



실험계획법을 이용한 마이크로파 차폐용 개폐도어부의 최적설계

Optimal Design of Microwave Shielding Door by Using of Design of Experiments

이가희¹, 김광^{1,#}
Ka Hee Lee¹ and Kwang Kim^{1,#}

¹ 한국공학대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea)
Corresponding Author / E-mail: kimkwang@tukorea.ac.kr, TEL: +82-31-8041-0428
ORCID: 0000-0001-9734-3605

KEYWORDS: High-frequency electromagnetic field simulation (고주파 전자기장 해석), Microwave drying and heating system (전자기파 가열건조기), Design of experiments (실험계획법), Microwave shielding (전자기파 차폐), Optimal design (최적설계)

In the heating and drying system using microwaves, an optimal design method was presented to effectively shield microwaves leakage between the door and the cylindrical applicator. In order to protect the human body from leaking microwaves, it is necessary to keep the intensity of microwaves below 5 mW/cm². The door part adopts a choke structure and includes a number of design factors, such as, fin shape, slit shape, and a gap between the applicator and the door. The geometry was optimized by design of experiments, applying full factorial design and response surface method in a 4-factor, 2-level design. The results obtained by ANSYS HFSS analysis were applied to the intensity of microwave leakage according to the change of the design factors. The shape of the choke structure was optimized using Minitab, a statistical program. The microwave heating and drying system was manufactured based on optimal design value and the leakage of microwaves between the door and the applicator was measured. We confirmed that the experimental values were consistent with the simulation values.

Manuscript received: August 23, 2022 / Revised: October 19, 2022 / Accepted: October 31, 2022
This paper was presented at KSPE Spring Conference 2022

NOMENCLATURE

L	=	Length of Microwave Transmission Path
L ₁	=	Length of Inner Choke Wall
L ₂	=	Length of Fin
L ₃	=	Overlapped Length between Door Base and Applicator
G ₁	=	Gap Distance between Door Base and Applicator
G ₂	=	Gap Distance between Fin and Door Base
S	=	Height of Slit Wall
λ	=	Wave Length of Microwave

1. 서론

마이크로파를 이용한 가열건조시스템은 일반적으로 가정에서 널리 사용되는 전자레인지 이외에도 의료분야에서는 치과용 지르코니아의 소결 등에 활용되고 있다[1,2]. 그 외에도 3 kW 이상의 고출력 마그네트론 적용하는 사례[3]와 좁은 영역에 마이크로파를 집중시켜 바이오매스 가열용[4,5]으로도 활용하고 있으며 최근에는 폴리머의 용용에도 건조용[6,7]으로도 연구가 활발하게 진행되고 있다. 마이크로파 건조기는 2.45 GHz의 고주파 발진에 의해 피건조물에 포함된 물 분자 간 회전 충돌로 발생된 열에너지를 사용하여 가열 건조하는 장치이다.

마이크로파를 활용한 장치의 경우 발생할 수 있는 마이크로파의 누설은 통신기기의 전파를 교란시키며 특히 인체에 미치는

영향으로 인해 전자레인지의 경우 피폭기준을 5 (mW/cm²) 또는 138 (V/m) 이하로 제한하고 있다[8]. 따라서 마이크로파 누설을 안전하게 차폐하기 위해 피건조물의 투입과 배출에 필요한 개방부를 나사 체결방식으로 설계한 경우 나사를 체결하고 푸는데 많은 시간이 소요되어 작업성이 저하된다. 이와는 달리 건조 대상물의 투입과 배출 시간을 단축하기 위해 마이크로파 차폐 특성이 우수한 재료를 사용하거나[9] 누설부의 형상을 변형시키는 방법을 도입하였다[10]. 특히, 건조 대상물의 투입과 배출을 간단하게 실행하기 위한 도어(Door)로 대체하고 초크(Choke) 형상을 적용한 방식[11]은 마이크로파 누설을 차폐할 수 있으나 초크 형상 설계에 필요한 다수의 설계인자가 존재하므로 최적의 차폐 도어를 설계하는 것이 곤란하다.

본 연구에서는 마이크로파의 누설을 방지하기 위한 차폐 도어 설계에 있어서 도어 구조를 결정하는 핀(Fin), 슬릿(Slit), 초크(Choke) 형상과 본체와의 갭(Gap) 및 중첩 길이 등 다수의 설계 인자들을 최적화하기 위해 실험계획법을 활용하고 해석과 실험을 통해 설계의 유효성을 확인하였다. 마이크로파 누설량은 ANSYS HFSS를 사용한 해석을 통해 파악하였으며 통계 해석을 위해 Minitab을 활용하여 최적 설계 값을 도출하였다.

