

열성형 진동판의 미세주름 두께변화가 구조강성 및 진동특성에 미치는 영향 분석

김경민¹ · 박 근[#]

Effect of Thickness Change in Corrugations on the Stiffness and Vibration Characteristics of a Thermoformed Diaphragm

K.-M. Kim, K. Park

(Received November 12, 2013 / Revised November 19, 2013 / Accepted November 25, 2013)

Abstract

Recently, micro-speakers have attracted much attention due to their increasing demand in mobile devices. Micro-speakers use polymer diaphragms, which are manufactured from thin polymer film by the thermoforming process. The diaphragm is generally designed to be a circular membrane with a cross section consisting of a double dome structure, and a number of corrugations are located in the outer region to produce better sound quality. In the current study, a finite element (FE) analysis is performed for thermoforming, and the resulting thickness reduction in the corrugation regions is estimated. The estimated thickness distribution is used in further structural and modal FE analyses, from which the effects of local thickness reduction on the stiffness and vibration characteristics are determined.

Key Words : Speaker Diaphragm, Thermoforming, Corrugation, Finite Element Analysis, Modal Analysis

1. 서론

최근 이동통신 산업의 발전으로 핸드폰과 PDA 등의 개인용 휴대기기가 하나의 소형화된 멀티미디어 기기로서 통화뿐만 아니라 TV 시청 및 음악청취 등의 활동도 시공간의 제약을 받지 않고 가능하게 되었다. 이러한 개인용 휴대기기의 발전은 관련 부품들의 발전에도 큰 영향을 주었고, 소형 이어폰의 부품인 마이크로 스피커(Micro speaker)에 대한 관심이 많아지고 있다. 마이크로 스피커는 크기가 작아 저음영역에서의 소리 재생이 어렵기 때문에 저음영역에서 음질 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다[1, 2].

마이크로 스피커의 소리를 재생하는데 가장 중요한 역할을 담당하는 부품은 진동판(Diaphragm)이다.

기본적으로 마이크로 스피커는 라우드 스피커의 구조와 비슷하지만 크기가 작아 몇 개의 필요한 구성 요소만을 가지고 소리를 재생한다. 따라서 라우드 스피커의 소리재생에 도움을 주는 엣지와 댐퍼 등의 역할을 진동판이 대신하기 때문에 진동판의 두께, 재질, 형상 등의 특성이 마이크로 스피커의 성능을 크게 좌우한다[3, 4].

일반적으로 마이크로 스피커의 진동판은 얇은 고분자 박막으로 제작되며, 열성형(Thermoforming)을 통하여 생산되는데, 이를 통하여 생산된 제품은 공정 조건에 따라 제품내의 두께가 균일하지 않다고 알려져 있다[5]. 따라서 마이크로 스피커의 진동판 역시 제품 내의 두께가 균일하지 않을 것으로 예상된다. 이러한 점을 바탕으로 본 연구에서는 진동판

1. 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

Corresponding Author : Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

의 내부 두께변화가 스피커 시스템의 강성 및 진동 특성에 미치는 영향을 열-구조-진동 연계 수치해석을 통해 분석한다.

2. 스피커 진동판의 열성형 공정

2.1 열성형 공정의 개요

열성형 공정이란 금형 위에 고분자 박막을 고정하고 고온으로 가열을 하여 박막을 연화시킨 후, 압력을 인가하여 제품을 제작하는 방법이다. 열성형 공정은 설비가 간단하고 한번에 많은 제품을 생산할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 열성형 공정 방법에는 진공성형, 압공성형, 프레스성형 등이 해당되며, 사용되는 고분자 박막으로는 Polypropylene (PP), Polyethylene(PE), Polyethylene terephthalate(PET), Polyvinyl chloride(PVC)등 다양한 종류가 존재한다.

