

# 실버 할라이드 감광유제를 이용한 칼라 홀로그래피 제작 기술

필립 종테, 이승현  
광운대학교

## 요약

본고에서는 칼라 홀로그래피에 대한 최근의 연구 동향을 살펴보고, 칼라 홀로그램 제작을 위한 얼티메이트 홀로그래피(Ultimate Holography)사의 새로운 초고해상도 실버 할라이드 감광유제인 얼티메이트 04(U04)를 이용한 실험결과를 공유한다. U04는 환경 친화적이며, 입자의 크기가 4 nm 로 매우 작고, 해상도는 18,000 lines/mm로써 어떤 다른 실버 할라이드 기록재료 보다 뛰어나다. 440 nm 에서 700 nm까지의 넓은 감광영역에서 풀 칼라 홀로그램을 선명히 기록할 수 있다.

## I. 서론

2000년 St. Polten에서 열린 The World Congress for Holography (Holographic Millennium Conference)에서, 프랑스의 얼티메이트 홀로그래피(Ultimate Holography)사는 “Ultimate” 라고 하는 실험실에서 제작한 초고감도 실버 할라이드 홀로그램 감광유제를 처음으로 선보였다. 입자의 크기는 10 nm 이었으며 “The Clown”, “Butterflies”와 같은 30 x 40cm 크기의 풀 칼라 홀로그램을 제작하여 전시하였다[1].

그 이후, 입자 크기의 균일, 안정된 기록, 코팅 품질 향상, 새로운 증감제, 프리 슈프팅(pre-shifting), 최대 감도 구현, 친환경적인 기록매질 처리 등의 기술 발전을 통해 상업적으로 구매가 가능하게 되었다.

현재 얼티메이트 홀로그래피사의 감광유제는 세계 각국의 회사, 대학, 연구소, 홀로그래퍼 들이 사용하고 있다[2-10]. 얼티메이트 홀로그래피사의 가장 최근 제품이 얼티메이트 04(U04)이다. 본고에서는 칼라 홀로그래피에 대한 최근의 연구 동향을 살펴보고, U04 의 특성 및 안전한 현상 과정에 대해 알아본다.

## II. 관련 연구

초고해상도의 풀 칼라 홀로그램을 제작하기 위해서는 품질 좋은 홀로그램 기록 재료를 선택해야 한다. 홀로그램 기록 재료에는 대표적으로 실버 할라이드(silver halide), 중크롬산 젤라틴(DCG, dichromatic gelatin), 포토폴리머(photopolymer) 3가지 종류가 있다. 본고에서는 실버 할라이드 기록재료에 대해 언급할 것이다.

2 개의 다른 감광유제와 비교하여 실버 할라이드 감광유제의 가장 큰 장점은 1,000배 이상의 높은 감광도이다. 실버 할라이드 감광유제는 습식법(wet process)을 이용하며 필름이나 유리 플레이트에 코팅하여 사용한다.

1990년대에는 Agfa, Ilford, Kodak 과 같은 대형 업체가 단색형 홀로그래픽 실버 할라이드 기록재료를 생산하였다. 그러나 최근에는 Slavich의 PFG-03C[11], Sfera-S Ltd.의 PFG-03CN[12], Colour Holographic Ltd.의 BB-PAN[13], Ultimate Holography의 Ultimate 08 (U08)[14]과 같이 러시아와 유럽의 일부 중소 업체들에 의해 실버 할라이드 칼라 감광유제가 시판되고 있다.

칼라 홀로그램의 제작을 위해 시판되고 있는 실버 할라이드 홀로그램 기록재료의 주된 특성을 <표 1>에 보인다.

표 1. 상용 실버 할라이드 홀로그램 기록매질

기록매질	감광대역(nm)	해상도 (lines/mm)	입자크기(nm)
U08 <sup>1</sup>	440-700	10,000	8
PFG-03CN <sup>2</sup>	435-665	6,000	9
PFG-03C <sup>3</sup>	450-700	6,000	10
BB-PAN <sup>4</sup>	440-650	6,000	10

<sup>1</sup> Ultimate Holography <sup>2</sup> Sfera-S Ltd, <sup>3</sup> Slavich,

<sup>4</sup> Colour Holographic Ltd.

