

V/UHF 대역 SP3T 송수신 스위치 설계

Design of V/UHF-Band SP3T Transmitting/Receiving Switch

이 병 남* **박 동 철****
Lee, Byeong-Nam Park, Dong-Chul

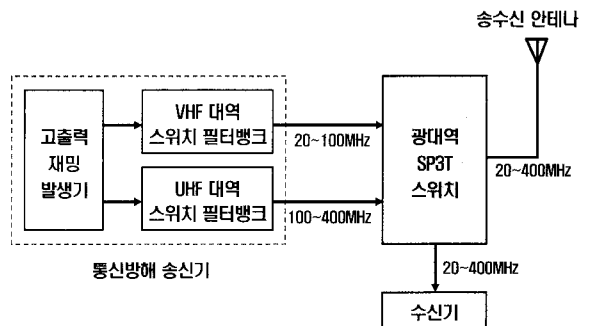
ABSTRACT

This paper describes the design of SP3T PIN diode switch which has a 500W high power handling capability in 20~400MHz frequency range. Design factors were investigated and it was confirmed by simulation that the characteristics of insertion loss, VSWR, and isolation met design goal. Also, the capability to handle 500W high power with very fast switching speed of less than 26μs was confirmed and insertion loss of less than 1dB, VSWR of less than 1.4:1, and isolation of higher than 60dB were obtained by experiments.

주요기술용어(주제어) : Communication Jammer(통신 방해장비), SP3T(Single Pole Triple Throw)

1. 머리말

통신방해 장비는 아날로그 및 디지털 통신신호를 전파 방해하기 위한 군용 장비로서^[1], 그림 1과 같이 고출력 재밍발생기, 스위치 필터뱅크 및 SP3T 송수신 스위치로 구성된다. 여기서 송수신 전환 스위치로 적용되는 SP3T 스위치는 20~400MHz 범위의 광대역에서 동작 가능하며, 송신경로는 수백 W 이상의 고전력을 취급할 수 있어야 하고 수신경로는 원하는 통신 신호 탐지를 위해 작은 삽입손실을 가져야 한다. 또한 수십 μs 이하의 빠른 송수신 전환 스위칭 속도가 요구되며 송신기에서 수신기로 직접 넘어 오는 신호를 차단하기 위해 송수신 격리도가 높아야 한다.



[그림 1] 통신방해장비 송수신 구조

일반적으로 고전력 취급에는 동축 스위치나 도파관 스위치가 사용되지만^[2], 광대역 동작에 적합하지 않으며 스위칭 속도가 매우 느리다는 단점이 있다. 따라서 통신방해 장비와 같이 고전력 취급과 수십 μs의 빠른 스위칭 속도를 만족시키기 위해서는 반도체 스위치를 사용하여야 하며 국내에서도 고전력 스위치를 비롯한 하모닉 제거용 필터 등을 설계한바 가 있다^[3,4].

† 2008년 7월 28일 접수~2008년 9월 19일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

교신저자 이메일 : depark@cnu.ac.kr

본 논문은 광대역 SP3T 반도체 스위치 설계에 관한 것으로서, 고전력 동작에 적합한 Micro-Semi사의 GC4602와 Metelics사의 MPN7380 패키지 PIN 다이오드를 적용하고 스위치 기본설계를 완료하고 상용 톨인 ADS를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 스위치 설계 과정에서는 주요 특성인 삽입손실, VSWR 및 격리도 성능 달성에 초점을 맞춰 직렬 및 병렬 다이오드 개수를 선정하고 다음 RF 초크용 인덕터와 DC 차단용 커패시터 등을 적용하여 스위치 회로를 완성하였다.

스위치는 20~400MHz 범위에서 500W 이상의 고전력 취급과 50µs 이하의 스위칭 속도, 삽입손실 1dB 및 VSWR 1.5:1의 성능을 만족하도록 설계하였다. 또한 송신신호가 수신경로로 넘어오는 것을 차단하기 위한 송수신 격리도는 60dB로 설정하였다. 삽입손실 및 격리도 예측을 위한 이론적 해석^[5]에 따라 직렬 2단 및 병렬 2단의 다이오드 구조와 주변회로가 설계되었고 시뮬레이션을 통해 목표 성능을 만족하는 것을 확인하였다. 제작된 스위치는 실험을 통하여 최대 26µs 이하의 빠른 스위칭 속도로 500W 이상의 고전력을 취급할 수 있고, 삽입손실 1dB, 송수신 격리도 60dB, VSWR 1.4:1 이하의 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다.

