SF_6 GIS의 부분방전 검출을 위한 단일벽 탄소나노튜브 센서

Single-Walled Carbon Nanotube Sensors for Partial Discharge Detection in SF_6 GIS

정세훈[1], 최재붕[1], 김영진[1,2], 이종철[3], 장용무[4], *,#백승현[1,2]

S. H. Jung[1], J. B. Choi[1], Y. J. Kim[1,2], J. C. Lee[3], Y. M. Chang[4], *,#S. H. Baik(sbaik@me.skku.ac.kr)[1,2]

[1] 성균관대학교 기계공학부, [2]성균관대학교 나노과학기술원, [3]강릉대학교 기계자동차공학부,
[4]한양대학교 퓨전전기기술응용연구센터

Key words : Partial discharge, Single-walled carbon nanotube, Gas insulated switchgear, Sulfur hexafluoride

1. 서론

최근 10여 년간 전체 변전설비 고장 중 가스절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear: GIS) 고장이 약 11%를 차지하고 있으며, 설비가 증가함에 따라 고장 발생건수도 증가 추세에 있다. 따라서 도전성 입자, 개폐 스위치 절연불량 등 절연결함과 관계된 사고가 많은 부분을 차지하고 있는 SF_6 GIS에서의 사고예방과 안전한 운영을 위하여 사고를 진단하고 예측분석할 수 있는 전문적이고 체계적인 진단시스템(전기적 검출방법, 초음파 검출방법, UHF 센서를 이용한 검출방법 등)의 개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만 운전 중인 초고압 GIS 설비 내부에서 발생하는 부분방전을 측정하기 위해서는 센서의 출력신호의 크기, 기계적 진동 및 전자파에 의한 노이즈로 인하여 많은 어려움이 존재하고 있다.

나노기술이 적용된 단일벽 탄소나노튜브 (Single-Walled Carbon Nanotubes: SWNT)는 지름 약 0.6~2 nm로 이루어진 graphite tube로서 [1] 우수한 기계적 강도, 독특한 전기적 특성을 가지고 있을 뿐 아니라, large surface to volume ratio, 1차원 전자 구조, 표면 원자들로만 되어있는 분자 구조 등 가스센서 재료로서 많은 장점을 가지고 있어 SWNT를 이용한 가스센서 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다 [2-7]. 이미 SWNT를 이용해 NO_2, NH_3 등을 PPM 농도 범위까지 탐지한 연구가 성공적으로 수행되었으며 [7], 특히 일본 연구소등에서는 탄소나노튜브(Carbon Nanotube: CNT)를 SF_6 GIS의 부분방전 검출에 성공적으로 적용한 바 있다 [8].

본 논문에서는 SWNT-based 가스센서를 이용한 부분방전 검출방법을 제시하였다. 부분방전 검출기술 개발 및 반응 메커니즘 규명을 위하여 1차적으로 SF_6 플라즈마 챔버에서 기초실험을 수행하였고, 2차적으로 제작한 실험용 부분방전 챔버에서 부분방전 검출기술을 검증하였다.

2. SWNT-based 가스센서 제작

광리소그라피(photolithography) 방법으로 500 nm 두께의 SiO_2 층이 코팅(coating)된 p-type 실리콘 웨이퍼 위에 전극(electrode)을 만들어 센서를 제작하였다. 전극 사이의 간격은 5 μm이며, 티타늄(titanium)과 금 (gold)이 각각 5 nm와 200 nm 두께로 스퍼터링 되었다. 한편 HiPco-SWNT를 분산시키기 위해서 음극(anionic) 성질을 지닌 SDS(sodium dodecyl sulfate) 계면 활성제가 쓰였으며, 나노튜브 분산을 위한 프로세스는 homogenization, ultrasonication, ultracentrifugation 등의 과정을 사용하는 방법을 따르고 있다 [9]. 분산된 SWNT 현탁액(decant) 20 μL를 전극사이에 적용시킨 후 dielectrophoresis 방법을 이용하여 SWNT를 마이크로 전극사이에 정렬 및 침전시켰다 [10-12]. SWNT-based 센서를 제작하기 위해 사용된 dielectrophoresis 조건은 부하 전기장의 주파수가 10 MHz이고 peak to peak 전압(Vp-p)이 10 V이다.

3. 부분방전 검출기술 개발 (플라즈마 챔버)

본 연구에서는 일차적으로 측정 메커니즘을 확인하기 위하여, 플라즈마 상태에서 분해되는 SF_6 가스의 측정을 통해 부분방전 검출기술을 개발하였다. Fig. 1은 개발된 센서를 이용해 플라즈마 챔버에서 SF_6 가스의 변화를 검출하기 위해 구성된 실험장치의 개략도이다.

