

광원의 색온도 및 연색성과 밝음의 느낌

지 철 근 <국제조명위원회 한국위원회의 회장>
이 진 우 <호서대학교 전기정보통신공학부 교수>

1 서 론

광원의 연색성의 차이에 의한 밝음의 느낌(visual acuity)의 변화의 현상에 관하여는 많은 실험적 연구가 발표되고 있다. 약 30년 전인 1969년에 Aston과 Bellchamber가 “연색성의 차이에 따른 형광램프에 의한 밝은 느낌의 변화”의 실험적 연구에서 고연색성 형광램프는 저연색성 형광램프에 비하여 약 25~40[%] 낮은 조도에서도 동일한 밝음을 느낀다고 발표하였다. 이 연구가 발단이 되어 이어서 6여년 후인 1975년에 Boyce, Lynes, Kanedani 등이 “광원의 색온도, 연색성이 소요조도에 미치는 영향” 등이 발표되었다.

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

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

이와 같이 이들 각종 연구는 시각 대상물이나 평가 기준이 각각 다르지만, 광원의 연색성과 색온도 차이에 의한 물체색의 보임의 변화효과를 조도레벨로 정량적으로 받아들이고 있으며, 이들 각종 실험에서 얻어진 조도레벨의 상대값은 실험에 사용된 광원의 연

색성과 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.

근래 출현되어 시판되어 널리 사용되고 있는 효율, 색온도, 연색성이 우량한 고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프, 3파장 형광등 그리고 최근에 시판되어 각광을 받고 있는 효율, 색온도, 연색성, 시동특성 특히 월등하게 긴 수명인 무전극 방전등도 포함한 6종류의 광원을 대상으로 이 광원의 색온도, 연색성 차이에 의한 밝은 느낌의 변화를 다수의 남녀 관찰자를 참가시켜서 도출한 실험적인 결과를 소개한다.

2. 실험 방법

2.1 장치

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 천장

에 부착하고 광원의 하부에 스크린을 설치하여 박스 하면의 조도를 변경할 수 있도록 하였으며, 전면 상부는 직사광이 관찰자의 시야에 들어오는 것을 방지하기 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 광원 박스는 그림 1과 같다.



그림 1. 실험 장치 및 관측자의 실험 광경

2.2 실험 방법

동일한 크기의 두 광원 박스의 시야 한 쪽에 기준광원을 다른 쪽에 비교광원을 설치한다. 실험 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 13.4, 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

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 2와 같다.

표 2. 실험에 사용한 광원의 특성

광원의 종류	크기[W]	색온도[K]	평균연색계수 (Ra)	광효율 [lm/W]	수명[시간]	시동시간[초]	재점등 시간[초]
백열전구	100	2,800	100	15	1,000	0.1	0.1
백색 형광램프	20	3,200	51	81	7,000	3	3
주광색 형광램프	20	6,000	67	73	7,000	3	3
3파장 주광색 형광램프	20	7,000	85	90	7,000	3	3
고압 나트륨램프	100	2,100	29	85	12,000	480	300
메탈할라이드램프	100	3,700	80	80	6,000	480	600
무전극 방전램프	100	4,000	86	80	60,000(1)	0.001	0.001

기술해설

실험에서는 각종 사용광원의 조도를 비등하게 하기 위하여, 백열전구는 100(W)×4등, 각종 형광램프는 20(W)×4등을 사용하였다.
관찰자는 무전극 방전램프를 기준광원으로 사용하

여 여러 종류의 램프를 비교한 경우 남녀 15명, 3과장 주광색 형광램프를 기준광원으로 사용하고 형광램프 간에 비교한 경우는 남자 5명을 대상으로 하였다.

3. 실험 결과

3.1 결과

3.1.1 여러 종류의 램프를 비교한 경우

무전극 방전램프를 기준광원으로 사용하여 여러 종류 램프의 비교 실험을 한 결과는 다음과 같다.

표 3. 시각 대상물에 대한 광원의 조도비 (비교광원 조도/기준광원 조도)

광원 \ 시각대상물	IL - ELD	FL W - ELD	FL D - ELD	HPS - ELD	MHL - ELD
흑백인쇄문자지	1.58	/	1.31	1.60	1.41
적 색 지	/	/	/	1.28	/
황 색 지	1.66	/	/	1.55	1.56
청 색 지	/	/	1.15	1.52	/
녹 색 지	1.30	/	1.25	1.74	/
총 합	1.31	/	1.21	1.52	1.25

주 : IL-백열전구, FL W-백색 형광램프, FL D-주광색 형광램프, HPS-고압 나트륨램프, MHL-메탈헬라이드 램프, ELD-무전극 방전램프/ - 통계적 의미 없음

흑백인쇄문자의 경우 무전극 방전램프에 대하여 고압 나트륨램프, 백열전구, 메탈헬라이드램프, 할로인산 주광색 형광램프의 경우 느끼는 밝음의 느낌비를 그림 2에, 흑백인쇄문자 및 적색, 황색, 청색, 녹색의 경우 종합적인 밝음의 느낌비를 그림 3에 나타내었다.

