

水晶振動子の 特性에 對한 研究

(A Study on the characteristics
of the crystal vibro meter)

김 유 근* (해양과학대학전임강사)

현 영 진* (이공대학전임강사)

양 인 홍** (해양과학대학강사)

目 次

記號說明

1. 序 論

2. 理論解析

(1) 水晶의 結晶面의 說明

(2) 水晶의 壓電特性

(3) 立方體의 彈性振動

3. 實 驗

(1) 實驗裝備

(2) 實驗方法

4. 結 論

記號說明

P : 압전편극

P_x, P_y, P_z : 각 성분의 압전편극

d : 압전상수(+)

d_{ij} : 각 성분의 압전상수

e : 압전상수(-)

e_{ij} : 각 성분의 압전상수

\underline{T}	: Tensor
\underline{T}_i	: 각 성분의 Tensor.
Q	: 전하
C	: 축전용량
C_0	: 진동자의 전기용량
C_1	: 진동자의 등가용량
L	: 진동자의 등가인덕턴스
R	: 진동자의 등가저항
F	: 탄성충격력
F_x, F_y, F_z	: 각 성분에 탄성충격력
U	: 탄성변위
U_x, U_y, U_z	: 각 성분의 탄성변위
t	: 시간
X, Y, Z	: 각 성분의 탄성용력
f_a	: 탄성 주파수
f_b	: 직렬 공진주파수
f_{al}	: 종파 탄성주파수
f_{ba}	: 병렬 공진주파수
f	: 주파수
ω	: 진동수
C_{ij}	: 각 성분의 탄성계수
ρ	: 수정진동자의 밀도
Z	: Impedance.
Y	: Admittance.
G	: Conductance.
B	: Succetpance.
T	: 온도
dx, dy, dz	: 각성분의 미소길이

1. 序 論

水晶振動子는 水晶의 판, 봉, 음차등의 彈性振動을 電氣的인 공진소자로 변위시켜 安定된 공진 주파수와 예리한 공진특성을 그 특징으로 하고 있어 고도로 안정된 周波數 신호용 소자로서 수 KHz~수백 MHz 등으로 광범위하게 분포되고 있다. Lippman이 水晶을 최초로 研究하였는데 이는 水晶의 압전현상의 예언이 었다(1881년). 그後 큐리 형제가 X-판을 개발하여 이를 實驗으로 확인하여 Lengevin이 이를 응용 2箇의 鍍판에 水晶을 모자이크상으로 하여 超音波의 送, 受信子로 使用하였다.

日本の Kowa氏는 R(AT) 板을 개발하여 무선통신 회로에 利用했다.

美國의 벨 研究所에서는 위의 板에 垂直한 DT板을 개발하여 高周波測定에 利用했다. 이후 많은 학자들에 의해 Y板, NT, DT, 기타 Fork板등등 절단 각의 變位에 따라 수많은 板들이 發見되고 개발되었다. 水晶이 使用되는 重要이유로는 지구상에 풍부한 SiO_2 의 단결정이며 硬度가 커서 機械적으로 안정성이 있어 加工하기 쉽고 불소외에는 어떤 약품도 침입되지 않아 化學적으로 安定되어서 彈性振動의 損失이 적어 溫度에 의한 振動變化가 극히 적다.

最近 IC 回路의 개발로 回路의 소형화가 이루어져 時計工業에서는 機械式에서 電子式으로 전환되면서 손목時計 또는 Clock用에 水晶은 저주파에서 고주파로 광범위하게 利用되고 있다.

그래서 표준주파수 測定에 있어서 水晶은 세슘, 루비듐등을 제외하고는 광범위하게 利用되므로 이에 의한 溫度測定素子, 流量測定素子, 힘 變換素子, Oscillator 等 各種 filter回路에 연결하여 變換素子로서는 重要的한 역할을 수행하고 있다.

따라서, 本 論文에서는 위에서 열거한 水晶振動子の 特性성을 이론적으로 해석하고 水晶의 고유특성인 溫度의 安定性에 對한 것을 C.I Meter와 항온로를 利用하여 상온에서의 溫度의 安定性이 좋은 AT板 水晶振動子を 溫度變化 시켜 이에 對한 周波數變化에 따르는 여러현상을 고찰하고 이에 對한 應用回路에 관하여 研究하였다.

2. 理論解析

(1) 水晶의 結晶面의 說明

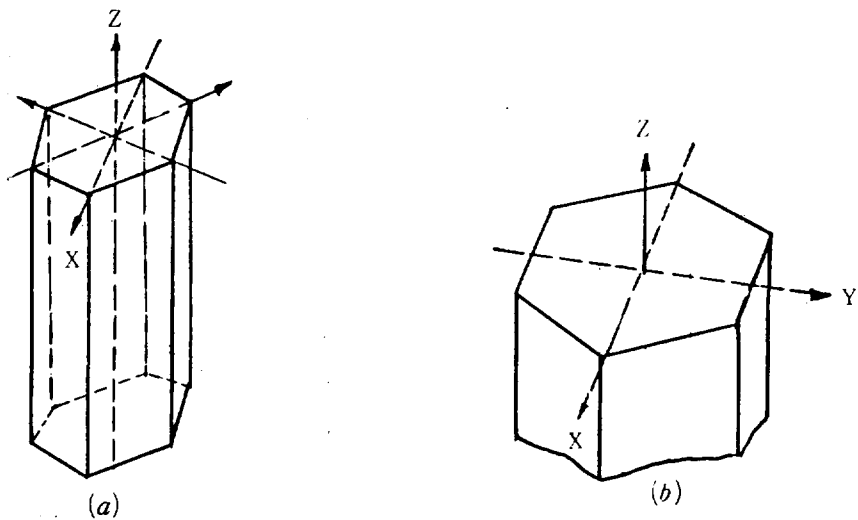


Fig. 1. 水晶의 結晶面의 構造圖

Fig 1에서 X軸은 機械軸, Y軸은 電氣軸, Z軸은 光學軸이라 하며 XY面에서 垂直으로 切斷된 面을 X板 또는 Curie板이라 한다.

