

# C급 전력증폭기의 체계적 설계

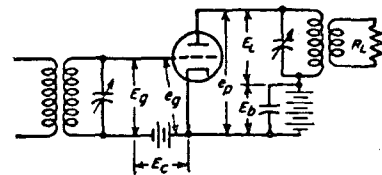
## (Systematised Class-C Power Amplifier Design)

基督教中央放送 技術局副局長

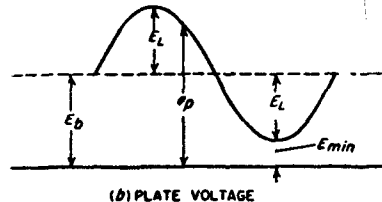
金 京 龍 \*

### 부호목록(List of Symbols)

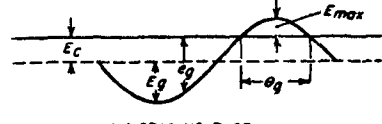
- $I_m$  = 캐소드 전류의 첨두치 ( $i_{bmax}$ )
- $I_1$  = 플레이트 전류의 기본파 성분
- $I_{g1}$  = 그리드 전류의 기본파 성분
- $I_p$  = 플레이트 전류의 직류분
- $I_g$  = 그리드 전류의 직류분
- $e_p$  = 플레이트 전압의 순시치
- $e_g$  = 그리드 전압의 순시치
- $E_L$  = 플레이트 출력전압의 진폭
- $E_g$  = 그리드 입력전압의 진폭
- $E_b$  = 플레이트 직류공급전압 ( $E_{bb}$ )
- $E_c$  = 그리드 바이어스 전압 ( $E_{cc}$ )
- $E_{min} = e_p$ 의 최저치 ( $e_{bmin}$ )
- $E_{max} = e_g$ 의 최고치 ( $e_{cmax}$ )
- $e_{bco}$  = 부하전압과  $i_b = 0$ 전압과의 교점
- $\theta_p$  = 플레이트 전류의 유통각
- $\theta_g$  = 그리드 전류의 유통각
- $P_i$  = 플레이트 직류입력전력 (DC)
- $P_o$  = 플레이트 교류출력전력 (RF)
- $P_d$  = 플레이트 열 손실
- $P_g$  = 그리드 여진전력
- $P_b$  = 그리드 바이어스회로에서 소모되는 전력
- $P_{gd}$  = 그리드 열 손실
- $\eta$  = 플레이트 효율
- $\mu$  = 진공관의 증폭정수
- $\delta = E_{min}/E_{max}$
- $R_L$  = 플레이트 부하 임피던스 (뱅크임피던스)
- $R_{gL}$  = 그리드 부하 임피던스 (뱅크임피던스)
- $R_g$  = 그리드 리크저항



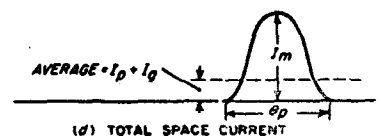
(a) CIRCUIT (NOT INCLUDING NEUTRALIZING ARRANGEMENT)