2. 마이크로파 가열건조기 해석

2.1 마이크로파 가열건조기 모델링

플리머 또는 음식물의 가열건조 등에 활용하기 위해 자체 제작한 원통형의 가열건조기는 Fig. 1과 같다. 1 kW 출력을 갖는 마그네트론 2개를 사용하고 있으며 도파관(Wave Guide)을 통해 건조기 본체(Applicator)로 마이크로파가 전달되며 마그네트론 작동 시 출력량과 반사량은 방향성정합기(Directional Coupler)를 통해 상시 모니터링함으로써 과도한 반사에 의해 마그네트론의 손상이 발생하지 않도록 구성하였다. 마이크로파 가열건조기의 본체는 원통 형태를 갖고 있으며 제원을 Table 1에 나타내었으며 Fig. 2에는 가열건조기의 초크(Choke) 구조의 차폐 도어 부에서 누설되는 전자기장을 파악하기 위한 전자기장 해석모델을 나타내었다. Fig. 3에는 차폐 도어부의 세부 명칭을 나타내었다. 건조통 본체(Applicator)와 차폐 도어의 경계면에서 마이크로파가 누설되며 G_1 , G_2 , L_1 , L_2 , S 는 설계 인자로 크기 변화에 따라 누설량이 변화하게 된다. G_1 은 건조통 본체와 차폐 도어 간 틈새(Gap)이며 평탄도 문제로 인해 발생한다. 나사 체결방식에서 체결력에 의해 거의 영에 가까웠으나 원터치 록킹 방식에서는 필연적으로 틈새가 발생하며 건조과정 중 발생한 수증기가 틈새(G_1)로 누출되며 이를 방지하기 위해 일정한 두께 이상의 실링고무(Sealing Rubber) 또는 가스켓(Gasket)의 적용이 요구된다. G_2 는 차폐 도어 베이스(Door Base)에서 핀(Fin)까지의 거리이며 독립변수로서 G_1 의 영역과는 중복되지 않는다. 개폐 도어부의 차폐 성능을 높이기 위해서는 초크 구조를 복수의 슬릿으로 분할하여 개방된 전송 경로를 형성해야 한다. 이와 함께

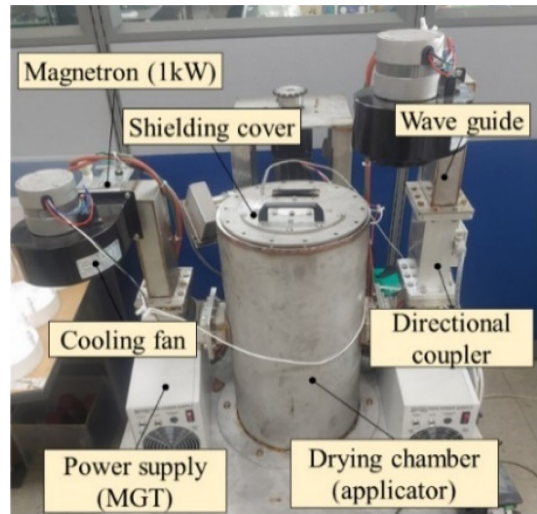


Fig. 1 Microwave heating and drying system

Table 1 Specification of system

Components	Specification
Magnetron	1 kW, 2.45 GHz (2M246, LG)
Directional coupler	3kW (BPM 112, National)
Applicator (SM45C) [mm]	∅280 × H510, t = 1.0
Wave guide	□86 × 43 mm (WR-340, Power supply Inc.)
Power supply	1.1 kW (MDT-1100S, Power Supply Inc.)

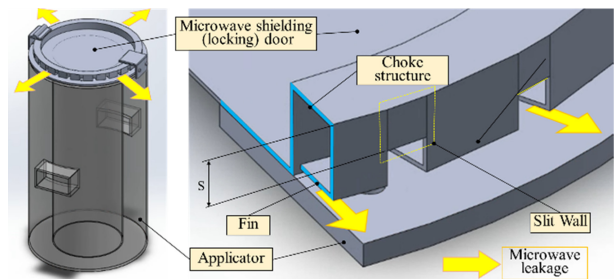


Fig. 2 Model for electromagnetic field analysis

Fig. 2에서와 같이 슬릿이 형성되고 슬릿의 높이 S 가 증가할수록 전기장의 전파를 억제하는 전기장의 임피던스를 증가시키는 효과가 있으며[11] 결과적으로 마이크로파 누설량을 감소시킬 수 있다[10]. 또한 슬릿의 높이 S 는 내측 초크 벽(Inner Choke Wall, L_1)보다는 낮게 설정해야 한다. 초크 구조를 갖는 차폐 도어 설계에 있어 식(1)과 같이 내측 초크 벽 길이(L_1)와 외측 초크 벽 길이(L_2)의 합이 마그네트론의 파장(λ)의 4분의 1을 유지하여 설계되어야 한다[10]. 이때 λ 는 12.24 cm이다.