여기서 5°, 18.5° 傾斜된 面을 5°X板, 18.5°X板이라 부른다. XZ面에 對하여 傾斜된 面을 BT, DT, CT, AT板이라하며 이는 傾斜角에 의해 結定된다.

또한 YZ面에 垂直 또는 XZ面에 平행한 面을 Y板이라 한다. 여기서 X板은 종진동파로 固有振動數에 의해 周波數測定이 可能하며 방형이다.

XY面에의 傾斜面은 AT, BT板이라 하며 원형의 형상이 많고 간혹 구형도 있다. 水晶은 비등방성 結定이어서 切斷面마다 彈性係數가 달라 진동형태와 周波數特性이 各各 다르다.

表 1은 角 切斷面의 振動特性이다.

表 1. 各種 切斷面의 振動特性

절 단 면 명	진 동 형 태	주 파 수 범 위
A T	두 개 전 단 진 동	0.5 ~ 100 MHz
B T	"	5 ~ 15 MHz
C T	관 전 단 진 동	300 ~ 1,000 KHz
D T	"	200 ~ 500 KHz
+ 5° X 판	길 이 진 동	60 ~ 300 KHz
+ 18.5° X 판	"	60 ~ 300 KHz
G T	"	100 ~ 556 KHz
M T	길 이 두 개 진 동	10 ~ 100 KHz
N T	길 이 · 폭 · 왜 곡	10 ~ 100 KHz

(2) 水晶의 壓電特性

一般의 壓電 結晶體에 대해서는

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_x \\ Y_x \\ Z_x \\ X_y \\ Y_y \\ Z_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

및

$$\begin{bmatrix} -P_x \\ -P_y \\ -P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_x \\ Y_y \\ Z_x \\ Y_x \\ Z_x \\ X_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

인 關係가 成立된다.

위 式에서의 各各의 係數는 Vector 量이다. 計算의 편리상 式(1)과 式(2)을

$$\begin{aligned} [P] &= [e] [A] \dots\dots\dots (3) \\ [P] &= [d] [B] \end{aligned}$$

로 表示되며 좌표 變換에 對해서는

$$\begin{aligned} [P'] &= [e] [A'] \dots\dots\dots (4) \\ [P'] &= [d] [B'] \end{aligned}$$

로 기록된다.

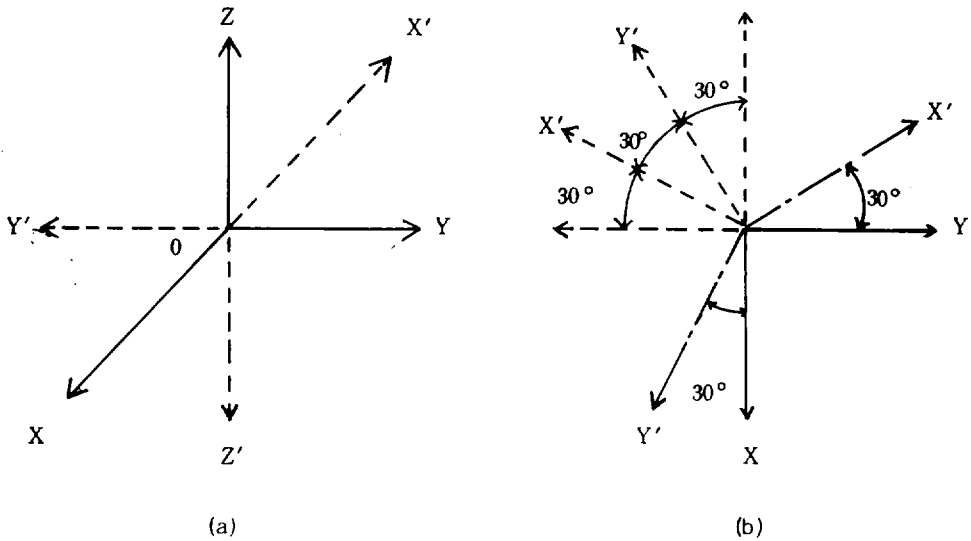


Fig. 2 좌표변환의 예

Fig 2-(a)에 表示한 2회 대칭축을 회전축으로 하는 좌표變換의 變換 tensor 는

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = [T_4] \dots\dots\dots (5)$$

즉 $[P'] = [e][A'] = [e][T_1][A] = [T_4][P] = [T_4][e][A]$
 $\therefore [T_4][e] = [e][T_1] \dots\dots\dots (6)$

윗 式을 計算하면 ($e_{15} = e_{16} = e_{21} = e_{22} = e_{23} = e_{24} = e_{31} = e_{32} = e_{34} = 0$) 의 값을 얻는다. 또한 fig 2-(b)의 3회 대칭축으로 變換하면

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}, 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0 \\ 0, 0, 1 \end{pmatrix} = [T_5] \dots\dots\dots (7)$$

여기서 []부호는 fig 2-(b)의 X'' Y'' Z''의 좌표 變換이다. 따라서

$$[T_5][e] = [e][T_3] \dots\dots\dots (8)$$

式(8)을 計算하여 水晶의 e는 다음 式으로 표시된다.

$$[e] = \begin{pmatrix} e_{11} & -e_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -e_{14} & e_{11} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

[d]에 對해서도 같은 方式으로 計算한다.

2회 대칭축의 경우에 對해서는 式(6)과 같고 3회 대칭축에 대해서는

$$[d][P'] = [d][B'] = [d][T_2][B] = [T_5][d][B] \dots\dots\dots (10)$$

이에 의해 水晶의 d는

$$[d] = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{12} & 0 & d_M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

이와 같이 結定된다.

