

레이저 프로젝터의 스페클 저감을 위한 광학 소자 설계 및 제작

Design and Fabrication of Optical Element for Speckle Reduction

in Laser Projector

이재용*, 김영주†

Jae-Yong Lee and Young-Joo Kim

(2014년 9월 18일 접수; 2014년 9월 22일 심사완료; 2014년 9월 23일 게재 확정)

Abstract

Laser projector has many advantages of high brightness, high resolution and small size, but the huge drawback of image degradation called speckle which generated by coherence of laser and roughness of surface interrupts their general use. There are many methods to reduce speckle pattern, but they need effective optical systems to realize display to the far field with huge volume. We designed speckle reduction element by using microlens with controlled curvature to reduce spatial coherence. Vibration element was also applied to reduce temporal coherence which considered response time of eye. Designed element was fabricated by simple reflow method and imprinting method. From the results, the fabricated element performed 48.33% of speckle reduction efficiency and 41.29% of optical efficiency with a single doublet lens.

Key Words : Speckle Pattern, Laser Projector, Spatial Coherence, Optical Element, Microlens

1. 서론

레이저 프로젝터는 3 가지 파장의 레이저와 마이크로 미러를 사용하여 각각의 디스플레이 픽셀을 하나의 혼합된 광원으로 구현할 수 있는 디스플레이 시스템이다. 레이저를 광원으로 사용하기 때문에 높은 밝기로 고해상도의 영상을 구현할 수 있으며 장치의 소형화가 용이하다는 장점을 가지고 있지만, 디스플레이 화질에 악영향을 미치는 스페클 패턴이 발생하는 단점이 있다. 스페클 패턴은 높은 간섭성과 높은 세기를 가지는 단파장 레이저 광원이 영상이 투사되는 면의 거칠기와 상호 작용하여 발생하는 보강, 상쇄 간섭에 의한 것으로 시청자의 위치에서 관찰되는 불규칙한 세기

분포에 의한 간섭무늬를 의미한다[1].

이를 저감시키기 위해서는 레이저의 공간적 간섭성 저감[2-3], 시간적 간섭성 다양화[4-5], 그리고 편광 다양화 등의 방법이 사용되고 있으며, 여러 방법들을 혼용하여 프로젝터에 적용하는 연구 또한 다양하게 진행되고 있다[6-8]. 하지만 앞서 연구된 소자들은 각각 소자의 설계 목적에 따라 가까운 거리 또는 먼 거리에서의 스페클 저감 효율은 높으나, 소자 효율이 감소하고 이를 확보하기 위해 다양한 광학계를 요구하므로 소형 프로젝터에 적용하기에 큰 부피를 차지하게 된다.

본 연구에서는 소형 레이저 프로젝터에 적용 가능하며 향상된 스페클 저감 효율과 소자 효율을 가지는 광학 소자를 설계하고 이를 제작, 평가 하였다. 설계된 소자는 소자 효율과 공간적 간섭성을 조절하기 위한 곡면을 가지는 마이크로 렌즈와 시간적 간섭성을 저감하기 위한 진동 소자를 포함하며 Reflow 공정을 통해 손쉽게 제작 되었다. 또한 스페클 평가 광학계를 구성하여 향상된 소자 특성을 평가 및 분석하였다.

† School of Mechanical Engineering, Yonsei University

E-mail : yjkim40@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-6852

* School of Mechanical Engineering, Yonsei University

2. 설계 및 제작

2.1 스페클 저감 소자 설계

레이저 프로젝션 시스템에서 투사 면에 의해 발생하는 스페클 패턴은 Fig.1 과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 레이저 광원이 일련의 광학 소자를 통과한 이후 마이크로 스캐닝 미러에 의해 영상을 구현하며 투사 면의 특성에 의해 불규칙한 광 분포를 가지는 영상에 의해 스페클이 발생한다. 스페클 저감 소자는 프로젝터 내의 광학계에 포함되며 미러에 입사 되기 이전에 레이저 광원의 간섭성을 저감시키는 역할을 한다. 우리는 스페클 저감을 위한 방법으로 Fig.2 와 같이 마이크로 렌즈를 사용한 공간적 간섭성 저감과 진동 소자에 의한 시간적 간섭성 저감을 사용하였다.

