

# 새로운 유도성 포스트 구조를 갖는 Ka-Band NRD 가이드 필터의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of Ka-Band NRD Guide Filter with Newly Designed Inductive Post Structure

김영수 · 류원렬 · 유영근 · 최재하\*

Young-Su Kim · Won-Ryul Ryu · Young-Geun Yoo · Jae-Ha Choi\*

### 요 약

본 논문에서는 NRD Guide를 이용한 새로운 구조의 Ka-Band 대역의 필터를 설계하고, 제작하여 그 측정결과를 기존의 구조와 비교 검토하였다. 밀리미터파 대역의 필터는 필터의 치수에 매우 민감하며, 따라서 설계치와 유사한 특성을 갖기 위해서는 수 마이크로미터의 정밀도가 요구된다. 기존의 공극 결합된 NRD 가이드 필터의 경우, 필터의 각 단의 공진기로 동작하는 유전체 블록을 공극 결합시켜 필터로 구현하였다. 이러한 구조에서는 각 단의 공진기의 정밀가공 및 각 단의 공진기 간의 간격을 수 마이크로미터 대의 정밀도로 조립하기란 거의 불가능하다. 본 논문에서는 NRD 가이드를 이루는 유전체 선로에 유도성 포스트를 삽입하여 각 단의 공진기를 결합한 구조를 갖는다. 포스트 사이의 유전체 선로는 필터의 각 단의 공진기로 동작하며, 포스트의 삽입위치로 각 단의 결합량을 결정하였다. 제안한 필터는 그 구조가 매우 간단하고, 정밀가공이 용이해 양산에 적합한 구조를 갖는다. 설계, 제작 및 측정결과, 중심주파수 39.475 GHz에서 350 MHz의 대역폭을 가지며, 통과대역에서 1.8 dB 이하의 삽입손실과, -18 dB 이하의 반사손실을 갖는다.

### Abstract

In this paper, Ka-Band NRD guide band pass filter with newly designed inductive post structure is proposed and analyzed with its test results. Generally, millimeter-wave filters are very sensitive in their physical dimensions, hence, it is requires extreme precisions of several micron so as to get the designed performance. In case of common NRD Guide filter with air gap coupled structure, it is fabricated with dielectric blocks coupled via air gap. In these structures, however, it was not easy to fabricate and to process of each NRD guide dielectric resonator blocks using PTFE, so it was almost impossible to assemble with several microns in precision. In this our research, however, each dielectric resonators are coupled with a pair of inductive metal post, so all resonators are located in a single NRD Guide. The dielectric parts between two pairs of posts are operated as resonators of each stage, and the positions of the post decide the couplings between resonators. The structure we suggested is suitable for mass production, because it is very simple and easy to process. As a result of measurements, designed NRD guide inductive post filter has a superior performance. The center frequency is 39.475 GHz with 350 MHz bandwidth, insertion loss is less than 1.8 dB, and the return loss is below than -18 dB.

Key words : Millimeter-Wave, NRD Guide Filter, Inductive Post

엔알디(주)(NRD Corporation, R&D Center)

\*울산대학교 전기전자 및 자동화공학부(Electrics Electronics & Automation Engineering, University of Ulsan)

· 논문 번호 : 20021203-168

· 수정완료일자 : 2003년 1월 28일

## I. 서론

NRD 가이드는 밀리미터파 대역에서 마이크로스트립 선로에 비해 낮은 전송손실과 구형 도파관에 비해 제작의 용이한 장점을 갖는다. 입사파가 전송되는 유전체 선로를 상하 도체평판 사이에 끼운 구조를 가지며, 두 도체판은 사용주파수의 자유공간 파장의 1/2 이하가 되도록 하여, 유전체 선로 이외 부분으로의 방사를 차단하여 유전체 선로를 따라 저손실로 전송할 수 있다<sup>[1]</sup>. NRD 가이드를 이용한 기존의 공극결합 필터는 유전체 블록을 각 단의 공진기로 사용하여 파의 진행방향으로 나열한 구조를 갖는다. 이 때 각 단의 공진기는 그 길이에 의해 공진 주파수가 결정되며, 공진기 사이의 길이를 조절하여 coupling을 결정한다. 따라서 공진기의 정밀가공 및 정밀조립이 요구되며, 수 마이크로의 정밀도를 요하는 밀리미터파 대역의 필터 구조로는 적합하지 않다.

