공간회로망법을 이용한 GIS 내부의 움직이는 도체이물질에 의한 불평등전계 해석

論 文
51C-2-3

Analysis of Unequal Electric Field by Moving Metal Particle in GIS Using SNM

朴 景 洙* · 崔 成 烈** · 高 榮 浩***
(Kyoung-Su Park · Sung-Youl Choi · Young-Ho Ko)

Abstract - In compared with air insulated switchgear, GIS has a high efficiency and confidence. Insulation method using SF_6 gas has a very excellent insulation characteristic for high voltage equipment but has a characteristic that insulation heredity is changed for internal unequal electric field. So analysis of time varying electromagnetic field in GIS is very important for structure design and trouble diagnosis process. In compared with established method, the SNM(Spatial Network Method) in this paper can observe variation of electromagnetic field with real time and get result very similar to measurement. In order to know variation of electromagnetic field distribution in fast moving particle, we make used of SNM.

Key Words : GIS, UHF, Spatial network method, Computational electromagnetic

1. 서 론

절연 소호 매체로 SF_6를 사용하는 GIS는 높은 절연내력을 가지므로 소형화가 가능하고 높은 신뢰도와 환경조화, 보수유지의 편리성등 다양한 장점을 가지고 있다. SF_6가스에 의한 절연방식은 고압의 절연장비에 매우 우수한 절연특성을 가지지만 내부의 불평등전계에 의하여 절연내력이 변화하는 특징을 가지고 있다. 전기적 부성기체인 SF_6가스 중의 방전은 기본적으로는 전극간에 걸리는 전계에 의해 가속되는 전자의 증배량에 의존한다. 따라서, GIS내부의 전자계의 분석은 GIS의 형상 설계 및 고장 진단 과정에 매우 중요한 기초자료이다.[1][2][3]

GIS의 가장 큰 고장 원인은 내부의 도체이물질(Metal Particle)로 알려져 있다. GIS의 도체(Conductor)와 외함(Enclosure) 사이는 주파수 60Hz에 따라 변화하는 전위차가 존재하기 때문에 내부의 도체이물질은 도체와 반대로 대전되게 된다. 이 때 발생한 도체와 도체이물질의 인력에 의한 힘이 중력에 의한 힘보다 커지게 되면 도체에서 외함으로 빠르게 이동하면서 부분방전(Partial Discharge)을 일으키게 된다. 또한 스페이서에 도체이물질이 붙어 있게되면 스페이서에 다른 부분보다 큰 불평등전계를 가하게 되는데, 이때, 유전체로 된 스페이서의 절연 내력이 감소하여 역시 부분방전을 일으키게 된다.[4][5][6]

GIS내의 도체이물질에 대한 거동해석에 대한 많은 연구가 어루어지고 있지만[7][8] 움직이는 도체이물질에 의한 불평등전계와 같이 이동하는 도체이물질에 대한 3차원 전자계 해석은 이루어지지 못하고 있다. GIS내의 도체이물질의 거동은 도체이물질의 형태, 부상 전계의 크기, 외함과의 접촉력, 충돌하는 부분의 형상 등에 영향을 받으므로 여러 가지 파라미터를 고려하여 대단히 복잡한 계산을 하여야 한다. 본 논문은 도체이물질의 거동에 의하여 변화하는 전자계를 해석하기 위한 것으로 도체이물질의 이동경로를 임의적으로 주었을 때 발생하는 전자계의 변화를 봄으로써 이동하는 도체이물질에 의한 불평등전계를 해석하고, 도체이물질에 의해 일어나는 전자계의 변화가 안테나 센서에 의해 어떻게 나올 것인지를 예측하였다.

본 논문에서는 GIS의 내부의 전자계 해석을 위하여 공간회로망법을 이용하였다.[9][10] 공간회로망법은 맥스웰 방정식을 차분화한 시간영역 수치해석 방법으로, 여기서 해석하려고 하는 GIS와 같이 과도현상이 특히 중요한 부분에 유용한 수치해석 방법이다.

