

## 홀로그래피(Holography)란 무엇인가?

김 수 길 <호서대 제어계측공학과 교수>

홀로그래피의 역사는 데니스 게이버(Dennis Gabor)의 1948년 논문으로부터 시작되었다. 그는 전자현미경 상(像)을 개선하는 방법으로, 전자 현미경에 이용되고 있는 전자렌즈를 사용하지 않고, 전자선(電子線)의 파면을 기록하고, 그 다음 전자선보다도 파장이 긴 빛으로 상을 확대하여 재생하는 방법을 생각했다. 당시에는 간섭성이 좋은 코히어런트한 전자선을 얻을 수 없었으므로 수은등을 이용하여 기록과 재생실험을 하였다.

수은등의 빛은 파장폭이 좁기는 하지만 코히어런트한 빛이라고 말하기에는 부족하기 때문에 기록 가능한 피사체에는 한계가 있었다. 이 때문에 투명한 기판에 검은색으로 문자를 적은 간단한 2차원 패턴을 이용하였다. 재생된 상에는 불필요한 재생상(공액상)이 초점에 어긋난 상태로 중첩되어 화질이 좋지 않았다.

레이저가 발명되어 코히어런트한 빛을 사용할 수 있게 되고, 특히 파장이 632.8nm인 가시광의 연속파가 헬륨 네온 레이저로부터 얻어지게 되자, 홀로그래피의 연구는 급속히 진전되었다.

게이버의 실험에서 재생상의 질을 저하시킨 공액상은, 재생위치를 옆으로 비껴놓는 방법으로 중첩되지 않도록 하고, 일반적인 3차원 물체로부터의 파면을 기록하여, 이로부터 다시 3차원 입체상이 재생 가능하게 되었다.

홀로그래피에 의한 3차원 상의 재생기술에 의해 이제까지의 두 눈의 시차를 이용한 입체 사진에 비하면 보는 방향의 자유도가 커지고, 초점 조절도 자연스러운 입체상을 얻을 수 있었다.

홀로그래피 연구가 진전되면서 여러 형식의 기록 재생방법이 개발되어 많은 분야에서 이용하게 되었다. 또 최근에는 간단한 영상의 기록과 디스플레이 뿐만 아니라 파면 간섭에 따른 측정이라든지, 새로운 광학소자로서 이용되고 있다.

### 1. 코히어런트 홀로그래피(Coherent holography)

코히어런트 홀로그래피는 입체상을 기록하고 재생할 때, 코히어런트한 광원인 레이저를 이용한다.

#### 1) 홀로그램(hologram)이란?

한 점 P로부터 퍼지는 구면파와 기준파와의 간섭을 생각해보자. 이때, 구면파를 가로지르는 평면위에서는 중심으로부터 멀어질수록 간격이 조밀해지는 동심원들이 모인 간섭무늬가 만들어 진다. 이 곳에 감광재료를 놓으면, 두 파의 위상차에 따라 동심원들의 반경이 변화하는 프레넬 윌대판(Fresnel zone plate)과 같은 형태의 간섭무늬가 기록된다.

피사체의 다른 점으로부터 나오는 구면파도 비슷

한 윤대판을 만드는 데 이 점들의 위치가 서로 달라 윤대판의 중심도 서로 다르게 되고, 이 점들과 감광재료면까지의 거리가 다르면, 동심원들의 반경들이 변화하는 형태에도 차이가 생긴다.(중심에서 멀수록 간격이 가늘어진다.) 일반적으로, 피사체로부터 나오는 빛의 파면을 다수의 구면파가 모인 것이라고 생각하면, 이것과 평면기준파(또는 구면 기준파)와의 간섭무늬를 기록한 것은 결국 수 많은 윤대판의 중첩이라고 생각할 수 있다.

이와 같이, 간섭무늬를 기록한 것을 "홀로그램(hologram)", 이 기술을 "홀로그래피(holography)"라 하는데, 이것은 파면의 모든 정보를 기록하고 있다는 의미에서, 그리스어로 전부라는 뜻의 "홀로"라는 단어를 써서 명명한 것이다.

