

## 압전 세라믹과 여파기

김 영 수\*

### 1. 서 론

압전 세라믹은 여러가지 크기 모양 설계로 이용될 수 있다. 유전상수  $\epsilon$ , young계수  $E$ , 전기기계상수  $k$ , 압전상수  $\alpha$ , 전위출력상수  $g$ , 메카니칼  $Q$  값에 의해서 능률이 결정된다. 예를들면 초음파를 발생 시키기 위한 발진기는 Hard material인 PZT-4와 같이  $\alpha$ 와  $Q$ 가 큰값이 필요하며 높은  $g$  값을 갖는 물질은(soft material, 즉 PZT-5)는 보통 픽업(pick up)으로 사용되며 낮은 온도계수를 갖는 안정된 물질 즉 PZT-6은 여파기로서 사용된다. 다음장에서 이들물질의 여러가지 응용에 대해서 논의한다.

### 2. 세라믹 발진기

(a) 초음파 송수신에 사용되는 발진기 깊이탐지기 어족탐지기 또는 소나(Sonar)에서는 일정히 정해진 주파수가 송수신에 사용되며 원형판 원추형판 또는 원기둥형 발진장치가 보통 사용된다. PZT 세라믹이 광범위 하게 사용되기는 하지만  $BaTiO_3$  세라믹을 효율이 좋기때문에 널리 쓰이고 있다. 만약 주파수가 50kc 까지 증가 한다면 세라믹의 두께는 4cm 또는 그 이상이 되며 극분류와 내부임피던스를 보상하기 위해서 금속판이 세라믹의 양쪽에 붙여져야 한다. 만약 발진기의 두께가 복사구경과 같은 크기일 경우 복합 발진이 발생하며 발진의 성질은 매우 복잡하게 된다. 유도된 20kc 이하의 주파수에 대해서는 세라믹 발진기가 일반적으로 사용된다. side load의 경

우에서 공진시의  $Q$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q = \frac{\pi \rho_m C_m}{2 \rho_o C_o} \quad (1)$$

여기서  $\rho_o C_o$ 와  $\rho_m C_m$ 은 각각 매개체와 발진물질의 음향임피던스를 나타낸다.

물에서  $Q$ 는 매우 작은값을 갖는다( $Q \approx 30$ ) 따라서 송수신 주파수에서의 근소한 차이는 실제 응용에서는 별로 문제시 되지 않는다. 금속판이 세라믹에 부착되어 있을때  $Q$ 값은 금속판의 무게에 따라서 변화한다. dump-bell 모양의 경우에  $Q$ 값은 복사면과 얇은 부분에서의 단면적비율을 적당하게 조정하여 변화시킬 수 있다. 압전 세라믹의 두께는 발진기의 내부임피던스 힘상수(역학상수)와 최대출력에 의해 결정된다.

두께가 감소하면 내부임피던스도 감소하며 힘상수는 증가하나 최대출력은 극부적으로 역학적 인 압력 때문에 감소하게 된다. 복사표면의 모양과 크기는 필요한 방향특성에 따라 설계된다. 큰 복사 표면이 필요하면 작은발진기를 적당히 연결하여 사용한다. 원통형의 경우에 2차원의 무방향성 송신기 혹은 수신기가 얻어진다. 따라서 복사 방향으로 발진기가 사용될때  $Q$ 값은 외각에 얇은 막을 형성시켜서 감소시킬 수 있다. 검출이 불완전한 경우 주파수는 1Mc 까지 올라가며 발진기의 두께는 0.3cm 또는 그 이하가 된다. 그러나 그와같은 세라믹을 만드는데는 어려움이 있다. 고주파가 가끔 사용되며 석영으로 된 발진기는 10 Mc 이상의 주파수에서 매우 유용하게 사용된다.

(b) 고전력 초음파발생에 사용되는 발진기

초음파 발생을 위한 발진기의 등가회로가 그림 1에 나타나 있다. 여기서  $R_o$ 는 유전손실이며  $RL$

\* 준회원 경희대학교, 전자공학과

은 음향 복사저항이고  $R_c$ 는 세라믹의 내부 마찰 손실  $R_J$ 는 여러가지의 역학적인 손실을 나타낸다(특히 음향 복사저항은 측면으로부터 나타난다) 유전손실에 기인한 단위체적당 전력의 손실은

$$P_{DE} = \omega E^2 \epsilon_{32} T \tan \delta \quad (2)$$

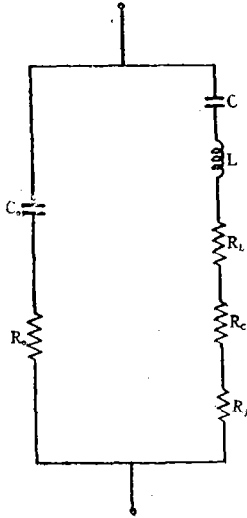


그림 1. 발전기의 동가회로

여기서  $\tan \delta = \frac{1}{Q_E} = \omega C_0 R_0$ 이다.

