J. Astron. Space Sci. 18(2), 119-128 (2001)

공진 포스트 구조를 갖는 Q-band 도파관형 건 발진기의 임베딩 임피던스 해석

김현주[1†], 한석태[2], 김태성[2], 김광동[2], 이창훈[2], 정문희[2], 김용기[3]
[1]*Gio Communication*(주)
[2]한국천문연구원 대덕전파천문대
[3]충북대학교 천문우주학과

AN ANALYSIS OF EMBEDDING IMPEDANCE FOR Q-BAND WAVEGUIDE GUNN OSCILLATOR WITH RESONANCE POST

Hyunjoo Kim[1†], Seogtae Han[2], Taiseong Kim[2], Kwangdong Kim[2], Changhoon Lee[2], Moonhee Chung[2], Yonggi Kim[3]
[1]Gio Communication Inc., Seoul, 100-273, Korea
[2]Taeduk Radio Astronomy Observatory, Korea Astronomy Observatory Taejon, 305-348, Korea
[3]Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University Cheongju, 361-763, Korea
E-mail: hjkim@trao.re.kr, sthan@trao.re.kr

(Received September 20, 2001; Accepted October 20, 2001)

요 약

도파관형 건 발진기의 발진주파수 범위와 주파수 안정도는 공진기 치수에 따른 임피던스에 민감하다. 그러므로 HFSS (High Frequency Structure Simulator)을 이용하여 공진기의 치수에 따른 임베딩 임피던스 (embedding impedance)를 계산하였다. 본 논문에서는 주파수 함수를 갖는 Q-band (33 ~ 50 GHz) 건 발진기의 임베딩 임피던스의 이론적인 결과와 실제 제작한 발진기의 실험측정 결과를 비교하여 이론적 해석의 타당성을 검증하였다. 그리고 본 논문에서 제시한 방법에 의한 이론적 해석만으로 발진주파수 범위를 예상할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

The oscillation frequency tuning range of waveguide Gunn oscillator and its stability depend sensitively on the dimensions of the resonator. Therefore the embedding impedances with the various dimensions of the resonator for Q-band (33 ~ 50 GHz) Gunn oscillator are calculated by using HFSS (High Frequency Structure Simulator). In this paper the comparisons between theoretical results of embedding impedances as a function of frequency and that of experimental results are described. And the oscillation frequency range could be predicted by using the theoretical evaluation methods which were proposed in this paper. It shows that post size has an effect on the frequency tuning characteristics of Gunn oscillator.

Key words: Radio telescopes and instrumentation, heterodyne receivers, oscillators

†corresponding author

1. 서 론

우주전파 관측용 수신기의 국부발진기에 활용되는 발진기는 높은 주파수 안정도와 작은 잡음 특성을 가져야 한다. 그러므로 밀리미터파 대역에서 사용되는 건 다이오드 (Gunn diode)는 작은 잡음과 넓은 주파수 대역 특성 때문에 밀리미터파 발진기에 널리 활용되고 있다.

밀리미터파 대역의 발진기는 도파관형 건 발진기가 주로 사용되고 있으며, 이러한 발진기의 발진주파수 범위와 주파수 안정도는 발진기를 구성하는 공진기의 구조에 따라 매우 민감하게 변화한다. 따라서 여러 가지 형태의 공진기에 관한 많은 연구가 수행되고 있다 (Haydl 1983, Jethwa & Gunshor 1972, Holzman & Robertson 1992). 이러한 공진기의 형태는 크게 디스크 (disc)형과 포스트 (post)형이 있다. 일반적으로 디스크형은 주로 60 GHz 이상의 발진기에 사용되는 반면에, 포스트형은 60 GHz 이하의 발진기에 사용되고 있다.

지금까지 여러 가지 형태의 발진기용 공진기 구조에 따른 발진주파수 변화에 대한 연구는 직접 공진기를 제작하여 실험을 통하여 수행되었다. 따라서 본 논문에서는 공진기를 제작하지 않고 공진기 구조에 따른 발진기 회로의 임베딩 임피던스 (embedding impedance)에 대한 이론적 해석을 통하여 발진기의 발진주파수를 예상할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

한편 본 논문에서는 Q-band(33 ~ 50 GHz) 대역 발진기의 공진기 구조에 따른 발진주파수 변화를 고찰하고자 포스트를 이용한 공진기를 사용하기로 하였다. 그리고 건 다이오드와 도파관 공진기의 임피던스를 정합하는 공진기 구조에 따른 발진주파수 변화를 이론적으로 검증하기 위해 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 값은 Bates & Ko (1990)의 결과 값과 비교하여 시뮬레이션 방법의 타당성을 검증하였다.

