

UHD 영상 시스템을 위한 고실감 색표현 기술

□ 곽영신, 백예슬, 강정원* / UNIST, *ETRI

요약

UHD 영상은 기존 HD 영상 신호보다 훨씬 다양한 색을 표현할 수 있다는 장점이 있다. 넓은 색역을 효율적으로 사용할 수 있게 하기 위해서는 UHD 영상 시스템을 위한 고실감 색표현 기술 개발이 필요하다. 본 고에서는 우선 사람이 보는 색을 표현하는 표준인 CIE 색표계 (CIE Colorimetry)에 대해 소개하고, CIE 색표계를 이용하여 기존 방송 표준 신호 색표현 방법의 문제를 분석한 후, 이를 바탕으로 UHD 신호를 위한 고실감 색표현 기술 개발 방향을 제안하고자 한다.

I. 서론

디지털 기술이 시작된 이래 소비자들의 눈을 조급이라도 더 끌기 위한 콘텐츠 제작 및 영상 장비 개발 업체들 간의 화질 경쟁이 치열하다. <그림 1>

은 카메라로 촬영한 영상을 디스플레이에 출력해 시청자들이 보기까지의 과정을 간단하게 도식화한 것이다. 카메라나 디스플레이는 모두 기본적으로 RGB 신호로 색을 표현하고 있으나, 각 제품의 특성에 따라 RGB가 의미하는 색의 의미는 크게 달라진다. 그렇기에 콘텐츠 제작 업체나 영상 장비 개발 업체에서 의도하는 색감을 표현하기 위해서는 촬영된 혹은 입력된 영상이 표현하고 있는 색이 사람들에게 어떻게 보이는 색인가에 대한 정보가 반드시 필요하다.

장비들 간의 정확한 색정보 교환은 표준화된 영상 신호를 통해 이루어진다. 예를들면 HD TV 방송은 ITU-R BT.709 [1]로 표현되고, UHD TV 방송은 ITU-R BT.2020 [2]으로 표현된다. 이 표준들에는 RGB 혹은 YCbCr로 표현되는 방송신호가 눈

※ 본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.B0101-15-295, 초고품질 콘텐츠 지원 UHD 실감 방송/디지털시네마/사이버지 융합서비스 기술 개발)



〈그림 1〉 영상 촬영에서부터 디스플레이 출력까지의 과정

으로 보았을 때 어떤 색을 의미하는지를 정의하고 있다. UHD 방송의 가장 큰 특징은 기존 HD 방송보다 더 많은 색을 표현할 수 있다는 것이다. 그러기에 UHD 영상에서 실감나는 색을 표현하는 기술의 중요성은 더 크다.

본 고에서는 사람이 보는 색을 표현하는 표준 방식인 CIE 색표계에 대해 알아보고, 기존의 표준 영상 신호들의 한계에 대해 소개한 후 고실감 색 표현을 위한 UHD 영상 신호 개발 방안에 논하고자 한다.

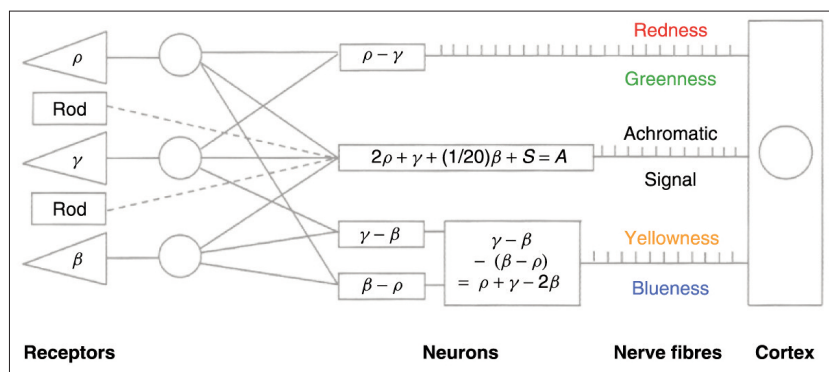
II. CIE 색표계 (CIE Colorimetry)

