

8 . 수정여파기에 관한 연구

1890

目 次

I. 서 論	261
II. 수정 필터	262
1. 수정 필터의 기본회로	262
가. 매칭격자 필터회로	262
나. Jaumann 회로를 사용한 필터회로	264
2. 수정필터의 설계	265
가. 설계 순서	265
나. 저역통과 Model 을 사용한 필터설계 이론	267
III. 455KHZ 태역통과 수정필터의 제작	276
1. 규 격	276
2. 수정 공진자의 소자치 계산	276
3. 설계한 필터의 특성	279
4. 수정 공진자의 제작	284
5. 수정 필터의 제작	292
IV. 결 論	296
V. 참 고 문 헌	298

동 신 기 정

오 주 한

동 신 기 좌

여 성 규

전 송 기 사 보

문 태 준

전 송 기 사 보

최 근 무

과 학 원 생

이 원 길

I. 서 론

통신의 급격한 발달에 따라 인간이 이용할수 있는 주파수대는 한정되어 있는데 반해 통신량의 팽창은 심각한 문제가 아닐 수 없다. 이 문제를 해결하는 한방법으로 단파파대(SSB) 이용 및 협대역 주파수변조를 사용하고 있다.

이 방법이 성공하기 위하여는 고안정성과 고선택도를 갖는 필터가 불가결의 요소가 된다. 수정필터는 이런 좋은 특성을 가졌으며 또한 낮은 손실과 소형으로 제작가능한 장점을 갖고있어 이에 가장 알맞는 필터가 되고있다.

이런 수정필터의 좋은 특성은 높은 Q를 갖는 수정공진자의 그 근거를 두고있다.

그 이유는 대역통과 필터가 고선택도와 적은 삽입손실을 갖이기 위해서는 필터특성에 큰영향을 주는 소자의 Q가 필터의 중심주파수에 대한 대역폭 비보다 훨씬커야 된다는 조건을 갖이기 때문이다. 현재 사용하고 있는 수정공진자의 Q는 20,000 ~ 200,000 까지이며 특수한 경우는 1,000,000 이상이다.

당연구에서는 이러한 수정공진자를 갖고 수정필터의 국내생산을 위한 계획으로 SSB수신기에 사용되는 수정필터를 전자계산기를 이용하여 설계한후 시작품 특성을 분석하여 각 소자에 한계치를 결정하고저 한다.

II. 수정 필터

1. 수정필터의 기본회로

가. 대칭격자 필터회로

지금까지 사용되고 있는 수정필터회로의 대부분은 대칭격자회로나 bridge 회로로 되어있다. 그런데 수정필터의 제작에 가장 큰 제약조건이 되고있는 병렬용량을 쉽게 처리하기 위해서는 대칭격자회로를 사용한다.

이 필터회로의 감쇄특성은 직렬 arm (A)와 병렬 arm (B)의 극 (Pole)과 영 (Zero)에 의해 결정된다.

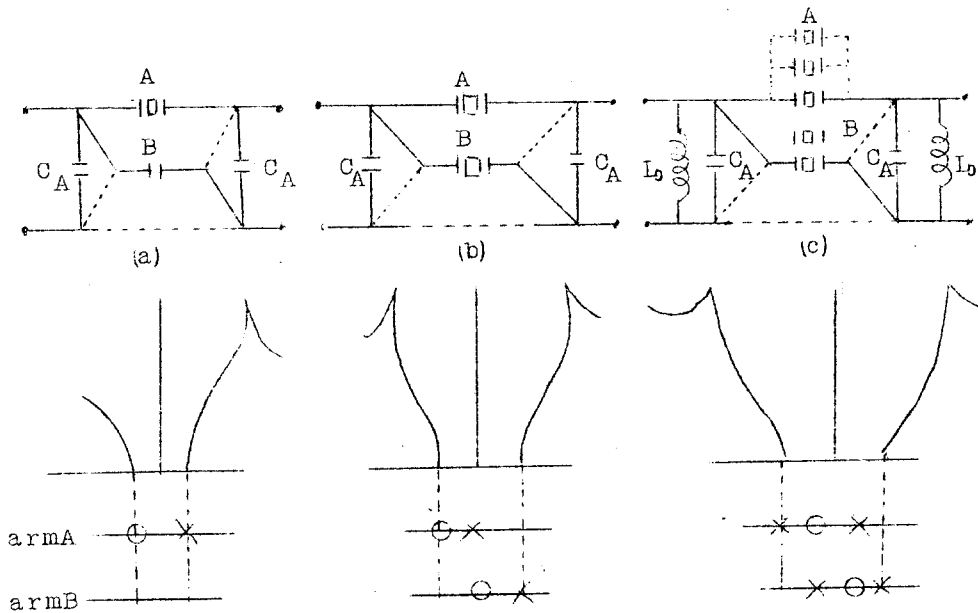


그림 1 수정격자 필터회로

그림 1 (a) , (b) 는 수정 - 용량 격자회로로서 협대역통과 대역 필터에 사용된다.

이 필터의 대역폭은 바로 수정 공진자의 극과 영의 간격에 의해 제한되며, 용량비와 관계된다. 이때 용량비는 외부에 연결된 C_A 까지 포함되므로 병렬 용량 C_0 가 증가한 것과 같은 효과를 가진다. 결과적으로 대역폭은 아주 적어지며, 최소 대역폭은 필터 중심 주파수의 0, 01 % 까지 만들수 있다. 좀더 넓은 대역폭을 갖는 수정필터를 만들기 위해서는 그림 1 (c) 와같이 격자회로와 병렬이나 직렬로 inductance 를 연결한다.

inductance L_0 는 $(C_0 + C_A)$ 와 더불어 중심 주파수에 공진하게 된다. 이렇게하면 통과대역폭이 직접적으로 용량비에 의해 제한받는 문제점은 해결된다. 이런 류의 필터를 중간대역필터라하며 당소에서 연구한 455KHz 필터도 이종류에 속한다. 여기에 사용되는 inductor 의 Q 는 60 ~ 100 정도이며 대역폭은 중심주파수의 0.3 ~ 1.5 % 이고 수정 - 용량 필터의 2 ~ 3 배 정도 대역폭을 넓힐 수 있다.

광대역수정필터는 그림 1 (c) 와 같은 회로로서 수정공진자와 inductance 를 잘 조합해서, 넓은 대역폭을 얻는데, 보통 중심주파수의 1.5 ~ 10 % 까지 대역폭을 넓힐 수 있다. 그림 1 은 대칭격자필터의 기본적인 회로만 표시한 것이고 실제로는 선택도와 감쇄역의 감쇄량을 증가시키기 위해 그림 1 의 회로를 종속접속하든가 격자 arm 에 평행으로 몇개의 공진자를 더 연결하는 등 복잡한 형태가 된다.

나. Jaumann 회로를 사용한 필터 회로

격자 arm에 몇개의 공진자를 병렬로 연결할때 각각 공진자의 병렬용량을 더하여 그 합을 그림 2 (a) 와 같이 외부로 뽑아내는 데는 격자 조가 아주 편리하다.

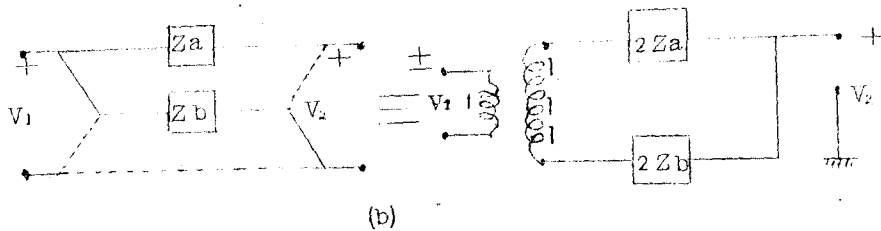
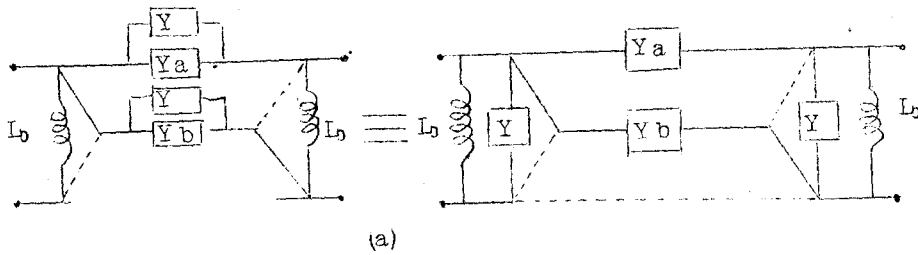


그림 2 등 가 회로

즉 각 arm의 병렬용량의 합 (그림 2 (a) 에서는 Y 에 해당) 이 같을때, 밖으로 뽑아내어 L_o 와 공진시켜 C_o 의 영향을 없앨 수 있다.

이와같이 격자회로가 좋은 점이 있는 반면에 다음과 같은 단점도 갖고 있다.

첫째 모든 소자 (component) 가 두 배로 필요하며 입력과

출력 사이에 공통접지가 없으므로 접지의 문제점이 생기며 소자치가 조금만 변해도 주파수 특성에 왜곡을 초래한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2 (b) 와 같은 Jaumann 회로를 이용한다. 여기에 사용되는 변성기는 이상적인 변성기로서 2 차측은 접지에 대해 정확히 균형되어야 하며 1 차측과 2 차측은 밀결합되어야 한다.

