

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.27

반응표면분석법을 이용한 자계누설 최소화 설계[§]

박진훈* · 권중학* · 황상문**

* 부산대학교 기계공학부

Design of Magnetic Circuit with Minimum Leakage Using Response Surface Methodology

Jin Hun Park*, Jung Hak Kwon* and Sang Moon Hwang**

* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received June 18, 2009 ; Revised November 23, 2009 ; Accepted November 30, 2009)

Key Words: Microspeaker(마이크로스피커), Magnetic Circuit(자기회로), Flux Leakage(자계누설), Response Surface Methodology(반응표면분석법)

초록: 본 논문에서는 무전기에 사용되는 마이크로스피커의 누설자속을 최소화하는 설계에 초점을 맞추었다. 진동판표면으로 누설되는 자속을 저감시키고 전자기력을 향상시키기 위한 최적설계로 반응표면법을 적용하였다. 최적설계의 목적함수는 전자기력과 누설자속이며, 폴피스 두께, 마그넷 그레이드, 요크 두께의 세 가지 변수에 의해 결정되어진다. 전자기력과 누설자속은 반응표면법으로 각 조건에서 계산되었고, 평가된 결과에 의해 최적화되었다. 폴피스 두께 0.9 mm, 마그넷 그레이드 N42H, 요크 두께 0.75 mm 일 때, 전자기력은 초기 모델과 동등한 수준을 만족하였고, 자속 누설량은 11.8% 저감되었다.

Abstract: This paper focuses on the design of microspeakers with minimum flux leakage, for use in radiotelegraphy. The response surface methodology (RSM) is applied as the optimization technique for obtaining a large magnetic force and a small flux leakage on diaphragm. The object functions of this optimization are the magnetic force and the flux leakage along three factors; pole piece thickness, magnet grade and yoke thickness, which are determined by the design of the experiment. The magnetic force and the flux leakage are calculated for each condition and optimized by results evaluated with RSM. For a pole piece thickness of 0.9 mm, a magnet grade of N42H and a yoke thickness of 0.75 mm, the magnetic force is satisfied as initial model and flux leakage is decreased to 11.8% than initial model.

- 기호설명 -

- μ : 물질 투자율
- μ_0 : 공기투자율
- μ_r : 상대투자율
- \vec{A} : 자기 벡터 포텐셜
- \vec{H} : 자기장의 세기
- l : 자계 속 코일길이
- \vec{B} : 자속밀도
- R : 코일저항
- I : 전류

1. 서론

정보통신분야의 개발 가속화로 인하여 전파를 사용하는 제품은 다양하게 발전되어 왔다. 그 중 산업 현장이나 여가활동 시 상호간 연락의 수단으로 많이 사용하는 무전기의 개발도 한 분야이다. 무전기는 전파의 수신거리가 수백 미터에서 수 킬로미터까지 사용가능하기 때문에 상호간의 교신주파수만 일치한다면 간편하게 사용할 수 있고 여러 사람 간에 연락할 수 있어서 산업현장에서 많이 사용된다. 무전기의 부품 중 하나인 마이크로스피커는 상대방의 음성을 전달하는 장치로 중요한 부품중의 하나이다. 만일 수신율이 양호하여 전파방해가 없는 경우 마이크로스피커의 특성에 따라 수신부의 음질이 결정되며 상대방의 메시지 전달도 명확하게 된다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 부산지부 춘계학술대회 (2009. 5. 8., 동명대) 발표논문임