본 연구에 사용된 방법은 압공성형으로 가열된 시트를 위에서 공압을 가하여 금형에 밀착시켜 성형하는 방법이다. 진동판의 성형과정은 가열과 냉각과정의 두 단계로 나눌 수 있으며, 가열과정은 금형 하부에 있는 히터에 열을 공급하여 초기온도 40℃에서 180℃로 가열을 한다. 사용된 고분자 박막의 유리전이온도(T_g)가 약 75~80℃이기 때문에 금형온도가 80℃에 도달하면 5kgf/cm²의 공기압을 주입한다. 금형온도가 180℃에 도달하면 히터가 동작을 멈추고 냉각수가 주입되게 된다. 냉각수는 금형온도가 초기온도로 될 때까지 계속 주입되며, 온도가 낮아져서 80℃에 이르게 되면 공기압의 주입도 중단된다. 상기 공정이 완료되었을 때 생산되는 총 49개의 진동판이 생산된다. 진동판은 고정링을 포함하여 지름이 14.55mm이며, 주변부 돔에 24개의 미세주름(Corrugation)이 형성되어 있다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 진동판의 단면형상 및 치수를 도시하였다[6].

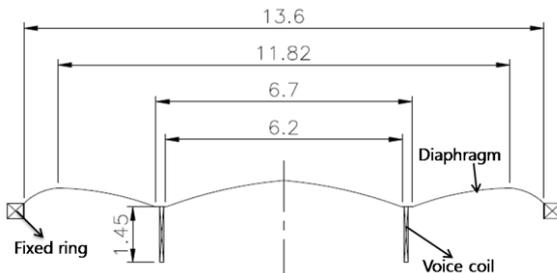


Fig. 1 Sectional shape and dimensions of the diaphragm (unit: mm)[6]

2.2 열성형 공정에서의 고분자 거동

본 연구에서는 열성형해석을 통한 진동판 내의 두께변화를 수치해석을 통해 예측하고자 한다. 따라서 제품의 생산에 사용된 PET 필름의 물성조건이 필요하게 되는데, 이때 사용된 필름재질의 점도(Viscosity)가 중요한 요인이 된다. 실제 점탄성 모델의 경우 온도에 따라 점도특성이 달라지는 비선형성을 보이며, 실제 사용된 열성형 공정은 100℃ 이상의 온도차이를 보이기 때문에 고분자 박막의 점도가 온도에 따라 변하는 특성을 고려해주어야 한다. 본 연구에서는 William-Landel-Ferry(WLF) 관계식을 사용하여 고온에서의 고분자 박막의 점성거동을 묘사해주었다.

WLF 관계식은 유리전이온도에서의 물질점도를 가장 잘 나타내는 이론식으로 알려져 있다. 일반적으로 고분자 물질은 비뉴턴 유체라고 알려져 있으나, 본 연구에서 대상으로 하는 열성형 공정은 사출성형 등의 공정에 비해 전단변형률이 매우 낮아 영향이 적기 때문에 일반화된 뉴턴 유체(Generalized Newtonian fluid)로 가정하여, 식 (1)과 같은 WLF 점도 방정식을 사용하였다.

$$\eta(T) = \eta_0(T_g) \exp \left\{ \frac{c_1(T - T_g)}{c_2 + (T - T_g)} \right\} \quad (1)$$

여기서 T_g 는 고분자 박막의 유리전이온도(Glass transition temperature), η_0 는 유리전이 온도에서의 점도, c_1 , c_2 는 물질특정상수를 의미한다. 본 연구에서 사용한 PET 필름에 대해 c_1 , c_2 는 각각 17.44, 51.6K의 값을 사용하였다[7].

