

# 500MW급 화력 발전기 냉각수 온도에 따른 고정자 권선 절연재의 흡습 특성에 관한 실험적 연구

論 文  
57-8-13

## An Experimental Study on Water Absorption Characteristics of Generator Stator Bar Insulation by Cooling Water Temperature in 500MW Capacity Power Plant

裴容彩<sup>†</sup> · 金希洙<sup>\*</sup> · 李斗寧<sup>\*</sup> · 李旭倫<sup>\*</sup>  
(Yong-Chae Bae · Hee-Soo Kim · Doo-Young Lee · Wook-Ryun Lee)

**Abstract** - The mechanical integrity of generator stator windings is one of the critical point because the electric power is generated and conducted to power system through these windings. De-mineralized water is used to cool stator bars during the normal operation of generator in large power plants because the water cooled method has highest cooling efficient. Water absorption of bar insulation is progressed by several causes such as generation of water leak path by corrosion, delamination of insulation by vibration, and inadequate water treatment, etc.. Reliable water absorption diagnostics of generator stator bar is important to ensure the availability of power plant and to reduce maintenance cost by generator accident. It is described that the water absorption characteristics for generator stator bar insulation used in 500MW capacity standard fossil power plant by cooling water temperature. It is verified that the management of stator cooling water temperature is one of the important factors to decrease water absorption rate of generator stator bars.

**Key Words** : Generator, Stator bar, Insulation, Capacitance, Dielectric constant, Water absorption, Cooling water temperature

### 1. 서 론

발전소에서 운전되고 있는 발전기는 전기를 직접 생산하는 핵심 기기로서 발전기 고정자 권선 절연물의 손상은 발전소 운전 신뢰성 저하에 큰 영향을 미친다. 전기 생산 중 발전기 고정자 권선에서 발생하는 열을 냉각시키기 위한 매체로 공기, 수소, 물을 사용하며, 특히 국내 280MW급 이상의 대부분의 대용량 발전기에는 냉각 효율이 탁월한 순수(de-mineralized water)를 매체로 하는 수냉각 방식을 채택하고 있다. 그러나 냉각 효율이 좋다는 장점에도 불구하고 최근 자주 발생하는 발전기 고정자 권선의 절연 손상 또는 2차 파급 사고의 요인으로 고정자 권선 절연물의 냉각수 흡습과 누수 현상을 들 수 있다. GE(General Electric)사의 보고서에 따르면 자체 시험 권선 중 약 50% 이상이 누수 또는 흡습된 것으로 보고 되고 있으며 흡습 허용치를 넘는 권선에 대해서는 1년 내로 권선을 교체하도록 추천하고 있다 [1]. 실제로 국내에서도 최근 U 원자력 발전소를 비롯한 대용량 발전기에서 고정자 권선의 진동 및 권선 흡습으로 인한 절연물 손상을 일으켜 장기간의 발전 정지 및 막대한 정비 비용을 수반한 바 있다. 따라서 발전소에서는 정기예방 점검 기간 중 항상 발전기 권선 누수 시험을 수행하고 있으나 진단의 신뢰성이 미흡하고 특히 국내외적으로 권선 절연물에 대한 냉각수 흡습 시험 및 진단 기술이 매우 취약하다.

