

초광대역임펄스복사에서 관측방향에 따르는 임펄스지속시간변화에 대한 연구

리영명, 정원철, 배원철

최근에 초광대역임펄스를 리용한 지면투과탐지기가 광범히 연구되어 지층구조의 분석을 비롯한 지하목표탐지에 널리 리용되고있다.[1] 지면투과탐지기를 비롯한 초광대역임펄스의 응용분야에서는 임펄스지속시간에 의하여 탐지기의 분해능이 결정되므로 초광대역임펄스복사안테나에 의한 복사임펄스지속시간확장현상을 정확히 밝히는것은 현실적으로 중요한 문제로 제기된다.

논문에서는 열린면안테나에 의한 초광대역임펄스신호의 복사에서 관측방향에 따르는 임펄스지속시간의 변화특성을 이론적으로 밝히고 실험적연구를 진행하였다.

초광대역임펄스를 반대극성의 계단임펄스의 합성으로 근사시킬수 있다는데로부터 우리는 초광대역임펄스신호의 복사마당형성에 대한 연구를 진행하였다.

열린면안테나에 의한 초광대역임펄스신호의 복사마당해석에 전기벡토프로텐살리론을 적용한다.[2]

열린면마당에 의한 복사전기마당은 전기벡토프로텐살에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (1)$$

전기벡토프로텐살

$$\vec{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_S \frac{\vec{M}}{R} e^{-jkR} ds' \quad (2)$$

를 대입하고

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{\vec{M}}{R} e^{-jkR} \right) &= \frac{1}{R} \nabla \times \vec{M} e^{-jkR} + \nabla \left(\frac{1}{R} \right) \times \vec{M} e^{-jkR} = \\ &= \frac{1}{R} (-jk\hat{R}) \times \vec{M} e^{-jkR} + \frac{1}{R^2} \hat{R} \times \vec{M} e^{-jkR} = \\ &= -\frac{jkR+1}{R^2} \hat{R} \times \vec{M} e^{-jkR} \\ \vec{M} &= -2\hat{z} \times \vec{E}_t \end{aligned}$$

이라는것을 고려하면 식 (1)은(\vec{E}_t 는 열린면접선전기마당)

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\frac{1}{4\pi} \int_S \left(-\frac{jkR+1}{R^2} \hat{R} \times (-2\hat{z} \times \vec{E}_t) e^{-jkR} \right) ds' = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{jkR+1}{R^2} ((\hat{z} \times \vec{E}_t) \times \hat{R}) e^{-jkR} ds' \end{aligned} \quad (3)$$

로 된다.

여기서

$$R = |r - r'| = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2}$$

$$\hat{R} = \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{R} = \frac{x - x'}{R} \hat{x} + \frac{y - y'}{R} \hat{y} + \frac{z - z'}{R} \hat{z}$$

$$r' = (x', y', 0), \quad r = (x, y, z)$$

이다.

이제 고찰하는 열린면이 평면파로 러기된다면 즉 어떤 \hat{r}_0 방향의 ∞ 에서 집초되는 열린면이라고 하면 열린면접선전기마당 \vec{E}_t 는

$$\begin{aligned} \vec{E}_t(x', y', s) &= e^{-jk\hat{r}_0 \cdot \vec{r}'} \vec{E}_t(x', y') f(s) = \\ &= e^{-jk\hat{r}_0 \cdot \vec{r}'} [\hat{x}E_x(x', y') + \hat{y}E_y(x', y')] f(s) = \\ &= e^{-jk\hat{r}_0 \cdot \vec{r}'} E_0 [\hat{x}g_x(x', y') + \hat{y}g_y(x', y')] f(s) = \\ &= e^{-jk\hat{r}_0 \cdot \vec{r}'} E_0 \vec{g}(x', y') f(s) \end{aligned} \quad (4)$$

로 표시할수 있다. 여기서 $\vec{g}(x', y')$ 는 열린면마당의 공간적분포이고 $f(s)$ 는 파형함수이다.

한편 식 (2)에서 먼마당조건($r \rightarrow \infty$)에 대하여

$$\begin{aligned} R &= r - \hat{r} \cdot \vec{r}' \\ \hat{R} &= \hat{r} \\ [\hat{z} \times \vec{E}_t(r', s)] \times \hat{R} &= [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \vec{E}_t(r', s) \end{aligned}$$

로 표시할수 있다. 여기서 $I = \hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ 은 단위병렬벡토르이다.

