

## 조명각 변조 방식의 3차원 입체영상 표시장치설계 및 공차분석

정우철 · 하상우 · 박현용 · 오범환 · 박세근 · 이일항 · 이승걸<sup>†</sup>

인하대학교 정보통신공학부

☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

박순룡 · 조성민

LGS Corporation

☎ 435-030 경기도 군포시 당정동 92-3번지

(2005년 5월 6일 받음, 2005년 6월 16일 수정본 받음)

조명각 변조 방식에 의한 3차원 입체영상 표시장치의 구현을 위해 렌티큘라 렌즈가 만족해야할 조건을 확립한 후 근축광선이론으로 렌즈 규격 및 모듈 구조를 설계하였고, 유한광선 추적법(finite ray tracing)을 이용하여 스테레오스코픽 모듈의 규격변화, 조립 과정의 정렬오차, 그리고 관찰자의 관찰 조건에 따른 영향을 분석하였다. 이를 통해 신호잡음을 최소화하기 위해 제작 공정에서 렌즈 합몰부가 발생하지 않아야 하며, 평판형 액정 서터와 렌티큘라 렌즈 판 사이의 어긋남이 최소화되어야 함을 알 수 있었다.

주제어 : Lenticular lens, Stereoscopic module, 3D display, Millimeter structure, Finite ray tracing.

### I. 서 론

차세대 첨단기술로써 3차원 입체영상 기술은 정보통신, 방송, 의료, 교육, 군사, 게임 등 다양한 응용분야를 가지고 있으며 다양한 구현방법들이 제안되었다[1]. 특히 양안시차 방식(stereoscopic technique)은 크게 안경식과 비안경식으로 구분되며, 최근에는 비안경식이 활발하게 연구되고 있다[2,3,4]. 비안경식의 경우 parallax barrier 방식과 렌티큘라 렌즈(lenticular lens) 방식이 있으며[3,4], parallax barrier 방식은 빛을 투과 또는 차단시키기 위해 가느다란 수직 슬릿을 일정한 간격으로 배열시켜 특정 시점에서 슬릿을 통해 보면 좌, 우 영상이 정확하게 분리되어 입체감을 감지하는 방식이며, barrier에 의한 밝기 저하와 제작의 어려움, 그리고 회절 등의 문제가 있다. 반면 렌티큘라 렌즈 방식은 다수의 반원통형(semi-cylindrical) 형상의 렌티큘라 렌즈의 초점면에 좌, 우 영상을 줄무늬 형태로 배치하고 이를 렌즈를 통해 관찰하면 렌즈의 방향성에 따라 좌, 우 영상이 분리되어 입체영상을 볼 수 있는 방식이며, 시야 범위(viewing zone)가 좁고 양쪽 눈 사이에서 영상이 겹쳐 보이는 신호잡음(cross-talk) 문제가 있다.

전술한 단점 중에서 분해능 저하와 좁은 시야 범위 한계를 해결하기 위해서 조명각을 변조하여 3차원 입체영상을 인식하도록 하는 새로운 방식이 최근 제안되었다[2,5]. 이 방식은 liquid crystal display(LCD) 패널의 조명각을 반복적으로 변조하여 오른쪽 눈을 위한 영상과 왼쪽 눈을 위한 영상을 순차적으로 제공하는 것이다. 조명각 변조하기 위해 내부전반

사 프리즘(TIR prism)을 이용하는 방식[5]과 LCD 모듈의 back light unit(BLU)로부터 방출된 빛을 주기적인 stripe pattern을 가진 평판형 액정 서터(liquid crystal shutter)와 렌티큘라 렌즈 판을 이용하는 방식[2]이 있다. 후자의 경우는 기존의 렌티큘라 렌즈 방식과 달리 렌티큘라 렌즈가 좌, 우안 영상을 결상하는 것이 아니라, 좌, 우안을 조명하는 빛의 조명각을 변경하는 수단으로 사용된다.

본 연구에서는 스테레오스코픽 모듈(stereoscopic module)을 구현하기 위해 렌티큘라 렌즈 판을 이용하는 조명각 변조 방식에서 핵심 구성요소인 렌티큘라 렌즈를 제작공정을 고려하여 설계하였고, 결정된 구조에 대해 유한광선 추적법을 이용하여 모듈의 성능 및 공차 분석을 수행하였다. 먼저 스테레오스코픽 모듈의 동작 원리를 설명하고, 두번째로 스테레오스코픽 모듈을 설계하는 방법과 세 번째로 설계된 렌티큘라 렌즈의 공차 특성을 다루었다. 그리고 마지막으로 결론을 제시하였다.

### II. 조명각 변조방식의 3차원 입체영상 표시장치 의 원리

본 연구에서 구현하고자 하는 스테레오스코픽 모듈의 구성 및 구동 원리는 그림 1과 같다. 모듈의 구성 요소를 배열 순서로 나열하면, BLU, 평판형 액정 서터, 렌티큘라 렌즈 판, LCD 패널이며, 마지막으로 관찰자의 양안 위치인 관찰면 혹은 상면(image plane)이 있다. 여기서 BLU, 평판형 액정 서터, 렌티큘라 렌즈 판은 그 위에 놓인 LCD 패널을 조명하기 위한 조명부로서 평판형 액정 서터와 렌티큘라 렌즈 판의 작용에 의해 조명각을 반복적으로 변조할 수 있으며, LCD 패

<sup>†</sup> E-mail: sglee@inha.ac.kr

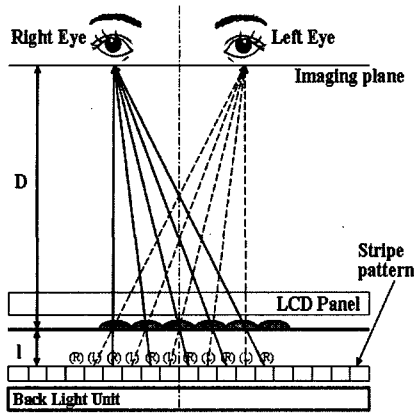


그림 1. 스테레오스코픽 모듈의 동작 원리도.