2. 공간회로망법

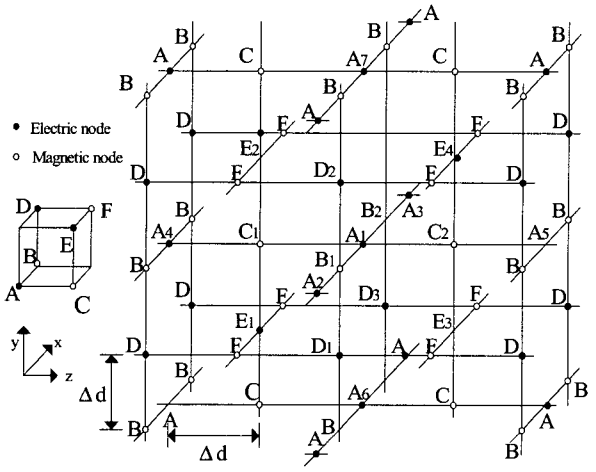
전자기파 수치해석에는 주파수영역에서의 해석방법인 유한요소법(Finite Element Method), 모멘트법(Moment Method)등이 있으며 시간영역에서의 해석방법에는 전송선로법(Transmission Line Method)[11], 시간영역 유한차분법(Finite Difference Time Domain)[12], 공간회로망법(Spatial Network Method)등이 있다.

주파수 영역 해석방법은 해석 구조에 의존적이고 광범위의 주파수 특성을 알고자 할 때 매번 반복계산을 해야 하는 단점이 있으나 공간회로망과 같은 시간영역해석법은 다양한 해석구조에 대한 모델링이 쉽고 간단히 프로그램 코드를 바꿔줌으로써 다양한 입력응답을 구할 수 있다. 또한 유전율이나 투자율, 도전율등의 해석 매질의 특성에 따른 모델링도 쉽게 할 수 있다. 시간에 대한 전자계의 변화를 눈으로 확인 할 수 있으므로 미리 해석매질에 대한 응답을 예측할 수 있고 해석구조에 대한 전자계의 메커니즘을 이해하기 쉽다. 시간에 대한 전자계의 변화는 보통 FFT(Fast Fourier

* 正 會 員 : (株)曉星 重工業研究所 研究員
** 正 會 員 : 全北大 工大 大學院 電子情報工學部 博士修了
*** 正 會 員 : 全北大 工大 電子情報工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2001年 07月 03日
最終完了 : 2001年 12月 17日

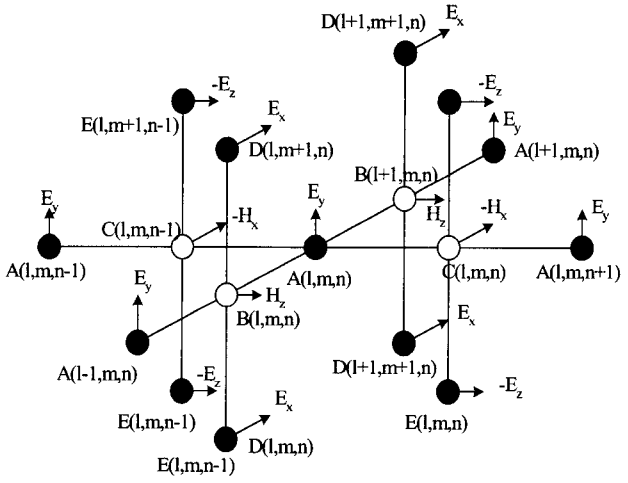
Transform)변환에 의해 주파수에 대한 변화로 변형되어 광대역의 응답을 구할 수 있다. 그러나 시간영역에서의 작은 오차는 주파수영역에서 큰 차이를 보이므로 정확한 알고리즘 적용을 필요로 한다.

3차원 공간에서의 각각의 이산점은 맥스웰방정식을 만족하여야 한다. 그림 1(a)는 3차원 입방격자망의 모습을 보여주고 있다. 공간회로망은 A,B,C,D,E,F의 6개의 절점으로 구성되는데 각각의 절점에서 맥스웰방정식과 대응된다. 공간회로망법에서의 등가회로는 3개의 이론에 따라 구성된다. 첫째, 이산점들 사이의 내부는 일차원이라고 가정한다. 둘째 모든 점은 전기와 자기전류의 연속적인 법칙이 성립한다. 그리고 마지막으로 매질조건은 집중정수소자로서 표현한다. 그림1(b)는 전기적 절점 A에서의 절점배치를 표시한 것으로 3차원에서 절점 A가 인접 절점인 절점 B와 절점 C의 관계를 표시하고 있다.



