

二層構造의 傳搬路를 갖는 彈性表面波의 溫度特性

(Temperature Characteristics of Elastic Layer Mode
Propagating on Piezoelectric Crystal)金 宗 相*
(Kim, Chong Sang)

要 約

壓電 結晶 LiNbO_3 에서 彈性表面波(Rayleigh 表面波)의 溫度係數가 가장 작은 131° 로테이트 Y컷트의 傳搬路에 Ag와 Pd를 蒸着하여 蒸着膜의 두께에 따른 位相速度의 變化和 位相速度의 溫度係數의 變化的 數值解析 方法에 依하여 計算하였다. 計算한 結果 Ag의 경우는 蒸着膜의 두께가 增加함에 따라 溫度係數가 급격히 增加하나 Pd의 경우는 增加와 減少의 不規則性을 보이며 $wh=9000$ 에서 $-36 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 位相速度의 溫度係數의 最少值를 얻었다.

Abstract

The temperature coefficients and phase velocity dispersions of elastic surface wave layer mode with Ag or Pd layer on piezoelectric LiNbO_3 substrate rotated 131° Y cut are calculated as a function of thickness by numerical method. Calculated results are shown that the temperature coefficients are rapidly increased in proportion as the thickness of Ag layer increases, and irregular variation of the temperature coefficients appears in the case of Pd layer. [Minimum value, $-36 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, of the temperature coefficients of elastic surface wave with Pd layer on LiNbO_3 substrate rotated 131° Y cut is obtained at $wh=9000$.

1. 序 論

彈性表面波 素子は 遲延線 및 필터에 使用되며 壓電媒質 表面위에 半導體를 設置하여 半導體에 直流을 흘려서 여기를 通過하는 彈性表面波와 相互作用시켜 彈性表面波를 增幅하는 裝置 및 光과의 相互作用을 利用하는 새로운 記憶素子로서 研究되어 지고 있다. 彈性表面波는 溫度에 따라서 位相速度가 달라져 遲延線에 있어서는 遲延時間도 달라지게 된다. 彈性表面波素子로서 가장 많이 利用되고 있는 LiNbO_3 에 對하여 溫度特性이 가장 좋은 컷트는 131° 로테이트 Y 컷트라는 것은 本 論文에서는 131° 로테이트 Y 컷트위 傳搬路

報告되어 있다.¹⁻⁵⁾

에 彈性定數의 溫度係數가 負인 Ag와 正인 Pd를 蒸着하였을 때 位相速度의 溫度係數를 數值解析 方法에 依하여 求하여 보았다.

2. 解析 및 計算結果

壓電 基板으로서 131° 로테이트 Y 컷트의 LiNbO_3 을 使用하고 그위에 立方晶系의 媒質을 蒸着한 그림 1과 같은 二層構造의 傳搬路를 生覺한다. 이러한 二層構造의 傳搬路를 彈性表面波가 傳搬할때 蒸着膜의 두께에 따라 速度 分散이 일어나게 된다. 먼저 이러한 速度 分散을 求하고 어느 溫度 $T^\circ\text{C}$ 에서 또 速度 分散을 求하여 蒸着膜의 두께에 따른 位相速度의 溫度係數를 求하기로 한다.

基板이 131° 로테이트 Y 컷트의 LiNbO_3 임으로 彈性定數 C^E , 壓電定數 e , 誘電率 ϵ^s 를 座標 變

* 正會員, 서울大學校 工科大學
College of Engineering,
Seoul National University

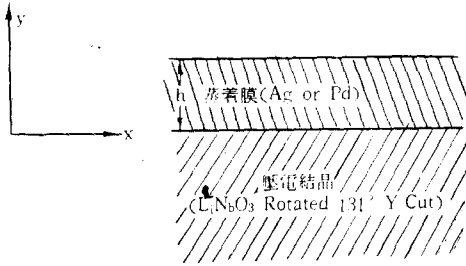


그림 1. 二層構造의 傳播路

換¹⁾하여 變換된 各 定數를 C' , e' , ϵ' 라 한다. 應力 T 는 아래와 같이 쓸수있다. (附錄 참조)

