

액체연료의 미립화 기술(2)

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

$I=I_1$ 및 $P=P_1$, $x=x_2$ 일때 $r=r_2$, $I=I_2$ 및 $P=P_2$ 로 놓고 $x_2-x_1=l$ 로 하면 흡수계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \alpha &= (1/l) \ln(r_1/r_2) \\ &= (1/2l) \ln(I_1/I_2) \\ &= (1/2l) \ln(P_1/P_2) \end{aligned}$$

7. 音波의 吸收와 分散

초음파를 방사하면 음파의 에너지 일부가 매질에 흡수 또는 분산되어 열에너지로 변환되므로 흡수(absorption)가 있으면 발산(dispersion)이 있게 된다.

이 흡수나 발산을 발생하는 구조는 매질의 점성, 열전도, 열방사 등에 영향된다. 음에너지의 일부가 매질중에서 흡수나 분산되면 음파는 감쇄한다.

x방향으로 진행되는 평면음파의 경우에 $x=0$ 에 있어서 변위진폭, 음의 강도 및 방사압 진폭을 r_0, I_0 및 P_0 로 할때 x에 있어서 그것을 r, I 및 P는 $r=r_0e^{-\alpha x}$, $I=I_0e^{-2\alpha x}$, $p=p_0e^{-\alpha x}$ 로 나타낸다. α 를 흡수계수(단위길이당 음의진폭)라 한다. 흡수의 크기는 매질의 특성에 좌우된다.

일반적으로 음의 에너지가 가장 많이 흡수되는 것은 기체이고, 다음은 액체, 가장 적게 흡수되는 것은 고체중 특히 금속, 수정등의 결정이다.

윗식에 제각기 자연대수를 놓고 $x=x_1$, $r=r_1$,

즉, X_1 및 X_2 되는 변위에서 변위 진폭 r_1, r_2 , 음의 강도 I_1, I_2 및 방사압 P_1, P_2 중의 한가지를 알면 흡수계수 α 가 구해진다.

일반적으로 주파수가 크게 됨(음의 높이가 크다)에 따라 흡수가 크게 되고 음의 파형도 정형파에서 톱날모양의 파로 변화하기 시작한다. 이것은 마치 오케스트라 연주시 그 장소로부터 점점 멀리 떨어질때 주파수가 큰(높은 음) plot의 음이 처음 들리지 않고 계속 멀어지면 Viola가, 마지막에는 주파수가 작은(낮은 음) drum의 음만이 들리게 된다.

표 4는 10°C부근에서 일부 물질의 밀도, 음속, 비음향 임피던스 및 10MHz초음파의 흡수계수를 나타낸다.

8. 초음파의 指向性

주파수가 크고 높은 음은 진동면의 정면 방향에

표 4 일부물질의 음향적 성질

물 질	밀 도 (g/cc)	음 속 (m/s)	비음향 임피던스 ($10^8 \text{kgf/m}^2 \cdot \text{s}$)	10Mc/s 흡수 계수 (dB/cm)
철	7.87	5850	40.7	0.05~1
수 정	2.65	5720	14.4	0.01
폴 리 메 칠 · 메 타 그 리 레 이 트	1.18	2780	3.27	8.0
벤 젠	0.88	1320	1.16	7.0
물	1.00	1430	1.43	0.22
공 기	0.0012	343	0.00041	120

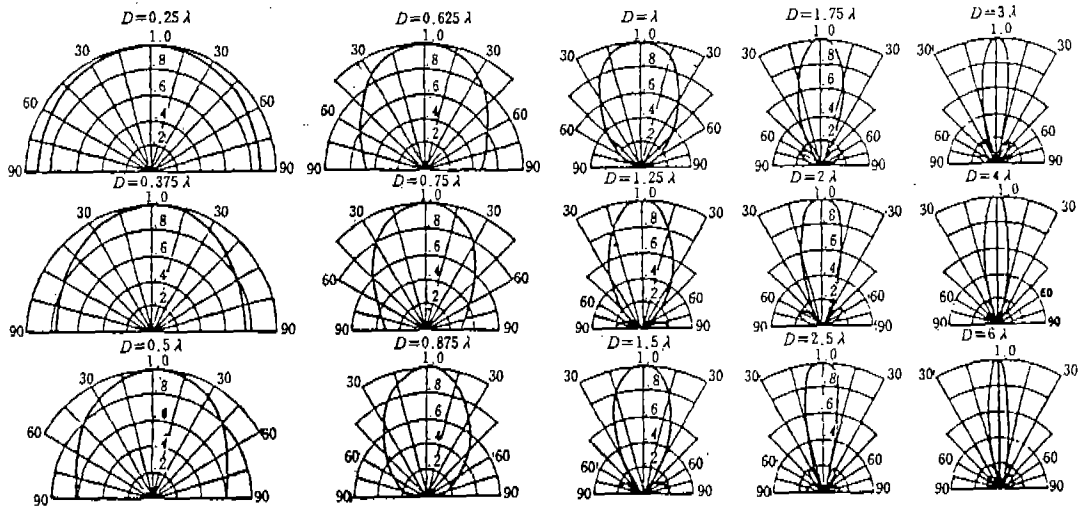


그림 11 초음파의 지향성(D: 음원의 직경, λ : 음파의 파장)

