

論 文

케 환과 순방향 공급경로를 이용한 자동조절 능동가변 등화기의 설계

正會員 李 相 寧* 正會員 朴 鍾 國**

Design of automatic Equalizer using Feedback and Feedforward

Sang Nyung LEE* and Chong Kug PARK**, Regular Members

要 約 동축 케이블이나 케이블 쌍을 사용하는 유선전송 시스템에 있어서 케이블의 전송특성에 의한 손실은 케이블 길이와 주위온도에 따라 변화하며 항상 \sqrt{f} 특성 형태를 취한다. 이러한 형태의 손실을 보상하기 위해 케 환과 순방향 공급 경로의 직렬결합을 이용한 자동조절 능동가변 등화기를 제시하였다. 본 논문에 제시한 자동조절 능동가변 등화기는 종래의 수동가변 등화기가 가지고 있던 인덕터의 필요성, 복잡한 설계과정, 그리고 매우 복잡한 현대 전자제어 시스템과의 비양립성 등 대부분의 결점을 제시시켜 준다. 또한 이러한 설계는 다른 능동가변 등화기 설계에 비해 많은 이점을 가지고 있으며 특히 1MHz 이하에서의 정확한 등화에 응용할 수 있다.

ABSTRACT In wire transmission systems using a coaxial cable or cable pair, the cable loss caused by the transmission characteristic of the cable varies depending on the length of the cables or variation in the ambient temperature, and usually takes the form close to \sqrt{f} characteristic. In order to compensate for such loss, an active variable automatic equalizer with a tandem combination of feedback and feedforward was presented. The automatic equalizer to be described here overcomes many of the disadvantages associated with the conventional passive variable equalizers, which include the need for inductors, a complex design procedure, and incompatibility with modern electronic control systems that are very complicated. This design has advantages over other active variable equalizer design and it is especially applicable to precision equalization at frequencies below 1 MHz.

1. 서 론

동축 케이블이나 케이블 쌍을 사용하는 유선 전송 시스템에 있어서 케이블의 전송특성은 케이블 길이와 주위온도에 따라 변화하게 된다. 가변 등화기는 이러한 전송특성의 변화를 보상하기 위해 사용된다.

가변 등화기는 Bode에 의해 제안된 이래 전기통신분야 및 유선 원격조정 제어 시스템의 선로 분야에 널리 응용되어 오고 있으며 Bode에 의해 개발된 가변 등화기는 등화량의 변화에 대해 등화과형이 변화하지 않는 독특한 특성을 가지고 있기 때문에 유선통신분야에 광범위하게 사용되어 오고 있다.

이러한 등화기에 공통되는 이상적인 특성식은 다음과 같이 표시된다^(1,2).

$$I_n I_1(\omega) = I_0(\omega) + f(x) F_1(\omega) \quad (1)$$

여기서 $I_0(\omega)$ 는 기준응답, $f(x)$ 는 가변요소

*** 慶熙大學校 工科大学 電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Kyunghee University,
Seoul, 132 Korea
論文番號: 83-15 (接受 1983. 8. 23)

x 의 함수이며 $F_1(w)$ 는 주파수의 함수이다.

Bode에 의해 개발된 이러한 수동 등화기는 인덕터의 필요성 및 제어요소값과 등화량 사이의 비선형 특성때문에 보다 발전된 전자제어요소를 사용한 등화기를 구성하는데 어려움을 주었다. 따라서 부피가 크고 값비싼 인덕터를 제거시키기 위한 능동가변 등화기가 Takasaki et al.^(3,4,5), Endo et al.⁽⁶⁾, Franc Brglez^(2,7), Shida와 Suzuki⁽⁸⁾, Y. Takasaki⁽⁹⁾등에 의해 발표되었다. 그러나 이러한 등화기는 회로 자체에 심각한 결점을 지니고 있다. 즉 1969년 Endo et al.⁽⁶⁾, 1975년 Franc Brglez^(2,7)에 의해 발표된 등화기는 정제화이나 신호감소 혹은 정제환과 신호감소 양쪽을 사용하여 등화를 이루고 있는데 이는 등화기에 대해 불필요하게 높은 감도를 갖게 하며 수동소자의 변동을 초래하게 한다.

또한 1976년과 1977년 Takasaki et al.^(4,5), 1977년 Shida와 Suzuki⁽⁸⁾, 1978년 Y. Takasaki⁽⁹⁾등에 의해 발표된 등화기는 다수의 제어요소나 다수의 정형 회로망을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 종래의 수동가변 등화기와 여러 능동가변 등화기가 지니고 있는 이와 같은 결점을 제거시키기 위해 새로운 능동가변 등화기를 구성하였다.

2. 능동가변 등화기의 구성

식(1)은 모든 등화기에 공통된 수식인데 이 식만으로는 실제회로를 구성할 수 없으므로 Bode는 다음 식과 같은 전달함수 형태로 식(1)을 근사화할 수 있다는 것을 제시하였다⁽¹⁾.

$$V(\omega) = \frac{1 + xF(\omega)}{x + F(\omega)} \quad (2)$$

여기서 x 는 이상적인 경우 0에서 ∞ 까지의 범위를 갖는다. 그리고

$$x = \frac{1+y}{1-y} \quad (3)$$

인데 x 는 기준저항에 대한 가변저항의 비를 나타내며 제어 파라미터이다. 또한 $F(\omega)$ 는 주파수의 함수이다.