홀로그램에는 피사체의 위치, 기준광의 상태 등에 따라 프레넬 홀로그램, 프라운호퍼 홀로그램, 푸리에 변환 홀로그램, 영상홀로그램, 무지개 홀로그램, 컴퓨터 홀로그램 등으로 분류된다.

### 2) 프레넬 홀로그램(Fresnel hologram)

3차원 피사체를 레이저로 조명하고 감광재료를 그 앞에 놓는다. 가장 간단한 조명 방법은, 현미경 대물렌즈처럼 초점거리가 짧은(집광각이 크게 된다) 렌즈로 레이저빔을 집속하여, 이 초점으로부터 발산하는 구면파를 이용한다. 이것은 피사체를 점광원으로 조명하는 것과 같으며, 피사체의 형태에 따라서는 여러개의 조명광을 이용하는 것도 필요하다. 감광재료에는 이 외에 기준광도 입사시켜야 하는 데, 기준광도 레이저 빔을 렌즈로 집광하여 만든 구면파를 이용하면 간단하다. 단, 기준광은 피사체를 반사광과의 간섭무늬가 시간적으로 변화하지 않도록, 피사체 조명광으로 사용되는 레이저 빔을 광분할기로 나누어 사용해야 한다. 또한, 광분할기로부터 감광재료에 도달하기까지의 기준광과 피사체 반사광의 광로는 거의 같을 필요가 있다.

### 3) 프라운호퍼 홀로그램(Fraunhofer hologram)

피사체가 감광재료로부터 충분히 멀고, 평행광에 가까운 기준광을 이용하여 기록한 홀로그램을 "프라

운호퍼 홀로그램"이라 한다. 실제로, 먼 곳에 피사체를 놓기는 곤란하므로 렌즈의 초점면에 2차원 영상을 두고, 후방으로부터 레이저광으로 조명한다. 영상의 각 점으로부터 산란되는 빛은 렌즈에 의해서 평행광이 되므로 무한대에 존재하는 것과 동등하게 된다.

재생상도 무한대에서 그냥 육안으로 직접 관측할 수 있으나, 재생상을 감광재료에 기록할 때에는 렌즈로 결상하지 않으면 안 된다. 이 방법에서는, 피사체의 위치(광축으로부터의 거리)에 관한 정보가 평행광과 광축이 이루는 각도로 변환되어 기록 재생되게 된다. 재생상의 크기는 결상 렌즈의 초점 거리에 비례한다. 홀로그램을 렌즈의 광축에 수직으로 이동시켜도 재생상과 광축이 이루는 각도는 변하지 않으므로 재생상의 위치가 변하지 않는 특징이 있다.

### 4) 푸리에 변환 홀로그램(Fourier transform hologram)

일반적으로, 영상은 여러 방향에서 여러 주기의 정현파들이 중첩 분포된 것이라 생각할 수 있다. 이것은, 시간적으로 변화하는 전기신호나 음향신호를 여러 정현파의 주파수 성분으로 분해할 수 있는 것과 같은데, 수학적으로는 푸리에 변환(Fourier transform)을 계산함으로써 주파수성분의 분포를 구할 수 있다.

광학적으로 영상에 균일한 평행광을 입사시켜, 프라운 호퍼 회절에 의한 회절각에 대한 회절광 진폭 분포를 구하는 것은, 수학적으로 영상의 진폭 투과율의 2차원적인 푸리에 변환을 구하는 것과(비례계수는 별도로 하고) 동등하다는 것은 이론적으로 증명되어 있으며, 광학적 방법으로 이러한 변환을 순간적으로 하는 것이 가능하다. 보통은, 평행광으로 조명된 영상으로부터의 회절광을 그의 초점거리 f만큼 떨어뜨려 푸리에 변환을 관측할 수 있는데, 이 분포를 기준광과 간섭시켜 기록한 것이 푸리에 변환 홀로그램이다.

### 5) 영상 홀로그램(Image hologram)

빛의 파면을 기록한다고 하는 원리상으로 고찰하

면, 감광재료 위에 렌즈로 실상을 만들어, 그것을 피사체로서 기록 재생하는 것이 가능하다. 이 형식의 홀로그래프를 “영상(image) 홀로그래프”이라 한다.

