

## 액체연료의 미립화 기술(3)

### Atomization Technology of Liquid Fuels

류 정 인  
J. I. Ryu



류 정 인  
 • 1945년 3월 22일생  
 • 기존연료 및 대체연료용 왕복형기관의 성능향상책 및 공해저감책  
 • 정회원, 충남대학교 기계공학과

## 2. 전기식 발진기

전기식 발진기는 매우 높은 주파수(10MHz이상)의 초음파 발진이 가능하고, 동작이 안정되며, 소형화가 가능하고 특히 회전부분이 없으며 기체나 액체의 흐름을 필요로 하지 않아 일반적으로 가장 많이 이용된다. 이 발진기에는 보통 전자관 발진기, 동전전자형 발진기 및 고주파 발진기 등이 있다.

이 전기식 발진을 각종 진동자에 의하여 초음파 진동으로 변환하여 매질중에 초음파를 발생시킨다.

### 2.1 전자관 발진기

이 발진기는 진공관으로부터 트랜지스터, IC, LSI에 진보한 기술에 의한 것이 이용되며 초음파를 중요 에너지 즉, 동력적으로 이용하는 목적의 경우와 중요 신호나 통신용으로 이용하는 목적의 경우로 나누어진다.

### 2.1.1 전자관 발진기

발진기는 아래와 같이 3가지 방식이 있고 사용하는 목적에 따라 선택하여 사용한다.

#### 1) 자여 발진방식

이 방식은 전력 진공관 1단만으로 직접 진동자를 구동하여 고주파 전력을 발진해서 공급하는 것으로서 회로가 간단하고, 부품도 적고 대전력 용으로서 경제적이거나 진동자의 주파수에 동조시키는 것이 불안정하고 능률도 떨어진다.

#### 2) 주발진 전력 증폭방식

이 방식은 발진기와 진동자 사이에 전력 증폭 회로를 1단만 설치해서 자여 발진방식의 결점을 보완한 것이다. 그림 22는 이 방식(master oscillation power amplifier)의 블록선도로서 (a)는 원리도, (b)는 실제도이다.

#### 3) 진동귀환 발진방식

이 방식은 앞의 MOPA방식을 더욱 개량한 것으로서 진동자의 진동상태를 전기적으로 검출해서 그것에 의해 발진기의 주파수나 출력을 제어하여 진동자가 항상 안정하게 진동할 수 있도록 고려된 것이다.

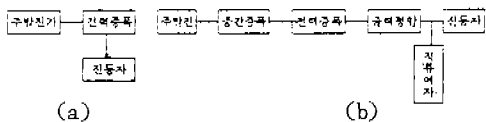


그림 22 MOPA방식의 블록선도

그림 23은 이 방식(motional feed back oscillation)의 발진회로 블록선도로서 (a)는 원리도, (b)는 실제도이다.

2) 전자관 발진기

이것은 초음파를 신호나 통신용으로서 이용하는 목적의 발진기이다. 일반적으로 광대역 발진기에 의해서 발진하고, 그것을 각종 진동자에게 음파로 변환해서 매질중에 음파를 발생시키는것등이 있다.

광대역 발진기는 실리콘 트랜지스터화시켜 소형 경량이고, 공진주파수는 10Hz~10MHz 범위가 많아 이용범위가 넓다. 그러나 동력용으로서 필요한 고출력을 얻기 어렵다. 그림 24는 광대역 발진기 블록선도를 나타낸다.

2.12 동전전자형 발진기

1) 동전형 발진기

이 원리는 다이내믹 스피커(dynamic speaker)에 유사하지만 다른것은 콘(cone)진동판 대신에 원주의 진동봉을 이용하여 음성코일(voice coil)에 직류전류를 흘리지 않고 전자유동에 의해 전류를 공급하는 점이다. 이방식은 그림 25에 블록선도를 나타낸다.

2) 전자형 발진기

전화기용 수화기에 사용되고 전기음향 변환기 구이다. 그림 26과 같이 영구자석으로 편기시킨 자기회로의 일부를 구성하는 자성 진동판이 진동할 때 간극길이가 변화하여 극편(pole piece) 중의 직류편기자장이 변화한다. 그것에 의해서 고정음성코일에 그 진동에 따른 기전력이 발생한다. 반대로 음성코일에 교류 전류를 통하면 간극내의 자속, 흡인력이 변화해서 진동판이 구동된다. 이것이 이 발진기의 원리이다.

3) 정전형 발진기

그림 27과 같이 직류편기전압을 고전압을 넣어 고정전극과 진동판(가동전극)에 걸어두고 진동판을 정현적으로 변위시킬때 양전극사이 정전용량의 변화에 따라 전기계에 전류를 발생한다. 역으로 양전극에 교류 전압을 주면 정전력이 변화하여 진동판이 진동한다. 이것이 이 발진기의 원리이다.

2.13 고주파 발진

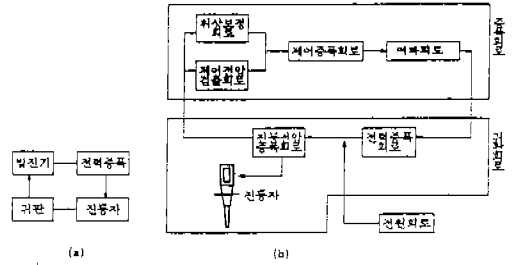


그림 23 MFO발진기 블록선도

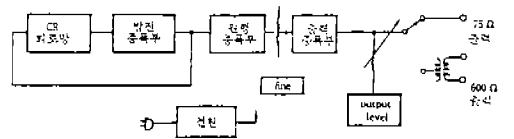


그림 24 광대역 발진기의 블록선도

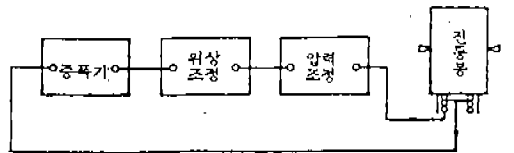


그림 25 자여 발진장치

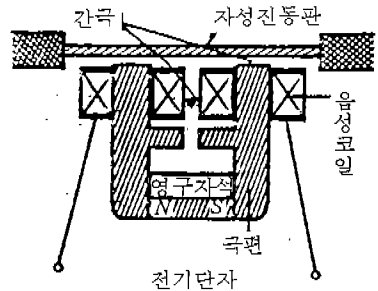


그림 26 전자형 변환기

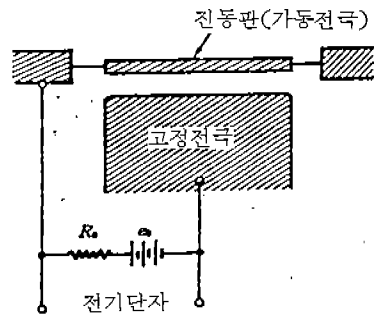


그림 27 정전형 변환기

이 방법은 전자판 발전기 대신에 고주파 전동 발전기에 전기진동을 발생시켜 진동자에 공급하는 방법이다.

### 3. 진폭 확대자(혼)

초음파 가공이나 초음파 소성가공동의 진동자 계는 그림 28과 같이 진동자의 한끝에 콘(cone, conical horn)을 뻗질, 또는 은납땜하여 이 콘선단에 여러형상의 혼(horn)을 볼트체결하고 더우기 혼선단에 공구를 뻗질, 또는 은납땜한다. 이 콘 또는 혼은 진동자 단면의 진폭을 확대하는 역할을 하는 것으로서 진폭의 분포경향을 나타낸다. 이 때문에 콘이나 혼을 진폭확대자, 속도 변환자(콘, 혼단면의 진동속도가 진동자 단면의 진동속도보다 크게된다)라고 부른다.

