

개방형 마이크로파 컨베이어 벨트 건조기의 요철 직사각형 도파관 차폐효과

Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of a Corrugated Rectangular Waveguide for an Open-Type Microwave Conveyor-Belt Dryer

김 성 연 · 배 상 현* · 이 왕 상*

Sung-Yeon Kim · Sang-Hyeon Bae* · Wang-Sang Lee*

요 약

본 논문에서는 현재 산업현장에 많이 쓰이고 있는 개방형 컨베이어 벨트형 마이크로파 건조기의 전자파 차폐 특성에 대해 분석 및 연구를 진행하였다. 특히, 범용의 2.45 GHz 마그네트론을 사용한 개방형 컨베이어 벨트형 건조기의 전자파 누설 문제를 직사각형 도파관에 요철을 적용하여 개선하였다. 본 논문은 요철을 적용한 직사각형 도파관의 감쇠 특성을 살펴보기 위해 제안된 도파관의 구조에 따른 최적 차폐특성의 모의해석을 수행하였다. 또한, 요철 직사각형 도파관을 제작하여 IEEE Std. 299 규격에 따라 차폐특성을 검증하기 위해 제안된 요철 직사각형 도파관을 갖는 실제 마이크로파 건조기 제품에 적용하였으며, 대략 30 dB 이상의 차폐특성을 확인하였다.

Abstract

We herein analyze and study the shielding effectiveness characteristic of an open conveyor-belt-type microwave dryer that is widely used in industry. In particular, the electromagnetic wave leakage problem of the open-type conveyor belt dryer using a general-purpose 2.45-GHz magnetron was improved by applying the corrugated rectangular waveguide. We conducted the electromagnetic simulation of the optimal shielding effectiveness characteristic with regard to the proposed waveguide structure to analyze the attenuation characteristics of the corrugated rectangular waveguide. To verify the shielding effectiveness characteristic of the fabricated corrugated rectangular waveguide by IEEE standard 299, we achieved the shielding effectiveness of more than 30 dB in the practical microwave dryer with the proposed corrugated rectangular waveguide.

Key words: Corrugated, Microwave Dryer, Rectangular Waveguide, Shielding Effectiveness.

I. 서 론

현재 우리나라 산업부문에서 사용되고 있는 건조기의 형식별 이용 현황은 대류식 건조기 77 %, 전도식 건조기

「This work was supported in part by the Industrial Technology Innovation Program and in part by of the Human Resources Program in Energy Technology of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, under Grant 20172010106020 and Grant 20174030201440, respectively.」

한국산업기술시험원 항공전자기술센터(Aerospace EM Technology Center, Korea Testing Laboratory)

*경상대학교 전자공학과/공학연구원(Department of Electronic Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang National University)

· Manuscript received March 21, 2018 ; Revised April 23, 2018 ; Accepted May 14, 2018. (ID No. 20180321-038)

· Corresponding Author: Wang-Sang Lee (e-mail: wsang@gnu.ac.kr)

20 %, 복사식 건조기 3 %로 대류식 열풍건조기가 가장 많이 사용되고 있다. 그러나, 열풍건조기의 경우 에너지 효율이 30~50 %로 비교적 낮고, 환경오염에 영향을 미치며 낮은 생산성과 높은 운전비용이 필요하며, 열풍가스 누출, 가동 초기의 주요 부품 손상 등으로 인해 높은 유지비용과 낮은 신뢰성이 단점이다^[1].

친환경적이고 높은 에너지 효율을 가지는 마이크로파는 건조, 가열 등 열에너지가 요구되는 모든 장치에 적용 가능하여 다양한 산업계에서 기술이 융합되어 활용하고 있다. 특히, 반도체, 나노, 식품, 정밀 화학, 의약품 등의 첨단 산업에서 고정밀, 고성능 건조기의 수요가 증가함에 따라 이러한 요구를 충족할 건조기로써 마이크로파를 이용한 건조기가 주목받고 있는 상황이다. 마이크로파를 이용한 하이브리드 건조기는 그린 에너지 전략 기술과 온실가스 감축 기술을 융합한 차세대 열 발생장치의 핵심 기술이다.

산업용 마이크로파 건조기에서 주로 사용하는 개방형 마이크로파 건조기의 경우에는 구조상의 특징으로 인해서 마이크로트론에서 나오는 전자파가 누설되고, 이런 전자파 누설 문제로 인해서 EMI 문제와 인체의 안전성 문제가 계속해서 대두되고 있는 상황이다. 현재는 개방형 컨베이어 타입 건조기의 전자파 차폐 대책은 경험에 의한 방법(컨베이어 벨트 투입구에 테프론 메쉬를 적용, 마그네트론 주위 메쉬 적용, 흡수체 사용 등)을 적용하고 있으나, 누설되는 전자파 차폐에는 한계가 있다. 본 논문

에서는 개방형 마이크로파 건조기의 차폐 특성을 근본적으로 개선하기 위한 요철 직사각형 도파관 구조를 제안하고, 전자파 모의해석을 이용하여 최적 차폐특성을 찾아 실제 제품에 적용하여 성능을 검증하였다.

