

발전기 고정자 권선에 사용되는 마이카/에폭시 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구

10-4-2

Mechanical Properties of Mica/Epoxy Composite Materials used in Generator Stator Windings

김희동*, 김희곤**, 김태완**, 강도열***

(Hee-Dong Kim, Hee-Gon Kim, Tae-Wan Kim, Dou-Yol Kang)

Abstract

Experiments on mechanical fatigue were conducted using the specimens which were cut from hydrogen cooled generator(rated 22kV and 500MW) stator windings. We have investigated the aged mechanism of mica/epoxy insulation systems under air or hydrogen by both the tensile and compressive loadings. The fracture of generator stator windings is generally affected by mechanical stress. Thus, the tensile strength test were conducted. In this case, the maximum strength and strain are quite different between sound and aged specimens. It is observed that low bonded interface parts of tapes generally have lower strength than those of normal tapes which causes stress. In order to estimate the effects of cyclic load by the electromagnetic forces while the generator starts/stops, the mechanical fatigue test was also conducted. It is confirmed that the equation of expected life depends on stress amplitude and number of cycles. Though the stress amplitude and number of cycles are very tiny, the tensile fatigue of aged specimens under hydrogen atmosphere is bigger than those under air. In the case of hydrogen atmosphere, the tensile stress gives bigger effect than the compressive one.

Key Words(중요 용어) : Mechanical Fatigue(기계적 피로), Hydrogen Cooled Generator(수소 냉각식 발전기), Mica/Epoxy Insulations(마이카/에폭시 절연 재료), Tensile Stress(인장 응력), Compressive Stress(압축 응력)

1. 서 론

최근 산업 구조의 변화와 문화 생활 수준의 향상으로 인해 냉,난방 부하 증가로 기저 부하에 비해 첨두 부하가 현저하게 증가하여 발전기 부하 변동과 기동 정지 횟수가 빈번해지고 있다. 따라서 회전기에 사용되는 마이카-에폭시 복합 절연 재료는 기동 정지시에 도체와 철심사이에 열팽창 계수가 상이하고 각각의 온도도 균일하지 않기 때문에 열-기계 응력(thermomechanical stress)이 반복되어 피로에 의한 열화가 일어난다. 또한 기계적 피

로는 열적 열화에 의해 마이카와 에폭시 사이의 경계면에서 발생한 박리(delamination)를 균열(crack)로 진전시켜 축적된 응력이 국부적으로 집중되었을 때 극한 강도보다 훨씬 작은 값에서 파괴가 발생할 수 있다.¹⁾ 이와같은 파괴 현상을 피로 파괴라 하며, 발전기의 고정자 권선에서 전자력에 의한 과도한 진동과 단말권선(endwinding)에서의 굽힘 응력(bending stress)에 의해 절연 열화가 진전된다.

단말권선은 정상 운전 상태에서 진동에 의해 권선 지지부가 이완되면서 기계적 피로 응력과 마모로 인해 턴(turn)과 주절연이 파괴된다. 슬롯 내에서도 주기적인 전자력에 의해 권선이 움직이면서 인장과 압축으로 인해 도체와 주절연물에 응력이 가해진다. 이들 절연물은 소선사이의 주절연 및 슬롯사이의 상대적인 운동에 의해서 소선과 권선 절연이 마모되어 소선과 턴 사이에 손상이 발생하고,

* : 전력연구원

** : 홍익대학교 물리학과

*** : 홍익대학교 전자전기공학부

접수일자 : 1997년 1월 31일

심사완료 : 1997년 4월 1일

마칩내는 지락 사고를 유발시킨다. 권선 표면이 파모되어 반도전층이 벗겨지면, 슬롯 방전에 의해 주절연이 손상되면서 절연 파괴가 일어난다.