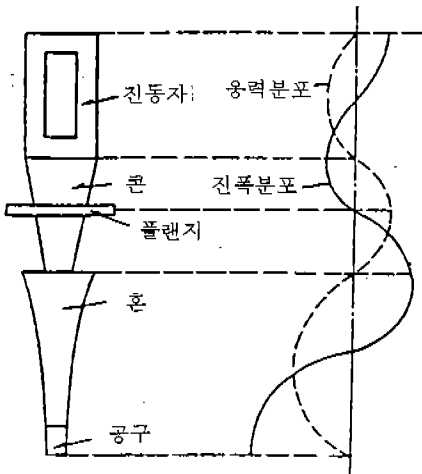


그림 28 진동자의 진동모드

혼의 형상으로는 여러 종류가 실용되고 있으나, 그림 29와 같이 기본적으로 스텝(step)형, 카테노이달(catenoidal)형, 익스포넨셜(exponential)형, 코니컬(conical)형의 4가지가 있다.

#### 3.1 진폭확대율과 혼의 형상

혼 양단면의 면적비가 동일하면 진폭확대율의 크기는 스텝형 > 카테노이달형 > 익스포넨셜형 > 코니컬형의 순서이다. 표 13은 진동자에 작용하는 전기입력, 콘 하단면의 직경등을 고려한 경험상의 혼 형상 선정법을 나타낸다.

#### 3.2 혼 재질 및 단면적의 결정법

표 13을 사용하여 혼 형상을 결정하면 다음으로 혼 재질을 결정하여야 한다. 이 재료로서 일반적으로 널리 이용되는 것은 연강이지만 이것을 스텝형 혼으로 채용할 경우 혼속에 발생하는 진동응력이 크면 피로 손실도 크게되어 피로파손할 염려가 있다. 또 진폭이 크게되면 어느 진폭값에서 내부손실이 급격하게 증대해서 재료의 파괴를 일으킨다. 스텝형혼 등에서는 보통 연강대신에 Ni-Cr강을 이용한다. 이외에 공구강, 스테인레스강, 황동, 티탄합금 등이 사용된다.

혼 상단면의 단면적은 종합 진폭확대비(콘부의 진폭확대비와 혼부의 진폭확대비의 곱)로도 결정된다. 이 종합 진폭확대비는 혼의 내부손실이나 피로한계등에 의해 경험적으로 최대 약 20~30으로 놓는다.

각종형상의 혼 설계시 사용할 중요기호를 아래 열거하면

- $S_1$  : 혼의 대단면적,  $cm^2$
- $S_2$  : 혼의 소단면적,  $cm^2$
- $S_x$  : 혼의 대단면적에서  $x$ 만큼 떨어진 위치의 단면적,  $cm^2$
- $D_1$  : 혼의 대단부직경,  $cm$
- $D_2$  : 혼의 소단부직경,  $cm$
- $D_x$  : 혼의 대단면에서  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 직경,  $cm$
- $\rho$  : 혼 재료의 밀도,  $g/cm^3$
- $c$  : 혼 재료중의 음속도,  $cm/s$
- $f$  : 혼의 공진주파수,  $1/s$

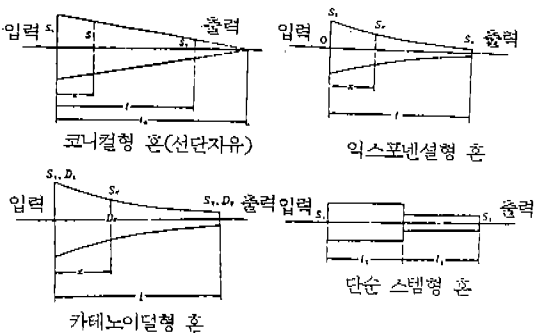


그림 29 각종형상의 혼

표 13 혼 형상의 선정표

진동 자입 력 W	혼 단면 경 mm	가공물 두께mm	가공물 직경mm															
			1	2	3	5	8	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	
50 }	15	0.5	C.E	E	E	E	E	E	E	E	S	S	S					
		1.0	C.E	E	E	S	S	S	S	S	S	S	S					
		5.0	C.E	E	E.S	S	S	S	S	S	S	S	S					
		0.5以上	C.E	E	E.S	S	S											
100 }	20	0.5	C.E	E	E	E	E	E	E	E	S	S	S	S				
		1.0	C.E	E	E	E	E	E	S	S	S	S	S	S				
		5.0	C.E	E	E	E.S	S	S	S	S	S	S	S	S				
		0.5以上	C.E	E	E	E.S	S	S										
500	25	0.5	C	C	C	E	E	E	E	E	S	S	S	S				
		1.0	C	C	C	E	E	E	E	S	S	S	S	S	S			
		5.0	C	C	C	E.S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			
		0.5以上	C	C	C	E.S	S	S	S	S	S	S						
500 }	35	0.5	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	S	S	S	S	
		1.0	C	C	C	C	E	E	E	E	E	S	S	S	S	S	S	
		5.0	C	C	C	C	E	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
		0.5以上	C	C	C	C	S	S	S	S	S	S						
1000	50	0.5	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	E	E	S	S	
		1.0	C	C	C	C	C	E	E	E	E	E	E	S	S	S	S	
		5.0	C	C	C	C	C	E	E	S	S	S	S	S	S	S	S	
		0.5以上	C	C	C	C	C	S	S	S	S	S	S	S	S			

C: 코니컬 형                    주: 1. 진동자입력은 보통 사용되는 범위를 나타낸다.  
 E: 익스포넨셜형            2. 가공물 두께의 실용도는 보통 10~25mm이다.  
 S: 스텝형

표 14 여러가지 혼재료의 밀도와 음속

재	료	밀도 $\rho(g/cm^3)$	음속도 $c(\times 10^6 cm/s)$
연	강	7.8	5.2
니	켈 - 크 롬 강	7.8	5.1
18-8	스 텐 레 스 강	8.0	5.0
황	동	8.5	3.4
	동	8.9	3.7
모	넬	8.84	4.6
티	탄	4.54	4.85
알	루 미 늬	2.7	5.2

- $\omega$ : 공진각 주파수 =  $2\pi f$ , 1/s
- $a$ : 파장정수 =  $\omega/c$ , 1/cm
- $l$ : 반파장 공진하는 horn의 길이, cm
- $u_1$ : 혼 대단면의 진폭, cm
- $u_2$ : 혼 소단면의 진폭, cm
- $u_x$ : 혼 대단면의  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 진폭, cm
- $M$ : 진폭 확대율

#### 4. 혼의 설계

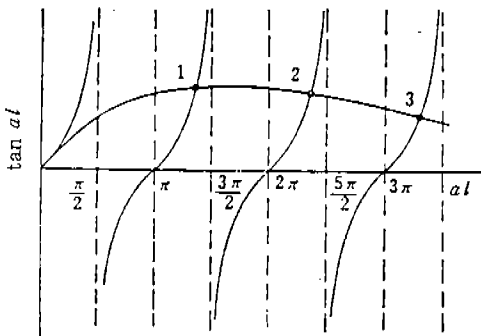
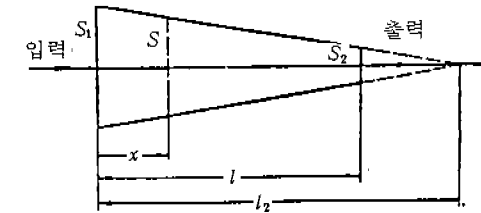
##### 4.1 코니컬(conical)형 혼

###### 4.1.1 코니컬형 혼의 이론 방정식

코니컬형 혼은 단면이 불균일한 긴봉이므로 2축방향에 신축하는 종진동에 대하여 생각해 보자. 왼쪽 그림에서 대단면으로 부터 거리  $X$ 되는 점의 단면적을  $S$ , 봉의 영율을  $E$ 라고 하면 운동방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\rho s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left( s \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

여기에서  $\rho$ 는 봉의 밀도,  $u$ 는 변위,  $t$ 는 시간이다.



