

시간 영역에서의 초광대역 안테나 특성 해석

Characterization and Analysis of UWB Antennas in Time Domain

송 중 화 · 박 영 진*

Jong-Hwa Song · Young-Jin Park*

요 약

본 논문은 시간 영역에서의 초광대역 안테나 특성 해석에 대하여 기술한다. 시간 영역 해석을 위해 임펄스 전파 채널에 대한 모델링을 제시하였고, 이를 근거로 초광대역 안테나에 대한 임펄스 응답의 유도 방법을 제시하였다. 또한, 시간 영역에서의 안테나의 특성을 나타내는 파라미터로서 떨림(ringing), 임펄스 응답의 첨두치, 그리고 응답 폭을 제시하였다. 임펄스 응답 측정을 위하여, 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나, 초광대역 TEM 혼 안테나, 초광대역 stepped fat 모노폴 안테나를 설계 및 제작하였다. 제작된 모든 안테나는 측정을 통하여 3 GHz 이상의 대역폭을 갖는 초광대역 특성을 보였다. 무반향 반사실에서 구한 각 안테나의 임펄스 응답 특성으로부터, 이득이 높은 TEM 혼이 가장 높은 첨두치를 가짐을 보였고, 대역폭이 가장 작은 stepped fat 모노폴 안테나가 가장 넓은 임펄스 응답 폭을 가짐을 확인했다. 또한, 떨림 현상은 TEM 혼안테나를 제외한 두 안테나에서 관찰되었다.

Abstract

In the paper, characterization and analysis of UWB(Ultra Wide Band) antennas in time domain are described. The impulse propagation channel including UWB antennas is proposed for the analysis in time domain. Using the proposed propagation channel, the technique of obtaining impulse response of UWB antenna is proposed. Also, ringing, peak value of the impulse response, and the width of the impulse response are introduced as parameters for characterizing a UWB antenna in time domain. A modified UWB conical monopole antenna, a UWB TEM horn antenna, and a UWB stepped fat monopole antenna were fabricated. From the measurement of reflection coefficients, three antennas had bandwidth more than 3 GHz. The impulse responses of the antennas were measured in an anechoic chamber. The results showed that the TEM horn with highest gain has the highest peak amplitude and the stepped fat monopole antenna with narrowest bandwidth for reflection coefficient had the widest width of the impulse response. Also, ringing in the stepped fat monopole antennas and the UWB conical monopole antenna were observed.

Key words : UWB Antennas, Time Domain Characterization, TEM Horn Antenna, Stepped Fat Monopole Antenna, Modified Conical Monopole Antenna

I. 서 론

미국 연방 통신 위원회(FCC)에서 초광대역(Ultra

Wide Band: UWB) 기술에 대한 제한적 사용을 허가 이후^[1], UWB 기술은 근거리 무선 통신 분야에서 큰 관심을 불러 일으키고 있다. 초광대역 무선통신

과학기술연합대학원대학교 전력정보통신공학과(Dept. of Electrical Equipment Information and Communications Eng., University of Science & Tech.(UST))

*한국전기연구원 전기정보망그룹(Power Telecommunication Network Group, Korea Electrotechnology Research Institute(KERI))

· 논문 번호 : 20060113-003

· 수정완료일자 : 2006년 2월 28일

기술은 기존의 주파수 영역에서의 협대역 신호 대신 시간 영역의 극단 임펄스 신호를 전파시켜 무선 통신에 활용하는 방식이다^[2]. 협대역 통신에 사용되는 안테나는 사용 주파수 대역에서 안테나의 특성이 일정하다고 가정할 수 있으나, 초광대역 안테나는 사용 주파수 대역이 수 GHz 대역으로 안테나의 특성이 전 주파수 대역에서 일정하다고 가정할 수 없다. 특히, 시간 영역에서 초광대역 안테나의 분산, 펄럼 특성은 UWB 시스템에 사용되는 수 나노 초(nano second)의 폭을 갖는 펄스 열에 영향을 끼치므로, 시간 영역에서의 초광대역 안테나에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 초광대역 코니컬 모노폴 안테나, 초광대역 TEM 혼 안테나, 초광대역 stepped fat 모노폴 안테나를 소개하고, 이들에 대한 시간 영역에서의 임펄스 응답 유도 방법과 그 결과들을 제시하고자 한다. 또한 안테나의 임펄스 응답에서 도출할 수 있는 초광대역 안테나 특성 파라미터들을 제시하였으며, 제안한 안테나 특성 파라미터를 이용하여 제작한 각 안테나의 특성을 시간 영역에서 비교, 해석하였다.

