

기술 특 집

홀로그래픽 Head-Up Display 시스템

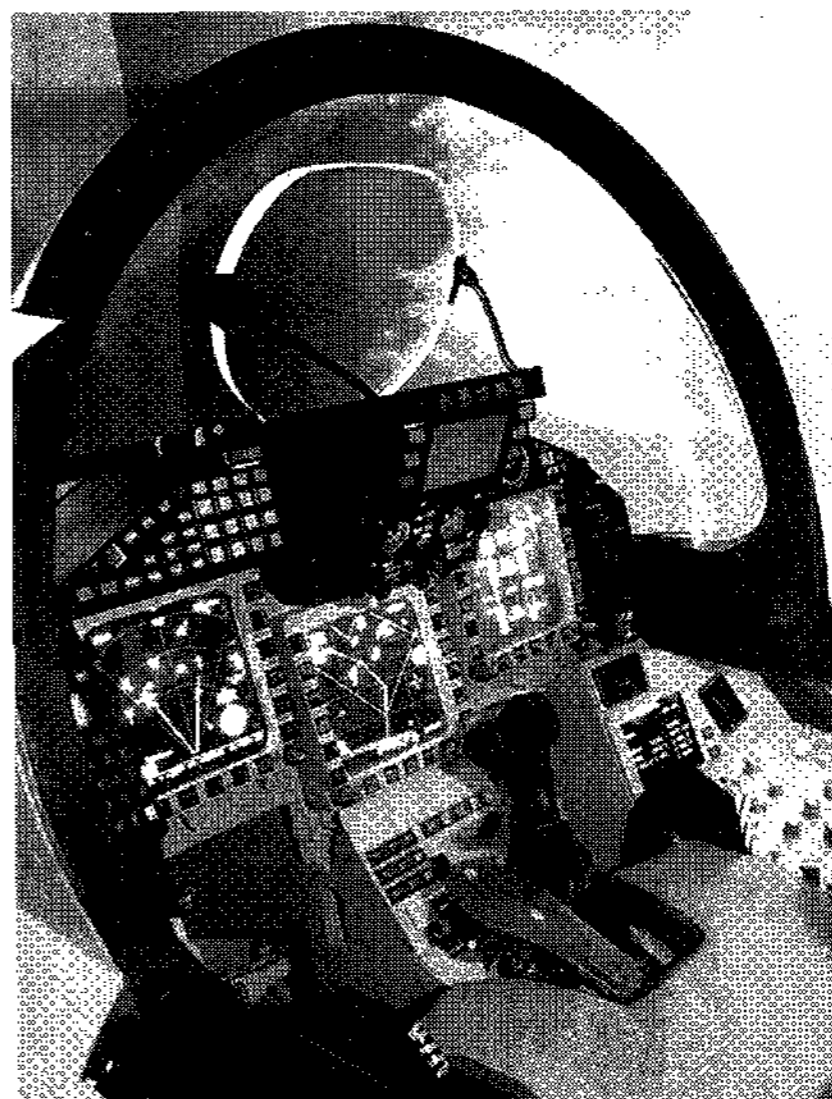
정만호 (청주대학교 정보기술공학부)

본 고에서는 헤드업 디스플레이(Head-Up Display ; \HUD)시스템의 개요 및 기술적 특징을 기술하며 특히 주요 응용분야인 자동차용 HUD 시스템을 중심으로 살펴보고자 한다.