사람이 인지하는 색을 표현하는 방식은 국제조명기구 CIE (International Commission On

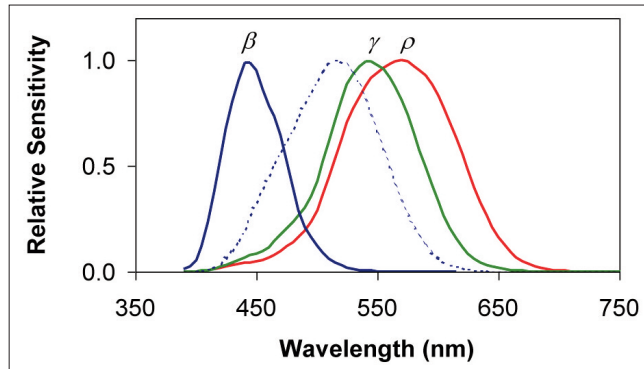
Illumination)의 제 1분과(Division I)인 Vision & Colour 분과에서 논의되고 표준으로 지정되고 있으며, CIE에서 표준으로 인정된 색표계들은 ISO와 같은 타 국제 기구에서도 표준으로 인정되고 있다. CIE 색표계는 사람의 시각 특성을 기반으로 개발된 것인 만큼 사람의 시각 시스템에 대해 먼저 소개 후 CIE 색표계가 어떻게 구성되어 있는지 알아보도록 하겠다.

1. 사람의 시각 시스템

〈그림 2〉는 눈의 동공을 통해 입사한 빛이 ‘색’으로 인식되기까지의 과정을 간략히 표현한 그림이다. 눈에 들어온 빛은 망막에 있는 원추(cone) 세포와 막대(rod) 세포에 흡수된다. 막대 세포는 아주 어두운 환경에서 작동하며 세포 종류가 한 종류 밖



〈그림 2〉 사람의 색 인지 과정 개념도 [3]



〈그림 3〉 원추 세포들의 파장별 민감도

에 없어 밝기 인지만이 가능한 반면, 원추 세포는 밝은 환경에서 작동하며 흡수 파장대가 서로 다른 세 종류가 있어 우리가 색깔을 볼 수 있게 하는 역할을 한다. 본고에서는 컬러 영상에 관한 이슈만을 다룰 것이므로 색을 인지하는데 사용되는 원추 세포에 대해서만 설명하도록 하겠다.

원추 세포에는 세 종류의 세포들이 존재하는데 RGB, LMS(Long, Middle, Short) 혹은 $\rho\gamma\beta$ 등 다양한 방식으로 불린다. 이 이름들은 이 원추 세포들이 주로 흡수하는 가시광선의 영역이 〈그림 3〉과 같이 장파장대, 중간파장대, 단파장대로 나뉜다는 것에서 기인한다. 사람의 눈에 색을 인지하는 세포가 세 종류 밖에 없기 때문에 메타메리즘(Metamerism) 현상 즉 스펙트럼 모양이 달라도 사람 눈에 동일한 색으로 보이는 현상이 발생하는데, 이 메타메리즘 현상 덕분에 사람들은 다양한 영상장비들을 통해 실제 자연에서 보는 것과 같은 색을 느낄 수 있게 된다.

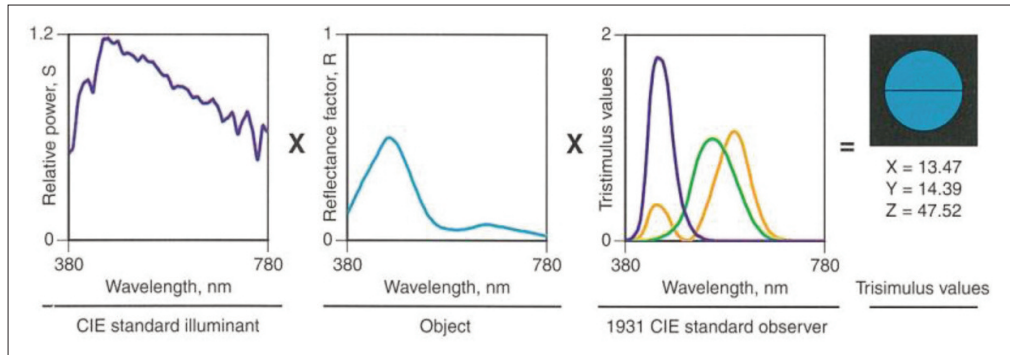
원추 세포에서 만들어진 전기 신호들은 다시 밝고 어두운 정도를 나타내는 achromatic 신호, redness-greenness 정도를 나타내는 신호, yellowness-blueness 정도를 나타내는 신호 이렇