II. 이 론

2-1 초광대역 안테나의 임펄스 응답

그림 1에 임펄스 전파 채널에 대한 구성도를 개략적으로 나타내었다. 송수신 안테나가 거리 R 만큼 떨어져 있다. $h_{Tx}(t)$ 와 $h_{Rx}(t)$ 는 송수신 초광대역 안테나의 임펄스 응답을 말하며, $H_{Tx}(\omega)$ 와 $H_{Rx}(\omega)$ 는 송수신 초광대역 안테나의 전달함수이고, $H_p(\omega)$ 는 채널의 전달함수이다. $x(t)$ 와 $X(\omega)$ 는 송신 안테나에 입력하는 시간 영역과 주파수 영역의 신호이며, $y(t)$ 와 $Y(\omega)$ 는 수신 안테나에서 출력되는 시간 영역과 주파수 영역의 신호이다. 다중경로가 없다고 가정하면 시간 영역과 주파수 영역에서의 신호의 입출력 관계를 다음과 같이 각각 쓸 수 있다^{[3]-[7]}.

$$y(t) = \frac{d}{dt}(h_{Tx}(t)) * h_p(t) * h_{Rx}(t) * x(t) \quad (1a)$$

$$Y(\omega) = j\omega \cdot H_{Tx}(\omega) \cdot H_p(\omega) \cdot H_{Rx}(\omega) \cdot X(\omega) \quad (1b)$$

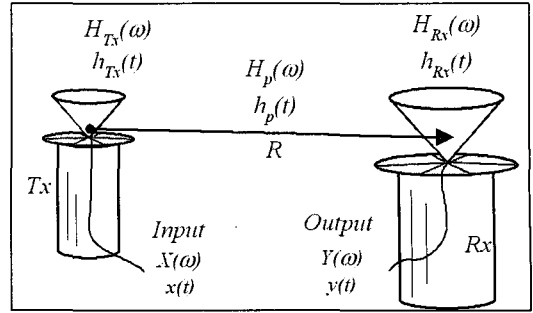


그림 1. 임펄스 전파채널 구성도
Fig. 1. Schematic drawing of impulse propagation channel.

여기서, $(\cdot) * (\cdot)$ 는 두 값의 컨볼루션을 말한다. 송수신 안테나와 수신 안테나의 전기적 특성이 같다고 가정하면, 식 (1b)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = j\omega \cdot [H_{Tx}(\omega)]^2 \cdot H_p(\omega) \quad (2)$$

입력과 출력의 관계는 벡터회로망 분석기를 이용하여 측정된 $S_{21}(\omega)$ 와 같으므로 안테나의 전달함수는 다음과 같다.

$$H_{Tx}(\omega) = \sqrt{\frac{S_{21}(\omega)}{j\omega \cdot H_p(\omega)}} \quad (3)$$

또한, 채널의 전달함수 $H_p(\omega)$ 는 다중경로가 없으므로, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_p(\omega) = \frac{1}{2\pi Rc} e^{-j\omega R/c} \quad (4)$$

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

따라서, 식 (3)으로부터 초광대역 안테나에 대한 전달 함수를 얻을 수 있다. 구한 전달 함수로부터 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)를 수행하여 초광대역 안테나의 임펄스 응답을 구할 수 있다^{[8],[9]}.