I. 서 론

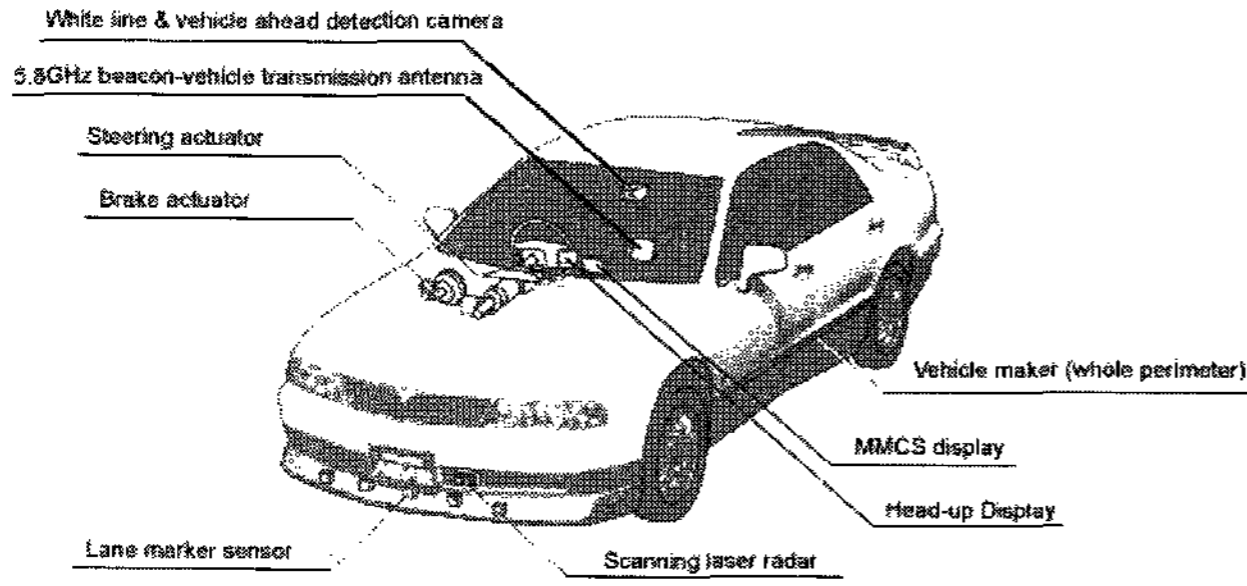
헤드업 디스플레이(Head-Up Display ; HUD) 시스템은 현재 공군 전투기 또는 민간 항공기에서 많이 응용되고 있는 광학 시스템으로 조종사가 시야(field of view)에 들어오는 외부 물체 또는 바깥세상을 관찰하면서 조종석의 아래 부분에 위치한 계기판과 사격 조준 판으로 주어지는 정보가 조종사가 머리를 숙이지 않아도 동시에 볼 수 있도록 조종사의 시야에 들어가도록 해주는 장치이다. 이러한 HUD는 조종사가 비행하는 동안 시야를 확보하면서 각종 계기의 상황을 동시에 주시할 수 있기 때문에 비상시 조종사의 반응 속도를 빠르게 할 뿐만 아니라 조종하는 부담을 줄여 피곤함을 덜어 준다. 이러한 이유 때문에 최초의 HUD 응용은 민항기에 사용되었는데 미국의 Flight Dynamics사에서 보잉 727기에 응용한 것이 대표적인 예이다. [그림 1]은 차세대 전투기인 EF2000(Eurofighter Typhoon 2000)에 장착된 HUD 시스템을 나타내고 있다. 조종석은 영국을 주축으로 4개국의 최고 기술들을 모아 만든 것으로, 이는 세계 최고 수준이라고 한다.

그러나 이러한 재래식 HUD는 CRT의 밝기를 지나치게 높여야 하고 외부에서 들어오는 빛의 투과율이 낮으며 계기판의 밝기가 균일하게 조절 되지 못하는 등의 단점을 가지고 있다. 최근에 홀로그래픽 광학소자(Holographic Optical Element ; HOE)의 급속한 발달로 이러한 홀로그래픽 광학소자를 이용한 홀로그래픽 HUD가 기존의 HUD를 대체하고 있다. 홀로그래픽 HUD는 앞서 기술한 재래식 HUD의 문제점을 해결할 수 있을 뿐 아니라 가벼우며 또한 소요되는 광학소자의 수를 줄여 좁은 공간에 HUD를 장착할 수 있는 장점을 갖고 있다.



[그림 1] 차세대 전투기 EF 2000내에 장착된 HUD 시스템

한편 자동차 분야에서도 고급화를 추구하면서 HUD에 대한 관심이 높아져서 홀로그래픽 HUD에 관한 연구를 시작하였는데 독일의 Volkswagen 연구개발팀, 미국의 Hughes 항공회사의 레이더 시스템 연구그룹에서 최근에 각각 자동차용 홀로그래픽 HUD를 개발하기 시작했으며 이탈리아의 FIAT 자동차 회사에서는 자회사인 Velgia Borletti의 연구팀과 공동으로 개발하고 있는 상태이며 미국에서도 GM을 포함한 자동차 생산업체에서 이미 개발에 착수하여 상당한 연구실적을 보이고 있다. 국내에서도 자동차 부품연구소를 중심으로 차세대 미래형 자동차 개발 사업의 일환으로 HUD 개발에 국내의 업체들이 참여하고 있는 실정이다. 이들이 개발하고 있는 자동차용 HUD의 경우 그 기능이 더욱 확대되어 주행 중에 도로안내 및 교통표지판 특히 정지신호를 운전자의 눈앞에 떠올려 안전하고 쾌적한 주행을 할 수 있도록 하고 있다. 또한 컴퓨터를 자동차에 내장하여 주행 중인 지역의 도로망이나 교통상황을 모니터에 나타내주는 장치가 개발되고 있는데 이러한 경우 많은 정보를 빠른 시간에 전달하기 위해서는 모니터의 정보를 항상 접할 수 있



[그림 2] Mitsubishi 사의 Smart Cruise 21 ASV

는 HUD의 사용이 필수적이다. HUD는 자동차의 방풍유리창(windshield)에 부착시키거나 또는 방풍유리창 앞에 장착하여 계기판의 정보를 눈앞에 떠올려 보게 되므로 계기판에 사용되는 광원의 분광 대역폭 내에서 높은 반사율을 갖고 한편으로는 외부에서 들어오는 빛은 모두 투과시켜야 하므로 나머지 파장영역에서는 높은 투과율을 가져야 한다. [그림 2]는 Mitsubishi 자동차의 Smart Cruise 21 ASV에 장착되는 HUD 시스템을 나타낸다.