이러한 경우에 역학적인 입력은 다음과 같이 표시된다.

$$P = WrE^2_3 k^2 \epsilon_{33} T Q_M \quad (3)$$

여기서  $k_{31}$  또는  $k_{33}$ 은 발전기의 성질에 따라서 결정된다.  $Q_M$ 은 발전기의 역학적인  $Q$ 값이며 이것은 역학적인 이동 형태에 좌우되며 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\frac{1}{Q_M} = WrC(R_L + R_J + R_C) \quad (4)$$

이 경우 음향출력 는 다음식으로 부터 계산할 수 있다.

$$Pa = WrE^2_3 k^2 \epsilon_{33} T Q_M \left( \frac{Q_c}{Q_c Q_L \eta_{ma}} \right) \eta_{ma} \quad (5)$$

$$= P \eta_{em} \eta_{ma}$$

여기서

$$Q_c = 1/WrCR_L, \quad Q_c = 1/Wr, CR_C Q_J$$

$$= 1/WrCR_J$$

$$\eta_{ma} = Q_J / (Q_L + Q_J)$$

$\eta_{ma}$ 는 역학적인 음향변환효율을 나타내며 세라믹의 성질과는 무관하다. 전체입력  $P_i$ 는 다음과

같이 표시된다.

$$P_i = P + P_{DE} \quad (6)$$

$$= Pa + P_{DM} + P_{DE}$$

여기서  $P_{DM}$ 은 세라믹의 내부 마찰손실에 따른 힘의 손실을 나타내며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_{DM} = P(1 - \eta_{em} \eta_{ma}) \quad (7)$$

$$= WrE^2_3 k^2 \epsilon_{33} T Q_M \left( \frac{Q_L \eta_{ma}}{Q_D + Q_L \eta_{ma}} \right)$$

따라서 전기적 음향변환효율은 다음 식으로부터 얻어진다.

$$\eta_{ea} = \frac{P_a}{P + P_{DE}} \quad (7)$$

$$= \frac{k^2 \eta_{ma} [Q_c / (Q_c + Q_L \eta_{ma})]}{k^2 + (1/Q_M Q_M)}$$

$$= \eta_{em} \eta_{ma} \quad (8)$$

여기서  $\eta_{em}$ 은 전기적인 역학변환효율을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{em} = \eta_{em}' \eta_{em}'' \quad (9)$$

여기서

$$\eta_{em}' = \frac{k^2}{k^2 + 1/Q_M Q_E} \quad (10)$$

$$\eta_{em}'' = \frac{Q_c}{Q_D + Q_L \eta_{ma}}$$

transducer가 큰진폭으로 거동될때 다음 문제가 나타난다.

(1) 세라믹의 動壓的 파괴의 범위

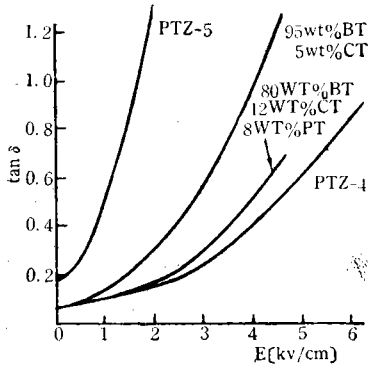
공진이 일어나는 동안 압력은 다음 관계에서 측정할 수 있다.

$$T = \frac{E_3 \alpha Q_M}{S_E} \quad (11)$$

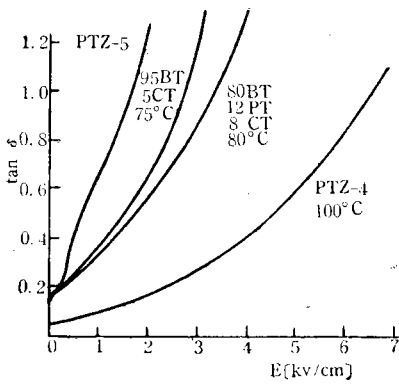
발전기의 성질에 따라  $\alpha_{31}$ 과  $S_{11}^E$  또는  $\alpha_{33}$ 과  $S_{33}^E$ 가 사용된다. 세라믹의 응력 저항은 정지상태에서 측정될 수 있으며 약  $300\text{kg/cm}^2$ 이고 여기에서 압축 한계는 약  $700\text{kg/cm}^2$ 이다. 원추형판의 축방향 발전에 대해서 파괴한도는  $300\omega/\text{cm}^2$  정도라고 알려져 있다(전장 길이는  $akV/\text{cm}$ )이다 이값은  $Q_M \cong 10$ 에 대한 식(11)과 일치한다.