한편 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 여부를 진단하기 위하여 GE사 및 WH(Westinghouse)사에서는 자체 흡습 시험 장치를 개발하여 활용하였으나 측정 데이터의 재현성이 떨어지는 단점이 있어 국내 발전소에서의 시험 및 진단에 활용도가 떨어진다. 따라서 Y.C. Bae 등은 상기의 문제점을 해결하기 위하여 새로운 측정장치인 Gen-SWAD(Generator Stator Water Absorption Detector)를 개발하여 발전기 권선 흡습 진단에 활용하고 있다 [2]. 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 여부를 진단하기 위해서 주로 절연물의 정전 용량을 측정한다. 표준화력 발전기의 경우, 측정 센서의 면적에 의해 차이는 있지만, 권선 각각의 측정 위치에서의 정전 용량은 약 10 pF 전후의 값을 갖는다. pF 단위는 -12 order를 가지고 있어 계측기의 정밀도와 절연물의 상태에 따라 흡습 진단의 신뢰도에 큰 영향을 미치게 된다. 발전기 고정자 권선 절연물에 대한 신뢰성 있는 흡습 여부의 진단은 발전기 운전 신뢰성 증진 및 정비 비용 절감 측면에서 매우 중요하나 발전기 고정자 권선의 구조와 절연물의 제질 및 온도에 따라 흡습 특성이 다르게 나타난다. 특히 현존하는 발전기 고정자 권선 각각에 대한 절연물의 냉각수 흡습 평가는 발전기 정지 중 off-line으로 수행되므로 실제 발전기 운전 중 권선 절연물의 온도 변화에 따른 흡습 특성 파악은 발전기 정지 중 흡습 시험 및 진단의 신뢰성 증진 측면에서 매우 중요하다. 또한, 발전기 운전 중 냉각수 온도의 관리는 권선 절연물의 흡습 특성에 영향을 줄 수 있어 이에 대한 실험적 규명이 필요하다.

따라서 본 연구를 통해 국내 화력 발전소에서 가장 많이 운전되고 있는 500MW급 표준화력 발전기의 고정자 권선 절연물을 대상으로 냉각수 온도에 따른 절연물의 흡습 특성

\* 正 會 員 : 韓電電力研究院 先任研究員

† 교신저자, 正 會 員 : 韓電電力研究院 責任研究員

E-mail : ycbae@kepri.re.kr

接受日字 : 2008年 5月 23日

最終完了 : 2008年 7月 8日

규명을 목적으로 실험적 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 발전소에서 실제 운전되는 발전기 고정자 권선 절연물을 이용하여 각종 시편 및 실험 장치를 설계, 제작하고 실제 냉각수 운전 온도인 약 55℃를 중심으로 40~70℃의 조건으로 흡습 실험을 수행한 결과를 분석하였다. 또한, 적외선 카메라를 이용하여 각 냉각수 온도에 따른 절연물 재질의 박리 상태와 정전용량 값의 변화 상태를 분석하였다. 본 연구의 결과는 발전기 정지 중 수행되는 고정자 권선 절연물에 대한 흡습 시험과 진단의 신뢰성 증진 및 냉각수 운전 관리에 기여하리라 기대된다.

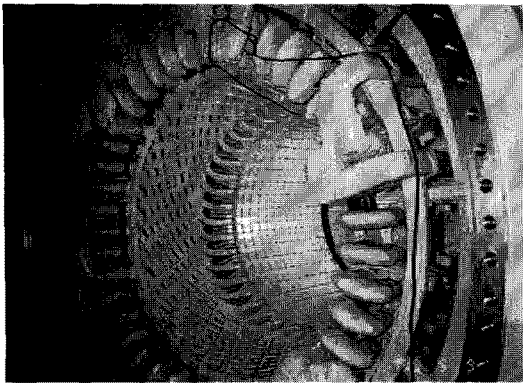


그림 1 표준화력 발전기 고정자 권선  
Fig. 1 500MW generator stator windings

## 2. 장치 및 시편

### 2.1 측정 장치

발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 상태를 평가하기 위하여 사용한 측정 장치는 그림 2와 같이 GEN-SWAD (Generator Stator Water Absorption Detector)를 이용하였다[2]. 본 장치는 전력연구원에서 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 여부를 진단하기 위하여 개발한 전용 장치로써



그림 2 흡습 시험장치(Gen-SWAD)  
Fig. 2 Generator stator water absorption detector

그림 3에서 보는 바와 같이 표준 콘덴서의 값과 측정값이 매우 잘 일치하고 있으며 국가 표준 기관의 인증 후 현재 발전소 흡습 시험에 활용되고 있다.