집중 방사되고 주파수가 작고 낮은음은 정면만이 아니라 횡방향에도 방사된다. 음이 일정방향에 강하게 방사되는 성질은 지향성(directivity)이라 부른다. 주파수가 높은 만큼 지향성이 날카롭고 음원의 크기가 다른 때에는 그림 11과 같은 음원의 직경 D와 파장 λ 와의 비가 큰 만큼 지향성이 예리하게 된다.

여기에서 보는 바와 같이 일반적으로 수백 KHz이상의 초음파는 빛과 똑같이 직진하게 되므로 기하학적으로 취급한다. 이와 같은 고주파수 초음파에는 빛과 똑같이 초음파의 전에너지를 집중, 반사, 굴절 및 발산시킬 수 있다.

그림 12는 집속 렌즈로서, 그림 13은 티탄산

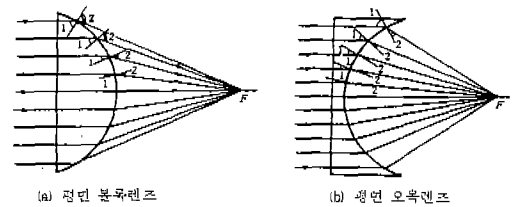


그림 12 집속 렌즈에서 음선



그림 13 티탄산 바륨 집속발진기의 형태

바륨등의 전왜집속 진동자를 나타낸다.

이와 같이 하여 초음파에너지를 초점에 집중하여 매우 큰 음의 강도나 음압을 만들 수 있다.

이와 같은 방법을 고주파의 초음파분무에 이용되며, 또 의학에서 생체조직의 일부분을 그 주위의 조직을 파괴시키지 않고 치료할 수 있는 등 이용가치가 매우 높다.

지향성이 날카로운 고주파수 초음파 변환기를 진동 발생용으로 뿐만 아니라 수음기로서도 사용한다. 수음기의 경우 경사방향에서의 잡음(noise)를 거의 없애면 정면에서 오는 음파가 미약한 신호라도 신호대 잡음이 뛰어나 음원의 발생 방향을 탐지할 수 있다. 그래서 이 수음기를 회전한다거나 출력의 방향을 탐지한다는 것이 가능하며 공중의 레이더에 상당하는 수중 소너(sonar)나 수중통신등에 이용된다.

9. 固有振動과 共鳴・共振

9.1 固有振動

탄성체에 외력이나 충격을 가하면 탄성력에 의해서 진동을 발생한다. 한층더 진동을 가하면 탄성력만으로 진동을 계속하게 된다. 이와 같은 진동을 고유(또는 자유)진동(proper oscillation)이라 부른다. 고유주파수는 탄성체의 재질, 크기 등에 따라서 정해지므로 진동을 요하는 탄성체는 그 고유주파수로 진동을 가하면 진동이 일어난다.

매질 내에 마찰이 없을때 진폭이 무한히 크게 되면 탄성체는 파괴되지만 실제에는 매질내부에 마찰이 있기 때문에 진폭이 크게 될수록 마찰도 크게 되어 진동을 방해하게 된다. 그러므로 탄성체에 그 고유주파수로 진동을 주어도 진폭은 크지 않고 어느 일정한 값을 갖는다.

9.2 共振・共鳴

어느 범위 또는 공간에서 어느 주파수로 자유 진동을 할 때 외부에서 그 주파수에 동일한 진동을 주면 큰 음이 발생한다. 이 현상을 공명 또는 공진(resonance)라고 부른다.

일반적으로 기체에서는 공명, 액체나 고체에

서는 공진이라고 부른다. 어느 물체에 자유진동을 준 때 그 주파수와 똑같은 주파수로 외부에서 진동을 가하면 작은 외력으로도 큰 진동을 발생시킬 수 있으며 이것을 공진이라고 부른다.

응용 예로서는 초음파의 경우 어느 한가지만의 주파수를 발생시켜야 하는 경우가 많고 그 공진을 이용하여 그 효율을 높일 필요에 쓰인다.

9.3 共振周波數

탄성체의 고유주파수에 똑같은 외부진동을 가했을 때 강한 진동이 얻어지는 현상이 공진이고 이때 주파수를 공진주파수(resonance frequency)라고 부르며 공진주파수는 탄성체의 재질, 크기 및 현상에 의해 정해진다. 표 5는 티탄산 바륨($BaTiO_3$) 주성분의 랑주방(Langevin)형 진동파의 각형상 치수에 의한 공진주파수를 나타낸다.

