

압력변화에 따른 Ar/N₂ 및 Kr/N₂ 혼합가스의 절연파괴 특성

(Breakdown Characteristics of Ar/N₂ and Kr/N₂ Gas Mixtures with Pressure Variation)

이상우 * · 이동인 * · 이광식 * · 김인식 * * · 김이국 * * · 배영호 * *

(Sang-Woo Lee · Dong-In Lee · Kwang-Sik Lee · In-Sik Kim · Lee-Kook Kim · Young-Ho Bae)

School of Elec. Eng., Yeungnam University * , School of Elec. Eng., Kyungil University * *

Abstract

In this paper, the ac breakdown characteristics of Ar/N₂ and Kr/N₂ gas mixtures with gas pressure range of 58.8~137.3[kPa] under uniform and non-uniform fields were investigated. Summarizing the experimental results, the breakdown voltages of Ar/N₂ gas mixtures were decreased with decreasing the mixture ratio of pure N₂ gas. In case of Ar(85%)/N₂(15%) and Ar(70%)/N₂(30%) gas mixtures comparing to the pure Ar gas, the breakdown voltages under uniform field were increased about 1.8 and 2.2 times, and under non-uniform field were increased about 1.1 and 1.3 times at the pressure of 101.3[kPa]. Also, in case of Kr(85%)/N₂(15%) and Kr(70%)/N₂(30%) gas mixtures comparing to the pure Kr gas, the breakdown voltages under uniform field were increased about 1.7 and 2.0 times, and under non-uniform field were increased about 1.0 and 1.2 times.

1. 서 론

순수 Ar 및 Kr 가스는 공기 중에 함유되어 있는 체적 비율이 약 0.93 및 0.00011[%]로 미소하여 희유(稀有) 가스라고도 하며, 다른 물질이나 불순물과 화학적인 작용을 하지 아니한다. 그리고 순수 Ar 가스에 미량의 순수 N₂ 가스를 주입한 혼합된 가스는 조명용 전구에서 필라멘트의 증발을 억제하므로, 발광 효율[lm/w]를 높이고, 수명 증대를 위해 적정 비율로 혼합 붐입하여 사용하고 있다. 그러나 여러 관련 회사마다 혼합 가스의 적정 비율이나 절연파괴 특성 등에 대한 데이터가 불충분하여 그 차이가 큰 것이 현실이다.

또한, 각종 고효율 램프와 같이 조명용 백열전구의 발광 효율을 증대하기 위하여 높은 효율을 가진 순수 Ar가스보다 가일층 발광 효율을 향상시키기 위해 순수 Kr 및 Xe 가스를 사용하고 있다.[1] 그러므로 arc 방전이 발생하기 쉬운 고효율을 가진 Ar/N₂와 Kr/N₂ 혼합 가스의 교류절연파괴 특성 등을 연구할 필요성이 있다.

순수 N₂ 가스보다 분자량이 큰 순수 Ar 및 Kr 가스를 사용하면 열전도율이 낮아서 열의 전도나 대류에 의한 필라멘트가 열을 빼앗기는 현상이 줄

어들어 발광 효율을 극대화 할 수 있을 뿐만 아니라 에너지의 소비가 줄어드는 이점이 있으나, 양극에서 arc 방전이 발생하기 쉬운 결점이 있다. 또한 원자량이 큰 경우 열전도율에 의한 가스 손실이 줄어들어 필라멘트의 증발이 낮아 조명용 전구의 수명이 연장되는 것으로 보고되고 있다[2].

조명용 전구의 경우, 전구 내의 압력이 점차 낮아지면, 원자량의 밀도 변화보다 열의 전도나 대류에 의한 열전달이 매우 중요시되고 있다[3]. 그리고 전구의 점등 시간이 늘어남에 따라 필라멘트가 점진적으로 증발하여 저항은 증가하는데 비해 전류는 감소되며, 이로 인하여 전구의 광속은 점차 감소하게 된다. 이러한 주요 원인은 주로 필라멘트의 재질, 붐입 가스의 순도, 혼합 주입 가스의 비율, 유리구의 크기, 점등 조건 등에 의해 큰 영향을 받고 있다[4].