널에는 조명각 변조장치와 연동하여 좌, 우안 영상이 반복적으로 표시된다.

BLU와 바로 위에 놓여있는 평판형 액정 서터가 결합하여 주기적인 줄무늬 형태의 광원 역할을 하게 된다. 평판형 액정 서터에서 (R)로 표시된 줄무늬 부분이 모두 ON 상태가 되면 BLU에서 방출된 빛은 해당 부분만을 통과하므로, 주기적인 줄무늬 형태의 광원이 될 것이다. 이 빛은 렌티큘라 렌즈 판을 지나 그 바로 위에 있는 LCD 패널을 비추게 되는데, 렌티큘라 렌즈 판의 작용에 의해 그림 1의 실선과 같이 LCD 패널을 비스듬하게 조명하므로 LCD 패널의 영상은 오른쪽 눈으로만 전달된다. 반대로 평판형 액정 서터에서 (L)로 표시된 줄무늬 부분이 모두 ON 상태가 되면, 가로 방향으로 줄무늬 폭만큼 이동된 줄무늬 형태의 광원을 얻게 된다. 그림 1의 점선으로 표현된 바와 같이 렌티큘라 렌즈 판에 의해 조명각이 정반대가 되므로, 조명된 LCD 패널의 영상은 왼쪽 눈으로 전달된다. 결국 평판형 액정 서터의 주기적인 동작에 따라, 방출되는 줄무늬 모양의 광원은 렌티큘라 렌즈 판에 의하여 LCD 패널에서 표현되는 좌, 우안의 영상 정보를 번갈아가면서 한번은 오른쪽 눈으로 그 다음에는 왼쪽 눈으로 각각 전달하게 된다[2].

이러한 구동 원리에 의해 관찰자는 LCD 패널의 분해능 저하 없이 양안 시차에 의해 입체영상을 느낄 수 있게 된다. 하지만 LCD 패널의 영상정보를 두 눈에 번갈아 보내주어야 하므로, 평판형 액정 서터 및 LCD 패널의 응답속도는 일반 LCD 패널에 비해 두 배 정도 빨라야 한다.

### III. 입체영상 표시장치의 설계

2절에서 설명한 구동 원리에 따라 스테레오스코픽 모듈이 동작하기 위해서는 핵심 소자인 렌티큘라 렌즈가 반드시 만족해야할 조건이 있다. 첫째, BLU의 한 점에서 발산된 빛은 렌티큘라 렌즈 판의 반원통 렌즈를 지나 관찰면 상에 맺혀져야 하는데 이를 결상 조건(imaging condition)이라 한다. 이는 방출된 빛이 LCD 패널을 원하는 조명각으로 조명하면서 동

시에 빛의 퍼짐을 억제하기 위한 조건이다. 만일 이 조건이 만족되지 않는다면, 한 쪽 눈으로 보낸 조명광이 다른 쪽 눈으로 일부 갈 수도 있을 것이다. 렌티큘라 렌즈 판 바로 위에 놓인 LCD 패널의 각 픽셀(pixel)을 지나면서 빛이 부분적으로 분산될 수 있지만 양안 간격을 고려하면 그 영향을 무시할 수 있다.

두 번째 조건은 그림 1에서와 같이 평판형 액정 서터에서 (R)로 표시된 줄무늬 중심에서 방출된 빛은 반원통 렌즈를 지나 오른쪽 눈의 중심으로 집속되어야 한다는 것이다. 이러한 조건은 (R)로 표시된 모든 줄무늬 부분에 대해 동시에 만족되어야 하므로, 이를 누적 조건(accumulation condition)이라 한다. 물론 (L)로 표시된 줄무늬 부분 대해서도 동일한 조건이 만족되어야 한다. 상기 조건이 만족되기 위해서는 BLU 바로 위에 놓이는 평판형 액정 서터의 줄무늬 폭과 렌티큘라 렌즈 주기 사이에 일정 관계가 성립되어야 한다[2].

그림 1에 표시된 것과 달리 특정 줄무늬 부분으로부터 방출된 빛이 바로 위에 있는 렌티큘라 렌즈 판의 반원통 렌즈 부분만을 통과하는 것이 아니라, 인접한 반원통 렌즈 부분을 지나 관찰면으로 갈 수 있는데 이를 고차 투과광이라 한다. 만일 고차 투과광이 다른 쪽 눈에 들어가게 되면 신호잡음의 원인이 되므로, 고차의 투과광이 다른 눈으로 들어가지 않도록 모듈이 설계되어야 하는데 이를 비중첩 조건(non-overlapping condition)이라 한다.

다음에서 상기 조건을 만족하기 위해 렌티큘라 렌즈와 모듈 구성에 관한 여러 변수들이 상호 어떤 관계를 만족해야 하는지를 근축광선이론을 기초로 정리하였으며, 이를 토대로 스테레오스코픽 모듈을 설계하였다.

#### 3.1. 스테레오스코픽 모듈 설계 구성 및 설계 변수

본 논문에서는 개인용 소형 스테레오스코픽 모듈 설계를 목표로 하고 있으며, 설계될 모듈의 구성 및 설계 변수를 그림 2에 나타내었다. 왼쪽에서부터 평판형 액정 서터, 렌티큘라 렌즈 판을 지지하는 기판(substrate), 렌티큘라 렌즈 판, LCD 패널, 그리고 관찰면이며 BLU 부분은 표시되지 않았다.