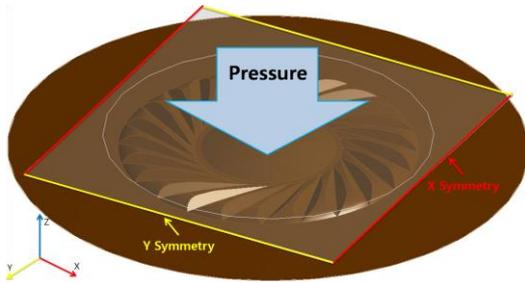
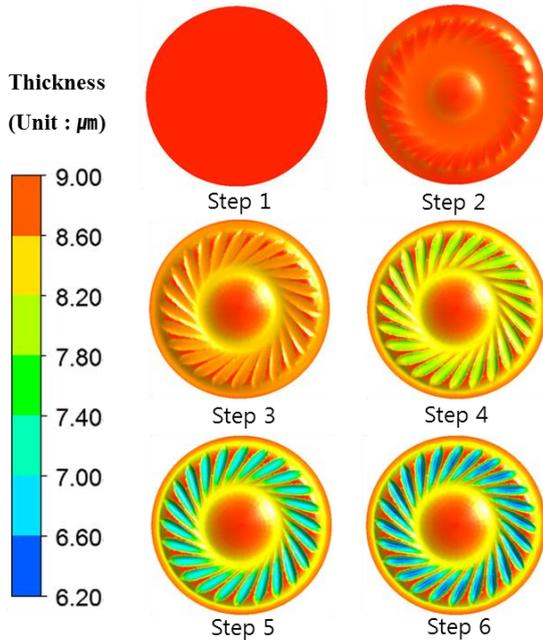
3. 열성형공정 해석결과

3.1 열성형공정 해석개요 및 결과

스피커 진동판의 열성형 공정을 수치적으로 묘사하기 위해 고분자 유동해석 전용 프로그램인 ANSYS PolyflowTM를 사용하였다. 성형시 사용되는 필름의 재질은 PET이며, 초기두께는 9 μ m이다. Table 1에 해석에 사용된 성형조건을 요약하였다. 이때 진동판을 생성하는 금형 전체모형을 적용시킬 경우 요소수가 많아짐에 따라 대칭성을 고려하여 하나의 코어(Core)에 대해서만 해석을 수행하였다. 따라서 필름의 각

Table 1 Thermoforming conditions

Property	Value
Material	PET
Translation Velocity (mm/s)	0.01
Inflation pressure imposed (kPa)	490
Initial Temperature (°C)	40
Maximum Temperature (°C)	180
Viscosity(Pa ·s)	WLF law

**Fig. 2 Boundary condition of thermoforming analysis****Fig. 3 Change of the thickness distribution of the micro-speaker diaphragm with corrugation during the thermoforming process**

모서리에 대칭조건을 부여하였으며, 공기압이 주입되는 과정을 고려하여 플라스틱 시트에 압력을 설정하였다. Fig. 2에 열성형 해석을 위한 구속조건을 도시하였다.

Fig. 3에 시간경과에 따른 진동판의 형상 및 두께 분포 변화를 도시하였다. 해석결과를 보면 초기두께가 $9\mu\text{m}$ 인 PET 필름의 두께가 성형이 진행될수록 얇아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 미세주름이 있는 부분에서 두께감소가 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 최종 공정에서 최소두께가 $6.27\mu\text{m}$ 로 31%의 감소를 보였다. 이러한 국부적인 두께감소는 열성형 공정에서 미세주름 주변의 연신(Stretching) 변형이 집중적으로 발생하기 때문으로 분석되며, 결과적으로 두께방향의 강성을 저하시킬 것으로 예상된다. 반면 전체 영역에 대한 두께의 평균은 $8.03\mu\text{m}$ 로 계산되었고, 이는 초기두께($9.0\mu\text{m}$)에 비해 10.78% 감소된 것에 해당한다.