마이크로 렌즈는 렌즈의 곡률에 따른 광원의 산란을 통해 공간적 간섭성을 다양화 하며 투사 면의 특성에 의해 발생하는 보강, 상쇄 간섭을 줄여 효과적으로 스페클을 저감시킬 수 있다. 마이크로 렌즈의 곡률은 저감 소자로부터 투사 스크린까지 거리와 스페클 저감 소자의 굴절률을 고려하여 아래 수식들을 통해 설계 되었다.

$$n_1 \sin \theta_i = n_{air} \sin \theta_o$$

$$\theta_i = \tan^{-1} v$$

여기서 v 는 렌즈의 곡률, θ_i 는 곡률에 입사하는 광선의 각도, n_1 는 재료의 굴절률, 그리고 θ_o 는 소자를 투과하여 출사하는 광선의 각도를 의미한다. 마이크로 렌즈의 곡률이 높을수록 초기 입사되는 레이저의 광 경로가 다양한 각도로 산란 되므로 스페클 저감 효과는 높지만 그만큼 감소된 직진성에 의해 스크린의 원하는 지점에 투사되는 광량이 감소하게 되므로 소자 효율이 감소한다. 따라서 우리는 소자와 스크린, 관측자의 간격을 고려하여 소자의 곡률을 설계하였고, 각각의 수치는 소자에서 스크린까지 200mm, 스크린에서 관측자까지 600mm 의 거리로 고려하였다. 거리와 소자의 재료를 고려한 출사 광선의 각도는 소자 효율을 위해 0.5°로 선정 하였으며, 그 결과 최적 렌즈의 곡률은 0.15 로 수식을 통해 계산 되었다. 동시에 입사 광 내에 마이크로 렌즈를 밀집 시켜 렌즈의 효

