

論 文
35~11~3

# 高壓 나트륨 램프의 高周波 放電特性 研究

## A Study on the High-frequency Operation Characteristics of the High-pressure Sodium Lamps

池 哲 根\* · 金 燾\*\*  
(Chol-Kon Chee · Hoon Kim)

### Abstract

The change of the discharge characteristics of the high-pressure sodium (HPS) lamps is investigated over a power source frequency range of 60 Hz to 30,000 Hz.

As the frequency increases, the light and electrical characteristics of the HPS lamps are improved since the re-ignition is not needed due to the constant electron density, and the cathode fall is reduced. But at the certain frequency range, the arc instability called acoustic resonance occurs, and the arc tube is damaged.

Regarding these characteristics and the kind of the illuminating system, a proper frequency is selected to operate the HPS lamps.

And a new measuring system using a computer and the storage-scope is developed to avoid the error of the ordinary gauges at high frequency power.

### 1. 序 論

高光度放電燈(High Intensity Discharge Lamp, 이하 HID 램프로 略함)은 白熱電球나 螢光燈에 비하여 發光效率이 높고, 수명이 길며, 크기가 작아서 照明設計가 간편한 것등의 장점이 있으므로, 최근에는 도로나 광장등에서뿐 아니라, 演色性이나 配光分布가 중요한 高천정실내에서도 사용이 증가하는 추세이다.<sup>1), 2)</sup>

그러나 HID 램프는 低壓放電燈에 비하여 아아크 전압에 대한 전류의 비가 크고, 따라서 安定器에서의 손실이 상대적으로 크다.<sup>3)</sup> 또한 高壓 나트륨램프와 메탈할라이드램프의 경우 그 放電開始電壓이 매우 높으므로, 始動時 전원전압의 매 주기마다 전자시동기(electronic ignitor)를 이용하여 高壓펄스를

인가하는 등의 보조수단을 사용하여야 하며, 이에 따라 安定器의 크기와 무게 및 電力損失이 커지게 된다.<sup>4)</sup> 이 결과 高壓펄스의 감쇠를 막기 위하여 安定器와 램프사이의 거리가 제한되며, 램프의 수명이 다하거나 파손되어 點燈되지 않더라도 시동기가 계속하여 동작하는 등의 결점을 갖게된다.<sup>5)</sup>

이러한 결점에 대한 대책으로서 HID 램프에 고주파전압을 인가하는 방식이 제안되고 있다.<sup>6), 6)</sup> 放電燈에 인가한 전압의 주파수가 증가할 수록, 전류의 순시변화에 따른 플라즈마온도의 교번적 변화가 줄어들고, 따라서 放電開始電壓 및 再始動電壓이 낮아지게 된다. 또한 安定器에서의 損失이 줄어들고 빛의 어둡거림도 없어지는 등의 장점이 있다. 이러한 장점때문에 低壓放電燈인 螢光燈의 경우 이미 고주파를 인가하는 방식의 電子安定器가 개발되어 있다.<sup>7)</sup>

본 논문에서는 HID 램프 중에서 아아크전압에 대한 전류의 비가 가장 크고 放電開始電壓이 가장 높아서 고주파점등의 필요성이 높은 高壓나트륨램프

\*正 會 員: 서울大 工大 電氣工學科 教授·工博

\*\*正 會 員: 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字: 1986年 5月 11日

를 선정하여, 고주파점등시의 광특성 및 전기적특성의 변화를 측정하고, 특정 주파수에서 일어나는 아아크의 불안정현상을 해석하였으며, 고주파를 사용하는 전자안정기의 개발을 위하여 램프를 점등하기에 적절한 주파수 및 구성소자를 선정하였다.

## 2. 理論的 考察

### 2.1 램프전압, 전류의 변화

放電燈은 負特性이므로 전압원과 램프를 직접 연결하여 점등하면 램프전류가 제한되지 않는다. 그러므로 전류를 일정한 값으로 제한시키기 위하여 램프와 직렬로, 限流의 역할을 하는 임피던스를 연결할 필요가 있다.