3.2 실험결과와의 비교

도출된 열성형 해석결과와 신뢰성을 확인하기 위하여 해석에 사용된 진동판의 두께를 측정하였다. 사용된 진동판이 매우 얇기 때문에 측정에 어려움이 있어 에폭시를 이용하여 진동판을 경화시킨 후 단면을 연마하여 측정하는 방법을 사용하였다. 진동판의 지름인 14.55mm 의 절반에 해당하는 만큼 연마하여 단면형상을 측정하였다. Fig. 4에 연마한 시편의 단면을 광학현미경으로 측정한 결과를 도시하였으며, 연속된 6개 부분의 확대사진을 표현하였다. 총 5개의 시편을 측정하였으며, 측정된 사진을 이용하여 0.25mm 간격으로 측정된 두께의 평균값을 계산하였다. 측정된 결과값 중 최대값과 최소값을 제외한 3개의 평균값을 적용하여 진동판의 두께를 고찰하였다.

주름이 있는 진동판의 두께분포는 약 $6.33\sim 8.55\mu\text{m}$ 의 분포를 보였다. 특히 주름이 있는 구간에서 급격한 두께변화를 보였으며 진동판 내부에서의 두께 편차는 25.96%로 나타났다. Fig. 5에 해석결과와 실험결과를 그래프로 비교하였다. 측정결과와 해석결과가 오차는 있으나 경향성은 비슷한 것을 확인할 수 있다. 특히 진동판의 주름이 있는 부분에서 두께변화가 크게 나타나는 것을 동일하게 확인할 수 있다. 측정오차는 에폭시 수지를 경화시킬 때, 진동판이 수축이나 팽창하여 치수의 변화가 생길 수 있기 때문이라고 판단된다. 또한 연마공정중에 생긴 버(Burr)도 측정에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그러나 실험과 해석결과가 전체적인 경향성이 유사한 점을 감안하여 상기 해석결과를 바탕으로 진동판의 강성 및 진동특성을 분석하였다.

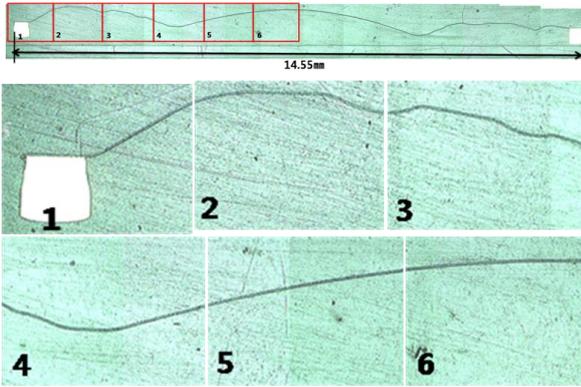


Fig. 4 Sectional images of the diaphragm with 6 enlarged regions

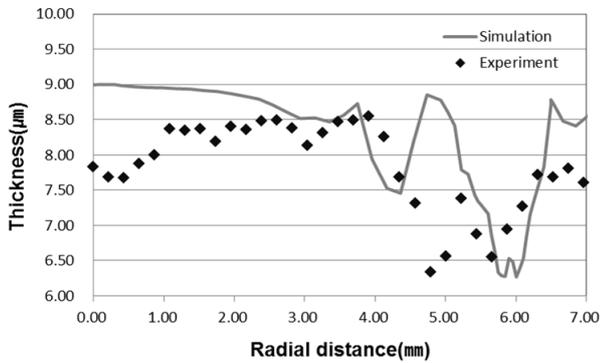


Fig. 5 Comparison of thickness variations along the radial direction

4. 열성형 진동판의 강성 및 진동특성 분석

4.1 해석조건 및 경계조건

본 연구에서는 열성형 공정에서 발생한 진동판의 두께변화가 강성 및 진동특성에 주는 영향을 판단하기 위해 열성형 결과로부터 얻어진 두께분포를 연계하여 추가적인 해석을 수행하였다. 연계해석에 사용된 소프트웨어는 NX NASTRAN이며 진동판의 재질은 PET, 코일의 재질은 알루미늄(Aluminum)으로 설정하였다. 그리고 필름의 두께분포가 성형하기 전의 초기 두께인 9μm로 균일(Uniform)한 것과 열성형 효과를 고려하여 두께분포가 있는(Non-uniform) 것의 두 가지 타입으로 해석모형을 설정하였다. Table 2에 각 재료의 물성을 도시하였다.

