

매우 짧은 전자기 펄스 수신을 위한 저항성 모노폴 센서의 특성 분석

°최용호 · 전상재 · 전광진 · 박의준
 `국립금오공과대학교 전자공학부

Analysis of Characteristics of Resistive Monopole Sensors for Receiving Very Short Electromagnetic Pulses

Yong Ho Choi · Sang Jae Jun · Kwang Jin Jeon · Eui Joon Park
 School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Abstract

In order to detect very short electromagnetic pulses (EMP) with picosecond width, a receiving antenna with a wide bandwidth and good sensitivity over several GHz is needed. In this paper, the receiving characteristics of various thin wire monopole (or dipole) antennas with nonreflecting resistive loading are analyzed for determining the optimum configurations. This study also indicates that it is possible to choose an ideal load impedance for achieving the required fidelity and sensitivity. The analysis is facilitated by introducing the frequency transfer function.

Keywords : Resistive Antennas, Electromagnetic Pulse, Monopole Sensors

I. 서론

이상적인 경우 안테나의 길이가 무한히 길면 주파수에 독립적이 되어 무 왜곡 펄스 송, 수신이 가능하지만 유한한 길이의 안테나의 경우는 단부에서의 반사파를 가능한 한 억압시킬 필요가 있다. 또한 소형화시킬수록 공진에 의한 주파수 의존성을 줄일 수 있는 반면 감도 (sensitivity)가 감소하는 단점을 가진다. 따라서 안테나 크기와 양호도 (fidelity) 및 감도 등의 적절한 타협이 이루어야 하며 그 최적의 타협점은 안테나 상에 저항을 적절히 분포시키는 방법으로 찾을 수 있다. 안테나 상의 내부 반사를 줄이기 위한 방법으로서 1961년 Altshuler^[1]는 최초로 이산적인 저항을 다이폴의 단부에서부터 $\lambda/4$ 지점에 부착하여 진행파 안테나를 구현하였으나 펄스안테나의 광대역 특성은 만족시키지 못하였다. 펄스안테나의 조건으로서는 안테나 상의 반사신호

피크치가 인가 신호의 40 dB 이하를 만족시키는 범위를 대개 정하고 있다. 1965년 Wu와 King^[2]은 다이폴 안테나 상에 저항을 연속적으로 분포시키는 방법을 제시하였으며, 오늘날 WK 프로파일로 알려지면서 많이 응용되고 있다. WK 프로필을 기초로 하여 분포저항 장하 안테나에 관한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 오늘날의 장하 방법으로서의 얇은 유전체 sheet에 저항성 필름 혹은 금속 합금의 폭을 가변시켜 침전시키는 방법^[3]과, 연속적인 분포저항 프로필을 이산적으로 근사화시켜 서로 다른 값을 갖는 일정한 길이의 저항 필름을 이산적으로 분포시키는 방법^[4] 등이 있다. 본 연구에서는 수 ps 해당하는 짧은 펄스를 수신할 수 있는 저항성 와이어 안테나들, 즉 Straight형, V-형, L-형, 계단형, 루프형 안테나들의 펄스 수신 특성을 비교 분석하고 양호도와 감도를 고려하여 최적의 안테나의 형상을 도출한다.