재생광원의 파장이 홀로그래프를 기록한 파장과 다르면 재생상의 위치와 크기가 변하는 것은 프레넬 홀로그래프의 경우와 같다. 단, 이 변화량은 홀로그래프와 재생상의 거리에 비례하므로 영상 홀로그래프의 경우에는 무시할 수 있을 정도로 작다. 이 때문에 여러 파장을 포함한 백색광으로 조명해도 색수차가 없는 백색의 입체상을 관측할 수 있다.

#### 6) 무지개 홀로그래프 (Rainbow hologram)

홀로그래프로부터 파면을 재생할 때에는 빛의 회절현상을 이용하므로 입사광의 파장에 따라 회절각은 반드시 변한다. 영상홀로그래프에서 백색광으로 재생상을 관찰하는 경우에도, 빛의 진행방향을 역으로 추적하여 보면, 기록할 때의 파장에 따라 빛이 결상 렌즈의 다른 곳을 통과한 것을 알 수 있다. 렌즈구경이 크기 때문에 렌즈의 재생상의 위치가 파장에 따라 달라져도 서로 겹쳐지는 부분이 있으므로 회계 보인다.

만약, 렌즈의 수평방향으로 가늘고 긴 슬릿을 렌즈에 겹쳐서 기록하면 재생된 슬릿의 상들은 파장에 따라 상하로 늘어서고, 여기에 흰 종이를 놓으면, 무지개처럼 스펙트럼으로 분해되어 보인다.

여기에 눈을 대고 보면, 눈의 높이에 따라 다른 색의 재생상을 관찰할 수 있다. 이 때, 눈의 동공의 크기가 작으므로 망막으로 입사되는 빛의 파장폭이 제한되어, 파장에 따른 재생상의 크기변화가 적기 때문에 영상홀로그래프처럼 홀로그래프 가까이에서 피사체가 있을 필요는 없다. 보통의 프레넬 홀로그래프에서도 위와 같이 슬릿을 사용하면 색수차가 없는 선명한 상을 볼 수 있다. 또한 슬릿은 수평으로 퍼져 있으므로 두 눈으로 관찰할 수 있어 입체감을 상실하지 않는다.

렌즈를 사용하지 않고 이것을 실현하기 위해서는, 먼저 프레넬 홀로그래프에 수평방향으로 긴 슬릿을 겹쳐놓고, 기록할 때의 기준광과 완전히 반대의 방향으로 진행하는 집광 구면파로 조명한다. 그러면 프

레넬 홀로그래프의 작은 부분으로 부터의 회절광에 의해서 실상이 피사체가 있던 위치에 재생된다. 이 때, 상하방향의 시차, 즉 슬릿에 의하여 가려지는 홀로그래프의 다른 부분에 기록되어 있는 정보는 상실되지만 좌우방향의 시차는 보존된다. 이 실상을 만들고 있는 파면을 제 2의 홀로그래프에 기록하는 데, 이때의 기준광은 같은 레이저로부터의 빛을 집광하여 만든 구면파를 사용한다. 이것이 무지개 홀로그래프이다.

기준광이 집광된 점으로부터 반대방향으로 퍼지는 단색광의 구면파로 무지개 홀로그래프를 조명하면 피사체의 위치에 허상이 재생되고, 흰 종이를 대어보면 분명히 알 수 있지만 다른 장소에 슬릿의 재생상도 만들어진다. 홀로그래프에서 회절된 빛은 전부 이곳을 통과하고 있으므로, 이곳에 눈을 두면 재생상을 전부 관찰할 수 있다. 눈을 앞뒤로 이동하면 재생상의 위나 아래가 보이지 않게 된다. 백색광으로 재생하면 장파장의 빨간색에 의한 슬릿 상은 위쪽에, 파란 빛의 슬릿 상은 아래쪽에 파장순으로 펼쳐진다. 이것이 무지개 홀로그래프이란 이름의 유래인데, 눈의 위치를 상하로 움직이면 다른 색의 재생상이 관찰된다. 또 눈의 위치를 홀로그래프에 가까이 하면 재생상의 아래쪽이 빨갛게, 위쪽이 파랗게 보이고, 멀리하면 이와는 반대로 보인다.

