

# 트랜스포머에 의한 수중 음향 트랜스듀서의 송수신 특성의 변화

°조치영\*, 이정민\*

## Changes in Transmitting-Receiving Characteristics of Underwater Acoustic Transducer by Transformer

°Chee-Young Joh and Jung-Min Lee

### ABSTRACT

In this study, the changes in transmitting and receiving characteristics, especially resonance frequencies, of the underwater acoustic planar array transducer by the transformers used in the analog weighting circuit are investigated. Electrical equivalent circuit analysis shows that an ideal transformer does not change the resonance frequency of the transmitting mode, but the resonance frequency which gives the maximum receiving sensitivity can be designed by adjusting the magnitude of reactance of transformer.

### 1. 머리말

수중 음향 트랜스듀서는 수중에서 음파를 이용하여 목표물을 탐지, 추적, 식별하기 위한 센서로서 일반적으로 음원으로는 그림 1과 같이 압전 세라믹을 가운데 두고 양쪽에 점, 후면추를 결합하여 만든 Tonpitz형 진동체가 널리 이용된다<sup>(1)</sup>. 진동체의 길이방향 모드의 공진 주파수로 압전 세라믹의 양단에 교류 전압을 가하여 길이 방향의 피스톤 운동으로 발생하는 음파를 음원으로 사용한다. 그런데 하나의 음원만으로는 원하는 방사패턴을 구현하기가 힘들기 때문에 동일한 음원을 평면에 배열하여 각 음원의 상대적인 세기를 조절함으로써 원하는 빔 패턴을 얻는다<sup>(2)</sup>.

한편 원하는 송신 및 수신용 빔 패턴을 구현하기 위해서는 각각의 모드에 대해 각 음원의 상대적인 크기 및 위상차를 갖는 가중치를 부여할 수

있는 아나로그 가중회로를 설계하여 사용한다<sup>(3)</sup>. 이러한 아나로그 가중회로 설계에는 트랜스포머가 널리 이용되는데 1, 2차측 코일의 감는 횟수를 조절함으로써 상대적인 리액턴스(reactance) 값을 설계하여 각 진동체의 가중치를 부여한다. 그런데 트랜스포머를 사용함으로써 트랜스포머의 리액턴스 값이 음향 트랜스듀서의 송수신 회로의 전기적 특성, 특히 송신 및 수신 모드에서 최대 감도가 얻어지는 공진 주파수의 변화에 미치는 영향을 해석하여 이를 트랜스포머의 설계에 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 샌드위치형 압전 세라믹 트랜스듀서가 음원으로 이용된 평면 배열 수중 음향 트랜스듀서에 대해, 아나로그 가중회로에 사용된 트랜스포머가 트랜스듀서의 송신 및 수신 특성에 미치는 영향, 특히 공진 주파수의 변화를 고찰하였다. 전기적 등가회로 해석을 통하여 이상적인 트랜스포머를 사용할 경우 송신 모드의 공진 주파수는 변화가 없고, 수신 특성은 사용 주파수 범위 내에서 트랜스포머의 리액턴스 값을 적절히 조절함으로써 최대 수신 감도가 얻어지는 공진 주파수를

\* 국방과학연구소 2본부 수중음향센서연구실

설계할 수 있음을 보였다.

## 2. 등가회로 모델링

그림 1의 샌드위치형 압전 세라믹 트랜스듀서에 대해 후면추의 공기중 방사 임피던스를 무시하고 전면추에서의 수중 방사 임피던스만을 고려하여, 전기적 등가회로를 그리면 그림 2와 같다. 구성 요소의 내부 특성보다 입, 출력 간의 관계에 관심이 있을 경우 다음과 같이 전송 파라미터를 이용한 관계식이 유용하다<sup>(4)</sup>.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$A_2 = 1, \quad B_2 = Z_m, \quad C_2 = j\omega C_0, \quad D_2 = 1 + j\omega C_0 Z_m$$

$$Z_m = \frac{R_m + j\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)}{N^2}$$

여기서  $V_1, I_1$  은 세라믹에 가해지는 구동 전압과 전류이며,  $V_2, I_2$ 는 전면추면에서 방사 임피던스에 가해지는 출력 전압과 전류를 나타낸다. 그리고  $C_0$ 는 트랜스듀서의 제지 정전 용량 (clamped capacitance) 이며  $R_m, L_m, C_m$ 은 각각 트랜스듀서의 기계적 손실, 질량, 강성과 관련된 전기적 상수이며,  $N$ 은 트랜스듀서의 변환 효율이다.

