

## 부분방전 검출을 위한 저, 고주파용 센서 해석 및 설계

허창근\*, 김용주\*\*, 강동식\*\*, 정현교\*  
\*서울대학교, \*\*전기연구원

### The Design of a Sensor for Measuring Partial Discharge Signals in Rotating Machines.

Chang Geun Heo\*, Yong Joo Kim\*\*, Dong Sik Kang\*\*, Hyun Kyo Jung\*  
\*Seoul National University, \*\*Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 회전기기의 운전 상태에서 on-line 부분방전시험은 고정자 권선의 절연상태를 검사, 평가할 수 있는 중요한 수단으로서 이러한 부분방전시험을 통하여 회전기기 시스템의 사고예방을 위한 진단을 할 수 있다. 기존의 비접촉식 센서인 SSC는 부분방전 측정을 위하여 권선의 웨지 아래에 설치하는 방식으로 개발되어 [1], 설치가 불편하고 Global VPI 방식으로 제작된 소형 회전기에는 설치할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 소형 회전기에 사용가능한 저, 고주파용 부분방전 센서를 제안하였다. 웨지 위에 설치 가능한 SSC 형태의 마이크로스트립 센서 및 전송선로 이론을 이용한 2선 평행 전송선로 센서는 값이 싸고 소형 회전기에 설치할 수 있을 정도의 크기를 지니며, 기본적으로 센서의 구조가 고주파 웨이브가이드로서 고주파용 센서로 적합하다. 또한 저주파 신호를 검출하기 위한 센서로 로고우스키 코일 형태의 U 타입 센서는 와전류를 검출하는 센서로서 슬롯 외부에 설치 되어야 한다. 이러한 U 타입 센서와 마이크로스트립 센서 또는 2선 평행 전송선로를 동시에 설치할 경우 저, 고주파를 효과적으로 검출할 수 있다.

### 1. 서 론

고정자 권선에서 고전압이 인가될 때 절연체 내부의 공극에서 부분방전이 발생한다. 이러한 방전은 절연재료의 열화를 판정하는데 중요한 기준이 되며 고정자의 절연 고장을 복구하는데는 장시간이 요구되므로, 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 발견하고 불시정지에 따른 파급을 막기 위해서는 부분방전의 상시감시가 요구된다. 한편 회전기기 운전 중 부분방전을 검출하기 위한 회전기 일체형 센서는 회전기기 내부 구조에 내장할 수 있을 정도의 소형이어야 한다. 고주파용 마이크로스트립 센서와 2선 평행 전송선로 센서의 경우 웨지 위에 설치되므로 고정자 철심과 회전자 사이의 공극 2.5-3.0(mm)의 높이와 고정자 코일의 폭 8(mm)를 고려하여 설계하여야 하며, 슬롯 외부에 위치할 U 타입센서의 경우 코일간 간격을 고려하여 설계 제작 되어야 한다.

기존 SSC의 경우 고정자 권선과 웨지 사이에 설치 되어야 하고 그 크기가 소형 회전기에 적합하지 않는 단점을 가지고 있다. 하지만 마이크로스트립 센서와 2선 평행 전송선로 센서는 그 작은 설치 크기나 저렴한 가격 면에서 소형기기의 부분방전 검출센서로 적합하고 U 타입의 경우 기존 로고우스키 타입의 센서와는 달리 플라스틱 등과 같은 유동적으로 구부릴