송수신 안테나가 다를 경우, 앞에서 구한 송신 안테나에 대한 전달함수, $H_{Tx}(\omega)$ 와 송수신 안테나 사이의 $S_{21}^*(\omega)$ 을 이용, 식 (1b)로부터 구하고자 하는 수신측 초광대역 안테나에 대한 전달 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{Rx}(\omega) = \frac{S_{21}^*(\omega)}{j\omega \cdot H_{Tx} \cdot H_p} \quad (5)$$

따라서, 수신 안테나의 임펄스 응답은 식 (5)의 전달

함수를 IDFT 취하여 얻을 수 있다.

2-2 초광대역 안테나의 임펄스 응답 특성 파라미터

2-2-1 응답 폭(Full Width at Half Maximum: FWHM)

응답 폭은 안테나의 임펄스 응답의 크기가 최고 첨두치의 반일 때 시간 간격이다. 응답 폭, $W_{0.5}$ 은 다음과 같이 정의된다^{[9],[10]}.

$$W_{0.5} = t_1 \Big|_{|h_{Tx}(t)| = p/2} - t_2 \Big|_{\tau_2 < \tau_1, |h_{Tx}(t)| = p/2}$$

$$p = \text{Max}\{|h_{Tx}(t)|\} \quad (6)$$

이 값은 주파수 영역에서 안테나의 반사계수 특성과 밀접한 관련을 갖고 있다. 또한, 응답 폭이 크다면 채널의 다중경로 임펄스가 묻히게 되어 나타나지 않게 되어, 응답 폭은 안테나의 왜곡을 나타내는 척도가 된다.

2-2-2 초광대역 안테나 임펄스 응답의 첨두치

안테나의 임펄스 응답의 첨두치가 높을수록 안테나가 내보낼 수 있는 전력의 양이 많아진다. UWB 무선통신에 이용되는 안테나는 크기가 작으므로, 입력할 수 있는 전력이 작다. 그러므로 초광대역 안테나로서 입력된 작은 전력을 최대한으로 출력해야 하므로 임펄스 응답의 첨두치는 초광대역 안테나의 특성을 나타내는 중요한 수치이다.

2-2-3 떨림(Ringing)

떨림이란 안테나 자체에서 발생하는 다중경로를 뜻한다. 떨림이 있는 초광대역 안테나를 사용하면 채널에서 발생하는 다중경로 이외에 안테나에서 발생하는 다중경로가 같이 나타나게 되므로 초광대역 무선통신의 펄스 열에 영향을 준다. 물리적으로 떨림은 안테나 구조의 불연속성에 의한 신호의 반사에 의해서 생긴다.

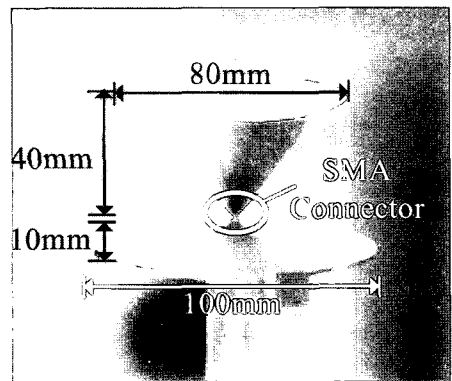
III. 초광대역 안테나 설계 및 제작

3-1 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나

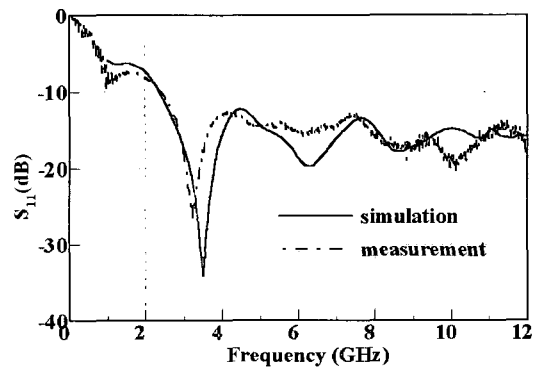
초광대역 코니컬 모노폴 안테나는 광대역 안테

나로 광범위하게 사용되고 있다^[11]. 본 논문에서 제작한 안테나는 코니컬 모노폴의 넓은 지면 문제를 줄이고, biconical의 급전 문제 및 부피를 줄이기 위해, biconical과 코니컬 모노폴의 중간 형태를 취하도록 하였다. 즉, 지면 고깔의 지름을, 윗 고깔의 지름 보다 조금 더 크게 하였다. SMA 커넥터를 이용하여 안테나를 급전하였다. 안테나에 대한 개략적 구조 모양이 그림 2(a)에 나타내었다.