負特性으로 인한 또하나의 결과는 비교적 낮은 주파수의 교류전압을 인가하였을 때 나타난다. 즉 낮은 주파수의 교류는 일정한 주기로 증감하는 직류로 볼 수 있으며, 이때 램프전류가 正弦波이면 램프전압은 직류에서의 負特性의 영향으로 심하게 왜곡되어 矩形波의 형태로 된다.<sup>10)</sup> 그러나 전원전압의 주파수가 점차 상승하면 더 이상 직류에서의 관계가 성립하지 않게 된다. 주파수가 높아지게 되면 아아크내에서 전자가 이온과 再結合(recombination)하여 소멸하는 속도보다 전류변화의 속도가 빨라져서 아아크의 물리적 특성이 변화하게 된다.<sup>6), 11), 12)</sup> 이 결과로 주파수가 높아지면 램프전압은 점차 正弦波로 변화하게 된다. 이렇게 되면 필요한 限流素子의 특성을 일반적인 벡터 다이어그램을 사용하여 放電燈을 순서항으로 보고 구할 수 있다.

낮은 주파수에서 램프전압을 矩形波로 보면 실제 램프에 유입되는 전력은 겉보기전력보다 적으며, 램프의 力率도 1보다 작은 값으로 된다. 즉 램프의 力率  $\alpha_l$ 은

$$\alpha_l = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i_l v_l d(\omega t) \quad (1)$$

$i_l, v_l$ : 램프전류, 전압의 순시치

$I_l, V_l$ : 램프전류, 전압의 실효치

로 되며, 만약 전압이 矩形波, 전류가 正弦波라고 하면,

$$\alpha_l = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_l V_l \int_0^\pi \sin \omega t d(\omega t)}{I_l V_l} = 0.9$$

로 되어, 실제 측정치보다 약간 크다. 실제로 이 力

率값은 램프전압, 전류의 위상차에 의한 것이 아니고 램프전압파형의 왜곡에 의한 것이므로 주파수가 상승하여 正弦波로 되면 1에 가까운 값으로 된다.

### 2.2 音響共振 (Acoustic Resonance)

放電燈을 고주파점등할 때 나타나는 音響共振현상은 Campbell등에 의해 처음으로 관찰되었다. 이 현상은 고주파전원으로 放電燈을 점등할 경우 특정 주파수 범위에서 아아크가 불안정해지거나 꺼지는 현상으로 C. Kenty는 放電管내의 가스가 오르간의 파이프에서와 같은 半波共振을 받을 때 일어나는 것으로 해석하였다.<sup>5)</sup>

放電燈을 교류점등하면 전원주파수의 2배의 주파수를 갖는 전력이 방전관에 입력된다. 이 주기적인 에너지입력이 放電가스를 가열시키고 가스壓力의 주기적인 진동을 일으키게 된다. 특정주파수에서 입력전력은 가스壓力의 진동과 同相으로 되어 振幅이 매우 큰 定在壓力(standing pressure wave)를 발생시킨다. 이러한 가스密度의 진동은 放電路를 왜곡시키므로, 放電전압이 증가되어 아아크가 꺼지거나 放電管이 부분적으로 가열되어 파괴되는 등의 현상이 일어난다.<sup>5), 6)</sup>

音響共振이 일어나는 주파수는 放電管내에 定在音波(standing acoustic wave)가 존재할 수 있는 주파수를 계산하여 알 수 있다.<sup>7)~9)</sup> 放電管 형태가 그림 1에서와 같이 실린더 형태이고, 내부가스가 剪斷係數(shear modulus) 0인 等方壓縮性流體(isotropic compressible fluid)일 때 定常狀態에서 波動方程式

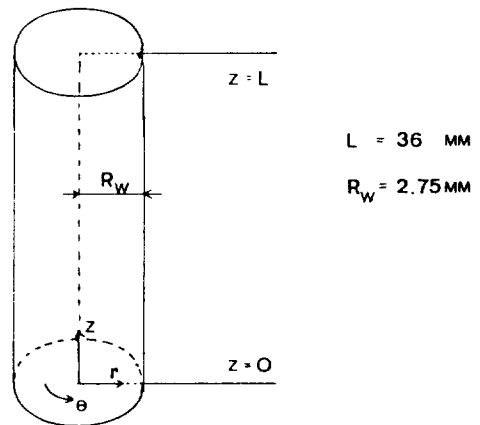


그림 1. 放電管의 형태 및 좌표계

Fig. 1. Geometry of the arc tube and the coordinate system.

은,

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2)$$

P : 가스압력

c : 분자량 M, 온도 T인 媒質중의 音速

$$\left( c = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{RT}{M}}, R \text{은 기체상수} \right)$$

로 되며, 이 式을 풀면

$$P(r, \theta, z, t) = \sum_{m,n,i} A_{mni} J_m \left( \frac{\alpha_{mni} r}{R_w} \right) \cos(m\theta) \cos \left( i \frac{\pi z}{L} \right) \cos(\omega_{mni} t) \quad (3)$$

m, n, i : 자연수 (1, 2, 3, 4, ...)