II. 시간 영역 해석

1990년 Shen^[5] 등은 상승시간 56 ps 와 펄스폭 66 ps (14 GHz 대역폭)를 갖는 가우산 펄스 신호에 대해 도체 선형 모노폴에 비해 도체 V-형 모노폴의 감도가 같은 대역폭에서 약 8배가 됨을 근사화된 시간영역 해석에서 보인 바가 있다. 이는 형상 변형을 통한 대역폭이 향상된 예이다. 이 때 안테나의 단부에서의 반사파에 의해 대역폭에 한계를 가지므로 ps 신호에 대해 분포저항을 장하시킨 V-형, L-형, 계단형, 루프 안테나의 수신 특성을 수치해석(모멘트법)에 입각하여 분석해 보았다. 전류의 기저함수 및 무게함수를 펄스함수로 두었다. 기저함수의 계수를 I_n 으로 두고, 전압행렬을 V_m 이라 두면, 일반화 된 임피던스 행렬은 $[Z_{mn}][I_n]=[V_m]$ 표현될 수 있다. 분할된 와이어의 n 번째 조각과 $(n+1)$ 번째 조각 사이에 R_n 의 집중저항 소자가 장하되어 있다면 이 저항에 의해 전압 강하가 발생할 것이므로 $[Z'_{mn}][I_n]=[V_m]$ 으로 수정되어지며, 여기서 $m=n$ 일 때 $Z'_{mn}=Z_{mn}+R_m$, $m \neq n$ 일 때 $Z'_{mn}=Z_{mn}$ 으로 둘 수 있다. 분포저항으로 장하될 경우 각 구간에서의 분포저항 $R(\Delta s_n)$ 은 일정하지만 분할 개수를 크게 하면(본 연구에서는 $N=80$) 저항이 거의 연속적으로 분포된 것으로 간주할 수 있으며, 이 분포저항에 의해 각 구간에서의 전압 강하가 발생함으로써 집중저항 소자를 고려한 모멘트법과 동일한 형태로 취급할 수 있다.

전자기파 수신용 L형 혹은 직선형 다이폴 안테나^{[6],[7]}의 경우 입사하는 전장은 안테나의 방향과 같은 방향으로 안테나의 각 segment에 동시에 도달하게 된다. 하지만, V-형^{[6],[8],[9]}, 계단형^[9] 및 루프 안테나^[10]의 경우는 도래하는 방향으로 안테나가 굽어져 있으므로 입사하는 전장은 안테나의 각 segment에 각각 다른 시간에서 도달하게 된다. 따라서 안테나의 단부에 가까울수록 더 이른 시간에 전장이 도달하게 되고, 시간지연은 곧 각 segment에서의 위상 지연을 의미한다. 시간 지연을 고려해서 안테나상의 접선 방향으로 인가되는 전장을 V-형 안테나인 경우는 다음과 같이 된다.

$$E(t, l) = \sin \theta E^i(t + \frac{l \cos \theta}{c}) \quad (1)$$

여기서 \bar{E} 를 가우산 평면파로 가정하면 다음과 같은 푸리에 변환쌍으로 표현된다.

$$\bar{E}^i(t, l) = \exp(-g^2(t - t_d - \frac{l \cdot \hat{n}}{c})^2) \hat{z} \quad (2)$$

$$\leftrightarrow \bar{E}^i(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}}{g} \exp(-\frac{\omega^2}{4g^2}) \exp(-j(t_d + \frac{l \cdot \hat{n}}{c}) \omega) \hat{z} \quad (3)$$

여기서, t_d 는 가우산 펄스가 갖는 time delay의 기준 시간인데, 이 항은 와이어가 꺾였을 때의 각 segment에 도달하는 시간 지연을 고려한 항이다. 그리고, \hat{n} 은 입사파의 도래방향 단위벡터, $\tau=2/g$ 는 3dB 펄스폭을 의미한다. 루프 안테나인 경우도 같은 방법으로 표현된다. 각 segment에 여기되는 전압을 계산하고 모멘트법을 사용하여 급전부 전압을 계산한 후 IDFT를 수행하여 시간영역 수신 파형 해석을 하였다.