(a) 3차원 입방격자망

(a) Three dimensional cubic lattice



(b) 3차원 절점배치

(b) Thee dimensional node arrangement

그림 1 3차원 절점구조

Fig. 1 Three dimensional node structure

UHF법의 경우 1GHz근처의 주파수 대역을 이용하는데, 공간회로망법은 초고주파 회로해석, 안테나 파라미터 추출, EMI/EMC등 초고주파 대역의 전자기해석에 많이 이용되고 있으며 GIS의 기본구조 해석에 적용하여 그 특성을 고찰하였다.[13]

3. 움직이는 도체이물질에 의한 전자계 변화

3.1 도체이물질의 대전특성

GIS내부에 도체이물질이 존재하게 되면 GIS가 가동될 때 도체와 외함의 전위차에 의해 도체이물질이 대전되게 된다. 이때, 외함의 바닥에 있던 도체이물질은 중력보다 더 큰 전자계가 가해지면 외함에서 도체로 빠른 속도로 올라가 도체에 충격을 주면서 절연 파괴에 이르게 된다.

도체이물질은 그림2와 같이 도체와 가까운 곳은 도체와 반대방향으로 외함과 가까운 곳은 도체와 같은 극성으로 대전되게 되어 도체이물질의 주위에는 불평등전계가 만들어지게 된다. 이때 도체이물질은 GIS의 축방향으로는 같은 극성을 띄므로 전계의 크기가 큰 변화가 없으므로 불평등전계는 축방향의 도체이물질의 크기보다는 내부 도체방향으로의 크기에 크게 영향을 받게 된다.

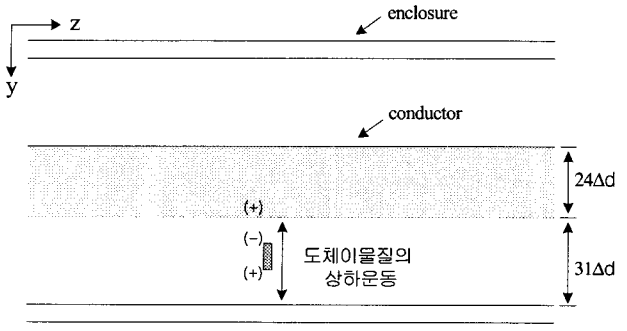


그림 2 대전된 도체이물질의 운동

Fig. 2 The motion of charged metal particle

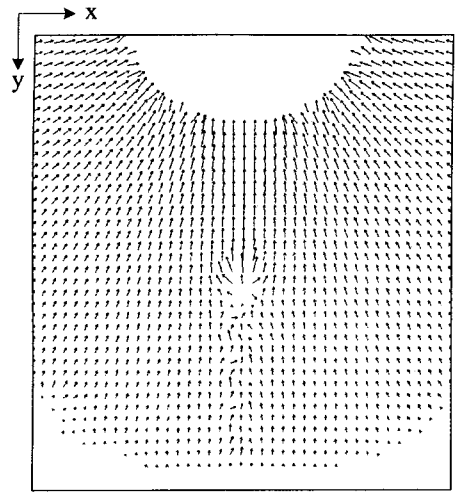
공간회로망법은 이동하는 도체이물질의 영향에 대한 전자계 해석을 간단히 도체경계조건을 변경함으로써 모의할 수 있다. 따라서, 도체이물질에 의한 GIS 내부의 전자계의 변화를 정지된 상태뿐만 아니라 이동중의 상태도 해석이 가능하다.