본 연구에서 제안하는 유도성 포스트 구조의 필터는 NRD 가이드를 이루는 유전체 선로의 E-면에 수평으로 금속 포스트(metal post)를 삽입하여 각 단의 공진기를 결합한 구조이며, 따라서 필터의 제작시 유전체 선로의 적절한 위치에 금속 포스트가 삽입될 홈(hole)만 가공하면 되도록 설계하였다. 유전체 선로의 정밀 가공을 보장하면서, 가공시간을 최소화하여, 기존의 NRD 가이드 필터의 상용화의 걸림들이었던 정밀가공 및 조립성을 획기적으로 개선하였다. 제작한 필터는 Ka-band 대역에서 설계하였으며, 측정결과, 중심 주파수 39.475 GHz에서 350 MHz의 대역폭을 가지며, 대역내 삽입손실 1.8 dB, 반사손실 -18 dB 이하의 우수한 특성을 갖는 것으로 확인되었다.

## II. NRD 가이드 필터 설계

### 2-1 NRD 가이드의 구조

그림 1은 상하 도체판 사이에 유전체 선로를 삽입한 NRD 가이드의 구조를 나타낸다. 상하 도체판 사이의 간격은 자유공간 파장의 1/2 이하로 설정하여 선로 이외의 부분으로의 파의 진행을 차단하게 된다. 그림 2는 NRD 가이드를 1/4 대칭 구조로 잘라 EM-Simulator로 해석한 LSM01 모드의 필드분포

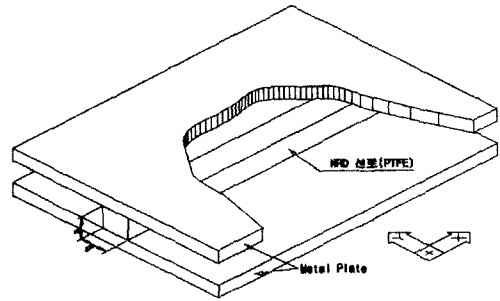


그림 1. NRD 가이드 구조  
Fig. 1. Structure of NRD Guide.

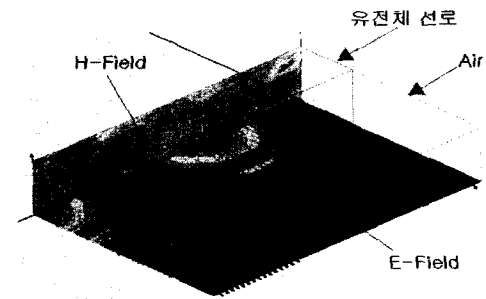


그림 2. NRD 가이드의 필드분포  
Fig. 2. Field Pattern of NRD Guide.

를 나타낸다. 수평면에 형성된 E-field와 선로의 내부에 진행방향으로 루프(loop)를 형성한 H-field를 확인할 수 있다.

### 2-2 기존의 NRD 가이드 공극결합 필터의 구조

그림 3은 기존의 공극결합 필터(air gap coupled filter)의 구조를 나타낸다<sup>[2]</sup>. 일렬로 배치된 각각의 유전체 블록은 필터의 각 단의 공진기로 동작하며, 공진기 사이의 간격(air gap)을 조절해 각 공진기를 결합(coupling)시킨다. 따라서 Ka-band와 같은 밀리

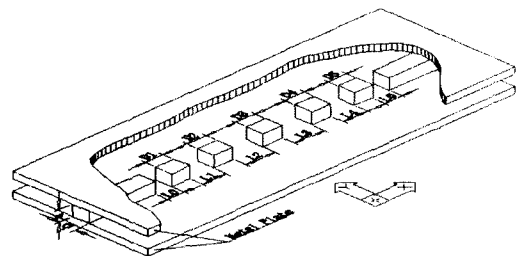


그림 3. NRD 가이드 공극결합 필터  
Fig. 3. NRD Guide Air Gap Coupled Filter.