1969년 Endo et al.⁽⁶⁾, 1975년 Franc Brglez^(2,7), 1977년 S. Shida와 K. Suzuki⁽⁸⁾등에 의해 발표된 능동가변 등화기는 제어요소가 -1 에서 $+1$ 의 범위만을 갖도록 식(2)를 수정하였다. 즉 식(3)의 x 를 식(2)에 대입하여 $(1+F(\omega))$ 와 $(1-F(\omega))$ 를 포함하는 항으로 묶고 복소변수 S 의 함수로 표시하면

$$V(S) = \frac{(1+F(S)) - y(1-F(S))}{(1+F(S)) + y(1-F(S))} \quad (4)$$

$$= \frac{1 - yF_2(S)}{1 + yF_2(S)} \quad (5)$$

여기서

$$F_2(S) = \frac{1-F(S)}{1+F(S)} \quad (6)$$

이며 y 는 등화의 양과 부호를 결정하는 제어요소이고 이상적인 경우 -1 에서 $+1$ 의 범위를 갖는다.

본 논문에 제시한 능동가변 등화기는 등화기의 제어요소가 단지 0에서 1의 범위만을 갖도록 식(4)을 수정하여 얻은 것이다.

이것은

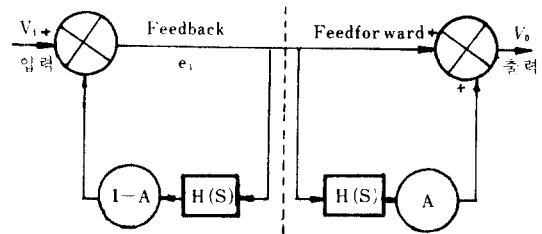
$$y = 2A - 1 \quad (7)$$

로 놓음에 의해 이루어지는데 여기서 A 는 이상적인 경우 0에서 1까지의 값을 취한다.

식(4)에 식(7)을 대입하면

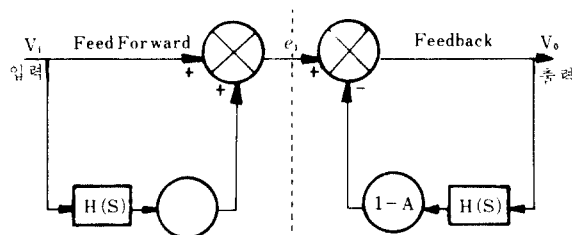
$$V(S) = \frac{1 + F(S) - (2A - 1)(1 - F(S))}{1 + F(S) + (2A - 1)(1 - F(S))} \quad (8)$$

$$= \frac{1 + A(F(S) - 1)}{A + (1 - A)F(S)}$$



(a) 제환과 순방향공급(feedforward)의 직렬결합으로 구성된 가변등화기의 블록선도

The block diagram of the active equalizer with a tandem combination of feedback and feedforward.



(b) 그림(a)를 다른 방법으로 구성한 등화기의 블록선도

The block diagram of the active equalizer being presented here.

그림 1 본 논문에서 제시한 능동 가변등화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer being presented here.

$$= \frac{1 + A(F(S) - 1)}{(1 - A)F(S) - (1 - A) + (1 - A) + A}$$

$$= \frac{1 + A(F(S) - 1)}{1 + (1 - A)(F(S) - 1)} \quad (9)$$

식(9)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$V(S) = \frac{1 + AH(S)}{1 + (1 - A)H(S)} \quad (10)$$

여기서

$$H(S) = F(S) - 1 \quad (11)$$

이다.

식(10)은 그림 1에 제시된 바와 같이 제환과 순방향 공급(Feedforward)의 직렬결합으로 구성할 수 있다.

이러한 회로구성 블록선도를 그림 1 (a)와 (b)에 표시하였다.

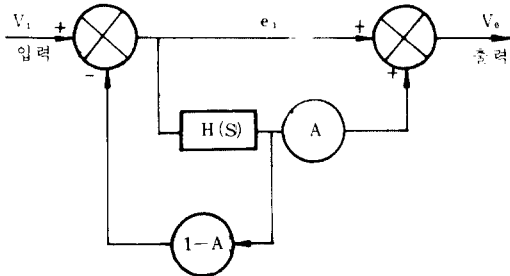
그림 1 (a)에서

$$e_1 = V_i - (1 - A)H(S)e_1$$

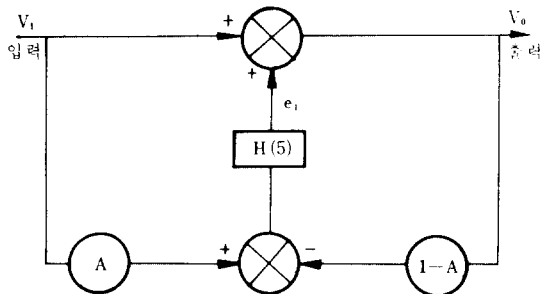
$$V_0 = e_1 + AH(S)e_1$$

$$V(S) = \frac{1 + AH(S)}{1 + (1 - A)H(S)} \quad (10)$$

그림 1 (b)에서



(a) 신호분기기를 이용한 능동 가변동화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer using a signal fork.



(b) 그림 (a)를 다른 방법으로 구성한 동화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer with the other method.