마이카-에폭시 절연 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 기계적인 피로 시험을 통하여 고정자 권선에서 변형과 파쇄 성질이 연구되었다.²⁾ 또한 갑작스런 단락발생시 고정자 단말권선의 변형 상태를 알기위해 변형률(strain) 측정 기법이 사용되고 있으며, 이 기법은 전자력에 의한 동요를 감소시키기 위해서 개발되었다.³⁾

본 논문에서는 마이카-에폭시를 주절연으로 사용하는 수소 냉각식 화력용 발전기(정격전압 22kV, 500MW) 고정자 권선을 제작하여 공기와 수소중에 권선을 설치한 후 420Hz, 27.5kV 전압을 인가하여 실험실에서 가속 열화 시험을 수행하였다. 공기중 열화 권선(열화 온도 : 110℃) 3개 중에 2개가 각각 1,800시간과 2,240시간 및 가압 수소중 열화 권선(상온) 6개 중에 2개가 2,942시간과 3,332시간 가속 열화 후 절연파괴가 발생하였다. 따라서 열적, 전기적 열화를 받은 권선의 기계적인 특성을 분석하기 위해 공기 및 수소중에서 절연파괴된 권선과 공기중 건전한 권선의 직선형 바(bar)에서 절출한 시편에 대해 인장, 압축강도 및 피로시험을 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시편제작

본 논문에 사용된 고정자 권선은 수소 냉각식 화력용 발전기(정격전압 22kV, 500MW)로써 가속 열화에 의한 절연 파괴 시험을 수행하기 위하여 그림 1과 같이 직선형 바로 설계하였다.

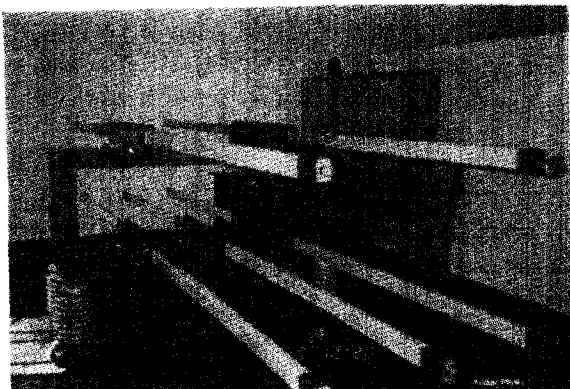


그림 1. 공기중에서 파괴를 위한 고정자 권선의 시험장치

Fig. 1. The test apparatus of stator windings for breakdown under air

또한, 공기중과 가압 수소 상태에서 고정자 권선의 전기적 열화 시험을 비교하기 위한 장치를 그림 2와 같이 제작하였으며, 고정자 권선에 420Hz, 27.5kV/mm를 인가하기 위하여 77kV급 Bushing을 Chamber 상부에 설치하였다.

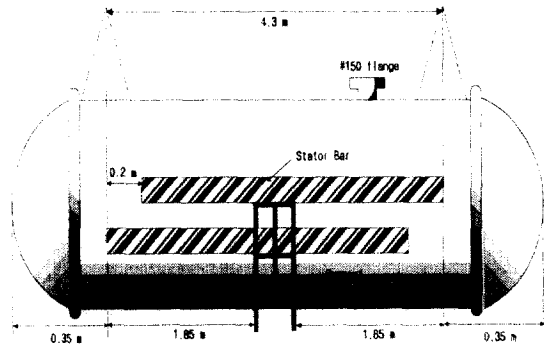


그림 2. 고정자 권선 시험용 Chamber 및 권선 배치도

Fig. 2. The test chamber of stator windings and arrangement.

시편은 소선의 규격이 4.27×7.14mm이며, 직선형 바의 규격이 30.5×54mm인 고정자 권선에 대해 마이카-에폭시 테이프를 1/2씩 겹쳐지게 14회 감고 킴파운드 탱크에 넣어 130℃에서 경화시켜 도전성 접착제를 도포한 후 유리 테이프를 감고 8시간 이상 대기중에서 건조시켰다. 또한 저저항 포인트를 직선형 바에 도포하였으며, 최종적으로 직선형 바의 치수를 41×64.5mm로 제작하였다.

전기적 가속 열화는 전압을 높여서 시험하는 것이 일반적인 방법이지만, 고정자 권선의 통상적인 절연 설계는 2kV/mm ~ 3kV/mm사이에서 운전하도록 설계되어 있어 가속 열화 전압이 6kV/mm이상일 경우 비정상적으로 열화가 진행될 수 있으므로 부분 방전이 발생하지 않는 한계값인 5.5kV/mm(인가전압 27.5kV, 권선절연 두께 5mm)로 정하여 실험하였다.

