Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 6 pp. 744-749, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.6.744
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

LCOS기반의 파장선택스위치 빔제어용 컴퓨터 생성 홀로그램

이용민*, 한창호
선문대학교 기계ICT융합공학부

Computer Generated Hologram for Beam Control of LCOS based Wavelength Selective Switch

Yong-Min Lee*, Chang Ho Han
School of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sunmoon University

요 약 본 논문은 차세대 ROADM을 구성하는 핵심기술인 LCOS를 이용한 파장선택 스위치에서 LCOS 소자의 빔 제어 방법으로 컴퓨터 생성 홀로그램 설계에 관한 논문이다. LCOS 소자를 이용한 빔 제어방법으로 일반적으로 grating 패턴을 사용하지만 본 논문에서는 컴퓨터 생성 홀로그램을 도입하여 보다 높은 광효율의 파장선택 스위치 구현이 가능하도록 하였다. LCOS 소자의 위상변조 특성을 이용하여 5개의 출력 포트와 40 채널의 다중파장의 빔 제어를 할 수 있는 파장선택 스위치의 홀로그램 설계방법을 제시하였다. Gerchberg-Saxton 알고리즘을 적용한 멀티레벨 위상변조 홀로그램을 설계하였으며 다른 출력 포트와 채널을 갖는 파장선택 스위치 시스템에도 쉽게 적용이 가능하다. 타겟 이미지의 밝기정보를 사전에 입력하고 역프리에 변환을 통해 위상정보를 추출하여 홀로그램에 저장한 후 임의의 광원의 밝기정보를 합성하여 프리에 변환하는 방법으로 타겟 이미지의 밝기정보를 예측하는 방법을 사용한다. 5개의 출력포트용 홀로그램을 제작하여 검증실험장치의 재생 이미지의 출력특성을 통해 본 연구방법으로 설계된 홀로그램의 유용성을 검증하였고 40채널 파장선택 스위치 제어용 홀로그램 설계방법을 제시하였다.

Abstract This paper presents the design of a computer-generated hologram for beam control of an LCOS-based wavelength selective switch, which is the core technology for next-generation ROADM. By introducing a computer-generated hologram instead of general grating patterns to control the LCOS device, we contribute to building a more efficient wavelength selective switch. With the use of phase modulation properties of LCOS devices, we designed the hologram for five-port output and a 40-channel wavelength selective switch. We applied a multi-level phase modulation technique with the Gerchberg-Saxton algorithm to produce the hologram, which is easily scalable to any different type of wavelength selective switch. With an experimental setup, we verified the usability of the hologram designed for five-port output. We also suggest a hologram design technique for beam control of a 40-channel wavelength selective switch.

Keywords : LCOS, Wavelength Selective Switch, Computer Generated Hologram, ROADM, Optical Communication

1. 서론

정보전달의 대량화 및 고속화 추세에 따라 다중파장 신호를 이용한 광섬유 정보전달망이 Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM) [1]로 진화하고 있다. 이러한 차세대 ROADM에서 핵심이 되는 노드 스위칭 기술을 실현하는 기술중 한가지가 파장 선택 스위치 (Wavelength Selective Switch) 기술이다. 이 파장선택 스위치는 하나의 입력 포트와 N개의 출력 포트를 갖는 소자로 다중파장의 입력신호가 파장 선택 스위치를

*Corresponding Author :Yong-Min Lee(Sunmoon Univ.)
Tel: +82-41-530-2349 email: ymlee@sunmoon.ac.kr
Received March 9, 2016 Revised (1st May 23, 2016, 2nd June 1, 2016)
Accepted June 2, 2016 Published June 30, 2016

통해 각 파장별 입력신호를 임의의 출력 포트로 전달하는 기능을 갖는다.

