PVDF Flexural Disk Hydrophone의 Sensitivity 개선에 관한 연구 :FEM을 이용한 Hydrophone Design

소 병 세 성 광 보 서울대학교 공과대학 전자공학과

Study on Sensitivity of PVDF Flexural Disk Hydrophone :Hydrophone Design by FEM

B. S. So K. M. Sung Dept. of Electronics Eng., Seoul National University

I. 서른

Polymer 물질인 polyvinylidene fluoride(PVDF) 가 drawing과 poling에 의하여 강한 압전효과를 나타낸다는 사 실이 발견된 이택 PVDF를 이용한 연구가 활발히 진행되어 왔 다.

PVDF는 piezoceramic에 비하여 큰 면적으로 얻을 수 있 으며 가볍고 flexibility가 크다. 또한 기계적, 열적 충격 에 강하고 확학적으로 안정되어 있으며, g-constant가 크다. 특히 acoustic impedance가 불과 비슷하고 internal loss가 크기 때문에 여러 종유의 hydrophone에 용용되고 있 다(l). 1978년 Sullivan은 낮은 주파수에서 수중음파를 수신할 목적으로 flexural disk에 PVDF를 부착시킨 hydro phone을 제작하였다[2]. 그런데 이 flexural disk hydro phone은 hydrostatic pressure가 증가함에 따라 sensiti vity가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 이번 desensitization을 없애고 동시에 sensitivity도 개선하기 위하여 disk의 단면을 gaussian curve로 변형시키고, finite element method (FEM)를 써서 sensitivity을 계산하였다.

II. Plexural disk hydrophone

A. 동작원리 및 문제점

Polymer film을 hydrophone에 응용하기 위하여서는 film이 hydrostatic pressure에 견딜 수 있도록 하여야 하며, 그 방법중의 하나가 그림 1과 같이 2개의 flexural disk를 이용하는 것이다.

2개의 disk를 simple supported edge가 되도록 com pliant ring에 부칙하며, PVDF를 disk의 한쪽 혹은 양면에 불인다. Disk의 내부쪽은 공기에 접해 있으므로 수중 음압이 작용할 때 영향을 받지않게 되며, PVDF의 stiffness가 disk에 비하여 무시할만 하므로 disk의 채질, 형태, bound ary condition에 hydrophone의 중요한 parameter가 된다 [5]. 이때 flexural disk hydrophone는 g₃₁-mode토 동작한다. Sullivan 등의 연구 결과에 의하면[2] 그림 1, 과 같은 hydrophone은 hydrostatic pressure가 0.7MPa 에서 4MPa로 변화함에 따라 sensitivity가 4.5dB 감소한다 그 주요 원인은 hydrostatic pressure가 중가함에 따라 disk²| boundary condition⁰| simple support⁰|⁴| clamp로 빠뀌게 되어, 끝이 clamped 된 평판에서 일어나는 stress cancellation에 있다. 그들은 stress cancella tion에 의한 desensitization을 줄이기 위하여 단면을 그림 2-a)와 같이 바꾸고 epoxy로 aluminum ring얘 부착시킴으 로써 desensitization의 폭으로 1.5dB로 낮추었다[1]. Holden 동은 그림 2~b)와 같은 단면을 갖는 disk를 이용하 고 PVDF의 면적을 disk 보다 작계할 것을 제안하였다[3].



그림 1. Dual bender disk hydrophone [5]



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

그러나 Sullivan 등의 방법(그림 2-a))은 desensitiza tion은 줄었으나 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 변화 시켜 주는 것이다[3]. Holden 등은 단면이 그림 3과 같이 대칭이고 소위 linear gentle profile을 가정하고 S를 pa rameter로 하는 sensitivity 식을 유도하여 최적화를 시도 하였으나, S=0인 경우가 결과로 나오게 되어 실계에 응용할 수 없게 되며, PVDP을 부착시키기에 부적합한 모양을 하고 있다. 또 sensitivity도 simple support (그림 1)에 비해 3.5 dB 자아진다.



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 시간 다. Stress cancellation을 없애려면 edge가 simple support 이어야 하므로 edge는 얇게 하여 simple support 에 근사시키며 중앙 부분은 hydrostatic pressure에 견딜



그림 4. Simulation model hydrophone의 단면도

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

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1} &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \left(\mathcal{I}_{1} - \mu \mathcal{I}_{2} \right) \\ \varepsilon_{2} &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \left(\mathcal{I}_{2} - \mu \mathcal{I}_{1} \right) \end{aligned} \tag{1}$$

E.E.; disk 내부 표면에서의 strain (l≠radial 방향,

2=tangential 방향)

김,것; disk 내부 표면에서의 stress

丫 ; disk의 Young's modulus

µ ; disk⁹| Poisson's ratio

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

$$s_{1} = s_{11}^{D} T_{1} + s_{12}^{D} T_{2} + g_{31}D_{3}$$

$$s_{2} = s_{12}^{D} T_{1} + s_{22}^{D} T_{2} + g_{32}D_{3}$$
(2)
$$\boldsymbol{\mathcal{E}}_{3} = -g_{31} T_{1} - g_{32} T_{2} + \boldsymbol{\beta}_{33}^{T}D_{3}$$