여기서 트랜스듀서의 입력 임피던스  $Z_0$ 는 수중 방사 임피던스  $Z_w$ 의 등가 회로 임피던스

$$Z_L \left( = \frac{Z_w}{N^2} \right) \text{에 대한 출력 전압 } V_2 = I_2 Z_L \text{ 을 식 (1)}$$

에 대입하고 정리하면 다음의 식으로 표현된다.

$$Z_0 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{A_2 Z_L + B_2}{C_2 Z_L + D_2} \quad (2)$$

$$= \frac{Z_L + R_m + j\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)}{1 - \omega C_0 \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right) + j\omega (Z_L + R_m) C_0}$$

여기서 방사 임피던스와 트랜스듀서의 손실을 무시하면, 즉  $Z_L = R_m = 0$  일 때, 식 (2)에서 입력 임피던스의 크기가 최소가 되는 기계적 공진 주파수  $\omega_0$ 와 입력 임피던스의 크기가 최대가 되는 전기적 반공진 주파수  $\omega_a$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}}, \quad \omega_a = \sqrt{\frac{C_m + C_0}{L_m C_m C_0}} \quad (3)$$

그림 3은 아나로그 가중회로 구성에 널리 사용되는 트랜스포머의 전기적 등가회로를 그린 것으로, 전송 파라미터 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{L_1}{M}, \quad B_1 = \frac{j\omega(L_1 L_2 - M^2)}{M}$$

$$C_1 = \frac{1}{j\omega M}, \quad D_1 = \frac{L_2}{M}$$

여기서  $L_1, L_2$ 는 각각 트랜스포머의 1, 2차측의 리액턴스이며,  $M$ 은 상호 인덕턴스로서 결합계수  $k$ 를 이용하여 다음의 식으로 정의된다.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}; \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (5)$$

그림 4는 트랜스듀서와 트랜스포머가 결합된 전체 시스템의 송신 및 수신 모드에 대한 등가회로를 그린 것이다. 전체 시스템에 대한 입출력 관계식은 식 (1), (4)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{M} [L_1 - \omega^2 C_0 (L_1 L_2 - M^2)]$$

$$B = \frac{1}{M} [L_1 Z_m - \omega^2 C_0 Z_m (L_1 L_2 - M^2) + j\omega (L_1 L_2 - M^2)]$$

$$C = \frac{1}{j\omega M} [1 - \omega^2 C_0 L_2]$$

$$D = \frac{1}{j\omega M} [Z_m - \omega^2 C_0 Z_m L_2 + j\omega L_2]$$

그리고 전체 시스템의 등가 입력 임피던스  $Z(j\omega)$  는 식 (2)와 마찬가지로 다음 식으로 표현된다.

$$Z(j\omega) = \frac{V}{I} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (7)$$

### 3. 송, 수신 특성

먼저 그림 4(a)의 송신 모드에서 가중회로가 없을 때 트랜스듀서만의 회로에 대한 입출력 전압비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{V_1} &= \frac{Z_L}{Z_m + Z_L} \\ &= \frac{Z_L}{Z_L + R_m + j\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 보면 송신 출력 전압  $V_2$ 는 식 (3)에서 정의된 압전 세라믹 진동체만의 기계적 공진 주파수  $\omega_0$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다. 그리고 그림 4(b)의 수신 모드에서 가중회로가 없을 때 트랜스듀서만의 회로에 대한 수신 전압 감도비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{V_p} &= \frac{\frac{1}{j\omega C_0}}{Z_m + Z_L + \frac{1}{j\omega C_0}} \\ &= \frac{C_m}{C_0 + C_m - \omega^2 L_m C_0 C_m + j\omega C_0 C_m (R_m + Z_L)} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 보면 수신 전압  $V_1$ 은 식 (3)에서 정의된 압전 세라믹 진동체만의 반공진 주파수  $\omega_a$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다.