(2) 유전손실에 의한 효율의 저하

그림 2는  $1\text{kc}$ 의 고주파 전계가 가해졌을때 전제와  $\tan \delta$  사이의 관계를 보여 주고 있다. 유전손실은 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 세라믹의 온도를 높이는 열효과를 나타낸다.



(a) Room temperature



(b) High temperature

그림 2. 전계 (IKC)와  $\tan \delta$ 와의 관계

(3) 세라믹의 내부 마찰손실에 따른 효율의 저하

그림 3은 발진이 축과 직각되는 방향에서 이루어질 때 내부압력과 QC 사이의 관계를 보여주고 있다. 유전손실의 경우 내부 마찰계수는 세라믹의 열효과에 영향을 미친다(그림 4에 있는 황좌표는 MKS 단위의 힘)

(4) 고전계에 의한 세라믹의 극분리가 감소된다.

그림 (4)는 30분동안 고압의 전계를 가한후  $K_p$ 의 감소량을 보여주고 있다.

(5) 온도상승을 수반한 세라믹의 극분리 감소식 (2)와 (7)에 의한 PDE와 PDM 양은 열손실이 되며 온도상승의 원인이 된다. 온도가 상승되기 때문에 극분리는 감소되며 변환효율이 감소되며 결국 발진이 정지된다. 온도상승을 냉각 조건과 발진의 진폭에 좌우되어 변화되지만 보통

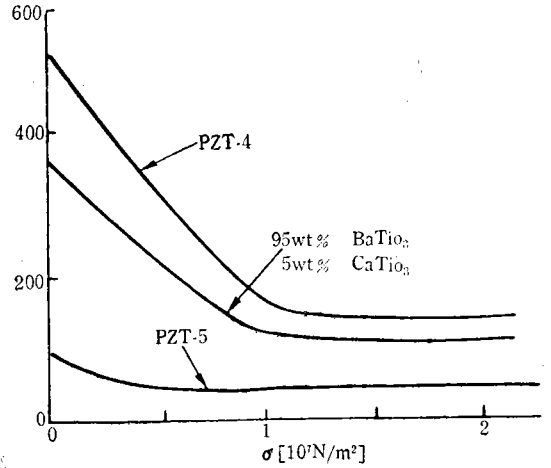


그림 3. QC와 극분리축에 직각인 방향에서의 발진을 위한 내부압력과의 관계

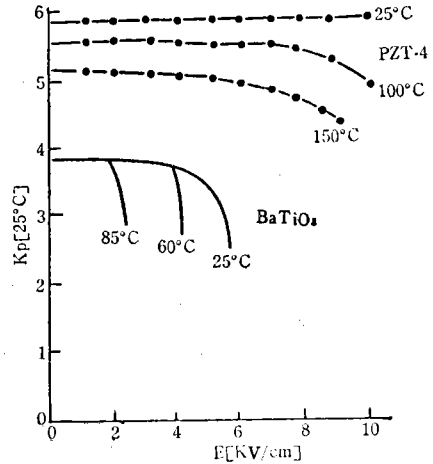


그림 4. 30분동안 높은 전계 E를 적용한 후의  $K_p$  값

허용온도상승은  $BaTiO_3$ 에 대해서는 약  $40^\circ C$ 이며 PZT 세라믹에 대해서는  $100^\circ C$ 이다.

발전기의 설계는 (1) 효율 (2) 온도상승의 허용범위 (3) 압력에 의한 파괴를 피할 수 있는 진폭 한계에 의해서 결정된다.

어떤 경우든 발전기에 대한 생각이 필요한 요소가 되며  $2 \sim 10 W/cm^2$  음향출력의 최적범위가 일반적으로 용납된다.

항목 (3)에 관해서는 압력에 의한 파괴의 한계가 발전기에 영구적인 압축을 가함으로 증가시킬 수 있다. 이런 목적으로 샌드위치와 같은 구조가 제안되었다. 그러나 이런 구조에서 극분리는 역

학적 bias의 적용방법 혹은 크기에 따라서 유도되기 때문에 상당한 주의를 요한다. 발전기의 일반적인 모양과 크기는 다음에 논의될 요소들에 의해서 결정되나 더 자세한 것은 발전기가 사용되는 특수한 목적에 의해서 결정된다.

예를들면 오목한 표면이나 볼록한 발전기의 경우 초음파 에너지는 초점에 집중된다. 높은 출력이 요구될때 발전기의 병렬연결이 보통 사용된다 만약 음향출력이 증가된다면 공동이 생겨나고 발전기의 표면에 있는 전극에 영향을 미친다. 따라서 전극을 설계하는데 주의 해야한다.

