



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# LED조명의 스펙트럼과 S/P Ratio 관계에 관한 연구



2017 년 2 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학전공

김 종 오

공학석사 학위논문

# LED조명의 스펙트럼과 S/P Ratio 관계에 관한 연구

지도교수 류 우 찬

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017 년 2 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학전공

김 종 오

# 김종오의 공학석사 학위논문을 인준함

2017 년 2 월 24 일



主 審

이 용 욱 

委 員

류 우 찬 

委 員

김 용 현 

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구의 목표 및 구성 .....	3
제 2 장 관련 이론 .....	5
2.1 눈의 구조 .....	5
2.1.1 명소시(광순응적 시각, Photopic Vision) .....	7
2.1.2 암소시(암순응적 시각, Scotopic Vision) .....	8
2.1.3 박명시(중간적 시각, Mesopic Vision) .....	8
2.2 LED조명의 광학 특성 .....	9
2.2.1 LED조명의 구조 .....	9
2.2.2 색좌표 .....	10
2.2.3 색온도(CT)와 상관색온도(CCT) .....	14
2.2.4 연색성(Color Rendering) .....	15
2.2.5 S/P Ratio .....	16
제 3 장 실험방법 .....	21
3.1 시뮬레이션 프로그램 구성 .....	21
3.2 시뮬레이션 방법 .....	25
제 4 장 실험 결과 및 고찰 .....	26
4.1 RGB PKG 스펙트럼 이동과 광학 특성 변화 .....	26

4.1.1 RGB 스펙트럼 반치전폭 20 nm에서의 최고파장 이동에 따른 S/P Ratio 변화 .....	26
4.1.2 RGB 스펙트럼 반치전폭 30 nm에서의 최고파장 이동에 따른 S/P Ratio 변화 .....	31
4.1.3 RGB 개별 반치전폭 증가에 따른 S/P Ratio 변화 .....	36
4.1.4 CCT별 S/P Ratio 변화에 따른 CRI 변화 .....	37
4.2 RGBY PKG 스펙트럼 이동에 따른 광학 특성 변화 .....	40
4.2.1 RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P Ratio 변화 I .....	40
4.2.2 RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P Ratio 변화 II .....	46
4.2.3 RGBY 개별 반치전폭 증가에 따른 S/P Ratio 변화 .....	51
4.2.4 CCT별 S/P Ratio 변화에 따른 CRI 변화 .....	55
<b>제 5 장 결 론 .....</b>	<b>61</b>
참고문헌 .....	62
Abstract .....	

## 표 차 례

표 1.1 조명별 일반적인 S/P ratio 값 .....	3
표 2.1 S/P ratio와 명소시 휘도에 따른 <i>ELF</i> .....	16
표 3.1 측정결과 .....	22



## 그림 차례

그림 1.1 배경 휘도에 따른 눈의 시각 특성 .....	2
그림 2.1 눈의 구조와 빛을 느끼는 세포 .....	5
그림 2.2 간상체 세포와 추상체 세포 .....	6
그림 2.3 원추세포(Cone cell)와 간상세포(Rod cell) 및 반응 파장 .....	7
그림 2.4 LED조명의 구조 .....	10
그림 2.5 RGB 활용 색일치함수(a)와 CIE 표준관찰자 색일치함수(b) .....	12
그림 2.6 CIE 삼자극치 $X, Y, Z$ .....	13
그림 2.7 CIE 1931 $xy$ 색좌표(a)와 CIE 1976 $u'v'$ 색좌표(b) .....	14
그림 2.8 색온도와 상관색온도 .....	15
그림 2.9 S/P ratio에 따른 터널 내 밝기 차이 .....	20
그림 3.1 1차 S/P ratio simulator .....	21
그림 3.2 50 cm 적분구 .....	22
그림 3.3 MATLAB을 이용한 S/P ratio simulator .....	23
그림 3.4 LED의 SPD와 모델링 SPD 비교 .....	24
그림 3.5 프로그램 파장이동 개념도 .....	24
그림 4.1 반치전폭 20 nm, Blue 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	27
그림 4.2 반치전폭 20 nm, Green 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	27
그림 4.3 반치전폭 20 nm, Red 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	28
그림 4.4 반치전폭 20 nm, CCT 3000 K RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	29
그림 4.5 반치전폭 20 nm, CCT 4000 K RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	29
그림 4.6 반치전폭 20 nm, CCT 5000 K RGB 파장 이동에 따른	

S/P ratio 변화 .....	30
그림 4.7 반치전폭 20 nm, CCT 6000 K RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	30
그림 4.8 반치전폭 30 nm, Blue 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	32
그림 4.9 반치전폭 30 nm, Green 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	32
그림 4.10 반치전폭 30 nm, Red 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	33
그림 4.11 반치전폭 30 nm, CCT 3000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	34
그림 4.12 반치전폭 30 nm, CCT 4000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	34
그림 4.13 반치전폭 30 nm, CCT 5000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	35
그림 4.14 반치전폭 30 nm, CCT 6000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	35
그림 4.15 Green, Blue 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 I .....	36
그림 4.16 Green, Blue 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 II .....	37
그림 4.17 CCT 3000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화 ...	38
그림 4.18 CCT 4000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화 ·	38
그림 4.19 CCT 5000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화 ...	39
그림 4.20 CCT 6000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화 ...	39
그림 4.21 RGBY LED, Red 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio .....	41
그림 4.22 RGBY LED, Green 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio .....	41
그림 4.23 RGBY LED, Yellow 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio .....	42
그림 4.24 RGBY LED, Blue 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio .....	42
그림 4.25 CCT 3000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 .....	43

그림 4.26 CCT 4000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	44
그림 4.27 CCT 5000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	44
그림 4.28 CCT 6000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	45
그림 4.29 Red 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화	47
그림 4.30 Green 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화	47
그림 4.31 Yellow 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화	48
그림 4.32 Blue 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화	48
그림 4.33 CCT 3000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	49
그림 4.34 CCT 4000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	50
그림 4.35 CCT 5000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	50
그림 4.36 CCT 6000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화	51
그림 4.37 Red, Green 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 I	53
그림 4.38 Red, Green 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 II	53
그림 4.39 Blue, Yellow 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화	54
그림 4.40 Green, Blue, Yellow 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화	54
그림 4.41 CCT 3000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 20/10/50/20)	56
그림 4.42 CCT 4000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 20/10/50/20)	56
그림 4.43 CCT 5000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 20/10/50/20)	57
그림 4.44 CCT 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 20/10/50/20)	57
그림 4.45 CCT 3000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 30/30/90/40)	59

그림 4.46 CCT 4000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 30/30/90/40) .....	59
그림 4.47 CCT 5000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 30/30/90/40) .....	60
그림 4.48 CCT 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화 (반치전폭 30/30/90/40) .....	60



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

빛은 우리의 시각 기능을 향상시켜주는 도구에 불과하였다. 동물체계의 빛을 이용하던 시절에서, 화학적 반응을 이용한 조명으로, 나아가 전기를 이용한 조명으로 변화하면서 많은 발전을 이루었으며, 이제 단순히 빛을 밝히는 도구에서 인간의 감성을 조절하고, 일의 능률을 향상시키며, 조명 자체가 한 예술작품이 되는 시대로 발전하였다[1].

시대에 따라, 빛의 색채에 따른 생리적·심리적인 효과에 관한 연구[2], 관찰자의 주변 밝기에 따라 빛의 색채가 뇌와 눈이 인지하는 속도에 관한 연구[3] 등이 진행되었다. 더 나아가서는 조명의 선택과 설치의 오류로 인한 문제점과 방지 대책[4], 최적의 조명을 선택하기 위한 연구[5-6] 등이 제안되었다. 이러한 연구들을 통하여, 주변 빛의 밝기(휘도)에 따라 인식하는 색상과 영역이 달라진다.

사람의 눈은 빛의 밝기 정도에 따라 사물을 인지하는 기능이 변한다. 즉, 배경 휘도 범위에 따라서 시각은 명소시(Photopic vision), 암소시(Scotopic vision), 박명시(Mesopic vision)로 구분하여 반응한다[7]. 밝은 곳에서는 명소시에 순응하고 어두운 곳에서는 암소시로 순응하며 그 가운데는 박명시로 순응하게 된다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 명소시로 순응하는 휘도 범위는  $(10 \sim 100,000,000) \text{ cd/m}^2$ 이고, 암소시로 순응하는 휘도 범위는  $(0.000001 \sim 0.001) \text{ cd/m}^2$ 이며, 박명시로 순응하는 휘도 범위는  $(0.001 \sim 10) \text{ cd/m}^2$ 이다.

일반적으로 어두운 실외에서 조명에 의해 발생하는 휘도의 범위는 박명시로 순응하는 휘도의 범위이다[8-9]. 따라서 가로등, 보안등, 투광등 등의 실

외조명 아래에서는 순응하는 사람의 눈에 맞추어서 연구, 개발되어야 한다. 즉, 어두운 공간을 비추는 실외조명 아래에서는 박명시에 순응하는 조명으로 최적화해야 하고, 따라서 새로이 연구되는 LED조명 또한 박명시에 최적화해야 한다.

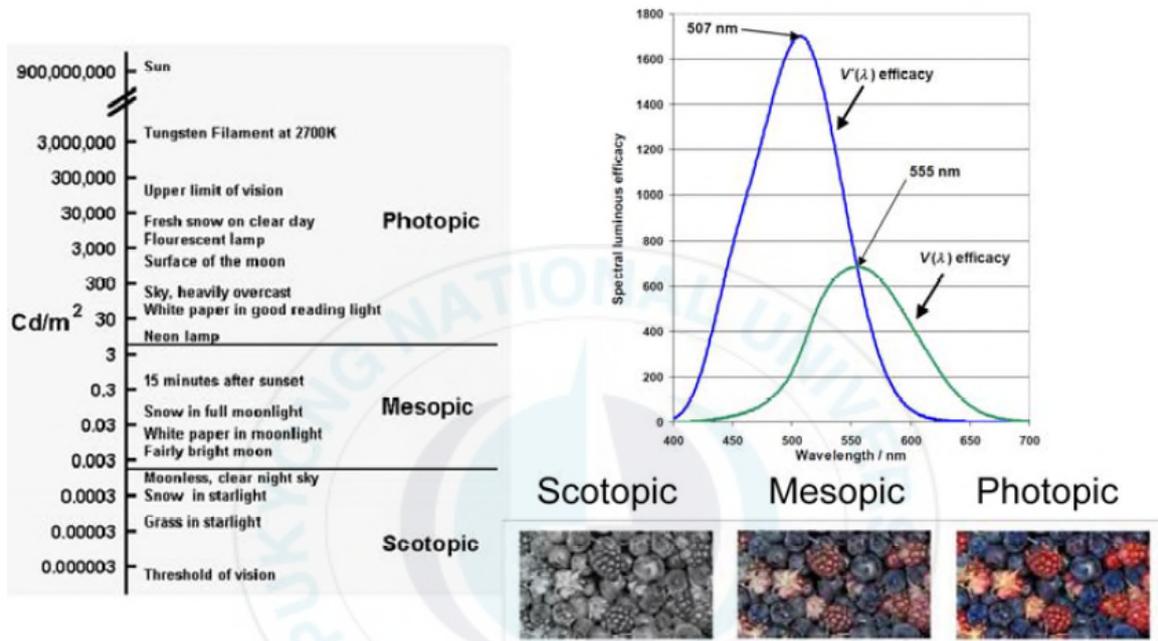


그림 1.1 배경 휘도에 따른 눈의 시각 특성[10]

이러한 박명시에서의 조명을 평가하는 데 있어서 주요한 파라미터가 S/P ratio이다[8-9]. 따라서 본 논문은 실외에서 사용되는 실외조명 최적화를 위하여 RGB LED와 RGBY LED를 사용하는 실외용 LED조명이 갖는 스펙트럼을 변화시켰을 때, 박명시에서 중요한 평가 파라미터인 S/P ratio의 변화를 연구하고자 한다.

## 1.2 연구의 목표 및 구성

저압 나트륨등, 고압 나트륨등, 할로겐램프, 형광등 등의 기존 조명의 S/P ratio는 0.25~2.3의 범위를 갖는다. 특히 가로등으로 많이 사용되는 저압 및 고압 나트륨등은 각각 0.25, 0.66으로 매우 낮다. 높은 색온도를 갖는 메탈할라이드(Metal halide)는 1.26~2.1로 높은 편이다. LED를 사용한 LED가로등은 형광체를 사용한 경우에 1.21~2.04 정도이나, RGB 3색 LED를 사용할 경우에는 1.39~2.18로 상대적으로 높은 S/P ratio 값을 구현할 수 있다. 조명별 S/P ratio에 대한 대표적인 값을 나타낸 것이 표 1이다[8-9].

그러나 LED조명의 경우, 아래 표에서 보는 바와 같이, 사용하는 LED Package의 파장 특성에 따라 S/P ratio가 달라진다. 따라서 파장 선정이 비교적 자유로운 LED Package를 이용하여 LED조명을 제작할 때 파장을 비롯한 스펙트럼을 선정하는 것이 S/P ratio를 개선하는 데 매우 중요하다.

표 1.1 조명별 일반적인 S/P ratio 값[8-9]

Lamp Type	Typical S/P ratio
Low-pressure sodium	0.25
High-pressure sodium	0.66
Halogen headlamp	1.43
Linear fluorescent	1.3 to 2.3
Metal halide	1.26 to 2.1
Warm white LED	1.21
Cool white LED	2.04
RGB LED(3500 K)	1.39
RGB LED(6000 K)	2.18

특히 LED Package 중에서 파장을 조절하여 S/P ratio를 높이는 방법으로 RGB 또는 RGBY LED를 사용하는데, 이 RGB 또는 RGBY 스펙트럼을 최적 화함으로써 최상의 S/P ratio를 확보하는 연구결과는 제시되지 않았다.

본 연구는 고연색성의 LED조명에 대한 연구 및 제작에 사용되는 RGB PKG와 RGBY Package를 이용하여 기존 연구에서 제시된 LED조명의 S/P ratio 값을 개선하고자 할 때, 최적의 S/P ratio를 확보할 수 있는 LED의 스펙트럼 특성을 제시하는 데 목표가 있다.

그와 더불어 LED조명에서 S/P ratio 변화에 따라 시인성과 관련된 파라미터인 CRI 변화를 함께 살펴봄으로써, 최적의 실외용 LED조명에 대한 설계와 설치가 이루어질 수 있도록 하는 데 의미가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제1장은, 살펴본 바와 같이, 연구 배경과 연구 목표 및 논문의 구성을 제시하고, 제2장은 눈의 구조와 명소시, 암소시 및 박명시에 대해 알아보고 색좌표, 색온도, 연색성, S/P ratio 등 광학 특성과 관련된 이론을 살펴봄, 제3장에서는 시뮬레이션을 실시하기 위한 구성과 시뮬레이션 방법을 확인하고, 제4장에서는 시뮬레이션을 통해 RGB LED조명과 RGBA LED조명에서 스펙트럼의 최고파장 이동과 반치전폭 증가를 통해 S/P ratio 및 CRI의 변화 결과를 제시한 후, 제5장에서 결론을 도출한다.

## 제 2 장 관련 이론

### 2.1 눈의 구조

눈은 시각 정보를 수집하고 이를 전기적, 화학적 정보로 변환하여 시신경을 통하여 뇌로 전달하는 입력기관이다. 눈의 형태는 구형으로 각막의 중앙을 전극이라 하고, 공막 후면의 중앙을 후극이라 하며, 이 양극을 잇는 가상의 선을 시각축(안축)이라고 한다. 시각축의 길이는 평균 24 mm, 폭은 23.6 mm, 높이는 23.3 mm, 안구의 부피는 6.5 ml이다[11].

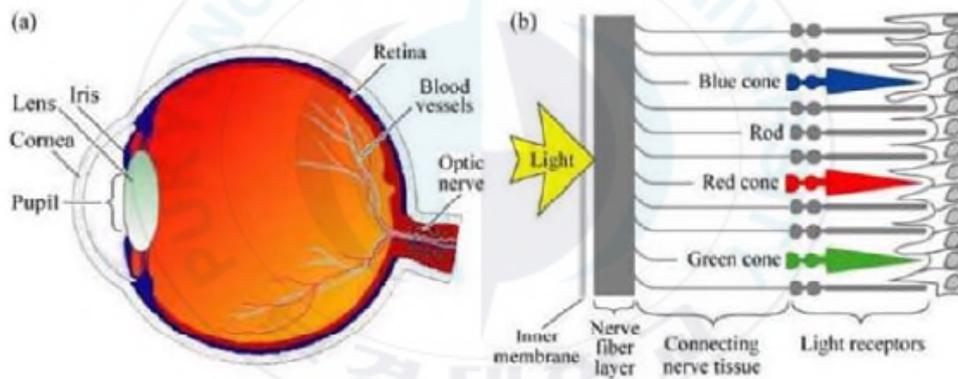


그림 2.1 눈의 구조와 빛을 느끼는 세포[11]

안구의 가장 바깥층에는 눈의 흰자위에 해당하는 공막과 검은자위에 해당하는 각막, 이 두 기관을 덮고 있는 결막으로 이루어져 있다. 눈의 중간 층 부분에는 빛의 양을 조절하는 홍채와 카메라 렌즈에 해당하는 수정체의 두께를 변화시켜 망막에 상이 정확히 맺히도록 하는 모양체, 혈관이 지나고 있는 층으로 되어 있어 영양분을 공급해주고 카메라의 어둡상자 역할을 하는 맥락막 등이 있다[11].

추상체 수용기(Cone receptor 또는 Cone cell)는 망막의 중심부에 밀집

되어 있는 시세포의 일종으로 밝은 곳에서 움직이고 색깔 및 시력에 관계되는 세포로 망막 중심부에 약 6~7백만 개의 세포가 밀집되어 있다. 추상체 세포의 형태는 그림 2.2 (a)와 같다.

간상체 수용기(Rod receptor 또는 Rod cell)는 명암을 식별하는 시세포 중 망막 시세포의 하나로 어두운 곳에서 주로 활동한다. 추상체가 망막의 중심부에 밀집되어 있는 것과 달리 망막 주변부에 약 1억2천만~1억3천만 개가 고루 분포되어 있다. 간상체 세포의 형태는 그림 2.2 (b)와 같다.



(a) 추상체 세포

(b) 간상체 세포

그림 2.2 간상체 세포와 추상체 세포[11]

눈 속의 생물학적 영상 체계인 간상체, 추상체 세포는 눈의 감광도를 조절하는데, 빛에 반응하는 색소를 이용한다. 추상체는 특정한 빛의 파장에만 반응하는 색소들을 가지고 있어서, 이를 이용하여 색채 지각이 가능하지만 간상체는 시홍(Visual purple) 색소만을 이용하여 인지한다. 간상체, 추상체 세포의 모양과 색의 파장에 반응하는 색소를 나타낸 것이 그림 2.3이다[11].

빛이 간상체나 추상체에 닿으면 감광성 색소를 표백시키는 화학반응이 일어나며, 이 세포들 속에 흡수되는 빛을 제한한다. 이러한 과정의 예로, LED

조명을 응시하다가 시선을 돌렸을 때, 생기는 어둠 잔상을 들 수 있는데 이 때 반응한 수용기는 다시 감광성이 생기기 전까지는 다음 빛 자극에 반응을 하지 않는다.

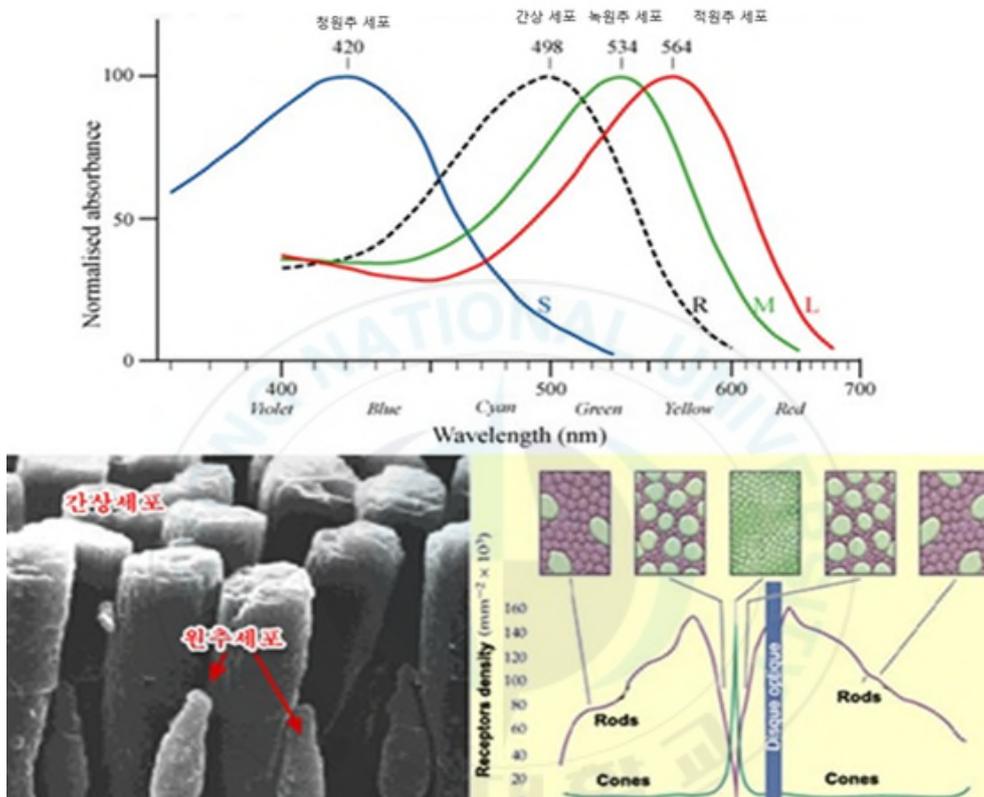


그림 2.3 원추세포(Cone cell)와 간상세포(Rod cell) 및 반응 파장[11]

### 2.1.1 명소시(광순응적 시각, Photopic Vision)

주변 휘도가 약  $10 \text{ cd/m}^2$  이상의 상태, 즉 명순응 아래서의 시각으로 낮의 밝은 장소에서의 눈의 보통상태를 일컫는다. 색, 명암, 밝기 등 세부적인 부분에 대한 식별이 우수하고 색상의 판별이 이루어지는 상태이다.

낮의 밝은 장소에서 눈은 보통 이 상태에 있으므로 백주시라고도 한다. 이러한 조건하에서는 망막의 빛 수용세포 중의 원추세포가 주로 활동하므로

추체시라고도 한다. 이 상태에서 가장 밝게 느껴지는 빛의 스펙트럼 최고파장은 550 nm이다. 암소시에 비하면 백색광에 대한 감수성은 떨어지나 세부적인 부분에 대한 식별은 명소시가 가장 우수하다. 명소시로 순응하는 휘도 범위는 (10~100,000,000) cd/m<sup>2</sup>이다.

### **2.1.2 암소시(암순응적 시각, Scotopic vision)**

주변 휘도가 약 0.000001 cd/m<sup>2</sup> 이하의 상태에서 추상체가 동작하지 못하고, 간상체만 동작하는 상태로써 물체의 명암만 흐릿하게 식별할 수 있는 상태를 말한다. 이 상태에서 가장 밝게 느껴지는 빛의 스펙트럼 최고파장은 507 nm이다. 암소시로 순응하는 휘도 범위는 (0.000001~0.001) cd/m<sup>2</sup>이다.

### **2.1.3 박명시(중간적 시각, Mesopic vision)**

주변 휘도가 명소시와 암소시의 중간 정도인 빛의 밝기에서는 추상체와 간상체가 동시에 기능을 하는 눈의 상태를 말한다. 박명시의 색각은 명소시와 비교하면 시력이 저하되고 색이나 사물의 형태가 명확하지는 않으나 어느 정도 보이는 상태를 말한다. 박명시로 순응하는 휘도 범위는 (0.001~10) cd/m<sup>2</sup>이다.