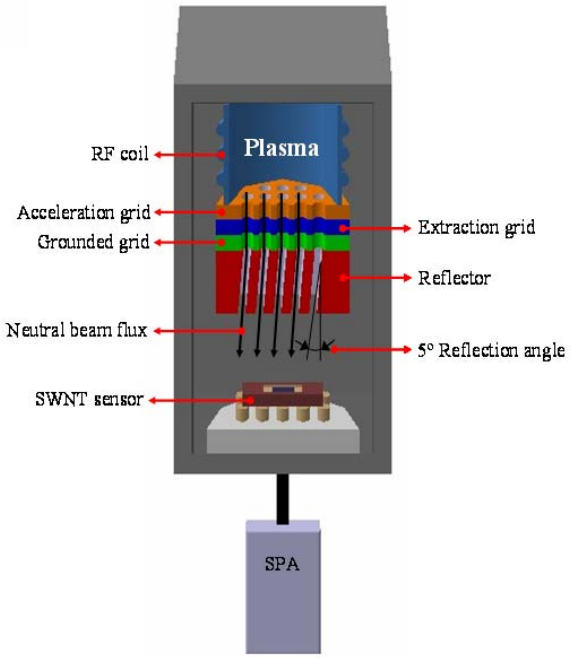

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental setup for radical detection in plasma chamber.

SF_6 가스는 플라즈마 상태에서 전자(e^-), 이온(SF_3^+, SF_5^+, SF_2^+, SF^+, F^+, S_2F^+, S^+, SF_6^-, SF_5^-, SF_4^-, etc.), 라디칼(SF_5, SF_3, SF, F, S, etc.) 및 안정화된 분자(SF_4, SF_2, F_2, etc.)등으로 분해되며, SF_3^+, SF_5^+, SF_2^+, SF^+ 이온, SF_5, SF_3, SF 라디칼 및 SF_2, F_2, 분자 등이 지배적으로 생성된다 [13-20]. 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 전자 및 이온의 영향을 최소화하고 라디칼이 나노튜브에 미치는 영향을 알아보기 위해 three-grid ion gun과 reflector로 구성된 low-angle forward-reflected neutral beam source [20]가 사용되었으며, gird 시스템에 의해서 ion gun로부터 센서 방향으로 방출되는 라디칼과 reflector로부터 30 cm 거리에 위치한 SWNT 센서의 반응을 측정 시스템을 이용하여 실시간으로 측정하였다.

4. SWNT-based 가스센서 검증 실험 (부분방전 챔버)

플라즈마 챔버에서 검증한 SF_6 가스 변화 검출기술을 실험용 SF_6 부분방전 챔버에 적용하여 부분방전에 대한 센서반응 검증실험을 수행하였다. 본 실험에서는 실험용 부분방전 챔버를 이용해 개발된 SWNT 센서를 부분방전에 노출시키면서 SWNT의 전도도 변화를 측정하였다. Fig. 2는 제작한 실험용 부분방전 챔버를 이용해 구성한 실험장치의 모습을 보여준다. 실험 장치는 NI PXI-1031을 이용해 센서의 전도도 변화를 측정하고 컴퓨터를 통해서 센서 전도도의 실시간 변화량을 확인할 수 있게 구성되었다.

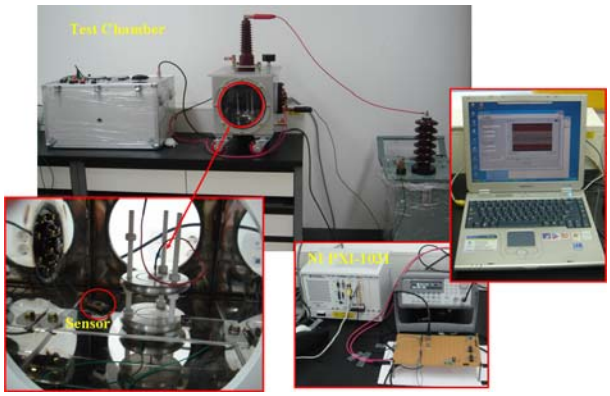

Fig. 2 Experimental setup for PD detection using test chamber.