본 고에서는 이하 자동차용 헤드업 디스플레이 시스템을 중심으로 기술하고자 한다.

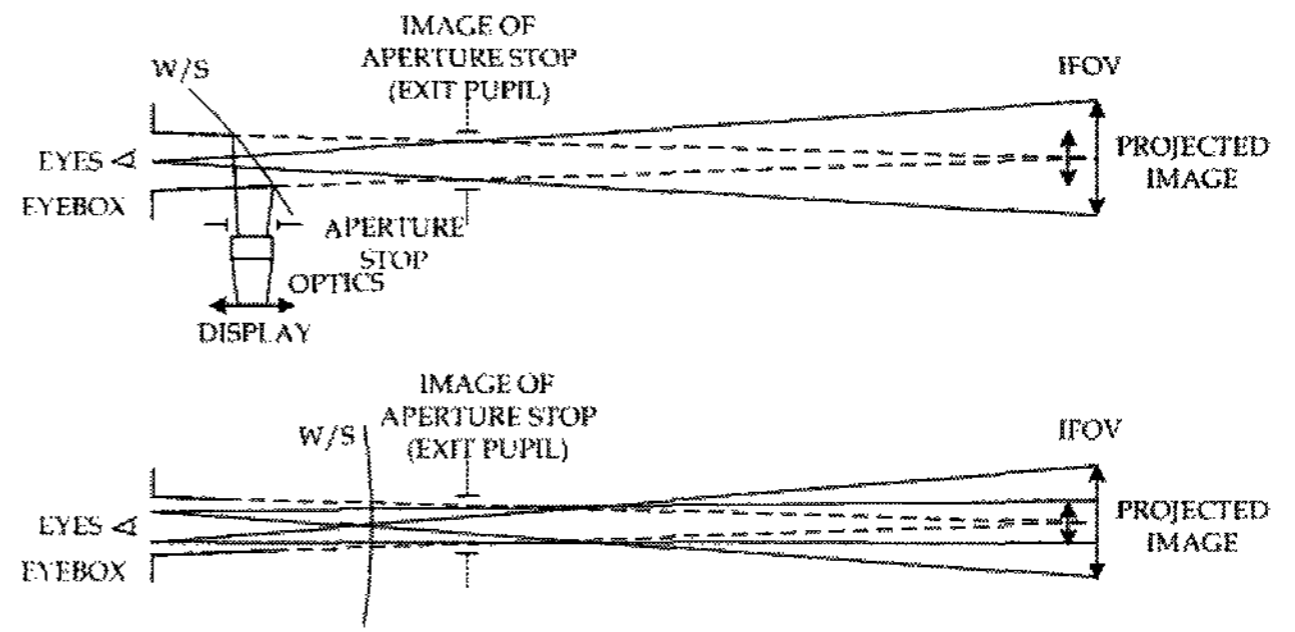
II. 본 론

1. 자동차용 홀로그래픽 헤드업 디스플레이 시스템의 기본 형태

HUD용 광 결합기의 일반적인 요구사항 외에 자동차용 HUD 시스템은 [표 1]과 같이 항공기용 HUD와는 다른 몇 가지 차이를 가진다. 자동차의 경우 항공기와 달리 외부 시야의 물체가 가까이 있으므로 운전자의 초점수렴거리의 변화를 줄이기 위해 재생상도 수 m의 거리에 위치시켜야 한다. 군용기의 경우 조준용 표적을 표시하기 위하여 매우 정

[표 1] 자동차용 HUD와 항공기용 HUD의 차이점

주요특성	자동차용 HUD	항공기용 HUD
상 거리	짧다(2-20m)	길다(무한대)
위치제어 정확도	중요하지 않다	매우 중요하다
상 변형	중요하지 않다	중요하다
외부시계의 주대상물	보행자, 차, 건물, 신호등	구름, 비행기, 활주로
운전자의 눈 위치 변화	많다	적다
장착 공간	좁다	상대적으로 넓다
제품 생산 및 가격	대량생산, 저가	소량생산, 고가



[그림 3] 자동차용 헤드업 디스플레이 시스템의 구조

확한 재생상의 위치제어가 필요하나 자동차용 HUD에 사용되는 기호들은 외부시계와는 무관한 자동차의 상태를 나타내므로 재생상의 위치 또는 수차에 의한 상 변형은 중요하지 않다. 또한 장착 공간이 상대적으로 좁으므로 정밀하지는 않으나 소형화된 설계가 요구된다.^[1]