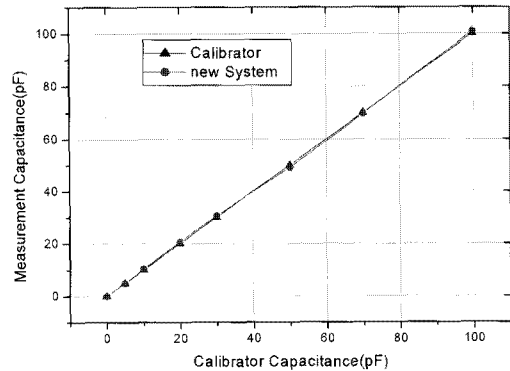


그림 3 장치 검증  
Fig. 3 Verification of detector using calibrator

### 2.2 시편 제작

500MW 표준화력 발전기 고정자 권선 절연물의 흡습 특성을 평가하기 위하여 실제 권선 절연물을 이용하여 시편을 제작하였다. 발전기 고정자 권선 절연물은 그림 4와 같이 실제 발전기 고정자 권선을 이용하였으며 시편 제작 전 권선의 절연물에 대한 이물질 및 결함 여부를 파악하기 위하여 방사선 투과 촬영을 하여 권선 절연물의 건전성을 확인하였다. 권선 절연물 시편은 그림 5와 같이 권선의 절연물

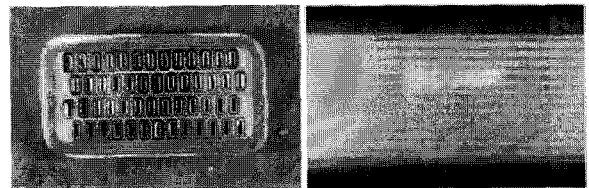


그림 4 500MW 고정자 권선 및 절연물의 RT 촬영 결과  
Fig. 4 Inspection of insulating material in stator windings



그림 5 고정자 권선 절연물 시편  
Fig. 5 Specimen for water absorption test

두께 범위 내에서 흡습 및 두께 변화에 따른 질량 및 정전용량 값의 변화 상태를 확인하기 위하여 두께 0.5mm로부터 각각 0.5mm 차이로 4.0mm까지 제작 하였다. 이때 제작된 시편 표면의 조도는 0.05 $\mu$ m이다.

### 3. 실험 및 결과 분석

#### 3.1 냉각수 온도별 흡습 실험

##### 3.1.1 실험 장치

500MW급 표준화력 발전소에서 운전 중인 고정자 권선의 냉각수 온도 변화에 따른 흡습 정도를 파악하기 위하여 그림 6과 같이 흡습 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 내부에 각각의 온도별로 실험할 수 있도록 4개의 수조가 격막으로 분리되어 있으며 수조별로 임의의 온도를 설정, 제어할 수 있도록 제작되었다. 또한, 각각의 수조는 인근 수조로부터의 열전달의 영향을 최소화하기 위해 절연재를 이용하여 차단하였다.

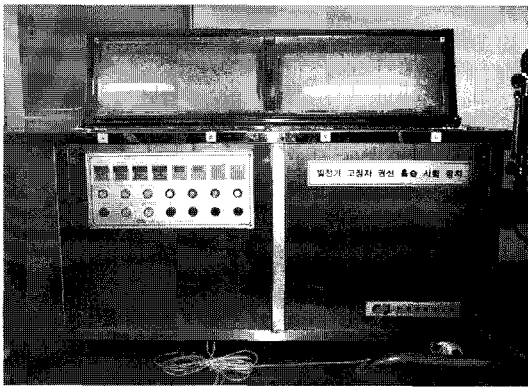


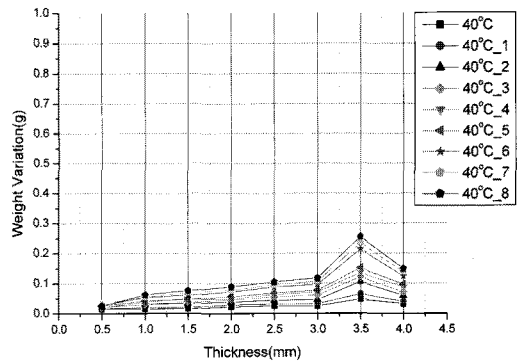
그림 6 고정자 권선 절연물 흡습 실험 장치  
Fig. 6 Water absorption test equipment