미터와 대역에서 우수한 특성을 갖는 필터를 구현하기 위해서는 가공 및 조립시 수 마이크론(micron)의 정밀도가 요구되며, 특히 조립시 각 공진기를 정확한 위치에 마운트(mount) 시키기는 더욱 어려운 제작상의 단점을 갖는다.

2-3 NRD 가이드 Inductive Post 필터의 구조

그림 4는 본 논문에서 제안하는 NRD 가이드 Inductive Post 필터의 구조이다. NRD 가이드를 이루는 상하 도체판 사이에 금속 포스트를 삽입한 유전체 선로를 끼워 넣은 매우 간단한 구조를 갖는다. 정밀가공이 어려운 유전체 선로의 가공을 최소화 하였으며, 또한 삽입되는 post의 직경을 동일하게 설계하여 가공이 용이하도록 하였다. 위 아래 두개의 post가 한 쌍으로 필터의 각 단의 임피던스 인버터(Impedance Inverter)로 동작하며, 이 두개의 post 사이의 간격으로 coupling을 결정하도록 하였다. 두 쌍의 post 사이의 유전체 부분은 필터의 각 단의 공진기로 동작하며, 각 단의 공진기는 인접한 공진기 및 입출력 유전체 선로와 물리적으로 결합된 구조이다. 따라서 가공 및 조립시 취급이 매우 용이하며, 별도로 가공된 금속 post를 가공된 홀에 삽입하면 필터의 조립은 완성된다.

2-4 NRD 가이드 Inductive Post 필터 설계

그림 5는 설계한 NRD 가이드 Inductive Post 필터구조에 대한 설계치수의 정의를 나타낸다. 설계 및 제작에 사용한 NRD 가이드로 4.0 mm×3.5 mm 단면을 갖는 유전율 2.1 이하의 PTFE를 사용하였다. 공진기의 길이는  $D_m$ [mm]이며, E-면에 삽입된

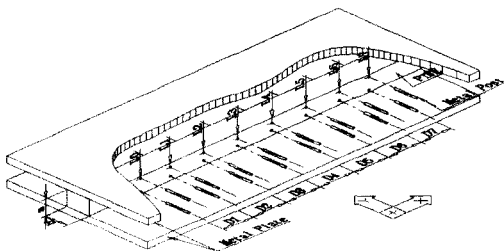


그림 4. NRD 가이드 Inductive Post 필터  
Fig. 4. NRD Guide Inductive Post Filter.

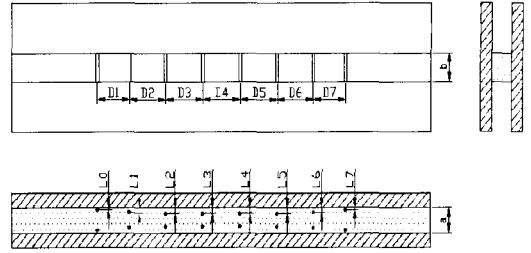


그림 5. 필터의 치수정의  
Fig. 5. Definitions of Filter Dimension.

Post의 중심과 도체판 사이의 길이를  $L_n$ [mm]로 정의하였다. 또한 삽입된 Inductive Post의 직경은 모두 동일하다.

2-5 Inductive Post 필터 등가회로

그림 6은 필터의 각 단을 임피던스 인버터(K-Inverter)로 결합한 등가회로를 나타낸다. 그림에서  $R_n$ 은 각 단의 공진기이며,  $K_{n,n+1}$ 은 각 단의 공진기를 결합하는 K-Inverter이다. 실제 제작시 유전체 선로와 한 쌍의 Inductive Post로 각각 구현된다.