따라서 본 연구는 방전 챔버에 수평으로 설치한 평등 및 불평등 전계하에서 상용주파수 전압을 인가하였을 때, 58.8~137.3[kPa]의 압력 변화에 따른 Ar/N₂와 Kr/N₂ 혼합 가스의 절연파괴 특성을 조사하였다. 또한 전구에 Ar/N₂ 및 Kr/N₂ 혼합 가스를 주입한 경우, 그에 따른 발광 효율[lm/w], 광속 [lm] 및 수명[hr] 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 가스 혼합 방법

그림 1은 여러 가지 특성을 조사하기 위한 실험 장치의 개략도이며, 저진공에서 고기압까지 유지할 수 있도록 하였다. 그리고 순수 가스를 일정 비율로 혼합할 수 있도록 설계하였으며, 혼합된 가스를 방전 챔버에 주입할 수 있도록 제작하였다.

그림 1에 나타난 방전 챔버의 압력은 294.2[kPa]이며, Ar/N₂ 및 Kr/N₂ 가스를 혼합하기 위한 혼합 가스 챔버의 압력은 490.3[kPa]으로 설계하였다.

Ar/N₂ 및 Kr/N₂ 혼합 가스의 경우, 혼합 가스를 주입하기 전에 혼합 챔버내를 게이지 상의 진공도인 완전 진공(101.3[kPa])으로 배기 한 후, 가스의 혼합비가 적은 순수 N₂ 가스(순도99.99%)를 먼저 주입하고, 혼합비가 높은 순수 Ar(99.99%) 및 Kr(순도99.99%) 가스를 적정 비율로 충전하였다. 그리고 혼합 가스의 주입 방법은 챔버의 압력 490.3[kPa]을 기준으로 그에 따른 분압 법칙을 적용하였으며, 챔버에 Ar(70%)/N₂(30%) 가스를 혼합하려면, 챔버에 순수 Ar 가스 343.2[kPa]와 순수 N₂ 가스 147.1[kPa]의 비율로 혼합하였다.

또한, 혼합된 가스는 방전 챔버로 해당 시험 압력까지 노즐을 통하여 주입한 후, 교류절연과피 특성을 조사하였다. 그리고 혼합 가스 챔버의 혼합 가스 비율은 순수 Ar 및 Kr 가스를 50~90[%]으로 변화시켜 충전하였을 때, 순수 N₂ 가스를 50~10[%]으로 변화시켜 충전하였다.

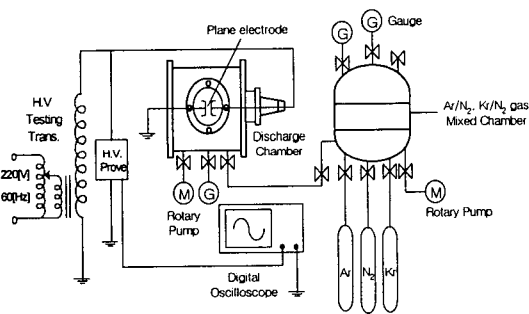


그림 1 실험 장치의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2. 실험장치 및 방법

압력변화에 따른 Ar/N₂와 Kr/N₂ 혼합 가스의 교류절연과피 특성을 조사하기 위해 평등 및 불평등 전계를 형성하고, 58.8~137.3[kPa]의 압력을 변화하여 실험하였다. 혼합 가스의 교류절연과피 실험

의 경우, 갭 길이는 3, 5 및 7[mm]로 변경하여 실험하였으며, 갭 길이는 gauge block set.(code no. 516-968, set no. bml-32-2, mitutoyo)으로 측정하였다. 평등 전계의 경우, 평판 전극은 직경 75.0[mm], 두께 15.0[mm]인 stainless steel 재질을 사용하였다. 그리고 불평등 전계의 경우에도 침 전극의 재질은 stainless steel을 사용하였으며, 침 전극의 직경은 10.0[mm], 선단 각은 90도가 되도록 연마하여 실험하였다.

코로나에 의한 방전 전류 펄스를 측정하기 위해 평판 전극과 접지 사이의 도선에 무유도 저항 47[Ω]을 삽입하였으며, 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하여 코로나 전류 펄스를 관측하였다. 고전압 발생 장치는 입력 전압 220[V], 60[Hz], 최대 출력 전압 50[kV]인 측정 시스템(Tokyo Transformer Co., Ltd.)으로 실험하였다. 상용 주파수의 인가 전압을 정밀하게 측정하기 위해 분압비가 2000:1인 고압 프로브(High Voltage Probe, type; EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였으며, 상용 주파수의 인가 전압은 승압 속도 0.1[kV/s]로 전압을 인가하여 절연과피 전압을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Ar/N₂ 혼합 가스의 절연과피 특성

3.1.1. 평등 전계인 경우

그림 2는 평등 전계인 경우, 대표적인 Ar/N₂ 혼합 가스의 압력 변화에 따른 교류절연과피 특성을 나타낸 것이다. 그림 2 및 그림 3은 Ar/N₂ 혼합 가스를 챔버에 주입하여 대표적으로 갭 길이가 5[mm]인 경우, 혼합 가스 비율과 가스 압력 변화에 따른 절연과피전압을 나타낸 것이다.