† Corresponding Author, shwang@pusan.ac.kr

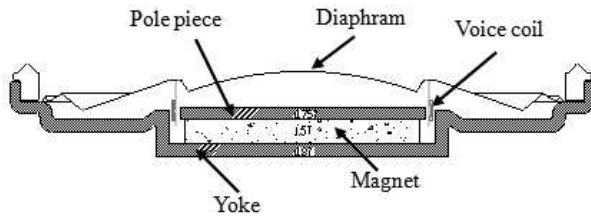


Fig. 1 Schematic of microspeaker

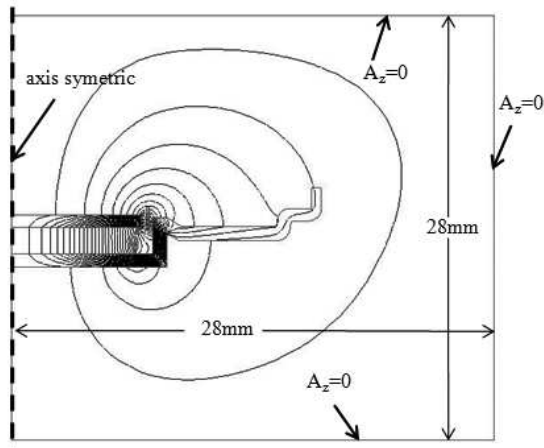


Fig. 2 Boundary conditions of electromagnetic system

마이크로스피커의 경우 진동판에 부착된 보이스코일에 쇠교자속을 유발하기 위한 자기회로를 구성하고 있는데 이로 인하여 진동판 표면에 다소의 누설자속이 발생한다. 따라서 비산면지나 이물질이 많은 산업현장에서 작동될 경우 누설자속이 먼지에 대한 인력으로 작용하여 진동판 표면에 달라붙게 한다. 이는 진동판의 질량과 강성을 변화시킬 뿐만 아니라 진동판이 동작할 때 이질음을 발생시킬 수 있다. 이러한 문제 때문에 일부 무전기 업체에서는 마이크로스피커의 자계누설을 최소화 하도록 요구하고 있다. 따라서 마이크로스피커는 높은 성능은 유지하면서 자계누설은 최소가 되도록 요구하고 있다.

본 논문에서는 현재 무전기에 사용되고 있는 마이크로스피커를 선정하여 유한요소법을 사용하여 보이스코일에 작용하는 전자기력(magnetic force)과 진동판표면에 발생하는 누설자속(flux leakage)을 평가하였다. 또한 반응표면법을 이용하여 전자기력은 초기모델수준을 만족하면서 자계누설이 최소가 되는 3개의 설계변수(폴피스 두께, 자석 그레이드, 요크 두께)를 찾기 위한 최적설계를 수행하였다.

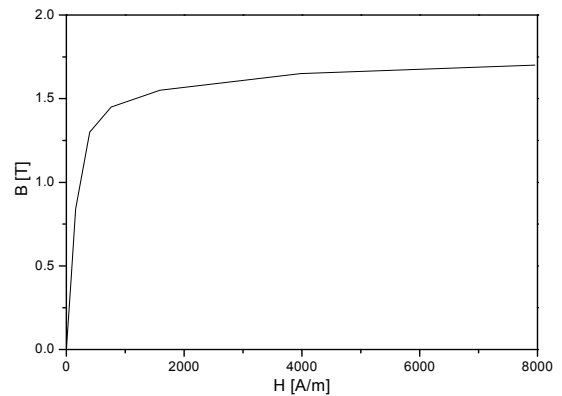


Fig. 3 B-H curve of steel(Cold Rolled Mild Steel)

2. 마이크로스피커 해석 방법

마이크로스피커는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 플레밍의 왼손법칙에 의하여 여러 주파수가 포함된 전류신호가 자계속의 보이스코일을 지나면서 전자기력을 받게 되고 이 가진력(exciting force)은 진동판의 상하운동을 유발하여 공기를 밀어내게 되고, 이 때 소정의 음압을 발생하게 된다. 이러한 전자기력의 발생을 위해 구성된 자기회로(magnetic circuit)는 보이스코일에만 자기장을 형성하는 것이 아니라 진동판 표면에도 자기장을 형성하게 된다. 공극과 진동판 표면에 발생하는 자속밀도는 식 (1)과 같은 지배방정식에 의해 결정된다.⁽²⁾