왼쪽 그림에서 봉의 단면적이 일정한 균일봉의 경우는 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{단, } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ 로서 } c \text{는 봉속을}$$

전파하는 음속도이다.

윗 식에서 봉의 단면치수가 파장에 비해서 매우 작고 종진동이 주로 고려되는 경우에는 봉의 중심축에  $x$ 를 놓으면  $S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)$ 로 된다.

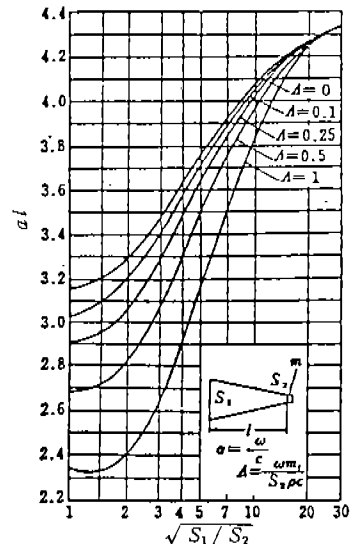
여기에서  $S_x$ 는 봉의 단면에서  $x$ 되는 점의 단면적,  $u_x$ 는 그 단면에서의 진동변위,  $c$ 는 봉의 재료중에서의 음속도,  $t$ 는 시간이다.

왼쪽 그림과 같은 코니컬형 혼의 종진동은 경계조건으로서  $x=0$  및  $l$ 에서 변위구배가 0으로 되므로  $x=0$  및  $l$ 에서  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ 을 이용하여 그 공진조건식은 다음과 같다.

$$\tan \alpha l = \frac{\omega l (D_1 - D_2)^2}{c^2 (D_1 - D_2)^2 + \omega^2 l^2 D_1 D_2}$$

###### 4.1.2 혼 설계 예

단면 원형의 연강제 코니컬형 혼에서 대단면 직경은 15mm, 소단면 직경을 5mm로서 20KHz에서 공진하는 혼의 길이  $l$ 을 구해보면  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{15}{3} = 3$  공수가 매달리지 않았으므로  $A=0$ 이고 표 15에서  $\alpha l = 3.48$ 이므로



$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 20 \times 10^3 = 1.25 \times 10^5 \left(\frac{1}{S}\right)$$

$$C = 5.2 \times 10^5 \text{Cm/sec} \quad \alpha = \omega c = 0.2417 (1/\text{cm})$$

$$\therefore \ell = 3.48 / 0.2417 = 14.40 \text{cm}$$

#### 4.2 익스포넨셜형(exponential type) 혼

##### 4.2.1 익스포넨셜형의 이론 방정식

단면적이 지수함수적으로 변화하는 혼을 일반적으로 익스포넨셜형 혼이라고 부르며 이와같은 혼의 종류는 그림 30과 같다.

그림 31과 같은 혼에서 혼의 대단면적을  $S_1$ , 소단면적을  $S_2$ 라 하고, 대단면에서 거리  $x$ 의 단면적을  $S_x$ 라 하면, 혼의 형상은 일반적으로  $S_x = S_1 e^{\alpha x}$ 로 나타낸다.

이 때에도 코니컬 형 혼의 계산에서와 같이 경계조건  $x=0$ 에서  $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$ ,  $x=l$ 에서  $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$ 을 이용하면 익스포넨셜 혼의 공진조건으로서  $l n = n \frac{c}{2fn} \sqrt{1 + \tan^2 \phi_n}$ 을 얻는다.

단,  $\tan \phi_n = \frac{1}{2n\pi} \log e \left(\frac{S_2}{S_1}\right) = \frac{rln}{2\pi n}$  이므로 아래첨자  $n$ 은 제  $n$ 차 공진을 나타낸다. 강력 초음파발생용 혼으로서는 보통 제1차공진(반파장공진)을 이용하므로, 이때에는 일반적으로

$$l = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \tan^2 \phi} = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{4\pi^2 + r^2}$$

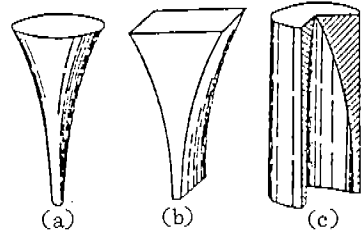
또는  $l = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{4\pi^2 + [\log e(S_2/S_1)]^2}$ 로 되어

$$\tan \phi = \frac{1}{2\pi} \log e(S_2/S_1) = \frac{rl}{2\pi}$$

여기에서  $S_1, S_2, f$ 가 주어지면 혼의 길이와 임의의 단면적을 구할 수 있다. 대단면에서 진동 진폭을  $u_1$ 이라 하면 대단면에서  $x$ 되는 위치에서의 진폭  $u_x$ 는

$$u_x = u_1 \left( \cos \frac{\omega x}{c'} + \frac{rc'}{2\omega} \sin \frac{\omega x}{c'} \right) e^{-\frac{\alpha x}{2}}$$

여기서  $c' = 2/f$ 이므로 익스포넨셜 혼중에서 음속도는 다음과 같이 구할 수 있다.



- (a) 원통외형 익스포넨셜
- (b) 췌기형
- (c) 원통내형 익스포넨셜

그림 30 익스포넨셜 혼의 종류

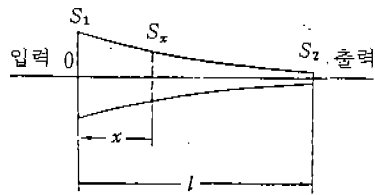


그림 31 익스포넨셜형 혼

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{rc}{2\omega}\right)^2}}$$

이 식에서 익스포넨셜중에서 음속도  $c'$ 는 단면이 일정한 봉의 음속도  $c$ 보다 매우 크게 된다. 또  $|\frac{rc}{2\omega}| < 1$ 이어야 하므로  $|r| < \frac{2\omega}{c}$  일때 반파장 공진하는 혼의 설계가 가능하다.

##### 4.2.2 혼 설계 예

단면원형의 익스포넨셜형 혼에서 대단면 직경  $D_1 = 30\text{mm}$ ,  $D_2 = 6\text{mm}$ , 공진주파수 20KHz의 경우, 혼 길이를 구하고 윤곽곡선의 치수를 결정하자. 혼 재질은 Ni-Cr강으로 한다.