그림 2 단일 정형회로망만을 필요로 하는 동화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer using only one shaping network.

$$e_1 = V_i + AH(S)V_i$$

$$V_0 = V_i(1 + AH(S)) - (1 - A)H(S)V_0$$

$$V(S) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1 + AH(S)}{1 + (1 - A)H(S)} \quad (10)$$

가 된다.

그림 2에 제시한 동화기의 블록선도는 가변 동화기가 단지 단일 정형 회로망만을 필요로 하도록 하기 위해 그림 1을 수정한 것이다.

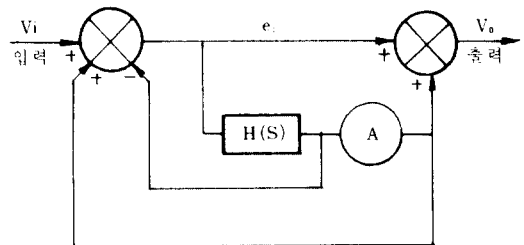
여기서 정형 회로망은 동화기가 필요로 하는 주파수 특성을 나타내도록 구성한다.

그림 2 (a)의 블록선도는 더욱 조정시킴에 의해 그림 3 (a)와 같이 단일 감쇠기 요소만을 가진 회로로 구성할 수 있다.

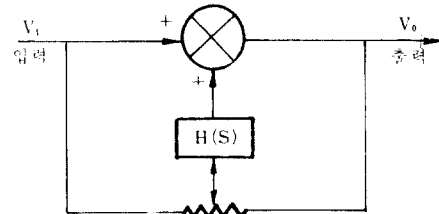
반면 그림 2 (b)의 블록선도는 그림 3 (b)와 같이 단일 선위차계와 단일 합산기를 갖는 회로로 구성할 수 있다.

따라서 식(10)과 식(11)를 조합하여 본 논문에서 제시한 능동가변 동화기의 부가적인 장점을 알 수 있다. 즉

- 1) 단지 제환과 순방향 공급(Feedforward) 경로만을 사용하여 동화를 이루므로 잠정적인 감도손상이 생길 수가 없다.



(a) 단일 감쇠기 요소만을 사용하여 구성된 동화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer utilizing only a single attenuator.



(b) 단일 선위차계와 단일 합산기를 사용하여 구성된 동화기의 블록선도
The block diagram of the active equalizer with a mechanical potentiometer and a summer.

그림 3 단일 H(S)와 단일 제어요소만을 사용하여 구성된 동화기의 블록선도
The block diagram of the active variable equalizer using only one H(S) and one control element.

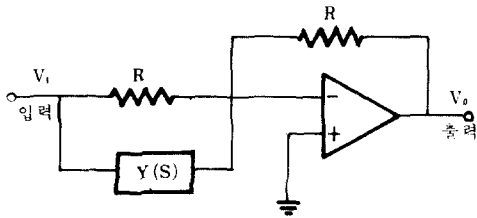


그림 4 정형회로망 전달함수 $H(S)$ 의 실제회로 구성형태
Realization of shaping network transfer function $H(S)$.

2) 정형 회로망 전달함수 $H(S)$ 와 최대등화전달함수 $F(S)$ 사이의 관계가 매우 간단하게 표시된다. 즉 최대등화 전달함수 $F(S) = |1 + H(S)|$ 가 된다.

그림 4는 정형 회로망 전달함수 $H(S)$ 를 실제 회로로 구성한 것이다.

3. 실험 결과

3-1 등화기의 구성 및 특성고찰

케이블 쌍이나 동축 케이블의 손실은 항상 \sqrt{f} 에 비례하는 형태를 취한다.

본 논문의 등화기는 이러한 형태의 손실을 보상하기 위해 유선전송 시스템 내에 등화를 이루도록 하는데 사용된다.

정형 회로망 $H(S)$ 는 5개의 직렬저항-캐패시턴스 회로를 병렬결합하여 구성된 어드미턴스 회로망으로 이루어지며 주파수의 함수이다.

이러한 병렬결합은 희망하는 주파수 특성을 나타내도록 해준다. 즉 본 논문의 정형 회로망 $H(S)$ 는 주파수가 증가함에 따라 단조적으로 증가하는 특성을 갖는 회로이다. 정형 회로망 $H(S)$ 를 그림 5에 제시하였다. 여기서 정형 회로망 전달함수 $H(S)$ 는 $Y(S) \cdot R$ 이 된다.

본 논문의 능동가변 등화기의 전체회로는 그림 6에 제시하였다.

그림 6에 표시된 전위차계는 입력과 출력신호의 가중된 합인 중간신호를 만들어 낸다. 탭(tap) 위치가 조정됨에 따라 전위차계의 양끝에 인가된 입력과 출력신호의 감쇠는 보폭형태로 변화된다.

그림 6에 표시된 트랜지스터는 $Y(S)$ 에 의해 부가된 부하로부터 전위차계의 와이퍼(Wiper)를 분리시키는 에미터 플로워용 트랜지스터이다.

제어요소 A 와 y 값에 따른 능동가변 등화기의 응답특성을 그림 7에 제시하였다. 여기서 dB로 나타낸 등화응답은 \sqrt{f} 에 거의 근사적으로 비례하였다.