3.2 움직이는 도체이물질이 위치에 따른 전계분포

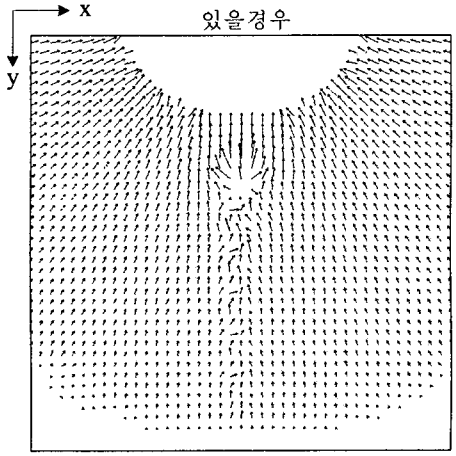
이동하는 도체이물질에 의한 전자계의 변화를 보기 위해 그림 2와 같이 5mm크기의 도체이물질을 외함의 밑부분에서 중앙의 도체까지 상하운동 시켰다. 그리고, 움직이는 도체이물질이 주는 불평등전계의 영향을 도체이물질이 상승하고 있을 때와 하강하고 있을 때로 나누어 전자계의 변화를 비교하였다. 이때 적용한 GIS 모델의 크기는 도체의 직경이 120mm, 외함의 직경은 434mm로 하였다.

3.2.1 도체이물질이 상승할 때

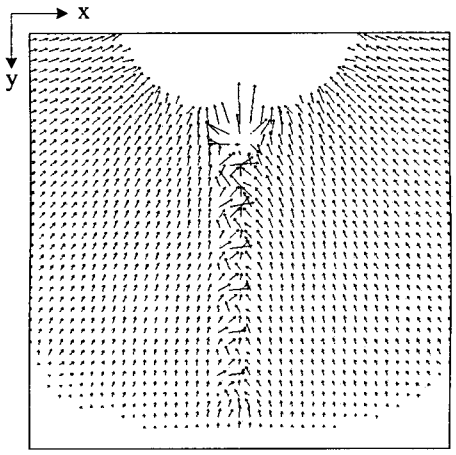
그림 3은 도체이물질이 있는 xy단면상의 전자계분포이다. 도체이물질이 상승하면서 도체이물질 주위에는 복잡한 전계의 산란현상이 일어나고 특히, 도체 근처에서 전계분포가 크게 변화함을 볼 수 있다.



(a) 도체이물질이 중심 부분에 있을경우



(b) 내부도체에 가까이 접근할때



(c) 내부도체에 근접했을 때

그림 3 도체이물질의 수직상승운동에 따른 전계벡터의 시간 변화

Fig. 3 Time variation of electric field vector by vertical ascent motion of metal particle

그림 4는 도체이물질이 있는 y방향의 경로에서의 전계분포로 좌측은 GIS의 윗부분이고 우측은 도체이물질이 이동하는 GIS의 아랫부분이다. 도체이물질이 없는 윗부분과 아랫부분에서 대조적인 전계분포가 명백하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 윗부분은 도체이물질이 없으므로 균일한 전자계의 분포를 가지지만 아랫부분은 도체이물질의 이동하는 경로에서 전자계의 분포가 불규칙으로 변화하고 있다. 그림 4는 초기값으로 1을 입력했을때의 전계의 크기를 표시한것으로 단위는 V/m이다.

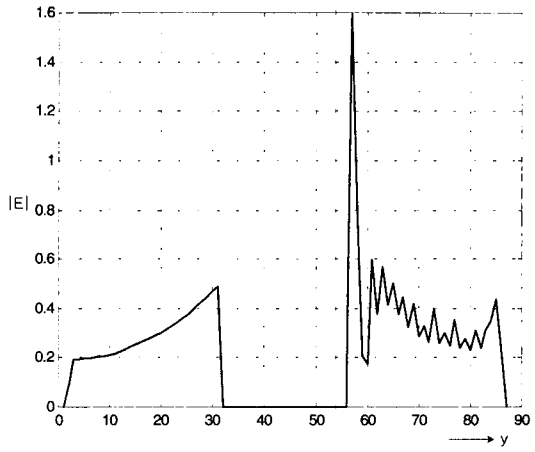
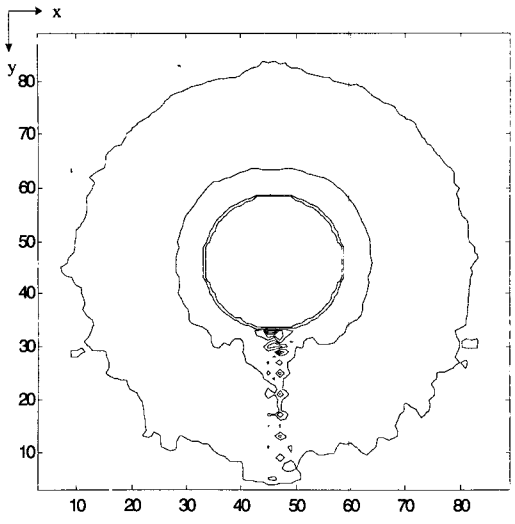