따라서

$$\begin{aligned} \vec{E}(r, s) &= \frac{jke^{-jkr}}{2\pi r} [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} \vec{E}_t(r', s) ds' = \\ &= \frac{j\omega e^{-jkr}}{2\pi cr} [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} \vec{E}_t(r', s) ds' = \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{se^{-jkr}}{2\pi cr} [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} \vec{E}_t(r', s) ds' \\ \vec{H}(r, s) &= \frac{1}{z_0} \hat{r} \times \vec{E}(r, s) \end{aligned} \quad (6)$$

로 된다.

그리고 식 (4)를 식 (5)에 대입하면

$$\vec{E}(r, s) = \frac{se^{-jkr}E_0}{2\pi cr} f(s) [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S e^{jk(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'} \vec{g}(r') ds' \quad (7)$$

로 된다. 여기서

$$\vec{F}_a(\hat{r}, s) = \frac{1}{A} [(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S e^{jk(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'} \vec{g}(r') ds' \quad (8)$$

로 표시하고 이것을 열린면함수로 정의하며

$$\vec{F}(\hat{r}, s) = sf(s)\vec{F}_a(\hat{r}, s) \quad (9)$$

로 표시하고 이것을 먼마당파형함수로 정의한다.

한편 열린면함수를 시간영역에서 표시하면

$$\vec{F}_a(\hat{r}, t) = \frac{1}{A}[(\hat{z} \cdot \hat{r})I - \hat{z}\hat{r}] \cdot \int_S \delta\left(t + \frac{1}{c}[\hat{r} - \hat{r}_0] \cdot \vec{r}'\right) \vec{g}(r') ds' \quad (10)$$

이다.

만일 열린면함수가 시간영역에서의 단위계단함수라면 $f(s) = 1/s$ 이며 이때 먼마당파형함수는 관측방향에 따르는 퍼짐을 제외하고 시간상에서 델타함수와 유사하다.

따라서 먼마당파형함수에 의하여 식 (7)은

$$\vec{E}(r, s) = \frac{e^{-jkr} E_0 A}{2\pi cr} \vec{F}(\hat{r}, s) \quad (11)$$

로 된다.

먼저 유한한 치수의 열린면(S_a)에서 마당이 균일분포되고 편극방향이 \hat{r}_a 인 경우를 고찰하자. 이 경우

$$\vec{g}(r') = \begin{cases} \hat{r}_a, & \vec{r}' \in S_a \\ 0, & \vec{r}' \notin S_a \end{cases} \quad (12)$$

이며 따라서 열린면함수는

$$\begin{aligned} \vec{F}_a(\hat{r}, s) &= [(\hat{z} \cdot \hat{r})\hat{r}_a - (\hat{r} \cdot \hat{r}_a)\hat{z}] \frac{1}{A} \int_S e^{jk(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'} ds' = \\ &= [(\hat{z} \times \hat{r}_a) \times \hat{r}] f_a(\hat{r}, s) \end{aligned} \quad (13)$$

로 된다. 여기서

$$f_a(\hat{r}, s) = \frac{1}{A} \int_S e^{jk(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'} ds' \quad (14)$$

를 스칼라열린면함수로 정의한다. 이때 먼구역에서 마당근사공식은

$$\vec{E}(r, s) = \frac{e^{-jkr} E_0 A}{2\pi cr} sf(s)[(\hat{z} \times \hat{r}_a) \times \hat{r}] f_a(\hat{r}, s) \quad (15)$$

로 된다.

여기로부터 먼구역복사마당은 관측방향과 스칼라열린면함수에 관계되며 델타함수와 유사한 파형을 가진다는 것을 알 수 있다.

한편 식 (14)의 스칼라열린면함수는 시간영역에서

$$f_a(\hat{r}, t) = \frac{1}{A} \int_{S_a} \delta\left(t + \frac{1}{c}(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'\right) ds' \quad (16)$$

로 표시할 수 있다. 이것은 임펄스형태가 열린면형태에 관계된다는 것을 의미하며 임펄스파형은 \hat{r} (관측방향)에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 그리고 임펄스면적에 대한 계산식

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_a(\hat{r}, t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{A} \int_{S_a} \delta\left(t + \frac{1}{c}(\hat{r} - \hat{r}_0) \cdot \vec{r}'\right) ds' dt = \frac{1}{A} \int_{S_a} ds' = 1 \quad (17)$$

로부터 \hat{r} 이 \hat{r}_0 으로부터 멀어질 때 임펄스너비는 증가하고 진폭은 작아진다는 것을 알 수 있다.