II. 요철을 갖는 직사각형 도파관 해석

2-1 직사각형 도파관

직사각형 도파관은 초고주파 신호를 보내는데 사용되는 전송선로 중 가장 오래된 형태이며, 커플러, 감지기, 분리기, 감쇄기능, 슬롯이 있는 선로와 같은 다양한 부품들이 1~220 GHz 이상까지 표준 도파관 대역별로 상용화가 되어 있다. 특히, 고출력 시스템과 밀리미터파 및 대전력에 적합하다. 또한, 위성시스템, 정교한 시험을 요구하는 분야 등 많은 분야에서 직사각형 도파관을 사용하고 있다^{[2][3]}.

TE_{10} 모드는 직사각형 도파관에서 차단주파수가 제일 낮고, 실제로 전송할 때 모드 변환(mode conversion)의 염려가 없는 안정된 단일 모드(single mode)이다. 따라서, TE_{10} 모드를 기본전송모드(dominant mode)라고 하며, 요철을 적용한 직사각형 도파관의 기본 전송모드 또한 TE_{10} 이다.

2-2 요철 직사각형 도파관

안테나에서 사용되고 있는 요철의 원리를 이용하여 직사각형(rectangular) 도파관에 적용하고자 한다. 본 논문에서는 개방형 마이크로파 건조기에서 주변으로 전자파가

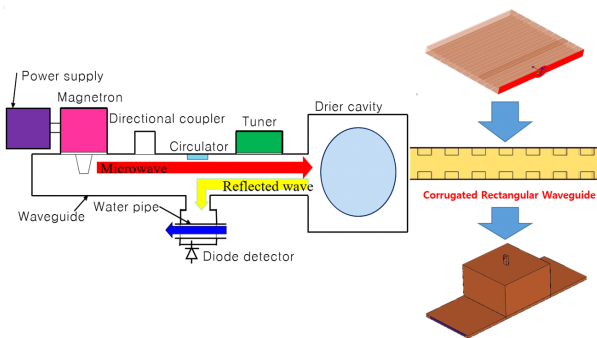


그림 1. 차폐 특성 개선을 위한 제안된 요철 직사각형 도파관 구조

Fig. 1. Proposed CRW structure for improving shielding effectiveness.

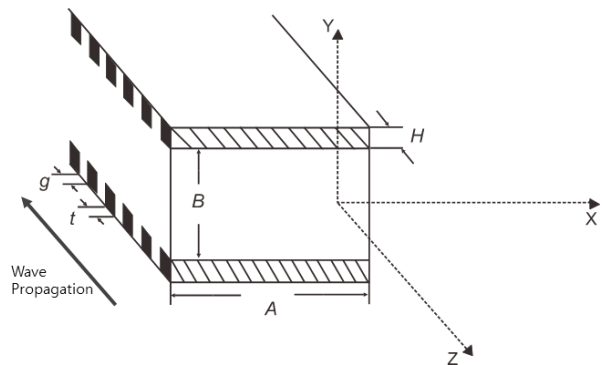


그림 2. 요철 직사각형 도파관 구조

Fig. 2. Structure of CRW.

표 1. 요철 직사각형 도파관 변수

Table 1. Parameter of corrugate rectangular waveguide.

Parameter of corrugate rectangular waveguide	Symbol
Corrugate height	H
Corrugated rectangular waveguide height	B
Corrugated rectangular waveguide width	A
Corrugated rectangular waveguide length	L
Corrugate slot	g
Corrugate width	t

누설되는 것을 저감하기 위해 직사각형 도파관에 요철을 적용하는 방법을 제안한다. 직사각형 도파관에 요철을 적용한 것을 요철 직사각형 도파관(CRW: Corrugated Rectangular Waveguide)으로 정의한다. CRW는 요철 높이(H), 슬롯(g), 간격(t)으로 정하고, 도파관의 높이는 B 의 변수로 정의한다.

요철 직사각형 도파관을 갖는 개방형 컨베이어 벨트형 건조기의 차폐효과 특성을 살펴보기 위해, 3차원 전자기 해석 툴인 CST Microwave Studio 2017 프로그램을 이용하여 전자파 모의해석을 진행하였다.

2-3 요철 직사각형 도파관의 전자파차폐 해석

제작이 가능한 직사각형 도파관을 기준으로 요철 직사각형 도파관의 차폐구간은 $1000(L) \times 600(W) \times 60(G)$ mm³이며, 동작주파수는 마그네트론 동작 주파수인 2.45 GHz로 해석을 진행하였다. 건조실 및 도파관의 재질은 스테인리스(STS304)로 전기 전도율(electric conductivity)은 13.88×10^6 S/m이다. 도파관 높이는 B , 요철의 높이를 H , 요철의 간격을 g , 요철의 간격을 t 인 변수를 가지며, E-field 방향(수평과 수직)에 따른 전자파 해석을 수행하고자 하며, 그림 3은 전자파 해석을 위한 요철을 적용한 직사각형 도파관을 모델링을 나타내고 있다.