수 있는 비자성체 코어를 사용함으로써 설치 시 용이하다는 장점을 가지고 있다. 절연체 내부의 공극에서 발생하는 부분방전은 수 마이크로에서 수 나노 초(second)의 상승시간과 폭을 가지는 펄스의 형태로 다중방전의 성향을 나타낸다. 고주파 영역에서 부분방전의 전자기적 현상은 매우 복잡하며 고주파의 전파현상은 단순한 등가회로 모델로는 그 현상을 고려할 수 없다. 그래서 FDTD (Finite Difference Time Domain method)나 FEM (Finite Element Method)등을 이용한 수치해석 방법이 적용되고 있으며 본 논문에서는 이러한 수치해석에 기반을 둔 Ansoft의 HFSS 상용프로그램과 CST의 MWS (Microwave Studio)를 사용하였다 [2]. 저주파용 U 타입센서의 검출원리는 전동기 권선에 발생하는 방전 펄스로 인한 와전류를 검출하는 것으로서 U 타입 코일의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 수치적으로 구한 후 시간차분에의해 센서 양단의 전압을 계산한 후 실험과 비교 분석 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 센서의 구조

그림 1은 제작 및 시뮬레이션에 사용된 센서들의 구조를 보여준다. 마이크로 스트립 센서는 도체로 이루어진 신호라인이 웨지에 고정되고 센서의 윗면은 접지면으로서 도체로 이루어져 있다. 실제 전동기에 설치시 한쪽 포트만을 사용하므로 다른 한쪽 포트는 임피던스 정합을 위해 50Ω의 칩저항을 설치 하였다. 센서의 두께는 0.787[mm], 센서의 길이는 15[cm], 신호라인의 폭은 1.4[mm] 이다.

2선 평행 전송선로 센서는 고정자 권선 위의 웨지에 설치되며 두 원통도선이 일정한 거리를 두고 코일의 길이방향으로 놓여져 있는 구조로 이루어져 있다. 설치의 용이함을 위해 도선의 주변을 절연물질로 코팅 하였다. 센서는 크게 접지라인과 신호라인, 유전체 부분으로 구분되며 한 개의 출력 포트를 가진다. 원통도선의 지름은 0.5[mm]이며 두 도선의 중심사이 거리는 0.7[mm], 둘러싼 유전체는 비유전율  $\epsilon_r = 4.6$ 의 유전체를 사용하였다. 센서 출력 포트는 동축케이블로 연결되며, 다른 한쪽은 50[Ω]의 칩저항을 설치하였다. 또한 출력 선과의 임피던스 매칭을 위해 2선 평행 도선의 특성임피던스는 50[Ω]으로 하였다. 이 평행 도선의 전파모드는 TEM (Transverse Electro Magnetic) 모

de로 설명할 수 있다.

U 타입의 경우는 실제 전동기에 간편하게 부착할 수 있도록 쉽게 휘어질 수 있는 유전체에 코일을 감은 형태이며  $0.5[mm] \times 0.5[mm]$  두께의 유전체에 90턴의 코일을 감아서 사용하였다.

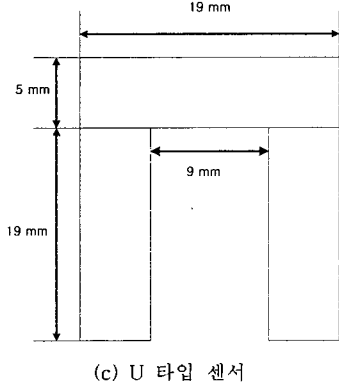
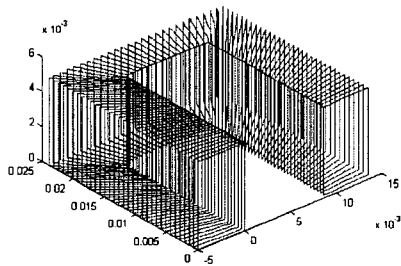
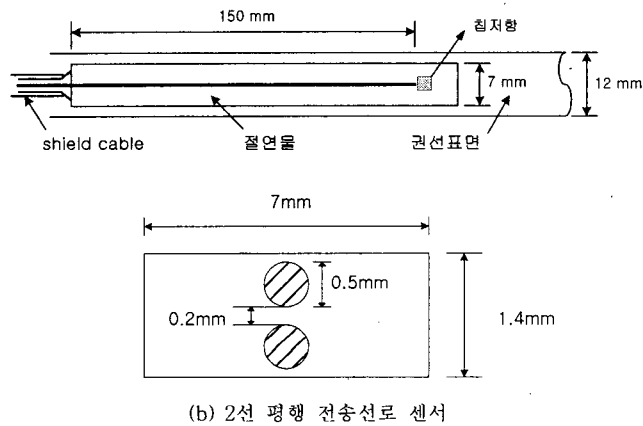
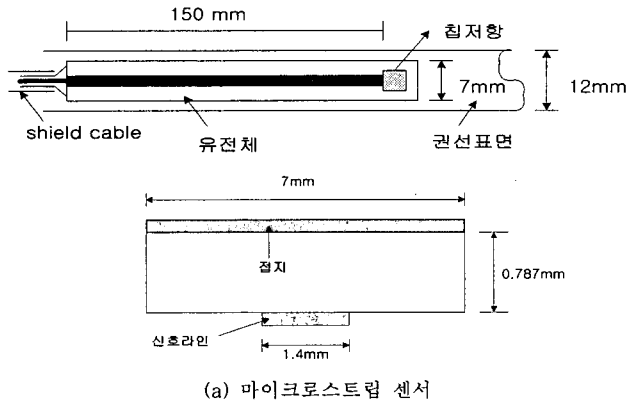