주파수의 단위는 독일의 물리학자 Hertz의 이름을 따서 hertz(cycle/초), $10^3\text{Hz}=1\text{kHz}$, $10^6\text{Hz}=1\text{MHz}$ alc $10^9\text{Hz}=1\text{GHz}$ 를 사용한다.

하나의 진동자에서는 하나의 공진주파수를 갖는 경우가 일반적이거나 그렇지 않고 2개를 갖는 경우도 있다. 이 공진주파수를 약간 변화시키면 전기진동이 기계진동으로 변환되는 효율이 매우 나쁘게 되므로 정확하게 선택하여야 한다.

일반적으로 공진주파수에서 출력을 증가시키면 저주파수의 자왜 진동자에서는 심한 진동을 발생하고, 고주파수의 전왜 진동자에서는 액면에 분류(噴流)를 생성하여 액면에서 크게 성장되며, 액면의 높이에 따라서 성장부에서 액주나 미세한 분무가 발생된다.

10. 캐비테이션(Cavitation)

10.1 現象

일반적으로 캐비테이션(공동현상)은 액체중에 용존하고 있는 공기나 다른 가스가 액체에 가해진 팽창력(또는 감압력)에 의해서 팽창하여 큰 부압을 일으켜 공동부분 또는 공동(Cavity)을 만드는 현상이다.

초음파 캐비테이션(ultrasonic cavitation)은 때

질입자에 매우 큰 가속도를 주는 것이 가능하므로 초음파에 의한 액중에 용존하고 있는 공기분자의 집합, 성장 및 발달에서 압과까지 일어나는 현상이다.

10.2 거동

액체는 그의 종류, 온도 및 압력에 따라 기체를 용존하고 있다. 표 5는 대기중에 노출된 물에 대하여 100cc중에 용존하고 있는 공기의 포화 용해량을 나타낸다.

온도가 올라가거나 압력이 낮게 되어 일부는 기포로 되어 액면에서 방출되므로 액면이 증기로 덮여 쌓이게 된다. 그러면 외력으로 공기가 내부에 용입되기 어렵게 된다. 또 탈기(脫氣)한 상태에서 초음파를 방사하면 캐비테이션이 일어나기 어렵게 된다.

실제의 캐비테이션은 공동 또는 기포(air bubble)가 원자나 분자의 크기에 비례하여 크게 된다.

표 5 물 100cc중 공기 포화 용해량

물의 온도(°C)	공기의 용해량(cc)
0	2.918
10	2.284
20	1.868
30	1.564
100	0.000

그림 14는 캐비테이션 분열 모델을 설명한다. (A)는 점 또는 구형음원에서 매질이 팽창과 압축을 반복하여 소밀파가 생기는 것을 나타낸 것이고, (B)는 이것을 음압 P와 시간 t의 관계를 나타낸다. 정압 P₀를 중심으로 음압의 증감이 일어난다. 곡선 A는 초음파의 출력이 작은 경우이고, 곡선 B는 큰 경우로서 파압과 부압이 크게 나타난다.

부압에 따라서 액체는 끌어 당겨지고 액체중의 기포핵이나 액중 공기 분자가 집합이나 성장하여 공동을 [2]로 발생한다. 기포는 더욱 발달하여 [3]에서 최대로 되고, 점차로 기포는 압축되어 [4]에서 공동소멸 또는 작은 공동 그대로 남아 있다가 더욱 단열압축(매우 순간적으로 일어나는

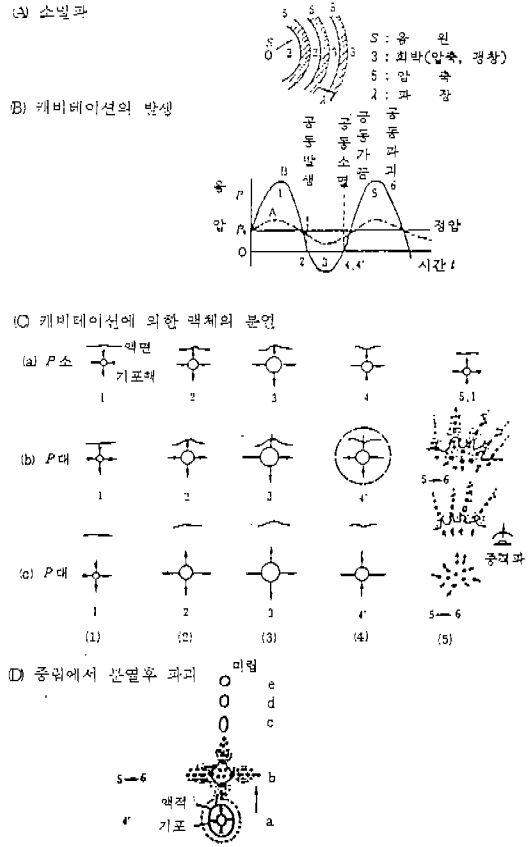


그림 14 캐비테이션 분열의 모델도

현상이기 때문에 단열압축이라함)되어 [5]의 고온 고압미소기포로 되고 [6]에서 기포가 파괴되면서 원래와 같이 분자상으로 쪼개어 흩어진다.