$A_{mni}$  : 壓力의 振幅

$J_m$  : m 次의 베셀함수 (Bessel Function)

$\alpha_{mni}$  : 境界條件  $\left( \frac{d}{dr} [J_m(\alpha_{mni} r/R)] \Big|_{r=R_w} = 0 \right)$  에

의해 결정되는 계수

$$\omega_{mni}^2 = \omega_{mn}^2 + \omega_i^2$$

로 된다. 여기에서 축방향공진각주파수 (longitudinal resonance angular frequency)  $\omega_i$ 는

$$\omega_i = \frac{\pi i c}{L} \quad (4)$$

이며, 축과 직각 방향 (transverse) 공진각주파수  $\omega_{mn}$ 은

$$\omega_{mn} = \frac{c \alpha_{mni}}{R_w} \quad (5)$$

이다. 따라서 축방향으로 존재하는 定在音波의 주파수  $f_i$ 는

$$f_i = \frac{ic}{2L}, \quad (i=1, 2, 3, 4, \dots) \quad (6)$$

로 되며, 이것이 입력전력의 주파수와 같아지면 — 즉, 전원주파수가 이 주파수의 1/2일 때 — 音響共振이 일어난다. 또한 축방향의 壓力分佈는  $\cos \left( i \frac{\pi z}{L} \right)$  로 放電管의 양단 ( $Z=0, L$ ) 에서 가스壓力이 가장 크며 放電路의 왜곡도 클 것이다.

또한 管徑方向 (r방향) 의 기본공진주파수  $f_{01}$ 은

$$f_{01} = \frac{3.83c}{2\pi R_w} \quad (7)$$

方位角方向 ( $\theta$ 방향) 기본공진주파수  $f_{10}$ 은

$$f_{10} = \frac{1.84c}{2\pi R_w} \quad (8)$$

로 된다.

### 3. 測定方法 및 結果

#### 3.1 測定方法

고주파집등 특성을 측정하기 위한 회로의 개념도는 그림 2 와 같다.

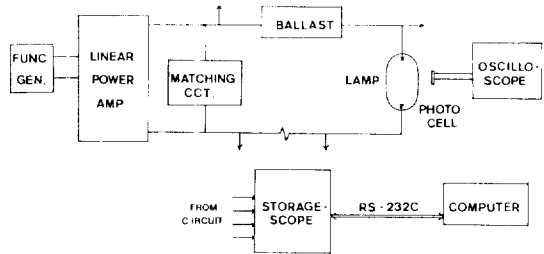


그림 2. 測定回路的 概念圖

Fig. 2. Schematic diagram of the measuring circuit

함수발생기 (function generator) 의 출력신호를 선형전력증폭기 (linear power amplifier) 에 입력시켜 고주파전력을 얻는다. 함수발생기의 출력신호주파수를 변화시켜 고주파전력의 주파수를 변경할 수 있다. 선형전력증폭기의 출력단에 적당한 限流素子와 램프를 직렬로 연결하여 점등시키며 放電燈에 적정전력을 공급하기 위하여 가변인덕턴스 혹은 가변커패시턴스로 이루어진 임피던스 매칭회로를 출력단에 연결하였다.

일반적인 測定計器들은 높은 주파수에서 큰 오차를 갖는다. 이러한 오차를 피하기 위하여 전압, 전류 및 전력의 測定에 다음과 같은 방법을 사용하였다. 즉 전압과 전류의 波形을 디지털 스토리시스코우프 (digital storage-scope : Nicolet 2090-3C) 로 측정, 저장하고 그 순시치의 데이터를 시리얼인터페이스 (serial interface : RS-232C) 를 이용하여 컴퓨터 (Apple-II) 에 전송하여 이 데이터로 전압, 전류의 실효치와 전력을 계산하였다. 순시치의 데이터로 실효치와 평균치를 계산할 때 오차를 줄이기 위하여 하나의 파형당 최소한 300개의 순시치가 필요하며, 한번 측정시에 전압과 전류의 값이 필요하므로 600개 이상의 데이터가 전송되어야 한다. 스키투프 내에서 한개의 데이터는 4 자리의 유효숫자를 가지며 2 진수로 12bit, 전송시에는 8bit 코우드 2

byte로 구성된다. 따라서 8bit 데이터 1200개가 한번의 측정에 전송되며, 컴퓨터에서는 이 데이터 들을 16bit의 부호-크기법으로 표현된 2진수로 변환한 뒤 곱셈 900 회, 덧셈 900 회를 행하여 전압, 전류의 실효치와 전력을 계산한다. 9600 baud rate로 전송시 데이터의 전송에 약 5초, 연산에 약 3초가 소요되었다.