풀 칼라 홀로그램을 기록하기 위해서는 10,000 line pairs/mm 이상의 해상도를 갖는 아이소판크로매틱(iso-

panchromatic) 감광유제가 요구된다[15]. 만일 해상도가 너무 낮게 되면 희미하게 되고, 흐림 없는 청색(정밀히 말하면 진한청색, deep blue) 파장의 기록이 불가능하게 된다. 대부분의 홀로그래퍼들은 저전력 레이저(20 mW 이하)를 사용하고 있다. 품질 좋은 홀로그램 제작의 가능성을 높이기 위해서는 노출 시간이 짧아야 한다. 따라서 높은 감도의 기록매질은 아주 중요한 요소이다. 대부분의 홀로그램 기록재료들은 감도를 높이기 위해서 노출 이전에 처리과정을 거친다. 예를 들면, Colour Holographic Ltd. 의 트리에탄올아민(triethanolamine) 솔루션은 기록 이전 그들의 플레이트에서 이루어지며, Slavitch 의 감광유제는 경화 사전 처리가 요구된다.

전통적인 홀로그래피 기술에서 플레이트에 사용된 화학 약품은 일반적으로 인간과 환경에 위험하며 유해하다. 특히, 25년전 초정밀 입자 Slavich PFG-03C 에 사용된 처리 과정은 경화 사전 처리를 위해 현상액과 정착액에 Formaldehyde, Catechol과 같은 화학 약품을 사용하여 비 환경 친화적이고 불안전하며 다루기 어렵다[16].

이와 같은 화학 약품을 다루기 위해서는 전문지식과 주의가 요구되며, 후드가 있는 화학실험용 싱크와 같은 특수한 장비를 필요로 한다. 또한 사용 후에 화학 약품은 회수되어야 하며, 환경 보호를 위해 재활용되어야 한다. 따라서 추가적인 비용이 발생하게 되며 학교에서 어린 학생들이 사용하기 어렵게 만든다. 따라서 칼라 홀로그래피의 제작을 위해 요구되는 일반적인 사항은 ①진한 청색부터 적색까지의 파장 대역을 모두 기록할 수 있는 10,000 line pairs/mm 이상의 해상도를 갖는 아이소판크로매틱 감광유제, ② 저전력 레이저(20 mw 이하)로 사용 가능한 고감도 감광유제, ③안전하고 홀로그램 현상처리가 간단한 감광유제이다.

### III. 엘티메이트 홀로그래피사의 U04 특징

칼라 홀로그램 제작을 위한 홀로그래퍼들의 요구를 충족할 수 있는 새로운 초고감도 실버 할라이드 홀로그래픽 감광유제가 엘티메이트 U04 이다.

〈표 2〉에서와 같이 U04 는 이전의 홀로그래픽 감광유제 U08 보다 기록 속도는 낮지만 높은 해상도를 갖는다. 입자 크기가 4 nm로 매우 작아 모든 파장에 적합하다. 특히 진한 청색을 갖는 442 nm Helium Cadmium (HeCd) 레이저를 이용하여 희미함 없이 명료한 청색을 기록할 수 있다.

표 2. U04와U08의 특성 비교

	U04 특징	U08 특징
감광대역	440-700 nm	440-700 nm
입자크기	04 nm	08 nm
해상도	18,000 lines/mm	10,000 lines/mm
단색 기록 속도	450 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (최소) 600 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (표준) 900 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (마스터링 <sup>1</sup> )	150 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (최소) 200 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (표준) 300 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (마스터링 <sup>1</sup> )
칼라 기록 속도	400 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ per laser	130 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ per laser
레이어 두께	4 $\mu\text{m}$	4 to 5 $\mu\text{m}$
베이스	유리판(3 mm) 필름(190 $\mu\text{m}$ )	유리판(3 mm) 필름(190 $\mu\text{m}$ )
현상처리	전용 액을 이용한 안전한 현상 및 표백	전용 액을 이용한 안전한 현상 및 표백
유효기간	4 °C에서 2년 이상	4 °C에서 2년 이상
저장	박스 내 4 °C 냉장보관	박스 내 4 °C 냉장보관
플레이트 또는 필름	온도 안정화를 위해 냉장고에서 꺼낸 후, 한 시간 이상 촬영 장소에 둘 것	온도 안정화를 위해 냉장고에서 꺼낸 후, 한 시간 이상 촬영 장소에 둘 것