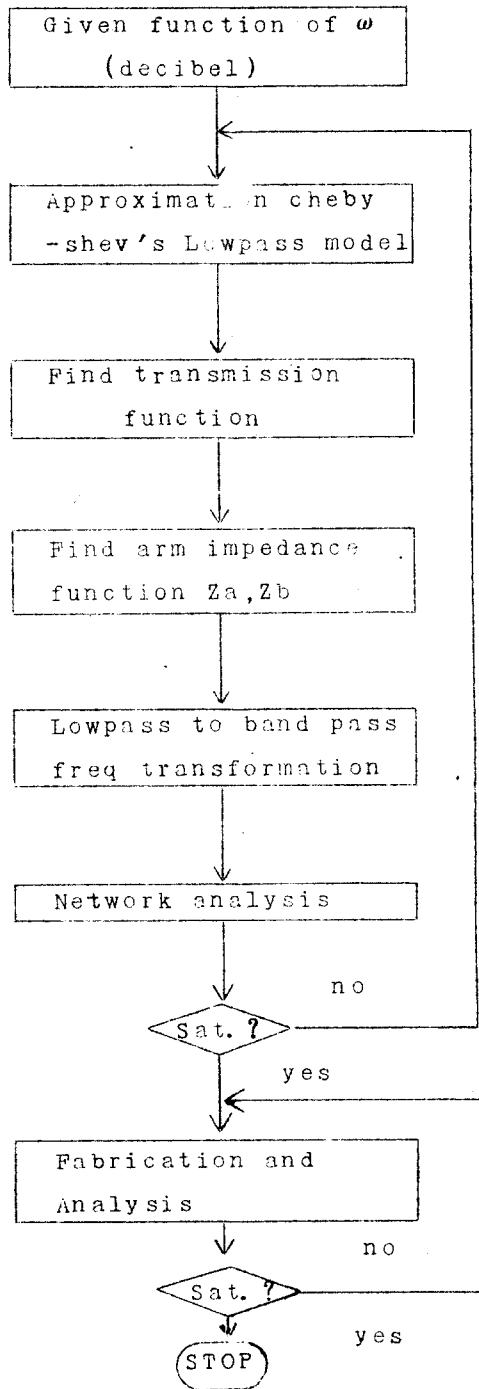
그러나 실제 변성기는 코일사이의 용량때문에 inductance 가 무한대가 될수 없으므로 고주파에서는 이상적인 변성기가 되지 못한다. 그래서 이것을 이상적인 변성기와 같게하기 위해 2 차측코일과 병렬로 가변할 수 있는 콘덴서를 단다. 또한 야광회로에 주파수 범위는 $10\text{KHz} \sim 40\text{MHz}$ 이며 대역폭 범위는 중심주파수의 $0.01 \sim 7\%$ 정도이다.

2. 수정필터의 설계

가. 설계순서

원하는 필터의 주파수 특성이 주어지면 여기에 가장 가까운 주파수 특성을 가진 저주파 통과필터 Model 을 Chebyshev 군에서 찾는다.

다음으로 이 Model 의 극 (Pole) , 영 (Zero) 으로 재현할 수 있는 Transmission function 을 만들고 여기서 Darlington 방법에 의해 합성을 한다.



다음 격자회로로 바꾸기 위해 2 등분정리를 이용하며, 각 arm의 impedance는 저역통과필터에서 대역 통과필터로 주파수 변환을 통해 실제 재현할 수 있는 소자치를 얻는다.

여기서구한 소자치로서 회로 분석을 하는데 전자계산기를 이용한다. 분석결과 원하는 특성이 나오면 계산된 소자치대로 수정공진자 제작에 들어가며 그렇지 못하면 저주파 필터 Model을 다시 찾는다.

끝으로 제작한 공진자를 측정해서 그값으로 주파수 특성을 구하고 그다음 필터특성을 측정해서 주파수 특성을 구한다. 이 두 값을 비교 검토하여 실제만든 필터특성이 원하는 특성을 못알면 원인을 규명하고 다시 제작한다.

그림 3 설계순서의 flow Chart

나. 저역통과 Model 을 사용한 필터 설계이론

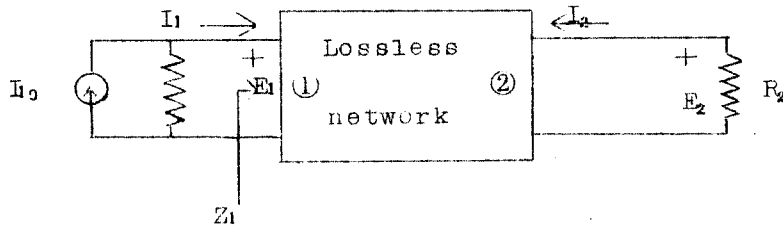


그림 4 양쪽에 부하를 단 무손실 회로

그림 4의 driving point impedance는

$$\frac{E_1}{I_1} = Z_1(j\omega) = R_{11} + jX_{11} \quad (1)$$

이 회로에 들어오는 평균전력은 나가는 전력과 같으므로

$$|I_1|^2 R_{11} = \frac{|E_2|^2}{R_2} \quad (2)$$

$$\frac{I_1}{I_{10}} = \frac{R_1}{R_1 + Z_1} \quad (3)$$

식 (2), (3)에서

$$|I_1|^2 = \frac{|I_{10}|^2 R_1^2}{|R_1 + Z_1|^2} \quad (4)$$

식 (2), (4)에서

$$\frac{|E_2|^2}{R_1 R_2 |I_{10}|^2} = \frac{R_{11} R_1}{|R_1 + Z_1|^2} = \frac{1}{4} \left(1 - \left| \frac{R_1 - Z_1}{R_1 + Z_1} \right|^2 \right) \quad (5)$$

$E_{10} = R_1 I_{10}$ 이므로

$$\frac{4 |E_2|^2}{R_1 R_2 |I_{10}|^2} = \frac{|E_2|^2 / R_2}{|E_{10}|^2 / 4 R_1} = t(j\omega)^2 \quad (6)$$

이 식은 Source에 의해 R_2 에 최대로 전달할 수 있는 전력

에 대해 실제 R_L 에 전달되는 전력의 비이다.

이 $t(s) \big|_{s=j\omega}$ 를 transmission coefficient 혹은 transmission function이라 한다.

$$|t(j\omega)|^2 = 1 - |\rho(j\omega)|^2 \quad (7)$$

$\rho(s) \big|_{s=j\omega}$ 을 reflection coefficient 혹은 reflection function이라 한다.

식 (5), (6)에서

$$\rho(s) = \frac{R_L - Z_L(s)}{R_L + Z_L(s)} \quad (8)$$

$R_L = 1$ 일 때, 식 (8)에서

$$Z_L(s) = \frac{1 - \rho(s)}{1 + \rho(s)} \quad (9)$$

결과적으로 주어진 $t(s)$ 에서 $\rho(s)$ 를 구하고 이 $\rho(s)$ 로부터 $Z_L(s)$ 를 구한다.

이 $Z_L(s)$ 를 합성하는데 Darlington 방법을 이용한다. 그런데 격자회로를 만들기 위해서는 대칭적인 회로가 우선 필요하므로 Darlington 방법에 의한 대칭회로 구성에 대해 먼저 연구해 본다.

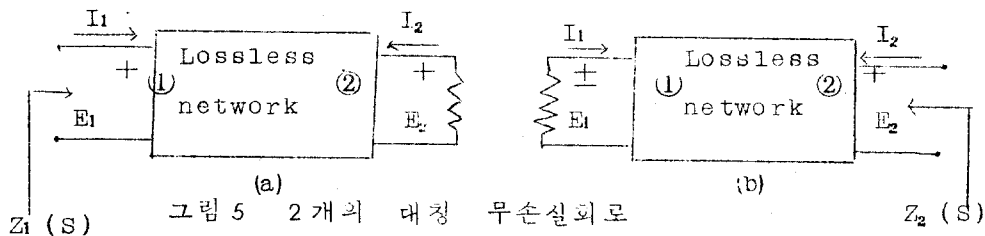


그림 5 2개의 대칭 무손실 회로

그림 5에서 $Z_1(S) = \frac{m_1 + n_1}{m_2 + n_2} \dots \dots \dots (10)$

이면

$$Z_2(S) = \frac{m_2 + n_1}{m_1 + n_2} = \frac{P(S)}{Q(S)} \dots \dots \dots (11)$$

여기서 m 은 우수차 다항식이고 n 은 기수차다항식이다 식 (10), (11)에서 $m_1 = m_2$ 이면 $Z_1(S) = Z_2(S)$ 가되며 이 회로는 대칭회로가 된다.

또 $n_1 = n_2$ 이면 $Z_1(S) = 1/Z_2(S)$ 가 되며 이것을 역대칭회로라한다.

Transmission function에서 impedance function을 유도하는 과정에서 impedance function이 위와 두경우중 한가지 경우가되므로 각각각각의 경우에 대해 기술한다.

i) 대칭회로의 경우

식 (10)에서 $Z_1(S) = \frac{m_1 (n_1/m_1) + 1}{n_2 (m_2/n_2) + 1} \dots \dots \dots (12)$

또 $Z_1(S)$ 를 회로의 Z-Parameter로 표시하면

$$Z_1(S) = \frac{(Z_{11,22} - Z_{12}^2) + Z_{11}}{Z_{22} + 1} \dots \dots \dots (13)$$

식 (12), (13)에서

$$Z_{11} = \frac{m_2}{n_1} \circ Z_{22} = \frac{m_2}{n_2} \quad Y_{22} = \frac{m_1}{n_1} \dots \dots \dots (14)$$

$$Z_{12} = \frac{\sqrt{m_1 m_2 - n_1 n_2}}{n_2}$$

그림 5에서 $Z_{12}(S) = \frac{E_2}{I_1}$ 이므로 Thevenin 정리에 의해

$$Z_{12}(S) = \frac{Z_{12}}{1 + Z_{22}} \quad (15)$$

식 (14), (15)에 의해

$$Z_{12}(S) = \frac{\sqrt{m_1 m_2 - n_1 n_2}}{m_1 + n_2} \quad (16)$$

대칭 회로이므로 $Z_{12}(S) = Z_{21}(S)$ 이다.

