

Analysis of Quality Improvement of a Floating Image Using a Hybrid Retroreflective Mirror Array Sheet

Dong Il Yu, Young Jae Baek, Hyeon Joong Yong, and Beom Hoan O[†]

LED Smart Technology Advanced Research (LED-STAR) Center, Department of Information and Communication Engineering,
Inha University, 100, Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

(Received May 29, 2019; Revised June 26, 2019; Accepted June 28, 2019)

Normally, a corner cube retroreflector (CCRR) sheet is used as a retroreflective mirror array (RRMA) in a volumetric display. Each CCRR unit reflects light in the retroreflective direction, which is parallel to the incident light, and it makes a blurred image, as it shifts the position of light within its dimensions. Adopting a “curved planar wall” and “parabolic focusing” (x-axis), a hybrid-t(transverse direction)-RRMA is proposed, to improve the image quality and brightness. The improvement of image contrast is achieved by tuning a “linear v-shaped groove” structure to a “parabolic v-shaped groove”. Also, the system has been simplified and the brightness enhanced 4 times by removing the half mirror.

Keywords: Floating image, Retro-reflector, Parabolic

OCIS codes: (110.2990) Image formation theory; (100.6890) Three-dimensional image

혼성-병풍형 구조의 재귀반사 거울 배열판을 이용한 부양영상 개선 분석

유동일 · 백영재 · 용현중 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학과, 고성능 LED 조명모듈 핵심기술 연구센터(LED-STAR)
Ⓞ 22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

(2019년 5월 29일 받음, 2019년 6월 26일 수정본 받음, 2019년 6월 28일 게재 확정)

일반적으로 체적형 방식의 디스플레이에는 큐브-모서리 재귀반사(corner cube retroreflector, CCRR)시트와 반투과 거울판이 사용되며, 이는 광원의 빛을 재귀반사시켜 부양영상(floating image)을 만든다. 이러한 기존 CCRR 방식은 광원의 강도를 1/4로 줄이는 반투과 투과 2회의 광손실과 각 단위 CCRR 크기에 의한 영상의 퍼짐 현상이 있다. 본 연구진이 제안하는 ‘혼성-병풍형’ 구조 재귀반사(hybrid-t(transverse directional)-RRMA)는 광퍼짐을 최소화하여 부양영상의 품질을 향상시킬 뿐만 아니라, 광도를 4배로 높이며, 제작상의 편리함도 제공한다. ‘선형 v자 홈’ (linear v-shaped groove)을 ‘포물선 v자 홈’ (parabolic v-shaped groove) 모양으로 조절한 재귀반사로 영상의 퍼짐을 개선하여 부양영상을 최적화하였고, ‘평면(flat wall) 재귀반사’ 대신 ‘곡면(curved planar wall)-재귀반사’ 구조를 적용한 ‘곡면-병풍형-재귀반사판’을 사용하여 반투과 거울판을 없애 반투과에 의한 광손실을 개선하고, 시스템을 단순화하였다.

Keywords: 부양영상, 재귀반사판, 포물선

OCIS codes: (110.2990) Image formation theory; (100.6890) Three-dimensional image

I. 서 론

3D 영상을 구현하는 기술방식은 스테레오-스코픽 디스플레이 방식과 3D 디스플레이 방식으로 나눌 수 있다. 3D 디스플레이 방식 중에서도 체적형 방식 디스플레이(volumetric display)는 영상 평면이 아닌 실제 공간에 영상이 놓여있게 되는 부양영상을 나타내는데, 공중에 떠있는 실상이기 때문

에 직접적으로 관찰하고 서로 상호작용이 가능하며, 매우 큰 각도로 그 이미지를 볼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점을 응용해 3D 부양영상은 다양하게 응용될 수 있다.

체적형 방식 디스플레이를 나타내는 기술 중 재귀반사(retroreflector, rr)를 이용하는 기술은 큐브-모서리 재귀반사(corner cube retroreflector, CCRR) 판이나 병풍형-t(transverse directional)-rr판을 이용하여 부양영상을 형성하게 하는 것이다.