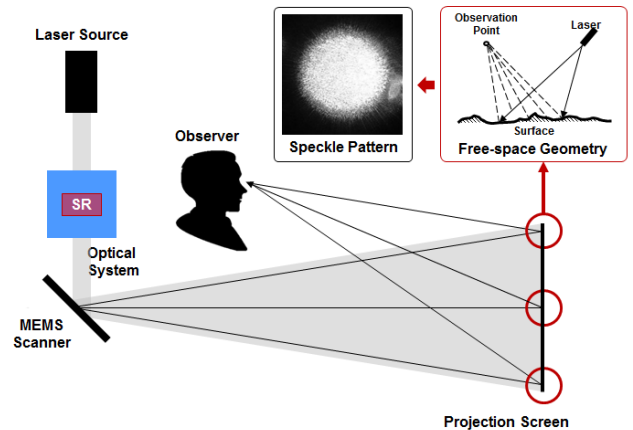


Fig. 1 Speckle pattern distributions on laser projection display

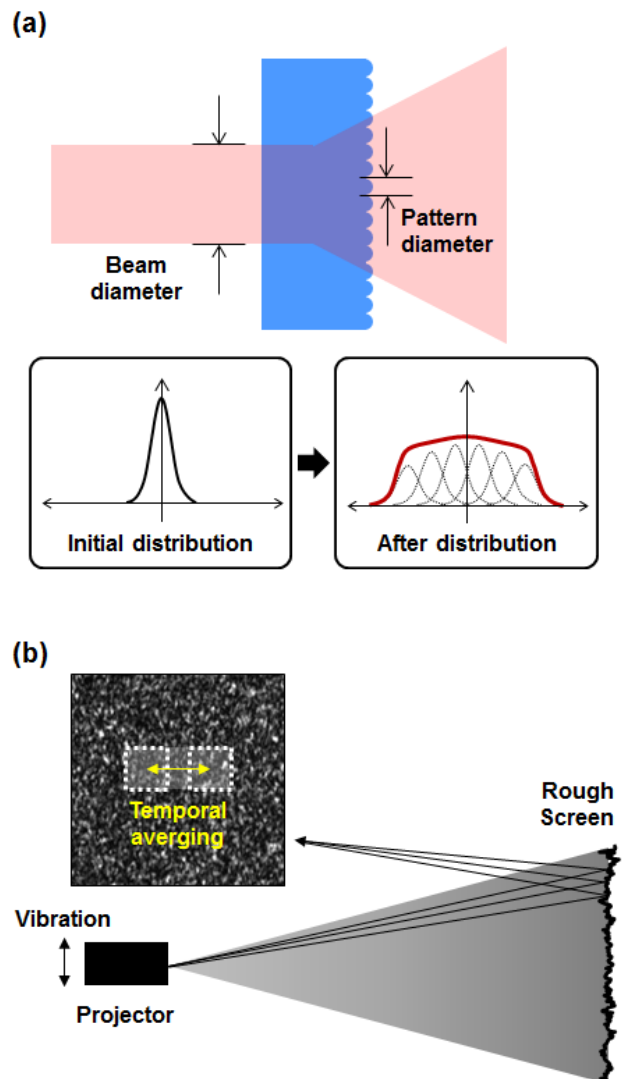


Fig. 2 Design concept of optical element: (a) spatial coherence, (b) temporal coherence

과를 높이기 위해, 입사 광의 직경 보다 작은 100 μm 의 반경과 벌집 모양 구조의 패턴 밀도 0.9를 가지도록 설계 되었다. 또한 각각 렌즈의 초점 거리에 의해 상이 흐려지는 효과를 막고 영상 이미지의 결상을 위해 doublet 렌즈를 포함하여 소자를 설계하였고, 소자에서 렌즈까지 거리는 소형 프로젝터 소자의 크기를 고려하여 50mm로 선정하였다.

마이크로 렌즈에 의한 공간적 간섭성 저감과 동시에 시간적 간섭성을 저감 시키기 위한 진동 소자의 구동 조건은 일반적으로 알려진 사람의 인지 속도인 17ms 보다 빠른 속도인 100Hz로 선정하였다. 실험에는 일반적으로 진동 실험에 사용하는 가진기를 통해 소자를 한 축으로 진동 시켜 주어 그 특성을 평가하였다.

2.2 스펙클 저감 소자 제작

앞서 설계한 소자를 reflow 공정과 imprinting 공정을 통해 제작하였다. 포토레지스트(PR)의 코팅 두께는 원하는 렌즈의 곡률 제작을 위해 다음 수식을 통해 계산 되었다.

$$t_{PR} = \frac{t_{cy}}{1-\delta} = \frac{1}{1-\delta} \cdot \frac{h}{6} \cdot \left(3 + \frac{h^2}{r^2}\right)$$

여기서 t_{PR} 은 PR의 수축률을 고려한 코팅 두께이며, δ 는 PR의 수축률, h 는 패턴의 높이, 그리고 r 은 패턴의 반경을 의미한다. 마이크로 렌즈 제작 순서는 Fig.3과 같다. 우선 공정을 위해 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였으며, 이소프로필 알코올, 아세톤 그리고 DI water를 사용해 기판을 세척하였다. 그리고 계산된 두께만큼의 PR을 spin coater를 통해 웨이퍼에 코팅하였다. PR이 코팅된 웨이퍼를 불순물 제거를 위해 hot plate를 사용하여 90도에 100초 동안 prebake 공정을 진행하였다. 다음으로 원형 패턴이 그려진 photo mask를 통해 웨이퍼를 lithography 장비를 통해 352nm 파장과 $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 파워를 가지는 ultraviolet(UV)광원에 노출시켰다. 그리고 developer를 사용하여 경화되지 않은 PR을 제거하였으며, 원기둥 형태의 PR 패턴이 가공된 웨이퍼를 hot plate를 사용하여 reflow 공정을 진행하여 몰드를 제작하였다. 이후, 패턴을 복제하기 위한 복제 몰드를 열경화

