

각종 광원의 색온도, 연색성과 밝은 느낌에 대한 실험적 연구

(A Study on Visual Clarity According to Color Temperature and Color Rendering of Light Sources)

이진우* · 지철근 · 조경애

(Chin - Woo Yi · Chol - Kon Chee · Kyung - Ae Cho)

요 약

본 연구에서는 광원의 색온도와 연색성의 차이에 의한 밝음의 느낌을 연구하기 위하여 이중 램프간, 또한 동종 램프 간의 비교 실험을 시각 대상으로 흑백 인쇄문자지와 색상지를 사용하여 수행하였다. 백열전구, 형광램프, 고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프, 무전극 방전램프를 대상으로 실험을 수행한 결과, 이중 광원의 경우 밝음의 느낌 비는 백열전구를 제외한 광원의 경우 대체적으로 평균연색계수에 비례하는 경향이 있으며, 모든 시험 대상 광원의 경우 색온도에 비례하는 것으로 나타났다.

Abstract

We studied visual clarity according to the difference of color temperature and color rendering by using black and white printed paper and four sheets of colored paper under different kinds of lamps and same kind lamps. The results show visual clarity is proportioned to average color rendering index approximately except incandescent lamps and to color temperature under incandescent lamps, fluorescent lamps, high pressure sodium lamps, metal halide lamps and electrode less discharge lamps.

Key Words : visual clarity, color temperature, average color rendering index

1. 서 론

광원의 연색성의 차이에 의한 밝음의 느낌(visual clarity)의 변화의 현상에 관하여는 많은 실험적 연구가 발표되고 있다. 1969년에 Aston과 Bellchamber가 “연색성의 차이에 따른 형광램프에 의한 밝은 느낌

의 변화”의 실험적 연구에서 고연색성 형광램프는 저연색성 형광램프에 비하여 약 25~40[%] 낮은 조도에서도 동일한 밝음을 느낀다고 발표하였다 [1]-[3]. 이 연구가 발단이 되어 이어서 1975년에 Boyce, Lynes, Kanedani 등이 “광원의 색온도, 연색성이 소요조도에 미치는 영향” 등을 발표하였다 [4]-[9].

이들 연구에서 Kanedani는 사람의 얼굴, 기타 각종 유채색 샘플군을 시각 대상으로 사용하였고, Astom과 Bellchamber 등도 같은 실험 결과를 발표하였다.

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수
Tel : 041-540-5655, Fax : 041-540-5693
E-mail : leejw@office.ac.kr
접수일자 : 2003년 1월 8일
1차심사 : 2003년 1월 13일, 2차심사 : 2003년 7월 10일
심사완료 : 2003년 10월 1일

각종 광원의 색온도, 연색성과 밝은 느낌에 대한 실험적 연구

그리고 평가 기준으로는 Aston, Bellchamber 및 Thornton 등은 “밝은 느낌(visual clarity)”를 Boyce 등은 “satisfaction”을 Kanedani 등은 “적정조도의 한 계값”을 Akiyama 등은 “밝은 느낌”을 사용하였다.

이와 같이 이들 각종 연구는 시각 대상물이나 평가기준이 각각 다르지만, 광원의 연색성과 색온도 차이에 의한 물체색의 보임의 변화효과를 조도레벨로 정량적으로 받아들이고 있으며, 이들 각종 실험에서 얻어진 조도레벨의 상대값은 실험에 사용된 광원의 연색성과 대개 동일하게 유지된다면 대부분 같은 값을 얻고 있다.

그러나 이로부터 근 30년이 지나면서 색온도, 연색성, 효율, 수명 등 특성이 우수한 여러 광원들이 출현하여 여러 방면에서 넓게 사용되고 있다. 그러므로 현재 새롭게 출현된 광원들도 포함하여 이들의 색온도, 연색성 차이에 의한 밝은 느낌의 변화 실험이 요망되고 있다.

