

홀로그래피 Head-Up Display 시스템의 설계 및 제작*

정만호 · 송재봉

한국표준과학연구원 광학연구실

한영수 · 유연석

청주대학교 광학공학과

(1994년 3월 7일 받음)

홀로그래피 HUD의 제작에 필요한 주요 파라미터를 살펴보고 이들 값을 결정하기 위한 관계식을 유도하여 설계 값을 설정하였다. 기록 방법으로는 간섭무늬에 의한 잡음을 최소화할 수 있는 공기층 반사 기록방법을 제시하였다. 특히 DCG필름을 처리한 후에 생기는 중심파장의 이동을 보정하기 위한 새로운 방법을 소개하였다.

I. 서 론

그동안 전투기를 비롯한 항공기 부문에 사용되어 오던 Head-Up Display (HUD) 시스템을 자동차에 응용하기 위한 연구가 최근에 많이 이루어 지고 있다.^[1-4] HUD는 운전자가 주행중에 시야(field of view)에 들어오는 외부 물체 또는 바깥 세상을 관찰하면서 계기판의 정보를 머리를 숙이지 않고 볼 수 있도록 운전자의 정면에 떠올려 외부세계와 함께 볼 수 있도록 해 주는 장치이다. 자동차의 경우 지난 80년대 말에 미국의 GM사에서 유리기판에 진공증착법으로 다층 코팅하여 제작한 재래식 광결합기를 처음으로 사용하여 HUD를 개발하였다. 그러나 이러한 재래식 HUD는 계기판의 파장에 대한 광결합기의 반사율이 낮아 CRT의 밝기를 지나치게 높여 정보를 인지할 수 있도록 하여 CRT의 수명이 짧아지고 외부에서 들어오는 빛의 투과율이 낮으며 계기판의 밝기가 균일하게 조절되지 못하는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 홀로그래피 광학소자를 이용한 홀로그래피 HUD를 자동차에 응용하려는 연구가 진행되고 있다. 홀로그래피 HUD는 앞서 기술한 재래식 HUD의 문제점을 해결할 수 있을 뿐 아니라 가벼우며 또한 소요되는 광학소자의 수를 줄일 수 있어 좁은 공간에 HUD를 장착할 수 있는 장점을 갖고 있다.

HUD는 자동차의 앞유리(windshield)에 부착시키거나

또는 앞유리 앞에 장착하여 계기판의 정보를 눈앞에 떠올려 보게되므로 계기판에 사용되는 광원의 분광 대역폭 내에서 높은 반사율을 갖고 한편으로는 외부에서 들어오는 빛은 모두 투과시켜야 하므로 나머지 파장영역에서는 높은 투과율을 가져야 한다. 홀로그래피 HUD는 재래식 HUD에 비하여 상대적으로 높은 파장 반사율을 나타낼 수 있으므로 콘트라스트가 높아 밝은 대낮에도 정보를 판독할 수 있다. 특히 홀로그래피 HUD는 off-axis의 각도로 기록할 경우 기록된 각도로 계기판의 정보를 회절시켜 재생할 수 있으므로 계기판의 정보를 원하는 위치에서 볼 수 있다.

HUD의 종류에는 굴절형과 반사형이 있다. 굴절형 HUD는 렌즈로 CRT광원에서 나오는 빛을 평행광으로 만든 뒤 평면형 광결합기로 반사시키는 방식이며 무한대의 거리에 상을 위치시켜 조종사의 눈의 위치에 무관한 조준각을 갖는다. 반사형 HUD는 릴레이 렌즈를 사용하여 계기판의 실상을 만든 뒤 이 실상을 곡면형 광결합기로 반사시켜 허상을 형성한다.

본 연구에서는 홀로그래피 HUD의 기본원리 및 이론을 살펴보고 이를 토대로 굴절형 홀로그래피 HUD에 사용될 광결합기를 DCG (Dichromated Gelatin) 필름을 사용하여 홀로그램 면과 평행하게 간섭무늬가 형성되는 conformal fringe 형태로 설계 제작한 결과를 제시하였다. 특히 본 연구에서는 설계된 광결합기의 중심파장을 얻기위해 먼저 기록각도를 0°로 하여 홀로그램을 제작한 후에 중심파장을 측정하여 이론값과 비교하였다. 이때 측정

* 본 연구는 과기처 특정연구과제로 수행되었음.