이 파괴하는 순간에 매우 큰 순간 압력의 충격파가 발생하여 액내에 격렬한 잡음이 발생하고 액체가 충돌하여 합쳐지고, 파괴하며 합쳐지면서 방사압이나 직진류도 가해져 액면이 발달하여 솟아 오르며 유괴(流塊)도 생기면서 가늘은 고유주파수의 분무가 발생된다.

이런 과정을 실험에 의하여 액립의 크기가 주파수에 좌우되는 특성을 알 수 있다.

주파수가 높은 만큼 발생기포의 크기가 작고 입자 크기가 작게 되는 것을 얻을 수 있다. 이런 현상을 유화, 분무, 세정, 확산속도나 반응속도 등의 촉진이나 고분자의 핵중합, 술의 숙성, 의학용의 치료나 수술등에 이용되고 있다.

11. 초음파

11.1 초음파의 발생기구

초음파는 자연계에 널리 발생되고 있으나 이것을 바로 이용하기에는 어려움이 있다. 따라서 필요한 주파수와 강도를 갖는 초음파는 인공적으로 발생시켜야 한다. 이런 장치가 초음파 발생기이고 매질이 기체, 액체 및 고체이냐에 따라서, 또 주파수에 따라서 여러가지 발생 방법이 있으나 크게 나누어 기계식 방법과 전기식 방법이 있으나 여기서는 전기식에 대하여 소개하고자 한다.

11.1.1 전기식 방법

이 방식은 기계식에 비해 매우 높은 주파수의 초음파를 만들어 내는 것이 가능하고, 소형이며 회전부분이 없고, 기체나 액체의 흐름이 필요치 않고 취급이 용이하다.

1) 전기 음향 변환기(전기 음향 진동자)

(1) 자왜 진동자

Ni, Alfer(철 80%, Al 13%의 합금) 및 페라이트와 같은 강자성체를 봉상으로 하여 자장속에 설치하고 이것에 자계를 가하면 자계의 방향으로 신축한다. 이 현상을 자왜현상(magnetostriction) 또는 줄 효과(Joule effect)라고 부른다. 이것은 원리적으로 강자성체의 내부에는 작은 분자자석이 불규칙적 배열로 분포하고 있으나 이것에 강한 자계를 가하면 분자자석이 자계의 방향으로 정렬하여 자석이 된다. 이때 한정된 길이의 분자자석이 정렬되면 강자성체가 늘어나거나 줄어들게 된다. 이것이 자왜현상이다. 이 현상을 이용한 것이 자왜 진동자이다.

① 금속 자왜 진동자

그림 15는 각 자왜 금속의 자장강도에 의해 자왜도 $\delta l/l$ (l : 봉의 길이, δl : 팽창 또는 수축 길이)로 나타낸다. 그림에서 40% Co강이나 Alfer합금이 자화하면 자왜도가 커서 길이의 늘어남이 크다. 니켈이나 페라이트는 반대로 수축한다. 순철의 경우에는 자장강도가 작으면 늘어나고 크면 수축하나 그 양이 작다. 이와 같이 금속의 재질에 따라 자왜 특성이 다르게 나타난다.

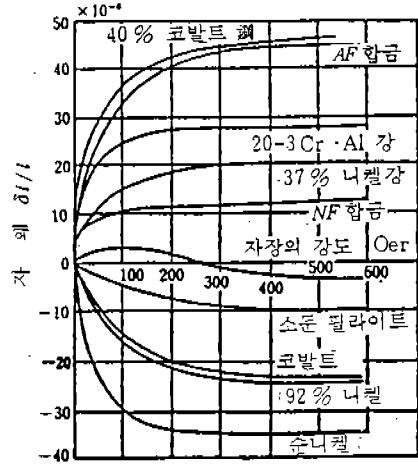


그림 15 자왜금속의 정자왜특성

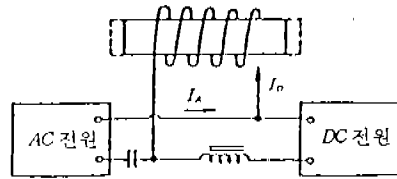


그림 16 자의 진동자의 구동원리

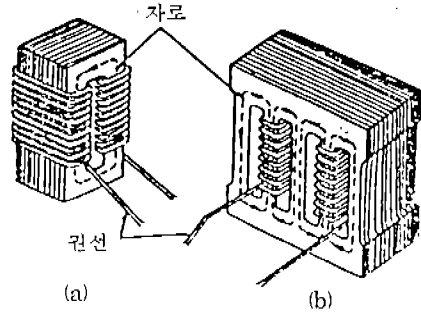


그림 17 자왜 진동자의 예

그림 16은 자장을 만드는 예이다. Ni등의 강자성체 봉에 선을 감아 직류전류를 흘리면 정적인 자장강도가 얻어지고 봉은 그 길이 방향으로 자화되며 편기자화(編倚磁化)가 일어난다. 선에 교류전류를 중첩해서 흘리면 봉의 자화는 편기자화를 중심으로 하여 교류전류의 주파수와 똑