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{6^2}{30^2} = \frac{1}{25}, \quad \left(\log e \frac{S_2}{S_1}\right)^2 = 10.3612$$

$$l = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{4\pi^2 + \left[\log e \left(\frac{S_2}{S_1}\right)\right]^2} = \frac{5.1 \times 10^5}{4\pi \times 2 \times 10^4} \sqrt{(4\pi^2 + 10.3612)}$$

=14.326cm

$$r = \frac{1}{l} \log_e \frac{S_2}{S_1}$$

$$= \frac{-3.2189}{14.326} = -0.2247$$

이 경우, 단면 원형이므로  $D = D_0 e^{\frac{1}{2}rx}$  로 되어 표16과 같이 계산에 의해  $x$ 와 18D의 치수관계가 구해져 그림 32와 같은 혼이 설계된다.

표 16 익스포넨셜 혼 계산에

$x$ cm	$\frac{1}{2}rx$	$e^{\frac{1}{2}rx}$	$D_x$ cm
0	0	1.00000	3.000
1	-0.1124	0.89368	2.681
2	-0.2247	0.79876	2.396
3	-0.3371	0.71391	2.142
4	-0.4494	0.63801	1.914
5	-0.5618	0.57024	1.710
6	-0.6741	0.50946	1.528
7	-0.7865	0.45547	1.366
8	-0.8988	0.40702	1.221
9	-1.0112	0.36381	1.091
10	-1.1235	0.32564	0.975
11	-1.2356	0.29066	0.872
12	-1.3482	0.25971	0.779
13	-1.4606	0.23212	0.696
14	-1.5729	0.20744	0.622
14.33	-1.6095	0.20010	0.600

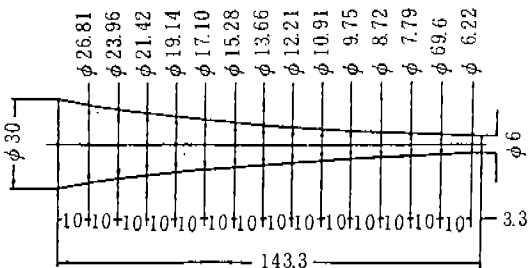


그림 32 익스포넨셜 혼 설계

### 4.3 카테노이덜(Catenoidal)형 혼

#### 4.3.1 카테노이덜형 혼의 이론 방정식

이 형상의 혼은 그 제작이 어려우므로 실용화 되지 않으나 익스포넨셜형에 비해서 진폭확대율이 크므로 경우에 따라서는 익스포넨셜형보다 유리하다.

윤곽곡선이 카테노이덜형으로 되어있는 혼은 익스포넨셜형과 유사하나 형상은 그림31과 같다. 이것의 종진동 운동방정식은 타형상의 혼일때와 똑같다. 입력단 및 출력단의 면적을  $S_1, S_2$ 라 하고 입력단에서  $x$ 되는 거리의 단면적을  $S_x$  전체길이를  $l$ 이라하면 기본과 진동을 하는 혼의조건식은 다음과 같다.

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{\alpha}\right)^2} \alpha l \tan \sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{\alpha}\right)^2} \alpha l$$

$$= -\sqrt{1 - \frac{S_2}{S_1}} \cosh^{-1} \sqrt{\frac{S_2}{S_1}}$$

단,  $\alpha = \omega/c$  ( $\omega = 2\pi f$ : 각진동수,  $c$ : 혼 재료중 음속도)이고 카테노이덜 곡선은 다음식으로 나타낸다.

$$S_x = S_2 \cosh^2 \eta(l-x)$$

단면원형의 경우는 직경  $D_x, D_2$ 를 이용하여

$D_x = D_2 \cosh \eta(l-x)$ 로 한다.

$$\eta = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \frac{D_1}{D_2} = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \text{ 인}$$

관계가 성립한다.

윗 식을 풀어  $\frac{S_1}{S_2}$  값에 대한  $\alpha l$ 을 구하여 표와 그림으로 나타내면 표17과 그림 33으로 나타낸다.

카테노이덜형 혼의 설계에서 대단면과 소단면의 면적  $S_1$  및  $S_2$ 가 주어지면, 그림 33에서  $\alpha l$ 이 구해지고 이것에서 혼의 길이  $l$ 이 결정된다. 이  $l$ 을 이용하여 카테노이덜곡선의  $\eta$ 가 구해지고

표 17 카테노이달형 혼의  $\alpha l$  값

$\sqrt{S_1/S_2}$	$\text{arc cosh } \sqrt{S_1/S_2}$	$\alpha l$
1.2	0.62236	3.111
1.5	0.96242	3.055
2.0	1.31696	3.047
2.5	1.56680	3.073
3.0	1.76275	3.114
3.5	1.92485	3.161
4.0	2.06344	3.210
4.5	2.18464	3.260
5.0	2.29243	3.309
6.0	2.47789	3.403
7.0	2.63392	3.492
8.0	2.76866	3.573
9.0	2.88727	3.649
10.0	2.99322	3.720

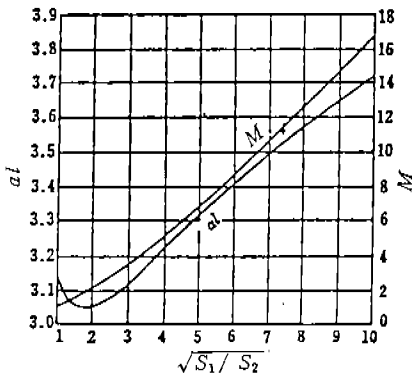


그림 33 카테노이달형 혼의  $\alpha l$  및  $M$  값

혼의 치수가 계산된다.

4.3.2 혼 설계 예

단면 원형인 카테노이달형 혼에서 입력단 직경은 40mm, 출력단 직경은 5mm로 한경우의 혼 길이가  $l$ , 진폭 확대율  $M$ , 진동절면의 위치  $X_N$ 을 구하고 혼을 설계하자.

단, 혼의 공진주파수는 20KHz이고 재료는 Ni-Cr강을 사용한다.

$$\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{40}{5} = 8 \quad \text{표 17에서 } \alpha l = 3.573 \text{ 이므로}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \times 2 \times 10^4}{5.1 \times 10^8} = 0.2464 \text{ 1/cm}$$

$$\therefore l = \frac{3.573}{0.2464} = 14.40 \text{ cm}$$

$$\eta = \frac{1}{l} \text{cosh}^{-1} \frac{D_1}{D_2} = \frac{2.76866}{14.40} = 0.19094 \text{ 1/cm}$$

입력단에서  $x$ 되는 위치의 직경  $D_x$ 는 표 18과 같이 구하고 이것에서 그림 34와 같이 혼 설계가 된다. 진폭 확대율은 표 19에서  $M=12.6$ 으로 되고 진동절면의 위치  $x_N$ 은 표 17에 의해  $\alpha x_N=0.870$   $\therefore x_N=3.53 \text{ cm}$ 로 된다.

4.4 스텝(step)형 혼

4.4.1 스텝형 혼의 이론방정식

강력 초음파 응용에서는 그림 35와 같은 스텝형 혼이 널리 사용된다. 이 혼의 장점은 그림과 같은 단순 스텝형의 경우, 진폭확대율이 대단면과 소단면의 면적비로 되어 선단에서 매우 큰 진폭이 얻어진다. 단, 스텝부에서의 면적비가 크게 되면 설계계산의 전제로 하는 응력 연속가정이 성립되고 공진주파수가 설계된 값보다 크지 않아야 실용화 될 수 있다. 일반적으로 스텝부에 알맞은 곡률을 두거나 스텝부를 익스포넨셜 곡선으로 만든다.