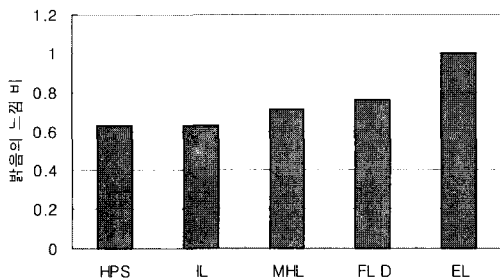


그림 2. 흑백인쇄문자의 경우 밝음의 느낌 비

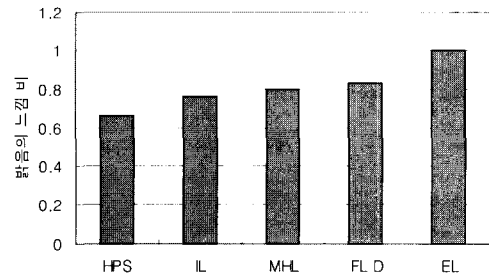


그림 3. 종합적인 경우 밝음의 느낌 비

무전극 방전램프를 기준으로 하여 종합적인 실험 결과를 광원의 색온도에 따라 나타낸 밝음의 느낌을 그림 4에, 광원의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌을 그림 5에 나타내었다.

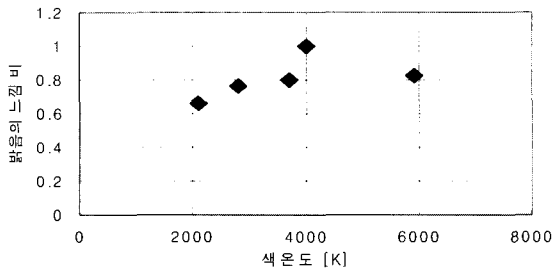


그림 4. 광원의 색온도에 따른 밝음의 느낌 비

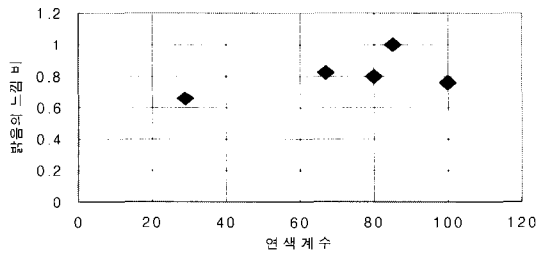


그림 5. 광원의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌 비

3.1.2 형광램프를 비교한 경우

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

표 4. 시각 대상물에 대한 광원의 조도비 (비교광원 조도/기준광원 조도)

시각대상물 \ 광원	FL W - FL EX-D	FL D - FL EX-D
흑백인쇄문자지	1.37	1.14
적색지	/	/
황색지	1.18	1.10
청색지	/	/
녹색지	1.26	/
종합	1.19	1.11

주 : FL W-백색 형광램프, FL D-주광색 형광램프, FL EX-D-3파장 주광색 형광램프/-통계적 의미 없음

흑백인쇄문자의 경우 3파장 주광색 형광램프에 대하여 할로인산 백색 형광램프와 할로인산 주광색 형광램프의 경우 밝음의 느낌비를 그림 6에, 흑백인쇄 문자 및 적색, 황색, 청색, 녹색의 경우 종합적인 밝음의 느낌비를 그림 7에 나타내었다.

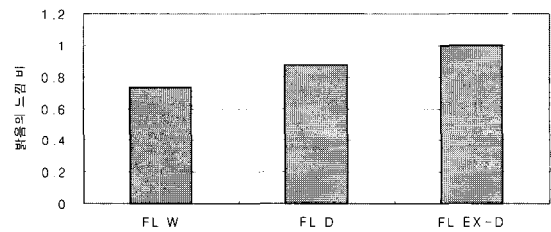


그림 6. 흑백인쇄문자의 경우 밝음의 느낌 비

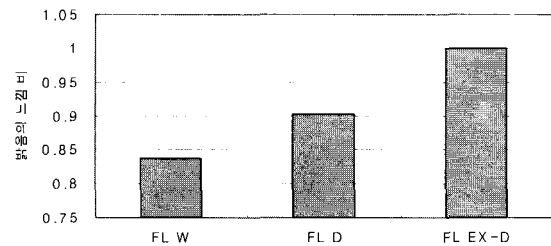


그림 7. 종합적인 경우 밝음의 느낌 비

또한 광원의 색온도에 따른 밝음의 느낌비를 그림 8에, 광원의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌비를 그림 9에 나타내었다.