(c) 샌드위치 형식으로된 압전 세라믹

그림 5, 6에 있는 바와같이 중앙전극이 양극이고 외부전극은 음극이다. 외부단자는 출력단자이다. 한단자상수를 고정하고 다른 단자에 집중된 힘  $F$ 를 적용할 경우 전위감도  $S$ 는  $V$ 가 출력전압이라 할때 다음과 같이 표시할 수 있다.

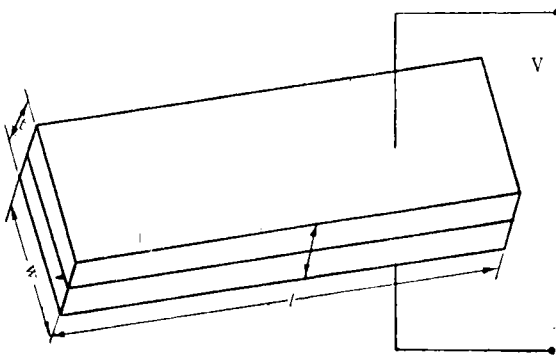


그림 5. 샌드위치 모양의 직렬연결

$$S = \frac{V}{F} = \frac{3}{2} \frac{g_{31}}{Wt} L \quad (12)$$

이런 경우에 컵플리언스  $C_m$ 은 다음 식으로부터 얻어진다.

$$C_m = \frac{4L}{Wt^2} S_{11}^E \quad (13)$$

역학적인 힘을 증가시키기 위하여 금속막이 가끔 샌드위치식으로 가운데 삽입된다. 금속막의 두께가 얇을때는 비교적 근사적으로 방정식 (13)을 이용할 수 있다. soft·PZT는  $g_{31}$ 의 값이 Hard·PZT의 값과 근사적으로 같다. 그러나 young 계수는 Hard PZT의 값보다는 더작다. 두께가 얇으면 낮은 임피던스가 낮으므로  $t=0.5mm$ 가 사용된다. 스테레오 pick up의 경우 이러한

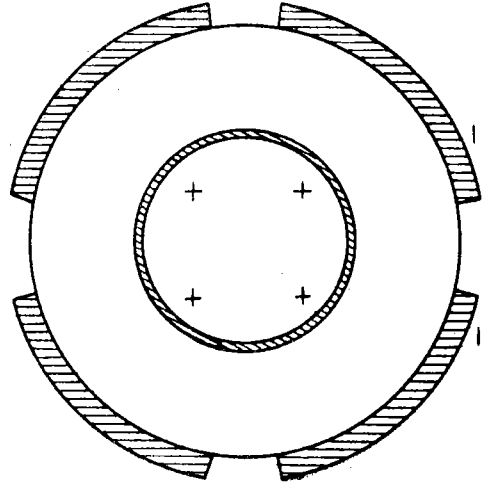


그림 6. 원통형샌드위치식으로된 전극구조

종류의 2가지 요소가 사용된다. 그림 6에 나타나 있는 원통형이 제안 되었지만 역시 컵플리언스는 아직 문제로 남아있다. 전화에 사용되는 송수화기는 원형 샌드위치판으로 만들어진 것을 사용하고 있다. 그리고 그 감도는 전자기형으로 된 것만큼 좋다고 알려져 있다. 이러한 것은 트랜지스터 라디오의 이어폰에도 이용되고 있다. 이러한 종류의 구조형식은 전자기장치보다 크기가 훨씬 작다. 그러나 접합점에서의 압력이 매우 높아지기 때문에 과잉압력을 피하기 위하여 비교적 부피가 크게 만들어져 있다.

(d) 여러가지 응용

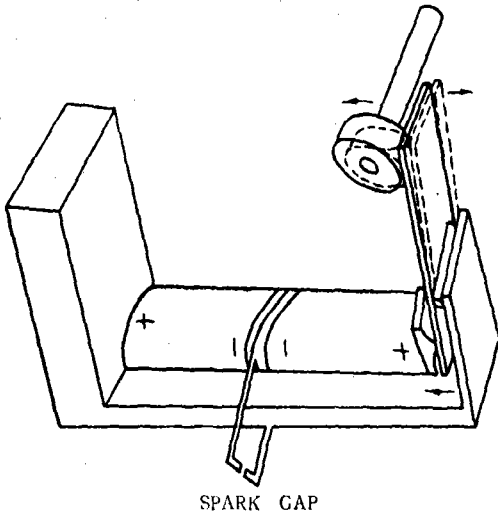
(1) 스파크 방전발생에 응용

단위면적당 힘  $T$ 가 압전 세라믹에 적용될 경우 전압  $V$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$V = gLT \quad (14)$$

여기서  $l$ 은 두전극 사이의 간격을 나타낸다. 예를들어  $l=0.02m$   $T=10^8N(\cong 1 \text{ ton/cm}^2)$ 이고  $V=6 \times 10^4V$  라고 하자. PZT 세라믹에 대한 최대압축 관계는 약  $7\text{ton/cm}^2$ 이므로 1만 volt가 쉽게 발생한다. 이런 종류의 스파크 방전이 사용되는 내부 연소엔진이 개발되었다.