차폐율은 공기 중에서의 차폐구간(b)의 F1 지점에서 차폐율과, 금속 내 차폐구간(c)의 F2 지점에서의 dB 값을 뺀 값을 나타낸다. 평면과 진행 방향(P)으로 E-field 방향은 도파관의 투입구 방향을 기준으로 E-field가 수평일 때 수평방향, 도파관의 투입구 방향을 기준으로 E-field가 수직일 때 수직방향으로 나누어서 모의해석을 진행하였다.

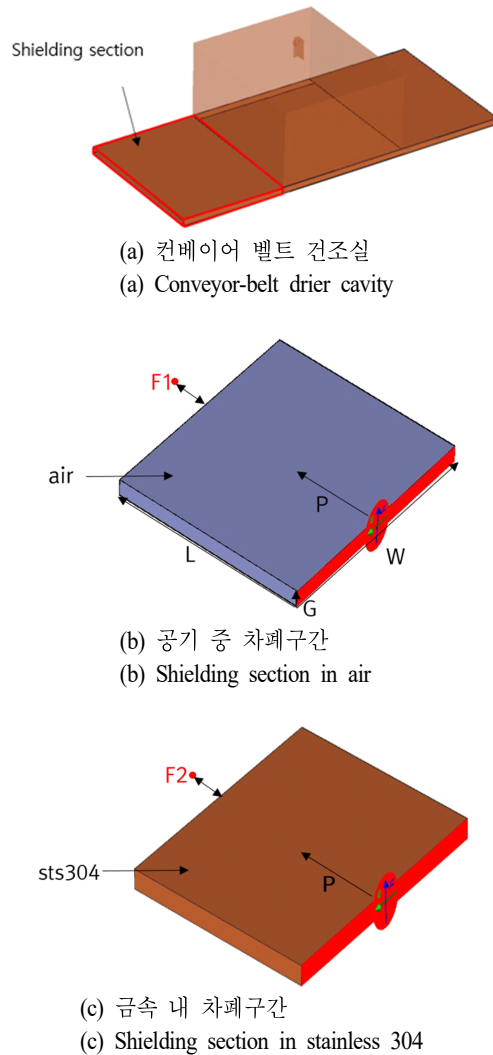


그림 3. 요철 직사각형 도파관의 모델링
Fig. 3. Electromagnetic modeling for CRW.

요철 직사각형 도파관의 차폐구간은 $1,000(L) \times 600(W) \times 60(G)$ mm³에서 차단주파수는 식 (1)의 계산에 의해 E-field 수평방향은 2.5 GHz, E-field의 수직방향은 250 MHz이다. 여기서 a 는 도파관의 폭이며, b 는 도파관의 높이를 나타낸다. 마그네트론의 동작 주파수를 고려하면 E-field 수평방향이 E-field의 수직방향보다 차폐 특성이 우수함을 확인할 수 있다⁴⁾.

$$f_c^{mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

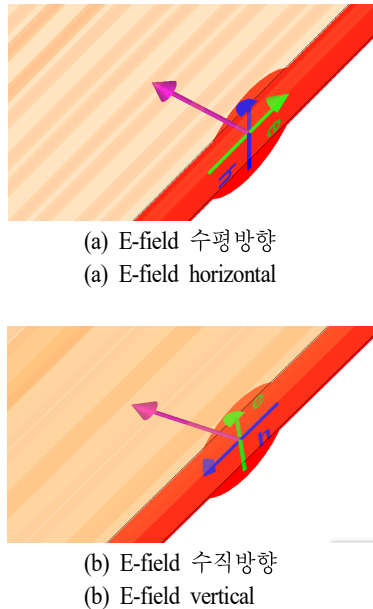


그림 4. E-field(수평 및 수직 방향) 해석
Fig. 4. Simulation of E-field(horizontal/vertical direction).

2-3-1 파라미터 스터디: 도파관 높이(B)

우선 차폐가 가능한 직사각형 도파관의 높이 특성을 알아보기 위해 도파관 높이(B)에 따른 입사면의 E-field 방향을 수직방향과 수평방향으로 각각 해석을 진행하였다. 직사각형 도파관의 높이에 따른 차폐특성 해석결과는 그림 5와 같이 E-field 방향이 수평일 때는 61.2 mm($1/2\lambda$) 이상일 경우에는 E-field가 차폐가 되지 않으며, E-field가 수직의 경우에는 요철 높이에 관계없이 차폐효과가 발생하지 않는다. 수평의 E-field에서 차폐가 가능한 직사각형 도파관 높이는 61.2 mm($1/2\lambda$) 이하이어야 한다. 컨베이어 벨트형 건조실과 도파관의 조립 및 실제 건조되는 공간인 케비티 사이즈를 고려하여 차폐가 되는 도파관의 높이는 61.2 mm($1/2\lambda$)를 넘지 않도록 하여야 한다.