## 2.2 LED조명의 광학 특성

LED(Lighting Emitting Diode, 발광다이오드)란 GaN, InP, GaAs 등의 화합물 구조에 전류를 흘리면 빛을 발산하는 반도체소자이다. 발광원리는 p-n 접합구조를 이용하여 전자 또는 전공을 주입하고 이들의 재결합을 통하여 빛을 발산한다. 1923년 실리콘 카바이드(SiC) 재료에서 직류전류를 흘렸을 때 발광했던 최초의 물질이 LED의 시초가 되지만, 실리콘 카바이드(SiC)는 제조방법이 쉽지 않아 진전되지 않았다. 그 29년 후인 1952년 실리콘(Si)과 게르마늄(Ge)의 반도체 p-n접합에서 발광이 처음으로 보고가 되어 갈륨 포스파이드(GaP)와 같은 3족, 5족의 화합물 반도체가 LED재료로 처음 제안되었다. 1955년 갈륨 포스파이드 단결정을 성장시켜 점접촉의 전극에 의하여 오렌지색의 발광을 관측하였고, 1962년 GE에서 현재와 같은 반도체형 LED를 개발하였다. 1968년 갈륨-비소-인(GaAsP)의 3족계의 화합물로 된 적색 LED가 미국에서 상용화되었으며, 실내에서 사용되는 표시기, 신호용으로만 사용되었다.

1993년 일본의 니치아화학에서 인듐 갈륨 나이트라이드(InGaN) 고휘도 청색 LED가 개발되고, 이를 바탕으로 빛의 삼원색인 적색, 청색, 녹색 LED가 처음 등장하게 되었다.

1996년 청색 LED 위에 형광물질을 도포하여 구현한 백색 LED가 개발되고, 지금까지 고휘도, 고연색성, 저전력의 LED PKG를 만들기 위한 많은 기술개발이 이루어지고 있다[12].

### 2.2.1 LED조명의 구조

LED조명이란, 광원으로 LED를 이용한 신개념 조명으로써, 광원인 LED, 광량을 증가시키기 위해서 수량을 증가시키기 위해 여러 개의 LED와 PCB

를 결합한 LED모듈, LED에서 발생하는 열을 외부로 발산하는 방열부, 빛의 방향을 제어하기 위한 렌즈, 확산판 등의 광학기구, LED모듈을 구동하고 컨트롤하기 위한 제어부 등으로 구성된다. 대표적인 LED조명의 구조(예)는 그림 2.4와 같다.

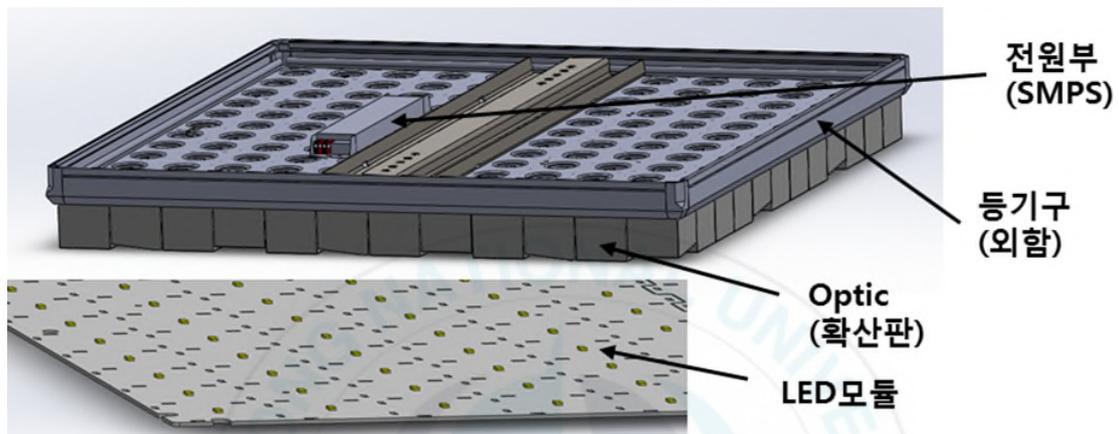


그림 2.4 LED조명의 구조(예)

LED조명은 소비전력이 백열등, 형광등 등으로 대표되는 기존조명에 비해 낮고, 광효율(단위 lm/W)이 더 높아 에너지 절감효과가 커서 각광받고 있다. 또한 부속품에 따라 수명이 달라지지만 수명이 5만~10만 시간으로 길고, 수은을 쓰지 않아 친환경 제품으로 인정받고 있다.

백색 LED조명은 제조 방법에 따라 여러 가지가 있으며, RGB 색상을 이용하기 때문에 다양한 색상 구현과 고휘도, 고연색성 구현이 가능하며, 개발자 및 사용자의 디자인을 고려한 다채로운 조합이 가능하다.

### 2.2.2 색좌표

CIE 1931 XYZ 색좌표는 인간의 색채 인지에 대한 연구를 바탕으로 수학적으로 정의된 최초의 색좌표 가운데 하나이다. 1920년대 W. David Wright

와 Jone Guild의 연구의 기반으로 CIE RGB 색좌표가 만들어졌고, 그에 기반하여 CIE XYZ 색좌표가 만들어졌다[13-14, 18].

인간의 눈에는 단파장(Short wavelength), 중파장(Middle wavelength), 장파장(Long wavelength)의 세 가지 빛을 받아들이는 원추세포가 존재한다. 이 원추세포로 인하여 인간의 색 감각을 표현할 수 있다. 삼자극치는 주로 CIE 1931 색공간에서  $X, Y, Z$  값으로 표현된다. CIE XYZ 색공간에서, 삼자극치인  $X, Y, Z$ 는 각각 빨강, 초록, 파랑과 비슷한 색깔이며, 두 색을 조합하면 다른 색과 비슷하게 보일 수 있다. 이러한 현상을 조건등색(Metamerism)이라 하며, CIE XYZ 색공간에서 두 개의 색깔이 가진 삼자극치의 합은 두 개의 색깔이 갖는 파장과 관계없이 똑같이 보이는 다른 색의 삼자극치와 동일하다.

눈의 원추세포는 균일하게 분포되어 있지 않기 때문에 삼자극치는 관찰자의 시야에 따라 조금씩 달라진다. 이 차이를 없애기 위하여 CIE는 표준색 관찰자를 정의하였다. 이는 평균적인 시각을 가진 사람의 시야각  $2^\circ$  이내에 몰려 있는 원추세포의 반응을 가리킨다. 따라서 CIE 1931 표준관찰자는 CIE 1931  $2^\circ$  표준관찰자라고도 불린다. 이것은 삼자극치  $X, Y, Z$ 에 대한 각각 원추세포의 반응함수를 정의한 함수이다[15-17].

파장  $\lambda$ 에 따라  $I(\lambda)$ 의 파장분포를 갖는 빛의 삼자극치는 다음 수식과 같이 결정된다[18].

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (\text{식1})$$

$$Y = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (\text{식2})$$

$$Z = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (\text{식3})$$

여기서  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ 는 CIE 1931 2° 표준관찰자에 대한 적색, 녹색, 청색의 삼원색에 대한 색일치함수 스펙트럼을 각각 나타낸 것으로 그림 2.5와 같다[13, 18].

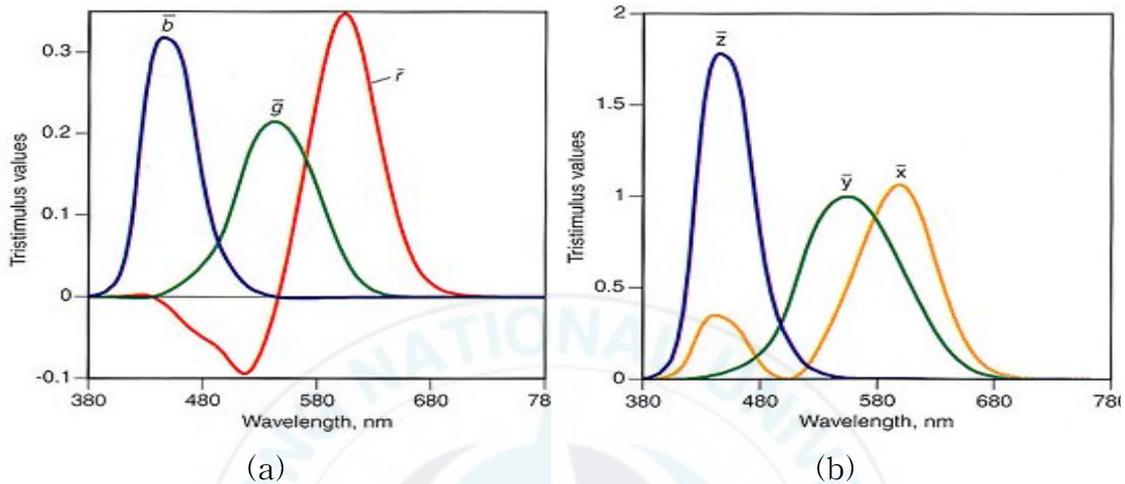


그림 2.5 RGB 활용 색일치함수(a)와 CIE 표준관찰자 색일치함수(b)

특정 분광복사율 곡선을 지닌 광원 하에서 특정 분광반사율을 지닌 물체가 반사하는 빛의 스펙트럼은 두 곡선의 곱으로 표현되며, CIE 표준관찰자의 반응 정도는 파장 스펙트럼에 각각 곱하여 전 파장의 값을 합한 값이 된다. 그 과정을 그림으로 설명한 것이 그림 2.6이다. 이 과정을 통해 구한 값을  $X, Y, Z$ 로 표시하고 삼자극치(Tristimulus values)라 한다. 상기의  $X, Y, Z$ 는 밝기를 나타내는 것이 아니라 색채만을 표시하는 계수이고, 이 삼자극치를 이용하여 아래 수식과 같이 CIE  $xy$  색좌표를 나타낼 수 있다[18].

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \tag{식4}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \tag{식5}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \tag{식6}$$

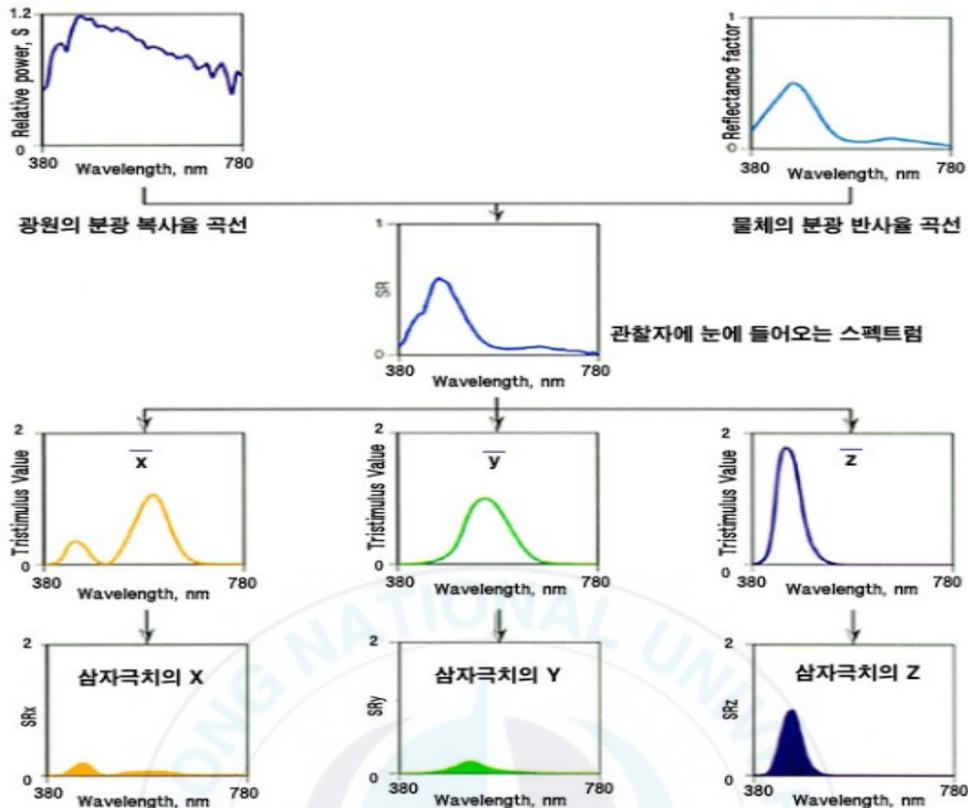


그림 2.6 CIE 삼자극치 X, Y, Z

$x$ 와  $y$ 로 이루어지는 공간을 색좌표(Chromaticity diagram)라 하는데 이 색좌표에서  $x, y$  좌표는 색의 3속성 중 색상과 채도를 나타낼 수 있다. 그림 2.7 (a)는 단일 파장 빛에 대한  $xy$  색좌표를 나타낸 것으로 이들을 연결하면 말굽 형태의 곡선을 이룬다. 모든 색의 좌표는 이 색좌표 안에 위치하게 되고 색을 띄지 않는 흰색이나 검정색 계열의 무채색은 중앙 부분에 위치하며, 순색에 가까울수록 색좌표 가장자리 선에 가깝게 위치한다.

$xy$  색좌표의 색공간은 위치에 따라서 균일한 분포를 나타내지 않는다. 이러한 단점을 없애고 균일한 분포를 확보하기 위하여 CIE 1960  $uv$  색좌표를 도입하였다. 흑체복사곡선(Black body locus), 색온도(Color temperature), 상관색온도(Correlated color temperature) 등이 이 색좌표 위에서 구현된다. 색공간의 균일성을 향상하기 위하여 CIE 1976  $u'v'$  색좌표가 도입되었으며

그 수식은 아래와 같고 그림으로 나타낸 것이 그림 2.7 (b)이다[18].

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (\text{식7})$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad (\text{식8})$$

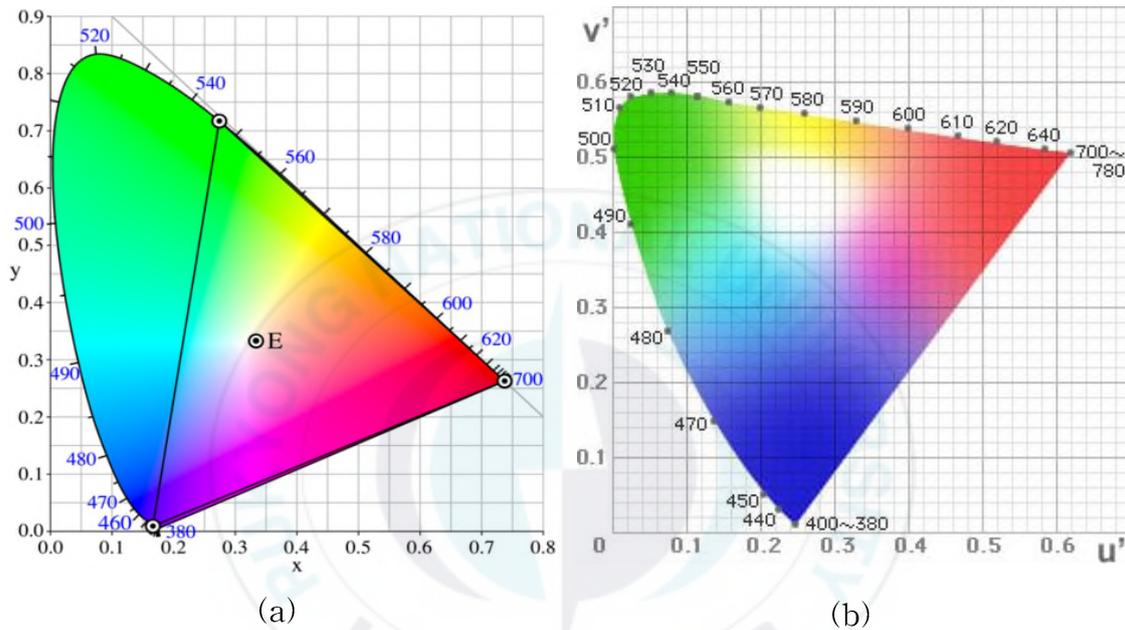


그림 2.7 CIE 1931 xy 색좌표(a)와 CIE 1976 u'v' 색좌표(b)

### 2.2.3 색온도(CT)와 상관색온도(CCT)

색온도(Color temperature)는 광원의 색을 절대온도를 이용하여 숫자로 표시한 것이다. 푸른색 계통의 광원일수록 색온도가 높으며, 붉은색 계통의 광원일수록 색온도가 낮다. 색온도는 플랑크 법칙과 빈의 변위법칙과 관련이 있으며, 실제 조명은 흑체복사곡선 위에 있지 않으므로 CIE 색좌표 상의 근사값인 상관색온도(이하 CCT)를 사용한다[18].

빛/복사의 분광 특성을 온도의 개념으로 정의한 것으로 온도에 따라 열복사의 분광특성, 즉 색이 달라지며, 이때 흑체 온도를 색온도(이하 CT)라 한

다. CT의 단위는 켈빈(K, Kelvin)으로 표현된다. CT와 CCT를 그린 것이 그림 2.8이다.

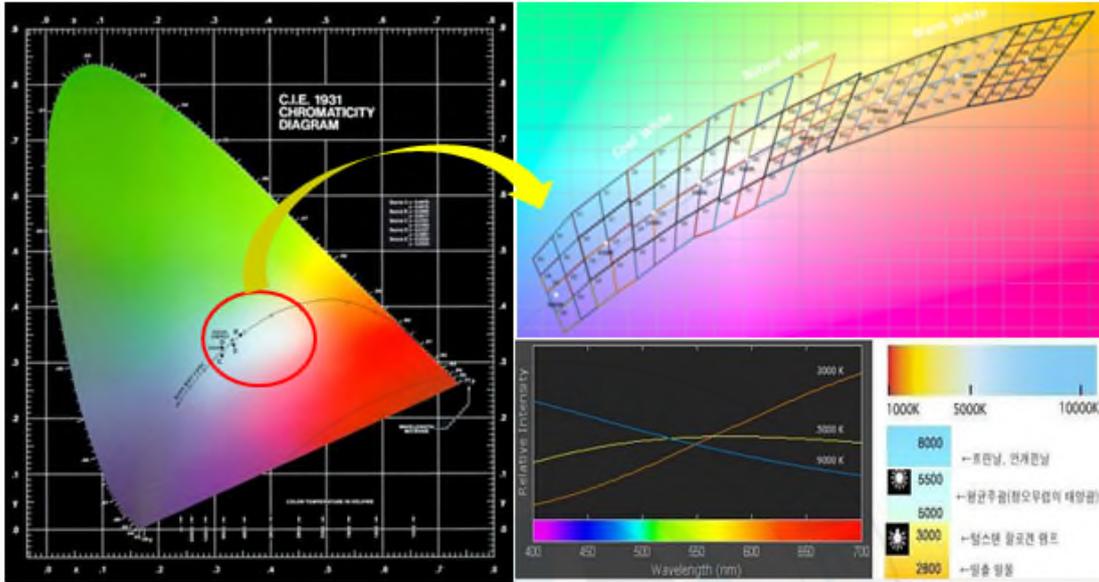


그림 2.8 색온도와 상관색온도

## 2.2.4 연색성(Color Rendering)

색의 정체는 밝혀지지 않고 있으나 사람의 눈은 파장에 따라서 감도가 다르며 이를 비율로 나타낸 것이 비시감도이다. 즉 사람의 눈은 같은 양의 에너지를 받아도 파장에 따라 느끼는 시감도가 다르다. 같은 색도의 물체라도 어떤 광원으로 조명해서 보느냐에 따라 그 색감이 달라진다.

조명에서 연색성을 표현하는 방법으로 많이 사용하는 것은 연색지수(Color rendering index, CRI)이며, 이는 자연광과 비교하여 얼마나 자연스럽게 색을 구현되는가를 수치화한 것으로서, 자연광 하에 물체의 연색지수를 100으로 하고, 비교 조명의 물체의 연색지수를 1~100까지 수치화한 것이다. CIE에서 제시하는 비교에 사용되는 색지(Test color samples, TCS)는 총 14개인데, TCS 1~8을 사용하여 일반연색지수  $R_a$ 를 구하고, TCS 9~14를 사용

하여 특수연색지수를 산출한다[19].

### 2.2.5 S/P Ratio

S/P ratio란 광원의 암소시 광속(Scotopic lumen flux)과 명소시 광속(Photopic lumen flux)의 비율, 즉 야간 환경에서 느낄 수 있는 광속을 측정할 수 있는 지수이며, 계산 공식은 다음과 같다.

$$\Phi_P = 683 \int_{380}^{780} P_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{식9})$$

$$\Phi_S = 1699 \int_{380}^{780} P_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \quad (\text{식10})$$

$$S/P = \frac{\Phi_S}{\Phi_P} \quad (\text{식11})$$

망막의 원추세포 중에서 암소시에 민감한 막대형 광수용기와 명소시에 민감한 원뿔형 광수용기의 민감도를 나타내는 비율이다. 색온도가 높은 램프일수록 색온도가 낮은 램프에 비해 S/P ratio가 높다.

박명시 조명을 평가하는 보다 발전된 방법을 CIE에서 제안하였고, IES에서는 *ELF*(Effective Luminance Factor)를 제안하였다. 이를 표로 나타낸 것이 표 2.2이며, S/P ratio에 따른 Table로 나타난다[9].

$$ELF = \frac{L_{\text{mesopic}}}{L_{\text{photopic}}} \quad (\text{식12})$$

$$L_{\text{mesopic}} = \frac{mL_{\text{photopic}} + (1-m)(S/P)(K)}{m + (1-m)(K)} \quad (\text{식13})$$

여기서  $K=683/1699$ 이고,  $S/P$ 는 S/P ratio이다.

