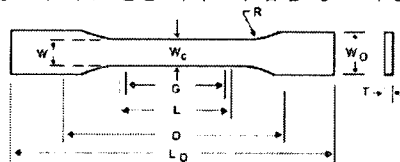


그림 1. 인장강도 시편의 형상[5].

축방향(X축과 Y축)에 따라 측정하였다. 굽힘강도 시험용 시편은 ASTM D790m[6]에 따라 Method I, 3점 인가법에 맞도록 제작하였으며 크기와 두께는 25 mm × 60 mm, 2.5 mm이고 그 형상은 기기의 Nose와 Support와 함께 그림 3에 도시하였으며 실물은 그림 7에 도시하였다. 시험 기기는 2.2절에 언급한 만능시험기를 그대로 사용하였다.



그림 2. 인장 및 굽힘시험용 시험기

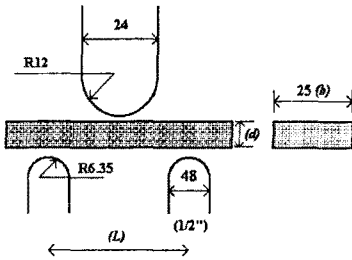


그림 3. 굽힘강도 시험용 시편의 형상.

3. 결과 고찰

경화된 비열화 시편을 대상으로 인장강도와 굽힘강도 특성을 시험하였고, 180 °C에서 1천 시간, 2천 시간, 3천 시간 가속 열화시킨 시편을 대상으로 굽힘강도 특성을 측정하였으며 그 결과를 제시한다. 그림 4와 그림 8의 범례에서 Sp1x(◇)와 Sp1y(◆)는 개발 중인 F종 레진 리치형 절연 테이프의 X축과 Y축 시편을, Sp2x(○)와 Sp2y(■)는 상용화되어 사용 중인 F종 레진 리치형 절연 테이프의 X축과 Y축 시편을 의미한다.

3.1 비열화 상태의 인장강도 특성

축 방향에 따라 각각 7개의 시편을 대상으로 측정된 인장강도 특성을 그림 4에 도시하였다. 시험 결과 Y축 방향 시편의 인장강도가 X축 시편보다 약 1.5배 높았다. 이것은, 그림 5에 나타낸 것과 같이, 모든 X축 방향 시편의 파단면을 관찰해보면 시편의 최외각에서 테이프와 테이프 사이가 오버랩되어 감겨진 부분에서 파단이 시작되고 있음을 알 수 있다. 표면에서 매우 취약한 부분인 것이다.

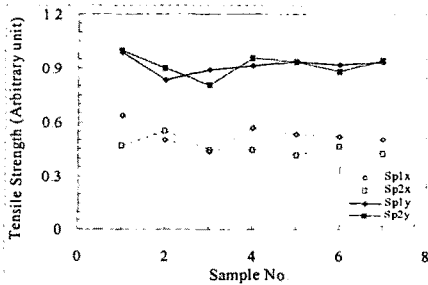


그림 4. X 및 Y축 비열화 시편의 인장강도

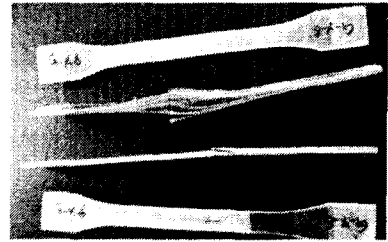


그림 5. 인장강도 시험 후 시편 파단면. 밑에서 3, 4번째 시편이 X축 방향 시편.

그러나 절연 테이프를 실제 바에 감을 때를 고려하면, 테이프가 육면체 바 위에 감길 때 축방향을 따라서 감겨져 나아간다. 바의 표면보다는 바의 모서리 부분에서 장력이 많이 작용할 것이 예상되므로 X축보다는 Y축이 힘을 더 받게 될 것으로 판단된다.

Y축 시편 데이터를 대상으로 Sp1y와 Sp2y의 평균값을 비교해보면 0.3 %만큼 Sp2y 시편이 높으나 표준편차는 상대적으로 Sp2y가 3 % 이상 크므로 두 테이프의 인장강도는 비슷한 값을 가진다고 할 수 있다.

3.2 비열화 상태의 굽힘강도 특성

X축, Y축 시편 각각 8개를 대상으로 굽힘강도를 시험하였고 시편의 변형된 길이에 대한 스트레스 곡선(Flexibility)을 그림 6에 도시하였다. 먼저 X축 방향 시편과 Y축 시편은 인장강도 시험 결과와 동일한 파단 특성이 발견되었다. X축 시편 표면에 오버랩된 곳에서 파단이 일어난 것이다. 그림 6 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 최대 항복점에서 최대 하중이 가해진 직후 파단과 동시에 급격히 하중값이 저하되며, 반면에 Y축 시편은 그림 6 (c)와 (d)에서처럼 일차로 파단이 일어난 뒤에도 어느 정도 기계적인 강도를 유지하면서 서서히 기계적인 특성이 저하되어 간다는 점이다. 그림 7에서는 전형적인 X축 방향 시편의 파단부를 보였으며 이는 X축 방향 인장강도 시편이 파단된 그림 5의 모습과 매우 흡사하다.