또한 정격 전압 및 정격 주파수에서 권선의 수명은 대부분 100,000시간을 초과하므로 420Hz로 높여 권선의 평균 수명이 20,000시간 이내가 되도록 M-G Set(William I. Horlick Co., 420Hz)를 제작하였으며, 50kV까지의 고전압 발생장치는 AVO Biddle Instruments 회사의 전력용 변압기 및 제어 장치로 구성하였다. M-G 시스템의 입력은 3φ, 200V, 80A, 60Hz이며, 출력은 1φ, 480V, 420Hz이다. 전력용 변압기는 50kV, 1A, 420/60Hz 겸용으로

로 사용할 수 있도록 설계되어 있어 가속 열화시와 측정시에 모두 사용할 수 있도록 설계하였다.

수소중 가속 열화 시험은 $4\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 가압 수소 탱크 안에서 실시하였으며, 2000시간마다 한 번씩 수소를 방출하였다.⁴⁾

2.2 인장 및 압축 피로 시험

본 연구에서는 마이카-에폭시 재료의 기계적인 특성을 조사하여 열화 현상 분석과 수명 평가를 위하여 각각의 시편에 대하여 인장 강도 및 피로 시험을 실시하였다. 피로 시험용 시편은 그림 3~4와 같은 형상으로 고정자 권선의 절연층에서 절출하였으며, 피로 시험은 그림 5와 같이 이축 피로 시험기(Instron 8500s)를 사용하였다. 또한, 정하중 방식으로 부하의 변화에 따른 응력 피로를 고찰하기 위하여 고사이클 피로 시험에 의한 인장 피로 시험을 수행하였다. 기계적인 특성 시험은 발전기 고정자 권선의 열화 현상을 정밀하게 파악하기 위하여 매우 중요하다. 이러한 이유 때문에 마이카-에폭시 재료에서 인장 강도 시험을 실시하였다.

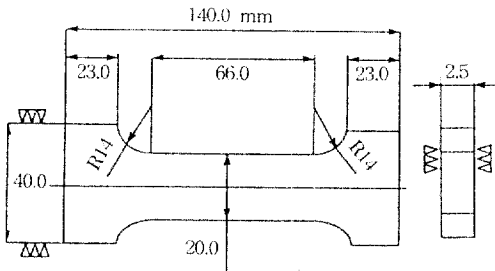


그림 3. 인장 피로 시험 편의 형상

Fig. 3. The appearance of tensile fatigue specimen.

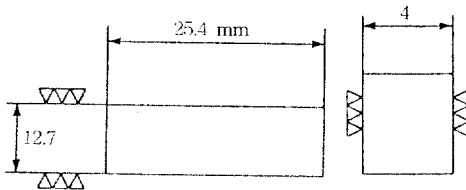


그림 4. 압축 피로 시험 편의 형상

Fig. 4. The appearance of compressive fatigue specimen.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 인장 강도 시험

응력에 의한 발전기 고정자 권선의 파괴 원인을

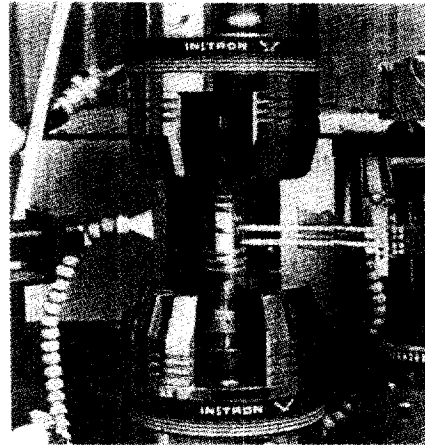


그림 5. Instron 8500s 피로 시험기

Fig. 5. The fatigue test apparatus of Instron 8500s.