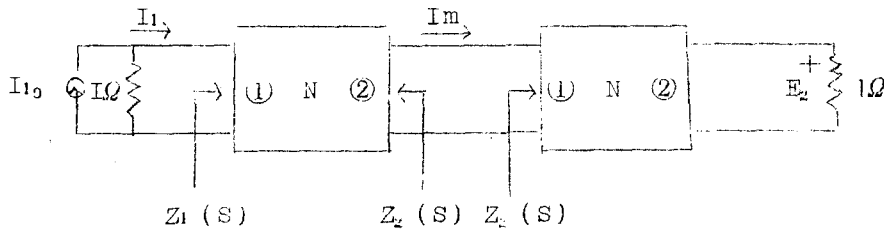


그림 6 대칭 회로

그러므로 식 16에 의해

$$Z_{21}(S) = \frac{E_2}{Im} = \frac{\sqrt{m_1 m_2 - n_1 n_2}}{m_1 + n_2} \quad (17)$$

Thevenin 정리에 의해

$$Im = \frac{I_{10} Z_{21}}{2 Z_2} \quad (18)$$

식 (17)에 대입하면

$$\frac{2 E_2}{I_{10}} = \frac{Z_{21}^2}{Z_2} = \frac{m_1 m_2 - n_1 n_2}{(m_2 + n_1)(m_1 + n_2)}$$

$$= \frac{P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)}{2P(S)Q(S)} \dots\dots\dots (19)$$

식 (19) 를 제공하면

$$\begin{aligned} \left| \frac{2E_z}{I_{10}} \right|^2 &= \frac{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2}{4P(S)Q(S)P(-S)Q(-S)} \\ &= \frac{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2}{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2 - [P(S)Q(-S)-P(-S)Q(S)]^2} \end{aligned}$$

\dots\dots\dots (20)

여기서 transmission function $t(j\omega)$ 의 제공형은

$$t(j\omega)^2 = \left| \frac{2E_z}{I_{10}} \right|^2 = \frac{M^2}{M^2 - N^2} = \frac{1}{1 - (N^2/M^2)} \dots\dots\dots (21)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{1}{2} [P(S)Q(S)+P(-S)Q(S)] = m_1 m_2 - n_1 n_2 \\ N &= \frac{1}{2} [P(S)Q(-S)-P(-S)Q(S)] = m_1 n_1 - m_2 n_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$$\left. \begin{aligned} M + N &= P(S)Q(-S) \\ M - N &= P(-S)Q(S) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

어떤 transmission function 의 제공형이 식 (21) 로 표시되면 대칭형의 회로로 만들수 있다.

다음단계로 이대칭형의 회로를 실제 격자회로의 각 arm impedance 함수로 나타내기 위해 이등분정리를 이용한다.

그림 6 을 격자회로로 표시할시 각 arm impedance 함수는

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= \frac{1}{Y_{22}} = \frac{n_1}{m_1} \\ Z_b &= Z_{22} = \frac{m_2}{n_2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

ii) 역 대칭 회로의 경우

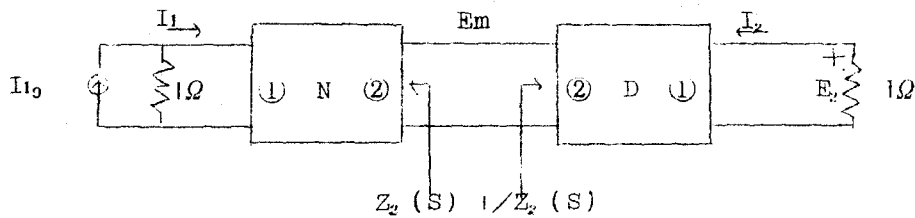


그림 7 역 대칭 회로

그림 7의 회로 D는 회로 N의 transfer impedance와 같은 transfer admittance를 가지므로

$$Z_{21}(S) = \frac{I_2}{Em} = \frac{E_2}{Em} = \frac{\sqrt{m_1 m_2 - n_1 n_2}}{m_1 + n_2} \quad (25)$$

Thevenin 정리를 적용하면

$$\frac{Em}{I_{10}} = \frac{Z_{21}(1/Z_2)}{Z_2 + (1/Z_2)} = \frac{Z_{21}}{Z_2^2 + 1} \quad (26)$$

식 (25)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{2E_2}{I_{10}} &= \frac{2E_{21}^2}{Z_2^2 + 1} = \frac{2(m_1 m_2 - n_1 n_2)}{(m_2 + n_1)^2 + (m_1 + n_2)^2} \\ &= \frac{P(S)Q(-S) + P(-S)Q(S)}{P(S)^2 + Q(S)^2} \quad (27) \end{aligned}$$

식 (27) 의 제곱형은

$$\begin{aligned} \left| \frac{2E_2}{I_{10}} \right|^2 &= \frac{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2}{[P(S)^2+Q(S)^2][P(-S)^2+Q(-S)^2]} \\ &= \frac{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2}{[P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)]^2 + [P(S)P(-S)-Q(S)Q(-S)]^2} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서

$$|t(j\omega)|^2 = \left| \frac{2E_2}{I_{10}} \right|^2 = \frac{M^2}{M^2+W^2} = \frac{1}{1+W^2/M^2} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} [P(S)P(-S)-Q(S)Q(-S)] \\ &= \frac{1}{2} [(m_2'-m_1^2)-(m_1'-m_2^2)] \\ M &= \frac{1}{2} [P(S)Q(-S)+P(-S)Q(S)] \end{aligned} \quad (30)$$

역대칭회로가 재현되기 위해서는 식 (29) 의 분모가 Hurwitz 가 되어야 하므로 식 (29)(30)에서

$$\begin{aligned} 2(W+jM) &= [P(S)+jQ(S)][P(-S)+jQ(-S)] \\ 2(W-jM) &= [P(S)-jQ(S)][P(-S)-jQ(-S)] \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 $P(S), Q(S)$ 의 다항식은 $(W+jM)$ 의 근중 좌평면의 근만 으로 구성된다.

이렇게 계산된 $[P(S)+jQ(S)]$ 의 다항식을 격자회로의 arm impedance 함수로 변환시키기 위해 2 등분정리를 사용하면 각 arm impedance 는

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= \frac{n_1 + jm_2}{m_1 + jn_2} \\ Z_b &= \frac{n_1 - jm_2}{m_1 - jn_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

식 (32) 을 수정 공진자의 소자치 (R_1, L_1, C_1, C_0) 로 고치기 위해서는 Foster 의 제 2 형식인 부분분수전개를 한다. 그런데 여기서 문제점은 소자치중 재현할 수 없는 허수부분이 있는것이다.

이 재현할수없는 허수부분은 저수와 통과필터에서 대역통과필터로 주파수변환을 할때 재현할수있는 L 나 C 로 바꾼다. 일반적인 주파수변환식은

$$S_B = \frac{S}{2a} \pm i \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2a}\right)^2} \dots\dots\dots (33)$$

여기서 $a = \frac{fm}{\Delta f}$ Δf : 통과 대역폭
 fm : 중심주파수

식 (33) 에서 중간대역의 a 값은 아주크므로 $\left(\frac{S}{2a}\right)$ 항은 무시할수 있다. 그결과,

$$S_B = \frac{S}{2a} \pm j \dots\dots\dots (34)$$

이 근사식은 $a < 0.1$ 인 조건에서는 오차를 무시할 수 있다.

식 (34) 로 주파수변환을 하면 각 수정 공진자의 공진주파수와 inductance(L_1) 은

$$f_{1,2} = fm \pm F \frac{\Delta f}{2}, \quad L_1 = \frac{L_1}{\Delta W} \dots\dots\dots (35)$$

여기서

$$F = \frac{X}{L_1} \quad X = \text{constant Reactance}$$

L_1 = 저주파통과필터의 inductance

iii) Yaman 회로의 변성기와 부하코일

주파수 변환결과 수정 공진자에 대치할수있는 소자치는 계산되었으나 실제 공진자 제작시 나타나는 병렬용량값은 계산되지 않았다.

그러므로 필터제작을 위해서는 절단각에 해당되는 병렬용량을 계산하고 이 용량을 없애기위해 source 와 부하측에 부하코일 L_c 를 붙여야 한다.

이때 L_c 는 원래의 특성에 왜곡을 주지않기위해 필터의 대역폭보다 넓은 대역폭 Δf_c 를 가져야한다.

$$\text{즉 } \frac{\Delta f_c}{\Delta f} = \frac{fm}{Q\Delta f} = \left(\frac{fm}{\Delta f}\right)^2 \cdot \frac{L_1}{L_{min}} \gg 1 \quad (36)$$

여기서 L_{min} 은 각 공진자 소자치중 L_1 값이 가장적은 공진자의 L_1 값

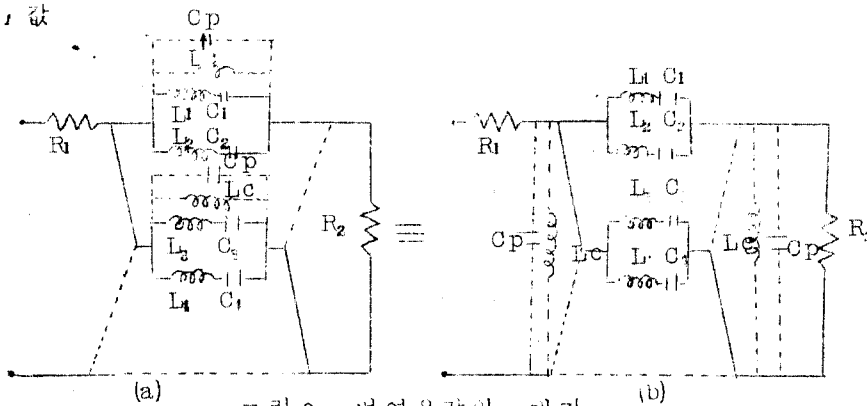


그림 8 병렬용량의 제거

그림 8에 나타난 C_p 는 각 arm에 있는 수정공진자의 C_0 합이며 C_p 값이 서로 다르면 그림 8(b)와 같이 외부로 C_p 를 뽑아낼수 없으므로 C_p 와 병렬로 여분의 콘덴서를 달아 각 arm의 C_p 값을 같도록 조정해야 한다.

Jaumann 회로의 변성기는 임, 출력측의 부하코일로 대체되며 코일의 권수를 조정하여 impedance 정합을 하기도 한다.

III. 455KHz 대역통과수정필터의 제작

1. 규 격

SSB 수신기에 사용되고있는 수정 필터 제작을 시도했다.

요구되는 규격은 전파관리법 시행령 205조에 다음과 같이 명시되어있다.

A3A, A3H, A3J의 전파는 28MHz 이하에서는 아래사항의 수신장치 조건을 만족해야 한다.

통과대역폭 : 6db에서 2.4KHz ~ 3KHz

감쇄량 46db에서 3.8KHz 이내

66db에서 4.2KHz 이내

~ Spurious response : 40db이상

2. 수정 공진자의 소자치 계산

주어진 특성을 얻기위해 $n=4$ 인 Chebyshev의 저주파통과 Model을 이용했다.