자동차용 HUD 시스템의 구조가 [그림 3]에 나타나 있다. 일반적으로 HUD 시스템은 계기판, 렌즈를 포함한 광학 시스템 그리고 계기판의 정보를 운전자가 보도록 하는 광결합기의 3 부분으로 크게 이루어져 있으며 홀로그래픽 헤드업 디스플레이 시스템에서는 광결합기를 홀로그램 광결합기를 사용한다. 일단 운전자가 원하는 정보가 계기판에 올려지면 계기판 정보의 허상이 광학시스템에 의해 투사되어 자동차 방풍 유리창 내에 있는 홀로그래픽 광결합기에서 반사된 후 운전자의 눈에 입사된다. 중요한 광학적 특성 및 시스템의 특징은 다음과 같다.

- (1) 상크기—운전자의 위치에서 마주 대하고 있는 상의 각도크기로서 이는 디스플레이의 크기 및 광학시스템의 배율에 의해 결정된다.
- (2) 상위치—운전자의 시야내의 상의 위치로서 자동차의 광결합기에 대한 광학시스템의 위치에 의해 결정된다. 대부분의 경우 본넷 상단에 상위치를 선호하고 있다.
- (3) Eyebow—상의 시계를 잃지 않는 범위 내에서 움직일 수 있는 눈의 운동영역으로서 광학시스템의 구경 및 모양에 좌우된다.
- (4) 시야—상공간내의 각도크기로서 조종사와 HUD의 위치관계에 의해 매 순간마다 변하는 순간시야와 머리를 움직여서 볼 수 있는 전체시야가 있다.

이들은 모두 광학시스템의 구경에 좌우된다. 상의 크기, 시야 및 eyebow는 홀로그램의 크기 및 특성에 영향을 준다. 따라서 이들 광학적 특성을 만족하기 위해서는 홀로그램의 크기, 각도 및 분광특성이 충분해야 한다.

- (5) 이중상—자동차 방풍유리창의 반사표면에서 발생하는 상의 광학적인 분리 현상으로 일차적 상과 이차적인 상과의 컨트라스트는 이들 상의 밝기 비로 나타낸다.

홀로그래픽 광학소자의 특성을 가진 홀로그래픽 광결합기를 만들면 재래식 HUD시스템이 가지고 있는 단점들을 제거할 수 있다. 홀로그래픽 광학소자는 좁은 분광대역폭과 각도대역폭을 갖는 회절형 소자이므로 CRT광원의 파장과 각

도영역에서만 높은 반사율을 가지고 그 외의 영역에서는 반사율이 낮고 투과율이 높은 광결합기를 제작할 수 있다. 따라서 홀로그래픽 HUD는 재래식 HUD에 비하여 상대적으로 높은 반사율을 가지므로 컨트라스트가 높아 밝은 대낮에도 정보를 판독할 수 있다. 특히 홀로그래픽 HUD는 off-axis의 각도로 기록할 경우 기록된 각도로 계기판의 정보를 회절시켜 재생할 수 있으므로 계기판의 정보를 원하는 위치에서 볼 수 있다. 광결합기에서는 계기판에서 나온 빛의 입사각이 위치에 따라 변화한다. 따라서 Bragg 각도를 갖는 체적홀로그래프에서는 위치에 따라 변하는 좁은 각도대역폭을 갖도록 할 수 있으므로 다른 각도에서 들어오는 투과광의 투과율을 감소시키지 않으나 다층막코팅의 경우는 특정파장대의 반사율은 높일 수 있으나 각도 대역폭이 크기 때문에 외부광의 투과율을 크게 감소시키므로 사용할 수 없다.

홀로그래픽 광결합기를 사용하면 공통적으로 첫째 CRT 광원의 파장영역에서 높은 반사율을 얻어 컨트라스트를 개선하며 둘째 외부광의 투과율을 높이고 셋째 Fresnel 반사로 인하여 계기판의 상의 밝기가 고르지 못한 것을 균일하게 보정할 수 있으며 넷째 홀로그램이 기판위에 제작되므로 기판의 작은 결함을 상쇄할 수 있는 장점을 얻을 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.