주파수 대역은 미국 FCC에서 규정한 UWB 통신 대역을 고려하여 2 GHz에서 12 GHz로 설정하였다. Ansoft HFSS를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 시



(a)



(b)

그림 2. (a) 변형된 코니컬 모노폴 안테나 사진
(b) 변형된 코니컬 모노폴 안테나의 반사 특성 시뮬레이션 및 측정

Fig. 2. (a) Photograph of the modified conical monopole antenna.

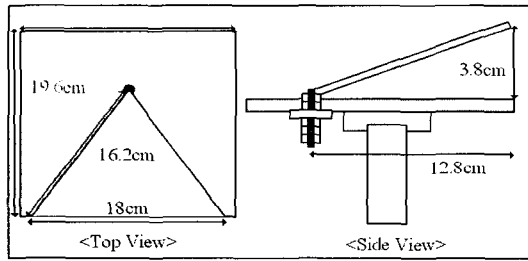
(b) Simulated and measured reflection coefficient of the modified conical monopole antenna.

플레이션을 통하여 윗 고깔의 지름은 80 mm, 아래 고깔의 지름은 100 mm로 정했다. 윗 고깔의 벌어진 각도는 45°로 정하였고, 아래쪽은 SMA 커넥터의 크기를 고려하여 각도를 정하였다.

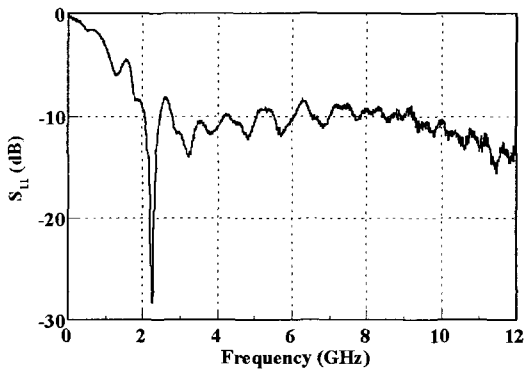
제작된 안테나는 Agilent E8363B를 사용하여, 안테나의 반사계수를 측정하였다. 측정 결과는 그림 2(b)에 나타내었다. 그림에서처럼 안테나는 반사계수의 관점에서 광대역 특성을 가짐을 알 수 있다.

3-2 TEM 혼 안테나

TEM 혼 안테나는 크기가 크다는 단점을 가지고 있지만, 안테나의 분산 현상이 적고, 높은 지향성 때문에 impulse radar로 많이 사용되는 안테나이다. 제작한 TEM 혼 안테나의 구조와 제작한 TEM 혼 안테나의 반사특성(S_{11})은 그림 3과 같다. 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나와 마찬가지로 Agilent E8363B로 측정하였으며, 광대역 특성을 보인다.



(a)

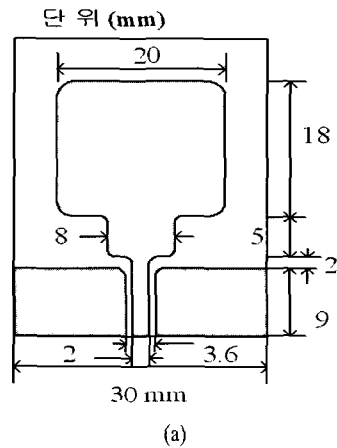


(b)