#### 7) 컴퓨터 홀로그래프 (Computer-generated hologram)

이제까지의 홀로그래프는 실제로 존재하는 피사체로부터의 반사광 또는 투과광과 기준광의 간섭 무늬를 기록하여 만들었다. 그러나 피사체가 비교적 단순한 꼴을 하고 있는 경우에는 그 곳으로부터 떨어진 임의의 위치에서의 빛의 진폭과 위상 분포를 회절이론으로부터 계산할 수 있으므로 간섭패턴도 계산할 수 있다.

재생하고자 하는 피사체의 수학적 모델이 결정되면 홀로그래프 평면에 기록될 회절패턴을 계산하여야 한다. 재생될 피사체의 광분포와 홀로그래프 패턴사이의 관계는 홀로그래프 평면으로부터 재생시킬 위치까지의 거리에 의해 결정된다. 즉, 재생될 위치까지의 거리가 무한대인 경우에는 상호 푸리에 변환관계에

있고 유한한 거리면 프레넬 변환관계가 있다. 이렇게 해서 계산된 결과를 플로터나 프린터를 이용하여 그려내고, 그것을 축소촬영하여 홀로그램을 만든다. 가상의 피사체로부터의 화면을 재생할 수 있으므로 영상처리기술에 많이 이용된다.

지금까지의 홀로그램은 2차원적인 투과율분포와 굴절률 분포 혹은 약간의 요철이 있는, 말하자면 얇은 홀로그램(thin hologram)만을 생각해 왔다. 그런데, 홀로그램을 기록하는 감광재료를 두껍게 하면 여러 층의 간섭무늬를 기록하는 것이 가능하며, 빛을 회절시키는 층이 규칙적으로 배열된 경우의 회절 현상을 이용할 수 있다. 이와 같은 두께의 효과를 이용한 홀로그램을 “두꺼운 홀로그램(thick hologram)”이라 한다. 두꺼운 홀로그램은 백색광으로 재생하여도(감광재료 처리시 두께가 변하지 않으면) 기록에 쓰인 파장의 빛 밖에 반사하지 않으며, 또 공액상도 생기지 않는다. 최근에는 화학적 처리과정을 거치지 않고 간섭패턴을 기록하였다가 기준광을 이용하여 상을 재생할 수 있는 체적홀로그램(volume hologram)이 홀로그램 메모리용으로 널리 이용되고 있다. 이 것은 광의 세기를 굴절률의 변화로서 기록할 수 있는 광굴절매질(Photorefractive material)이 개발됨으로써 널리 이용되고 있는데, 이것도 두꺼운 홀로그램과 마찬가지로 기록에 사용한 파장만을 강하게 회절시키므로 상의 재생시에는 항상 기록 파장과 동일한 파장을 이용하여 상을 재생하며, 다른 파장을 이용하여 상을 재생하면 상이 재생되지 않는 특성을 가지고 있다.

최근에는, 기존의 CD와는 개념이 전혀 다른 새로운 방법으로 고속으로 Tbyte 이상의 막대한 데이터를 저장·처리할 수 있는 체적 홀로그램(volume hologram) 3차원 광메모리 방식에 대한 상용화 연구가 최근 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 각설탕만한 크기의 비선형 광굴절결정매질(photorefractive materials)을 이용한 데이터의 체적 홀로그램 저장 방식은 기존 2차원 메모리 개념이 아닌 3차원 입체 메모리 저장으로 그림 1과 같이 그 정보저장 용량은 21세기 고도정보화 사회에서 요구되고 있는 극초대용량(Tbyte 이상)의 데이터 저장

용량과 저장된 정보를 초고속( $\mu$ sec) 병렬 액세스 할 수 있는 장점을 동시에 제공할 수 있는 유일한 차세대 데이터 저장 시스템으로 분석되고 있다.