본 논문에서는 현재 널리 사용되고 있는 고압 나트륨램프, 백열전구, 백색 형광램프, 메탈할라이드램프, 주광색 형광램프, 3파장 주광색 형광램프, 무전극 방전램프 등도 포함한 7종류의 광원을 대상, 1차적으로는 3파장 주광색 형광램프를 제외한 6종류의 광원을 실험 대상으로 하였으며, 2차적으로 형광램프 3종을 대상으로, 이들 광원의 색온도, 연색성 차이에 의한 밝은 느낌의 변화를 15명의 남녀 대학생 관찰자를 참가시켜서 실험하였다. 도출된 결과는 각종 용도에 사용될 광원들의 올바른 선정기준의 설정에 기여할 것이다. 또한 적색, 황색, 녹색, 청색에 대한 각종 광원에 의한 밝음의 느낌의 변화도 관찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 장 치

가로, 세로, 높이가 각각 90, 90, 90[cm]인 관찰용 광원 박스를 제작하여, 전면을 동일한 두 개의 공간으로 나누었다. 박스의 내부는 흑색 천을 부착하여 내부 반사의 영향을 제거하였다. 광원은 박스의 천장에 부착하고 광원의 하부에 스크린을 설치하여 박스 하면의 조도를 변경할 수 있도록 하였으며, 전면 상부는 직사광이 관찰자의 시야에 들어오는 것을 방

지하기 위하여 차폐를 실시하였다.

시각 대상물을 광원 박스의 양 하면에 설치하여 실험을 행하였으며, 관찰자는 두 가지 시각 대상물이 동시에 시각 내에 인지되는 거리에 위치시켰다.

본 실험에 사용한 실험장치는 그림 1과 같다.

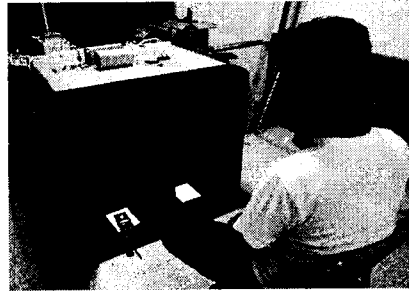


그림 1. 실험 장치 및 관측자의 실험 광경
Fig. 1. A scene of a experimental apparatus and an observer

2.2 실험 방법

동일한 크기의 두 광원 박스의 시야 한 쪽에 기준 광원을 다른 쪽에 비교광원을 설치한다. 시험 광원에 대한 밝음의 감도를 구하기 위하여, 관찰자는 3[분]의 순응 시간 후, 동일한 색상의 시각 대상물에 대한 기준광원과 비교광원의 밝기를 조정하여 동일한 밝음으로 인식할 때 조정을 중지한다. 그리고 조도계를 사용하여 기준광원과 비교광원 하의 시각 대상물 상의 조도를 측정하여 기록한다. 시각 대상물을 변경하여 동일한 실험을 반복한다.

시각 대상물로는 가로, 세로가 134, 18[cm]인 색상지와 검정색 문자가 인쇄된 백색지를 사용하였다. 색상지의 색상은 적색, 황색, 청색, 녹색을 사용하였으며, 각 색상의 먼셀 색좌표는 표 1과 같다.

표 1. 시각 대상물의 색상과 먼셀 색좌표
Table 1. Hues and Munsell color coordinates of visual objects

색 상	먼셀 색좌표
적 색	5R 4.5/14
황 색	5Y 8/12
청 색	7B 4/8
녹 색	10G 5/9

실험대상 광원은 백열전구, 백색 형광램프, 주광색 형광램프, 3파장 주광색 형광램프, 고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프 및 무전극 형광램프를 사용하였다. 사용한 광원의 특성은 표 4와 같다.

실험에서는 각종 사용광원의 조도범위를 비슷하게 하기 위하여, 백열전구는 100[W]×4등, 각종 형광램프는 20[W]×4등을 사용하였다.

관찰자는 무전극 방전램프를 기준광원으로 사용하여 여러 종류의 램프를 비교한 경우 남녀 15명, 3파장 주광색 형광램프를 기준광원으로 사용하고 형광램프 간에 비교한 경우는 남자 5명을 대상으로 하였다.

3. 실험 결과

3.1 결 과

3.1.1 여러 종류의 램프를 비교한 경우

실험 결과의 타당성을 검증하기 위하여 쌍체 비교 t-검정을 실시하였다.

쌍체 비교 t-검정은 실험단위를 동질적인 쌍으로 묶은 다음 각 쌍에 대해 랜덤하게 두 처리를 적용하고, 각 쌍에서 얻어진 반응값의 차이를 이용하여 두 모평균을 비교하는 것이다.