값과 이론값에 오차가 생기는데 원래 설계된 광경합기의 재생각도를 구하기 위한 홀로그람 기록각도 및 새로운 젤라틴의 두께비를 제시하였다.

II. HUD시스템의 기본 이론 및 설계

HUD의 주요 특성으로는 광경합기의 밝기를 나타내는 회절효율, 분광대역폭, 각도대역폭, 수차, 콘트라스트, 시야 등이 있다. 평면형 광경합기는 배율을 갖지 않기 때문에 수차는 다른 요소에 비해 덜 중요하다. 일반적으로 HUD시스템의 밝기를 좌우하는 요소는 조종사의 눈의 크기(pupil size), 계기판 광원의 밝기, 시스템내의 광학소자들의 투과율 및 반사율에 의한 전체 광학계의 유효투과율 등이다. 눈의 크기는 조절할 수 없는 요소이며 계기판의 밝기도 한계가 있고 휘도를 너무 크게 할 경우 계기판의 수명을 단축시키므로 HUD의 밝기를 높이기 위해서는 디스플레이 광원의 과장과 대역폭 그리고 재생각도 영역에서는 높은 반사회절효율을 가지며 나머지 영역에서는 투과율이 높은 광경합기를 제작하여야 한다. 광경합기의 회절효율은 DCG 감광재료를 사용하여 위상형 체적 홀로그람으로 제작할 경우 90% 이상의 높은 값을 얻을 수 있으며 분광대역폭 및 각도대역폭은 홀로그람의 두께와 굴절률변조에 의해 결정된다.

HUD의 콘트라스트 비율 CR은 아래와 같이 정의된다.

$$CR = (I_B + I_S) / I_B \quad (1)$$

여기서 I_B 는 홀로그래피 광경합기를 투과해서 들어오는 외부빛의 밝기이며 I_S 는 계기판에서 들어온 빛이 광경합기에서 반사되어 들어온 빛의 밝기이다. 외부에서 들어오는 빛에 대한 자동차 앞유리창과 HUD의 투과율이 각각 90%, 80%이고 계기판에서 들어오는 빛에 대한 결상렌즈의 투과율과 HUD의 반사율이 각각 90%, 80%인 경우 대낮의 휘도가 11,000 fL, 계기판의 휘도가 5,000 fL가 되도록 설계된 경우 HUD의 콘트라스트 CR은 1.4의 값을 얻을 수 있는데 이 정도의 값은 대단히 높은 콘트라스트라고 할 수 있다.

시야에는 전체시야(total field of view)와 순간시야(instantaneous field of view)의 두가지 개념이 있다. 전체시야는 계기판의 직경과 결상렌즈의 유효초점거리에 의해 결정되는 결상계 자체의 고정된 값이며 순간시야는 운전자의 머리움직임과 광경합기와 운전자간의 거리 등에 의해 값이 바뀌는 시야를 나타낸다.

그림 1은 계기판과 결상렌즈에 의해 형성되는 간단한 형태의 결상계에서의 전체시야의 개념을 나타내고 있으

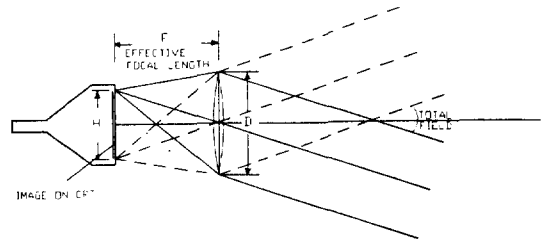


그림 1. 전체시야의 개념을 나타내는 광학계.

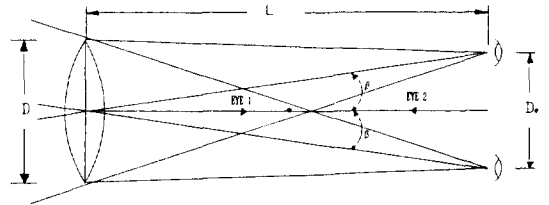


그림 2. 순간시야의 개념을 나타내는 광학계.

