

홀로그램 감광재료 특성 및 연구동향

□ 김남, 박미란 / 충북대학교

1. 서론

홀로그래피는 빛의 간섭현상을 이용해 3차원 영상을 재현하는 기술이다. 사물을 본다는 것은 곧 사물에 반사된 빛을 본다는 의미다. 이 빛만 재생하면 실제로 없는 사물도 바로 앞에 있는 것처럼 볼 수 있다. 빛에는 많은 정보가 담겨있다. 빛의 파장에는 물질의 색깔 정보가 들어있고, 빛의 진폭은 밝고 어두운 정도를 나타내며, 빛의 위상은 울퉁불퉁한 물체의 입체감을 표현한다. 사진을 찍어 순간을 기록할 수 있는 이유는 사진 필름이 빛의 파장과 진폭을 기록하기 때문이다. 하지만 사진은 빛의 위상을 기록하지 못하는 탓에 평면적이다. 빛의 위상을 기록할 수 있다면 얼마든지 입체적인 이미지를 구현할 수 있는데, 이것이 바로 홀로그램이다.

홀로그램을 만들려면 일단 레이저빔 하나를 물체빔(object beam)과 기준빔(reference beam)으로

갈라야 한다. 물체의 표면에서 반사된 물체빔이 어떤 물체도 통과하지 않은 기준빔과 만나면 서로 중첩되면서 수많은 선으로 이뤄진 간섭무늬를 만든다. 간섭무늬에는 물체의 색과 명암 그리고 입체감을 나타내는 위상 정보가 담겨 있다.

간섭무늬가 맺히는 곳이 바로 홀로그램 감광재료인데, 홀로그램 감광재료에 간섭무늬가 기록되면 물체빔을 끄고 기준빔만 비추면 3차원 영상이 나타난다. 3차원 홀로그램을 실현하기 위해서 빛의 위상까지 기록하는 홀로그램 감광재료 개발이 필요하다. 홀로그램 감광재료를 개발하려면 고분자 유기물질을 합성하는 화학적 지식도 필요하지만 이에 못지않게 빛의 성질을 잘 알고 있어야 한다. 빛을 통제하려면 빛이 통과하는 매질의 굴절률을 조절해야 한다. 매질의 굴절률은 빛의 속도와 관련이 있는데 빛은 굴절률이 큰 매질을 통과할 때 느리게 움직인다. 감광재료의 굴절률에 따라 빛의 속도가 달라

진다는 사실에 착안해 물질의 굴절률을 변화시킬 수 있는 재료를 개발하는 것이 필요하다. 홀로그래프 감광재료는 국내생산이 없기 때문에 해외에서 제작되는 감광재료를 적용해서 3차원 영상을 재현하여 결과물을 완성하는데 제한을 두며, 특히 생산국인 미국, 독일, 러시아, 프랑스에서 제작되는 감광재료의 실험과 특성에 따르는 비교분석을 주된 연구로 삼게 된다. 홀로그래프 감광재료는 홀로그래프를 제작하는데 가장 중요한 요소중의 하나이다. 본 고에서는 홀로그래프 감광재료의 종류, 특성에 대해 알아보고 또한 감광재료 개발 및 연구동향을 살펴본다.

II. 홀로그래프 감광재료 특성

홀로그래프 기록용 감광재료에는 은염(silver halide), DCG(dicromated gelatin), 포토레지스트(photoresist), 포토폴리머(photopolymer), 포토크롬(photochromics), 열감응 플라스틱(photo thermoplastic), 광굴절 결정(photorefractive materials) 등이 있는데 이러한 감광재료들은 <표 1>

과 같은 광학적 성능을 갖고 있다[1].

홀로그래프 감광재료 중 은염은 100년 동안 일반사진, 천문학, 분광학 그리고 x-ray 사진술 등에서 가시 및 비가시 방사(radiation)에 의한 기록과 소자 개발에 이용되었다. 또한 홀로그래프를 기록하기 위한 가간섭성의 광원으로 장파장의 He-Ne 레이저가 처음으로 개발되었을 때, 이 광원의 감광 대역폭에서 고해상도의 기록이 가능한 유일한 기록매질이였다. 그 이후로 보다 파장이 짧은 레이저 광원들이 개발되었고 이들 광원에 적합한 감광대역폭을 갖은 다른 많은 홀로그래프 감광재료들이 개발되었다.