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= C'_{11}S_1 + C'_{12}S_2 + C'_{13}S_3 + C'_{14}S_4 \\ &\quad - e'_{21}E_2 - e'_{31}E_3 \\ T_2 &= C'_{12}S_1 + C'_{22}S_2 + C'_{23}S_3 + C'_{24}S_4 \\ &\quad - e'_{22}E_2 - e'_{32}E_3 \\ T_3 &= C'_{13}S_1 + C'_{23}S_2 + C'_{33}S_3 + C'_{34}S_4 \\ &\quad - e'_{23}E_2 - e'_{33}E_3 \\ T_4 &= C'_{14}S_1 + C'_{24}S_2 + C'_{34}S_3 + C'_{44}S_4 \\ &\quad - e'_{24}E_2 - e'_{34}E_3 \\ T_5 &= C'_{55}S_5 + C'_{56}S_6 - e'_{15}E_1 \\ T_6 &= C'_{56}S_5 + C'_{66}S_6 - e'_{16}E_1 \end{aligned} \right\} (1)$$

여기서 S 는 變形이고 E 는 電界를 나타낸다. 또 電氣變位 D 는 아래와 같이 쓰여진다.

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= e'_{15}S_5 + e'_{16}S_6 + \epsilon'_{11}E_1 \\ D_2 &= e'_{21}S_1 + e'_{22}S_2 + e'_{23}S_3 + e'_{24}S_4 \\ &\quad + \epsilon'_{22}E_2 + \epsilon'_{23}E_3 \\ D_3 &= e'_{31}S_1 + e'_{32}S_2 + e'_{33}S_3 + e'_{34}S_4 \\ &\quad + \epsilon'_{23}E_2 + \epsilon'_{33}E_3 \end{aligned} \right\} (2)$$

實際 彈性表面波의 z 方向의 變化가 없으므로 $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ 라 하고 變形 S 를 求하면 아래와 같다.

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ S_2 &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ S_3 &= 0 \\ S_4 &= \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ S_5 &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ S_6 &= \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \end{aligned} \right\} (3)$$

여기서 u 는 振動變位이며 u_x, u_y, u_z 는 各 振動變位의 x, y, z 方向 成分을 나타낸다.

또한 電界 $E = -\text{grad}\phi$ 로 부터 電位 ϕ 는 아래와 같이 쓸수 있다.

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} \\ E_2 &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} \\ E_3 &= 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

그리고 運動 方程式은 아래와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_6}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= \frac{\partial T_6}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \frac{\partial T_5}{\partial x} + \frac{\partial T_4}{\partial y} \end{aligned} \right\} (5)$$

여기서 ρ 는 壓電媒質 即 LiNbO_3 의 密度이다.

또 $\text{div } D = 0$ 로 부터

$$\frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial D_2}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

式 (5)과 (6)式에 (1), (2), (3) 및 (4)式을 代入하여 整理하면 아래와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= C'_{11} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + C'_{66} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + (C'_{12} \\ &\quad + C'_{66}) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + (C'_{14} + C'_{56}) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} \\ &\quad + (e'_{21} + e'_{16}) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} &= C'_{66} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + C'_{56} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + C'_{22} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \\ &\quad + C'_{24} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + (C'_{12} + C'_{66}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} \\ &\quad + e'_{16} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + e'_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= C'_{55} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + C'_{56} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + C'_{24} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \\ &\quad + C'_{44} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + (C'_{14} + C'_{56}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} \\ &\quad + e'_{15} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + e'_{24} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ e'_{15} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + e'_{16} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + e'_{22} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + e'_{24} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \\ &\quad + (e'_{16} + e'_{21}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \epsilon'_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ &\quad - \epsilon'_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