2-3-2 파라미터 스터디: 요철 높이(H)

요철의 높이(H)에 따른 전자파 차폐특성을 분석하기 위하여 도파관 높이가 $1/2\lambda$ 일 때, 요철의 높이(H)에 따른 차폐효과 특성을 살펴보았다. 일반적으로 알려진 평행 하이브리드 모드특성을 검증하고 적용하기 위해 모의해석을 진행하였다. 그림 6과 같이, 요철의 높이(H)에 따른

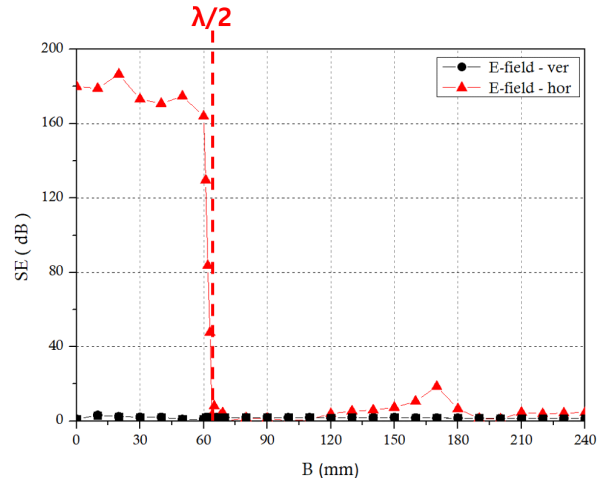


그림 5. CRW의 도파관 높이에 따른 차폐 특성
Fig. 5. Attenuation for waveguide height(B) of CRW.

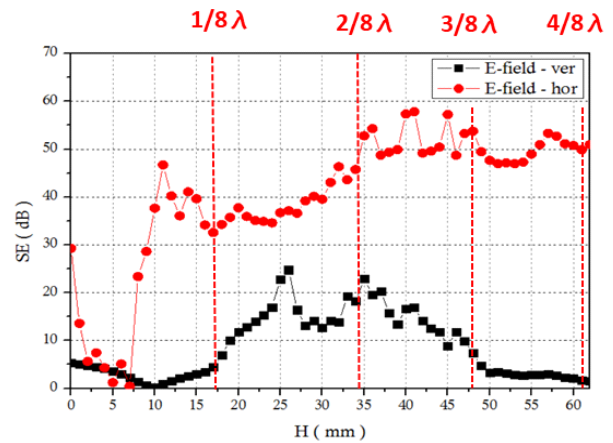


그림 6. CRW의 요철 높이에 따른 차폐 특성
Fig. 6. Attenuation for corrugate height(H) of CRW.

각각의 파장별로 해석 결과를 보면, 일반적으로 알려진 평행 하이브리드 모드특성 $1/4\lambda$ (31.2 mm)일 때 E-field 수평방향 50 dB, E-field 수직방향 24 dB로 가장 좋은 차폐 특성을 가짐을 확인하였다.

2-3-3 파라미터 스터디: 간격비율(t:g)

요철 간격(t)과 슬롯(g)의 파장별 간격 비율에 따른 차폐 특성을 살펴보고자 한다. 요철 슬롯(g) 비율을 1로 고정하고, 각각의 비율로 요철의 간격(t) 비율을 변경하여

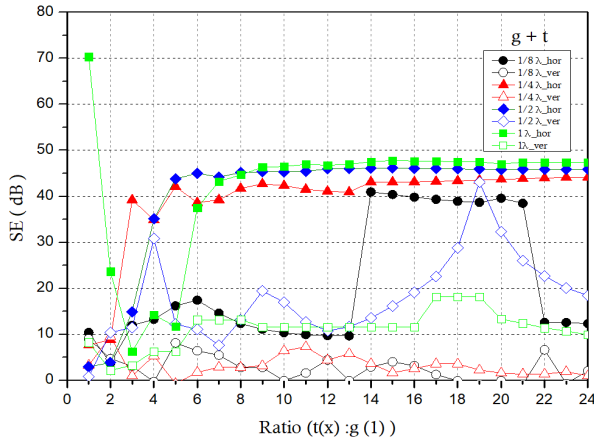


그림 7. 간격비율($t:g$)에 대한 CRW 차폐 특성
 Fig. 7. CRW shielding characteristics with regard to the gap ratio($t:g$).

해석하였다. 요철 슬롯(g)과 요철의 간격(t)의 합이 파장 별로 E-field의 수평방향과 수직방향으로 각각 해석을 진행하였다. 도파관에서 차폐 구간으로 입사하는 E-field는 방향이 일정하지 않기 때문에, 수평 방향과 수직방향 모두를 고려하여 해석을 진행하였다.

