

고압 회전기 On-line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성

論 文

51C-5-5

Characteristics of Ceramic Coupler for On-line Partial Discharge Measurement in High Voltage Rotating Machines

姜 東 植* · 尹 大 熙** · 金 容 柱*** · 李 弘 植§ · 尹 英 浩§§ · 朴 正 后§§§

(Dong-Sik Kang · Dae-Hee Yoon · Yong-Joo Kim · Hong-Sik Lee · Youn-Ho Yun · Chung-Hoo Park)

Abstract - In order to improve the reliability of high voltage rotating machines, it is necessary to understand the breakdown mechanism of stator windings. Especially partial discharge(PD) inception and growth are important in stator winding insulation. Recently, many research on the diagnosis of stator winding insulation for large rotating machines have been developed since the 1970s. Capacitive couplers have been the most widely used sensor for on-line partial discharge detection in rotating machines. This paper deals with the electrical on-line monitor characteristics of ceramic coupler(CC) which has been developed to continuously measure the PD activity in operating high voltage motor stator windings on site. We investigated the electrical characteristics(PD quantity, breakdown voltage and frequency response) to develop CC. This paper presents frequency characteristics and laboratory test result to compare conventional 80[pF] epoxy-mica coupler(EMC) and 105[pF] CC for PD measurement with 6.6kV model stator windings.

Key Words : 회전기, 고정자 권선, 부분방전, ceramic coupler, 절연진단

1. 서 론

산업설비로 많이 사용되는 고압 회전기는 장기간 사용함에 따라 고정자 권선 절연부분이 열화되면 예상치 못한 절연파괴 사고로 많은 손실을 일으킨다. 이러한 회전기 고정자 권선의 열화진단을 위한 방법의 하나로 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 측정하는 기술에 관한 많은 연구가 진행되어왔다. 회전기 고정자 권선의 절연열화 진단방법으로는 회전기를 정지하고 절연상태를 측정하는 off-line 진단법과 회전기가 실사용 조건으로 운전되고 있는 동안 절연상태를 측정하는 on-line 진단방법으로 나타낼 수 있다[1,2]. On-line 진단법은 내부방전, 슬롯방전 및 권선단말 방전 등의 다양한 종류의 방전이 측정 가능하며, 운전중에 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점이 있어 초기진단 개념으로 최근 활발한 연구가 수행되고 있다. 최근 선진 외국에서는 고압부에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 capacitive coupler인 Epoxy-Mica Coupler(EMC)와 비접촉식 센서인 Stator Slot Coupler(SSC), Resistance Temperature Detector(RTD) 및 Radio Frequency Current Transformer (RFCT) 등의 센서를

이용한 on-line 부분방전 측정 기술이 개발되어 일부 이용하고 있는 실정에 있다[2-6]. 국내에서도 1990년대부터 회전기 진단에 관한 연구를 수행하여 기반기술을 구축하고 있다[1,3].

회전기의 on-line 부분방전 측정용 센서로서 현재 가장 폭넓게 사용되고 있는 capacitive coupler는 초기에는 cable type을 사용하였으나, 설치시 문제점 등을 보완한 EMC가 개발되어 사용 중에 있다. 지금까지는 회전기의 부분방전을 측정하기 위해 정전용량이 80[pF]인 capacitive coupler가 주로 사용되었다. 그러나 근래 정전용량 값이 증가할수록 더 높은 측정 감도를 가진다는 것에 착안하여 500[pF] 및 1000[pF] EMC가 개발되고 있다[6].

본 논문에서는 6.6[kV]급 회전기 고정자 권선의 부분방전을 on-line으로 측정하는 capacitive coupler를 개발하기 위하여 현재 상용 판매중인 캐나다 IRIS사의 EMC의 각종 특성을 분석하였다. 이를 통하여, EMC와 동등 이상의 전기적 및 고주파 응답특성을 지닌 ceramic coupler(CC)를 설계·제작하였다. 또한, 본 연구를 통하여 제작된 CC를 6.6[kV]급 고압전동기 고정자 권선 모의 슬롯에 연결하여 발생하는 부분방전을 실험실적으로 비교 분석하여 부분방전 측정센서로서의 적용가능성을 확인하였다[19].

2. 전동기 고정자 권선의 부분방전 측정

2.1 부분방전 특성

일반적으로 고정자 권선내의 전기적 방전은 정격전압이 5[kV] 이상일 때 발생된다. 부분방전은 전극과 전극 사이를

* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 新 電 力 機 器 組 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 新 電 力 機 器 組 研 究 員

*** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 產 業 電 氣 研 究 團 專 門 委 員

§ 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 院 電 氣 物 理 組 組 長

§§ 非 會 員 : Power Plus(주) 社 長

§§§ 正 會 員 : 釜 山 大 學 校 工 大 電 子 電 氣 通 信 工 學 部 教 授

接 受 日 字 : 2001年 11月 21日

最 終 完 了 : 2002年 3月 8日

교락하지 않는 부분적인 방전으로, 고체 절연체 중의 공극(void)에서의 방전인 내부방전, 표면에서의 방전인 연면방전과 고압측의 날카로운 부분의 방전인 코로나로 나누어진다. 이러한 부분방전은 최대 전압차가 발생하는 회전기 출력측에 있는 권선과 접지 사이, 그리고 권선 단말부의 상간에서 많이 나타난다.