PZT 두께의 방향에서  $K$ 의 값은 약 0.7이며 연소효율은 약 70%이다. 그림 7은 이러한 스파크 기기의 원리를 보여주고 있다. 또한 다이내마이트의 triggering 장치로써 응용되며 이 경우 고전압이 필요하지 않기 때문에 압전 세라믹의 두



SPARK GAP

그림 7. 스파크를 이용한 방전원리의 예

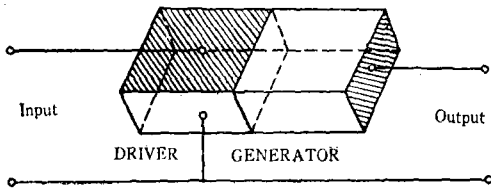


그림 8. 압전 변압기의 예

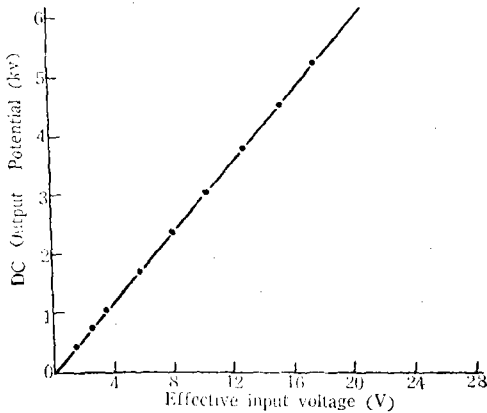


그림 9. 세라믹 변압기를 사용한 고압직류 발전기 특성

께는 1~2mm로서 충분하다.

(2) 압전 변압기

압전 세라믹은 고전압을 발생시키는 데 사용된다. 그림 8에 한 예를 도시하였다. 공진주파수와

동일한 주파수의 교류전류가 일차측에서 가해질 때 동일주파수의 고전압이 2차측에서 발생된다. 그림 9에서는 PZT 세라믹을 사용했을 때 출력직류와 입력전압과의 관계를 나타내고 정류회로는 출력측에 연결되었다. 고압의 직류를 얻기위해서 이러한 시도의 가능성도 있다.

3. 압전 세라믹여파기

(a) 2단자 여파기

압전 세라믹 진동자는 진동자의 모양과 크기에 의해 결정되는 공진주파수를 갖기 때문에 그리고 반공진주파수를 갖기 때문에 공진주파수 근처의 임피던스 변화를 이용하여 여파기로서 사용할 수 있다. 예를들면 트랜지스터 회로에서 에미터에 바이어스캐패시터를 사용하는 대신에 세라믹소자를 사용하면 선택도를 개량시킬 수 있다.

(b) 3단자 여파기

압전 세라믹 소자의 한 면을 나누어 3단자 여파기를 만든다. 이 등가회로가 그림 10이다. 회로에서의 L, C, 와 R은 각각, 등가저항, 등가커패시턴스, 등가저항이고  $C_{01}$  과  $C_{02}$  는 입력과 출력면에서 정용량이고  $C_{012}$  는 두 전극사이의 분포용량이다. 압전 세라믹이 큰 유전상수를 갖기므로  $C_{012}$  는 보통 작고  $C_{012}$  는 대부분 경우 무시할 수 있다. 만약  $C_{01}$  과  $C_{02}$  의 값이 다르면 임피던스 변환특성 뿐만 아니라 여러가지 여파기특성을 얻는다.

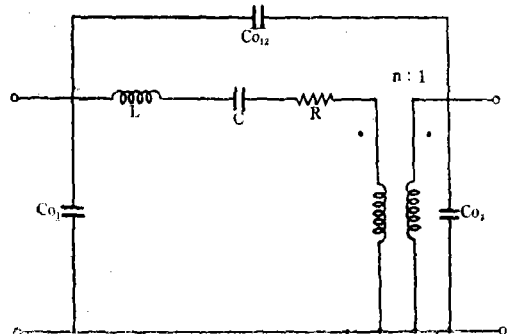


그림 10. 3단자 여파기 등가회로

CO<sub>1</sub> 과 CO<sub>2</sub> 가 진동자에 관하여 대략 등가적인 값일때 다음과 같이 근사치가 적용된다.

$$n^2 = \frac{Co_1}{Co_2} \quad (15)$$

만약 CO<sub>1</sub> 이 너무 적으면 전자역학변환 능률이 떨어지고 결과적으로 손실이 증가한다. 그림 11 은 소위 말하는 ring-dot 여파기 특성의 실예이다 이것은 반경방향의 원형판의 진동주파수의 두번째 높은 주파수를 이용한 것이다.