그림 4(a)에 있는 전체 시스템의 송신 모드에서 송신 출력 전압은 식 (6)에서 방사 임피던스  $Z_L$ 에 대한 출력 전압  $V_2 = I_2 Z_L$ 을 대입하고 정리하면 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{V_2}{V} = \frac{Z_L}{AZ_L + B} = \frac{Z_L M_T}{A(j\omega) + jB(j\omega)} \quad (10)$$

$$A(j\omega) = (R_m + Z_L)(L_T - \omega^2 C_0 \widetilde{L}_T)$$

$$B(j\omega) = (L_T - \omega^2 C_0 \widetilde{L}_T) \left( \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) + \omega \widetilde{L}_T$$

식 (10)에서  $\widetilde{L}_T$ 는 다음 식으로 정의되는 등가 리액턴스이며,

$$\widetilde{L}_T = L_T L_{T2} - M_T^2, \quad M_T = k_T \sqrt{L_T L_{T2}} \quad (11)$$

여기서  $L_T, L_{T2}, k_T$ 는 각각 송신용 트랜스포머의 1, 2차측 리액턴스 및 유효 결합 계수이다. 그런데  $k \approx 1$ 이면 식 (11)로부터  $\widetilde{L}_T \approx 0$ 이므로 식 (10)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{V_2}{V} = \frac{Z_L}{\frac{L_T}{M_T} \left[ R_m + Z_L + j \left( \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right]} \quad (12)$$

따라서 식 (12)에서 보면  $k \approx 1$ 인 이상적인 트랜스포머일 경우 송신 출력 전압  $V_2$  는 트랜스듀서만 있을 때와 같이 압전 세라믹 진동체만의 기계적 공진 주파수  $\omega_0$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다.

한편 그림 4(b) 있는 전체 시스템의 수신 모드에서 수신 전압 감도는 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{V}{V_p} = \frac{j\omega M_R}{A(j\omega) + jB(j\omega)} \quad (13)$$

$$A(j\omega) = (Z_L + R_m)(1 - \omega^2 C_0 L_{R1})$$

$$B(j\omega) = (1 - \omega^2 C_0 L_{R1}) \left( \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right) + \omega L_{R1}$$

여기서  $M_R = k_R \sqrt{L_{R1} L_{R2}}$ 이며,  $L_{R1}$ ,  $L_{R2}$ ,  $k_R$ 은 각각 수신용 트랜스포머의 1, 2차측 리액턴스 및 유효 결합계수이다. 식 (13)에서 보면  $\omega^2 C_0 L_{R1} \ll 1$  이면 수신 전압 감도비는 송신 전압 감도비와 같이 진동체만의 기계적 공진 주파수  $\omega_0$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 트랜스포머의 리액턴스값을 적절히 조절함으로써 최대 수신 감도가 얻어지는 공진 주파수를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

그림 4(a)의 등가회로에서 트랜스포머가 없는 경우 트랜스듀서의 출력전력  $P_0$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_0 = R_L I_2^2; \quad R_L = \text{Real}(Z_L) \quad (14)$$

여기서 출력전압  $V_2 = Z_L I_2$ 를 식 (1)에 대입하면 다음의 관계식을 얻는다.

$$I_2 = \frac{V_1}{(A_2 Z_L + B_2)} \quad (15)$$

따라서 식 (15)를 식 (14)에 대입하면 다음과 같다.

$$P_0 = R_L \left( \frac{V_1}{A_2 Z_L + B_2} \right)^2 \quad (16)$$

한편 트랜스듀서의 수중에서의 출력 특성은 다음과 같이 데시벨 치수로 정의되는 음원 준위, SL (source level)로 나타낼 수 있다.

$$SL_0 = 170.8 + 10 \log_{10} P_0 + DI \quad (17)$$

여기서 DI (directivity index)는 진동체의 지향지수를 나타낸다. 식 (16)을 식 (17)에 대입하면  $SL_0$ 는 다음과 같다.