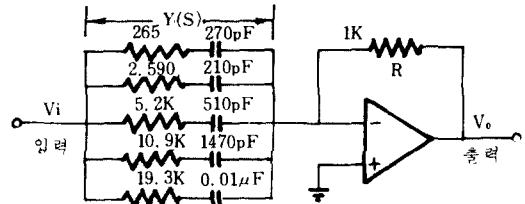


그림 5 1M(Hz)에서 최대과성이득이 ± 9 (dB)에 근사한 값을 갖는 가변등화기의 정형회로망 $H(S)$
A shaping network $H(S)$ for an active variable equalizer which has ± 9 (dB) at 1M(Hz).

이 등화기의 최대오차는 ± 0.07 dB였는데 이는 더욱 이상적인 연산 증폭기를 사용하고 정확한 소자값과 정밀한 측정장치를 사용한다면 오차를 ± 0.07 dB이하로 줄일 수 있을 것이다.

능동가변 등화기의 이론치에 대한 측정치의 오차를 그림 8에 제시하였는데 제어요소 A 가 $A = 0.00$ ($y = -1.00$), $A = 0.50$ ($y = 0.00$)일 때 오차가 가장 적다는 것을 알 수 있었다.

3-2 자동조절 능동가변 등화기의 설계

더욱 현대적인 시스템에서는 전자 제어적 수단에 의해 등화를 이루게 하는 것이 요구된다. 본 논문의 가변 등화기는 전자적 수단에 의한 제

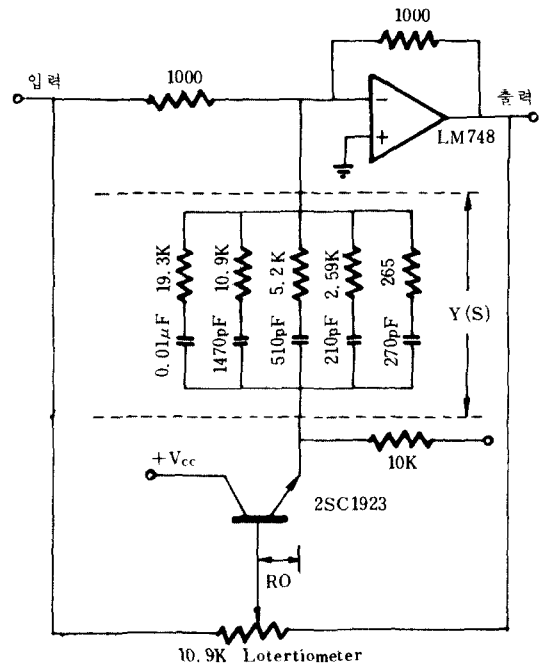


그림 6 능동 가변등화기의 전체 구성도
A complete realization of an active variable equalizer

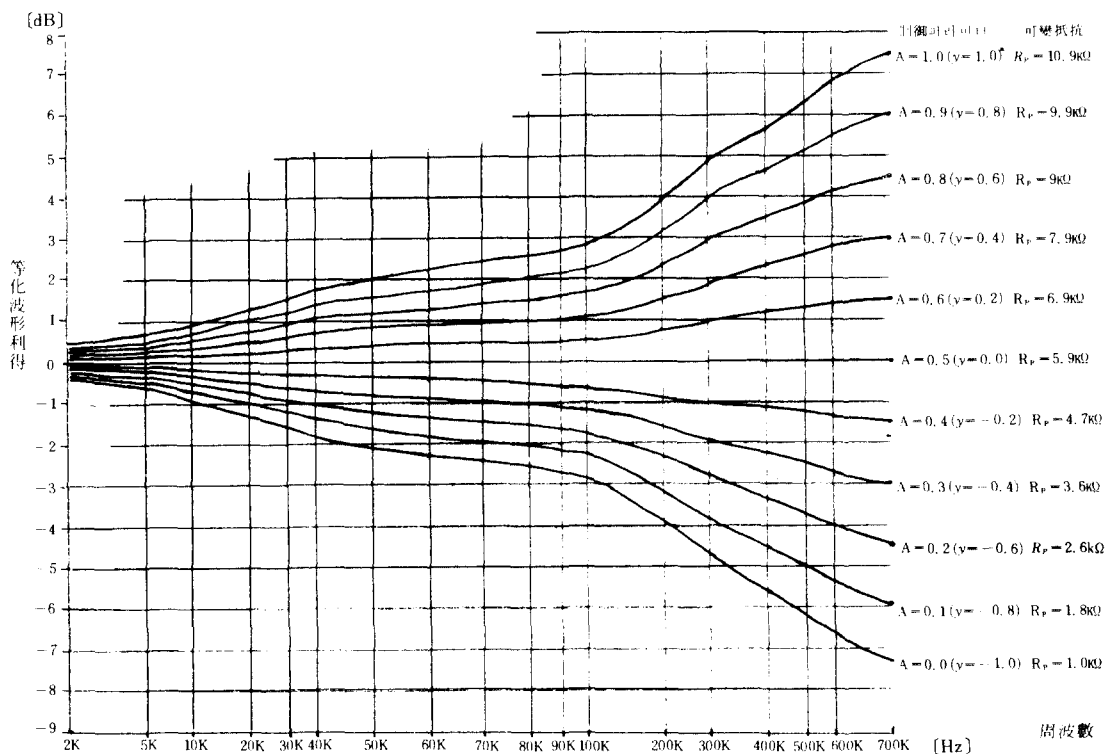


그림 7 능동가변동화기의 應答特性曲線
A family of active variable equalizer frequency response characteristics.