표 2.1 S/P ratio와 명소시 휘도에 따른 *ELF*[9]

S/P	Base light level (photopic luminance (cd/m <sup>2</sup> ))											
	0.001	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12
0.25	0.0003	0.0026	0.0054	0.0084	0.0115	0.0149	0.0185	0.0223	0.0264	0.0308	0.0355	0.0457
0.35	0.0004	0.0036	0.0075	0.0115	0.0158	0.0203	0.0250	0.0300	0.0353	0.0408	0.0467	0.0591
0.45	0.0005	0.0047	0.0095	0.0146	0.0199	0.0255	0.0313	0.0373	0.0436	0.0501	0.0568	0.0711
0.55	0.0006	0.0057	0.0115	0.0176	0.0239	0.0304	0.0371	0.0441	0.0512	0.0586	0.0661	0.0818
0.65	0.0007	0.0067	0.0135	0.0205	0.0278	0.0351	0.0427	0.0505	0.0584	0.0665	0.0747	0.0917
0.75	0.0008	0.0076	0.0154	0.0234	0.0315	0.0397	0.0480	0.0565	0.0651	0.0739	0.0827	0.1007
0.85	0.0009	0.0086	0.0174	0.0262	0.0351	0.0441	0.0532	0.0623	0.0716	0.0809	0.0902	0.1092
0.95	0.0010	0.0096	0.0192	0.0289	0.0386	0.0483	0.0581	0.0678	0.0776	0.0874	0.0973	0.1170
1.05	0.0011	0.0106	0.0211	0.0316	0.0420	0.0524	0.0628	0.0731	0.0834	0.0937	0.1040	0.1244
1.15	0.0012	0.0115	0.0229	0.0342	0.0453	0.0564	0.0674	0.0782	0.0890	0.0997	0.1104	0.1315
1.25	0.0013	0.0125	0.0247	0.0367	0.0486	0.0602	0.0717	0.0831	0.0943	0.1054	0.1164	0.1380
1.35	0.0014	0.0134	0.0265	0.0392	0.0517	0.0640	0.0760	0.0878	0.0994	0.1109	0.1222	0.1444
1.45	0.0015	0.0144	0.0282	0.0417	0.0548	0.0676	0.0801	0.0923	0.1043	0.1161	0.1277	0.1504
1.55	0.0016	0.0153	0.0300	0.0441	0.0578	0.0711	0.0841	0.0967	0.1091	0.1212	0.1330	0.1561
1.65	0.0017	0.0162	0.0317	0.0465	0.0607	0.0745	0.0879	0.1009	0.1136	0.1260	0.1381	0.1616
1.75	0.0018	0.0171	0.0333	0.0488	0.0636	0.0779	0.0917	0.1050	0.1180	0.1307	0.1430	0.1669
1.85	0.0019	0.0180	0.0350	0.0511	0.0664	0.0812	0.0953	0.1090	0.1223	0.1352	0.1478	0.1720
1.95	0.0020	0.0189	0.0366	0.0533	0.0692	0.0843	0.0989	0.1129	0.1265	0.1396	0.1524	0.1769
2.05	0.0021	0.0198	0.0383	0.0555	0.0719	0.0875	0.1024	0.1167	0.1305	0.1439	0.1568	0.1817
2.15	0.0022	0.0207	0.0398	0.0577	0.0745	0.0905	0.1057	0.1203	0.1344	0.1480	0.1611	0.1862
2.25	0.0023	0.0216	0.0414	0.0598	0.0771	0.0935	0.1090	0.1239	0.1382	0.1520	0.1652	0.1906
2.35	0.0024	0.0225	0.0430	0.0619	0.0796	0.0964	0.1122	0.1274	0.1419	0.1558	0.1693	0.1949
2.45	0.0025	0.0233	0.0445	0.0640	0.0821	0.0992	0.1154	0.1308	0.1455	0.1596	0.1732	0.1990
2.55	0.0026	0.0242	0.0460	0.0660	0.0846	0.1020	0.1185	0.1341	0.1490	0.1633	0.1770	0.2030
2.65	0.0027	0.0251	0.0475	0.0680	0.0870	0.1048	0.1215	0.1373	0.1524	0.1669	0.1807	0.2070
2.75	0.0028	0.0259	0.0490	0.0700	0.0894	0.1074	0.1244	0.1405	0.1557	0.1703	0.1843	0.2107

표 2.1 S/P ratio와 명소시 휘도에 따른 *ELF*(계속)[9]

S/P	Base light level (photopic luminance (cd/m <sup>2</sup> ))											
	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
0.25	0.0573	0.0704	0.0849	0.1009	0.1184	0.1373	0.1574	0.1788	0.2012	0.2246	0.2487	0.2736
0.35	0.0728	0.0877	0.1037	0.1209	0.1392	0.1585	0.1787	0.1998	0.2217	0.2442	0.2674	0.2912
0.45	0.0864	0.1026	0.1197	0.1377	0.1565	0.1760	0.1963	0.2172	0.2387	0.2607	0.2831	0.3060
0.55	0.0983	0.1156	0.1335	0.1521	0.1713	0.1911	0.2113	0.2320	0.2532	0.2747	0.2966	0.3188
0.65	0.1092	0.1273	0.1459	0.1649	0.1844	0.2043	0.2245	0.2451	0.2659	0.2871	0.3085	0.3301
0.75	0.1191	0.1379	0.1570	0.1764	0.1961	0.2161	0.2363	0.2567	0.2773	0.2981	0.3190	0.3401
0.85	0.1283	0.1477	0.1672	0.1869	0.2068	0.2268	0.2470	0.2672	0.2876	0.3081	0.3286	0.3492
0.95	0.1368	0.1566	0.1765	0.1965	0.2165	0.2365	0.2566	0.2767	0.2969	0.3170	0.3372	0.3574
1.05	0.1448	0.1651	0.1853	0.2054	0.2255	0.2456	0.2656	0.2856	0.3055	0.3254	0.3452	0.3651
1.15	0.1523	0.1730	0.1935	0.2138	0.2339	0.2540	0.2739	0.2937	0.3135	0.3331	0.3526	0.3721
1.25	0.1593	0.1803	0.2010	0.2215	0.2417	0.2617	0.2816	0.3013	0.3208	0.3402	0.3594	0.3786
1.35	0.1661	0.1873	0.2082	0.2288	0.2491	0.2691	0.2888	0.3084	0.3277	0.3469	0.3658	0.3847
1.45	0.1724	0.1940	0.2150	0.2357	0.2560	0.2759	0.2956	0.3150	0.3341	0.3531	0.3718	0.3903
1.55	0.1785	0.2003	0.2215	0.2422	0.2625	0.2824	0.3020	0.3213	0.3402	0.3590	0.3774	0.3957
1.65	0.1843	0.2063	0.2276	0.2484	0.2687	0.2886	0.3081	0.3272	0.3460	0.3645	0.3827	0.4007
1.75	0.1899	0.2120	0.2335	0.2543	0.2746	0.2944	0.3138	0.3328	0.3514	0.3697	0.3877	0.4054
1.85	0.1952	0.2175	0.2391	0.2599	0.2802	0.3000	0.3193	0.3381	0.3566	0.3747	0.3924	0.4099
1.95	0.2003	0.2228	0.2444	0.2653	0.2856	0.3053	0.3244	0.3432	0.3615	0.3794	0.3969	0.4141
2.05	0.2053	0.2279	0.2496	0.2705	0.2907	0.3103	0.3294	0.3480	0.3661	0.3838	0.4012	0.4182
2.15	0.2100	0.2327	0.2545	0.2754	0.2956	0.3152	0.3341	0.3526	0.3706	0.3881	0.4052	0.4220
2.25	0.2146	0.2374	0.2592	0.2801	0.3003	0.3198	0.3387	0.3570	0.3748	0.3922	0.4091	0.4257
2.35	0.2190	0.2419	0.2637	0.2847	0.3048	0.3242	0.3430	0.3612	0.3789	0.3960	0.4128	0.4291
2.45	0.2233	0.2463	0.2682	0.2891	0.3092	0.3285	0.3472	0.3652	0.3828	0.3998	0.4164	0.4325
2.55	0.2275	0.2505	0.2724	0.2933	0.3134	0.3326	0.3512	0.3691	0.3865	0.4034	0.4198	0.4357
2.65	0.2315	0.2546	0.2765	0.2974	0.3174	0.3366	0.3551	0.3729	0.3901	0.4068	0.4230	0.4388
2.75	0.2354	0.2585	0.2805	0.3014	0.3213	0.3404	0.3588	0.3765	0.3936	0.4101	0.4261	0.4417

표 2.1 S/P ratio와 명소시 휘도에 따른 *ELF*(계속)[9]

S/P	Base light level (photopic luminance (cd/m <sup>2</sup> ))											
	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60
0.25	0.2990	0.3250	0.3514	0.3782	0.4053	0.4327	0.4604	0.4883	0.5164	0.5446	0.5730	0.60
0.35	0.3154	0.3400	0.3650	0.3904	0.4160	0.4419	0.4681	0.4944	0.5210	0.5477	0.5745	0.60
0.45	0.3293	0.3529	0.3768	0.4010	0.4254	0.4500	0.4749	0.4999	0.5251	0.5504	0.5759	0.60
0.55	0.3413	0.3640	0.3870	0.4102	0.4336	0.4571	0.4809	0.5047	0.5287	0.5528	0.5771	0.60
0.65	0.3519	0.3739	0.3961	0.4184	0.4409	0.4635	0.4862	0.5091	0.5320	0.5551	0.5782	0.60
0.75	0.3613	0.3827	0.4042	0.4258	0.4474	0.4692	0.4911	0.5130	0.5350	0.5571	0.5792	0.60
0.85	0.3700	0.3907	0.4116	0.4325	0.4534	0.4745	0.4955	0.5166	0.5378	0.5589	0.5802	0.60
0.95	0.3777	0.3980	0.4182	0.4385	0.4589	0.4792	0.4995	0.5199	0.5403	0.5606	0.5810	0.60
1.05	0.3849	0.4047	0.4244	0.4442	0.4639	0.4836	0.5033	0.5229	0.5426	0.5622	0.5818	0.60
1.15	0.3915	0.4109	0.4301	0.4494	0.4685	0.4876	0.5067	0.5257	0.5447	0.5637	0.5826	0.60
1.25	0.3976	0.4165	0.4354	0.4541	0.4728	0.4914	0.5099	0.5283	0.5467	0.5650	0.5833	0.60
1.35	0.4033	0.4219	0.4403	0.4586	0.4768	0.4949	0.5129	0.5307	0.5486	0.5663	0.5839	0.60
1.45	0.4087	0.4268	0.4449	0.4628	0.4805	0.4981	0.5156	0.5330	0.5503	0.5675	0.5845	0.60
1.55	0.4137	0.4315	0.4492	0.4667	0.4840	0.5012	0.5182	0.5351	0.5519	0.5686	0.5851	0.60
1.65	0.4184	0.4359	0.4532	0.4703	0.4873	0.5040	0.5207	0.5371	0.5534	0.5696	0.5857	0.60
1.75	0.4228	0.4400	0.4570	0.4738	0.4904	0.5067	0.5229	0.5390	0.5549	0.5706	0.5862	0.60
1.85	0.4271	0.4440	0.4606	0.4771	0.4933	0.5093	0.5251	0.5408	0.5562	0.5715	0.5867	0.60
1.95	0.4310	0.4477	0.4640	0.4802	0.4960	0.5117	0.5272	0.5424	0.5575	0.5724	0.5871	0.60
2.05	0.4348	0.4512	0.4673	0.4831	0.4987	0.5140	0.5291	0.5440	0.5587	0.5732	0.5876	0.60
2.15	0.4384	0.4545	0.4703	0.4859	0.5011	0.5162	0.5309	0.5455	0.5599	0.5740	0.5880	0.60
2.25	0.4419	0.4577	0.4733	0.4885	0.5035	0.5182	0.5327	0.5469	0.5610	0.5748	0.5884	0.60
2.35	0.4451	0.4607	0.4760	0.4910	0.5057	0.5202	0.5343	0.5483	0.5620	0.5755	0.5888	0.60
2.45	0.4483	0.4636	0.4787	0.4934	0.5079	0.5220	0.5359	0.5496	0.5630	0.5762	0.5892	0.60
2.55	0.4513	0.4664	0.4813	0.4957	0.5099	0.5238	0.5375	0.5508	0.5639	0.5768	0.5895	0.60
2.65	0.4541	0.4691	0.4837	0.4980	0.5119	0.5255	0.5389	0.5520	0.5649	0.5775	0.5899	0.60
2.75	0.4569	0.4716	0.4860	0.5000	0.5138	0.5272	0.5403	0.5531	0.5657	0.5781	0.5902	0.60

우리가 일반적으로 사용하는 휘도  $L$ 은 다음 식에 의해서 명소시 휘도  $P$ 와 암소시 휘도  $S$ 의 값으로 표현할 수 있다.

$$L = 0.834P - 0.335S - 0.2 + \sqrt{0.696P^2 - 0.333P - 0.56PS + 0.11S^2 + 0.537S + 0.04}$$

(식14)

암소시 및 박명시 상황에서는 일반적인 휘도보다 S/P ratio 값이 높은 휘도가 우리 눈에 더 밝게 보인다. 이를 Pupil lumens라 하는데, 적은 광속을 가지는 빛이 관찰자의 생물학적 특성에 따라 더 밝게 느껴지는 현상이다. 이 Pupil lumens을 수식으로 나타낸 것이 아래 식과 같다.

$$Pupil_L = P \times \frac{Scotopic Lumens}{Photopic Lumens}$$

(식15)

한 예로, 60 W, 140 lm/W LED조명의 광속 8400 lm이고 S/P ratio가 1.96이면 Pupil lumens는 16,464 lm이 되고, 150 W 90 lm/W의 HPS조명 광속이 13500 lm에 S/P ratio가 0.62이면 Pupil lumens는 8,370 lm이 된다. 명소시 휘도가 큰 경우보다 Pupil lumens 값이 클 때 박명시에서 더 잘 보이며 이는 그림 2.9에서 확인할 수 있다[20].



그림 2.9 S/P ratio에 따른 터널 내 밝기 차이[20]

## 제 3 장 실험방법

### 3.1 시뮬레이션 프로그램 구성

일정한 색온도에서 S/P ratio의 최대값을 산출하기 위하여, 자체적으로 S/P ratio simulator를 구축하였다(그림 3.1 참고). 이 프로그램은 계산의 편의를 위하여 광원의 스펙트럼 분포를 Dr. Ohno의 방법[19]을 사용하여, 최고 파장(Peak wavelength)와 반치전폭(FWHM, full width at half maximum)을 입력하면, 스펙트럼의 분포, CCT, CRI, S/P ratio 값이 계산되도록 구성하였다. 이때, S/P ratio의 값은 식9~식11의 수식을 사용하여 계산하였다.

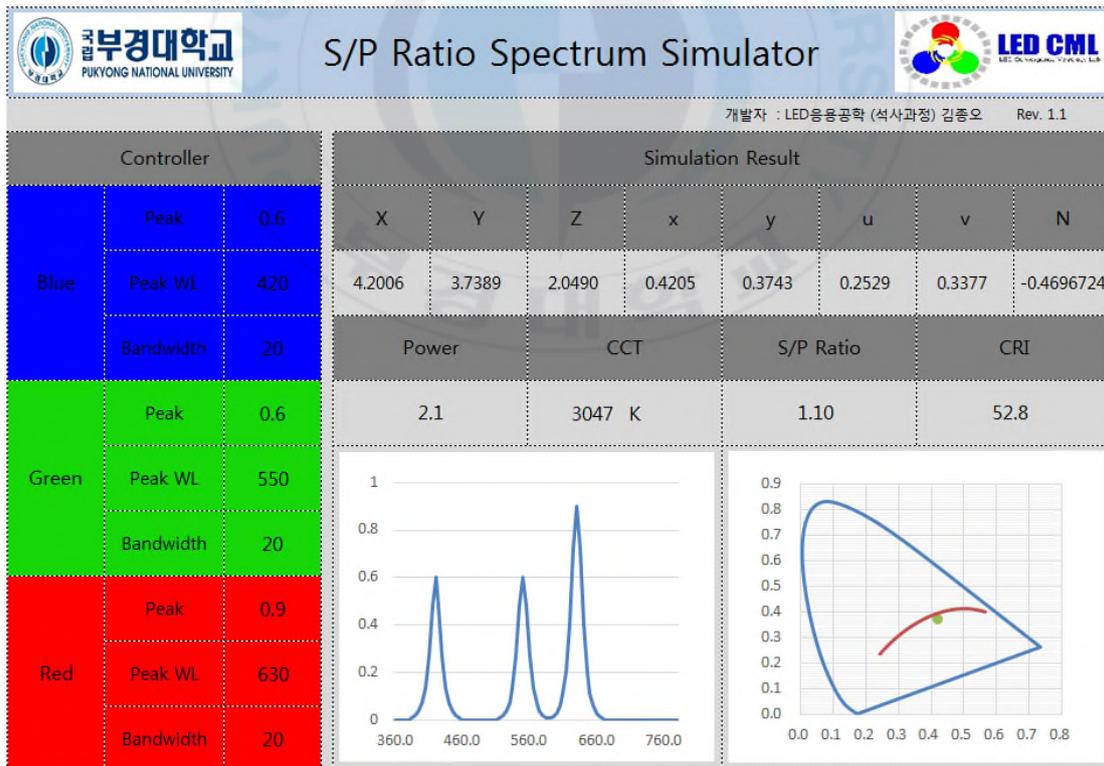


그림 3.1 1차 S/P ratio simulator

프로그램의 유효성 검사를 위하여, L사의 LED 5630, 0.5 W, 5700 K 단품 제품을 측정하여 스펙트럼, 광선속, CRI, CCT를 비교하였다. 측정에 사용한 장비는 MEASURFINE사의 50 cm 적분구이며, 측정결과는 다음과 같다.

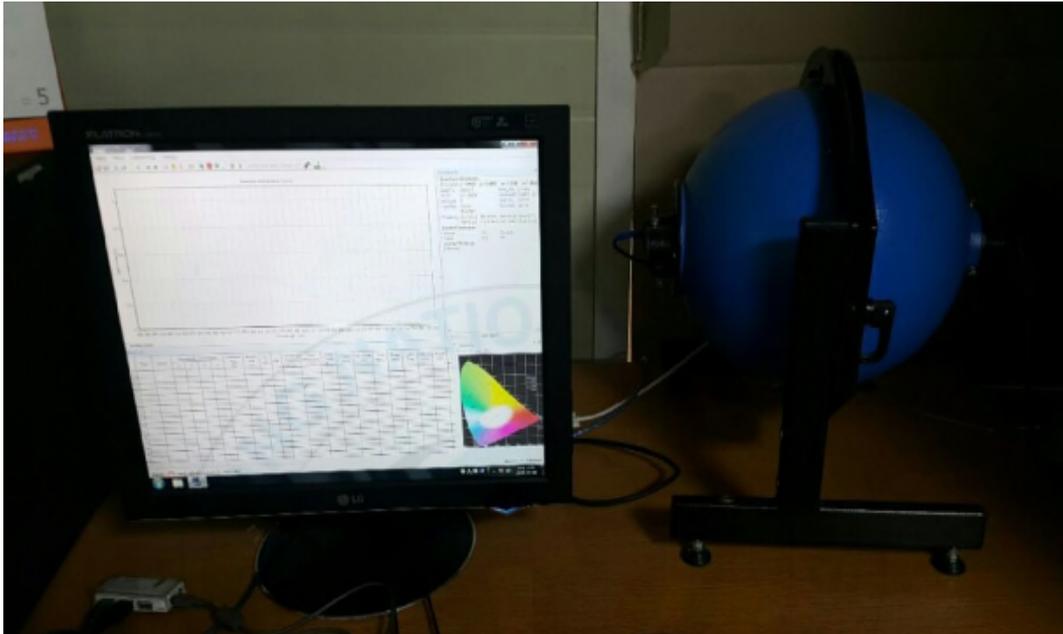


그림 3.2 50 cm 적분구

표 3.1 측정결과

	20' 적분구	프로그램계산 결과
광선속 (lm)	32.1	32.1
CCT (K)	5,638	5,635
CRI (-)	87.5	87.4

이 Simulator를 사용하여, 색온도별 S/P ratio를 수동으로 계산하였으나, CCT 및 색좌표 허용범위  $D_{uv}$ , RGB 개별 LED 출력 조절 등의 어려움이 있어서, MATLAB 프로그램을 사용하여 개발한 CRI simulator[21]에 연동하여 S/P ratio를 계산할 수 있도록 Simulator를 구성하여 연구를 진행하였다.



이동은 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K가 되도록 설정하여 최고 S/P ratio 값을 확인하였다[22].

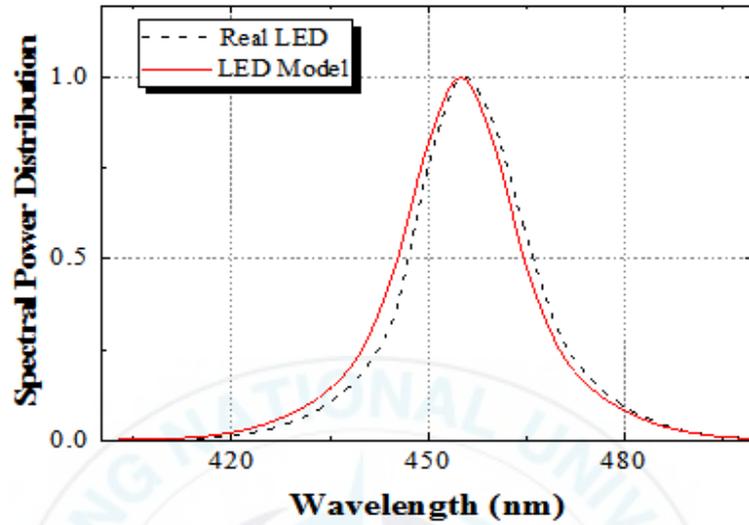


그림 3.4 LED의 SPD와 모델링 SPD 비교[21]

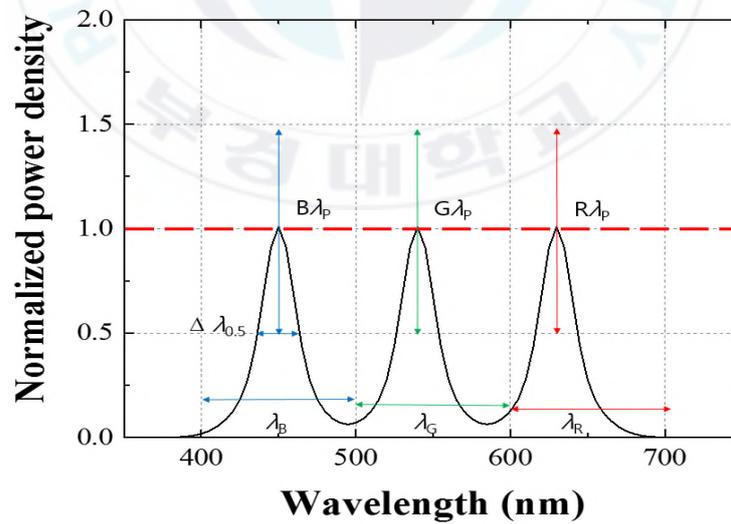


그림 3.5 프로그램 파장이동 개념도[21]

## 3.2 시뮬레이션 방법

식16과 식17을 사용하여 RGB 각 파장영역에서 최고파장과 반치전폭을 이동할 수 있도록 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. 최고파장과 반치전폭을 이동하는 구체적인 방법은 아래와 같다.

- ① 최고파장  $\lambda_R$ ,  $\lambda_G$ ,  $\lambda_B$ 는 각각 420 nm, 500 nm, 640 nm, 반치전폭 20 nm, CCT 3000 K가 되도록  $B\lambda_P$ ,  $G\lambda_P$ ,  $R\lambda_P$ 를 조절하여 S/P ratio를 계산한다.
- ② Blue 스펙트럼이 420 nm에서 480 nm까지 5 nm 간격으로 이동하면서 최대 S/P ratio를 계산한다.
- ③ Green 스펙트럼의 최고파장을 500 nm에서 5 nm 증가시킨 후, ②의 과정을 반복하고,  $\lambda_G$ 를 500 nm에서 570 nm까지 이동하면서 최대 S/P ratio를 계산한다.
- ④ Red 스펙트럼의 최고파장을 5 nm 증가시킨 후 ②~③의 과정을 반복하여  $\lambda_R$ 를 640 nm에서 720 nm까지 이동하면서 최대 S/P ratio를 계산한다.
- ⑤ Blue 스펙트럼의 반치전폭을 20 nm에서 30 nm로 증가시켜 ②~④의 과정을 반복하여 계산을 진행한다.
- ⑥ ⑤의 과정이 완료되면, Green, Red의 반치전폭이 각각 10 nm씩 증가시켜 각 파장의 반치전폭이 30 nm가 될 때까지 반복하여 계산을 진행한다.
- ⑦ ⑥의 과정이 완료되면 CCT를 1,000 K 간격으로 (3000 K~6000 K) 범위에서 ①~⑥의 과정을 반복하여 CCT별 S/P ratio를 계산한다.
- ⑧ RGBY 시뮬레이션도 위 순서에 맞춰 Red 파장은 620 nm에서 650 nm, Green 파장은 520 nm에서 550 nm, Yellow 파장은 570 nm에서 600 nm, Blue파장은 440 nm에서 470 nm로 설정하였으며, 10 nm 간격으로 이동하여 ①~⑦과 동일한 과정을 반복한다.

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 4.1 RGB PKG 스펙트럼 이동과 광학 특성 변화

#### 4.1.1 RGB 스펙트럼 반치전폭 20 nm에서의 최고파장 이동에 따른 S/P Ratio 변화

RGB 스펙트럼 각각의 반치전폭을 20 nm에 고정하고, 각 스펙트럼 이동에 따라 CCT 3000 K~6000 K까지의 S/P ratio 변화를 살펴보았다. 이때, 각 스펙트럼의 최고파장(Peak wavelength)은 CCT 조절을 위하여 개별 Power를 인가하지만, RGB 최고파장 총 Power 합은 동일하게 설정하였으며, 플랑크 곡선 상에서의  $D_w \pm 0.005$  이내가 되도록 설정하였다[22].