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \times \vec{H} \tag{1}$$

공극에서의 자속 밀도 및 보이스코일의 전류와 가진력 F_{coil} 의 관계는 Lorentz 방정식에 의해 식 (2)와 같이 표현된다.⁽²⁾

$$F_{coil} = \oint Idl \times \vec{B} \tag{2}$$

해석모델인 마이크로스피커는 원형이고 축방향 대칭이기 때문에 Fig. 2와 같이 이차원으로 모델링 할 수 있다. 모델링에서 자유공간영역은 반경방향으로 28 mm, 축방향으로 28 mm씩 확보하였다. 2배 이상의 자유공간을 주었을 때와 비교하여 공극에서의 자속밀도에 대한 오차범위는 1 % 미만이었다. 경계조건은 $A_z = 0$ 으로 경계조건 이후로는 자계가 흐르지 않는다고 가정한다.

폴피스(pole piece)와 요크(yoke)의 투자율은 Fig. 3의 냉간압연강판의 투자율곡선에 의해 해석된다. 또한, 보이스코일은 상대투자율이 공기와 가까운 1의

Table 1 Material property of magnet

Grade	Br(residual magnetism) [T]	Hc(coercive force) [kA/m]
N33H	1.167	898
N38H	1.234	950
N42H	1.3	1000

Table 2 Coil specification

Coil Diameter [mm]	Resistance [Ω]	Turns
$\varnothing 0.07$	7.3	31.15

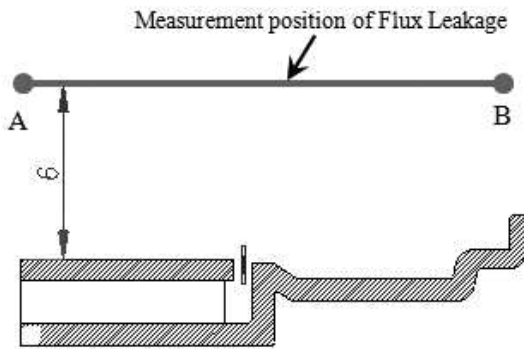


Fig. 4 Measurement points of flux leakage

값이므로 공기와 동일하다고 가정한다. 자석(magnet)의 물성값은 Table 1과 같이 지정하였고, 코일(coil)은 Table 2의 조건을 사용하였다. 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 전자기 해석을 수행하였고 보이스코일의 가진력과 자계누설량을 구했다.

3. 초기 모델 분석

초기모델은 폴피스의 두께 0.75 mm, 마그넷 그레이드 N38H, 요크 두께 0.8 mm로 모델링 했다.

자계누설 측정점은 Fig. 4에서 보는바와 같이 폴피스에서 6 mm 떨어져 있고 A지점에서 B지점까지 측정하였다. 이것은 마이크로스피커의 폴피스에서 무전기 외함 표면까지의 거리로 비산면지 및 이물질이 제일 먼저 용착되는 부분이기 때문에 최외각 크기를 고려하여 측정점의 치수를 설정하였다. 자계누설량은 Fig. 5에서 보는 것과 같이 A지점에서 32.2 mT이다. 전자기력은 코일 변

Table 3 Design factor

Factor	Level		
	0.4	0.65	0.9
Pole piece thickness [mm]	0.4	0.65	0.9
Yoke thickness [mm]	0.6	0.7	0.8
Magnet grade	N33H	N38H	N42H
Coded values	-1	0	1