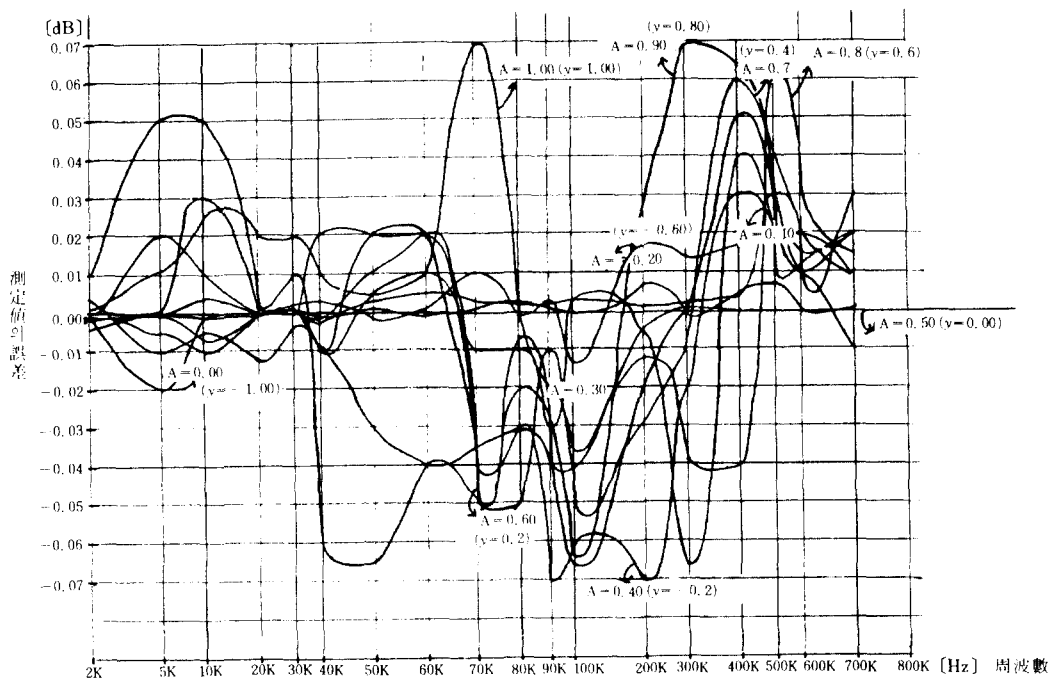


그림 8 능동가변동화기의 이론치에 대한 측정치의 오차
The deviations of the measured value in comparison with the theoretical value of an active variable equalizer.

어에 매우 적합하다. 왜냐 하면 필요한 제어요소의 범위가 0에서 1까지로 그렇게 크지 않으며 제환과 순방향 공급(Feedforward)만의 결합으로 회로동작을 용이하게 해 주기 때문이다.

본 논문에 제시한 가변 등화기의 주요장점은 다음과 같다.

- 1) 전위차계와 같은 단일제어요소가 두 가지 제어요소 A와 1-A양쪽을 제공한다.
- 2) 전 범위에 걸쳐 동작하는 등화기를 구성하는데 있어 제어요소가 단지 0에서 1까지의 범위만을 필요로 한다.
- 3) 임의의 주파수에서 dB로 나타낸 등화의 양이 제어 파라미터 A와 선형적인 관계를 갖는다.

하나의 이중신호 전위차계를 사용한 자동조절 능동가변 등화기의 구성을 그림 9에 제시하였다. 이 회로는 거의 모든 회로 소자를 집적회로화할 수 있다.

한쌍의 에미터 결합 트랜지스터 Tr_2, Tr_3 와 다른 한쌍의 에미터 결합 트랜지스터 Tr_4, Tr_5 는 이중 균형회로로서 동작하며 트랜지스터 $Tr_1, Tr_2, Tr_3, Tr_4, Tr_5, Tr_6$ 는 와이퍼의 위치가 DC 제어전압에 의해 제어되는 하나의 자동조절 전위차계(Automatic Potentiometer)를 형성한다.

등화기의 입력과 출력신호는 자동조절 전위차

계의 양끝에 직접 인가된다.

여기서 $R_1 = R_2 = 10k$ 로 하였다.

전류원 1, 2, 3, 4, 5는 트랜지스터의 허용 정격 전류 한도를 감안하여 10k저항을 각각 사용했다. 입출력 신호는 바이어스 전류의 분할에 따라 나누어진다. 중간신호는 Tr_2 와 Tr_4 의 컬렉터 내에 흐르는 신호전류로부터 생겨나며 이것은 입력신호의 일부인 A와 출력신호의 나머지 일부인 1-A의 결합으로 이루어졌다.

제어신호가 0V일 때 바이어스 전류는 에미터 결합 트랜지스터의 쌍 양쪽에 똑같이 나누어지며 따라서 중간신호는 입출력 신호의 똑같은 양을 포함한다. 제어신호가 순방향 전압일 때 Tr_2 내의 바이어스 전류는 증가하고 Tr_4 의 바이어스 전류는 감소한다. 그러므로 중간신호는 입력신호의 더욱 큰 부분 그리고 출력신호의 더욱 작은 부분을 포함하게 된다. 제어신호가 역방향 전압일 때 Tr_2 내의 바이어스 전류는 감소하고 Tr_4 내의 바이어스 전류는 증가한다. 따라서 중간신호는 입력신호의 더욱 작은 부분, 출력신호의 더욱 큰 부분을 포함하게 된다. 전 범위에 걸친 등화를 이루는데 있어 제어전압은 단지 -0.25V에서 +0.25V까지의 범위만을 필요로 했다.