해석 결과는 도파관의 전체 길이(L)를 1 m로 고정하고, 요철 슬롯(g)과 요철의 간격(t)의 합이 $1/2 \lambda$ 일 때, 슬롯(g)과 간격 비율 g 와 t 가 1:19의 비율에서 E-field 차폐 특성은 수평방향이 43.09 dB, 수직방향 45.9 dB로 가장 좋은 특성을 가진 것으로 확인되었다. 이때의 요철 슬롯(g)은 3 mm 이하이다. 해당 조건의 경우, CRW의 실제 적용을 했을 경우에는 제작이 어려울 뿐만 아니라, 실제 제작 시 너무 좁은 요철 슬롯 때문에 아크가 발생할 소지가 있다. 따라서, 두 번째로 차폐 특성이 우수하고, 실제 제작이 가능

표 2. 슬롯, 간격비율에 대한 CRW 차폐 특성
 Table 2. CRW shielding characteristics(slot, width).

$K=1/2 \lambda$ $L=1 \text{ m}$	$g:t=(1:19)$ (optimal shielding) ($g \leq 3 \text{ mm}$)	$g:t=(1:4)$ (manufacture available)	$g \leq 3 \text{ mm}$
E-field horizontal	45.9 dB	35.1 dB	Arc and spark occurs
E-field vertical	43.1 dB	30.8 dB	

한 조건은 요철 슬롯(g)과 요철의 간격(t)의 합이 $1/2 \lambda$ 인 조건에서 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t) 비가 1:4이다. 이때의 실제 길이는 $g:t=12.32 \text{ mm}:49.28 \text{ mm}$ 를 가진다. 이 조건에서의 차폐 모의 해석 결과값은 E-field 수평방향이 35.1 dB, 수직방향 30.8 dB를 가짐에 따라 최소 30 dB 이상의 차폐 특성을 가진다.

2-3-4 파라미터 스터디: 요철 길이(L)

CRW의 길이(L)에 따른 차폐특성을 살펴보기 위해 앞에서 모의 해석한 실제 제작 가능한 $g+t=1/2 \lambda$ 조건에서 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)이 비율의 변수를 변경하면서 CRW의 길이(L)를 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 별로 모의 해석을 진행하였다. 해석결과는 $g+t=1/2 \lambda$, $g:t=1:4$ 의 조건에서 $L=0.5 \text{ m}$ 일 때 E-field 수평방향이 28.5 dB, 수직방향 14.9 dB이고, $L=1.0 \text{ m}$ 일 때 E-field 수평방향이 35.1 dB, 수직방향 30.8 dB를 갖는다. 또한, $L=1.5 \text{ m}$ 일 때 E-field 수평방향이 39.2 dB, 수직방향 17.7 dB이며, $L=2.0 \text{ m}$ 일 때, E-field 수평방향이 33.9 dB, 수직방향 7.8 dB임을 확인하였다.

해석결과, 단지 도파관의 길이가 증가하거나 요철이 많다고 해서 차폐 특성이 좋아지는 것은 아니며, 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)의 비율에 따라 최적의 CRW의 길이(L)가 있음을 확인하였다. 실제 개방형 컨베이어 타입 건조기에 제작 및 적용 가능한 CRW 차폐 최적 조건은 $g+t=$

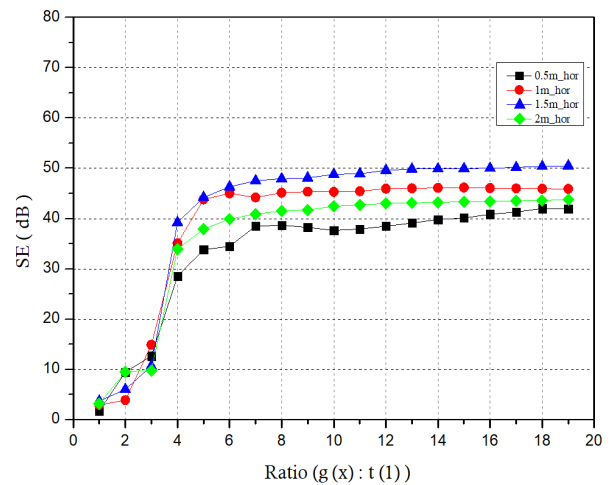


그림 8. CRW 길이별 차폐특성(E-field 수평)
 Fig. 8. Shielding characteristics by CRW length(E-field hor.).