위의 piezoelectric equation (2)로부터 다음과 같은 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\pi b^{2} e/h = - \frac{E \pi}{1 - e^{D}} (g_{31} + g_{32}) \int_{0}^{b} (e_{1} + e_{3}) r dr$$

$$+ \beta_{33}^{dr} Q \qquad (3)$$
e; 유기된 전압
b; PVDF의 반경
h; PVDF의 두께
5^D; PVDF의 Foisson's ratio
Q : 유기된 전함

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

$$e = -\frac{Eh}{1-r^{b}}(g_{31}+g_{32})\frac{1}{b^{2}}\int_{0}^{b}(e_{1}+e_{2})rdr \quad (4)$$

위의 식에서 sensitivity 만 고려할 때 $\frac{1}{25}\int_{0}^{0} (E_{1}+E_{2})rdr$ 이 maximum 이어야 sensitivity³ maximum이 되며, 이론 적으로 b=0에서 maximum에 도달되나 capacitance를 고려하 면 b가 클수록 좋음을 알 수 있다.

III. Simulation 및 결과

Simulation은 Structured Analysis Program(SAP6) 을 이용하여 VAX11-780 computer에서 수행되었다[4]. 효과 적이면서도 신빙성 있는 계산 결과를 얻기 위하여 3~D solid element를 이용하여 그림 5-a)와 같이 disk의 일부분 만을 modeling 하였다. Disk 내부 표면에서의 stress 분포 re solution을 높이기 위하여 1400개의 node을 사용하여 0.2mm 간격으로 element을 구성하였다. 또 경계조건을 실제 경우와 갑도록 하기 위하여 disk을 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 변 형된 모습을 보여주고 있다. Simulation에 필요한 parame ter 값은 sullivan 논문에 근거하고 있으며, disk의 재료는 thermoplastic acrylic으로 가정하였다. parameter 값 들은 다음과 같다.

| 9 ₃₁ | = | 0.192 | [Vm/1 | J) | |
|-----------------|---|---------------------|----------|------------|------------------------|
| 9 ₃₂ | ÷ | 0.02 | [Vm/1 | 4] | |
| h | Ŧ | 27 | [j.m] | | |
| а | = | 20 | [mm] | ; | disk의 반경 |
| بر | ŧ | 6 = 0, | 4 | ; | disk 및 PVDF의 Poisson's |
| | | | | | ratio |
| E | = | 2.5x10 ³ | MPa | ; | PVDF의 Young's modulus |
| Y | = | 3.72x10 | 3 MPa | · | disk≌ Young's modulus |

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



그림 6. a) Sensitivity

b) Capacitance

c) Hydrophone factor

위의 그림에서 sensitivity는 b=12.5mm 알 경우 ~212dB re 1V/µPa 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 개선되 어 있음을 볼수 있다.

그림 6에서 18<b<20 안 영역에서 sensitivity와 hy drophone factor가 크게 나라난 이유는, finite element 볼 이용하기 때문에 stress가 급격히 변화하는 부분에서 생기 는 오차로 볼수 있다. 파라서 이 영역에서는 변화하는 경향만 을 파악할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 hydrophone의 sensitivity와 capacitance는 서로 여의 관계에 있어서 보통의 경우 이 두 가지를 절충하여야 한다. 최적 조건을 찾기 위한 한 가지 방 법으로 Rijnja가 주장한[6] hydrophone factor (삭(4))를 사용할 수 있다. PVDF의 크기에 다룬 hydrophone factor H 가 그림 6-c)에 그려져 있다.

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

M ; sensitivity

- C ; capacitance
- H ; hydrophone factor

그림 6-c)에서 보는 바와 같이 sensitivity와 capacitan ce를 동시에 고려하면 b=12.5[mm]부근에서 H가 maximum 이므로 PVDF의 반경을 12.5 [mm]로 할 때 최적이 됨을 알 수 있다.

그림 7은 hydrostatic pressure⁷) model hydrophone 에 미치는 영향을 보여주고 있다. Curve a)는 zero hydro static pressure 에서의 sensitivity이며, curve b)는 3MPa의 hydrostatic pressure 에서의 sensitivity이다.



그림 7.

a) Zero hydrostatic pressure 에서의 sensitivity b) 3MPa의 hydrostatic pressure 에서의 sensitivity

IV. 결혼

Flexural disk hydrophone의 desensitization을 억 제하는 동시에 sensitivity를 개선하기 위하여 flexural disk의 단면을 gaussian curve로 변형시키고 clamp 한 mo del을 가정하고,SAP6 program을 이용하여 FEM을 써서 sen sitivity를 구하였다. FEM을 transducer 설계에 이용하는 것은 본 논문에서와 같은 flexural disk hydrophone 설계 외에 일반적으로 적 용될 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

- T.D. Sullivan, J.M. Powers
 " Piezoelectric polymer flexural disk hydro phone" J.A.S.A. 63(5), May 1978,1396-1401
- 3. A.J. Bolden, A.D. Parsons, A.E.J. Wilson "Flexural disk hydrophones using polyviny lidene fluoride (PVDF) piezoelectric film : Desensitization with increasing hydrostatic pressure" J.A.S.A. 73(5), May 1963,1858-1862
- *SAP6 user manual * Structual mechanics computer laboratory U.S.C., 1982
- "Electronic progress" Vol. XXXIV
 No. 1 Raytheon company, Spring 1982

6. H.A.J. Rijnja

"Small sensitive hydrophone" Acoustica Vol. 27, 1972,182-188