이 水晶 d 값은 Q와 F와의 關係에서 다음 式으로 결정된다.

$$[Q] = [d][F] \dots\dots\dots (12)$$

콘덴서 容量과 端子電壓의 關係는 다음과 같다.

$$V = \frac{Q}{C} \dots\dots\dots (13)$$

이때 C의 값이 공진주파수 測定에 關係가 있다.

(3) 立方體의 彈性振動

水晶振動子を 미소 立方體로 생각하면 加速度를 $-\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, 면적 $A = dx \cdot dy$ 로 하고 힘을 F로 하면

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx, dy, dz = F \dots\dots\dots (14)$$

이와같은 立方體를 fig. 3에 나타냈다.
 X軸에 垂直한 面 ABCD와 OEFG의
 충격력에 對해 생각하면

$$A, B, C, D \dots\dots Xx_1 \ Xx_1 \ Zx_1$$

$$O, E, F, G \dots\dots Xx_2 \ Xx_2 \ Zx_2$$

라면 X軸方向의 충격력 F_x 는

$$F_x = (Xx_2 + Xx_1) dy dz + (Xy_2 + Xy_1) dx dz + (Xz_2 + Xz_1) dx dy$$

여기에서

$$Xx_2 = -Xx_1 + \frac{\partial Xx}{\partial x} dx$$

$$Xy_2 = -Xy_1 + \frac{\partial Xy}{\partial y} dy$$

$$Xz_2 = -Xz_1 + \frac{\partial Xz}{\partial z} dz$$

이므로

$$F_x = \left(\frac{\partial Xx}{\partial x} + \frac{\partial Xy}{\partial y} + \frac{\partial Xz}{\partial z} \right) dx dy dz = F'_x dx dy dz$$

같은 方式으로

$$F_y = \left(\frac{\partial Yx}{\partial x} + \frac{\partial Yy}{\partial y} + \frac{\partial Yz}{\partial z} \right) dx dy dz \dots\dots\dots(15)$$

$$F_z = \left(\frac{\partial Zx}{\partial x} + \frac{\partial Zy}{\partial y} + \frac{\partial Zz}{\partial z} \right) dx dy dz$$

水晶振動子の 板面을 X-Y面이라 생각하면 두께 Z軸 方向에서의 變位는 存在하지 않기 때문에 F의 Z軸 分력에 對해서는 생각할 必要가 없다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial t^2} = F_x' \dots\dots\dots(16)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial t^2} = F_y'$$

式(15)와 式(16)을 조합하면

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial t^2} &= C_{11} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial x^2} + 2C_{16} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial x \partial y} + C_{66} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial y^2} + C_{16} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial x^2} + (C_{12} + C_{66}) \frac{\partial \mu_y}{\partial x \partial y} + C_{26} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial y^2} \\ \rho \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial t^2} &= C_{16} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial x^2} + C_{26} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial x \partial y} + C_{66} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial x^2} + C_{66} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial x \partial y} + C_{12} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial x \partial y} + C_{22} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial y^2} + C_{26} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial x \partial y} \\ &\quad + C_{26} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial y^2} \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

또한 각 점의 變位는 角速度 ω 로 振動하기 때문에

$$\mu_x = \mu_x e^{j\omega t}, \quad \mu_y = \mu_y e^{j\omega t}$$

이 振動은 한 번에 對한 振動이 아니고 2 面의 윤곽에 依한 振動이므로

$$\frac{\partial \mu_x}{\partial x} = \frac{\partial \mu_y}{\partial y} = 0$$

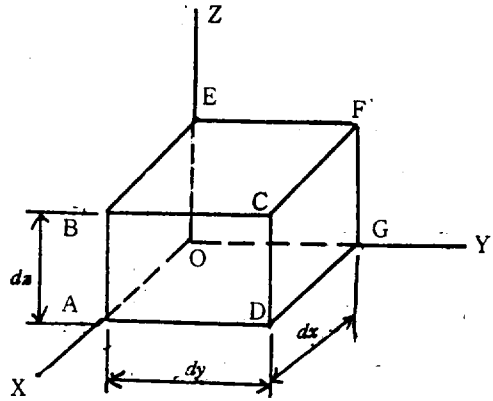


Fig. 3 미소입방체의 구조

윗 식(16)은

$$C_{66} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial y^2} + C_{26} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial y^2} + \omega^2 \rho \mu_x = 0$$

$$C_{26} \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial y^2} + C_{22} \frac{\partial^2 \mu_y}{\partial y^2} + \omega^2 \rho \mu_y = 0$$

연립 방정식에 의해 2원 2차 연립방정식을 전개하면

$$\frac{\partial^4 \mu_x}{\partial y^4} + \omega^2 \rho \left[\frac{C_{22} + C_{66}}{C_{66}C_{22} - C_{66}^2} \right] \frac{\partial^2 \mu_x}{\partial y^2} + \frac{\omega^4 \rho^2 \mu_x}{C_{22}C_{66} - C_{26}^2} = 0 \dots\dots\dots(18)$$

이 解는

$\mu_x = A \cos \beta y + B \sin \beta y + C \cos \beta y + D \sin \beta y$ 이고 윗 식에 대입하여 상수를 구하면 幅이 l 인 水晶振動子の 共振周波數 f 를 求하면

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{C_{22} + C_{66} \pm \sqrt{(C_{22} - C_{66})^2 + 4C_{26}^2}}{\rho}} \dots\dots\dots(19)$$

윗 식을 간단히 하면

$$f_l = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$

윗 식은 fig. 1의 XZ面의 傾斜진 절단판에 각각 적용되는데 이것을 두께에 의한 共振 振動이라 한다. 또한 X板일 경우에는 길이方向의 경우만 생각하면 되므로 식(20)과 같다.

$$f_l = \frac{m}{2l} \sqrt{\frac{1}{C\rho}} \dots\dots\dots(20)$$

여기서 m 은 정수이다.