실제 발전소에서 운전 중인 발전기 고정자 권선의 온도가 40~60  $^{\circ}$ C이므로 4조로 제작된 흡습 실험 장치의 온도를 40, 50, 60, 70  $^{\circ}$ C로 각각 설정하여 각 수조에 시편을 넣어 순수를 흡습시켰다. 측정은 1주일간격으로 2개월간 수행하였으며 측정 시 시편의 표면을 완전 건조한 후 정밀 저울을 이용하여 질량을 측정하였고 각 시편에 대한 정전용량을 측정하여 비교하였다.

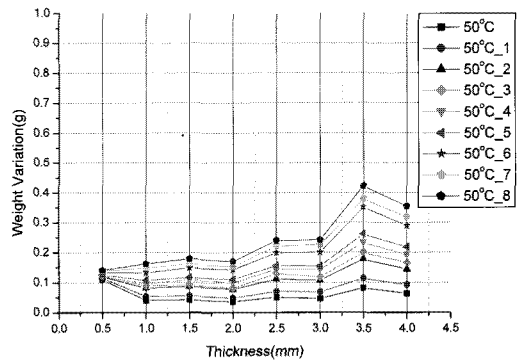
##### 3.1.2 냉각수 온도별 절연물 흡습에 따른 질량 변화

그림 7과 같이 각 시편의 온도에 따른 흡습 정도를 분석하기 위해 흡습 전후의 질량을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 높을수록 질량 변화폭이 증가되어 냉각수의 흡습이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. 500MW 3.5 mm 시편의 경우 다른 시편에 비해 질량 변화가 큼을 알 수 있으며 이는 시편 제작 시 다른 시편에 비해 표면 결함이 존재하여 흡습이 잘된 것으로 분석된다. 온도가 높을수록 전체적으로 질량 변화가 큼을 알 수 있으며 특히, 70 $^{\circ}$ C의 경우 5주 이상 흡습이 진행된 후 질량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 높은 온도에 따른 마이카 사이에 갭이 증가되고

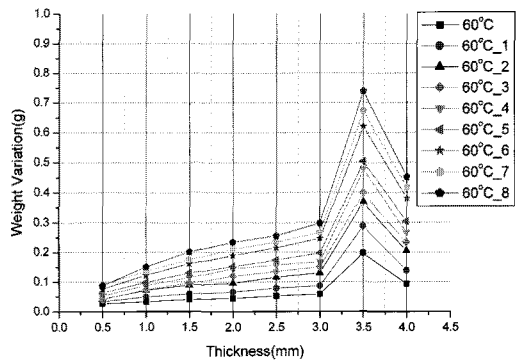
일정 시간이 경과한 후 증가된 갭 사이로 냉각수가 유입되면서 질량이 급격히 증가된 것으로 판단된다. 실험 결과 발전기 고정자 권선 운전 온도 영역(40~60  $^{\circ}$ C)에서는 급격한 질량 변화 없이 순차적으로 흡습이 진행되었다. 그러나 이보다 높은 온도 즉, 70 $^{\circ}$ C 이상의 온도에서 장시간 운전을 하게 되면 권선의 절연물에 문제를 일으킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 발전기 고정자 권선에 흡습이 순차적으로 아주 미소하게 진행되다 어느 정도 흡습이 진행된 후에는 흡습이 급격히 진행될 수 있어 흡습의 경향을 지속적으로 파악하는 것이 중요하리라 판단된다. 그림 8은 40 $^{\circ}$ C와 70 $^{\circ}$ C의 경우에 대한 시편의 정전용량 측정 결과이다.