본 논문에서는 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 건 발진기를 설계·제작하였다. 제작한 Q-band 도파관형 발진기는 바이어스 쵸크 (bias choke), 도파관 임피던스 변환기 (waveguide impedance transformer), 공진 포스트 (resonance post), 주파수 조절 백쇼트 (frequency tuning backshort)로 구성되어 있으며, 각 부분에 대한 제작방법을 제시하였다. 그리고 이론적 해석 결과에 따라 여러 가지 포스트 구조를 제작하여 그에 따른 발진주파수 변화에 대하여 측정하고 그 결과를 제시하였다.

2. 설계 및 제작

2.1. 저역통과 필터의 설계

저역통과 필터 (low-pass filter)의 기능을 하는 바이어스 쵸크의 단면도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 ϵ_0는 공기 유전율 (1)이고, ϵ_r은 테플론 (teflon)의 유전율 (2.08)로써 바이어스 쵸크가 건 블록 (block)과 접촉되어 바이어스 전압이 단락 (short)되는 것을 방지하는 역할을 한다. 저역통과 필터는 Lidholm (1977)와 김현주 외 (2000)가 제시한 방법으로 설계하였다.

최종적으로 설계한 저역통과 필터는 5단으로 구성되어 있으며, 각각의 치수는 D=3.0 mm, d1=2.9 mm, d2=1.2 mm로 결정하였다. 필터의 성능을 검토하기 위해 필터의 입력 임피던스를 계산하였다. 계산 결과, 그림 2에서 볼 수 있듯이 발진신호 대역인 33 GHz에서 50 GHz대역에 걸쳐 임피던스의 저항성분은 거의 0에 접근된 값들을 보이고 있다. 이것은 발진신호 대역의 발진신호 전력이 바이어스 쵸크를 통해 누설되지 않는다는 것을 나타내며, 전형적인 저역통과 필터의 특성을 보인다. 또한

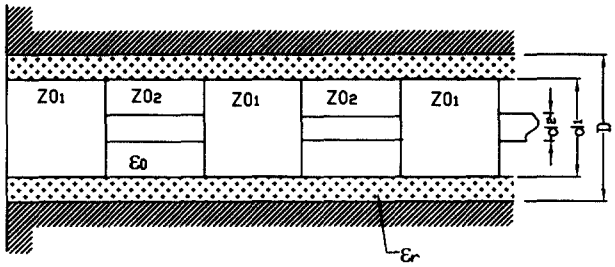

그림 1. 바이어스 쵸크 (저역통과 필터) 단면도.

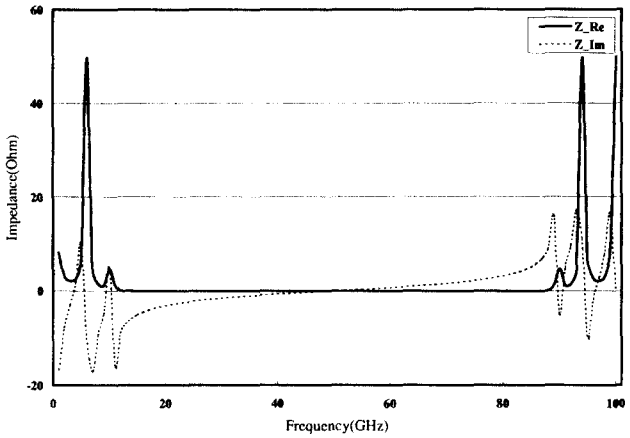

그림 2. 저역통과 필터의 임피던스를 이론적으로 계산한 결과.

발진신호 대역 내에서 리액턴스 (reactance) 성분이 매우 적어 발진회로의 임피던스 정합에 유리함을 알 수 있다. 따라서 발진기에서 사용하고자 하는 바이어스 쵸크용 저역통과 필터가 우수하게 설계되었음이 검증되었다.

