

기판에 수직으로 진동하는 다공 평판 미소구조물의 공기감쇠

論文
49C - 1 - 11

Squeeze Film Damping of Perforated Planar Microstructures

金應三* · 曹永昊** · 金文彦***
(Eung-Sam Kim · Young-Ho Cho · Moon-Uhn Kim)

Abstract - This paper investigates the squeeze film damping of a perforated planar micromechanical structure that oscillates in the normal direction to the substrate. Special focus has been placed on the effect of holes and edges of the perforated planar microstructures on the squeeze film damping of oscillatory motions. Theoretical models and test structures of the squeeze film damping have been developed for the transversely oscillating perforated plates. A set of nine different test structures, having three different sizes with three different numbers of perforations, has been fabricated and tested. The experimental Q-factors, measured from the fabricated test structures, are compared with the theoretical values, estimated from finite element analysis. It is found that the finite element analysis overestimates the Q-factors up to 150% of the experimental values. Major discrepancy comes from the inaccuracy of the zero pressure condition, placed by the finite element analysis along the perforated edges.

Key Words : Microdamping, Edge effect, Squeeze film damping, Perforated plate

1. 서론

마이크로머신기술을 이용한 마이크로폰[1], 미소가속도계[2-3] 그리고 미소광학 간섭계[4-5] 등과 같은 MEMS소자에는 평판 형태의 미소구조물들이 많이 사용되고 있다. 이러한 MEMS소자에 사용되는 평판형 미소 진동구조물(그림 1)의 동적 거동은 주로 구조물과 실리콘면 사이의 유체의 점성감쇠에 의해 지배된다. 특히 미소구조물의 동적 거동을 특정 주파수 영역에서 조절하여야 하는 MEMS소자의 경우, 미소구조물의 거동특성은 공기감쇠에 따라 크게 좌우된다. 따라서 미소영역에서의 공기감쇠 특성에 대한 이해는 공진 구조물이나 주파수 응답특성에 민감한 MEMS소자의 설계와 성능향상에 매우 중요한 기반을 제공한다.

공기감쇠에 대한 기존의 연구는 Starr[3], Sadd, et al.[6], Blech[7], and Andrew, et al.[8]에 의해 수행되었으며, 이들 연구는 기판과 막힌 평판 사이에 존재하는 유체의 압축 영향과 점성감쇠 현상에 집중되었다. 그러나 최근 표면미세가공기술에 의해 제작되는 평판구조물의 대부분은 막힌 평판이 아니라 희생층 제거공정의 필요성에 의해 다공 평판 형태를 취하고 있으며, 이러한 다공 평판과 실리콘 기판사이의 공기층에 의한 점성감쇠는 Vovack[2]에 의해 유한요소법으로 해석된 바가 있다.

본 논문에서는 그림 2와 그림 3에 도시한 바와 같은 실리콘

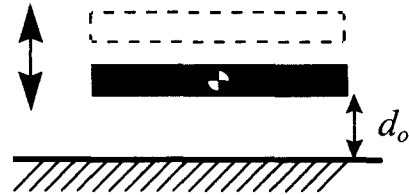


그림 1 기판에 수직으로 진동하는 미소 평판 구조물의 단면도.
Fig. 1 Cross-sectional view of a vertically oscillating planar microstructure.

큰 기판 위에 다공 평판과 막힌 평판을 제작하여 실리콘 기판과 평판사이의 비압축성 공기감쇠를 측정하고, 그 결과를 유한요소해석에 의한 예측치와 비교한다. 공기감쇠의 측정을 위하여 그림 3에 도시한 바와 같이 감쇠 면적이 같은 총 9종의 시험구조물을 설계하였으며, 두 층의 다결정 실리콘을 소재로 한 표면미세가공기술로 제작되었다. 제작된 시험구조물을 이용하여 감쇠계수를 측정하였고, 대기압과 상온에서 유한요소해석으로 예측된 결과와 비교하였으며, 측정치와 예측치의 차에 대해 토의하였다.