5. 결론

본 논문에서는 SWNT-based 가스센서를 이용해 SF_6 GIS에서 발생되는 부분방전의 측정 가능성을 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 상용 PD 센서인 HAEFELY PD-DETECTOR를 이용하여 1.3 atm SF_6 가스 압력에서 인가전압 5.6 kV 의해 발생하는 부분방전량에 대한 SWNT-based 가스센서의 응답특성 비교연구를 통해 개발된 센서는 17 pC 이하의 부분방전량 측정이 가능함을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-061) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

1. Saito, R., Dresselhaus, G. and Dresselhaus, M. S., Physical Properties of Carbon Nanotubes, London, Imperial College Press, 1998.
2. Qi, P., Vermesh, O., Grecu, M., Javey, A., Wang, Q., Dai, H., Peng, S. and Cho, K. J., "Toward large arrays of multiplex functionalized carbon nanotube sensors for highly sensitive and selective molecular detection," Nano Lett., 3, 347-351, 2003.
3. Peng, S. and Cho, K. J., "Ab initio study of doped carbon nanotube sensors," Nano Lett., 3, 513-517, 2003.
4. Peng, S., Cho, K. J., Qi, P. and Dai, H., "Ab initio study of CNT NO_2 gas sensor," Chem. Phys. Lett., 387, 271-276, 2004.
5. Collins, P. G., Bradley, K., Ishigami, M. and Zettl, A., "Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes," Science, 287, 1801-1804, 2000.
6. Chopra, S., McGuire, K., Gothard, N., Rao, A. M. and Pham, A., "Selective gas detection using a carbon nanotube sensor," Appl. Phys. Lett., 83, 2280-2282, 2003.
7. Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C., Chapline, M. G., Peng, S., Cho, K. and Dai, H., "Nanotube molecular wires as chemical sensors," Science, 287, 622-625, 2000.
8. Suehiro, J. Zhou, G. and Hara, M., "Detection of partial discharge in SF6 gas using a carbon nanotube-based gas sensor," Sensors and Actuators B-Chemical, 105, 164-169, 2005.
9. O'Connell, M. J., Bachilo, S. M., Huffman, C. B., Moore, V. C., Strano, M. S., Haroz, E. H., Rialon, K. L., Boul, P. J., Noon, W. H., Kittrell, C., Ma, J., Hauge, R. H., Weisman, R. B. and Smalley, R. E., "Band gap fluorescence from individual single-walled carbon nanotubes," Science, 297, 593-596, 2002.
10. Krupke, R., Hennrich, F., Lohneysen, H. and Kappes, M. M., "Separation of metallic from semiconducting single-walled carbon nanotubes," Science, 301, 344-347, 2003.
11. Baik, S., Usrey, M., Rotkina, L. and Strano, M. S., "Using the selective functionalization of metallic single-walled carbon nanotubes to control dielectrophoretic mobility," J. Phys. Chem. B 108, 15560-15564, 2004.
12. Kim, Y., Hong, S., Jung, S, Strano, M. S., Choi, J. and Baik, S., "Dielectrophoresis of surface conductance modulated single-walled carbon nanotubes using catanionic surfactants," J. Phys. Chem. B, 110, 1541-1545, 2006.
13. Riccardi, C., Barni, R., De Colle, F. and Fontanesi, M., "Modeling and diagnostic of an SF6 RF plasma at low pressure," IEEE Trans. Plasma Sci., 28, 278-287, 2000.
14. Brand, K. P. and Jungblut, H., "The interaction potentials of SF6 ions in SF6 parent gas determined from mobility data," J. Chem. Phys., 78, 1999-2012, 1983.
15. Anderson, H. M., Merson, J. A. and Light, R. W., "A kinetic model for plasma etching in a SF6/O2 RF discharge," IEEE Trans. Plasma Sci., 14, 156-164, 1986.
16. Wagner, J. J. and Brandt, W. W., "DC plasma etching of silicon by SF6, mass spectroscopic study of the discharge products," Plasma Chem. Plasma Proc., 1, 201-215, 1981.
17. Foest, R., Olthoff, J. K., Van Brunt, R. J., Benck, E. C. and Roberts, J. R., "Optical and mass spectrometric investigations of ions and neutral species in SF6 radio-frequency discharges," Phys. Rev. B, 54, 1876-1887, 1996.
18. Turban, G., Coulon, J. F. and Mutsukura, N., "A mechanistic study of SF6 reactive ion etching of tungsten," Thin Solid Films, 176, 289-308, 1989.
19. Nagaseki, K., Kobayashi, H., Ishikawa, I., Nishimura, E., Saito, Y. and Suganomata, S., "Mass spectrometry of discharge products at 13.56 MHz in SF6 gas," Jpn. J. Appl. Phys., 33, 4348-4352, 1994.
20. Chung, M. J., Lee, D. H. and Yeom, G. Y., "Diagnostics of neutral species in the low-angle forward-reflected neutral beam etching system," Surf. Coat. Technol., 171, 231-236, 2003.