며 계기판의 유효직경을 H , 결상렌즈의 유효초점거리를 F 라고 할때 전체시야 TFOV는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$TFOV = 2 \tan^{-1}(H/2F) \quad (2)$$

그림 2는 순간시야 IFOV를 나타내고 있으며 눈과 렌즈 사이의 거리를 L 이라 할때 거리 L 에서 한쪽 눈에 의한 순간시야 IFOV는

$$IFOV_E = \tan^{-1}(D/2L) + \beta \quad (3)$$

가 된다. 이때 β 는 두눈 사이의 거리 D_e 와 눈과 렌즈사이의 거리 L 에 의해 결정되는 값으로 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\beta = \tan^{-1}(D_e/2L) \quad (4)$$

따라서 두눈에 의한 순간시야 IFOV는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$IFOV = 2 \tan^{-1}(D/2L) + 2\beta \quad (5)$$

식 (5)에서 순간시야는 눈의 위치에 따라 변하므로 눈이 위치 1에 있을 때가 위치 2에서 보다 크게 된다. 따라서 머리를 앞으로 움직이면 순간시야는 증가하게 되고 머리를 좌우로 움직이면 계기판 정보의 좌우면 중 한면을 다른면 보다 많이 볼 수 있다. 제작하고자 하는 HUD 시스템의 전체시야의 값이 주어졌을 경우에는 계기판의 크기와 결상렌즈의 초점거리가 주요변수가 되며 이때 계기판의 크기가 클수록 전체시야는 넓어진다. 그러나

전체시스템의 무게와 크기를 고려한다면 계기판의 크기를 줄이고 렌즈의 초점거리를 짧게 해야한다. 그러나 초점거리를 너무 짧게하면 수차의 발생원인이 되며 정확한 상을 얻을 수 없다. 따라서 이러한 점을 고려하여 알맞은 값을 선정한다. 본 연구에서는 계기판으로 크기가 4×2 cm인 VFD(Vacuum Fluorescence Display)를 사용하였으며 결상렌즈의 초점거리는 20 cm로 하였다. 따라서 전체시야는 식 (2)에서 수평시야는 11.4°, 그리고 수직시야는 5.7°임을 알 수 있다. 또한 렌즈의 직경이 10 cm이고 운전자의 눈의 위치가 렌즈로부터 50 cm 떨어져 있을 경우 수평 순간시야와 수직 순간시야는 각각 11.4°, 5.7°가 된다.

홀로그래피 HUD에서 중요한 파라미터인 중심파장은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.^[5]

$$\lambda_c(\theta) = \lambda_c(0) \frac{\sqrt{N_o^2 - \sin^2 \theta}}{N_o} \quad (6)$$

이때 $\lambda_c(\theta)$ 는 입사각이 θ 일 때의 재생중심파장이며, $\lambda_c(0)$ 는 입사각이 0°인 경우의 재생중심파장, 또한 N_o 는 홀로그래피의 평균 굴절율이다. 화학처리 과정을 거친 후 홀로그래피의 재생중심파장은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\frac{\lambda_c(0)}{\lambda_o} = \frac{SN_o}{N_o \cos \theta} \quad (7)$$

이때 N_o 는 홀로그래피를 처리하기 전의 홀로그래피의 평균 굴절율, λ_o 는 레이저의 기록 파장, θ 는 젤라틴 내에서의 기록각도, S 는 처리과정 후의 젤라틴의 두께와 처리과정 전의 젤라틴의 두께 비이다. 식 (7)은 홀로그래피의 재생중심파장이 기록에 사용한 레이저의 파장과 비교하여 얼마나 다른 파장으로 이동하였는지를 나타내며 필터의 재생중심파장은 젤라틴의 두께 비인 S 에 의해 많이 좌우되고 기록각도 θ 를 크게하여 재생중심파장을 긴 파장에서 얻을 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 HUD의 재생각도를 35°로 하고 이때의 재생중심파장 $\lambda_c(\theta)$ 는 계기판의 중심파장인 515 nm가 되도록 설계하였다.