이 파장선택 스위치를 구성하는 핵심소자로 현재 Micro Electro Mechanical System (MEMS) 소자[2],[3]와 Liquid Crystal on Silicon (LCOS) 소자[4]-[6] 2가지가 주로 경쟁하고 있다. 이 두가지 소자는 빔을 반사시켜 방향을 제어하는 방식으론 같으나, 구체적으로 MEMS 소자는 각 픽셀에 위치한 마이크로 반사판을 움직여서 입사빔을 방향을 제어하는 방식으로 저손실 이득과 빔의 편광과 파장의 영향이 없다는 장점이 있다. 반면에 LCOS소자는 빛의 회절현상을 이용하여 각 픽셀에 위치한 반사판에서 입사빔의 방향을 제어하는 방식으로, 움직이는 부품이 없어 진동에 강하고 포트확장성 및 견고성이 우수하며 채널별 손실 보상, 파장변위 보상, 입출력 채널 모니터링등의 기능을 용이하게 수행할 수 있는 장점 [7],[8]이 많아 활발한 연구가 진행되고 있다. 위의 두 가지 소자 이외에 Liquid Crystal (LC)소자 와 Digital Light Processing(DLP) 소자를 이용한 방법도 있지만 LC소자는 제어 빔의 구경이 너무 크고, DLP소자는 진동에 매우 취약한 단점이 있다.

LCOS소자를 이용한 빔 제어방법[9]으로 일반적으로 grating패턴이 쓰이고 있는데 입출력간의 광효율 측면에서 매우 불리하다. 그런데 홀로그램 패턴을 사용할 수 있다면 보다 높은 광효율의 파장 선택 스위치의 실현이 가능할 것이다. 홀로그램을 제작하는 기법으로 Simulated annealing[10], Direct binary search[11], Gerchberg-Saxton 알고리즘[12] 등이 연구되고 있다. 이 중에 특히 Gerchberg-Saxton 알고리즘은 프리에 변환 기반의 홀로그램과 이미지 도메인의 위상값을 반복적으로 최적화하는 방법으로 위상의 자유도를 제공하는 장점이 있다. 타겟 이미지의 밝기 이미지 데이터를 갖고 역프리에 변환을 통해 홀로그램 위상정보를 만들고 이 홀로그램 위상정보에 레이저 광원을 합성하여 프리에변환을 시켜 근접한 타겟 이미지를 제작하는데 이러한 과정을 수십차례 반복한다.

또한 LCOS소자에 적용하기 위한 홀로그램을 제작하려면 액정층의 위상변조 (phase modulation) [13] 특성을 이용해야 하는데 binary 위상변조 방법과 멀티레벨 위상변조 방법이 있다. Binary 위상변조 방법의 경우는 프리에 변환시에 발생하는 dual image 문제로 광효율의 손실을 초래하게 된다.

본 논문에서는 LCOS소자를 이용한 파장선택 스위치 시스템에서 5개의 출력 포트를 갖고 40 채널의 다중파장의 빔제어를 할 수 있는 컴퓨터 생성 홀로그램 연구에 관한 것으로 Gerchberg-Saxton 알고리즘 기반의 멀티레벨 위상변조 방법으로 5개의 출력포트를 지정할 수 있는 컴퓨터 생성 홀로그램을 설계하고 40채널의 다중파장에 대한 빔 제어용 홀로그램 설계방법에 대해 기술한다.

2. 본론

2.1 LCOS소자를 이용한 파장선택스위치 시스템 개요

LCOS소자를 이용한 파장선택스위치 시스템은 기본적으로 Fig. 1 과 같이 구성한다. 1개의 다중파장 입력포트와 5개의 출력포트를 갖는 fiber collimator array입출력부, LCOS소자에서의 회절을 위한 편광처리 및 collimation 렌즈부, 다중파장으로 분리를 위한 grating, 분리된 각 파장의 빔을 제어하는 LCOS소자로 구성된다.

본 파장선택스위치 시스템의 동작원리를 살펴보면, 우선 Input포트로 입사된 다중파장 광신호가 렌즈부를 거쳐 안정적인 단일 편광이 입사되도록 한다. 입사된 광신호는 grating lens에서 다중 파장으로 분리되어 LCOS소자에 입사되면 LCOS에서 표시되는 홀로그램 패턴에 따라 LCOS소자에 입사되는 각각의 파장은 각각 다른 각도로 반사되어 되돌아가서 원하는 출력포트로 나가도록 컨트롤한다.