게 세 가지의 대응색 신호(Opponent-signal)로 바뀐다. 대응색 신호들 중 achromatic 신호는 가장 공간해상도가 높고 yellowness-blueness 정보들의 공간해상도는 가장 낮다. 즉 yellow-blue 컬러 영상 정보는 어느 정도 해상도를 낮춰도 사람들은 화질 차이를 잘 느끼지 못하는 반면 밝기 정보의 해상도 변화는 쉽게 인지하게 된다. 대응색 신호들은 시신경을 따라 뇌의 대뇌피질 영역으로 이동하게 되게 최종적으로 밝고 연한 빨강, 진한 녹색과 같은 ‘색’으로 인지되게 된다.

2. CIE 색표계 (CIE Colorimetry) [4]

사람이 보는 색을 수식적으로 표현하는 최초의 표준 방식은 1931년도에 CIE에서 표준화한 CIE 1931 XYZ 색공간이다. 〈그림 4〉는 빛의 스펙트럼으로부터 XYZ 삼자극치(tristimulus values) 값을 계산하는 과정을 도식화한 것이다.

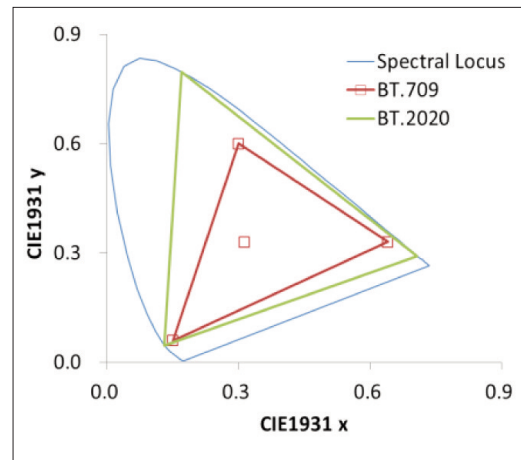
광원의 스펙트럼과 물체의 반사스펙트럼이 결합된 빛의 스펙트럼을 계산한 후, 사람 눈의 특성을 대변하는 컬러 매칭 함수(color matching function)를 이용하여 XYZ 삼자극치값을 계산하



〈그림 4〉 CIE XYZ 계산 과정 [5]

게 된다. 표준이 제정되던 당시에는 원추 세포들의 감광 스펙트럼을 정확히 측정할 수 있는 기술이 부족하였던 상황이었다. red(700nm), green(546.1nm), blue(435.8nm) 파장의 빛들을 섞어 가시광선 영역의 임의의 단파장광들의 색을 맞추게 하는 컬러 매칭 실험을 통해 간접적으로 원추 세포들의 특성을 알아내 만든 것이 컬러 매칭 함수이다. 즉 CIE XYZ값은 동일하지는 않지만 원추 세포에서 만들어진 신호와 유사한 의미를 갖는다.

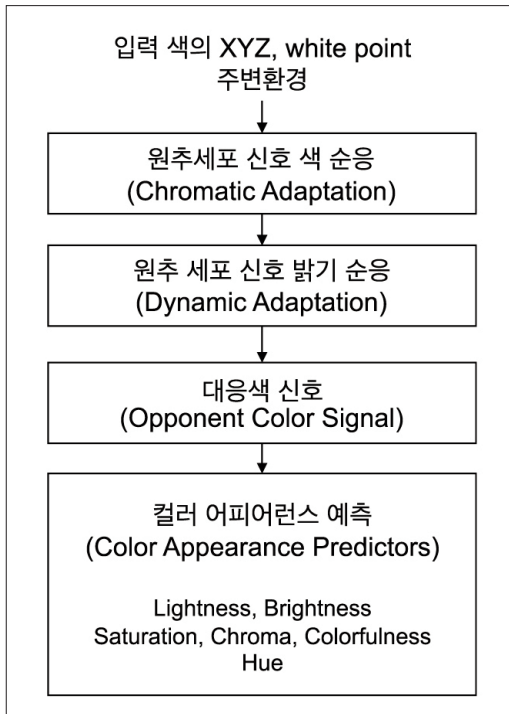
XYZ값은 시각적으로 표현하기가 쉽지 않기 때문에 XYZ값을 정규화하여 만들어진 색도 좌표(chromaticity coordinates) x, y 값을 이용해 Y_{xy} 값으로 표기하기도 한다. 〈그림 5〉는 CIE xy 색좌표를 나타낸 것으로 말굽모양의 폐곡선은 스펙트럼 컬러들의 색좌표값들을 연결한 것으로 사람이 볼 수 있는 색 영역의 경계면이기도 하다. 사람들이 인지하는 모든 색은 이 말굽 모양의 spectral locus 안에 존재한다. Spectral locus 안의 두 삼각형은 ITU-R에서 지정한 HD TV 영상 표준 및 UHD TV 영상 표준에서 정의하는 색역 경계를 나타낸다.