2. SP3T 송수신 스위치 설계

가. 고전력 송수신 스위치 설계 요소

본 논문에서 설계하고자 하는 SP3T 스위치는 그림 1에서 볼 수 있듯이, VHF 대역 20~100MHz 범위 및 UHF 대역 100~400MHz 범위의 500W 고전력 신호를 입력 받아 안테나로 전달하고, 안테나로부터 V/UHF 대역 20~400MHz 범위로 수신되는 1W 이하의 저전력 신호를 수신기로 전달하는 기능을 수행한다. 이때 저전력 수신 경로는 20:1 이상의 광대역에서 1dB 이하의 저손실을 갖도록 설계하는 것이 중요한 요소이고, 고전력 취급을 위한 송신경로는 500W 수준의 고전력 취급과 1dB 이하의 삽입손실 및 60dB 이상의 격리도를 달성하는 것이 설계의 중요한 요소이다.

일반적인 고전력 스위치로는 동축 스위치 또는 도파관 스위치가 흔히 사용되는데, 이러한 스위치는 대역폭이 좁고 특히 스위칭 속도가 매우 느리다는 단점이 있다. 또한 상용으로 쉽게 접할 수 있는 반도체 스위치는 스위칭 속도가 빠른 반면 취급전력이 수 W 급 이하의 특성을 갖고 있다.

[표 1] 스위치 성능비교

구분	설계목표	일반적인 반도체형	일반적인 동축형
스위칭속도	50µs	수백 ns 수준	수십 ms 수준
취급전력	500W	수 W급	수 kW급
삽입손실	1.0dB	1.5dB 수준	1.1dB 수준
격리도	60dB	60dB 수준	80dB 수준
VSWR	1.5:1	2.0:1 수준	1.1:1 수준

표 1은 본 논문에서 다루고자 하는 고전력 스위치의 목표성능과 일반적인 상용 스위치들의 성능을 비교한 것으로서, 본 논문의 경우처럼 수십 µs 수준의 스위칭 속도가 요구되는 경우에는 필수적으로 반도체 스위치를 사용하여야 한다. 그런데 일반적인 반도체 스위치는 대부분이 수 W급 이하의 저전력용으로서 500W 이상의 고전력 취급을 위해서는 상용 제품을 쉽게 적용할 수 없으므로 전용의 고전력 스위치를 설계하여야 한다.

한편 고전력 스위치 설계를 위해서는 스위칭 속도와 취급전력을 만족시키는 것도 중요하지만 고전력 운용 조건에서 삽입손실과 격리도 특성을 좋게 하는 것도 매우 중요한 요소이다. 즉, 고출력으로 증폭된 신호를 최소한의 손실로 안테나로 전달할 수 있어야 하고, 또한 고전력의 송신신호가 수신경로로 직접 유입될 경우 장비의 고장이나 오동작을 유발하게 되므로 유입신호를 최대한 차단할 수 있어야 한다.

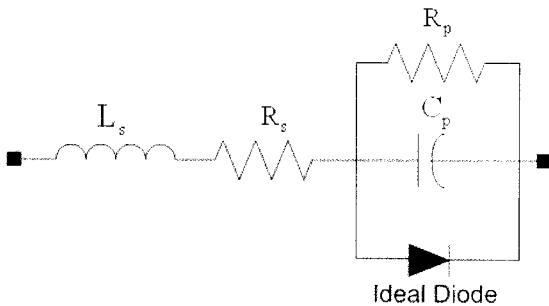
스위치의 삽입손실과 격리도는 기본적으로 직렬 및 병렬 다이오드의 적용 개수에 따라 달라지며(그림 3, 4 참조) 삽입손실과 격리도 요구조건을 동시에 만족시키도록 적절한 다이오드의 개수를 선정하여야 한다.

아울러 고전력 취급이라는 특수성을 감안하여 모든 소자는 고전력 취급에 적합한 것을 적용하여야 하며, 패라이트 코어를 이용한 인덕터 설계와 방열구조를 고려한 레이아웃 설계 및 수백 볼트 수준의 고전압 역 바이어스 설계 등도 중요한 요소이다.

나. SP3T 스위치 회로 설계

고전력 스위치 설계를 위한 주요 성능 항목에는 취급전력, 스위칭 속도, 삽입손실, VSWR 및 격리도 등이 있으며, 이러한 성능을 만족시키기 위해 선정된 다이오드의 이론적 성능검증과 고전력 스위치 설계를 다음과 같이 진행하였다. 일반적으로 패키지 다이오드는 그림 2와 같은 등가회로 모델로 표현되는데^[6], 다이오드가 on 되는 경우 기생 인덕턴스 L_s 와 직렬 저항 R_s 성분으로 등가화 되며 off 되는 경우에는 병렬 저항 R_p 및 커패시턴스 C_p 성분이 추가되어 등가화 된다.

그런데 일반적으로 R_s 는 매우 작으며 R_p 는 매우 큰 값을 갖게 된다. 따라서 다이오드가 on 되는 경우 직렬저항 R_s 가 작기 때문에 비교적 작은 삽입손실을 구현할 수 있고, off 되는 경우 병렬저항 R_p 가 크기 때문에 비교적 높은 격리도를 구현할 수 있게 된다.