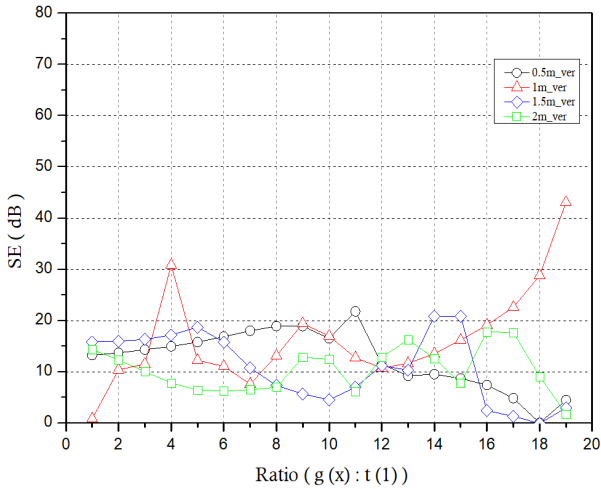


그림 9. CRW 길이별 차폐특성(E-field 수직)
Fig. 9. Shielding characteristics by CRW length(E-field ver.).

표 3. 도파관 길이에 대한 CRW 차폐 특성
Table 3. CRW shielding characteristics for waveguide length.

$K(g+t)=1/2 \lambda$	$L=0.5 \text{ m}$	$L=1.0 \text{ m}$	$L=1.5 \text{ m}$	$L=2.0 \text{ m}$
E-field horizontal	28.5 dB	35.1 dB	39.2 dB	33.9 dB
E-field vertical	14.9 dB	30.8 dB	17.7 dB	7.8 dB

$1/2 \lambda$, $g:t=1:4$, $L=1 \text{ m}$ 를 갖는다. CRW 차폐 최적 조건은 $g+t=1/2 \lambda$, $g:t=1:4$, $L=1 \text{ m}$ 를 갖는다.

2.4 개방형 마이크로파 컨베이어 벨트 건조기의 차폐 해석

전자파 모의해석을 통한 차폐효과성능을 실제 컨베이어 벨트 건조기에 적용하기 위하여, 2-3절에서 최적 차폐특성을 갖는 CRW의 높이(B) 61.2 mm ($1/2 \lambda$), 요철의 높이(H) $1/4 \lambda$ (30 mm), 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)의 합 $g+t=1/2 \lambda$, 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)의 비율 $g:t=1:4$, CRW의 길이 $L=1 \text{ m}$ 의 조건을 갖는 건조기에 적용하여 차폐 해석을 수행하였다. 그림 10과 같이, 건조실의 크기는 $1,200(L1) \times 600(W) \times 800(H1) \text{ mm}^3$ 으로 건조실 상부에 마그네트론 1 kW 를 소스원으로 적용하여 그림 10과 같이 모델링하였으며, CST Microwave Studio(MWS) 2017으로 CRW E-field 차폐 모의해석을 진행하였다.

그림 11 및 그림 12와 같이, 컨베이어 벨트형 마이크로

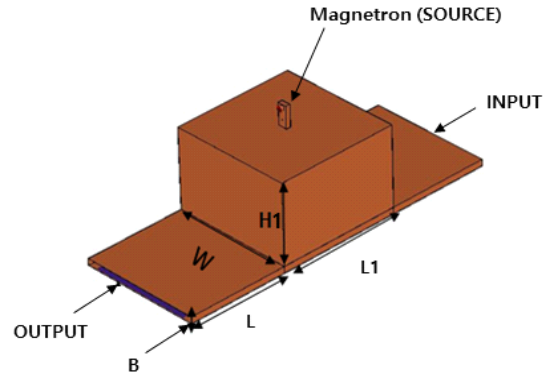
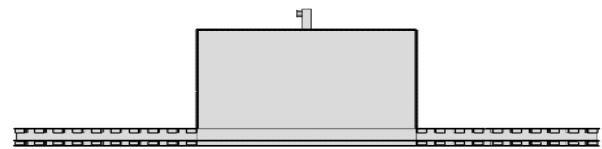
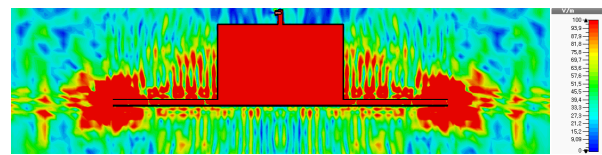


그림 10. 컨베이어 벨트형 마이크로파 건조기의 모델링
Fig. 10. Modeling of microwave conveyor-belt dryer.

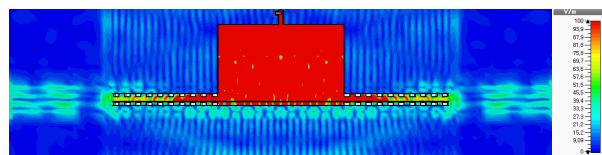
파 건조기의 투입구와 출구에 기존 직사각형 도파관 구조를 갖는 경우, 차폐특성이 없어 건조기 외부로 E-field가 누설되는 것을 확인할 수 있으며, 반면에 제안된 CRW에서는 E-field가 투입구 밖으로 누설되지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 11은 측면에서 CRW E-field 차폐 모의



(a) 측면
(a) Side view



(b) 기존 구조
(b) Existing structure



(c) 제안된 CRW 구조
(c) Proposed CRW structure

그림 11. CRW E-field 차폐 모의해석
Fig. 11. CRW E-field shielding simulation.