〈그림 5〉 CIE xy 색도 좌표

CIE XYZ값은 모든 색 측정값의 기본을 이루고 있으나 색차(Color Difference)를 계산하기에는 적합하지 않고 측정된 숫자가 사람이 느끼는 색과 직접적으로 연결되지는 않는다는 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 1976년 CIELAB, CIELUV라는 두 개의 uniform color space들이 CIE 표준으로 제정된다. 이후 1997년에 다양한 환경에서 컬러 어피어런스를 예측할 수 있는 CIECAM97s라는 표준 컬러 어피어런스 모델(Color Appearance Model)이

제정되었고, 2002년에 CIECAM02 모델로 발전되었다. CIECAM02 모델은 입력 색의 XYZ값과 주변 환경 정보를 입력으로 받아 brightness, lightness, colorfulness, chroma, hue와 같은 컬러 어피어런스 값을 출력한다.

〈그림 6〉은 CIECAM02 모델 흐름도를 나타낸 것으로 입력 색의 삼자극치 XYZ값과 기준 백색, 배경의 밝기, 휘도 정보 등을 입력 받은 후 원추 세포 단계에서 진행되는 색 및 밝기 순응 과정을 거친 후 대응색 정보로 변환된다. 그리고 밝기, redness-greenness, yellowness-blueness를 나타내는 대응색 값을 이용하여 컬러 어피어런스를 계산하게 된다. 이런 계산과정은 〈그림 2〉에 표현된 사람의 색 인지 과정과 거의 유사하다.



〈그림 6〉 CIECAM02 모델 흐름도

III. 기존 방송 신호의 색표현 문제점

앞에서 소개한 CIE XYZ, Yxy, CIECAM02와 같은 색표계들은 사람이 보는 색을 수치로 표현하는 표준 방법들이므로 정확한 색 정보 전달을 위해서는 RGB나 YCbCr과 같은 값들이 어떤 CIE XYZ값을 갖는지에 대한 정의가 필요하다. 때문에 ITU-R BT.709나 BT.2020과 같은 문서에는 방송에서 송수신되는 RGB가 어떤 색역 및 광전변환 특성을 갖는 카메라를 통해 획득된 영상인가를 명시하고 있다. 이 정보를 이용하면 각각의 RGB값이 어떤 XYZ값을 갖는지를 알 수 있게 된다. 또한 방송 표준에서는 YCbCr색공간도 제시하고 있는데, 이는 실제 사람 시각 시스템에서 만들어지는 대응색 신호를 모방하여 만들어진 색공간이다. Y는 밝기 정보, Cb는 blue-yellow, Cr은 red-cyan에 대응한다.

