

그림 2. a) Sullivan 등의 disk 단면도 [2]
b) Holden 등의 disk 단면도 [3]

그러나 Sullivan 등의 방법(그림 2-a)은 desensitization은 줄였으나 sensitivity가 simple support에 비하여 7dB 이상 감소되었으며, Holden 등의 방법(그림 2-b))은 capacitance와 sensitivity의 감소가 있었다.

Sensitivity가 떨어지지 않으면서 desensitization이 일어나지 않도록 하는 또다른 방법은 disk의 단면 모양을 변화시켜 주는 것이다[3]. Holden 등은 단면이 그림 3과 같이 대칭이고 소위 linear gentle profile를 가정하고 S를 parameter로 하는 sensitivity 식을 유도하여 최적화를 시도 하였으나, S=0인 경우가 결과로 나오게 되어 실제에 응용할 수 없게 되며, PVDF를 부착시키기엔 부적합한 모양을 하고 있다. 또 sensitivity도 simple support (그림 1)에 비해 3.5 dB 작아진다.

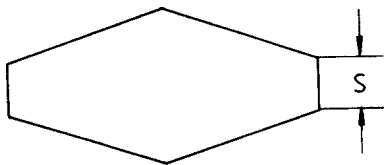


그림 3. Holden 등이 변형한 disk 단면도

B. 개선 방안 및 sensitivity의 계산

앞에서 언급된 단점을 보완하기 위한 방법으로 그림 4와 같이 flexural disk의 단면을 변화시켰다.

Desensitization을 방지하기 위하여 edge는 clamp 시킨다. Stress cancellation을 없애려면 edge가 simple support 이어야 하므로 edge는 얇게 하여 simple support에 근사시키며 중앙 부근은 hydrostatic pressure에 견딜

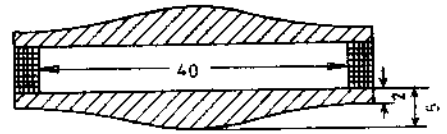


그림 4. Simulation model hydrophone의 단면도

수 있도록 두껍게 한다. 또 변형된 후 disk가 적이는 부분이 없도록 smooth한 단면 curve가 요구된다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 단면의 모양을 gaussian curve로 하였다.

이런 단면을 가진 hydrophone의 sensitivity를 이론적으로 계산하는 것은 간단하지 않다. 그 이유는 이런 단면의 경우 주어진 음압에 대한 strain 분포를 계산하는 것이 어렵기 때문이다. 여기서는 인가된 음압에 대하여 FEM을 사용하여 disk의 stress 분포를 얻었으며 식(1)과 같이 Hooke의 법칙을 이용하여 strain 분포를 구하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= 1/\gamma (\tau_1 - \mu \tau_2) \\ \epsilon_2 &= 1/\gamma (\tau_2 - \mu \tau_1) \end{aligned} \quad (1)$$

ϵ_1, ϵ_2 : disk 내부 표면에서의 strain (1=radial 방향, 2=tangential 방향)

τ_1, τ_2 : disk 내부 표면에서의 stress

γ : disk의 Young's modulus

μ : disk의 Poisson's ratio

PVDF는 disk 내부 표면에 부착되어 있으므로 strain의 continuity에 의하여 strain 분포를 PVDF에 적용하였다.

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}^D T_1 + s_{12}^D T_2 + g_{31}^D D_3 \\ S_2 &= s_{12}^D T_1 + s_{22}^D T_2 + g_{32}^D D_3 \\ \epsilon_3 &= -g_{31} T_1 - g_{32} T_2 + \beta_{33}^T D_3 \end{aligned} \quad (2)$$

위의 piezoelectric equation (2)로부터 다음과 같은 식

(3)을 얻을 수 있다.

$$\pi b^2 e / h = - \frac{E \pi}{1 - \sigma^D} (g_{31} + g_{32}) \int_0^b (\epsilon_1 + \epsilon_2) r dr + \beta_{33}^T Q \quad (3)$$

e ; 유기된 전압

b ; PVDF의 반경

h ; PVDF의 두께

σ^D ; PVDF의 Poisson's ratio

Q ; 유기된 전하

Open circuit condition인 경우에 $Q=0$ 이므로 PVDF에 발생하는 전압 e 는 식 (4)로 주어진다.