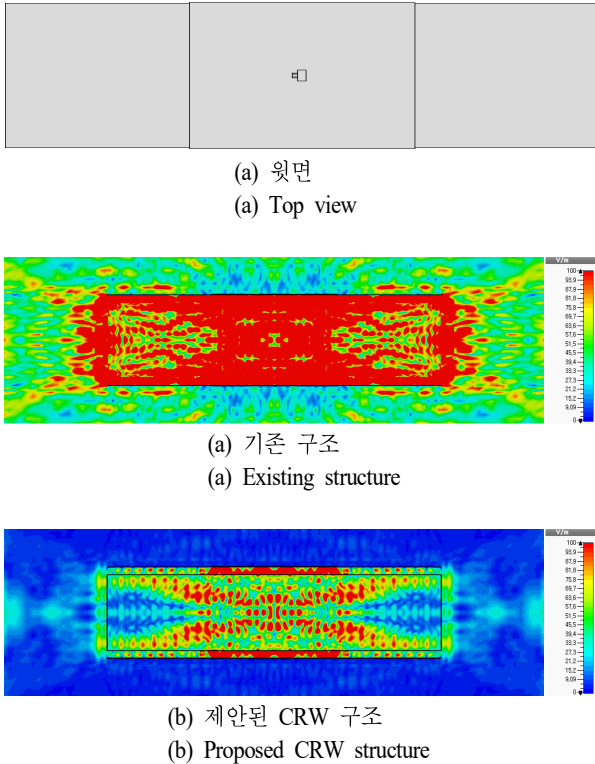


그림 12. CRW E-field 차폐 모의해석
Fig. 12. CRW E-field shielding simulation.

해석 결과를 나타낸 것이며, 그림 12는 윗면에서 CRW E-field 차폐 모의해석 결과를 나타낸다.

III. CRW 제작 및 측정

전자파해석 결과를 바탕으로 실제 실험을 통해 요철 직사각형 도파관의 차폐효과 성능을 검증하기 위하여, 다음 표 4와 같이, 설계 및 제작을 진행하였다. 제작된 요철 직사각형 도파관의 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)의 비율 $g:t=1:4$, CRW 높이(B) $61.2\text{ mm}(1/2\lambda)$, 요철의 높이(H) $1/4\lambda$ (30 mm)를 가지며, CRW의 길이(L)를 0.5 m , 1.0 m , 1.5 m 를 갖는 3종을 제작하였다. 직사각형 도파관 길이(L)를 1.0 m , 직사각형 도파관 높이(B) $61.2\text{ mm}(1/2\lambda)$ 로 해서 직사각형 도파관을 1종을 제작하였다.

차폐효과 측정 방법은 IEEE Std. 299 규격을 적용하여 수행하였다. 측정 제품은 농산물 상업용 마이크로파 건조기를 대상으로 진행하였으며, 측정기기는 RF Signal Gene-

표 4. 제작된 CRW 사양

Table 4. Designed CRW specifications.

No.	Waveguide	Waveguide length	Slot ratio	Waveguide height	CRW height
①	Rectangular waveguide	1.0 m	-	61.2 mm	-
②	CRW-1	0.5 m	1:4	61.2 mm	30 mm
③	CRW-2	1.0 m	1:4	61.2 mm	30 mm
④	CRW-3	1.5 m	1:4	61.2 mm	30 mm

rator(Agilent사의 E8257D 모델), Spectrum Analyzer(Agilent사의 E4448A 모델), Microwave Amplifier(Agilent사의 83017A 모델), Horn Antenna(ETS-Lindgren사의 3115 모델)를 사용하였다. 실제 측정 결과는 모의해석 결과와 동일한 요철 슬롯(g)과 요철 간격(t)의 비율 $g:t=1:4$, CRW 높이(B) $61.2\text{ mm}(1/2\lambda)$, 요철의 높이(H) $1/4\lambda$ (30 mm), CRW 길이(L) 1.0 m 일 때 가장 좋은 차폐 특성을 확인하였다.

실제 모의 해석한 차폐특성과 실제 측정값은 약간의 오차가 존재한다. 이는 CRW를 제작할 때 도파관과 요철의 접합 시 전체 용접 제작이 불가능하여 부분용접을 진행하여 요철과 도파관 사이에 틈이 발생하였다. 요철 제작 방법은 제작 소요 비용 및 시간 단축을 위하여 요철을 분리하여 각각 용접하는 것이 아니라, 스테인리스 재질의 밴딩 제작방식을 이용하였다. 이로 요철이 수직으로 제작되어야 하지만 제작상의 한계로 인해 완전한 수직각(edge)으로는 만들기가 불가능하여 모의 해석값과 실제 측정값이 차이가 발생하였다. 표 5는 직사각형 도파관 및 CRW 도파관의 차폐효과를 측정값을 비교하였다.

