

피이드백 라우드니스 制御回路 (Feedback Loudness Control Circuit)

金 周 弘*, 沈 光 輔**, 嚴 基 煥***
(Ju Hong Kim, Kwang Bo Sim and Ki Hwan Eom)

要 約

本 研究는 피이드백形 音量調節 回路와 이것에 結合한 音響再生 增幅器에 使用되는 라우드니스 제어 회로에 관한 것이다. 再生 音界 레벨에 따라 變化하는 라우드니스 補償曲線에 追從하는 特性을 갖도록 브리지 트윈 T 回路網과 피이드백 回路에 삽입한 普通의 音量調節用 可變抵抗器로 라우드니스 제어 회로를 構成하였다. 이 새로운 방식에 의한 라우드니스 제어 회로를 實現하여 그 特性을 測定하고 또 컴퓨터 시뮬레이션한 것을 비교한 결과 理想에 가까운 補償特性을 얻었다.

Abstract

This is a Loudness Control Circuit in an audio amplifier controlled by feedback type volume control variable resistors. This circuit consists of Bridged Twin T network and a ordinary variable resistor. The variable resistor acts not only as a volume control by varying feedback quantity, but also as Loudness Control through the characteristics variation by Sound Level. This new Loudness Control Circuit showed ideal compensation characteristics that agree computer simulation and measured datas.

I. 序 論

音響再生用 增幅器에 附隨한 라우드니스制御는 인간의 聽覺特性이 音界의 레벨이 낮은 경우는 3 [KHz]

근처의 音이 가장 잘 들리며 高域과 특히 低域의 音은 상대적으로 낮게 들리는 現象, 즉 Fletcher-Munson의 法則을 補償하는 회로이다.¹⁾ 從來는 여러 개의 필터를 스위치에 의하여 선택해서 사용한 방식과 中間端子가 있는 音量調節用 可變抵抗器에 高域 및 低域 通過 필터를 結合한 것을 使用하였다.^{4) 8) 10)} 前者는 調節部品이 增加하여서 操作이 不便하고 後者는 高레벨과 低레벨 再生時의 불륨의 위치에 대한 補償特性이 Fletcher-Munson의 라우드니스 레벨曲線에 追從하지 못하므로 理想的인 補償이 되지 못하며, 또한 中間端子가 있는 可變抵抗器를 使用하여야 하는 缺點이 있다.^{1) 4) 5) 7) 9) 10)} 短點을 改善하여 넓은 範圍의 레벨에서 理想的인 라우드니스 補償特性^{12) 16)}에 追從하는 라우드니스 制御回路方式을 試圖하고 이를 設計하여 컴퓨터

*正會員, 東國大學校 工科學 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., Dong Kook Univ.)

**正會員, 瑞逸工業專門大學 電子科
(Dept. of Electronics Eng., Seo Il Technical Junior College)

***正會員, 柳韓工業專門大學 電氣科
(Dept. of Electronics Eng., Yoo Han Technical Junior College)

시뮬레이션한 것과 試作回路에서의 測定을 通하여 理想的인 補償特性을 立證하였다.

II. 理論 및 回路設計

그림 1 과 같은 等音感度(equal loudness level)曲線에서 一般的으로 많이 듣는 레벨인 1000[Hz]를 基準으로 하여서 20[dB]~60[dB](phone)의 範圍에 適合한 補償特性을 가진 라우드니스 제어회로를 目標로 音量調節 可變抵抗器(volume control用 V.R)에 따라 變化한 音量에 알맞은 等音感度曲線에 追從하는 回路를 試圖하였다.⁽¹⁾

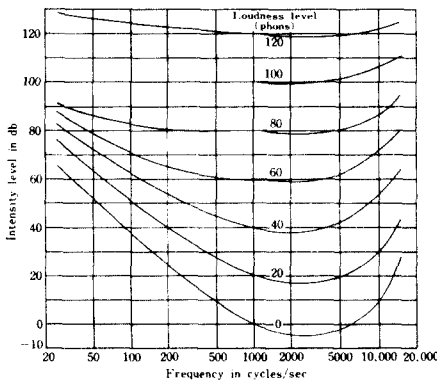


그림 1. 等音感度曲線(기준 레벨은 10⁻¹²[Watt/m²])

Fig. 1. Equal loudness level contours (decibels relate to 10⁻¹²[Watt/m²])

等音感度曲線과 같은 전달함수를 가진 回路特性과 그림 2와 같은 周波數特性을 가진 回路를 合成하기 위해 그림 3과 같은 回路를 構成하였다.