그림 2에 표시된 각종 변수를 왼쪽부터 설명하면 다음과 같다. 평판형 액정 서터에서 줄무늬 부분의 폭을  $P_s$ , 기판의

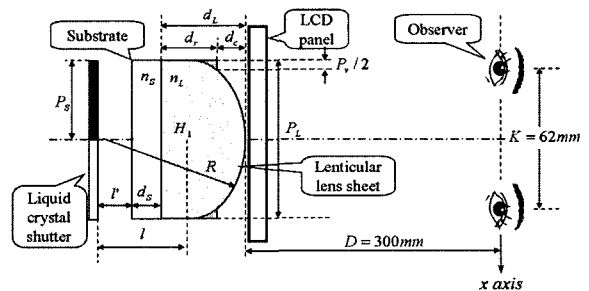


그림 2. 스테레오스코픽 모듈의 구성 및 변수.

로부터 평판형 액정 셔터 면까지의 거리를  $l'$ , 기판의 두께를  $d_s$ , 렌티큘라 렌즈의 전체 두께를  $d_L$ , 렌티큘라 렌즈의 평판부와 곡면부의 두께를 각각  $d_r$ ,  $d_c$ , 렌티큘라 렌즈 주기를  $P_L$ 이라 한다. 이때 LCD 패널과 렌티큘라 렌즈 판 사이는 서로 밀착된 것으로 간주한다.

결상의 관점에서 보면, 평판형 액정 셔터에 의해 형성되는 줄무늬 형태의 광원은 물체(object)가 되며, 렌티큘라 렌즈에 의해 그 상이 관찰면에 맺히게 된다. 따라서 렌티큘라 렌즈를 구성하는 반원통 렌즈의 제1주요면( $H_1$ )으로부터 평판형 액정 셔터 면까지의 거리는 물체 거리( $l$ )가 되며, 반원통 렌즈의 제2주요면( $H_2$ , 구조상 렌즈의 곡면부 정점에 위치)으로부터 관찰면까지의 거리는 상 거리( $D$ )가 된다. 한편, 반원통 렌즈의 곡률반경은  $R$ , 관찰자의 양안 간격은  $K$ 이고, 기판과 렌티큘라 렌즈의 굴절률은 각각  $n_s$ ,  $n_L$ 라 한다. 한편 렌티큘라 렌즈의 제작 방식에 따라 인접한 반원통 렌즈의 경계부가 선명하게 정의될 수도 있지만, 그림 2에서 빗금이 쳐진 부분과 같이 렌즈 경계의 계곡 부분이 일부 매워져 그 경계가 명확하지 않을 수 있다. 이를 렌즈 함몰부(filled valley)라 하여 그 폭을  $P_v$ 로 표시하였다.

설계될 모듈의 변수 중에서 양안 간격  $K$ 를 62 mm로, 상 거리  $D$ 를 300 mm로 설정하였다. 렌즈는 엠보싱(embossing) 공정에 의해 제작되며, 재질은 PMMA라고 가정하였으므로 가시광의 중심파장에 대해 렌티큘라 렌즈의 굴절률  $n_L$ 은 1.4918, 기판의 굴절률  $n_s$ 은 1.5192이다. 또한, 기판의 두께  $d_s = 0.7$  mm, 렌즈의 평판부의 두께  $d_r = 0.03$  mm로 정하였다. 여기서 렌즈 평판부의 두께는 엠보싱 복제공정에서 일종의 잔류 두께(residual thickness)에 해당한다. 이상에서 언급한 변수들은 설계 과정에서 고정되는 것이므로 고정 변수라 하고, 3절에서 설명한 조건을 만족하기 위해 최적화 되어야 할 변수를 설계 변수라 구분하였다.

**3.2. 근축광선이론에 의한 렌티큘라 렌즈 설계**

제안한 스테레오스코프 모듈에서 렌티큘라 렌즈 판은 일종의 조명용 광학계에 해당한다. 따라서 엄밀한 의미에 있어서 thin lens로 근사하는 것에 문제가 있으나 설계하고자 하는 광학계는 결상용 광학계 아니라 조명용 광학계이므로 thin lens 공식을 이용한 설계과정을 적용할 수 있으며, 엄밀한 광선이론이나 수차분석 과정은 필요치 않을 것이다. 따라서 근축광선이론에 의해 설계에 필요한 관계식을 유도하더라도 충분히 유용할 수 있으며 각 변수사이의 관계식을 유도하기 위해 우수 직각좌표계에 입각한 부호 규약을 사용하였다[6]. 먼저 반원통 렌즈의 렌즈 공식과 초점 거리 공식에 의해

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{f_i} = \frac{1}{D}, f_i = -\frac{R}{n_L - 1},$$

반원통 렌즈의 곡률 반경  $R$ 은 아래 관계를 만족해야 하며,

$$R = -(n_L - 1) \frac{l \cdot D}{l - D} \tag{1}$$

횡배율  $M_T$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$M_T = \frac{D}{l}$$

한편, 원통 렌즈가 반원 형상을 가지므로, 제1주요점( $H_1$ )에서 렌즈의 왼쪽 경계면까지의 거리  $h_1$ 과 제2주요점( $H_2$ )에서 렌즈의 오른쪽 경계면까지의 거리  $h_2$ 는 각각

$$h_1 = -\frac{d_L}{n_L}, h_2 = 0$$

와 같이 주어진다. 따라서 기판 효과를 고려하면,  $l$ 과  $l'$ 의 관계는 다음과 주어진다.

$$l' = l + \frac{d_L}{n_L} + \frac{d_s}{n_s} \tag{2}$$

그런데, 식(2)에서  $l'$ 이 양의 값을 갖는다면, 평판형 액정 셔터가 마치 기판 속에 위치하는 것과 같으므로  $l'$ 의 부호는 결코 양수가 될 수 없다. 따라서 식 (2)로부터 다음 조건식을 얻을 수 있다.