2.2. 도파관 임피던스 변환기 (waveguide impedance transformer)의 설계

도파관형 발진기는 비선형 소자를 이용하므로 도파관과 비선형 소자용 마운트 사이의 임피던스 정합을 위해 도파관 임피던스 변환기가 이용된다. 도파관의 특성 임피던스는 도파관의 높이가 낮아짐에 따라 특성 임피던스가 낮아짐으로 도파관의 높이를 줄여서 임피던스 변환을 시킨다. 도파관 변환기의 종류에는 Siegel et al. (1984)에 의하면 변환 부분을 선형적으로 변화시키되 전압 정재파비를 개선하기 위하여 선형적으로 변화된 부분에 벌지 (bulge)형의 구조를 갖는 벌지 선형 변환기와 도파관의 높이를 감소시킨 길이를 $\lambda/4$로 하는 계단형의 두 가지가 있다. 본 논문에서는 제작이 용이하고 특성이 우수한 계단형 도파관 변환기를 이용하여 임피던스 변환기를 설계하였다. 사용주파수가 $33 \sim 50$ GHz인 표준형 (WR-22)과 건 다이오드의 마운트 임피던스 정합과 제작의 용이성을 감안하여 임피던스 비율을 2.4로 하여 494.96Ω을 206.23Ω으로 변환하였다. 변환기의 변환부는 3단을 두었으며, 각 부에 대한 치수는 그림 3에 제시하였다. 설계한 변환기의 성능을 알아보기 위하여 이론적으

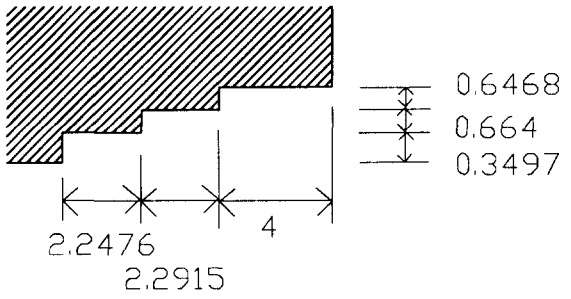

그림 3. 설계한 도파관 임피던스 변환기.

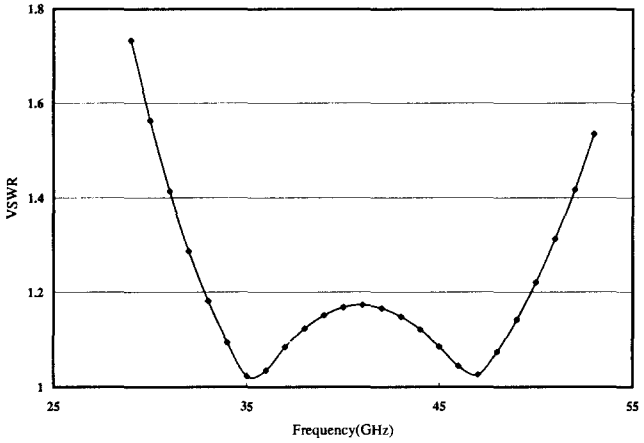

그림 4. 설계한 도파관 임피던스 변환기의 이론적 VSWR 특성.

로 계산한 전압 9정재파비의 결과를 그림 4에 제시하였다. 주파수 범위인 33 GHz에서 50 GHz까지는 전압 정재파비인 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)이 1.3 이하이며 중심 대역에 속하는 35 GHz에서 45 GHz에서는 VSWR이 1.2 이하가 되어 이에 대한 반사손실은 약 20 dB 이상이 되었다. 따라서 임피던스 부정합에 의한 발진전력의 손실이 적다는 것을 알 수 있다.

3. 건 발진기 공진회로의 임베딩 임피던스 (embedding impedance)

건 발진기는 건 다이오드의 임피던스 $Z_{D=R_{diode}} + jX_{diode}$와 다이오드를 제외한 도파관 내에 구성된 회로에 의한 임베딩 (embedding) 임피던스 $Z_{e=R_{circuit}} + jX_{circuit}$가 같을 때 공진을 일으켜 임의의 주파수를 발진하게 된다 (Haydl 1983). 한편 두 임피던스의 저항성 성분과 리액턴스 성분이 서로 같아야 최대의 발진전력과 안정적인 발진을 얻게되며, 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$R_{diode}(f) + R_{circuit}(f) = 0 \quad (1)$$