2. 자동차용 헤드업 디스플레이 시스템의 주요 파라미터

HUD의 주요 특성으로는 광결합기의 밝기를 나타내는 회절효율, 분광대역폭, 각도대역폭, 수차, 컨트라스트, 시야 등이 있다. 평면형 광결합기는 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 경우에는 계기판의 수명을 단축시킨다. 따라서 HUD의 밝기를 높이기 위해서는 디스플레이 광원의 파장과 대역폭 그리고 재생각도 영역에서 높은 반사회절효율을 가지면서 나머지 영역에서는 투과율이 높은 광결합기를 제작하여야 한다. 광결합기의 회절효율은 DCG 감광재료 혹은 포토폴리머를 사용하여 위상형 체적 홀로그램으로 제작할 경우 90% 이상의 높은 값을 얻을 수 있으며 분광대역폭 및 각도대역폭은 홀로그램의 두께와 굴절률변조에 의해 결정된다.^[2-5] HUD의 컨트라스트 비율 CR은 다음과 같이 정의된다.

$$CR = \frac{I_p + I_s}{I_p} \quad (1)$$

여기서 I_p 는 홀로그래픽 광결합기를 투과해서 들어오는 외부빛의 밝기이며 I_s 는 계기판에서 들어온 빛이 광결합기에서 반사되어 들어온 빛의 밝기이다. 예를 들어 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 컨트라스트 CR은 1.4의 값을 얻을 수 있는데 이 정도의 값은 대단히 높은 컨트라스트라고 할 수 있다.

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

[그림 4]는 계기판과 결상렌즈에 의해 형성되는 간단한 형태의 결상계에서의 전체시야의 개념을 나타내고 있으며 계기판의 유효직경을 H, 결상렌즈의 유효초점거리를 F라고 할 때 전체시야 TFOV는 식 (2)와 같이 주어진다.

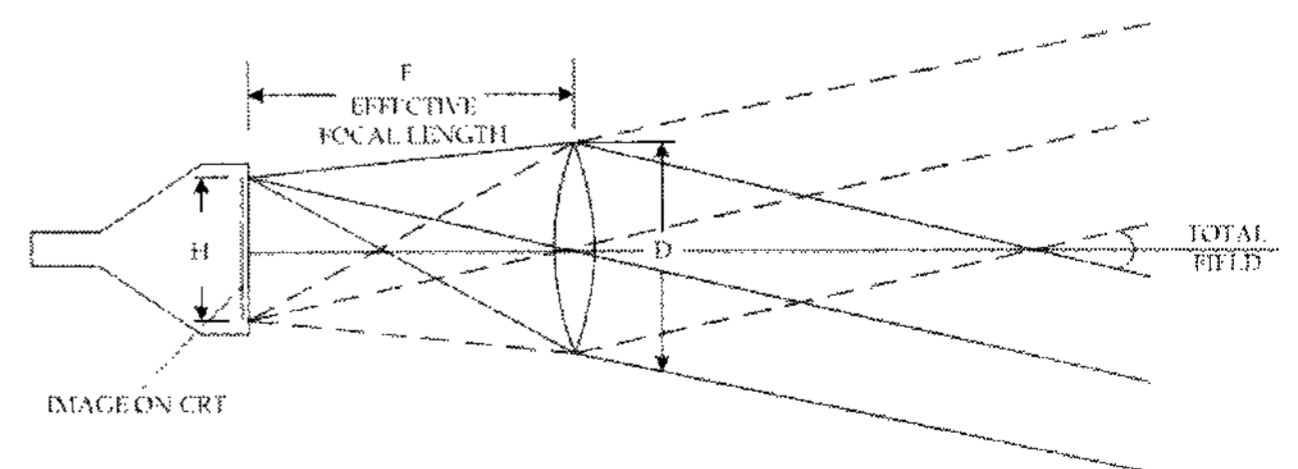
$$TFOV = 2 \tan^{-1}(H/2F) \quad (2)$$

[그림 5]는 순간시야 IFOV를 나타내고 있으며 눈과 렌즈 사이의 거리를 L이라 할 때 거리 L에서 한쪽 눈에 의한 순간시야 IFOV_E는

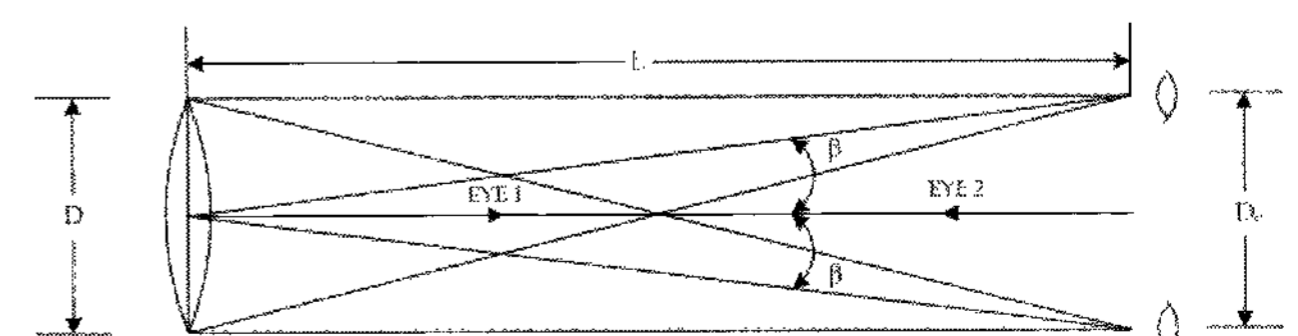
$$IFOV_E = \tan^{-1}(D/2L) + \beta \quad (3)$$

으로 표현된다.