그림 2에 나타난 바와 같이 절연과피전압은 일정한 Ar/N₂ 혼합 가스 비율에서 가스 압력이 높아짐에 따라 증가된 것으로 나타났다.

혼합 가스 비율과 가스 압력의 변화에 따른 절연과피전압의 증가 비율은 대표적으로 갭 길이가 5[mm]에서 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우 약 3.02, 4.69, 5.49/78.45 및 6.52/78.45[kV/kPa]인 것으로 나타났다. 그리고 그림2에 나타난 바와 같이 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연과피전압은 순수 Ar 가스에 비해 약 1.7, 2.6, 3.0 및 3.6배 증가되었다. 그림2에 나타난 바와 같이 혼합 가스의 절연과피전압은 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70

및 50[%]인 경우, 약 4.22, 5.89, 7.07 및 7.97[kV]인 것으로 나타났다. 그리고 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 절연파괴전압은 순수 Ar 가스에 비해 약 1.3, 1.8, 2.2 및 2.5배 증가된 것으로 나타났다. 그림 2에 나타난 바와 같이 Ar/N₂ 혼합 가스의 경우, 절연파괴전압은 순수 N₂ 가스의 혼합 비율이 적을수록 절연파괴전압이 저하되는 것으로 나타났으며, 압력 변화에 따른 절연파괴의 변화율도 저하된 것으로 나타났다.

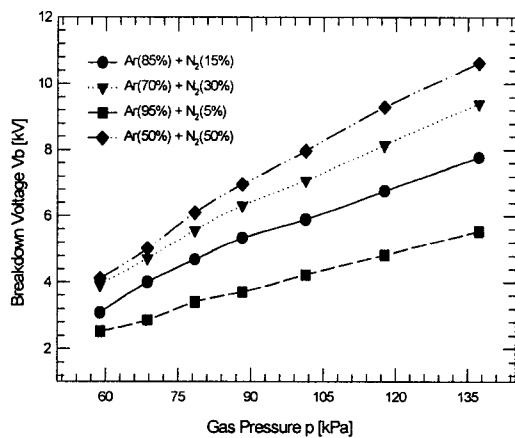


그림 2 대표적인 Ar/N₂ 혼합 가스 비율과 압력 변화에 따른 교류절연파괴 특성 (평판-평판전극, 갭 길이 5[mm])
 Fig. 2 AC breakdown characteristics with typical Ar/N₂ gas mixtures ratio and pressure variation (plane-plane electrode, gap length 5[mm])

3.1.2. 불평등 전계인 경우

그림 3은 불평등 전계의 경우, 대표적인 Ar/N₂ 혼합 가스의 압력 변화에 따른 절연파괴 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에 나타난 바와 같이 절연파괴 특성은 3.1.1절의 평등 전계인 경우와 동일하게 일정한 Ar/N₂ 혼합 가스 주입 비율에서 가스 압력이 높아짐에 따라 증가되었다.

Ar/N₂ 혼합 가스 비율과 가스 압력의 변화에 따른 절연파괴전압의 증가 비율은 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 약 1.88, 2.48, 3.34/78.45 및 3.46/78.45[kV/kPa]인 것으로 나타났다.

그림3에 나타난 바와 같이 순수 Ar 혼합 가스 주입 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연파괴전압은 순수 Ar 가스에 비해 약 1.1, 1.4, 1.8 및 1.9배인 것으로 나타났다. 혼합 가스인 Ar/N₂의 평등 전계인 경우에 비해, 불평등 전계하에서 대표적인 갭 길이가 5[mm]인 경우, 순

수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연파괴전압은 약 0.6, 0.5, 0.6 및 0.5배로 감소된 것으로 나타났다.

그림 3에 나타난 바와 같이 Ar/N₂ 혼합 가스의 절연파괴전압은 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 약 3.14, 3.21, 4.05 및 4.67[kV]인 것으로 나타났다. 그리고 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Ar 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]에서 절연파괴전압은 순수 Ar 가스에 비해 약 1.0, 1.1, 1.3 및 1.5 배인 것으로 나타났다.