그리고, 안테나 단부에서의 주파수 의존성 반사파를 최대로 억압 시키기 위해 아래와 같은 방법으로 안테나에 분포저항을 장하 시켰다. s 방향으로 놓인 모노폴 안테나의 한 변의 길이를 L , 모노폴의 반경을 a 라고 하면 WK 프로필에 의해 단위길이당 분포저항 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

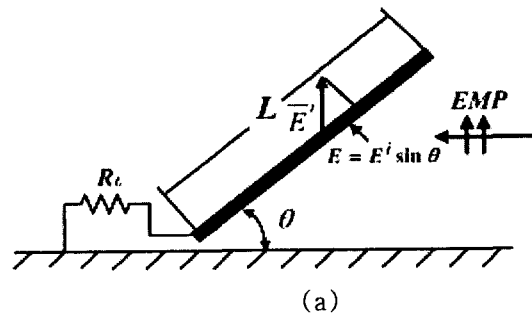
$$r(s) = \frac{60 Re[\Psi]}{L-S} [\Omega/m] \quad (4)$$

$r(0)$ 는 안테나 상에서 저항 분포 시작점에서의 분포저항값이며 Ψ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi \approx 2[\sinh^{-1}(\frac{L}{a}) - C(2ka, 2kL) - jS(2ka, 2kL)] + \frac{j}{kL}(1 - e^{-j2kL}) \quad (5)$$

여기서 $C(\cdot)$ 와 $S(\cdot)$ 는 각각 일반화된 cosine 및 sine 적분을 의미하고, k 는 자유 공간에서의 파수를 의미한다.