그림 4.1은 Blue LED 스펙트럼을 (420~480) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. Blue 파장이 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향을 보인다. CCT가 클수록 파장이 증가함에 따라 S/P ratio 변화가 커진다. 최대 S/P ratio는 CCT 6000 K, 최고파장 460 nm에서 나타난다.

그림 4.2는 Green LED 스펙트럼을 (500~570) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. Green 파장이 증가할수록 S/P ratio는 감소하는 경향을 보이고, 파장이 증가할수록 CCT별 S/P ratio 차이는 다소 감소한다.

그림 4.3은 Red LED 스펙트럼을 (640~720) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 감소하는 경향을 보이고, CCT가 클수록 파장이 증가함에 따라 S/P ratio는 감소한다. 그러나 5000 K에서 S/P ratio 변화가 가장 작다.

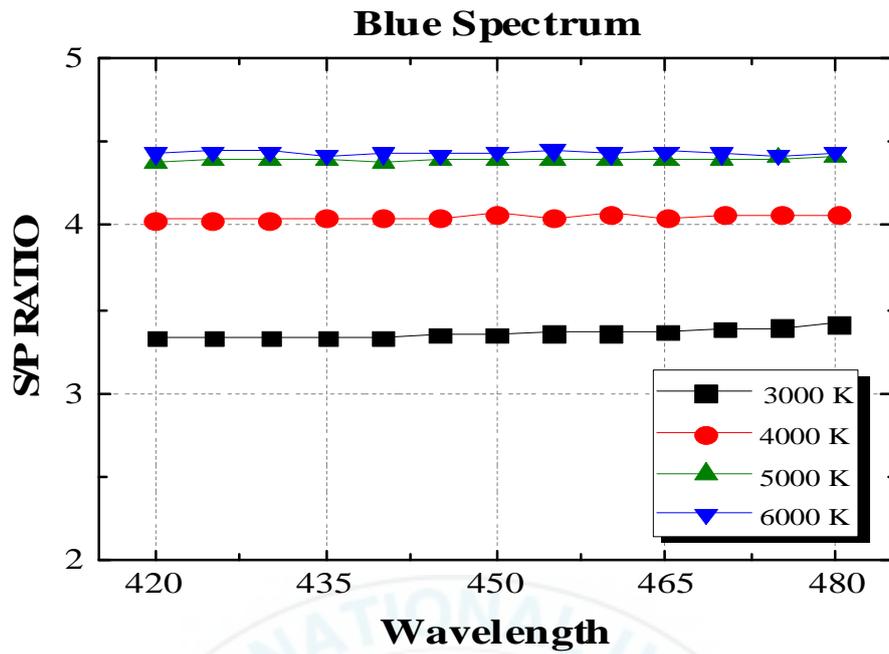


그림 4.1 반치전폭 20 nm, Blue 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

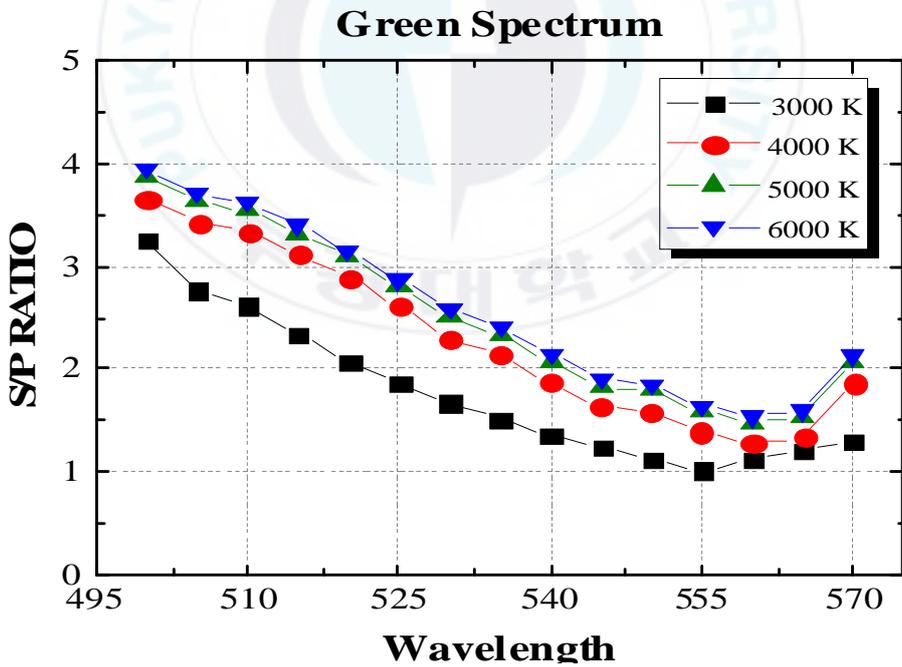


그림 4.2 반치전폭 20 nm, Green 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

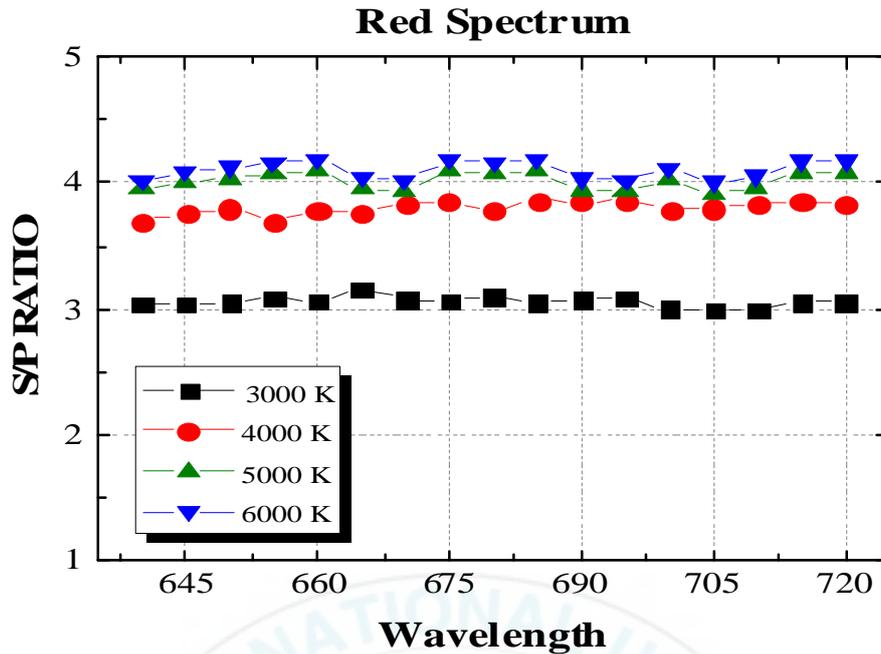


그림 4.3 반치전폭 20 nm, Red 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

그림 4.4는, 그림 4.1에서 그림 4.3에 나타낸 변화 중에서, CCT 3000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 3000 K에서는 Green 파장의 영향이 가장 크고, Blue와 Red 파장 영향은 작은 편이다.

그림 4.5는, 그림 4.1에서 그림 4.3에 나타낸 변화 중에서, CCT 4000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 4000 K에서도 Green 파장의 영향이 가장 크고, Blue와 Red 파장 영향은 작은 편이다.

그림 4.6은, 그림 4.1에서 그림 4.3에 나타낸 변화 중에서, CCT 5000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 5000 K의 변화 추이는 4000 K일 때와 유사하다.

그림 4.7는, 그림 4.1에서 그림 4.3에 나타낸 변화 중에서, CCT 6000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. Green 파장의 영향이 가장 크고, Red 파장의 영향도 작용하며, Blue 파장은 파장이 증가할수록 S/P ratio의 값이 증가하는 경향이 나타난다.

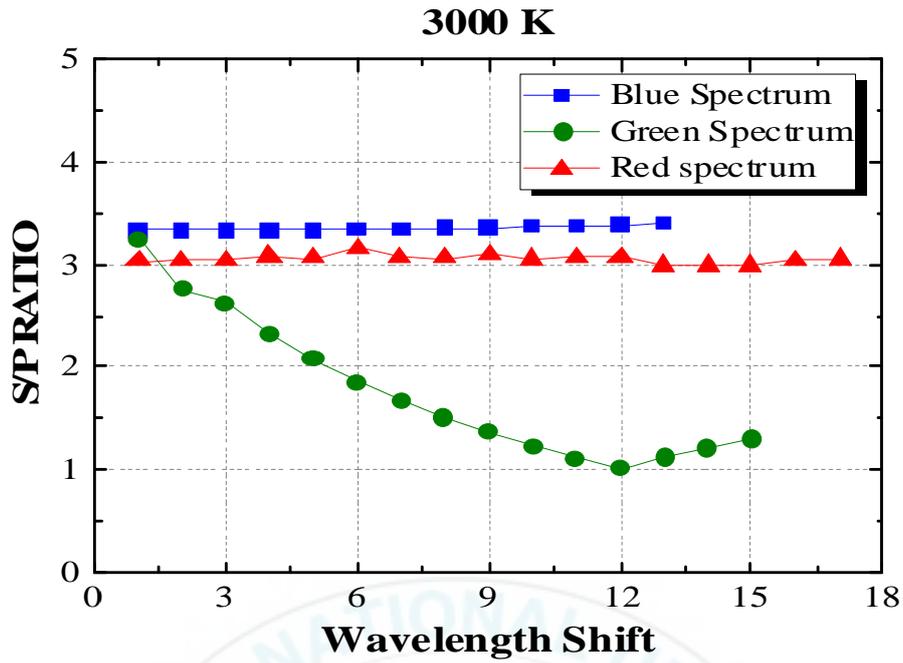


그림 4.4 반치전폭 20 nm, CCT 3000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

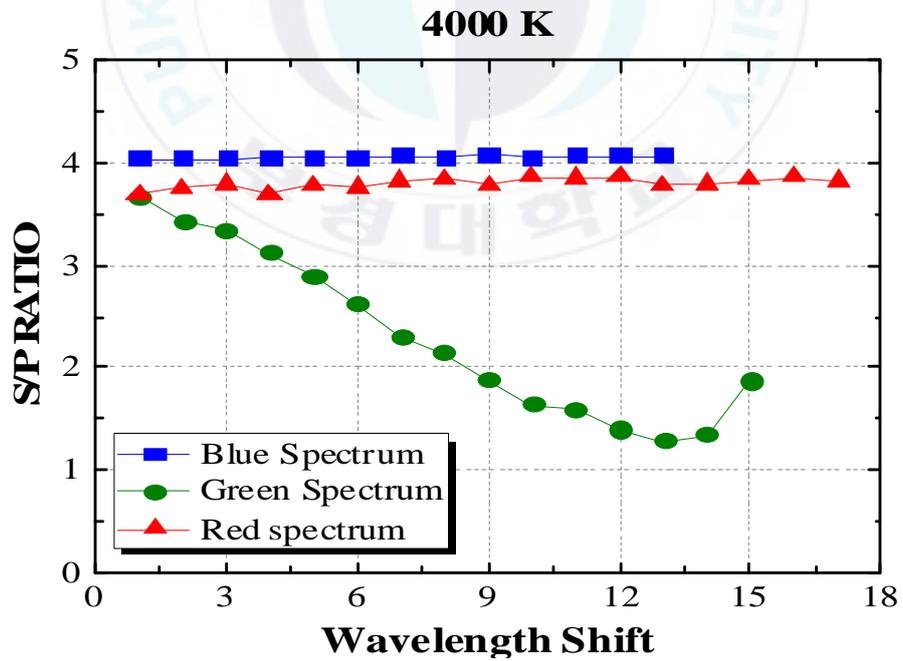


그림 4.5 반치전폭 20 nm, CCT 4000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

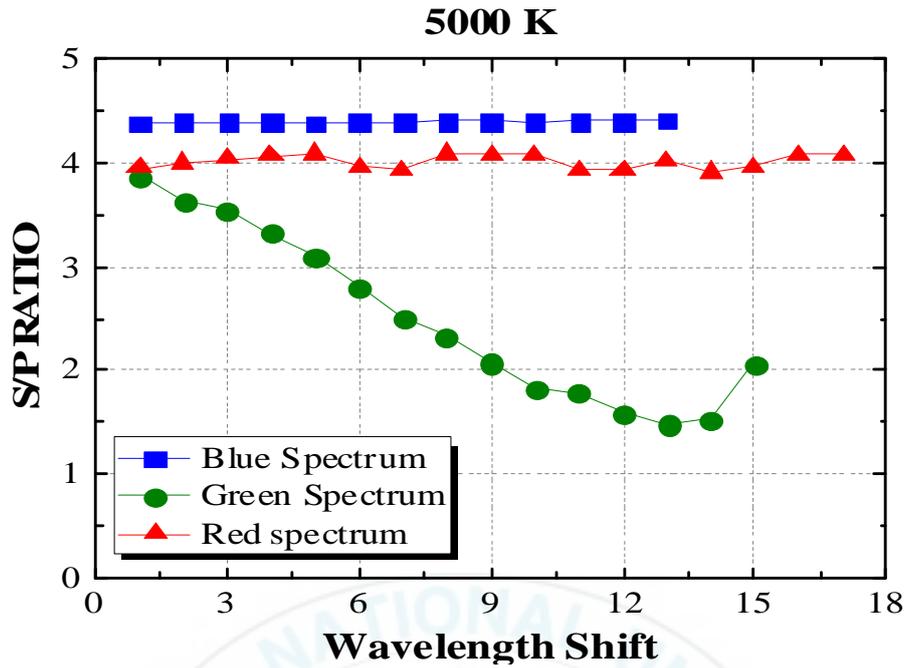


그림 4.6 반치전폭 20 nm, CCT 5000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

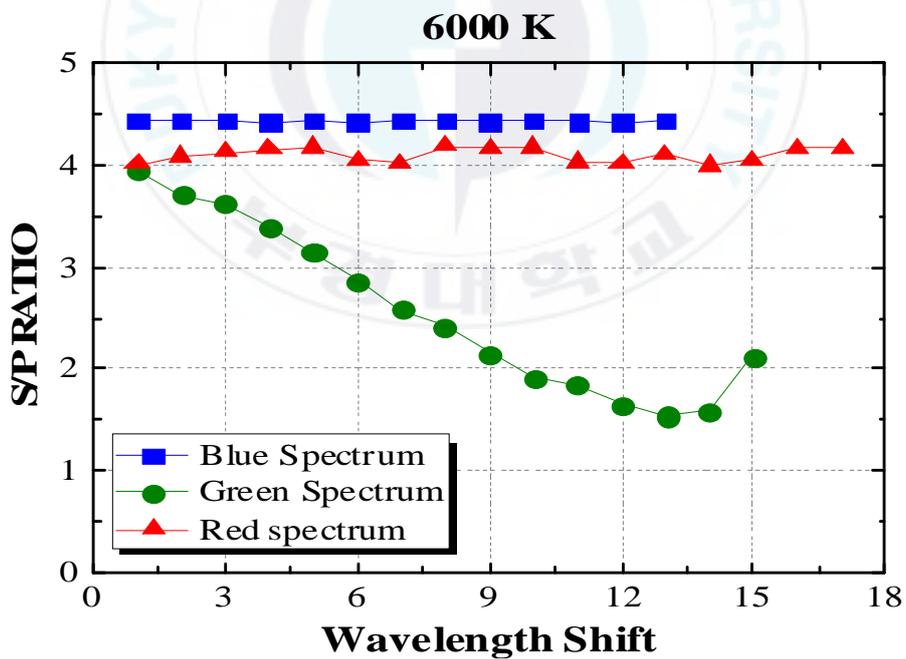


그림 4.7 반치전폭 20 nm, CCT 6000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

## 4.1.2 RGB 스펙트럼 반치전폭 30 nm에서의 최고파장 이동에 따른 S/P Ratio 변화

RGB 각각의 반치전폭을 각각 30 nm에 고정하고, 각 스펙트럼의 최고파장 이동에 따라 CCT 3000 K~6000 K까지 S/P ratio 변화를 살펴보았다. 이 시뮬레이션에서도 4.1.1에서 제시한 CCT 설정 방법과 개별출력 및 총출력 설정 방법을 동일하게 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 4.8은 Blue LED 스펙트럼을 (420~480) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. CCT가 증가할수록 S/P ratio가 증가하나 5000 K에서 최대가 된다. 3000 K와 4000 K에서는 파장에 의한 영향이 거의 없고, 5000 K와 6000 K에서 파장이 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향을 보인다. 최대 S/P ratio는 최고 파장 475 nm에서 나타난다.

그림 4.9는 Green LED 스펙트럼을 (500~570) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. Green 파장이 증가할수록 S/P ratio는 감소하는 경향을 보이고, 파장이 증가할수록 CCT별 S/P ratio 차이는 다소 감소한다.

그림 4.10은 Red LED 스펙트럼을 (640~720) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장 증가에 따른 S/P ratio 변화가 크고, CCT별 S/P ratio 변화도 크다. 반치전폭 20 nm일 때와 달리, 6000 K에서 S/P ratio 변화가 가장 작다.

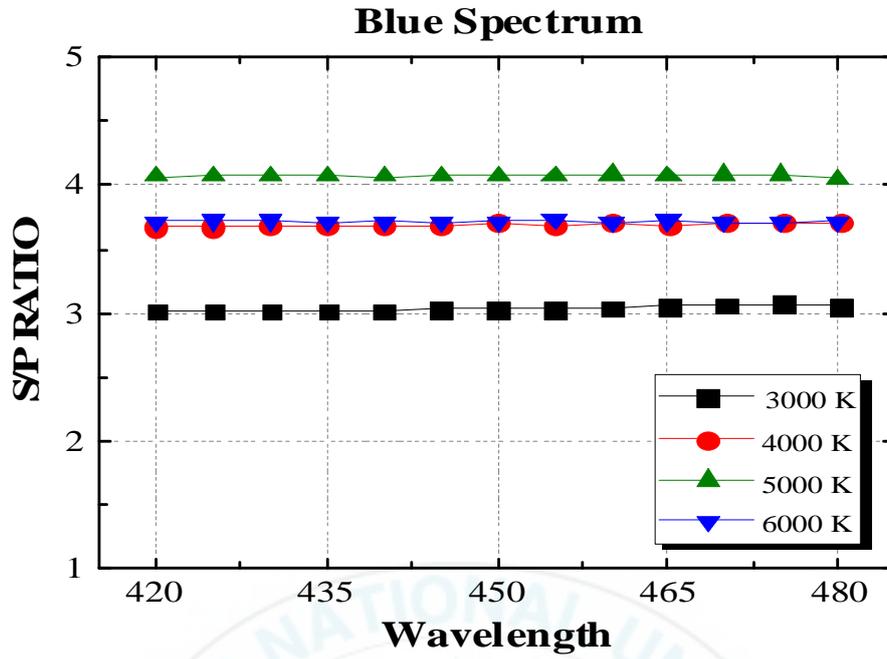


그림 4.8 반치전폭 30 nm, Blue 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

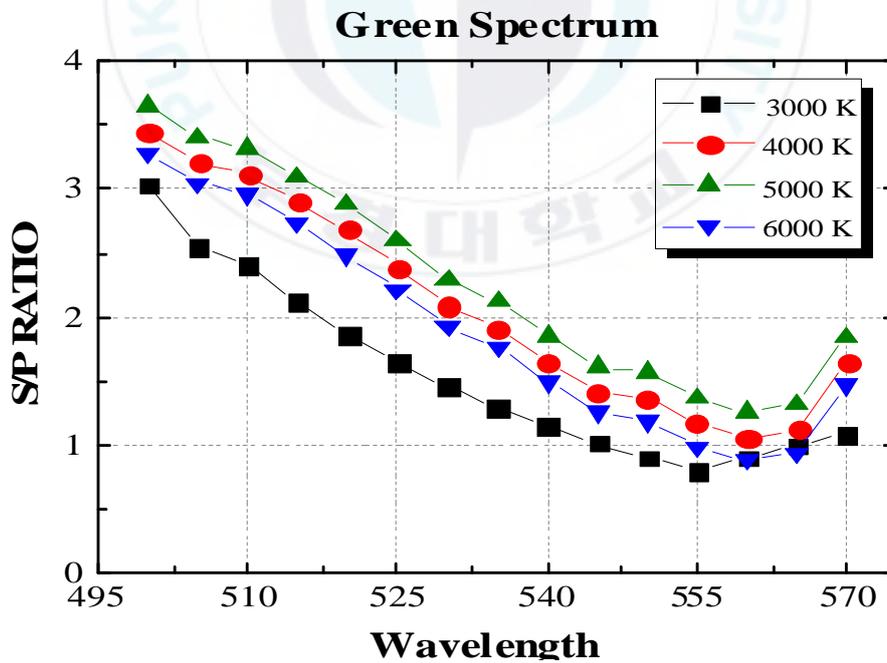


그림 4.9 반치전폭 30 nm, Green 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

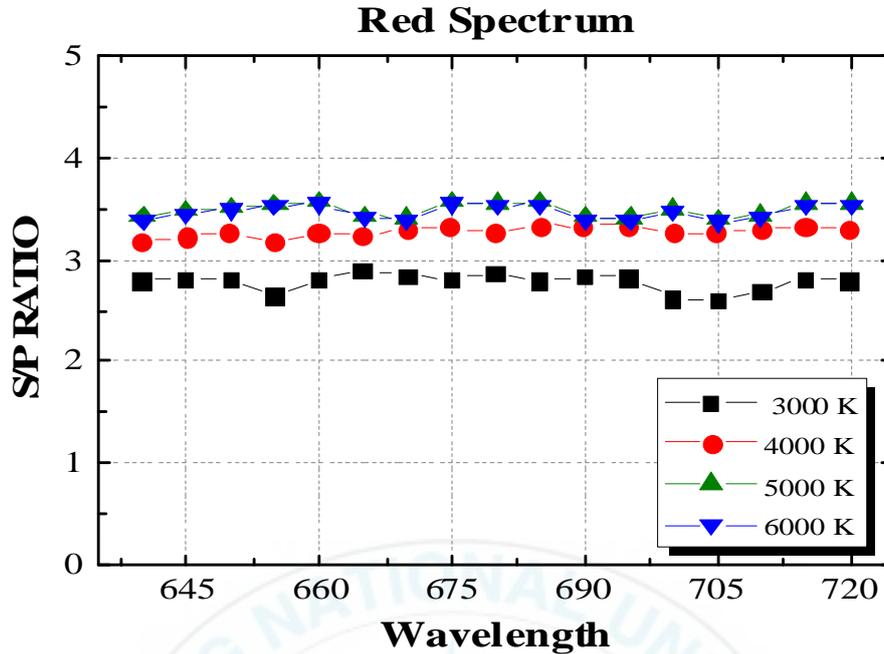


그림 4.10 반치전폭 30 nm, Red 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

그림 4.11은, 그림 4.8에서 그림 4.10에 나타낸 변화 중에서, CCT 3000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 3000 K에서는 Green 파장의 영향이 가장 크고, Blue와 Red 파장 영향은 작은 편이다. Red 스펙트럼은 파장 변화 과정에서 S/P ratio 감소 부분이 있다.

그림 4.12는, 그림 4.8에서 그림 4.10에 나타낸 변화 중에서, CCT 4000 K에서 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 4000 K에서는 Green 파장의 영향이 가장 크고, Blue 파장 영향은 작은 편이다. Red 스펙트럼은 파장 변화 과정에서 S/P ratio에서 큰 변화를 보인다.

그림 4.13 및 그림 4.14는, 그림 4.8에서 그림 4.10에 나타낸 변화 중에서, CCT 5000 K 및 6000 K에서 파장별 최고파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 각각 나타낸 것이다. 5000 K와 6000 K에서는 Green 파장의 영향이 가장 크고, Blue와 Red 파장은 파장이 증가할수록 S/P ratio가 증가하는 경향이 있으며, Red 스펙트럼은 파장 이동 과정에서 S/P ratio 감소 부분이 있다.