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9992-7911

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

각각의 CCRR이나 병풍형 재귀반사(t-rr) 단위구조체는 단순 평면 정육면체의 구성면이나 서로 수직한 모서리면으로 이루어져 있기 때문에 개별 단위구조체에서 재귀 반사된 빛은 정초점이 존재하지 않는다. 따라서 부양 결상이 그리 선명하지 않게 보이는 단점이 있다. 또한 부양 결상을 구현하기 위해서는 반투과거울판(half mirror)이나 광분리기(beam splitter)를 통해 재귀 반사/투과광의 경로조절이 반드시 필요하며, 2회의 필연적 투과/반사에 의한 광도의 저하가 수반된다. 이러한 단점을 개선하기 위해, 단순평면 형태의 CCRR 방식을 대신하여, 타원 및 포물면의 대칭 초점 집광반사를 이용하기 위한 세로축 방향의 ‘곡면(curved planar wall) 병풍형’ 구조 적용 방안과 ‘포물선 v자 홈’ 모양을 동시에 적용하는 ‘혼성-병풍형’ 구조의 재귀반사(hybrid-t-RRMA)를 제안하였고, 그 이미지 결상 확인을 위해 전산모사를 진행하였다. 기존 ‘CCRR반사판’ 방식과 비교하여, 중간단계 방식(곡면 병풍형 재귀반사, 곡면벽과 선형 v홈 모양(linear v-shaped groove) t-rr)이 개선된 결과를 보였고, 최종적인 ‘혼성 병풍형’ 재귀반사 방식(곡면벽과 포물선 v홈 모양(parabolic v-shaped groove) t-rr)이 가장 개선된 부양영상을 제공하였다.

본 연구는 제기한 이론의 타당성 검증을 위해 광선추적(ray tracing) 기반의 Light-tools 전산모사를 이용하여 기존 부양영상의 개선결과 뿐 아니라 정량적인 개선지표로서 광 퍼짐(σ)도 비교 분석하였다. 다양한 크기와 조건의 병풍형 재귀반사 방식에 대해 부양영상의 선명함이 달라짐을 확인하였고, 이는 정량화된 분석 결과와 일치한다.

II. 본 문

2.1. 제안구조의 배경 및 특성

재귀반사 CCRR판을 구성하는 기본 단위구조는 평면 격자 구조의 조건으로 인해 삼각형과 육각형으로 제한되며, CCRR 판에 수직인 빛을 기준으로 각각의 재귀반사율은 50%, 100%를 가지는 것이 잘 알려져 있다^[3]. CCRR판은 재귀 반사시킨

빛을 다시 모이게 함으로 부양영상을 구현하며, 경로조절을 위해서는 반투과거울(half mirror)이 반드시 필요하며, 간단한 설치 예를 아래 그림 1(a)에 보여주고 있다.

그림에서 보이듯이, 반투과거울막에 1회 반사와 1회 투과를 반드시 해야 하므로 이로 인한 최종 광도는 최대 1/4에 지나지 않는 문제가 있다^[12]. 이에 반해, 그림 1(b)에 보이는 제안된 병풍형(t) 재귀반사의 경우는, 반투과거울막이 없이도 부양영상의 구현이 가능하다. 이는 서로 수직배치된 띠모양의 거울(t-RR)을 단위구조로 반복하여 배열한 휘어진 빨래판 형태이며, 상하퍼짐은 휘어진 병풍형 거울이 집광하며, 좌우 퍼짐은 수직배치된 띠모양 거울의 재귀반사로 집광하게 된다. 대부분의 발산광이 전체 재귀반사판에 입사 및 재귀반사되어 다른 부수적인 영향이 배제되도록 하기 위해, 발산각이 7°인 광원을 사용하여 전산모사한 결과, 그림 1의 각 경우 좌측하단에 예시된 바와 같이, 기존의 단순 평면형 CCRR 시트 방식(그림 1(a))의 부양영상은 선명도가 좋지 않았고, 단위구조체 길이(l_w)에 비례하여 영상의 광퍼짐도 열악해짐을 확인하였다. 반면에 제안된 병풍형 재귀반사 방식(그림 1(b))은 단위구조체의 길이(l_w)를 상당히 늘려도 선명한 영상 이미지(‘INHA’)를 형성하는 것을 확인하였다. 그림 1(b)의 최적 영상 이미지는 두 가지 방식(‘선형 홈 모양의 곡면-병풍형 재귀반사’와 ‘혼성 병풍형 재귀반사’ 두 방식)으로 구현이 가능하였으며, 그 중에 ‘선형 홈 모양의 곡면-병풍형 재귀반사’의 경우에는, 단위 재귀반사거울 크기가 수십 마이크로 단위까지 작아져야 하였으므로, 실제로는 거울면 제작 공정상의 어려움이 대단히 크다. 본 연구진이 제안한 개선 방안은, 병풍형 곡면거울의 이중초점 방식을 적용하는 것과, 포물경 재귀반사를 중첩적용하여 해상도를 개선하는 것이므로, ‘선형 홈 모양의 곡면-병풍형 재귀반사’의 영상구현에 있어서 단위거울 크기 의존성을 확인하며, 포물경 재귀반사를 함께 적용한 ‘혼성-병풍형 재귀반사’ 방식의 성능과도 비교하며, 각 방식의 영상개선 효과를 분석하고자 한다.