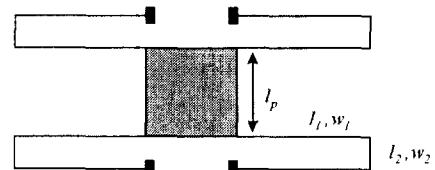


그림 2 두 쌍의 folded 미소 보에 의해 지지된 사각평판, H0
Fig. 2 Top view of a closed square plate, H0, suspended by two pairs of folded microflexures

* 準 會 員 : 韓國科學技術院 機械工學科 碩士
** 正 會 員 : 韓國科學技術院 機械工學科 副教授 · 工博
*** 正 會 員 : 韓國科學技術院 機械工學科 教授 · 工博
接受日字 : 1999年 8月 17日
最終完了 : 1999年 12月 18日

Area Ratio	No. of holes		
	H1	H4	H9
3.4 %	H1_AR3.4	H4_AR3.4	H9_AR3.4
6.8 %	H1_AR6.8	H4_AR6.8	H9_AR6.8
13.6 %	H1_AR13.6	H4_AR13.6	H9_AR13.6

그림 3 구멍의 크기와 수량이 다른 다공 평판
Fig. 3 Perforated square plates with different size and number of holes

2. 이론식 전개

기판에 수직으로 진동하는 미소구조물(그림 1)의 동적 특성은 미소 진폭의 경우 선형시스템처럼 간주될 수 있으며, 동적 변위는 다음과 같은 2차 미분방정식으로 표현된다.

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} + b_e \frac{dx}{dt} + k_e x = F \cos(\omega t) \quad (1)$$

여기서 m_e , b_e 그리고 k_e 는 각각 유효 질량, 유효 감쇠계수 그리고 유효 강성을 나타낸다. 식 (1)에서, F 와 ω 는 각각 구동력과 구동주파수를 나타내며, 독립변수, x ,는 미소물체의 상대변위를 나타낸다.

공기감쇠 시험구조물의 감쇠비, ζ ,와 공진주파수, f_n ,는 다음과 같이 표현되며, 공진시 Q-factor는 $Q = \frac{1}{2\zeta}$ 로 정의된다.

$$\zeta = \frac{b_e}{2\sqrt{m_e k_e}} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (3)$$

사각 평판이 실리곤 기판과 수직인 방향으로 진동할 때 평판과 기판 사이의 균일한 두께, d_0 ,의 유체층 내에 압력이 발생한다. 이러한 경우 무차원 압축계수, σ ,는 다음과 같이 정의된다[9].

$$\sigma = \frac{12\mu\omega l^2}{d_0^2 P_d} \quad (4)$$

여기서 μ , ω 그리고 l 은 각각 유체의 점성, 진동 주파수 그리고 사각평판의 폭을 의미하며 P_d 는 유체층 내의 압력을 뜻한다.

낮은 압축계수($\sigma < 0.3$)[3] 영역의 경우 유체의 압축성과 강성의 영향을 무시할 수 있으며, Reynold 수가 낮을 경우

(< 1), 유체층 내의 압력분포는 Navier-Stoke 방정식으로부터 다음과 같은 식(5)[3]으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 P_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_d}{\partial y^2} = \frac{12\mu}{d_0^3} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 밀도, d 는 유체층의 두께, x 와 y 는 좌표들이다. 그리고 막힌 평판 아래의 유체층인 경우, 평판 경계를 따라 유체층의 상대 압력, P_d ,은 0 (대기압)으로 가정할 수 있다.

평판 아래의 유체층의 압력은 평판운동에 감쇠력을 가하게 되고, 정방형 막힌평판의 경우 감쇠계수, b ,는 식(6)[3]과 같이 표현된다.

$$b = 0.422 \frac{\mu l^4}{d_0^3} \quad (6)$$

3. 시험구조물의 설계 및 제작

3.1 시험구조물의 설계

공기감쇠 측정을 위한 시험구조물은 그림 2에 도시한 바와 같이 두 쌍의 접힌 (folded) 미소보에 의해 지지된 사각평판으로 구성되어 있다. 또한 공기감쇠에 대한 다공(perforation)의 영향을 알아보기 위해, 그림 3과 같이 총 9종의 정방형 구멍을 가진 다공평판을 설계하였다.

그림 3에 도시한 시험구조물에서 사각구멍의 크기와 숫자는 다음의 조건을 만족하게 설계하였다. 1) 다공평판의 유효 공기감쇠 면적을 $80 \times 80 \mu m^2$ 으로 모두 동일하게 하였다. 2) 그림 3의 각 가로 행의 평판들은 다음과 같이 정의된 막힌 부분과 뚫린 부분과의 면적비가 모두 같게 하였다.

$$AR(\%) = \frac{N_h l_h^2}{l_0^2} \times 100 \quad (7)$$

여기서 N_h , l_h 그리고 l_0 는 사각구멍의 숫자, 사각구멍 한 변의 길이, 그리고 전체평판 변의 길이를 나타낸다. 3) 그림 3의 세로 열의 평판들은 각각 일정한 면적비(3.4%, 6.8%, 13.6%)를 유지하면서 구멍의 크기와 개수를 변화시켰다.