(4) 振動子の 電氣特性

水晶振動子에 고주파 전압을 가하면 압전현상에 의해 공진하게 된다. 이때 전기적 등가 회로는 공진점 근처에서 fig.4와 같이 표시된다.

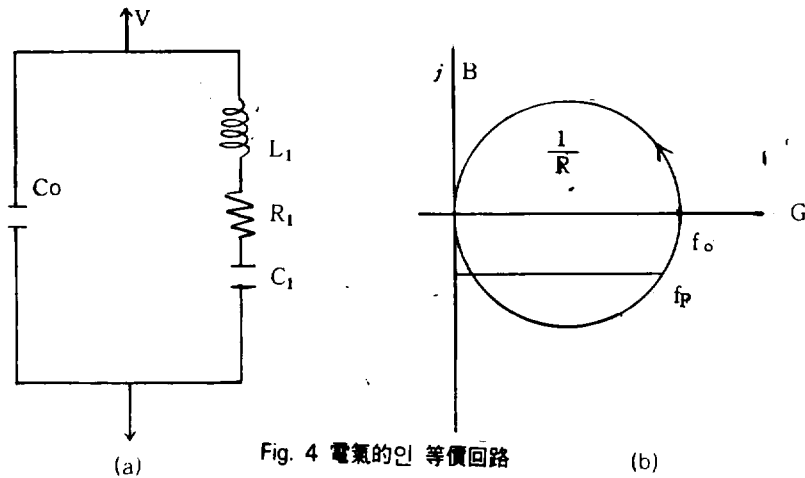


Fig. 4 電氣的인 等價回路

C_1 은 振動子의 강성도로 등가인 電氣量으로 치환한 값이다. 즉 C_0 와 C_1 의 比는 $r = C_0 / C_1$ 는 水晶振動子에서 측정된 電氣energy 와 機械energy 를 나누는 값이며, L_1 은 실효질량을 電氣量으로 치환한 등가 인덕턴스를, R_1 은 振動子 기계전기 값으로 치환한 energy 손실을 뜻한다. fig의 等價回路는 다음 式으로 나타낸다.

$$I = \left(\frac{1}{Z}\right) V = rV$$

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{R - j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \dots\dots\dots (21)$$

Y를 Conductance 와 Suceptance로 表示하면

$$Y = G + jB$$

$$Y = G(\omega) + jB(\omega)$$

$$G(\omega) = \frac{R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad B(\omega) = \frac{-\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \dots\dots\dots (22)$$

$G(\omega)$ 와 $B(\omega)$ 에서 ω 를 소거하면

$$G^2 + \left(\frac{G}{R}\right) + B^2 = 0 \dots\dots\dots (23)$$

윗 式은 fig. 4에 도시된다. 이때 I는 $B=0$ 에서 最大值와 共振周波數를 갖는다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_1}} \quad \text{또는} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \dots\dots\dots (24)$$

여기서 容量 C_0 를 포함하는 병렬 共振周波數는

$$f_p = f_0 \sqrt{1 + \left(\frac{C_1}{C_0}\right)} \dots\dots\dots (25)$$

式(19)의 彈性振動周波數는 式(25)의 共振周波數로 고주파 電壓에 의해 變換되어 예리한 共振特性을 나타내어 이것을 電氣 및 電子回路로 연결시켜 신호를 전송시키게 한다.

Fig. 5는 水晶振動子을 測定하기 위한 回路의 원리도이며 이를 C. I meten라 한다. C.Imeter의 基本回路 μ 는 일종의 증폭회로가 된다. 즉 이 回路는 vector量인 e_1 이 입력전압을 e_2 로한 출력전압으로 증폭시키게 된다. 이 e_1 와 e_2 와의 比 μ 는 fleet 또는 Grid 同調回路의 콘덴서를 조정하여 위상을 유지하기 때문에 동상이다.

e_2 인 電壓 switch s를 Q軸으로 할때 振動子 Q를 포함하는 β 回路를 통하여 e_1 인 전압으로 감쇠하고 μ 인 回路를 가한다. 그러면 $\mu\beta = 1$ 인 것을 만족하므로 이 발진기는 발진을 계속하게 된다. 또한 水晶發振子는 그 共振周波數 부근에서 아주 큰 리액턴스 變化을 하게 되는데 이때 回路의 콘덴서를 變化시켜 그 同調周波數 0.8~1.2배 程度의 範圍로 變化되어 μ 의 위상을 상당히 크게 變化시켜도 β 는 이것을 보완하여 $\mu\beta = 1$ 로서의 發振은 可能하다.