그림 4 움직이는 도체이물질 경로의 전계의 크기

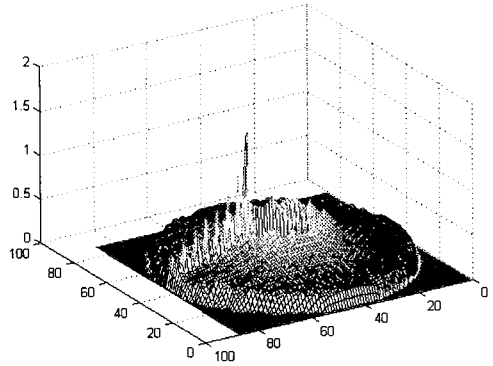
Fig. 4 Electric field intensity at path of moving metal particle

그림 4와 같이 도체에 근접한 지점의 값은 최대 1.5966으로, 반대편의 같은 위치의 값 0.4866보다 대략 3.3배만큼의 전자계 상승이 있음을 알 수 있다. 여기서 특이할 사항은 도체를 중심으로 인접한 두 점의 값의 차이를 보면 1.4223으로 다른 부분에서 비교적 완만하게 변화한 것과 비교할 때 훨씬 큰 불평등전계가 나타남을 알 수 있다.

그림 5의 (a)와 (b)는 도체이물질에 의한 전자계의 변화를 2차원 contour와 3차원 mesh로 표현한 것으로 전자계의 변화가 도체이물질의 이동경로를 따라 불규칙하게 큰 폭으로 변하고 있음을 잘 보여주고 있다.



(a) contour



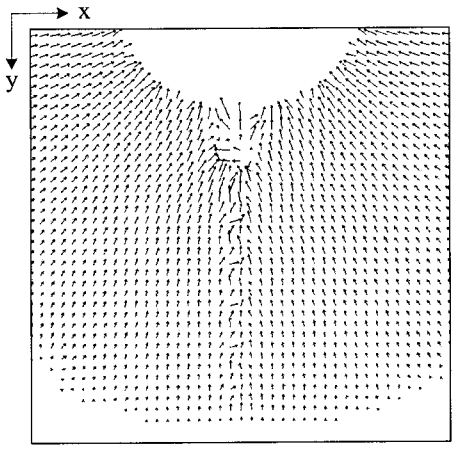
(b) mesh

그림 5 불평등전계 분포

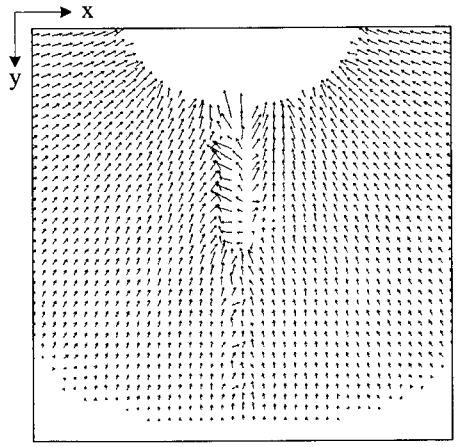
Fig. 5 Distribution of unequal electric field