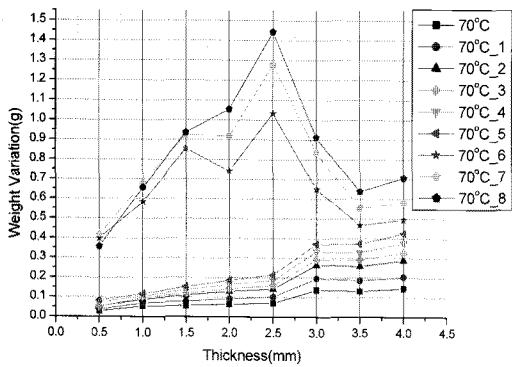
(a) 40 $^{\circ}$ C



(b) 50 $^{\circ}$ C



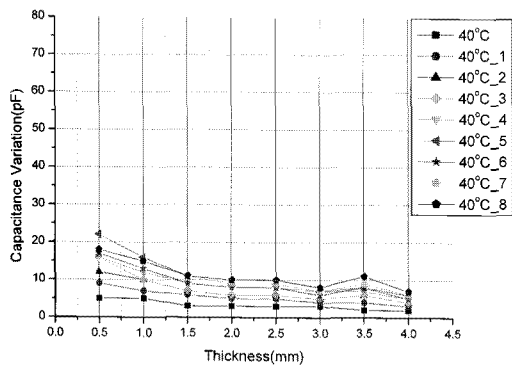
(c) 60 $^{\circ}$ C



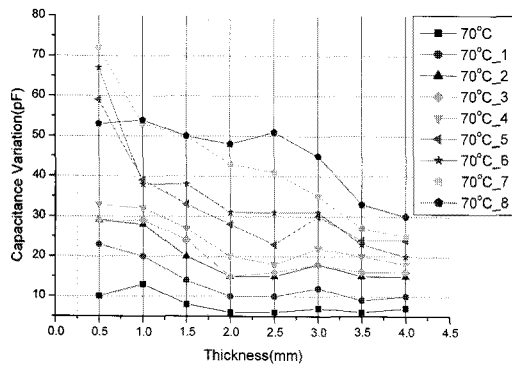
(d) 70°C

그림 7 냉각수 온도별 절연물의 흡습 질량 변화

Fig. 7 Weight variation of specimen by cooling water temperature



(a) 40°C



(b) 70°C

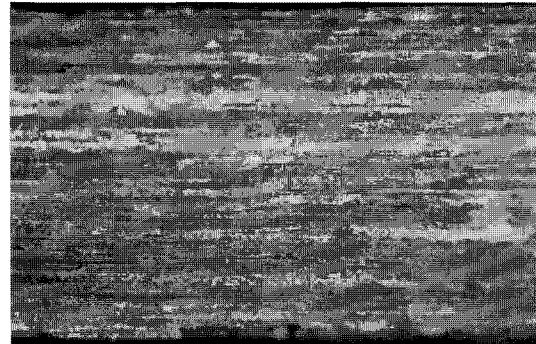
그림 8 냉각수 온도별 절연물의 정전용량 변화

Fig. 8 Capacitance variation of specimen by cooling water temperature

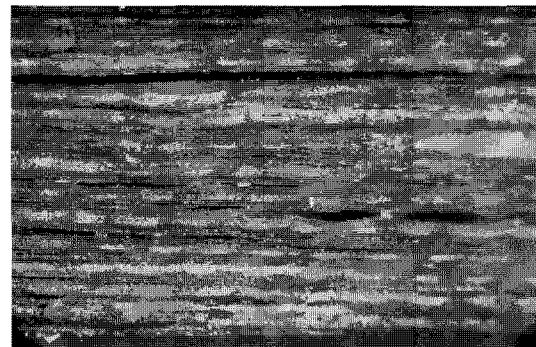
3.1.3 냉각수 온도별 절연물 흡습에 따른 제질 변화

그림 9는 냉각수 온도별 절연물 흡습에 따른 재질의 변화를 분석한 결과로써 흡습 시편 중 40°C와 70°C 경우에 대한 시편의 재질 변화 상태를 보인다. 즉, Lecia사의 WILD M8 고배율 측정 장치를 이용하여 각 시편의 측면(두께 방향)을

30배로 확대해 촬영한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 냉각수 온도가 40°C인 경우 시편의 표면에 흡습의 경향은 보이나 절연물의 박리 현상은 거의 나타나지 않으나 냉각수 온도가 비교적 높은 70°C에서의 시편에서는 표면의 변색 및 박리 현상이 확연하게 나타남을 알 수 있다.



(a) 40 °C



(b) 70 °C

그림 9 흡습에 따른 절연물의 상태 변화(두께 방향)