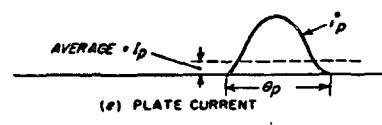
(b) PLATE VOLTAGE



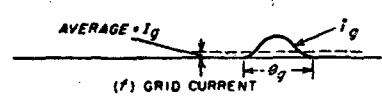
(c) GRID VOLTAGE



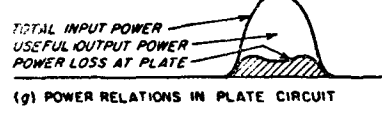
(d) TOTAL SPACE CURRENT



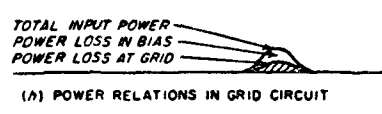
(e) PLATE CURRENT



(f) GRID CURRENT



(g) POWER RELATIONS IN PLATE CIRCUIT



(h) POWER RELATIONS IN GRID CIRCUIT

\* 通信技術士・電氣通信

그림-1 전형적 C급증폭기에서의 전압, 전류, 전력관계

## I. 서론(Introduction)

무선전화용 송신기의 RF Chain에 사용되는 C급 전력 증폭기의 설계법에 대해서는 이미 여러가지로 잘 알려져 있다[1]~[7]. 이들 설계법은 모두가 적당히 선택된 몇개의 독립변수의 가 정된 값을 가지고 진공관 제작자의 자료와 증폭기 성능에 합당한 설계치가 얻어질 때 까지 수 없이 계산을 반복하는 시행착오법이다. 이런 계산의 과정은 길고도 지루한, 순전히 시간을 소모하는 작업으로서 보통 여러시간에서 어떤 때는 2,3일 씩 걸리기도 한다.

이런 난점을 해결하기 위하여 J.P.Deignan은 컴퓨터를 이용해서 단 3분 동안에 C급증폭기를 설계하는 방법을 고안하였다[8].

본론에서는 그동안 많은 연구자들이 제시한 설계법을 하나의 체계로 정리하여 무선계통의 설계자들이 간편히 사용할 수 있는 정전류특성 곡선(constant current characteristic curve)의 정밀해석에 의한 설계법을 기술하였다.

전자 발브(electronic valve)는 진공관으로 한 정하였는데 그 이유는 대출력 송신기의 R-F Chain 종단은 진공관을 사용하고 있기 때문이다.

## II. 설계고려사항(Design Considerations)

C급 전력증폭기 설계의 기본 목표는 다음과 같다(1).

- 1) 고능율을 얻을것.
- 2) 출력전력은 가급적 클것.
- 3) 여진전력은 가급적 작을것.

이 목표를 얻기 위하여 필요한 조건치들은 다음과 같이 서로 모순하는 관계를 갖는다.

고능율을 얻으려면  $\theta_p$ 를 작게 해 주어야 한다 커다란 출력전력을 얻으려면  $\theta_p$ 는 크게,  $E_{min}$ 은 작게,  $I_m$ 은 크게,  $E_{max}$ 는 크게 해주어야 한다.

여진전력을 작게 해주려면  $E_{max}$ 는 작게,  $\theta_p$ 는 크게 해주어야 한다.

$\theta_p$ 를 작게 하면 능율은 최고 85% 이상도 얻을 수 있을 만큼 증가 하지만 출력전력은 감소하기 때문에  $\theta_p$ 는 타협적으로  $120^\circ \sim 150^\circ$ 의 범위 내에서 선택한다. 한편 능율도 75% 정도가 얻을 수 있도록 설계 한다.  $\theta_p$ 를 줄이기 위하여 부의 그리드·바이어스 전압(negative grid bias voltage)을 크게 해주면, 소요의 출력을 내기 위한  $E_{max}$ 의 값까지 그리드를 여진하는데 요하는 전력이 몹시 증가한다. 3CX2500F3와 같은 진공관의 경우 동일한 출력전력에 대해서  $\eta$ 를 75%에서 85%로 높이려면 그리드 여진전력  $P_g$ 는  $\eta=75\%$  때의 두배로 증가시켜 주어야 한다.

그리드 여진전압이 충분히 크지 않으면 커다란 출력을 얻을 수가 없고 정격  $I_p(DC)$ 를 얻을 수가 없다. 그러나  $E_{max}$ 가  $E_{min}$ 보다 크게 되면 그리드 전류는 급격히 증가하면서 진공관 그리드 선조를 망가트릴 수가 있다. 이와같은 그리드 전류의 증가는 플레이트 전류의 감소를 초래하는데 이때 출력을 저하시킴과 동시에, 플레이트 전류를 낙타 등 모양의 쌍봉을 갖는 몹시 왜곡된 파형으로 만들기 때문에 출력에 고조파가 증가 한다(그림-2).