이러한 측정방법의 정확성을 검증하기 위하여 放電燈대신에 白熱電球를 사용하여 측정을 행하였다. 白熱電球는 수백 kHz 이하의 주파수 범위에서는 순저항으로 볼 수 있으므로, 측정하려는 전체 주파수 범위에서 電球의 光束을 기준으로 하여 측정을 행한 결과, 이 측정시스템의 오차는 1~2% 정도임을 알 수 있었다.

限流素子의 용량은 디지털 RLC 메타로, 저항값은 휘트스톤브리지로 측정하였다.

放電燈의 發光光束은 光電池(photo-cell)를 이용하여 그 광전류의 크기로 상대적인 光束變化를 측정하고 波形으로 플리커현상을 관측하였다.

### 3.2 測定結果 및 檢討

정격소비전력 100W인 高壓나트륨 램프를 그림 2의 회로에 연결하고 주파수를 변동시키면서 특성을 측정하였다. 이 때 전력증폭기의 출력전압은 100V, 램프의 소비전력은 100W로 고정시켰다. 限流素子로는 인덕턴스를 택하여 이를 공심코일로 구성하고 매칭회로로는 커패시턴스를 택하였다. 특성변화의 양은 램프제작회사와 각각의 램프에 따라 다소 다르나, 그 경향은 일치하므로 평균적인 값을 취하였으며 60Hz에서의 값을 100%로 하여 도시하였다.

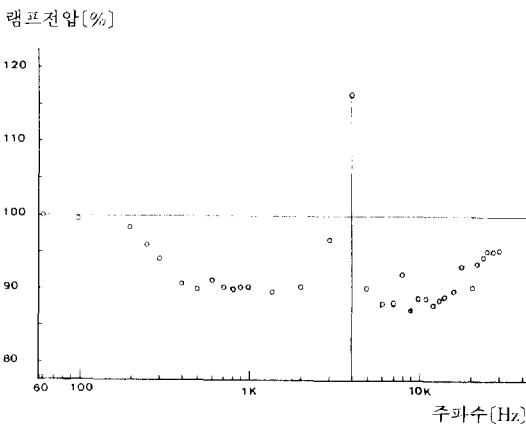


그림3. 주파수에 따른 램프 전압의 변화  
Fig.3. Lamp voltage vs. frequency.

#### 3.2.1 램프전압, 램프전류의 변화

램프전압은 그림 3에서와 같이 주파수가 증가하면 감소하여 1kHz 부근에서 90% 정도로 되고 이후는 계속 비슷한 값을 유지하다가 20kHz 이상으로 되면 다시 증가한다. 램프전류는 그림 4에서와 같이 주파수 상승에 따라 약간 증가하였다가 1kHz에서부터 감소하여 30kHz에서는 약 90%로 된다. 이에 따라 램프의 역률을 계산하여 보면 60Hz에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 0.845 정도로 낮으나 주파수가 높아짐에 따라 점차 증가하여 5kHz 이상에서는 0.99 이상으로 되며 이 때 放電燈을 순저항으로 볼 수 있게 된다.

그림 3에서 주파수 1kHz 이하의 부분에서 램프전압이 주파수 증가에 따라 낮아지는 것은 음극강화가 줄어들기 때문이다. 또한 전압은 3kHz에서 갑자기 증가하기 시작하여 4kHz에서 최대로 되고 다시 감소하여 5kHz에서 정상으로 되는데 이는 축방향 램프전류(%)

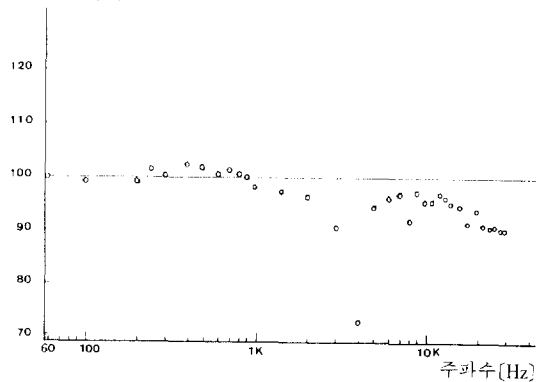


그림4. 주파수에 따른 램프 전류의 변화

Fig.4. Lamp current vs. frequency.

