

레이저 계측

조 두 진*

(*아주대학교 자연대학 물리학과 조교수)

1. 서 론

1960년에 마이먼(T.H.Maiman)이 루비레이저를 실현한 이래, 레이저는 엄청난 발전을 거듭해오고 있으며, 매우 폭넓은 과학기술분야에 기여해 왔다. 빛의 여러가지 성질을 이용하여 길이, 각도, 속도, 변형, 진동 등을 측정하는 광계측 분야[1, 2] 역시, 레이저의 출현 및 발전으로 말미암아 측정의 정밀도, 범위 및 단순성에 있어서 큰 영향을 받아왔고 또한 수 많은 새로운 방법들이 개발되었다[2~4]. 이러한 발전의 결과로 이룩된 레이저 계측에서는 레이저의 특성들, 즉 직진성, 단색성, 간섭성, 출력크기, 펄스의 길이 등을 유용하게 사용하는데 편광성, 파장가변성, 변조성 등도 중요한 역할을 한다.

각종산업 현장에서 측량이나 정렬하는 데에는 주로 레이저의 직진성을 이용한다. 레이저빛의 발산각은 광선의 굵기에 역비례하므로, 예를 들어 헬륨 네온레이저의 광선굵기를 5cm 정도로 하면, 100m 진행했을때 2mm 미만의 굵기의 증가가 있게 되는데, 이러한 직진성과 4분할 광검출기를 사용하면 재래식 방법으로는 상상하기 어려운 정밀도를 얻을 수 있다. 길이 및 거리측정에 있어서 수십 m까지는 마이켈슨 간섭계를 이용한 간섭적 방법, 그 이상의 거리에 대해서는 빔(beam) 변조법이나 반사 펄스법이 사용되는데, 가장 유명한 예는 지구와 달사이의 거리측정으로써 1969년 아폴로 11호가 달표면에 역반사경을 두고오에 따라 10ns의 Q-스위치 루비

레이저를 사용하여 $\pm 15\text{cm}$ 의 놀라운 정밀도를 얻은 바 있다. 비접촉적인 방법으로 두께나 외경을 측정하는 데에는 레이저빛의 회절현상을 주로 이용하며, 상당히 큰 물체의 경우에는 레이저빛을 주사(scan)하는 방법을 사용하는데, 예를 들면 수십 mm 직경의 뜨거운 금속봉의 직경을 수십 μm 의 정밀도로 측정가능하다.

레이저를 이용한 속도측정에 있어서는 LDP(레이저 도플러 속도측정법)와 스펙클(speckle)을 이용하는 방법을 들수 있는데, LDP에서는 광원으로 부터 상대적인 운동을 하는 물체로 부터 반사되는 빛의 주파수가 물체의 속도에 비례하여 달라진다는 도플러 효과를 이용한다. LDP는 내연기관, 화염, 바람굴(wind tunnel), 혈액순환, 터빈 날개 등의 속도측정에 사용되는데, 측정가능한 속도도 1초에 수 μm 에서 수 km까지 아주 넓은 범위를 가진다. 표면이 거친 경우에서는 스펙클을 이용하는 방법이 주로 사용되는데, 스펙클이란 레이저와 같이 간섭성이 큰 빛이 거친 표면의 여러부분에서 반사되어 무작위적인 위상차를 갖게 되므로서 서로 간섭했을 때 생기는 얼룩덜룩한 불규칙한 간섭무늬를 의미한다. 이러한 스펙클은 표면의 속도에 비례하여 이동하므로, 스펙클의 이동속도를 측정하므로써 물체의 속도를 측정할 수 있는데, 공장같은 곳에서 알루미늄, 철, 구리선, 신문용지, 플라스틱, 모래 등과 같은 다양한 물질의 속도를 연속적으로 측정하는데 사용되고 있다.

이상에서 간략하게 살펴본 레이저 계측법들 외에도, 레이저 자이로(laser gyro), 다양한 간섭적 방법들, 레이저를 이용한 표면의 형태와 변위측정 및 표면상태측정법, 모와레(moiré)무늬방법, 광탄성(photoelasticity)방법, 광섬유센서와 집적광학센서를 이용한 다양한 측정방법들, 타원분석법(ellipsometry) 등의 매우 다양한 방법들이 사용되고 있는데[2~4], 본 고에서는 산업기술분야에서 물체의 미소진동이나 변형 등을 측정하는데 많이 사용되는 HI(Holographic Interferometry, 홀로그래픽 간섭법)와 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry, 전자스펙클무늬 간섭법)에 대해 논하고자 한다[2~5]. 이들은 거친 표면을 갖는 물체에 대해 간섭적 방법들로부터 얻을 수 있는 높은 정밀도로 측정할 수 있고, 물체의 전체를 단번에 비접촉적으로 측정할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

2. HI(홀로그래픽 간섭법)

홀로그래피란 물체에서 나오는 빛의 세기 뿐만 아니라 위상도 기록하므로써 완벽한 3차원 영상을 재생할 수 있는 방법으로서 게이보(D. Gabor)가 레이저의 출현전인 1948년에 창안했는데, 레이저의 발전으로 말미암아 크게 발전하였다.