진동판의 강성특성을 분석하기 위한 구조해석의 경계조건은 코일에 작용하는 분포하중을 4, 8, 12, 16, 20mN의 5개로 설정하였으며, 진동판의 가장자리 고

Table 2 Properties of each material

Part	Voice coil	Diaphragm
Material	Aluminum	PET
Density [kg/m ³]	2744	1400
Young's modulus [GPa]	70	2.7
Poisson's ratio	0.33	0.4

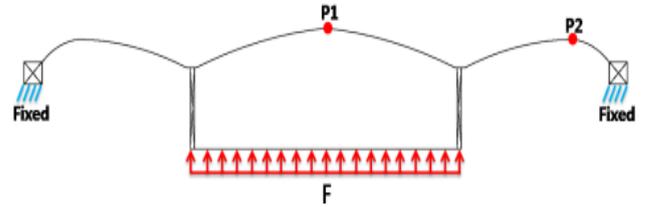


Fig. 6 Boundary condition and measurement point of analysis

정링 부분은 성형시 접착제로 붙여서 생산되기 때문에 링부분을 완전 구속하여 해석을 수행하였다. 진동해석의 경우는 사람의 가청주파수인 20~20000 Hz 사이의 범위에서 총 20개의 모드해석을 수행하였다. 또한 정량적인 비교를 위하여 중심부(P1)와 주변부(P2)에 위치를 잡아 결과값을 비교하였다. Fig. 6에 해석에 사용된 경계조건과 측정위치를 도시하였다.

4.2 구조해석을 통한 강성특성 분석

Fig. 7에 기준 하중이 4mN 일 때의 축방향 변형량을 도시하였다. 열성형 효과를 고려한 두께분포를 가지고 있는 경우가 중심부에서 변형량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 정량적으로 비교하기 위하여 단면방향으로의 변위를 Fig. 8에 도시하였으며, 중심부와 주변부에서의 축방향 강성의 변화를 Table 3에 비교하였다.

Table 3의 결과로부터 두께가 균일한 경우보다 균일하지 않은 경우 중심부에서 약 15.32%의 강성감소를 보였으며, 주변부의 강성은 15.11% 감소한 것으로 결과값이 도출되었다. 이러한 결과로 주변부 강성이 중심부 강성보다 강화되었음을 알 수 있다. 또한 진동판의 변형량이 증가하여 전체 강성이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 열성형 효과를 고려한 두께변화가 마이크로 스피커 진동판의 강성을 약 15% 감소시키는 것으로 보아 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

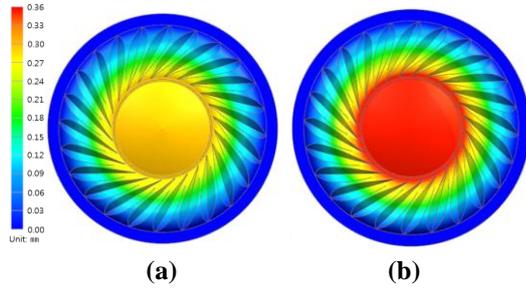


Fig. 7 Comparison of the axial deformation with corrugation diaphragm; (a) uniform thickness, (b) non-uniform thickness

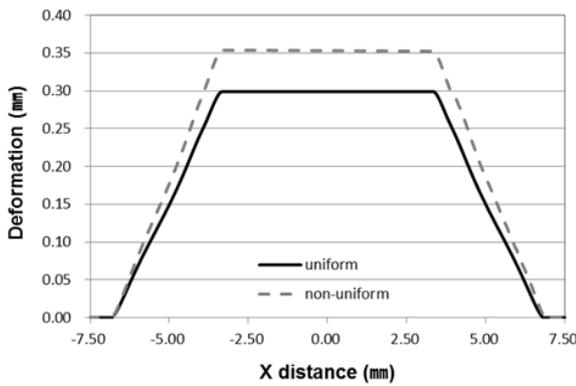


Fig. 8 Comparison of sectional deformation profiles

Table 3 Comparison of the axial stiffness values

Stiffness	k_1 (N/m)	k_2 (N/m)	k_2/k_1
Uniform thickness	13.38	54.79	4.10
Non-uniform thickness	11.33	46.51	4.09
Stiffness reduction ratio	15.32 %	15.11 %	-