그러나 지금도 은염은 다른 감광물질과 비교하여 해상도, S/N비 그리고 감광성이 높고 감광 대역폭이 넓다. 은염은 대부분 다른 감광재료보다 필요한 노출량이 적어 빠른 emulsion 이 가능하여 안전성이 높아 홀로그래프의 실험 연구에서는 다른 감광재료에 우선하는 필수적인 재료이다[2]. 이러한 특성으로 인해 고가의 레이저가 필요하지 않다. 그러나 은염은 알갱이로 구성되어 다른 recording materials 보다 빛을 분산시킨다. 또한 화학적 습식 처리를 거쳐야 하며 홀로그래프 기록 후에도 그 특성

<표 1> 홀로그래프 감광재료 특성

Material	Reusable	Processing	Type of grating	Exposure [J/m ²]	Spectral sensitivity	Resolution [line/mm]	Max Diff. efficiency
Silver emulsion	No	Wet chemical	Amplitude Phase (bleached)	1×10 ⁻¹	400-700	1,000 -10,000	6% 60%
Dichromated gelatin	No	Wet chemical	Phase	10 ²	50-580	>10,000	100%
Photoresists	No	Wet chemical	Phase	10 ²	Uv-500	3,000	33%
Photopolymers	No	Post exposure	Phase	10-10 ⁴	Uv-650	2,000-5,000	100%
Photochromics	Yes	None	Aplitude	10 ² -10 ³	300-700	>5,000	2%
Photothermoplastics	Yes	Charge & heat	Phase	10 ¹	400-650	500-1,200	33%
Photorefractive							
LiNbO ₃	Yes	None	Phase	10 ⁴	350-500	>1,500	100%
Bi2SiO ₂₀	Yes	None	Phase	10	350-550	>10,000	100%

이 변하여 수명이 길지 않다는 단점이 있다.

DCG 감광재료는 부피 위상형 홀로그램의 매우 이상적인 기록매질로서 흡수와 산란이 적으며 굴절률 변조가 크고 $10,000\text{mm}^{-1}$ 의 공간주파수까지 얻을 수 있는 높은 해상도와 변조 전달함수(MTF: Modulation Transfer Function)를 갖는다. 또한 투과형 뿐만 아니라 반사형 홀로그램에도 매우 적합한 감광재료로 알려져 있다. DCG는 젤라틴 기관에 감광유제로 중크롬산 암모니아를 함유하고 있으며 노광에 의해 화학적으로 광 망상결합으로 경화되는 성질을 이용한다. 이 반응은 인접한 젤라틴 결합의 carboxylate group들 사이에서 부분적인 연계결합을 만드는 광화학적으로 생성된 Cr^{+3} 이온에 의하여 일어난다. DCG는 표면양각형 홀로그램을 제작할 수도 있지만 굴절률변조에 의한 위상형 홀로그램 제작에 더욱 적합하다. 그러나 젤라틴으로도포된 건판이나 필름이 상용으로 생산되지 않기 때문에 실험실에서 직접 제작해야 하는 불편함이 있고 천연 고분자물인 젤라틴은 온도, 압력, 습도 등의 환경적 변화에 민감하게 영향을 받기 때문에 광학소자로 개발하여도 점차적으로 물리적 특성이 열화되며 수명이 짧은 단점이 있다[3].

최근의 포토폴리머는 은염이나 DCG의 복잡한 화학적 처리라는 단점을 보상할 수 있고 회절효율이 높고, 기록 후 감광유제의 수축이 일어나지 않으며, 감광도와 해상도가 우수하고, 비교적 적은 노광량에 반응이 일어난다. 특히 다른 어떤 감광재료보다 환경적 변화에 강하기 때문에 광학소자 개발에 우수한 감광재료로 각광받고 있다. 포토폴리머는 모노머(monomer)와 결속제(binder), 그리고 광개시제(photoinitiator), 기록광원의 파장에 맞는 감광대역폭을 갖도록 첨가하는 감광제(photosensitizer)와 염료(dye) 등으로 구성되어 있