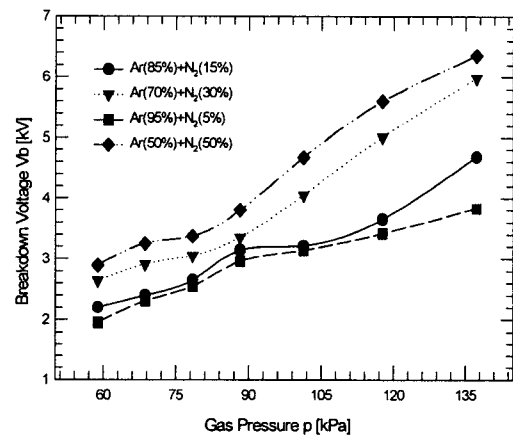


그림 3 대표적인 Ar/N₂ 혼합 가스 비율과 압력 변화에 따른 교류절연파괴 특성 (침-평판전극, 갭 길이 5[mm])
 Fig. 3 AC breakdown characteristics with typical Ar/N₂ gas mixtures ratio and pressure variation (needle-plane electrode, gap length 5[mm])

3.2. 압력 변화에 따른 Kr/N₂ 혼합 가스의 절연파괴 특성

3.2.1. 평등 전계인 경우

그림 4는 평등 전계인 경우, 대표적인 Kr/N₂ 혼합 가스의 압력 변화에 따른 절연파괴전압 특성을 나타낸 것이다. 그리고 그림 4 및 그림 5는 Kr/N₂ 혼합 가스를 챔버에 주입하여 대표적으로 갭 길이가 5[mm]인 경우, 혼합 가스 비율과 가스 압력 변화에 따른 절연파괴전압을 나타낸 것이다.

그림 4에 나타난 바와 같이 절연파괴전압은 일정한 Kr/N₂ 혼합 가스 비율에서 가스 압력이 높아짐에 따라 증가된 것으로 나타났다. 그림4에 나타난 바와 같이 혼합 가스 비율과 가스 압력의 변화에 따른 절연파괴전압의 증가 비율은 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우 약 3.07, 4.42, 5.14/78.45 및 5.88/78.45[kV/kPa]인 것으

로 나타났다. 그림 4에 나타난 바와 같이 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연파괴전압은 순수 Kr 가스에 비해 약 1.5, 2.2, 2.6 및 3.0배 증가되었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 혼합 가스의 절연파괴전압은 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 약 4.16, 5.65, 6.65 및 7.49[kV]인 것으로 나타났다. 그리고 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 절연파괴전압은 순수 Kr 가스에 비해 약 1.3, 1.7, 2.0 및 2.3배 증가된 것으로 나타났다. Kr/N₂ 및 Ar/N₂ 혼합 가스의 경우, 절연파괴전압은 순수 N₂ 가스의 혼합 비율이 적을수록 저하되었으며, 분자량이 순수 Ar 가스에 비해 큰 순수 Kr 가스에서 순수 N₂ 가스 혼합 비율에 따라 Ar/N₂ 혼합 가스에 비해 Kr/N₂ 혼합 가스인 경우 절연파괴전압이 저하된 것으로 조사되었다.

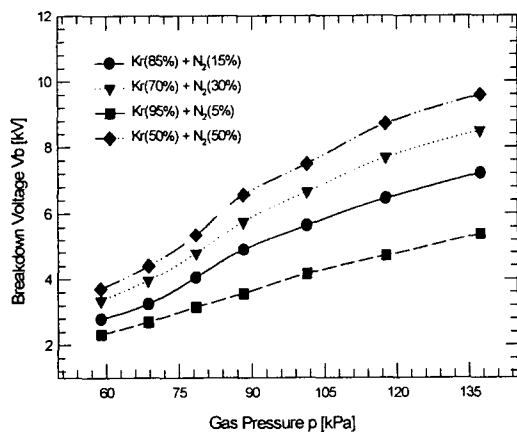


그림 4 대표적인 Kr/N₂ 혼합 가스 비율과 압력 변화에 따른 교류절연파괴 특성 (평판-평판전극, 갭 길이 5[mm])

Fig. 4 AC breakdown characteristics with typical Kr/N₂ gas mixtures ratio and pressure variation(plane-plane electrode, gap length 5[mm])

3.2.2. 불평등 전계인 경우

그림 5는 불평등 전계의 경우, 대표적으로 Kr/N₂ 혼합 가스의 압력 변화에 따른 절연파괴 특성을 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 교류절연파괴 특성은 일정한 Kr/N₂ 혼합 가스 주입 비율에서 가스 압력이 높아짐에 따라 증가되었으나, 평등 전계인 경우에 비해 증가된 비율이 매우 낮은 것으로 나타났다. Kr/N₂ 혼합 가스 비율과 가스 압력의 변화에 따른 절연파괴전압의 증가 비율은 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및

50[%]인 경우, 약 1.76, 2.01, 2.61/78.45 및 3.06/78.45[kV/kPa]인 것으로 나타났다.