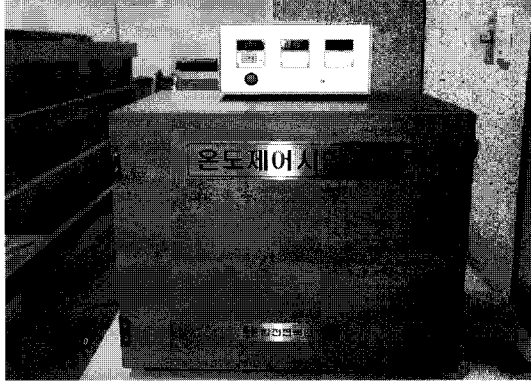
Fig. 9 Delamination of insulation with water absorption

3.1.4 적외선 카메라를 이용한 열화상 측정

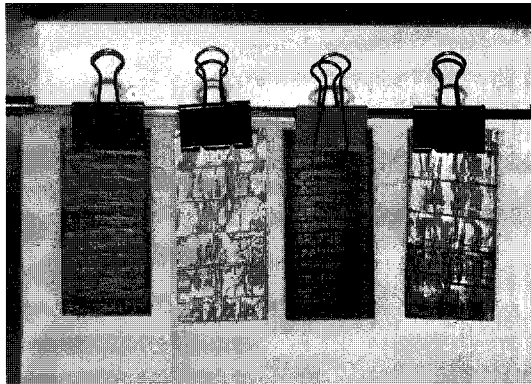
발전기 고정자 권선의 흡습 상태를 확인하기 위해 온도 변화에 따라 흡습시킨 시편을 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다. 흡습 시편에 대한 적외선 열화상 측정을 위해서는 주위 온도나 흡습 시편의 온도를 일정하게 유지한 상태에서 측정하여야 하며 이를 위해 그림 10과 같은 온도 제어 실험 장치를 별도로 제작하였다. 실험 장치는 온도를 80°C 까지 유지, 제어할 수 있도록 하였고 시편 및 내부 온도를 측정할 수 있는 온도 센서가 내장되어 있다. 본 연구에 사용된 적외선 카메라는 FLIA사에서 제작한 ThermaCAM SC5200이며 이 장비는 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장 중에서 적외선 부분만을 검출해 내어 온도분포를 측정한다.

실험은 온도 제어 실험 장치 안에 흡습된 시편을 넣고 45°C로 유지시킨 후 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다. 측정 결과, 그림 11과 같이 냉각수 온도가 40°C인 조건에서 흡습시킨 시편의 경우 흡습을 시키지 않은 정상 시편과 비교해 볼 때 40~43°C로 거의 동일한 온도 분포가 시편 표면

에서 나타났다. 그러나 70℃에서 흡습시킨 시편의 경우 시편의 온도 분포가 흡습이 된 시편 가장자리 부분부터 28~42℃로 낮게 나타났으며 열화상 확인한 결과 시편 양 측면 중앙부가 다른 곳에 비해 흡습이 많이 진행되었음을 알 수 있다.