LCOS 소자는 CMOS 반도체 제조 공정으로 이차원적으로 배열된 픽셀들과 구동회로를 실리콘 웨이퍼 기판에 집적하고 표면에 알루미늄 반사층을 만든 하판과 투명한 유리기판으로 이루워진 상판 사이에 액정물질을 주입하여 제작된 초소형 디스플레이 소자이다. LCOS의 각 픽셀에 인가되는 전압에 크기에 따라 달라지는 액정분자들의 배열상태에 따라 액정층의 위상 상태가 변하는 특성을 이용하며 이를 위상변조 라고 한다. 액정층을 통과하는 빛이 액정분자들의 배열방향에 따라 다른 굴절율을 받게 된다. 유전율이방성의 차이 (n_o, n_e) 는 특정 파장(λ)의 빛이 액정층 두께 (d)을 통과하면서 식(1)과 같이 위상지연(Γ)이 발생하게 되며 LCOS의 각 픽셀별로 프라운호퍼 회절현상을 만들게 된다.

$$\Gamma(reflective) = \frac{4\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d \qquad (1)$$

LCOS 소자에 표시된 특정 홀로그램 패턴에 따라 입사되는 광신호가 임의의 각도로 편향되어 반사하게 된다. 일반적으로 입력되는 광신호의 구경이 LCOS 소자의 단일 픽셀의 크기보다 커서 다수의 픽셀에 걸쳐 광신호가 반사되며 LCOS의 다수의 픽셀에 표시된 홀로그램 패턴의 형상에 따라 각 픽셀별로 제어되는 위상값에 따라 회절되어 반사되는 빔의 방향이 바뀌게 되어 원하는 출력포트로 나가게 된다.

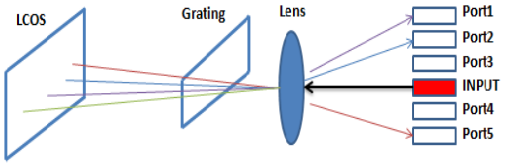

Fig. 1. Configuration of wavelength selective switch

2.2 5개의 출력포트 지정용 홀로그램 설계

파장선택 스위치 시스템에서 LCOS소자에 특정한 홀로그램 패턴을 디스플레이시켜 광의 회절 현상을 이용한 빔의 편향이 가능하므로 입출력 빔 제어를 할 수 있다. 이를 위해서 컴퓨터 생성 홀로그램이 필요하며, 홀로그램을 제작하기위해 Gerchberg-Saxton 알고리즘을 적용한 멀티레벨 홀로그램 생성 프로그램을 제작하였다.

본 연구에서는 5개의 출력포트를 지정하여 빔이 출력하도록 Fig. 2 와 같이 원본 이미지를 다섯 개를 제작하여 사용하였다. 각각의 이미지는 Fig. 1 의 파장선택 스위치에서 5개 출력포트중의 위치가 서로 다른 출력포트를 각각 나타낸다. 실제 파장선택 스위치 실험에서 배치하는 출력 포트의 정렬 방향에 따라 본 원본 이미지의 도트의 정렬 방향을 결정해서 디자인 해주면 된다. Fig. 2 의 5가지 원본이미지를 매트랩으로 제작한 홀로그램 생성 프로그램을 이용하여 각각의 이미지에 해당하는 홀로그램을 Fig. 3 과 같이 제작하였다.

