

GIS PD검출을 위한 초광대역 UHF 커플러의 비교 연구

이상화, 최재구, 김광화
한국전기연구원

A comparative study on UWB UHF couplers for GIS PD detection

S.H.Yi, J.G.Choi, K.H.Kim
KERI

Abstract - 가스절연개폐장치(Gas-Insulated Switchgear, GIS) 내부에서 발생하는 부분방전(Partial Discharge, PD) 신호는 1ns이하의 상승시간(rising time)을 가지므로, 이 신호를 효과적으로 측정하기 위해서는 초광대역(Ultra Wide Band, UWB)특성을 갖는 커플러가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 UWB 특성을 구현하기 위해, 대수주기 톱니형 평면 안테나(log-periodic toothed planar antenna)와 등각 스파이럴 패치안테나(equi-angular spiral patch antenna)형태의 두 가지 초광대역 UHF 커플러를 설계 제작하였다. 제작한 커플러들의 특성을 파악하기 위해 안테나의 급전부에, 자체 설계한 매칭 회로인 발룬(balun, balance to unbalance)을 장착하여, 반사계수, 모의펄스에 의한 검출신호, 스펙트럼 등을 측정하였다.

1. 서 론

가스절연 개폐장치(GIS)는 SF₆ 가스로 절연되어 있는 밀폐형이므로 육안점검이 불가능하고 고장발생시 복구에 장시간 및 고비용이 소요된다. 그래서 GIS의 내부 상태를 확인하기 위해 여러 가지 진단기술이 발전해 왔다. 특히 GIS의 절연이 열화 될 때 나타나는 전조현상인 부분방전을 검출하기 위해 빛, 음파, 진동 그리고 전파를 측정하는 기법들이 많이 이용되었다[1]. 이 중 전파를 검출하는 UHF법은 매우 유용한 방법 중 하나이다. UHF법을 이용한 진단 시스템에서 커플러는 특히 중요한 요소로, 1ns이하의 빠른 상승시간을 가지는 부분방전 펄스를 검출하기 위해서는 수백 MHz에서 수 GHz까지의 대역폭에서 동작해야 한다[2,3].

본 논문에서는 GIS부분방전 측정용 초광대역 커플러로, 평면형 대수주기 톱니형 평면 안테나와 등각 스파이럴 패치 안테나를 제안하였다. 설계, 제작한 두 가지 커플러의 성능은 반사계수, 모의 펄스 입력에 의한 검출신호, 스펙트럼을 측정하여 확인, 비교 하였다.

2. 본 론

2.1 안테나 이론에 의한 커플러 설계

2.1.1 대수주기 톱니형 평면 안테나

대수주기 안테나는 주파수의 대수주기에 따라 임피던스와 방사특성이 반복되는 구조를 갖고 있고, 주파수 독립 특성을 지니는 안테나 (frequency-independent antenna)로 취급된다. 대부분의 주파수 독립특성 안테나의 연구는 1950년대 후반부터 1960대 까지 University of Illinois에서 이루어졌다[4]. 이중 대표적인 것이 대수주기 톱니형 평면 안테나(log-periodic toothed planar antenna)이다. 이것은 톱니를 쌍원추형 안테나(bi-conical antenna)의 평면형인, 보우-타이 안테나(bow-tie antenna)와 흡사하다. 톱니는 보우-타이 구조의 안테나의 표면전류를 분산시키는 역할을 하여, 더욱

광대역 특성을 갖게 만든다.

그림 1의 구조에서 톱니 주기 간의 거리는 다음과 같은 상수 scale factor τ 로 주어진다.

$$\tau = R_n/R_{n+1} \tag{1}$$

슬롯의 폭은 다음과 같으며,

$$\sigma = \tau_n/R_{n+1} \tag{2}$$

이 관계는 모든 n에 대하여 성립한다. τ 는 구조의 주기를 나타내므로, 주기적인 전기적 길이에 대하여 안테나의 방사패턴과 임피던스 특성이 동일함을 예상 할 수 있다. 다시 말해, 만약 f_n 과 f_{n+1} 이 다음과 같은 관계의 인접한 주파수라면,

$$\frac{f_n}{f_{n+1}} = \tau \tag{3}$$

매 주기의 주파수에서 동일한 동작 특성을 나타내는 것이다.

안테나의 구조에 있어서 자기보완(self-complementary) 특성이란, 안테나의 금속부분과 슬롯 부분이 동일한 모양일 때, Babinet's principle에 의해, 안테나가 주파수 독립적인 특성을 나타내는 성질로, 초광대역 안테나의 중요한 설계 조건 중 하나이다[5]. 만약 대수주기 안테나가 자기보완 특성을 갖도록 설계한다면, 톱니의 크기는, $\alpha=135^\circ$, $\beta=45^\circ$ 가 될 것이고, 슬롯의 폭(σ)와 톱날의 간격($r_n - R_n$)이 같아야 하므로, (1),(2) 두 식으로부터 다음 식(4)와 같은 조건이 만족해야 한다.