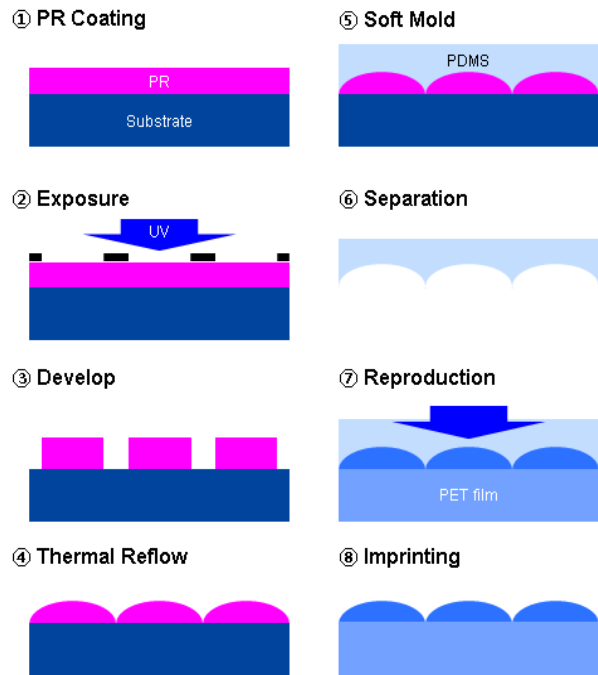


Fig. 3 Fabrication Process of microlens

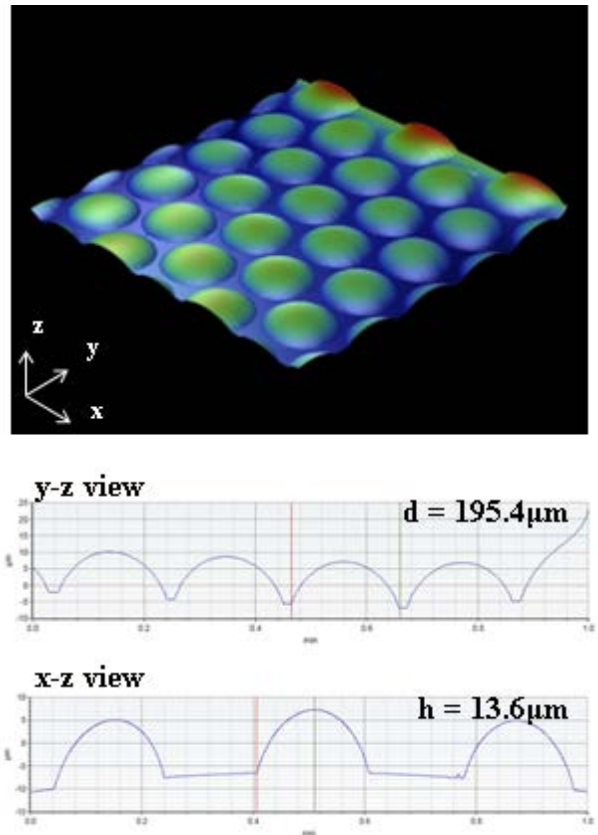


Fig. 4 The shape of fabricated microlens

성 폴리머인 poly(dimethylsiloxane) (PDMS)를 통해 제작하였다.

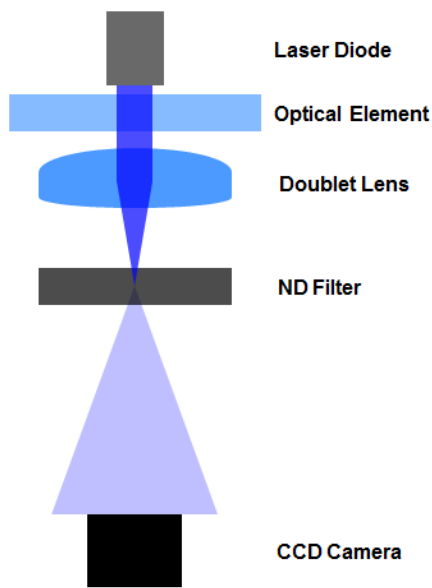


Fig. 5 Speckle evaluation system

마지막으로 제작된 복제 몰드를 사용하여 플라스틱 필름에 UV 경화성 폴리머로 렌즈를 복제하여 스페클 저감 소자를 완성하였다. 최종 제작된 소자는 3 차원 표면 측정기를 통해 측정되었으며, 설계한 수치대로 렌즈가 잘 제작 되었음을 fig.4 와 같이 확인하였다.