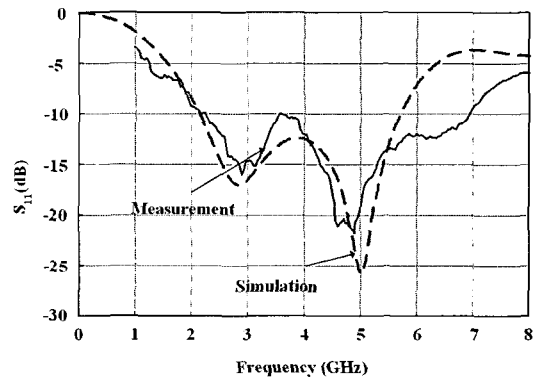
그림 3. (a) TEM 혼 안테나의 구조
(b) TEM 혼 안테나의 반사 특성 측정 결과
Fig. 3. (a) Schematic drawing of the TEM horn antenna.
(b) Measured reflection coefficient of the TEM horn antenna.

3-3 Stepped Fat 모노폴 안테나

Fat 모노폴 안테나는 전방향 특성을 가지고 가격이 저렴하며 제작이 비교적 쉽고, 회로에 집적하기 용이하다. 제작한 stepped fat 모노폴 안테나의 구조는 다음과 같다. 기존의 fat 모노폴 안테나의 대역이 좁다는 점을 stepped fat arm 구조를 만들어 주파수 상에 공진점을 하나 더 갖도록 하여 대역을 넓게 하여 광대역 특성을 갖도록 개선하였다. 그림 4는 제작한 stepped fat 모노폴 안테나의 구조와 광대역 반사 특성(S_{11})을 나타낸다. 구체적인 설계 자료는 참고문헌 [12]를 참조할 수 있다.



(a)



(b)

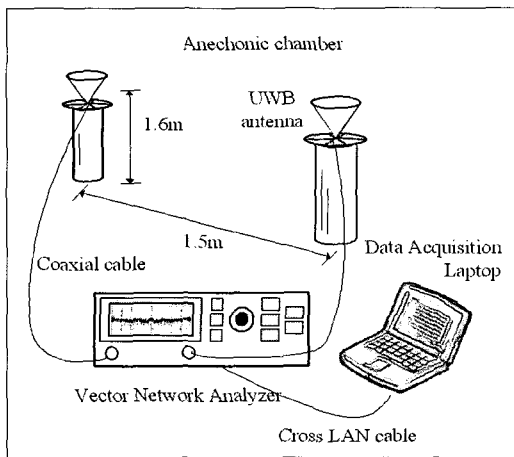
그림 4. (a) Stepped fat 모노폴 안테나의 구조
(b) Stepped fat 모노폴 안테나의 반사 특성 시뮬레이션 및 측정
Fig. 4. (a) Schematic drawing of the stepped fat monopole antenna.
(b) Simulated and measured reflection coefficient of the stepped fat monopole antenna.

IV. 초광대역 안테나 임펄스 응답 측정 및 해석

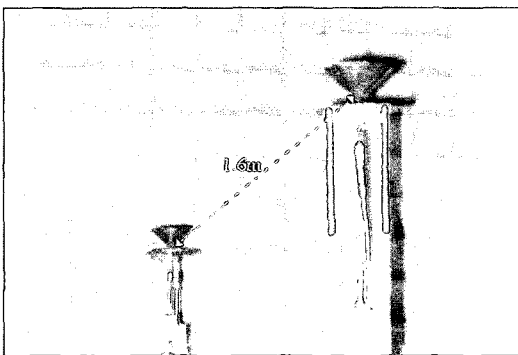
4-1 측정 구성

제작된 초광대역 안테나의 임펄스 응답을 구하기 위하여 무반향 반사실에서 그림 5와 같이 측정 셋업을 구성하였다.

송수신 안테나 사이의 거리는 1.5 m, 지면에서 안테나 중심까지의 거리는 1.6 m로 고정하였다. 벡터 회로망 분석기(Vector Network Analyzer: VNA)는 Agilent 사의 E8363B를 사용하여 측정하였으며, 각 안테나와



(a)



(b)

그림 5. (a) 초광대역 안테나 임펄스 응답 측정 구성도
(b) 초광대역 안테나 임펄스 응답 측정 사진
Fig. 5. (a) Measurement setup of impulse response of the UWB antennas.

