

시간영역에서 분석한 저대역 통과 필터를 통과한 펄스의 과도상태 응답

유민균¹, 우태희¹, 정용식², 천창율¹
¹서울시립대학교, ²광운대학교

Time domain analysis with transient response of the pulse on the low pass filter

Minkyun Yoo¹, Tae-Hee Woo¹, Young-Seek Chung², Changyul Chun¹
¹University of Seoul, ²Kwangwoon University

Abstract - 본 논문에서는 고출력 극초단파(High Power Microwave)가 쏘아지는 대상이 방어장비를 갖추고 있을 때 외부대상이 어떤 영향을 받는지를 규명하는데 목적이 있다. 입력펄스를 변조(modulation)시켜 저지대역(Stop Band) 주파수 대역에 맞추고, 펄스(Pulse)를 저대역 통과 필터의 저지대역에 통과시킨다. 이때 출력펄스의 응답(response)을 시간영역(Time-domain)에서 분석하여 정상상태(steady state)보다는 과도응답(Transient Response)을 확인하는 것을 제안한다. 이 방법은 저지대역의 파형이 필터를 통과해도 과도응답 때문에 필터가 제 역할을 하지 못한다는 이론을 규명한다. 이 이론은 고출력 극초단파가 외부대상에 미치는 영향에 있어서 전자파를 방어하려고 하여도 과도응답 상태 응답 때문에 타격을 받을 수 있다는 것을 규명한다.

1. 서 론

최근 미국과 이라크 전에서 미국이 사용하였다고 보고된 전자폭탄(Electronic-Bomb)에 의한 공격은 이라크군의 각종 전자장비를 마비시켜서 미군이 유리한 상황에 이를 수 있게 만들었다. 고출력 극초단파라고 불리는 전자폭탄은 러시아에서 처음 개발되었다. 이 고출력 전자기파는 진동수가 대략 1~100GHz의 대역에 해당하는 전자기적 펄스를 의미한다. 이 폭탄의 특징은 아무런 흔적도 남기지 않고 목표로 설정된 전자장비만을 파괴하는 조용한 무기이며, 다른 폭탄과는 달리 사람에게 직접적 피해가 오지 않는다는 것이다.

이 전자폭탄의 원리는 전자기펄스(Electromagnetic pulse)로서 고출력 에너지를 이용하여 순간적으로 전자장비만을 파괴하거나 오작동을 유발시켜 한순간에 장비의 기능을 무력화 시킨다. 따라서 이러한 공격에 대비하기 위해서 고출력 극초단파가 전자 회로에 끼치는 영향에 대한 연구가 필요하게 되었고, 이미 미국이나 러시아 등에서 먼저 이루어지고 있다.

하지만 이러한 연구결과들과는 반대로 고출력 에너지가 대상에 미치는 영향을 줄이기 위한 연구도 많이 필요하고 연구되어 지고 있다. 예를 들어 안테나의 앞에 필터 또는 리미터회로를 부착하여서 출력이 높은 전자파가 뒤의 회로 또는 안테나에 미치는 영향을 줄이는 연구이다. 고출력의 전자파가 순간적으로 침투하여서 회로가 오작동을 할 수 있기 때문에 과도응답 특성의 연구가 필요하다. 하지만 이러한 과도응답 연구들은 주파수 영역에서 해석했을 때 특성이 잘 나타나지 않는다. 이는 주파수영역에서는 뒷부분의 회로에 받는 영향을 분석하기가 힘들다는 것이다. 따라서 본 연구는 필터나 리미터가 회로의 앞에 설치되어있다고 가정된 상태에서 연구를 진행하였다. 입력파형이 필터나 리미터의 저지대역을 통과했을 때 출력파형을 시간영역에서 분석하여서 과도응답을 확인하였다. 입력펄스를 변조시켜서 필터의 저지대역에 통과시켰다. 이때 통과된 출력펄스를 시간영역에서 파형관측기로 분석하여 과도응답 특성을 분석하였다. 따라서 저대역 통과 필터를 설계하여 실험을 진행하였다. 본 논문의 시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였다. 이 프로그램은 행렬(Matrix)을 기본으로하여 연산하기 때문에 복잡한 신호처리(Signal Processing)연산에 적은시간으로 정확한 해석이 가능하였다.