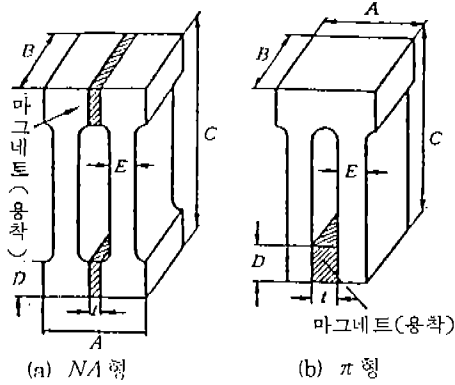


그림 18 페라이트계 자왜진동자의 형상

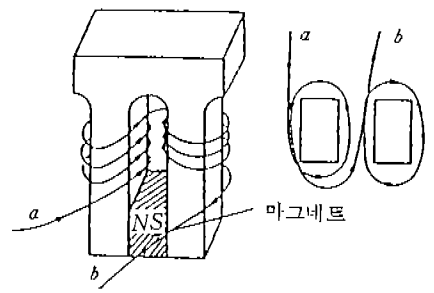


그림 19 권선방법

표 6 페라이트계 진동자의 크기와 공진 주파수

공진 주파수 (KHz)	형	표 준 치 수(mm)					
		방사면, 형 A	방사면, 형 B	높이 C	편의자석 두께 t	편의자석 높이 D	각두께 E
20	NA	55	25	109	4	24	13
20	π	51	25	131	14	26	13
28	NA	40	20	75	2	17	9
40	π	40	20	87	11	18	9
50	π	40	20	49	11	18	9
75	π	27	13	32	7	12	6
100	π	20	10	24	5	9	4

표 7 자왜 재료의 특성비교

명 칭	순니켈	Alfer	페라이트
성 분	Ni98% 이상	Fe87% Al13% 합금	Ni-Cu계 페라이트
투 자 율	40	190	20
고유저항(Ω -cm)	7×10^{-8}	91×10^{-8}	4×10^2 이상
전기기계결합계수(%)	20~30	20	22
밀도(g/cm ³)	8.9	6.7	5
음속(m/sec)	4800	4700	5700
정자왜포화 변형	-40×10^{-8}	35×10^{-8}	-30×10^{-8}
최적편의자장(Oer)	10~15	6~10	10~15
내식성(해수중)	양호	약간양호	극히양호
기계적강도(kgf/cm ²)	$* 2 \times 10^6$	$* 1.4 \times 10^6$	1) 8.4×10^3 2) 4×10^2 3) 9.8×10^2

* 영율, 1) 압축강도, 2) 인장강도, 3) 저항강도

같은 주파수로 변동한다. 자화가 변동하면 Joule효과에 의해 봉은 양단면에서 신축한다.

봉의 주파수는 교류전류의 주파수와 똑같으므로 교류전류의 주파수를 봉의 고유진동수와 일치시키면 봉은 공진하고 진동이 강하게 된다.

② 페라이트 자왜 진동자

페라이트는 최초 발달한 강자성체로서, 라디오, TV 등에 많이 사용되는 소밀 금속이다. 이것은 Fe, Ni, Co, Cu, Mg, Mn, Ba 등의 산화철 분말을 혼합, 압축, 가열하여 소결한 것이다.

페라이트는 전열저항이 매우 크고 Ni보다 와전류 손실이 적어 발열이 작고 또 전기·기계 변환효율이 90% 이상, 내식성이 뛰어나고 발전 출력을 작게 할 수 있는 이점이 있다.

페라이트 진동자의 형식은 그림 18과 같이 NA형과 π 형의 두 종류가 있다.

페라이트 진동자에는 그림과 같이 직류로, 전기자화는 영구자석으로 Joule효과를 얻을 수 있고 특히 영구자석으로는 바륨 페라이트로 편기용 자석을 이용하면 직류여자형 전원이 필요없는 특징이 있다.

코일의 감는 방법은 그림 19와 같이 좌우 양다리의 권선 방향은 역으로 하여 임피던스를 매칭시킨다. 권선을 너무 많이 감으면 진동을 방해하거나 열을 유지하여 권선의 피복절연이 파괴된다.