(b) Photograph of impulse response measurement setup.

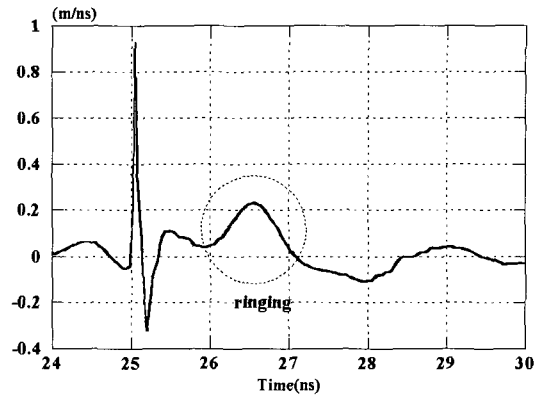


그림 6. 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나의 임펄스 응답

Fig. 6. Impulse response of the modified conical monopole antenna.

VNA 사이는 10 m 길이의 저손실 동축선을 사용하였다. 측정된 자료는 휴대용 컴퓨터에 실시간으로 저장 가능하도록 하였다. VNA로 측정한 주파수 범위는 10 MHz에서 12.01 GHz까지로 하였고, sweep time은 1 초, 1601 포인트로 설정하여 측정하였다.

4-2 Modified UWB 코니컬 모노폴 안테나

무반향 반사실에서 두 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나 사이의 전달 특성(S_{21})을 전방향에서 측정하여 식 (2), (3)을 이용하여 구한 안테나의 임펄스 응답은 그림 6과 같다. 안테나의 특성 파라미터는 평균적으로 응답 폭은 54 ps, 첨두치는 0.93 m/ns, 떨림은 0.346 ns로 측정된다.

전 방향에서 응답 폭은 최대값과 최소값이 약 20 ps 정도 차이가 생긴다. 이는 거리상으로 6 mm에 해당된다. 다중경로 상에서 6 mm 차이인 것은 무시할 수 있는 정도의 차이므로 전 방향에서 거의 차이가 없다고 할 수 있다.

4-3 TEM 혼 안테나

TEM 혼 안테나에 대한 임펄스 응답을 구하기 위하여, 측정된 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나를 이용하였다. 무반향 반사실에서 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나와 TEM 혼 안테나로부터 측정된 투과 특성인 S_{21} 과 이미 구한 변형된 초광대역 코니컬

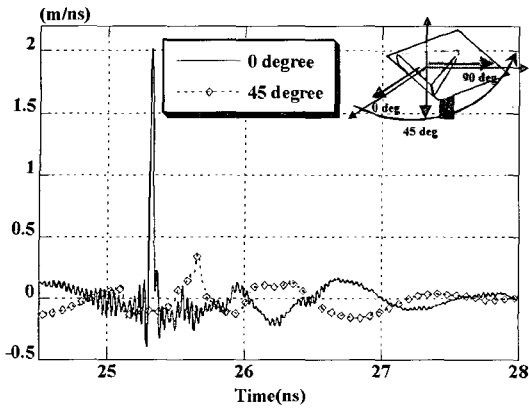


그림 7. TEM 혼 안테나의 임펄스 응답
Fig. 7. Impulse response of the TEM horn antenna.

모노폴 안테나의 전달함수를 이용하여 TEM 혼 안테나의 임펄스 응답은 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

그림 7에 TEM 혼의 안테나의 임펄스 응답을 나타내었다. TEM 혼 안테나는 안테나의 방향성을 확인하기 위해, 0°, 45°에 대한 임펄스 응답을 구하였다. 0°일 경우, 즉 TEM 혼과 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나가 마주 볼 때, 측정 결과 떨림 현상은 관찰되지 않으며, 첨두치는 2.02 m/ns, 응답 폭은 51 ps로 측정된다. 45°의 경우는 0°의 경우와 다르게 매우 낮은 임펄스 응답 첨두치를 가짐을 알 수 있다.