III. 결과 분석



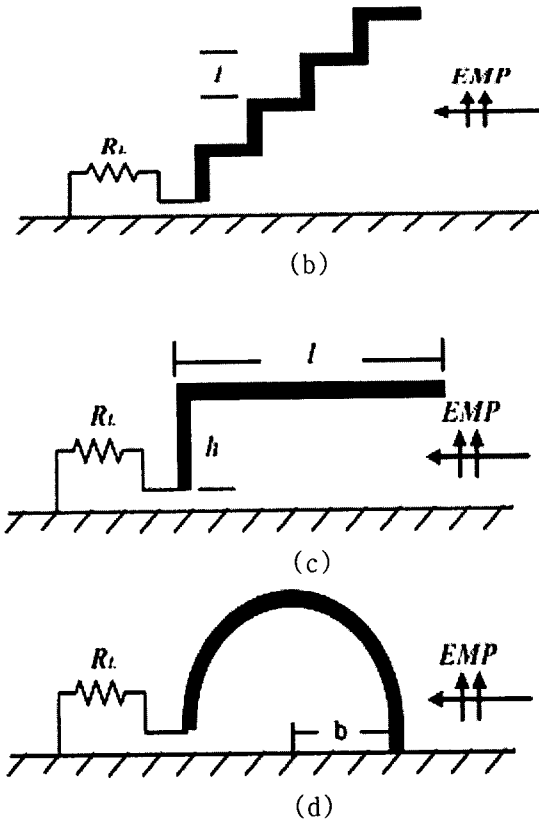


그림 1. 저항성 모노폴 센서들. (a) V-형 모노폴 (b)계단형 모노폴 (c)L-형 모노폴 (d)루프 모노폴

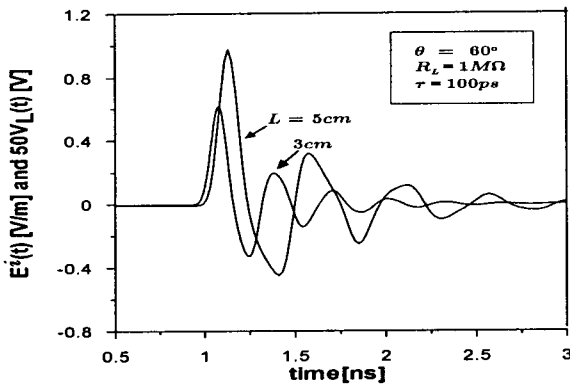


그림 2. 저항이 분포 되지 않은 V-형 ($\theta=60^\circ$) 모노폴의 길이의 변화에 따른 수신 파형 비교

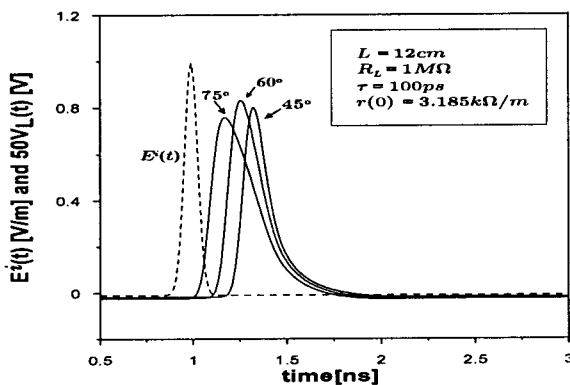


그림 3. V-형 안테나에서 $L=12cm$ 일 때 θ 의 변화에 따른 수신 파형 비교

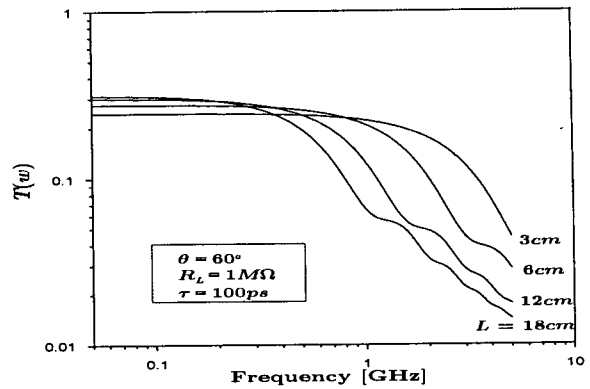


그림 4. V-형 모노폴에서 L 의 변화에 따른 주파수 전달함수 크기 비교

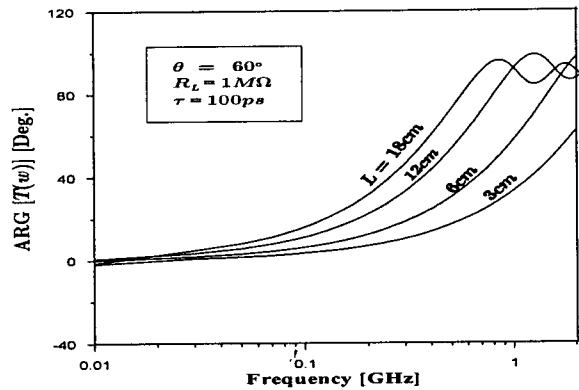


그림 5. V-형 모노폴에서 L 의 변화에 따른 주파수 전달함수 위상 비교

위 그림 1은 대표적인 저항성 모노폴 센서들을 나타내고 있으며 그림 2는 분포 저항이 장하되지 않았을 경우 100 ps V-형 센서의 수신 파형을 도시한 것으로 모노폴 단부에서 반사파가 크게 일어나 ringing 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 논문에서는 WK 프로필을 이용한 비선형적인 저항을 분포시켜서 ringing 현상을 없애고 반사파를 제거하였으며 이하 모든 시뮬레이션에서 WK 프로필을 적용하였다. 급전부 저항 R_L 이 증가함에 따라 주파수 전달함수의 평탄도 개선에 의해 수신레벨은 증가하고 전압 reaction이 개선된다. R_L 이 1M 이상이 될 때 대역특성이 거의 포화상태가 되어 이 연구에서는 $R_L = 1M$ 로 동일하게 두었으며 와이어 반경 ($a=1mm$) 역시 동일하게 두었다. 여기서 $E^i(t)$ 는 인가되는 가우시안 펄스이고, $50V_L(t)$ 는 급전부

에 유기 되는 전압에 50을 곱한 값을 의미한다. 그림 3은 사이각 θ 의 변화에 따른 수신 파형을 비교한 것으로 $L=12cm$ 에서 사이각이 60. 일 때 수신 파형의 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 4와 그림 5는 L 의 변화에 따른 주파수 전달 함수 특성을 보인 것이다. 이 그림들로부터 안테나 길이가 짧아지면 수신 레벨이 작아지지만 위상의 대역폭 증가와 위상의 주파수 의존성이 개선됨에 따른 분산의 감소에 의해 펄스 보전성이 향상 됨을 알 수 있다. 이상의 결과들은 우수한 주파수 전달함수 특성을 만족시키는 $r(0)$ 의 값을 각각 선정하여 계산하였다.