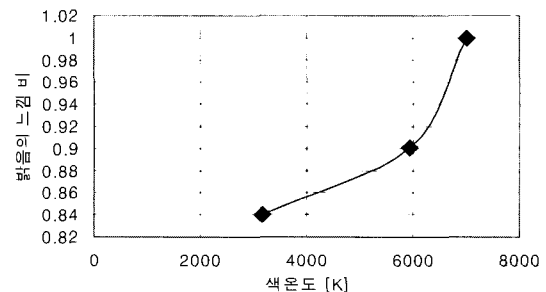


그림 8. 형광램프의 색온도에 따른 밝음의 느낌 비

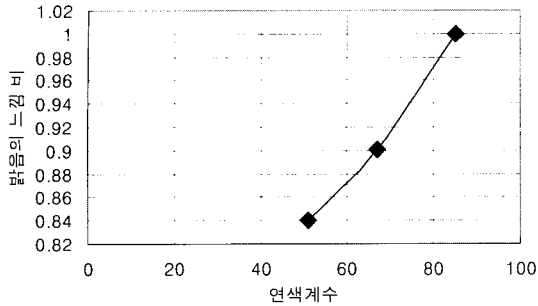


그림 9. 형광램프의 평균연색계수에 따른 밝음의 느낌 비

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. 백색 형광램프와 무전극 방전램프가 차이가 없는 것으로 나타난 이유는 두 램프의 색온도가 비슷하여 감각적으로 느끼는 색감의 차이가 없기 때문인 것으로 사료된다. 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 동일한 램프의 경우 시각 대상물로 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 무전

극 방전램프와의 동일 밝음을 느끼는 조도비를 구하여 보면, 시작업에서 가장 빈번하게 사용되는 흑백인쇄 문자지를 시각대상물로 한 경우, 무전극 방전램프를 기준광원으로 하면, 고압 나트륨램프의 경우 1.60배의 조도가 필요하였으며, 백열전구의 경우는 1.58, 메탈헬라이드램프는 1.41배, 주광색 형광램프의 경우는 1.31배의 조도가 필요한 것으로 나타났다. 실험에 사용한 흑백인쇄 문자지와 모든 색상지의 시각대상물을 종합하면 무전극 방전램프를 기준광원으로 하면, 고압 나트륨램프의 경우 1.5배의 조도가 필요하였으며, 백열전구의 경우는 1.3배, 메탈헬라이드램프는 1.25배, 주광색 형광램프의 경우는 1.2배의 조도가 필요한 것으로 나타났다. 특히 인쇄문자지의 경우가 색상지보다 전반적으로 동일 밝음의 느낌에 필요한 조도가 더 높은 것으로 나타났다.

현재 널리 사용되고 있는 광원에서의 밝음의 느낌의 비는 대략적으로 색온도에 비례하는 것으로 나타났으나, 주광색 형광램프의 경우가 전체적인 경향에서 벗어나고 있다. 밝음의 느낌과 평균연색계수의 관계는 평균연색계수가 100인 백열전구를 제외하고는 대체로 연색성이 낮을수록 종합적인 시각대상물을 경우에 동일 밝음으로 느끼는 조도가 증가하는 경향이 있다. 따라서 이중 광원의 경우 밝음의 느낌 비는 광원의 평균연색계수보다는 광원의 색온도와 관계가 깊은 것으로 사료된다.

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 비를 조사하기 위하여 시행한 시험의 결과는 3파장 주광색 형광램프를 기준광원으로 한 경우, 백색 형광램프, 주광색 형광램프와 동일한 밝기로 느끼는 조도비의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이 경우 적색과 청색 색상지의

경우는 차이가 나타나지 않았다. 그러나 백색 종이 위에 흑색으로 인쇄된 문자지의 시각 대상물의 경우는 앞의 실험 결과와 동일하게 색상지의 경우보다 그 차이가 큰 것으로 나타났다. 원인은 앞에서 설명한 바와 같이 시각 대상물의 스펙트럼에 따른 반사특성과 광원의 스펙트럼 분포 사이의 관계에 기인한 것으로 사료된다.

