

# 유도성 아이리스를 이용한 NRD 가이드 필터의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of NRD Guide Filter using Inductive Iris

김영수 · 류원렬 · 최형동 · 유영근

Young-Su Kim · Won-Ryul Ryu · Hyung-Dong Choe · Young-Geun Yoo

### 요 약

본 논문에서는 NRD 가이드를 이용하여 38 MHz 밀리미터파 대역의 대역통과 필터를 설계하고, 실제 제작하여 그 측정 결과를 비교 분석하였다. 기존의 공극 결합된 NRD 가이드 필터의 경우, NRD 가이드로 사용되는 PTFE 선로의 정밀 가공 및 공진기 간의 정위치가 어려워 대량생산에 불리한 단점이 있었으나, 본 연구에서는 각각의 유전체 공진기를 Inductive Iris로 결합, 하나의 선로상에 공진기를 제작할 수 있으므로 가공 및 조립성이 뛰어나 양산에 적합한 구조를 갖는다. 설계한 필터는 측정결과, 통과대역 38.66~39.06 MHz로 400 MHz 대역폭을 가지며, 대역내 삽입손실 1.4 dB, 반사손실 -18 dB 이하의 우수한 특성을 갖는다.

### Abstract

In this paper, NRD guide band pass filter with newly designed inductive iris structure is proposed and analyzed with its test results. In case of common NRD guide filter with air gap coupled structure, it was not easy to fabricate and process of each NRD guide dielectric resonator blocks using PTFE. However, in this our research, each dielectric resonator fabricated in a single NRD guide is coupled with inductive iris located on metal plates. The structure is suitable for mass production of a precise and reliable millimeter-wave filter applications. As a result of measurements, designed NRD guide inductive iris filter has superior performance. The pass band is 38.66 ~39.06 MHz with 400 MHz bandwidth, insertion loss is about 1.4 dB and return loss is below -18 dB.

Key words : Millimeter-Wave, NRD Guide Filter, Cavity Filter

### I. 서 론

비방사 유전체 도파관(Non-Radiative Dielectric; 이하 'NRD 가이드'라 함)은 마이크로스트립 선로에 비해 전송손실이 낮고, 또한 기존 도파관에 비하여 전송선로의 제작이 용이하다는 점 때문에, 마이크로파 대역, 특히 30 GHz 이상의 밀리미터파 대역용 전송선로로 주목을 받고 있다. NRD 가이드는 입사파가 전송되는 유전체 선로를 상하 도체평판 사이에 끼운 구조를 갖는다. 두 도체판은 사용 주파수의 자유공간 파장의 1/2 이하가 되도록 하여, 유전체

선로 이외에서는 전자파가 차단되어 그 방사가 억제되므로 유전체 선로를 따라 저손실로 전송할 수 있다<sup>[1]</sup>. NRD 가이드를 이용한 기존의 공극 결합필터의 경우 각각의 유전체 공진기를 선로에 일렬로 배열한 구조를 가지며, 이 때 놓여지는 각 공진기 사이의 길이로 결합량을 조절하며, 공진 주파수는 각 단의 공진기의 길이로 결정된다. 따라서 파장이 매우 짧은 밀리미터파 대역에서 우수한 필터 특성을 얻기 위해서는 공진기의 정밀가공 및 정밀조립이 요구되며, 이러한 이유로 상용화가 어렵게 된다. 본 연구에서는 각각의 공진기를 단일 선로로 구현

엔알디(주) 기술연구소 RF연구실(R&D Center, NRD Corporation)

· 논문 번호 : 20020525-01S

· 수정완료일자 : 2002년 7월 8일

하고 이를 유도성 아이리스로 결합하여, 정밀가공 및 조립성을 현저히 개선하였다. 설계한 필터는 LMDS 대역을 만족하도록 하였으며, 측정결과, 통과대역 38.66~39.06 GHz로 400 MHz 대역폭을 가지며, 대역내 삽입손실 1.4 dB, 반사손실 -18 dB 이하의 우수한 특성을 갖는다.

## II. NRD 가이드 필터 설계

### 2-1 NRD 가이드의 구조

NRD 가이드는 그림 1과 같이 자유공간 파장의 1/2 이하인 상하 도체판 사이에 유전체 선로를 끼운 구조를 갖는다. 따라서 진행파는 NRD 가이드 이외의 부분으로는 전파가 차단되며, 곡선부나 선로의 불연속에 의한 전송손실을 줄여 밀리미터 파의 저손실 전송이 가능하다. 동작모드는 LSE mode의 경우 상하 도체판과의 경계조건에 의한 손실이 크므로 주로 LSM mode를 사용한다.