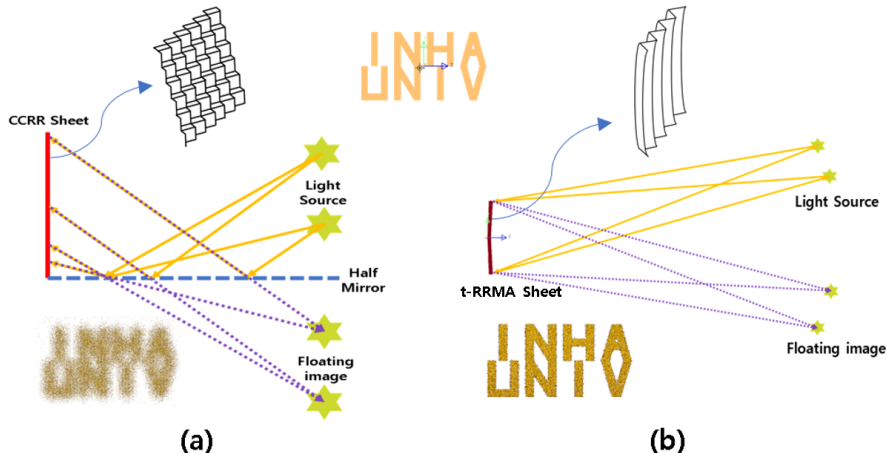


Fig. 1. Comparison of typical CCRR & proposed t-RRMA. (a) Setup and image quality of typical CCRR with half mirror. (b) Setup and image quality of the proposed t-RRMA.

2.2. 병풍형 재귀반사의 구조 비교

본 논문에서 비교할 기준 구조와 제안 구조는, ‘기준 CCRR 판’ 방식과 구분하여, 병풍 구조를 적용하는 ‘병풍형 재귀반사(t-RRMA)’ 방식으로 명명하며, 이 ‘병풍형’ 구조는 ‘평면-병풍형’ (flat wall-t)과 ‘곡면-병풍형’ (curved planar wall-t)으로 구분한다. 단, 병풍형 구조가 제대로 동작하기 위해서는 ‘곡면-병풍형’이 필수적임에 유의하자. 이제, 개선 제안된 ‘포물선 홈 모양’ 방식을 ‘곡면-병풍형’에 추가 적용한 구조를 ‘혼성-병풍형(hybrid-t)’으로 구분하며, 개략적인 조감도 및 평면도, 측면도는 그림 2에 비교되어 있다.

각 재귀반사 방식의 차이는 각 방향의 구조도에서 쉽게 확인할 수 있다. 그림 2의 우측 상단에 있는 조감도를 감안하면, 그림 2(b)에 보이듯, 병풍과 유사해 보이는 정면도를 떠올릴 수 있다. 그림 2(a)의 top view에서는 각 병풍형-재귀반사 단위구조(단위병풍, t-rr)에 있어서 ‘v자 홈’의 설계모양을 ‘선형’과 ‘포물선’ 모양으로 잘 보이도록 비교하고 있으며, ‘선형 v홈 모양’ 단위병풍(t-rr) 구조의 한 변 길이를 l_v 라 할 때, 한 변의 길이가 l_v 인 정사각형의 두 변으로 이루어져 있다. ‘포물선 v홈 모양’ 단위병풍(t-rr) 구조의 경우에는 만나는 모서리에서 서로 수직을 이루며, 같은 초점($f=2p, p=100$ mm)을 공유하는 포물선으로 이루어진다. 그림 2(c)에는 단위병풍 구조를 옆에서 보았을 때의 측면도(side view)로서, ‘평면-병풍형’ (flat wall-t)의 직사각형 단면과 ‘곡면-병풍형’ (curved planar wall-t)의 휘어진 사변형 단면 모습이 잘 비교