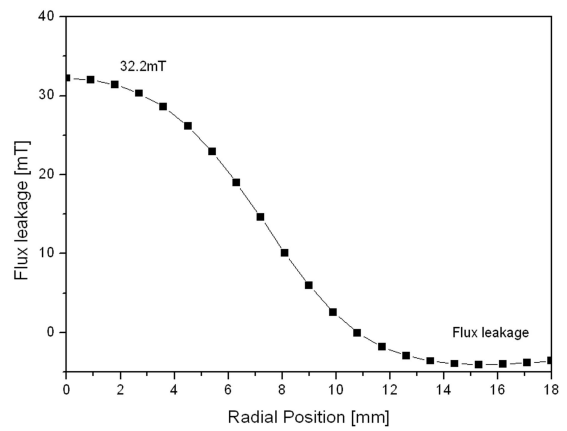


Fig. 5 Results of flux leakage

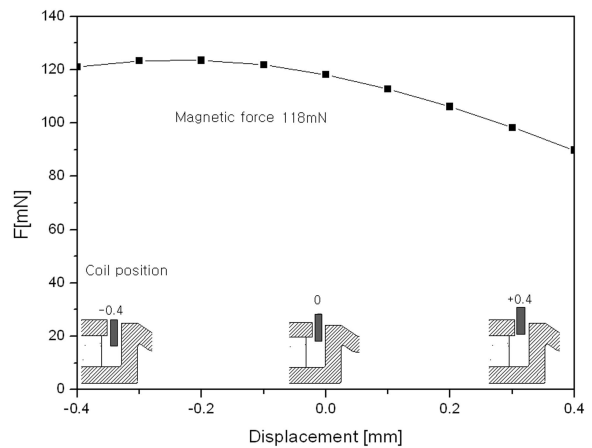


Fig. 6 Results of magnetic force

위가 0인 지점에서 측정하였고, Fig. 6에서 와 같이 118 mN이 도출되었다.

4. 설계변수와 실험계획법

4.1 설계변수와 목적함수

폴피스 두께, 자석 두께, 요크 두께의 총합은 3.05

mm로 일정하고, 보이스코일 사양은 초기모델과 동일하다는 가정 하에 설계 변수 값을 설정하였으며, 범위는 Table 3에서 보는 것과 같다.

여기서 자석 두께는 요크 두께와 폴피스 두께에 의해서 결정된다. 자석의 그레이드는 높을수록 누설양이 많아지지만 낮을수록 전자기력이 낮아진다. 따라서 최적화된 그레이드가 필요하다. 제조상에서 자석은 그레이드별로 가격단가가 차이가 있지만 N33H, N38H, N42H간의 가격단가는 크게 차이가 나지 않는다. 각 설계변수를 3수준으로 구분하여 실험을 실시하였다.

본 실험에서 목적함수는 전자기력과 A위치에서의 자계누설량이다. 초기모델과 동등한 수준의 전자기력(118 mN) 유지와 자계누설량을 최소화하는 것이 목적이다.

4.2 실험계획법

본 논문에서 사용한 최적화 알고리즘은 반응표면법이다. 반응표면설계에서 가장 일반적으로 사용되어지는 방법은 중심합성법으로 2차함수의 식이 사용된다.^(3,5)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1, j \leq i}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

독립변수의 수가 k인 2차 회귀모형은 식 (3)으로 표현된다. 여기서, x 는 디자인 인자이며 y 는 목적함수이며, 실험 결과 데이터에 의해서 구해진 β 는 회귀계수며 최소자승법에 의해 구해진다. 본 실험에서는 설계변수의 변화폭이 제한적이기 때문에 면중심 중심합성법(Face-centered central composite design)을 사용한다.⁽³⁾ 실험은 Fig. 7에서 보는 것과 같이 입방체의 격자점들을 기준으로 해석하였다.

4.3 반응표면분석법 결과

면중심 중심합성법을 이용하여 주요 인자를 설정하였고, 총 15번의 해석을 수행하여 Table. 4에서와 같이 전자기력과 자계누설을 구하였다. 전자기력 측면에서의 반응표면은 Fig. 8과 Fig. 9같이 나왔고, 자계누설 측면에서의 반응표면은 Fig. 10과 Fig. 11같이 나왔다. 각각에서 나머지 변수는 수준이 0일 때이다. 구해진 반응표면을 보면 자석 그레이드와 요크 두께는 수치가 높을수록 전자기력이 높아지고 낮을수록 자계누설이 줄어드는 경향을 보인다. 하지만 폴피스의 두께는 전

자기력 측면에서 극값이 존재하고 자계누설 측면에서는 높을수록 작아짐을 알 수가 있다.