그림 6에 주어진 임피던스 인버터를 이용한 필터 등가회로에서, 먼저 각 단의 공진기와 임피던스 인버터를 각각 하나의 ABCD 행렬로 나타내고 결합하면, 필터 전체 네트워크는 식 (1)과 같이 단일의

$$\begin{bmatrix} A & jB \\ jC & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & jK_0 \\ \frac{j}{K_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cosh \gamma_1 L_1 & Z_0 \sinh \gamma_1 L_1 \\ \frac{\sinh \gamma_1 L_1}{Z_0} & \cosh \gamma_1 L_1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \cosh \gamma_n L_n & Z_0 \sinh \gamma_n L_n \\ \frac{\sinh \gamma_n L_n}{Z_0} & \cosh \gamma_n L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & jK_{n+1} \\ \frac{j}{K_{n+1}} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 전체 필터 네트워크를 S-Para-

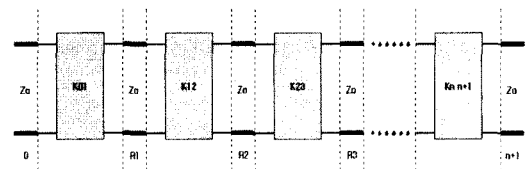


그림 6. 필터의 K-Inverter 등가회로  
Fig. 6. K-Inverter Equivalent Circuit of Filter.

meter로 변환하여 삽입손실 및 반사손실을 계산할 수 있으며, 삽입손실은 식 (2)와 같이 계산된다<sup>[3]</sup>.

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 T_n^2 \left[ \frac{\alpha \lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin \left( \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \right]^2} \quad (2)$$

여기서 필터의 차수  $n$  및 정규화 주파수  $x$ 에 따른 Chebyshev Polynomial,  $T_n(x)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_n(x) = \cosh[n \cosh^{-1}(x)] \text{ for } |x| > 1 \quad (3.a)$$

$$T_n(x) = \cosh[n \cosh^{-1}(x)] \text{ for } 0 \leq x \leq 1 \quad (3.b)$$

### 2-6 K-Inverter 등가회로

각 단의 K-Inverter는 그림 7과 같이 series reactance  $jX_a$ 와 shunt reactance  $jX_b$ 로 표현되는 T-형 등가회로로 치환된다. K-Inverter 및 Electrical Length,  $\phi$ 는 각각 식 (4) 및 식 (5)로 계산된다<sup>[3]-[6]</sup>.

$$\tan(2 \tan^{-1} K) = \frac{2X_b}{1 + 2X_b X_a + X_a^2} \quad (4)$$

$$\phi = -\tan^{-1}(2X_b + X_a) - \tan^{-1}(X_a) \quad (5)$$

NRD 가이드 Inductive post 필터의 K-Inverter값은 EM-Simulator로 해석하여 구할 수 있다. Post의 직경이 0.5 mm일 때 추출한 길이  $L$ 에 따른 K-Inverter의 값은 그림 8과 같다.

### 2-7 Physical Dimensions

필터의 각 단의 임피던스는 식 (6)과 같고, K-Inverter의 값은 식 (7)로 계산된다<sup>[5]</sup>.

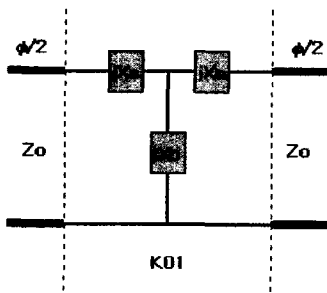


그림 7. K-Inverter 등가회로  
Fig. 7. Equivalent circuit of K-Inverter.