III. 홀로그래피 HUD의 제작 및 논의

홀로그래피 HUD는 일반적으로 홀로그래피 반사형 필터를 사용한다. 본 연구에서는 홀로그래피 표면에서 일정한 공간주파수를 형성하며 간섭무늬의 면이 홀로그래피 평면에 평행하게 형성되는 반사형 홀로그래피 필터를 제작하였다.

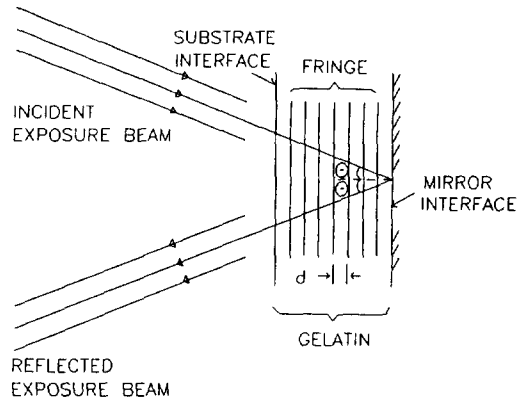


그림 3. 홀로그래피 필터의 간섭무늬 기록도.

본 연구에서는 홀로그래피 HUD를 제작하기 위한 감광재료로 DCG를 사용하였다. 먼저 Kodak 649F 건판을 사용하여 DCG필름을 얻기 위하여 필름을 정착액에 담가 은염을 제거한 후에 젤라틴 필름을 온도가 20°C 인 물에 10분간 담구었다. 그 후에 젤라틴의 부풀림 정도를 크게하기 위해서 온도가 50°C 인 뜨거운 물에 10분간 처리하였다. 감광제는 젤라틴에 ammonium dichromate를 첨가하였으며 실험을 위하여 3%의 감광제를 섞은 필름을 준비하였다. 감광제를 첨가한 젤라틴 필름들은 70°C 에서 10분간 baking 하였다. 이제 DCG 필름을 노출시킴으로써 HOE를 제작하게 되는데, DCG 필름에 아르곤 레이저 ($\lambda = 488 \text{ nm}$)를 입사시켜서 반사형 간섭필터를 형성하였다. 효과적인 기록을 위하여 공기층 반사 기록 방법을 사용하여 광결합기를 제작하였다. 일반적으로 홀로그래피 광결합기를 기록하는 방법으로 젤라틴면에 거울을 밀착하여 젤라틴층을 통과한 레이저 빛이 거울면에서 반사되어 나온 빛과 만나 간섭무늬를 형성하도록 한다. 그림 3에 홀로그래피 반사형 간섭필터의 제작도를 나타내었다. 이 방법을 사용할 경우 젤라틴면과 거울면 사이에서의 굴절율 차이에 의한 간섭무늬가 기록이 되어 양질의 홀로그래피를 제작할 경우 문제가 된다. 이 점을 해결하기 위해서 젤라틴면과 거울면 사이에 굴절율 정합 오일인 크실렌을 삽입하여 기록하는데 이 물질은 강한 냄새가 있으므로 본 연구에서는 젤라틴 층을 통과한 입사빔이 공기층에서 반사되도록 하여 이때 서로 반대 방향에서 들어온 입사빔과 공기층 반사빔이 감광재료상에서 간섭을 일으켜 간섭무늬가 형성되도록 하는 공기층 반사 기록 방법을 사용하였다.