정규모집단으로부터 n개의 짝지은 표본 (x1, y1), (x2, y2), ..., (xn, yn)을 얻었을 때, di = xi - yi (i = 1, ..., n)이라고 하자. 그러면 두 반응값의 평균에 대한 가설 μx = μy를 검증하는 것은 μd = μx - μy = 0을 검증하는 것과 같다. 여기서 변수 d는 다음과 같은 표본평균과 표본분산을 가진다.

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad s_d^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2$$

따라서 귀무가설 H0 : μd = 0 을 검증하기 위한 검정통계량은 다음과 같고, 이 T 통계량은 귀무가설 하에서 자유도 n - 1을 가지는 t-분포를 따른다.

대응비교에서 모평균의 차에 대한 추론은 다음과 같다.

검정통계량 :

$$T = \frac{\bar{d} - \delta_0}{s_d / \sqrt{n}}$$

기각역 :

	귀무가설	대립가설	기각역
(a)	H0 : μ1-μ2 ≤ δ0	H1 : μ1-μ2 > δ0	T ≥ ta (n-1)
(b)	H0 : μ1-μ2 ≥ δ0	H1 : μ1-μ2 < δ0	T ≤ -ta (n-1)
(c)	H0 : μ1-μ2 = δ0	H1 : μ1-μ2 ≠ δ0	T ≥ ta/2 (n-1)

δ0는 모평균의 차, μ는 모평균, ta는 신뢰구간을 나타낸다.

표 2에 시각 대상물의 색상에 따른 각 광원의 검정치를 나타내었다.

무전극 방전램프를 기준으로 하여 고압 나트륨램프, 백열전구, 메탈할라이드램프, 할로인산 주광색 형광램프의 경우 흑백인쇄문자에 대한 밝음의 느낌의 비를 그림 2에 종합적인 밝음의 느낌 비를 그림 3에 나타내었다.

무전극 방전램프를 기준으로 하여 종합적 실험 결과를 광원의 색온도에 따라 나타난 밝음의 느낌비를 그림 4에, 광원의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌비를 그림 5에 나타내었다.

표 2. 시각 대상물에 대한 광원의 t-검정 결과치
Table 2. t-test results of light sources in case of visual objects

시각대상물 \ 광원	IL-ELD	FL W-ELD	FL D-ELD	HPS-ELD	MHL-ELD
흑백인쇄문자 지	4.95***	0.35	2.80**	3.78**	3.86***
적 색 지	1.33	1.73	1.27	1.79*	1.58
황 색 지	5.76***	-0.04	1.48	4.89***	3.37**
청 색 지	0.94	0.44	1.82*	3.95***	1.52
녹 색 지	2.97**	0.70	2.91**	6.06***	1.30
총 합	4.51***	0.65	2.58*	5.35***	3.09**

*p<.05 **p<.01 ***p<.001

주 : IL-백열전구, FL W-백색 형광램프, FL D-주광색 형광램프, HPS-고압 나트륨램프, MHL-메탈할라이드램프, ELD-무전극 방전램프

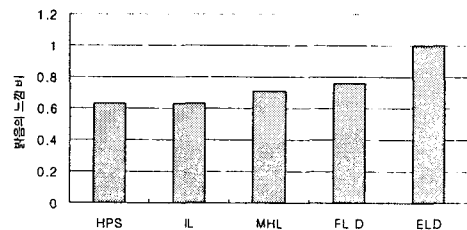


그림 2. 흑백인쇄문자의 경우 밝음의 느낌 비
Fig. 2. Visual clarity ratios of black and white printed paper

각종 광원의 색온도, 연색성과 밝은 느낌에 대한 실험적 연구

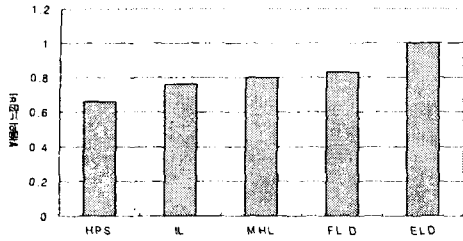


그림 3. 종합적인 경우 밝음의 느낌 비
Fig. 3. Visual clarity ratios of total cases

3.1.2 형광램프를 비교한 경우

3파장 주광색 형광램프를 기준광원으로 사용하여 백색 형광램프, 주광색 형광램프와의 동일 밝음을 느끼는 조도를 조사한 결과는 다음과 같다.

실험 결과의 타당성을 검증하기 위하여 쌍체 비교 t-검정을 실시하였다. 표 3에 시각 대상물의 색상에 따른 각 광원의 검정치를 나타내었다.