그림 2에 도시한 바와 같이 두쌍의 접힌보로 지지된 시험구조물의 수직방향의 유효강성(k_{sq})을 Castigliano 방법을 이용하여 유도하면 다음과 같다.

$$k_{sq} = \frac{4EI_1}{l_1^3} \left(\frac{1}{(\frac{2}{3} - \lambda) + \frac{1-\lambda}{\alpha} + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{3\beta_2}} \right) \quad (8)$$

여기서 $I_1 (= t^3 w_1 / 12)$ 은 지지보 1의 면적 모멘트이며 t , w_1 , l_1 은 각각 지지보 1의 두께, 폭 그리고 길이이다. 또한 식(8)에서 의 변수들은 $\alpha = GK_2 / EI_1$, $\beta_i = GK_i / EI_i$, $\lambda = (\alpha + 1)(2\alpha + 1)$, $K_i = (t_i^3 w_i / 3) \{ 1 - 0.627(t_i / w_i) \tanh(p_i t_i / 2w_i) \}$ 로 정의된다.

한편 에너지법을 이용하여 그림 2에 도시한 시험구조물의 유효질량을 유도하면 다음과 같다.

$$m_{e,sl} = m_p + \frac{1754}{3360} m_1 + \frac{1}{4} m_2 \quad (9)$$

여기서 m_p 는 평판의 질량이고, m_1 과 m_2 는 각각 지지 보 1과 2의 질량이다.

3.2 시험구조물의 제작

그림 2 및 그림 3과 같이 설계된 총 10종의 시험구조물은 그림 4에 도시한 바와 같이 총 6장의 마스크와 두 층의 다결정 실리콘 박막을 사용한 표면미세가공기술로 제작되었다.

먼저 그림 4a에서 도시한 바와 같이 n-type (100) 4인치 실리콘 기판에 인(phosphorous)을 확산한다. 그 위에 1 μm 두께의 실리콘 산화막을 성장시키고, 전기적 절연을 위해 Si_3N_4 (2000Å)를 증착한 후, RIE(Reactive Ion Etching)공정을 이용하여 Si_3N_4 /산화막 층을 식각하여 확산된 층에 접촉하기 위한 접속구멍을 형성한다. 그림 4b에서 2000Å 두께의 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 다결정 실리콘을 증착하고, 970°C에서 30분 동안 인을 확산한 후, 다결정 실리콘을 RIE 공정으로 식각하여 하부전극을 제작하였다. 그림 4c에서 2 μm 두께의 LPCVD PSG 회생층을 증착한다. 그림 4d에서는 4.3 μm 두께의 다결정 실리콘과 1.5 μm 두께의 LPCVD PSG를 증착한 후, 다결정 실리콘에 인을 대칭적으로 확산시키기 위해 1000°C에서 열처리를 한다. 그림 4e에서는 PSG 패터닝 공정이후, Cl_2 플라즈마 RIE를 이용하여 다결정 실리콘 구조물을 형성한다. 회생층을 제거한 후, 점착(sticking) 문제를 해결하기 위해 이소프로필알코올과 적외선(IR) 램프를 사용하였으며, wire bonding을 위한 Ti/Au 금속전극을 lift-off 공정으로 형성하였다. 그림 5는 제작된 시험구조물들 중 막힌 평판과 그림 3의 첫 번째 행에 해당하는 시험구조물의 사진들이다.

3.3 시험구조물의 해석

막힌 평판을 가진 공기감쇠 시험구조물의 경우, 감쇠비, 공진주파수 그리고 감쇠계수는 각각 식 (2), (3), (6)으로부터 구할 수 있다. 두께 4.3 μm 인 시험구조물의 경우, 공기감쇠 면적이 $6400\mu\text{m}^2$ 이고 공진주파수는 22 kHz로 예측된다.