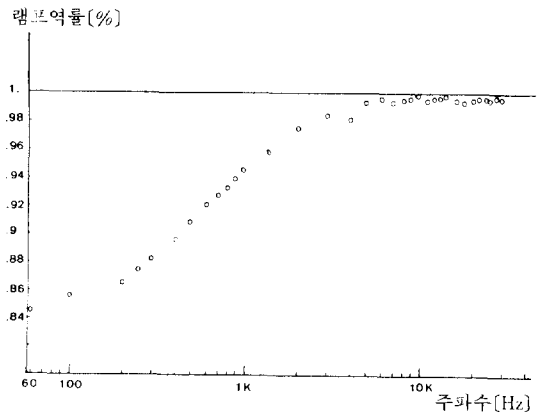


그림5. 주파수에 따른 램프 역률의 변화

Fig.5. Lamp power factor vs. frequency.

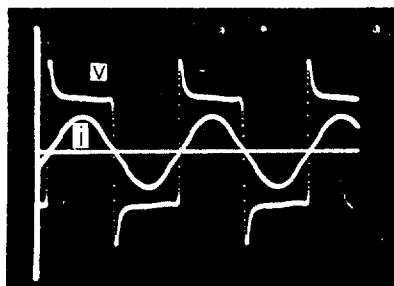
音響共振에 의한 것이다. 실제로 3~5kHz 범위에서는 放電이 안정되지 않고 전압, 전류와 광속이 계속 진동한다. 또 이때에는 공진 전압에 대한 램프 전압의 비가 매우 크므로 약간의 전원 전압 변동만 있어도 램프가 꺼지며, 오랫동안 이 상태로 침묵하고 있으면 放電管의 국부적인 가열로 인하여 管에 금이 가면서 파괴되는 것을 관찰할 수 있었다. 또 4kHz의 정수배수인 8kHz, 12kHz에서도 램프 전압이 상승하고 放電이 불안정해지며 이역시 音響共振에 의한 것으로 생각된다. 또한 20kHz 이상에서 전압이

상승하는 것은  $\theta$  방향 音響共振에 의한 것이다.

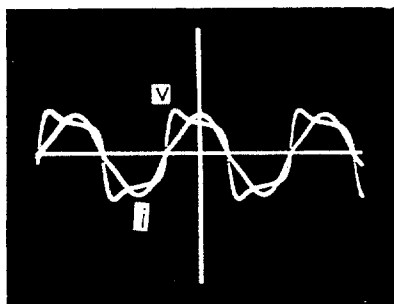
램프 전압, 전류의 波形은 그림 6 과 같다. 60Hz 에서 시판되는 安定器로 점등하였을 때 전압은 矩形波에 가까우나 이후 주파수 증가에 따라 점차 완만하여져서 5kHz 이상에서는 正弦波로 볼 수 있다.

### 3.2.2 安定器 損失

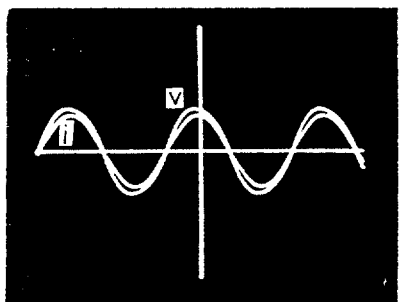
100V 전압에서 램프의 소비 전력을 정격으로 유지시키기 위한 공심코일의 임피던스 값을 그림 7에 도시하였다. 限流素子の 임피던스는 공심코일의 리액턴스 성분과 권선 저항으로 구성되며, 그 값이 30~40 $\Omega$  정도이다. 권선 저항이 적은 값일 때 임피던스는 전원각주파수와 코일의 인덕턴스의 곱으로 표시되며, 주파수가 증가하면 인덕턴스는 주파수에 거



(a) 60Hz



(b) 500Hz



(c) 10kHz

그림 6. 주파수에 따른 램프 전압(v) 램프 전류(i) 파형의 변화

Fig. 6. Oscillograms of the lamp voltage and the lamp current.