그림 1에 홀로그래피 실험장치를 개략적으로 보였는데, 레이저빛이 광분할기 BS에 의해 나누어져 한쪽 광선은 거울 M2와 렌즈 L2를 지나서 물체를

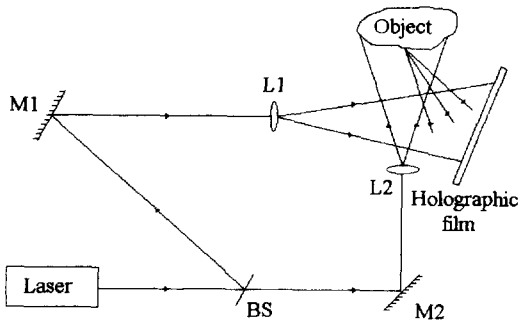


그림 1. 홀로그래피 실험장치 개략도, 레이저 빛이 광분할기 BS에 의해 나누어진 다음 홀로그래픽 필름면에서 합쳐져서 간섭무늬를 형성한다.

비추다음 반사되어 홀로그래픽 필름면에 도달하고 다른 한쪽 광선은 거울 M1과 렌즈L1을 지나 기준파로서 필름면에 오게된다. 이들은 필름면에서 서로 간섭하여 그 간섭무늬가 필름에 기록되는데 이를 홀로그램이라 한다. 이제 현상 및 정착과정을 거친 홀로그램을 원래 위치에 놓고 기준파만을 비추어 주면 그로부터 나오는 빛의 일부가 원래 물체로부터 반사되어 나왔던 빛과 동일한 세기와 위상을 갖게 되는 완벽한 3차원 영상을 재생하게 되므로, 홀로그램은 물체에 대한 완전한 정보를 수록하고 있는 셈이다. 간섭무늬는 미소한 진동에 민감하므로 그 요동이 극소화 되도록 실험장치를 안정하게 해 주어야 한다.

가장 기본적인 HI는 실시간(real-time) HI로서 온도, 압력 등의 변화에 의해 물체가 시간적인 여유를 가지고 미소변형하는 경우에 많이 사용된다. 우선 그림 1과 같은 실험장치를 사용하여 홀로그램을 제작한 다음 홀로그램을 원래위치에 정확히 갖다 놓는다. 그 다음에 물체를 변형시키며 홀로그램을 기록할 때와 동일하게 레이저빛을 비추게 되면, 홀로그램으로부터 재생되어 나오는 원래 물체의 빛과 변형된 물체로부터 반사된 빛이 간섭하여 원래 물체의 영상위에 변형정도가 간섭무늬로 겹쳐져서 나타나므로 변형정도를 실시간적으로 측정할 수 있다. 그림 2는 전원이 공급될 때의 온도상승으로 말미암아 야기되는 전자회로의 미소변형을 이와 같은 방법으로 보인 것인데, 각각의 간섭무늬곡선은 동일한 변형정도를 나타내며 이웃하는 두 간섭무늬곡선은 약 $0.25\mu\text{m}$ 의 높이차를 나타낸다. 실시

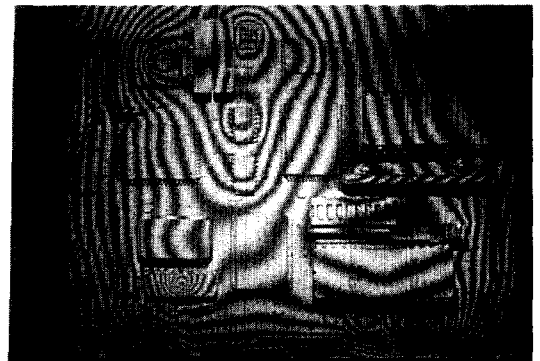


그림 2. 실시간 HI를 이용한 전자회로의 열적변형 측정

간 HI에서 홀로그래프를 원래위치에 정확히 갖다 놓는 번거로움을 피하기 위하여 필름을 옮기지 않고 그 자리에서(in situ) 현상처리하거나 홀로그래픽 필름 대신 thermoplastic 기록매질을 사용하기도 한다. 한편 진동하는 물체의 경우와 같이 동적인(dynamic) 변형을 하는 경우에는 다른 방법들이 사용되는데 두가지 대표적인 것은 다음과 같다.