$$L_1 + L_2 = \lambda/4 \tag{1}$$

도어록킹방식에 있어서 완전 밀봉을 실현하기는 어렵지만 G_1 을 줄일수록 차폐에 효과가 있다. L_3 는 차폐 도어 베이스와

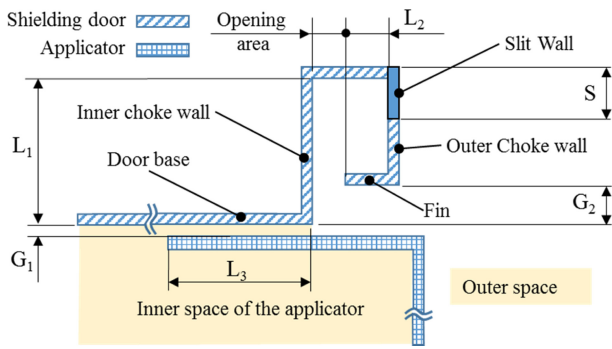


Fig. 3 Cross section of door with choke structure

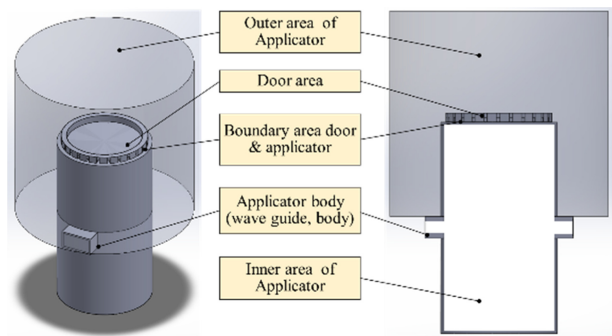


Fig. 4 Boundary area for electromagnetic field analysis

건조통 본체가 중첩된 영역으로써 실링 고무를 설치하기 적당한 길이(폭)를 유지하면 된다.

가열건조기의 해석을 위한 3D 모델링은 SOLIDWORKS를 활용하고 여섯 개의 파트로 구성하여 ANSYS HFSS로 전자기장 해석을 진행하였다. 전자기장의 분포를 파악하기 위한 해석 영역은 Fig. 4와 같다. 건조통 본체 일부와 차폐 도어를 감싸고 있는 외부 영역, 개폐용 차폐 도어 영역, 도어와 본체의 경계 영역, 본체(Applicator)와 도파관의 외벽 즉 건조통 외벽 영역, 가열건조기의 본체 내부 영역으로 구성되어 있다.

2.2 전자기장 해석을 위한 경계조건

두 개의 마그네트론 출력은 1 kW 그리고 주파수는 2.45 GHz로 설정하여 해석을 진행하였다. 해석에 있어 비유전율(ϵ_r)이 1인 공기를 제외한 건조통 본체, 웨이브가이드 그리고 차폐용 도어는 도체인 구조용 강판(SM45C, $\epsilon_r = 10^{10}$)으로 경계면에서 전계는 완전히 반사하는 성질을 갖게 된다. 본 해석에서는 차폐 도어 외부로 누설되는 것을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 외부 공기층(Outer Area of Applicator), 본체 내부, 도어와 본체의 경계 영역에서 전기장의 세기(V/m)를 파악하는 것으로 마이크로파의 누설을 확인한다.

2.3 요인선정과 전자기장 해석결과

차폐 도어 모델링 단계에서 마이크로파 누설에 영향을 미치는 설계인자는 $G_1, G_2, L_1, L_2, L_3, S$ 로 파악되었다. 식(1)에서

Table 2 Set of factor

Factor	Minimum [mm]	Median [mm]	Maximum [mm]
G_1	0.6	1.3	2
G_2	0	1.5	3
L_2	7.6	9.8	12
S	0	5	10

L_2 를 설계인자로 선택하면 L_1 은 자동적으로 결정되므로 L_1 을 제외하고 L_3 는 10 mm로 확정하고 설계인자에서 제외하였다. 실험계획법에서 결정해야 할 4개의 설계인자로서 G_1, G_2, L_2, S 를 선정하였다. 가열건조기의 크기, 가스켓(Gasket)의 설치 용이성 및 초크 형상의 제작성을 고려하여 설계인자들의 최댓값 및 최솟값을 결정한 후 Table 2에 나타내었다. 슬릿의 높이 S 는 내측 초크 벽 길이 L_1 보다 작게 설정되어야 하므로 0-10 mm로 정의하였다.