다. 광에 의하여 활성화되어 광중합이나 망상결합으로 두께 또는 굴절률 변조를 일으키는 것으로 각도 선택성(angular selectivity)이 탁월하고, 회절효율이 높은 부피 위상형 홀로그램을 만들며, 노광만으로 즉시 상을 볼 수 있는 특성을 갖는다. 포토폴리머는 필름 두께의 조절 가능성, 건식처리, 매우 긴 사용기간, 그리고 매우 중요한 생산조건인 낮은 가격 등 이상적인 홀로그램 특성으로 인해 광학소자용 감광재료로 각광받고 있으며, Dupont사가 최초로 상용화 하였다[4].

포토레지스트는 은행카드, 잡지표지, 음식용기와 많은 다른 제품에 광범위하게 사용된다. 수백만 개까지 대량 생산된다. 가장 저렴한 가격으로 홀로그램을 제작할 수 있다.

광굴절 결정은 은염 재료에 비해서 감도는 낮지만 1cm 두께의 결정을 성장할 수 있으며, 각도 선택도가 매우 뛰어나고 홀로그램 재생 영상이 매우 우수하다. 이러한 특성들 때문에 홀로그래픽 메모리(holographic memory), 광 연결(optical interconnections), 광학 소자(optical elements), 광학 필터(filter) 등과 같은 다양한 분야에 사용되고 있다. 반면 홀로그램을 재생하는 동안에 정보가 지워지는 문제점이 있으며, 가격이 비싸고 결정 형태의 기록 매질이기 때문에 유연성을 요구하는 시스템의 경우 적합하지 않은 단점이 있다.

III. 홀로그램 감광재료 개발 연구 동향

1. 홀로그램 감광재료 개발

홀로그램 감광재료의 개발은 세계적으로도 극히

드물고 특수한 목적으로만 제작하기 때문에 쉽게 공유할 수 없는 점에서 불편한 점들이 있다. 뛰어난 특성의 은염을 제작하는 프랑스의 Ultimate, 전세계에서 홀로그래피 감광재료 공급에 큰 규모를 가지고 있는 러시아 Slavich, 그리고 미국, 독일 포토 폴리머 재료들이 있다.

1) 러시아의 Slavich 감광재료

세계에서 가장 잘 알려진 홀로그래피 감광재료 회사인 독일의 Agfa 회사가 은염을 더 이상 생산하지 않겠다는 공표를 한 후 이는 바로 가격이 상승하는 요인으로 작용하게 되었고 서유럽에서의 기술개발과 생산중단은 곧바로 동유럽의 러시아에서 홀로그래피 감광재료를 생산하는 Slavich 회사의 등장과 그에 대한 관심 집중으로 이어지게 되었다. 러시아의 모스크바 외곽지역에 자리잡은 Slavich 회사의 마이크론(Micron)은 사진재료와 홀로그래피 재료를 생산하는 부서로서 회사 전체로 본다면 극히 한 분야에 불과한, 그러나 중요한 생산부서의 하나이다. 30년이 넘게 러시아 전 지역의 연구소와 학교, 그리고 홀로그래피 제작업체들을 대상으로 재료를 공급하는 역할을 해 왔고 할로겐화 은의 초미립자 유제의 생산은 최상의 홀로그램을 제작하는 중요한 요인을 해결하는데 일조를 하게 되었다[5].

Slavich, 코닥, 그리고 Agfa 회사의 생산제품들의 주된 차이점으로는 감광유제의 입자 크기와 은염의 함유량을 들 수 있다. 러시아 감광유제는 10cm보다 작은 입자 크기를 가지며, 은염의 함유량은 일반적으로 서방국가에서 제작하는 경우보다 약 1.5배 정도 더 높다.