3.2.2 도체이물질이 하강할 때

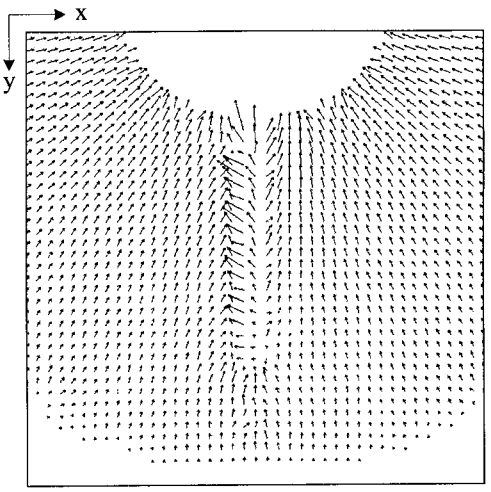
그림 6은 도체이물질이 상승하였다가 내려올 때의 전자계의 변화를 xy평면에서 본 것이다. 도체이물질이 내려오는 경로를 따라 전자계가 산란되어 복잡한 형태를 띄고 있다. 그림 3과 비교해보면 중심부분에서의 전계의 크기가 이동하는 도체이물질에 의해 더 커짐을 확인할 수 있다.



(c) 하강을 막 시작할때



(c) 중심까지 내려왔을때



(c) 외함 가까이까지 내려갔을때

그림 6 도체이물질의 수직하강운동에 따른 전계벡터의 시간변화

Fig. 6 Time variation of electric field vector by vertical descent motion of metal particle

그림 7은 GIS y방향의 도체이물질 이동 경로상의 전계분포를 보이고 있다. 그림 4와 같이 좌측은 균일한 전계를 우측은 불균일한 전계분포를 가지고 있다. 그림 7의 우측부분에 있는 도체이물질이 존재하는 영역을 보면 그림 4와 비교해 볼 때 중심의 최고값은 1.1213으로 작아졌지만 도체가 있는 중간부분의 전계가 더 커졌다. 불평등전계의 크기는 최대인 점과 최소인 점을 비교해보면 0.9077이다. 하강하는 도체이물질에 의해 전계의 최고 값은 작아졌지만, 중간부분에서는 전보다 훨씬 큰 전계값을 가진다.

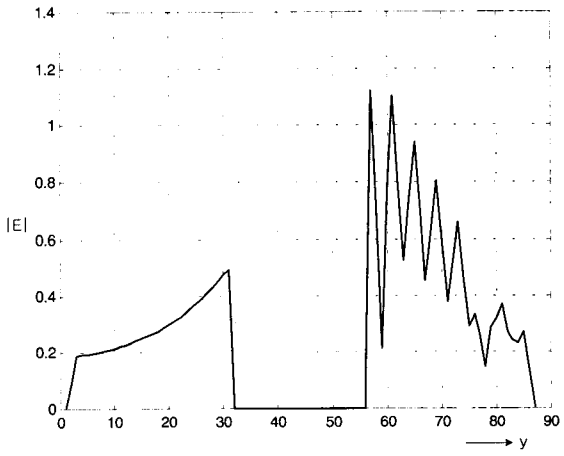


그림 7 전계의 크기

Fig. 7 Electric Field Intensity

3.2.3 도체이물질에 의한 출력단의 전계변화

80 Δt동안 1 Δd를 이동하는 속도로 도체이물질을 외함에서 내부도체로 이동시키면, 도체 주위에 발생된 불평등전계에 의하여 도체에서 상당히 떨어진 지점에 그림 8과 같은

전계의 변화가 일어나게 된다. 이것은 펄스의 형태를 가지면서 GIS내부를 전파하게되는데 이 펄스는 GIS에 설치된 안테나 센서에 의해 검출이 가능하다.

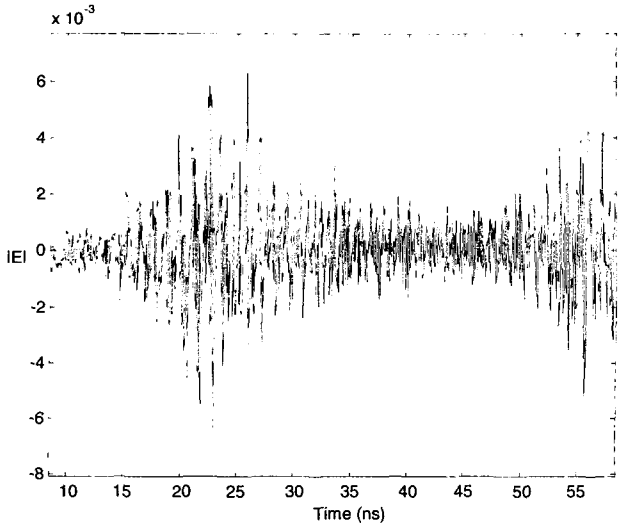


그림 8 전계의 시간변화

Fig. 8 Time variation of electric field

그림 9는 그림 8의 파형에 대한 주파수 분석 결과이다. 움직이는 도체이물질에 의해 발생하는 펄스의 주파수 특성은 800MHz 부근에서 가장 많은 주파수 성분을 가지고 있다. 이것은 참고문헌[14][15]에서 실측한 움직이는 도체이물질의 주파수 분석결과와 유사함을 확인하였다.