그림 4는 공기층 반사 기록 방법을 사용하여 기록각도를 0°로 하였을때 DCG필름에 제작된 반사형 필터의

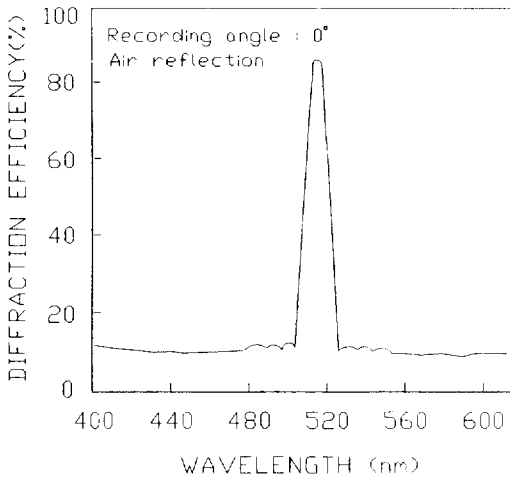


그림 4. DCG 홀로그래피 필터의 분광특성(기록각도: 0°, 공기층반사).

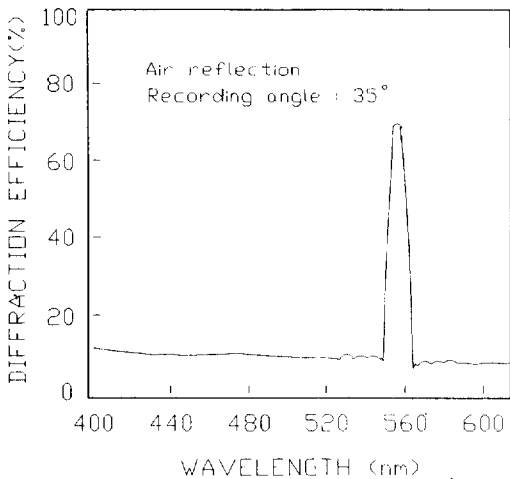


그림 5. DCG 홀로그래피 필터의 분광특성(기록각도: 35°, 공기층반사).

분광특성이다. 반사형 필터의 측정시 입사각 즉 재생각도는 0°로 하였으며 측정된 재생중심파장은 515 nm였다. 홀로그램의 기록에 사용된 레이저의 파장이 488 nm이므로 처리과정에서 27 nm 정도 긴 파장으로 이동되었음을 알 수 있다. 식 (7)에서 알 수 있듯이 이러한 재생파장의 이동은 처리과정 후 젤라틴 두께의 변화에 따른 것으로 본 실험에서 얻은 S의 값은 1.06이다. 이때 N_0/N_1 는 1로 가정하였다. 이제 S의 값을 구하였으므로 식 (7)에서 기록각도 θ 에 따른 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 를 보정할 수 있다. 따라서 기록각도 θ 가 35°일 때 $\lambda_c(0)$ 는 628

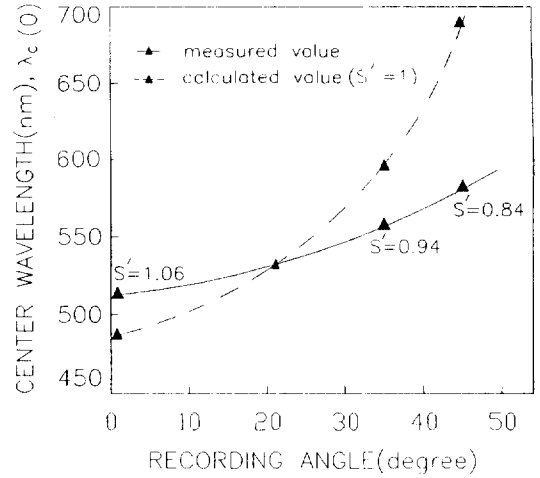


그림 6. 보정된 젤라틴 두께변화를 S'을 고려한 기록각도에 따른 재생중심파장 특성.