2.1 이중노출(double - exposure) HI

그림 1과 같은 실험장치를 사용하여 물체의 변형 전에 홀로그래프를 한번 기록하고, 같은 필름에 물체가 변형된 후의 홀로그래프를 다시 한번 기록하여 현상처리한 다음 기준파를 비추게 되면 변형전과 후의 물체로부터 오는 빛들이 재생되어 간섭하게 되므로 위에서 설명한 것과 같이 원래 물체의 영상에 간섭무늬가 겹쳐져서 나타나게 된다. 이때 홀로그래프를 실시간 HI에서와 같이 정확한 원래위치에 갖다 놓을 필요는 없다. 또한 쌍펄스(dual pulsed) 루비레이저와 같은 짧은 펄스레이저를 사용하게 되면, 실험장치의 안정성을 크게 고려할 필요 없이 짧은 시간 간격을 두고 일어나는 변형을 측정할 수 있다. 이 경우에는 홀로그래프를 재생할 때에 기준파로서 헬륨네온레이저와 같은 연속파(cw)레이저를 사용하게 된다. 또한 이 방법은 짧은 시간간격에 대해 측정이 가능하므로 상대적으로 넓은 범위의 변형에도 적용이 가능하다.

2.2 시간평균(time - averaged) HI

주기적인 진동을 하는 물체의 경우에는 진동주기보다 긴시간 동안 필름을 계속 노출시켜 물체를 재

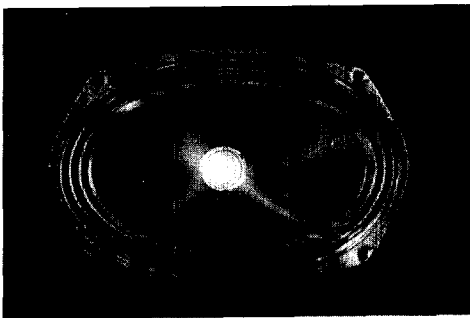


그림 3. 시간평균 HI 를 이용한 스피커의 진동모우드 무늬 측정

생하게 되면 원래 물체에 동일한 진폭을 갖는 곡선이 간섭무늬로 겹쳐져서 나타나게 되고 가장 밝은 부분은 진동을 하지 않는 노우드(node)를 나타내게 된다. 그림 3에는 스피커의 진동을 이 방법으로 촬영한 것을 보였는데, 진동모우드 무늬를 볼 수 있다.

HI에서 물체에 겹쳐서 나타나는 간섭무늬와 변형의 방향 및 크기와와 상관관계는 물체와 홀로그래프의 위치 및 조명 그리고 관찰방향에 따라 달라진다. 또한 경우에 따라서는 간섭무늬가 물체와 분리되어 형성되는 간섭무늬국소화(fringe localization)현상이 일어나므로 간섭무늬를 해석하는 것이 상당히 복잡한 문제이다. 한편 적용가능한 변형정도는 간섭무늬간격과 거친 표면에서 레이저빛이 반사했을때 생기는 스펙클의 크기에 의해 결정된다. 즉, 간섭무늬간격이 스펙클크기와 비슷하게 되면 간섭무늬가 불분명하게 되므로, 일반적으로 간섭무늬간격에 역비례하는 변형의 크기에 한계가 주어지는 것이다. HI는 변형이나 진동의 정성적인 측정에 주로 사용되지만, 헤테로다인(heterodyne) 기법이나 위상이동(phase - shift) 기법을 사용하면 정량적인 측정이 가능하며 이론적으로는 수 nm이하의 높은 정밀도를 얻을 수 있다.

2.3 응용분야

HI는 물체의 미소한 변형이나 진동을 비접촉적으로 측정할 수 있으므로 산업기술개발, 상품디자인, 비파괴검사, 품질관리 등에 폭넓게 응용되는데 수 m정도의 큰 물체에도 사용되어 진다.

① 진동의 가시화: 그림 3에서 보인 바와 같이 스피커, 터어빈 날개, 자동차의 엔진과 주요부품들, 자동차 몸체, 변압기 등의 진동모우드, 진동수 및 진폭을 측정할 수 있으며, 여러 장비에 부착할 진동 센서와 볼트 등의 적절한 위치를 찾는데 사용되기도 한다.

② 취약부위 및 결함의 가시화: 대상물체에 기계적, 압력적, 열적, 진동적, 충격적 부하를 가하여 미소변형을 측정한다. 예를 들면 기계적 변형에 의해 용접부위의 결함등을 찾아낼 수 있고, 압력적 변형에 의해 연료탱크, 식품보관용기, 다양한 진공관들, 밸브, 타이어 등의 취약부위 또는 결함, 전지의 누출, 파이프의 부식 및 침식 등을 찾아낼 수 있다.