내부방전은 고체 절연체 내부에 존재하는 기체가 들어있는 공극의 절연이 파괴되는 현상으로, 주로 전계집중과 관련된 임계전압에 의해 개시되며, 공극 크기에 따라 방전이 일어나기 위한 최소전압이 존재한다. 또한, 공기는 고압수소에 비해서 방전 억제력이 낮으므로 공냉식 고정자 권선의 경우에 부분방전이 더 잘 일어난다. 절연체는 부분방전의 발생에 의해서 절연물이 분해되며, 절연체의 열화속도는 부분방전 크기와 관련이 있는 것으로 나타나있다. 일반적으로 유기물질, 결합물질(폴리에스터, 에폭시, 아스팔트), 합성 에나멜은 석면과 마이카와 같은 무기물질보다 부분방전으로 인한 열화의 진전이 빠르다. 회전기의 장기간 사용에 따라 진전된 기계적 및 열적 열화와 제작 결합인 절연체내 공극에서 부분방전의 발생에 의한 열화가 진행된다[1,2].

공극 형성이론으로는, 전극과 절연체 경계면에서 국부적인 고전계에 의하여 공극이 형성된다고 주장하는 Fracture mechanics model[8] 등의 여러 가지 공극 형성이론[9,10]이 제시되어 있다. 그러나, 절연체의 제작과정에서 형성되어있던 공극이 높은 에너지를 지닌 전자의 무수한 충돌에 의하여 점차 증가하는 확률이 일반적으로 받아지고 있다[11,12]. 이 경우에 있어서 가스가 차있는 공극의 절연파괴 이론은 Townsend[13]에 의한 전자사태 현상으로 설명된다.

Dakin은 이온전도의 경우와 같이 방전에 의한 화학반응의 활성화 에너지가 부분방전 전계강도에 따라 감소하므로, 방전에 의한 전기적열화는 열열화와 동일하게 작용한다고 고려하여 식(2-1)을 도입하였다[14].

$$k(E) = f \cdot (E - E_0) A \exp\left[-\frac{Q - b(E - E_0)}{RT}\right] \quad (2-1)$$

여기서, E : 인가전계, E_0 : 부분방전 개시전계,
 R : 기체정수, T : 절대온도, f : 주파수,
 Q : 활성화 에너지, b : 재질 상수
 A : Arrhenius 식을 따르는 열수명 상수,

Endicott와 Eyring는 식(2-1)을 이용하여, 화학반응속도 정수 중의 스트레스 함수를 변형하여 통상적으로 전기적 열화를 표현하는데 이용되는 과전수명 식(2-2)을 도출하여 나타내었다.

$$V^n \cdot t = const. \quad (2-2)$$

여기서, n : 전기적 열화 종류 및 절연재료에 따른 정수

Simoni는 식(2-2)를 변형한 식(2-3)을 수명식으로 이용하였다[15]. 또한, 일반적으로 양대수로 표시되는 이 식은 2개의 변곡점을 지나는 경우가 많으며, 이를 부분방전발생전계와 트리발생전계로 설명하였다[16]. 즉, 트리발생전계 이하에서는 열화가 진전되지 않으므로 수명을 무한대로 보며, 인가전계가

높아 전압인가와 동시에 부분방전이 발생되면 트리가 급속하게 진전되어 절연파괴가 진행되고, 인가전계가 트리발생전계와 부분방전개시전계 사이에서는 식(2-3)를 만족하는 전기적 열화 및 절연재료 종류에 따라 변화되는 것으로, 기중 코로나 열화에서는 3~4, 유중 코로나 열화 및 트리열화에서는 10~11, 마이카 절연에서는 10~12의 값으로 나타난 연구결과가 있다[17].

$$(L/L_0) = (E/E_0)^{-n} \quad (2-3)$$

여기서, E : 인가전계,

E_0 : 전기적 열화가 발생되지 않는 전계강도,

L_0 : 전계강도 $E \leq E_0$ 조건에서의 수명시간

일반적으로 절연체 내부의 공극에서 형성되는 부분방전 펄스 발생폭은 수십 nsec(nano sec) 이하이고 펄스 상승시간은 수 nsec의 빠른 시간을 지니고 있다. 이러한 부분방전을 측정하기 위한 센서 및 잡음제거 회로에 관한 연구도 많이 진행되고 있다[2,7,18]. 최근, 상용 부분방전 측정용 센서의 하나인 80[pF] capacitive coupler의 측정 감도를 증대시키기 위하여 상대적으로 저주파 대역인 수 MHz의 성분의 측정이 가능한 500[pF] 및 1000[pF] EMC를 개발한 연구결과도 보고되고 있다[6].

2.2 부분방전 측정회로

절연체 내부의 공극에서 부분방전이 발생하면 그림 1과 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 공극에서의 전압강하 ΔU_1 은 공극의 정전용량 C_1 으로부터 식(2-4)와 같은 전하량 Δq_1 을 전류 $i_1(t)$ 를 통해 흘리게되지만 이는 절연체 내의 국부적 전류량으로 직접 측정할 수는 없다.