홀로그램을 자동차 방풍유리창 내에 박판으로 삽입할 경우 계기판의 상이 반사되는 표면은 앞유리창의 내부유리표면, 홀로그램, 그리고 앞유리창의 외부유리표면으로 구분할 수 있다. 이 때문에 홀로그램의 박판삽입으로 인한 이중상이 발생하는데 이들 표면에 의해 반사되는 상의 각도분리 α 는



[그림 4] 전체시야의 개념을 나타내는 광학계



[그림 5] 순간시야의 개념을 나타내는 광학계

상의 투사거리 V , 자동차 앞유리창의 두께 t , 그리고 시각 (viewing angle) θ 에 의해 결정된다. 각도분리 α 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = t \frac{\sin 2\theta}{V\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

홀로그램을 자동차 방풍유리창 내에 박판으로 삽입할 경우 광도특성에 미치는 영향을 고려해야 한다. 이때 고려해야 되는 것으로는 상의 밝기, 가시영역에서의 전체 투과율, 이차적인 상의 컨트라스트 등이 있으며 이들은 홀로그램의 특성 및 대역폭과 편광 등의 디스플레이의 특성의 영향을 받는다.

홀로그래픽 HUD에서 중요한 파라미터인 중심파장은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_c(\theta) = \lambda_c(0) \frac{\sqrt{N_0^2 - \sin^2 \theta}}{N_0} \quad (5)$$

이때 $\lambda_c(\theta)$ 는 입사각이 θ 일 때의 재생중심파장이며, $\lambda_c(0)$ 는 입사각이 0° 인 경우의 재생중심파장, 또한 N_0 는 홀로그램의 평균 굴절률이다.

3. 홀로그래픽 헤드업 디스플레이 시스템의 설계 특성

홀로그래픽 HUD에 사용되는 홀로그래픽 광결합기는 크게 conformal(unpowered) 홀로그램과 non-conformal (powered) 홀로그램의 형태로 나뉘어진다. Conformal 홀로그램은 격자벡터가 기판의 수직벡터와 평행한 반사형 off-axis 필터의 형태를 가진다. Non-conformal 홀로그램은 격자벡터가 기판에 평행하지 않으므로 회절광의 색분산을 유발하거나 외부시야의 투과시에 특히, 태양광이나 가로등 불빛이 분산되어 운전자의 눈에 들어올 수 있으나 광학계의 설계시 추가적인 장점을 얻을 수 있고 색분산에 의한 문제는 충분히 좁은 분광대역폭을 가지는 재생광원의 이용 및 홀로그램의 각도대역폭의 조절을 통해서 해결될 수 있으므로 자동차용 HUD에서와 같이 좁은 공간에서의 설치를 필요로 하는 경우에 유리하다.

반사형 홀로그램은 체적형 매질에 기록되므로 기록 및 재생조건에 따라 회절효율특성의 변화가 민감하므로 회절효율 특성에 대한 설계가 요구된다. 체적형 홀로그램의 회절효율 분석에는 결합파동을 통한 방법과 모드 접근법이 가장 잘 알려져 있다. 이들은 모두 격자내부에서의 전자장의 표현을 통해서 얻어지며 동일한 결과를 보인다. 이러한 일반적인 이론은 다시 모드이론, 2광파 2차 결합파이론, 다광파 결합파이론, 2광파 1차 결합파이론(Kogelnik 이론)등의 근사이론으로 단순화되는데 본문의 분석에는 Kogelnik의 2광파 1차 결합파이론이 사용되었다.^[6] 광결합기로 non-conformal 홀로그램이 사용될 경우 일반적인 HOE(Holographic Optical Element)의 특성을 그대로 지니므로 홀로그램의 결상 특성에 대한 고려가 필요하다. 자동차 HUD용 광 결합기의 경우 수차로 인한 재생상의 왜곡은 크게 중요하지 않다. 그

러나 홀로그래픽 광학소자의 결상특성은 파장에 매우 민감하여 기록 및 재생 파장의 차이에 의해 큰 색수차를 유발하게 되는데 이러한 수차를 감소시키기 위한 방법에 대해 논의한다.