$$l' = l + \frac{d_L}{n_L} + \frac{d_s}{n_s} \leq 0 \tag{3}$$

한편 그림 3에서처럼 렌티큘라 렌즈 판은 반원통 렌즈가 나란히 배열된 것이므로, 렌즈의 곡률반경이 렌즈 주기의 반보다 더 큰 경우, 인접된 렌즈의 곡면부가 부분적으로 중첩 되게 될 것이다, 따라서 렌티큘라 렌즈 판이 구성되기 위해서는 렌즈의 두께  $d_L$ , 곡률반경  $R$ , 그리고 주기  $P_L$  사이에는 다음의 관계가 적용되어야 한다. 그림 3에서 서로 중첩된 반원의 기하학적인 관계로부터 렌즈 평판부의 두께  $d_r$ 은

$$d_r = d_L + R + \sqrt{|R|^2 - P_L^2/4} \tag{4}$$

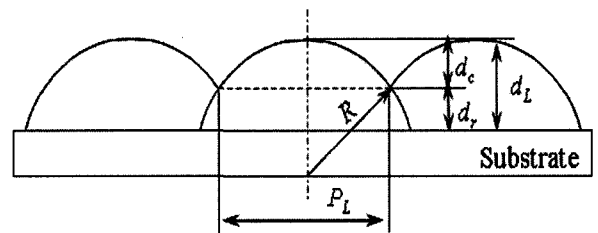


그림 3. 렌티큘라 렌즈 판에서 인접한 반원통 렌즈의 중첩.

를 만족해야 하며, 렌티큘라 렌즈 주기  $P_L$ 은 렌즈 두께  $d_L$ 와 곡률반경  $R$  사이에 아래와 같은 관계를 만족해야 함을 알 수 있다.

$$P_L < 2\sqrt{-2d_L R - d_L^2} \quad (5)$$

마지막으로 누적 조건을 만족하기 위해 렌티큘라 렌즈 주기와 평판형 액정 셔터의 줄무늬 부분의 폭은 참고문헌[2]에서와 같은 관계가 만족되어야 한다.

$$P_s = \frac{(1-l/D)P_L}{2} \quad (6)$$

이상의 관계식을 활용하여 설계 변수를 결정할 수 있으며, 제약 조건으로는 식(3), 식(4)외에도  $d_c > 0$ ,  $R < 0$ 가 있다. 4가지 제안 조건 중에서 기판과 평판형 액정 셔터 사이의 거리인  $l$ 은 모듈의 조립오차 발생 가능성을 낮추고 조립의 편의성을 도모하기 위해 가능한 0으로 근접할수록 유리하다.

그러므로 렌즈 공식과 각 변수들의 관계를 고려하여 고정 변수이외의 설계 변수 값을 구한 다음, 상기 4가지 제약 조건의 만족 여부를 판별한 다음, 그 중에서  $l$ 이 0에 근접하는 설계 변수 값을 최적 값으로 결정하였다. 이상의 과정을 통해 결정된 렌티큘라 렌즈 및 모듈의 설계치는 표 1과 같다.

#### IV. 스테레오스코픽 모듈의 평가

스테레오스코픽 모듈 설계 이론은 근축광선이론에 기초한 것이므로 설계된 모듈이 기대한 성능을 발휘하는 지를 확인해야 하며, 렌티큘라 렌즈 판의 제작오차 및 모듈의 조립 오차에 대한 영향을 분석하는 것도 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유한광선 추적법을 이용하여 스테레오스코픽 모듈의 성능을 평가하였다[7,8]. 렌티큘라 렌즈 및 스테레오스코픽 모듈의 대칭성을 고려하면 전체 시스템을 2차원적으로 취급할 수 있으며, 이때 광원은 줄무늬 부분의 폭과 같은 크기의 길이( $P_s$ )를 가진 선광원들이 된다. 선광원으로부터 방출되는 빛을 광선으로 표현하기 위해, 선광원의 길이 구간을 등 간격으로 분할하고 분할된 각 길이요소로부터 수치구경(NA)에 의해 주어진 발산각 범위 내로 여러 개의 광선이 방출되는 것으로 가정하였다.

BLU 및 평판형 액정 셔터로 구성되는 광원으로부터 방출된 빛이 관찰면에 어떻게 분포하는 지를 계산하기 위해 유한광선 추적법을 적용하였다. 이때 줄무늬 폭( $P_s$ )이 145  $\mu\text{m}$ 인 선광원 50개를 고려하였고, 각 선광원으로부터 1,000개씩의 광선이 방출되는 것을 가정하였다. 총 50,000개의 광선은 배율이 428배인 렌티큘라 렌즈로 구성된 확대 조명계를 지나 300 mm 떨어진 관찰면에 도달되며, 그 결과를 1차원 spot diagram 형태로 표현하였다. 이렇게 구한 조명광의 밝기 분포는 그림 4와 같이 표현된다.

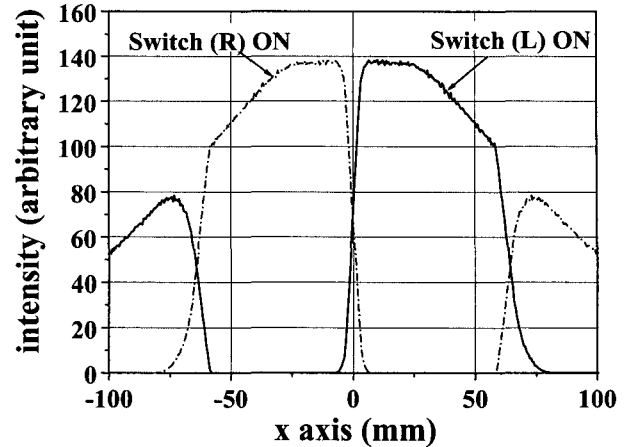


그림 4. 설계된 스테레오스코픽 모듈에 의한 관찰면에서의 조명광 분포.