그림에서  $l_1=l_2=\lambda/4$  ( $\lambda$ : 파장)로 하면 양단에서 진폭은 최대, 스텝부에서 진폭이 0으로 된다. 이때 진폭 확대율  $M$ 은  $M=S_1/S_2$ 로 양단의 면적비로 되어, 단면이 원형의 혼이면 양단면의 직경의 2승으로 된다.

그림 36은 반파장 공진하는 혼으로서  $l_1$ 의 길이를 변화시킨 경우의 진폭확대율을 나타낸 것으로서  $l_1$ 이  $\lambda/4$ 에 같을 때,  $M$ 은 최대가 된다.

입력측 직선부( $l_1$ 의 부분)와 출력측 직선부( $l_2$ 의 부분)의 재질이 다른것을 사용하면 그 진폭 확대율은 입력단 및 출력단에서 기계 임피던스의 비에 같게 되므로

$$M = \frac{\rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2} = \frac{E_2 c_1 S_2}{E_1 c_2 S_1} \text{ 로 된다.}$$



여기서  $E_1, E_2$ 는 입력측 및 출력측 재료의 영율이다. 위 식에서 양측 직선부의 재질을 적당히 선택하면, 동일 재질의 경우에 비해서 진폭확대율이 크게 된다. 즉  $Al$ , 황동, 동, 강,  $Ni$ 의  $\rho c$ 는 각각 141, 2.89, 3.29, 4.06,  $4.25(10^9 g/cm^2 s)$ 이므로, 출력측 직선부에  $Al$ 을, 입력측 직선부에 타금속을 사용하면 양측이  $Al$ 의 경우에 비해 진폭비는 황동의 2.05배, 동의 2.33배, 강의 2.88배, 니켈의 3.01배가 된다.

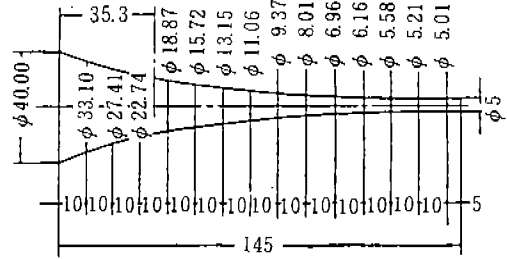


그림 34 카테노이덜형 혼의 설계예

그림 37은  $l_1=l_2$ 되는 경우 고유 진동수  $f$ 와  $l_1$ 의 관계를 여러 음속도에 대하여 나타낸 것이다.

표 18 카테노이덜형 혼의 설계

$x \text{ cm}$	$l-x \text{ cm}$	$\eta(l-x)$	$\cosh \eta(l-x)$	$D_x \text{ cm}$
0	14.50	2.7686	8.000	4.000
1	13.50	2.5777	6.620	3.310
2	12.50	2.3868	5.482	2.741
3	11.50	2.1958	4.548	2.274
4	10.50	2.0049	3.774	1.887
5	9.50	1.8139	3.144	1.572
6	8.50	1.6230	2.630	1.315
7	7.50	1.4321	2.212	1.106
8	6.50	1.2411	1.874	0.937
9	5.50	1.0502	1.603	0.802
10	4.50	0.8592	1.392	0.696
11	3.50	0.6683	1.231	0.616
12	2.50	0.4774	1.116	0.558
13	1.50	0.2864	1.041	0.521
14	0.50	0.0955	1.002	0.501
14.50	0	0	1.000	0.500

표 19 카테노이덜형 혼의 진폭확대율 M

$\sqrt{S_1/S_2}$	$\frac{\eta}{\alpha}$	$M$	$\sqrt{S_1/S_2}$	$\frac{\eta}{\alpha}$	$M$
1.2	0.2000	1.21	4.5	0.6701	6.00
1.5	0.3151	1.54	5.0	0.6928	6.89
2.0	0.4322	2.17	6.0	0.7215	8.51
2.5	0.5098	2.85	7.0	0.7544	10.64
3.0	0.5661	3.58	8.0	0.7748	12.60
3.5	0.6089	4.34	9.0	0.7912	14.68
4.0	0.6428	5.16	10.0	0.8046	16.78

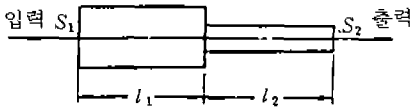


그림 35 단순 스텝형 혼

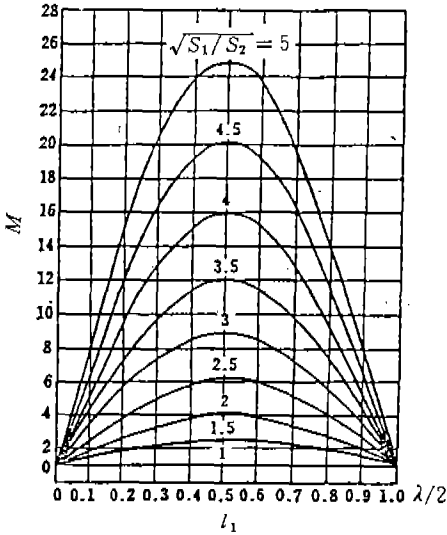


그림 36 단순 스텝형 혼의 치수와 진폭 확대율 M

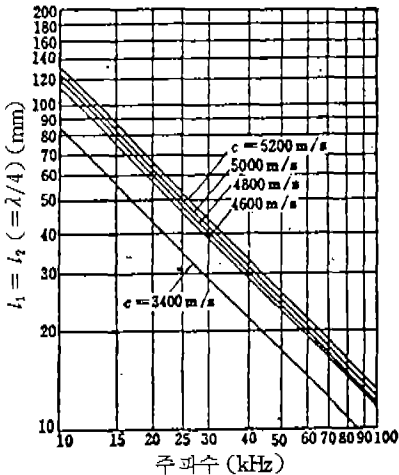


그림 37 단순스텝형 혼의 치수와 공진 주파수

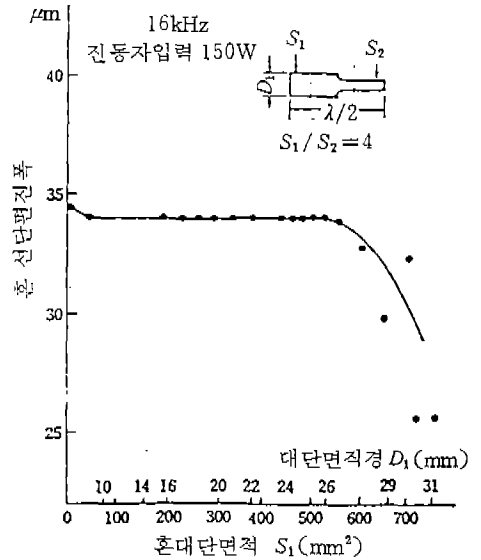


그림 38 스텝형상 혼에서 대단면적과 혼 선단의 진폭(면적비  $S_2/S_1=4$ )