마이크로파는 중첩부 L_3 를 통과하여 초크 형상 내부로 전파되는데 이때 핀(Fin)의 제작성을 고려하여 L_2 의 범위를 7.6-12.0 mm로 설정하였다. G_1 은 가스켓의 두께를 고려해 0.6-2 mm로 설정하고 G_2 는 최솟값인 0 mm에서 3 mm로 정의하였다.

4인자 2수준의 완전요인배치법으로 실시한 해석결과는 Table 3과 같으며 반응값(E-Field)은 차폐 도어로부터 5 cm 떨어진 거리에서의 전기장의 최댓값이다. Run5에서 누설된 전기장의 세기는 19.28 (V/m)로 피폭기준 137 (V/m)을 초과하지 않으나 Run14의 경우 598.23 (V/m)으로 피폭기준을 초과한다. Fig. 5는 Run5와 Run14에서의 전기장 분포를 나타낸 것으로 Run14는 Run5와 달리 건조통과 차폐 도어 외부로 전기장이 누설됨을 알 수 있다. Run17은 최솟값과 최댓값의 중앙점이다.

3. 실험계획법 및 마이크로파 차폐 도어 최적화

3.1 마이크로파 누설량에 대한 분산분석

각 설계인자가 누설량에 미치는 영향(주효과)과 2개 이상의 설계인자 조합에 의해 미치는 영향(교호효과)을 파악하고자 Table 3의 누설량에 대한 분산분석을 진행하여 Table 4에 결과를 나타내었다. Effect는 설계인자가 누설량에 미치는 실질적인 영향 정도이며, coefficient는 회귀식의 상수로 Effect의 절반이다. 그 값이 음수인 경우 설계 변수가 최솟값에서 최댓값으로 증가할수록 반응값인 누설량이 감소함을 의미한다. T-value가 클수록 또한 p-value가 작을수록 누설량에 미치는 영향이 크다고 판단한다. 다만 p-value가 .05를 초과하는 L_2 및 S 의 경우에도 설계인자로서 미치는 영향은 유의하다고 판단한다. Table 4로부터 누설량(Y)과 설계 변수들 간의 관계를 나타내는 회귀방정식을 다음의 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$Y = 234.3 + 120.6G_1 + 130.4G_2 - 48.2L_2 - 21.8S \quad (2)$$

Table 3 Full factorial design

Run	G ₁	G ₂	L ₂	S	E-field [V/m]
1	0.6	0	7.6	0	25.75
2	0.6	3	7.6	0	462.7
3	0.6	0	12	0	33.90
4	0.6	3	12	0	76.90
5	0.6	0	7.6	10	19.28
6	0.6	3	7.6	10	241.7
7	0.6	0	12	10	30.43
8	0.6	3	12	10	19.69
9	2	0	7.6	0	210.6
10	2	3	7.6	0	491.7
11	2	0	12	0	178.2
12	2	3	12	0	569.4
13	2	0	7.6	10	210.1
14	2	3	7.6	10	598.2
15	2	0	12	10	123.1
16	2	3	12	10	457.9
17	1.3	1.5	9.8	5	25.76

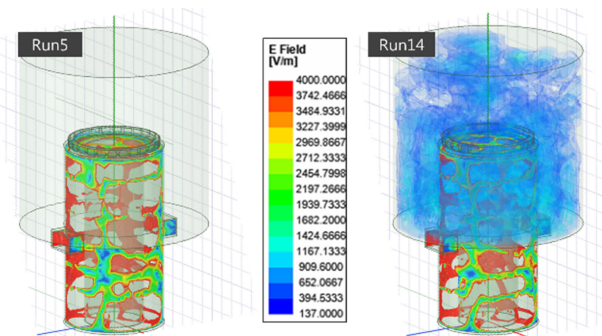


Fig. 5 Results of electromagnetic wave analysis of run 5 & 14

Table 4 Analysis of variance for E-field

Term	Effect	Coefficient	T-value	P-value
Constant		234.3	8.87	.000
G ₁	241.1	120.6	4.57	.001
G ₂	260.9	130.4	4.94	.000
L ₂	-96.3	-48.2	-1.82	.095
S	-43.6	-21.8	-0.83	.427