3. 평가 및 분석

3.1 평가 광학계 구성

제작한 스페클 저감 소자의 특성 평가를 위해 레이저 다이오드와 CCD 카메라를 포함하는 평가 광학계를 fig.5 와 같이 구성하였다. 평가를 위한 광원은 프로젝션 디스플레이에서 파랑색으로 사용되는 405nm 파장의 블루 레이저 다이오드를 사용하였으며, 광량 제어를 위한 ND 필터를 추가로 사용하였다. 또한 스페클 수치 측정을 위한 CCD 카메라와 결상을 위한 doublet 렌즈를 앞서 선정한 스크린의 거리를 고려하여 위치시켰다. 스페클 패턴은 앞서 설명하였듯 전체 광량에 대비하여 각 위치별 상쇄, 보강 간섭의 표준편차를 의미하므로 CCD 카메라를 통해 수집된 결과를 바탕으로 다음 수식들을 통해 소자의 스페클 값과 저감 효율을 계산하였다.

여기서 S 는 스페클 값, I_{mean} 은 측정된 광량의 평균값, R 은 스페클 저감 효율, S_0 는 저감 소자를

$$S = \frac{1}{I_{mean}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{mean})^2}$$

$$R = 10 \log \left(\frac{S_0}{S_{OE}} \right)$$

사용하지 않았을 때의 스페클 값, 그리고 S_{OE} 는 저감 소자를 사용하였을 때의 스페클 값이다.

3.2 제작 소자 특성 평가 및 분석

앞서 구성한 광학계를 통해 제작한 스페클 저감 소자의 특성을 평가하였다. Fig.6(a)는 제작한 소자를 사용하지 않고 레이저 광원과 ND 필터에 의해 형성된 스페클 패턴으로, 그림에서 알 수 있듯이 ND 필터를 스크린 대용으로 사용하여 레이저의 간섭 특성에 의한 스페클 패턴이 부각되었고, 소자에서 CCD 카메라까지의 거리가 멀어 스크린을 사용하였을 때보다 비교적 큰 형태의 간섭 무늬가 발생하였다. 이에 비해 fig.6(b)는 진동 소자 없이 제작된 소자를 사용하였을 때의 스페클 패턴으로, 앞서 설명하였듯 마이크로 렌즈에 의한 초점 거리에 맞추어 CCD 카메라를 위치시켰기 때문에 각각 마이크로 렌즈에 의해 이미지가 결상되어 그 중심의 광량이 강하고, 주변으로 갈수록 렌즈 곡률에 의한 효과로 광량이 비슷하지만 앞선 스페클 패턴과 다른 형태의 간섭무늬가 발생함을 알 수 있었다. 다시 말해 전체적인 공간적 간섭성은 저감 시켰으나, 렌즈에 의한 결상 효과 때문에 다른 형태의 간섭 패턴이 발생하여 전체적인 스페클 저감 효율은 얻을 수 없음을 확인하였다. 하지만 제작한 저감 소자를 진동 소자와 동시에 사용하였을 때 앞서 공간적 간섭성이 저감되어 형성된 간섭 패턴에 시간적 간섭성 저감 효과가 더해져 fig.6(c)과 같이 매우 균일한 광 분포를 가짐을 확인하였다. 이 경우, 스페클 저감 효율은 48.33%를 얻었으며, 소자 효율은 41.29%를 얻었다. 이는 마이크로 렌즈에 의해 형성된 균일한 공간적 간섭 패턴이 1 축 진동을 통해 서로 평균값을 가지게 되어 전체적으로 균일한 광 분포를 얻었음을 의미한다. 하지만 소자 설계 시 각도에 따라 예상했던 소자 효율 보다 결과 값이 낮게 측정 되었는데 이는 소자에 존재하는 계면의 거칠기 특성에 의한 산란과