그림 1. 센서의 구조

## 2.2 고주파 부분방전시 전자파의 전파

그림 2는 고주파 시뮬레이션에 사용된 해석모델을

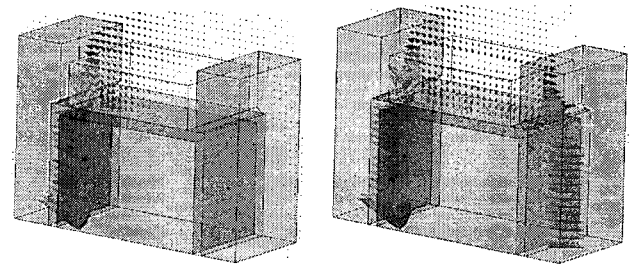
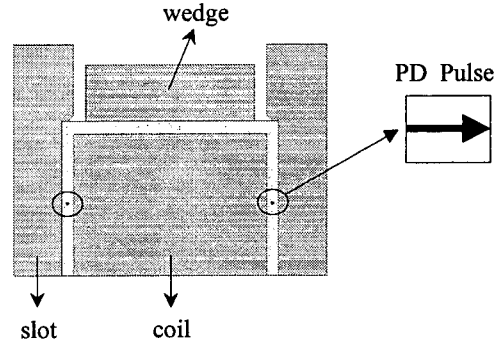


그림 3. 부분방전 시 고주파 방전 펄스의 전파경로

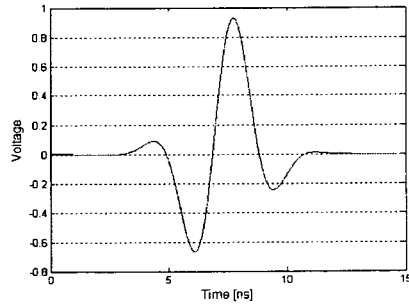
보여 준다. 센서는 이 구조에서 웨지 위에 설치된다. 고주파 방전펄스를 시뮬레이션하기 위해 주파수 영역에서  $300[MHz]$ 의 정현파를 공기로 채워진 크기  $0.1[mm^3]$ 의 공극에 입력한 후 이것을 입력파로 하여 회전기내 슬롯 구조에서 전계 분포를 살펴 보았다. 시뮬레이션은 HFSS 3차원 해석 프로그램을 사용하였다.

그림 3은 해석영역에서의 전계분포를 보여준다. 결과적으로 도체인 코일과 슬롯 간의 가이드 구조 사이에서 전자기 에너지가 전파됨을 확인 하였고 wedge 부분에서 구조의 불연속으로 인하여 전계가 크게 감소 됨을 알 수 있다. 그러므로 센서의 성능은 이러한 전자파 에너지를 얼마나 효과적으로 가이드 할 수 있는 가로 결정된다.

