

포토펴리머 기반의 다시점 VHOE 광학판 구현을 위한 최적 노출시간 스케줄링 기법

Optimized Exposure-time Scheduling scheme for Implementation of the Photopolymer-based Multiview VHOE

김승철, 구정식, 조병철, 김은수
Seung-Cheol Kim, Jung-Sik Koo, Byung-Chul Cho, Eun-Soo Kim

Abstract

In this paper, a new method to implement the photopolymer-based VHOE using the optimized exposure time schedule is proposed. The cumulative grating strength dependence on the exposure energy is mathematically modeled by using the fourth-order polynomial function and then using this model, the optimized exposure-time schedule of the photopolymer for recording the given multiple gratings is calculated.

Key Words : Photopolymer, VHOE, Time schedule, 3D display

1. 서 론

3차원(3D) 영상 디스플레이 기술은 차세대 입체 멀티미디어 정보통신의 핵심 기반기술로서 선진국을 중심으로 하여 경쟁적으로 그 개발을 추진하고 있다. 최근에는 자연스러운 3D 영상 디스플레이 구현을 위한 새로운 접근방법으로 VHOE(volume holographic optical element) 광학판을 이용한 다시점 스테레오 3D 디스플레이 시스템의 구현 모델이 제시되었다^[1].

VHOE를 이용한 3D 영상 디스플레이 시스템에서는 VHOE의 회절효율 특성, 각 선택도(angular selectivity)에 따른 다시점화 특성, 재생된 회절빔간의 영상누화(crosstalk) 특성 및 각 시점에 따른 균일한 회절효율 특성 등이 요구된다. 특히, VHOE기반의 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템에서 시점에 따른 복원영상이 누화 없이 균일한 회절빔으로 재생되기 위해서는 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 효과적으로 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄링이 요구된다^[2].

따라서, 본 논문에서는 포토폴리머 기반의 다시

점 VHOE 광학판을 효과적으로 구현하기 위한 포토폴리머(HRF-150-100, Dupont)의 최적화된 노출시간 스케줄링 기법을 제시하고 실험을 통해 8시점의 VHOE 광학판을 구현하고자 한다.

2. VHOE 구현을 위한 사전 노출시간 분석

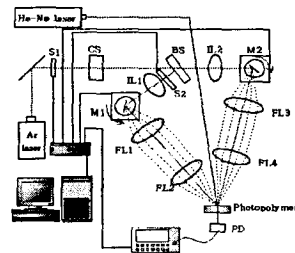


그림 1. 다시점 VHOE 구현을 위한 노출시간 측정 시스템도

Fig. 1. Experimental system for determining the exposure time schedule for multi-view VHOE

일반적으로, 대부분의 상용 포토폴리머는 좁기 광 노출에는 반응이 둔감하고 노출시간이 경과함에 따라 회절격자 형성이 선형적으로 증가하기

광운대학교 전자공학과
(서울시 노원구 월계동 447-1)
FAX : 82-2-941-5979
E-mail : sckim@explore.kwangwoon.ac.kr

때문에 효과적인 회절격자 기록을 위해서는 포토 폴리머의 광학적 특성에 따라 사전 노출시간 (pre-exposure)의 적용을 필요로 한다. 그림 1은 최적의 사전 노출시간과 다시점의 회절격자를 기록하기 위한 최적의 노출시간 스케줄을 유도하기 위한 광학 실험 구성도를 나타낸 것이다.

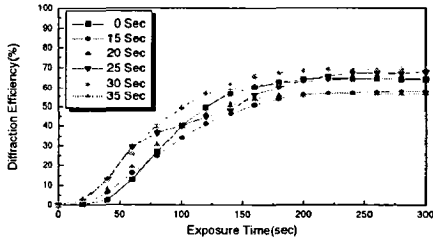


그림. 2. 사전 노출시간에 따른 회절효율의 변화
Fig. 2. Diffraction efficiency dependence on pre-exposure time