[그림 2] 패키지 다이오드 등가 회로 모델

다음으로 취급전력 및 스위칭 속도는 다이오드 등가 모델을 이용하여 이론적으로 계산함으로써 예측 가능하다^[6]. 단일 다이오드만 적용한다고 가정할 경우, 직렬 다이오드의 취급전력 P_s 는 식 (1)과 같이 계산되며 병렬 다이오드의 취급전력 P_p 는 식 (2)와 같이 계산되어 진다.

$$P_s = \frac{(2Z_0 + R_s)^2}{4Z_0 R_s} P_d \tag{1}$$

$$P_p = \frac{R_p}{Z_0} P_d \tag{2}$$

본 논문에서 선정된 Micro-Semi사 GC4602 PIN 다이오드의 경우 제작사 데이터에 따라 직렬저항 $R_s = 0.75\Omega$, 병렬저항 $R_p = 30k\Omega$, 다이오드 자체 소모전력 $P_d = 50W$ 가 적용되었고, 부하 임피던스는 $Z_0 = 50\Omega$ 이 적용되었다. 식 (1)과 (2)에 따라 취급전력 P_s 와 P_p 는 각각 3.4kW와 30kW로 계산되어 목표 값인 500W 이상의 고전력 취급이 가능함을 알 수 있었다.

스위칭 속도는 스위치 off에 소요되는 시간 T_{FR} 과 스위치 on에 소요되는 시간 T_{RF} 로 구분되는데, 일반적으로 T_{FR} 이 큰 값을 가지며 식 (3)과 같이 계산된다.

$$T_{FR} = \tau \log_e \left(1 + \frac{I_F}{I_R} \right) \tag{3}$$

여기서 τ 는 다이오드의 carrier lifetime으로 제작사 제시자료에 의하면 10 μ s이고, I_F 는 순방향 전류, I_R 은 초기 역방향 전류를 나타낸다. 식 (3)에 따라 계산하면 단일 다이오드의 T_{FR} 은 약 7 μ s가 되는데, 실제의 경우에는 여러 개의 다이오드가 사용되고 주변회로와 구동회로 등이 추가되므로 최종적인 스위칭 속도는 단일 다이오드에 대해 이론적으로 계산한 결과보다 다소 길게 나타난다. 어쨌든 단일 다이오드의 이론적 계산결과를 통해 예측해 보면 스위칭 속도 목표 값인 50 μ s는 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

한편 스위치가 충분한 격리도를 갖기 위해서는 단일의 직렬 다이오드 또는 단일의 병렬 다이오드 구조를 사용하는 것보다 몇 개의 직렬 및 병렬 다이오드를 혼합하여 사용하는 것이 효과적이다^[6]. 단, 이때 격리도만을 고려하여 다이오드 개수를 증가시킬 경우 삽입손실이 증가하게 되므로 삽입손실과 격리도 조건을 동시에 고려하여 다이오드 개수를 선정하여야 한

다. 직렬 및 병렬 다이오드를 각각 한 개씩 사용할 경우의 삽입손실 IL 과 격리도 I_{so} 는 각각 식 (4)와 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

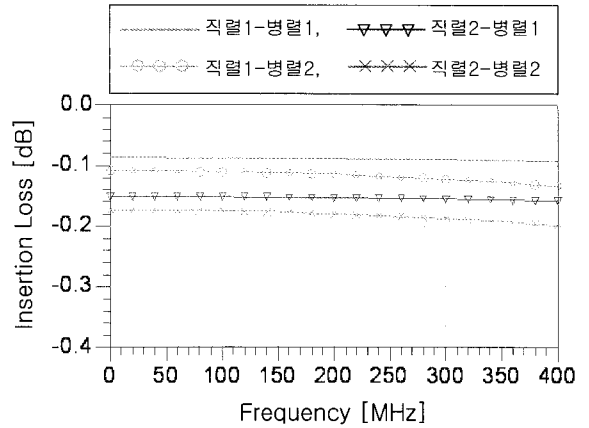
$$IL = 10 \text{ Log} \left[\left(1 + \frac{R_s}{2Z_0} \right)^2 + (\pi f C_p)^2 (Z_0 + R_s)^2 \right] \quad (4)$$

$$I_{so} = 10 \text{ Log} \left[\left(1 + \frac{Z_0}{2R_s} \right)^2 + \left(\frac{1}{4\pi f C_p Z_0} \right)^2 \left(1 + \frac{Z_0}{R_s} \right)^2 \right] \quad (5)$$