페라이트 진동자의 결점은 Ni와 같은 금속 진동자처럼 강하지 않으므로 공기중에서 과다 출력으로 진동시키면 파괴 등을 일으킨다.

③ 집속 자왜 진동자

저주파수 초음파($f=16\sim 50\text{KHz}$)는 일반적으로 지향성이 나쁘고 집속이 어렵다. 그러므로 집속 발진기에는 거의 고주파수 초음파 발진용의 티탄산 바륨이나 수정이 이용된다. 낮은 주파수에서 매우 강한 초음파를 발생시키는 경우에는 몇개의 평면 자왜 진동자를 그축을 한점을 향하도록 배치하여 초음파를 집속한다.

(1) 전왜 진동자

티탄산 바륨계 자기나 질리콘산 티탄산연계 자기는 강한 유전체이다. 유전체의 내부에 정과부의 전하를 가진 쌍극자가 있다. 보통 쌍극자는

불규칙하게 배열되어 있으나 강한 유전체를 강한 전기속에 넣으면 쌍극자의 전기축이 전기의 방향에 회전력을 받아 방향을 정리한다. 유한한 길이의 쌍극자가 정렬할때 이 유전체가 늘어나거나 줄어든다. 이것은 전왜현상(electrostrictive phenomena)이라 한다. 보통의 유전체에서는 이 현상은 매우 미약하거나 일어나지 않으나 티탄산 바륨계나 질리콘산 티탄산연계같은 유전체에서는 이 현상이 매우 커 전왜 진동자로 널리 사용된다.

① 전왜 진동자의 제작, 성질

티탄산 바륨계의 제조는 일반적으로 산화티탄(TiO_2)와 탄산바륨(BaCO_3)의 2성분의 분말을 알맞는 형에 넣고 압축성형하여 1300°C 이상의 산화분위기중에 가열해서 티탄산바륨의 결정을 만들어 이것을 분쇄하여 2성분의 몰비를 1:1로 혼합하여 원료를 만든다.

이것을 필요 따라 MgO, CaO, CdO등을 첨가해서 고용체로 만들어 필요한 형상으로 성형하여 다시 1300°C 이상의 산화분위기 노속에서 소결한다. 이것에 은, 금, 백금등의 전극을 붙여 양전극사이에 1cm당 20~100Kv로 수분동안 고압전류전계를 천천히 가하면서 분극처리하면 자석에 가까운 성질을 갖는다.

② 전왜 진동자의 종류

전왜 진동자는 형상과 전압이 걸리는 쪽에 따라 그림 20과 같이 여러가지 진동형태를 갖는다.

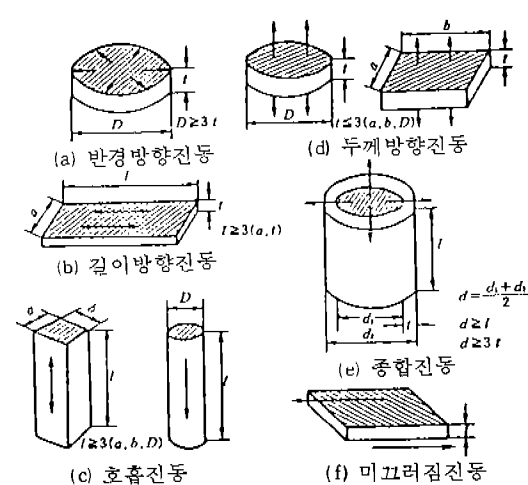


그림 20 전왜진동자의 진동형태

진동자의 공진주파수 f_r 과 진동자 두께 t 사이에는 $f_r \times t = N_i$ (주파수 정수)가 성립한다. 따라서 주파수가 어떤것, 어떤종류의 진동자를 사용하는가 또 어떤방향의 진동을 해야하는가가 결정되면 N_i 가 결정되므로 진동자의 두께가 구해진다.

즉, D : 원판이나 원주의 직경(cm)

1 : 각판, 원주, 각주 및 원통모양의 길이(cm)

a, b : 각판이나 원주의 폭(cm)

t : 원판, 각판 및 원통의 두께(cm)

d_1, d_2 : 원통의 내경, 외경(cm)라 하면, 공진주파수 f_r (KHz)는 다음과 같이 구해진다.