$$e = -\frac{Eh}{1-\nu^2} (g_{31} + g_{32}) \frac{1}{b^2} \int_0^b (e_1 + e_2) r dr \quad (4)$$

위의 식에서 sensitivity 만 고려할 때 $\frac{1}{b^2} \int_0^b (e_1 + e_2) r dr$

이 maximum 이어야 sensitivity가 maximum이 되며, 이론적으로 $b=0$ 에서 maximum에 도달하나 capacitance를 고려하면 b 가 클수록 좋음을 알 수 있다.

III. Simulation 및 결과

Simulation은 Structured Analysis Program(SAP6)을 이용하여 VAX11-780 computer에서 수행되었다[4]. 효과적이면서도 신빙성 있는 계산 결과를 얻기 위하여 3-D solid element를 이용하여 그림 5-a)와 같이 disk의 일부만 modeling 하였다. Disk 내부 표면에서의 stress 분포 resolution을 높이기 위하여 1400개의 node를 사용하여 0.2mm 간격으로 element를 구성하였다. 또 경계조건을 실제 경우와 같도록 하기 위하여 disk를 aluminum ring에 clamp 시켰다.

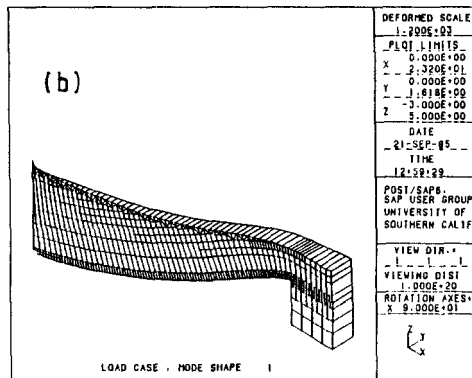
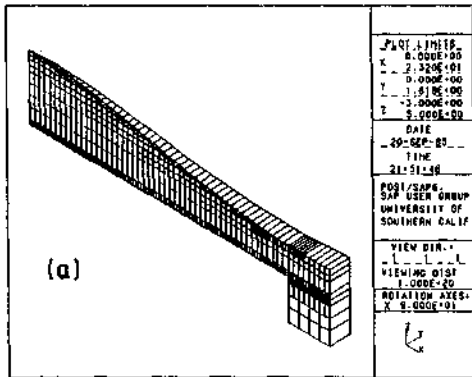


그림 5. a) SAP6에 입력된 disk model
b) 변형 후 disk의 모양

그림 5-b)는 sound pressure가 가해졌을 경우 disk의 변형된 모습을 보여주고 있다. Simulation에 필요한 parameter 값은 sullivan 논문에 근거하고 있으며, disk의 재료는 thermoplastic acrylic으로 가정하였다. parameter 값들은 다음과 같다.

$$g_{31} = 0.192 \text{ [Vm/N]}$$

$$g_{32} = 0.02 \text{ [Vm/N]}$$

$$h = 27 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$a = 20 \text{ [mm] ; disk의 반경}$$

$$\mu = \nu = 0.4 \text{ ; disk 및 PVDF의 Poisson's ratio}$$

$$E = 2.5 \times 10^3 \text{ MPa ; PVDF의 Young's modulus}$$

$$Y = 3.72 \times 10^3 \text{ MPa ; disk의 Young's modulus}$$

그림 6은 simulation 결과 PVDF의 면적에 따른 sensitivity와 capacitance를 보여주고 있다.

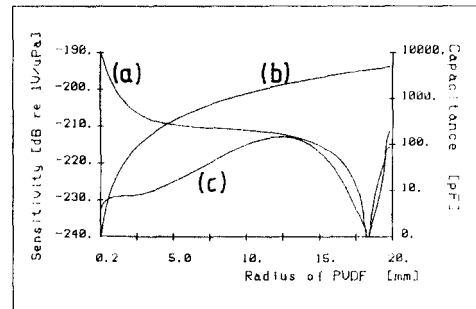


그림 6. a) Sensitivity
b) Capacitance
c) Hydrophone factor

위의 그림에서 sensitivity는 $b=12.5\text{mm}$ 일 경우 $-212\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ 임을 알 수 있다. 이것은 Holden이 같은 조건의 평면을 clamp 하였을 때 보다 9dB 이상 개선이 되었음을 알 수 있으며, sullivan의 경우 (그림 2-a)) 보다 7dB 개선되어 있음을 볼 수 있다.