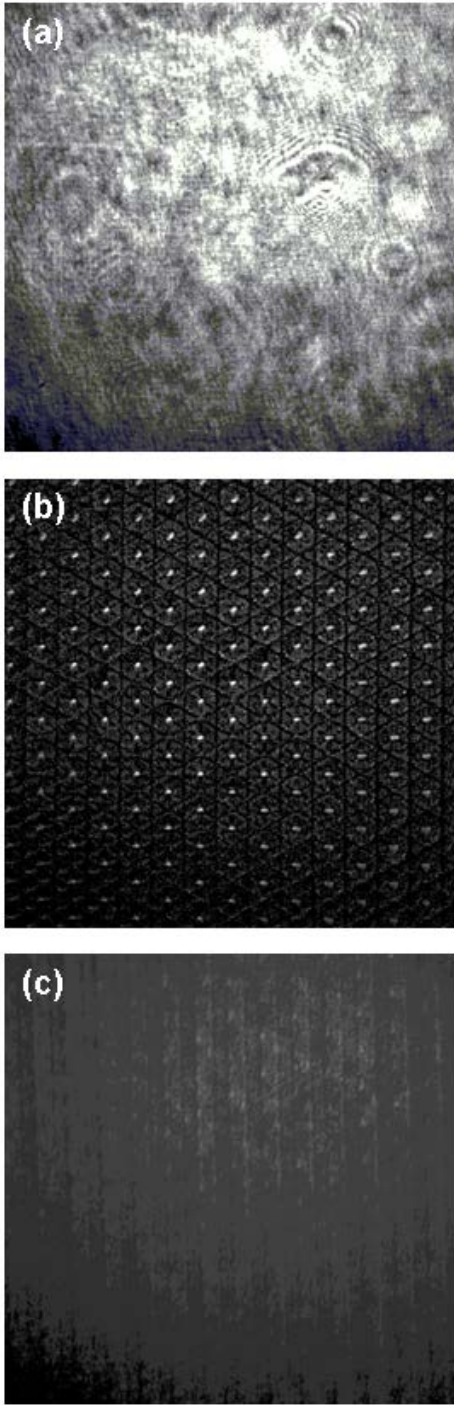


Fig. 6 Measurement of speckle pattern: (a) reference, (b) optical element without vibration, and (c) optical element with vibration

소자를 통과하면서 소자의 재료 특성에 의한 흡수가 영향을 미친 것으로 보이며, 소자 제작 시 발생한 가공 오차 또한 소자 효율에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 이러한 부분은 PET 필름을 사용하지 않고 동일 재료로 소자를 제작하고, 입사 면

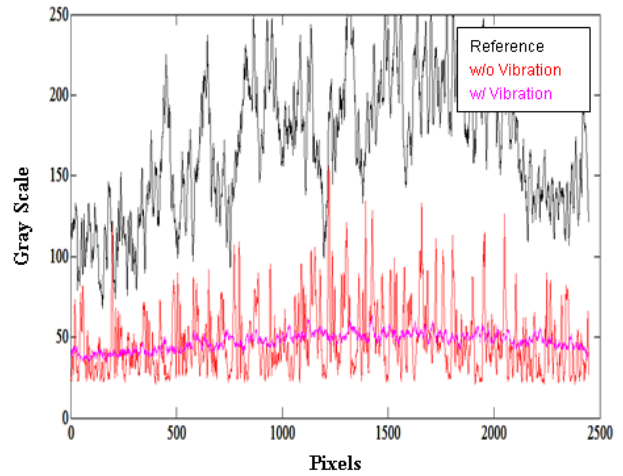


Fig. 7 Intensity distribution of measured speckle

의 반사 방지 코팅을 적용하며 정밀하게 소자를 제작할 경우 보완될 수 있을 것으로 생각된다.

정확한 성능 평가를 위해 임의의 한 축에 대한 광 분포를 비교하였고 그 결과는 fig.7 과 같다. 그 그래프의 검은 선은 저감 소자를 사용하지 않은 경우, 붉은 선은 진동 없이 저감 소자만을 사용하였을 경우, 그리고 분홍 선은 저감 소자를 진동시켰을 때의 광 분포이다. 저감 소자를 사용하지 않은 reference 의 경우, 전체적인 광량은 높으나 위치에 따른 광 세기가 불규칙하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 저감 소자만을 사용한 경우는 reference 에 비해 상대적으로 광량은 낮지만 마이크로 렌즈 분포에 의해 비교적 규칙적으로 높은 광량을 가지는 광 분포를 나타낸다. 이상적으로 동일 세기의 광이 소자에 입사하게 되면 높은 광량을 나타내는 peak 부분의 광 세기가 모두 같겠지만, 형성된 스펙클 패턴에 의한 광 분포의 영향을 받아 위치 별 peak 값이 차이가 남을 확인하였다. 마지막으로 소자를 진동시켰을 때 앞서 설명한 대로 위치 별 광 분포가 평균화 되어 거의 균일한 광 분포를 나타내었다.