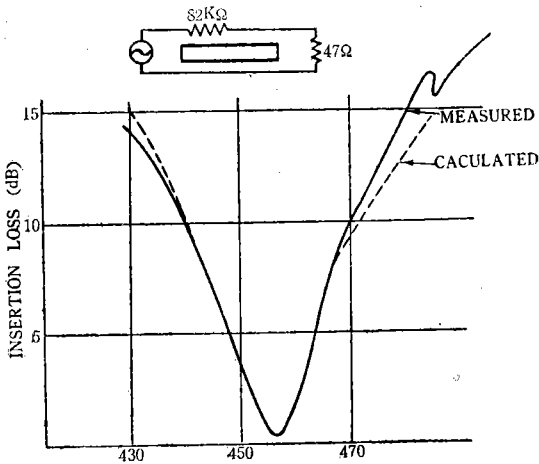


그림 11. 반지형 여파기의 특성

RZT-6을 사용하였을때 6dB에서의 대역폭은 4~7%이며 삽입손실은 2dB 이하이다. 또한 안정도는 10년동안 0.2% 이하의 주파수 변동밖에 일어나지 않으며 -20°C에서 60°C 사이에서 ±0.1%의 온도 특성을 갖고 있다. 그림 12에 단면이 표시된 반지모양의 구조는 낮은 주파수 즉 1KC ~ 50KC 용으로 개발되었다. 간격 S를 증가시키므로써 주파수는 6배정도 증가될 수 있다. U字형의 사용답이 매우 적은 이점을 갖고 있으며 만들기 용이하다. 반면 S字형은 CO<sub>2</sub> 과 CO<sub>2</sub> 의 변화 범위가 넓다. 그러나 고조파는 3배 혹은 2배정도 증가될 수 있다. 그림 13은 그 특성의 하나를 나타내고 있다. 그림으로부터 분명히 알수 있듯이 연결상태를 변화시키므로써 최대의 감쇄가 下部의 공진에서 上部의 공진으로 이동시킬 수 있다. 의사용답은 서로 상이한 특성의 공진기를 연결하여 제거시킬 수 있다.

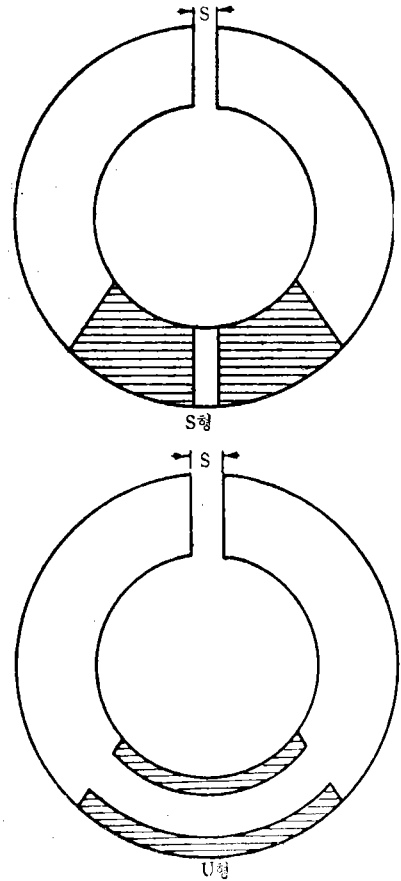


그림 12. 반지형 공진기의 단면도

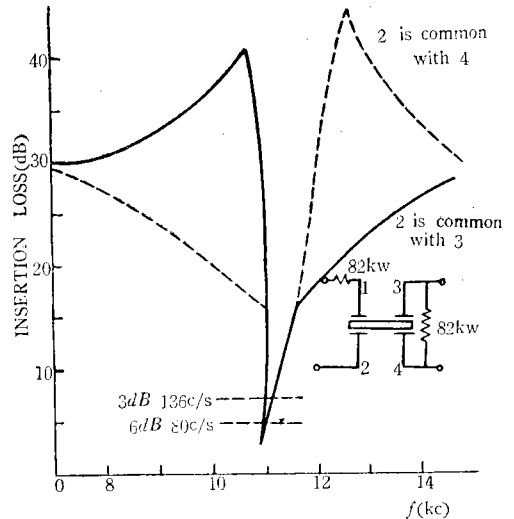


그림 13. U형 공진기의 특성

(C) 4 단자 여파기

세라믹 공진기가 공진과 반공진주파수를 모두

갖는다는 사실을 이용하여 공진기를 사다리형으로 연결하므로 아주 훌륭한 여파기가 제작된다. (그림 14) 기본 단위로써 그와같은 회로의 한 부분을 생각해 보자. 그 등가회로가 그림 15에 나타나 있다. 근사적으로  $R_1$ 과  $R_2$ 를 무시할수 있으면 직렬로 연결된 공진기의 공진주파수가 병렬로