따라서  $E_{max}$ 는 정격  $I_p$ 를 얻는데 적당한 만큼 이어야 하며,  $E_{min}$ 보다는 항상 작아야 한다.  $E_{max}$ 와  $E_{min}$ 은 다음의 조건이 되도록 적당히 선택한다.

$$\delta = \frac{E_{min}}{E_{max}} = 1 \sim 5 \text{-----} (1)$$

$E_{min}$ 은 출력전압파형의 최저치이므로 플레이트 부하 임피던스를 조정하여 위의 조건이 되도록 한다.

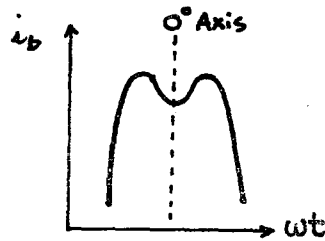


그림-2 Camel shaped current waveform when  $E_{max} > E_{min}$ .

그림-2

출력을 크게 하려면  $I_m$ 이 커야 한다.  $I_m$ 은  $E_{max}$ ,  $E_{min}$ ,  $\theta_p$ 를 크게 해주면 커진다. 그러나  $I_m$ 을 과도하게 크게 하면 진공관 수명이 단축되므로 진공관 제작자가 제시하는 값을 초과해서는 안된다. 제작자의 아무런 제시치가 없을 때는 보통 다음과 같이 해준다(1)(4).

$$I_m \approx 4 \times [\text{total cathode DC current}] \quad (2)$$

이 값은 엄격한 값이 아니고 설계를 할 때 잠정적으로 가정하는 시험적 개략치이다.

$I_m$ 을 감소 시키면 출력은 감소하지만 진공관 수명은 상당히 증가한다. 필라멘트 전력을 정격치의 90%로 낮추면 (이것은 보통 필라멘트 전압을 정격치의 95% 정도로 낮추는 것을 의미한다) 단위전력(watt)당 최대전자방출은 원래의 값의 75% 정도로 감소 하면서 진공관 수명은 두배로 연장된다(7).

플레이트 손실전력  $P_d$ 의 과다로 진공관이 소손되는 것을 방지하기 위해서 진공관 제작자가 제시하는 최대플레이트 허용손실을 초과해서는 안된다. 제작자의 제시가 없을 때는 보통 다음과 같이  $P_d$ 를 가정한다(4).

$$P_d \approx \frac{P_o}{3} \quad (3)$$

그리드 여진전력은 보통  $P_o$ 의 5~10%정도가 된다(5). 그리드 여진전력은 C급증폭기에서 보통 다음의 세가지를 말아야 한다(4).

- 1) 그리드 열 손실 :  $P_{gd}$
- 2) 그리드 바이어스 회로에서 소모되는 전력 :  $P_b$
- 3) 그리드 탱크 및 결합회로에서의 손실 : 이것은 그리드 여진 전력 의약 10%정도가 된다.

따라서 C급전력증폭기 전단으로부터 공급받아야 하는 총 여진전력  $P_g$ 는 대개 다음과 같이 된다.

$$P_g \approx 1.1(P_{gd} + P_b) \quad (4)$$

### III. 설계수속(Design Procedure)

#### 1. 일반—가정(General—Assumptions)

설계는 단구(single tube)를 기준으로 하여 실시한다. 만약 병렬(parallel) 또는 push-pull 동작이 사용되면,  $P_o$ ,  $P_g$ ,  $P_i$  등을 단구로 계

산했을 때의 값에 진공관수로 곱해 준다.

진공관의 정전류 특성곡선을 이용한 C급 전력 증폭기 설계의 요령은, 진공관 제작자로부터 주어진 진공관 data와 정전류 특성곡선 상에 가정된  $I_m$ ,  $\delta$ ,  $\theta_p$ 의 값으로부터  $E_c$ ,  $\theta_p$ ,  $I_p$ ,  $I_1$ ,  $I_g$ ,  $I_{g1}$ 을 계산한 값과 증폭기의 성능이 주어진 자료와 일치 하도록 하는 것이다. 계산치들이 주어진 자료와 증폭기 성능을 만족 시키지 못할 때에는  $I_m$ ,  $\delta$ ,  $\theta_p$ 의 값을 새로 가정하고 만족한 결과가 얻어질 때 까지 계산을 반복해야 한다.