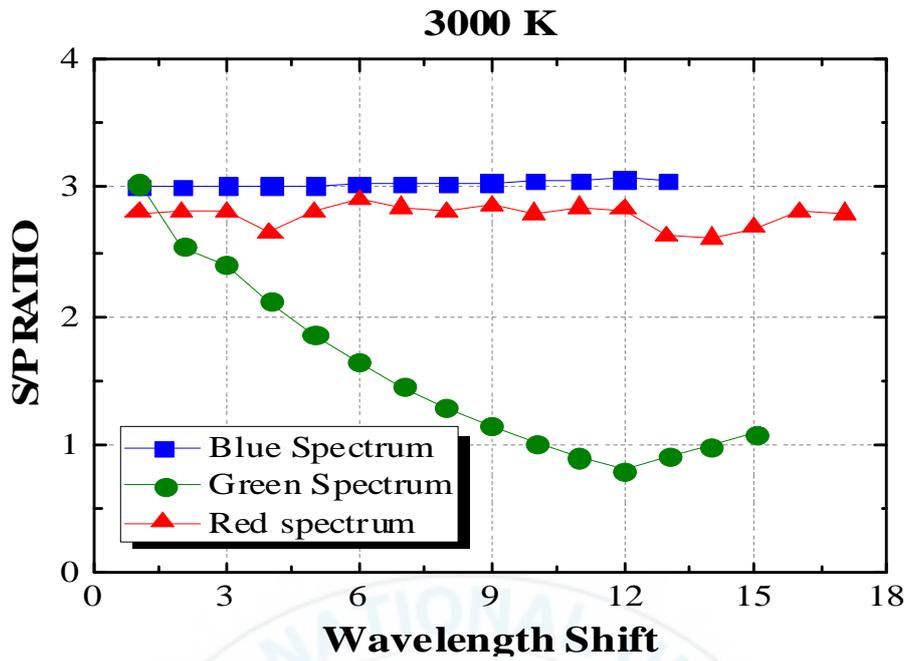


그림 4.11 반치전폭 30 nm, CCT 3000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

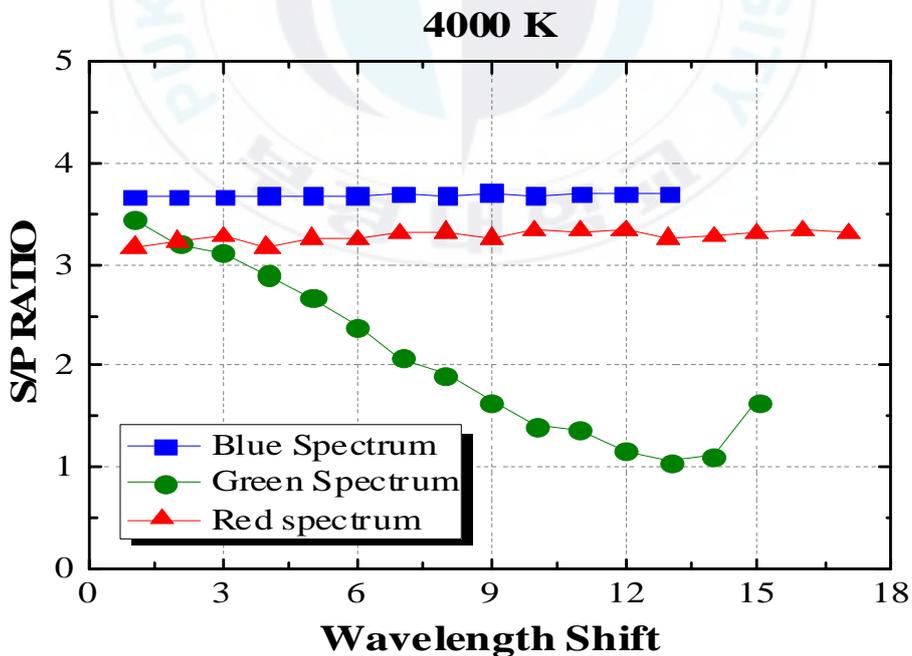


그림 4.12 반치전폭 30 nm, CCT 4000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

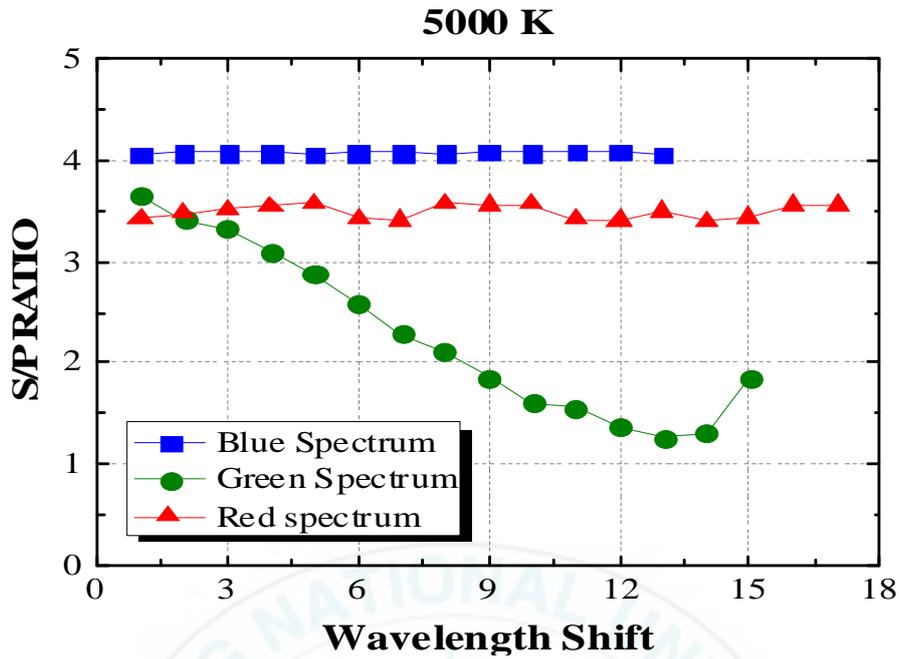


그림 4.13 반치전폭 30 nm, CCT 5000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

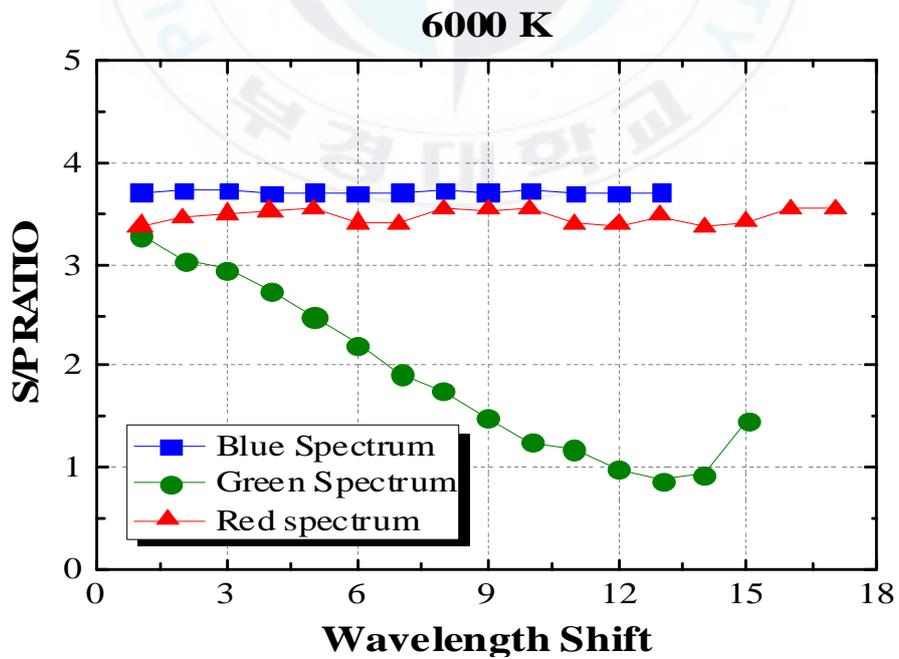


그림 4.14 반치전폭 30 nm, CCT 6000 K, RGB 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

RGB 각 스펙트럼의 반치전폭 30 nm에서는 Blue 파장이 증가함에 따라 S/P ratio가 높아지며, Green의 변화에 따라서는 20 nm와 동일한 패턴으로 떨어지지만, Red의 변화에 따라 S/P ratio 변화가 큰 부분이 발생하였다.

#### 4.1.3 RGB 개별 반치전폭 증가에 따른 S/P Ratio 변화

RGB PKG의 개별 스펙트럼의 반치전폭 변화에 따른 S/P ratio 변화를 살펴보고자 한다. Blue, Green, Red의 파장 반치전폭을 20 nm, 20 nm, 20 nm로 설정하고, ‘3.2.1 스펙트럼의 CCT, S/P ratio 시뮬레이션 방법’에서 제시한 방법의 순서로 시뮬레이션을 진행한 후, 반치전폭을 30 nm로 증가시켰다.

그림 4.15와 4.16은 개별 RGB LED 반치전폭을 각각 20 nm에서 30 nm로 변경할 때 S/P ratio의 변화를 나타낸 것이다. 반치전폭을 증가시킬수록 S/P ratio는 감소하는 경향을 보이고 특히 6000 K에서는 Blue의 반치전폭 증가함에 따라 S/P ratio 감소가 크다.

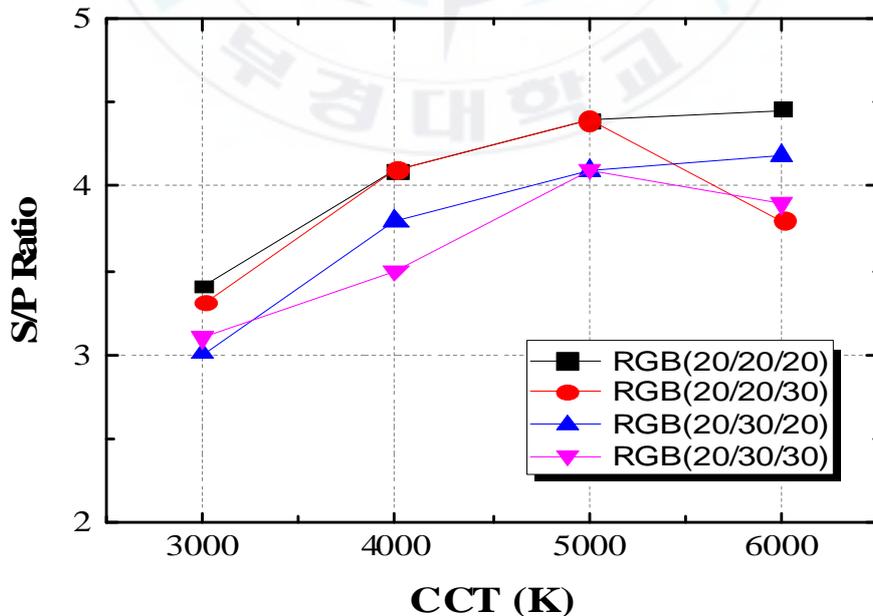


그림 4.15 Red, Blue 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 I

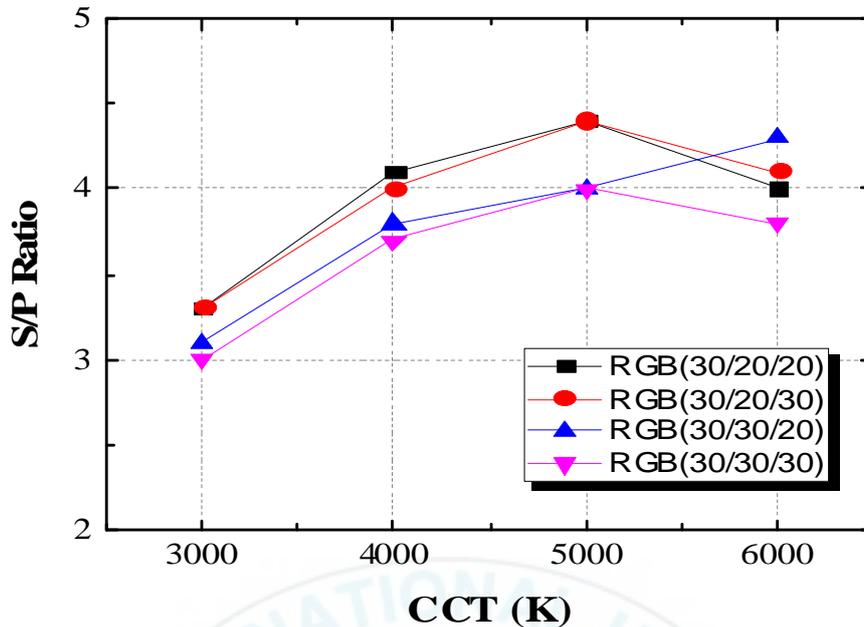


그림 4.16 Green, Blue 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 II

#### 4.1.4 CCT별 S/P Ratio 변화에 따른 CRI 변화

색온도별로 S/P ratio 변화와 CRI 변화 관계를 살펴보고자 한다. 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따라  $R_1 \sim R_8$ 을 각각 계산하여 평균한  $R_a[19]$ 를 이용하여, S/P ratio와 CRI 변화를 시뮬레이션하고 그 결과를 그림 4.17에서 4.20에서 비교하였다.

CCT가 증가할수록 최고파장 이동에 따른 S/P ratio 및 CCT의 변화가 점차 증가한다. 그리고 S/P ratio가 증가하면 CRI는 감소하고, CRT가 증가하면 S/P ratio가 감소하는, 상호 Trade-off 경향이 매우 강한 것을 알 수 있다. S/P ratio 2.5 부근에서 CRI 0이 나타나며, CRI가 50 이상이면 S/P ratio가 2 이하로 내려온다.

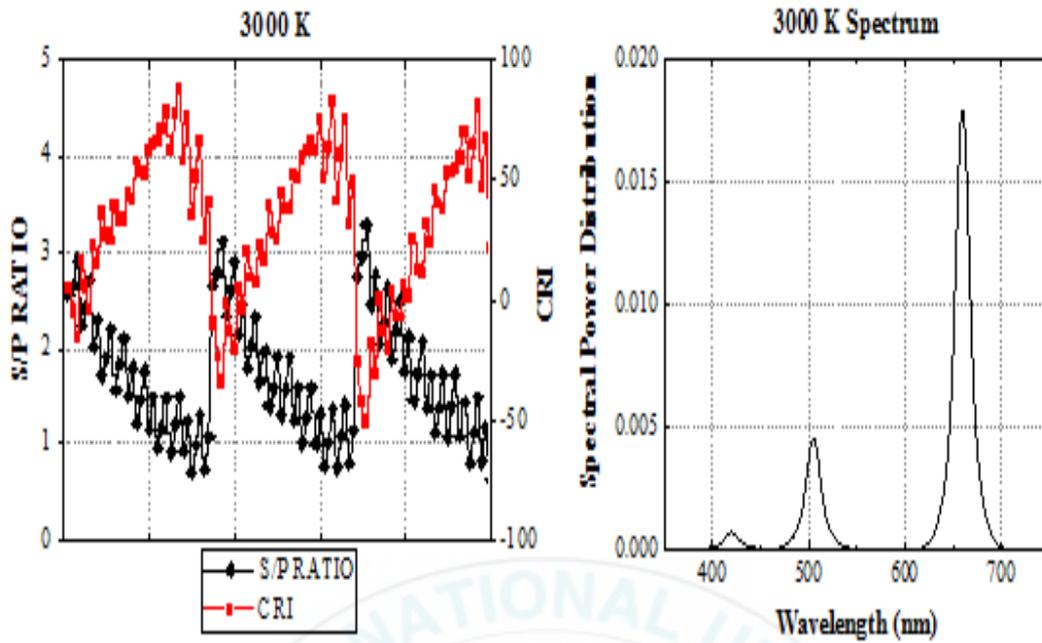


그림 4.17 CCT 3000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화

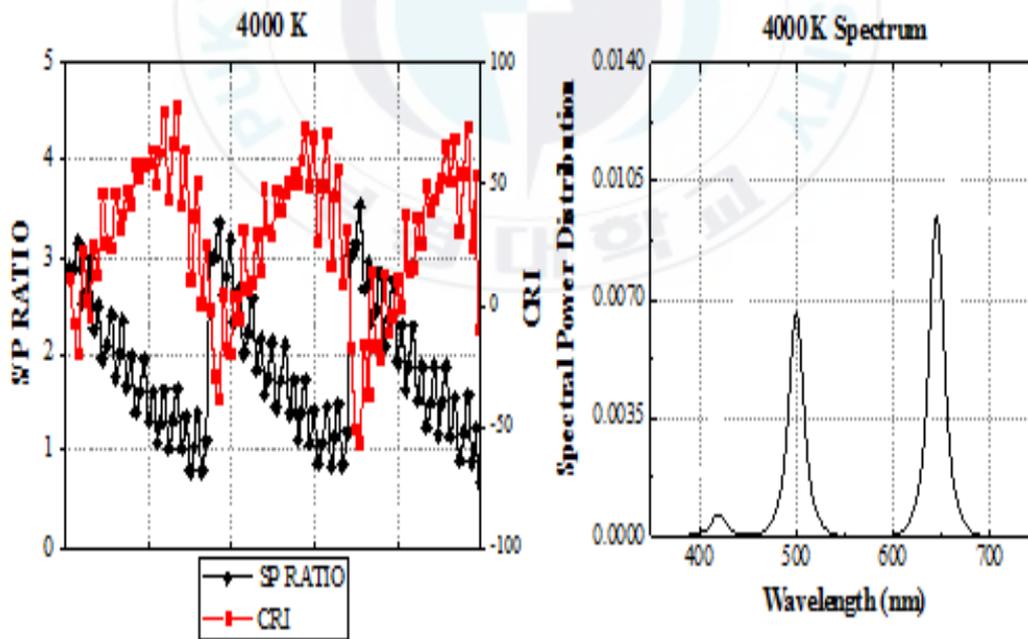


그림 4.18 CCT 4000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화

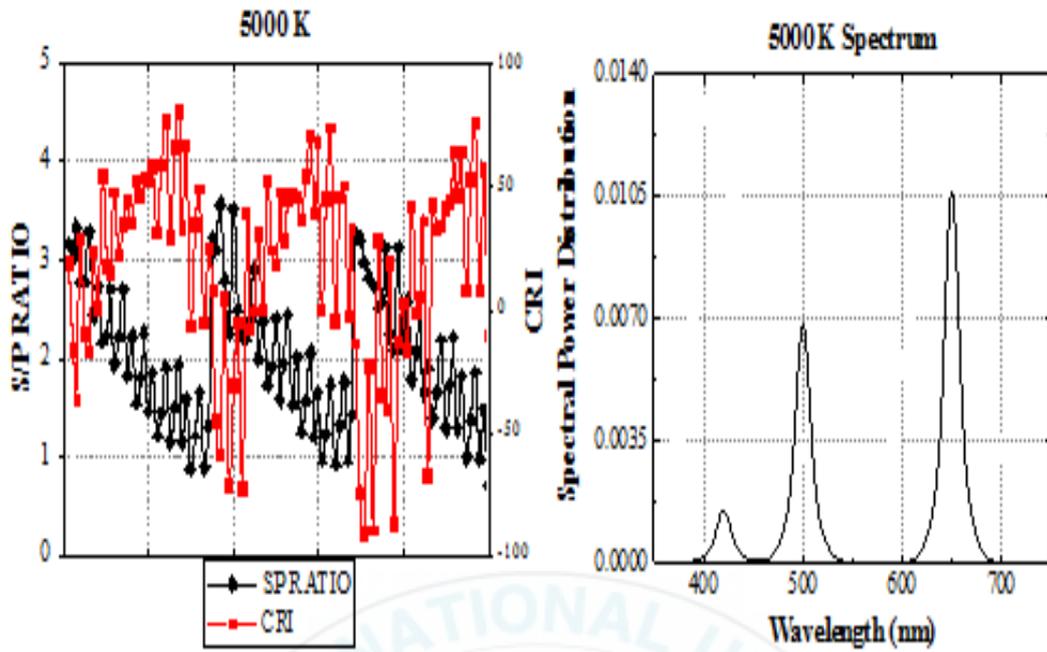


그림 4.19 CCT 5000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화

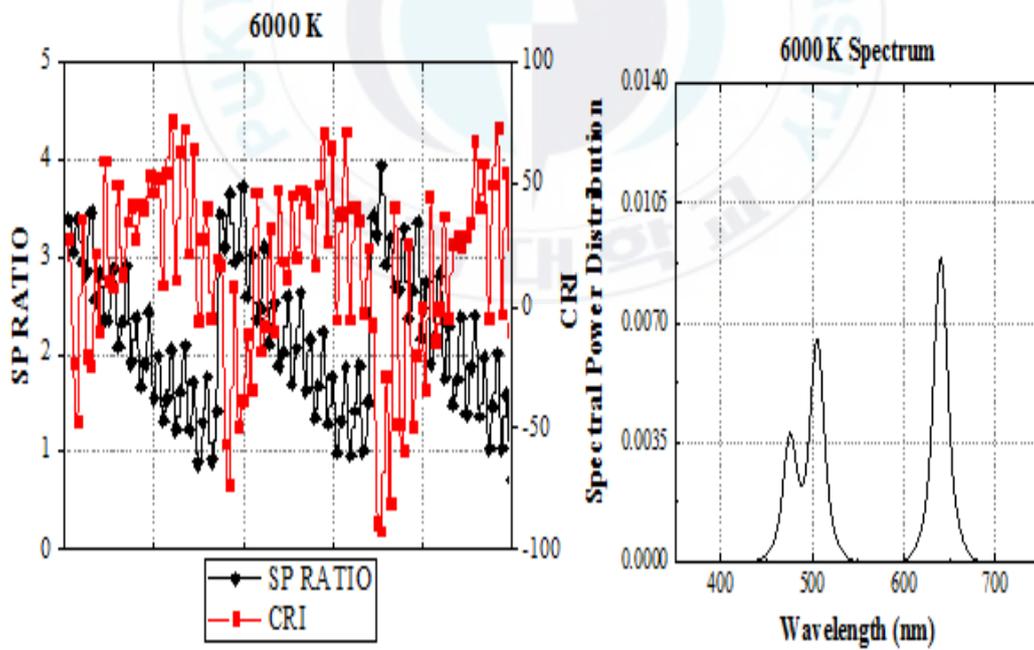


그림 4.20 CCT 6000 K에서 파장 이동에 따른 S/P ratio와 CRI 변화

## 4.2 RGBY PKG 스펙트럼 이동에 따른 광학 특성 변화

### 4.2.1 RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P Ratio 변화 I

Blue, Green, Red, Yellow LED의 반치전폭을 각각 20 nm, 10 nm, 50 nm, 20 nm에 설정하거, CCT 3000 K~6000 K의 범위에서 최고파장의 변화에 따른 S/P ratio 변화를 살펴보고자 한다.

스펙트럼과 S/P ratio 이동 방법은 ‘3.2.1 스펙트럼의 CCT, S/P ratio 시뮬레이션 방법’에서 제시한 순서와 동일하게 진행하였다.

그림 4.21은 Red LED 스펙트럼을 (620~650) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 모든 CCT에서 감소하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio는 감소하는 경향이 있다. S/P ratio는 전체적으로 2.3 이하로 나타난다.

그림 4.22는 Green LED 스펙트럼을 (520~550) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 모든 CCT에서 감소하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향이 있다.

그림 4.23은 Yellow LED 스펙트럼을 (570~600) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio는 증가한다.

그림 4.24는 Blue LED 스펙트럼을 (440~470) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio는 증가한다. S/P ratio는 6000 K에서 2.5까지 증가한다.