누설량에 대한 주효과도와 교호작용도는 Figs. 6과 7과 같다. x축은 각 인자의 수준이며, y축은 반응값인 누설량의 크기(E-field)이다. 주효과도에서 기울기를 통해 설계인자인 G₂, G₁, L₂, S 순으로 반응값에 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 중심점 (Center Point, Run17)이 주효과도의 직선상에서 크게 벗어난

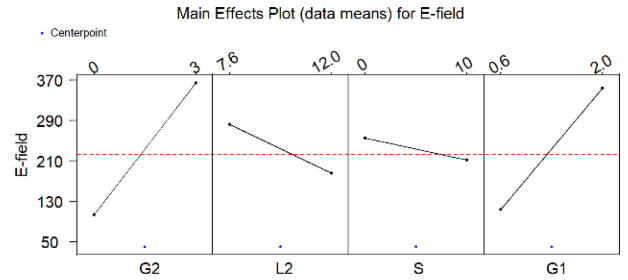


Fig. 6 Main effect plot for E-field

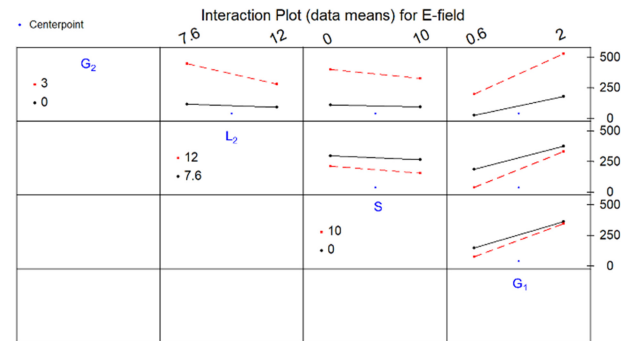


Fig. 7 Interaction plot for E-field

비선형성을 보이므로 식(2)의 회귀방정식을 보완해야 할 필요가 있다. 또한 교호작용도에서 설계인자의 변화에 따라 반응값이 기울기를 갖고 있어 상호작용도 존재하고 있어 보다 높은 차수의 추가 실험을 필요로 한다. 이에 고차의 실험으로서 반응표면분석법을 실시하였다.

3.2 반응표면분석법

반응표면분석법 중 보다 적은 실험으로 곡면을 추정할 수 있도록 중심합성계획법을 활용하였다. 중심합성계획법은 요인 실험을 기반으로 축점과 중심점을 추가한다. 설계인자 4개를 실험 인자로 설정하면 꼭짓점 블록 2⁴개, 축점 블록 2 × 4개, 중심점 7개로 총 31번의 실험을 수행한다.

Run25에서 Run31까지는 중심점으로 7개가 동일한 조건에서의 해석으로 동일한 반응값(누설량, E-field)을 보여준다. 최적 조건은 인자의 수준 사이에서 결정되어야 하므로 축점이 수준을 벗어나지 않도록 하는 면중심중심합성법으로 진행하여 해석 결과를 Table 5에 나타내었다. 반응표면분석법의 분산분석 결과는 Table 6과 같다. 인자 간에 중속되는 효과가 있을 수 있어 완전요인배치법과 다르게 한 번에 하나씩 인자를 제외하는 절차로 진행한다. 블록, 교호작용, 제공항 순으로 차례대로 제외하면서 플링하고 P-value 값이 높은 순으로 제거한다. 분산분석을 통해 도출한 반응값(E-field)의 회귀방정식은 식(3)과 같다.

$$Y = 63.7 + 113.4G_1 + 124.1G_2 - 46.5L_2 - 17.0S + 170.9L_2 * L_2 - 35.6G_2 * L_2 + 44.0G_1 * G_2 \quad (3)$$