그렇지만 發振周波數 자체는 變化를 하지않아 μ 回路의 同調回路 周波數를 아주 水晶發振子의 공진

3. 實 驗

3.1 實 驗 裝 置

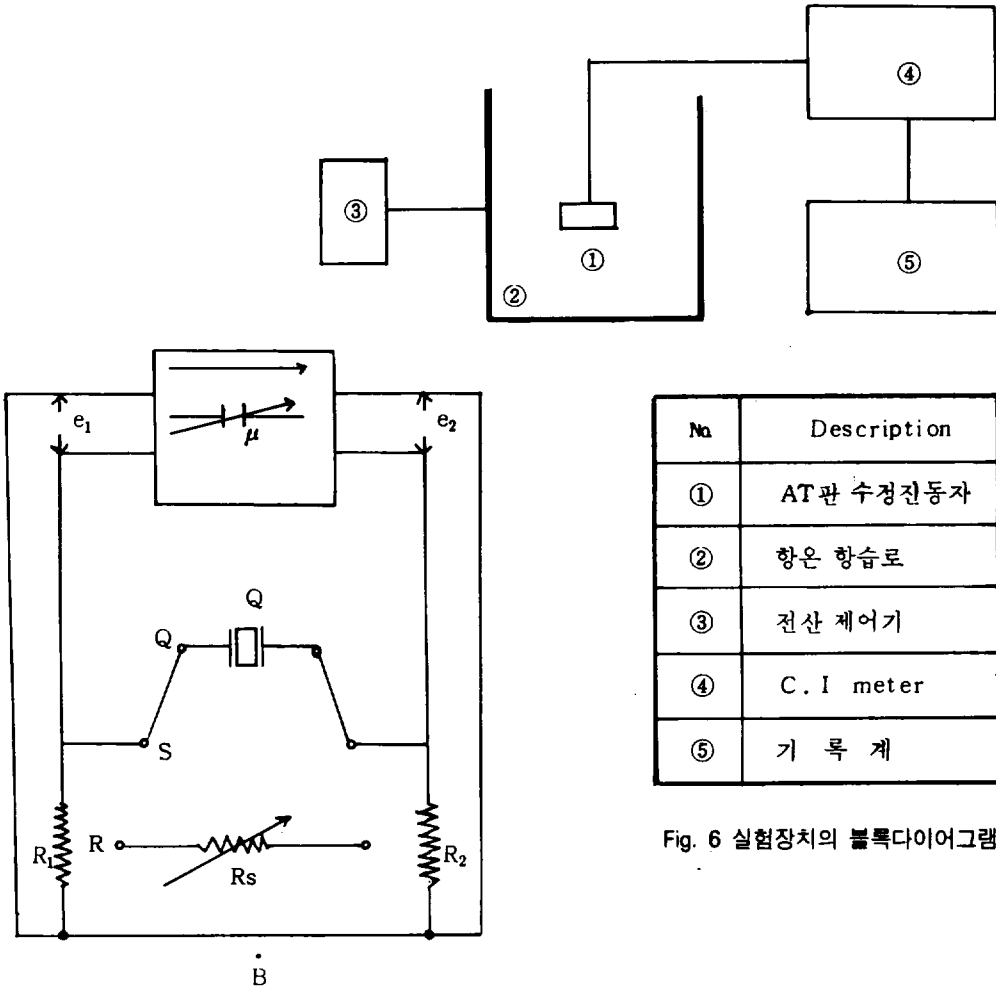
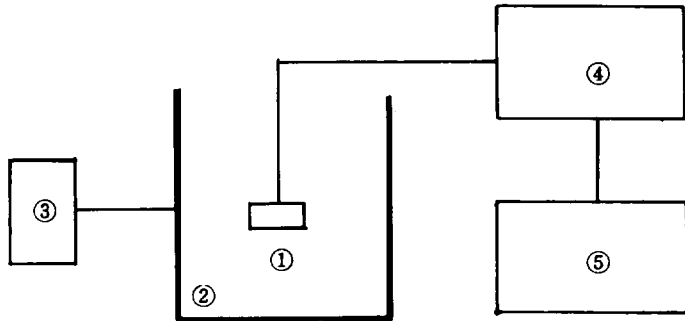


Fig. 5 C.I meter 원리도

주파수에서 분리되면 결국은 發振條件을 만족치 않고 정지한다.

S를 표준저항 R측에 대면 β 의 위상량은 0이 된다. 만약 이때 μ 가 계속 위상량을 유지하게 될경우 e_1 와 e_2 가 서로 동상이 아닌 경우에는 S가 R_s로 되어 μ 의 위상이 0으로된 周波數로 비약된다. 이때 연동 콘덴서를 조정하여 S를 R_s측으로 몇도 전환시킴과 동시에 R_s를 조정하여 그 발진 주파수가 S를



No	Description
①	AT 판 수정진동자
②	항은 항습로
③	전산 제어기
④	C. I meter
⑤	기록계

Fig. 6 실험장치의 블록다이어그램

Q에 대거나 R_s 특에 갖다 대어도 變化되지 않은 점을 구하면 發振子 Q는 공진상태로 있어 Q의 等價 저항은 R_s 와 같게 된다. 이 상태를 一應測定 동작점이라 하며 이 점을 찾아 變化하는 周波數를 구하면 된다.

3. 2 實驗方法

實驗은 AT板 水晶振動子 H. C. 49 μ Delco, 3. 600MHz, 4. 194MHz 및 H.C. 18 μ 4000MHz를 향한 항습도에 넣고 C.I meter에 연결하여 전산 制御器에서 溫度變化를 시키면서 고주파전압의 진동자전압을 가하게 되면 기록계에 기록된다. 이때 振動子에 각 8. 5. 5개씩 넣어 平均치를 구하여 본다.