4.3 진동해석을 통한 진동특성 분석

진동판의 진동특성을 분석하기 위하여 두께가 균일한 경우와 열성형 효과를 고려한 2 가지 경우에 대한 모드해석을 수행하였다. Fig. 9, 10 에 2 가지 경우에 대한 6 차까지의 진동모드 형상을 도시하였다. 2 가지 경우에 대해 기본적인 진동 모드는 유사하게 나타났으며, 다만 피크점 발생위치나 분할진동이 일어나는 진동방향의 변화만이 있었다. 진동모드를 살펴보면 1 차 모드의 경우 상하운동을 하여 중심부에 피크가 존재하였고, 2~3 차 모드는 주변부에 피크가 존재하며, 좌우가 번갈아 상하로 진동하는 경향을 보였다. 두 모드는 쌍을 이루어 발생하는데 이것은 내부적으로 강성행렬이 반대이기 때문에 나타나는

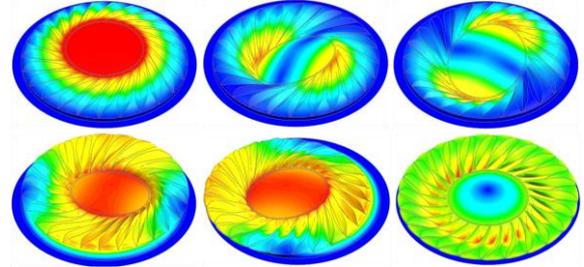


Fig. 9 Mode shapes for the corrugated diaphragm with uniform thickness

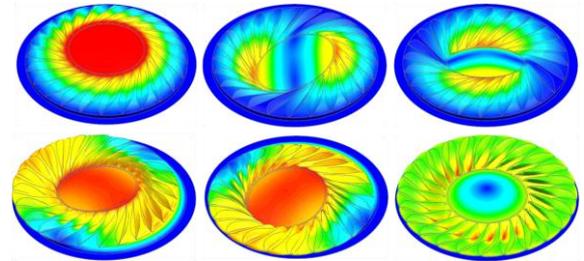


Fig. 10 Mode shapes for the corrugated diaphragm with non-uniform thickness

Table 4 Comparison of the natural frequencies according to the thickness change consideration

Mode no.	f_s (Hz)	f_s' (Hz)	Deviation (%)
1	194.9	180.2	-7.54
2	558.1	516.7	-7.42
3	558.4	518.3	-7.18
4	4088	3804	-6.95
5	4089	3808	-6.87
6	7150	6609	-7.57

현상이다. 또한 4~5 차 모드는 진동판이 양 옆으로 진동을 하며, 6 차모드는 가운데로 모였다가 퍼지는 운동형태를 보인다. 4~6 차는 특별한 피크는 없으나 진동판의 전체면적이 동일하게 움직이는 진동모드를 보인다. 일반적으로 주파수가 증가할수록 진동판의 주변부 돔에서 분할진동이 많이 일어나는 것으로 알려져 있으나, 상기 결과로 볼 때 넓은 주파수 영역에서 진동판이 동일한 위상으로 같은 움직임을 보임을 확인할 수 있다. 이는 미세주름이 없는 진동판의 해석결과[6]와 비교할 때 보다 넓은 주파수 대역에서 고르게 소리를 재생할 것이라고 판단된다.