식(3)에 대한 결정 계수(R²)는 89.5%로 모형을 잘 설명해

Table 5 Response surface methodology

Run	G ₁	G ₂	L ₂	S	E-field [V/m]
1	0.6	0	7.6	0	25.76
2	0.6	3	7.6	0	462.7
3	0.6	0	12	0	33.90
4	0.6	3	12	0	76.89
5	0.6	0	7.6	10	19.28
6	0.6	3	7.6	10	241.7
7	0.6	0	12	10	30.43
8	0.6	3	12	10	19.69
9	2	0	7.6	0	210.6
10	2	3	7.6	0	491.7
11	2	0	12	0	178.2
12	2	3	12	0	569.4
13	2	0	7.6	10	210.1
14	2	3	7.6	10	598.2
15	2	0	12	10	123.1
16	2	3	12	10	457.9
17	1.3	0	9.8	5	23.46
18	1.3	3	9.8	5	170.4
19	1.3	1.5	7.6	5	268.8
20	1.3	1.5	12	5	202.9
21	1.3	1.5	9.8	0	64.66
22	1.3	1.5	9.8	10	107.0
23	0.6	1.5	9.8	5	31.57
24	2	1.5	9.8	5	144.5
25	1.3	1.5	9.8	5	40.82
26	1.3	1.5	9.8	5	40.82
27	1.3	1.5	9.8	5	40.82
28	1.3	1.5	9.8	5	40.82
29	1.3	1.5	9.8	5	40.82
30	1.3	1.5	9.8	5	40.82
31	1.3	1.5	9.8	5	40.82

Table 6 Analysis of variance for E-field

Term	Coefficient	T	P
Constant	63.65	3.547	.002
G ₁	113.44	7.440	.000
G ₂	124.11	8.140	.000
L ₂	-46.48	-3.048	.006
S	-17.02	-1.116	.276
L ₂ * L ₂	170.87	7.257	.000
G ₂ * L ₂	-35.64	-2.204	.038
G ₂ * G ₁	43.98	2.720	.012

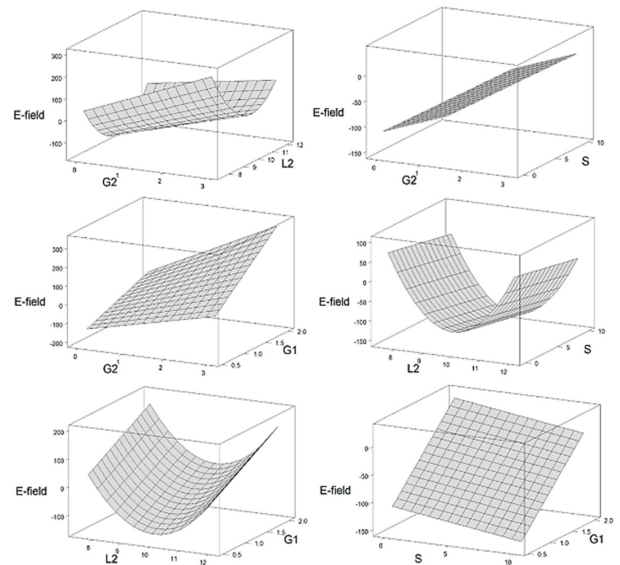


Fig. 8 Surface plot for all factor pairs

주고 있다. Table 6에서 보듯이 요인 S는 p-value가 0.276으로 반응값에 적은 영향을 미치지만 4개의 설계인자 중 하나의 인자로서 회귀방정식에 포함되어야 한다. Fig. 8은 모든 요인 쌍 (Factor Pairs)에 대한 표면도(Surface Plot)이며 G₁과 G₂는 값이 작을수록 즉 최소값에 가까울수록 E-field 값도 작아지는 것을 확인할 수 있다. 교호작용이 존재하는 인자 간의 그래프 양상이 비선형적인 곡면인 것을 확인할 수 있다.

3.3 반응 최적화(차폐 도어의 형상 최적화)

식(3)의 회귀방정식을 통해서 누설량(E-field)를 최소화하기 위해 인자들의 최적 조합을 찾는 반응 최적화를 실시하여 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 인체안전기준인 허용 전력 밀도[8]인 5 [mW/cm²]를 전기장 강도로 환산하면 137 [V/m]로 나타낼 수 있다. 차폐 도어의 최적 형상은 G₁ = 0.6 mm, G₂ = 0 mm, L₂ = 9.9 mm, S = 10 mm이며, 최적 형상을 기준으로 쇼크 구조를 갖는 마이크로파 차폐 도어를 제작하였다.