彈性表面波가 $-y$ 方向으로 감쇄하면서 v 的位相速度로 x 方向으로 傳播하기 때문에 u 및 ϕ 를 아래와 같이 假定한다.

$$\left. \begin{aligned} u_x &= A \exp [\Omega ky + jk(x-vt)] \\ u_y &= B \exp [\Omega ky + jk(x-vt)] \\ u_z &= F \exp [\Omega ky + jk(x-vt)] \\ \phi &= G \exp [\Omega ky + jk(x-vt)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8)式을 (7)式에 代入하여 整理하면 아래와 같은 特性方程式을 얻는다.

$$\left[D(\Omega) \right] \begin{pmatrix} A \\ B \\ F \\ G \end{pmatrix} = 0 \quad (9)$$

(9)式이 解를 갖기 위해서는 $|D(\Omega)|=0$ 이어야 한다. $|D(\Omega)|=0$ 를 풀면 Ω 에 對하여 8次方程式이 얻어진다. 이 8次方程式의 根 Ω 는 8個이나 real $[\Omega]$ 가 負인 경우는 $-y$ 方向으로 감쇄없이 振幅이 增加하게 되므로 부적합하여 버리고 real $[\Omega]$ 가 正인 4個의 根만을 取한다.

그러므로 (8)式은 아래와 같이 다시 써야 한다

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \sum_{i=1}^4 A^{(i)} \exp [\Omega^{(i)} ky + jk(x-vt)] \\ u_y &= \sum_{i=1}^4 B^{(i)} \exp [\Omega^{(i)} ky + jk(x-vt)] \\ u_z &= \sum_{i=1}^4 F^{(i)} \exp [\Omega^{(i)} ky + jk(x-vt)] \\ \phi &= \sum_{i=1}^4 G^{(i)} \exp [\Omega^{(i)} ky + jk(x-vt)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

다음에는 蒸着膜을 生覺한다.

蒸着膜은 Ag, Pd와 같은 立方晶系이므로 應力 T_L 은 아래와 같이 表示된다.

$$\left. \begin{aligned} T_{1L} &= C_{11L}S_{1L} + C_{12L}(S_{2L} + S_{3L}) = C_{11L} \frac{\partial u_{xL}}{\partial x} \\ &\quad + C_{12L} \frac{\partial u_{yL}}{\partial y} \\ T_{2L} &= C_{12L}(S_{1L} + S_{3L}) + C_{11L}S_{2L} \\ &= C_{12L} \frac{\partial u_{xL}}{\partial x} + C_{11L} \frac{\partial u_{yL}}{\partial y} \\ T_{3L} &= C_{12L}(S_{1L} + S_{2L}) + C_{11L}S_{3L} \\ &= C_{12L} \left(\frac{\partial u_{xL}}{\partial x} + \frac{\partial u_{yL}}{\partial y} \right) \\ T_{4L} &= C_{66L}S_{4L} = C_{66L} \frac{\partial u_{zL}}{\partial y} \\ T_{5L} &= C_{66L}S_{5L} = C_{66L} \frac{\partial u_{zL}}{\partial x} \\ T_{6L} &= S_{66L}S_{6L} = C_{66L} \left(\frac{\partial u_{yL}}{\partial x} + \frac{\partial u_{xL}}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$D_{1L} = \epsilon_{11L} E_{1L} = -\epsilon_{11L} \frac{\partial \phi_L}{\partial x} = 0$$

$$D_{2L} = \epsilon_{11L} E_{2L} = -\epsilon_{11L} \frac{\partial \phi_L}{\partial y} = 0$$

$$D_{3L} = \epsilon_{11L} E_{3L} = -\epsilon_{11L} \frac{\partial \phi_L}{\partial z} = 0$$

여기서 添字 L 는 蒸着膜 Layer 를 意味한다. 또한 일반적으로 導體는 $\phi_L=0$ 이다.