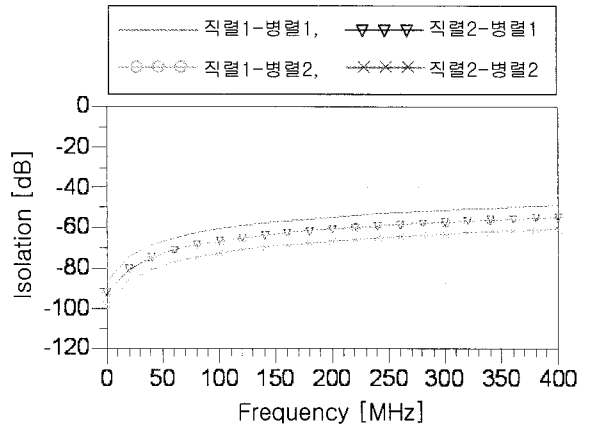
제작사 데이터에 따라 $C_p=1\text{pF}$ 를 적용하고 사용주파수 범위 내에서 가장 불리한 조건인 400MHz에서의 삽입손실과 격리도를 식 (4)와 (5)로 계산한 결과, 삽입손실 IL 은 0.09dB, 격리도 I_{so} 는 48.68dB로 계산되었다. 그림 3과 4는 직렬 및 병렬 다이오드 개수의 조합에 따른 삽입손실 및 격리도를 ADS로 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 3과 4에서 보면 충분한 격리도를 얻기 위해서는 직렬 및 다이오드의 개수가 늘어나야 하며 이럴 경우 삽입손실도 거의 비례적으로 늘어나는 것을 알 수 있다($L_s=0$ 으로 가정). 그림 3을 보면 다이오드 개수가 증가함에 따라 삽입손실이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 병렬 다이오드 보다는 직렬 다이오드가 삽입손실에 더욱 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

직렬 및 병렬 다이오드를 1개씩 적용하여 삽입손실을 시뮬레이션 한 결과, 그림 3에서 보듯이 400MHz 조건에서 0.1dB 보다 약간 작은 값을 갖는 것으로 나타나 식 (4)로 계산한 0.09dB와 거의 일치함을 보여주었다. 그리고 직렬 및 병렬 다이오드가 1개씩 적용된 경우 400MHz에서의 격리도는 그림 4에서 보듯이 약 50dB 정도로서 이 역시 식 (5)로 계산한 48.68dB와 유사한 결과로 나타났다. 그림 4를 통해 볼 때 다이오드 개수만을 고려하여 60dB 격리도 조건을 만족시키려면 최소한 직렬 2단 및 병렬 2단이 필요함을 알 수 있다. 또한 이와 같이 직렬 2단 및 병렬 2단을 사용할 경우의 삽입손실은 그림 3에서 보면 약 0.2dB 이하가 되므로 목표 값인 1dB를 충분히 만족시킬 수 있는 정도이다.

따라서 격리도와 삽입손실 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 직렬 2단 및 병렬 2단의 다이오드 구조



[그림 3] 다이오드 구조에 따른 삽입손실 변화



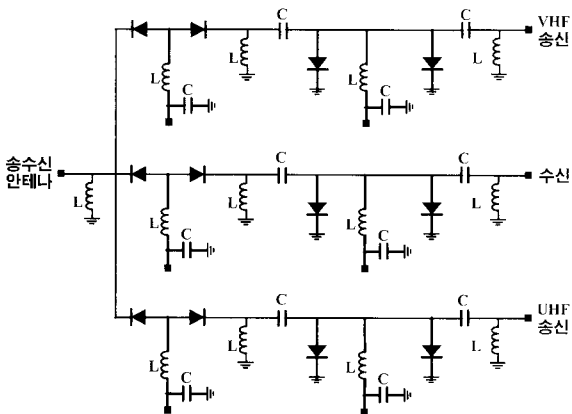
[그림 4] 다이오드 구조에 따른 격리도 변화

를 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단되었다. 그런데 다이오드만 적용하여 삽입손실과 격리도를 계산한 결과보다 실제로는 인덕터와 커패시터가 추가될 경우 삽입손실은 큰 변화가 없지만 격리도는 상대적으로 더욱 좋아지는 결과가 나타난다. 결국 직렬 2단 및 병렬 2단을 적용한 최종적인 스위치 회로는 1dB 삽입손실 및 60dB 격리도 달성이 충분한 것으로 예상되었다.

한편 고전력 응용에서 직렬 다이오드는 하모닉 특성의 개선을 위해 일반적으로 두 개의 직렬 다이오드가 마주보는 형태인 back-to-back 구조로 설계한다^[7,8]. 따라서 본 논문에서는 직렬 다이오드에 back-to-back 구조를 적용하였고 RF 초크용 인덕터와 DC

차단용 커패시터를 사용하여 최종적으로 그림 5와 같은 스위치 회로를 설계하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 설계된 스위치는 20~100MHz 범위의 VHF 송신경로와 100~400MHz 범위의 UHF 송신경로 그리고 20~400MHz 범위의 초 광대역 수신경로를 갖고 있다.