4. 최적 형상 해석결과 및 실험 결과 비교

4.1 최적화 형상 해석결과

Fig. 10은 3.3절에서 얻어진 최적 형상을 적용한 전자기장 해석 결과이다. 건조통 본체 내부에 피 건조물로서 물($\epsilon_r = 81.0$) 1 l를 Fig. 11과 같이 테프론 트레이($\epsilon_r = 2.1$)에 채우고 양쪽의 마그네트론은 각각 500 W로 발진시켜 해석을 진행하였다. Fig. 10(a)는 인체안전기준 이상의 전기장을 표시한 것으로 마이크로파 차폐 도어 외부로는 기준 이상의 전기장 누설은 발생하지 않았다. 차폐 도어에서 5 cm 떨어진 곳에서의 전기장 강도를 확인한 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 황축은 측정위치이며 종축은 각 측정위치에서의 누설량(E-field)이다. Fig. 11과 같이 원형인

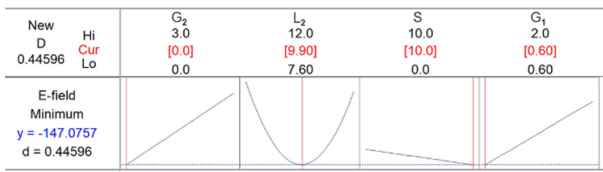
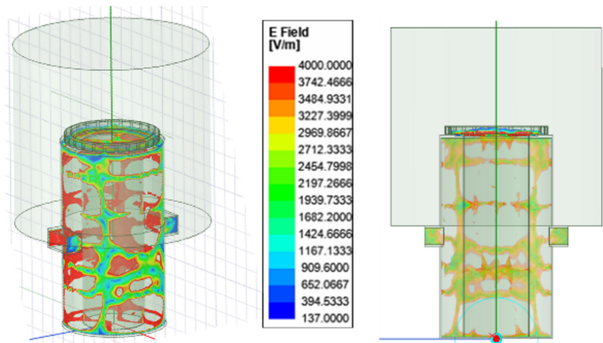
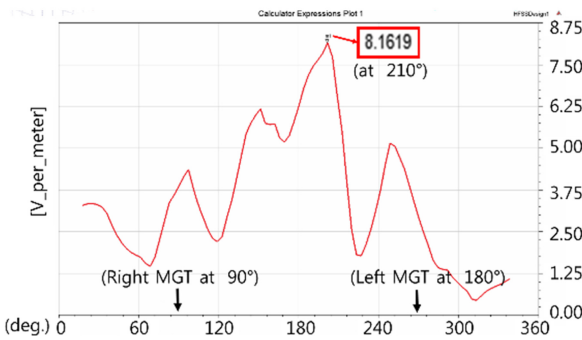


Fig. 9 Shape optimization of microwave shielding door



(a) Simulation results of optimized condition



(b) Maximum E-field strength at a distance of 5 cm from the door

Fig. 10 Electromagnetic field analysis of optimization conditions

차폐 도어의 원주방향으로 0°에서 360°까지 해석결과를 나타낸 것이다. 그 결과 210°에서 8.1619 [V/m]로 최대값을 갖는다. 전력밀도값으로 환산하면 0.0177 [mW/cm²]로 차폐 도어는 마이크로파를 이상적으로 차폐하고 있음을 알 수 있다.

4.2 실험 및 해석결과와의 비교

3.3절에서 얻어진 최적 형상을 기준으로 제작된 마이크로파 차폐 도어를 Fig. 11과 같이 마이크로파 건조기에 설치하였다. 4.1절에 적용한 해석조건과 동일하게 물 1 l를 테프론 트레이에 채우고 양쪽의 마그네트론은 각각 500 W로 발진시켜 이때 차폐도어 주위로 누설되는 전자기파를 측정하였다. 개폐도어로부터 5 cm 떨어진 거리에서 원주 방향을 따라 마이크로파 누설량을 측정하였다. 피건조물이 없는 상태에서 마그네트론을 동작시키는 경우 많은 양의 마이크로파가 반사되어 마그네트론을 손상시킬 수 있으므로 물 1 l를 테프론 트레이에 담은 채로 마그네트론을 동작시켰다. 8곳에서 전자기장시험기(Lutron 사, EMF-810)로 측정할 결과 225°에서 0.015 mW/cm²로 최대 누설량을

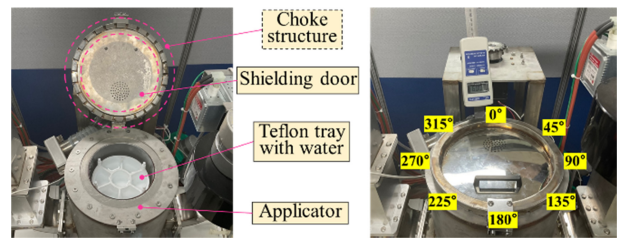


Fig. 11 Microwave leak experiment with an optimized shielding door

나타내었으며 해석값보다 15% 정도 적게 측정되었다. 이는 마이크로파의 에너지가 피건조물인 물에 흡수된 정도에서 약간의 차이가 발생한 것으로 사료된다. 해석결과와 동일하게 실험결과에서도 차폐 도어의 마이크로파 차폐 특성은 충분함을 알 수 있다.