제어요소 A와 y값에 따른 자동조절 능동가변 등화기의 응답을 그림 10에 제시하였다. 이 등화

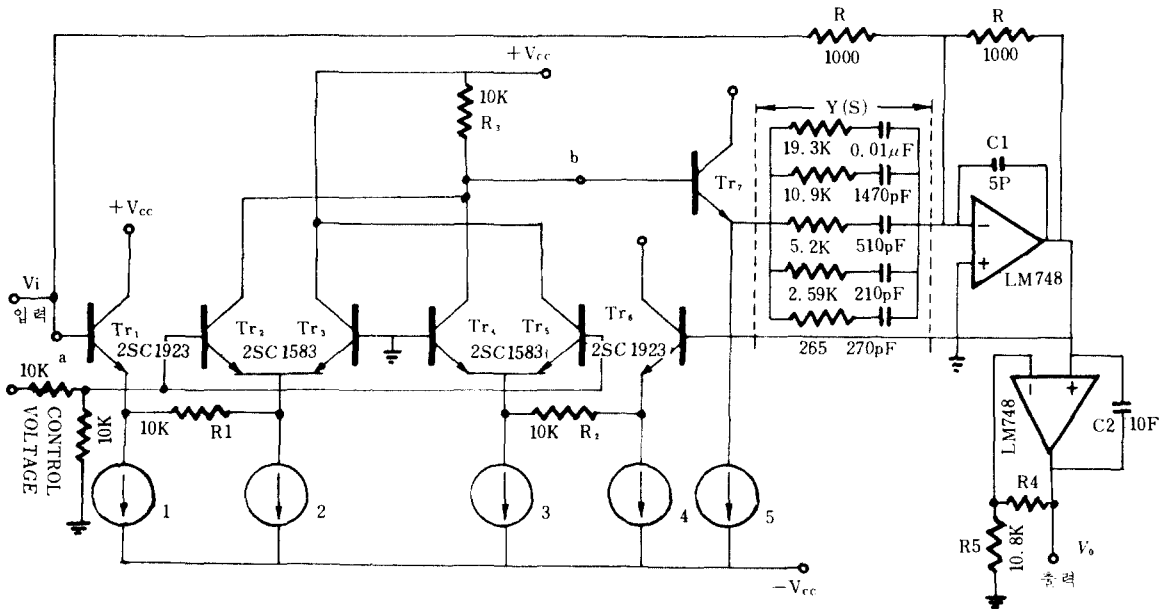


그림 9 자동조절 능동 가변 등화기의 전체 구성회로도
A complete realization of an automatic equalization.

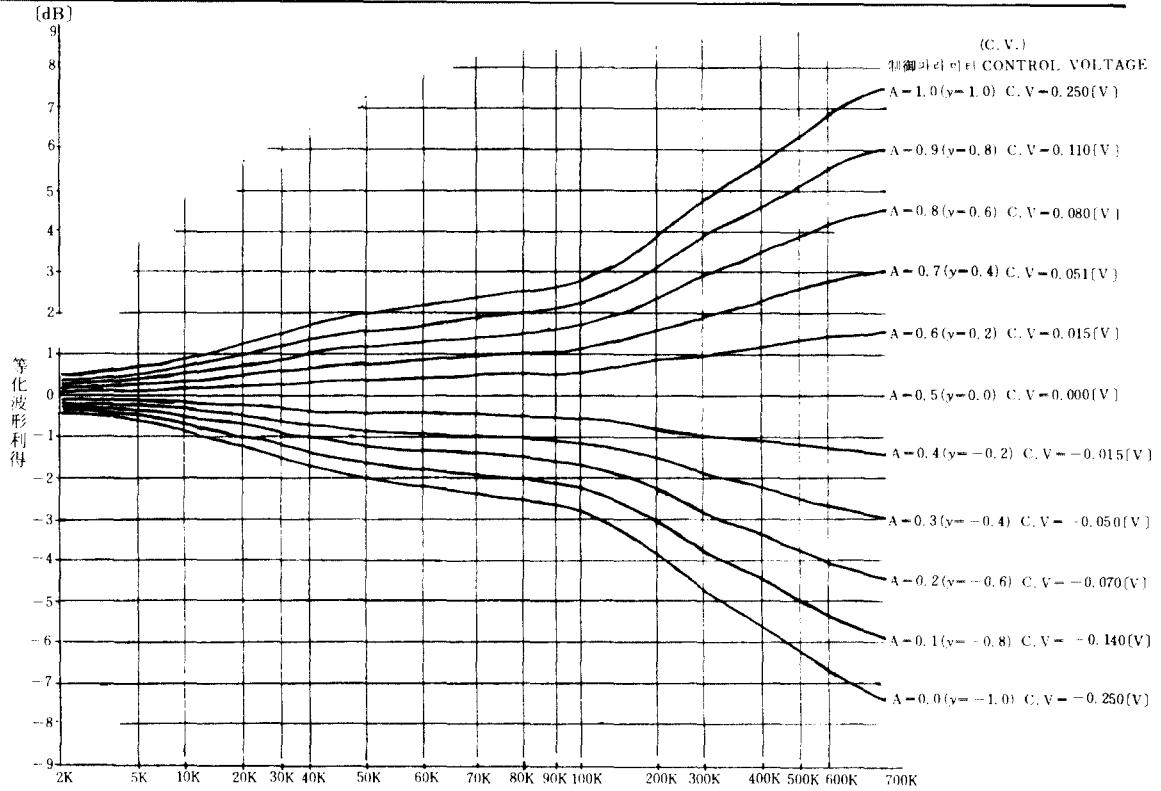


그림10 자동조절 등화기회로의 응답특성곡선

A family of automatic equalizer frequency response characteristics.