#### 2. 심프슨의 사다리꼴 법칙(Simpson's Trapezoidal Rule)과 파형 해석

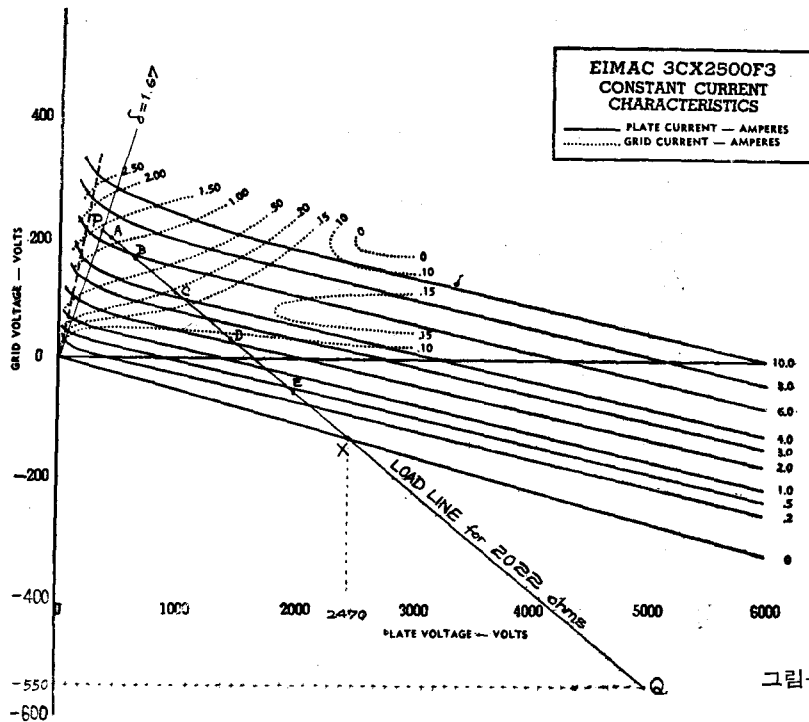
C급 전력증폭기를 설계함에 있어서 가장 중요한  $I_1$ ,  $I_p$ ,  $I_{g1}$ ,  $I_g$ 의 파형 해석은 근사정적분에 관한 심프슨의 사다리꼴 법칙에 의해서 실시한다. 이것은 고주파 전류의 반주기( $\pi$ )를 18등분 하여 매  $10^\circ$ 마다의 전류치를 정전류 특성곡선 상에서 알아냄으로써 C급 바이어스로 말미암아 왜곡된 펄스 전류파형의 면적을 계산해 내는 방식이다. 심프슨의 18점법(18 point schedule)에 의해서 펄스전류의 기본과성분과 평균직류성분을 구하는 공식은 각각 (5) 및 (6)과 같다. 이 공식을 이용하려면 정전류특성상에 그려지는 부하선(load line) PQ를 1로 하였을 때 그림-3의 점 P.A.B.C.....Q, 각각 다음과 같이 되도록 나누어 줘야 한다. PQ의 길이를  $l$ 이라고 할때

$$\begin{aligned} P &= 1.000l \dots\dots\dots (\cos 0^\circ) \\ A &= 0.985l \dots\dots\dots (\cos 10^\circ) \\ B &= 0.940l \dots\dots\dots (\cos 20^\circ) \\ C &= 0.866l \dots\dots\dots (\cos 30^\circ) \\ D &= 0.766l \dots\dots\dots (\cos 40^\circ) \\ E &= 0.643l \dots\dots\dots (\cos 50^\circ) \\ F &= 0.500l \dots\dots\dots (\cos 60^\circ) \\ Q &= 0.000l \dots\dots\dots (\cos 90^\circ) \end{aligned}$$

단, 그림 3의 X점은  $e_{bco}$ 의 점으로서  $\omega t = \theta_p/2$ 가 되는 곳이다. 즉 플레이트 전류의 차단점이다.