#### 4.1. 설계된 모듈의 성능

먼저 설계된 스테레오스코픽 모듈에 의한 조명광의 밝기 분포를 계산하여 액정 셔터 동작에 따라 우안, 좌안에 비치는 조명광 분포에 신호잡음이 없는 지를 확인하였다. 이를 위해 평판형 액정 셔터의 (R)로 표시된 부분이 모두 ON 상태일 때 관찰면에서의 조명광 분포와 (L)로 표시된 부분이 모두 ON 상태일 때의 분포를 구하여 각각 그림 4(a), (b)에 나타내었다. 그림 4에서 좌, 우안의 중심이 각각  $x=31 \text{ mm}$ ,  $x=-31 \text{ mm}$ 인 위치에 있으며 동공의 직경이 수 mm 이하임을 고려하면, 설계된 스테레오스코픽 모듈이 신호잡음 없이 제대로 동작함을 알 수 있다. 설계된 모듈은 배율이  $M_f=428$ 인 확대 광학계이므로, 좌, 우안의 동공 부분만을 조명하는 것이 아니라, 광원 부분의 줄무늬 폭( $P_s$ )이 상기 배율만큼 확대된 형태로 관찰면을 조명하게 된다. 이로 인해 빛이 넓게 분산되어 에너지 효율 측면에서 다소 불리함이 있지만, 눈의 위치가 관찰면 위에서 좌우로 다소 변하더라도 동공 부분이 계속 조명될 수 있다는 이점도 있다. 그림 4의 두 가지 결과가 서로 좌우 대칭적인 분포를 보이므로, 앞으로의 분석 과정에서는 오른 쪽 눈에 비춰지는 조명광 분포만을 다루게 된다.

표 1. 설계된 렌티큘라 렌즈 규격 및 모듈 구성

설계 변수	설계치
원통 렌즈의 곡률반경 ( $R$ )	-344 $\mu\text{m}$
원통 렌즈의 두께 ( $d_L$ )	62 $\mu\text{m}$
원통 렌즈의 주기 ( $P_L$ )	289 $\mu\text{m}$
평판형 액정 셔터의 줄무늬 폭 ( $P_s$ )	145 $\mu\text{m}$
기판과 액정 셔터 면의 간격 ( $l$ )	-2 $\mu\text{m}$
렌티큘라 렌즈와 관찰면 간격 ( $D$ )	300 mm

**4.2 스테레오스코픽 모듈의 구성요소의 규격변화 영향**

제작 과정에서의 오차가 스테레오스코픽 모듈 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 반원통형 렌즈의 곡률반경  $R$ 의 변화, 함몰부( $P_s$ )의 존재 유무, 그리고 인접한 줄무늬 사이에 빛이 투과할 수 없는 부분이 있고 없는 경우에 대해 각각 조명광 분포를 비교하였다.

그림 5(a)는 설계치에 비해 곡률반경이  $\pm 10\%$  정도 변화된 경우의 조명광 분포 변화를 보인 것으로, 설계치로부터 곡률반경이 달라지면 오른쪽 눈으로 가야 될 빛의 일부가 왼쪽 눈 방향으로( $x > 0$ ) 이동하는 것을 볼 수 있다. 하지만 왼쪽 눈의 동공 위치가 대략  $x = 31$  mm 위치에 있음을 고려한다면, 이 정도의 조명광 분포 변화는 실질적으로 신호잡음을 일으키지 않음을 알 수 있다.

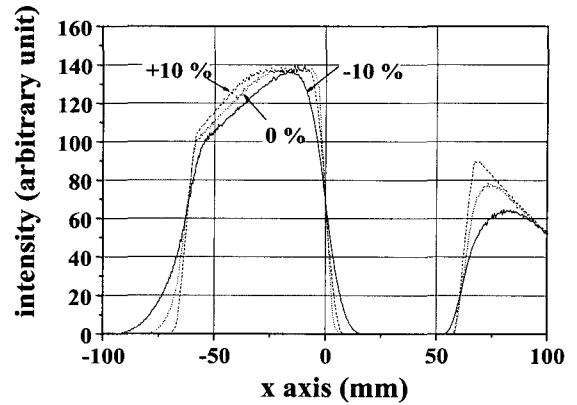
3절에서 언급한 바와 같이 렌티큘라 렌즈 판을 엠보싱 방식으로 제작하는 경우, 원형(master)을 만드는 방법에 따라 인접한 렌즈의 경계 부분이 매워질 수 있는데 이의 영향을 그림 5(b)에 나타내었다. 즉 함몰부가 없는 경우(unfilled valley)와 폭이 20  $\mu\text{m}$  정도인 함몰부가 있는 경우를 비교하였다. 그림에서 보면 함몰부(filled valley)가 존재함으로 인해, 오른쪽 눈으로 가야 될 빛의 상당량이 왼쪽 눈 방향으로 이동하며 넓게 분산됨을 알 수 있다. 따라서 경계 부분이 매워질 경우 스테레오스코픽 모듈은 심각한 신호잡음을 갖게 되어 3차원 입체 영상의 재현이 불가능하게 될 것이다. 따라서 렌즈 원형의 제작과정에서 함몰부를 최소화하기 위한 방안 및 노력이 요구된다.