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 \cdot C_1 \quad (2-4)$$

공극의 방전에 의한 전압강하는 주변 정전용량 C_2, C_3 의 전하이동으로 나타나므로, 대상 시료의 단자(A, B간)에는 식(2-5)와 같은 전압강하 ΔUt 가 나타나게 된다. 식(2-5)를 ΔUt 에 대하여 정리한 후 식(2-4)를 대입하면 식(2-6)과 같은 전하량으로 표현된다.

$$C_3 \times \Delta U_1 = (\Delta U_1 - \Delta Ut) \times (C_3 + C_2) \quad (2-5)$$

$$\Delta Ut = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \Delta U_1 = \frac{C_2}{(C_2 + C_3)C_1} \Delta q_1 \quad (2-6)$$

시료 전체의 정전용량 C_t 는 그림1(b)의 등가회로로부터 식(2-7)과 나타나므로, 시료의 단자전압 강하 ΔUt 는 이를 보상하기 위한 전류 $i(t)$ 에 의해 측정이 가능하며 견보기 전하량으로 알려진 q 는 식(2-8)과 같이 표시된다.

$$C_t = C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_2)} \quad (2-7)$$

$$q = \int i(t) dt = C_t \cdot \Delta Ut = \left(C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}\right) \Delta Ut \quad (2-8)$$

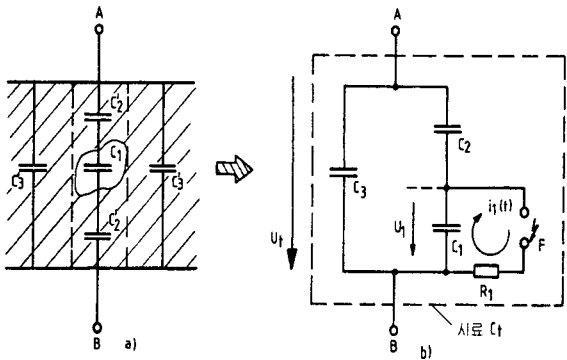


그림 1 시료의 공극 및 정전용량 등가회로
 Fig. 1 Void in specimen and equivalent of capacitance

일반적으로 $C_1 \gg C_2$ 이므로 식(2-8)은 식(2-9)의 앞 부분과 같이 나타낼 수 있으며, 식(2-6)의 관계로부터 걸보기 전하량은 공극에서의 방전 전하량 Δq_1 과 식(2-9)와 같은 관계로 나타나게 된다.

$$q = (C_3 + C_2)\Delta U t = C_2 \Delta U_1 = \frac{C_2}{C_1} \Delta q_1 \quad (2-9)$$

이러한 방전 전하량을 측정하기 위하여는 그림 2와 같은 측정용 커플링 콘덴서 C_k 및 측정 임피던스가 필요하게 된다.

측정 임피던스의 위치에 따라 커플링 콘덴서와 직렬로 연결되는 경우와 시료와 직렬로 연결하는 경우가 있으며 전자는 안정성이 높다는 점이 있고 후자는 측정감도가 전자보다 양호하다는 특징들이 있다. 사용되는 임피던스는 RC 병렬 임피던스를 많이 이용한다.

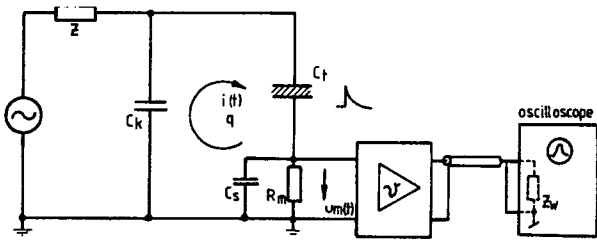


그림 2 시료의 부분방전 측정회로
 Fig. 2 PD measuring circuit on specimen

C_k 가 있으면 걸보기 방전량 q 로 인한 시료의 단자전압 변화는 식(2-10)과 같이 ΔU 에서 $\Delta U'$ 로 보다 작아지게 된다.

$$q = C_t \Delta U = (C_t + C_k) \Delta U' \quad (2-10)$$

커플링 콘덴서의 전하이동에 따른 전류 $i(t)$ 로 인해 측정되는 전하량 q_m 은 식(2-11)과 같다.

$$q_m = C_k \Delta U' \quad (2-11)$$

식(2-10)과 식(2-11)로부터 걸보기 전하량과 측정되는 전

하량과는 식(2-12)와 같이 나타나게 되며, 이로부터 부분방전의 측정감도를 양호하게 하기 위해서는 커플링 콘덴서의 정전용량 값이 시료의 값보다 충분히 큰 것이 요구됨을 알 수 있으며, 이들의 관계를 그림 3에는 나타내었다.

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (2-12)$$

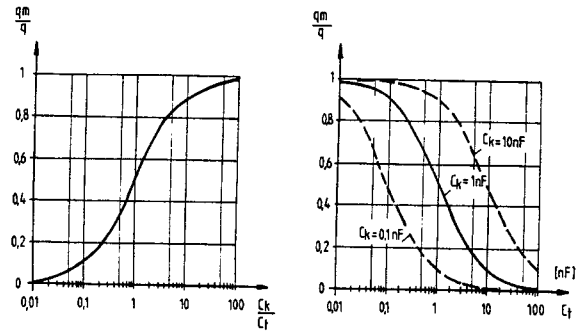


그림 3 측정감도에 대한 커플링 콘덴서의 영향
 Fig. 3 Test sensitivity effect of coupling condenser

3. 실 험

3.1 상용 EMC 센서의 구조 및 특성 분석

회전기 고정자 권선의 고전압 인출부 도체에 직접 연결 설치하여 운전중 부분방전 측정을 위해 현재 가장 많이 사용되는 외국제품 80[pF] EMC의 외형 및 측정구조를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 capacitor 부분은 마이카 절연 ($t=0.3$ [mm])에 금속전극($t=0.025$ [mm])을 부착하여 직병렬회로를 구성한 형태에 외부까지 에폭시로 함침한 구조이다. 이러한 구조는 마이카 및 금속전극을 일정 크기로 적층하는 제조공정이 어렵고, 제작과정에서 공극이 발생할 가능성이 높아 새로운 capacitive coupler를 검토하게 되었다.