### 2-2 NRD 가이드 공극 결합 필터의 구조

그림 2는 기존의 공극 결합 필터(air gap coupled filter)의 구조를 나타낸다<sup>[2]</sup>. 유전체 블럭을 각 단의 공진기로 사용하며, 공진기 사이의 간격을 조절해 각 공진기를 결합시킨다. 따라서 밀리미터파 대역에서 우수한 특성을 갖는 필터로 구현하기 위해서 필터의 물리적인 치수는 수 마이크로(micron)의 정밀도가 요구되며 조립시 각 공진기를 정위치 시키기 어렵다는 단점을 갖고 있다.

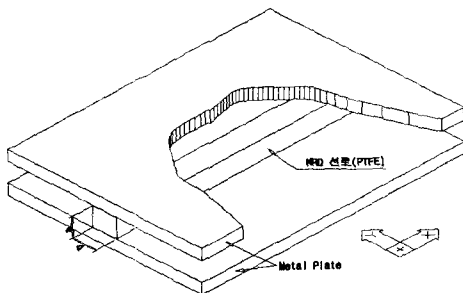


그림 1. NRD 가이드 구조  
Fig. 1. Structure of NRD guide.

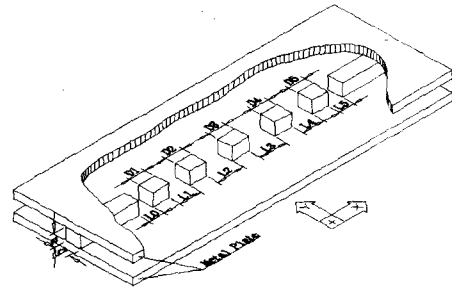


그림 2. NRD 가이드 공극 결합필터  
Fig. 2. NRD guide air gap coupled filter.

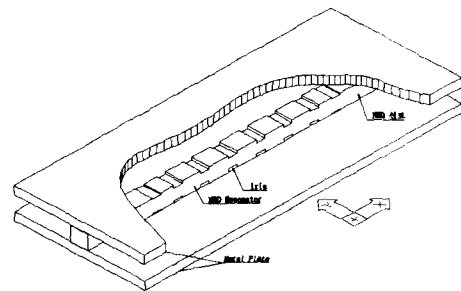


그림 3. NRD 가이드 Inductive Iris 필터  
Fig. 3. NRD guide Inductive Iris filter.

### 2-3 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 구조

본 논문에서 제안한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 구조는 그림 3과 같다. NRD 가이드의 위 아래에 적절한 깊이의 Iris가 유전체 속으로 삽입된 구조이며, 균일한 NRD 가이드에 삽입된 이 불연속에 의해 진행되는 파의 유전체 공진기 간의 결합량을 결정할 수 있다. 이런 구조적인 형태로 인해 NRD 가이드를 특별한 지지물 없이도 정위치에 고정시킬 수 있는 장점을 갖는다.

### 2-4 NRD 가이드 Inductive Iris 필터 설계

그림 4에는 설계한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 구조를 나타내었다. 설계 및 제작에는 폭 4.0 mm, 높이 3.5 mm, 유전율 2.1 이하인 PTFE를 NRD 선로로 사용하였다. 이 구조에서 기본 전송모드인 LSM<sub>01</sub> 모드의 차단주파수는 34.85 GHz이며, 필터의 중심 주파수에서 13.151 mm의 관내파장을 갖는다. NRD 선로에 삽입된 Inductive Iris의 길이는

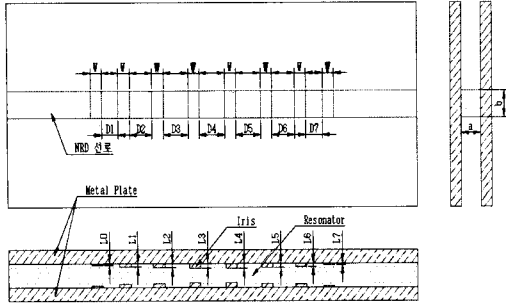


그림 4. NRD Guide Inductive Iris 필터의 치수정의  
Fig. 4. Definition of filter dimensions.

NRD 선로의 폭과 같이 4 mm로 하였고, 폭은 가공성이 좋도록 W로 동일하게 설계하였다.