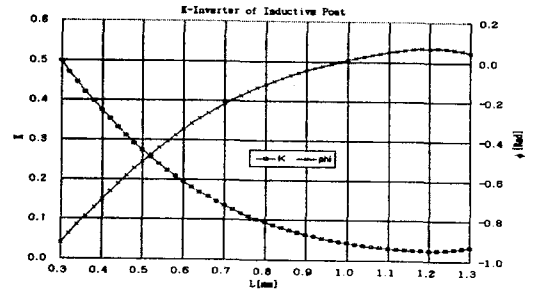


그림 8. Post의 위치  $L$ 에 따른 K-Inverter  
Fig. 8. K-Inverter vs  $L$  of post.

$$Z_k = \frac{2\alpha}{y} \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] - \frac{1}{4\alpha y} \left[ \frac{y^2 + \sin^2 \left( \frac{k\pi}{n} \right)}{\sin \frac{(2k+1)\pi}{2n}} \right] - \frac{1}{4\alpha y} \left[ \frac{y^2 + \sin^2 \frac{(k-1)\pi}{n}}{\sin \frac{(2k-3)\pi}{2n}} \right] \quad k=1,2,3, \dots, n \quad (6)$$

$$K'_{r,r+1} = \frac{\sqrt{y^2 + \sin^2 \left( \frac{r\pi}{n} \right)}}{y} \quad r=0,1,2, \dots, n \quad (7)$$

여기서  $N$ 은 필터의 차수,  $a$ 는 차단 주파수를 정규화 하기 위한 매핑 상수이며,

$$y = \sinh \left( \frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\epsilon} \right) \quad (8)$$

이다.

필터의 각 단의 공진기 길이  $D$ 는 각 단의 임피던스 인버터의 전기적인 길이  $\phi$ 를 보상하여 결정된다. 기존의 공극 결합 필터의 경우, 결합량이 줄어드는 가운데 단으로 갈수록 공극의 길이가 늘어나게 되어 필터 전체 사이즈가 증가하지만 본 논문에서 제안한 구조는 결합량을 줄이기 위해 post 사이의

표 1. 필터의 설계치수

Table 1. Physical Dimensions.

$D$ [mm]	$L$ [mm]
$D_1 = 5.1866$	$L_0 = 0.3703$
$D_2 = 5.8875$	$L_1 = 0.7620$
$D_3 = 6.0187$	$L_2 = 0.9096$
$D_4 = 6.0409$	$L_3 = 0.9499$

간격을 조절하므로 필터의 전체 사이즈를 증가시키지 않는 장점을 갖는다<sup>17)</sup>.

표 1에 최종 설계한 NRD 가이드 Inductive post 필터의 설계값을 요약하였다.

### 2-8 설계결과

그림 9 및 그림 10은 각각 설계한 필터의 특성 및

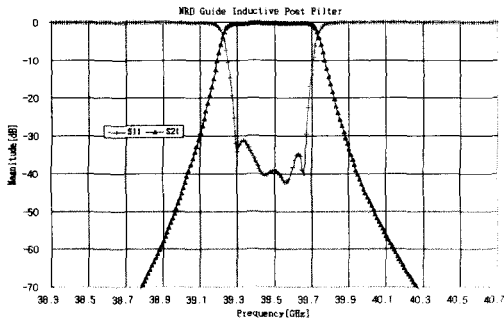


그림 9. 설계한 필터의 특성  
Fig. 9. Characteristics of Designed Filter.

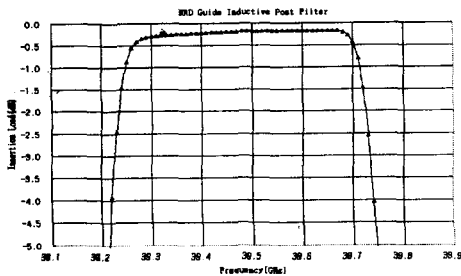


그림 10. 필터의 삽입손실  
Fig. 10. Insertion Loss of Designed Filter.