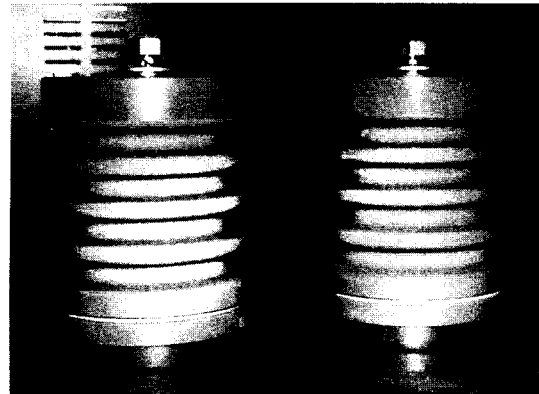


그림 4 EMC 센서의 형상
 Fig. 4 Configuration of EMC

그림 6은 Network analyzer(HP사, Model 81532S)를 이용

하여 EMC 센서의 주파수에 따른 응답특성을 분석한 것이다. 상용 EMC 센서의 cut-off 주파수 특성을 분석해 보면, 감쇠특성 5[dB]를 기준으로 했을 때 EMC 센서의 cut-off 주파수는 10.9~68[MHz]이고, 감쇠특성 10[dB]를 기준으로 했을 때 cut-off 주파수는 6.4~182[MHz]로 나타났다.

또한 6.6[kV]급 전동기용으로 요구되는 내전압 특성은 15[kV·rms] 이상, 8[kV] 전압 인가시 부분방전 발생량이 3[pC] 이하의 특성을 요구하는 것으로 나타났다.

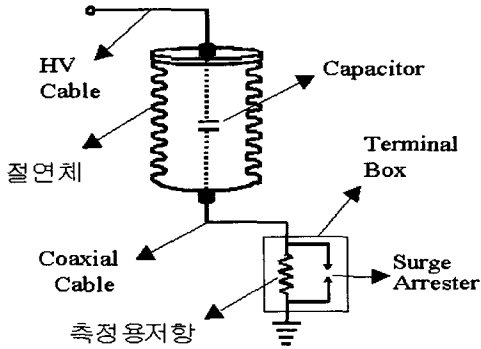


그림 5 EMC 센서를 이용한 측정회로
Fig. 5 Measuring circuit using EMC

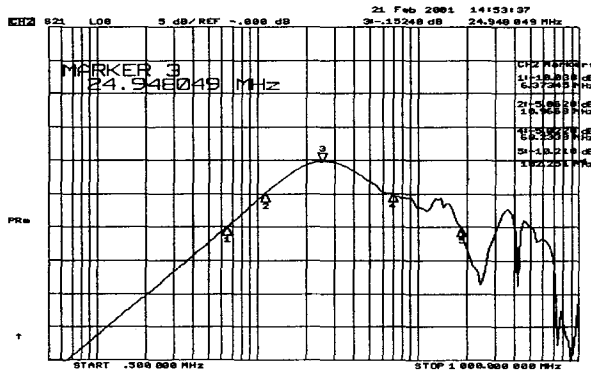


그림 6 EMC 센서의 주파수 응답특성
Fig. 6 Frequency response on EMC

3.2 개발용 CC 소체 제작 및 특성 분석

개발용 센서의 소체는 EMC 센서의 특성중 제일 주요 특성인 주파수 응답특성을 만족하면서 다른 전기적 특성을 만족하도록 설계하였다. 본 연구에서 개발하는 소체의 재질을 세라믹으로 하고 동등 이상의 주파수 특성 및 전기적 특성을 지니도록 세라믹 컴파운드(유전율 : 약 300)를 배합하여 소체를 성형하였다. 소체의 양쪽 전극면에 Ag로 프린팅후 800 [°C]로 소성한 금속 전극층을 형성하는 구조로 하여 기계적 접착력을 높였다. 그림 7은 개발과정을 거쳐 설계 제작된 105 및 210[pF]의 CC 소체이다. 105[pF] 소체는 210[pF] 소체 2개를 직렬로 연결한 구조로 구성되었다.

이들 CC 센서의 소체 중 105[pF]와 210[pF]의 정전용량을 가지는 소체를 선택하여 주파수에 따른 정전용량 변화율, 주파수 응답특성, 부분방전 시험 등을 수행하였다[19].

그림 8은 Network analyzer를 이용하여 2종류 CC 센서 소체의 주파수 응답특성을 분석한 것이다. 감쇠특성 5[dB]를 기준으로 했을 때, 105[pF] CC 소체의 cut-off 주파수 특성은 9.5~110 [MHz]이고, 210[pF] CC 소체에서는 5~107[MHz]로 나타났다. 감쇠특성 10[dB]를 기준으로 했을 때의 cut-off 주파수 특성시험 결과는, 105[pF] CC 소체에서는 5.2~221[MHz]이고, 210[pF] CC 소체에서는 2.6~221[MHz]로 나타났다.