<sup>1</sup> 광 대역폭을 갖는 마스터링

U04는 반사형(데니슈크형) 풀 칼라 홀로그램과 확산이 중요 요소인 HOE 에 적합하다[17]. 데니슈크형 홀로그램 또는 10:1 정도의 열악한 물체파:기준파 비율의 세팅에서도 회절 효율이 매우 높다. HOE 반사 디퓨저를 이용한 단색 홀로그램 기록에서의 홀로그램 회절 효율은 98% 정도로 매우 높다. U04 는 홀로그래피에 사용되는 모든 일반적인 레이저(442, 457, 473, 488, 514, 532, 633, 640, 647, 660, 695 nm)에 대해 설정되어 아이소판크로매틱으로 감광유제가 감광된다. 감광 스펙트럼의 감도는 청색 440 nm 에서 적색 700 nm 까지 기록할 수 있다. U08 감광 유제와 비교하여 3배 낮은 민감도를 갖지만 감도는 20 mW 보다 낮은 저전력 레이저로 충분히 기록할 수 있을 정도의 감도를 갖는다. 3개의 레이저를 이용하는 풀 칼라 홀로그램 제작을 위한 각 레이저의 최소 노출 전력 에너지는 400  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  이다. 단색 홀로그램 제작의 경우는 600  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 이다.

안정제(stabilizer)의 품질 향상으로 현상액의 유효 기간이 증가하여 4 °C에서 2년 이상, 상온에서 수개월 동안 보관할 수 있다.

## IV. U04 처리 과정 및 실험 결과

홀로그램 감광 유제에서 가장 중요한 요소 중의 하나가 해로운 화학 약품을 사용하지 않는 것이다. 얼티메이트 홀로그래피사는 식품 산업으로부터 얻어진 제품을 이용하여 인간에게 무해하고 환경 친화적인 얼티메이트 감광유제를 개발하였다. <표 3>에 안전한 얼티메이트 용액을 사용한 간단한 2단계의 현상 처리 과정을 설명하였다.

농축된 현상액과 그대로 사용할 수 있는 표백액은 4 °C 에서 2년 이상 보관할 수 있다. 현상액은 1:10으로 희석시켜 사용하며, 일단 희석된 현상액은 밀폐된 용기에서 약 6시간 정도 보관할 수 있다. 표백액은 반복해서 여러 번 사용할 수 있다.

또한, 얼티메이트 기록 매질은 제작 과정에서 사전 경화가 이루어지기 때문에 위험한 경화 처리를 하지 않아도 된다. 기록 전 2시간 동안 50°C 오븐에서 플레이트를 프리 태닝(pre-tanning) 하고 상온에서 1시간 동안 안정화를 함으로써 이동 변화 또는 부풀어 오름을 방지할 수 있다.

얼티메이트 U04 플레이트는 제조일로부터 약 10일 정도 후에 이미 최대 감도에 도달되어 있으므로 애벌 처리나 감도 처리를 하지 않아도 된다.

U04 플레이트를 이용한 홀로그램 기록 후의 현상처리 과정은 다음과 같다.

표 3. 기본적인 얼티메이트 감광유제의 처리 과정

처리 단계	시간 (분)
얼티메이트 전용 현상액을 사용한 얼티메이트 홀로그램 현상 (20~25 °C) (희석율 1:10)	4 to 6
세척	0.5
얼티메이트 전용 표백액을 사용한 얼티메이트 홀로그램 표백 (20~25 °C)	35 (또는 투명해질 때 까지)
세척	3
세척(Kodak Photo-Flo)	1
건조	20

### 1. 현상

무독성의 현상액은 산화 방지를 위해 밀폐된 병에 농축된 상태로 보관되어 있다. 현상 처리 전에 증류수와 1:10의 비율로 희석한다. 농축된 현상액과 혼합하기 전 증류수의 온도는 20 °C (68°F) 또는 보다 높아야 현상액이 정상적인 기능을 발휘하게 된다. 현상 시간은 상온(20~25 °C) 에서 4분~ 6분 정도이며

안전광 하에서 천천히 흔들어 준다. 혼합된 현상액에 완전히 플레이트를 담금과 거의 동시에 현상 처리가 진행된다.