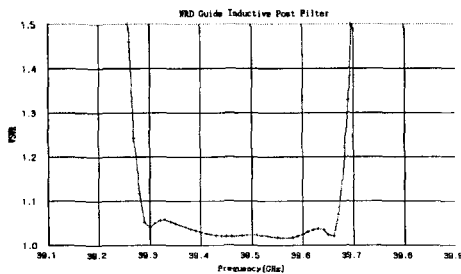


그림 11. 전압정재파비 특성  
Fig. 11. VSWR.

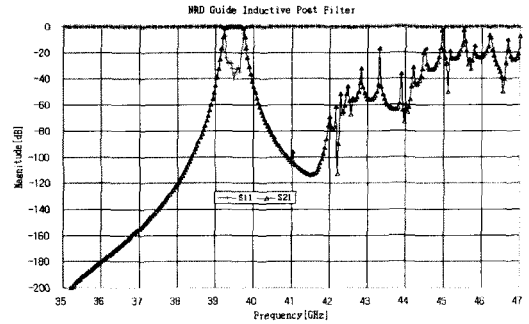


그림 12. 저지대역 특성  
Fig. 12. Characteristic of stop band.

삽입손실을 나타낸다. 통과 대역내 삽입손실 0.3 dB, 반사손실 -31 dB 이하,  $\pm 600$  MHz offset에서 -70 dB 이상의 rejection 특성을 갖는다.

그림 11은 VSWR을 나타내며, 통과 대역내에서 1.06 이하의 특성을 보였다. 그림 12는 필터의 저지대역 특성을 나타낸다.

### 2-9 NRD 가이드 필터의 제작

그림 13은 제작한 NRD 가이드 Inductive post 필터의 내부 실물 사진을 나타낸다. 먼저 유전체 선로에 금속 포스터가 삽입될 홀을 가공하였다. 사진에서 보는 바와 같이 필터의 각 단의 공진기는 별도로 가공할 필요가 없으며, 가공된 홀과 홀 사이의 유전체 선로가 필터의 각 단의 공진기로 동작한다. 금속 포스트는 직경이 0.5 mm인 steel wire를 은도금한 후, NRD 선로의 폭과 같이 4 mm로 잘라 삽입하였다. 금속 포스터가 삽입된 유전체 선로를 하우징에 끼워 넣어 필터의 조립을 마무리하였다.

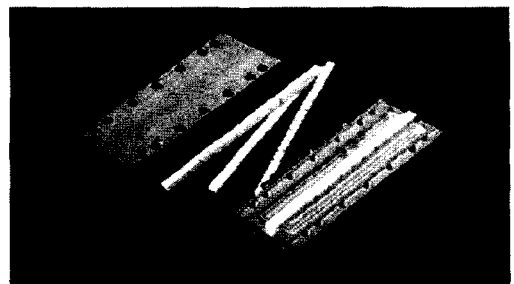


그림 13. NRD 가이드 Inductive Post 필터  
Fig. 13. Photograph of NRD Guide Filter.

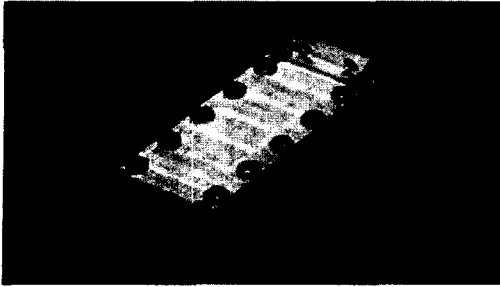


그림 14. NRD 가이드 Inductive Post 필터  
Fig. 14. Photograph of NRD Guide Filter.

그림 14는 Ka-Band 표준 도파관, WR-28과 호환되도록 제작한 실물 사진을 나타낸다. 설계한 NRD 가이드 필터는 LSM Mode로 동작하므로 WR28 Wave-guide의 TE<sub>10</sub> Mode를 LSM<sub>01</sub> Mode로 변환하기 위한 Mode Transition을 필터의 입출력 포트에 내장하였다. 따라서 기존의 구형 도파관과의 결합을 가능하게 하여 NRD 가이드 필터의 적용을 대폭 확대하였다.