스테레오스코픽 모듈의 구성 요소 중에서 평판형 액정 서터는 줄무늬 형태의 투과형 액정 스위치로 구현될 수 있다. 이 경우 픽셀과 픽셀 사이에 빛의 투과를 제어하지 못하는 부분이 있으며 이를 opaque metal line이라고 한다. 이로 인해 신호잡음이 발생할 수 있으므로 opaque metal line 폭이 0, 4, 8  $\mu\text{m}$ 인 경우에 대해 조명광의 분포를 계산하여 그림 5(c)에 나타내었다. 그림에서 opaque metal line이 신호잡음의 또 다른 원인임을 알 수 있지만, 함몰부에 비해서는 그 영향이 상대적으로 적음을 확인할 수 있다.

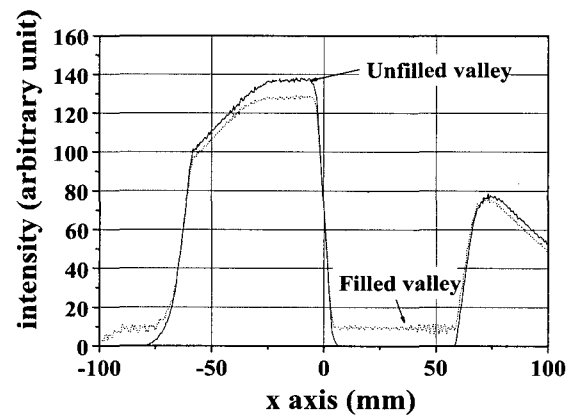
구체적인 결과를 제시하지는 않지만, 렌즈 평판부의 두께 변화가 조명광 분포에 미치는 영향도 분석해 보았으나, 그로 인한 영향은 거의 없음을 알 수 있었다. 원리 측면에서 기관의 두께 변화가 스테레오스코픽 모듈에 미치는 영향도 동일하므로, 기관 두께 변화도 조명광 분포에 거의 영향을 미치지 않음을 예상할 수 있다.

**4.3. 렌즈 주기와 줄무늬 폭의 변화에 대한 영향**

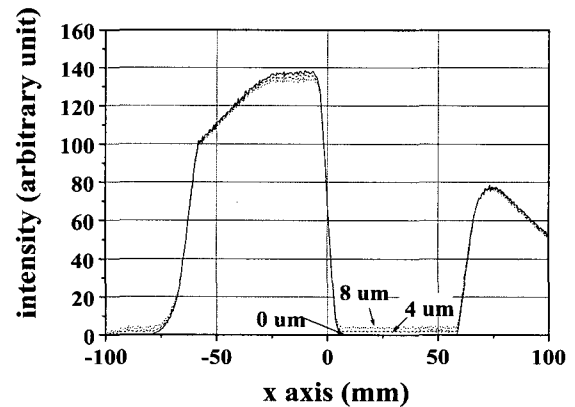
스테레오스코픽의 모듈을 성능을 평가하기 위해서 렌티큘라 렌즈 주기  $P_L$ 과 평판형 액정 서터의 줄무늬 폭  $P_s$ 에 대한 영향을 계산하였다. 첫 번째로 렌티큘라 렌즈 주기  $P_L$ 를 설계치 289  $\mu\text{m}$ 으로부터 0.7%씩 증가시키면서 조명광 분포를 계산하였다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 렌즈 주기가 약간만 변화하더라도 오른쪽 눈으로 가야 될 빛의 상당량이 왼



(a)



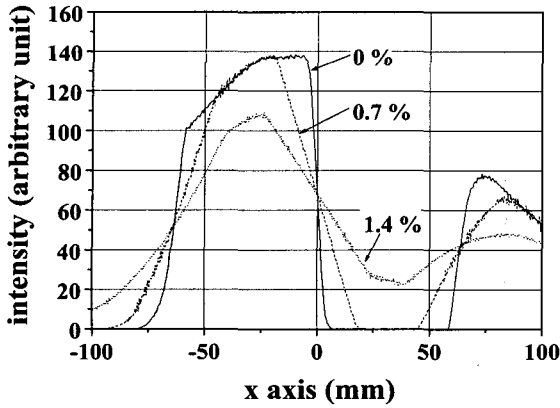
(b)



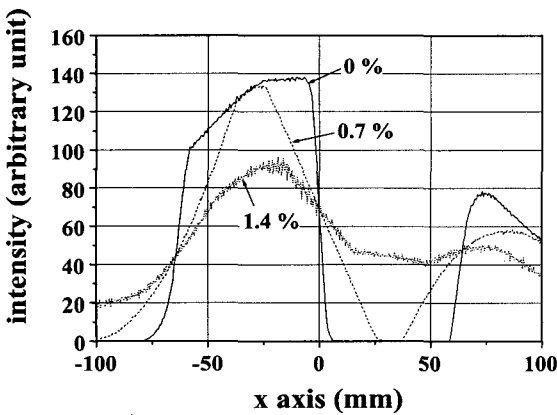
(c)

그림 5. 스테레오스코픽 모듈의 구성요소의 규격변화에 따른 조명광 분포. (a) 곡률반경 변화, (b) 함몰부의 유무, (c) 평판형 액정 서터의 opaque metal line 폭.