현상 후, U04 플레이트는 <그림 1>에서와 같이 옅은 노랑/오렌지 색으로 나타난다. 이와 같이 현상 후 특이한 색을 띠는 것은 다른 홀로그래픽 기록 재료(8~10 nm) 보다 매우 작은(4 nm) 입자 크기의 미 산란(Mie scattering)에 의해 설명될 수 있다. 따라서 검은색을 확인하기 위해 6분 이상 현상 할 필요는 없다. 노출에 대해 U04는 넓은 관용도(latitude)를 가지기 때문에 과다 노출시킬 필요가 없다.

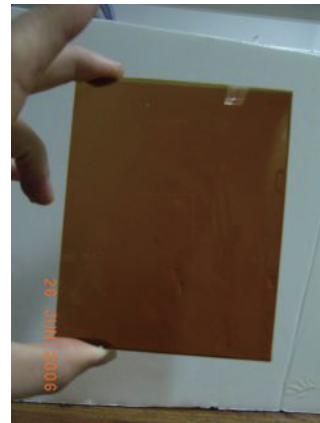


그림 1. 현상 후의 옅은 오렌지 색 플레이트

### 2. 세척

트레이 안의 플레이트를 안전광 하에서 흐르는 물에 30초간 세척한다.

### 3. 표백

무독성의 표백액도 산화 방지를 위해 밀폐된 병에 농축된 상태로 보관되어 있다. 상온에서 1년 정도 보관이 가능하다. 표백은 전등이 있는 상황에서도 가능하며 기본적인 표백 시간은 상온(20~25 °C)에서 3~4분이다. 트레이에 표백액을 부은 후 투명해질 때까지 천천히 흔들어 준다. 플레이트를 표백액에 완전히 담근 후 2~3초 후부터 표백 과정을 관찰 할 수 있다. <그림 2>는 2~3분의 표백 과정 후, 트레이 내부의 플레이트에 나타난 “플로팅(floating)” 이미지에 대한 사진이다.

표백액은 반복해서 여러 번 사용할 수 있다. 시간이 조금 더 걸려도 표백이 이루어지면 동일한 효과가 있는 것이며, 10분이 지나도 플레이트의 표백 작용이 이루어지지 않으면 더 이상 사용할 수 없는 것이다. 표백 후 플레이트는 <그림 3>에서와 같이 아무런 흔적도 없으며 완전히 투명해진다.

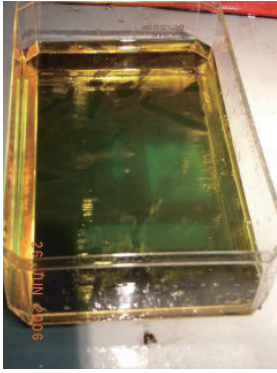


그림 2. 2~3분의 표백 과정 후, 트레이 안에서의 “플로팅(floating)” 이미지

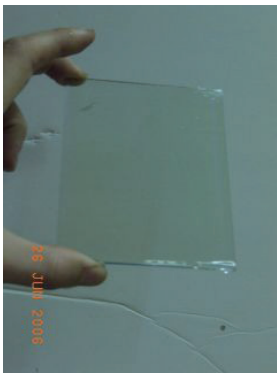


그림 3. 완전히 투명하고 거의 잡음이 없는 표백 후의 플레이트 사진

#### 4. 세척

트레이 내부의 플레이트를 흐르는 물에 60초 정도 세척한다.

데니슈크 홀로그램이 할로겐 램프에 투과되어 관찰된다. <그림 4>에서와 같이 홀로그램이 성공적으로 제작되었을 때 영상은 매우 강하게 나타난다. 이 후 플레이트를 추가적으로 2분 동안 흐르는 물에 세척한다.



그림 4. 플레이트가 젖어 있는 상태에서 관찰되는 투과 영상

#### 5. 건조

Kodak Photo-Flo 를 몇 방울 첨가한 탈염수 혹은 증류수에 홀로그래픽 플레이트를 1분간 담근 후, 꺼내어 수직으로 놓고 15분~20분 동안 건조시킨다.

#### 6. 최종 홀로그램

최종적으로 얻어진 홀로그램의 상태로부터 홀로그램 품질을 3가지 범주로 분류할 수 있다.