여기에서 인덕터는 RF 초크 기능을 수행하며 커패시터는 바이어스용 DC가 RF 포트로 전달되는 것을 차단하는 기능을 수행한다. 그런데 인덕터와 커패시터는 스위치의 전체적인 삽입손실에 영향을 줄 수 있고 격리도를 증가시키게 되므로 시뮬레이션을 통해 삽입손실 및 격리도 성능이 만족되도록 적절한 인덕턴스와 커패시턴스 값을 선정하여야 한다.



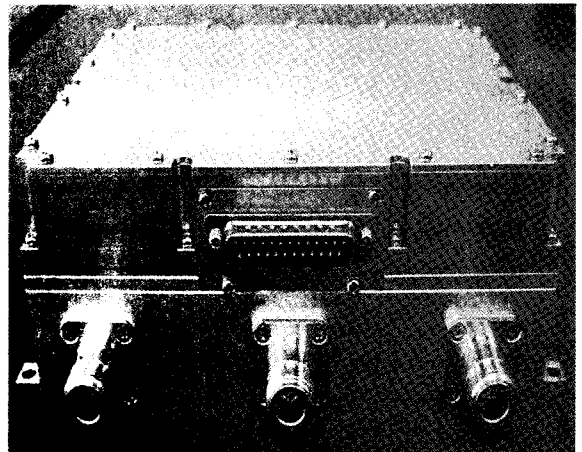
[그림 5] 설계된 SP3T 스위치 회로도

최종 설계된 SP3T 스위치에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과, 삽입손실 1dB 이하, VSWR 1.4:1 이하, 송수신 격리도는 60dB 이상으로 나타나 설계 목표값을 모두 만족함을 알 수 있었다(그림 7~9 참조).

3. 스위치 제작 및 실험

제작된 고전력 스위치는 가로 192mm, 세로 122mm, 두께 70mm의 크기로서 그림 6과 같으며, 고전력 취급에 적합하도록 전체적으로 방열처리 구조를 고려하여 알루미늄 케이스 내부에 장착하였다. 스위치 제작은 테프론 기판을 사용하여 다이오드와 커패시터 및

인덕터를 부착함으로써 완료하였고, 인덕터는 TT2-111 페라이트 코어와 에나멜 선재 1.2 ϕ 를 사용하여 직접 제작한 것을 적용하였다.

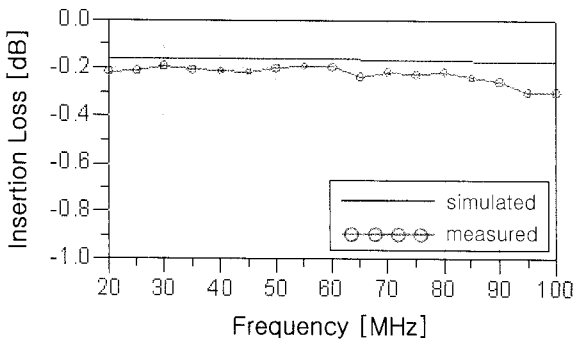


[그림 6] 제작된 SP3T 스위치

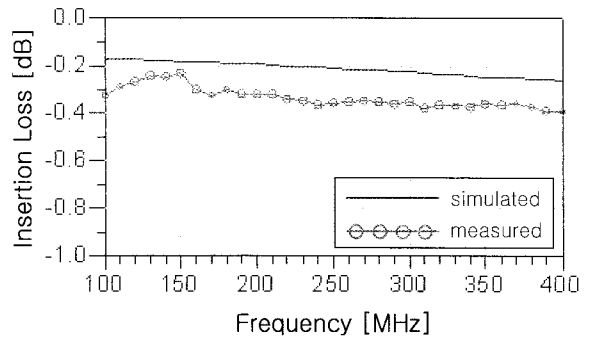
또한 역 바이어스 전압은 VSWR 2:1 조건에서 이론적으로 293V가 요구되는데 충분한 값을 갖도록 375V로 제작하였다. 스위치의 기본적인 성능실험은 회로망 분석기를 사용하여 저전력 입력 조건에서 삽입손실 및 반사손실을 측정하고 송수신 포트간의 격리도를 측정하였다. 그리고 스위칭 속도는 오실로스코프를 사용하여 입력신호와 출력신호간의 시간차를 측정함으로써 성능을 확인할 수 있었다. 그림 7부터 9까지는 제작된 고전력 스위치의 VHF 송신경로, UHF 송신경로 및 수신경로 각각에 대한 성능실험 결과를 나타낸 것이다.