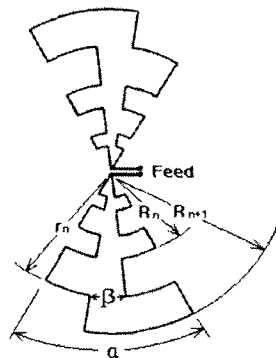


그림 1. 대수주기 톱니형 평면 안테나

$$\sigma = \sqrt{\tau} \quad (4)$$

2.1.2 등각 스파이럴 패치 안테나

스파이럴 안테나는 보통 자기 보안 특성을 적용하여 만들어지고, 최대 40:1의 극히 넓은 광대역 특성을 가질 뿐 아니라 [6] 회로 인쇄 기술의 발달 의해 패치 안테나 형태로 쉽게 제작이 가능하다. 일반적으로, 등각 스파이럴 안테나의 커브는 아래 수식을 따른다.

$$r = r_0 e^{a\phi} \quad (5)$$

여기서, r_0 는 $\Psi=0$ 일 때의 반지름이고, a 는 안테나의 확산 비(flare rate)를 조절하는 상수이다. 이 등각 스파이럴 커브는 그림 2의 안테나를 만드는 데 이용된다. 자기 보안 구조로 설계하기 위해 (5)의 커브를 정확히 90°씩 회전한 4개의 커브로, 그림 2의 스파이럴을 구성한다. 이때, ϵ 를 안테나의 팔이 한바퀴 돌 동안의 반지름 증가량이라고 하면, 확산 비 a 와 ϵ 의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{r(\phi+2\pi)}{r(\phi)} = \frac{r_0 e^{a(\phi+2\pi)}}{r_0 e^{a\phi}} = e^{2a\pi} \quad (6)$$

최고 동작 주파수 f_u 는 급전 구조에 의해 결정된다. 바로 안테나의 최단 둘레 $2\pi r_0$ 가 f_u 의 파장에 해당하는 길이이다. 즉,

$$2\pi r_0 = \lambda_u = \frac{c}{f_u} \quad (7)$$

를 만족한다. 동일하게 최저 동작 주파수는 안테나의 전체 반지름 R 에 의해 결정된다.

$$C = 2\pi R = \lambda_L \quad (8)$$

2.2 초광대역 UHF 커플러 제작 및 특성 실험

두 가지 초광대역 커플러 모두 500MHz ~ 2GHz의 동작 주파수를 갖도록, 기술한 설계 조건에 따라 제작하였다. 대수주기 안테나는 그림 3과 같이 유전체 위에 도체를 붙이는 형태로 제작하였고, 스파이럴 안테나는 그림 4와 같이 유전율이 낮은 고주파 회로기판 (RT/Duro id 2880)을 식각하여 제작하였다. 대수주기 튜니형 평면 안테나와 등각 스파이럴 안테나는 둘 다 균형 잡힌(bala