- ①노출이 적당한 경우, <그림 5>에서와 같이 최종 홀로그램이 밝고 플레이트가 투명한 상태이다.
- ②최종 홀로그램이 밝지만 플레이트가 하얀 우유 빛깔을 가지며 불투명한 경우, 홀로그램이 과다 노출된 경우이다.
- ③최종 홀로그램이 흐릿하고 플레이트가 투명한 경우, 홀로그램이 노출 부족 또는 물체가 기록 도중에 움직인 경우이다.



그림 5. 건조 후 홀로그램의 후면은 검은 필름과 같은 것을 접착하여 보호해준다.

얼티메이트 U04는 현재 칼라 홀로그래피 제작에 요구되는 사항을 대부분 만족한다. U04 감광유제의 입자 크기가 매우 작아 <그림 6>에서와 같이 3개 파장(적, 녹, 청)이 동시에 아무런 잡음 없이 아주 밝게 기록될 수 있다.



그림 6. Nefertiti - U04로 기록한 풀 칼라 홀로그램  
10x15 cm(457, 532, 640 nm 레이저)

<표 4>에서와 같이 입자 크기가 4 nm로 매우 작으며, 칼라 홀로그램 제작을 위한 다른 어느 실버 할라이드 감광매질 보다 해상도가 18,000 lines/mm 로 높다.

표 4. 칼라 홀로그램 제작을 위한 상용 실버 할라이드 홀로그래픽 기록재료

기록재료	감광대역(nm)	해상도(lines/mm)	입자 크기(mm)
U04 <sup>1</sup>	440-700	18,000	4
U08 <sup>1</sup>	440-700	10,000	8
PFG-03CN <sup>2</sup>	435-665	6,000	9
PFG-03C <sup>3</sup>	450-700	6,000	10
BB-PAN <sup>4</sup>	440-650	6,000	10

<sup>1</sup> Ultimate Holography <sup>2</sup> Sfera-S Ltd, <sup>3</sup> Slavich,

<sup>4</sup> Colour Holographic Ltd.

풀 칼라 홀로그램 제작을 위해 각 레이저당 400 μJ/cm<sup>2</sup>의 감도를 갖기 때문에 저전력 레이저의 사용이 가능하다. 2 단계의 처리 과정은 안전하며 사용하기 편리하다.

<그림 7>은 얼티메이트 감광 매질을 사용한 홀로그램으로 홀로그래퍼들에게 잘 알려진 청색 버전의 “The Clown”이다[18]. <그림 8>은 매우 사실적인 표현으로 진품과 똑 같은 나비 상자의 풀 칼라 홀로그램이다.



그림 7. The Blue Clown - U04로 기록한 풀 칼라 홀로그램  
30x40 cm(457, 532, 640 nm 레이저)

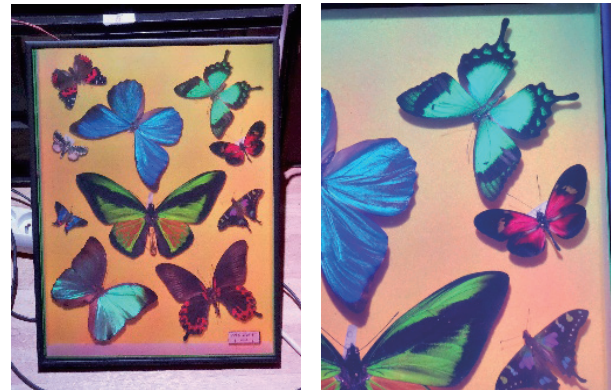


그림 8. Butterflies - U04로 기록한 풀 칼라  
30x40 cm(457, 532, 640 nm 레이저)

## Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2016-R0992-16-1008)

## V. 결론

고품질 홀로그램 기록을 위해 필요한 가장 기본적인 사항은 고해상도를 갖는 초미세 입자형 실버 할라이드 감광유제를 선택하는 것이다.

초실감 풀 칼라 홀로그램을 기록하기 위해서는 10,000 lines/mm 이상의 해상도를 갖는 아이소펜크로매틱 기록재료가 요구

된다. 얼티메이트 홀로그래피사의 U04는 잡음이 적고, 감도가 높으며, 현재 상용화된 제품들 중에서 해상도가 18,000 lines/mm로 가장 높은 제품이다.