2) 프랑스의 Ultimate 감광재료

Ultimate 감광재료는 사용이 편리한 유리판과 필

름, 두 종류를 생산한다[6]. 뿐만 아니라 사용하는 레이저의 특성에 적당한 유제를 선택하여 사용할 수 있으며 밝은 안전등 아래서 작업이 가능하기 때문에 쉽게 처리할 수 있다. 예를 들어 He-Ne레이저를 사용한다면 녹색 계열의 안전등 아래서 작업이 가능하다. 감광재료의 현상처리는 3단계의 과정으로 완성되어 사용하기에 안전하다. 이 감광재료는 초보자가 사용하더라도 밝고 투명한 홀로그램을 쉽게 제작할 수 있다. 백색광 아래서 재생이 가능한 반사식 홀로그램인 Denisjuk 타입의 홀로그램은 반사효율이 매우 높고 단순한 작업과정을 거치는 홀로그램을 제작하기에 적당하다. 이미지는 현상처리 후 투명도가 뛰어나며 Agfa 감광재료보다 입자가 더 세밀하고 감광도가 매우 높다.

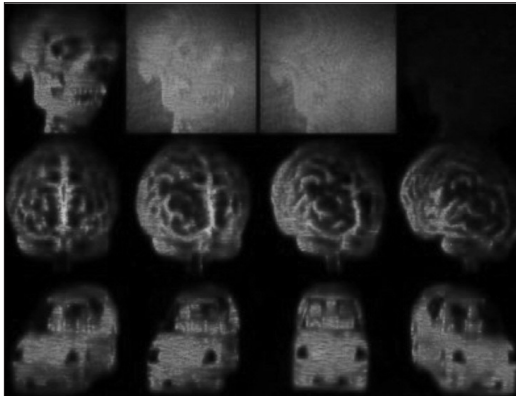
3) 미국, 독일 포토폴리머

포토폴리머는 은염과 DCG를 빠른 속도로 대체하여 부피 위상형 홀로그램의 시장을 공략하고 있으며, 그 사용분야도 광학, 통신, 디스플레이, 그래픽 아트(graphic art), 홀로그램을 이용한 보안 장치 및 광 패턴인식(optical pattern recognition) 등으로 빠르게 확장하고 있다. 따라서 이에 관한 여러 가지 모노머와 결속제의 개발, 그 물질들의 조성, 굴절률 특성, 그리고 광중합체가 형성되는 화학반응의 기구(mechanism) 등에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 기술발전과 특허에 관한 각국과 기업들의 관심이 고조되고 있다.

2. 홀로그램 감광재료 개발 연구동향

기록된 영상을 몇 분 내로 지우고 다시 쓸 수 있는 홀로그램 장치가 개발되었다[7]. <그림 1>은 개발된 3D 디스플레이의 실제 영상이다. 위쪽 줄은

지워지고 있는 두개골 홀로그램이고, 중간과 아래 줄은 수평시차를 입증하기 위해 다른 각도로 보인 3D 영상이다.



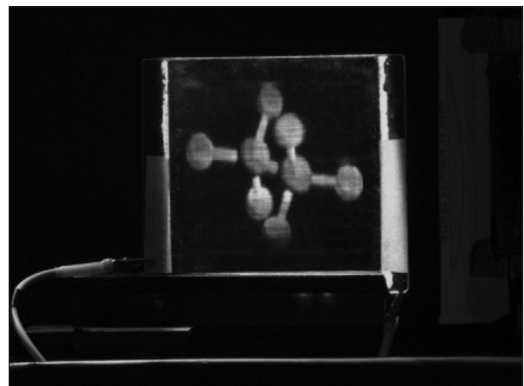
〈그림 1〉 다시 쓸 수 있는 홀로그램

아리조나 대학 (University of Arizona) 의 연구진은 3차원 안경 또는 보조 도구와 같은 특별한 안경을 필요로 하지 않고 3차원적으로 움직이는 영상의 프로젝션을 가능하게 해주는 새로운 종류의 홀로그래픽 텔레프레즌스(TelePresence)를 개발하였다. 특수 안경 없이도 볼 수 있는 이 홀로그램 디스플레이는 업데이트가 가능한 최초의 3D 디스플레이이며, 이로 인해, “상황 인식”이 필요한 의료, 산업 및 군사 분야에 이상적인 도구가 될 수 있다. 이 장치는 신용카드에 있는 작은 비둘기 홀로그램과는 전혀 다른 새로운 종류의 장치다.