표 5. 직사각형 도파관 및 CRW 도파관 차폐효과 비교

Table 5. Comparison of rectangular waveguide and CRW SE measurements.

No.	Waveguide	CST design simulation		Measurement	
		Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
①	Rectangular waveguide	50 dB	0 dB	26.7 dB	0 dB
②	CRW-1	40.8 dB	14.9 dB	24.1 dB	26.3 dB
③	CRW-2	35.1 dB	30.8 dB	44.4 dB	27.5 dB
④	CRW-3	50 dB	17.2 dB	29.7 dB	20.9 dB



그림 13. CRW 전자파 차폐 측정
Fig. 13. CRW electromagnetic shielding effectiveness measurement.

IV. 결 론

현재 친환경적이고 높은 에너지 효율을 가지는 마이크로파 건조기가 농산물 건조와 반도체, 나노, 바이오, 의학 분야 등의 산업분야에서 많이 사용되고 있고, 그 영역이 확장되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 현재 산업현장에 많이 쓰이고 있는 컨베이어 벨트형 마이크로파 건조기의 차폐 특성에 대해 분석 및 연구를 진행하였다. 특히, 컨베이어 벨트형 마이크로파 건조기는 건조물의 투입이 용이하고, 컨베이어 벨트를 적용하여 건조물의 이동이 용이하며, 표면이 타거나 파괴되는 것 없이 마이크로파로 인해 내부까지 건조가 되기 때문에 산업현장에서 주로 쓰이고 있다. 개방형 구조의 차폐특성을 위하여 본 논문에서는 요철을 갖는 직사각형 도파관을 건조기에 적용하여 대략 30 dB의 차폐특성을 갖는 컨베이어 벨트형 마이크로파 건조기를 설계하고, 실험적으로 검증하였다.

References

[1] 전원표, "열풍건조공정의 에너지 절약 기술 동향," 에

- 너지절약기술동향, 32, pp. 105-107, 2005년.
- [2] 정문희, 제도홍, 한석태, 김승래, "Corrugated 정사각형 도파관 구조를 이용한 85~115 GHz 90도 위상천이기 개발," 한국전자과학기술논문지, 24(12), pp. 1215-1218, 2013년 12월.
- [3] G. J. Vishnu, G. Jani, D. Pujara, and S. S. Menon, "U-band hybrid corrugated horn: An alternative to the conventional radial corrugated horns," in *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference(APMC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 853-856.
- [4] R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, "Shielding theory and practice," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, pp. 187-201, Aug. 1988.
- [5] 이경원, 정영철, 홍익표, 육종관, "수정된 설계 방정식을 이용한 허니콤 구조의 차폐 효과 예측," 한국전자과학기술논문지, vol. 16, no. 9, pp. 862-871, 2005년 9월.
- [6] K. W. Lee, "Prediction of shielding effectiveness in honeycomb structure using the modified design equation," Master's thesis, Yonsei University, Seoul, Korea, pp. 16-22, 2005.
- [7] G. Craven, "Waveguide bandpass filters using evanescent mode," *Electronics Letters*, vol. 2, no. 7, pp. 251-252, Jul. 1966.
- [8] A. M. B. Al-Hariri, "Low attenuation microwave waveguides," Ph.D. dissertation, University of London, London, Oct. 1974.
- [9] R. Baldwin, P. A. McInnes, "Attenuation in corrugated rectangular waveguide," *Electronics Letters*, vol. 7, no. 26, pp. 770-772, 1971.
- [10] P. J. B. Clarricoats, A. D. Olver, and S. L. Chong, "Attenuation in corrugated circular waveguide. Part 1: Theory," in *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution*, Nov. 1975, vol. 122, no. 11, pp. 1173-1179.

김 성 연



2008년 3월: 부경대학교 전기공학과 (공학사)
2017년 9월: 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
2017년 9월~현재: 경상대학교 전자공학과 박사과정
2008년 1월~2014년 1월: 삼성전자 선임

연구원

2014년 1월~현재: 한국산업기술시험원 선임연구원
[주 관심분야] EMI/EMC Analysis & Measurement, Shielding, RF/Microwave Antenna & Circuit

이 왕 상



2004년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2006년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
2013년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2006년 2월~2006년 8월: KT 컨버전스본

부 선임연구원

2006년 9월~2010년 8월: 한국산업기술시험원 전자과학기술센터 선임연구원
2013년 9월~2014년 8월: 한국철도기술연구원 녹색교통물류시스템공학연구소 선임연구원
2014년 9월~현재: 경상대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] RF/Microwave Antenna, Circuit & System, RFID, WPT, EMI/EMC

배 상 현



2016년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
[주 관심분야] High Power RF/Microwave, EMI/EMC Analysis, Shielding, RF/Microwave Antenna & Circuit