또 蒸着膜에서의 運動方程式은 (5)式으로 부터 아래와 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \rho_L \frac{\partial^2 u_{xL}}{\partial t^2} &= C_{11L} \frac{\partial^2 u_{xL}}{\partial x^2} + C_{66L} \frac{\partial^2 u_{xL}}{\partial y^2} \\ &\quad + (C_{12L} + C_{66L}) \frac{\partial^2 u_{yL}}{\partial x \partial y} \\ \rho_L \frac{\partial^2 u_{yL}}{\partial t^2} &= C_{66L} \frac{\partial^2 u_{yL}}{\partial x^2} + C_{11L} \frac{\partial^2 u_{yL}}{\partial y^2} \\ &\quad + (C_{12L} + C_{66L}) \frac{\partial^2 u_{xL}}{\partial x \partial y} \\ \rho_L \frac{\partial^2 u_{zL}}{\partial t^2} &= C_{66L} \left(\frac{\partial^2 u_{zL}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{zL}}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

蒸着膜에서의 振動變位の x, y, z 成分은 아래와 같이 假定한다.

$$\left. \begin{aligned} u_{xL} &= H \exp [\Omega_L ky + jk(x-vt)] \\ u_{yL} &= K \exp [\Omega_L ky + jk(x-vt)] \\ u_{zL} &= L \exp [\Omega'_L ky + jk(x-vt)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

u_{zL} 에 대한 것은 나중에 생각하기로 하고 (13) 式의 u_{xL} 및 u_{yL} 를 (12)式에 代入하여 整理하면 아래와 같이 된다.

$$\left\{ \begin{aligned} &(\Omega^2_L C_{66L} - C_{11L} + \rho_L v^2) j \Omega_L (C_{12L} + C_{66L}) \\ &j \Omega_L (C_{12L} + C_{66L}) \quad \Omega^2_L C_{11L} - C_{66L} + \rho_L v^2 \end{aligned} \right\} \begin{pmatrix} H \\ K \end{pmatrix} = 0 \quad (14)$$

이 同次方程式이 解를 갖기 위해서 係數의 行列式이 零이 되어야 한다. Ω 에 對하여 풀면 4次方程式이 되어 根은 4個가 된다. 이때는 根 4個를 全部 取하여야 하므로 (13)式의 u_{xL}, u_{yL} 은 아래와 같이 다시 써야한다.

$$\left. \begin{aligned} u_{xL} &= \sum_{i=1}^4 H^{(i)} \exp [\Omega^{(i)}_L ky + jk(x-vt)] \\ u_{yL} &= \sum_{i=1}^4 K^{(i)} \exp [\Omega^{(i)}_L ky + jk(x-vt)] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

다음에는 境界 條件²⁾을 生覺한다.

$$y=0 \text{에서}$$

$$u_{xL} = u_x \quad (16)$$

$$u_{yL} = u_y \quad (17)$$

$$u_{zL} = u_z \quad (18)$$

$$T_{6L} = T_6 \quad (19)$$

$$T_{2L} = T_2 \quad (20)$$

$$T_{4L} = T_4 \quad (21)$$

$$D_{2L} = D_2 = 0 \quad (22)$$

또 $y=h$ 에서

$$T_{6L} = 0 \quad (23)$$

$$T_{2L} = 0 \quad (24)$$

$$T_{4L} = 0 \quad (25)$$

이와 같이 境界條件은 10種으로 이를 8種으로 줄여 본다. 即 (13)式의 u_{zL} 를 (12)式에 代入하여 Ω_L 를 求해 보면

$$\Omega'_{L1} = \sqrt{\frac{C_{66L} - \rho_L v^2}{C_{66L}}}$$

$$\Omega'_{L2} = -\sqrt{\frac{C_{66L} - \rho_L v^2}{C_{66L}}} \quad (26)$$

그러므로 u_{zL} 은 아래와 같이 된다.

$$u_{zL} = L \exp [\Omega'_{L1}ky + M\Omega'_{L2}ky + jk(x-vt)] \quad (27)$$

그런데 여기서 境界條件 中에서 (18)式과 (25)式을 使用하면 u_{zL} 은 아래의 같이 다시 고쳐진다.

$$u_{zL} = \frac{u_z(0)}{1+M} \exp [\Omega'_{L1}ky + \Omega'_{L2}ky + jk(x-vt)] \quad (28)$$

여기서 $M = \exp [(\Omega'_{L1} - \Omega'_{L2})kh]$ 이고 $u_z(0)$ 은 $y=0$ 에서의 u_z 이다.