2-10 NRD 가이드 필터의 측정결과

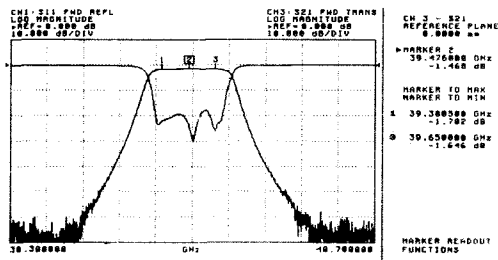


그림 15. 측정결과  
Fig. 15. Measured Results of Filter.

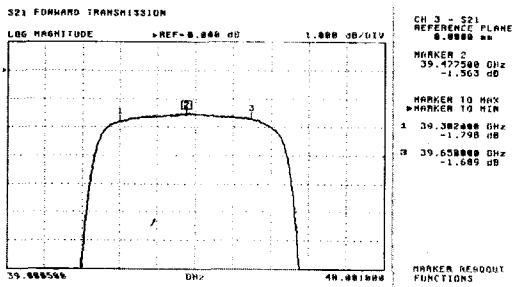


그림 16. 삽입손실  
Fig. 16. Measured Results of Insertion Loss.

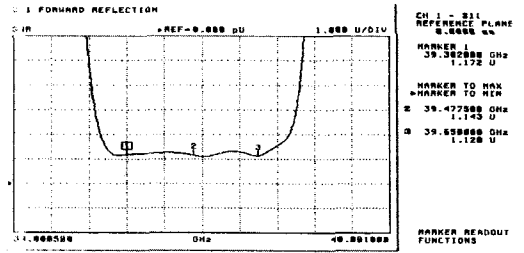


그림 17. 전압정재파비  
Fig. 17. Measured Results of VSWR.

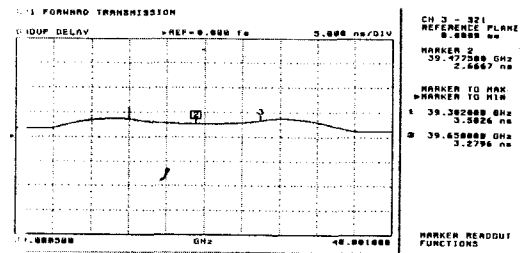


그림 18. 필터의 지연특성  
Fig. 18. Measured Results of Group Delay.

제작한 필터는 Anritsu社의 37397A VNA를 이용하여 측정하였으며, 그림 15~그림 18에 각각 나타내었다.

측정결과, 중심주파수 39.475 GHz에서 350 MHz의 대역폭을 가지며, 대역내 삽입손실은 약 1.8 dB, 반사손실은 -18 dB 이하로 VSWR 1.28이하의 특성을 갖는다. Mode 변환을 위해 사용한 입출력 포트의 Transition 손실 0.5 dB를 감안하면, 통과 대역

표 2. 제작한 필터의 성능 요약  
Table 2. Summary of Filter Performance.

Parameters	설계	측정
Center Freq.[GHz]	39.475	
Pass Band[GHz]	39.300~39.650	
Bandwidth[MHz]	350	
Insertion Loss[dB]	0.3	1.8
Return Loss[dB]	-31	-18
Attenuation[dB]	-60 @f <sub>c</sub> ±500 MHz	
VSWR	<1.06	<1.28
Group Delay[nS]	-	3.5 max
Input/Output Port	WR-28	
Size(L×W×H)[mm]	40.2×18×3.5	

내의 실제 NRD 가이드 필터의 손실은 1.3 dB 정도이며, 약 3.5 nS의 Delay를 갖는다. 따라서 Ka-Band 밀리미터파 대역의 필터로서는 양호한 특성을 갖는 것으로 나타났다.