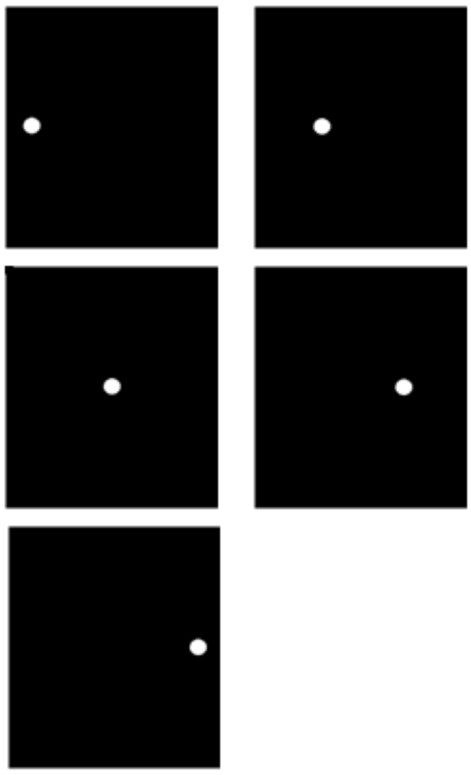

Fig. 2. Original images to be encoded

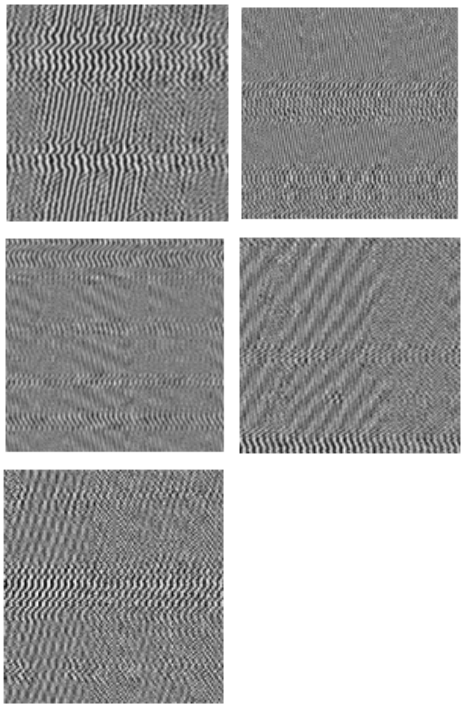

Fig. 3. Computer generated hologram of the original images

이와 같이 만들어진 5가지 홀로그램 패턴을 Fig. 4 와 같이 검증용 실험 장치를 통해 LCOS소자에 디스플레이 시킨 후 레이져광원을 비추어 스크린에 복원되는 광 이미지가 실제로 코딩된 원본 이미지와 같은지를 검증하는 실험을 진행하였다.

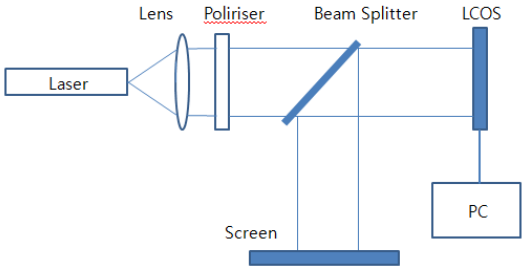

Fig. 4. Setup for reconstruction of original image

2.3 40채널 빔 제어용 홀로그램 설계

파장분할 다중화 광전송시스템에서 사용되는 파장대는 주로 C밴드(1528~1560nm)로 ITU표준채널의 21번 채널인 1560.61nm부터 60번채널인 1529.55nm까지 40개의 파장을 대상으로 출력포트 선택이 필요하다. 따라서 본 파장선택 스위치 시스템을 적용하려면 40채널 출력포트 선택용 홀로그램 패턴 생성이 필요하며 각 채널별로 출력포트 5개중 한 개를 선택하여 출력되어야 한다. LCOS소자에 40개의 채널의 파장이 grating 소자에 분할되어 나란히 입사할 것이며 40개의 채널을 별도로 제어하기 위해 LCOS소자에 40개의 홀로그램 패턴을 각 영역별로 디스플레이 되어야 한다. 예를 들어 각각의 채널이 Fig. 5 과 같이 40개의 채널의 출력포트가 다음과 같이 지정되었다면

1번채널이 1번째 출력포트로 전송,
2번채널이 4번째 출력포트로 전송,
3번채널이 5번째 출력포트로 전송,
4번채널이 3번째 출력포트로 전송,
5번채널이 5번째 출력포트로 전송,
.....

각각의 파장이 지정된 출력 포트로 전송되어야 한다. 이와같이 각 채널별로 정해진 출력포트로 스위칭하기 위해 LCOS소자에 각 채널영역에 Fig. 3 의 5개 출력포트 지정패턴중 하나를 각각 40개의 홀로그램 패턴으로 배열하여 원하는 출력포트 선택이 가능하며 채널별로 홀로그램 패턴의 폭도 개별적으로 정할 수 있도록 프로그램을 설계하였다. 따라서 40개의 분할파장이 LCOS소자에 입사되는 위치에 정확히 맞추어 각 홀로그램 패턴의 폭을 튜닝할 수 있도록 설계하였다. 이와 같이 지정한 포트와 패턴폭을 반영하여 Fig. 6 과 같이 40채널 빔 제어용 홀로그램을 제작하였다. Fig. 6 의 경우는 40개의 홀로그램 패턴폭이 동일한 경우를 나타내었다.