$$X_{diode}(f) + X_{circuit}(f) = 0 \quad (2)$$

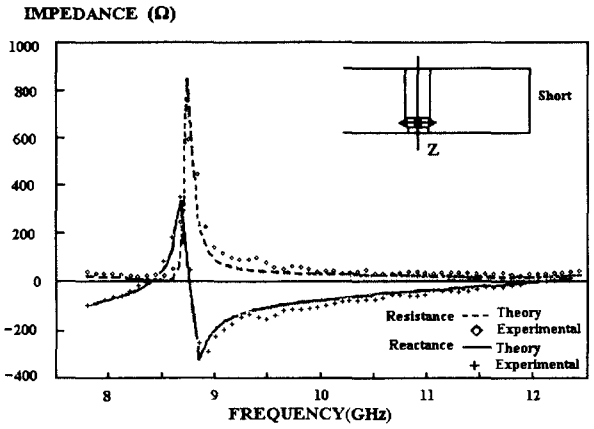

그림 5. Bates & Ko(1990)가 제시한 공진회로의 임피던스.

$$\frac{\partial X_{total}}{\partial f} > 0 \tag{3}$$

일반적인 건 다이오드의 임피던스 저항성분은 수 Ω 정도이고, 리액턴스 성분은 -10Ω에서 10Ω 사이의 값을 갖는다 (Holzman & Robertson 1992). 그리고 임피던스를 변화시킨 WR-22의 도파관 공진기의 임피던스는 206.23Ω이다. 한편 발진 조건인 식 (1)와 (2)를 만족하기 위해서 도파관 공진기에 임피던스 변환기인 공진 포스트를 두었다.

Barth (1981)와 Haydl (1983)에 의하면 발진기의 발진대역은 도파관 공진기의 구조에 따른 여러 가지 조건에 의해 달라지게 된다. 본 논문에서는 포스트 직경의 변화에 의한 발진조건을 검토하였다. 이제까지 도파관 공진기의 구조에 따른 발진주파수는 실험적으로 해석하였지만, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 포스트 직경 변화에 따른 발진주파수 변화를 알아보았다.

3.1. 도파관 공진회로의 임피던스 시뮬레이션 결과

실제 설계한 도파관 공진회로에 대해 HFSS를 이용하여 임피던스를 시뮬레이션을 하였다. 먼저 시뮬레이션 하기에 앞서 해석하고자한 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 그림 5에 Bates & Ko (1990)가 제시한 구조와 같은 규격의 공진회로에 대해 HFSS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 5의 Bates & Ko (1990)가 수행한 모드 (mode) 정합 방법에 의한 수치해석과 실험결과를 본 논문에서 제시한 시뮬레이션 결과인 그림 6과 비교했을 때, 8.5 ~ 9 GHz에서 임피던스 최대값이 리액턴스 성분은 120 정도 차이가 있고, 저항 성분은 150 정도 차이가 있음을 볼 수 있다. 두 값에서 차이가 생기는 이유는 임피던스가 주파수의 함수를 갖기 때문에 주파수를 어떻게 적분을 하였나에 따라 최대값이 변화하기 때문이다. 그 외의 9 ~ 12 GHz 대역에서는 거의 비슷한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 HFSS 시뮬레이터는 본 논문에서 제안된 도파관 공진회로 설계에도 응용될 수 있음을 보여준다.

시뮬레이션은 표 1의 A, B, C의 세 가지 경우에 대해 이루어졌고, 각 경우의 공진 포스트에 50Ω 동축 케이블 (coaxial cable)을 급전 (feeding)하였다. 이 경우, 공진 포스트 중심에서 5 mm 떨어진

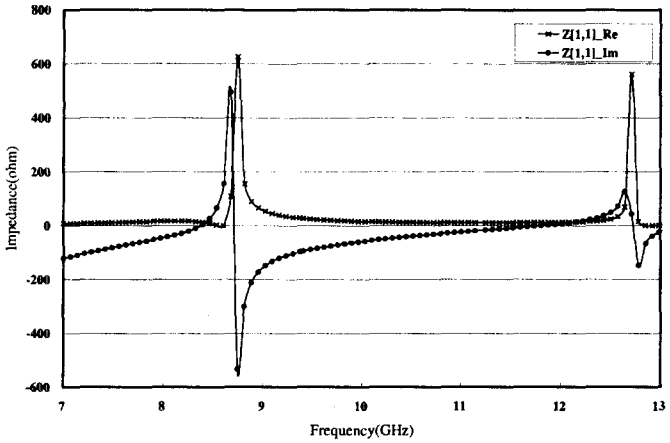

그림 6. Bates & Ko (1990) 논문의 구조와 같은 경우의 시뮬레이션 결과.