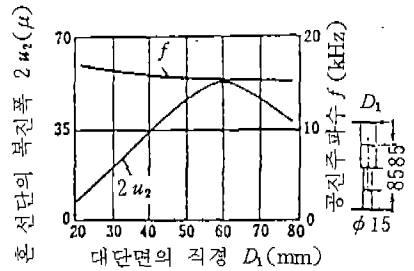


그림 39 스텝형 혼의 대단면 직경  $D_1$ 을 바꾸는 경우, 혼 선단의 복진폭  $2u_2$ 와 공진 주파수

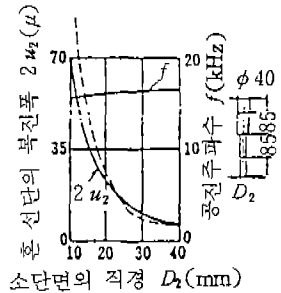


그림 40 스텝형 혼의 소단면 직경  $D_2$ 의 치수를 바꾸는 경우, 혼의 선단의 복진폭  $2u_2$ 와 공진주파수

4.4.2 혼 설계 예

스텝형 혼의 양단 직경비는 실용적으로는 5 : 1 정도로 제한한다. 또 이 경우 혼 대단면의 면적에도 실용적인 크기의 한계가 있다. 그림 38은 16KHz, 150W 출력의 초음파 가공기에서  $S_2/S_1$ 을 4로, 혼 대단면 면적  $S_2$ 를 증대시킬때 혼 소단면에서 편진폭을 측정 한 것이다. 그림에서 대단면의 면적이 약  $550\text{mm}^2$ , 원형의 경우 직경  $D_1$ 이 약 26mm까지는 진폭이 거의 일정하나, 직경 31mm로 되면 급격히 진폭이 작게 된다. 이와 같은 혼 단면적은 진동자의 치수나 발전기 출력에 의해서 바뀌나 실제 한계값이 있다.

그림 39는 스텝부 치수  $l_1=l_2=85\text{mm}$ 로서 소단면 직경을 15mm로 한 경우, 대단면 직경을 20~80mm로 바꾸고 혼 선단의 복진폭과 공진 주파수를 측정 한 것이다. 이 결과 대단면 직경이 60mm까지는 거의 직경에 비례해서 진폭은 증대한다. 60mm이상에서는 양단면적비가 크게 되지 않으므로 진폭은 감소한다. 그림에서 공진 주파수는 크게 변동하지 않는다. 또 이 경우 대단면 직경  $D_1$ 이  $\lambda/2$ 이하로 되면 중진동을 논할수가 없다.

그림 40은 대단면의 직경을 40mm로 하고 소단면 직경  $D_2$ 를 10~40mm로 바꾼 경우, 소단면의 진폭 및 혼 공진 주파수를 측정 한 것이다. 이때  $D_2$ 가 작게 되면 진폭의 거리  $(D_1/D_2)^2$ 에 비례해서 증대하여 거의 이론값과 일치한다.

그림 41은  $l_2=85\text{mm}$ 로 일정하고 대단면 직경 및 소단면 직경을 제각기 40mm 및 12mm로 할때  $l_1$ 의 길이를 바꾸어 혼 선단의 진폭 및 혼의 공진 주파수를 측정 한 것이다.  $l_1$ 이 70~80mm에서는 진폭이 비슷하다.

그림 42는  $l_2$ 부의 치수를 바꿀때 진폭과 공진 주파수의 그림으로서  $l_2$ 의 상위에 의한 진폭과 공진 주파수의 변동은 매우 차이가 난다. 소위 혼 설계에 있어서  $l_1$ 의 치수보다  $l_2$ 의 치수에 신경을 써야 한다.

입력측 직선부의 길이  $l_1 = \frac{\lambda}{4}$ 로 한 단순 스텝형 혼에서  $D_1=50\text{mm}$ 인 혼을 설계하자. 공진 주파수는 20KHz이고 혼 재질은 Ni-Cr강이다.

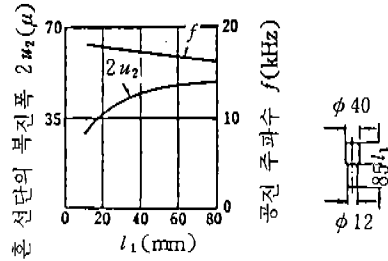


그림 41 스텝형 혼의  $l_2$ 의 길이를 바꾼 경우, 혼 선단의 복진폭  $2u_2$ 와 공진 주파수

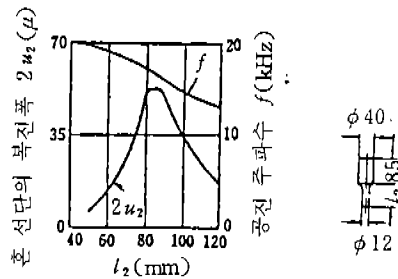


그림 42 스텝형 혼의  $l_2$ 의 길이를 바꾼 경우, 혼 선단의 복진폭  $2u_2$ 와 공진 주파수

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5.1 \times 10^5}{2 \times 10^4} = 25.5\text{cm}$$

$$l_1 = \frac{\lambda}{4} = 6.28\text{cm}$$

5. 초음파 진동 특성인자 측정

5.1 주파수 측정

옛날부터 주파수 측정법으로서는 포닉미터 (phonic meter), 진동철원형 주파수계, 주파수 브리지등이 개발되었다. 최근에는 고정도의 원자시계나 수정 발전기, 1000MHz까지 셀수있는 전자 카운터(counter)까지 나오고 있다.

5.1.1 수정 발전기

이것은 항온조에 넣은 공진 주파수가 매우 안정된 수정 발전자를 사용한 것으로서 주파수나 시간의 표준기로서, 전자 카운터, 신호 발생기등에 널리 사용되고 있다.

5.1.2 전자 카운터

전자 카운터는 주파수  $f(\text{Hz})$ , 주기  $T(\text{s})$ 를 내장된 시간 표준기를 사용하여 직접계수하여 측정하는 장치이다. 그림 43은 그 원리도이고  $T$ 시간마다 펄스(pulse)  $N$ 을 지나는 게이트(gate)회로와 펄스  $N$ 을 계수하여 표시하는 계수기로 구성되어 있다.

시간 카운터에는 유니버설 카운터외에 주파수 카운터, 타임 카운터 등이 있다. 게이트 시간  $T_s$ 를 정확히 정하고 그 사이에 게이트를 통과하는 측정신호의 파수  $N$ 을 측정하여 주파수  $f$ 를 구한다. ( $f=N/T_s$ ) 게이트 시간  $T_s$ 는 내장된 기준 주파수(예,  $1\text{MHz}$ )로 만들어 0.01, 0.1, 1, 10초 등으로 선택한다.

계수 가능한 주파수 범위는 기준 게이트 시간  $T_s$ (저주파측) 및 계수기의분해능(고주파측)에 따라 결정되며, 수십 Hz로부터 최고 1000MHz까지 시판되고 있다.

5.1.3 공진 주파수 구하는 방법

1) 공진 주파수

초음파를 이용할때에 한가지 주파수만을 발생시키는 경우가 많으므로 공진을 이용한 주파수를 얻어야 한다.

진동자는 예리한 진동을 하므로 공진점 부근에서 임피던스의 변화가 커서 약간의 주파수 변화나 출력의 변화에도 전압이나 전류의 변화가 크게 된다.