Table 4 Design of experiment

Run order	Pole piece thick	Magnet grade	Yoke thick	Force [mN]	Leakage [mT]
1	1	-1	-1	104.1	24.57
2	0	-1	0	111	32.87
3	0	0	0	113.9	34.88
4	0	0	1	116.5	36.46
5	1	1	-1	112.6	26.79
6	1	-1	1	112.1	26.43
7	0	1	0	117	37.29
8	1	0	0	112.3	26.58
9	0	0	-1	111	33.2
10	1	1	1	120	88.46
11	-1	0	0	103.9	47.66
12	-1	-1	1	103.3	46.74
13	-1	1	-1	104.3	48.85
14	-1	1	1	109.5	52.18
15	-1	-1	-1	98.1	43.4

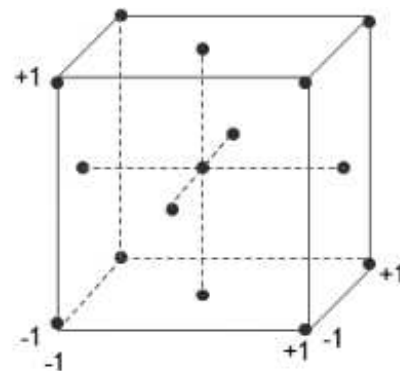


Fig. 7 Face-centered central composite design

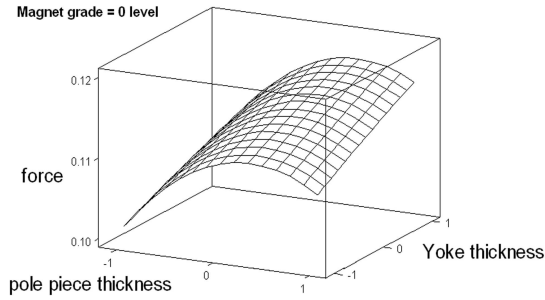


Fig. 8 Magnetic force of pole piece thickness and magnet grade

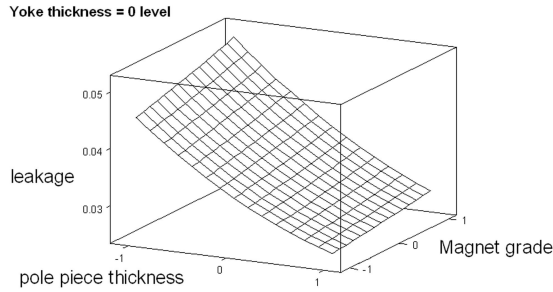


Fig. 9 Magnetic force of pole piece thickness and yoke thickness

설정된 관심 실험영역에서 실험을 통해 얻어진 결과를 이용해 구하는 반응표면으로 2차 회귀모델을 사용하기로 하였으므로 각 입력인 폴피스 두께, 마그넷 그레이드, 요크 두께의 회귀식을 나타내면 다음과 같다.^(4,6)

$$y_1 = \alpha_1 + x_1\alpha_2 + x_2\alpha_3 + x_3\alpha_4 + x_1^2\alpha_5 + x_2^2\alpha_6 + x_3^2\alpha_7 + x_1x_2\alpha_8 + x_1x_3\alpha_9 + x_2x_3\alpha_{10} \quad (4)$$

$$y_2 = \beta_1 + x_1\beta_2 + x_2\beta_3 + x_3\beta_4 + x_1^2\beta_5 + x_2^2\beta_6 + x_3^2\beta_7 + x_1x_2\beta_8 + x_1x_3\beta_9 + x_2x_3\beta_{10} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = 0.113925$$