표 3. 시각 대상물에 대한 광원의 t-검정 결과치
Table 3. t-test results according to visual objects

시각대상물 \ 광원	FL W - FL EX-D	FL D - FL EX-D
흑백인쇄문자지	13.8**	6.93*
적 색 지	-0.17	1.69
황 색 지	18.5**	3.98*
청 색 지	2.22	-0.09
녹 색 지	4.21*	1.28
총 합	4.85*	4.91*

*p<.05 **p<.01

주: FL W-백색 형광램프, FL D-주광색 형광램프, FL EX-D-3파장 주광색 형광램프

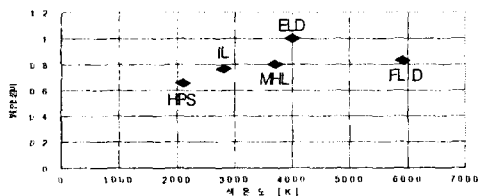


그림 4. 광원의 색온도에 따른 밝음의 느낌 비
Fig. 4. Visual clarity according to color temperature of light sources

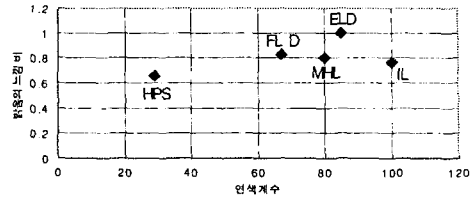


그림 5. 광원 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌 비
Fig. 5. Visual clarity according to average color rendering index of light sources

흑백인쇄문자의 경우 3파장 주광색 형광램프에 대하여 할로인산 백색 형광램프와 할로인산 주광색 형광램프가 밝음의 느낌 비를 그림 6에, 종합적인 밝음의 느낌 비를 그림 7에 나타내었다.

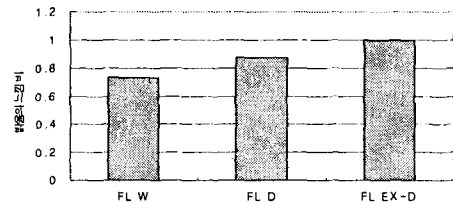


그림 6. 흑백인쇄문자의 경우 밝음의 느낌 비
Fig. 6. Visual clarity ratios of black and white printed paper

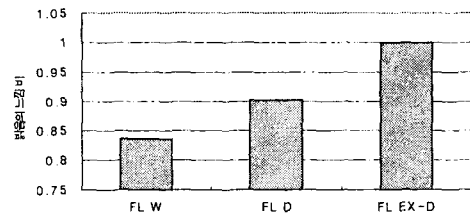


그림 7. 종합적인 경우 밝음의 느낌 비
Fig. 7. Visual clarity ratios of total cases

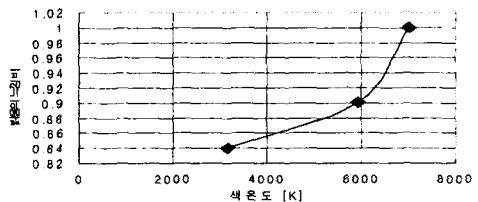


그림 8. 형광램프의 색온도에 따른 밝음의 느낌 비
Fig. 8. Visual clarity ratios according to color temperature of fluorescent lamps

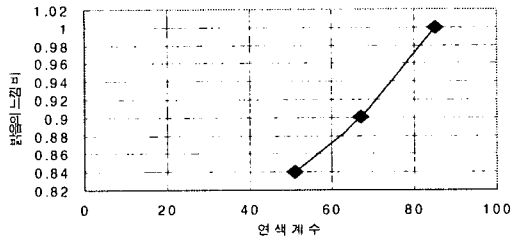


그림 9. 형광램프 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌 비
Fig. 9. Visual clarity ratios according to Ra of fluorescent lamps

3파장 주광색 형광램프를 기준으로 한 색온도에 따른 밝음의 느낌 비를 그림 8, 형광램프의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌 비를 그림 9에 나타내었다.