가. 반경방향의 진동 :

$$f_r = N_1/D \text{ 단, } D \leq 3t$$

나. 길이방향의 진동 :

$$f_r = N_2/l \text{ 단, } 1 \leq 3(a, t)$$

다. 종방향의 진동 :

$$f_r = N_3/t \text{ 단, } 1 \leq 3(a, b, D)$$

라. 두께방향의 진동 :

$$f_r = N_4/t \text{ 단, } t \leq 3(a, b, D)$$

마. 호흡진동 :

$$f_r = N_5/d \text{ 단, } d = (d_1 + d_2)/2, d \leq 1, d \leq 3t$$

바. 미끄럼진동 :

$$f_r = N_6/t$$

표 8 전액 재료의 재질특성

정 수	단 위	티탄산	지르콘산 티탄산납				
		바 룬	3D	7	7A	8	
밀도	g/cm ³	5.4	7.6	7.6	7.8		
포아송비		0.28	0.32	0.32	0.32	0.32	
투전율		1150	450	1200	600	1500	
손실계수		0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	
주파수 정수	KHz · cm	지름방향진동 N_1	308	250	225	235	220
		길이방향진동 N_2	228	184	162	175	164
		종방향진동 N_3	227	175	159	160	150
		두께방향진동 N_4	252	200	206	220	200
전기기계 종합계수		지름방향 K_p	0.30	0.30	0.52	0.53	0.55
		길이방향 K_{31}	0.18	0.20	0.30	0.30	0.33
		종방향 K_{33}	0.48	0.50	0.60	0.62	0.68
영 율	$\times 10^{12}$ dyne/cm ²	E_{31}	1.13	1.03	0.80	0.93	0.83
		E_{33}	1.12	0.93	0.77	0.77	0.70
압 전 출 력 계 수	$\times 10^{-3}$ V-m/N	g_{31}	8	10	10	12	11
		g_{33}	14	26	22	25	27
기 계 적	Q	400	200	800	800	500	
큐 리 온 도	°C	120	290	330	320	260	
온도계수*	$\times 10^5$ /°C	주파수온도계수	55	20	20	25	25
		용량온도계수	2.0	5.0	2.5	3.0	2.8
용 도		일반	탐상기 의료기 기	어선탐지기, 촉탐기, 세정기, 미케니컬 필터	강력 초음파 발생용 진동자		

진동방향은 분극방향과 똑 같으므로 구동전계는 이것과 직각방향에 설치한다. 표 8은 전왜 재료의 제 특성을 나타내며 표 중의 기계적 Q의 의미는 진동계의 공진폭을 나타내는 양이다.

표 9는 티탄산바륨 주성분의 원판형 전왜 진동자와 티탄산연 질리콘산연 주성분의 원통형 전왜 진동자의 여러가지의 크기에 대한 fr 및 액중에서 상시 사용되는 음향출력을 나타낸다.

(3) 압전 진동자

천연적으로 얻는 수정(quartz), 인공적으로 만든 로셴염(Rochelle salt)나 전기석 등단결정에서는 힘을 가해 변형을 주면 힘의 방향 또는 특정방향의 결정 양끝면에 전하가 흐른다. 반대로 결정의 양면에 전압을 가하면 판이 압축

또는 팽창한다. 이것이 압전현상으로서 압전효과(piezo effect)가 나타난다.

고주파수 초음파의 발생은 초기에는 거의 천연산의 수정을 이용하였다. 수정은 절연체이므로 전기적 손실이 적고 결정으로 존재하므로 재질이 안정되고 온도계수가 작기 때문에 온도 변화에 대하여 안정적이다. 그러나 유전율은 전왜 진동자에 비해서 매우 작기 때문에 정전용량이 작고 저주파수에서는 전기적 임피던스가 높아 큰 전력을 가하지 않으면 강한 초음파를 내지 않으므로 저주파수 초음파 발생에는 적합하지 않다. 수정은 얇게 가공하기 쉽고, 얇은 수정판에서는 정전용량이 크고 임피던스가 낮아 전왜 진동자에 의한 보다 높은 주파수(1 MHz)이상의 진동자에 알맞다.

표 9 원판형 및 원통형 자왜 진동자

재질	D(mm)	t(mm)	공진 주파수 (KHz)	액중허용음향 출력(W)	재질	D(mm)	h(mm)	t(mm)	공진 주파수 (KHz)	액중허용음향 출력(W)
20	13	200	10		38	30	5	500	100	
주	60	13	200	80	주	38	30	3.3	800	100
성	20	9	300	10	성	38	30	2.6	1000	100
분	60	9	300	80	분	65	30	5	500	180
·	100	9	300	250	·	65	30	3.3	800	180
티	20	6.5	400	10	지티	100	30	5	500	250
탄	50	6.5	400	60	르탄	38	30	3.5	600	130
산	100	6.5	400	250	콘산	38	30	2.5	800	130
바	20	5	500	10	산납	38	30	2.5	800	130
륨	50	5	500	60	납					
	100	5	500	250						

표 10 자왜 진동자와 전왜 및 압전진동자의 비교

진 동 자	압 전	전 왜	자 왜	
	수 정	티탄산바륨	Ni-Alfer	페라이트
장치의 길이	소	소	대	소
최적사용주파수	1MHz이상	200KHz~2MHz	50KHz이하	100KHz이하
전기교환변환능률	80%이상	80%이상	20~50%	80%이상
수중에서의 최대전기입력	-	10W/cm ³	6~10W/cm ²	6~10W/CM ³
수중에서의 연속전기입력	-	3~6W/cm ³	6~10W/cm ²	6~10W/CM ³

전왜소자의 경우와 똑같이 압전소자의 고유 주파수 f_p (KHz)와 두께 t 의 곱은 일정하므로 $f_p t = N$ (KHz·mm)이며 N 은 주파수 정수이다.