살펴보면 일반적으로 운전 중에 노출되어 주기적인 기동 정지에 의한 열적, 기계적인 열화에 의해 절연 파괴 되는 것으로 알려져 있다. 절연 시스템은 단분자화(depolymerization), 취성(brittleness)의 증가, 균열 및 박리 등이 발생할 수 있으며, 축적된 응력이 국부적으로 집중되었을 때 파괴를 초래할 수 있다. 전기적인 응력이 부분 방전에 의해 전기 화학적인 부산물을 생성시킨다면 베어링의 마모, 공극의 불균형에 의한 자속 밀도의 왜곡으로 기계적인 진동이 발생하여 지지 구조물들이 약화될 수 있다. 이러한 현상은 궁극적으로 웨지의 느슨해짐이나 단말권선의 이동 등을 초래할 수도 있고 스위칭 썬지와 전력계통의 난조에 의해 발생하는 과도적인 전기 응력은 턴과 턴사이와 주절연에 국부적인 과도응력을 발생시킬 수 있다.

그림 6~8은 마이카-에폭시 복합 재료의 인장 시험에 있어서 반복 응력-변형률 선도(cyclic stress-strain curve)를 나타낸 것으로 재료에 작용하는 하중을 최초의 단면적으로 나눈 응력값, 즉 공칭 응력을 표시한 것이다. 그림 6~8에서 알수 있는 바와같이 응력(σ)과 변형률(ϵ)이 직선적으로 변화하므로 후크의 법칙이 성립됨을 알 수 있으며, 금속과는 달리 응력을 없애면 변형률이 완전히 소실되어 한계점에 이르거나, 응력을 받은 상태로 유지 또는 감소함에도 불구하고 변형률이 증가하는 항복점을 구별하기가 어렵다. 이러한 항복점 이상에서는 재료가 탄성적 응집력을 잃었기 때문에 소성 상태로 되며, 복합 재료나 고무, 구리, 알루미늄 등에서는 항복점이 명확하지 않다고 보고되고 있다.⁵⁾ 따라서 이와 같은 재료에서는 편의상

영구 변형률이 0.002 정도로 잔류하는 경우의 응력 값을 항복점으로 생각하고 이를 내력(yield strength)이라고 한다.^{6,7)}

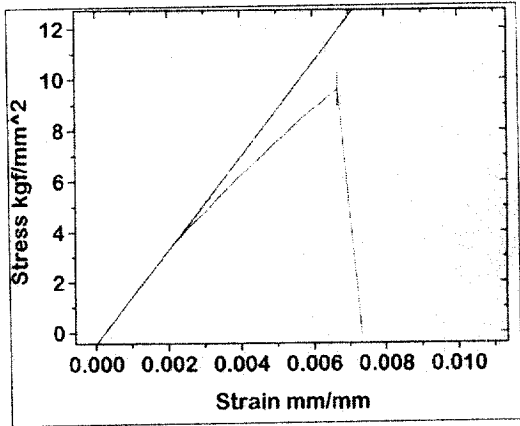


그림 6. 공중기 건전 시편의 인장 강도 특성
Fig. 6. The tensile strength characteristics of sound specimen under air.

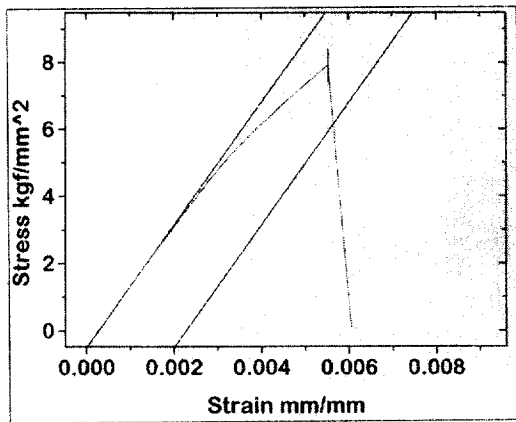


그림 7. 공기중 열화 시편의 인장 강도 특성
Fig. 7. The tensile strength characteristics of aged specimen under air.