HOE의 결상식은 두 개의 기록광에 의해 간섭무늬 내에 기록된 위상과 조명광에 대한 위상의 곱을 원점으로부터의 거리로 나타낸 것을 급수 전개하고 이것을 재생광에 대한 급수의 1차 항과 비교하여 얻을 수 있다. 또한 3차항을 비교하여 수차계수의 표현을 얻을 수 있다. 이들 수차계수의 형태는 재래식 렌즈에서 사용되는 것을 그대로 따르는데 이는 두 경우 모두 경로 및 위상차에 대한 제곱근의 급수 전개를 통해서 얻어지기 때문이다.^[7] 기록광을 첨자 R 과 O , 재생광을 C 와 I 로 나타내고 [그림 6]과 같이 홀로그램의 중심으로부터의 거리를 R , z 축과 이루는 각을 α 로 표현하면 경로차에 대한 급수식에서 1차 항의 비교를 통해 Gauss상점의 위치 및 방향에 대한 표현을 (6)식과 같이 얻는다. 여기서 μ 는 기록 및 재생 파장의 비 λ_c/λ_R 을 나타낸다.

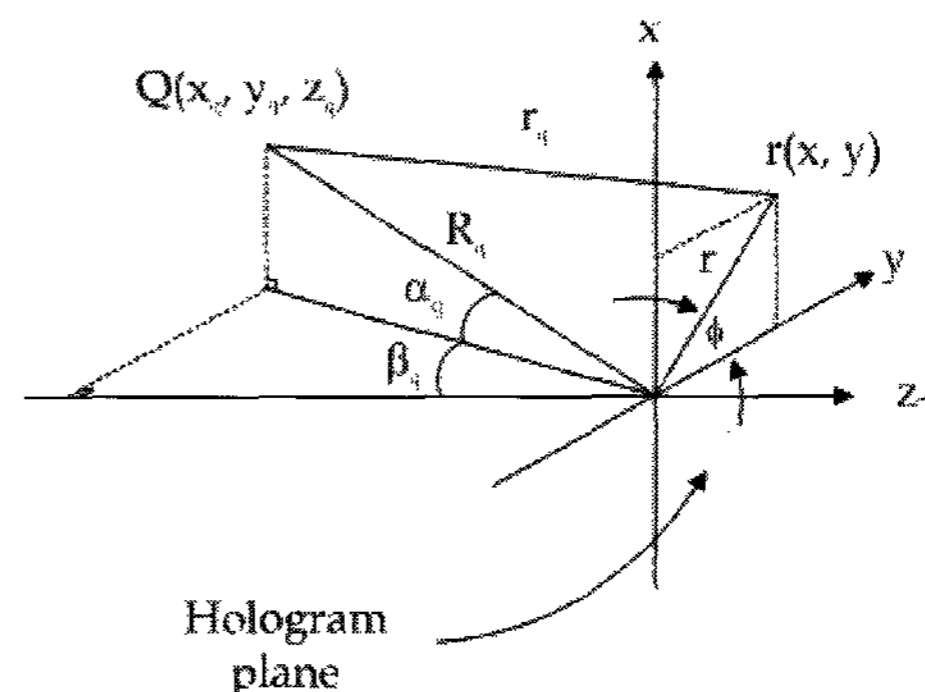
$$\frac{1}{R_I} = \frac{1}{R_C} \pm \mu \left(\frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right) \quad (6)$$

$$\sin \alpha_I = \sin \alpha_C \pm \mu (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R)$$

3차 항의 비교를 통해 구면수차 S , 코마 C , 비점수차 A 의 x 방향의 성분을 구할 수 있다.

홀로그램에서의 색수차는 기록파장과 재생파장의 불일치에서 발생하는데 두 기록광 사이의 각이 커지거나 제작되는 홀로그램의 $F/\#$ 가 증가할 때 또는 기록파장과 재생파장의 차이가 클 때 더욱 증가하게 된다. 이러한 색수차는 파면수차계수의 상쇄를 이용하여 보정할 수 있다.^[8] 파면수차의 균형을 통해 색수차를 보정하는 것은 Gauss 결상식 뿐만 아니라 수차계수들 또한 파장비의 영향을 받기 때문이다.

일반적인 홀로그래픽 광학소자에서 각 수차계수에 의해 발생하는 파면수차의 크기를 살펴보면, 코마의 경우 홀로그램의 중심에 대해 비대칭적인 형태를 보이거나 구면수차와 비점수차는 홀로그램의 중심에 대해 대칭적인 모양을 가짐을 알 수 있다. 그러나 대개의 경우 구면수차의 크기는 비점수차보다 크다. 따라서 코마를 없애는 조건을 찾는 동시에 구면수차를 일으켜 비점수차와 반대방향으로 크기가 같게 한다면 수차계수 간에 서로 상쇄되어 특정 결상점에서 전체



[그림 6] 홀로그램 기록 및 재생광의 위치를 나타내기 위해 사용된 좌표

파면수차의 양 Δr 를 크게 줄일 수 있다. 이것을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Max} |\Delta_s| &= -\text{Max} |\Delta_A| \\ \Delta_c &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