그림 6에서 $18 < b < 20$ 인 영역에서 sensitivity와 hydrophone factor가 크게 나란한 이유는, finite element를 사용하기 때문에 stress가 급격히 변화하는 부분에서 생기는 오차로 볼 수 있다. 따라서 이 영역에서는 변화하는 경향만을 파악할 수 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 hydrophone의 sensitivity와 capacitance는 서로 역의 관계에 있어서 보통의 경우 이 두 가지를 절충하여야 한다. 최적 조건을 찾기 위한 한 가지 방법으로 Rijnja가 주장한[6] hydrophone factor (식(4))를 사용할 수 있다. PVDF의 크기에 따른 hydrophone factor H가 그림 6-c)에 그려져 있다.

$$H = M \sqrt{C} \quad (4)$$

M ; sensitivity

C ; capacitance

H ; hydrophone factor

그림 6-c)에서 보는 바와 같이 sensitivity와 capacitance를 동시에 고려하면 b=12.5(mm)부근에서 H가 maximum이므로 PVDF의 반경을 12.5 (mm)로 할 때 최적일 것임을 알 수 있다.

그림 7은 hydrostatic pressure가 model hydrophone에 미치는 영향을 보여주고 있다. Curve a)는 zero hydrostatic pressure에서의 sensitivity이며, curve b)는 3MPa의 hydrostatic pressure에서의 sensitivity이다.

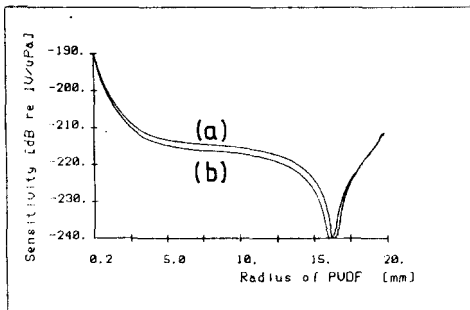


그림 7.

- a) Zero hydrostatic pressure에서의 sensitivity
- b) 3MPa의 hydrostatic pressure에서의 sensitivity

IV. 결 론

Flexural disk hydrophone의 desensitization을 억제하는 동시에 sensitivity를 개선하기 위하여 flexural disk의 단면을 gaussian curve로 변형시키고 clamp 한 model을 가정하고, SAP6 program을 이용하여 FEM을 써서 sensitivity를 구하였다.

FEM을 transducer 설계에 이용하는 것은 본 논문에서와 같은 flexural disk hydrophone 설계 외에 일반적으로 적용될 수 있다.

본 simulation에 계산된 hydrophone을 실제로 제작하여 simulation 결과와 비교하여 보는 일이 과제로 남아 있다.

또한 최적의 단면 형태를 얻기 위해 많은 단면 형태를 조사하여 보는 것도 의미있는 일이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. B. Woodward
"The suitability of polyvinylidene fluoride as a underwater transducer material" Acustica Vol.38, 1977, 264-268
2. T.D. Sullivan, J.M. Powers
" Piezoelectric polymer flexural disk hydrophone" J.A.S.A. 63(5), May 1978, 1396-1401
3. A.J. Holden, A.D. Parsons, A.E.J. Wilson
"Flexural disk hydrophones using polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric film : Desensitization with increasing hydrostatic pressure" J.A.S.A. 73(5), May 1983, 1858-1862
4. "SAP6 user manual" Structural mechanics computer laboratory U.S.C., 1982
5. "Electronic progress" Vol. XXXIV
No. 1 Raytheon company, Spring 1982
6. H.A.J. Rijnja
"Small sensitive hydrophone" Acustica Vol. 27, 1972, 182-188