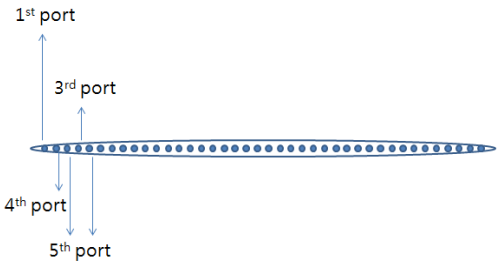

Fig. 5. 40 channel demultiplexed beam profile on LCOS device

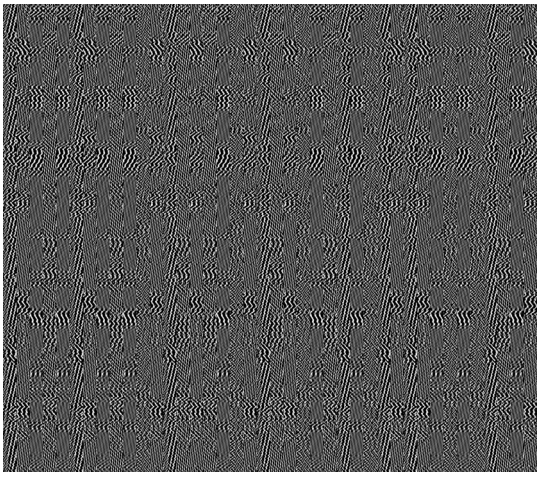

Fig. 6. Computer generated hologram for 40 channel beam control

3. 실험결과 및 고찰

5가지 출력포트를 지정하는 Fig. 3 의 홀로그램 패턴의 성능을 검증하기 위해 Fig. 4 의 실험장치에서 5가지의 홀로그램 패턴에 따른 각각의 재현된 이미지를 촬영한 그림을 Fig. 7 에 나타내었다. 원본이미지인 Fig. 2 와

비교해 보면 재현된 각 이미지의 도트 위치가 원본이미지와 똑같이 바뀜을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3의 홀로그램 패턴을 LCOS소자를 통해 5가지의 출력포트를 지정하는 역할을 충분히 할 수 있음을 보여준다. 촬영된 재현이미지에서 중간 부분에 밝은 spot이 보이는데 이는 회절현상의 dc spot 성분에 의해 생성된 것이며 이로 인해 입출력 효율이 떨어질 수 있으나 입력부의 폴라라이저를 적절히 조절하면 없앨 수 있는 부분이다.

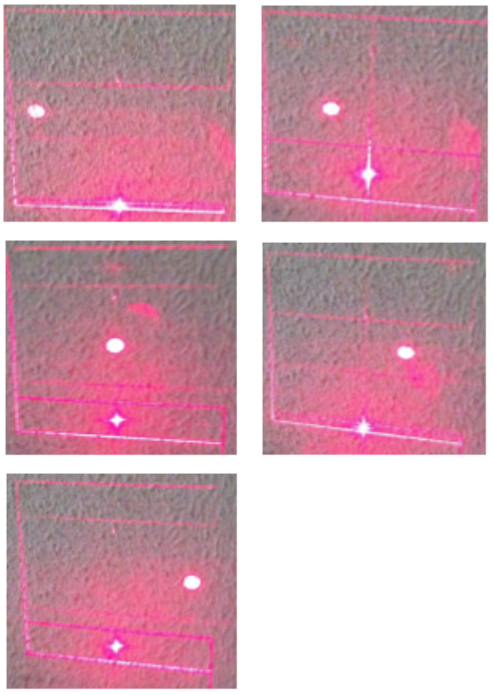

Fig. 7. Measured reconstructed images

40채널 빔제어용 병합 홀로그램을 Fig. 6 과 같이 성공적으로 제작하였으며 각각의 홀로그램 패턴의 폭도 임의로 정할 수 있도록 설계하였다. 따라서 주변의 다른 홀로그램 패턴의 영향을 받지 않도록 하여 각 채널간의 크로스토크를 효율적으로 방지할 수 있을 것이다. 이 병합 홀로그램을 LCOS 소자에 디스플레이 시켜 파장선택 스위치의 빔 제어가 이루워 지게 된다. 이 병합 홀로그램을 적용하면 향후 LCOS 소자를 사용한 파장선택 스위치 시스템설계 시 광효율이 높은 시스템 설계에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