2. 본 론

2.1.1 이론적 배경

본 연구의 주요 목표는 필터의 저지대역을 통한 펄스의 과도응답 특성을 시간영역에서 분석하는 것이다. 시간영역에서 분석하여 회로의 앞에 필터가 장착되어있어도 필터 뒤의 회로에 영향이 얼마나 미치는지를 확인하려는 것이다. 하지만 주파수 영역에서의 응답을 분석하게되면 과도응답 특성을 분석할 수가 없게된다. 이는 과도응답 자체가 시간에 관계가 있는 응답이기 때문이다. 따라서 시간과 주파수 영역을 분석 할 수 있는 푸리에변환과 역푸리에변환의 이론적배경이 필요하다. 또 필터의

저지대역을 통과하기때문에 -20dB 이상을 저지해주는 특성을 가지는 저대역 통과 필터가 필요하다. 입력 펄스로는 폭 250[ns],크기 2[V]를 가지는 펄스를 사용하였다. 저지대역을 통과하면 입력펄스의 균일한 감쇠가 일어나게 된다. 하지만 과도응답 특성을 보면 그렇지 않다는 것을 알 수 있다.

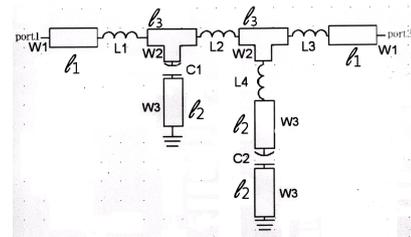
시간영역의 입력펄스를 $x(t)$ 라 하고, 필터의 주파수특성을 $H(f)$ 라 하였다. Time invariant system의 입력출력 관계식인 식(1)이 있다. 여기서 식(1)을 푸리에변환하여 식(2)를 유도할 수 있다. 이때 시간영역 입력파형 $x(t)$ 와 필터의 주파수 특성인 $H(f)$ 를 알고있으므로 푸리에변환 공식을 사용하여 시간영역 입력파형 $x(t)$ 을 푸리에 변환하여 주파수영역의 입력파형 $X(f)$ 로 바꾸고 필터의 주파수특성인 $H(f)$ 와 곱하여 주파수 영역의 출력 $Y(f)$ 를 구한다. 이를다시 역푸리에 변환하여 시간영역에서의 출력파형 $y(t)$ 을 구할 수 있다.

$$x(t) * h(t) = y(t) \quad (1)$$

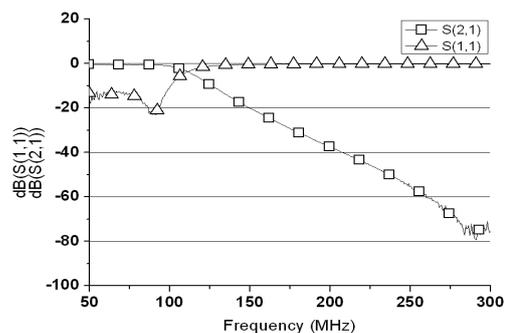
$$X(f) \cdot H(f) = Y(f) \quad (2)$$

2.1.2 저대역 통과 필터의 설계

-20dB 이상의 저지특성을 갖는 저대역 통과 필터를 설계하였다. 필터의 크기를 줄이기 위하여 마이크로스트립라인(Micro-strip-line)으로 전체를 다 구현하지 않고, Lumped Element L, C를 이용하여 마이크로 스트립라인에 부착하는 방법을 선택하였다. 이때 사용된 기판은 FR-4 ($\epsilon_r=4.6$, $h=1.6\text{mm}$)이다. 이렇게 설계된 필터는 차단주파수 $f_c=110$ MHz이다. 필터의 구조는 <그림1>과 같이 나타내어지고, 필터의 특성인 S-parameter는 <그림2>와 같이 측정되어 나타내져 있다.