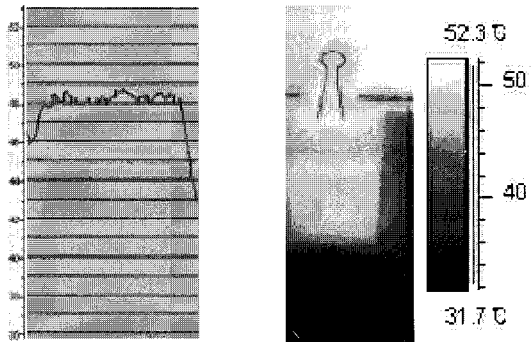
(a) 시편 온도 제어 장치



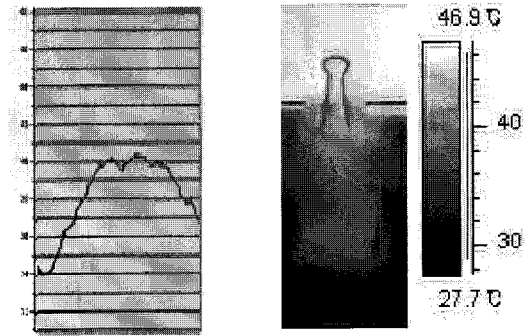
(b) 측정 시편

그림 10 시험 장치 및 시편

Fig. 10 Temperature control equipment and specimen



(a) 40℃



(b) 70℃

그림 11 흡습 시편의 열화상 측정 결과

Fig. 11 Infrared photography of absorbed specimen

### 3.2 온도 변화에 따른 절연물의 정전용량의 변화

표준화력 발전기 고정자 권선 절연물의 온도 변화에 의한 유전 상수의 변화 특성을 파악함으로써 실제 냉각수 흡습에 의한 정전 용량 변화 특성을 파악하기 위하여 그림 10의 실험 장치를 이용하여 시편의 온도별 유전 상수와 정전 용량을 측정하였다. 시편의 온도는 장치 내 설치되어 있는 히터를 이용하여 약 20℃에서 70℃ 범위에서 측정하였으며 그 결과 표 1과 그림 12에서 보이는 바와 같이 0.8pF 이하의 차이를 나타냈다. 국내 표준 화력 발전소에서 운전되는 발전기 고정자 권선의 냉각수 온도 범위가 40~60℃이므로 표준화력 발전기 고정자 권선 시편의 온도 변화에 따른 유전 상수 및 정전용량 변화는 약 3% 이내임을 알 수 있었다. 즉, 본 흡습 실험을 통한 절연물의 흡습 특성 결과는 절연물 자체의 온도 특성 보다는 냉각수 온도 변화에 따른 흡습 특성임을 알 수 있다. 또한 이 결과는 흡습 측정 장치를 이용하여 고정자 권선의 정전용량을 측정, 흡습 상태를 진단할 때 계절별 온도 상승에 따른 오차 요인을 감소시키고 권선 온도의 영향을 고려함으로써 진단의 신뢰성을 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

표 1 온도별 권선 절연물의 정전 용량 변화

Table 1 Capacitance variation by insulation temperature

시간	온도(℃)		1 kHz		10 kHz		100 kHz	
	히터	시편	$C_p$	$D$	$C_p$	$D$	$C_p$	$D$
10:25	23	23.4	14.028	0.0189	13.708	0.0160	13.393	0.0176
11:04	30	30.3	14.091	0.0193	13.768	0.0158	13.465	0.0170
12:43	40	40.3	14.243	0.0195	13.908	0.0155	13.624	0.0155
14:21	50	50.2	14.388	0.02	14.039	0.0157	13.762	0.0143
15:32	60	60.1	14.564	0.0212	14.196	0.0162	13.916	0.0135
17:30	70	70.1	14.835	0.0221	14.461	0.0161	14.177	0.0129