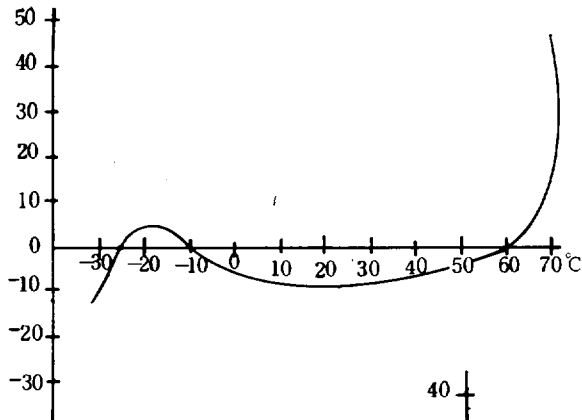


Fig. 7 H. C. 49 Delco 4,194MHz

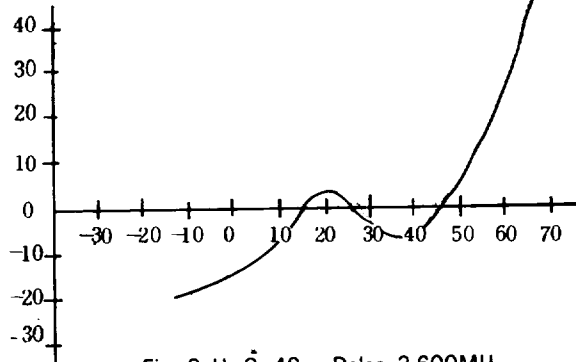


Fig. 8 H. C. 49 Delco 3,600MHz

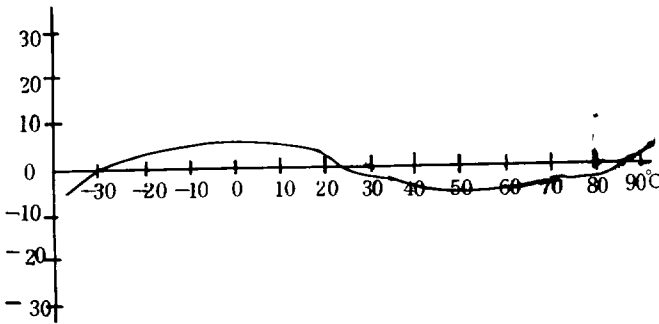


Fig. 9 H. C. 18 Delco 4,000MHz

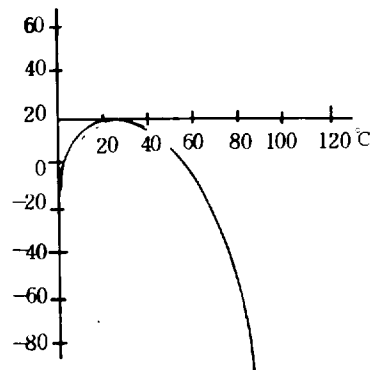


Fig. 10 X-板 水晶振動子(山下氏)

實驗結果는 Fig. 7.8.9에 나타내며 Fig. 10은 日本의山下氏の X板의 實驗結果이다. Fig. 7은 -10°C , -25°C , 60°C 에서 周波數의 變化率이 各各 0이되며 저온 또는 고온일때는 주파수變化率이 증가되거나 감소되는 현상을 보이고 있으며 Fig. 8에서는 15°C , 25°C , 45°C 에서 周波數變化率이 0이 되며 저온 또는 고온이 되면서 윗표보다 훨씬 많은 變化率을 보여주고 있다. 그러나, Fig. 9는 周波數變化率이 0이되는 점이 -30°C , 25°C , 85°C 로 광범위하게 分布되어 있으나 위의 두표와 같이 상온에서의 變化率이 0에 근사하게 分布되어 있지 않으며 저온이나 고온에서는 위와 달리 周波數變化率이 그렇게 크게 變化되고 있지 않다. 이들의 공통사항은 25°C 에서 항상 0이 되는데 이를 영온도계수라 부르며 이것을 영온도계수 水晶振動子라 부른다. 그리고 상온에서는 周波數變化率은 적으나 고온 또는 저온일때 變化率이 증가 또는 감소하고 있다는 점이다. 또한 다른 사항은 各各의 振動子가 25°C 를 제외하고 다른 영온도계수를 갖게되는데 또 Fig. 7과 8은 상온에서의 變化率이 거의 비슷한 현상을 보이는데 반해 Fig. 9는 상온에서의 變化率이 이와는 달리 정현(sine) 곡선을 보여주고 있다.

또한 山下氏の 實驗에서 보면 21°C 를 제외하고는 영온도계수를 갖고 있지 않으며 溫度가 증가또는 감소함에 따라서 周波數變化率은 현격하게 감소하고 있다는 점이다. 즉 Fig. 7. 8. 9는 AT 水晶振動子이며 Fig. 10은 X板 水晶振動子이며 各各의 特性으로 인하여 그 고유의 온도 特性을 나타내게 되는 것은 그 特性이 振動의 형태 또는 두께, 彈性常數에 의해 영향을 받아 이의 L.C.R 共振回路의 各各의 共振 周波數가 달라지게 되는 것이 그 원인으로 생각된다. 즉 Fig. 1에서와 같이 水晶은 비등방성 결정이며 振動形態가 Fig. 7. 8. 9에서와 같이 서로 다른 振動形態를 같은 AT 振動子라 할지라도 Fig. 12의 振動形態와 같은 상이한 振動을 한다. Fig. 7. 8. 9의 진동형태는 Fig. 11에서 溫度變化를 받으면 이 振動形態는 달라지게 되는 것을 보여주는데 (a)는 순수한 길이 팽창, (b)는 幅剪斷, (c)는 굽힘전단을 表示한다. 이것은 X板과 같은 길이 振動을 하는 경우에 해당된다.

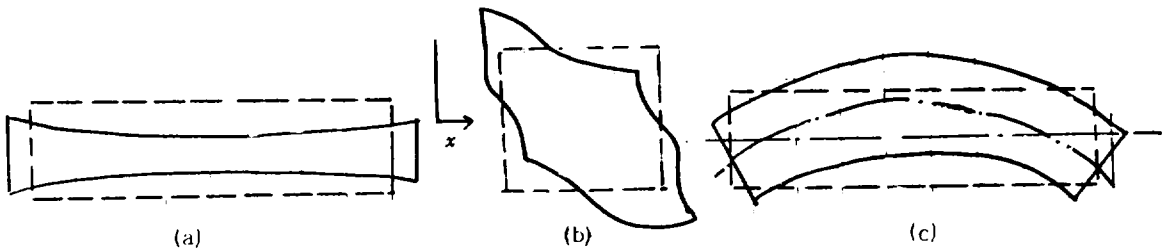


Fig. 11 온도 변화에 따른 진동형태

이의 振動波는 열팽창 및 축소에 따라 周波數變化率이 크게 달라지는 것이다.

또한 Fig. 12의 (a)는 두께 剪斷振動을 하는 振動子의 단순한 예인데 실제로는 Fig. 12 (b), (c)와 같이 복잡한 node와 mode형태로 두께 剪斷 overtone 振動을 하면서 振動한다. (b)는 一般的인 overtone 振動이며 (c)는 twist overtone 振動이다.