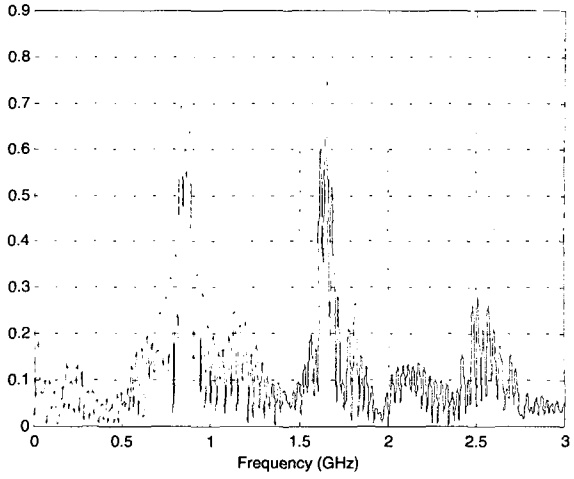


그림 9 주파수 특성

Fig. 9 Frequency property

4. 결 론

GIS내에 움직이는 도체이물질이 존재할 때 GIS내부에서 전자계가 어떻게 변화하는가를 공간회로망법을 이용해 시뮬레이션 하였다. 도체이물질은 외함에서 내부도체로 갈수록 주위에 더 큰 불평등전계를 주는데 이동경로상의 전자계가 불규칙하게 커짐으로 해서 그 경로를 따라 절연파괴가 일어날 가능성이 훨씬 커짐을 알 수 있었다. 움직이는 도체이물질에 의한 전계는 상승하면서 도체에 인접할 때 가장 큰 불평등 전계를 주며 이후 하강할 때에는 중심부분의 전계의 크기를 비약적으로 상승시킨다. 움직이는 도체이물질에 의해 발생된 전자계의 변화는 펄스의 형태를 띄며 GIS내를 전파하게 되는데 이것은 UHF 안테나 센서에 의해 검출이 가능하다. 이 검출된 신호를 예측하고 주파수 특성을 비교함으로써 실제의 데이터와 유사한 주파수 특성을 얻을 수 있었다. GIS 내부는 매우 복잡한 구조를 이루며 수많은 잡음에 노출되어 있기 때문에 시뮬레이션 결과와 실측치와의 구체적인 비교가 어려웠다. 하지만, 일반적으로 도체이물질에 의해 발생되는 주파수 특성을 만족하였고, 뚜렷한 불평등전계의 특성을 관찰할 수 있었다.

공간회로망법을 이용하면 기존의 해석법에 비하여 간단하게 3차원에서 이동하는 도체이물질에 대한 전자계의 해석을 할 수 있다. 또한, 시간영역 수치해석법이므로 시간적으로 변화하는 전자계를 실시간적으로 관찰할 수 있어 복잡한 GIS에서의 전파특성과 응답을 예측하기 쉽다. 여러 가지 매질의 도체이물질과 다양한 경로에 대한 전자계의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 예측할 수 있다면 UHF법을 적용할 때 도체이물질의 위형을 판단하고 위험 정도를 진단하는데 유용할 것이다.

본 논문의 모든 데이터는 공간회로망법을 이용해 C/C++을 이용해 코딩하여 얻었으며 수행속도와 메모리의 문제를 극복하기 위해 전북대학교의 슈퍼컴퓨터(IBM RS6000-SP 9076-550, 최고속도:51.2GFlops)를 이용하였다.

감사의글

본 연구는 전북대학교 부설 공학연구원 전자정보신기술연구센터 지원에 의해 수행되었으며, 이에 진심으로 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] M.D.Judd, O.Farish, B.F.Hampton, "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS", *IEEE Trans. dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 3, No. 2, April 1996.