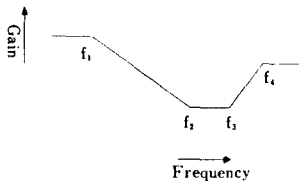


그림 2. 필터특성

Fig. 2. Characteristic of filter.

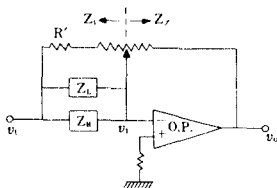


그림 3. 라우드니스 제어회로

Fig. 3. Loudness control circuit.

여기서 O. P. amp.를 前置增幅器로 하고 音量調節用 可變抵抗器(V.R.)를 피이드백 回路와 入力回路에 걸쳐 놓고 周波數特性回路로 L. P. F.인 Z_L와 H. P. F.인 Z_H를 並列로 하여서 B. E. F.를 構成하고, V.R.의 일부분과 R'로 된 抵抗 Z_R를 並列로 하여 V.R.의 變化에 따라 周波數 特性曲線의 傾斜(gradient)를 變化시켜서 라우드니스 制御作用을 하게 하였다.⁽¹⁾⁽⁷⁾ 그리고 Z_L와 Z_H의 相互間의 干涉을 적게 하기 위하여 各 各 T 回路를 作用하여서 O. P. amp. 入力回路에는 브리지 트윈(bridged twin) T 回路로 構成하였다. O. P. amp.의 利得特性이

$$A_o(s) = \frac{A_a}{a+s} = \frac{A_a}{s} \quad (1)$$

과 같은 것을 감안하여 入出力電壓의 比 즉 전달함수 G(s)는

$$G(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = - \frac{Z_r(s)/Z_i(s)}{1 + (1 + \frac{Z_r(s)}{Z_i(s)}) \frac{s}{A_a}} \quad (2)$$

이 된다. 여기서 Z_i(s)는 볼륨 接觸子(volume contact)의 左側 即 入力回路의 等價 임피던스이고 Z_r(s)는 O.P.amp.의 피이드백 임피던스이다. 式(2)의 分母의 제 2항은 Z_r(s)/Z_i(s) ≫ 1인 경우에 近似的으로

$$G(s) \approx - \frac{Z_r(s)/Z_i(s)}{1 + \frac{Z_r(s)}{Z_i(s)} \frac{s}{A_a}} \quad (3)$$

이 된다. 入力回路의 Z_L와 Z_H를 그림 4와 같이 T로 構成하면 入力임피던스 Z_i(s)는 다음과 같다.

$$\frac{1}{Z_i(s)} = Y(s) = Y_R(s) + Y_L(s) + Y_H(s)$$

여기서 Y_R(s) = 1/Z_R(s), Y_L(s) = 1/Z_L(s), Y_H(s) =

1/Z_H(s)이다. (4)

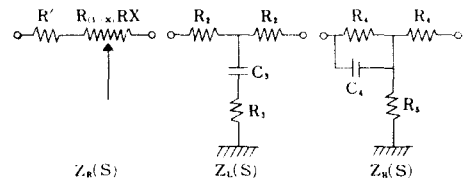


그림 4. 필터회로

Fig. 4. Filter circuit.

그림 4 (a)에서

$$Y_R(s) = \frac{1}{R' + R(1-x)} \quad (5)$$

이다. 여기서 R는 V.R.의 抵抗值이며 x는 V.R.의 接

點位置를 나타내는 변수로서 $0 < x < 1$ 의 範圍에서 變化한다. 그리고 $Y_L(s)$ 는 그림 4 (b)에서

$$Y_L(s) = \frac{1 + \tau_3 s}{2R_2 \left(1 + \left(1 + \frac{R_2}{2R_3} \right) \tau_3 s \right)} \quad (6)$$

이고 $\tau_3 = R_3 C_3$ 이다. 또 그림 4 (c)에서

$$Y_H(s) = \frac{1 + \tau_4 s}{R_4 \left(2 + \frac{R_4}{R_5} \right) \left(1 + \frac{\tau_4 s}{2 + R_4/R_5} \right)} \quad (7)$$