다시 〈그림 1〉로 돌아가보면 가장 가운데 블록인 ‘영상 신호’는 표준에서 정한 규칙을 따라 생성되고 전달되어야 한다. 그렇게 하기 위해서 ‘카메라’는 실제 시청자들이 영상을 보는 상황에 염두해두고 카메라 고유의 컬러특성을 고려하여 영상을 만들어야 하며, ‘디스플레이’는 입력된 표준 영상을 디스플레이 고유의 컬러 특성을 고려하여 재생하여야 한다. 대부분의 카메라와 디스플레이들은 표준 영상과는 상당히 다른 물리적 특성을 가지고 있기 때문에 자사 제품의 컬러 특성을 강조하기 위해 혹은 표준 영상과 똑같은 색을 재현하기 위해 다양한 영상 처리 기술들이 들어가게 된다. 이런 영상 장비들을 위한 영상 처리 기술들은 RGB 보다는 YCbCr 색공간을 더 많이 활용되고 있는데, YCbCr이 사람 시각 시스템에서 만들어지는 대응색 신호와 직접적으로 대응되기 때문이다. 또한 대응색 신호가 채널별로 공간해상도가 다르다는 특성을 반영하여 YCbCr 색

공간은 영상 전송 시 데이터 압축을 위한 서브샘플링 기술에도 사용된다.

현재 HD와 UHD 방송 표준으로 사용하고 있는 색공간들은 효율적인 색표현을 하기에는 크게 두가지 한계를 가지고 있다. 첫번째는 표준 색공간이 표현할 수 있는 색역이 사람이 인지하는 모든 색을 포함하지 못한다는 것이다. <그림 5>에서 볼 수 있는 바와 같이 삼각형으로 표현된 영역 바깥 부분은 각 방송 영상에서 표현할 수 없는 색영역이다.

두번째 문제는 YCbCr이 실제 대응색 신호와 큰 차이가 있다는 것이다. <그림 7>은 ITU-R BT.709, BT.2020 YCbCr 색공간에서 등간격으로 나뉜 red색상들을 CIECAM02 색공간에 표현한 것이다. 가로 축은 CIECAM02 chroma 즉 채도를 나타내고 세로축은 CIECAM02 lightness, 밝기를 나타낸다. 그래프 상에서 세로 방향으로 연결된 선들은 CbCr값은 동일하고 luma, Y값들이 변화하는 색들이고 가로 방향으로 동일한 luma, Y값을 갖는 색들을 연결한 것이다. YCbCr이 사람이 인지하는 대응색 신호와 매칭이 된다면 그래프는 가로, 세로 방향으로 직선이 만들어져야 하나 실제 결과그래프

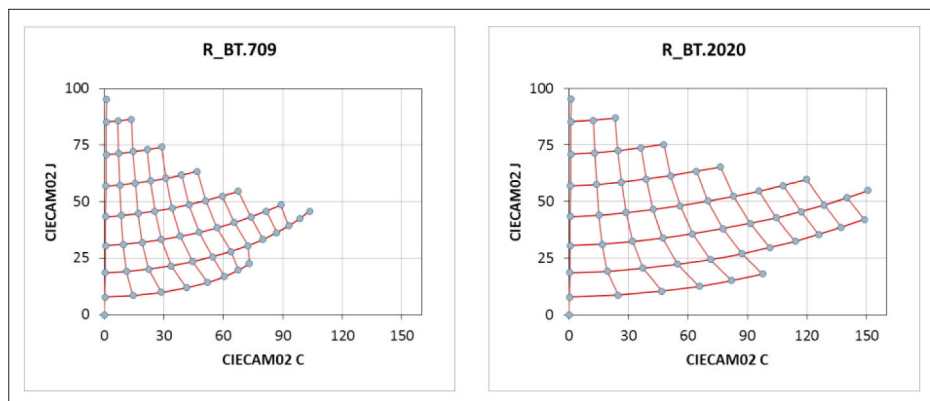
를 보면 YCbCr 신호와 사람이 인지하는 대응색 신호가 완전히 일치하지는 않는다.

예를 들어 YCbCr 신호가 사람의 대응색 신호와 일치한다면 Y값은 고정시킨 채 CbCr값만 일정한 비율로 변화 시키면 사람이 인지하기에는 채도 변화만 발생하여야 한다. 그러나 <그림 7>에서 볼 수 있는 바와 같이 실제로는 CbCr값이 바뀌면 사람이 인지하는 밝기, J값도 같이 변화하는 것을 볼 수 있다. 이러한 불일치는 YCbCr 색공간을 이용해 영상 처리를 할 때 원치 않은 효과를 야기한다.

<그림 8>은 원본 영상과 CbCr값 변화로 채도를 향상시킨 영상들을 비교한 것이다. 채도 변환된 원본 영상에 비해 채도가 높아진 것 뿐 아니라 의도하지 않은 밝기 변화가 발생하는 것을 알 수 있다.