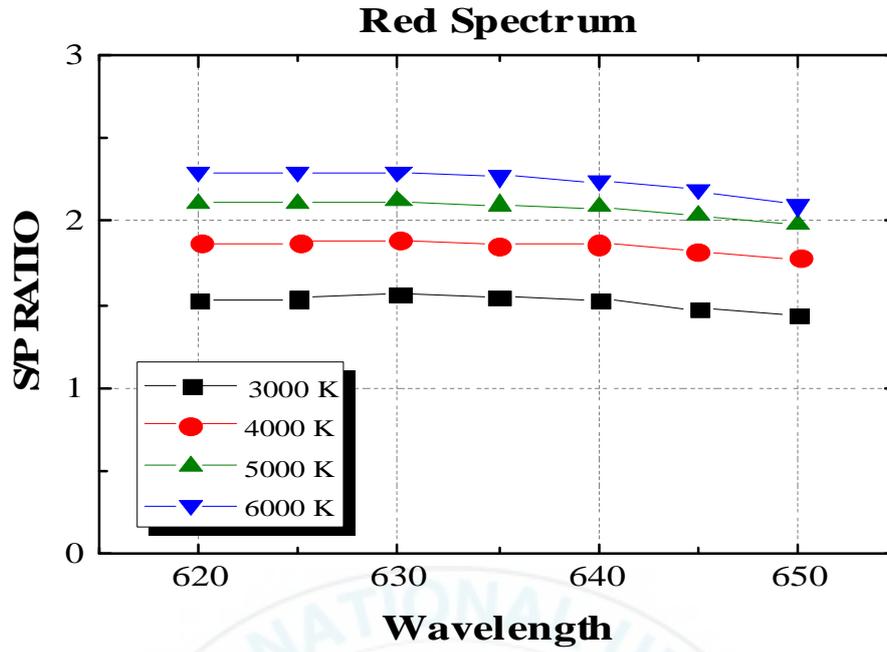


그림 4.21 RGBY LED, Red 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio

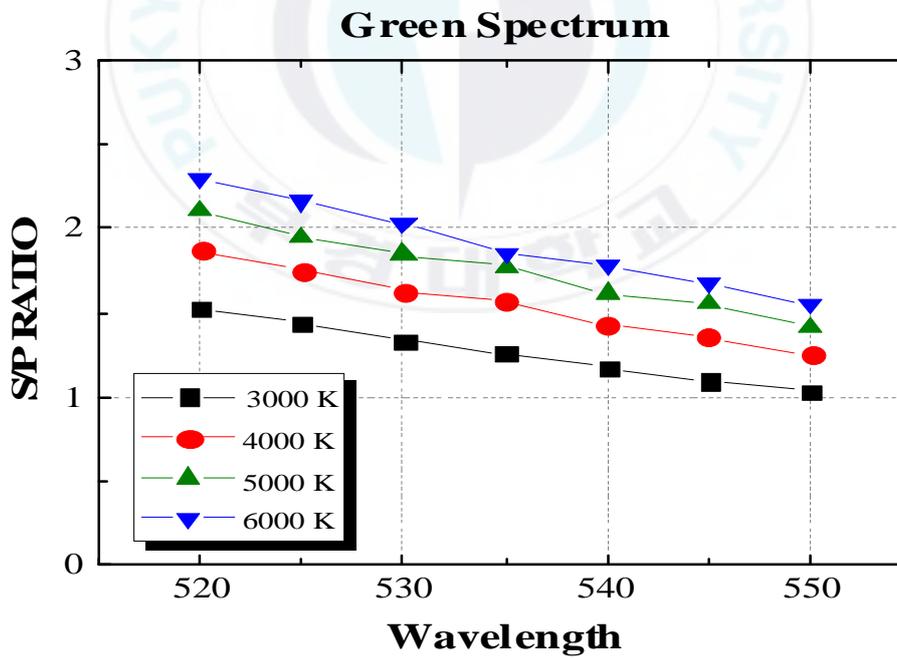


그림 4.22 RGBY LED, Green 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio

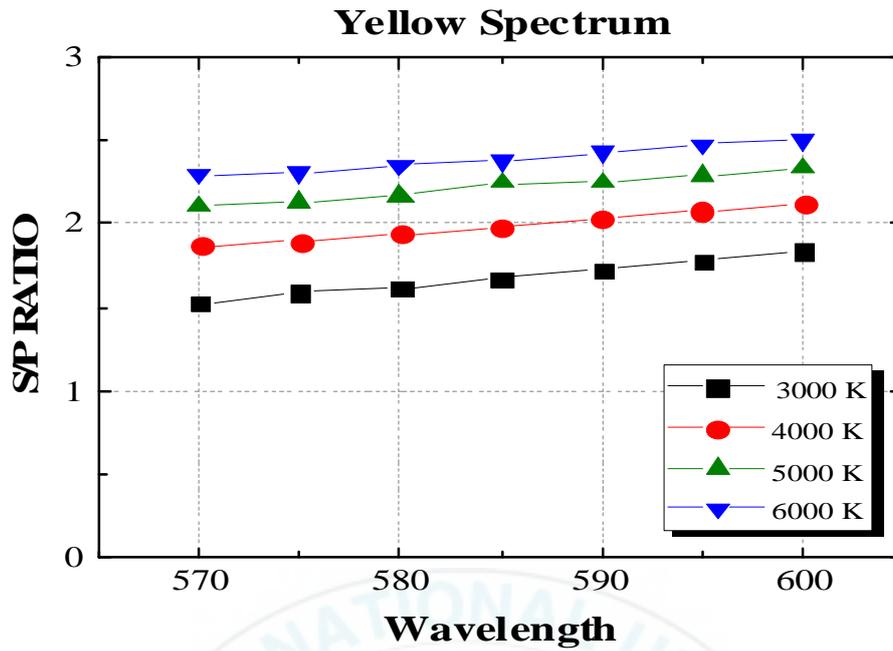


그림 4.23 RGBY LED, Yellow 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio

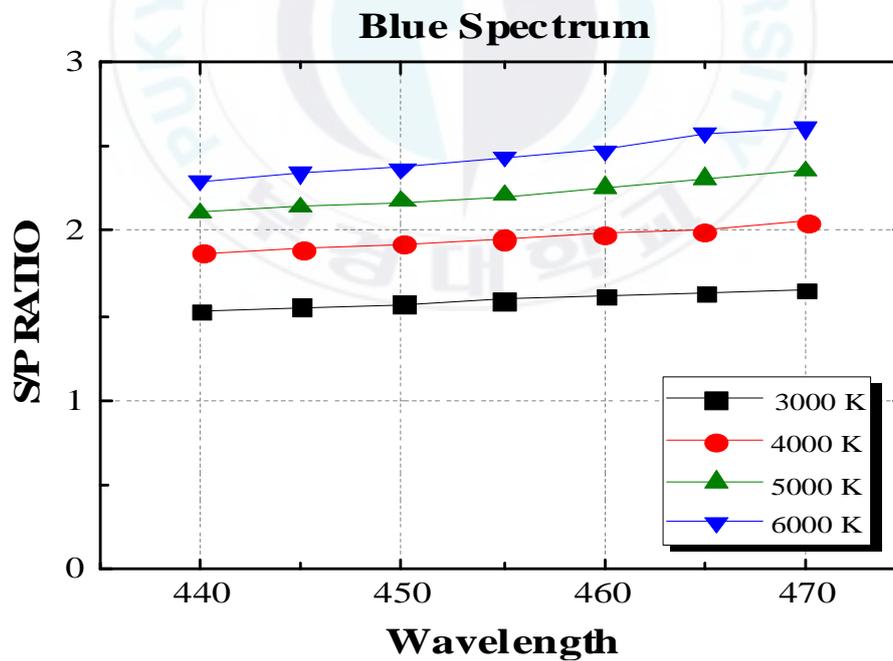


그림 4.24 RGBY LED, Blue 파장 이동에 따른 CCT별 S/P ratio

그림 4.25와 그림 4.26은, 그림 4.21에서 그림 4.24에 나타난 변화 중에서, CCT 3000 K 및 4000 K에서 RGBY 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 각각 나타낸 것이다. Green 및 Red 파장 이동에 따라 R/P ratio가 감소하고, Blue 및 Yellow 파장 이동에 따라 S/P ratio가 증가한다. Yellow 파장 이동에 따른 S/P ratio 증가가 가장 크다.

그림 4.27은 CCT 5000 K에서 RGBY 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 5000 K 또한 3000 K 및 4000 K에서와 비슷한 경향을 보이거나 Blue와 Yellow의 변화 정도가 비슷하다.

그림 4.28은 CCT 6000 K에서 RGBY 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 6000 K에서도 Green 및 Red 파장 이동에 따라 R/P ratio가 감소하고, Blue 및 Yellow 파장 이동에 따라 S/P ratio가 증가한다. Blue 파장 이동에 따른 S/P ratio 증가가 가장 크다.

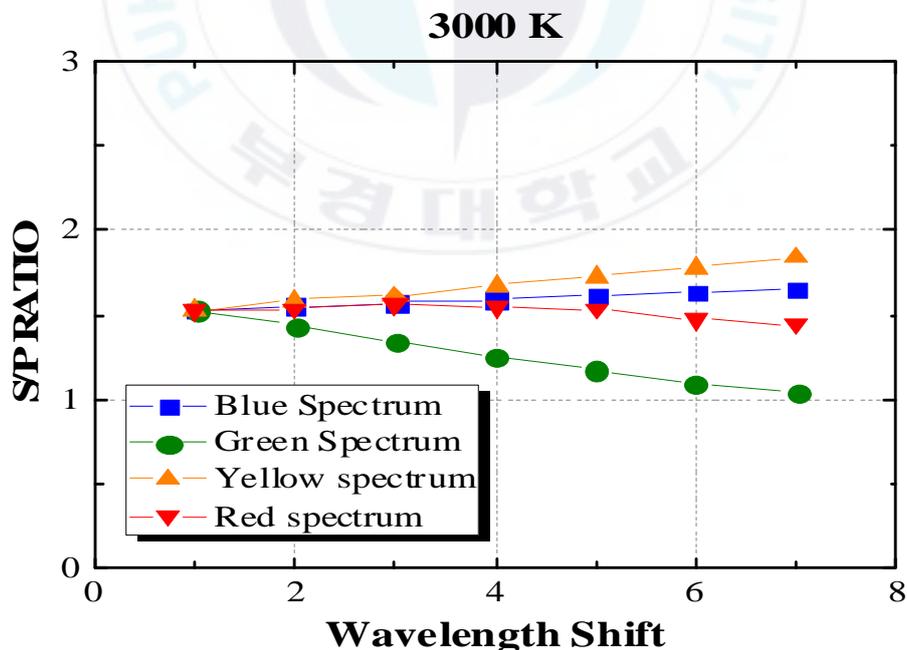


그림 4.25 CCT 3000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

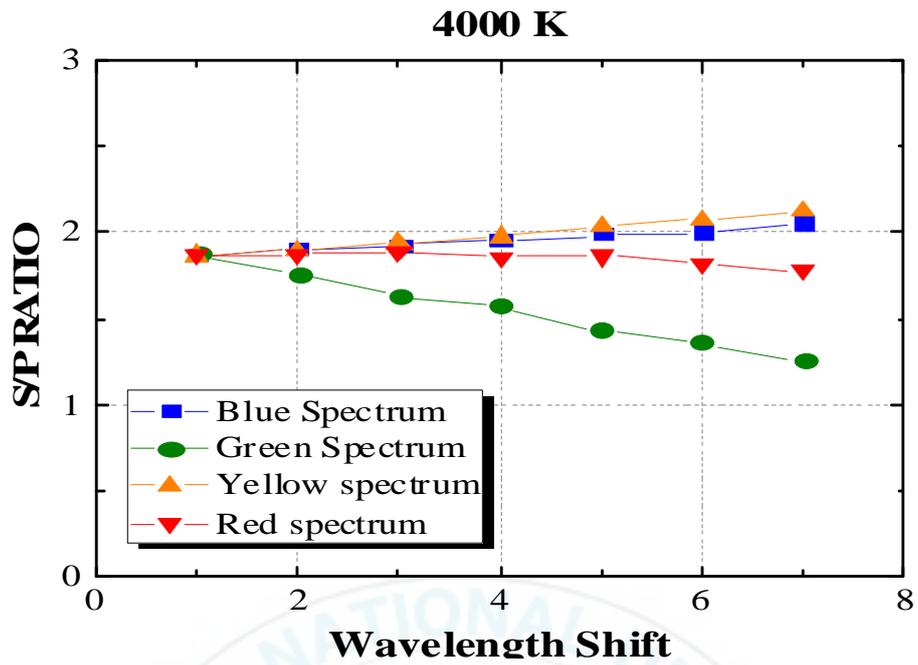


그림 4.26 CCT 4000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

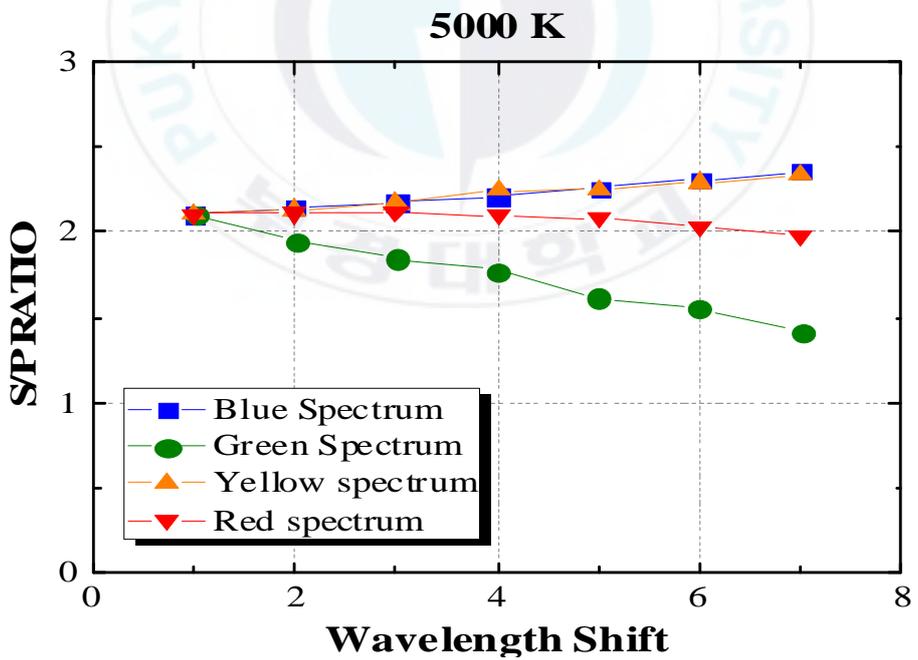


그림 4.27 CCT 5000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

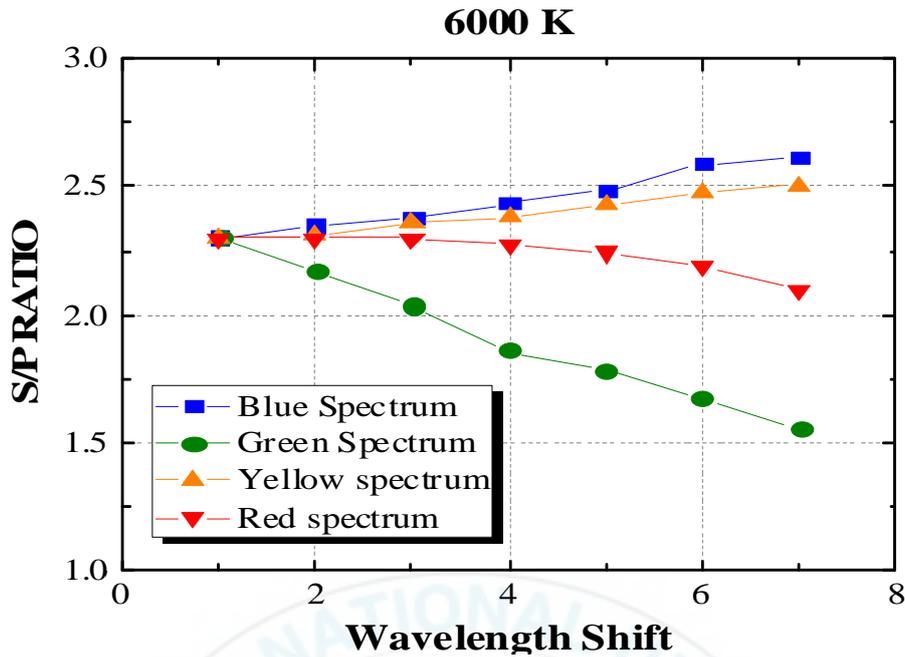


그림 4.28 CCT 6000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P ratio 변화를 각 스펙트럼 이동에 따라 살펴보았다. IES-TM-12-12에서 제시하고 있는 조명별 일반적인 S/P ratio 중에서 Warm white LED와 Cool white LED의 S/P ratio 값보다 15%~25% 높게 만들 수 있음을 확인하였다.

각 스펙트럼 이동에 따른 S/P ratio의 변화를 살펴보면, Red와 Green의 스펙트럼이 증가함에 따라 S/P ratio는 감소하고, 그 중 Green 파장 이동에 따른 S/P ratio 감소가 두드러진다. Blue와 Yellow는 스펙트럼이 증가함에 따라 S/P ratio의 값이 증가하는데, CCT에 따라 Blue 또는 Yellow 파장 이동에 따른 S/P ratio 증가 정도가 다르다.

## 4.2.2 RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P Ratio 변화Ⅱ

RGBY의 반치전폭을 각각 30 nm, 30 nm, 90 nm, 40 nm로 설정하고, CCT 3000 K~6000 K 범위에서 S/P ratio 변화를 각 스펙트럼 이동에 따라 살펴 보고자 한다.

그림 4.29는 반치전폭이 증가시킨 후 Red LED 스펙트럼을 (620~650) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 반치전폭이 증가하면 모든 CCT에서 S/P ratio가 감소하며, Red 파장의 증가에 따라서 S/P ratio가 감소하는 경향이 있다.

그림 4.30는 반치전폭을 증가시킨 후 Green LED 스펙트럼을 (520~550) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 반치전폭이 증가하면 모든 CCT에서 S/P ratio가 감소하며, Red 파장의 증가에 따라서 S/P ratio가 감소하는 경향이 있다.

그림 4.31은 반치전폭을 증가시킨 후 Yellow LED 스펙트럼을 (570~600) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 모든 CCT에서 S/P ratio는 증가하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio도 증가한다.

그림 4.32는 반치전폭을 증가시킨 후 Blue LED 스펙트럼을 (440~470) nm 범위에서 이동하였을 때 CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio를 비교한 것이다. 파장이 증가할수록 S/P ratio는 증가하는 경향을 보이고, CCT가 증가할수록 S/P ratio는 증가한다.

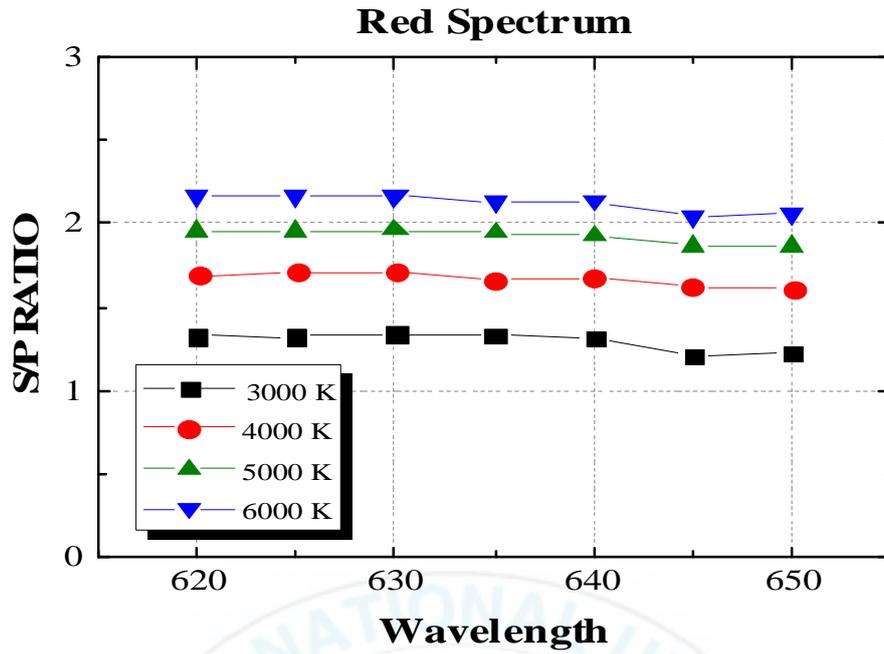


그림 4.29 Red 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화

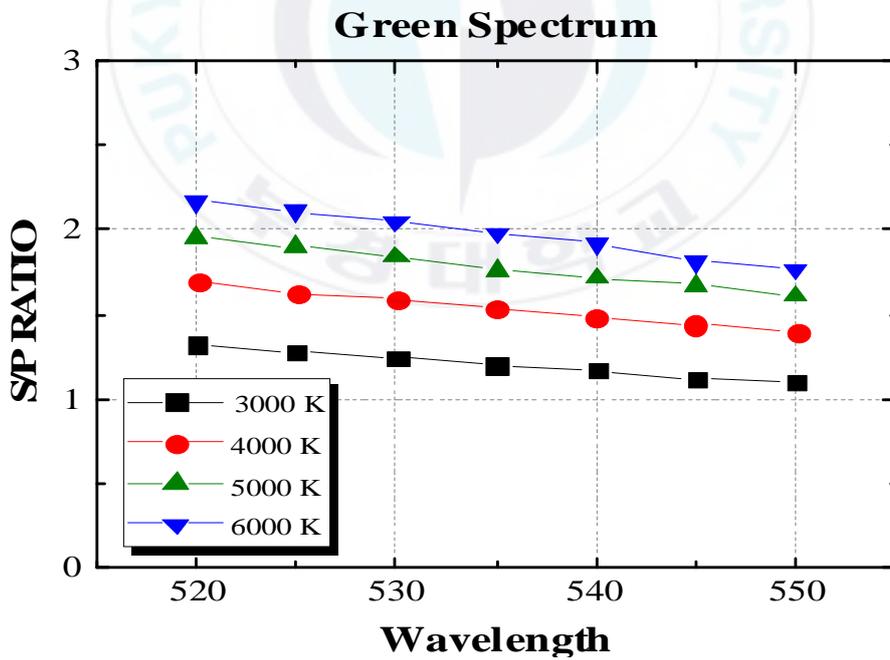


그림 4.30 Green 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화

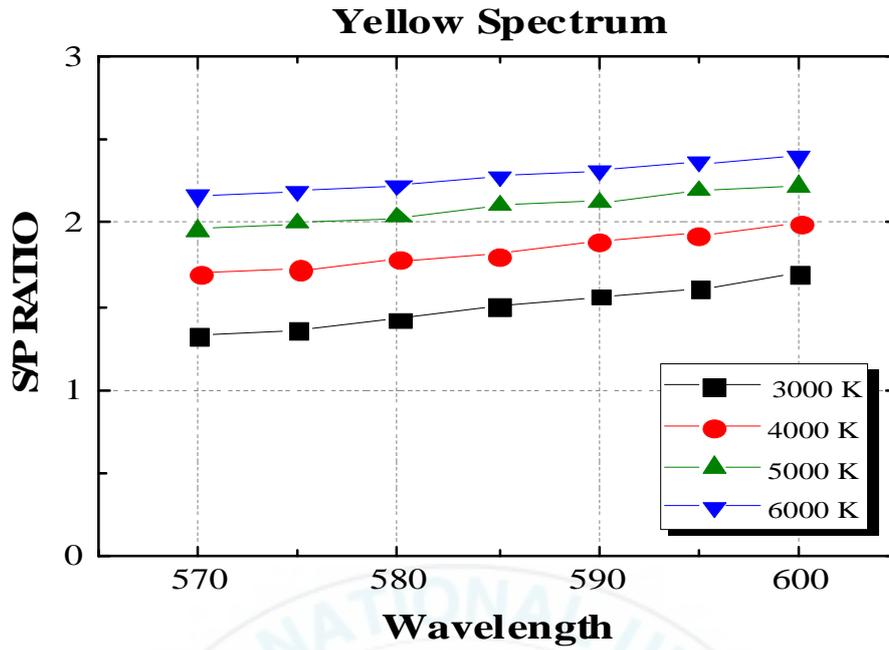


그림 4.31 Yellow 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화

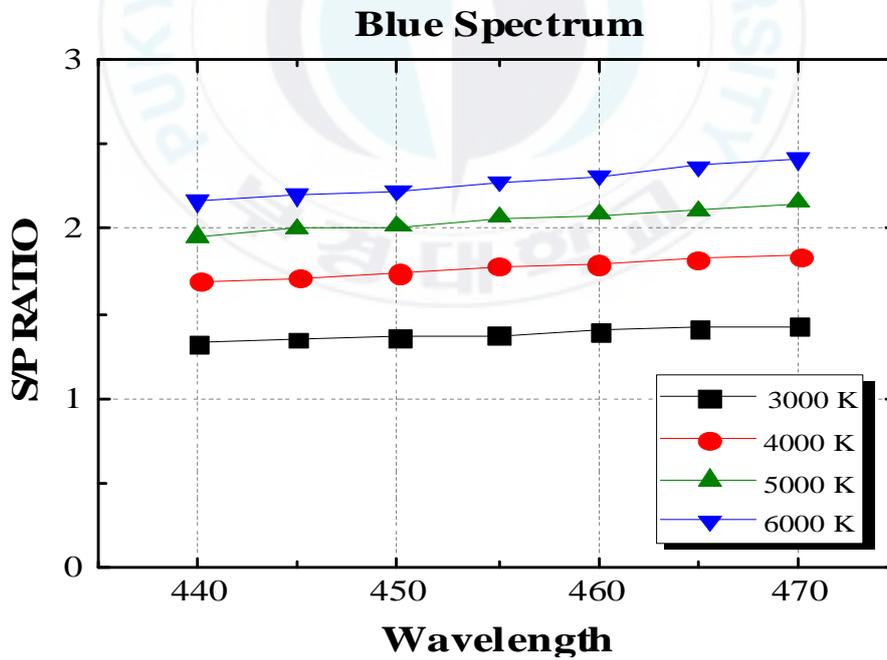


그림 4.32 Blue 스펙트럼 이동에 따른 CCT별 S/P ratio 변화

그림 4.33, 그림 4.34, 그림 4.35는, 그림 4.29에서 그림 4.32에 나타난 변화 중에서, CCT 3000 K, 4000 K, 5000 K에서 RGBY 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화 추이를 각각 나타낸 것이다. Green 및 Red 파장 이동에 따라 R/P ratio가 감소하고, Blue 및 Yellow 파장 이동에 따라 S/P ratio가 증가한다. Yellow가 Blue보다 파장 이동에 따른 S/P ratio 증가가 가장 더 크다.