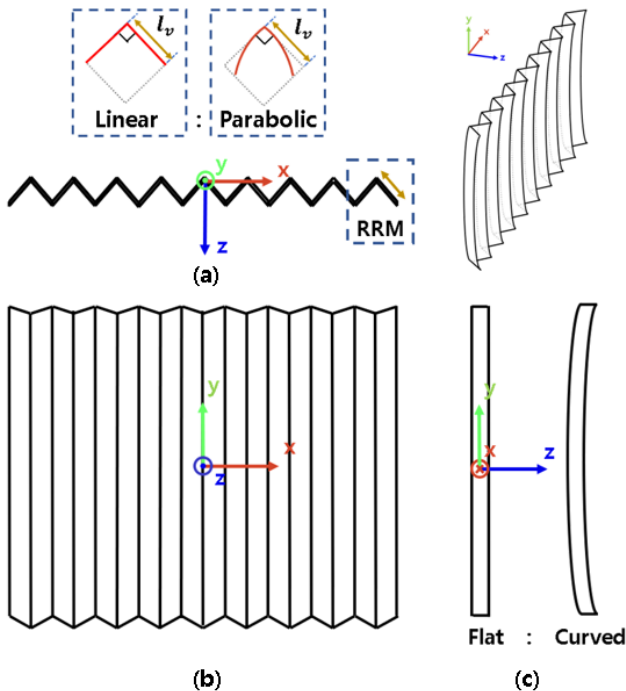


Fig. 2. Schematic shapes of various t-RRMA's. (a) Top view of t-RRMA walls and the v-grooves of two t-rr shapes; linear v (left) & parabolic v (right). (b) Front view of typical t-RRMA's. (c) Side views of flat-t-rr (left) & curved-t-rr (right).

되고 있다. 이때 휘어진 사변형의 긴 두 변은 반지름이 $2p$ 인 원의 곡률을 갖도록 설계한다. 정리하면, ‘평면-병풍형’ 구조와 ‘곡면-병풍형’ 구조 모두 ‘선형 v홈 모양’을 가지며, ‘혼성-병풍형’ 구조는 ‘포물선 v홈 모양’과 ‘곡면-병풍’ 방식을 모두 적용한 구조이다.

2.3. 각 RRMA의 성능 분석 및 비교

‘병풍형’ 구조와 ‘포물선 v홈 모양’을 적용한 각 단계마다의 부양 결상의 정량적 분석을 위하여 광원과 재귀반사판, 그리고 부양영상이 형성될 결상면까지의 거리는 각각 $2p$ ($=200$ mm), 광원과 결상 크기는 40×40 mm², 발산각 7° 로 설정하여 설계하고, 전산모사를 진행하였다. 그림 3에는 ‘곡면-병풍형’ 구조를 기준으로 l_v 크기에 따른 준가우시안 광퍼짐 변화(σ_x 와 σ_y)를 구하여 나타내었다. 이는 결상용 면광원과 동일한 발산도의 점광원에 대해 결상면(RRMA로부터 거리= $2p, p=100$ mm)의 결상점을 중심으로 광퍼짐 분포를 계수하였다. ‘곡면-병풍형’ 구조의 σ_x 광퍼짐(t-rr 반복배열 방향)에 대해서는, 재귀반사체의 원리상 기대되는 바와 같이, l_v 가 커질수록 σ_x (◆)는 선형적으로 증가하고 있다. 이와 대비하여, ‘곡면-병풍형’ 구조의 σ_y 는 l_v 값 변화에 무관하게 0.1 mm 이하의 작은 수치를 나타내고 있으며 (그래프의 명료도를 위해 그림 3에 σ_y 표기는 생략함), 이는 타원의 이중 초점에 의한 집광영상 원리를 감안하면 타당한 결과로 판단된다. 단위길이가 큰 $l_v=2\sqrt{2}$ mm의 경우, 이에 비례하여, ‘곡면-병풍형’ 구조의 σ_x (◆)가 커져서, 그림 3 상단부에 보이듯이, 결상 형태로부터 광원의 모습을 알아낼 수 없는 정도이나, l_v 가 작아질수록 부양 결상의 선명도가 좋아지는 것을 볼 수 있다. 단위길이가 작은 $l_v=0.1\sqrt{2}$ mm의 경우, 그림 3 하단부 좌측에 보이듯이, 매우 우수한 결상 결과(‘INHA’)를 보여준다. ‘곡면-병풍형’ 구조의 경우, l_v 가 작아야만 부양 결상의 선명도가 개선되기 때문에, 제작 공정의 난이도가 매우 올라가게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 ‘곡면-병풍형’ 구조체에 초점거리가 $2p$ 인 포물선 v홈 모양의 수평방향 곡면을

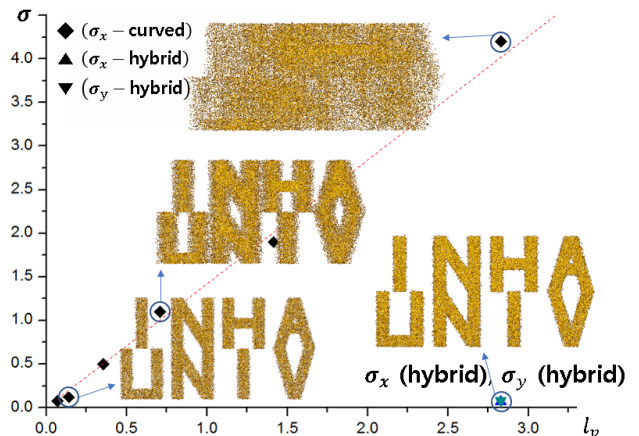


Fig. 3. Simulation result & analysis on t-RRMA's.