<그림 9>는 4:2:0 방식으로 서브샘플링 된 영상을 나타내는데 경계 부분에 격자 모양의 artifact가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 CbCr값만 변화시켜도 사람 눈에 밝기 변화가 나타나는 것으로 보이게된 실제 밝기 공간 해상도가 유지되지 못해 발생하는 현상이다.

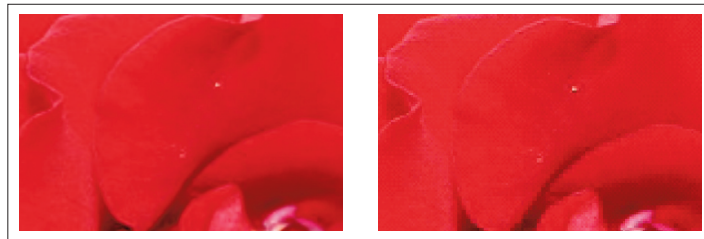
<그림 8>, <그림 9>에서 나타난 문제점들은 이미



<그림 7> CIECAM02 상에서 ITU-R BT.709, BT.2020의 Red 색상 분포



〈그림 8〉 BT. 709 YCbCr 색좌표 이용 채도 향상 영상 예



〈그림 9〉 BT. 709 YCbCr 색공간 이용 시 서브샘플링에 의한 화질 열화 예

잘 알려진 문제들로 YCbCr 색공간 사용 시 발생하는 문제들을 보완하기 위해서는 또 다른 컬러 처리 기술들이 요구된다.

IV. 결론: UHD 영상을 위한 고실감 색표현 기술 개발 방향

앞에서 설명한 바와 같이 현재 사용되고 있는 HD 및 UHD 방송 표준인 YCbCr 색공간은 사람의 시각 특성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 효율적인 실

감 색표현에 여러가지 한계를 갖는다. UHD 영상이 제공하는 넓은 색역을 최대한 활용하기 위해서는 기존 방식을 뛰어넘는 새로운 색표현 기술이 요구된다.

현재 논의되고 있는 색표현 방식은 사람의 시각 모델을 기반으로 하는 기술들이 주를 이루고 있다. Dolby사는 IPT 모델을 차용한 색표현 기술을 제안하였고[6], 본 연구팀에서는 CIECAM02의 대응색 신호를 차용한 색표현 기술을 개발 중이다. 이러한 새로운 고실감 색표현 기술들은 UHD 영상을 위한 효율적인 화질 향상 알고리즘 개발을 위한 밑바탕이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] ITU-R. BT.709-6, "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange" (2015)
- [2] ITU-R BT.2020 : Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange (2015)
- [3] R. W. G. Hunt, M. R. Pointer, Measuring colour, John Wiley & Sons, P.8 (2011)
- [4] CIE 015:2004 Colorimetry, 3rd edition
- [5] R. S. Berns, Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edition, Wiley-Interscience, p.56 (2000)
- [6] WO 2014130343 A2, Display management for high dynamic range video (2014)

필자소개



곽영신

- 1995년 : 이화여자대학교 물리학과 학사
- 1997년 : 이화여자대학교 물리학과 석사
- 2003년 : University of Derby (영국) Color Science PhD
- 2003년 ~ 2008년 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2009년 ~ 현재 : UNIST 디자인 및 인간공학부 교수
- 2015년 ~ 현재 : CIE Division1, Vision & Colour Director
- 주관심분야 : 색채 및 감성공학, 디스플레이 프로세싱



백예슬

- 2005년 : 대진대학교 물리학과 학사
- 2007년 : 대진대학교 물리학과 석사
- 2013년 : 대진대학교 물리학과 박사
- 2013년 ~ 현재 : UNIST 디자인 및 인간공학부 박사후연구원
- 주관심분야 : 색채 공학, 컬러 어피어런스



강정원

- 1993년 : 한국항공대학교 항공전자공학 학사
- 1995년 : 한국항공대학교 전자공학 석사
- 2003년 : Georgia Institute of Tech, ECE 공학박사
- 2003년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 주관심분야 : 비디오 부호화, 비디오 신호처리