(28)式을 (21)式에 代入하게 되므로 結果적으로 境界條件은 (18), (25)式을 除外한 8種이 된다.

그러므로 (2), (3), (10), (11), (15) 및 (28)式을 8種의 境界條件에 代入하여 整理하면 同次方程式이 얻어진다. 이 同次方程式의 係數의 行列式이 零이 되어야 한다.

$$\text{即 } |D| = 0 \quad (29)$$

처음 v 를 假定하여 Ω , 및 (10)式과 (15)式에서 係數의 關係를 求하여 (29)式에 代入하여 (29)式이 만족될때 까지 電子計算機로 反復 計算하여 (29)式을 만족하는 V 의 値가 彈性表面波의 位相速度이다. 이 位相速度는 wh 에 따라서 變化하는 速度 分散이 나타난다. 蒸着膜이 Ag, Pd 일 경우 速度 分散 曲線은 그림 2,3과 같다.

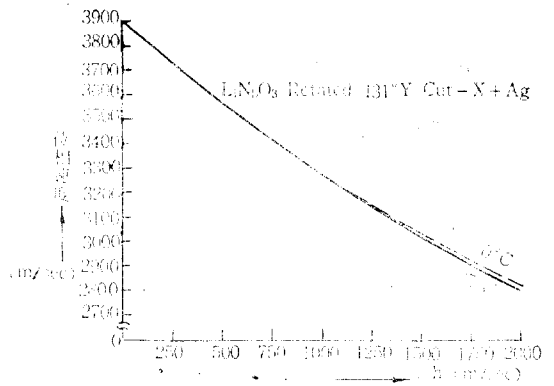


그림 2. 位相速度의 分散曲線

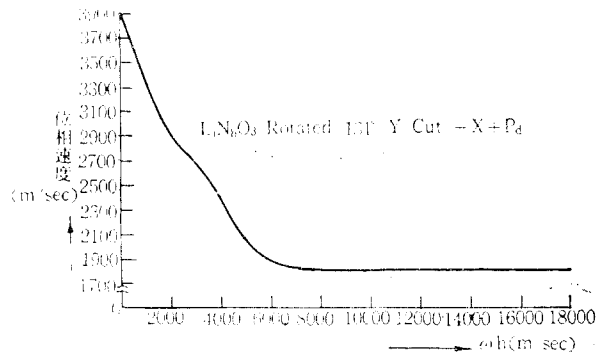


그림 3. 位相速度의 分散曲線

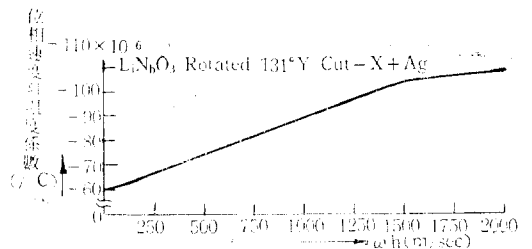


그림 4. wh 에 따른 位相速度의 溫度係數

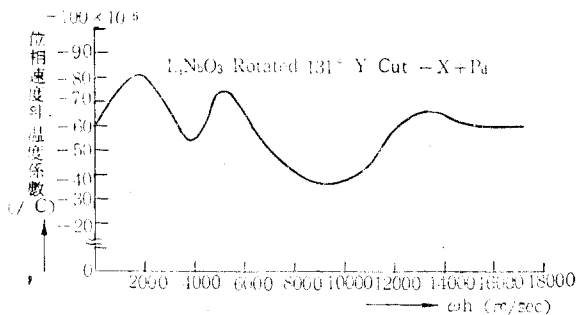


그림 5. wh 에 따른 位相速度의 溫度係數

또 溫度係數를 求하기 위해서는 어느 溫度 $T^\circ C$

에서 彈性定數, 壓電定數, 誘電率을 求해서¹⁻⁵⁾ 앞서 論한 方法대로 v_T 를 求하여 室溫에서 位相速度 v_R 와의 關係¹⁻⁵⁾로부터 wh 에 따라 位相速度의 溫度係數를 求한다. 이 計算 結果는 그림 4, 5와 같다.