이 고유의 共振周波數는 式(19)에 의해 다른 양상을 보이는 것으로 생각되는데 一般的으로 두께전단을 하는 진동자의 진동과 λ 와 두께 t 와의 사이에 $\frac{\lambda}{2} = t$ 라는 관계가 成立하는데 이때 λ 의 周波數를 f 라 하면 $\lambda = \frac{v}{f}$ 이므로 溫度變化에 의하여 t 가 커지면 v 도 이와같이 달라 진다.

$$\text{즉 } v = \sqrt{\frac{c}{\rho}}, \quad F = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

즉 式(19)가 적용되는데 溫度상승에 의해 彈性波의 전파속도가 증대되면 λ 는 $\Delta\lambda$ 로 증대되고 周波數 역시 증가하게 된다. 溫度상승에 의해 Δt 의 증가율이 $\Delta t/t$ 와 λ 의 증가율 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta t}{t} \times \frac{1}{2}$ 이라는 關係가 成立하면 이에 따라 증가분을 소거 시키거나 상쇄시켜 周波數變化率은 생기지 않게 된다.

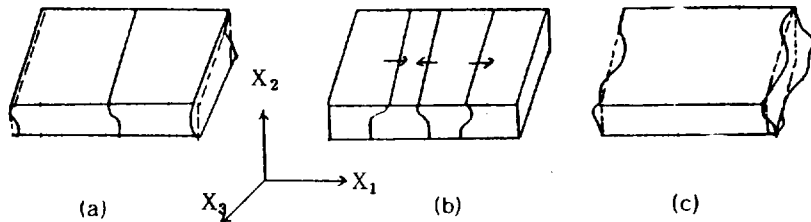


Fig. 12 두께 전단진동을 하는 진동자의 단순한 예

즉 전파속도 v 가 溫度變化에 의해 發生되지 않는 變化는 彈性常數의 溫度係數와 密度의 溫度係數가 동시에 行해지게 될 때이다.

즉 Fig. 7. 8. 9의 경우 周波數變化率이 0으로 되는 점이 이와 같은 경우라 생각된다.

Hafner氏는 水晶振動子の 溫度變化에 의한 式을 다음과 같이 表示하였다.

$$\Delta f = a(T-T_0) + b(T-T_0)^2 + c(T-T_0)^3 \dots\dots\dots (26)$$

여기서 a, b, c 는 周波數, T_0 는 溫度係數로 생각되는 진동형태의 효과적인 材料常數의 函數인데 $-200 \sim 200$ °C까지는 수정공진자의 경우에는 3차까지 구하는 것이 적합하다고 정의하였다.

그래서 X板의 경우에는 材料의 彈性常數가 密度의 溫度係數가 同時에 行해지고 있지 않기 때문에 위의 b 와 c 의 값이 거의 0으로 되어 溫度變化曲線은 2次曲線을 보여 주는데, AT板의 경우는 Fig. 12에서와 같은 진동형태로 인하여 溫度에 의한 周波數 變化率이 彈性常數의 溫度係數와 密度의 溫度係數가 거의 비슷하게 行해지므로 3차 또는 5차 정현곡선을 보여주는 것으로 생각되어 상온 및 상온 가까운 溫度에서는 AT板의 水晶振動子是 溫度의 安定性이 좋다.

Fig. 13은 P.L.L 방식의 동가회로의 구성예이다.

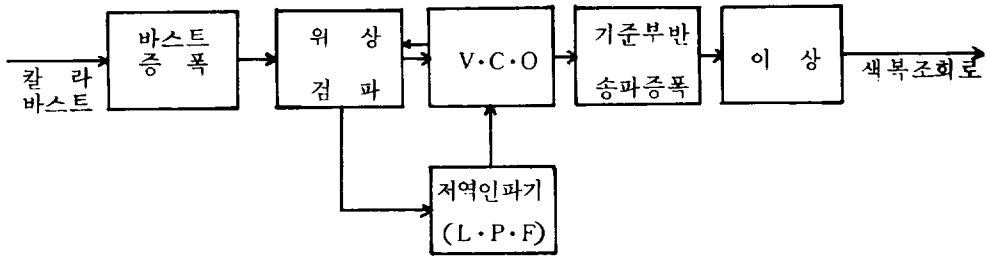


Fig. 13. P.L.L 방식의 동기회로 구성예

여기서 電壓制御 發振回路에 水晶振動子를 개입시켜 증폭회로로 귀환시키는 일종의 발진회로를 만들어 각 페이스에서 위상검파회로 출력으로부터 칼라박스와 V.C.O 出力의 위상차에 대응하여 직류전압을 가하여서 차동변합기에 의해 귀환 loop의 위상량을 변하게 하여 위상차를 0으로 하는 방향으로 반진 주파수를 변화하게 하는 것이다.

그러므로, 여기에 사용되는 水晶振動子에 대해서는 이상량의 변화에 대하여 충분한 周波數 變化量이 얻어질 수 있는 부하용량의 特性을 포함하는 것이 必要하게 된다. 여기에 利用되는 것이 AT 水晶振動子중에 3~4MHz를 使用하게 되는데 이 水晶振動子들이 發振子인 것이다.

Fig. 14에 나타내는 C. M. O. S - I. C의 인버터회로를 使用하여 게이트와 트레인 사이의 水晶振動子를 접속하여 振動子의 양끝에 Cg와 Cd를 개입하여 접지시킨다. Cg는 發振周波數와 미조정을 하기 위한 콘덴서이다.