그림 7에서 보면 VHF 송신경로의 삽입손실은 시뮬레이션 및 실험결과가 거의 유사함을 알 수 있고 약 0.3dB 이하의 우수한 삽입손실 특성을 갖는 것으로 나타났다. 반면 VSWR은 시뮬레이션과 실험결과가 다소 차이를 보였는데, 이론적인 등가모델에서 적용한 인덕턴스와 커패시턴스 데이터가 실제와 약간의 차이가 있기 때문에 발생된 결과로 예측되었다. 그러나 전체적으로 1.4:1 보다 작은 VSWR을 가짐으로써 목표성능인 1.5:1 조건을 만족하였고 격리도도 약 70dB 이하로 우수한 성능을 보여주었다.

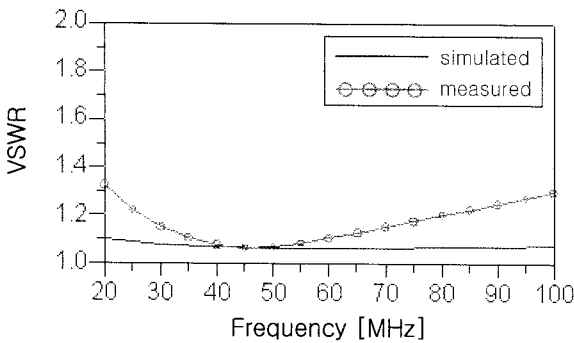
그림 8은 UHF 송신경로의 시뮬레이션 및 실험결



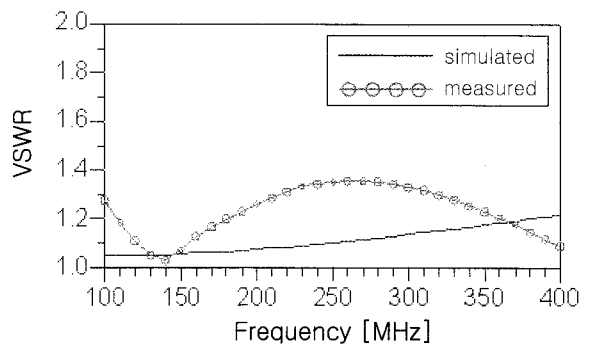
(a) 삽입손실



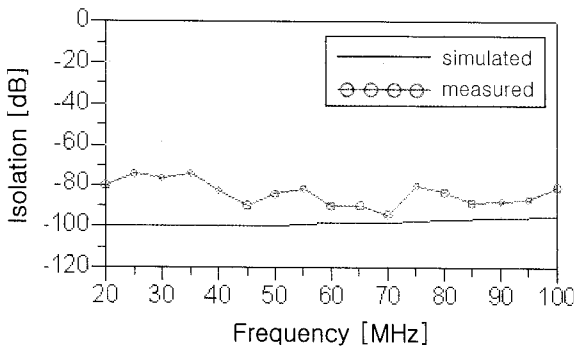
(a) 삽입손실



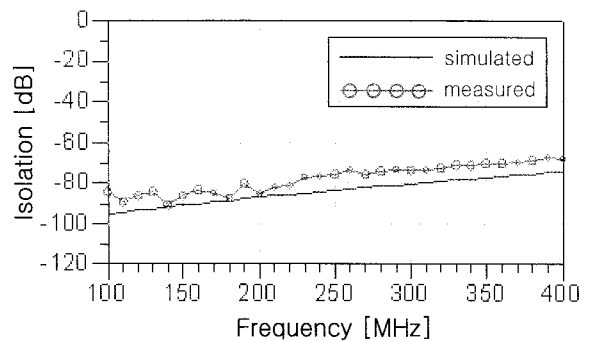
(b) VSWR



(b) VSWR



(c) 격리도



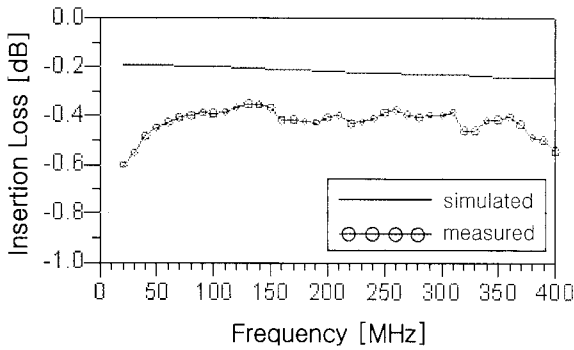
(c) 격리도

[그림 7] SP3T 스위치 VHF 송신경로 측정결과

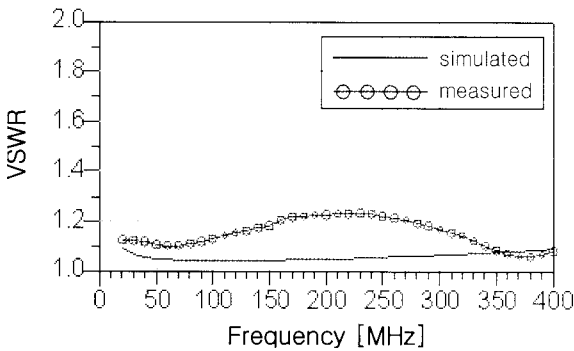
[그림 8] SP3T 스위치 UHF 송신경로 측정결과

과로서, 삽입손실과 격리도는 주파수에 따른 변화 추이가 비교적 잘 일치하였고 0.4dB 이하의 삽입손실과 60dB 이상의 격리도를 가짐을 보여주었다. VSWR은 VHF 송신경로에서와 유사한 이유로 시뮬레이션과 실험결과 사이에 다소 차이를 보였으나, 1.5:1 이하의 목표성능을 만족함을 알 수 있었다.