### 2-5 Inductive Iris 필터 등가회로

설계한 필터는 그림 5와 같이 각각의 공진기를 임피던스 인버터(K-Inverter)로 결합한 구조로 표현된다.

필터의 설계를 위해 먼저 주어진 규격을 만족하도록 필터의 차수를 결정해야 하며, 또한 그림 5에 주어진 임피던스 인버터를 이용한 필터 네트워크의 공진기 간 결합량을 결정하여 설계 주파수에서 임피던스 정합이 일어나도록 적절한 K값을 결정하여야 한다. 그림 5의 필터 전체 네트워크는 식 (1)과 같이 단일의 ABCD 행렬로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A & jB \\ jC & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & jK^n \\ j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cosh y_1 & Z_0 \sinh y_1 \\ \sinh y_1 & \cosh y_1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \cosh y_n & Z_0 \sinh y_n \\ \sinh y_n & \cosh y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & jK^{n-1} \\ j & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)로 구한 전체 필터 네트워크를 S-파라미터로 변환하여 삽입손실 및 반사손실을 계산할 수

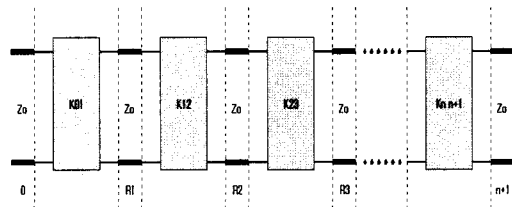


그림 5. NRD 가이드 필터의 K-Inverter 등가회로  
Fig. 5. K-Inverter equivalent circuit of filter.

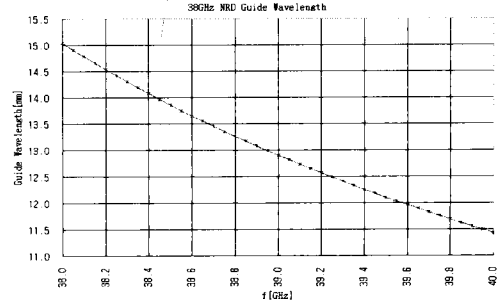


그림 6. NRD 가이드의 관내파장  
Fig. 6. Guide wavelength of NRD guide.

있으며, 삽입손실은 식 (2)로 계산된다<sup>[3]</sup>.

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

여기서  $T_n(x)$ 는 n차 Chebyshev Polynomial이며, 식 (3)과 같다<sup>[4]</sup>.

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

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

그림 6은 필터의 설계대역을 포함한 38 GHz대에서 계산한 NRD 선로의 관내파장을 나타낸다.

### 2-6 K-Inverter 등가회로

그림 5의 각 단의 K-Inverter는 그림 7과 같이 T형 리액턴스 등가회로로 표현되며, K-Inverter 값 및 Electrical Length  $\phi$ 는 각각 식 (4) 및 식 (5)로 계산된다<sup>[3]-[6]</sup>

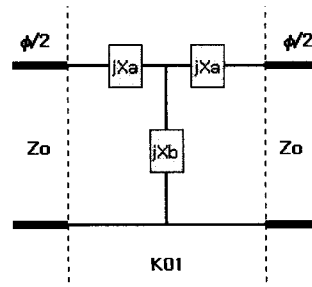


그림 7. K-Inverter 등가회로  
Fig. 7. Equivalent circuit of K-Inverter.

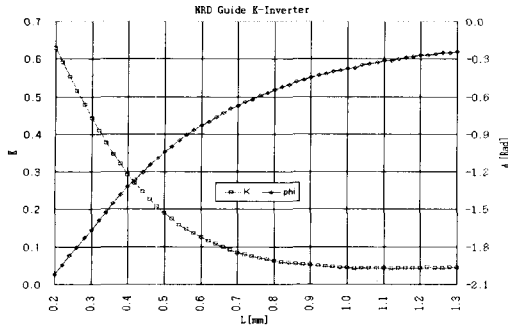


그림 8. Iris 길이에 따른 K-Inverter  
Fig. 8. K-Inverter vs Iris length.

$$\tan(2 \tan^{-1} K) = \frac{2Xb}{1 + 2XbXa + Xa^2} \quad (4)$$

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

NRD Guide Inductive Iris 필터의 K-Inverter값은 EM-Simulator로 해석하여 구할 수 있으며, Iris의 폭 (W)이 2일 때, Iris의 길이 L에 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>.