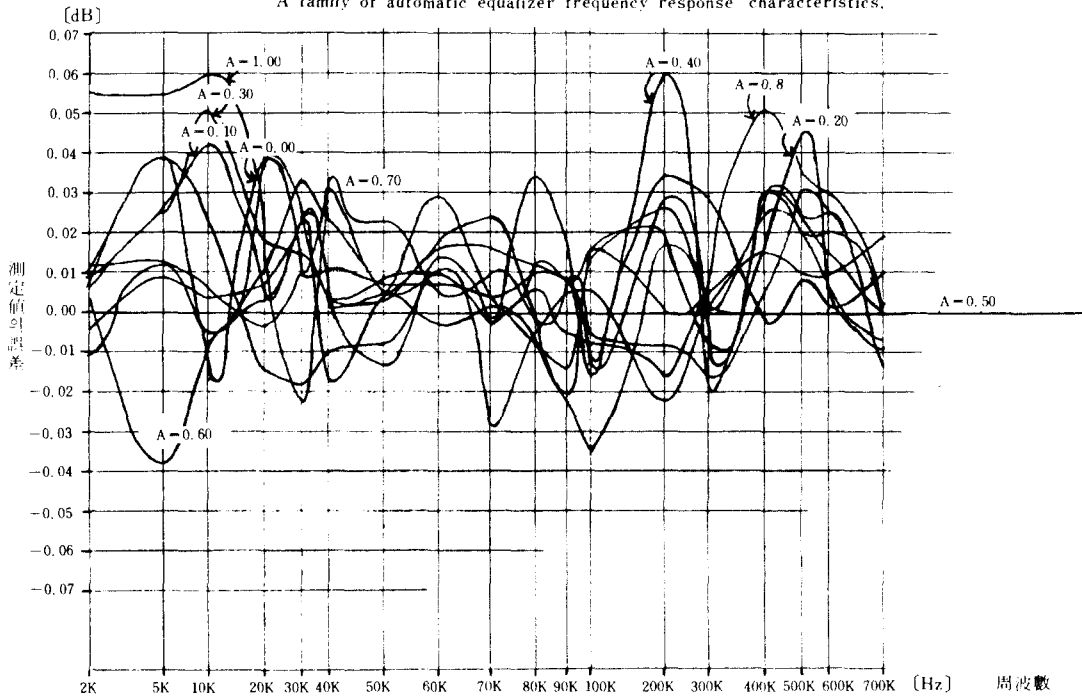


그림11 자동조절 등화기회로의 이론치와 비교한 측정치의 오차

The deviations of the measured value in comparison with the theoretical value of an autontic equalizer.

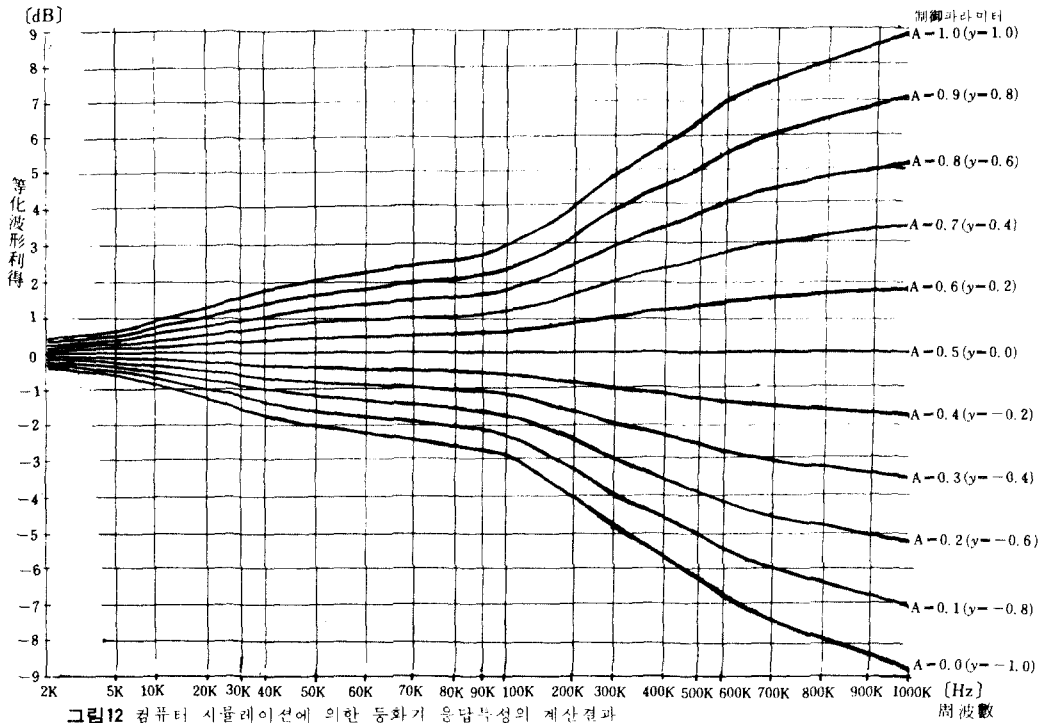


그림12 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 등화기 응답특성의 계산결과

The results of the equalizer response characteristics evaluated from computer simulation.