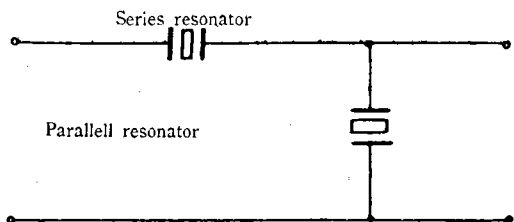


그림 14. 4단자 여파기의 기본소자

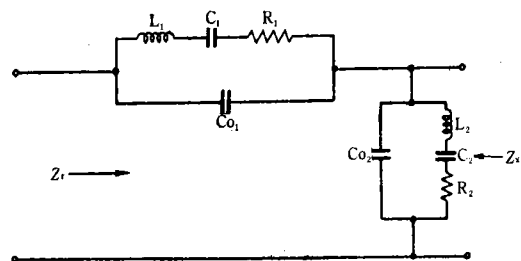


그림 15. 4단자 여파기의 등가회로

연결된 공진기의 반공진주파수와 같은 값을 갖는다. 이 경우 무한대 감쇄주파수  $f_{\infty 1}$ 과  $f_{\infty 2}$ , 그리고 상한 하한 차단주파수  $f_1, f_2$ 는 그림 16에 설명되어 있다. 그때 다음 관계가 성립한다.

$$C_{01} = \frac{1 - m_1^2}{2} C, \quad C_{02} = \frac{2}{m_2^2 - 1} C \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{Z_T Z_\pi}} \left[ \frac{1 + m_2^2}{1 + m_1^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$m_2^2 = \frac{f_{\infty 1}^2 - f_2^2}{f_{\infty 1}^2 - f_1^2}, \quad m_1 = \frac{f_2^2 - f_{\infty 2}^2}{f_1^2 - f_{\infty 2}^2}$$

$$C_1 = \frac{f_{\infty 1}^2 - f_0^2}{f_0^2} C_{01}, \quad C_2 = \frac{f_0^2 - f_{\infty 2}^2}{f_{\infty 2}^2}$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_1}, \quad L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_{\infty 2}^2 C_2}$$

따라서 이 경우 대역폭은 공진주파수와 반공진주파수의 차와 대략 비슷하고  $K$ 에 비례한다. 그러므로 석영의 경우와 비교하여 비교적 넓은 대역폭을 갖는 여파기를 만드는 것이 가능하다. 비록 감쇄량이 대역폭 비에 따라 변화되지만 구형

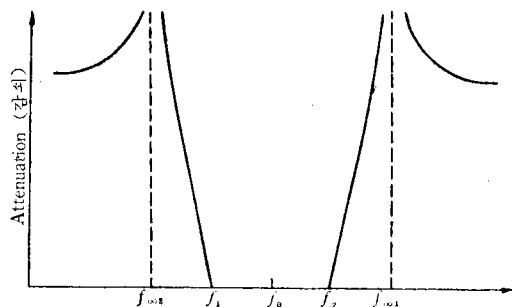


그림 16. 4단자 여파기의 특성

의 특성을 얻을 수 있으며 이것은 mesh의 수를 증가하므로써 얻어지고 이 경우 정지영역에서 감쇄가 증가한다. 대역폭은  $K$ 를 변화하므로써 조정할 수 있고 만약  $K$ 가 너무 작아질 경우 삽입 손실이 증가하게 되므로 이 요소가 대역폭을 좁게 하는 한계를 나타낸다. 세라믹의 역학적인  $Q$  값은 석영이나 기계적인 여파기에 비하면 그리 크지 않으므로 이것이 사용될 수 있는 기본공진기 소자의 최대개수를 제한하게 된다. 그림 17이 13개의 공진기로 만들어진 455KC의 여파기의 특성이다. 13개의 공진기중 7개는 직렬로 나머지 6개는 병렬로 연결되어 있다.

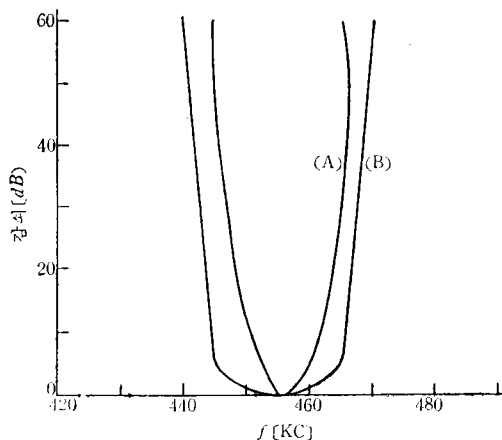


그림 17. 4단자 여파기의 특성

공진기는 평방형판으로 만들어 졌고 크기와 특성은 표 1에 표시되어 있다. 그림 17에서 곡선(A)는 10KC에서 임피던스가  $2K\Omega$  삽입손실이 약 6dB인 6-dB 대역폭을 갖고있다. 곡선(B)는 18KC에