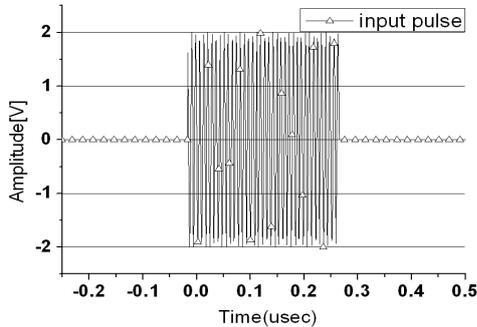
<그림 1> 필터의 레이아웃 (W1=3mm, W2=3mm, W3=3mm, $\ell_1=10\text{mm}$, $\ell_2=5\text{mm}$, $\ell_3=2\text{mm}$, $L_1=82\text{nH}$, $L_2=120\text{nH}$, $L_3=33\text{nH}$, $L_4=3.3\text{nH}$, $C_1=47\text{pF}$, $C_2=47\text{pF}$)



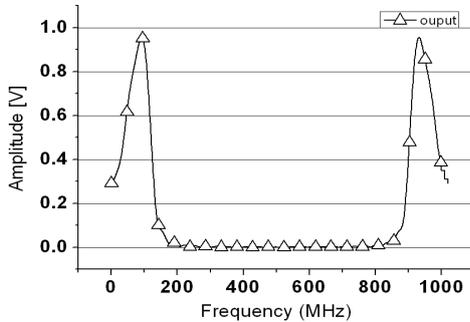
<그림 2> 제작된 저대역 통과필터의 S-parameter

2.2.1 저대역 통과 필터의 주파수 응답 특성

폭 250[ns], 크기 2[V]를 가지는 펄스를 저대역의 주파수에 맞게 변조 ($f_c=160$ MHz)된 시간영역 입력파형인 <그림3>을 푸리에 변환하였다. 식(2)를 이용하여 <그림2>의 필터의 주파수특성 $H(f)$ 인 S_{21} 과 곱하여 얻어진 주파수 영역의 정규화(Normalize)된 출력 $Y(f)$ 는 <그림4>와 같다.



<그림 3> 변조된 시간영역 입력파형($f_c=160$ MHz)

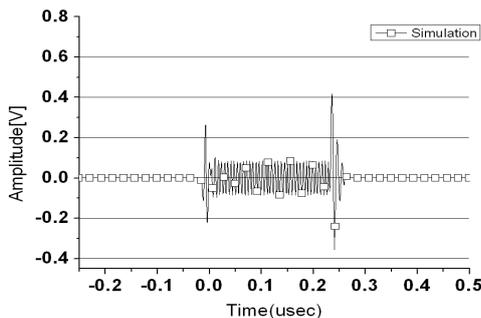


<그림 4> 주파수 영역의 정규화된 출력파형

<그림 4>를 보면 주파수 영역에서 160 MHz에서는 입력에 1[V]가 들어오면 출력은 0.1[V]이 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 필터의 저지특성이 좋을수록 더 낮아질 수 있다. 또한 이러한 특성을 필터 설계를 할때 튜닝을 해주면 고출력이 들어와도 거의 대부분을 저지할 수 있음을 나타낼 수도 있다. 하지만 이러한 상태에서는 과도응답 특성이 확인되지 않는다. 이렇게 과도응답상태가 확인 되지 않은 상태에서는 필터의 특성을 조절하는 것으로 거의 모든 파형을 저지할 수 있게 보인다. 따라서 본 논문과 같이 시간영역에서의 해석이 필요하게 된 것이다.

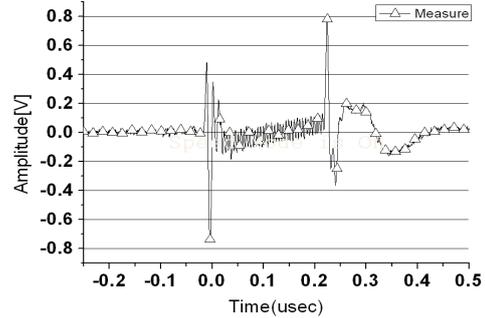
2.2.2 저대역 통과 필터의 시간 응답 특성

전 장에서의 주파수 응답은 과도응답 상태가 확인되지 않기 때문에 <그림 4>를 역푸리에 변환하여 시간영역에서 분석하였다. 시뮬레이션된 시간영역에서의 출력파형은 <그림 5>와 같다. <그림5>를 보면 입력펄스 <그림3>이 통과할때의 저지된 파형이 관측되었다. 주파수 영역의 출력과는 다르게 처음과 끝에서 첨두치가 균일하지 않는 현상이 관측된다. 이는 주파수영역에서는 분석하지 못했던 과도현상이 보여진다. 정규화되어서 입력펄스 <그림3>을 정규화 하여 1[V]가 들어왔을 때 출력에서는 저지되지 못한 0.2[V]~0.4[V]의 크기의 첨두치를 갖는 파형이 존재한다.