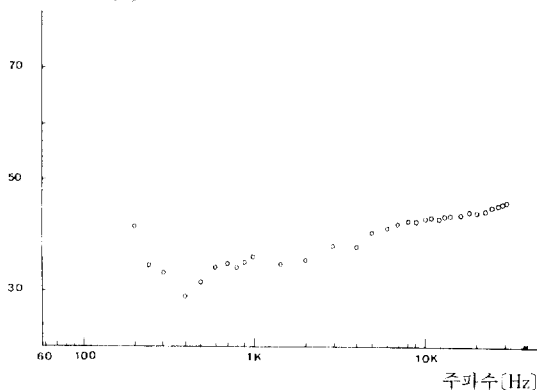


그림 7. 주파수에 따른 限流素子 임피던스 값의 변화

Fig. 7. Impedance of the current limiting element vs. frequency.

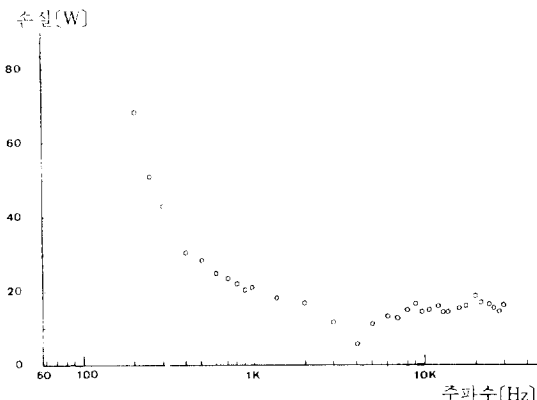


그림 8. 주파수에 따른 限流素子 손실의 변화(공심코일의 경우)

Fig. 8. Loss of the current limiting element vs. frequency.

의 반비례하여 감소하고, 따라서 코일의 捲數가 줄어들어 권선저항도 감소한다. 그러나 주파수가 매우 높아지면 표피효과(skin effect)에 의하여, 코일의 권선길이가 짧아져도 권선저항은 오히려 약간 증가한다. 그림 8에 권선저항에 의한 限流素子에서의 손실을 나타내었다. 낮은 주파수에서는 코일의 인덕턴스가 커져야 하며, 이를 공심코일로 구성할 경우 권선저항이 매우 커져서 거의 저항점등과 같은 특성을 나타낸다. 주파수가 수십kHz에 이르면 표피효과로 인하여 손실이 약간 증가한다.

3.2.3 光出力

주파수에 따른 光出力의 변화는 측정에 사용된 램프에 따라 차이가 많으나, 그 대표적인 변화를 그림 9에 보였다. 주파수증가에 따라 光出力은 서서히 증가하여 1kHz 근처에서 4% 정도의 향상을 보

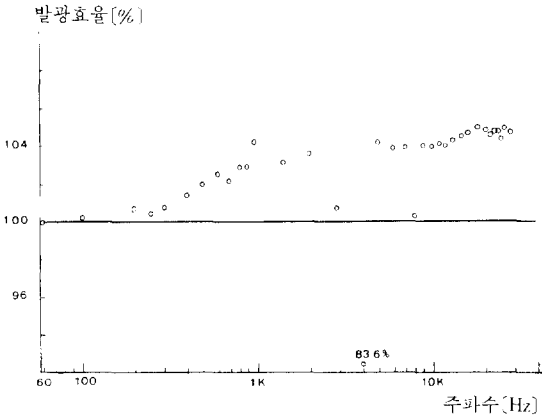


그림9. 주파수에 따른 發光效率의 변화  
Fig.9. Percent lumen vs. frequency.

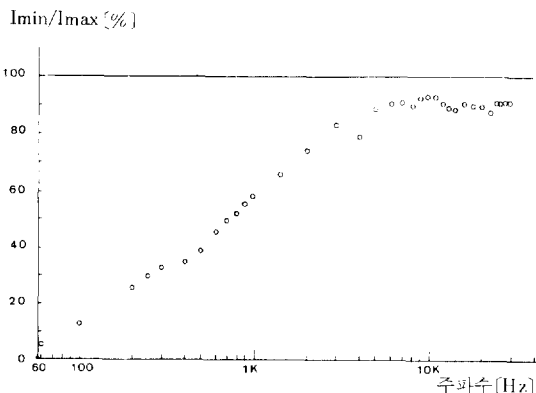
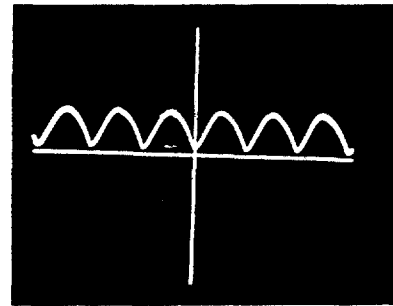