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

$k=1,2,3, \dots, N$

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

여기서,

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

이다. 실제의 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 각 단에서 공진기로 동작하는 NRD 선로의 임피던스는 동일하므로 식 (7)은 식 (9)로 수정된다.

$$K_{r,r+1} = \frac{K_{r,r+1}}{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}} \quad r=0,1,2, \dots, n \quad (9)$$

표 1. Physical Dimensions of designed filter

Table 1. Physical Dimensions of designed filter.

K	L[mm]	D[mm]	비 고
$K_{01} = 0.4345$	$L_0 = 0.2980$	$D_1 = 4.0439$	
$K_{12} = 0.1250$	$L_1 = 0.5897$	$D_2 = 5.1108$	
$K_{23} = 0.0735$	$L_2 = 0.7350$	$D_3 = 5.3960$	
$K_{34} = 0.0639$	$L_3 = 0.7832$	$D_4 = 5.4534$	

필터의 각 단의 공진기 길이 D는 각 단의 임피던스 인버터의 전기적인 길이  $\phi$ 를 보상하여 결정된다.

본 논문의 38 GHz 밀리미터파 대역 필터 연구에서 몇 차례에 걸친 실험 결과, 가공오차 등의 원인으로 필터의 실제 측정결과는 설계치 보다 수십 MHz 상향 이동하는 중심주파수 이탈현상을 보였다. 따라서 필터의 설계특성이 실제 측정치와 일치하도록 설계식을 매핑시켰으며, 표 1에 최종 설계한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 설계값을 요약하였다.

필터의 설계시 가운데 단으로 갈수록 결합량은 줄어들며, 본 논문에서 제안한 구조는 결합량을 줄이기 위해 Iris의 삽입 깊이를 증가시키므로 필터의 전체 사이즈를 증가시키지는 않는 장점을 갖는다.

기존의 공극 결합 필터의 경우, 설계 주파수가 동일하면 각 공진기의 길이는 동일하나, 공진기간의 결합이 줄어드는 가운데 단으로 갈수록 공극의 길이가 늘어나게 되어 필터 전체 사이즈는 더욱 길어지게 된다. 따라서 기존의 구조보다 본 논문에서 제안한 구조가 필터의 사이즈나 성능 및 가공성에서 훨씬 개선된 구조를 갖는다고 할 수 있다.

### 2-8 Simulations

설계한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터를 EM-Simulator로 해석하기 위해 그림 9와 같이 모델링하였다. 해석시간의 단축을 위해 1/4 대칭으로 하였으며, 필터의 각 입출력부에는  $\lambda_g$  이상의 균일 선로부를 주어 필터의 동작 모드인 LSM Mode가 충분히 여기되도록 하였다. 그림 10은 설계한 38 GHz 밀리미터파 대역에서의 필터특성을 나타낸다. 통과대역 38.66~39.06 GHz, 대역내 삽입손실 1.4 dB 이하, 반사손실 -32 dB 이하의 특성을 나타내고 있으

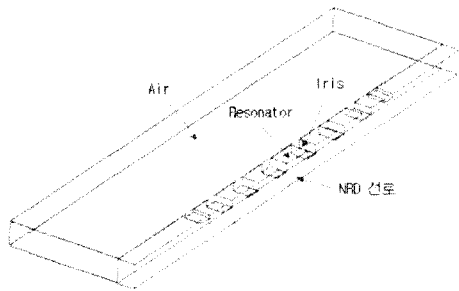


그림 9. EM-Simulator Modeling  
Fig. 9. EM-Simulator Modeling.

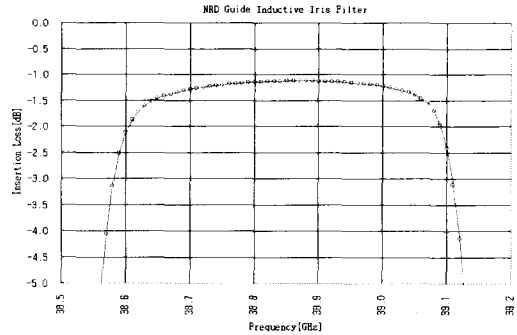


그림 11. 필터 삽입손실  
Fig. 11. Insertion Loss of filter.

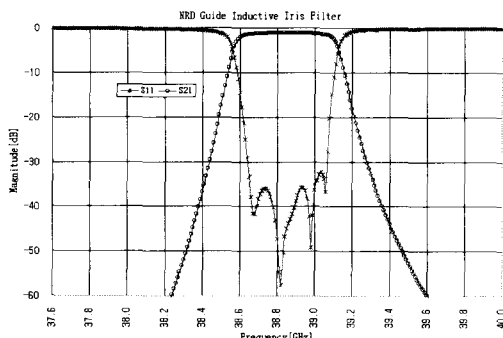


그림 10. 필터의 설계특성  
Fig. 10. Characteristics of designed filter.