이 Model의 저주파 통과필터 특성은 그림 9(b)와 같으며 사용된 극과 영은 그림 9(a)와 같다.

이때의 Ω_s 와 A_{min} 은

$$\Omega_s = 1.910879$$

$$A_{min} = 40.02$$

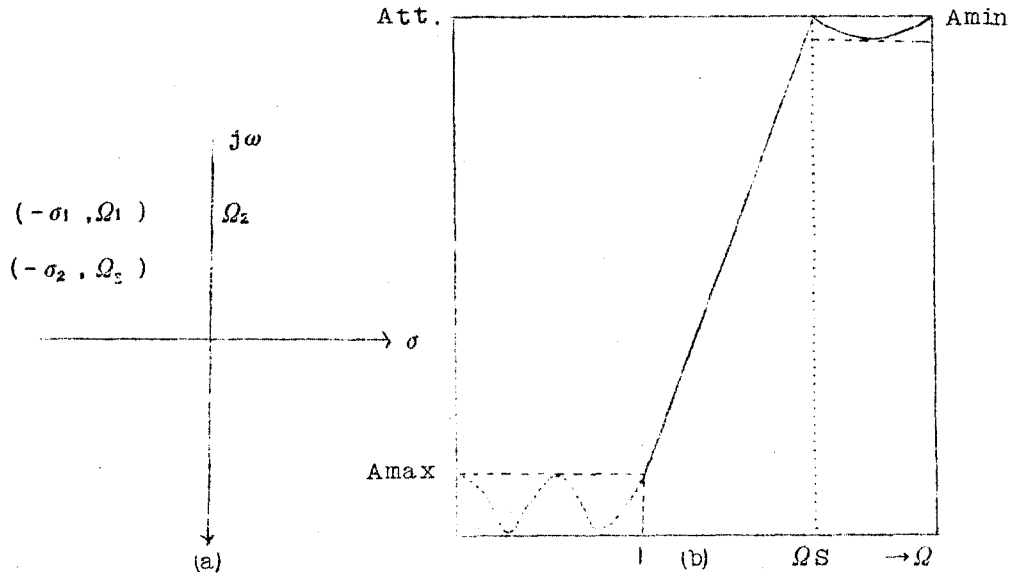


그림 9 저주파통과필터특성

$$\sigma_1 = -0.21918220$$

$$\sigma_2 = -0.67060050$$

$$\Omega_1 = 1.11882230$$

$$\Omega_2 = 2.072410$$

$$\Omega_3 = 0.5282668$$

가 Transmission function에서 M.W 계산

$$t(s)^2 = \frac{1}{1 + M^2/W^2} \quad (29)$$

$$t(s) = \frac{W(s)}{Q(s)} \text{ 로 두면}$$

식 (29)에서

$$\left| t(s) \right|^2 + \left| t(s) \right|^2 \left(\frac{M}{W} \right)^2 = \frac{W(s)}{Q(s)} \cdot \frac{W(-s)}{Q(-s)} + \frac{M(s)}{Q(s)} \cdot \frac{M(-s)}{Q(-s)} \\ = 1 \dots\dots\dots (37)$$

$$\therefore Q(s)Q(-s) = W(s)W(-s) + M(s)M(-s) \dots\dots\dots (38)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} t(s) &= \frac{a(s^2 + \Omega_1^2)}{(s^2 - 2\sigma_1 s + \sigma_1^2 + \Omega_1^2)(s^2 - 2\sigma_3 s + \sigma_3^2 + \Omega_3^2)} \\ t(-s) &= \frac{a(s^2 + \Omega_1^2)}{(s^2 + 2\sigma_1 s + \sigma_1^2 + \Omega_1^2)(s^2 + 2\sigma_3 s + \sigma_3^2 + \Omega_3^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

$$M(s)M(-s) = Q(s)Q(-s) - W(s)W(-s) \\ = [(s^2 + \sigma_1^2 + \Omega_1^2)^2 - 4\sigma_1^2 s^2][(s^2 + \sigma_3^2 + \Omega_3^2)^2 - 4\sigma_3^2 s^2] \\ - a^2 (s^2 + \Omega_1^2)^2 = (s^4 + bs^2 + c)^2 \dots\dots\dots (40)$$

완전제곱이되게 a 를 조정하면 식(29)와 같은 형식이 된다.

나 M, W 에서 격자 arm의 impedance 계산

$W + jM s^2 = P$ 에서 좌평면에 있는 근을 구하여 그것을 s_1, s_2 라하면

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= -A + jB \\ s_2 &= -C - jD \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (41)$$

식(41)의 근으로 다항식을 만들면

$$(W + jM) = (s + A - jB)(s + C + jD) = s^2 + Es + F + j(Gs + H) \dots\dots\dots (42)$$

식(32)에 의해

$$Z_a = \frac{ES + jH}{s^2 + jGS + F} \quad Z_b = \frac{ES - jH}{s^2 - jGS + F} \dots\dots\dots (43)$$

이 식을 부분분수로 전개한후 주파수변환을 하면 실제 각 공진자의 소자치가 계산된다.

이 계산의 결과가 Table #1"에 표시되어 있다.

Table #1" 수정 공진자의 소자치

공진자 번 호	공진주파수 (HZ)	C_1 (pf)	L_1 (H)	C_0 (pf)	水晶板의 크기	
					L&W (mm)	t (mm)
1	453720	0.00989825	12.4310	3.355	6.792736	0.5500
2	455652	0.02440	5.00	8.2717	6.763931	0.2212389
3	456280	0.00978749	12.4310	3.31790	6.754624	0.5500
4	454347	0.02454110	5.00	8.31930	6.78335	0.2212389

Table 1에서 보면 수정 공진자 제작을 위한 수정판의 크기는 가로 세로 길이가 거의 같으며 특히 두께가 두께씩 같으므로 다량생산을 위해서는 아주 좋은 설계방법이 된다.

3. 설계한 필터의 특성

가. 공진자의 Q가 무한대이고 병렬용량이 없는 경우에서 설계한 필터의 특성이 그림 10에 표시되어 있다.

그림에서 "G"로 표시된것이 원하는 필터의 특성이고 "☆"로 표시한것이 설계한것이 설계한 특성인데 비교해보면 설계한 특성이 훨씬 좋게 나타났다.

중요한 점에서의 특성은

$$A_{Max} = 0.46db$$

$$A_{Min} = 83.5db$$

6db 점의 주파수 : 453750Hz - 456250Hz (2.5KHz)

46db 점의 주파수 : 453250Hz ~ 456750Hz (3.5KHz)

66db " : 452900Hz ~ 457100Hz (4.2KHz)

나. 수정 공진자의 Q가 20,000 인 경우의 특성

필터에 사용되는 공진자의 Q는 보통 20,000 정도이므로 Q를 20,000으로하고 Table 1에 표시된 병렬용량을 없애기 위해 식 (36)에 주어진 조건을 만족하는 부하코일을 달았다.

이때 부하코일의 inductance는 $800 \mu H$ Q = 60으로했다.

그결과와 특성이 그림 11에 표시되어있다. 중요점의 특성은 그림 10과 같으며 틀리는것은 $A_{Max} = 5.51db$ $A_{Min} = 84.857db$

66db 점의 주파수 : 452900Hz ~ 457100Hz (4.2KHz)

이런 특성으로는 통과대역내의 ripple과 손실이 너무크므로 이것을 1db이하로 줄이기위해 Fletcher-Powell의 최적설계방법을 이용했다. 여기에 사용한 변수로는 L_c 의 inductance 및 Q, source저항 및 부하저항을 사용했다. 그결과 그림 12와같은 특성을 얻었는데

6db 점의 주파수 : 453750Hz-456250Hz (2.5Hz)

46db 점의 주파수 : 453250Hz-456750Hz (3.5KHz)

66db " : 452900Hz-457100Hz (4.2KHz)