그림 2는 적용한 사전노출 시간에 따른 회절효율 분포를 나타낸다. 실험결과를 분석하면 사전노출이 없이 기록한 경우 30초 까지 거의 반응을 보이지 않으나 30초 이후부터 서서히 회절효율의 증가를 본 실험을 통해 알 수 있었다. 그림 2에서의 원점은 사전노출을 제외한 실질적인 노출시간을 표현한 것이다. 따라서, 실험적 결과를 바탕으로 30초 전후의 값을 사전노출 시간으로 결정하여 30초를 적용하였을 경우 최적의 회절효율을 얻을 수 있었다. 실험적 결과를 바탕으로 포토폴리머를 이용한 VHOE 광학판 구현을 위하여 본 실험적 조건에서 30초의 사전 노출시간을 적용하였다. 또한, 선형적으로 증가하는 부분을 이용하기 위하여 안정화 시간(saturation time)을 240초로 결정하였다.

3. 다시점 VHOE 구현을 위한 노출시간

스케줄의 수학적 모델링

최적의 다시점 VHOE 광학판 제작을 위해서는 효과적인 사전 노출시간의 적용과 다시점의 회절격자를 기록하기 위한 최적의 노출시간 스케줄링이 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 본 논문에서는 회절격자의 기록 정도를 나타내는 파라미터로 노출 에너지의 함수인 누적 격자강도를 이용하였으며, 누적 격자강도는 회절법 세기의 제곱근을 취

한 후 이를 적분하여 유도할 수 있으며, 누적 격자강도는 포토폴리머에 기록된 총 에너지이므로 그것을 시점 수에 따라 동일하게 분배해 주게 되면 균일한 회절효율을 얻을 수 있게 된다.

본 논문에서는 실험을 통해 얻은 다시점의 회절효율의 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 수학적 파라미터를 사용하였다.

$$m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i' \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i' - m)^2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 일반적인 평균값과 표준편차를 구하는 식으로서 m 은 회절효율의 평균값을, M 은 회절격자의 수를, E_i' 는 회절효율을 그리고 σ 는 회절효율의 표준편차를 각각 나타낸다. 각 회절격자에 대한 회절효율의 평균이나 표준편차 값 하나만으로는 회절효율의 변화분포를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 본 논문에서는 새로운 파라미터로 변동계수(coefficient of variation)를 도입하여 분석하였다. 일반적으로, 두 결과의 회절효율 평균값이 같다면 각각의 표준편차만을 비교함으로써 각 시점에 대한 회절효율의 분포정도를 상대적으로 판단할 수 있지만 두 결과의 평균값이 서로 다르거나 계속 변하는 경우에는 표준편차만을 가지고 두 결과에 대한 상대적인 회절격자 분포정도를 판단하기가 어렵다. 따라서, 서로 다른 평균과 표준편차를 갖는 여러 실험결과의 상대적인 변화 분포를 분석하기 위해서는 각 실험 결과의 평균과 표준편차를 동시에 고려한 변동계수가 필요하게 되며 이는 식(3)과 같이 주어진다

$$v = \left(\frac{\sigma}{m} \right) \times 100\% \quad (3)$$

본 실험에서는 식(3)과 같은 변동계수를 이용하여 복원되는 8개의 영상에 대한 최적의 회절효율 분포를 분석하였다.

표 1. 각 다항식별 에러율

Table. 1. Maximum error rate for each order of polynomial

차 수	최대 에러율
6	0.12%
5	1.09%
4	2.38%
3	5.27%

표 1은 노출시간과 누적 격자강도 사이의 관계

를 다항식으로 표현하기 위해서 유도된 식과 인 데이터와의 차이를 최대 에러율로 나타낸 것이다. 표 1의 결과를 토대로 최종적으로 다시점의 VHOE 광학판 구현에 적합한 노출시간 스케줄을 식(4)와 같은 4차 다항식으로 모델링 하였다.

$$A = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad (4)$$

식 (4)는 포토폴리머를 이용한 기존의 체적 홀로그램 메모리 분야에서 일반적으로 적용되는 6차 다항식을 기본 모델로 최대 에러율을 적용하여 수학적으로 유도된 모델이다. 여기서, A 와 t 는 누적 격자강도와 누적 노출시간을 각각 나타내며