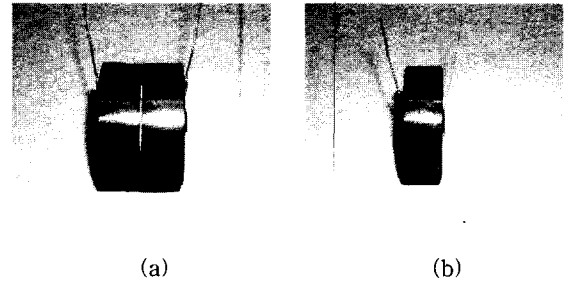
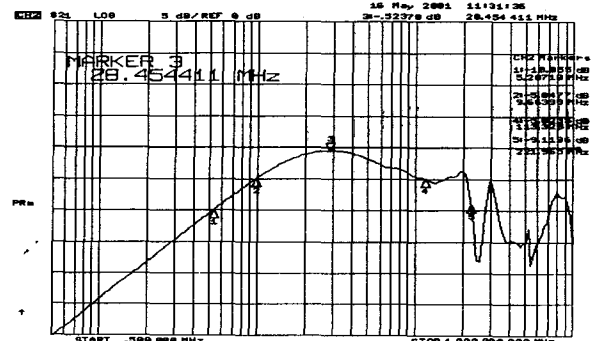
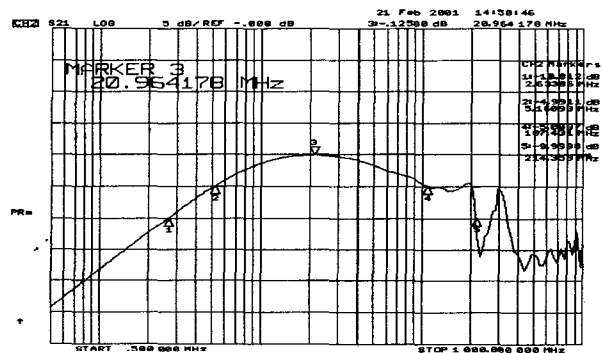


그림 7 설계 제작된 CC 센서의 소체 형상
(a) 105[pF] 소체 (b) 210[pF] 소체

Fig. 7 Configuration of CC element
(a) 105[pF] element (b) 210[pF] element



(a)



(b)

그림 8 CC 소체의 주파수 응답특성
(a) 105[pF] 소체 (b) 210[pF] 소체

Fig. 8 Frequency response of CC element
(a) 105[pF] element (b) 210[pF] element

각 소체의 주파수 특성을 살펴보면 105[pF] 및 210[pF]

CC 소체가 EMC 센서보다 좀더 넓은 주파수 응답대역을 지니도록 CC의 소체가 EMC에 비해 더 넓은 주파수 대역의 부분방전을 측정할 수 있다는 논문의 결과와 잘 일치한다[6]. 그러므로 이들 소체의 주파수 응답 특성은 모두 만족함을 알 수 있었다.

각 소체의 내전압 파괴 특성 파악을 위하여 실리콘유 속에 다 그림7의 소체를 넣고 1[kV/sec]로 전압을 상승시켜 절연 파괴 수준을 파악한 결과 105[pF] CC 소체는 45[kV], 210[pF] CC 소체는 60[kV]를 상회하는 결과를 보여 개발 기준치를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

소체의 부분방전 특성 파악을 위하여 연면방전이 발생되지 않게 실리콘유 속에다 넣고 차폐실에서 실험을 실시하였다. 소체에 가해지는 인가전압은 교류 60[Hz]로 1[kV/sec]로 전압을 상승시켜 부분방전 발생을 파악하는 것으로 하였다. 부분방전 실험은 부분방전 측정기(NIHON model CD-5)로 그림 9와 같이 구성하여 부분방전 발생전압, 부분방전 크기 및 부분방전 소멸전압을 측정하였다.

표 1의 부분방전 특성 결과처럼 부분방전 발생전압이 105[pF] CC 소체에서는 17[kV], 210[pF] CC 소체에서는 12.5[kV]로 나타났다. 또한 이들 전압값에서 소체 내부의 부분방전이 아닌 연면방전의 특성을 지닌 것으로 나타나, 향후 소체 외부에 에폭시 함침과정 등을 거치면 연면방전 특성이 향상될 것이므로 설계 기준을 충분히 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

CC 센서를 제작하기 위한 소체로 주파수 특성이 EMC 센서와 가장 유사하고 부분방전 개시전압이 높은 105[pF] 소체를 선택하였으며, 이를 이용하여 CC를 제작하기로 하였다.

3.3 CC 제작 및 특성 분석

105[pF] 세라믹 소체를 이용하여 그림 10(a)의 구조를 지니도록 CC의 완성품을 제작하였다. 제작된 제품의 실물 사진을 그림 10(b)에 나타내었다. 완성품은 높이 : 111[mm], 큰 shed 최대 외경 : 101[mm], 작은 shed 최대 외경 : 84[mm], 실리콘 housing 외경 : 62[mm]로 나타났다. 제작시 소체 외부의 연면방전 방지를 위하여 진공 속에서 에폭시로 molding 하였으며, 외부 노출상태에서 장기적 사용을 고려하여 외부에 실리콘으로 추가 절연을 실시하는 구조로 설계하였다.

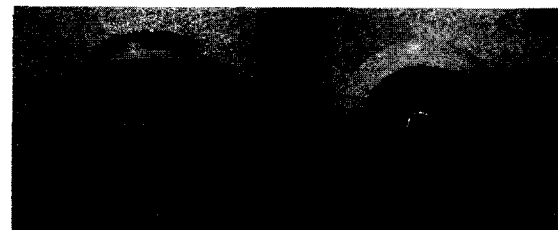
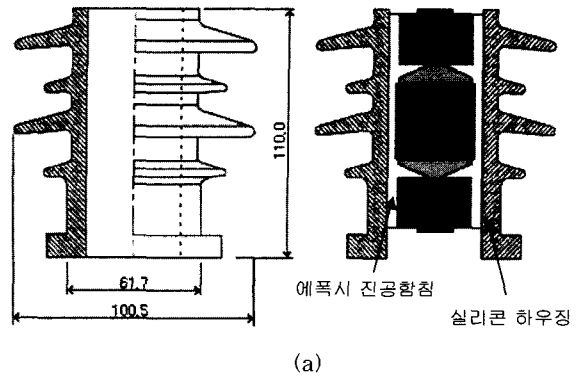