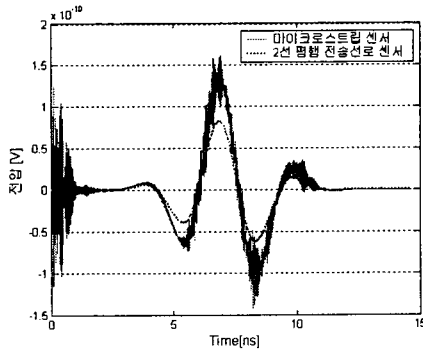
## 2.3 고주파 센서의 모의 실험

고주파의 시간영역 모의 실험은 CST의 MWS 3차원 해석 프로그램을 사용하였다. 방전 펄스로  $0.92[V]$ 의 가우시안 펄스를 인가한 후 마이크로스트립 센서는 신호선과 접지의 중앙 지점에서, 2선 평행 전송선로의 경우 두 원통 도체사이의 중앙에서 시간에 따른 전계변화를 측정하였다. 입력 파형으로는 특정 시점에서 수 나노 초의 펄스 폭을 갖는 임의의 두개의 가우시안 펄스를 사용 하였다. 그림 4와 5는 시간영역에서 부분방전 두 입력 펄스와 두 센서

에서 검출된 전압값을 비교하여 보여 주고 있다. 두 번의 시뮬레이션에서 마이크로스트립 센서의 경우 각각 최대  $2 \times 10^{-7} [V/m]$ ,  $3.08 \times 10^{-7} [V/m]$ 를 검출하였고 2선 평행 전송선로 센서의 경우 최대  $4.2 \times 10^{-7} [V/m]$ ,  $7.94 \times 10^{-7} [V/m]$ 를 검출하였다. 이를 전압으로 계산하면 실제 측정되는 전압은 마이크로 스트립의 경우,  $1.574 \times 10^{-10} [V]$ ,

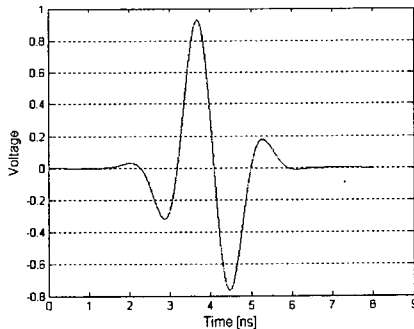


(a) 입력파형 1

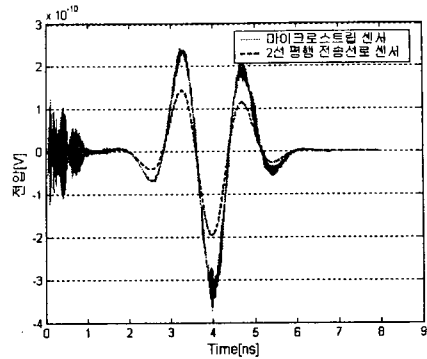


(b) 센서를 통한 전압의 출력파형 1

그림 4. 시간영역에서 센서의 성능 비교 1



(a) 입력파형 2



(b) 센서를 통한 전압의 출력파형 2

그림 5. 시간영역에서 센서의 성능 비교 2

$2.3 \times 10^{-10} [V]$ 이며 2선 평행 전송선로 센서의 경우  $0.84 \times 10^{-10} [V]$ ,  $1.4 \times 10^{-10} [V]$ 이 됨을 확인할 수 있었다.

## 2.4 저주파 센서 해석

U 타입 센서는 전동기 권선에 부착되며 수치적으로 해석을 하기 위하여 우선 Biot-Savart 법칙으로 다음과 같이 자기벡터 포텐셜 A를 계산한다.

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl'}{R} \quad (Wb/m) \quad (1)$$

상호 인덕턴스는 센서 중앙에 전동기 코일을 모델링한 후 계산된 A를 이용하여 다음과 같이 적분하여 구한다.