#### 3. 설계공식(Design Equations)

$$I_1 \text{ or } I_{g1} = \frac{1}{9} \left( \frac{I_m}{2} \cos 0^\circ + i_{10^\circ} \cos 10^\circ + \dots + i_{90^\circ} \cos 90^\circ \right) \quad (5)$$



$$I_p \text{ or } I_g = \frac{1}{18} \left( \frac{I_m}{2} + i_{10^\circ} + i_{20^\circ} + \dots + i_{\theta_x} \right) \quad (6)$$

$$E_L = E_b - E_{\min} \quad (7)$$

$$E_c = - \frac{(E_b/\mu) + [E_{\max} - (E_L/\mu)] \cos(\theta_p/2)}{1 - \cos(\theta_p/2)} \quad (8)$$

$$E_{\max} = -E_{cc} + E_g \quad (9)$$

$$e_{bcc} = E_b - E_L \cos\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \quad (10)$$

$$\theta_p/2 = \cos^{-1} \left( \frac{E_b - e_{bcc}}{E_b - E_{\min}} \right) \quad (11)$$

$$P_i = E_b I_p \quad (12)$$

$$P_o = \frac{E_L I_1}{2} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100(\%) \quad (14)$$

$$P_d = P_i - P_o \quad (15)$$

$$P_{gd} = E_{\max} I_g \quad (16)$$

$$P_b = E_c I_g \quad (17)$$

$$R_L = \frac{E_L}{I_1} \quad (18)$$

$$R_{gL} = \frac{E_g}{I_{g1}} \quad (19)$$

$$R_g = \frac{E_c}{I_g} \quad (20)$$

#### 4. 설계예 (Design Example)

설계수속을 단계적으로 설명하기 위해서 출력 5KW의 C급 전력증폭기를 설계하는 예를 들기로 한다. 이 예에는 표준방송용 송신기 및 고주파로에 흔히 쓰이는 미국 EIMAC회사의 3극 전력진공관 3CX 2500 F3를 사용하는 것으로 한다(그림 3).

다음은 이 진공관의 C급 전회용 동작에 대한 carrier condition에서의 data이다.

- DC plate Voltage.....5000 volts
- DC plate Current.....1.25 amps
- DC Grid Voltage.....-550volts
- DC Grid Current\* .....150ma
- Peak RF Grid Input Voltage\*.....760vots
- Driving Power\* .....115watts
- Grid Dissipation\* .....32watts
- Plate Input Power .....6250watts
- Plate Dissipation .....950watts
- Plate Output Power .....5300watts

\*Approximate Values.

Amplification Factor.....19~26

Step 1. 출력전력  $P_o$ 를 정한다. (이 전력은 플

레이트 탱크회로에서의 결합 회로망에서의 전력손실 등을 포함할 만큼 충분히 정한다) 예에서 5300W로 정함.

Step 2. 대략적 인플레이트 손실  $P_d$ 를 계산한다. (Eqn. 3)

예에서 950W

Step 3. 요구하는 성능을 만족할만한 진공관을 선택한다. 이때 다음 사항들도 아울러 고려 한다.

- 동작 주파수
- 소요 플레이트 및 필라멘트전압
- 냉각 조건
- 물리적 특성(크기, 용적 파워)
- 그리드 여진전력
- 진동 및 충격

예에서 EIMAC 3CX2500F3 Medium Mu Power Triode를 택함.

Step 4. 플레이트 공급전압(high tension)을 설정한다. (때때로 진공관을 제작자의 data sheet 및 정전류특성 곡선에 나타난 전압이 외의 전압으로 동작시킬 필요가 있을 때가 있다. 이 때 정전류특성상의 컨트롤·그리드 전압, 플레이트 전압 및 이와 관련한 정전류곡선을 새로운 scale로 변환시켜야 하는데 이것은 진공관의 3/2승 법칙에 의존하여 변환한다. 가령 플레이트 전압을 두배로 높여서 사용할 필요가 있다고 하면 컨트롤·그리드 전압도 두배로 높여야 하며 정전류곡선은 2(두배)의 3/2승, 즉  $2^{1.5}=2.83$ 배로 곱해준 값으로 새로 그려야 한다).