구면수차는 구경 좌표계의 4승에 비례하는 반면 비점수차는 제곱에 비례하기 때문에 수차들을 모두 동시에 제거할 수는 없다. 위의 두 식을 동시에 만족하기 위해서는 홀로그램의 4개의 광 중 하나를 결정하기 위한 나머지 3개의 광을 명시할 수 없다. 대개의 경우 (9)식은 만족되지 않으며 두 개의 기록광과 조명광을 정의한 뒤 마지막으로 재생광을 찾아내게 된다. 그러나 위의 균형조건의 만족되기 위해서는 두 개의 광을 정의하고 다른 두 개는 Gauss 결상식과 균형조건을 만족하도록 찾아 주어야 한다. 조명광과 재생광을 임의로 정의할 수 있다면 두 개의 기록광을 고정하여 나머지 두 개의 광을 결정할 수 있다.

기록광과 재생광을 분리하여 표현하기 위해 새로운 매개변수를 정의한 뒤 이들을 (6)식의 결상식과 (7)식의 색수차 최소화 조건에 대입하여 풀면 R_o 또는 R_R 에 대한 4차 식을 얻을 수 있고 이 식의 해가 파장변화에 따른 색수차를 최소화할 수 있는 기록광의 위치가 된다.

색수차가 최소화된 홀로그램의 파면수차를 통해 실제 파면을 구하고 이에 대한 법선이 상면과 만나는 점을 수치 계산하여 상면에서의 상점 형태를 그릴 수 있으며, 이렇게 얻은 상점의 형태는 격자방정식을 이용한 광선추적 결과와 잘 일치한다.

[그림 7]은 지금까지 논의한 방법으로 제작한 non-conformal 광결합기를 재생한 영상이다. 기록파장과 재생파장을 각각 514.5 nm, 632.8 nm로 하여 제작하였고, 측정된 분광 대역폭은 약 11.4 nm였고, 각도 대역폭은 약 4.1°였다. 결상특성은 재생 중심각 뿐만 아니라 재생각 근처에서도 수차가 크게 감소했으며 자동차용 HUD의 경우 결상의 정확도가 미치는 영향이 적으므로 충분히 사용될 수 있다.



[그림 7] 광결합기로부터 재생된 분해능 시험 표적의 영상

III. 결 론

본 고에서 홀로그래픽 광학소자를 자동차용 HUD에 응용하기 위한 주요 파라미터를 살펴보고 이들 값을 결정하기 위한 관계식을 유도하였다. 또한, 본 고에서 제시된 관계식을 사용하여 계기판의 사용파장 및 파장 대역폭과 일치하도록 중심파장 및 기록각도를 설계할 수 있음을 보였다.

관측자의 눈이 움직이는 범위를 크게 하고 시야를 넓히기 위해서는 넓은 각도 대역폭이 요구되며 높은 투과율을 위해서는 좁은 분광 대역폭이 필요하다. 또한, HUD의 밝기를 높이기 위해서는 디스플레이 광원의 파장과 대역폭 그리고 재생 각도 영역에서 높은 반사 회절효율을 가지면서 나머지 영역에서는 투과율이 높은 광결합기를 제작해야 한다.

앞으로는 HUD의 용도에 보다 적합한 기록매질의 연구 및 상면 전체에서의 수차보정 해석, 그리고 컬러 디스플레이 홀로그래픽 HUD에 대한 연구 등이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Beeck, T. Frost, W. Windeln, "Holographic mirrors laminated into windshields for automotive Head-Up Display and solar protective glazing applications," SPIE Vol. 1570, pp.394-406, 1991.
- [2] D. H. Close, "Holographic Optical Elements," Opt. Eng., Vol. 14, No. 5, 1975.
- [3] H. R. Magarinos, D. J. Coleman, "Holographic mirrors," Opt. Eng., Vol. 24(5), pp.769-780, 1985.
- [4] 정만호, 송재봉, "홀로그래픽 반사형 간섭필터의 제작," 한국광학회지, Vol. 2, No. 4, 1991
- [5] James M. Tedesco, "Holographic laser-protective filters and eyewear," Opt. Eng., Vol. 28, No. 6, 1989.
- [6] H. Kogelnik, "Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings," Bell Syst. Tech. J. 48, 2909-2949, 1969.
- [7] E. B. Champagne, "Nonparaxial Imaging, Magnifications, and Aberration Properties in Holography," J. OSA., Vol. 57(1), pp.51-55, 1967.
- [8] J. N. Latta, "Computer-based analysis of hologram imagery and aberrations I: Hologram types and their nonchromatic aberrations," Appl. Opt., Vol. 10(3), pp.599-608, 1967.