표 1. 설계한 공진기의 각 구조에 대한 치수(단위: mm).

	D	H	l	a	b
A	1.2	0.38	0.8	5.69	1.18
B	2.0	0.38	0.8	5.69	1.18
C	2.2	0.38	0.8	5.69	1.18

곳에 백쇼트를 두어 단락이 되도록 하였으며, 출력부분은 임피던스정합이 되었다는 가정 하에, 구형(rectangular) 도파관 내 원통형 포스트 주위의 전자계 분포를 계산하여 임베딩 임피던스를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 한 구조는 그림 7에, 치수는 표 1에 명시하였다.

한편 그림 8, 9, 10은 A, B, C에 대한 주파수에 따른 임피던스 변화 값이다. 실선은 임피던스의 저항 성분이고, 점선은 리액턴스 성분이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 A인 경우 34 ~ 41 GHz 대역에서 실수 성분이 30Ω 이하에 근접함을 알 수 있다. 이는 10Ω 이하인 건 다이오드와 완벽한 정합은 어려워 주파수가 불안정할 수 있음을 알 수 있다. 이에 비해 B와 C는 같은 대역에서 임피던스 실수 값이 B의 경우 20Ω 이하의 값을 갖고, C의 경우 10Ω 이하의 값을 갖는다. 따라서 식 (1)과 (2)에 나타낸 바와 같이 B의 경우와 C의 경우는 도파관 공진기의 임피던스가 건 다이오드 임피던스와의 차이가 적어 보다 용이하게 발진조건에 만족됨을 알 수 있다. 그러므로 포스트 직경이 커질수록 발진주파수가 안정적일 가능성이 크다는 것을 나타낸다. 그리고 경우 A에서의 리액턴스 성분이 37.66 GHz에서 0이 되어 공진이 되고, 경우 B는 34.87 GHz에서, 경우 C는 34.2 GHz에서 각각 공진함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Haydl (1983)이 언급한 바와 같이 같은 백쇼트의 위치에서는 공진 포스트의 직경이 커질수록 낮은 주파수 쪽에서 공진이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 직접 발진기를 제작하지 않고 본 논문에서 제안한 이론적인 시뮬레이션에 의하여 발진기의 발진주파수를 예측할 수 있다.

4. 실험결과

제작한 Q-band용 도파관형 건 발진기의 단면도를 그림 11에 제시하였다. 발진기는 크게 도파관과 임피던스 변환기, 바이어스 쵸크, 공진 포스트, 백쇼트로 구성된다. 본 논문에서 제작한 발진기는

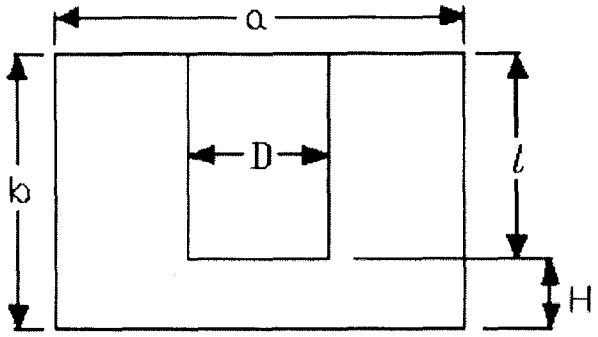

그림 7. 공진 포스트의 구조.

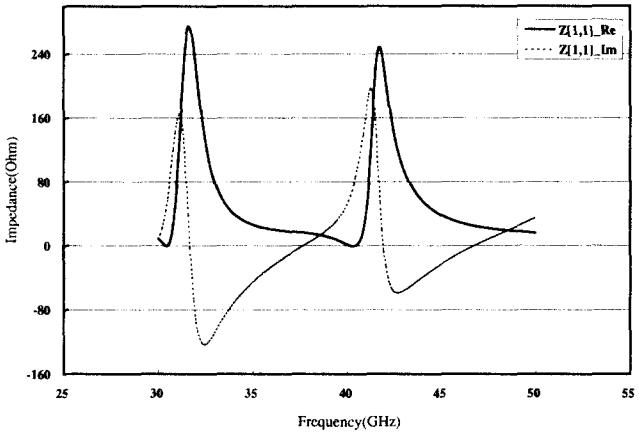

그림 8. 경우 A에 대한 시뮬레이션 결과.