기는 그림 6에 제시한 등화기에서와 같이 1000kHz에서의 최대과형이득이 $\pm 9\text{dB}$ 에 근사한 값을 갖도록 설계하였다. 등화기 응답특성의 이론치에 대한 측정치의 오차는 그림 11에 제시하였다. 종래의 능동가변 등화기는 응답특성의 최대오차가 0.1dB 혹은 0.1dB이상이었으나 자동조절 등화기는 최대오차가 0.06dB로서 회로소자와 측정장치의 오차를 감안한다면 이론치에 매우 근사한 응답특성을 보여주었다. 즉 실험을 통해 제어요소값과 등화량 사이의 관계가 선형적인 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 등화기를 구성하는데 사용했던 연산 증폭기는 LM748이다. 이 연산 증폭기는 100kHz 이상부터 출력전압의 허용범위와 전압이득이 점차 감소하는 주파수 응답특성을 가지고 있으므로 실험을 통해 최대로 측정할 수 있었던 주파수는 700kHz였다.

따라서 주파수 대역폭이 더욱 넓은 연산 증폭기를 사용한다면 1000kHz 이상에서의 응답특성 측정이 충분히 가능할 것으로 생각한다.

그림 12는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응답특성의 이론치를 제시한 것이다.

4. 결 론

본 논문에서 제시한 자동조절 능동가변 등화기는 종래의 수동가변 등화기가 인덕터를 필요로 함으로써 집적회로형태로 구성할 수 없었던 단점을 제거시켰다.

최근에 개발된 새로운 형태의 능동가변 등화기도 정제환이나 신호감소 혹은 정제환과 신호감소 양쪽을 사용하여 등화를 이룸으로써 등화기에 대해 불필요하게 높은 감도를 갖게 하며 수동소자의 변동을 초래하게 하는 단점을 가지고 있었으나 본 논문에서 제안한 능동가변 등화기는 계환과 부가적인 순방향 공급경로만을 사용하여 등화를 이루도록 함으로써 이러한 단점을 제거하였다. 그리고 종래의 다른 능동 등화기가 가지고 있던 단점인 다수의 제어요소나 다수의 정형 회로망의 필요성을 제거시켜 준다는 것을 실험을 통해 보였다. 또한 본 논문의 등화기는 선형 제어관계, 간단한 설계과정 그리고 단일제어요소와 단일정형 회로망만을 필요로 하는 장점을 가지고 있으며 이론치에 대한 실험치의 최대오차가 0.06dB로서 종래의 등화기에 비해 상당히 오차를 줄일 수 있었다.

또한 전 범위에 걸쳐 동작하는 등화기를 구성하는데 있어 제어요소가 단지 0에서 1까지의 범위만을 필요로 하며 따라서 고도로 복잡한 현대 제어 시스템과 유선 원격조정 제어 시스템에 연결 사용할 수 있다.

앞으로의 연구는 전자제어 요소에 의해 더욱 정밀하게 조정되는 정확한 등화기의 개발과 나아가서 디지털 등화기의 개발에 역점을 두어야 할 것이다.

参 考 文 献

- (1) H. W. Bode, "Variable equalizers," Bell Syst. Tech. J., pp. 229-244, Apr. 1938.
- (2) Franc Brglez, "Inductorless variable equalizers," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-22, pp. 415-418, May 1975.
- (3) Takasaki et al., "High-precision inductorless variable equalizers with wide variable range," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-24, pp. 704-708, Dec. 1977.
- (4) Takasaki et al., "Inductorless variable equalizers using feedback and feedforward," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-23, pp. 389-394, June 1976.
- (5) Takasaki et al., "Variable equalizer," U.S. Patent 4 004 253.
- (6) Endo et al., "A method to realize a variable equalizer", Electronics Comm. (Japan), vol. 52-A, no. 4, pp. 25-29, 1969.
- (7) Franc Brglez, "Minimally active RC variable equalizers," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-22, pp. 688-691 Aug. 1975.
- (8) S. Shida and K. Suzuki, "Variable equalizer with differential amplifiers," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-24, pp. 318-320, June 1977.
- (9) Y. Takasaki, "Simple inductorless automatic line equalizer for PCM transmission using new variable transfer function," IEEE Trans. Comm., vol. COM-26, pp. 675-678 May 1978.



李 相 寧 (Sang Nyung LEE) 正會員
 1958年 9月 23日生
 1981年 2月 : 明知大學校電子工學科卒業
 1983年 8月 : 慶熙大學校大學院電子工學
 科卒業(工學碩士)
 1983年 9月 ~ 現在 : K. D. C. Corp. 開發
 部 勤務



朴 鍾 國 (Chong Kug PARK) 正會員
 1945年 2月 7日生
 1971年 2月 : 서울大學校物理科卒業
 1975年 8月 : 延世大學院電氣工學科卒業
 (工學碩士)
 1979年 8月 : 延世大學院電氣工學科卒業
 (工學博士)
 1978年 3月 ~ 1980年 2月 : 東洋工業專門
 大學電子科副
 教授
 1980年 3月 ~ 現在 : 慶熙大學校電子工學科助教授