3. 計算 結果의 檢討

LiNbO₃ 로테이트 131° Y컷트 위에 Ag를 蒸着하였을때 角周波數 w 와 蒸着膜의 두께 h 의 積의 函數로서 彈性表面波의 位相速度가 分散됨을 그림 2는 表示하며 wh 가 增加함에 따라서 位相速度가 減少한다. 그림 3은 Pd를 蒸着하였을때의 分散曲線으로 wh 를 아주 크게하여 12000 以上되게 하면 位相速度는 거의 一定한 1800m/sec로 된다. 이는 $wh=12000$ 以上에서는 速度分散이 없 어지고 壓電媒質과 蒸着媒質의 定數들로 決定되는 一定한 速度로서 生覺되어 지며 $wh=0$ 인 경우는 前에 報告한 참고 문헌(1)에서 $\phi=0$ 로 하여 計算한 值와 一致한다. 即 傳搬路를 電氣的으로 短絡하였다고 假定하였을 때의 位相速度와 一致한다.

그림 4는 Ag를 蒸着하였을때의 wh 에 따른 位相速度의 溫度係數를 보여 주는데 LiNbO₃의 彈性定數의 溫度係數가 負이고 Ag의 彈性定數의 溫度係數도 負이므로 位相速度의 溫度係數가 增加한다고 보여지며, 彈性定數의 溫度係數가 正인 Pd의 경우는 그림 5와 같다. LiNbO₃의 彈性定數의 溫度係數는 負이나 壓電定數 및 誘電率의 一部の 溫度係數가 正이므로 wh 에 따라서 速度分

散이 일어 날때 LiNbO₃와 Pd의 어느 定數가 位相速度에 크게 기여하는 가에 따라서 그림 5와 같이 溫度係數의 增加, 減少가 나타나게 되어 진다고 볼수 있다.

4. 結 論

壓電結晶 LiNbO₃ 로테이트 131° Y컷트위에 Ag와 Pd를 蒸着하여 彈性表面波의 傳搬路가 二層構造로 되어 있을때 位相速度의 分散特性이 나타나며 Pd의 경우 $wh=12000$ 以上되면 速度分散 현상이 없어진다.

位相速度의 溫度係數는 Ag의 경우 $wh=2000$ 까지 계속 增加하게 되나 Pd의 경우는 不規則的으로 變하며 $wh=9000$ 에서 最少值 ($-36 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)가 나타남을 알았다. 또한 $wh=12000$ 以上の 速度分散이 없는 경우에는 溫度係數도 一定하게 됨을 알았다.

附 錄

本 論文의 計算에 使用한 Ag와 Pd의 溫度係數는 아래 表와 같다.

物質名	Pd				Ag			
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	ρ	C_{11}	C_{12}	C_{44}	ρ
溫度係數 ($\times 10^{-4}$)	1.079	2.31	1.74	0.35	2.3	1.5	4.0	0.5

(1)式과 (2)式은 다음과 같이 求해 진다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & C'_{14} & 0 & 0 \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{23} & C'_{24} & 0 & 0 \\ C'_{13} & C'_{23} & C'_{33} & C'_{34} & 0 & 0 \\ C'_{14} & C'_{24} & C'_{34} & C'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{55} & C'_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{56} & C'_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & e'_{21} & e'_{31} \\ 0 & e'_{22} & e'_{32} \\ 0 & e'_{23} & e'_{33} \\ 0 & e'_{24} & e'_{34} \\ e'_{15} & 0 & 0 \\ e'_{16} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e'_{15} & e'_{16} \\ e'_{21} & e'_{22} & e'_{23} & e'_{24} & 0 & 0 \\ e'_{31} & e'_{32} & e'_{33} & e'_{34} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon'_{22} & \epsilon'_{23} \\ 0 & \epsilon'_{23} & \epsilon'_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