따라서 진동자의 공진 주파수  $f_0$ 를 정확하게 구하는 방법에는 몇가지가 이용되나, 일반적으로, 자왜 진동자에서는 임피던스 루프(impedance loop)이나 임피던스 브리지법(impedance bridge)에 의하고, 전왜나 압전 진동자에서는 어드미턴스 루프(admittance loop)법에 의한다. 그러나 이것은 어려우므로 실제 현장에서는 신뢰할수 있는

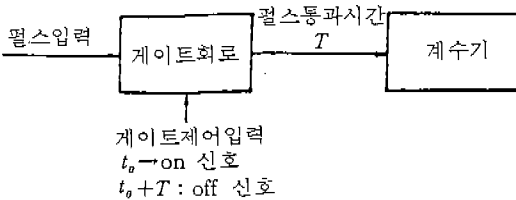


그림 43 카운터 원리도

전압회로나 전류회로법에 의해서 공진 주파수를 측정하는 경우가 많다.

2) 임피던스와 어드미턴스

자유 임피던스(free impedance)  $Z_f$ 와 자유 어드미턴스(free admittance)  $Y_f$ 가 진동자를 매질중에서 자유롭게 진동하는 상태로 놓고 각각의 전기단자(자왜진동자에서는 권선의 양단, 전왜 및 압전진동자에서는 양전극사이)에서 측정한 것을 임피던스 또는 어드미턴스(임피던스의 역수)  $Y_d$ 라 부른다.

진동하는 것에 따라 일어나는 경우를 각각 동 임피던스(motional impedance)  $Z_m$  및 동 어드미턴스(motional admittance)  $Y_m$ 이라 부르고, 다음 관계식이 성립한다.

$$Z_f = Z_d + Z_m \quad Y_f = Y_d + Y_m$$

$$= R_f + i \times f \quad = G_f + i B j$$

$$Z_d = R_d + i \times d, \quad Y_d = G_d + i B d$$

$$Z_m = R_m + i \times m, \quad Y_m = G_m + i B m$$

$Y_d$  또는  $Z_d$ 는 제각기 복소수평면에서 그림 44와 같이 주파수에 거의 비례해서 단조롭게 증가하나  $Z_m$  또는  $Y_m$ 은 그림 45와 같이 복소수 평면에서 진원의 궤적을 그린다. 이 원의 크기가 큰만큼 진동의  $Q$ 가 높은것을 나타내고 또 공기와 물속에서 원의 직경비가 큰만큼 초음파가 수중에서 효과적으로 방사된다.

3) 임피던스 루프법

자왜 진동자의 경우, 진동자의 발진 주파수를 바꾸어 진동시키면서 자유 임피던스를 측정하면 그림 46과 같은 자유 임피던스 루프가 복소수 평면에 그려진다.

진동자 권선의 임피던스 및 실효저항에 의해 단자사이에 전압  $E_0$ 가 된다. 진동자는 진동에 의해 권선의 진동속도에 비례한 역기전력이 유기된다. 이것이 빌라리 효과(Villari effect)라고 부른다.

진동자 단자사이의 전압  $E$ 는 진동전압(motio-

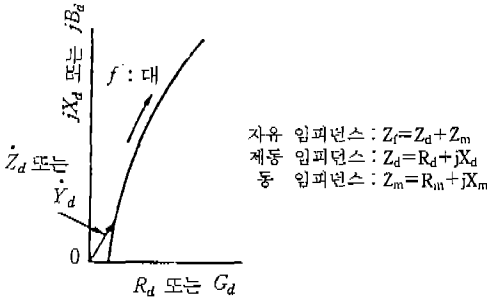


그림 44 제동 임피던스 또는 제동 어드미턴스 변화

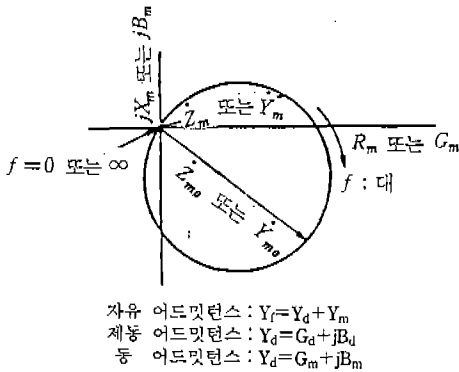


그림 45 동 임피던스 또는 동 어드미턴스 변화

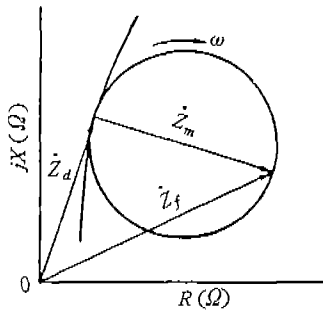


그림 46 진동자의 자유 임피던스의 주파수 궤적

nal voltage)를  $E_1$ 이라 하면  $E = E_0 + E_1$ 으로 되고 주파수 특성이 임피던스 변화로 나타난다. 자유 임피던스  $Z_f$ 는 권선을 흐르는 교반전류를  $i$ 라고 하면 다음식으로 된다.

$$Z_f = (E_0 + E_1) / i$$

$$= Z_d + Z_m$$

$$= R + ix$$

여기서,  $Z_d$ 는 진동자가 진동하지 않는때의 제어 임피던스이고,  $Z_m$ 은 진동자의 진동에 의해 생긴 동 임피던스이다.

이 임피던스를 그림 46에 구한 것에는 원점 0에서 원으로 그은 점선의 길이(vector)가  $Z_d$ 이고 그 점점을 통하는 직경(vector)이  $Z_m$ 이므로 합성벡터가  $Z$ 로  $Z_d$ 와  $Z_m$ 의 합이다.

그림 47은 20KHz의 혼 부착 NA형 자왜 진동자를 측정 한 자유임피던스의 곡선이다. 진동자의 두께 0.125mm의 Ni판 240매를 아탈다이트 수지로 접착한 단면적  $30 \times 32\text{mm}^2$ 에 연강재 반파장 공진 지수함수혼(큰단면  $\phi 32\text{mm}$ , 작은단면  $\phi 5.2\text{mm}$ )을 접합한 진동자이다.

복소수 평면위에 주파수에 거의 비례해서 단조롭게 증가하는 곡선이  $Z_d$ 의 궤적을 나타내며 이 곡선과 자유 임피던스 루프의 점점을 통한 직경이  $Z_m$ 이므로 원점 0과 그 직경 끝을 이은 직선 즉, 벡터가  $Z$ 이고 그때의 주파수가 구하는 공진 주파수  $f_r$ 은 20.13KHz이다.

#### 4) 어드미턴스 루프법

이 방법에 의해  $f_r$ 을 구한 예로서 그림 48에 나타낸다. 이것은 외면을 기포가 들어는 고무로 씌운 환상 전왜 진동자의 자유 어드미턴스를 공기중에서 측정 한 경우와 속에 기름을 넣어 물속에서 측정 한 경우의 어드미턴스 루프도이다.

$Y_d$ 는 복소수 평면에 주파수에 거의 비례해서 단조롭게 증가( $B$ 축에 거의 평행)하는 곡선, 공기중의 자유 어드미턴스 루프가 큰 원, 수중에서는 작은 원으로 나타난다. 큰 원의 공기중에서  $f_r = 23.26\text{KHz}$ , 물속의 작은 원에서  $f_r = 23.5\text{KHz}$ 가 얻어진다.

그림과 같이 공기중과 물속의 원 직경비가 크므로 이 경우는 초음파가 물속에서 효과적인 방사가 일어나는 것을 나타낸다.