發振상태의 等價回路는 Fig. 14인데 CL은 水晶 옆에 있는 회로전체의 용량인데 이 개략치는 다음과 같다.

$$C_L = \left(\frac{C_g + C_d}{C_o \cdot C_d} + C_{rc} \right)$$

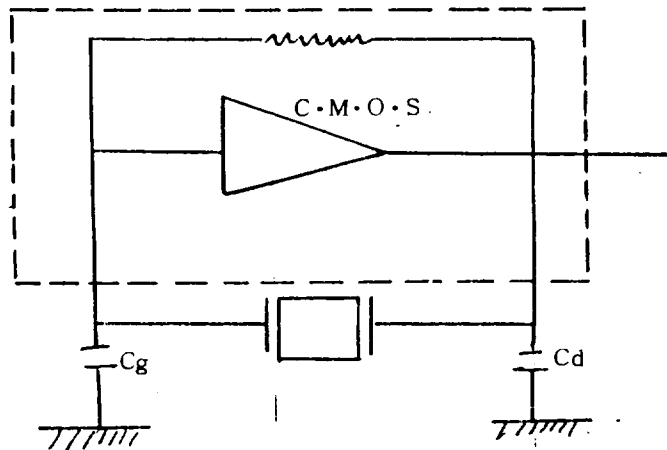


Fig. 14. C. M. O. S - I. C의 인버터 회로

또한 水晶振動子는 두께 測定에 있어서 내부흠을 檢出하는 非破壞檢査에도 利用이 되는데, 이 원리는 水晶振動子의 回路를 說明하면, 發振이 되어 고체로 입사된 超音波가 反對측면에서 反射되어 되돌아오고, 판의 두께가 마침 반파장의 정수 배가 되면 공진이 되어 정상파를 만들게 된다.

$$fn = \frac{n \cdot c}{2t}$$

그러나 공진방법은 檢出에 使用할 수도 있으나 檢出에 使用되는 것은 Pulse 反射法이다. 超音波를 1~50 KHz 정도의 周波數 Pulse를 가지고 材料內에 보내면 반대측에서 反射 Pulse의 형태로 돌아온다. 만일 도중에 缺陷이 있으면 그 部分에서 反射되어 저면반사보다 먼저 되돌아 오게 되므로 缺陷의 존재 위치를 알아낸다.

Fig. 15는 水晶振動子를 利用한 超音波測定의 원리도이다.

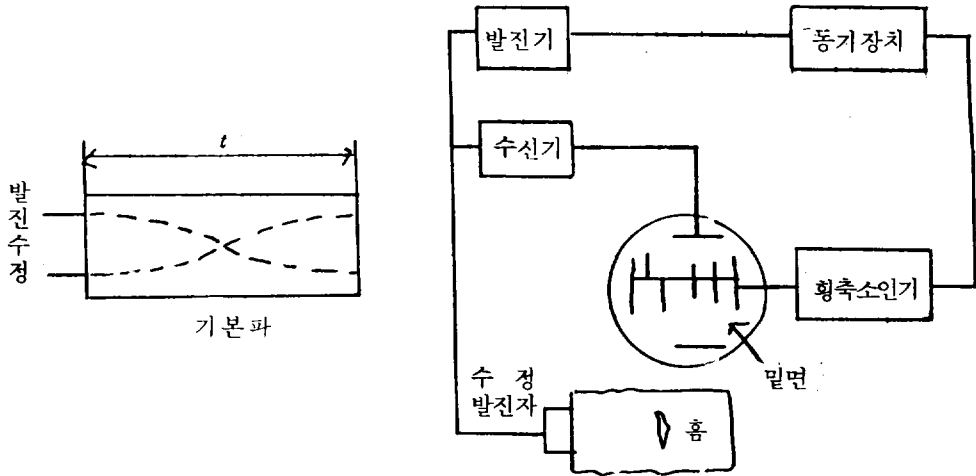


Fig. 15. 超音波測定의 원리도

4. 結 論

水晶은 다른 壓電素子보다 溫度係數가 安定되어 있는데 이 水晶振動의 溫度係數는 彈性係數와 密度에 영향을 많이 받아서 水晶振動子의 영온도계수를 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 AT板 水晶振動子라 할지라도 진동형태라든지 두께에 의해 周波數測定이 달라진다는 것을 알았다.

또한 AT板의 水晶振動子는 다른 水晶振動子보다 상온에서의 溫度安定性이 좋고 溫度範圍가 넓어 비교적 열저항을 많이 받는 제품에 이용될 수 있다는 것을 알게되었으며 水晶振動子는 壓電素子이므로 周波

數變化에 의해 機械的인 方式이 電氣的인 方式으로 전달됨을 알았다.
또한 振動子의 加工技術의 개발은 앞으로도 계속 研究되어야 할 것이다.

5. Reference

- 1) W. P. Mason, "Electromechanical Transducers and Wave Filters", (Van Nostrand, Princeton N. J., 1948)
- 2) 和高, 武田 ; 「高分解能探觸子」 NDI 資料 NO. 2838 (1981.1)
- 3) J. H. Goll ; The Design of Broad-Band Fluid-Loaded Ultrasonic Transducers, IEEE Trans. Vol. Su-26(1979) pp. 385-393.
- 4) C. S. Desilets, J. D. Frasen and G. S. Kino ; The Design of Efficient Broad-Band Piezo electric Transducers, IEEE Trans. Vol. Su-25(1978). pp. 115-125.
- 5) 福原熙明 ; 横波の全反射の際の音速變位 に関する數値實驗. NDI. 昭和 61年 1月. p12~16
- 6) 尾上守夫 ; 超音波探觸子 較正法, NDI, 昭和 56年10月. p768~771.
- 7) 岩崎秀夫, 泉守 ; 高温音響センサ一, AEセンサ一を中心として, NDI 昭和 56年10月 p.794~795.
- 8) 和高修三, 武田文雄 ; 高効率高距離分解能探觸子の 設計法, NDI, 昭和 56年10月. p.762~767.

Summary

This investigation on the dependence of the AT plate crystal vibrator on the temperature was carried out.

The results were as follows :

1. As the measurement range of temperature stability was increased, no other better crystal vibrator with respect to the temperature stability existed.
2. The vibration type and the thickness of the AT plate crystal vibrator depended on the frequencing characteristics of it.
3. The elasticity and the density of the crystal vibrator were varied according to the modulus of temperature.