그림 10 CC 센서의 구조 및 실물 사진
(a) CC 센서 구조 (b) CC 센서 실물 사진
Fig. 10 Construction and picture of CC
(a) Construction of CC (b) Picture of CC

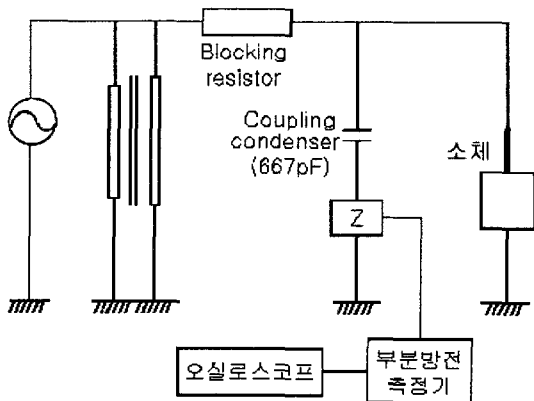


그림 9 부분방전 측정 실험회로
Fig. 9 PD measuring circuit on CC

표 1 CC 소체의 부분방전 특성
Table 1 PD characteristic of CC element

	210[pF] 소체		105[pF] 소체	
	1차	2차	1차	2차
PD 발생전압	12.5[kV]	13[kV]	17[kV]	17[kV]

완성된 제품의 부분방전 특성실험을 그림 9와 동일한 회로에서 소체를 완성품으로 대체하여 실시하였다. 표 2에 나타난 실험결과를 살펴보면, 정상적인 완성품에서는 20kV에서도 부분방전이 발생되지 않는 것으로 나타나 소체 실험시 추정된 결과와 잘 일치하였다. 그러나, 시료 # 2인 경우는 부분방전 발생전압이 12kV, 부분방전 발생량은 13~18[kV]에서 3[pC]으로 나타났다. 시료 # 2를 분해한 결과, 에폭시 절연공정에서 미소 기공이 발생된 것으로 나타났으며, 에폭시 절연물을 제거하고 실시한 재절연 작업에서는 정상적인 완성품과 동일한 부분방전 특성을 보였다.

표 3은 완제품 CC 센서의 주파수 응답특성으로 소체시험 결과에서와 같이 거의 유사한 주파수 응답특성을 보였으며, 80[pF] EMC 센서와 비교하면 약간 넓은 주파수 폭을 지니도록 알 수 있다.

표 2 완성품 105[pF] CC의 부분방전 특성
Table 2 PD characteristic of 105[pF] CC

전압	완성품			
	# 1	# 2	# 3	# 4
PD 발생전압	Free	12 [kV]	Free	Free
12 [kV]				
13 [kV]		3 pC		
15 [kV]				
17 [kV]		3 pC		
20 [kV]		5 pC		

표 3 주파수 응답특성 비교
Table 3 Frequency response of CC

주파수 cut-off 특성	5[dB] 기준	10[dB] 기준
IRIS 제품 (EMC 80[pF])	10.9~68 [MHz]	6.4~182 [MHz]
CC 105[pF] 완성품	9.6~113 [MHz]	5.2~221 [MHz]

고압 전동기의 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 이용하여 측정센서의 응답특성을 비교하기 위한 실험회로를 그림 11과 같이 구성하였다. 그림 11에 이용된 권선은 6.6[kV] 고압전동기용 고정자 권선이며, 모의 슬롯은 동판을 이용하여 구성하였으며, 측정용 센서는 제작된 CC 및 기존 EMC를 사용하였고, 부분방전 파형 측정은 오실로스코프(Lecroy model 9350L)를 사용하였다.

모의슬롯 회로의 고정자 권선에 60[Hz] 시험용 변압기(Hipotronics model 7100-60/D149)를 이용하여 최대 부분방전 발생량이 1000[pC], 3000[pC] 및 7000[pC]이 되게 전압을 인가하였다. 이때 각각의 인가전압은 4.8[kV], 6.5[kV] 및 9.0

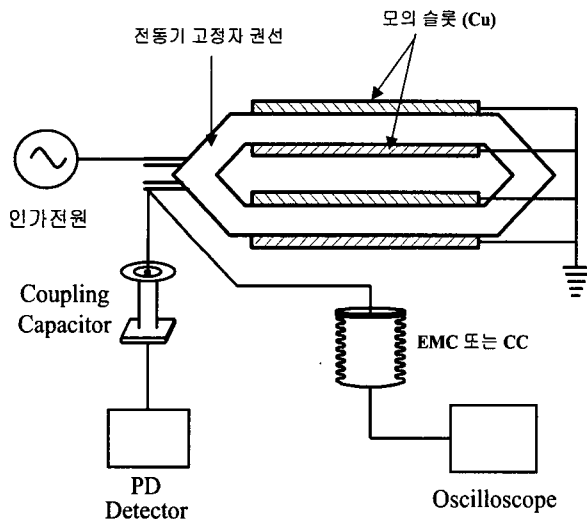
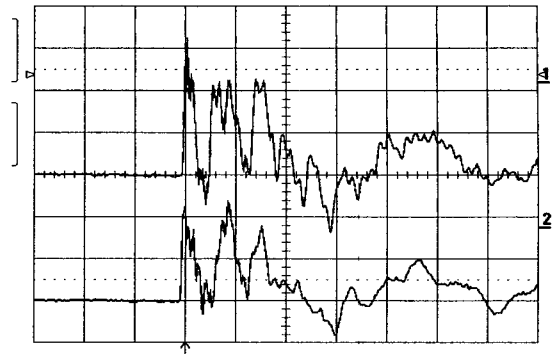
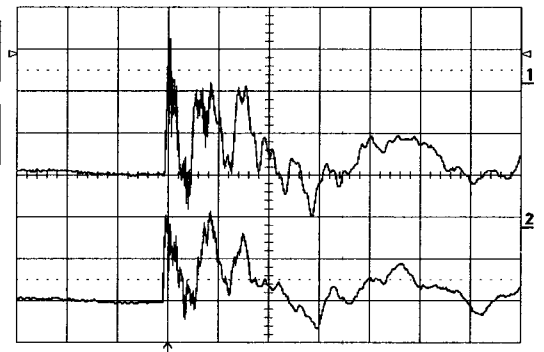