X축 시편의 굽힘강도는 Sp2x가 Sp1x보다 2.6 % 높았지만 그림 6 (a)와 (b)를 보면 Sp1x는 일정 하중까지는 동일한 특성을 보이지만 그 이후부터는 기울기 특성이 달라지는 반면 Sp2x의 경우에는 기울기는 비슷한 값을

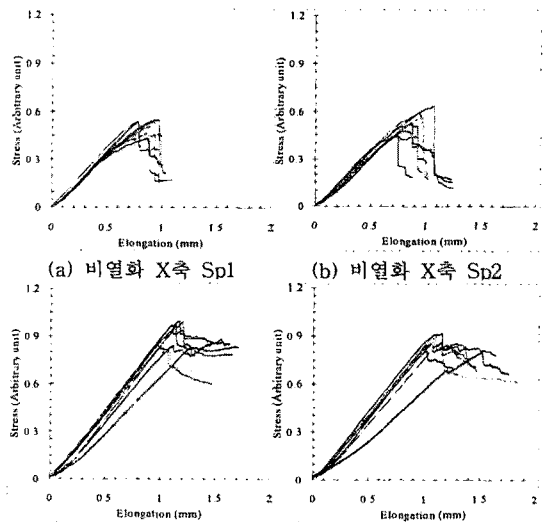


그림 6. X 및 Y축 방향 시편의 굽힘강도 특성



그림 7. X축 시편 파단부

갖지만 견디는 하중의 분포에서 많은 차이를 보였다. Y축 시편은 Sp1y가 Sp2y보다 5.2 % 높으나 전반적인 특성은 비슷하였다.

3.3 열화 시간에 대한 굽힘강도 특성의 변화

시편을 건조조에 넣고 표면온도가 180 °C 될 때까지 다음 1천 시간, 2천 시간, 3천 시간 가속 열화시켰다. 매 1천시간이 경과한 다음 시편을 추출하여 굽힘강도 특성을 측정하였으며 그 결과를 그림 8에 제시하였다. 굽힘강도 실험 데이터에 대한 MS-EXCEL®의 지수함수 curve fitting 기능을 이용하여 추세선을 그림 8에 함께 표시하였으며 이를 통하여 전반적인 가속열화 시간 변화에 대한 굽힘강도 특성의 변화를 유추할 수 있다.

그림을 통하여 X축 시편의 경우에는 가속 열화가 진행될수록 굽힘강도 특성이 저하되는 경향을 볼 수 있으며 비열화 상태에서는 Sp1x 시편이 우수한 특성을 가졌으나 시간이 갈수록 상대적으로 Sp2x 시편은 열화정도가 작으며 매우 안정화되어 있는 것으로 판단된다.

Y축방향 시편의 경우에는 비열화시 Sp2y 시편의 굽힘 특성이 매우 뛰어났지만 가속 열화가 진행될수록 X축 시편과는 반대로 Sp2y 시편의 굽힘강도 특성이 매우 가파르게 저하됨을 알 수 있다. 또한 X축 및 Y축의 다른 시편들에 비하여 표준편차도 매우 크게 분포되어 있다. 반면에 Sp1y 시편에서는 아무런 특성 저하가 관찰되지 않고 있다.

절연 테이프가 감기는 방향에 따라서 Sp1과 Sp2가 우등한 특성을 보이거나 열등한 특성을 보이는 것에 대한 정확한 원인 분석이 아직 이루어지지는 않았지만 절연 테이프를 구성하는 마이카 지와 보강재 직물의 조성, 치밀도, 크기 등 구성상 차이에 기인된 것으로 추정된다.

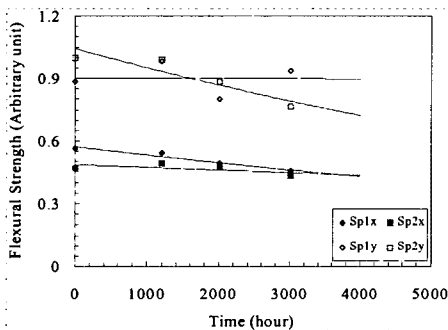


그림 8. 열화 시간에 따른 굽힘강도 특성 변화

4. 결 론

인장강도와 굽힘강도 시험을 통하여 현재 개발중인 대형 터빈 발전기 고정자 권선 주절연용 F종 레진 리치형 절연 테이프에 대하여, 기존에 사용 중인 외국 선전사의 테이프와 국제규격에 따라 시험한 기계적인 특성 결과를 제시하였다. 비열화 시편을 대상으로 인장강도와 굽힘강도 시험을 수행하였으며 180 °C에서 1천 시간, 2천 시간, 3천 시간동안 가속 열화시킨 시편을 대상으로 굽힘강도 시험을 수행하였고 그 결과를 비교하였다.

시험 결과 비열화 상태에서나 가속열화가 일정시간 진행된 경우에서나 두 종류의 테이프가 전반적으로 유사한

기계적인 특성을 보였다. 그러나 열화 여부와는 상관없이 테이프가 감기는 방향에 따라서 서로 다른 결과가 동일 시편에게서 도출되었는데 이것은 각각의 절연 테이프를 구성하는 구성요소의 물성이나 조성차로 인한 것으로 추정되며 이에 대한 정확한 분석이 추후에 필요하다.

본 논문에서 제시된 것보다 다양한 온도에서의 시험이 현재 진행 중에 있으며 이러한 시험 결과를 바탕으로 테이프의 품질 개선 및 수명 예측에 대한 연구가 진행될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. A. Lloyd, S. R. Campbell, G. C. Stone, "Continuous on line partial discharge monitoring of generator stator windings", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1131-1138, Dec., 1999.
- [2] 김현후, "연구실 소개 한전전력연구원 고압회전기 연구실", 전기전자재료, 제17권, 제4호, pp. 47-51, 2004. 4.
- [3] 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.
- [4] 김태희외 6인, "대형 발전기 고정자 권선 주절연용 절연 테이프의 시험 방법", 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 12-15, 2003. 4.
- [5] ASTM D 638m-91a, Standard test method for tensile properties of plastics [Metric].
- [6] ASTM D 790m 92, Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials [Metric].

본 연구는 산업자원부 전력산업기술개발사업으로 수행되었습니다.