그림 5에 나타난 바와 같이 순수 Kr 혼합 가스 주입 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연파괴전압은 순수 Kr 가스에 비해 약 1.0, 1.2, 1.5 및 1.7배인 것으로 나타났다. 혼합 가스인 Kr/N₂의 평등 전계인 경우에 비해, 불평등 전계하에서 대표적인 갭 길이가 5[mm]인 경우, 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]일 때, 압력 변화에 따른 절연파괴전압은 약 0.6, 0.5, 0.6 및 0.5배로 감소된 것으로 나타났다.

그림 5에 나타난 바와 같이 Kr/N₂ 혼합 가스의 절연파괴전압은 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 약 2.99, 3.05, 3.32 및 4.01[kV]인 것으로 나타났다. 그리고 가스 압력이 101.3[kPa]일 때, 순수 Kr 혼합 가스 비율이 95, 85, 70 및 50[%]에서 절연파괴전압은 순수 Kr 가스에 비해 약 1.0, 1.0, 1.2 및 1.4 배인 것으로 나타났다.

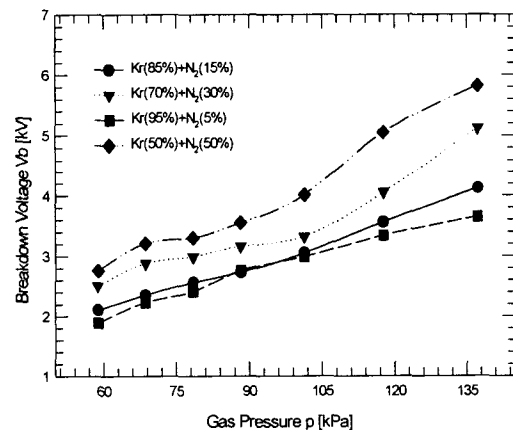


그림 5 대표적인 Kr/N₂ 혼합 가스 비율과 압력 변화에 따른 교류절연파괴 특성 (침-평판전극, 갭 길이 5[mm])

Fig. 5 AC breakdown characteristics with typical Kr/N₂ gas mixtures ratio and pressure variation (needle-plane electrode, gap length 5[mm])

3.3. 가스 혼합 비율 및 종류에 따른 발광 효율 및 광속 특성

가스 혼합 주입 비율은 전구의 발광 효율, 광속 및 수명 특성에 매우 중요한 영향을 차지하고 있는 실정이다. 또한 적절한 가스 혼합 주입 비율은 필라멘트의 증발을 억제하며, 광속 및 수명을 증가시킬 뿐만 아니라 arc 방전을 미연에 방지하여 발열로 인한 필라멘트의 단선을 방지

하는 중요한 역할을 하고 있다. 그림 6은 가스 혼합 주입 비율에 따른 광속 및 수명 특성을 실측하여 나타낸 것이다.

그림 6의 경우, 조명용 전구의 체적은 134[mm³]이고 일반 전구용 필라멘트를 사용하였으며 상용 주파수 220[V]를 인가하였다. 그리고 백열전구에 혼합된 가스를 주입하기 전에 0.04[Pa]의 압력으로 배기 한 후, 혼합 가스 주입 비율을 Ar(70%)/N₂(30%), Ar(85%)/N₂(15%), Kr(70%)/N₂(30%) 및 Kr(85%)/N₂(15%)의 비율로 혼합 가스를 주입하여, 실용 백열전구의 발광 효율, 광속 및 수명 등을 실측하여 나타낸 것이다. 그림 6에 나타난 바와 같이 혼합 가스 주입 비율에 대한 광속의 변화 비율은 Ar(70%)/N₂(30%)인 혼합 가스에 비해 Kr(70%)/N₂(30%)인 혼합 가스의 경우, 발광 효율, 광속 및 수명 특성은 16[%], 15[%] 및 21[%]로 증가된 것으로 나타났다. Ar(85%)/N₂(15%)인 혼합 가스에 비해 Kr(85%)/N₂(15%)인 혼합 가스의 경우 발광 효율, 광속 및 수명 특성은 12[%], 11[%] 및 0.5[%]로 증가된 것으로 나타났다.