<그림 5> 시뮬레이션된 시간 영역의 정규화된 출력파형

시뮬레이션에서 확인한 과도응답을 실험에서도 측정이 가능하였다. 측정된 시간영역의 출력파형은 <그림6>과 같다. 시뮬레이션된 시간영역 출력파형과 측정된 시간영역의 출력파형을 비교해보면 저대역을 통과한 파형이 균일하게 감쇠되지 못하는 현상이 재차 확인 되었다.



<그림 6> 측정된 시간 영역의 정규화된 출력파형

실험과 시뮬레이션을 분석하면 입력펄스가 필터의 저대역을 통과할 때 필터가 모든 파형을 균일하게 감쇠시켜주지 못하고 파형의 처음과 끝부분에서는 감쇠가 적게 되는 것을 확인하였다. 이는 필터의 정상상태에서는 균일한 감쇠가 일어나지만 과도상태에서는 일정량의 입력펄스가 남아 있는 것으로 판단 된다. 또한 이런 현상은 회로앞에 필터가 있어서 고출력 극초단파를 방어하려고 할 때 뒤의 회로를 방어해주지 못하고 영향을 줄 수 있다는 사실을 규명해준다.

시뮬레이션과 실험값의 첨두치가 차이가 발생하는 것은 시뮬레이션을 수행할 때 미소시간이 정의될 때 샘플링되는 개수가 유한하고, 그 값들이 소수점 밑으로 해석되는 자릿수에 한계가 있기 때문에 실험값과 시뮬레이션간의 오차가 발생했다고 판단된다. 또한 파형의 뒷부분을 보면 실험값의 뒤에서 0으로 바로 수렴하지 않고 파형이 크게 한번 출렁거리는 것은 측정을 할 때 장비들에 존재하는 기생 커패시턴스에 의해서 발생하는 응답 속도 차이라고 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 시간영역에서 펄스가 저대역통과 필터의 저대역을 통과할 때 과도응답 특성을 분석하였다. 또한 차단주파수 $f_c=110$ MHz인 저대역 통과 필터를 제작하였다. 회로의 앞에 필터가 장착되어서 고출력 극초단파를 감쇠해주는 현상에 대하여 과도응답 특성과 관련된 대상을 받는 영향에 대하여도 규명하였다. 연구된 자료들은 시뮬레이션과 실험값이 유사하게 나타나서 본 논문의 타당성을 뒷받침해주었다. 입력펄스가 필터의 저대역을 통과할 때 균일한 감쇠가 일어나지 않고 과도응답 특성 때문에 입력의 일정량이 항상 남아서 감쇠가 일어나지 않는다. 이것은 고출력의 입력일 경우 필터를 통과해도 뒤의 대상에 타격을 줄 수 있다는 것을 의미한다.

이상으로 본 논문에서 연구된 내용은 HPM과 관련하여 전자폭탄에 대한 방어를 연구할 때, 대상이 공진기 안에 존재하고 있을 때 타격의 유무를 판별할 때, 원격으로 조정되는 장비에 입사되는 전자파에 의한 오작동을 유발하는 연구가 진행될 때 충분히 활용 가능할 것으로 생각된다. 앞으로 이러한 과도응답을 저지할수 있는 연구가 진행되어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] David M.Pozar, "Microwave Engineering ", Wiley, vol. 3 p p.370-388.
- [2] Samuel D. Stearns, Ruth A. David, "Signal Processing Algorithms In Matlab", PTR.PH, pp.36-63, pp.148-175.
- [3] John L. Semmlow, "Biosignal And Biomedical Image Processing" Marcel Dekker,Inc, pp.31-58, pp.61-84, pp.125-144
- [4] 최은하, "전자기펄스를 이용한 전자폭탄", "국방과 기술", 2006년 10월