(9)式의 $|D(\rho)|$ 는 參考文獻 (1)의 附錄을 참조하면 되고 (11)式은 立方晶系에서 아래와같이 求해

진다.

$$\begin{pmatrix} T_{1L} \\ T_{2L} \\ T_{3L} \\ T_{4L} \\ T_{5L} \\ T_{6L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11L} & C_{12L} & C_{12L} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12L} & C_{11L} & C_{12L} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12L} & C_{12L} & C_{11L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{66L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{1L} \\ S_{2L} \\ S_{3L} \\ S_{4L} \\ S_{5L} \\ S_{6L} \end{pmatrix}$$

(29)式은 아래와 같다.

$$\det \begin{pmatrix} u_{xL}^{(1)}(0) & u_{xL}^{(2)}(0) & u_{xL}^{(3)}(0) & u_{xL}^{(4)}(0) & -u_x^{(1)}(0) & -u_x^{(2)}(0) & -u_x^{(3)}(0) & -u_x^{(4)}(0) \\ u_{yL}^{(1)}(0) & u_{yL}^{(2)}(0) & u_{yL}^{(3)}(0) & u_{yL}^{(4)}(0) & -u_y^{(1)}(0) & -u_y^{(2)}(0) & -u_y^{(3)}(0) & -u_y^{(4)}(0) \\ T_{6L}^{(1)}(0) & T_{6L}^{(2)}(0) & T_{6L}^{(3)}(0) & T_{6L}^{(4)}(0) & -T_6^{(1)}(0) & -T_6^{(2)}(0) & -T_6^{(3)}(0) & -T_6^{(4)}(0) \\ T_{2L}^{(1)}(0) & T_{2L}^{(2)}(0) & T_{2L}^{(3)}(0) & T_{2L}^{(4)}(0) & -T_2^{(1)}(0) & -T_2^{(2)}(0) & -T_2^{(3)}(0) & -T_2^{(4)}(0) \\ T_{4L}^{(1)}(0) & T_{4L}^{(2)}(0) & T_{4L}^{(3)}(0) & T_{4L}^{(4)}(0) & -T_4^{(1)}(0) & -T_4^{(2)}(0) & -T_4^{(3)}(0) & -T_4^{(4)}(0) \\ T_{6L}^{(1)}(h) & T_{6L}^{(2)}(h) & T_{6L}^{(3)}(h) & T_{6L}^{(4)}(h) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{2L}^{(1)}(h) & T_{2L}^{(2)}(h) & T_{2L}^{(3)}(h) & T_{2L}^{(4)}(h) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -D_2^{(1)}(0) & -D_2^{(2)}(0) & -D_2^{(3)}(0) & -D_2^{(4)}(0) \end{pmatrix} = 0$$

參 考 文 獻

- 1) 金宗相 : 大韓電子工學 會誌 73.6. 第10卷 3 號 p.141.
- 2) 金宗相, 山之內, 柴山; 日本 音響學會講演 論文集, 72年 10月 p.411.
- 3) 金宗相, 山之內, 柴山; 日本 電氣關係學會 東北支部 連合大會 講演 論文集, 72年 8月 p. 19.

- 4) 金宗相, 山之內, 柴山; 日本 東北大學電氣通 信研究所 第170回 音響工度研究會 資料 72年 6月
- 5) Chong Sang Kim, Yamanouchi, Karazawa, Shibayama; J. J. A. P Vol. 13. No. 1, 1974 年 1月 掲載豫定.
- 6) 阿部, 山之內, 柴山 日本 音響學會 講演 論 文集 72年 5月 p. 157.