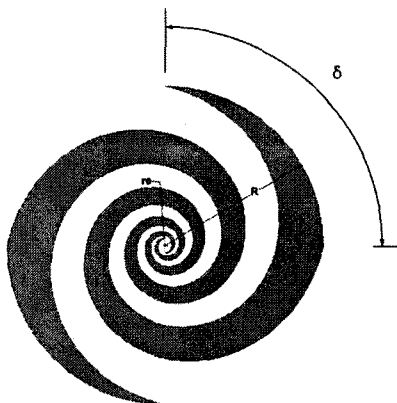


그림 2. 등각 스파이럴 안테나

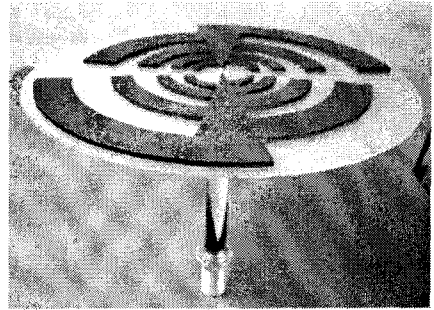


그림 3. 대수주기 커플러의 제작된 모습

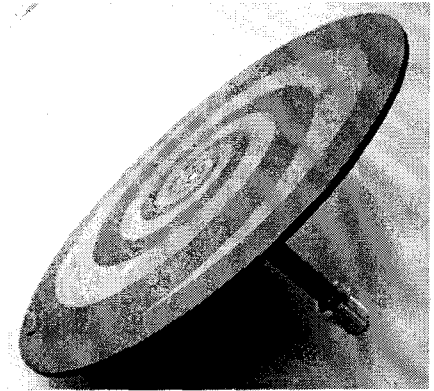


그림 4. 스파이럴 커플러의 제작된 모습

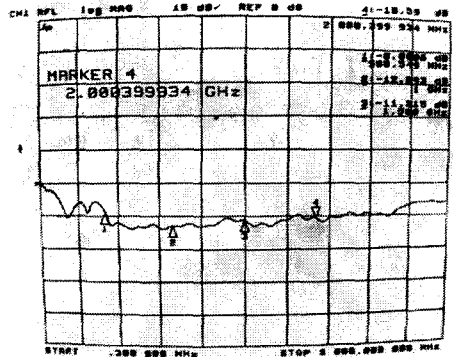


그림 5. 대수주기 커플러의 S_{11}

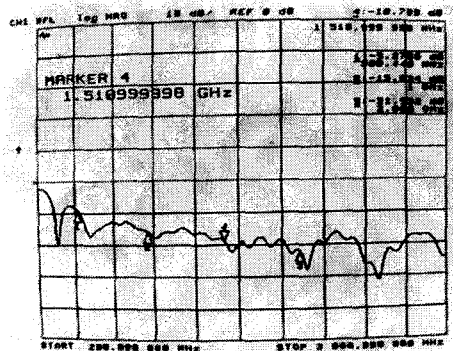


그림 6. 스파이럴 커플러의 S_{11}

nced) 구조의 초광대역 안테나이지만, 일반적인 동축 급전선은 균형 잡히지 않은(unbalanced)구조이다. 그러므로 이 둘 사이의 매칭을 위하여 커플러의 급전부에 발룬(balun)이 반드시 들어가야 한다. 기존의 테이퍼(tapered)형태의 발룬을 보완하여 자체 제작한 발룬을, 두 가지 초광대역 커플러 모두에 장착하여 특성을 파악하였다.

그림 5 와 그림 6 은 네트워크 분석기(HP, 8753D)를 이용하여 측정된, 두 가지 초광대역 커플러의 주파수에 따른 S_{11} 값이다. 설계한 대로 500MHz ~ 2GHz의 넓은 주파수 대역에서 -10dB이하의 값을 나타내고 있다. 덧붙여, 두 커플러 끼리의 결과를 비교해보면, 1GHz 이상의 고주파 대역에서는 스파이럴 커플러의 경우 -15dB이하의 값을 보여 대수주기보다 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 제안된 커플러들의 GIS내부에서 검출특성을 확인하기 위한 실험은 362kV GIB(Gas-Insulated Bus)를 통해 그림 7 과 같이 수행되었다. 그림 7 에서 펄스발생기는 500ps의 상승시간을 가지는 펄스를 GIB로 방출한다. 커플러는 Hole 1 관측창에 취부되며, 커플러를 통해 검출된 신호는 오실로스코프(Lecroy, wavePro960)와 스펙트럼 분석기(Adventest, R3131A, 9kHz 3GHz)를 이용해 해석된다.