예에서 5000V

Step 5. 직류 플레이트 전류의 배략치를 다음의 식에 의해서 계산한다.

$$I_p = \frac{P_o + P_d}{E_b} \quad (21)$$

예에서 1.25A.

Step 6.  $I_m$ 의 값을 가정한다. (Eqn. 2)

예에서  $I_m = 4(I_p + I_d) = 6.5A$ .

Step 7.  $\delta$ 의 값을 가정하고(Eqn. 1) “정전류 특성상”에  $\tan\delta$ 의 직선을 원점에서 긋는다. (diode line).

예에서  $\delta=1.67$

Step 8. 진공관 data로 부터  $E_{max}$ 를 계산한다(Eqn. 9)

예에서  $E_{max} = -550 + 760 = 210V$

Step 9. 정전류특성상에 앞서 구한  $I_m, \delta, E_{max}$ 의 값을 만족하는 점 P를 찍는다.

예의 그림 4.

Step 10.  $E_{min}$ 을 계산한다. (Eqn. 1)

예에서  $E_{min} = 1.67 \times 210 = 250V$

Step 11.  $E_L$ 의 값을 계산한다. (Eqn. 7)

예에서  $E_L = 5000 - 350 = 4650V$

Step 12.  $\theta_p$ 를 가정한다.

예에서  $\theta_p/2 = 57^\circ$

Step 13.  $e_{bco}$ 를 계산하고 (Eqn. 10), 정전류 특성상에 X점을 찍는다.

예에서  $e_{bco} = 5000 - 4650 \times 0.5441 = 2470V$

Step 14. 부하선 PX를 정전류특성상에 긋는다.

Step 15. 앞서 Step 12에서 가정된  $\theta_p$ 가 만족한 것인지를 Eqn. 11에 의하여 검토한다.

(Eqn. 11은 다음과 동가이다. 그림 4에서

$$\frac{\theta_p}{2} = \cos^{-1} \frac{XQ}{PQ}$$

예에서  $\theta_p/2 = 57^\circ$ 이므로 만족함.

Step 16. 정전류특성상에  $e_b = E_b$ 의 수직선과 부하선 PX의 연장선과의 교점 Q를 얻는다.

이 Q점에서  $e_c$ 축을 보았을 때의 그리드 전압치가 바로  $-E_c$ 이다. 이때 정전류 특성상의  $-E_c$ 가 진공관 data sheet의 값과 일치하는지 확인한다. 만약 일치하지 않으면  $\theta_p$ 의 값을 다시 가정하고 계산을 반복한다.

예에서  $E_c = -550V$ (일치)

Step 17. (optional)  $E_c$ 의 값을 Eqn. 8에 의하여 계산해서 위의 결과와 같은지 확인한다.

일치하지 않을 때는  $\theta_p$ 의 값을 변경하여 가정해야 한다.

예에서  $E_c = 550V$ (일치)

Step 18. 부하선 PQ를 1로 했을 때  $10^\circ$  간격의 여현치(cosine)로 점 P.A.B...Q을 찍어 나간다.

Step 19. 다음 표에 의하며 점 P로부터 점 Q까지의 전류치를 정전류 곡선의 부하선 상에서 읽으며 기록해 나간다. (플레이트 전류 및 그리드전류)

점	$(\omega t)^\circ$	$\cos\omega t$	$i_b$	$i_b \cos\omega t$	$i_c$	$i_c \cos\omega t$
P	0°	1.000	6.5	6.5	1.34	1.34
A	10°	0.985	6.4	6.304	1.15	1.133
B	20°	0.940	5.8	5.452	0.7	0.658
C	30°	0.866	4.2	3.637	0.19	0.164
D	40°	0.766	2.25	1.685	0.07	0.054
E	50°	0.643	0.35	0.225	—	—

$i_b$ : plate current (A),  $i_c$ : grid current (A)