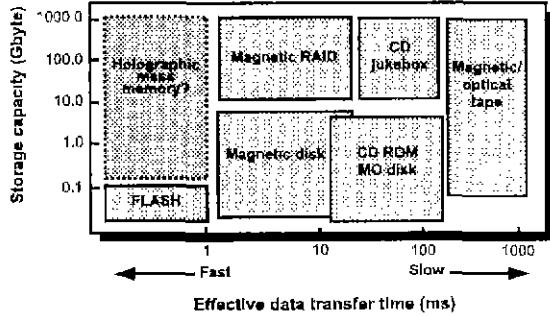


그림 1. 정보저장 시스템의 성능분석

이 아이디어는 1963년 Polaroid사의 Van Heerden에 의해 처음으로 제안되어 많은 결과가 나왔으나 지난 30여년동안 광소자를 비롯한 광정보처리 기술이 반도체 메모리 기술 및 광자기 메모리 기술에 비해 상대적으로 발전되지 않아 실질적인 응용 연구로 연결되지 못하였다. 그러나, 최근 효과적인 홀로그램 기록 매질의 개발과 소형 반도체 레이저, LCD 공간 광 변조기, CCD 광 검출기 기술등과 같은 관련 광전자 소자의 발전, 그리고 멀티미디어 정보통신, 주문형 비디오, 네트워크 컴퓨팅, 개인 휴대통신, 대용량 동화상 기록 미디어, 대용량 컴퓨터 서버, 첨단 군정보 체계, 뉴럴 컴퓨팅, 초대형 디지털 데이터베이스, 광 컴퓨터, 3차원 입체 및 실감 통신 등 볼륨 홀로그래픽 광메모리의 장점을 최대로 이용할 수 있는 새로운 응용 분야의 등장에 따라 차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

## 2. 인코히어런트 홀로그래피(Incoherent holography)

70, 80년대에 걸쳐 홀로그래피에 대한 연구가 활발히 진행되었지만 홀로그래피를 3차원 입체상의 디스플레이를 위한 목적으로 사용하고자 할 때 여러 가지 문제점이 나타나면서 그 응용이 제한되었다.

특히, 기존의 홀로그래피는 레이저광을 이용하여 홀로그램을 만들기 때문에 우리가 일상적으로 보는 야외풍경이나 실내의 방과 같이 부피가 큰 장면은 레이저광의 간섭길이의 한계 때문에 홀로그램의 구성이 불가능하다.

따라서, 기존의 레이저를 이용한 코히어런트 홀로그래피가 가지고 있는 문제점을 해결하고자 자연광을 이용하여 홀로그램을 구성하는 기술이 나왔으며, 이를 인코히어런트 홀로그래피라고 한다. 기본적인 원리는 물체가 점들의 집합이라고 생각할 때, 홀로그램을 만드는 각 점 광원의 위치와 빛의 세기에 관한 정보를 가지는 2차원의 간섭패턴들의 중첩을 이용하여 홀로그램을 구성한다. 이것은 앞에서 언급한 레이저를 이용한 홀로그램의 구성원리와 비슷하나 코히어런트 홀로그램의 경우에는 각 점광원간에도 간섭현상이 발생하나, 인코히어런트 홀로그램의 경우에는 각 점광원간에도 간섭현상이 발생하지 않는다.

인코히어런트 홀로그램이 만들어진 다음에는 일반

적인 자연광이나 레이저광을 이용하여 3차원 입체상을 재생할 수 있다.

홀로그래피 기술은 현재 여러 분야에서 이용되고 있지만, 미래에 이용될 가장 유력한 분야는 3차원 입체영상을 기록하였다가 재생하여 인간으로 하여금 3차원의 입체 동영상을 즐길 수 있는 분야, 즉 3차원 TV, 3차원 영화, 3차원 비디오, 3차원 입체화상 회의, 3차원 영상의료진단 등에 가장 적합한 기술이 될 것으로 예측되고 있다.

#### ◇ 著 者 紹 介 ◇



김 수 길(金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~1997년 서울대 공학연구소 특별연구원. 현재 호서대 공대 전기전자제어공학부 제어계측전공 전임강사.