4.4 Stepped Fat 모노폴 안테나

Stepped fat 모노폴 안테나의 임펄스 응답을 구하기 위하여, 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나의 임펄스 응답을 이용하였다. 그림 7에 stepped fat 모노폴 안테나에 대한 임펄스 응답을 보였다.

변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나와 TEM 혼 안테나의 임펄스 응답은 가우시안 펄스 형태를 나타내는 것에 반해 stepped fat 모노폴은 가우시안 모노폴스 형태를 나타내고 있다. 이는 주파수 영역에서 stepped fat 모노폴 안테나가 전 주파수 대역을 모두 방사하지 못하기 때문이다. 실제로 반사 특성에서도 stepped fat 모노폴 안테나가 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나와 TEM 혼 안테나에 비해 대역이 좁다. 이렇게 방사된 전자파는 시간 영역에서 가우시안 모노폴스나 가우시안 더블렛으로 나타나게 된다.

Stepped fat 모노폴 안테나의 특성 파라미터는 전 방

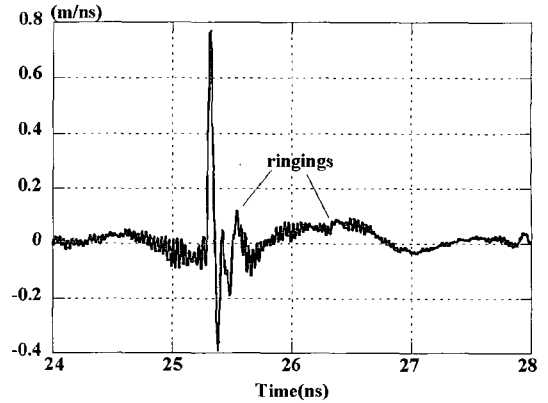


그림 8. Stepped fat 모노폴 안테나의 임펄스 응답
Fig. 8. Impulse response of the stepped fat monopole antenna.

향에서 평균적으로 떨림은 0.216 ns, 1.068 ns에서 관찰되었고, 첨두치는 0.77 m/ns, 응답 폭은 113 ps로 측정된다. 전 방향에서 최고 값과 최소 값의 차이가 떨림은 21 ps, 응답 폭은 30 ps로 측정된다.

4.5 초광대역 안테나의 특성 파라미터 비교

표 1에 세 개의 안테나에 대한 시간 영역에서 구한 임펄스 응답 값들을 정리하였다.

초광대역 안테나가 송수신할 수 있는 전력의 양을 결정하는 첨두치 측면과 떨림 현상이 없다는 측면에서 TEM 혼 안테나가 유리하지만, 전 방향성 안테나가 아니라면 점이 초광대역 무선 안테나로 사용되기엔 힘들다.

이에 비해 제작한 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나와 stepped fat 모노폴 안테나는 전 방향성 측면에서 초광대역 무선 안테나로서 유리한 특성을 보이

표 1. 초광대역 안테나의 특성 파라미터 비교
Table 1. Comparison of characterization parameters on the UWB antennas.

	떨림 (ns)	첨두치 (m/ns)	응답 폭 (ps)
초광대역 코니컬 모노폴 안테나	0.346	0.93	54
TEM 혼 안테나(0°)	-	2.02	51
Stepped fat 모노폴 안테나	0.216, 1.068	0.77	113

고 있다. 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나는 송수신 전력이 크기 때문에 임펄스 전파채널 측정에 유리하지만 크기가 크고, 회로에 집적이 어렵다는 점에 서 실제 UWB 무선통신에 사용되기엔 어려움이 있다.

Stepped fat 모노폴 안테나는 다른 안테나에 비해 첨두치가 낮아 송수신 전력이 낮고, 응답폭이 크지만, 떨림현상도 작고, 특히 제작비용이 적게 들고, 회로에 집적이 용이하며, 크기가 작다는 점에서 근거리 무선 통신에 유리하다.