3.2 분석

광원의 종류에 따른 밝음의 느낌은 실험에 사용한 램프 중 백색 형광램프와 무전극 방전램프 사이에는 동일 밝기로 느끼는 조도의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 다른 램프와 무전극 방전램프 사이에는 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 백색종이에 흑색으로 문자를 인쇄한 흑백인쇄 문자지 대상물의 경우가 색상지를 사용한 경우보다 광원의 종류에 대한 동일 밝기로 느끼는 조도비의 차이가 분명하게 나타나고 있다. 이는 백색과 흑색이 대비되는 경우 광원이 가지고 있는 모든 스펙트럼 영역이 밝음의 느낌에 관계하기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 동일

한 램프의 경우 시각 대상으로 사용한 색상지에 따라 밝음의 느낌이 다르게 나타나는 것은 스펙트럼에 따른 색상지의 반사율과 광원의 스펙트럼과의 관계에 기인한 것으로 사료된다. 실험 결과를 분석하여 보면 색온도 차이가 클수록 밝음의 느낌 차이도 큰 것으로 나타났다.

실험 결과의 통계처리 후, 동일 밝기로 느끼는 조도의 차이가 있는 것으로 나타난 백열전구, 주광색 형광램프, 고압 나트륨램프, 메탈헬라이드램프와 무전극 방전램프 등의 광원에서의 밝음의 느낌의 비는 대략적으로 색온도에 비례하는 것으로 나타났으나, 주광색 형광램프의 경우가 전체적인 경향에서 벗어나고 있다(그림 4 참조). 밝음의 느낌과 평균연색계수의 관계는 평균연색계수가 100인 백열전구를 제외하고는 대체로 평균연색계수가 증가함에 따라 종합적인 시각대상을 경우에 함께 증가하는 경향이 있다(그림 5 참조).

동종 광원 사이에서 밝음의 느낌을 비교하기 위하여 할로인산 백색 형광램프, 할로인산 주광색 형광램프, 3파장 주광색 형광램프에 대하여 동일한 시험을 하였다.

여러 가지 형광램프에 대한 밝음의 느낌 비를 조사하기 위하여 시행한 시험의 결과는 3파장 주광색 형광램프를 기준광원으로 한 경우, 백색 형광램프, 주광색 형광램프 사이의 밝음의 느낌 비는 색온도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다(그림 8 참조). 또한 평균연색계수와 밝음의 느낌과의 관계도 평균

표 4. 광원의 특성과 밝음의 비
Table 4. Characteristics of light sources and visual clarity ratio

광 원	특 성	크기 [W]	색온도 [K]	평균연색계수 (Ra)	동일한 조도에서 느끼는 밝음의 비[%] ¹⁾		동일한 밝은 느낌에 필요한 조도의 비[%] ¹⁾	
					흑백문자	종합	흑백문자	종합
고 압 나 트 륨 램 프		100	2,100	29	63	66	159	152
백 열 전 구		100×4	2,800	100	63	76	159	132
백 색 형 광 램 프		20×4	3,200	51	64 ²⁾	77 ²⁾	156 ²⁾	130 ²⁾
메 탈 헬 라 이 드 램 프		100	3,700	80	71	80	141	125
주 광 색 형 광 램 프		20×4	6,000	67	76	83	132	120
3파장 주광색 형광램프		20×4	7,000	85	87 ²⁾	92 ²⁾	115 ²⁾	109 ²⁾
무 전 극 방 전 램 프		100	4,000	85	100	100	100	100

- 주) 1) 동일한 조도에서 느끼는 밝음의 비와 동일한 밝은 느낌에 필요한 조도의 비는 무전극 방전램프를 100으로 하여 상대적인 값으로 나타낸 수치임.
2) 백색 형광램프와 3파장 주광색 형광램프의 동일한 조도에서 느끼는 밝음의 비와 동일한 밝은 느낌에 필요한 조도의 비는 무전극 방전램프와의 직접적인 관계로부터 구한 값이 아니며, 형광램프 사이의 관계로부터 유추한 것임

각종 광원의 색온도, 연색성과 밝은 느낌에 대한 실험적 연구

연색계수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다(그림 9 참조). 원인은 앞에서 설명한 바와 같이 시각 대상물의 스펙트럼에 따른 반사특성과 광원의 스펙트럼 분포 사이의 관계에 기인한 것으로 사료된다. 이 실험 결과는 유사한 실험을 행하였던 이전의 실험 결과와 그 경향이 일치하고 있다.

이상의 결과로부터 형광램프의 경우는 동일한 조도라도 높은 색온도와 고연색성 광원이 더욱 밝게 느껴진다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광원의 색온도와 연색성의 차이에 의한 밝음의 느낌과 조도와의 관계를 밝히기 위하여 이중 램프간, 또한 동종 램프 간의 비교 실험을 시각 대상으로 흑백 인쇄문자지와 색상지를 사용하여 수행하였다.