한편 다공평판의 경우, 공진주파수, 감쇠계수 및 감쇠비는 다음과 같은 유한요소 해석을 통해 구하였다. 그림 3과 같은 다공평판 아래의 공기층 압력분포는 식(10)과 같이 온도 T에 대한 2차원 열전도를 지배하는 Poisson 식 [10]의 유한요소 해로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\dot{q}}{k} \quad (10)$$

여기서, \dot{q} 는 단위체적당 열 발생률이고, k 는 열 전도도를 의미한다.

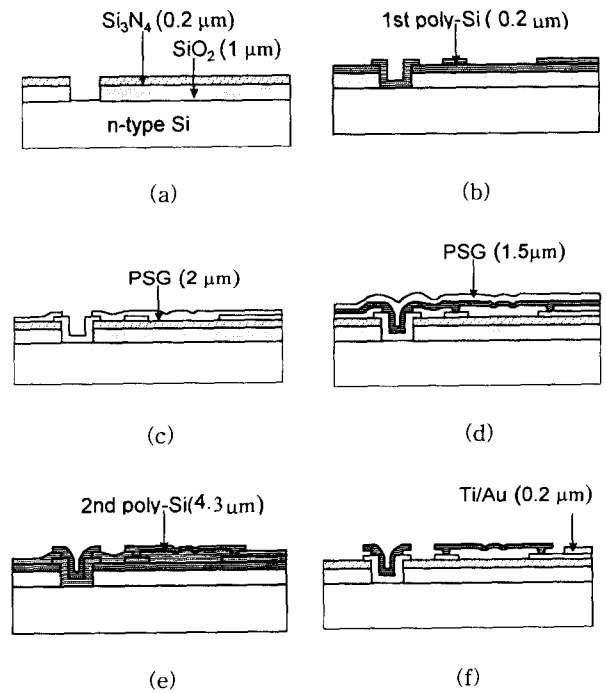


그림 4 표면미세가공법을 이용한 제작공정
Fig. 4 Microfabrication process

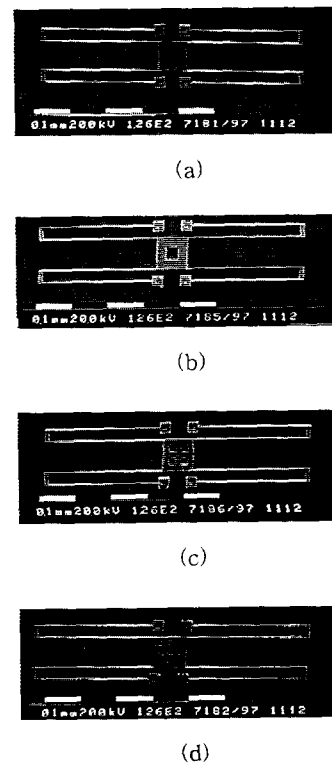


그림 5 제작된 그림 3의 시험구조물: (a) H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4
Fig. 5 Microfabricated test structures of Fig. 3: (a)H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4

따라서 그림 3의 평판에 대해 식(10)의 해를 유한요소해석으로 구하는 과정에서 평판 및 구멍 외곽경계에서의 상대 압력을 0으로 가정하였으며, 그림 6은 이와 같이하여 막힌 평판과 다공평판 아래의 유체층의 압력분포를 유한요소해석을 통해 구한 결과이다. 여기서 막힌 평판의 중심점에서 8.9 kPa의 최대압력상승을 얻었으며, 감쇠력 5.02×10^{-3} kgmm/sec²와 감쇠계수 $b=3.99 \times 10^{-5}$ kg/sec를 구하였다. 막힌 평판에 대해 유한요소해석의 결과는 해석적으로 구한 3.98×10^{-5} kg/sec의 결과와 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 시험 및 측정

점성감쇠 측정을 위한 실험장치는 그림 7과 같이 구성하였고, 20V(peak-to-peak)의 전압을 가하여 미소 평판을 구동시킨 상태에서, 구동 정전력에 의한 평판 구조물의 속도 응답은 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 측정하였다.