금속의 경우 항복점을 넘으면 응력과의 관계는 곡선상으로 나타남과 동시에 재료의 단면이 점차 가늘게 되어 국부 수축 현상이 발생하지만 마이카-에폭시 복합 재료는 그림 6~8과 같이 국부 수축 현상 없이 즉시 파단이 발생한다. 이러한 이유는 복합 재료 자체가 테이프 형태로 되어있어 하중에 의한 응력이 테이프와의 접촉 부분에 집중적으로 분포되어 국부적인 응력 집중이 발생하고 재료의 접촉 상태에 따라 여러 가지의 파괴 양상이 일어난 것으로 분석된다.

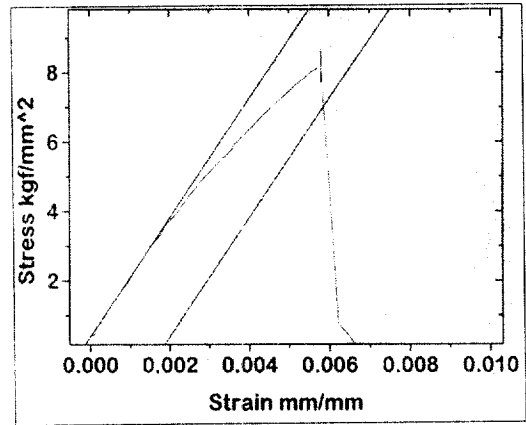


그림 8. 수소중 열화 시편의 인장 강도 특성
Fig. 8. The tensile strength characteristics of aged specimen under hydrogen.

특히 그림 6 및 그림 7~8의 인장 시험값을 비교할때 인접 부분의 접촉 상태 열화로 인한 유연 강도(flexural stiffness)의 감소 현상이 마이카 조각(splitting)의 결합력(bonding strength)이 약한 부분에 발생함으로써 인장 강도의 값이 저하한 것으로 판단된다. 따라서 인접 부분의 접촉 상태를 보강할 수 있는 보강재의 개발이나 접착재의 개발은 고정자 권선 재료에서 응력 집중에 의한 영향을 경감시킬 수 있어 기계적인 특성의 향상 및 수명 연장에 크게 기여할 것으로 사료된다.

인장 강도 실험의 결과로서 반복 응력-변형률 선도를 분석하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서와 같이 공기 및 수소중에서 열화된 시편을 비교하면 열화에 의한 기계적인 특성의 변화에는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없으나, 공기중 건전 시편과 열화된 시편사이에는 최대 강도 및 최대 변형율에서 비교적 큰 차이를 관찰할 수 있었다.

표 1. 마이카-에폭시 복합 재료의 기계적인 특성 시험.

Table 1. The mechanical properties test of mica-epoxy composite materials.

시험 종류	탄성 계수 (Kg/mm ²)	최대 변위 (mm)	최대 강도 (Kg/mm ²)	최대 하중 (kgf)	최대 변형율 (mm/mm)
공기중 건전 시편	1848	0.3344	9.607	480.4	0.0067
공기중 열화 시편	1846	0.2924	8.597	429.5	0.0058
수소중 열화 시편	1703	0.326	8.152	407.6	0.0060

3.2 인장 피로 시험

반복 응력에 있어서 최대 응력이 σ_{max} , 최소 응력이 σ_{min} , 평균 응력 $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$, 응

력 진폭 $\sigma_v = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ 이라고 하면, $\sigma_m =$

σ_v , 즉 $\sigma_{min} = 0$ 의 경우를 편진이라고 하고 $\sigma_m = 0$ 의 경우를 양진이라고 한다. 본 실험에서는 인장과 압축 피로에 의해 고정자 권선에 미치는 영향을 알아보기 위하여 편진에 의하여 실험하였으며, 시험편에 응력 진폭 $\sigma_v = S$ 의 반복 응력을 작용시켜 피로 파괴 할 때까지의 반복수 N 을 구하고 세로축에 응력 진폭 S 의 값, 가로축에 N 의 값을 취하여 세로축에 $\log_{10} N$ 을 취하고 직선으로 근사화하여 S-N곡선으로 나타냈다.