그림 9는 수신경로의 시뮬레이션 및 실험결과로서, 두 결과가 약간의 차이를 보여주었다. 이 역시 이론적 등가모델이 다소의 오차 요소를 포함하고 있기 때문에 나타난 결과로 예측되었고, 전체적으로는 0.6 dB 이하의 삽입손실과 1.3:1 이하의 VSWR을 갖고 있었다.



(a) 삽입손실



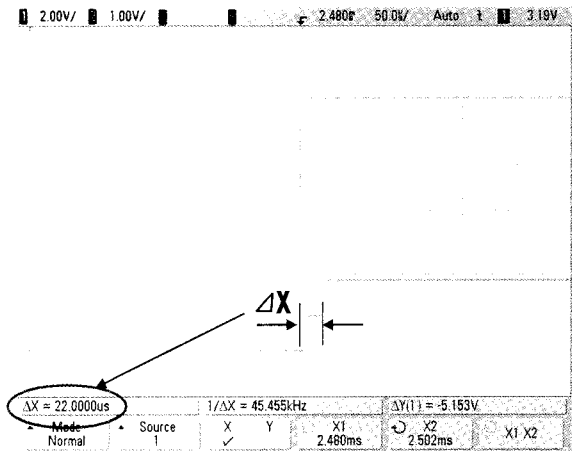
(b) VSWR

[그림 9] SP3T 스위치 수신경로 측정결과

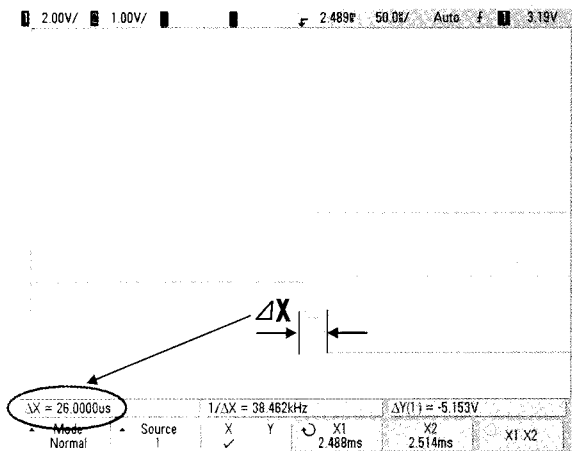
스위칭 속도는 스위치를 on 및 off 시키는데 소요되는 시간을 오실로스코프로 측정하였으며, 그림 10에서 볼 수 있듯이 on 시간은 22 μ s, off 시간은 26 μ s로서 설계 목표인 50 μ s 이하를 만족하였다. 한편 스위치의 고전력 실험에는 일반적으로 회로망 분석기만을 사용하는 저전력 실험에서보다 다소 복잡한 실험구성이 요구된다.

그림 11은 스위치 고전력 실험을 위한 실험 구성도를 보여주고 있다. 또한 그림 12는 고전력 실험을 위한 각종 계측기 등이 설치된 실험장면을 보여주는 것으로서, 고전력 실험에는 상용 계측장비와 더불어 고전력 전용 부품들이 사용되었다.

실험에는 Agilent사의 E4432B 신호발생기, EMPOWER사의 VHF 2kW 증폭기(모델명 2110-BBS2E3CXV) 및 UHF 1kW 증폭기(모델명 2074-BBS3C3KUT), HP사의 6521A DC 전원공급기, BIRD