홀로그래퍼가 쉽고 안전하게 현상처리를 할 수 있도록 간편화 하였으며 환경 친화적이다. 이미 많은 회사, 예술가, 연구소, 대학 실험실 등에서 U04를 사용하고 있으며 풀 칼라 홀로그램 제작을 위한 새로운 기준 기록 매질로 각광받고 있다.

이 새로운 실버 할라이드 감광유제가 더 사실적인 풀 칼라 홀로그램을 제공하게 됨으로써 홀로그래피 분야 및 시장 활성화에 많은 공헌을 할 수 있으리라 생각된다. 또한 환경친화적이며 안전하고 손쉬운 현상 처리로 인해 학생 및 새로운 홀로그래퍼들이 그들만의 독창적인 홀로그램을 쉽게 제작할 수 있는 기회를 가질 수 있기를 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] Yves Gentet and Philippe Gentet "Ultimate emulsion and its applications: a laboratory-made silver halide emulsion of optimized quality for monochromatic pulsed and full-color holography", Proc. SPIE 4149, Holography 2000, 56, October 2000.
- [2] Park, J., Stoykova, E., Kang, H., Hong, S., Lee, S., & Jung, K "Numerical reconstruction of full parallax holographic stereograms" 3D Research, 3(3), 1-6, 2012.
- [3] Bjelkhagen, H. I. "Ultra-realistic 3-D imaging based on colour holography". In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 415, No. 1, p. 012023). IOP Publishing, 2013.
- [4] Desse, J. M., & Tribillon, J. L. "Real-time three-color reflection holographic interferometer". Applied optics, 48(36), 6870-6877, 2009.
- [5] Sarakinos, A., Lembessis, A., & Zervos, N "A transportable system for the in situ recording of color Denisyuk holograms of Greek cultural heritage artifacts in silver halide panchromatic emulsions and an optimized illuminating device for the finished holograms", In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 415, No. 1, p. 012024). IOP, 2013.
- [6] Gustafsson, J., & Lindfors, C. "Development of a 3D interaction table." In Electronic Imaging 2004 (pp. 509-516). International Society for Optics and Photonics, May 2004.
- [7] Asmolova, O., Molchanov, P., Billmers, R., Ludwig, M., & Contarino, V. M. "Holographic optical elements for Lidar systems." In SPIE Defense and Security Symposium (pp. 69500M-69500M). International Society for Optics and Photonics, April 2008.
- [8] Pauliat, G., & Contreras, K. "Recording high-resolution wavelength-multiplexed data pages in a Lippmann data storage system." In International workshop on holographic memories & display 2010 (pp. 16D-5), November 2010.
- [9] Escarguel, A. "Upgrade of the pedagogic and popular science tool for holography to a colour version". arXiv preprint rXiv:1609.07346, 2016
- [10] Rodrigues, C., Garcia-Algado, P., Semião, V., de Pinho, M. N., & Geraldes, V. "Concentration boundary layer visualization in nanofiltration by holographic interferometry with light deflection correction" of membrane science, 447, 306-314, 2013
- [11] SLAVICH Joint Stock Company, Russia; www.slavich.com, 2016
- [12] Sfera - S Ltd, Russia; www.geola.com, 2016
- [13] Colour holographic Ltd, UK; www.colourholographic.com, 2016
- [14] Ultimate Holography; http://www.ultimate-holography.com
- [15] Bjelkhagen, Hans, and David Brotherton-Ratcliffe. Ultra-realistic imaging: advanced techniques in analogue and digital colour holography. CRC press, 2013.
- [16] 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
- [17] Yu. N. Denisyuk and I. R. Protas, "Improved Lippmann photographic plates for recording stationary light waves," Opt. Spectrosc. (USSR) 14, 381-383, 1963
- [18] John Fleischman, Robert Kunzig, "Photography, Old & New Again", Discover Magazine, February 01, 2002

## 약 력



필립 중테

1994년 French Grande Ecole HEI (공학석사)  
1995년~2016년 BORDEAUX HOLOGRAPHY  
연구원  
2016년~현재 광운대학교 박사과정  
관심분야: 홀로그래피



이 승 현

1984년 광운대학교 공학사  
1986년 광운대학교 공학석사  
1992년 광운대학교 공학박사  
1992년~현재 광운대학교 정보콘텐츠대학원 교수  
관심분야: 실감미디어, 3D 영상, 홀로그래피