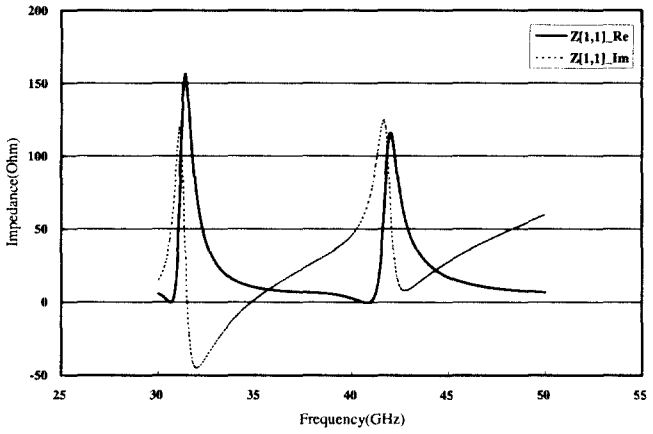

그림 9. 경우 B에 대한 시뮬레이션 결과.

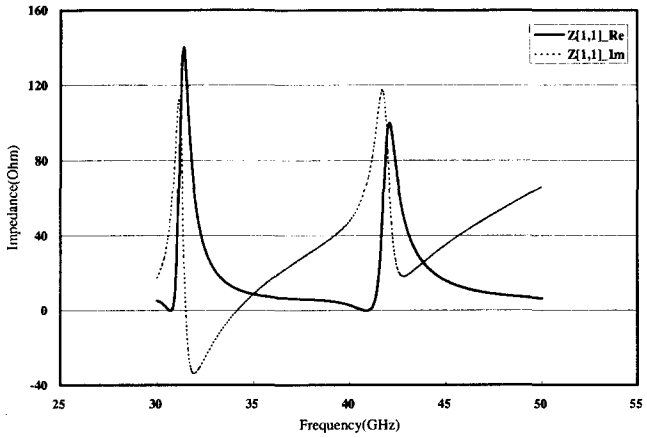

그림 10. 경우 C에 대한 시뮬레이션 결과.

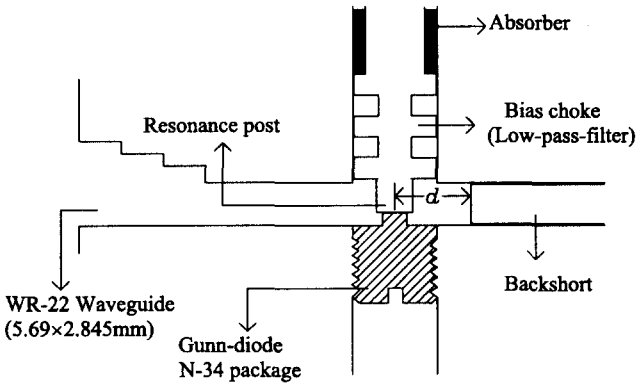

그림 11. Q-band용 건 발진기의 단면도.

WR-22 도파관 ($5.69 \times 1.1854mm$)에 직경이 3 mm인 바이어스 쵸크가 교차되도록 하였으며, 발진주파수 가변을 위한 백쇼트의 구동장치가 장착된 형태이다. 패키지된 건 다이오드는 도파관 바닥에 탭을 만들어 장착하였다. 바이어스 전압은 바이어스 쵸크를 통하여 다이오드에 공급된다. 건 다이오드에 직류 전압을 전달하는 바이어스 쵸크는 테플론으로 둘러싸여 원통형의 홀 (hole)의 벽과 분리시켜 직류 바이어스 전압이 단락되는 것을 방지하였다. 또한 바이어스 쵸크는 발진전력이 바이어스 쵸크를 통하여 누설되는 것을 방지하기 위한 저역통과 필터의 역할도 한다. 본 논문에서 제작한 발진기의 발진주파수는 포스트 직경의 변화, 백쇼트의 이동거리(d)에 의한 임피던스 변화에 의하여 조절된다.