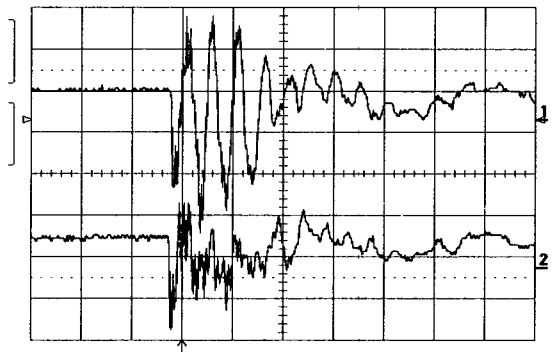
그림 11 6.6kV 모의슬롯을 이용한 PD 측정 회로도
Fig. 11 PD measuring circuit using 6.6kV motor model slot



X axis:0.1[μs/div], Y axis:100[mV/div]
Ch 1 : CC wave, Ch 2 : EMC wave
(a) 1,000[pC]



X axis:0.1[μs/div], Y axis:200[mV/div]
Ch 1 : CC wave, Ch 2 : EMC wave
(b) 3,000[pC]



X axis:0.1[μs/div], Y axis:500[mV/div]
Ch 1 : CC wave, Ch 2 : EMC wave
(c) 7,000[pC]

그림 12 모의슬롯을 이용한 PD 펄스 파형 비교
Fig. 12 PD pulse waveforms acquired from model slot

[kV]로 나타났다. 최대 부분방전 발생량 측정은 부분방전측정기(Haefely Trench model TE571)를 이용하였다.

그림 12는 제작된 CC와 IRIS의 80[pF] EMC를 이용하여 6.6[kV] 고압 전동기용 고정자 권선에서 발생하는 부분방전 펄스를 비교 측정된 결과 예를 나타낸 것이다. 동일한 부분방전량에서 둘다 유사한 펄스 폭을 지닌 것으로 나타났으나, 펄스 크기는 본 논문에서 제작된 CC가 기존 EMC보다 약

30% 정도 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 표3에 나타난 주파수 응답영역의 폭이 제작된 CC가 기존 EMC보다 넓은 것에 의한 것으로 보이며, 정전용량이 큰 coupler가 더 넓은 주파수 대역의 부분방전을 측정할 수 있다는 논문의 결과와 잘 일치한다[6].

각 coupler를 통하여 동시에 측정된 부분방전 펄스 크기를 나타낸 표 4에 의하면, 기존 EMC의 경우에 1000[pC]에서는 최대 240[mV] 및 평균 204[mV]로 나타났다. 또한, 3000[pC]에서는 최대 440[mV] 및 평균 384[mV]로 나타났고, 7000[pC]에서는 최대 1050[mV] 및 평균 960[mV]로 나타났다. 반면, 제작된 CC의 경우에는 1000[pC]에서는 최대 330[mV] 및 평균 264[mV]로 나타났고, 3000[pC]에서는 최대 660[mV] 및 평균 552[mV]로 나타났으며, 7000[pC]에서는 최대 1700[mV] 및 평균 1540[mV]로 나타났다.

이 결과는 최대 부분방전량이 증가함에 따라 발생한 부분방전 펄스의 크기도 증가하는 것을 나타내므로, 용량성 coupler를 이용하여 펄스 크기 및 수량 등을 측정하는 on-line 진단 센서는 매우 유용한 것으로 나타났다.

표 4 용량성 센서로 측정된 부분방전 펄스 크기

Table 4 Magnitude of PD pulse detected by capacitive couplers

	1000[pC] 발생 파형					3000[pC] 파형		
	1	2	3	4	5	1	2	3
105[pF] CC 센서	330 mV	200	260	280	250	660 mV	440	580
IRIS 80[pF] EMC 센서	240 mV	160	200	230	190	440 mV	300	390

	3000[pC]		7000[pC] 발생 파형				
	4	5	1	2	3	4	5
105[pF] CC 센서	560 mV	520	1700 mV	1450	1500	1450	1600
IRIS 80[pF] EMC 센서	420 mV	370	1050 mV	850	950	900	1050

4. 결 론

본 논문에서는 장기 사용된 고압 회전기의 고정자 권선에 서 발생하는 부분방전을 on-line으로 측정하여 절연열화 진단에 이용하고자, 현재 부분방전 측정 센서로 많이 사용되고 있는 EMC의 기본이 되는 주파수 특성을 분석하고, 이를 토대로 고전압용 ceramic coupler(CC)를 제작하여 실규모 모델 시료 실험 등을 통하여 센서로서의 특성을 기존 상용제품과 제품과 비교하여 파악한 결론은 다음과 같이 나타났다.