기판과 수직인 평판운동의 주파수 응답을 측정하기 위해

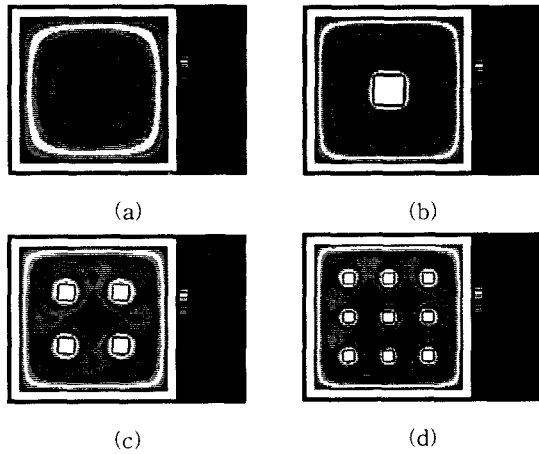


그림 6 유한요소해석으로 분석한 평판 밑의 squeeze film 압력 (그림 3의 시험구조물 중 면적비 3.4%인 경우): (a) H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4.

Fig. 6 Finite element analysis of the squeeze film pressure underneath the plates (For the case of the Area Ratio of 3.4% in Fig. 3): (a) H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4.

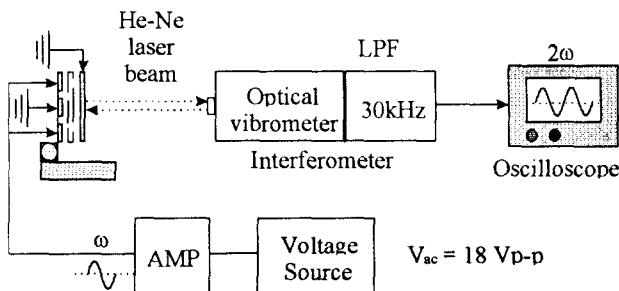


그림 7 Squeeze 평판의 속도 측정
Fig. 7 Velocity measurement of a squeezing plate

여, 막힌 평판과 그림 3에 도시한 9종의 다공평판 등 총 10종의 시험구조물에 대해 정전구동 전압의 주파수를 500 Hz에서 30 kHz까지 변화시키며 평판의 구동진폭을 관찰하였다. 이때 모든 감쇠시험은 대기압 및 상온에서 수행하였다.

평판의 정전구동 시험에서 측정된 동적구동(그림 8)으로부터 감쇠비, ζ ,를 추출하였으며, 이는 측정된 속도응답(그림 8의 점)과 이론적인 속도곡선(그림 8의 실선)과의 최소 자승오차식 (12)를 이루는 상태에서 감쇠계수를 추출하였다.

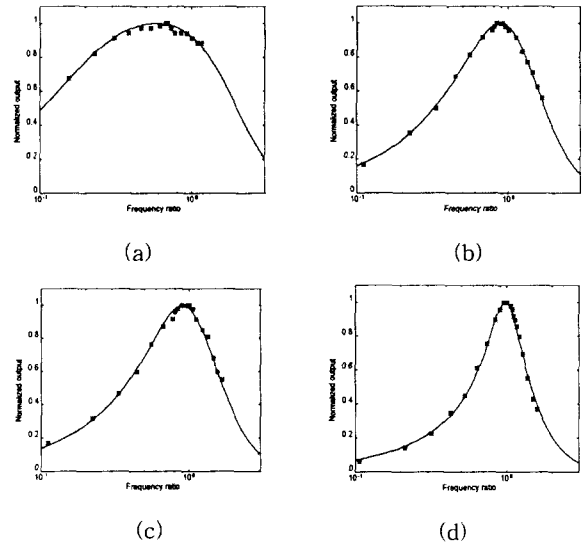


그림 8 제작된 평판의 정규화된 주파수 의존 속도 응답의 최소자승근사에 의한 감쇠계수의 추출 (그림 3의 시험구조물 중 면적비 3.4%인 경우): (a) H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4.

Fig. 8 Extraction of damping factors from the least square fit of the normalized frequency-dependent velocity response of the fabricated plates (For the case of the Area Ratio of 3.4% in Fig. 3): (a) H0; (b) H1_AR3.4; (c) H4_AR3.4; (d) H9_AR3.4.

$$SSE \equiv \sum_{i=1}^N (V_i - V_i(\zeta))^2 \tag{11}$$

식 (11)에서 V_i 는 측정된 평판 속도, $V_i(\zeta)$ 는 감쇠비, ζ 의 경우 이론적인 평판속도를 각각 의미한다.

실험적 감쇠계수, b_{ex} ,는 실험적으로 구한 감쇠비, ζ_{ex} ,로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{ex} = 2 \zeta_{ex} \omega (2\pi f_n) m_e \tag{12}$$

여기서, m_e 는 시험구조물의 유효질량이다.