그림10. 주파수에 따른 광전류 최소치와 최대치 비 (Imin/Imax)의 변화

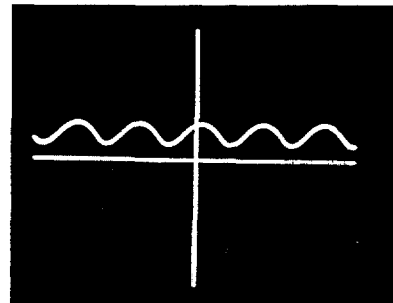
Fig. 10. Ratio of the minimum and the maximum value of the photocell current Vs. frequency

이며 그 이후는 더 이상 증가하지 않는다. 주파수가 높아지면, 램프전류가 0으로 되는 부분에서 전자가 소멸하는 속도보다 빨리 외부에서 전력이 다시 인가되므로, 낮은 주파수에서 매 반주기마다 일어나던 再點弧현상이 필요없게 되고, 여기에 소모되던 에너지가 光出力으로 전환되기 때문인 것으로 생각된다.

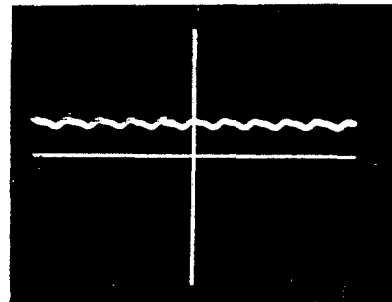
주파수가 높아지면 전자의 소멸이 없으므로 光出力이 주기내에서 거의 일정하게 되어 플리커현상도 없어진다. 주기내에서 광전류 최소치와 최대치의 비를 그림 10에 나타내었다. 또한 여러 주파수에서의 광전류파형을 그림 11에 보였다.



(a) 60Hz



(b) 500Hz



(c) 10kHz

그림11. 주파수에 따른 광전류 파형의 변화  
Fig.11. Oscillograms of the photocell current.

3.2.4 音響共振

放電管내의 가스 조성을 水銀 340Torr(분자량 M=200), 나트륨 70Torr(M=23), 크세논 190Torr(M=131)로 보면 평균분자량 M은 157.5로 된다. 또 아아크 중심의 온도  $T_0$ 를 4000°K, 관벽온도  $T_w$ 를 1500°K로 보고,<sup>7, 12)</sup> 관의 반지름방향의 온도분포를 포물선적으로 보면,<sup>11)</sup> 관내의 평균온도 T는

$$T = \frac{1}{\pi R_w^2} \int_0^{R_w} 2\pi r \cdot \left[ T_0 - (T_0 - T_w) \frac{r^2}{R_w^2} \right] dr$$

$$= \frac{1}{2} (T_0 + T_w) = 2750 [^{\circ}K]$$

이다. 따라서 放電管내의 音速 c는

$$c = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{RT}{M}} = 492 [m/sec]$$

로 되며,<sup>7)</sup> 식 (6)~(8)에 따라 공진주파수는 각각  $f_1 = 6830Hz$ ,  $f_{01} = 109kHz$ ,  $f_{10} = 52.4kHz$ 로 된다. 따라서 이 주파수의 반인 전원주파수 3.4kHz에서 축방향 공진이, 26.2kHz에서  $\theta$ 방향 공진이, 54.5kHz에서 r방향 공진이 각각 일어날 것으로 예상할 수 있다.

실제 측정의 결과 3~5kHz, 8kHz에서 音響共振 현상이 뚜렷이 나타났으며, 12kHz 및 16kHz에서와 20kHz 이상의 주파수에서도 공진현상이 나타났다. 따라서 축방향 音響共振이 일어나는 기본전원주파수는 4kHz부근임을 알 수 있으며 이때  $f_1$ 은 8kHz 정도로 되어야 한다. 音速의 계산에 있어서 평균온도 대신에 중심온도를 넣어 계산하면  $c = 593m/sec$ 로 되고, 이때의  $f_1$ 은 8230Hz로 되므로 측정결과와 부합된다. 따라서 축방향 音響共振의 주파수계산시에는 音速의 계산에 관중심온도를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

20kHz 이상에서 전압이 증가하는 것은  $\theta$ 방향 音響共振에 의한 것으로 생각되나 그 영향은 축방향 공진의 경우처럼 뚜렷하지는 않으며, r방향 공진은 측정범위를 벗어난다.