그림 9~11은 각 시료에 대한 상온(25°C)에서의 인장 피로 특성을 나타낸 것으로 Origin 상용 프로그램의 curve fitting에 의해 아래의 식 (1)을 얻었으며, 이 식에 의하여 고정자 권선의 수명을 예측할 수 있다.

$$\sigma_m = A + BN \quad (1)$$

여기서 σ_m 은 평균 응력, N 은 파괴까지의 사이클 수를 나타내며 A, B 는 재료 상수이다.

고정자 권선은 운전되는 동안 온도 변화에 의한 반복적인 열응력을 받고 있으므로 열주기에 의한 고정자 권선의 기계적인 강도를 평가하는 것이 무엇보다 중요하며 특히 피로 강도를 이용하여 수명을 평가할 수 도있다.

그림 9~11에서와 같이 건전 시편, 공기중 열화 시편 및 수소중 열화 시편을 비교해보면, 열화된 시편의 경우가 건전 시편에 비하여 많은 피로를 받고 있음을 알 수 있었고 고정자 권선에서 마이크로 테이프 내의 유연 강도 감소를 인장 시험으로 확인할 수 있었다. 이와같이 유연 강도의 감소는 절연 재료의 점진적인 파괴를 유도하고 파괴 전압의 감소를 초래할 수 있으며, 이러한 결과는 발전기의 고정자 권선에 대한 절연 파괴 전압의 주기적인 감소로서 확인할 수 있다.⁴⁹⁾

3.3 압축 강도 시험

그림 12는 압축 강도 시험의 반복 응력-변형률 선도로서 시험 두께 방향의 중심부에서 중간 박리가 일어났다. 그림 12에서 알 수 있듯이 건전 시편의 압축 강도가 공기 및 수소중에서 열화된 시

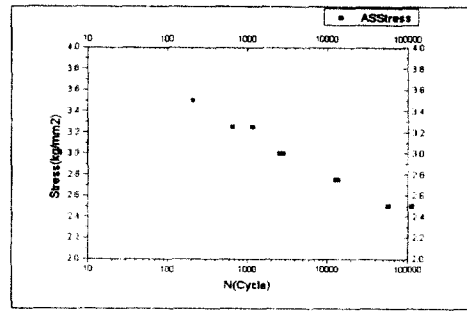


그림 9. 건전 시편의 인장 피로 특성
Fig. 9. The Tensile fatigue characteristics of sound specimen.

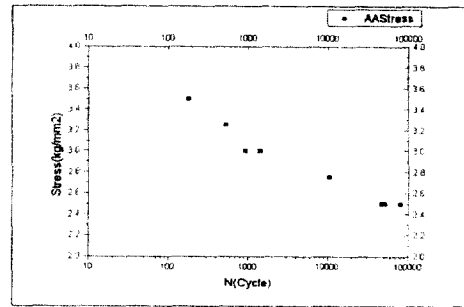


그림 10. 공기중 열화 시편의 인장 피로 특성
Fig. 10. The Tensile fatigue characteristics of aged specimen under air.

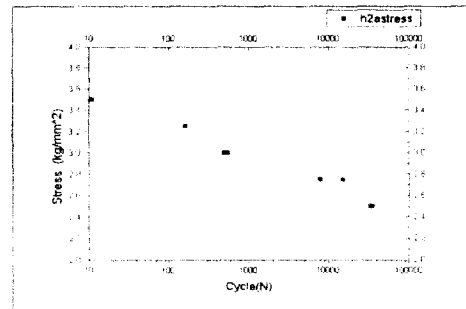


그림 11. 수소중 열화 시편의 인장 피로 특성
Fig. 11. The Tensile fatigue characteristics of aged specimen under hydrogen.

편보다 응력 진폭이 높음을 알 수 있었다. 특히 공기중 시편은 항복점이 2회에 걸쳐 나타남을 볼수 있으며, 이것은 항복점이 초과된 테이프와 건전 테이프 사이의 차이에 의한 현상이라 생각되고 수소중 시편은 절연 재료 내부에 존재하는 많은 결함들에 의해 적선적으로 파괴됨을 알 수 있었다.