그림 9에서는 그림 3과 같은 시험구조물에 대하여 유한요소해석으로부터 얻은 이론적 Q-factor와 실험적으로 측정된 Q-factor를 비교하였다. 그림 2의 막힌평판의 경우, 유한요소 해석에 의한 결과(Q=0.27)가 실험치(Q=0.18±0.2) 보다 약간 높게 나타났으나, 상호 크기는 실험오차 이내에서 비교

적 잘 일치하였다.

다공평판의 경우, 유한요소 해석에 의한 이론적인 Q-factor는 실험치 보다 아주 작게 예측되었으며, 그림 9에서 보는 바와 같이 Q-factor의 이론치과 실험치 간의 불일치 정도가 구멍의 수나 면적비(AR)가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 9에서 동일한 감쇠면적에 대해 구멍 개수의 증가는 구멍크기의 증가보다 감쇠를 줄이는데 더욱 효과적임을 알 수 있다.

한편 그림 10은 그림 9의 결과를 평판의 총 경계길이에 따라 표시한 것이다. 그림 3의 동일한 면적비를 가진 가로열의 평판에서, 외부평판의 경계길이는 고정된 반면 내부 구멍의 경계길이는 그림 3의 열 방향으로 순차적으로 2, 3배

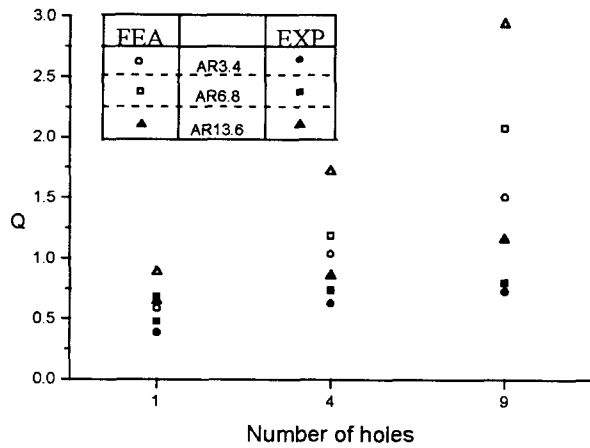


그림 9 그림 3의 다공평판에 대한 Q-factor의 이론치와 실험치의 비교: FEA는 유한요소해석에 의한 이론적 예측치; EXP는 제작된 시험구조물로부터 측정된 실험치

Fig. 9 Comparison of the theoretical and experimental Q-factors for the perforated plates of Fig. 3: FEA denotes the theoretical values estimated from the finite element analysis; EXP indicates the experimental values measured from the fabricated test structures

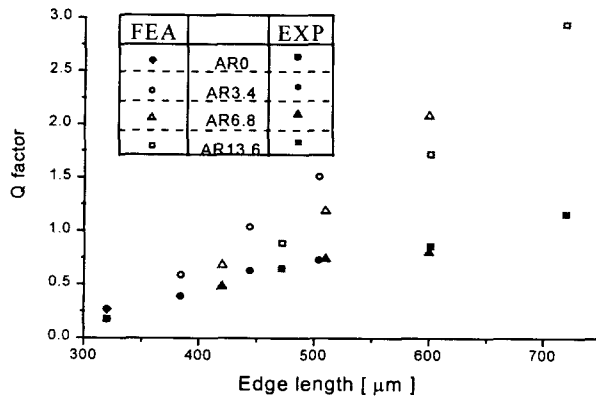


그림 10 그림 3의 다공평판에 관한 전체 모서리 길이에 대한 Q-factor의 이론치와 실험치

Fig. 10 Theoretical and experimental Q-factors, expressed in terms of the total edge length of the perforated plates of Fig. 3

증가한다. 한편 그림 3의 세로열을 구성하는 평판의 외부경계의 길이와 구멍주위의 내부경계 길이가 동시에 세로 열 방향으로 면적비가 증가함에 따라 증가한다. 그림 10으로부터, 실험치와 유한요소해석의 결과의 불일치는 동일한 감쇠 면적에 대해 다공평판의 총 경계길이에 관련된 것임을 알 수 있다.