진동판의 진동특성에 두께분포의 변화가 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위하여 Table 4 에 2 가지 해석모델에 대한 고유진동수를 비교하였다. 두께

가 균일한 경우의 고유진동수(f_s)보다 두께분포를 고려한 경우의 고유진동수(f'_s)가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 진동판의 두께가 국부적으로 감소됨으로 인해 강성이 감소되기 때문으로 분석된다.

또한 두께변화를 고려한 경우 전반적으로 7% 정도의 고유진동수 감소율을 보임을 알 수 있었다. 이는 미세주름이 없는 진동판을 대상으로 한 본 연구자의 선행연구[7]에서 두께변화를 고려한 경우 2% 이내의 고유진동수 변화를 보인 점과 비교하면 3 배 이상의 차이를 보임을 알 수 있다. 상기 결과는 미세주름부의 두께감소율이 주변부에 비해 상대적으로 큰 점을 감안할 때 해당 부위에서의 강성변화가 크게 작용하기 때문으로 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 진동판의 내부 두께변화가 마이크로 스피커의 강성 및 진동특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 열성형 해석을 통한 두께분포를 고찰하였고, 구조 및 진동해석과 연계하여 진동판의 강성 및 진동특성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 열성형 해석에서 진동판에 미세주름이 있는 부분에서의 두께분포변화가 클 것으로 예상되어 해석을 수행하였다. 그 결과 6.27~9.00 μm 의 분포를 보이며 최고 31%의 두께감소를 보였다. 실험과의 비교에서 해석과 실험의 경향성이 유사하게 관찰되어 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(2) 스피커 진동판의 구조해석 결과 열성형에 의한 두께변화 효과를 고려한 경우 균일하게 설정한 경우에 비해 강성이 약 15% 정도 감소함을 확인하였다.

(3) 스피커 진동판의 진동해석 결과 열성형에 의한 두께변화 효과를 고려한 경우 균일하게 설정한 경우에 비해 고유진동수가 7% 정도 감소하는 것을 확인하였다.

상기 결과로부터 진동판의 형상설계시 열성형공정에서 발생하는 두께변화를 고찰하고 그 결과를 적용하면 보다 정확한 진동특성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행된 결과이며, 진동판 열성형 실험에 도움을 주신 (주)다이나믹모션 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] G. Y. Hwang, K. T. Kim, S. U. Chung, S. M. Hwang, B. S. Kang, 2002, Analysis of a Dynamic Speaker in Mobile Phones by Considering Mechanical, Electrical, and Magnetic Coupling Effects, J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 10, pp. 6979~6981.
- [2] G. J. Nam, C. B. Lee, C. D. Kim, 2001, A Study on the Small Size Loudspeaker for Hi-fi Low Frequency Sound Reproduction, Trans. Acoust. Soc. Kor., Vol. 20, No. 8, pp. 31~37.
- [3] S. J. Oh, 2006, Studying Acoustical Properties of Micro-speaker as a Function of Diaphragm Material, Trans. Acoust. Soc. Kor., Vol. 25, No. 5, pp. 222~228.
- [4] D. K. Hong, B. C. Woo, D. Y. Kim, C. W. Ahn, 2005, A Study on the Shape Design of Micro Speaker Diaphragm, J. Kor. Soc. Noise and Vib. Eng., Vol.15, No. 7, pp. 775~780.
- [5] Y. G. Yoo, H. S. Lee, 2011, Effects of Processing Conditions on Thickness Distribution for a Laminated Film during Vacuum-assisted Thermoforming, Trans. Mat. Proc., Vol. 20, No. 3, pp. 250~256.
- [6] K. M. Kim, S. K. Kim, K. Park, 2013, Investigation on Vibration Characteristics of Micro Speaker Diaphragms for Various Shape Designs, J. Kor. Soc. Prec. Eng., Vol. 30, No. 8, pp. 790~796.
- [7] K. M. Kim, K. Park, 2013, Numerical Investigation on Vibration Characteristics of a Micro-speaker Diaphragm Considering Thermoforming Effects, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 27, No. 10, pp. 2923~2928.