4. 결론

높은 밝기와 고해상도의 구현이 가능한 프로젝션 디스플레이를 구현하기 위한 레이저 프로젝터에 대해 활발한 연구가 진행되고 있고, 이를 사용하였을 때 레이저 광원의 간섭 특성에 의해 발생

하는 디스플레이의 화질 저하 요소인 스페클 패턴의 저감은 필수적이다. 이는 레이저의 특성과 영상을 투사하는 스크린의 표면 특성에 의해 발생하는 무늬로 레이저의 간섭 특성을 공간적, 시간적으로 저감 시키는 방법을 통해 개선이 가능하다. 하지만 기존에 사용했던 스페클 저감 방법들은 소자를 구현하기 위한 광학계의 부피가 크기 때문에 소자의 소형화가 어렵다. 본 연구에서는 마이크로 렌즈의 설계를 통해 레이저의 공간적 간섭성을 조절하여 스페클 저감 효과를 얻음과 동시에 소자 효율을 높이고자 하였고, 진동 소자를 사용하여 시간적 간섭성을 저감하여 스페클 저감 효과를 높이고자 하였다. 설계한 소자는 reflow 공정과 imprinting 공정을 통해 손쉽게 제작되었으며, CCD 카메라를 포함하는 평가 광학계를 통해 그 특성을 평가 하였다. 그 결과, 제작된 소자는 48.33%의 저감 효율과 41.29%의 소자 효율을 달성하였다. 이는 공간적 간섭성과 시간적 간섭성을 동시에 저감 시켰을 때 얻을 수 있는 결과로, 진동 소자 없이 공간적 간섭성 저감을 통해 스페클을 저감 시킬 경우는 저감 효율이 없음을 확인하였다. 이는 공간적 간섭성 보다 시간적 간섭성이 스페클 저감이 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 설계된 소자는 실험에는 크기가 큰 가진기를 사용하였지만 소형화된 소자 부피를 고려하여 piezo 진동 소자와 같이 조건에 맞는 소형 진동 소자를 사용하여 동일한 성능을 유지하면서 그 크기를 소자에 맞추어 축소가 가능하다. 또한 스크린 위치로의 결상을 위해 소자 크기에 맞춘 doublet 렌즈 하나만을 필요로 하기 때문에 추가적인 광학계를 필요로 하지 않는 장점을 가진다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 SW 융합형부품 개발사업으로 수행된 연구결과임. (No. 10047785, 3D HD 영상을 위한 스마트 피코 프로젝터 부품 및 엔진 개발)

REFERENCES

[1] J. W. Goodman, 1976, "Some fundamental properties of speckle", Journal of Optics Society of America, Vol.66, No.11, pp.1145-1150

[2] Lingli Wang, Theo Tschudi, Throsteinn Halldorsson, and Palmi R. Petursson, 1998, "Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements, Applied Optics, Vol.37, No.10, pp.1770-1775

[3] Yuhei Kuratomi, Kazuo Sekiya, Hiroaki Sato, Tohru Kawakami, Tatsuo Uchida, 2010, "Analysis of speckle-reduction performance in a laser rear-projection display using a small moving diffuser", Journal of the SID, Vol.18, No.12, pp.1119-1126

[4] Jahja I. Trisnadi, 2004, "Hadamard speckle contrast reduction", Optics Letters, Vol.29, No.1, pp.11-13

[5] Zhaomin Tong, Muhammad Nadeem Akram, and Xuyuan Chen, "Speckle reduction using orthogonal arrays in laser projectors", Applied Optics, Vol.49, No.33, pp.6425-6429

[6] Victor Yurlov, Anatoly Lapchuk, Sangkyeong Yun, Jonghyeong Song, and Haengseok Yang, 2008, "Speckle suppression in scanning laser display", Applied Optics, Vol.47, No.2, pp.179-187

[7] Jahja I. Trisnadi, 2002, "Speckle contrast reduction in laser projection displays", Proc. SPIE 4657, Projection Displays VIII, 131

[8] Wenhong Gao, Zhaomin Tong, Vladimir Kartashov, Muhammad Nadeem Akram, and Xuyuan Chen, 2012, "Replacing Two-Dimensional Binary Phase Matrix by a Pair of One-Dimensional Dynamic Phase Matrices for Laser Speckle Reduction", Journal of Display Technology, Vol.8, No.5, pp.291-295