nm이어야 한다. 그림 5는 공기층 반사 기록 방법을 사용하여 기록각도를 35°로 하였을 때 얻어진 반사형 필터의 분광특성이다. 반사형 필터의 분광특성 측정시 입사각 즉 재생각도는 0°로 하였으며 이때의 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 는 570 nm임을 알 수 있다. 예상했던 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 는 628 nm였으나 약 58 nm 정도 짧은 파장을 얻었다. 이러한 사실은 식 (7)에서 젤라틴 두께변조비 S가 처리과정을 동일하게 하여도 기록각도를 변화시키면 변화한다는 사실을 나타내며 또한 굴절률 변조비 N_0/N_1 도 영향을 받는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 식 (7)에서 파라미터 $S(N_0/N_1)$ 를 S'으로 대치하여 보정하였다. 그 이유는 처리과정과 기록각도의 변화에 따라 S와 N_0/N_1 가 함께 변화하여 정확한 예측을 할 수 없기 때문이다. S'은 측정 값이므로 기록각도를 변화시키며 따라 얻어진 반사형 필터의 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 을 측정하여 식 (7)에 대입하면 기록각도에 따른 S'값을 구할 수 있다. 그림 6은 이러한 방법으로 얻어진 기록각도에 따른 S'값과 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 의 관계를 나타내고 있다. 따라서 재생중심파장의 설계 값이 결정되면 그림 6에서 S' 값을 연결하여 얻은 실선을 통하여 우리는 원하는 재생중심파장 $\lambda_c(0)$ 을 얻기위한 기록각도를 구할 수 있다. 점선은 기록각도에 따라 S' 값이 항상 같다고 가정하였을 때의 곡선으로 상당히 큰 오차요인이 된다는 것을 알 수 있다. 여기서 HUD의 재생각도는 35°로 하고 이 각도에서의 재생중심파장을 515 nm로 설계한다면 식 (6)에 이 값을 대입하면 $\lambda_c(0)$ 는 557 nm가 된다. 따라서 그림 6에서

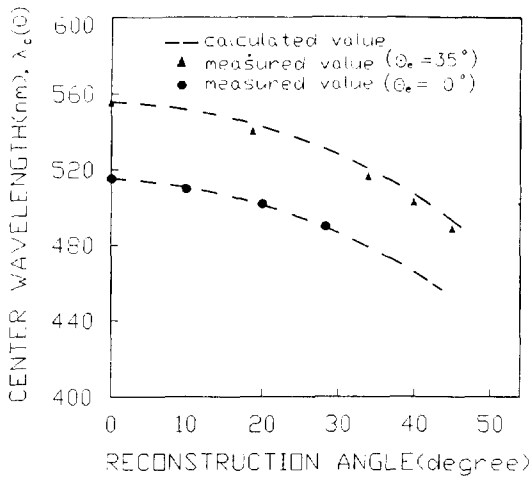


그림 7. 재생각도에 따른 재생중심파장 특성.

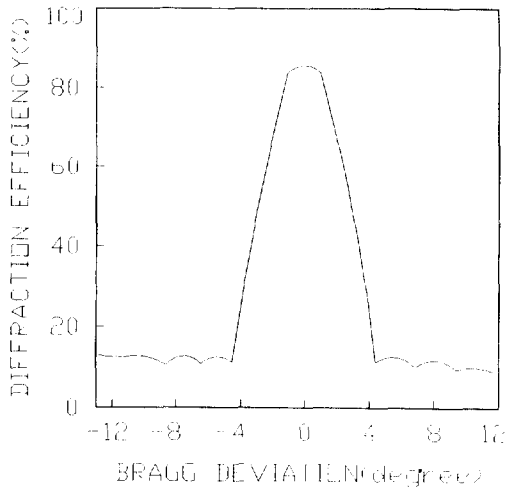


그림 8. DCG 홀로그래피 필터의 각도대역폭 특성.

기록각도는 35°로 하면 된다는 것을 알 수 있다. 또한 재생각도 35°에서의 재생중심파장을 502 nm로 한다면 $\lambda_c(0)$ 는 542 nm가 되어 그림 6에서 기록각도는 28°로 하면 된다.

그림 7은 실제로 0°와 35°로 기록한 반사형 필터에 입사되는 재생각도 θ 에 따른 재생중심파장 $\lambda_c(\theta)$ 를 측정 한 값으로 점선은 식 (6)에 의해 계산된 값을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 0°로 기록한 경우에는 계산치와 측정치 간에 오차가 0.5 nm 정도이고 기록각도가 35°인 경우에는 3 nm 정도 오차가 생겼으나 전체적으로 좋은 결과를 얻은 것으로 판단된다. 그림 8은 제작된 홀로그래피 광결합기의 각도대역폭을 측정 한 값이다. 이 값은