표 1. 455-KC 휠타의 치수 및 특성

휠 타	공진기	치 수		K	Co (pF)
		면의 길이	두께		
A	직렬	0.44	0.12	0.20	147
	병렬	0.44	0.05	0.20	363
B	직렬	0.44	0.12	0.25	103
	병렬	0.44	0.05	0.25	374

표 2. 105-KC 휠타의 치수 및 특성

휠 타	공진기	치 수		K	Co (pF)
		면 길이	두께		
A	직렬	1.90	0.18	0.16	434
	병렬	1.90	0.08	0.16	3400
B	직렬	1.90	0.18	0.30	720
	병렬	1.90	0.08	0.30	3820

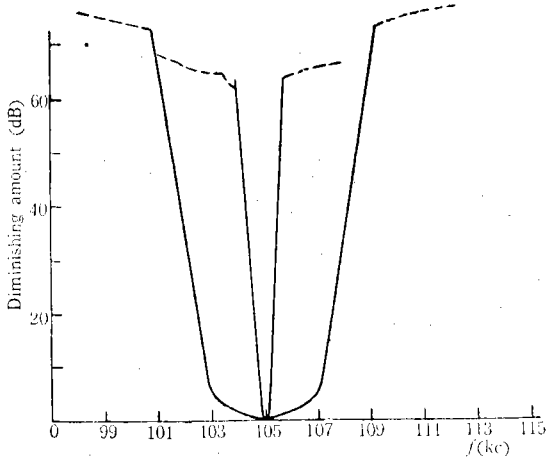


그림 18. 7요소로 된 Carrier filter의 특성

서 대역폭이 6dB이며 임피던스가 약 2KΩ 내부 손실이 약 2dB이다. 실험적으로는 4에서 20KC까지의 대역폭이 가능하다. 그림 18은 반송주파수를 위한 여파기의 특성을 보여주고 있다. 크기와 특성은 표2와 같다. 고주파 여파기의 경우 압전 세라믹의 크기는 작아지며 원형판의 구심방향에서 두번째로 높은 주파수가 사용된다. 이와같은 경우의 여파기 구조가 그림 19에 나타나 있다.

또한 79KC에서 삽입손실이 1.6dB이고 6-dB 대역폭을 갖는 4.3MC 여파기를 만드는 것이 가능하다.

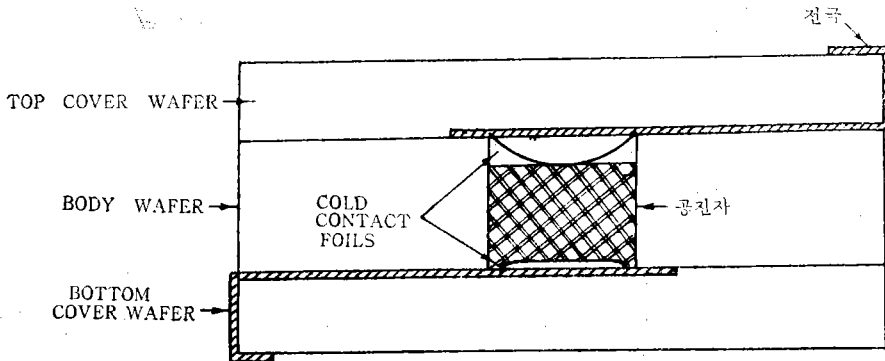
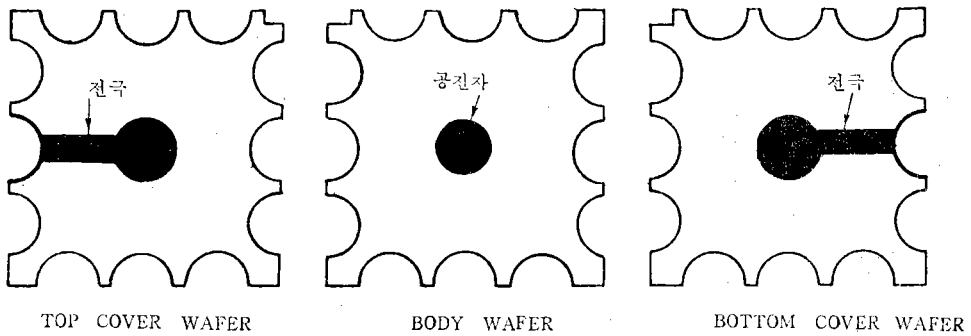


그림 19. 4.3-MC 압전세라믹 여파기 구조