현재 널리 사용되고 있는 백열전구, 형광램프, 고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프, 무전극 방전램프를 대상으로 실험을 수행하여, 램프 간 실험 결과의 통계처리 결과, 백열전구와 무전극 방전램프, 주광색 형광램프와 무전극 방전램프, 고압 나트륨램프와 무전극 방전램프, 메탈할라이드램프와 무전극 방전램프는 유의수준 5[%] 이내에서 결과에 분명한 차이가 있음이 밝혀졌다. 실험의 결과에 따르면 이중 광원의 경우 밝음의 느낌 비는 백열전구를 제외한 광원의 경우 대체적으로 평균연색계수에 비례하는 경향이 있으며, 모든 시험 대상 광원의 경우 색온도에 비례하는 것으로 나타났다. 그러므로 앞으로의 연구에서는 이중 광원의 경우는 색온도 차이에 근거하는 연구가 보다 확실한 결과를 도출할 것으로 사료된다.

형광램프 동종 램프 간의 실험 결과는 할로인산 백색 형광램프와 3파장 주광색 형광램프, 할로인산 주광색 형광램프와 3파장 주광색 형광램프의 관계에서 유의수준 5[%] 이내에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 밝음의 느낌 비는 색온도와 평균연색계수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 형광램프의 경우는 동일한 조도라도 높은 색온도와 고연색성 광원하에서 더욱 밝게 느껴진다는 것을 알 수 있다. 광원의 종류에 따른 물리적 특성과 동일한 조도에서 느끼는 밝음의 비와 동일한 밝은 느낌에 필요한 조도의 비를 무전극 방전램프를 기준으로 하여 표 4에 나타내었다.

본 연구에서 여러 가지 광원에 대하여 흑백인쇄 문자와 주요 색상의 경우 밝음의 느낌과 조도와의 관계를 정량적으로 도출한 결과는 각종 용도에 사용될 광원들의 선정기준의 설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

향후에는 여러 가지 광원 및 등기구의 효율과 가격, 수명, 시동특성 등등을 종합적으로 고려한 경제성 평가에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

References

- (1) S. M. Aston & H. E. Bellchamber, "Illumination, Color Rendering and Visual Clarity", *Lighting Res. Tech.*, 1(1969), p.259.
- (2) H. E. Bellchamber, "Illumination, Color Rendering and Visual Clarity", *CIE Compte. Rendu P-71*, 25(1971).
- (3) H. E. Bellchamber & A. C. Cobby, "Illumination, Color Rendering and Visual Clarity", *Lighting Res. Tech.*, 4(1972), p.104.
- (4) P. R. Boyce & J. A. Lynes, "Illumination, Colour Rendering Index and Colour Discrimination Index", *CIE Compte Rendu P-75*, 35(1975), p.290.
- (5) 金谷, 吉瀬, "光源の色温度, 演色性が所要照度に及ぼす影響", 昭和50年 照明學會全國大會, p.48.
- (6) S. Kanaya, K. Hashimoto, et al., "Subjective Balance Between General Colour Rendering Index, Colour Temperature, and Illuminance of Interior Lighting", *Publ. CIE No. 50(1980)*, p.274.
- (7) 成定, 金谷, "光源の演色性と明るさ感", 電気學會光應用, 視覚研究會, LAV-82-18, (昭58), p.40.
- (8) 金谷, 橋本, "ランプの演色性と明るさ感", 昭和58年 照明學會全國大會, p.111.
- (9) 金谷, 橋本, "光源の演色性と明るさ感増加効果についての考察", 昭和59年 照明學會全國大會, p.126.

◇ 저자소개 ◇

이진우 (李鎭雨)

1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1994년 세명백트론(주) 연구실장. 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 교수. 본 학회 편수이사.

지철근 (池哲根)

1927년 7월 17일생. 1951년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1957년 미국 케이스대 공대 대학원 수료. 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 대한전기학회 회장. 현재 서울대 공대 전기공학부 명예교수, 기술사. 본 학회 명예회장. 국제조명위원회 한국위원회 회장.

조경애 (趙敬愛)

1959년 12월 5일생. 1977년 한양여자고등학교 졸업. 1992년 금석전자 경리이사. 1999년~현재 (주)세광에너텍 대표이사.