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{N_2}{I_1} \int_{s_2} (\nabla \times \vec{A}_1) \cdot ds_2 \\ &= \frac{N_2}{I_1} \int_{s_2} \vec{A}_1 \cdot dl_2 \end{aligned} \quad (2)$$

자기 인덕턴스는 식(3),(4)에 의해 계산되어 진다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_s \vec{B} \cdot ds \\ &= \int_s \nabla \times \vec{A} \cdot ds \end{aligned} \quad (3)$$

$$L_{11} = \frac{\int_s \vec{A} \cdot ds}{I_1} \quad (H) \quad (4)$$

계산된 결과 상호 인덕턴스와 자기 인덕턴스는 각각  $5.18875e-008[H]$ ,  $5.46103e-006[H]$ 가 된다. 와전류 및 센서 양단에 걸리는 전압은 다음과 같은 시간 차분의 과정으로 구해진다.

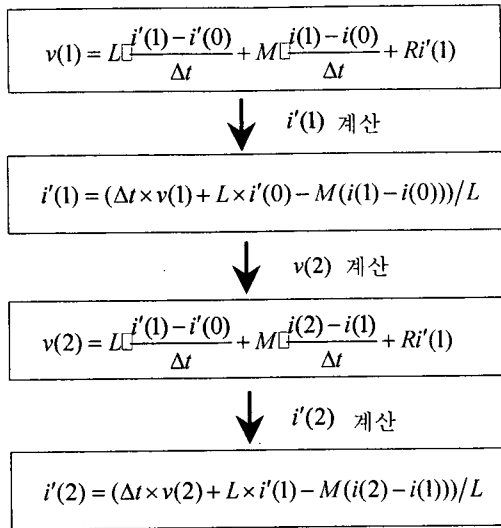
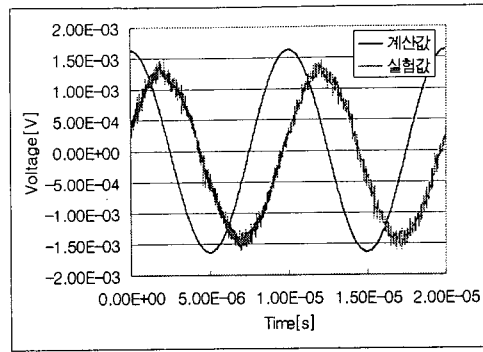
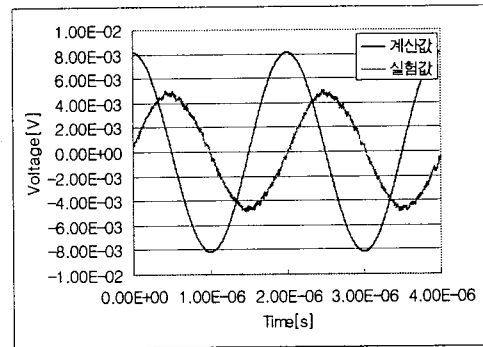


그림 6. 시간 차분에 의한 센서 양단의 전압계산 과정

센서를 전동기 권선에 설치 후 권선 양단에 0.1[A]의 정현파를 입력한 후 센서에서 검출되는 전압을 측정하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 측정결과 10[KHz]에서 0.32[mV], 100[KHz]에서 3.18[mV]로 검출 능력이 선형적으로 증가하였고, 약 300KHz이하의 저주파에서는 수치적으로 계산된 값과 같았으나 고주파로 갈수록 커패시턴스 같은 기생성분으로 인해 실험값과 수치해석 값에 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