$$SL_0 = 170.8 + 10 \log_{10} R_L - 20 \log_{10} (|A_2 Z_L + B_2|) + 20 \log_{10} V_1 + DI \quad (18)$$

결국 트랜스듀서만의 단위 전압당 송신 전압감도, TVR (transmitting voltage response)는 다음 식으로 결정된다.

$$TVR_0 = 170.8 + 10 \log_{10} R_L - 20 \log_{10} (|A_2 Z_L + B_2|) + DI \quad (19)$$

(dB// $\mu$ Pa/Volt @1m)

한편 트랜스듀서의 수신 특성은 식 (2)에 정의된 진동체만의 입력 임피던스  $Z_0$ 를 이용하여 다음 식으로 계산되는 수신 전압 감도, RVS (receiving voltage sensitivity)로서 나타낼 수 있다.

$$RVS_0 = TVR_0 + 20 \log_{10} (|Z_0|) - 20 \log_{10} (f) - 294 \quad (20)$$

(dB// Volt/ $\mu$ Pa)

마찬가지 방법으로 트랜스포머가 결합된 전체시스템의 경우에 대해서도 다음과 같이 TVR과 RVS를 구할 수 있다.

$$TVR = 170.8 + 10 \log_{10} R_L - 20 \log_{10} (|AZ_L + B|) + DI \quad (21a)$$

(dB//μPa/Volt @1m)

$$RVS = TVR + 20 \log_{10} (|\bar{Z}|) - 20 \log_{10} (f) - 294 \quad (21b)$$

(dB//Volt/μPa)

여기서 A, B는 식 (6)에 정의된 등가회로 파라메타이고,  $\bar{Z}$ 는 식 (7)에 정의된 전체 시스템의 등가 입력 임피던스이다.

한편 유효반경이 a인 원형 단면의 트랜스듀서가 무한 배플위에서 피스톤 운동할 때, 수중에서의 방사 임피던스  $Z_w$ 는 다음 식으로 계산된다<sup>(6)</sup>.

$$Z_w = R_w + j X_w \quad (22)$$

$$R_w = \pi a^2 c_w \rho_w R_1(2ka), \quad X_w = \pi a^2 c_w \rho_w X_1(2ka)$$

$$R_1(x) = 1 - \frac{2J_1(x)}{x} = \frac{x^2}{2^2 1! 2!} - \frac{x^4}{2^4 2! 3!} + \dots$$

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 5} + \frac{x^5}{3^2 5^2 7} - \dots \right]$$

여기서  $\rho_w$ ,  $C_w$ 는 각각 물의 밀도와 음속이며,  $k \left( = \frac{\omega}{c_w} \right)$ 는 파수 (wave number),  $J_1(x)$ 는 제1차 1종 Bessel 함수이다. 그리고 지향 지수 DI는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$DI = 10 \log_{10} D; \quad D = \frac{(ka)^2}{1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}} \quad (23)$$

이상에서 설명한 트랜스포머의 영향을 수치적으로 시뮬레이션하기 위하여 다음과 같은 전기적 상수를 가지며, 방사면의 유효반경이 10mm인 트랜스듀서 모델을 이용하였다<sup>(4)</sup>.

$$N = 0.4675, \quad C_0 = 345 \mu C, \quad C_m = 844 \mu C, \\ R_m = 19 \Omega, \quad L_m = 0.0294 H$$

그리고 송신 및 수신용 트랜스포머의 전기적 상수는 다음과 같다.

$$L_{T1} = 40 \mu H, \quad L_{T2} = 1800 \mu H, \\ L_{R1} = 1800 \mu H, \quad L_{R2} = 100 \mu H$$