그림 4.36은 CCT 6000 K에서 RGBY 파장별 파장 이동에 따른 S/P ratio의 변화 추이를 나타낸 것이다. 5000 K 또한 3000 K 및 4000 K에서와 비슷한 경향을 보이거나 Blue와 Yellow의 변화 정도가 비슷하다.

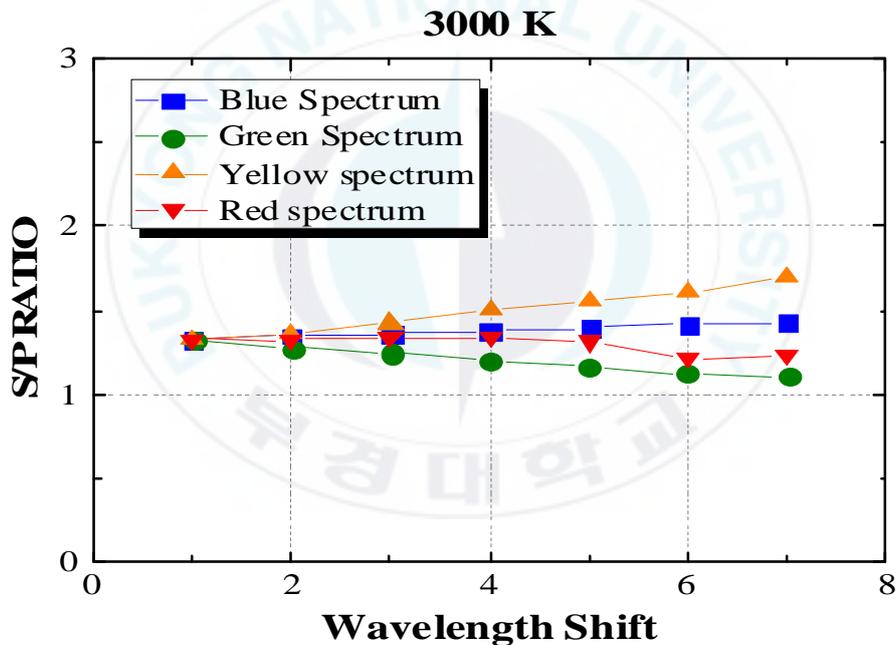


그림 4.33 CCT 3000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

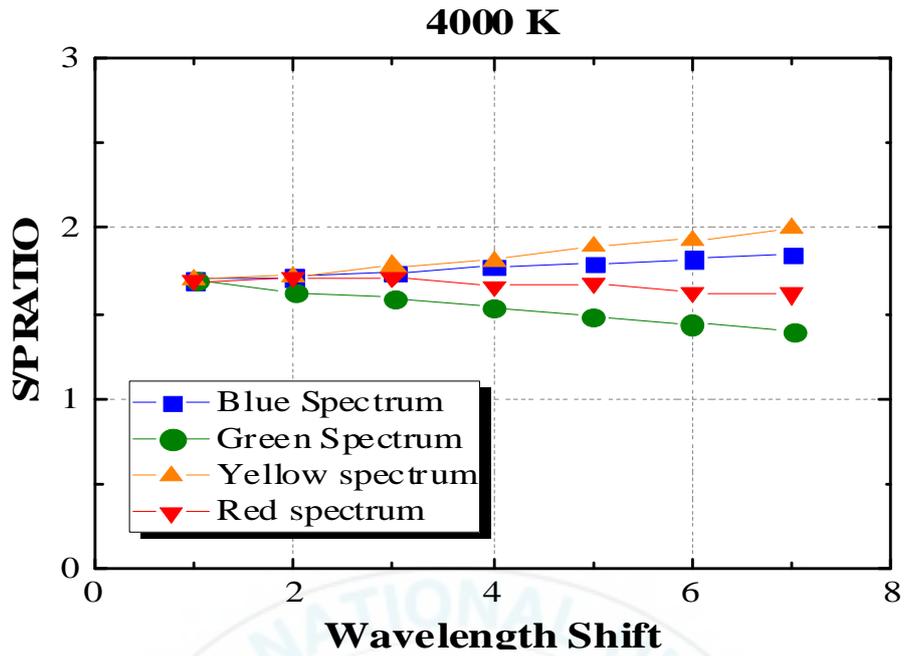


그림 4.34 CCT 4000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

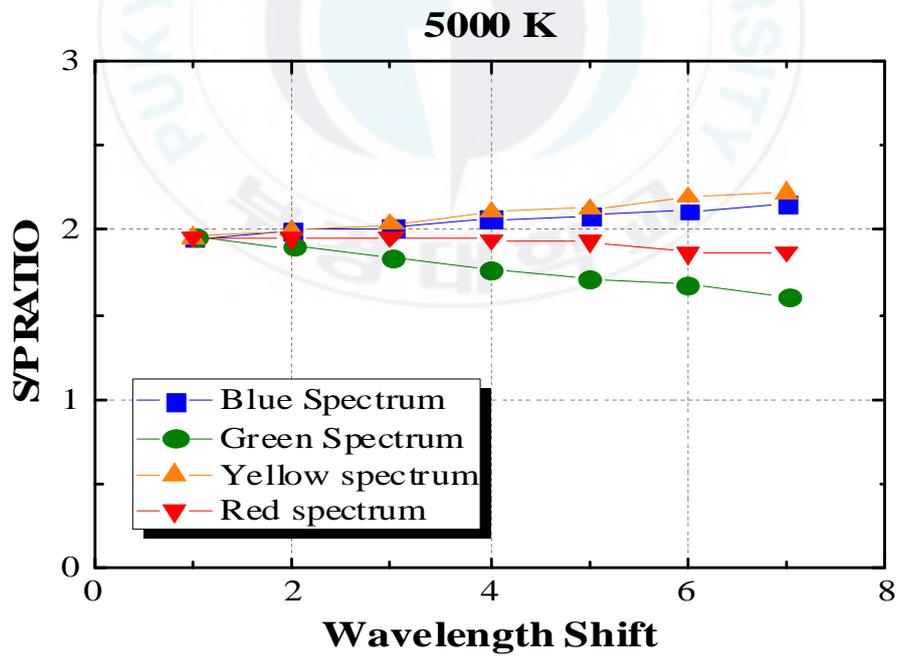


그림 4.35 CCT 5000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

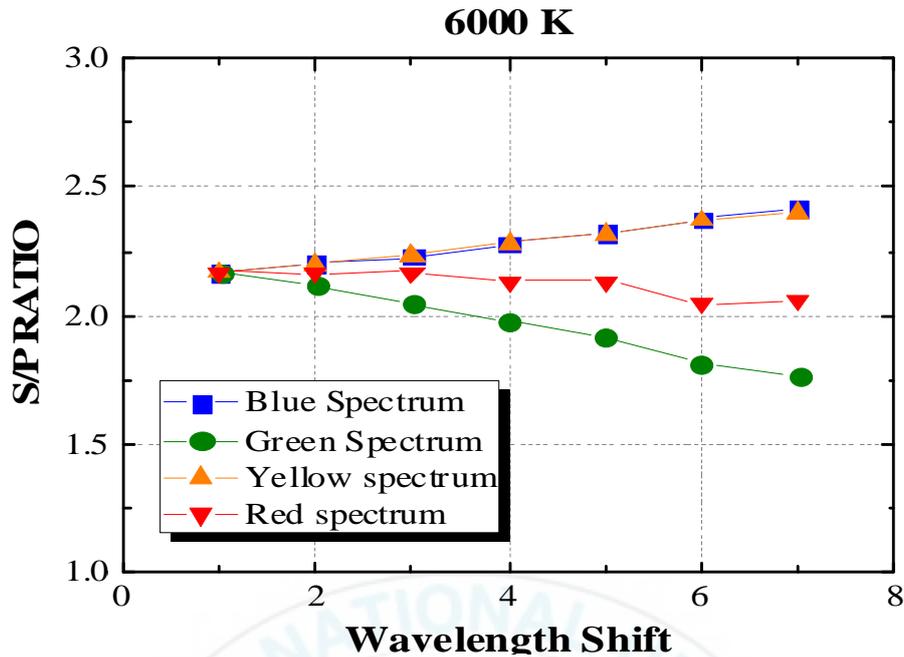


그림 4.36 CCT 6000 K, RGBY 파장 이동에 따른 S/P ratio 변화

본 논문 4.2.1 RGBY 스펙트럼 이동에 따른 S/P ratio 변화 I 에서 살펴본 바와 유사하게 S/P ratio의 값 변화와 비슷한 수준이었으며, 각 스펙트럼 변화에 따른 S/P ratio 값 또한 스펙트럼 증가에 따라 Blue, Yellow는 증가하고, Green, Red는 떨어지는 경향을 확인하였다.

#### 4.2.3 RGBY 개별 반치전폭 증가에 따른 S/P Ratio 변화

RGBY PKG의 개별 스펙트럼의 반치전폭 변화에 따른 S/P ratio 변화를 살펴보았다. RGBY LED의 반치전폭 변화 또한 ‘4.1.3 RGB 개별 반치전폭 변화에 따른 S/P ratio 변화’와 유사한 방법으로 수행하였다.

그림 4.37은 Blue와 Yellow의 반치전폭을 60 nm, 30 nm에 각각 고정하고, Red LED의 반치전폭을 20 nm에서 30 nm로, Green LED의 반치전폭을 10 nm에서 20 nm로 증가시켰을 때 S/P ratio의 변화를 나타낸 것이다. 반치전폭을 모두 증가시켰을 때 S/P ratio의 값은 가장 작게 나타난다.

그림 4.38은 Blue와 Yellow의 반치전폭을 80 nm, 20 nm에 각각 고정하고, Red LED의 반치전폭을 20 nm에서 30 nm로, Green LED의 반치전폭을 10 nm에서 20 nm, 30 nm로 증가시켰을 때 S/P ratio의 변화를 나타낸 것이다. Red 반치전폭 증가에 따른 영향은 거의 없다. 그림 4.37과 마찬가지로 반치전폭을 모두 증가시켰을 때 S/P ratio의 값은 가장 작게 나타난다.

그림 4.39는 Red와 Green의 반치전폭을 30 nm, 10 nm에 각각 고정하고, Blue LED의 반치전폭을 50 nm, 60 nm, 80 nm, 90 nm로, Yellow LED의 반치전폭을 20 nm에서 30 nm, 40 nm로 증가시켰을 때 S/P ratio의 변화를 나타낸 것이다. Yellow와 Blue 반치전폭 증가에 따라 S/P ratio가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4.40는 Red의 반치전폭을 30 nm에 고정하고, Green의 반치전폭을 10 nm에서 20 nm, 30 nm로, Blue LED의 반치전폭을 50 nm, 60 nm, 80 nm, 90 nm로, Yellow LED의 반치전폭을 20 nm에서 30 nm, 40 nm로 증가시켰을 때 S/P ratio의 변화를 나타낸 것이다. Blue 증가에 따른 S/P ratio는 영향이 없으나, Green 반치전폭 증가에 따른 영향이 가장 크게 나타난다.

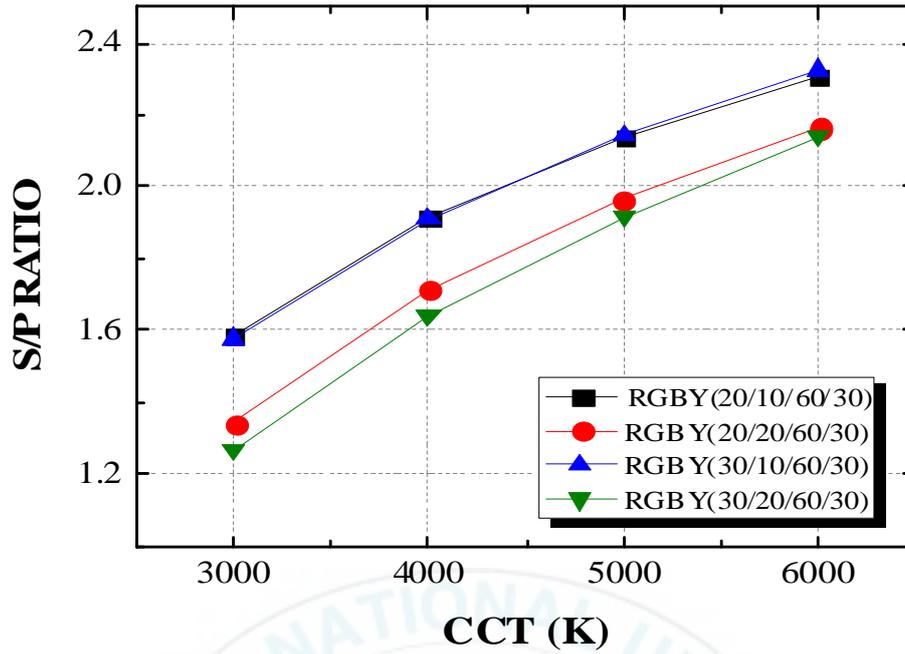


그림 4.37 Red, Green 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 I

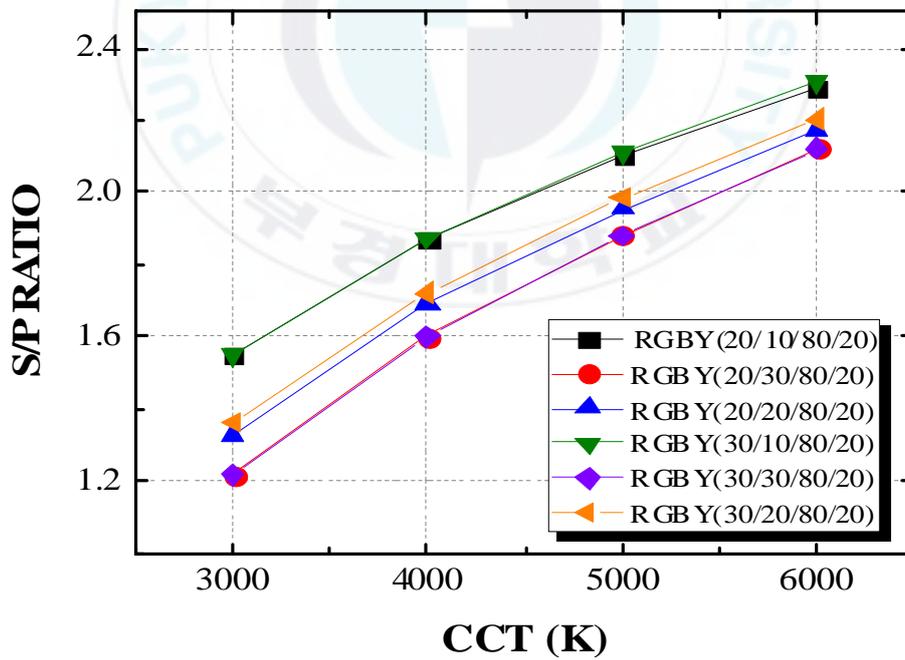


그림 4.38 Red, Green 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화 II

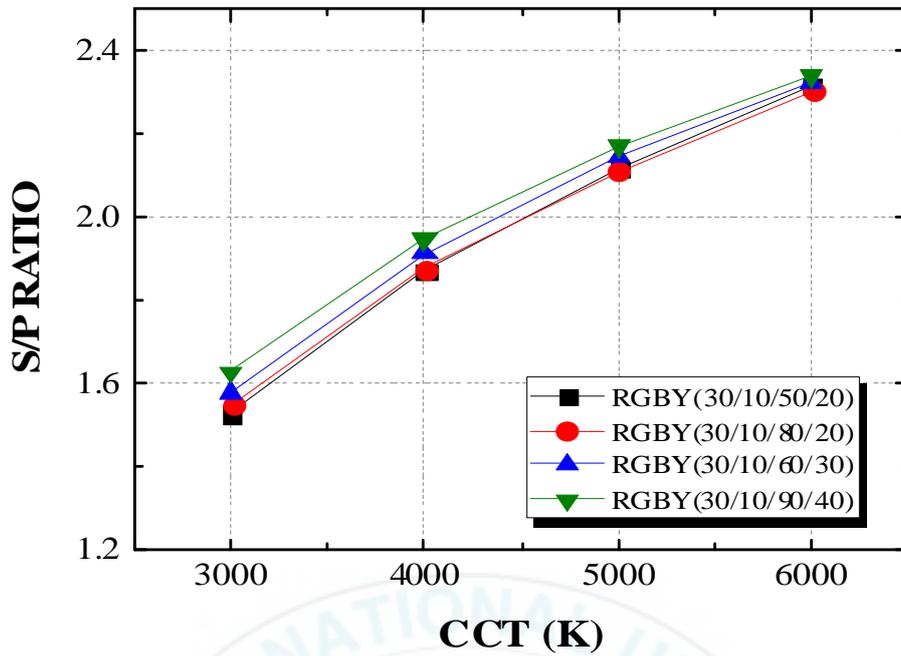


그림 4.39 Blue, Yellow 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화

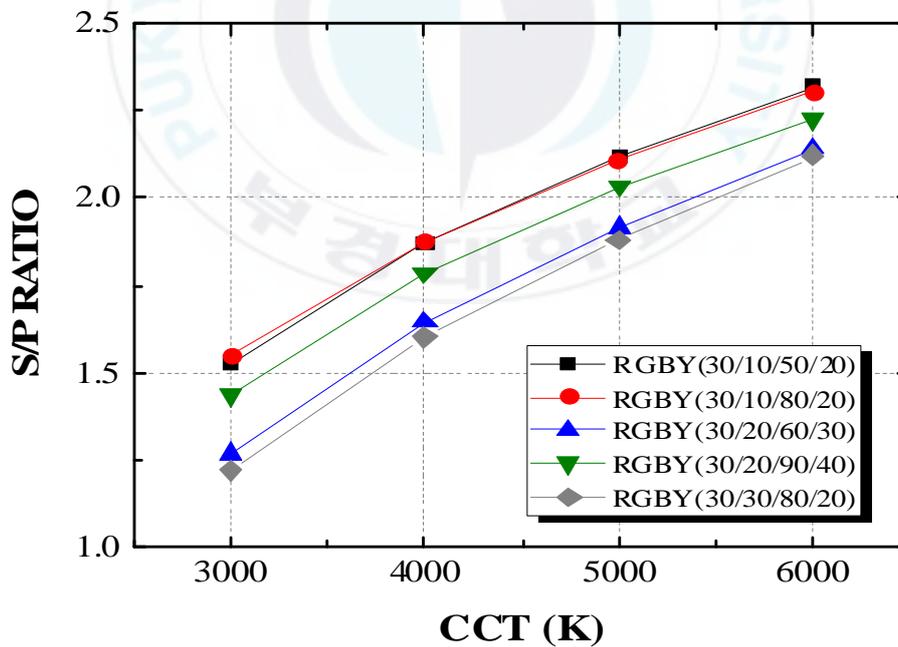


그림 4.40 Green, Blue, Yellow 반치전폭 증가에 따른 S/P ratio 변화

#### 4.2.4 CCT별 S/P Ratio 변화에 따른 CRI 변화

RGBY 스펙트럼 변화를 통해 색온도별로 S/P ratio 변화와 CRI 변화 관계를 살펴보고자 한다. 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따라  $R_1 \sim R_8$ 을 각각 계산하여 평균한  $R_a[20]$ 를 이용하여, S/P ratio와 CRI 변화를 시뮬레이션하고 그 결과를 그림 4.41에서 4.44에서 비교하였다. 이때 RGBY 스펙트럼의 반치전폭은 각각 20nm, 10 nm, 50 nm, 20 nm이어서 CCT별 S/P ratio의 변화를 살펴보았다.

그림 4.41에서 3000 K에서는 연색성이 60~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.1에서 1.9까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향의 상관관계는 나타나지 않는다.

그림 4.42에서 4000 K에서는 연색성이 55~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.3에서 2.3까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향의 상관관계는 나타나지 않는다.

그림 4.43에서 5000 K에서는 연색성이 40~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.6에서 2.6까지 변화하는 것을 확인하였으며, 일부 구간을 제외하면 그 변화의 방향성이 나타난다.

그림 4.44에서 6000 K에서는 연색성이 20~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.5에서 2.7까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향은 동일하다.

따라서 CCT가 증가할수록 최고파장 이동에 따른 S/P ratio 및 CCT의 변화가 점차 증가하는 비례 관계가 있음을 확인하였고, 이는 앞서 S/P ratio와 CRI가 반비례 관계인 RGY 3색 LED를 사용하는 경우와는 다르게 일부에서만 S/P ratio와 CRI의 비례관계가 나타난다.