Step 20. Simpson의 공식에 의해서 Step 19의 표의 값들로부터 플레이트 및 그리드 전류의 기본파성분과 직류성분을 구한다. (Eqn 5 및 6)

$$I_1 = \frac{1}{9} \left[ \frac{6.5}{2} + 6.304 + 5.452 + 3.637 + 1.685 + 0.225 \right]$$

$$\therefore I_1 = 2.3A$$

$$I_p = \frac{1}{18} \left[ \frac{6.5}{2} + 6.4 + 5.8 + 4.2 + 2.25 + 0.35 \right]$$

$$\therefore I_p = 1.24A$$

마찬가지로  $I_{g1} = 0.3A$ ,  $I_g = 0.15A$ .

Step 21.  $P_i$ 를 구하여 data sheet의 값과 비교해 본다. (Eqn. 12)

$$P_i = 5000 \times 1.24 = 6200W (O.K.)$$

Step 22.  $P_o$ 를 구하여 data sheet의 값과 비교해 본다. (Eqn. 13)

$$P_o = \frac{4650 \times 2.3}{2} = 5300W (O.K.)$$

Step 23.  $\eta$ 를 구한다. (Eqn. 14)

$$\eta = \frac{5300}{6200} \times 100 = 85\% (O.K.)$$

Step 24.  $P_d$ 를 구하여 data sheet의 값과 비교해 본다.

$$P_d = 6200 - 5300 = 900W (O.K.)$$

Step 25.  $R_L$ 을 구한다. (Eqn. 18)

$$R_L = \frac{4650}{2.3} = 2022 \text{ ohm}$$

Step 26.  $P_{gd}$ 를 구하여 data sheet의 값과 비교해 본다.

$$P_{gd} = 210 \times 0.15 = 31.5W (O.K.)$$

Step 27.  $P_b$ 를 구한다. (Eqn. 17)

$$P_b = 550 \times 0.15 = 82.5$$

Step 28.  $P_g$ 를 구하여 data sheet의 값과 비교해 본다. (Eqn. 4)

$$P_g = 1.1(31.5 + 82.5) = 125W (O.K.)$$

Step 29.  $R_{gL}$ 을 구한다. (Eqn. 19)

$$R_{gL} = \frac{760}{0.3} = 2533 \text{ ohm}$$

Step 30.  $R_g$ 를 구한다. (Eqn. 20)

$$R_g = \frac{550}{0.15} = 3.667 \text{ ohm}$$

#### IV. 결론(Conclusion)

C급전력증폭기의 설계법에 대한 여러 연구를 체계화하여 단일 수속으로 정리하였다. C급전력증폭기용 발브(진공관)의 기술특성에 적합한 동작조건을 계산에 의하여 알아 보는 방법과, 또 이에 적합한 외부회로소자( $R_L$ ,  $R_{gL}$ ,  $R_g$ )를 구하기 까지의 과정을 상세히 다루었다.

#### 참고문헌(References)

- [1] Terman, F.E.: "Radio Engineers' Handbook", McGraw Hill 1943, Section 5. Par. 21.
- [2] Gray, T.S.: "Applied Electronics", John Wiley & Sons, Inc., 1954, Ch. X. Art. 4
- [3] Terman, F.E.: "Electronic and Radio Engineering", McGraw-Hill 1955. 4th Ed. Ch. 13.
- [4] Landee, R.W., Davis, D.C., Albrecht, A.P.: "Electronic Designers' Handbook", McGraw-Hill 1957. Section 4.4.
- [5] Seely, S.: "Electron Tube Circuits", McGraw Hill 1958. 2nd Ed. p.393.
- [6] Zeines, B.: "Electronic Communications Systems", Prentice Hall 1970. Ch.7
- [7] Clarke, K.K., Hess, D.T.: "Communication Circuits: Analysis and Design", Addison-Wesley 1971 Section 9.4.
- [8] Deignan, J.P.: "Computer-Aided Class-C Amplifier Design", PROC. IEE, Vol. 117, No. 3. Mar. 1970.