동일한 밝음을 느끼는데 필요한 조도의 비는 가장 빈번히 사용되는 흑백인쇄 문자지의 경우 백색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.37배, 할로인산 주광색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.14배인 것으로 나타났으며, 흑백인쇄 문자지와 모든 색상지를 종합한 경우는 백색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.2배, 할로인산 주광색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.1배인 것으로 나타났다.

밝음의 느낌 비는 색온도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 평균연색계수와 밝음의 느낌과의 관계도 평균연색계수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 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 이종 램프간, 또한 동종 램프 간의 비교 실험을 시각 대상으로 흑백 인쇄문자지와 색상지를 사용하여 수행하였다.

현재 널리 사용되고 있는 백열전구, 형광램프, 고압 나트륨램프, 메탈헤라이드램프, 무전극 방전램프

를 대상으로 실험을 수행하여, 램프 간 실험 결과의 통계처리 결과, 백열전구와 무전극 방전램프, 주광색 형광램프와 무전극 방전램프, 고압 나트륨램프와 무전극 방전램프, 메탈헤라이드램프와 무전극 방전램프는 유의수준 5[%] 이내에서 결과에 분명한 차이가 있음이 밝혀졌다. 실험의 결과에 따르면 동일 밝음으로 느끼는 소요조도는 본 실험에 사용한 램프들 중 고압 나트륨램프가 가장 높았으며, 무전극 방전램프가 가장 낮았다. 그러므로 실험 사용광원 중에서는 무전극 방전램프가 소요조도가 가장 낮음을 알 수 있었다. 무전극 방전램프를 기준으로 하였을 때, 흑백인쇄 문자지를 시각대상물로 한 경우, 고압 나트륨램프의 경우는 무전극 방전램프의 1.60배의 조도가 필요하였으며, 백열전구의 경우는 1.58, 메탈헤라이드램프는 1.41배, 주광색 형광램프의 경우는 1.31배의 조도가 필요한 것으로 나타났으며, 시각대상물을 종합한 경우는 고압 나트륨램프는 무전극 방전램프의 1.5배, 백열전구는 1.3배, 메탈헤라이드램프는 1.25배, 주광색 형광램프는 1.2배의 조도가 필요한 것으로 나타났다. 특히 흑백 인쇄문자지의 경우가 색상지보다 전반적으로 동일 밝음의 느낌에 필요한 조도차이가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 이종 광원의 경우 밝음의 느낌 비는 광원의 평균연색계수와는 유관하다고 보기 어렵고, 광원의 색온도와 유관한 것으로 나타났다. 그러므로 앞으로의 연구에서는 이종 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. 동일한 밝음을 느끼는데 필요한 조도는 흑백인쇄 문자지의 경우 백색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.37배, 할로인산 주광색 형광램프가 3

기술해설

파장 주광색 형광램프에 비하여 1.14배인 것으로 나타났으며, 시각대상물을 종합하여 보면 백색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.2배, 할로인산 주광색 형광램프가 3파장 주광색 형광램프에 비하여 1.1배인 것으로 조사되었다. 밝음의 느낌 비는 색온도와 평균연색계수가 증가함에 따라 증가하는 것으

로 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 5에 나타내었다.

표 5. 광원의 특성과 밝음의 비

광 원	특 성	크기(W)	색온도(K)	평균연색계수(Ra)	동일한 조도에서 느끼는 밝음의 비(%1)		동일한 밝은 느낌에 필요한 조도의 비(%1)	
					흑백문자	종 합	흑백문자	종 합
고압 나트륨램프		100	2,100	29	63	66	160	152
백열전구		100×4	2,800	100	63	76	158	131
백색 형광램프		20×4	3,200	51	642)	772)	1572)	1302)
메탈할라이드램프		100	3,700	80	71	80	141	125
주광색 형광램프		20×4	6,000	67	76	83	131	121
3파장 주광색 형광램프		20×4	7,000	85	872)	922)	1152)	1092)
무전극 방전램프		100	4,000	80	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

본 문헌에서 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.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Aston & H. E. Bellchamber, "Illumination, Color Rendering and Visual Calarity", Lighting Res. Tech., 1(1969), p.259.
- [2] H. E. Bellchamber, "Illumination, Color Rendering and Visual Calarity", CIE Compte. Rendu P-71, 25(1971).
- [3] H. E. Bellchamber & A. C. Codby, "Illumination, Color Rendering and Visual Calarity", 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", 電氣學會光應用, 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.

◇ 저 자 소 개 ◇



지 철 근(池哲根)

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



이 진 우(李鎭雨)

1961년 2월 4일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 세명백트론(주) 연구실장. 현재 호서대 전기정보통신공학부 부교수, 당학회 편수위원장.