5. 결론

마이크로파를 이용한 가열건조시스템에서 피건조물의 효율적인 투입과 배출을 위해 나사 체결방식의 투입구를 원터치 록킹구조의 도어로 변경하였다. 이때 도어 경계에서 발생하는 마이크로파 누설을 차단하기 위해 초크구조를 개폐도어에 적용하고 도어 형상의 최적화를 수행하였다. 마이크로파 누설량은 ANSYS HFSS 활용한 전자기장 해석결과를 적용하였고 완전요인배치법과 반응표면분석법 적용을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 마이크로파 누설을 최소화하기 위해 Minitab을 활용하여 초크구조의 도어 형상 최적화를 진행하였다. 그 결과, 최적의 형상 및 건조통 본체와의 접촉조건으로 G₁ = 0.6 mm, G₂ = 0 mm, L₂ = 9.9 mm, S = 10 mm를 얻을 수 있었다. 특히, 건조통 본체와 차폐 도어 사이 거리(틈새)인 G₁ 및 G₂가 적을수록 누설량이 적어지는 것을 파악하였다.

(2) 최적화된 형상 조건을 적용하여 해석한 결과, 차폐 도어에서 5 cm 떨어진 곳에서의 최대 전력 밀도는 0.0177 [mW/cm²]로 보여줌으로써 마이크로파는 이상적으로 차폐되었음을 알 수 있었다.

(3) 최적화한 인자를 적용하여 차폐 도어를 제작한 후 마이크로파 누설량을 측정할 결과는 0.015 [mW/cm²]로 해석값 0.0177 [mW/cm²]보다 15% 정도 작게 측정되었으며 인체에는 충분한 안정성을 확보하였다.

실험계획법을 통한 마이크로파 차폐용 개폐도어 최적화 설계의 유효성을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[GRRC TU

Korea 2020-B01, 다중소재가공기술 혁신연구센터]의 지원과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이며(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업), 건조장치 제작에 있어 아인텍(주)의 도움을 받았으며, 이에 감사드립니다.



Ka Hee Lee

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea. Her research interest is mechanical elements and system design.
E-mail: kahee0825@tukorea.ac.kr

REFERENCES

1. Jeon, B., Lee, G., (2017), Effect of microwave sintering on flexural strength of dental zirconia, *Korean Journal of Dent Mater*, 44(2), 163-169.
2. 3M Innovative Properties Company, (2018), A microwave furnace and a method of sintering, KR1020187018286.
3. Ahn S. H., Jeong C. H., Kim S. Y., Kwon N. R., Lee W. S., (2020), Improving heating uniformity of high power microwave dryer with multiple slotted-waveguide, *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, 1684-1685.
4. Ke, C., Shi, C., Zhang, Y., Guang, M., Li, B., (2022), Energy conversion performances during biomass air gasification process under microwave irradiation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(74), 31833-31842.
5. Motasemi, F., Gerber, A., (2018), Multicomponent conjugate heat and mass transfer in biomass materials during microwave pyrolysis for biofuel production, *Fuel*, 211, 649-660.
6. Hosseini, M., Kaasinen, A., Link, G., Shoorehdeli, M. A., Lähivaara, T., Vauhkonen, M., (2022), Tomography-assisted control for the microwave drying process of polymer foams, *Journal of Process Control*, 114, 16-28.
7. Jung, U.-S., Lee, W.-K., Lim, K.-T., (2011), Vulcanization efficiency of non-polar rubber compounds by microwave, *Polymer (Korea)*, 35(3), 228-231.
8. FDA, Radiation-Emitting Products. <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/>
9. Han, G.-Y., Song, D.-H., Ahn, D.-G., (2010), Electromagnetic interference shielding effect of fiber reinforced composites with stainless fiber conductive filler, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(7), 71-78.
10. Jan A. C. G., (1987), Sealing arrangement for microwave ovens, US4645892.
11. Kim, B.-J., Jun, W.-K., Hong, W.-P., Kim, S.-J., Lim, B.-K., Kang, H.-D., Cho, J.-W., Shin, Y.-S., (1997), Microwave oven door having a microwave shielding structure, EP0763964A2.



Kwang Kim

Professor in the Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea. His research interest is nano/micro system design, digital manufacturing and creation of mechanical elements.
E-mail: kimkwang@tukorea.ac.kr