또한 벡토르열린면함수에 대하여

$$\int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}_a(\hat{r}, t) dt = [\hat{z} \times \hat{r}_a] \times \hat{r} \quad (18)$$

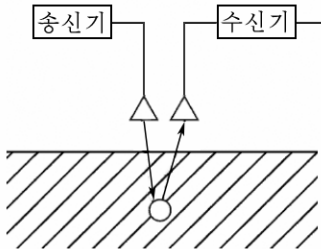


그림 1. 지면투과탐지기에
목표거리에 따르는 관측
방향의 변화

이러는데로부터 복사파형의 임펄스는 관측방향의 각도의 함수이며 앞에서 고찰한 스칼라파형함수를 곱해준 벡토르함수라는것을 알수 있다.

이상의 해석결과로부터 우리는 열린면안테나에 의한 초광대역임펄스복사와 수신을 지면투과탐지기에 적용하는 경우에 그림 1에서 보는것처럼 반사목표까지의 거리에 따라 관측방향이 축방향으로부터 차이나고 분해능이 떨어지므로 이것을 보정해주어야 한다는 중요한 결론을 얻을수 있다.

다음으로 그림 2와 같이 초광대역임펄스복사실험장치를 구성하고 초광대역임펄스신호의 복사에서 복사방향에 따르는 임펄스지속시간의 변화특성을 실험적으로 확증하였다.

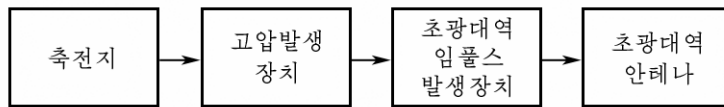


그림 2. 초광대역임펄스복사실험장치

실험에서는 일정한 거리에서 각도에 따르는 초광대역신호의 복사파형을 관측하여 진폭과 임펄스지속시간의 변화를 측정하였다. 그림 3은 5m거리에서 각도에 따라 측정된 복사마당수신파형이다.

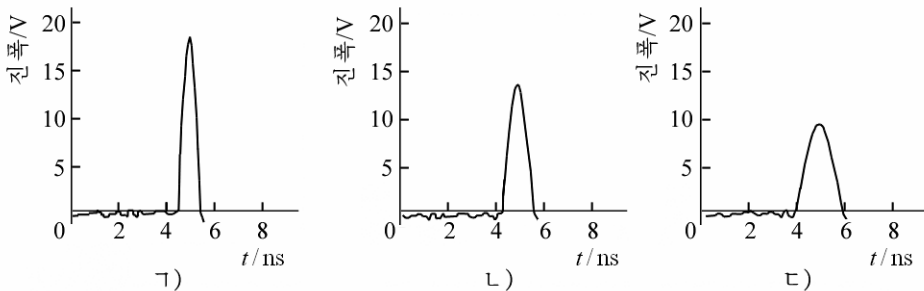


그림 3. 각도에 따라 측정된 복사마당의 수신파형(거리 5m)

ㄱ) 0°일 때, ㄴ) 30°일 때, ㄷ) 60°일 때

각도에 따르는 진폭과 임펄스지속시간측정결과를 표와 같다.

이상의 실험결과로부터 축방향으로부터 멀어질 때 임펄스너비는 증가하고 진폭은 작아진다는 해석적연구결과가 정확하다는것을 알수 있다.

표. 5m거리에서 각도에 따라 측정된 임펄스신호의 진폭과 지속시간

각도/(°)	측정자료	
	진폭/V	지속시간/ns
0	18	1.1
30	14	1.4
60	9.5	2
90	8	2.2

맺 는 말

열린면안테나에 의한 초광대역임펄스의 복사에서 관측방향이 축방향으로부터 멀어질 때 임펄스너비는 증가하고 진폭은 작아진다는것을 해석적으로 밝히고 실험적으로 확증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Zhenghuan Xia et al.; Journal of Electrical and Computer Engineering, 5, 1, 2015.
- [2] Constantine A; Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc., 20~45, 2005.

주체108(2019)년 8월 5일 원고접수

Study on the Variation of Pulse Duration According to Observation Direction in Ultra-WideBand Impulse Radiation

Ri Yong Myong, Jong Won Chol and Pae Won Chol

We studied analytically and verified experimentally that pulse duration increased and the amplitude decreased when the observation direction became far out of axis in Ultra-WideBand Impulse Radiation by aperture antenna.

Key words: ultra-wideband, impulse radiation