공진 포스트 직경에 따른 발진주파수 대역을 알아보기 위해 표 1에 제시된 공진 포스트의 구조에 대한 경우 A, B, C의 설계값와 동일하게 제작하여 실험을 하였다. 실험은 실내 (온도 25°C)에서 이루어졌고, 건 다이오드에 공급하는 바이어스 전압은 6.25 V였고, 전류는 780 mA이었다. 주파

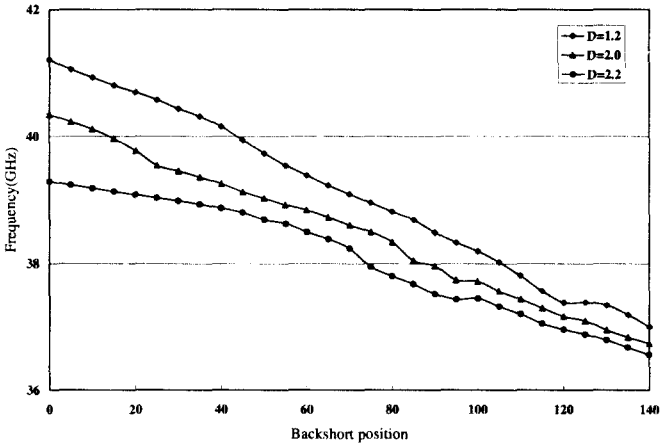

그림 12. 공진 포스트 A (D=1.2), B (D=2.0), C (D=2.2)에 대한 발진주파수와 백쇼트 위치 관계(단위: mm).

수는 백쇼트의 위치를 가변하여 조절하였다. 각각 경우 A, B, C에 대하여 백쇼트의 위치에 따른 발진주파수의 변화에 대한 실험결과를 그림 12에 나타내었다. 그림 12에 제시한 바와 같이 A의 경우 37.0035 ~ 41.2138 GHz, B의 경우 36.7383 ~ 40.3433 GHz, C의 경우 36.5612 ~ 39.2882 GHz 대역에서 발진함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 실험 측정결과에서도 포스트 직경이 클수록 낮은 주파수 쪽에서 발진하는 특성을 얻었다. 따라서 본 논문에서 제시된 시뮬레이션 결과와 실험결과가 일치함으로써 시뮬레이션 방법의 타당성을 확인하였다.

5. 결 론

밀리미터파 우주전파 수신기용 국부발진부에 쓰이는 국부발진기인 도파관형 건 발진기의 설계방법을 제시하고, 공진회로의 이론적 해석과 실험측정 결과를 논의하였다.

발진주파수는 공진기의 구조에 따라 매우 민감하게 영향을 받는다는 이론적 해석을 검증하고자 직경이 다른 공진 포스트를 설계하여 HFSS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 포스트 직경을 변화시키는 A, B, C 세 가지 경우에 대해 이루어졌고, 시뮬레이션 결과를 검증하고자 Bates & Ko (1990)의 결과와 비교하였다. 설계한 공진 포스트를 가공하여 발진기 블록에 장착하여 각 경우에 대하여 실험을 하였다. 실험결과, 시뮬레이션 결과와 동일하게 포스트 직경이 클수록 리액턴스 성분의 공진점 위치가 낮은 주파수에서 생성되어 발진주파수가 낮아짐을 확인하였다. 따라서 공진기를 구조별로 직접 제작하지 않고 본 논문에서 제안한 시뮬레이션 해석방법으로 발진주파수를 미리 예측할 수 있음을 검증하였다.

참고문헌

김현주, 한석태, 김태성, 김용기 2000, 한국우주과학회지, 17, 221

Barth, H. 1981, IEEE, 334

Bates, B. D. & Ko, A. 1990, IEEE MTT-38, 8, 1037

Haydl, W. H. 1983, IEEE MTT-31, 11, 879

Holzman, E., & Robertson, R. 1992, Solid-state microwave power oscillator design (Dedham: Artech House)

Jethwa, C. P., & Gunshor, R. L., 1972, IEEE MTT-20, 9, 565

Lidholm, S. 1977, Research report No.129, Onsala Space Observatory

Siegel, P. H., Kerr, A. R., & Hwang, W., 1984, NASA technical paper 2287, NASA