유한요소해석 결과와 실험치의 불일치에 대한 주요한 요인은 유한요소해석 과정에서 평판과 구멍의 경계를 따라 부여되는 압력 경계조건($P_a=0$)의 부정확성에서 기인한다. 미소 영역에서의 다공평판 아래의 공기층의 압력은 평판 혹은 구멍의 경계에 따라 어느 정도 속도를 가지게되므로 압력 0의 조건을 유지하지 못한다. 따라서 유한요소해석의 Q-factor 예측치는 실제 Q-factor 보다 훨씬 높게 나타난다.

5. 결론

본 논문에서는 기관과 수직방향으로 움직이는 다공평판의 점성감쇠에 대한 실험적 연구 및 이론과의 비교연구를 수행하였다. 총 10종의 평판을 대상으로 공기감쇠 시험구조물을 설계, 제작 그리고 시험하였다. 측정된 Q-factor 값에 비해, 유한요소해석에 의해 예측된 이론적 Q-factor 값은 공기감쇠 영향을 과소 예측한 것으로 판명되었으며, 이러한 Q-factor의 이론치와 실험치 간의 차이는 다공평판의 총 경계길이의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났다. 다공평판의 공기감쇠 현상을 적절히 예측하기 위해 다공평판의 경계를 따라 압력을 구할 수 있는 고차원의 유한요소해석이 필요하다.

참고 문헌

- [1] J. Bergqvist and J. Gobert, Capacitive Microphone with a Surface Micromachined Backplate using Electroplating Technology, *J. of Microelectromech. Sys.*, Vol.3, No.2 (June 1994) 69-75.
- [2] M.J. Novack, *Design and Fabrication of a Thin Film Micromachined Accelerometer*, M.S. Thesis (1992) Massachusetts Institute of Technology.
- [3] J. B. Starr, Squeeze Film Damping in Solid State Accelerometer, *Tech. Digest, IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, USA, June 1990, pp.44-47.
- [4] D. Arch, T. Ohnstein, D. Zook and H. Guckel, A MEMS-based Tunable Infrared Filter for Spectroscopy, *Optical MEMS and Their Application, IEEE/LEOS Summer Topical Meetings*, 1996, pp.21-22.
- [5] M.S. Wu, E.C. Vail, G.S. Li, W. Yuen and C.J. Chang-Hasnain, Widely and Continuously Tunable Micromachined Resonant Cavity Detector with Wavelength Tracking, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.8, No.1 (1996) 98-100.
- [6] M. H. Sadd and A. K. Stiffler, Squeeze Film Damper : Amplitude Effects at Low Squeeze Numbers, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of*

the ASME, Vol. 97, Series B, Nov. 4, 1975, pp.1366-1370.

[7] J. Blech, On Isothermal Squeeze Films, *Journal of Lubrication Technology*, V.105, 1983, pp.615-620.

[8] M. Andrews, I. Harris and G. Turner, A Comparison of Squeeze-Film Theory with Measurements on a Microstructure, *Sensors and Actuators*, A36, 1993, 79-87.

[9] J. A. Williams, *Engineering Tribology*, Oxford, 1994, pp.320-322.

[10] A. F. Mills, *Heat Transfer*, Irins, Boston, 1992, pp.126-128.

저 자 소 개



김응삼(金應三)
 1974년 1월 5일생. 1996년 KAIST 기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 관심분야: 미소구조물의 동적 구동 및 공기감쇠의 이해와 응용
 Tel : 02-847- 4127
 E-mail : keslove@hanmail.net



김문언(金文彦)
 1943년 7월 13일생. 1967년 서울대 문리과대학, 물리학과 졸업. 1969년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1976년 일본 도쿄대 물리학 졸업(공학). 현재 KAIST 기계공학과 정교수.
 관심분야 : 점성유동 및 저속 층류 거동
 Tel : 042-869-3037, Fax : 042-869-3210
 E-mail : mukim@kaist.ac.kr



조영호(曹永昊)
 1957년 8월 10일생. 1980년 영남대 기계공학과 졸업(학사). 1982년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 1991년 미국 버클리대 기계공학과 졸업(공학). 1982년~1986년 한국과학기술연구원(KIST) CAD/CAM연구실 연구원. 1987년~1990년 Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC) 연구 조교, 1990년~1991년 BSAC Post-doc., 1991년~1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원. 1994년~현재 KAIST 기계공학과 부교수. 관심분야: 마이크로 관성센서, 마이크로 액추에이터, 미소 광기전복합 소자, 미소 자율 구동기관 및 응용
 Tel : 042-869-3038, Fax : 042-869-3050
 E-mail : mems@kaist.ac.kr