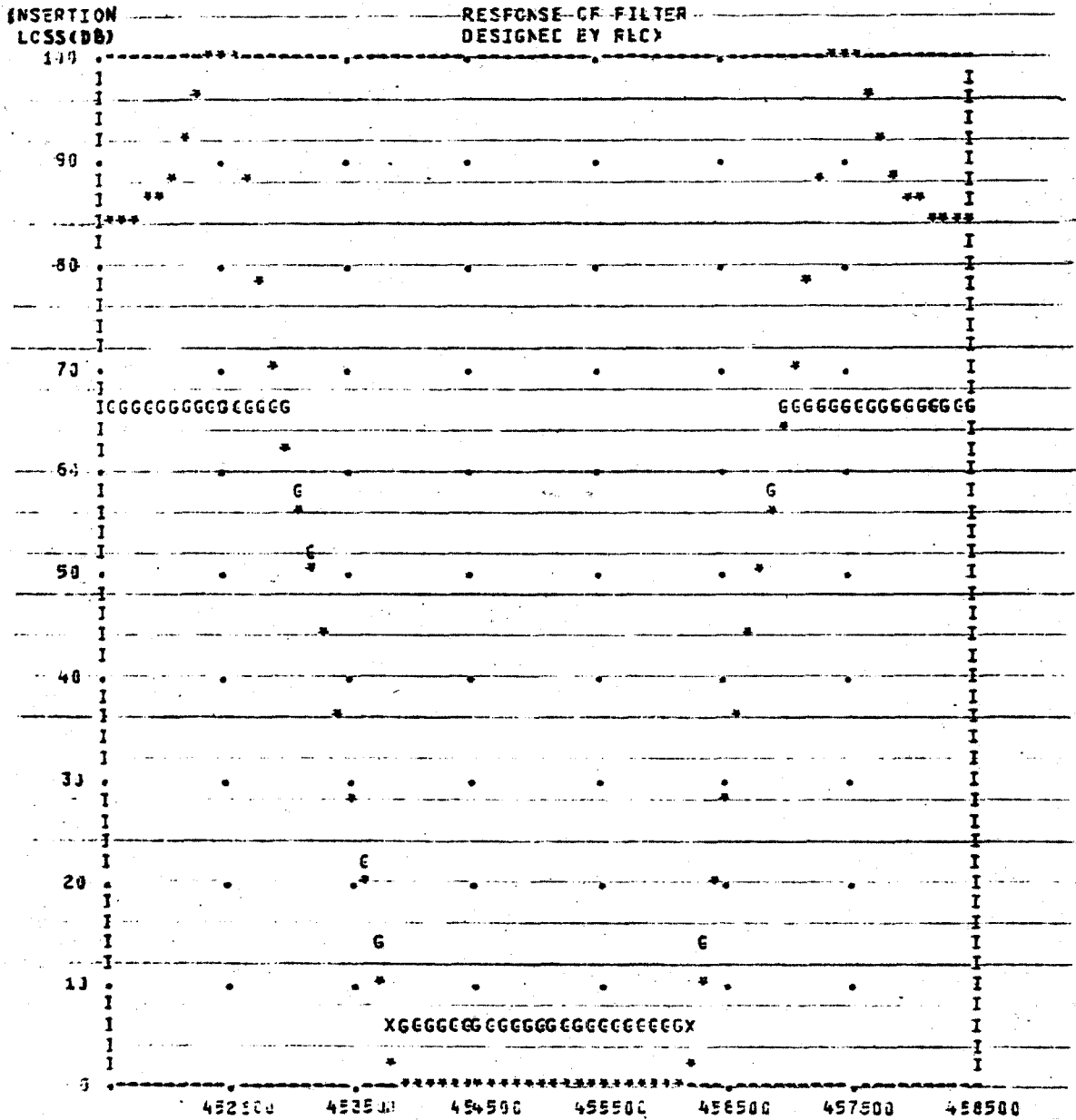
$A_{Max} = 1.52db$

$A_{Min} = 87.0db$

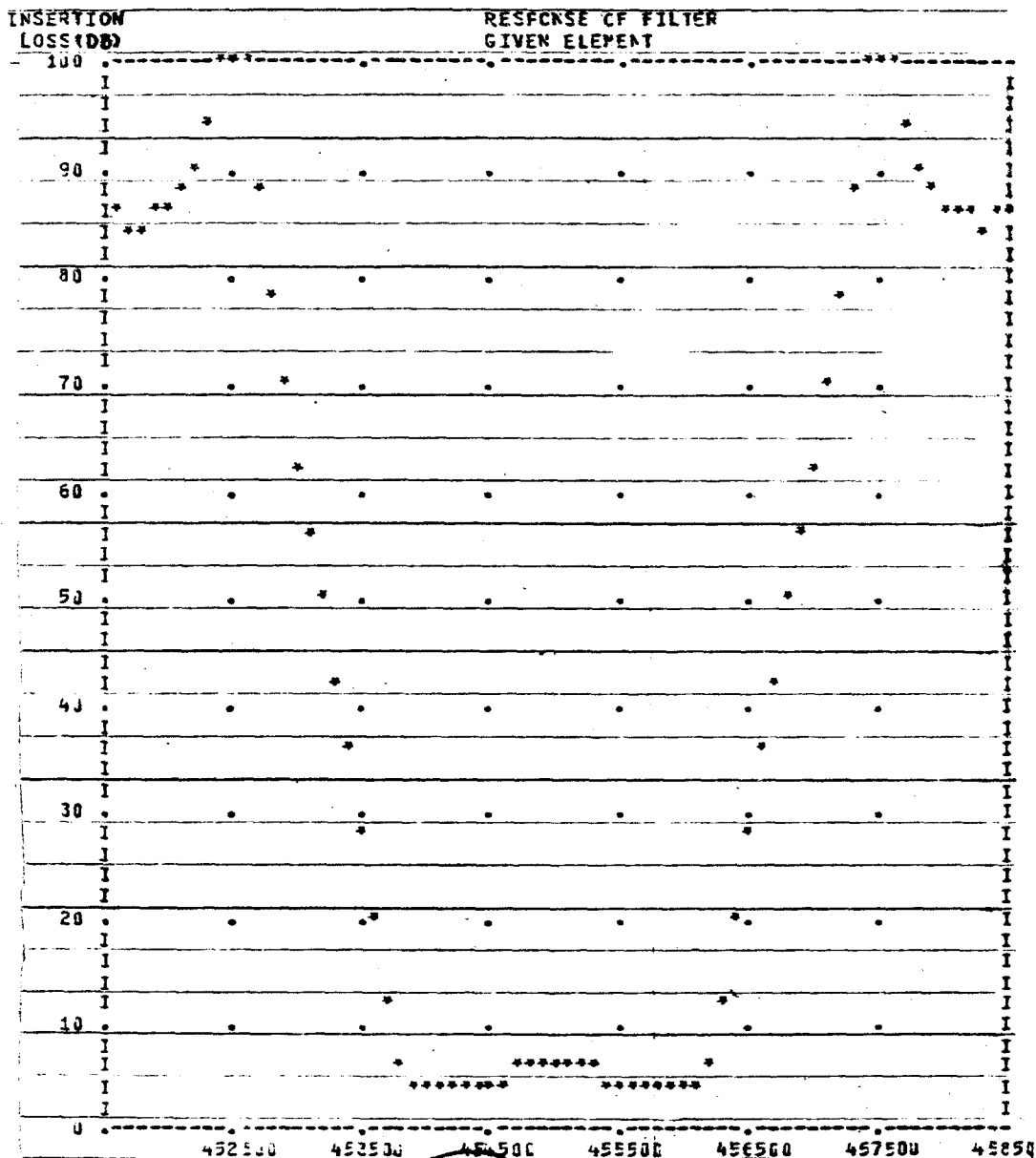
이며 통과대역의 손실은 많이 감소했으나 ripple은 1.04db로 별로 감소되지 않는다. 또 계산된 값이 $L_c = 2.3H$ $Q = 400$ 이며 source저항 및 부하저항은 변화가 없었다.

이 부하코일의 inductance와 Q는 실제 제작이 불가능한 값들이었으므로 450KHz대에서 제작가능한 최대값들을 사전에 정해두고

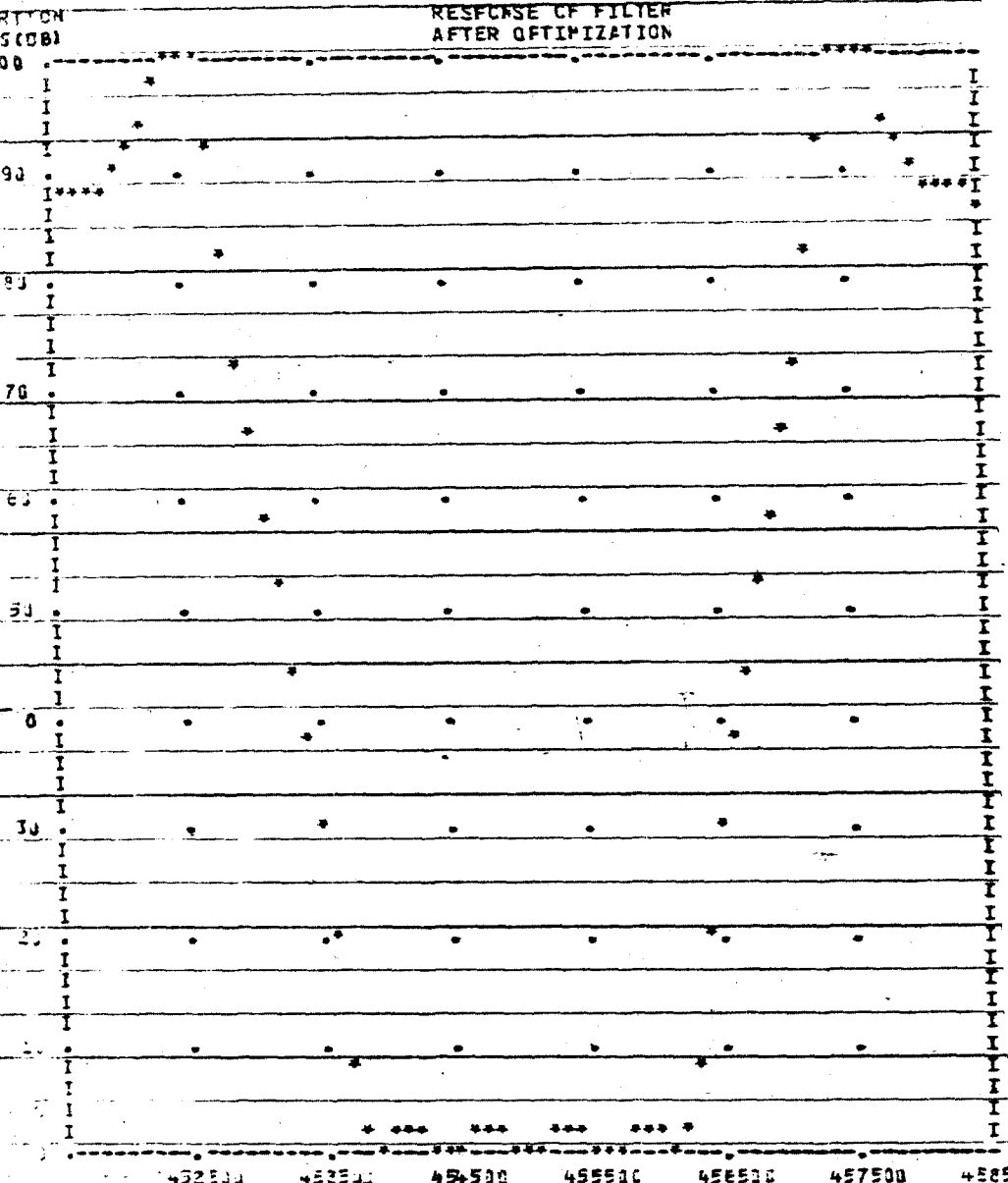
***** FREQ. RESPONSE OF CRYSTAL FILTER *****
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



**** FREQ. RESPONSE OF CRYSTAL FILTER ****
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



FREQ. RESPONSE OF CRYSTAL FILTER
 22272227227227227227227227227227227227227227227227222



다시 최적설계를 한결과 부하코일의 inductance는 1.7mH , Q 는 100이고 Source 및 부하저항은 $50\text{K}\Omega$ 이었으며 주파수특성이 그림 13에 표시되어있다.

A_{Max} 는 2.0db , A_{Min} 은 80.23db 이나 통과대역내의 ripple은 0.2db 로 좋아있다.