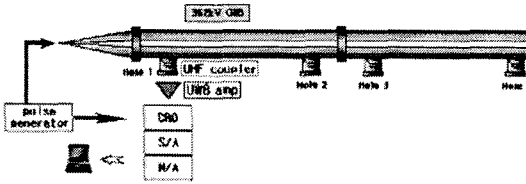


그림 7. GIS PD 검출용 커플러의 검출특성실험 장치도

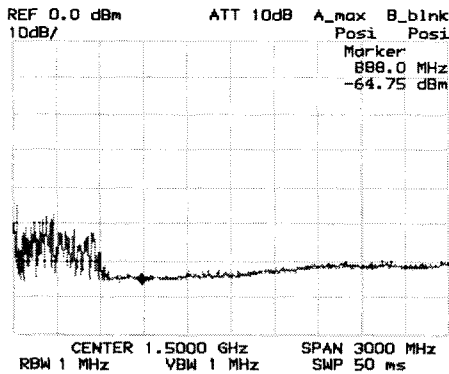


그림 8. 500pC 입력시, 대수주기 커플러에 의한 스펙트럼

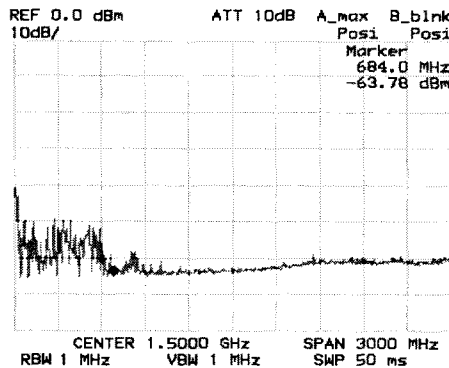


그림 9. 500pC 입력시, 스파이럴 커플러에 의한 스펙트럼

그림 8 과 그림 9 는 500pC의 전하량을 갖는 모의펄스를 GIB로 방출 한 후 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이다. 두 결과를 비교해 보면, 600MHz 이상의 고주파 대역에서의 스펙트럼 출력이 스파이럴 커플러의 경우가 조금 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 앞의 S_{11} 특성과도 일치하는 결과이다. 스펙트럼 신호의 측정 결과에서 1GHz이상의 성분이 잘 잡히지 않은 것은, GIB와 스페이서를 통과하는 동안 감소하거나 외부로 방출되는 전자파의 고주파 성분이 저주파 성분 보다 많기 때문이라 생각된다. 그림 10과 그림 11은 각각 대수주기 커플러와 스파이럴 커플러를 취부하고, 동일한 100pC의 모의 펄스를 입력 하여 측정된 오실로스코프 검출 파형이다. 그림 9의 스파이럴 커플러 파형이 그림 8의 대수주기 커플러 파형 보다 조금 더 날카로운 것으로 보아 스파이럴 커플러가 고주파성분을 더 잘 잡아냄을 확인 할 수 있다. 그림 12 는 여러 가지 입력전하량에 따라 출력신호의 피크값을 측정된 결과이다. 두 가지 커플러 모두 입력 전하량에 따라 출력 전압이 선형적으로 변하고 있으며, 스파이럴 커플러가 대수주기 커플러보다 조금 더 우수한 출력을 보였다.

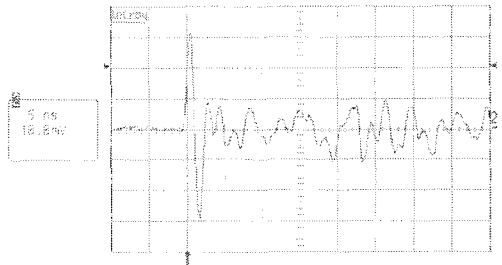


그림 10. 100pC 입력시, 대수주기 커플러에 의한 검출파형

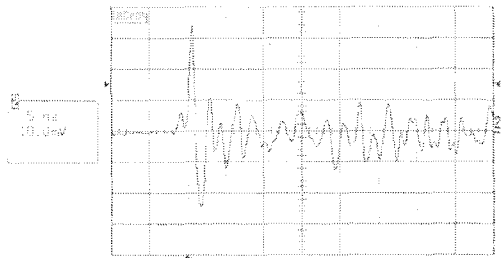


그림 11. 100pC 입력시, 스파이럴 커플러에 의한 검출파형

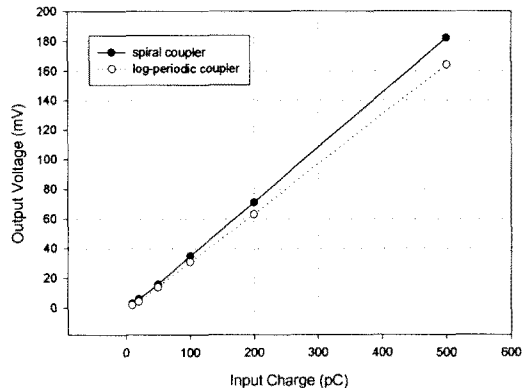


그림 12. 입력 전하량에 따른 검출파형의 피크값 분포

3. 결 론

본 논문에서는 GIS 부분방전 측정용 초광대역 커플러로서, 평면형 대수주기 안테나와 등각 스파이럴 패치 안테나를 제안하여 설계 제작하고, 두 가지 커플러의 성능을 실험을 통하여 비교 하였다. 제안한 두 커플러 모두 500MHz ~ 2GHz 대역에서 10dB이상의 반사계수를 만족하였고, 특히 스파이럴 안테나의 경우 1GHz이상의 대역에서는 15dB이상의 반사계수를 만족하였다. GIS내부의 검출 특성 실험에서 두 커플러 모두 만족할 만한 파형과 스펙트럼을 보여 주었고, 입력 전하량에 따른 검출파의 크기 또한 둘 다 선형적으로 증가하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Baumgather, "Partial Discharge-PartX:PD in GIS-measurements and Practical Considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 1, pp. 16-26, 1992.
- [2] M. D. Judd, "Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.2, No. 5, pp.892-905, 1995.
- [3] J. S. Pearson, B. F. Hampton and A. G. Sellars, "A Continuous UHF Monitoring for Gas-insulated Substations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 3, pp. 469-478, 1991.
- [4] R. H. DuHammel and D. E. Isbell, "Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures", IRE Intern. Conv. Record, pp.119-128, 1957.
- [5] Y. Mushiaki, "Slef-Complementary Antennas", Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [6] W.L. Stutzman and G.A. Thiele, "Antenna Theory and Design 2nd Edition", Canada, John Wiley & Sons, 1982.