音響共振현상이 가장 심한 4kHz에서 램프를 점등하면 램프전압, 전류 및 光出力이 1초정도의 주기로 계속 진동하며 放電管에서 소리가 나고, 이 상태가 계속 유지되면 管이 파괴된다.

4 結 論

이상의 측정결과로 다음과 같은 결론을 얻었다. 즉 전원주파수가 상승하면 光出力이 증가하며 限流素子の 손실이 감소하고 플리커현상이 없어서서 점등에 유리하다. 그러나 3~5kHz의 주파수 범위와

8, 12, 16kHz의 주파수에서는 축방향 音響共振이, 20kHz 이상의 주파수에서는  $\theta$ 방향 音響共振이 일어나므로 고주파점등시에는 이 주파수대역을 피하여야 한다.

또한 고주파로 되면 배전손실이나 방사잡음등에 대하여 고려해야 하므로 고주파 점등의 실용화를 위해서는 램프의 특성뿐 아니라 사용장소 및 용도에 따라 적절한 주파수와 전력공급시스템 등을 선택하여야 한다.

즉, 배전선로가 짧은 고전정 실내조명의 경우 대용량 SCR 등을 사용한 대형의 전원장치로 약 2kHz 정도의 전원전압을 만들어 램프와 限流素子만을 포함한 각각의 등기구에 공급하는 것이 유리하며, 가로등이나 광장조명의 경우에는 각 램프마다에 FET나 GTR을 사용한 소형의 전원장치와 한류소자를 부착하여 13~15kHz 정도의 전압을 공급하는 것이 좋다.

이상과 같이 高壓나트륨램프의 고주파점등특성에 관하여 연구하여 여러결과를 얻었으나 그 실용화를 위하여는 아직도 해결되어야 할 문제들이 있다. 즉 주파수변동에 따른 방전개시전압과 動程의 변화, 音響共振의 제거방법, 放電管의 형태변화에 따른 공진주파수의 변화, 30kHz 이상의 주파수에서의 특성 변화등에 대하여 연구되어야 한다. 또한 새로운 형태의 安定器 및 램프를 개발하기 위해서는 放電現象을 정량적으로 해석하고 시뮬레이션하여 설계를 자동화할 수 있어야 할 것이다.

앞으로 본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

參 考 文 獻

- 1) W. Elenbaas, "Light Sources", MACMILLAN, 1972, Chap. 8.
- 2) 石川太郎, "光源と省エネルギー", 日本電氣學會誌, Vol. 99, No. 6, pp. 497-521, 1979.
- 3) 井山博之, et al, "小出力高壓ナトリウムランプの毎サイクル點弧形電子安定器による點灯", 照明學會誌, Vol. 67, No. 6, pp. 266-271, 1983.
- 4) M. C. Unglert, et al, "The Interaction of High-Pressure Sodium Lamps, Ballasts and Luminaires", Lighting Design and Application, pp.43-47, Nov., 1980.
- 5) J. H. Campbell, "High-Intensity Discharge Lamps on High-Frequency Power", Illum. Engng., Vol. 64, No. 12, pp.713-722, 1969.

- 6) 越村安信, et al, "HID ランプの高周波點灯における放電安定化方法", 照明學會誌, Vol. 67, No. 2, pp. 55-61, 1983.
- 7) H. L. Witting, "Acoustic Resonances in Cylindrical High-Pressure Arc Discharges", J. Appl. Phys, Vol. 49, pp.2680-2683, 1978.
- 8) R. Schäfer, H. P. Stormberg, "Investigations on the fundamental longitudinal acoustic resonance of high pressure discharge lamps", J. Appl. Phys., Vol. 53, No.5, pp3 476-3480, 1982.
- 9) H. P. Stormberg, R. Schäfer, "Excitation of a acoustic instabilities in discharge lamps with pulsed supply voltage", Lighting Research & Technology, Vol. 15, No.3, pp. 127-132, 1983.
- 10) W. Elenbaas, "Fluorescent Lamps", MA-CMILLAN, 1971, Chap. 6-7.
- 11) P. C. Drop, J. Polman, "Calculations on the effect of supply Frequency on the positive column of a low-pressure Hg-Ar AC discharge", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 5, pp.562-568, 1972.
- 12) J. A. J. M. van Vliet, J. J. de Groot, "High-pressure sodium discharge lamps", IEE Proc., Vol. 128, Pt. A, No. 6, pp.415-441, Sep., 1981.
- 13) J. J. de Groot, et al, "High frequency operation of low sodium lamps", J. of IES, Vol. 14, No. 1, pp.188-210, 1984.