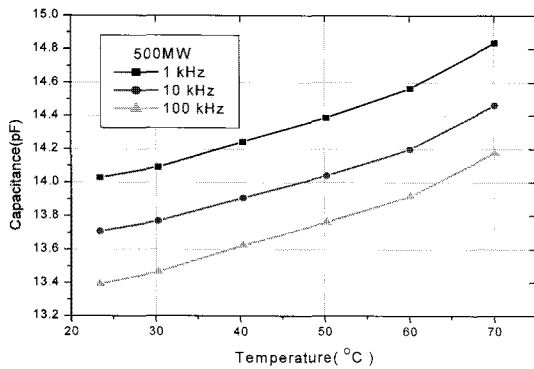


그림 12 절연물의 온도별 정전용량 변화  
 Fig. 12 Capacitance variation by insulation temperature

#### 4. 결 론

발전기 절연 손상의 주요 원인으로 작용하는 고정자 권선 절연물의 냉각수 흡습 여부를 정확히 진단하는 것은 발전소 운전 신뢰성 증진 및 정비 비용 절감 측면에서 매우 중요한 일이다. 본 연구에서는 국내 발전소에서 가장 많이 운전되는 500MW급 표준화력 발전기 고정자 권선 절연물의 냉각수 온도에 따른 흡습 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과 발전기 고정자 권선 냉각수의 온도가 높아질수록, 특히 70°C의 경우에 권선 절연물의 흡습이 많이 됨을 알 수 있었다. 또한, 열화상 측정 결과 70°C에서 절연물 내부의 탈색 및 박리 현상이 크게 나타나며 흡습 속도가 빨라짐을 알 수 있었다. 권선 절연물의 온도 변화에 따른 유전 상수와 정전 용량을 측정된 결과 정지중 흡습 시험 온도인 상온에 비해 발전기 운전 중 권선 온도인 55~60°C에서의 정전용량 변화가 약 3% 증가됨을 알 수 있었다. 본 논문을 통하여 발전기 고정자 권선의 절연물 시험의 냉각수 온도 변화에 따른 흡습의 상태를 실험을 통하여 분석하였으며 이는 발전기 고정자 권선 흡습 시험 및 진단의 신뢰성을 높일 수 있는 중요한 자료가 되리라 기대된다.

#### 참 고 문 헌

[1] D. J. Stamon, "Diagnosing and Repairing Water Leaks in Stator Windings", G.E. company Review, Schenectady, New York, 1992  
 [2] Y. C. Bae, et all, "Development of Water Absorption Measurement Equipment for Generator Stator Windings in Power Plant", Proc. of KSME Annual Conference, 2005

### 저 자 소 개



#### 배 용 채 (裴容彩)

1960년 9월 19일생. 1995년 전남대 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1986년~현재 한전 전력연구원 책임연구원  
 Tel : 042-865-5311  
 Fax : 042-865-5499  
 E-mail : ycbae@kepri.re.kr



#### 김 희 수 (金希洙)

1971년 5월 29일생. 1995년 전남대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한전전력연구원 선임연구원  
 Tel : 042-865-5312  
 Fax : 042-865-5499  
 E-mail : hskim@kepri.re.kr



#### 이 두 영 (李斗寧)

1971년 9월 1일생. 1997년 건국대 대학원 기계설계학과 졸업(석사). 1999년~현재 한전전력연구원 선임연구원  
 Tel : 042-865-5314  
 Fax : 042-865-5499  
 E-mail : dylee@kepri.re.kr



#### 이 욱 룬 (李旭倫)

1970년 11월 1일생. 2005년 충남대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1998년~현재 한전전력연구원 선임연구원  
 Tel : 042-865-5313  
 Fax : 042-865-5499  
 E-mail : maerong@kepri.re.kr