이며 $\tau_4 = R_4 C_4$ 이다. 그리고 피이드백 임피던스 $Z_f(s)$ 는

$$Z_f(s) = Rx \quad (8)$$

이 된다. 式 (4)~(8)에서 O.P.amp.의 周波數 特性을 考慮하지 않는 경우의 利得 $A_1(s)$ 는

$$A_1(s) = \frac{Z_f(s)}{Z_i(s)} = \left[\frac{1}{\frac{R'}{R} + 1 - x} + K_L \frac{1 + \tau_2' s}{1 + \tau_1' s} + K_H \frac{1 + \tau_4' s}{1 + \tau_3' s} \right] x \quad (9)$$

이고, 여기서

$$K_L = \frac{R}{2R_2}, \quad K_H = \frac{R}{R_4 \left(2 + \frac{R_4}{R_5} \right)}, \quad \tau_1' = \left(1 + \frac{R_2}{2R_3} \right) \tau_3,$$

$$\tau_2' = \tau_2, \quad \tau_3' = \frac{\tau_4}{2 + \frac{R_4}{R_5}}, \quad \tau_4' = \tau_4 \text{이다. } A_1(s) \text{를 式 (3)}$$

에 代入하면

$$G(s) = \frac{-A_1(s)}{1 + A_1(s) \frac{S}{A_a}} \quad (10)$$

이 成立한다. 即 式 (10)은 試圖한 피이드백形 블륨을 兼한 라우드니스 制御回路의 전달함수이며 이는 물론 O.P.amp.의 周波數 特性까지 考慮한 式이다.

III. 實驗 및 檢討

以上 回路와 그 解析에 따라 표 1과 같은 定數에 의하여 設計하여서 이것을 컴퓨터 시뮬레이션하고 回路를 實現하여 實測한 結果는 다음과 같다.

표 1. 定數

Table 1. Constant.

$f_1 = 50$ [Hz]	Low level에서의 이득의 최대차 :
$f_2 = 1.5$ [KHz]	22[dB]
$f_3 = 5$ [KHz]	High level에서의 이득의 최대차 :
$f_4 = 30$ [KHz]	14[dB]
$f_4 = 30$ [KHz]	O.P.amp.의 f_1 : 1 [MHz]

그림 5는 본 라우드니스 制御回路의 Z 를 파라미터로 한 周波數와 利得을 나타내는 利得線圖이며 Z 는

블륨의 接點位置 x 를 나타내는 것이며 $z=1$ 일때 音量이 最大이며 最小音量 ($Z=0$)의 20倍 (電壓比)로 設計하였다.

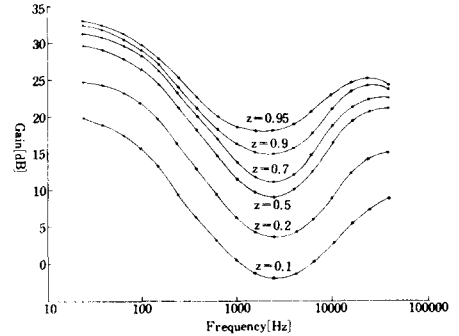


그림 5. $G(s)$ 의 컴퓨터에 의한 利得線圖

Fig. 5. Gain diagram of $G(s)$ by computer simulation.

그림 6은 마찬가지로 Z 를 파라미터로 한 周波數와 位相을 나타내는 位相線圖이다. 그림 5와 그림 6은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 라우드니스 制御回路의 利得과 位相 特性이며 音量에 따라 利得 特性이 그림 1의 loudness compensation curve에 接近함을 나타내고 있다. 또 試作한 回路에 관하여 實測한 特性은 그림 7과 같다.

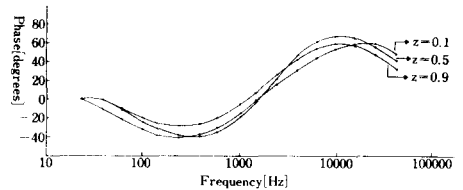


그림 6. $G(s)$ 의 컴퓨터에 의한 位相線圖

Fig. 6. Phase diagram of $G(s)$ by computer simulation.

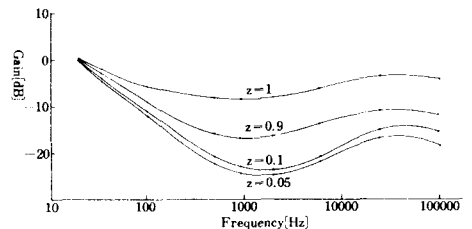


그림 7. 測定에 의한 라우드니스 制御特性

Fig. 7. Loudness control characteristic by measurement.