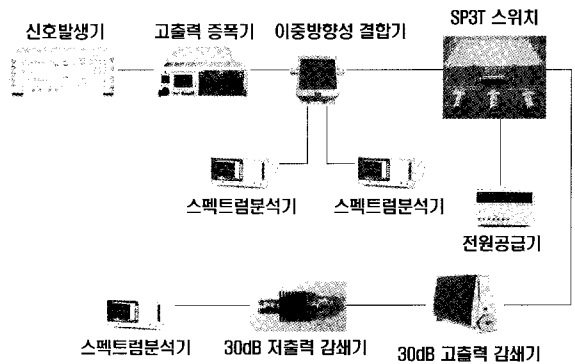


(a) on 시간

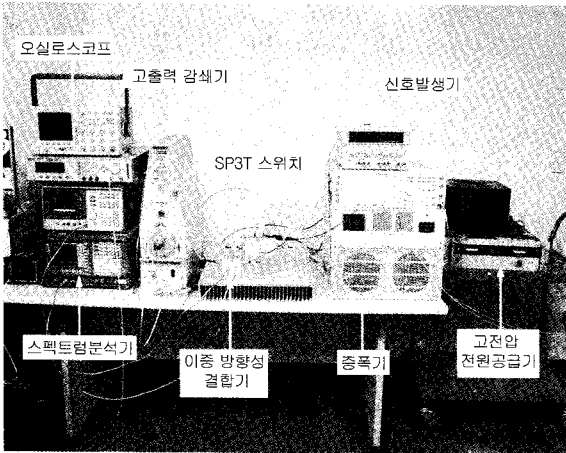


(b) off 시간

[그림 10] 스위칭 속도 측정결과



[그림 11] 스위치 고전력 실험장치 구성도



[그림 12] 스위치 고전력 실험 장면

사의 4kW용 30dB 감쇄기(모델명 BA-300-230)과 WERLATONE사의 VHF 50dB 이중방향성 결합기(모델명 C5951-12) 및 UHF 50dB 이중방향성 결합기(모델명 C3908-10), Agilent사의 E4407B 스펙트럼 분석기 등이 사용되었다.

고전력 취급능력은 그림 11과 같은 실험구성을 통해 스위치 입력포트 및 출력포트의 신호세기를 스펙트럼 분석기로 측정하는 방법으로 확인하였다. 고전력 실험은 500W 신호를 3분간 연속적으로 입력하면서 스위치가 정상적으로 동작하는지를 확인하였고 스펙트럼 분석기를 통해 확인한 결과 1dB 이하의 삽입손실로 출력됨을 확인하였다. 저전력 시험 및 고전력 시험의 결과를 종합적으로 요약하면, 설계된 스위치는 취급전력 500W, 스위칭 속도 26 μ s, 삽입손실 1dB, 격리도 60dB 및 VSWR 1.4:1의 우수한 특성을 갖고 있었다.

4. 맺음말

본 논문은 광대역 SP3T 반도체 스위치 설계에 관한 것으로서, 통신방해 장비의 송수신 전환 스위치로 적용하기 위해 V/UHF 대역의 고전력 신호 취급 및 빠른 스위칭 속도를 갖도록 설계하였다. 스위치 설계 및 해석에는 상용 시뮬레이션 툴인 ADS를 사용하였고, 삽입손실 및 격리도 예측을 위한 이론적 해석을

통해 직렬 2단 및 병렬 2단의 다이오드로 구성되는 스위치 기본회로 및 주변회로를 설계하였다.

시뮬레이션 결과 삽입손실, VSWR 및 격리도 특성이 원하는 성능을 만족함을 확인하였다. 제작된 스위치는 실험을 통하여 20~400MHz 범위에서 500W 이상의 고전력 취급이 가능하며 최대 26 μ s 이하의 빠른 스위칭 속도와 1dB 이하의 낮은 삽입손실을 갖고, 60dB 이상의 높은 송수신 격리도와 1.4:1 이하의 낮은 VSWR 성능을 갖는 등 전체적으로 설계목표 보다 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] Richard Poisel, "Introduction to Communication Electronic Warfare Systems", Artech House, 2002.
- [2] Joseph F. White, "Microwave Semiconductor Engineering", Van Nostrand Reinhold Company Inc., pp. 358~362, 1982.
- [3] 이병남, 박영주, 이규송, 박범준, "VHF 광대역 2 kW급 대전력 스위치 개발", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 389~392, 2007년.
- [4] 이병남, 이규송, 박범준, "통신대역 고출력용 하모닉 제거 필터 설계", 통신/전자 학술대회, 2006년.
- [5] Gerald Hiller, "Design with PIN Diodes", Application Note, AG312.
- [6] 김동욱, 김경학, 김보래, "와이브로 기지국 시스템을 위한 고전력 PIN 다이오드 스위치 모듈과 고속 스위치 구동회로의 구현", 한국전자과학회논문지, 18(4), pp. 364~371, 2007년 4월.
- [7] R. Tenenholtz, "A 2000 Watt CW MIC 20-500 MHz SPDT PIN Diode Switch Module", IEEE International Microwave Symposium Digest, Vol. 81, pp. 252~254, June 1981.
- [8] Martin Caulton, Arye Rosen, Paul J. Stabile and Anna Gombar, "p-i-n Diodes for Low-frequency High-power Switching Applications", IEEE MTT Vol. 30, No. 6, pp. 875~882, June 1982.