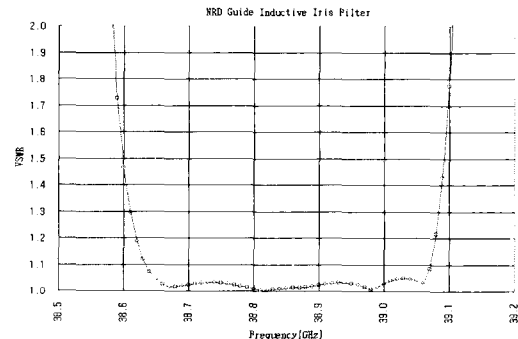


그림 12. 전압 정재파비  
Fig. 12. Calculated VSWR.

며, 저지대역 감쇄는 약 20 dB/100 MHz로 이론치 7차 Chebyshev 함수에 잘 근사됨을 알 수 있다.

그림 11은 통과 대역내 삽입손실을 나타낸다. 설계 중심주파수에서 삽입손실은 약 1.1 dB이었으며, 유전체 손실을 감안하더라도 38 GHz 밀리미터파 대역의 필터 특성으로는 아주 양호한 결과라 볼 수 있다.

그림 12와 그림 13은 대역내 전압 정재파 비와 저지대역 특성을 나타낸다. 대역내 VSWR은 1.06 이하의 특성을 보였으며, 44 GHz 부근에서 spurious 특성을 보였다.

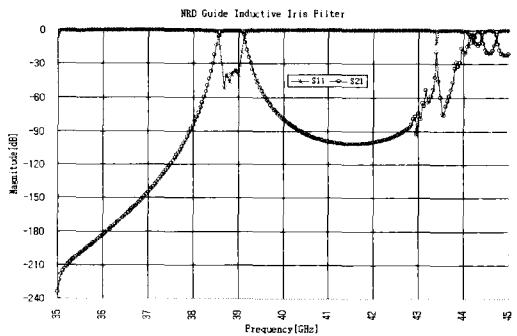


그림 13. Spurious 특성  
Fig. 13. Spurious of designed filter.

### 2-9 NRD 가이드 필터의 제작

그림 14는 제작한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 내부 및 외관을 나타내며, 상하 도체판 사이에 단일선로로 가공된 유전체 필터부를 삽입한 구조를 갖는다.

상하 도체판에 돌출된 Iris는 유전체 필터부의 삽입홈에 정확히 일치되며, 이는 별도의 조립용 보조 지그가 필요치 않음을 의미한다. 따라서 수 마이크로의 정밀도를 요하는 밀리미터파 대역의 필터를 별도의 조립용 보조지그 없이 가공 정밀도를 그대로

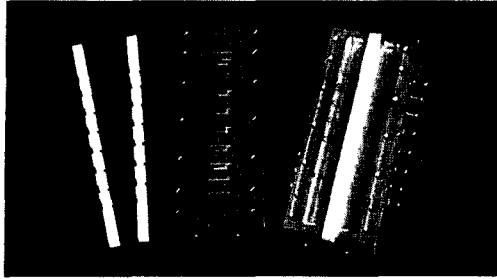


그림 14. NRD 가이드 Inductive Iris 필터  
Fig. 14. Photograph of NRD guide filter.

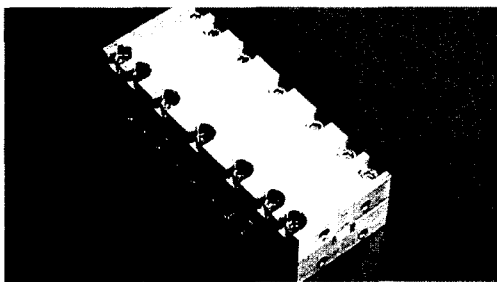


그림 15. NRD 가이드 Inductive Iris 필터  
Fig. 15. Photograph of NRDguide filter.

유지하며 정밀 조립할 수 있는 장점을 갖는다.  
설계한 NRD 가이드 필터는  $LSM_{01}$  Mode로 동작하므로 WR28 Waveguide의  $TE_{10}$  Mode를  $LSM_{01}$  Mode로 변환하기 위해 별도로 설계한 Mode Transition 을 필터의 입/출력 포트에 부가하여 최종 조립된 필터는 WR28 표준 구형 도파관과 호환 되도록 제작하였다.