$$\alpha_2 = 0.004189$$

$$\alpha_3 = 0.003477$$

$$\alpha_4 = 0.003131$$

$$\alpha_5 = -0.005821$$

$$\alpha_6 = 0.000086$$

$$\alpha_7 = -0.000178$$

$$\alpha_8 = 0.000492$$

$$\alpha_9 = 0.000635$$

$$\alpha_{10} = -0.000074$$

$$\beta_1 = 0.0348813$$

$$\beta_2 = -0.0105607$$

$$\beta_3 = 0.00198705$$

$$\beta_4 = 0.00138503$$

$$\beta_5 = 0.00223615$$

$$\beta_6 = 0.000163656$$

$$\beta_7 = -0.0000554828$$

$$\beta_8 = -0.000781910$$

$$\beta_9 = -0.000345043$$

$$\beta_{10} = 0.0000233013$$

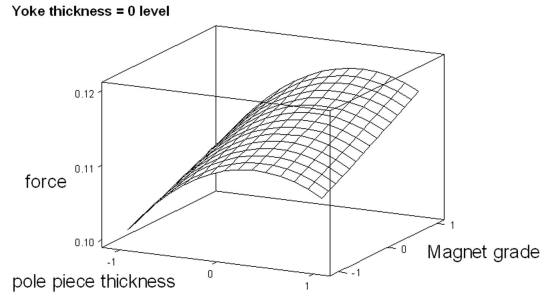


Fig. 10 Flux leakage of pole piece thickness and magnet grade

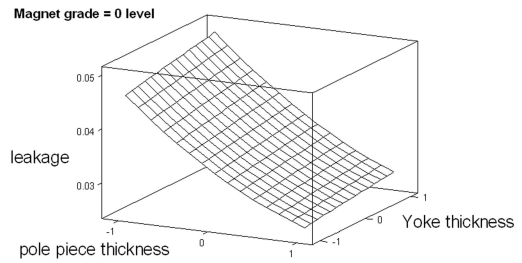


Fig. 11 Flux leakage of pole piece thickness and yoke thickness

여기서 y_1 은 전자기력이고, y_2 는 자계누설을 말하고 x_1, x_2, x_3 은 각각 폴피스 두께, 마그넷 그레이드, 요크 두께를 말한다. 2차 회귀식을 상용 소프트웨어인 Minitab으로 계산하였고, Matlab을 이용하여 각 coded value 값에 따른 전자기력과 자계누설량을 추측하였다. 영향력이 큰 폴피스 두께는 coded value 값을 -1에서 1까지 0.2간격으로 변화시켰고, 요크 두께는 -1에서 1까지 0.5간격으로 마그넷 그레이드는 -1, 0, 1의 범위로 변화시켰다.

그 결과 폴피스는 0.9 mm, 마그넷 그레이드는 N42H, 요크 두께는 0.75 mm일 때, 초기모델과 전자기력이 똑같은 118 mN이 나왔고, 자계누설은 초기모델보다 11.8 % 감소된 28.4 mT가 나왔다. 자속밀도에 의한 전자기력은 아래 식과 같이 자속밀도의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 최적화 된 자기회로는 누설자속에 의한 비산면지의 인력을 22.2 % 정도 감소시킨다고 볼 수 있다.

4.3 최적화 모델과 결과의 비교

2차 회귀식을 계산한 결과를 바탕으로 변경된 모델에 대해 초기 모델과의 전자기력과 자계누설값들을 비교 하였다. Table 5에서 볼 수 있듯이

Table 5 Comparison of results

	Initial	Optimized
Pole piece thickness [mm]	0.75	0.9
Magnet grade	N38H	N42H
Yoke thickness [mm]	0.8	0.75
Force [mN]	118	118
Flux leakage [mT]	32.2	28.4

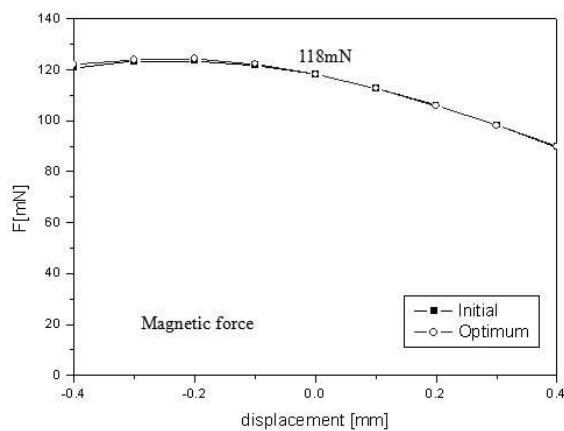


Fig. 12 Force comparison between initial model and optimized model

전자기력은 초기모델과 동등한 수준을 유지하면서 자계누설은 28.4 mT로 낮아졌다. Fig. 12와 Fig. 13은 전자기력과 자계누설량을 비교한 그래프이다. 코일변위에 따른 전자기력은 초기값과 거의 동일한 수준으로 유지하면서 자계누설의 최대치를 10 % 이상 감소되었음을 알 수가 있다.