[2] K. Mizuno, A.Ogawa, K.Nojima, "Investigation of PD Pulse propagation characteristics in GIS", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 12, No2, pp. 1022-1030, May 1997.

[3] Hiroshi Imagawa, Kunio Emoto, "Simplified Simulation Method for Partial Discharge Phenomena in GIS", IEEE proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference-volume 2, 534-540, 1999.

[4] K.Masaki, T.Sakakibara, H.Murase, M.Akazaki, K.Uehara, S.Menju, "On-site measurement for the development of on-line partial discharge monitoring

system in GIS", IEEE trans. Power Delivery, Vol.9, No.2, April 1994

[5] Sander Meijer, Andrea Bovis, Edward Gulski, Johan J. Smit, Alain Girodet, "Analysis of the Sensitivity of the UHF PD Measuring Technique", *IEEE* Electrical Insulation Conference, Anaheim, CA USA, 395-399, April 2-5, 2000

[6] J.S.Pearson, B.F.Hampton, A.G.Sellars, "A Continuous UHF Monitor for Gas-insulate Substations", *IEEE* trnas. Electrical Insulation, Vol. 26, No.3, June 1991

[7] M.M.Morcos, S.A.Ward, H.Anis, K.D.Srivastava, S.M.Gubanski, "Insulation Integrity of GIS/GITL Systems and Management of Particle Contamination", *IEEE* Electrical Insulation Magazine, Vol.16, No.5, 25-37, September/October, 2000

[8] R.Kurrer, K.Feser, "Attenuation Measurements of Ultra-High-Frequency Partial Discharge Signals in Gas-Insulated Substations", CIGRE 25-29, 1997, Montreal, Quebec, Canada

[9] N. Yoshida and I. Fukai "Transient Analysis of a Stripline Having a Corner in Three-Dimensional Space", *IEEE Trans. MTT.*, Vol. MTT-32, No. 5, pp.491-498, May 1984.

[10] Y. H. Ko, N. Yosida, I. Fukai, "Three-Dimensional Analysis of a Cylindrical Waveguide Converter for Circular Polarization by the Spatial Network Method", *IEEE trans MTT.*, Vol. 38, No. 7, pp.912-918, JULY 1990.

[11] Wolfgang J.R.. Hoefer, "The Transmission-line Matrix Method - Theory and Application", IEEE Trans. MTT., vol. MTT-33, No. 10, Oct 1985

[12] Kane S. Yee, "Numerical Solution of Initial boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", *IEEE Trans. AP.*, pp.302-307, May 1966.

[13] 고영호, "공간회로망법을 이용한 GIS내부의 펄스 전파 특성해석", 대한전기학회 논문지 제50권 제1호, 1월, 2001.

[14] R. Feger, K. Feser, C. Neumann, V. Rees, "Non-Conventional UHF sensors for PD measurements on GIS of different designs", IEEE PowerCon 2000 Conference, Perth, Australia, Dec. 4-7, 2000, 1395-1400

[15] W.buesch, H.P.Dambach, T.Aschwanden, M.Haessig, P.Hadorn, T.Heizmann, "Application of Partial Discharge Diagnostics in GIS at on-site commissioning tests", CIGRE 15-104 1998 Session, Paris

저 자 소 개

박 경 수 (朴 景 洙)
1974년 4월 10일 생
1999년 2월 전북대 전기공학과 졸업
2001년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
2001년 1월~현재 (주)효성 중공업연구소 창원분소 연구원
Tel : 055-268-9917
Fax : 055-268-9928
E-mail : ksp@hyosung.com

최 성 열 (崔 成 烈)
1971년 4월 7일 생
1997년 2월 전북대 전기공학과 졸업
1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 063-270-2390
Fax : 063-270-2394
E-mail : mrwave@moak.chonbuk.ac.kr

고 영 호 (高 榮 浩)
1981년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 일본 북해도대학 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1992년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 전자정보공학부 부교수
관심분야 : 전자계 해석, 안테나 해석 및 설계
Tel : 063-270-2390
Fax : 063-270-2394
E-mail : koyh@moak.chonbuk.ac.kr