“이 장치는 신용카드에 있는 작은 비둘기 홀로그램과는 전혀 다른 새로운 종류의 장치다. 신용카드에 있는 홀로그램은 영구적으로 인쇄되어 있다. 여러분은 그 영상을 지워서 완전히 다른 3D 사진으로 교체할 수 없다”고 아리조나대 광과학 교수인 나세르 페이검바리언(Nasser Peyghambarian)은 말했

다. “홀로그래피는 수십 년 동안 있었지만, 홀로그램 디스플레이는 실로 이 기술을 최초로 실용적으로 응용한 것이다”라고 같은 학교 광과학자 사바스테이(Savas Tay)는 말했다. 동적 홀로그램 디스플레이는 외과 의사들이 길고 복잡한 뇌수술 과정의 진행상황을 파악하는데 도움을 주고, 항공기나 전투기 조종사들에게 주변 전체의 위험물을 보여주며, 혹은 비상대응 팀에게 급변하는 범람이나 교통 문제를 보여주는 장치로 만들어질 수 있을 것이다. 또한 “슈퍼마켓이나 백화점에 들어서면, 크고 동적인 3차원의 제품 디스플레이를 볼 수 있을 것이다”라고 테이는 말했다.

이들의 장치는 투명전극이 코팅된 유리판 2장 사이에 샌드위치로 낀 광굴절 폴리머로 구성되어 있다. 영상은 〈그림 2〉와 같이 레이저빔과 외부에서 인가되는 전기장을 이용하여 감광 플라스틱에 기록된다. 이 과학자들은 사물이나 장면을 스캐닝하면서 수많은 2차원 광경들로부터 사진을 찍고, 홀로그램 디스플레이는 이 2D 광경들을 3D 사진으로 조립한다. 이번 연구에 투자한 공군과학연구청(The Air Force Office of Scientific Research)은 과거에도 홀로그램 디스플레이를 사용했다. 그러나 과거



〈그림 2〉 에탄올 분자의 3D 모델을 보여주고 있는 홀로그램 디스플레이

의 디스플레이들은 정적이며 지우거나 갱신할 수 없었다. 이번에 개발된 새로운 홀로그램 디스플레이는 몇 분마다 새로운 영상을 보여줄 수 있다.

연구팀이 만든 가로세로 4인치 크기의 프로토타입 디스플레이는 현재 빨간색으로만 보이지만, 훨씬 더 큰 완전컬러 디스플레이를 개발하는데 아무런 문제가 없다고 이들은 생각한다. 이들은 다음에는 가로세로 1피트 크기로 만들고, 그 뒤에는 가로세로 4피트 크기의 디스플레이를 만들 계획이다. “우리는 대단히 효율적이고 저렴하며 매우 큰 크기로 만들 수 있는 기록 물질을 사용한다. 이것은 실물크기의 사실적인 3D 디스플레이를 만드는데 매우 중요하다. 우리는 3분내로 완전한 장면이나 사물을 기록할 수 있으면, 3시간동안 저장할 수 있다.”고 페이지컴바리언은 말했다. 연구진은 펄스 레이저를 이용하여 영상을 더욱 빠르게 기록하는 연구도 하고 있다. 만일 펄스 레이저로 더 빨리 기록할 수 있다면, 현재 작은 홀로그램을 기록하는데 걸리는 시간과 동일한 시간에 더 큰 홀로그램을 기록할 수 있다. 우리는 실물크기의 홀로그램도 가능할 것으로 전망한다. 예를 들면, 사람 전체 영상을 실제 사람과 동일한 크기로 보여줄 수 있을 것이다.

갱신될 수 있는 홀로그램 디스플레이는 의료분야에서 중요하게 응용될 수 있다고 연구진은 말했다. “3차원 영상 기술은 예컨대 MRI, CAT 기술처럼 이미 의료 분야에 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 3차원으로 생성된 엄청난 양의 데이터들은 여전히 컴퓨터 스크린이나 종이와 같은 2차원 장치로 표시되고 있다. 데이터를 이런 식으로 표시함으로써 엄청난 양의 데이터가 손실된다. 따라서 우리가 더 큰 완전컬러 3D 홀로그램을 개발하면, 세계의 모든 병원들이 우리를 원할 것이다.”라고 연구진은 말했다. <그림 3>은 미래의 홀로그램 3D 디스플레이를

보여준다.