그러나 통과대역내의 손실은 2.0db 로 증가되었다. 그렇지만 시판되는 외국제품의 필터특성도 통과대역내의 손실이 6db 정도됨을 감안하면 이정도로서도 제작한후 좋은특성을 얻을수 있을것으로 생각되었다. 실제 제작한후 측정한결과 5.5db 정도의 삽입손실이 있었다.

4. 수정 공진자의 제작

가. 제작공정

i) 수정판

450KHz 대의 수정 공진자용 절단방법은 CT - CUT로서 천연 수정에서 $37^\circ 40'$ 으로 절단했다.

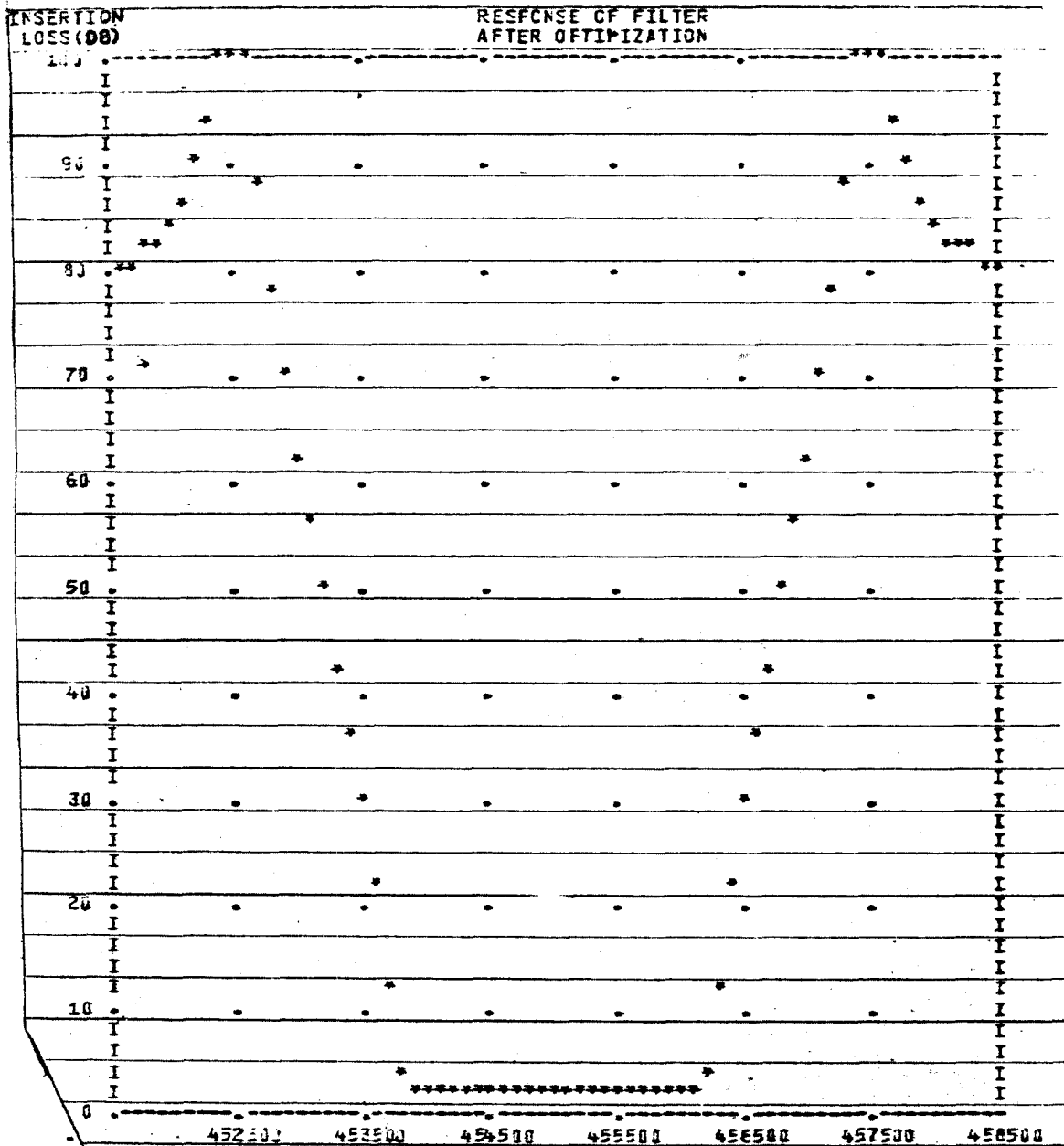
이 수정판의 두께는 설계된 L_1 값을 만족시키기 위해 Table 1을 참조하여 0.6mm 로했다.

ii) 평면연마

Eccentric Lapping 기계를 사용하며 이때 사용하는 연마제는 # 1,500 ~ # 3,000로서 계산된 두께까지 정확히 연마하며 최종연마시는 # 4,000을 사용한다.

수정 공진자 번호 1. 3 의 두께는 0.221mm 를 기준으로 하여 오차

***** FREQ. RESPONSE OF CRYSTAL FILTER *****
 XXXXX1XX1XX1XX1XX1XX1XX1XX1XX1XX1XX1



범위는 $+0.005\text{ mm} \sim 0.002\text{ mm}$ 이고 두께는 0.550 mm 을 기준으로해서 $+0.005\text{ mm} \sim 0.002\text{ mm}$ 의 오차로 제작했다. 오차범위가 +쪽이 큰 것은 정밀수정을 위해 조정이 가능하도록 하기 위함이며 기준보다 -쪽이 0.002 mm 다적으면 정밀수정이 불가능하기 때문이다. 요구되는 두께로 연마한뒤 연마제 세척과 etching을 위해 48%불화암모니아에 5초간 담근다. (60°C 유지)

iii) 윤곽연마

CT-CUT 공진자의 주파수는 변의길이에 의해 결정되므로 주파수를 측정해 가면서 변의길이를 맞추어야 한다. 특히 가로와 세로의 길이가 똑같은 정방형이라야하므로 두변의차이가 $1/100\text{ mm}$ 이내되게 연마한다.

이때는 큰 1,000의 연마판위에 손으로 연마했는데 Single Lapping 기제를 사용하면 더 좋게 연마할수 있다.

iv) 세척 및 건조

윤곽연마가 끝나면 수정판에 붙어있는 금속, 산, 알칼리등을 제거하기 위해 초산 중크롬산가리 가성가리로 세척하고 최종적으로 초음파세척기로 세척한다. 그다음 130°C 에서 건조시킨다.

v) 은점 부착

윤곽폴진동시 Node 점은 수정판의 기하학적 중심이므로 정확한 중심점의 발견은 힘들다. 그래서 실제로는 0.005 mm 정도의 오차를 가지며 이 오차이내에서는 별지장이 없다.

또 Node 점에 붙이는 은점의 크기도 문제가 되는데 은점이 너무크면 Q가 감소하고 은점이 너무적으면 수정판의 입력전류가 적어서 실제 동작저항이 증가한것과 같고 또 부착력이 적어서 수정

판을 제대로 지지하지 못한다. 본 연구에서는 은점의 직경을 $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$ 로 했으며 Q에는 별지장이 없었다.

은점을 붙이는 이유는 은점을 이루는 성분 (Silver Preparation) 들이 수정판에 침식해 들어가서 수정판과 지지선을 연결할 수 있도록 하기 때문이다.

vi) 용착과정 (annealing)

은점을 붙인 후 수정판을 전기로에서 520°C 로 가열한다. 이 동안 Silver Preparation에 있는 산화은은 환원하여 판 표면에 나타나며 수정면과 용융상태로 결합한다.

이때 결합강도는 520°C 로 가열하는 과정과 밀접한 관계가 있다. 여러번 실험결과 얻은 가장 좋은 방법은 처음 1시간 동안 서서히 520°C 까지 올리고 그 상태에서 1시간 30분 동안 두었다가 1시간 30분에 걸쳐 서서히 상온까지 온도를 낮추는 방법으로 이때 강도는 $1 \text{ mm}^2 / \text{Kg}$ 정도가 되었다.

vii) 납 댐

은점은 부착시 끝이 둥글게 되어있어 지지선 끝과 잘맞지 않으므로 그림 14와 같이 끝부분을 편편하게 자른다.

그다음 수정판을 $170^\circ\text{C} \sim 230^\circ\text{C}$ 로 가열한 후 액체 Past를 사용하여 공정납을 은점에 도포시킨다. 공정납은 보통 납땜과는 그 성분이 다르며 Sn(57%), Pb(40%), Ag(3%)로 되어있다. 그다음 지지선을 수정판과 적각이 되게 해서 은점위에 $10 \sim 15 \text{ g}$ 의 압력으로 올려놓은 후 수정판을 식히면 지지선과 수정판은 결합된다.

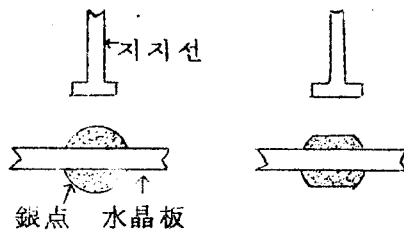


그림 14 은점 연마

viii) 세척 및 건조

납땜도중 생긴 불순물을 없애기 위해 활성액체로 세척하며 Paste 제거를 위해서는 알콜에 침전시킨다. 건조시는 100°C 미만에서 건조하며 이때는 초음파 세척기를 사용하지 않는다.

ix) 증착

수정판 양면에 전면 전극막을 만든다. 우선 진공도가 1×10^{-3} Torr 이하에서 약 10 분간 5000v 의 고압을 흘려 bombardment 를 실시한다. 그러면 수정판에 붙어있는 먼지나 세척안된 불순물이 깨끗이 제거되고 은막이 밀착되기 쉽게된다. 그다음 진공도를 5×10^{-5} Torr 이하로 낮추고 온을 1500°C ~ 1800°C로 가열하면 은이 증발되고 이 증기가 수정판에 부딪치면 급냉되어 피막을 형성한다.