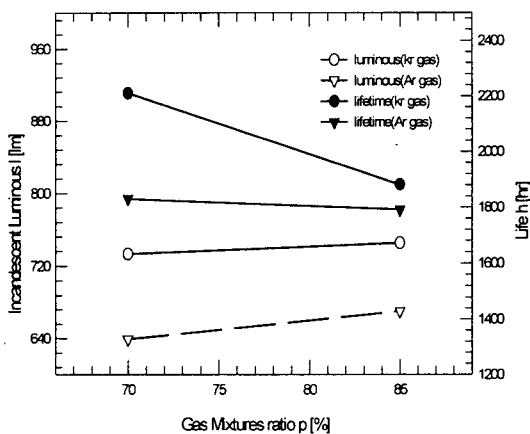


그림 6 가스 혼합 비율에 따른 광속 및 수명 특성
Fig. 6 Characteristics of luminous and lifetime with gas mixtures ratio in incandescent lamps

또한, 혼합 가스 주입 비율이 Kr(85%)/N₂(15%)인 혼합 가스의 경우, 순수 Kr 가스의 혼합 비율이 증가됨에 따라 arc 방전이 빈번히 발생하여 전구의 수명이 급격히 저하된 것으로 관측되었다. 이러한 이유는 분자량이 순수 Ar 가스에 비해 큰 순수 Kr 가스는 필라멘트의 주변을 억제하는 역할을 하는 반면, 절연과괴전압이 낮아 arc 방전에 의한 영향이 큰 것으로 나

타났다. 가스 혼합 주입 비율에 대한 시험 결과, Ar/N₂ 혼합 가스인 경우에 비해, Kr/N₂ 혼합 가스에서 열전도율에 의한 가스 손실이 줄어들 뿐만 아니라 전구의 발광 효율 및 광속이 증가되었으며, 수명이 연장된 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 Ar/N₂와 Kr/N₂ 혼합 가스의 평등 및 불평등 전계하에서 가스의 압력을 58.8~137.3[kPa]으로 변화시켜, 절연과괴 특성을 실험하였으며, 혼합 가스 변화에 따른 발광 효율, 광속 및 수명 등을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Ar/N₂ 혼합 가스에서 순수 Ar 가스에 비해 Ar 가스의 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 절연과괴전압은 평등 전계하에서는 약 1.7, 2.6, 3.0 및 3.6배 증가되었으며, 불평등 전계하에서는 약 1.1, 1.4, 1.8 및 1.9배인 것으로 나타났다.

2) Kr/N₂ 혼합 가스에서 순수 Kr 가스에 비해 Kr 가스의 비율이 95, 85, 70 및 50[%]인 경우, 절연과괴전압은 평등 전계하에서는 약 1.5, 2.2, 2.6 및 3.0배 증가되었으며, 불평등 전계하에서는 약 1.0, 1.2, 1.5 및 1.7배인 것으로 나타났다.

3) Ar/N₂ 및 Kr/N₂ 혼합 가스의 경우, 절연과괴전압은 순수 N₂ 가스의 혼합 비율이 줄어들수록 절연과괴전압이 저하된 것으로 나타났으며, 압력 변화에 따른 절연과괴전압의 변화율도 저하된 것으로 나타났다.

4) 가스 혼합 주입 비율이 Ar(70%)/N₂(30%)에 비해, Kr(70%)/N₂(30%)인 경우, 발광 효율, 광속 및 수명은 16, 15 및 21[%]로 증가된 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] W. E. Thouret, R. Kaufman and J. W. Orlando, "Energy and cost saving Krypton filled incandescent lamps", Journal of IES Tran. pp. 188-197, 1975.
- [2] I. Amdur and E. A. Mason, "Properties of Gases at Very High Temperatures", The Physics of Fluids, Vol. 1, No. 5, pp. 370-383, 1958.
- [3] J. R. Coaton, C. Eng., M. I. E. E. and L. Inst. P., "The optimum operating gas pressure for incandescent tungsten filament lamps", Lighting Research and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 98-103, 1969.
- [4] G. Bergmann and P. Gerhsen, "Electrical breakdown in gas-filled incandescent lamps", Lighting Research and Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 159-165, 1972.