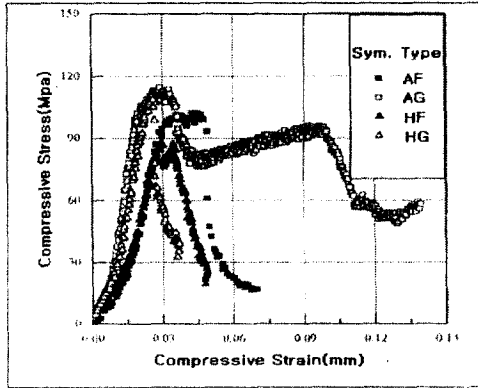


그림 12. 시편의 압축 강도 특성
Fig. 12. The compression strength characteristics of specimen.

3.4 압축 피로 시험

본 실험에서는 압축 피로에 의해 고정자 권선에 미치는 영향을 알아보기 위하여 편진에 의하여 실험하였으며, 그림 13~15는 압축 피로에 의한 S-N 곡선을 나타냈다. 그림 13~15에서 보는 바와 같이 건전 시편과 공기중 열화 시편의 경우 큰 차이는 인정할 수 없지만, 수소중 열화 시편의 경우 공기중 열화 시편에 비하여 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 수소중 열화시 기계적인 피로가 공기중 열화시 보다 크다고 생각 할 수 있다.

전체 수명을 비교할 때 공기중과 수소중의 시편에 대해 인장 보다 압축에 의한 수명의 감소가 작으므로 고정자 권선에서 인장 피로를 받는 부분을 보완할 수 있는 보강재 개발이 필요함을 알 수 있었다.

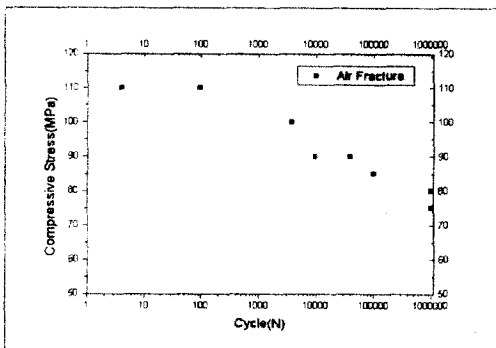


그림 13. 건전 시편의 압축 피로 특성
Fig. 13. The compression characteristics of sound specimen.

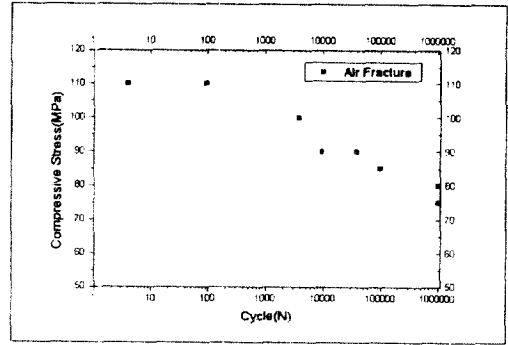


그림 14. 공기중 열화 시편의 압축 피로 특성
Fig. 14. The compression fatigue characteristics of aged specimen under air.

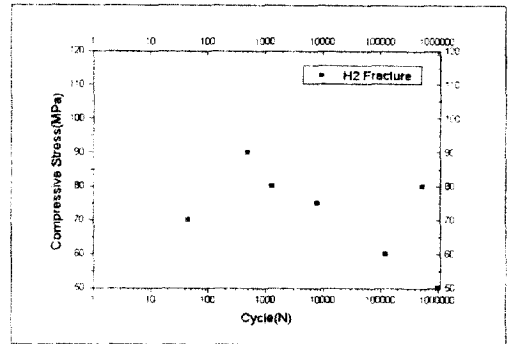


그림 15. 수소중 열화 시편의 압축 피로 특성
Fig. 15. The compression fatigue characteristics of aged specimen under hydrogen.