이피막은 수정판의 모서리 까지 덮혀있으므로 모서리 부분의 피막을 제거하고 주파수를 측정한다. 이때 주파수는 200 ~ 300Hz 가 증착전에 비해 감소한다. 요구되는 주파수와 측정된 주파수차가 100Hz 미만일때는 2차증착으로 정확히 맞추나 100Hz 이상이면 연마판으로 윤곽연마를 다시해서 주파수를 맞춘다.

x) 세 척

암모니아로 은막의 먼지를 제거한 후 알콜로 세척 한다.

xi) Base 부착

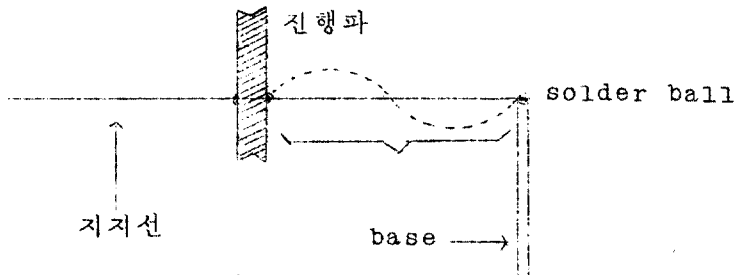


그림 15. 정재파

지지선의 한쪽끝을 Base 에 부착하는데 지지선의 길이에 따라 공진자의 Q 가 달라진다. 가장 알맞는 길이는 다음식에 의해 결정된다.

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{d \pi v}{8}}$$

d = 지지선의 직경
V = 3.5×10^5 cm/sec

그러나 실제 제작시는 정확히 이 길이를 맞출수 없으므로 Q 가 가장 높은 점에 Base 를 부착시키고 Solder Ball 의 크기로서 다시 Q 의 크기를 최대로 조정한다.

xii) 봉 입.

Case 를 씌운후 1×10^{-3} Torr 의게 진공을 시키고 건조 질소 Gas 를 채운후 납땜을 한다.

나. 동가정수 측정

동가정수 측정은 CI meter (crystal impedance Meter) 로 하지만 본 연구에서는 Vector impedance Metr 로 했다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_1}{C_0} &= \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_s^2} \\ L_1 &= \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (45)$$

결과적으로 공진자로 부터 C_0 , f_s , f_p , 만 측정하면 등가정수가 계산될 수 있다. C_0 는 Q-meter 로 측정할 수 있으나 그 값이 3Pf 정도로 적으므로 상대 오차가 커서 Q-meter 대신 낮은 주파수에서 C_0 의 Impedance 를 측정해서 C_0 를 계산했다.

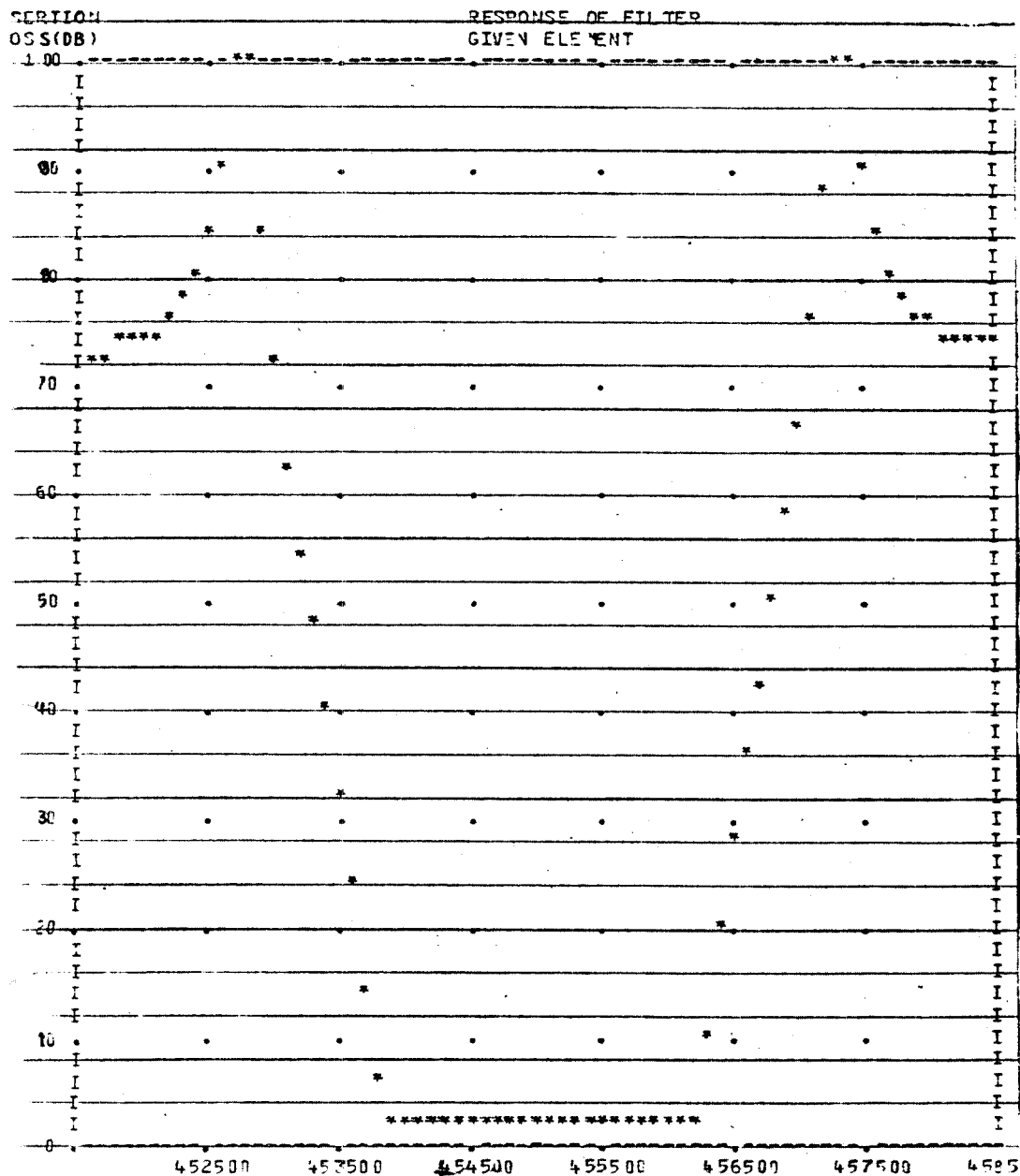
설계한 등가정수와 실제제작한 공진자의 등가정수를 비교한 표가 Table 2 에 표시되어 있다.

“ Table 2 ” 등가정수 비교

공진자 번 호	설계한 등가정수			제작품 등가정수		
	f_s (HZ)	L_1 (H)	C_0 (Pf)	f_s (HZ)	L_1 (H)	C_0 (Pf)
1	453720	12.4	3.355	453740	12.0	3.588
2	455652	5.0	8.272	455726	5.0	9.54
3	456280	12.4	3.318	456308	12.0	3.54
4	454347	5.0	8.319	454310	5.0	8.59

제작한 공진자의 등가정수에 의한 필터의 주파수특성을 전자계산기로 Plot 한것이 그림 16에 표시되어 있다.

***** FREQ. RESPONSE OF CRYSTAL FILTER *****



중요점의 특성은

$$A_{min} = 72.6\text{db} \quad A_{max} = 2.2\text{db}$$

6db 점의 주파수 : 453760 HZ-456240 HZ(2480 HZ)

46db " 453360 HZ-456750 HZ(3390 HZ)

66db " 453060 HZ-457080 HZ(4020 HZ)

5. 수정 필터의 제작

가. 필터 회로

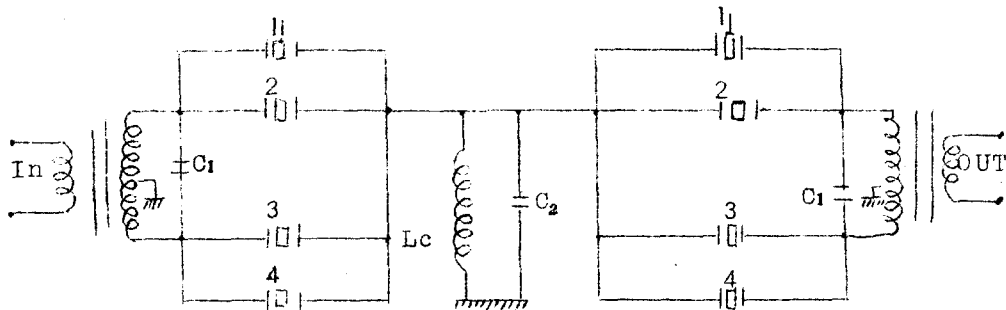


그림 17. 필터회로

C_1, C_2 는 L_c 가 중심 주파수에서 공진하기 위해 필요한 용량값으로 각 Arm의 병렬용량값과 코일사이의 분포용량을 제외한 값이다. 그런데 각 Arm의 병렬용량값이 서로 일치하지 않으므로 이 값을 정확히 일치시키기 위해 작은 값의 콘덴서를 필요로 한다. 그러나 0.5~1.0 Pf 정도의 콘덴서가 없으므로 릿츠선을 꼬아 필요한 용량을 얻었다.

본 회로에 사용한 소자치는

$$C_1 = 70 \text{ pf} \quad L_c = 740 \mu\text{h} \quad \text{권선수} : 155$$

$$C_2 = 120 \text{ pf} \quad L_c \text{의 } Q : 159.0$$

또 변성기는 $50\text{ K}\Omega$ 의 내부저항을 $5\text{ K}\Omega$ 으로 정합시키기 위해 권선비를 40:125로 했다.

2차측의 Inductance는 $1,760\text{ }\mu\text{h}$ $Q = 61.3$ 이다. 이와같은 값은 최적설계방법에 의해 구한 부하코일의 값을 그림 2와 같은 격자회로에서 Jaumann 회로로 변환시키는 과정에서 산출되는 식 (1)에 의거 구한 값이다.

나. 제작품의 특성측정

i) 사용계기

- ① HP 3,590 A Wave analyzer
- ② HP 7,004 B X-Y recorder
- ③ HP 5,327 A Timer Counter

iv) 제작품의 특성

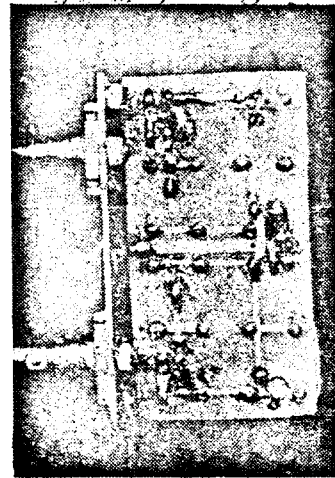
그림 18에 측정된 필터 특성이 표시되어 있으며 Table 3에서 이 특성과 전자계산기로 계산된 특성을 비교해보았다.