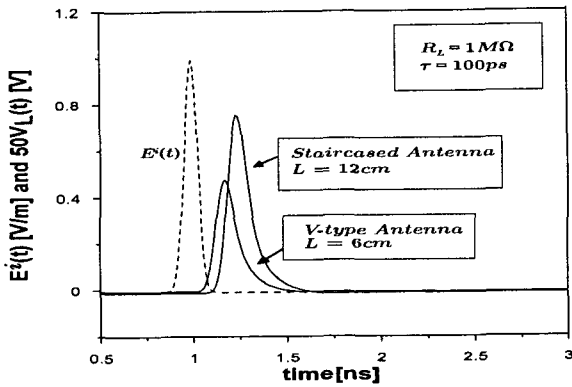


그림 6. V-형과 계단형 모노폴의 수신 특성 파형 비교

그림 6은 V-형 모노폴의 단부와 계단형 모노폴의 단부를 같이 두었을 경우 수신특성을 비교한 것이다. 여기서 V-형 모노폴은 $L=6cm$, $\theta=45^\circ$ 로 두고 계단형 모노폴은 $l=6mm$, $L=12cm$ 로 두었다. 이 그림으로부터 V-형 안테나가 계단형 안테나에 비해 수신 레벨의 크기는 작으나 시간 지연이 짧으며 펄스 보전성이 증가함을 확인할 수 있다.

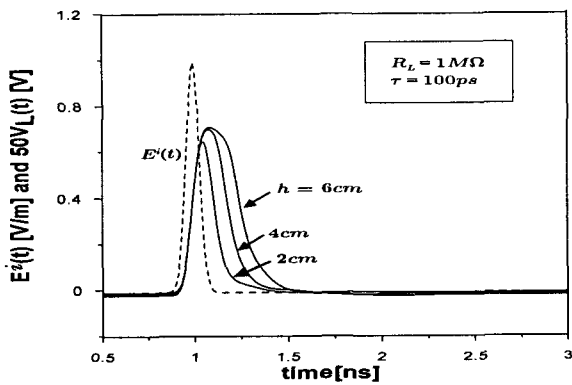


그림 7. L-형 모노폴에서 높이(h)에 따른 수신 파형 비교

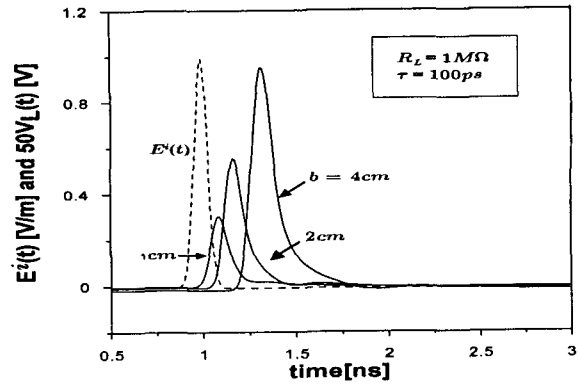


그림 8. Loop 모노폴에서 반경(b)에 따른 수신 파형 비교

그림 7은 L-형 안테나의 높이(h)의 변화에 따라 시간 지연은 같으나 높이가 증가하면 펄스 보전성이 떨어짐을 확인할 수 있다. 그림 8은 루프 안테나의 반경(b)에 따른 수신 특성을 나타내고 있다. 안테나의 반경이 감소함에 따라 수신 파형의 크기는 감소하나 펄스 보전성이 향상됨을 확인할 수 있다.