여기서 計算値와 測定値에 차이가 있음은 部品の 偏差로 인한 것이며 별로 큰 差가 없음을 알 수 있다. 이들의 特性曲線은 音量調節用 可變抵抗인 볼륨의 單一調整에 의하여 音量에 따라 連續的으로 變化한 特性을 가진 라우드니스 制御特性을 나타낸 것이며 試圖한 目的에 充分히 接近한 것이다. 특히 從來의 라우드니스 制御用 可變抵抗은 中間端子가 있는 特殊한 것을 使用하여 왔으나 本 回路에서는 一般의 可變抵抗을 使用하였으며 이것에 의하여 피이드백 量을 調節하는 볼륨 制御方式을 擇하였으므로 낮은 音量인 경우에 S/N比가 크고 damping이 큰 點等, 피이드백 固有의 長點이 현저하게 나타남을 既成의 再生裝置와 그 裝置에 本 回路를 代換한 경우에 關하여 비교 聽取한 結果로 알게 되었다.

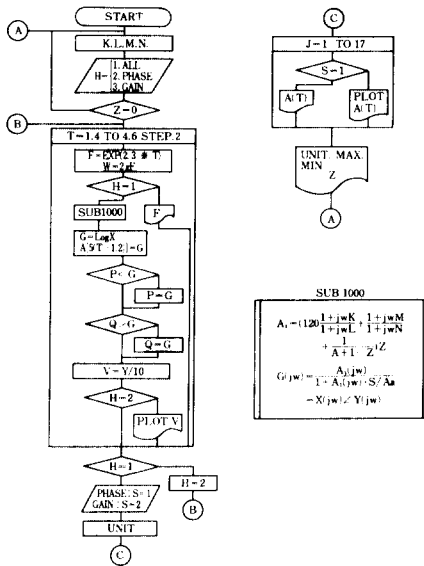


그림 8. 전달함수의 信號流通圖
Fig. 8. Flow chart of transfer function.

또한 그림 8 은 本 回路의 利得을 나타낸 전달함수의 周波數應答을 計算하기 위한 flow chart이며 利得과 位相을 各各 數值로서 보우드 線圖로 plot 시키는 basic program用이다.

IV. 結 論

위에서 記述한 바와 같이 一般의 可變抵抗이 單一操作으로 피이드백 方式의 볼륨 制御와 再生音量에 따라 變化하는 loudness compensation curve와 近似한

特性을 가진 回路임을 컴퓨터 시뮬레이션과 實測을 통하여 確認하였으며 특히 低音量 領域에서 피이드백 固有의 長點이 현저하게 나타나 S/N比와 damping이 커져서 再生裝置의 HiFi特性에 큰 向上이 있었음을 알게 되었다. 이에 대한 測定이 隨伴되는 詳細한 研究는 次機會로 미룬다.

參 考 文 獻

- [1] Lawrence E. Kinsler & Austin R. Frey, *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons Inc., pp. 390-398.
- [2] R. Germain, "Loudness adaptation," *Acustica*, vol. 49, no. 3, pp. 239-244, 1981.
- [3] 度邊 好章 等, "有限抵幅音波傳播의 시뮬레이션手法와 實驗", 日本音響學會誌, vol. 38, no. 2, pp. 105-102, 1982.
- [4] G. Spahlinger, "The influence of operational amplifiers in switched-capacitor filters," *AEU*, vol. 48, no.5, pp. 342-348, 1981.
- [5] UIF Berglaud, "Loudness (or Annoyance) summation of combined communitynoises," *J. Acous. SOC. Am*, vol. 70, no. 6, pp. 1628-1634, 1981.
- [6] Hideki Kawahara, "Objective calculation of ratings based on loudness," *Rev. Elec. Comm. Lab.*, vol. 29, no. 9-10, pp. 873-880, 1981.
- [7] Edward M. Cherry, Feedback, Sensitivity, and stability of audio power amplifiers," *J. Audio. Eng. Soc.*, vol. 30, no. 5, pp. 282-294, 1982.
- [8] Robert A. Lutfi, "Combination bands and the measurement of the auditory filter," *J. Acous. Soc. Am*, vol. 71, no.2, pp. 421-423, 1982.
- [9] 上野孝文 等, "非線形 버스트시뮬레이션" 전자통신학회기술연구보고, vol. 82, no. 41, pp. 29, 1982.
- [10] Bernard A. Hutchins, "An adapting delay camb filter for the restoration of audio signals badly corrupted with a periodic signal of slowly changing frequency," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 30, no. 1-2, pp. 24-27, 1982. *