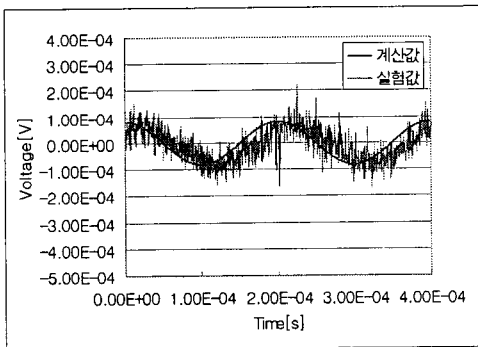


c) U 타입 센서 : 100KHz에서 성능 비교

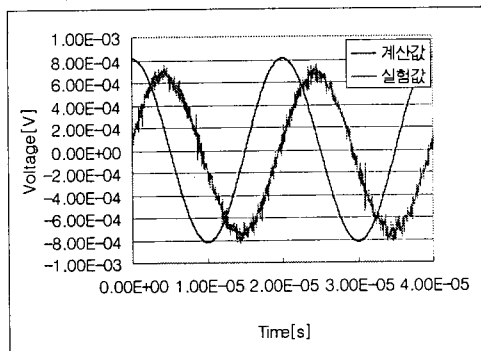


d) U 타입 센서 : 500KHz에서 성능 비교

그림 7. 주파수에 따른 실험값과 수치해석 결과 비교  
 결과적으로 고주파로 갈수록 상대적으로 측정감도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 고주파용 센서 마이크로 스트립은 그림 9에서 볼 수 있듯이 고주파로 갈수록 성능이 급격히 향상됨을 확인할 수 있다.



a) U 타입 센서 : 10KHz에서 성능 비교



b) U 타입 센서 : 50KHz에서 성능 비교

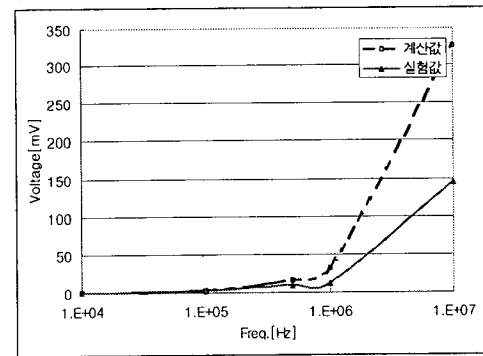


그림 8. U 타입의 주파수에 따른 실험치와 수치해석결과 비교

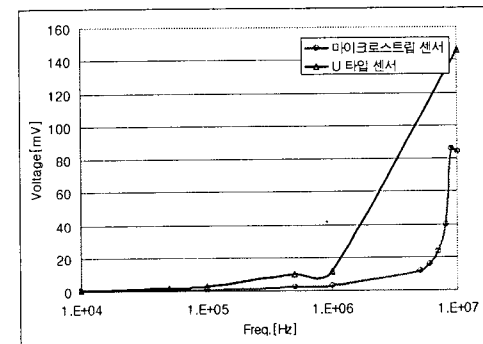


그림 9. 주파수에 따른 마이크로스트립 센서와 U 타입 성능 비교

### 3. 결 론

본 논문에서는 효과적인 부분방전 측정을 위한 저주파 및 고주파용 센서를 제안 하였다. 센서의 전체 크기는 회전기기내 설치 가능한 작은 크기이며, U 타입, 마이크로스트립, 2선 평행 전송선로 센서의 성능을 검증하기 위하여 시간차분 수치해석 및 3차원 해석 프로그램을 사용하였다. 고주파용 마이크로스트립 센서와 2선 평행 전송선로 센서를 비교 분석 하였고, 결과적으로 센서로서 좋은 전자파 검출 특성을 도출할 수 있었다. 또한 저주파용 센서로서 비자성체 코어를 사용한 U 타입의 센서를 제안 하였고 저주파에서 효과적으로 방전 펄스를 검출함을 확인 할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] S. M. Tetrault, G. C. Stone, H. G. Sedding, "Monitoring Partial Discharges on 4-kV Motor Windings," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 35, No. 3, pp.682-688, May/June. 1999.
- [2] D. Pommerenke, R. Jobava, R. Heinrich, "Numerical Simulation of Partial Discharge Propagation in cable Joints Using the Finite Difference Time Domain Method," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 6, pp.6-11, 2002.