1. 세라믹 재질을 이용한 105[pF] 소재는 주파수 응답특성에서 기존 제품에 비하여 cut-off 주파수 대역의 일부 증가가 나타났으므로, 부분방전 측정 감도에 있어서 동등 이상의 특성을 지니므로 이를 기본 소재로 선정하였다.
2. 완성된 여러개의 CC에서도 주파수 응답특성 및 부분방전

특성이 동일하게 나타나 센서로서의 재현성이 양호한 것으로 나타났다.

3. 완성된 CC의 부분방전 측정결과 6.6[kV] 전동기에서 발생 가능한 이상전압보다 높은 20[kV]에서도 내부방전이 발생되지 않는 것으로 나타나 부분방전 측정용으로 충분한 여유를 지닌 것으로 나타났다.
4. 모델 권선을 이용한 실험결과에서 부분방전 발생량에 비례하여 펄스 크기가 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 본 논문에서 제작된 CC가 기존 EMC보다 펄스 크기 응답에서 약 30% 정도 크게 나타나 측정감도면에서 양호함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전기연구소, "고압 회전기 On-Line 감시기술 개발", 최종 보고서, 1998.
- [2] I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Conduction of Large Rotating Machines (Volume 16)", EPRI publication EL-5036, 1989.
- [3] Y.J. Kim, D.H. Hwang, B.C. Shin, D.Y. Park, and J.W. Kim, "Development of Continuous Partial Discharge Monitoring System for Generator Stator Insulations", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 5-8, 2000.
- [4] Ken Kimura, Yoshiharu Kaneda, Koji Mio, Satoru Kuroki, Teruya Osawa and Hiroki Tanaka "On-line Partial Discharge Monitor for Turbine Generator", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 1999 (ICEE '99), Vol. 1, pp. 172-175, 1999.
- [5] 電氣協同研究會, "電力設備への センサ 技術適用", 電氣協同研究 第46卷, 第4号, 1990.
- [6] 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, December 1999.
- [7] K. Itoh et. al., "On-line Partial Discharge Measurement of Turbine Generators with New Noise Rejection Techniques on Pulsed-by-pulsed Basis", Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 197-200, 1996.
- [8] Zeller H.R. and Schneider W.R., "Electro Fracture Mechanics of Dielectric Aging", Journal of Applied Physics, Vol.56(2), 1984.
- [9] Zoledziowsks S. and Soar S., "Life Curves of Epoxy Resin under Impulses and the Breakdown Parameters", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-7, No.2, 1972.
- [10] Bahder G., Dakin T.W. and Lawson J.H., "Analysis of Treeing Type Breakdown", CIGRE International

Conference of Large High Voltage Electric Systems, Session 21-29, 1974.

- [11] Tanaka T. and Ikeda Y., "Internal Discharges in Polyethylene with an Artificial Cavity", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, 1971
- [12] Y.J. Kim, "Partial Discharge Spectroscopy for Insulation Diagnosis", RPI Press, New York, 1987.
- [13] Von Hippel A., "Dielectrics and Waves", MIT Press, Cambridge, Mass., 1966.
- [14] T. W. Dakin et al, "The Voltage Endurance of Cast Resin", Proc. IEEE International Conference on Electrical Insulation, No. 216. 1973. 06.
- [15] L. Simoni, "General Equation of the Decline in the Electric Strength for Combined Thermal and Electrical Stresses", IEEE Trans., EI-19, pp.45, 1984.
- [16] L. Simoni, "Fundamentals of Endurance of Electrical Insulating Materials", CLUEB Publ., Via Marsal 24, Bologna, Italy, 1983.
- [17] 井關 他, "絶縁の電壓劣化に関する考察", 電氣學會全國大會, No. 277, 1982.
- [18] 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. 1131-1137, 1999.
- [19] 강동식, 김용주 외, "6.6kV 회전기 부분방전 측정용 capacitive coupler 특성", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(C), 2001. 7. 18.-20.

저 자 소 개



강 동 식 (姜 東 植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 박사과정 수료. 1987년~현재 한국전기연구소 신전력기기그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1573 Fax : 055-280-1589
E-mail : dskang@keri.re.kr



윤 대 희 (尹 大 熙)

1971년 3월 1일 생. 1997년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2001년 2월 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 · 한국전기연구원 위촉연구원
Tel : 055-280-1549 Fax : 055-280-1589



김 용 주 (金 容 柱)

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~현재 한국전기연구원 책임연구원. 1999년~2000년 산업전기연구단 단장. 2001년~현재 산업전기연구단 전문위원.

2001년~현재 대한전기학회 국제이사. 전기기기 및 에너지변환시스템학회 학술이사

Tel : 055-280-1540, Fax : 055-280-1547

E-mail : yjkim@keri.re.kr



이 홍 식 (李 弘 植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 그룹장. 책임연구원

Tel : 055-280-1491 Fax : 055-280-1406

E-mail : hslee@keri.re.kr



윤 영 호 (尹 英 浩)

1964년 1월6일생. 1985년 명지대학교 요업공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(박사). 1986년~2001년 삼화콘텐서 연구소 근무. 2001년~현재 주식회사 파워플러스 대표이사

Tel:043-222-2369, Fax:043-222-2377

E-mail: yhyun@ipowerplus.com



박 정 후 (朴 正 后)

1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수.

Tel : 051-510-2369 Fax : 051-513-0212

E-mail : Parkch@hyowon.cc.pusan.ac.kr