LCOS소자를 이용한 파장선택 스위치 시스템에서 빔 제어용으로 컴퓨터 생성 홀로그램 설계방법을 통해 광 입출력효율이 높은 파장선택 스위치 설계에 기여할 수 있게 되었다. 5개의 출력포트를 지정하기 위한 홀로그램 패턴의 재생이미지 검증 실험을 통해 본 홀로그램 설계 방법의 우수성을 입증하였고 채널간 크로스토크 회피 가능한 40채널의 다중파장 빔 제어용 홀로그램 제작방법을 제시하였다. 본 논문에서는 5개의 출력 포트와 40 채널의 다중파장의 빔제어에 대한 설계방법을 제시하였는데 본 논문의 설계방법으로 더 많은 출력과 채널에도 같은 방법으로 쉽게 적용할 수 있다. 향후 본 설계된 홀로그램 패턴으로 실제 LCOS 소자를 이용한 파장선택 스위치 설계에 적용하는 연구를 진행할 예정이다.

References

[1] M. Feuer, D. Kilper, and S. Woodward, "ROADMs and their system applications" in Optical Fibre Telecommunications VB, (I. Kaminov, T. Li., A. Willner eds), pp. 293-343, San Diego, Academic Press, 2008.

[2] L.Y. Lin et al., "MEMS for optical networking: Current status and future prospects," in Proc. ECOC 2000, p. 91, Sept. 2000.

[3] D. M. Marom, D. T. Neilson, D. S. Greywall, C. S. Pai, N. R. Basavanhally, V. A. Aksyuk, D. O. L´opez, F. Pardo, M. E. Simon, Y. Low, P. Kolodner, and C. A. Bolle, "Wavelength-selective 1 × K switches using free-space optics and MEMs micromirrors," J. Lightw.Technol., vol. 23, no. 4, pp. 1620-1630, 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2005.844213

[4] N. Collings, T. Davey, J. Christmas, D. Chu, and B. Crossland, "The applications and technology of phase-only liquid crystal on silicon devices," J. Display Technol., vol. 7, no. 3, pp. 112–119, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/JDT.2010.2049337

[5] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer," IEEE Commun. Mag., vol. 50, pp. S12-S20, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146481

[6] Y. Lee, "Wavelength Selective Switch using LCoS Display," J. Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 15, No. 8, pp. 5288-5293, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.5288

[7] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer," IEEE Commun. Mag., vol. 50, pp. S12-S20, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146481

[8] M. Johansson, S. H°ard, B. Robertson, I. Manolis, T. Wilkinson, and W. Crossland, "Adaptive beam steering implemented in a ferroelectric liquid crystal spatial-light-modulator free-space, fiber-optic switch," Appl. Opt., vol. 41, no. 23, pp. 4904-4911, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1364/AO.41.004904

[9] Y. Lee, J. Gourlay, W. J. Hossack, I. Underwood, and A. J. Walton, "Multi-phase modulation for nematic liquid crystal on silicon backplane spatial light modulators using pulse-width modulation driving scheme," Opics Comm., vol. 236, pp. 313-322, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2004.03.043

[10] A. Kirk and T. Hall, "Design of binary computer generated simulated annealing: Coding density and reconstruction error," Opt. Commun., vol. 94, pp. 491-496, 1992.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0030-4018(92)90592-F

[11] M. A. Sedowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeny, "Synthesis of digitalholograms by direct binary search," Appl. Opt., vol. 26, pp. 2788-2798, 1987.
DOI: http://dx.doi.org/10.1364/AO.26.002788

[12] R. Gerchberg, W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diraction plane pictures," Optik, vol. 35, no. 2, pp. 237-246, 1972.

[13] C. A. Tee, W. A. Crossland, T. D. Wilkinson, and A. B. Davey, "Binary phase modulation using electrically addressed transmissive and silicon backplane spatial light modulators," Opt. Eng. Vol. 39, No. 9, pp. 2527-2534, 2000.
DOI: http://dx.doi.org/10.1117/1.1287395

이 용 민(Yong-Min Lee) **[정회원]**

- 1986년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
- 2005년 1월 : Univ. of Edinburgh 전자공학과(공학박사)
- 1985년 12월 ~ 2007년 2월 : 삼성 SDI 수석연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 부교수

<관심분야>
디스플레이, 광통신소자, 터치패널 구동기술

한 창 호(Chang Ho Han) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 청주대학교 전자공학과 (학사)
- 1995년 2월 : 동 대학원 전자공학과 (석사)
- 2010년 2월 : 선문대학교 전자공학과 (박사)
- 2014년 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 조교수

<관심분야>
영상처리, 모션캡처