Table 3. 특성의 비교

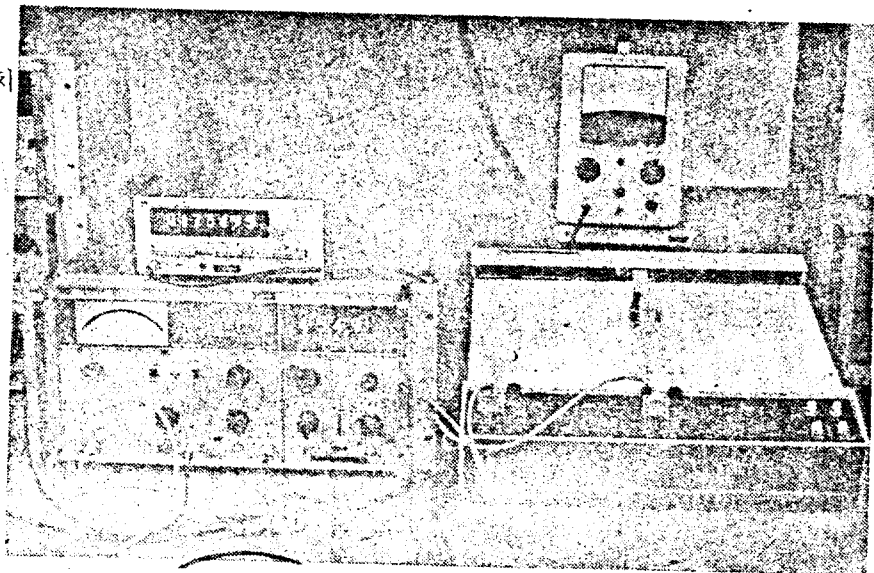
내 용	전자계산기에 의한분석	Wave Analyzer에 의한 측정
A max.(db)	2.2	2.2
A min.(db)	72.6	66.7
6db점의 주파수 (HZ)	453760~456240(2480)	453760~456240(2480)
46db "	453360~456750(3390)	453420~456735(3315)
66db "	453060~457080(4020)	453140~457070(3930)

전자계산기로 예측한것과 거의같은 실측특성을 얻을수 있었다.

ii) 제작품 모형



iii) 측정장치



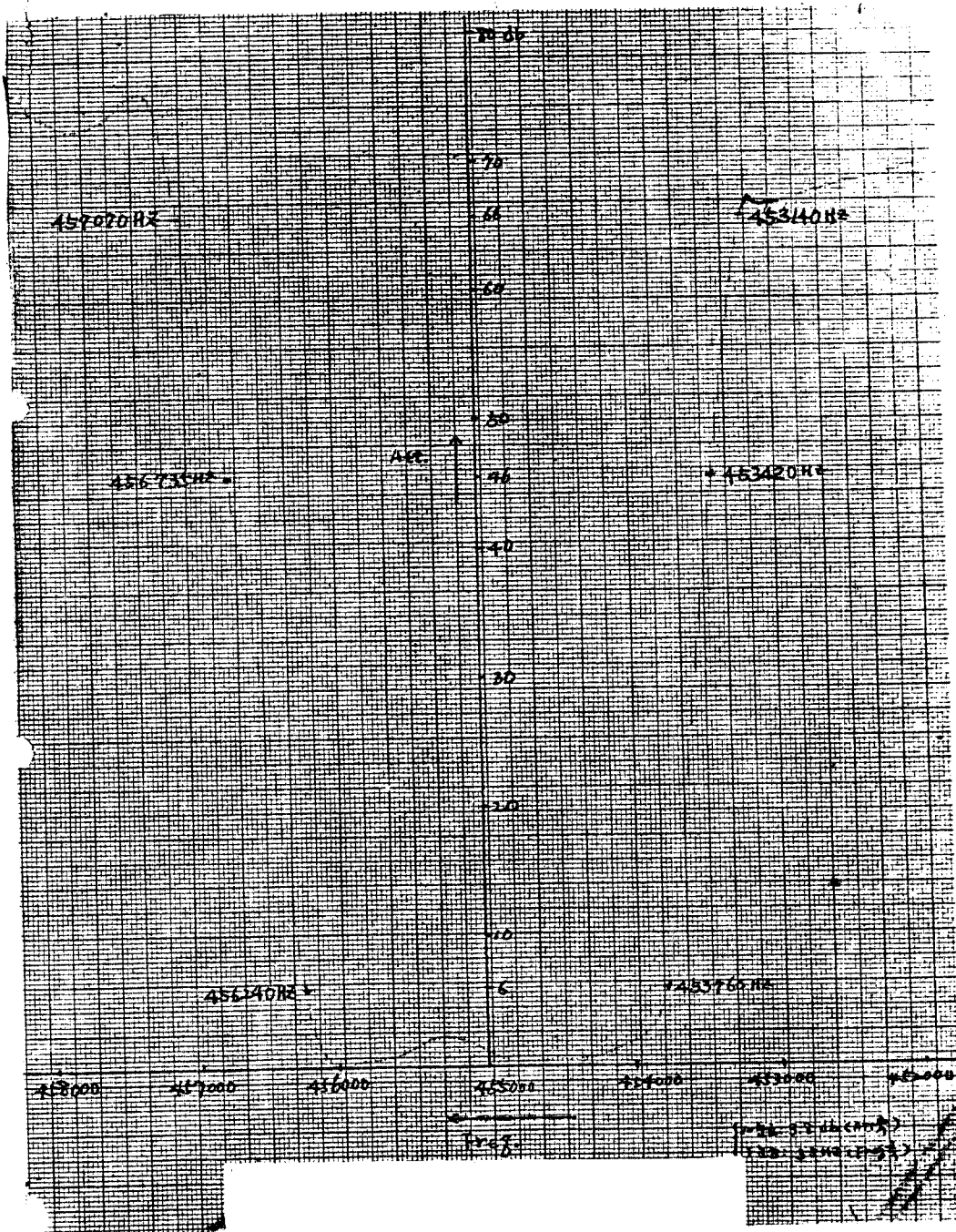


그림 18. 제작한 수정 필터의 측정된 특성

IV. 결 론

수정 필터의 설계를 위해 처음 시도한 방법이 영상 Parameter 법에 의한 설계 방법이었다.

여기서 얻은 필터의 주파수 특성은 감쇄영역에서는 좋았지만 통과 대역내에서는 통과대역 양단에서 큰 Ripple 의 있었다. 또 부공진의 영향을 없애기 위해 종속접속을 한 결과 이 Ripple 이 너무커져서 사용할 수 없게되었다. 그다음 시도한것이 삽입 손실에 의한 방법의 필터 설계였다. 각 격자 Arm 에 2개의 공진자를 사용할 경우 10차항의 다항식을 풀어야 하며 사용하는 공진자의 극과 영이 아주 가까이 있기 때문에 정확한 해를 얻기 힘들지는 다항식이 되었다. 이 다항식의 근은 적어도 유효 숫자가 18자리 이상이어야하며 다항식 계수의 적은 변화가 영쫓한 근으로 해석되어 원하는 바의 공진자 정수를 구할수 없었다.

변수 변환을 하여 이 문제는 해결할 수 있었으나 필터특성이 주어지면 공진자의 정수가 그대로 확정되어 버리니 이 공진자들의 등가 Inductance 가 서로 같지 않으므로 다량생산을 위한 설계 방법으로는 좋은방법이 아니었으며 또한 계산과정이 복잡해서 오차가 생기기 쉽고 계산시간이 너무많이 소요되었다. 그다음으로 시도한 것이 저주파 통과 필터에서 대역폭통과, 필터로 변환하여 설계하는 방법으로 각 공진자의 병렬용량을 제외하기 때문에 계산도 간단해지고 등가 Inductance 가 서로 같은 2개의 공진자를 만들 수 있었으므로 다량생산을 위한 설계로는 가장 좋은 방법이었다. 그런데 공진자 제작은 손으로 하나 하나 만들기 때문에 꼭

같은 값의 공진자를 만들 수 없었다.

전자계산기로 각 공진자 상호간의 오차범위를 계산해 본 결과 주파수는 0.01 %이내, 등가 Inductance 는 0.1 %이내 Q는 10 %이내이며 설계된 값과 제작된 공진자 등가값수값의 오차는 주파수가 0.02 %이내 등가 Inductance 는 4 %이내 Q는 20,000 이상이었다. 이러한 오차를 감안해서 설계시의 특성을 아주 좋게 한 결과 다소제작시 특성이 나빠졌지만 요구하는 특성보다 좋은 필터를 만들 수 있었다.

V. 参 考 文 献

- (1) E.A.Guillemin, "The effect of incidental dissipation in filters.," Electronics, 19, p130~135 (oct. 1946)
- (2) J.C. Mathaway and D.F. Bascock, "Survey of mechanical filters and their applications," Proc. IRE. 45. p5~16 (Jan. 1957)
- (3) W.G. Cady, "The piezo-electric resonator," Proc. IRE. 10. p83~144 (Apr. 1922)
- (4) K.S. Van Dyke, "The piezo-electric resonator and its equivalent network," proc. IRE. 16. p742~764 (Jun. 1928)
- (5) Temss and Mitra, "Modern filter theory and design." Chapter 4. John Wiley & sons (1973)
- (6) 沢登義文, "通信用 フィルター", Chapter 2, 7. 日刊工業新聞社 (1967)
- (7) Zverev, "The handbook of filter Synthesis" Chapter 3, 5 Wiley (1967)
- (8) Guillemin, "Synthesis of passive networks," p196~200 Wiley (1958)
- (9) Humpherys, "The analysis, design, and synthesis of electrical filters", chapter 7, printice Hall (1970)
- (10) Private Communication with Seoul Jupa Company (Bo Han Lee)
- (11) 滝貞男, "人工水晶과 전기적 응용", chapter 2, 日刊工業新聞社 (1974)
- (12) 田川康夫, 畑野五郎共著, "mechanical filters and crystal filters", chapter 2~5, ONM 社 (1964)