추가 접목한 ‘혼성-병풍형’ 구조의 $\sigma_x(\blacktriangle)$ 값은 단위 구조체의 크기 l_v 가 $2\sqrt{2}$ mm인 경우에도 0.07 mm로 매우 작은 값을 가지며, 이와 동등한 수준의 $\sigma_x(\blacklozenge)$ 수치를 갖는 ‘곡면-병풍형’ 구조는 $l_v = 0.05\sqrt{2}$ mm 임을 그래프로부터 간단히 유추할 수 있다. 또한 혼성병풍형-RRMA의 σ_y 또한 0.07 mm 이하로 우수한 수치임을 확인하였다. 이상의 성능 분석 비교는 광발산각을 7°로 작게 설정한 결과이며, 이는 광원 영상의 모든 점에서 발산된 빛이 대부분 재귀반사판에 입사되도록 조절하여, 반사판 외로 유실되는 등의 부수적인 결과외곽을 배제하기 위함이다. 실제적인 광원의 발산각은 ‘광원크기’/‘결상거리’의 \tan 수치보다 작아져야 효율저하를 방지하게 되며, 광원의 유효발산각도가 커지면 부수적으로 재귀반사판의 반사효율 저하도 고려하여 최적화 설계해야 한다⁴⁾.

참고적으로, ‘평면-병풍형’ 구조는 세로축이 초점에 집광하지 못하는 관계로, 광퍼짐도는 매우 열악하며, 비교를 위해 $l_v = 2\sqrt{2}$ 인 경우, $\sigma_x = 5$ mm 이상, $\sigma_y = 40$ mm 이상이며 상이 맺히지 않았음을 의미하므로, 그 표기는 생략한다. 기존 부양영상 방식의 결상 기준인 ‘기존 CCRR시트’ 방식의 경우, 비교적 작은 수치인 $l_{cc} = 1$ mm인 경우조차도 σ_x, σ_y 가 1.5 mm 정도이며, 부양영상의 결상화질이 우수하지 못하다.

III. 결 론

재귀반사를 이용하는 체적형 디스플레이 방식 기술 중 ‘기존 CCRR판’ 방식과 ‘병풍형’ 개선구조의 특성 및 장단점을

파악하였다. ‘기존 CCRR판’ 방식의 경우 반투과거울막 사용이 필수적이고, 부양 결상 선명도가 떨어지는 문제를 내포하고 있다. 개선안으로 제안하는 ‘곡면-병풍형 재귀반사’ 방식의 개선효과를 파악하고, 단위구조의 l_v 크기에 의존하는 선명도를 정량화하였고, 추가적인 ‘포물선 v홈 모양’의 적용을 통해 l_v 크기의 영향을 최소화하여, 부양결상 선명도를 대폭 개선하는 ‘혼성-병풍형 재귀반사’ 구조를 제안, 설계, 및 검증하였다.

재귀반사를 이용하는 광학구조물의 설계 및 적용에 있어 본 ‘혼성-병풍형-재귀반사’ 구조가 널리 활용될 수 있을 것으로 기대하며, 공간적인 제약으로 인해 불가능했던 시스템의 최적 설계도 가능할 것으로 기대한다.

References

1. D. Miyazaki, N. Hirano, Y. Maeda, K. Ohno, and S. Maekawa, “Volumetric display using a roof mirror grid array,” Proc. SPIE **7524**, 75240N (2010).
2. H. Yamamoto and S. Suyama, “Aerial 3D LED display by use of retroreflective sheeting,” Proc. SPIE **8648**, 86480Q (2013).
3. S. K. Kaisha, “Micro corner cube array, manufacture method, display device,” Korea Patent 10-0472883-0000 (2005).
4. Y. B. Jeong, Y. H. Kim, and B. H. O, “Analysis of the reflection characteristics of a rectangular corner cube retro reflector,” Korean J. Opt. Photon. **26**, 17-22 (2015).