이상 소개한 각 진동자의 특성은 표 10, 11, 12에 나타낸다.

(4) Langevin 진동자

수정판에서 저주파수의 공진주파수의 강력 초음파 진동을 얻기 위해서는 판 두께를 상당히 크게 하여야 한다. 그것을 피하기 위하여 2매의 다른 탄성판(금속)사이에 수정판을 모자이크상

표 11 압전 전왜 재료의 제 정수

재 료	성 분	정 계 와 점 군	밀 도 (ρ) 10^3 (kg/ cm ³)	절 단 법	진 동 형 식	투 전 율 (ϵ/ϵ_0)	저 항 율 Ωm (10^9)	압 전 율 (d) 10^{12} (V·m /N)	전 압 출 력 계 수 (g) 10^{-3} (V·m /N)	총 합 계 수 (k) (%)	주 파 수 정 수 (cycle ·m)	음 피 단 항 스 (pc) (kgf/ m ² sec)	기 계 적 Q 치	최 고 안 전 응 력 10^6 (N/m ²)	최 고 이 용 온 도 (°C)	최 고 이 용 습 도 (%)
수 정	SiO ₂	3방 D ₃	2.65	0° X	신장	4.5	> 1000	2.0	50	10	2700	14.3	> 10 ⁵	95	500	100
로 셀 염 (RS)	NaKCaO ₂ ·4H ₂ O	사방 D ₂	1.77	45° X	∅	350	> 10	275	90	73	2100	5.6	30~ 100	14	45	조해 풍해성
티탄산바 륨계자기 (BT)	BaTiO ₂	정방 CooV	5.7	(Z)	∅	1700	> 100	78	5.2	21	2200	25	~300	~80	80	100
	(Ba 0.92- Ca0.08) TiO ₃ (시판)	∅	5.5	∅	∅	1200	> 100	58	5.5	19	-	-	-	~80	80	100
지르콘산 티탄산연 계자기 (PZT)	PZT-4 그레파이트 (시판)	∅	7.5	∅	∅	1200	> 100	110	10.4	30	1650	25	600	~80	~ 250	100
	PZT-5 그레파이트 (시판)	∅	7.5	∅	∅	1200	> 100	140	10.6	31.8	1500	22.5	75	~80	~ 250	100

표 12 진동자 재료의 특징

	자 왜 진 동 자		압 전 진 동 자		전 왜 진 동 자	
재 질	Ni·Alfer 페라이트		수 정 로 셀 염		티탄산바륨 지르콘산티탄산염	
장 단 점	Ni·Alfer	페라이트	수 정	로 셀 염	티탄산 바륨	지르콘산 티탄산염
	변환능률 20~25% 파류손실이 크다 구동력이 크다 최고사용온도 약 150°C	변환능률 85~90% 기계적 강도가 작다 최고사용온도 약 150°C	변환능률 10%정도 고가이다 최고사용 온도 150°C	변환능률 90%이상 습기에 약하다 최고사용 온도 약 45°C	변환능률 30%정도 온도특성이 좋고 비교적 싸다 최고사용온도 80°C	변환능률 40~50% 온도특성상 좋지만 제작 곤란 최고사용온도 250°C
	단, 절연접착제, 감는선의 재료 등으로 약 70°C로 제한한다.					

으로 모아 집착 또는 볼트 체결하여 전체로서 안정시켜 저주파수의 강력 초음파를 얻도록 한 진동자이다.

특히 볼트 체결 Langevin진동자의 주요 특징은 다음과 같다.

- ① 기계적 Q가 크고 전기음향 변환효율이 90% 이상 높다.
- ② Curie점이 보통진동자보다 높아 일반적으로 냉각이 필요하지 않다.
- ③ 외측이 금속블록으로 되므로 견고하여 부하의 변동에 안정된다. 혼 및 세척조의 바닥에 볼트로 접합시키므로 편리하다. 혼에 접합시키므로 다른 자와 진동자보다 대출력 대진폭의 진동이 가능하다. 1개의 진동자로 사용하는 진동소자는 주파수의 크기에 따라 다르나 6~8매 정도까지 가능하므로 큰출력이 얻어진다.
- ④ 진동자 전체로서 비교적 저주파수쪽에도 대진폭 초음파를 얻을 수 있어 이용범위가 넓다.
- ⑤ 단점으로서는 임피던스가 높고 가해지는 전압이 높고 비교적 가격이 비싸다.