5. 결론

일반적으로 사용자 환경이 열악한 무전기에 사용되는 마이크로스피커에서는 성능과 함께 자계누설량도 중요한 평가항목이다. 자계누설은 단말기에 각종 이물을 유도하여 마이크로스피커 뿐만 아니라 단말기의 특성에도 영향을 미친다. 자계누설량에 대한 기준은 단말기구조와 마이크로스피커 장착 위치에 따라 달라지며 일반적으로 단말기 업체에서 정하지만 최소화 하는 게 좋다. 본 연구에서 무전기 장착용 마이크로스피커의 폴피스 두께, 마그넷 그레이드, 요크 두께에 의해 결정되는 자계누설이 최소값을 가질 때의 최적 조건을 반응표면분석법을 이

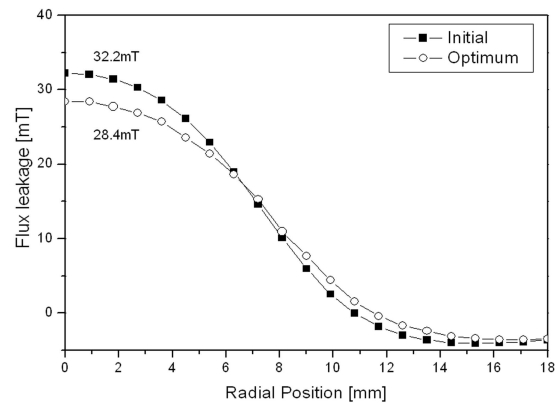


Fig. 13 Leakage comparison between initial model and optimized model

용하여 도출하였다. 전자기력은 초기모델과 동일하게 유지하면서 자계누설은 11.8 % 줄어 들었다. 자계누설에 의한 비산면지의 인력은 누설자속밀도의 제곱에 비례하기에 약 22.2 % 정도 감소할 수 있다. 따라서 느끼는 음질 및 음량은 현 수준과 동등하면서 자계누설의 감소로 인하여 마이크로스피커의 진동판에 용착되는 비산면지와 이물질의 양을 최소화할 수 있으므로 제품의 사용 수명 연장 및 음질의 저하를 방지할 수 있다.

참고문헌

- (1) Lee, J. H. and Yoo, J. H., 2008, "Optimal Design of an MRI Device Considering the Homogeneity of the Magnetic Field," *KSM(A)*, Vol. 32, No. 8, pp. 654-659.
- (2) Hwang, S. M., LEE, H. J., Kwon, J. H., Hwang, G. Y. and Yang, Y. C., 2006, "Development of Combined Permanent Magnet Type Microspeakers Used for Mobile Phones," *KSNVE*, Vol. 16, No. 2, pp. 183-189.
- (3) Lee, S. B., 2005, "Experiment Plan Focussing on Examples with MNITAB," pp. 273-293.
- (4) Hong, D. K., Woo, B. C., Kwon, Y. S., Choi, J. G. and Ahn, C. W., 2006, "Optimal Geometric Design of Micro Speaker Diaphragm Using Response Surface Methodology," *Proceedings of the KSME autumn annual conference*, pp. 69-74.
- (5) Kim, T. H., Park, H. S., Lee, S. H. and Oh, Y. K., 2002, "Optimization of Resistance Spot Welding Process for TRIP Sheets using Response Surface

Methodology,” *Proceedings of the KSME spring annual conference*, pp. 1131~1136.
(6) Park, J. S., Lee, D. J. and Im, J. B., 2005, “The

Study for Construction of the Improved Optimization Algorithm by the Response Surface Method,” *KSAF*, Vol. 13, No. 3, pp. 22~33.