#### 5) 정전압 회로법

고유주파수를 간단하게 구하는 실용법으로서 정전압 회로법과 정전류 회로법이 있다. 정전압

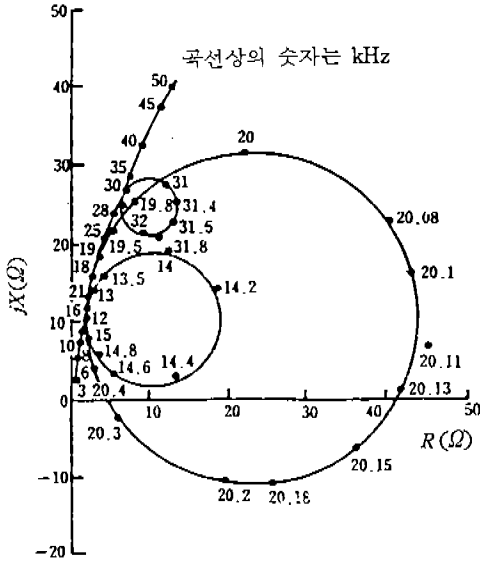


그림 47 진동자의 자유 임피던스의 주파수 궤적 공진 주파수 20.13KHz

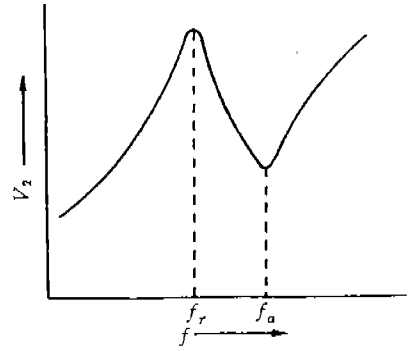


그림 50 공진주파수  $f_r$ , 반공진주파수  $f_a$

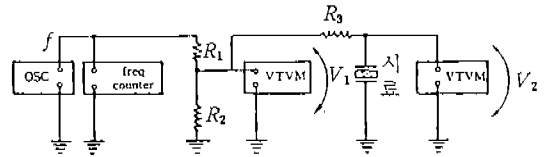


그림 51 정전류 저항

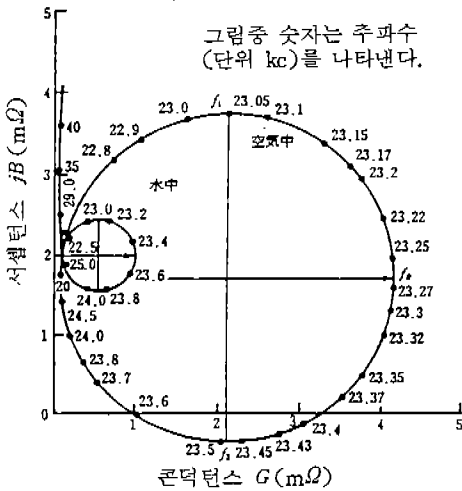


그림 48 자유 어드미턴스 궤적

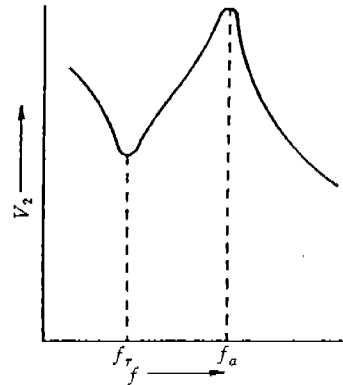


그림 52 공진주파수  $f_r$ , 반공진주파수  $f_a$

회로법이란 그림 49와 같이 진동자에 걸리는 전압을 일정하게 하여 전류를 변화시켜 이것을  $R_3$  변화에 따라 전압계를 읽는다. 이 회로는 전액 진동자에 알맞아 널리 이용되며, 특히 임피던스가 높은것은 이 회로에 측정이 바람직하다.

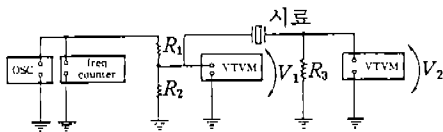


그림 49 정전압 회로

발전기(OSC)와 저항  $R_1, R_2$ 에서 일정 전압을 진동자에 인가한다.  $R_3$ 는 진동자에 흐르는 전류를 측정하기 위한 저항이다. 이론적인  $R_3$ 가 진동자의 임피던스보다 매우 작을때  $V_2$ 는 진동자의 어드미턴스에 비례한다.

일반적으로 공진주파수  $f_r$ , 반공진주파수  $f_a$ 일때 동시에 이 조건을 만족시키는 것은 곤란하므로, 실제에는 다음의 조건을 만족하기만 하면 아주 정확한 측정이 된다.

- ①  $R_3$ 가 공진시 임피던스의 3배보다 작을 때
- ②  $R_2, f_r, f_a$ 에서  $V_1$ 의 변동이 1dB이하로 되도록 선택될 때
- ③  $R_1+R_2$ 는 발진기에 의해서 알맞은 부하로 있도록 선택될 때

또 측정오차를 최소화 하도록 인출선을 줄이며, 저항  $R_2$  및  $R_3$ 는 100~600 $\Omega$ 으로 사용한다. 이 회로에서는 그림 50과 같이 주파수를 변화시켜 진공관 전압계 VTVM(vacuum tube volt meter)의 전압  $V_2$ 가 극대값일때의  $f$ 가 공진주파수  $f_r$ 이고,  $V_2$ 가 극소값일때  $f$ 가 반공진주파수  $f_a$ 이다.

6) 정전류 회로법

그림 51과 같이 전류를 일정하게 흘릴때 전압  $V$ 가 변화하고 주파수  $f$ 도 변화한다. 진동자의 임피던스 절대값의 100배 정도 큰 저항  $R_3$ 를 그림과 같이 발진기(OSC)와 진동자 사이에 넣으면 거의 정전류로 된다. 그러나 진동자의 임피던스

$|Z_0|$ 가 변하면 전압계 VTVM의  $V_2$ 가 변화하므로 임피던스  $|Z_0|$ 를 전압계로 읽는다.

이 측정회로는 비교적 임피던스가 낮은 진동자에 알맞고, 제어용량의 큰 자왜나 전왜진동자에 주로 사용된다.

발진기(OSC)와 저항  $R_1, R_2$ 에서 일정한 전압을 진동자에 인가하도록 하면,  $R_3$ 는 진동자에 흐르는 전류를 일정하게 하도록 하는 저항이다. 이론적인  $R_3$ 가 진동자의 공진 임피던스보다 작을 때에는  $V_2$ 는 진동자의 임피던스에 비례한다.

일반적으로는  $f_r, f_a$ 도 동시에 이 조건을 만족시키는 것은 곤란하므로 실제에는 다음조건을 만족시키면 정확한 측정이라고 할 수 있다.

- ①  $R_3$ 가 공진 임피던스의 3배보다 클 때
- ②  $R_2$ 는  $f_r, f_a$ 에서  $V_1$ 의 변동이 1dB이하로 되도록 선택된 때
- ③  $R_1+R_2$ 는 발진기에 의해서 알맞은 부하에 있도록 선택된 때

이 회로에서는 그림 52와 같이  $f$ 를 변화시키고 전압계 VTVM의 전압  $V_2$ 가 극소값일때  $f$ 가 공진주파수  $f_r$ 이고, 최대값이 반공진주파수  $f_a$ 이다.