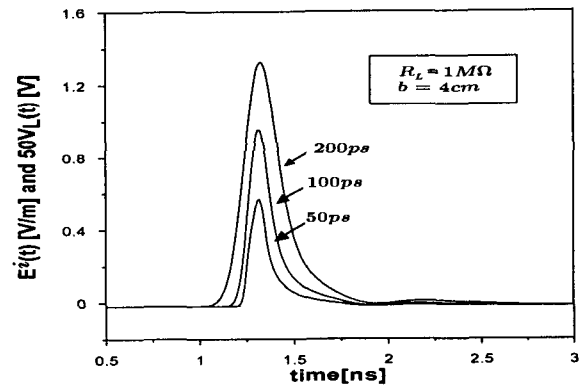


그림 9. Loop 모노폴에서 펄스폭(τ)에 따른 수신 파형 비교

그림 9는 루프 모노폴에서 반경이 4cm일 때 펄스폭의 변화에 따른 수신 파형을 비교한 것이다. 주어진 반경에서 펄스폭이 감소하면 수신전압 크기가 줄어들고, 왜곡이 커지지만 이는 안테나의 길이를 감소시켜 극복할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 V-형, 계단형, L-형 및 루프 모노폴 상에 가우시안 펄스를 인가하였을 때 수신 특성을 분석하였다. 각 모노폴에 WK 프로필을 이용하여 저항을 연

속적으로 분포 시킴으로 인해 안테나 단부에서 반사파를 억압함으로써 광대역을 구현하고 수신 전압 파형의 ringing 현상을 제거하였다.

V-형, 계단형, L-형 및 루프 모노폴 센서들의 길이를 짧게 하므로써 광대역에서 평탄한 주파수 응답을 가지고 펄스 보전성을 향상 시킬수 있으나 그로 인해 수신 파형의 크기는 떨어짐을 알수 있었다. 특히, V-형 모노폴은 길이와 사이각 사이의 적절한 타협점이 필요함을 확인 할수 있었다. 위 모노폴들은 모두 펄스폭, 안테나의 총 길이, 급전부 저항 및 $r(o)$ 간의 적절한 타협점이 존재함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] E. E. Altshuler, "The traveling-wave linear antenna," *IRE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 9, pp. 324-329, July 1961.
- [2] T. T. Wu and W. P. King, "The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 13, pp. 369-373, May 1965.
- [3] K. P. Esselle and S. S. Stuchly, "A broad-resistively loaded V-antenna : experimental results," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 39, pp. 1587-1591, Nov 1991.
- [4] J. G. Maloney and G. S. Smith, "Optimization of a conical antenna for pulse radiation An efficient design using resistive loading" *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 41, pp. 940-947, July 1993.
- [5] H. M. Shen, W. P. King, T. T. Wu, "New sensors for measuring very short electromagnetic pulses," *IEEE Tran. Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 6, pp. 838-846. June, 1990.
- [6] K. P. Esselle and S. S. Stuchly, "Resistively Loaded as a Pulse-Receiving Antenna", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 38, July 1990.
- [7] K. P. Esselle and S. S. Stuchly, "Pulse-receiving characteristics of resistively loaded dipole antennas," *IEEE Tran. Antennas and propagation*, vol. 38, no. 10, pp. 1677-1683, Oct, 1990.
- [8] I. S. Garcia, A. R. Bretones, and R. G. Martin, "Pulse-receiving characteristics of v-dipole antennas with resistive loading," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 2, pp. 174-176, May, 1998
- [9] T. P. Montoya, *Vee Dipole Antennas for use in Short-Pulse Ground-Penetrating Radars*, Ph.D. Dissertation, Georgia Inst. Technol., Atlanta, GA, March 1998.
- [10] K. P. Esselle and S. S. Stuchly, "Resistively Loaded Loop as a Pulse-Receiving Antenna", *IEEE Tran. Antennas and propagation*, vol. 38, no. 7, pp. 1123-1126, July 1990