그림 5는 트랜스포머의 1차측 리액턴스값의 변화에 따른 송신 특성, 즉 TVR의 변화를 그린 것으로 트랜스포머가 부착되지 않은 진동체만의 공진 주파수의 변화는 없고 1차측 리액턴스 값이 클수록 TVR은 증가함을 알 수 있다. 그림 6은 트랜스포머의 2차측 리액턴스값의 변화에 따른 TVR의 변화를 그린 것으로 역시 공진 주파수의 변화는 없고 2차측 리액턴스 값이 클수록 TVR은 증가함을 알 수 있다. 그림 7은 트랜스포머의 1차측 리액턴스값의 변화에 따른 수신 특성, 즉 RVS의 변화를 그린 것으로 최대 수신 감도가 얻어지는 공진 주파수는 트랜스포머가 부착되지 않은 진동체만의 반공진 공진 주파수에서가 아니라 공진주파수 부근임을 알 수 있다. 그리고 1차측 리액턴스 값이 작을수록 RVS는 커짐을 알 수 있다. 마지막으로 그림 8은 트랜스포머의 2차측 리액턴스값의 변화에 따른 RVS의 변화를 그린 것으로 최대 수신 감도가 얻어지는 공진 주파수는 역시 진동체의 공진 주파수 부근임을 알 수 있다. 그리고 1차측 리액턴스 값이 작을수록 RVS는 커지며 공진주파수는 낮아짐을 알 수 있다.

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 평면 배열 수중 음향 트랜스듀서의 아나로그 가중회로에서 트랜스포머가 트랜스듀서의 송신 및 수신 특성에 미치는 영향, 특히 공진 주파수의 변화를 고찰하였다. 전기적 등가회로 해석을 통하여 이상적인 트랜스포머를 사용할 경우

송신 모드의 공진 주파수는 트랜스듀서 자체만의 기계적 공진주파수와 같이 변화는 없고, 수신 특성은 사용 주파수 범위내에서 트랜스듀서의 정전 용량, 트랜스포머의 1차측 리액턴스값에 좌우됨을 알 수 있었다. 따라서 트랜스포머의 리액턴스를 적절히 조절함으로써 최대 수신 감도가 얻어지는 공진 주파수 설계가 가능하였다.

### 참고 문헌

1. 조치영,김인수,윤형규, 수중 음향 트랜스듀서용 샌드위치형 압전 진동체의 설계, 한국소음진동공학회지, 제5권 제4호, 1995, pp. 577-583.
2. 조치영,서희선,이정민, 방사임피던스를 고려한 평면배열 수중 음향 트랜스듀서의 최적 빔 설계, 한국음향학회지, 제15권 제1호, 1996, pp. 40-45.
3. 윤형규,김군철,이정민, 평면배열된 트랜스듀서의 빔형성을 위한 가중회로 설계연구, 국방과학연구소 기술보고서 (ATRC-517-93084), 1993.
4. 조치영,서희선,이정민, 수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가회로 모델링, 한국음향학회지, 제15권 제4호, 1996, pp. 77-82.
5. 박송배, 교류회로이론, 문운당, 1972.
6. L.E., Kinsler, A.R., Frey, A.B., Coppens and J.V., Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, 3rd Ed., 1980.