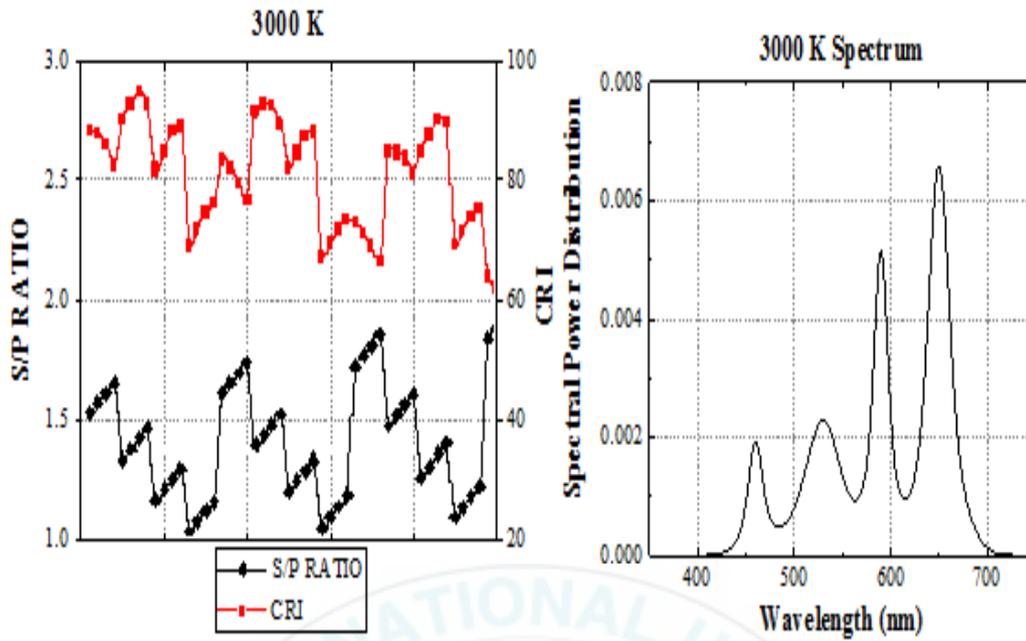


그림 4.41 CCT 3000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 20/10/50/20)

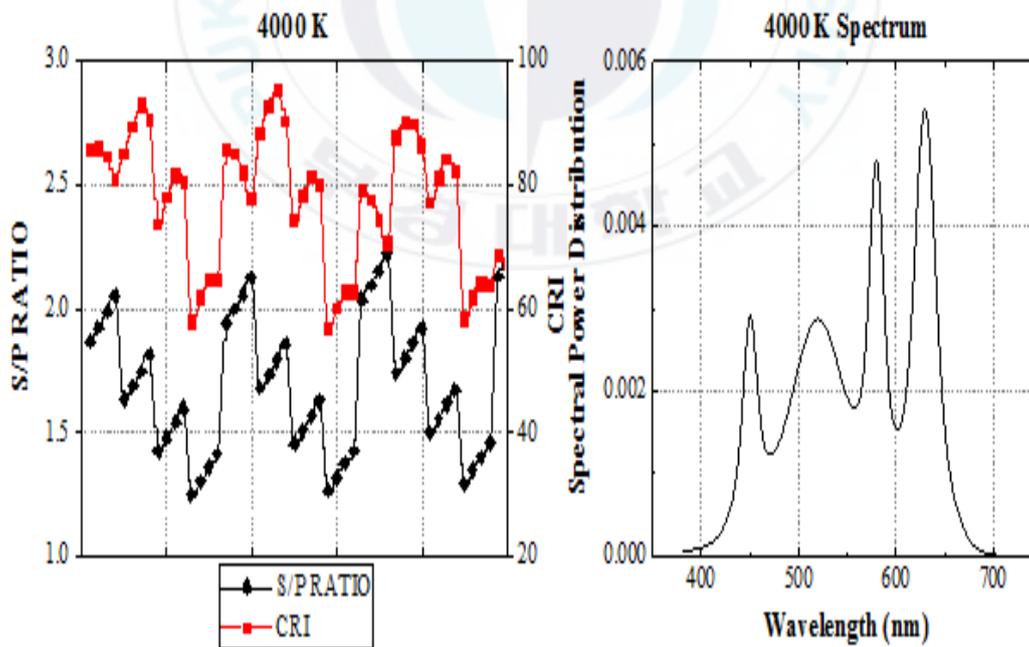


그림 4.42 CCT 4000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 20/10/50/20)

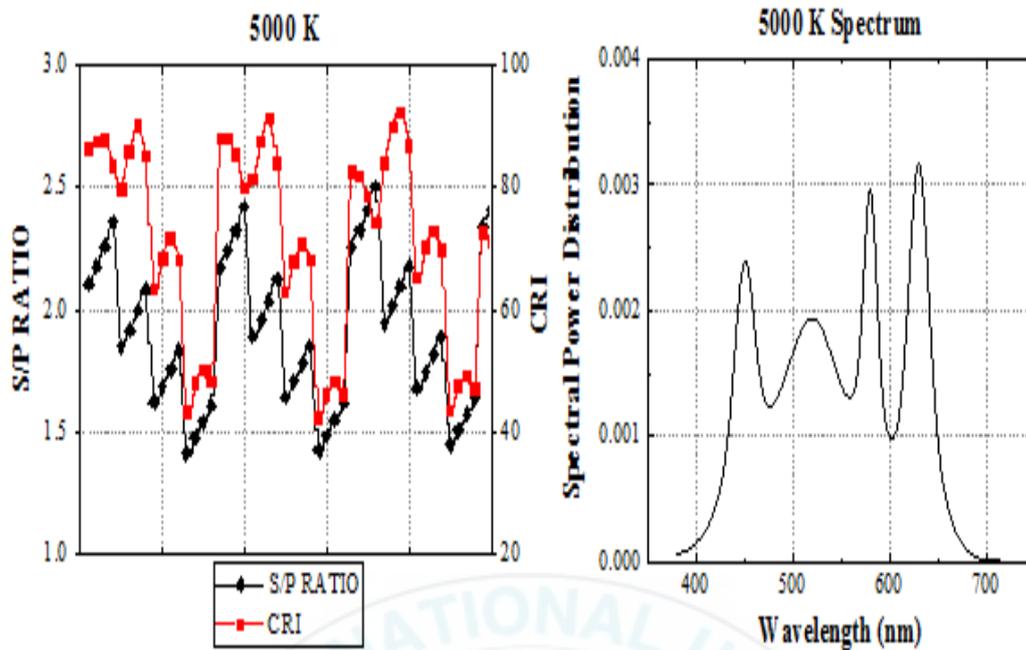


그림 4.43 CCT 5000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 20/10/50/20)

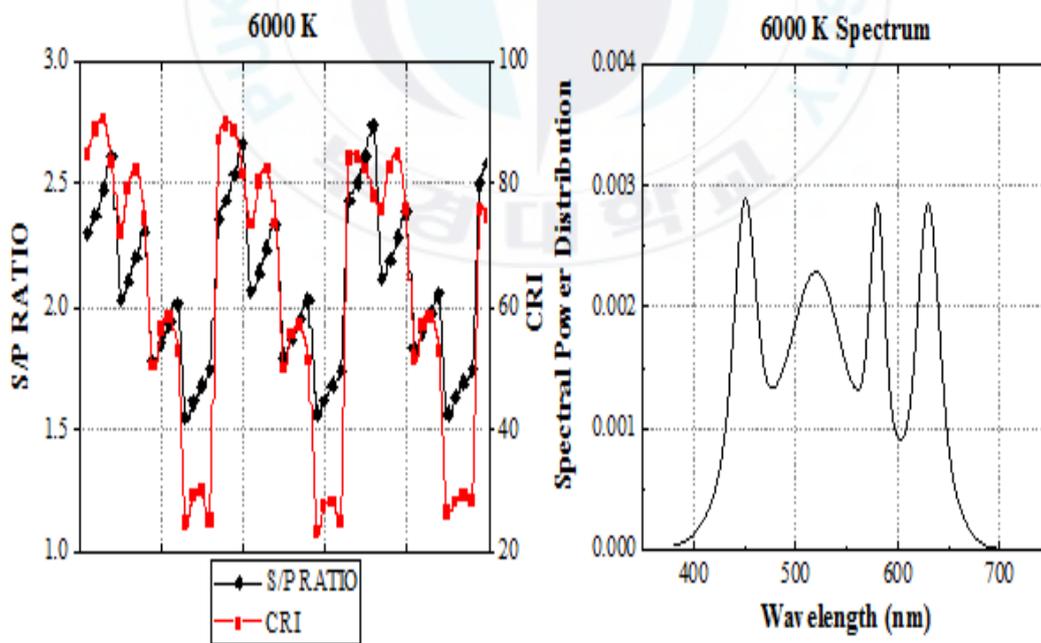


그림 4.44 CCT 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 20/10/50/20)

그리고 RGBY 스펙트럼의 반치전폭은 각각 30 nm, 30 nm, 90 nm, 40 nm로 증가시킨 후 CCT별 S/P ratio의 변화를 살펴보았다.

그림 4.45에서 3000 K에서는 연색성이 62~82까지 변화할 때 S/P ratio는 1.1에서 1.8까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향은 동일하다.

그림 4.46에서 4000 K에서는 연색성이 60~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.4에서 2까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향은 동일하다.

그림 4.47에서 5000 K에서는 연색성이 50~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.6에서 2.3까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향은 동일하다.

그림 4.48에서 6000 K에서는 연색성이 40~90까지 변화할 때 S/P ratio는 1.7에서 2.5까지 변화하는 것을 확인하였으며, 그 변화의 방향은 동일하다.

따라서 CCT가 증가할수록 최고파장 이동에 따른 S/P ratio 및 CCT의 변화가 점차 증가하는 비례 관계가 있음을 확인하였고, 이는 앞서 S/P ratio와 CRI가 반비례 관계인 RGB 3색 LED를 사용하는 경우와는 반대의 경향이 나타남을 확인하였다.

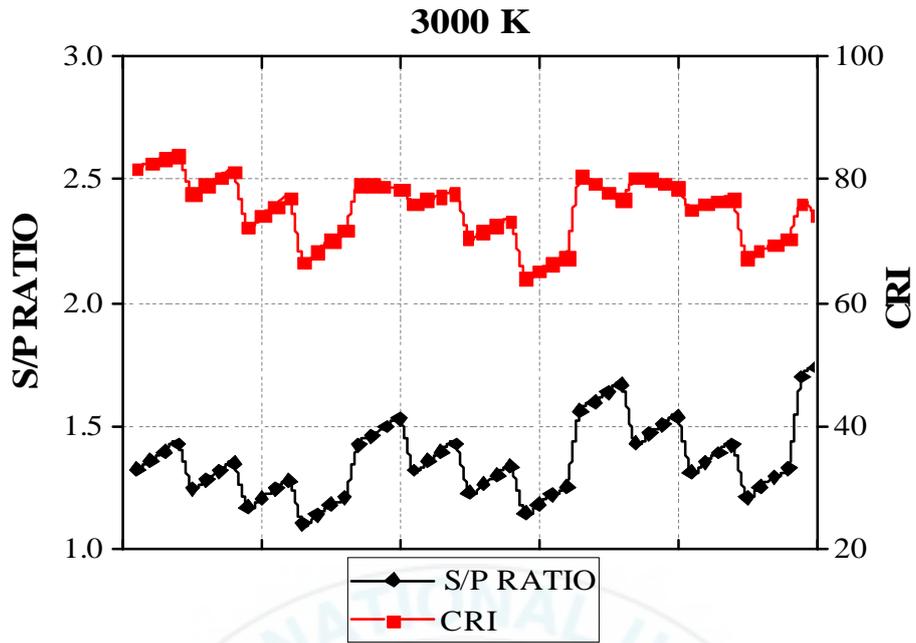


그림 4.45 CCT 3000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 30/30/90/40)

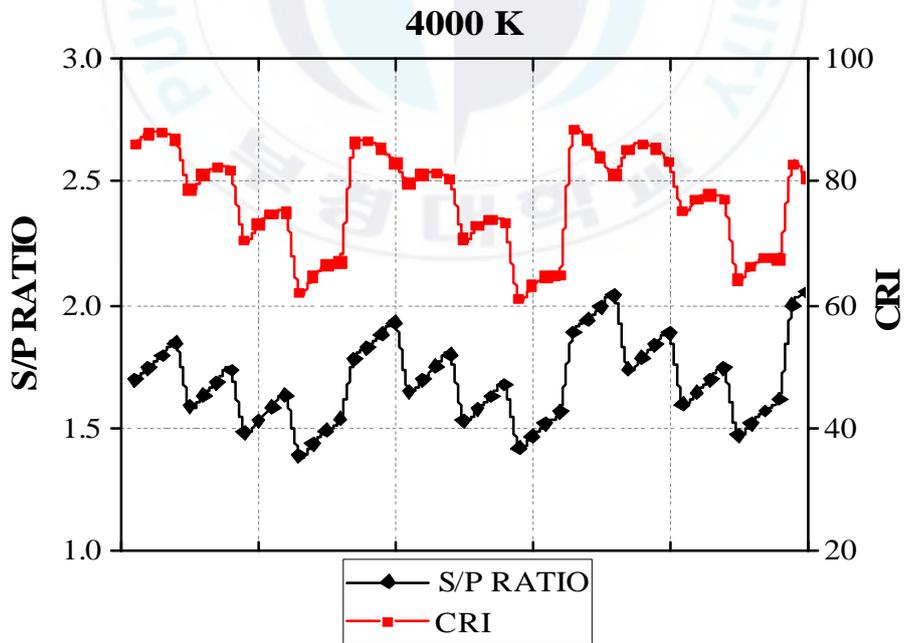


그림 4.46 CCT 4000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 30/30/90/40)

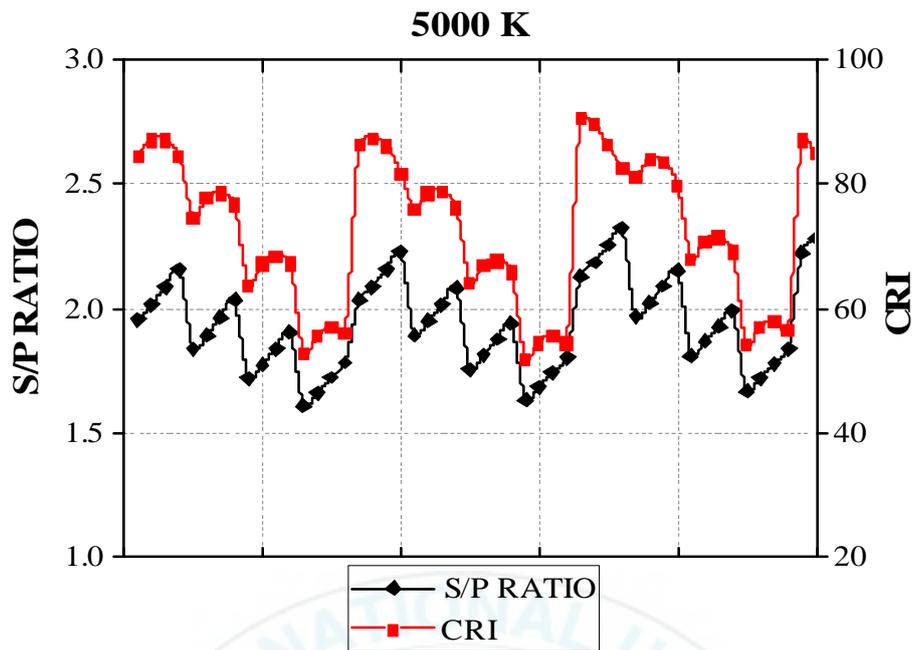


그림 4.47 CCT 5000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 30/30/90/40)

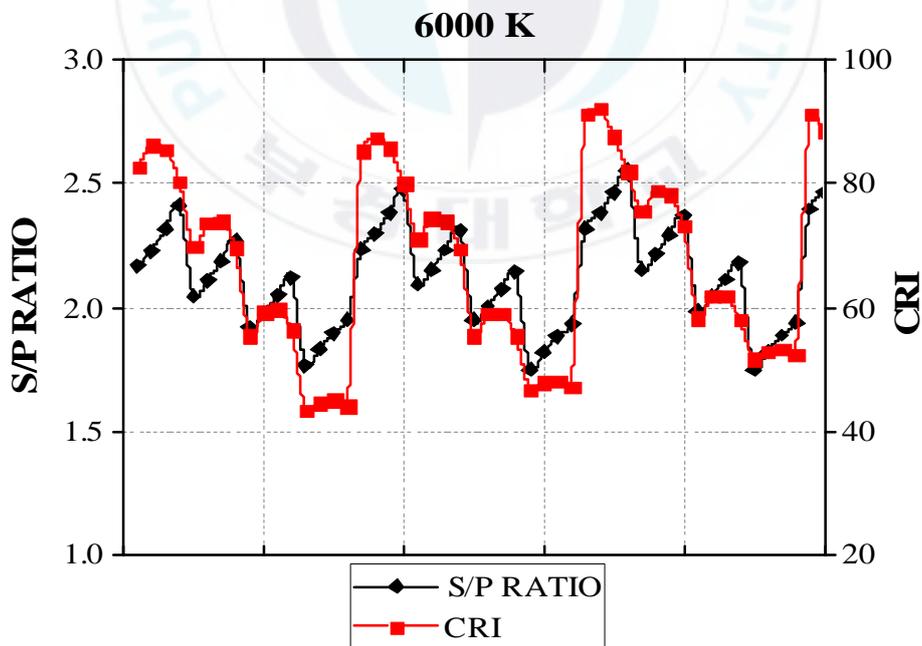


그림 4.48 CCT 6000 K에서의 S/P ratio 변화에 따른 CRI 변화  
(반치전폭 30/30/90/40)

## 제 5 장 결 론

국내에서는 LED조명에서 광속과 CRI는 중요한 선택 기준이다. 그러나 유럽, 미국 등 선진국에서는 인간의 신체적, 정신적인 기능을 중요시 여겨 이를 법적으로 제안하고, 규제하고 있다. 본 연구에서는 야간 조명과 인간의 신체적 기능에 적합한 조명을 설계하는 방법에 대하여 연구하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 관찰자가 어두운 휘도, 즉 박명시(Mesopic vision) 휘도 영역에서 눈의 피로가 가장 적고 밝게 볼 수 있는 조명 제작을 위해서는 형광체 도포의 LED를 사용하는 것보다 RGB PKG 혹은 RGBY PKG를 사용하는 것이 효과적이다.
2. RGB 스펙트럼 변화를 사용하여 전산모사하였을 때, CCT 3000 K에서 S/P ratio는 3.2, 4000 K부터 4, 5000 K에서 4.3, 6000 K에서 4.5로 계산되었으며, CRI는 음수(-)로 계산되므로, S/P ratio와 CRI는 Trade-off 관계이다.
3. RGBY 스펙트럼 변화를 사용하여 전산모사하였을 때, CCT 3000 K에서 S/P ratio는 1.8, 4000 K에서 2.1, 5000 K에서 2.4, 6000 K에서 2.7로 계산되었으며, CRI는 최소 40에서 90으로 계산되었다.

RGB 및 RGBY PKG를 활용하여 LED조명을 제작하였을 때, 관찰자의 박명시 휘도 상황에서 최적의 조명으로 사용이 가능하다. 이는 야간에 사용하는 도로조명과 군사용, 야간경계근무에 사용되는 조명으로 발전가능성이 높으며, 제품화하여 적합한 S/P ratio와 CRI의 선정, 시인성 평가에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 향후 실제 제품 제작, 평가 결과를 제시할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Hwang Young-geun, "The development of lighting technology and the prospect of LED lighting," Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 41-45, 2010. 7.
- [2] Yoon, Gab-Geun, Kang, Kyoung-Won and Jung, Sa-Hee, "Effects psychological response light & color - Focusing on experimental application of 3D Image," Korean Institute of Interior Design Journal, Vol. 14, No. 3, 2005. 6.
- [3] Lee Jin-woo, "빛의 지각과 빛에 관련된 심리," the Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 16, No. 8, pp. 39-46, 2002. 8.
- [4] Cho Sook-hyun, "Calculation and regulation proposal of light pollution from road lightings," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 25, No. 12, pp. 21-26, Dec. 2011,
- [5] Min-Wook Lee, "Criterion of LED luminaire selection according to road composition and installing condition," Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2015. 5.
- [6] Hyeon-Seok Choi, Seong-Sik Yoo and Hoon Kim, "The comparison of Mesopic vision luminance for lamp variation," Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2015. 5.
- [7] Yoon Chul Lee, Sung Gi Chae, Seung Hyun Park, Kang Ho Kim, Uh Chan Ryu, Nam Hwang and Yong Ick Cho. "A evaluation technology based on Mesopic vision for roadway luminaires," Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2010. 9.
- [8] IES TM-12-12, "Spectral effects of lighting on visual performance at Mesopic light levels," Illuminating Engineering Society, 2012.
- [9] LIA TS-24:2013, "S/P ratios and Mesopic vision," Technical Statement of Lighting Industry Association, Issue 1, 2013.
- [10] OSRAM, "LED fundamentals Mesopic vision," 2014. 3.

- [11] 서울대학교병원, “눈,” 서울대학교병원 신체기관 정보. <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=938671&mobile&cid=51006&categoryId=51006>.
- [12] 신무환, 김재필, “Advanced LED Package Technology,” Bookshill, 2013.
- [13] Wiliam David Wright, “A re-determinaltion of the trichromatic coefficients of the spectral colours,” Transactions of the Optical Society, Vol. 30, No. 4, pp. 141-164, 1928-1929.
- [14] Thomas Smith and John Guild, “The CIE colorimetric standards and their use,” Transactions of the Optical Society, Vol. 33, No. 3, pp. 73-134, 1931-1932.
- [15] W. S. Stiles and J. M. Burch, “NPL colour matching investigation: final report,” Optical Acta, 6, pp. 1-26, 1958.
- [16] N. I. Speranskaya, “Determination of spectrum color coordinates for twenty seven normal observers,” Optics and Spectroscopy, Vol. 7, 1959.
- [17] A. C. Harris and I. L. Weatherall, “Objective evaluation of colour variation in the sand-burrowing beetle Chaerodes Trachyscelides White (Coleoptera:Tenebrionidae) by instrumental determination of CIELAB values,” Journal of the Royal Society of New Zealand, Vol. 20, No. 3, Sep. 1990.
- [18] R. H. Simons and A. R. Bean, “Lighting Engineering, Applied calculation,” Architectural Press, Oxford, 2001.
- [19] Yoshi Ohno, “Spectrum design considerations for white LED color rendering,” Optical Engineering, Vol. 44, No. 11, Nov. 2005.
- [20] Ronald van Triest, “Outdoor Lighting,” Ellipz Lighting Outdoor General, from <http://www.slide.net>, Oct. 2014.
- [21] Hyeong-Seob Jo, Hee-Seong Yang and Uh-Chan Ryu, “Study on CRI and CCT variations of LED lightings according to RGB color changes of multi-chip LEDs,” Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2015. 11.
- [22] Hyeong-Seob Jo and Uh-Chan Ryu, “Study on optical characteristic variations according to spectrum changes of RGBY multi-chip LEDs,” Proceedings of KIIEE Annual Conference, 2016. 11.

# Study on Relation of Spectral Characteristics and S/P Ratio of LED Lightings.

Jong Oh Kim

Department of LED Convergence Engineering,  
Specialized Graduate School Science & Technology Convergence,  
Pukyong National University

## Abstract

Since LED lightings were presented as new lighting technologies, researches have been performed on the photopic vision, the scotopic vision and the mesopic vision under the LED lightings. The S/P ratios of the warm and the cool white LEDs are 1.2 and 2.04, respectively, as specified in the IES-TM12-12. In this paper, the S/P ratios in the CCT range of 3000 K to 6000 K are simulated according to the changed of the spectral characteristics such as peak wavelengths and full widths at half maximum of RGB 3-chip and RGBY 4-chip LEDs.

Spectral power densities of RGB and RGBY LEDs were generated by the Gaussian distribution composed of peak wavelength and full width at half maximum. As scanning the peak wavelengths of RGB and RGBY SPDs, CRIs and S/P ratios were simulated. And also the full width at half maxima increased by some proportions to make changes in S/P ratio. Thus, the variations of S/P ratio and CRI were represented from the simulation results.

As results in warm white regions(CCT 3,000 K and 4,000 K), RGB LEDs showed S/P ratio of 3.2 and 4, respectively. In cool white regions(CCT 5,000 K and 6,000 K), RGB LEDs showed S/P ratio of

4.3 and 4.7, respectively. But CRIs were degraded as S/P ratio increased with RGB LEDs.

Using RGBY LEDs, in the CCT ranges from 3,000 K to 6000 K, S/P ratios from 1.8 to 2.7 were achieved with relatively higher CRIs than those from RGB LEDs.