그림 15는 제작한 NRD 가이드 필터의 실물 사진을 나타낸다.

### 2-10 NRD 가이드 필터의 측정결과

그림 16은 측정된 NRD 가이드 필터의 특성을 나타낸다. 측정에는 Anritsu 社의 37397A VNA를 이용하였으며, WR-28 Calibration-Kit을 이용하여 calibration 후 측정하였다.

대역내 삽입손실은 약 1.4 dB이며, 반사손실은 -18 dB 이하로 VSWR 1.28의 특성을 보였다. Mode 변환을 위해 사용한 입출력 포트의 Transition 손실 0.5 dB를 감안하면 통과 대역내 실제 NRD 가이드 필터의 손실은 0.9 dB 정도이다.

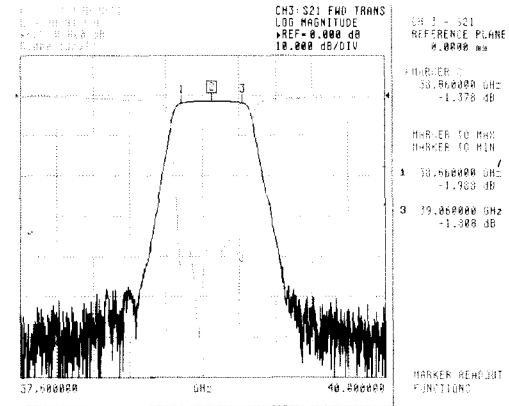


그림 16. 측정결과  
Fig. 16. Measured results of filter.

### 2-11 NRD 가이드 필터의 특성요약

설계 및 제작한 NRD 가이드 Inductive Iris 필터의 성능을 표 2에 요약하였다.

표 2. 제작한 필터의 성능 요약  
Table 2. Summary of filter performance.

Parameters	설 계	측 정
Center Freq. [GHz]	38.860	
Pass Band [GHz]	38.660 ~ 39.060	
Bandwidth [MHz]	400	
Insertion Loss [dB]	1.4	1.4
Return Loss [dB]	-32	-18
Attenuation [dB]	-45 @ $f_0 \pm 500$ MHz	
Ripple [dB]	0.002	
Transfer Function	Chebyshev	
Poles	7	
VSWR	<1.07	<1.28
Input/Output Port	WR-28	
Size(LxWxH) [mm]	55 × 18 × 3.5	
Filter(LxWxH) [mm]	60 × 28 × 19	

## 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 38.86 GHz, 대역폭 400 MHz, 통과대역 삽입손실 1.4 dB, 반사손실 -18 dB 이하, VSWR 1.28 이하의 아주 우수한 특성을 갖는다. 또한 구조적으로 매우 심플(sim-

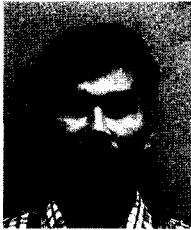
ple)하여 가공성이 우수하다. NRD 선로를 압출 성형할 경우를 고려하여 Iris의 폭을 동일하게 하고, 선로의 가로 방향으로는 불연속이 없도록 설계하여 대량 생산시 양산성이 뛰어나다. 그리고 필터를 상하 도체판에 고정할 경우에도 별도의 조립용 보조 지그가 필요치 않으며, 밀링머신의 수 마이크론의 가공 정밀도를 그대로 유지하면서 정위치 시킬 수 있는 장점을 갖는다.

참 고 문 헌

[1] T. Yoneyama, S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits", *IEEE MTT-29*, no. 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.

김 영 수



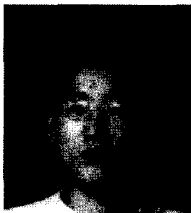
1996년 2월: 울산대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 8월: 울산대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 12월~현재: 엔알디(주) 기술연구소 RF연구실 주임연구원  
 [주 관심분야] 밀리미터파 증계기, PLO, Filter, Diplexer, 밀리미터파 소자 및 회로설계

최 형 동



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

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 전자공학과 (공학석사)  
 1996년 8월~1997년 2월: 현대전자(주) 위성사업단 연구원  
 1997년 3월~1998년 12월: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 연구원  
 1999년 1월~1999년 10월: (주)밀리트론 기술연구소 주임연구원  
 1999년 11월~현재: 엔알디(주) 기술연구소 RF연구실 책임연구원  
 [주 관심분야] 밀리미터파 무선통신장치, NRD 가이드