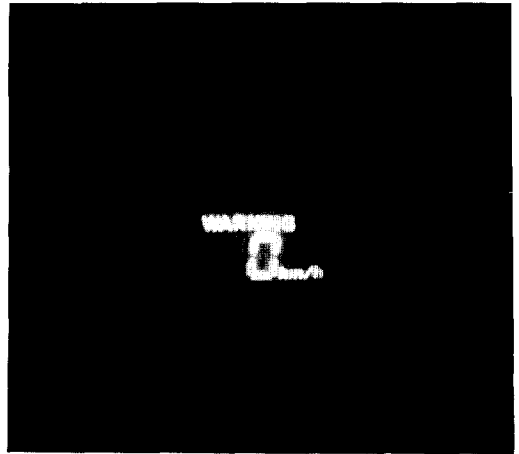


그림 9. 제작된 홀로그래피 HUD에 의해 재생된 홀로그래피 영상.

Bragg각도에서 최대 회절효율을 나타내다가 브래그 각도에서 벗어나면서 회절효율이 감소되게 되는데 자동차용 HUD의 경우에 광결합기의 시야 값으로 작용한다. 본 연구에서 제작된 홀로그래피 광결합기의 각도 대역폭은 최대 회절효율의 50% 지점(FWHM)을 기준으로 할 때 약 7°로 나타났다. 이 값은 설계된 HUD의 시야 값 11.4° 보다 다소 작게 나타났으며 각도대역폭을 더욱 증가시키기 위해서는 젤라틴의 굴절을 변조값을 증가시킬 필요가 있다.^[6] 이때 각도대역폭을 증가시키려는 이유는 본 연구에서 얻은 7°로는 운전자의 머리 움직임을 감안할 때 다소 작기 때문이다. 본 연구에서 제작된 홀로그래피 반사형 필터의 반사율은 80% 이상이므로 컨트라스트 CR은 설계된 값에 만족하고 있으며 파장대역폭은 15 nm 정도였다. 그림 9는 제작된 홀로그래피 HUD시스템의 계기판 정보가 홀로그래피에 나타난 사진이다.

IV. 결 론

홀로그래피 HUD를 제작하기 위한 주요 파라미터를 살펴보고 이들 값을 결정하기 위한 관계식을 유도하였다. 자동차용 HUD로 사용하기 위해서는 높은 회절효율을 갖도록 DCG처리 방법을 개발하여야 하며 본 연구에서 제시된 관계식을 사용하여 계기판의 사용파장 및 파장대역폭과 일치하도록 중심파장 및 기록각도를 설계할 수 있음을 보였다. 파장 대역폭은 보통 20 nm 정도를 사용하므로 본 연구에서 제시한 처리 방법은 무난하다고

판단된다. 홀로그램에서 각도대역폭이 7° 정도로 다소 설계된 값보다 작게 나타났는데 이 값은 DCG처리 방법 및 회절효율 값 즉 굴절을 변조 값에 따라 달라지므로 최적의 값을 얻도록 더욱 연구해야 할 과제로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어 실험을 도와주신 강신웅씨에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. J. Chang, Technical Report 134800-1-P, Environmental Research Institute of Michigan (1978).
- [2] Juris Upatnieks, SPIE, **883**, 171(1988).
- [3] R. D. Rallison, SPIE, **883**, 75(1988).
- [4] R. L. Fisher, Opt. Eng., **28**, 616(1989).
- [5] J. M. Tedesco, Opt. Eng., **28**, 609(1989).
- [6] H. Kogelnik, Bell Syst. J., **48**, 2909(1969).

Design and Fabrication of Holographic Head-Up Display System

Man Ho Jeong and Jae Bong Song

Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards & Science, Taejon 305-606, Korea

Yeong Soo Han and Yeon Serk Yu

Dept. of Physics and Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received: March 7, 1994)

Main parameters and equations necessary for developing the holographic HUD are investigated. Air reflection recording method of obtaining good holographic reflection filters with minimized interference pattern noises is presented. Especially, a new method of correcting the center wavelength shift which takes place after the processing of the DCG film is suggested.