$a_0 \sim a_4$ 는 누적 격자강도 그래프를 다항식으로 표현할 때 적용된 계수를 나타낸다. 8시점의 VHOE 광학판인 경우는 8개의 회절격자를 기록하기 때문에 식 (5)와 같이 안정된 누적 격자강도를 8등분하여 그에 해당되는 노출시간을 결정한다. 이때, 식 (5)를 각 $n(1 \leq n \leq 8)$ 에 대하여 계산해 각각의 노출시간인 t_n 을 계산해 낼 수 있다.

$$\frac{nA_{sat}}{8} = a_0 + a_1t_n + a_2t_n^2 + a_3t_n^3 + a_4t_n^4 \quad (5)$$

따라서, 식 (5)에서 산출한 노출시간 스케줄을 적용하여 포토폴리머에 회절격자를 기록한 후 측정된 회절 효율의 분포는 그림 3(b)와 같다. 같은 방법으로 반복 수행한 결과를 그림 3(c), (d)에 각각 나타냈다. 그림 3에서 실선은 회절효율의 평균값을, 점선은 회절효율의 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 그림 3을 분석해 보면 반복 실험을 할수록 평균값은 높아지면서 동시에 표준편차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 표 2는 이에 대한 결과를 수치적으로 나타낸 것이다.

즉, 표 2에는 식 (1), (2), (3)을 이용하여 각 실험 결과에 대한 평균, 표준편차, 변동계수를 계산하여 나타냈다. 표 2에서 첫 번째 노출시간 스케줄에서는 변동계수 v 값이 68.47%로 나타났는데 이는 회절효율이 평균값을 중심으로 비교적 넓은 68.47%범위 내에 분포한 다는 것이다. 그러나, 반복 수행함에 따라 변동계수는 16.95%, 11.34%, 4.21%로 급속히 그 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이처럼 변동계수가 작아진다는 것은 각 회절법의 회절효율은 높아지면서 균일하게 분포되어 간다는 것을 의미한다. 따라서, 제시된 노출시간 스케줄의 수학적 모델을 이용한 반복 수행을 통해 다중화된 회절격자의 균일한 회절효율을 얻을 수 있게 된다.

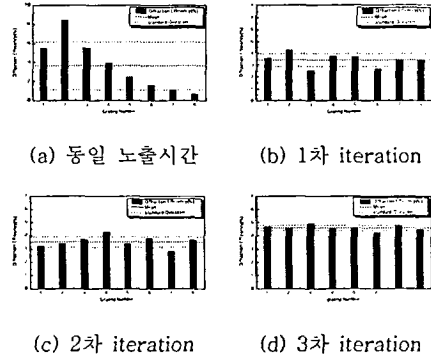


그림 3. 반복 실험에 따른 회절효율, 평균값 및 표준편차 변화

Fig. 3. Diffraction efficiency dependence on equal exposure time & exposure-time schedule

표 2. 반복실험에 따른 회절효율의 평균, 표준편차와 변동계수의 변화

Table 2. Means, standard deviation, coefficient of variation of diffraction efficiency per each iteration

	동일 노출시간	1차 반복수행	2차 반복수행	3차 반복수행
평균(m)	3.686%	3.402%	3.520%	4.573%
표준편차(σ)	2.524%	0.576%	0.399%	0.193%
변동계수 (v)	68.47%	16.95%	11.34%	4.21%

4. 8시점 VHOE 광학판의 구현 실험 및 결과분석

본 논문에서는 세 번째 반복수행을 통하여 얻은 결과 값을 이용하여 8 시점의 회절격자를 기록하려는 포토폴리머(HRF-150-100, Dupont)의 노출시간 스케줄을 결정하고, 이를 이용하여 8시점의 VHOE 광학판을 실험적으로 구현하고 실험하였다.