V. 결 론

본 논문은 UWB 안테나의 시간 영역에서 임펄스 응답 측정 및 해석 방법을 제시하였다. 변형된 초광대역 코니컬 모노폴 안테나, 초광대역 TEM 혼 안테나, 초광대역 stepped fat 모노폴 안테나를 설계 및 제작하였고, 제시된 방법을 이용하여 이들에 대한 임펄스 응답 특성을 구하였다. 얻어진 결과를 토대로 안테나들에 대한 시간 영역에서의 첨두치, 떨림, 응답 폭에 대한 특성을 해석하였다. 또한, 시간 영역에서 안테나 특성 파라미터를 비교하여 초광대역 무선통신에 유리한 안테나의 기준을 제시하였다. 이러한 해석 방법은 초광대역 무선통신 안테나의 선정에 있어 하나의 기준으로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 제안된 방법은 임펄스 특성을 이용한 매질의 특성 해석, 임펄스 전파 채널에서 초광대역 안테나 해석을 위하여도 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communications Commission(FCC), "Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra wideband transmission system", First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC02-48, Adopted Feb. 2002, Released Apr. 2002.

[2] M. Z. Win, R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it works", *IEEE Communications Letters*, vol. 2, no. 1, Jan. 1998.

[3] W. Soergel, F. Pivit, and W. Wiesbeck, "Comparison of frequency domain and time domain measurement procedures for ultra wideband ante-

nna", in *Proc. Antenna and Measurement Tech. Assoc., 15th Ann Meeting and Symp.*, pp. 72-76, Oct. 2003.

[4] E. G. Farr, C. E. Baum, "Time domain characterization of antennas with TEM feeds", *Sensor and Simulation Notes* 426, pp. 7-11, Oct. 1998.

[5] R. C. Robertson, M. A. Morgan, "Ultra-wideband impulse receiving antenna design and evaluation", *Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics*, vol. 2, pp. 179-186, 1995.

[6] Joon-Yong Lee, Sangsung Choi, "Through-Material propagation characteristic and time resolution of UWB signal", *Ultra Wideband Systems, 2004. Joint with Conference on Ultrawideband Systems and Technologies. Joint UWBST & IWUWBS. 2004 International Workshop*, pp. 71-75, May 2004.

[7] Zhi Ning Chen, Xuan Hui Wu, "Consideration for source pulses and antennas in UWB radio systems", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 52, pp. 1739-1748, Jul. 2004.

[8] S. L. Marple Jr., "Computing the discrete-time 'analytic' signal via FFT", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, pp. 2600-2603, Sep. 1999.

[9] 박영진, 송종화, 김관호, "임펄스 전파채널에서의 초광대역 안테나 영향 연구", *전자공학회 논문집*, 42(12), TC, pp. 165-170, 2005년 12월.

[10] W. Sögel, W. Wiesbeck, "Influence of the antennas on the ultra-wideband transmission", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, pp. 196-305, Mar. 2005.

[11] B. Scheers, M. Acheroy, and V. Vorst, "Time domain simulation and characterization of TEM horns using a normalised impulse response", *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, vol. 147, pp. 463-468, Dec. 2000.

[12] Y. -J. Park, J. -H. Song, and K. -H. Kim, "A novel stepped fat monopole antenna for precision location system using impulse waveform", *IEEE International Conference on Ultra-Wideband(ICU 2005)*, vol. 1, pp. 85-88, Sep. 2005.

송 종 화



2004년: 홍익대학교 전기전자공학부 (공학사)

2005년~현재: 과학기술연합대학원대학교 석사과정

[주 관심분야] UWB antenna, Impulse radio channel modeling, digital beam forming(DBF)

박 영 진



1997년: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)

1999년: 한국과학기술원 전기전자과 (공학석사)

2002년: University of Karlsruhe 전기전자과 (공학박사)

2002년 11월~현재: 한국전기연구원 전기정보망 기술연구그룹

2004년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 겸임교원
[주 관심분야] Impulse radio propagation, UWB image radar, short range automotive radar, digital beam forming(DBF), power line communications(PLC)