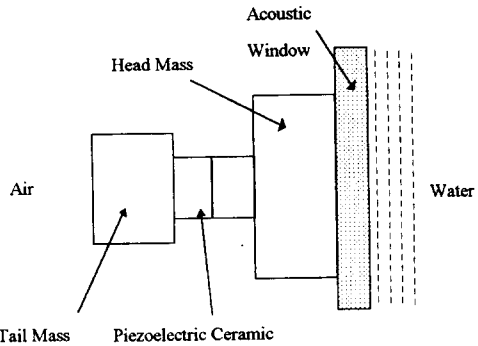


그림 1 샌드위치형 압전 세라믹 트랜스듀서

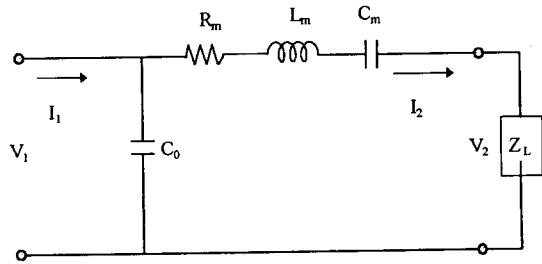


그림 2 압전 세라믹 트랜스듀서의 전기적 등가회로

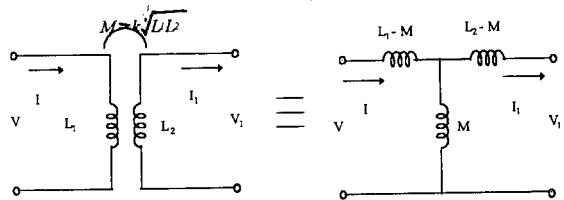
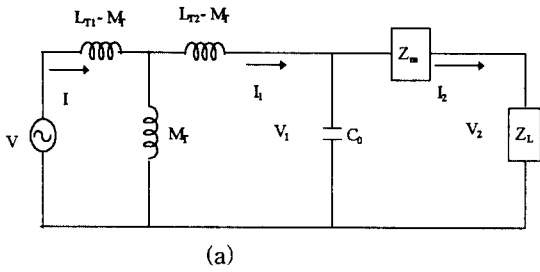
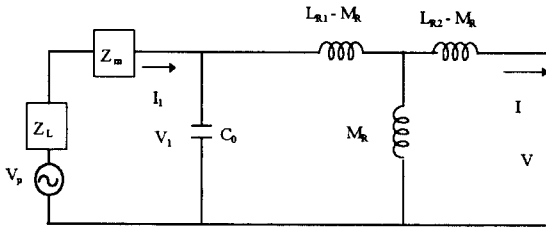


그림 3 트랜스포머의 전기적 등가회로



(a)



(b)

그림 4 트랜스포머가 결합된 압전 트랜스듀서의 등가회로  
(a) 송신 모드 (b) 수신 모드

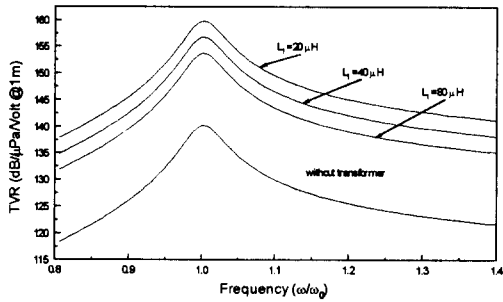


그림 5 트랜스포머의 1차측 래턴스에 따른 송신특성의 변화 ( $L_2 = 1800\mu H$ )

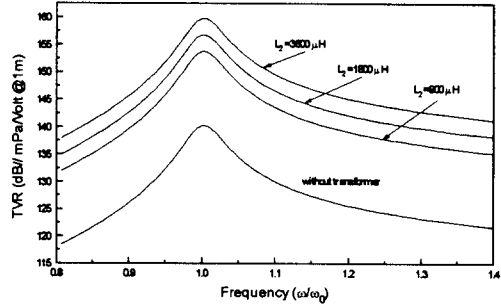


그림 6 트랜스포머의 2차측 래턴스에 따른 송신특성의 변화 ( $L_1 = 40\mu H$ )

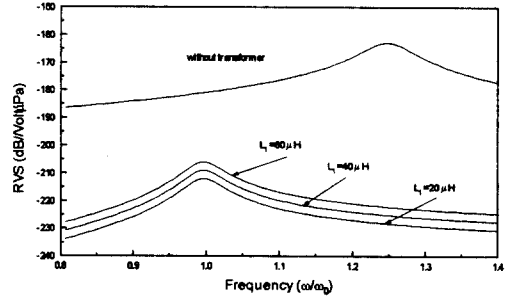


그림 7 트랜스포머의 1차측 래턴스에 따른 수신특성의 변화 ( $L_2 = 1800\mu H$ )

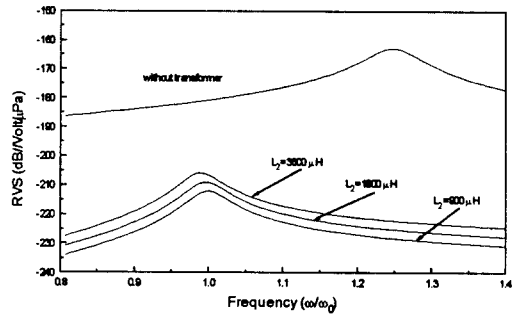


그림 8 트랜스포머의 2차측 래턴스에 따른 수신특성의 변화 ( $L_1 = 40\mu H$ )