### 2-11 NRD 가이드 필터의 특성요약

설계 및 제작한 NRD 가이드 Inductive post 필터의 설계 및 측정 결과를 표 2에 요약하였다. 제작한 필터는 약 40.2 mm의 길이를 갖는다.

### III. 결 론

NRD 가이드를 이용하여 기존의 공극 결합 필터 등과 비교하여 양산성 및 조립성을 획기적으로 개선한 새로운 구조의 밀리미터파 대역의 필터를 설계 및 제작하였다. 측정결과, 중심주파수 39.475 GHz, 대역폭 350 MHz, 통과대역 삽입손실 1.8 dB, 반사손실 -18 dB 이하, VSWR 1.28 이하의 우수한 특성을 갖는다. 또한 구조적으로 매우 간단하여 NRD 가이드를 이용한 밀리미터파 대역의 송수신기의 적용에 용이하다. 유전체 선로에 필터를 구현할 때, 압출 성형을 고려하여 삽입될 금속 포스트의 직경을 동일하게 설계하여, 가공성 및 조립성이 뛰어나 양산에 적합하다. 기 제안한 Inductive Iris 구조<sup>[7]</sup>와 함께 밀리미터파 대의 통신장치에 적용이 기대된다.

#### 김 영 수

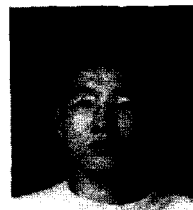


1996년 2월: 울산대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 8월: 울산대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 12월~현재: 엔알디(주) 기술연구소 RF연구실 주임연구원  
 [주 관심분야] 밀리미터파 중계기, PLO, Filter, Diplexer 등, 밀리미터파 소자 및 회로설계

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Yoneyama, S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits", *IEEE MTT-29*, 11. pp. 1188-1192, Nov. 1981.
- [2] T. Yoneyama, F. Kuroki and S. Nishida, "Design of Nonradiative Dielectric Waveguide Filters", *IEEE MTT-32*, no. 12, Dec. 1984.
- [3] D. S. Budimir, "Design of Waveguide E-Plane Filters with All-Metal Inserts by Equal Ripple Optimization", *IEEE Trans. MTT*, vol. 42, no. 2 Feb. 1994.
- [4] G. Matthaei, L. Young, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*, Artech House, 1981.
- [5] L. Q. Bui, D. Ball, "Broad-Band Millimeter-Wave E-Plane Bandpass Filters", *IEEE Trans.* vol. MTT-32, Dec. 1984.
- [6] F. Arndt, "Modal S-matrix method for the optimum design of inductively direct-coupled cavity filters", *IEE Proceedings*, vol. 133, no. 5 Oct. 1986.
- [7] Y. S. Kim, W. R. Ryu, H. D. Choe and Y. G. Yoo, "Design and Fabrication of NRD Guide Filter Using Inductive Iris", *The Journal of KEES*, vol. 13, no. 8, Sep. 2002.

#### 류 원 렬



2001년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)  
 2000년 8월~현재: 엔알디(주) 기술연구소 RF연구실 연구원  
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로설계

유 영 근



1994년 2월: 울산대학교 전자 및  
전산공학과 (공학사)

1996년 8월: 울산대학교 전자공학  
과 (공학석사)

1996년 8월~1997년 2월: 현대전  
자(주) 위성사업단 연구원

1997년 3월~1998년 12월: 한국전  
자통신 연구원 무선방송기술연구소 연구원

1999년 1월~1999년 10월: (주)밀리트론 기술연구소 주임  
연구원

1999년 11월~현재: 엔알디(주) 기술연구소 RF연구실 책임  
연구원

[주 관심분야] 밀리미터파 무선통신장치, NRD가이드

최 재 하



2002년 1월~2003년 1월: 엔알디  
(주) 기술연구소 기술고문

1980년~현재: 울산대학교 전기전  
자 및 자동화공학부 교수

[주 관심분야] MMIC, 초고주파  
회로 및 무선통신 시스템 설계