먼저, 그림 4는 제안된 노출시간 스케줄의 수학적 모델을 사용하여 반복실험을 통해 얻어진 누적 격자강도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험을 반복 수행할수록 누적 격자강도의 그래프가 직선에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이는 각 시점의 회절효율이 균일하게 분포되었다는 것을 의미한다. 따라서, 이를 통해 최적의 회절효율

을 구할 수 있는 노출시간의 스케줄을 결정할 수 있는데, 그림 5는 8시점 VHOE 광학판을 포토폴리머(HRF-150-100, Dupont)에 제작하기 위한 최종 노출시간 스케줄을 나타낸 것이다.

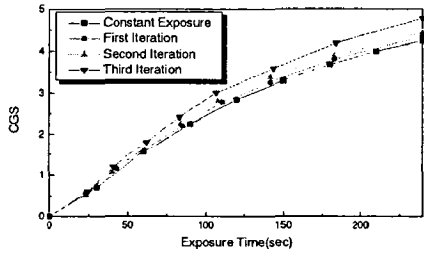


그림 4. 반복실험에 따른 누적 격자강도 변화분포
Fig. 4. Variation of the cumulative grating strength per each iteration

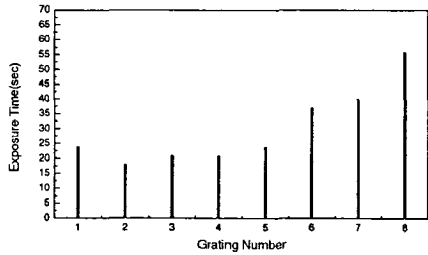


그림 5. 8시점 VHOE 구현을 위한 최적화된 노출 시간 스케줄
Fig. 5. Optimized exposure-time schedule for 8-view VHOE

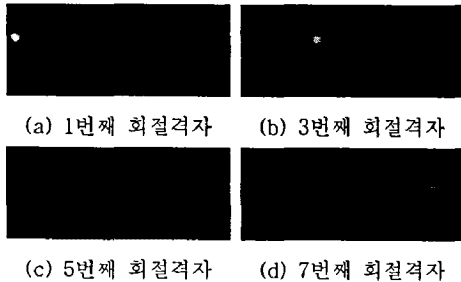


그림 6. 복원된 8시점의 회절빔
Fig. 6. Diffracted 8-view beams

그림 5와 같은 최적화된 노출시간 스케줄을 사용하여 8시점의 회절격자를 각 다중화하여 포토폴

리머(HRF-150-100, Dupont)에 기록함으로써 8시점의 VHOE 광학판을 제작하였다. 그리고, 제작된 8시점 VHOE 광학판에 기준빔을 시분할적으로 인가해 줌으로써 기록된 8시점의 회절격자로부터 각각의 회절빔을 얻을 수 있었다. 그림 6은 8시점 VHOE 광학판으로부터 회절되어 최종적으로 검출한 8개의 회절빔을 나타낸 것으로 8시점 모두 균일한 빔의 형태를 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 최적화된 노출시간 스케줄을 이용한 포토폴리머(HRF-150-100)기반의 VHOE 광학판 구현기법을 제시하고 실험을 통해 8시점의 VHOE 광학판을 구현하였다. 즉, VHOE를 구현하기 위한 포토폴리머의 노출 에너지와 누적 격자강도 간의 관계를 나타내는 4차 다항식의 수학적 모델을 제시하고 이를 이용하여 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 효과적으로 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄을 유도하였다. 그리고, 상용 포토폴리머를 이용한 8시점의 VHOE를 실제 제작하고 실험을 통해 입증함으로써 앞으로, 본 논문에서 제안한 최적의 노출시간 스케줄의 수학적 모델은 VHOE 기반의 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템의 실질적인 구현에 응용이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

본연구는 과학기술부 2000년도 국가지정 연구실 사업의 연구비 지원으로 이루어짐.

참고문헌

- [1] J. Gu, B. Cho, E. Kim, "Performance analysis of photopolymer-based VHOE for time-sequential multiview 3D display system", *Proc. of SPIE*, vol. 4712, Orlando, USA, April 2002.
- [2] J. Gu, S. Kim, B. Cho, E. Kim, "Exposure schedule scheme for uniform intensities of the reconstructed beams in the VHOE-based multi-view 3D Display System", *Proc. of SPIE*, vol. 4712, Orlando, USA, April 2002.