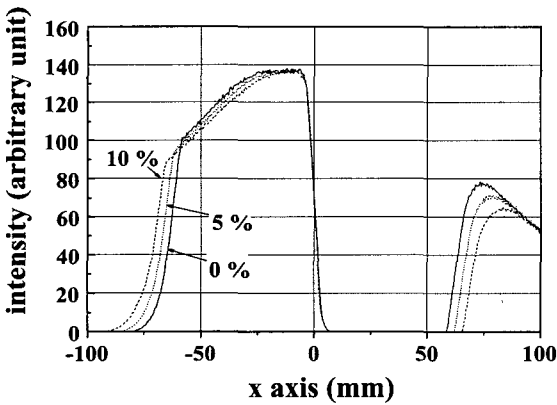
쪽 눈 방향으로 이동하며 넓게 분산됨을 알 수 있다. 두 번째로 줄무늬 폭  $P_s$ 에 대한 영향에 보기 위해 설계치 145  $\mu\text{m}$ 에서 0.7%씩 증가시키면서 조명광의 세기분포를 계산하였다. 그림 6(b)에서 보면 줄무늬 폭도 약간만 변화하더라도 오른쪽 눈으로 가야 될 빛의 상당량이 왼쪽 눈 방향으로 이



(a)



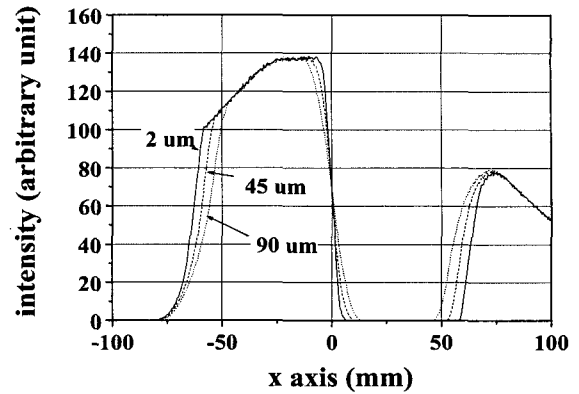
(b)



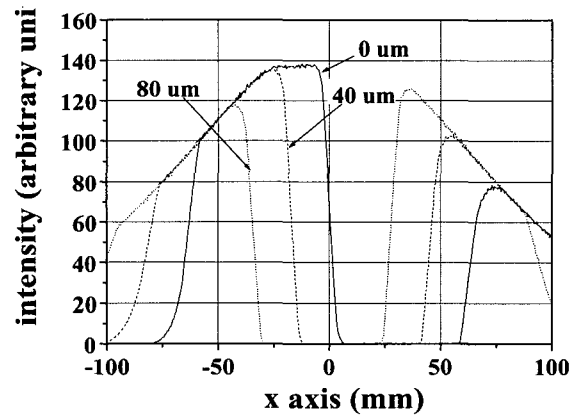
(c)

그림 6. 렌즈 주기와 줄무늬 폭 변화에 따른 조명광 분포 (a) 렌즈 주기 변화, (b) 줄무늬 폭 변화, (c) 렌즈 주기와 줄무늬 폭을 동시에 변화.

동하며 넓게 분산됨을 알 수 있다. 위 결과에서 알 수 있듯이 렌즈 주기와 줄무늬 폭 변화는 신호잡음의 심각한 원인이 된다. 그러나 렌즈 주기와 줄무늬 폭을 동시에 설계치로부터 5%씩 변화시키면서 그 영향이 살펴보았으나, 그림 6(c)에서처럼 그 영향이 상대적으로 현저히 줄어든다는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 7. 제작 공정에서 정렬 오차에 의한 조명광 분포 변화. (a)  $l'$  변화, (b) 줄무늬 패턴과 렌티큘라 렌즈의 횡방향 어긋남.

그런데 렌티큘라 렌즈의 원형이나 평판형 액정 셔터의 줄무늬 패턴이 반도체 공정기술에 의해 제작되므로, 개별 렌즈 주기는 다소 변화할 수 있으나 렌즈의 평균 주기는 설계치와 거의 달라지지 않을 것이며, 같은 이유에서 줄무늬의 평균 폭도 거의 변함을 없을 것이다. 따라서 주기의 변화에 대한 스테레오스코픽 모듈의 영향은 심각하지만, 제작 공정에서 이러한 오차는 크게 고려하지 않아도 될 것이다.

#### 4.4. 정렬오차(조립 과정의) 분석

스테레오스코픽 모듈의 제작 공정시 평판형 액정 셔터와 렌티큘라 렌즈 판을 정렬하면서 발생할 수 있는 오차를 분석하기 위해 두 가지의 경우를 분석하였다. 첫 번째로 평판형 액정 셔터면과 기관과의 거리( $l'$ )에 따른 오차를 분석하였으며, 두 번째로 줄무늬 패턴과 렌티큘라 렌즈 판이 횡방향으로 (그림 2에서 x축 방향) 서로 어긋남으로써 생기는 오차를 분석하였다.

그림 7(a)은 렌티큘라 렌즈의 기관과 평판형 액정 셔터면 사이의 간격이 설계값인  $l'=2\mu\text{m}$ 인 경우와  $45\mu\text{m}$ ,  $90\mu\text{m}$ 로 변하는 경우에 대해 정렬오차에 따른 조명광의 세기 분포를

나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 정렬오차가 증가할수록 신호잡음이 증가하지만, 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

두 번째는 렌티큘라 렌즈 판과 줄무늬 패턴의 주기적인 배열 방향은 서로 나란하지만, 횡방향으로 서로 어긋날 경우에 대해 조명각 분포를 분석하여 그림 7(b)에 나타내었다. 횡방향 어긋남(mismatch)이 커질수록 조명각 분포가 우안 쪽으로 이동하며, 동시에 오른쪽 눈으로 가야할 조명각의 광량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 횡방향 어긋남으로 인해 전체적인 유효 조명각은 감소하지만, 관찰자가 눈 위치를 관찰면 위에서 횡방향으로 이동한다면, 신호잡음 문제는 야기되지 않을 것이다. 오히려 이러한 광량 감소를 이용한다면, 렌티큘라 렌즈 판과 줄무늬 패턴의 조립 과정을 정밀하게 제어하는 수단을 확보할 수도 있을 것이다.