<그림 3> 미래의 홀로그램 3D 디스플레이

사물의 사실적인 3차원 영상 정보를 저장하고 보여줄 수 있는 홀로그램은 이제까지 대부분 다시 쓰기가 힘들었다. 비록 대용량의 데이터를 저장하기 위한 홀로그래피 메모리 분야에서는 아조벤젠 폴리머를 매체로 이용한 방식 등이 지우고 다시 쓸 수 있는 기술로 발표되었지만, 현재 상용으로 구할 수 있는 홀로그래픽 3D 디스플레이는 영상갱신 능력이 없어 용도가 제한된다. 이번에 개발된 장치는 현재 영상 기록에 9000볼트, 영상 유지에 4000볼트라는 큰 전압이 필요하여 영상 갱신이 낮지만, 거의 100%에 이르는 회절효율, 빠른 기록시간, 여러 시간 동안의 영상 유지, 빠른 삭제, 대면적 구현이 가능한 장점이 있다. 앞으로 영상 갱신율이 더 빨라지고 과도한 전압 문제 등이 해결된다면, 향후 의료, 군사, 물품 전시, 박물관의 디지털화 등 다양한 분야에 많은 기회를 제공할 수 있을 것이다.

IV. 결론

오늘날 홀로그램 광학장치의 성패는 사용하는 감광재료의 수행능력에 따라 크게 좌우된다. 본 고에서는 홀로그램 감광재료인 은염, DCG, 포토폴리머, 포토레지스트와 광굴절결정의 특성과 각각의 장단점 및 개발 연구동향에 대해 살펴보았다. 향후

홀로그램 감광재료는 나노복합소재(nanocomposite), 고분자전해질(polyelectrolytes), 광굴절 고분자(photorefractive polymers)로 가장 많이 활성화 되면서 성장할 것으로 예상된다. 그러나 지속적으로 발전하고 있는 기존의 감광재료에 존재하는 경쟁력은 배제할 수 없다.

참고문헌

- [1] D.Hunt, N.Reingand, R.Cantrell, "Intellectual property analysis of holographic materials business", SPIE Proceedings, Photonics West 2006, vol. 6136, "Practical Holography".
- [2] H.I. Bjelkhagen: Silver Halide Recording Materials for Holography and Their Processing, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 66 (Springer-Verlag, Heidelberg, New York 1993)
- [3] T. Mizuno, T. Goto, K. Matsui and T. Kubota, "Methylene blue sensitized gelatin holograms: influence of the moisture on their exposure and diffraction efficiency," Appl. Opt., vol. 29, 4757-4760, (1990)
- [4] A. M. Weber, W. K. Smothers, T. J. Trout, and D. J. Mickish, "Hologram recording in DuPont's new photopolymer materials," SPIE, vol. 1212, Practical Holography IV, 30-39 (1990)
- [5] Y.A. Sazonov, P.1. Kumonko: Holographic materials produced by the "Micron" plant at Slavich, in Sixth Int'l Symposium on Display Holography, ed. by T.H. Jeong, H.I. Bjelkhagen. Proc. SPIE 3358, 31-40 (1998)
- [6] <http://www.ultimate-holography.com/en/materials.html>
- [7] P.-A. Blanche, A. Bablunian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, N. Peyghambarian, "Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer," Nature, 468 (2010)

필자소개



김남

- 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
- 1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학석사)
- 1988년 8월 : 연세대학교 전자공학과(공학박사)
- 1989년 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수
- 1992년 8월 ~ 1993년 8월 : 미국 Stanford 대학교 방문교수
- 2000년 3월 ~ 2001년 2월 : 미국 California Technology Institute 방문교수
- 2005년 4월 ~ 2011년 4월 : 충북 BIT 연구중심대학 육성사업단 사업단장
- 2008년 1월 ~ 2009년 12월 : 한국정보디스플레이학회 3D 연구회 회장
- 2009년 4월 ~ 현재 : 지식경제부 산업표준심의회(광학재료 및 망원/현미경) 전문위원회 위원
- 2009년 5월 ~ 현재 : 기술표준원 3D산업표준기술연구회 위원장

필자소개



박미란

- 2006년 8월 : 중국 연변대학교 전자정보공정 학사
- 2009년 2월 : 충북대학교 전자정보대학 석사
- 2009년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 박사과정