4. 결 론

수소 냉각식 화력용 발전기에 사용되는 마이카-에폭시 고정자 권선을 직선형 바로 제작하여 건전한 권선과 열화된 권선의 기계적 특성을 연구하기 위해서 절연층에서 절출한 시편에 대해 인장, 압축 강도 및 피로 시험을 수행함으로써 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기계적인 응력에 의한 고정자 권선의 파괴 원인을 살펴보기 위해 공기중 건전시편과 열화된 시편에서 인장 강도 시험을 실시한 결과 마이카-에폭시 복합 재료는 국부 수축 현상 없이 즉시 파단이 발생하였으며, 반복 응력-변형을 선도를 분석한 결과 탄성 계수, 최대 강도, 최대 하중 및 최대 변형률에서 차이를 관찰하였다.
- 2) 인장 피로 시험 결과 응력 진폭과 반복 횟수에 의한 수명 예측식을 구하였으며, S-N 곡선에

서 공기중 건전 시편과 열화된 시편을 비교해보면 열화된 시편의 경우가 건전 시편에 비하여 많은 피로를 받고 있음을 확인할 수 있었다.

3) 마이카-에폭시 복합 재료의 경우 건전 시편이 열화된 시편보다 응력 진폭이 높음을 관찰할 수 있으며, 공기중 시편이 수소중 시편보다 압축 강도가 높게 나타났다.

4) 압축 피로 시험결과 공기중 건전 시편과 열화 시편의 경우 큰차이는 인정할 수 없지만, 수소중 열화 시편이 공기중 열화 시편에 비하여 큰차이를 보이고 있다. 이것은 수소중 열화시 기계적인 피로가 공기중 열화시 보다 크다는 것을 알 수 있었다.

5) 고정자 권선의 전체 수명을 비교할 때 공기중과 수소중의 시편에 대해 인장 보다 압축에 의한 수명의 감소가 작으므로, 고정자 권선에서 인장 피로를 받는 부분을 보완할 수 있는 보강재 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 배성인, 한민구, "파괴역학 실험법", 원창출판사, pp. 157-159, 1993.
2. A. Futakawa, S. Hirabayashi, T. Tani and K. Shibayamam, "Mechanical Fatigue Characteristics of High Voltage Generator Insulation", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. EI-13, No. 6, pp. 395-402, Dec. 1978.
3. A. Futakawa and S. Yamasaki, "Dnamic Deformation and Strength of Stator End-winding During Sudden Short Circuits", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. EI-16, No. 1, pp. 31-39, Feb. 1981.
4. Y. Takikawa, "Thechnology for Preventive Maintenance of Turbine Generator", Hitachi Review, Vol. 72, No. 8, pp. 35-42, 1990.
5. 정선보, 한동철, "표준 기계설계학(신판)", 신광문화사, pp. 18-25, 1984.
6. D. Thornley, "The Effect of Mechanical Stress on Electrical Performance of Insulating Materials", IEE Colloquium on 'The Mechanical Influence on Electrical Insulation Performance', pp. 1/1-1/3, 1995.
7. D.W. Auckland and B. R. Varlow, "Mechanical Aspects of Electrical Treeings", IEE Colloquium on 'The Mechanical Influence on Electrical Insulation Performance', pp. 7/1-7/3, 1995.
8. R.C. Sheehy, T. R. Blackburn and J. Rungis, "Multistress Aging of High Voltage Stator Bars", Proc. of 4th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 776-779, 1994.
9. A. Kutil and K. Frohlich, "A Multistress Test Procedure for Qualification of Composite Insulation Materials in GIS", IEEE Int. Symposium on EI, pp. 58-62, 1994.

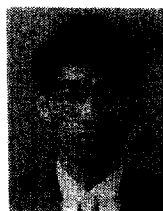
지시소개

김희동



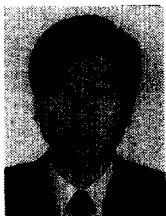
1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년-현재 동 대학원 박사과정 재학중. 1990년-현재 전력연구원 선임연구원.

김희곤



1964년 11월 4일생. 1987년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년-현재 전력연구원 선임연구원.

김태완



1958년 7월 5일생. 1981년 연세대학교 물리학과 졸업. 1983년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 미국 UCLA 물리학과 졸업(박사). 현재 홍익대학교 물리학과 조교수.

강도열



1934년 12월 30일생. 1957년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1979년 홍익대학교 대학원 전기공학과(공학). 1986년 2월 일본 동경공업대학 객원연구원. 홍익대학교 전기제어공학과 교수. 현재 홍익대학교 부총장.