**4.5. 관찰자 조건에 따른 변화**

마지막으로 설계된 스테레오스코픽 모듈에서 관찰자의 위치 변화로 인한 조명각의 세기분포 변화를 살펴보았다. 설계된 스테레오스코픽 모듈에서 관찰자의 위치 변화는 상거리 D를 변화시키는 것과 동일하다. 본 논문에서는 관찰자의 위치에 따른 변화를 평가하기 위해 설계치 300 mm에 대하여 ±10%만큼 변화시키면서 분석해보았다. 그림 8에서 알 수 있듯이 관찰자가 관찰 위치로부터 벗어남에 따라, 동공으로 들어오는 광량은 감소하지만, 신호잡음은 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 분석하고 있는 렌티큘라 렌즈는 일종의 조명계로서 관찰 위치가 달라지더라도 상의 결상에 영향을 주지 않을 것이다.

**5. 결 론**

조명각 변조방식의 스테레오스코픽 모듈에서 렌티큘라 렌

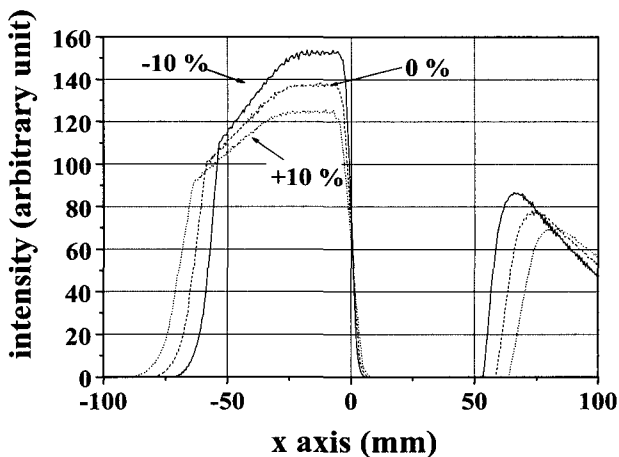


그림 8. 관찰자의 조건에 따른 조명각 분포 변화.

즈 및 모듈 구조의 최적 설계를 위해 렌즈 공식과 변수들의 기하적인 관계 및 제한조건을 고려해 설계 변수 값을 결정하였고, 유한광선 추적법을 통하여 렌즈 제작공정의 오차와 조립 과정의 오차 영향을 분석해 보았다. 즉, 설계 변수 값에 대하여 스테레오스코픽 모듈의 구성요소의 규격변화 영향, 렌즈 주기와 줄무늬 폭 변화에 대한 영향, 조립 과정에서 정렬오차의 영향, 그리고 관찰자의 조건에 따른 영향을 분석하였다.

이를 통해 제작 공정 시 렌즈 함몰부가 발생하지 않도록 해야 하고, 조립 과정에서 평판형 액정 서터와 렌티큘라 렌즈 기판사이 거리가 최소가 되어야 하며, 횡방향 어긋남을 최소화해야 함을 확인할 수 있었다. 마지막으로 평판형 액정 서터의 opaque metal line 폭이 커지면 다소간의 신호잡음을 야기함으로써 metal line 폭을 최소화할 필요가 있음을 알 수 있었다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Mill-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제와 한국과학재단 지정 우수 연구센터(ERC) 사업인 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

- [1] 김은수, “3차원 입체 디스플레이 기술의 국내외 연구 개발 동향 및 향후 발전방향,” 한국정보디스플레이학회지, 제5권, 제2호, pp. 3-5, 2004.
- [2] K. Toyooka, T. Miyashita, and T. Uchida, “The 3D Display Using Field-Sequential LCD with Light Direction Controlling Back-light,” SID’01 Digest, pp.174-177, 2001.
- [3] R. Boner, “Autostereoscopic lenticular systems,” Stereoscopic Television, IEE Colloquium on Stereoscopic Television, pp. 2/1 -2/5, 1992.
- [4] I. Sexton, “Parallax barrier display systems,” Stereoscopic Television, IEE Colloquium on Stereoscopic Television, pp. 5/1 -5/5, 1992.
- [5] A. Yuuki, M. Agari, N. Iwsaki, T. Sasagawa, S. Tahata, T. Satake, O. Murakami, K. Oda, A. Ito, and S. Miyake, “A New Field Sequential Stereoscopic LCDs by use of Dual-Directional-Backlight,” Journal of Information Display, vol. 5, no. 2, pp. 6-9, 2004.
- [6] E. Hecht, Optics (Addison-Wesley Publishing Company, New York, 2002), pp. 149-233.
- [7] 이상수, 기하광학 (교학연구사, 서울, 1985), pp. 61-64.
- [8] 이봉렬, 이연호, 김상국, “렌티큘러 렌즈를 이용한 입체영상 시스템의 광학적 특성 분석,” 한국광학회지, 제7권 제1호, pp. 9-16, 1996.

## **Design and Tolerance Analysis of 3-D Stereoscopic Display Modules with Alternating Illumination Angles**

Woo Chul Jeong, Sang Woo Ha, Hun Yong Park, Beom Hwan O, Se Geun Park,  
El hang Lee and Seung Gol Lee<sup>†</sup>

*School of Information and Communication Engineering, INHA University  
Inchon, 402-751, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: sglee@inha.ac.kr*

Sun Ryoung Park and Sung Min Jo

*LSG Corporation  
Dangjung-Dong, Kunpo-Si, Kyungki-Do, 435-030, Korea*

(Received May 6, 2005, Revised manuscript June 16, 2005)

In order to realize a 3-D stereoscopic display module with alternating illumination angles, several conditions required for a lenticular lens sheet were established, and then both the lens specification and the module structure were designed. Also the performance of the stereoscopic module and its tolerance characteristics were evaluated by simulating the intensity distribution on the observation plane with a finite-ray tracing technique. From the evaluation, it was known that an intersection area between two adjacent lenses should not be filled and that the lateral mismatch between a planar liquid crystal shutter and a lens sheet should be minimized.

OCIS codes : 080.2740. 220.4830. 080.360.