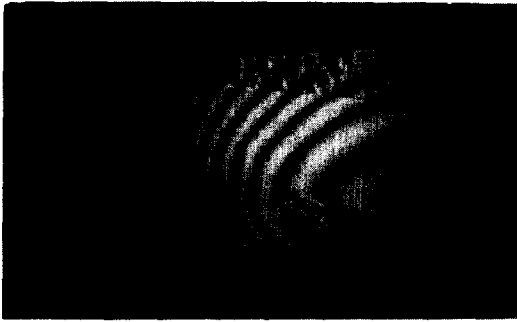


그림 4. HI를 이용한 열적변형에 의한 헬리콥터 날개의 취약부위 검사

열적 변형에 의해서는 컴퓨터 하드디스크 몸체와 같은 정밀주물, 그림 4에 보인 바와 같은 헬리콥터 날개, 항공기 복합부품들, 표면 코팅. 그림 2에서 보인바와 같은 전자회로, 접시 안테나, 레이저 몸체, 자이로 스코우프, 클러치판과 같은 접촉물들, 총판부품, 벌집구조물, 핵연료봉 등을 검사하는데 사용된다.

③ 유체의 밀도 등에 민감하므로 유체흐름의 가시화, 플라즈마 진단 등에 사용된다.

④ 생물학적 시료, 결정, 폴리머, 오염물질 등과 같이 미소한 증식을 하는 대상에 대한 측정에 사용된다.

⑤ 물체의 자세한 표면 윤곽 측정(contouring)에 적합하다.

이상에서 열거한 예들 이외에도 수많은 가능성이 있는데, 생산현장에서와 같이 신속한 측정이 중요한 관건일 경우에는 다음 절에서 논의할 ESPI와 같은 방법을 주로 사용한다.

3. ESPI(전자스펙클무늬 간섭법)

ESPI는 거친 표면을 갖는 물체의 미소변형이나 진동에 대해 HI와 거의 동등한 정보를 제공하여 주는데, HI의 단점들, 예를 들면 상당한 시간 및 작업을 요하는 홀로그래프의 기록 및 현상처리 과정을 보완하는 방법으로 1970년대 초에 개발되었다.

그림 5에 전형적인 ESPI 실험장치의 개략도를 보였는데, 레이저빛이 광분할기 BS1에 의해 분할되어 한쪽 빛은 공간여과기 SF1과 거울 M1을 거쳐 물체를 비추는 다음 물체의 영상이 렌즈 L 및 부

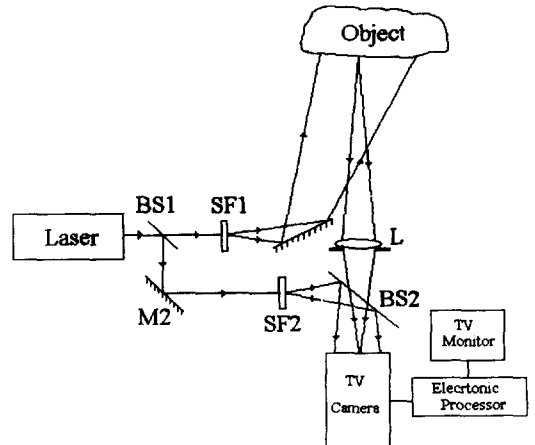


그림 5. ESPI 시스템 개략도, 대상물체에서 오는 빛과 기준파가 간섭하여 생성된 스펙클무늬가 TV 카메라에 기록된다.

분반사거울 BS2를 통하여 TV 카메라에 도달하고 다른쪽 빛은 거울 M2와 공간여과기 SF2 그리고 부분반사거울 BS2를 거쳐 기준파로서 TV 카메라에 도달한다. 이 두 빛이 간섭하므로써 생성된 스펙클무늬를 가진 물체의 영상이 TV 카메라에 기록된다. 이때 스펙클의 크기는 렌즈 L의 조리개에 의해 조절되는데 TV 카메라 해상도보다 커야 한다. 그림 5의 광학장치는 그림 1의 HI 장치와 기본적으로 같은데, 물체로부터 반사되어 오는 빛과 기준파가 이루는 각도가 작기 때문에 높은 해상력을 가진 기록매질을 요하지 않으므로 TV 카메라를 사용하여 스펙클무늬를 기록하므로써 충분한 정보를 얻을 수 있다는 차이가 있다.

물체의 변형이나 진동을 나타내는 간섭무늬는 이와 같이 기록한 변형전과 후의 스펙클무늬를 가진 물체의 영상들의 비디오신호의 합(合) 또는 차(差)에 의해 얻어진다. 먼저 차에 의한 경우에는 우선 TV 카메라에 기록된 하나의 영상을 전자적으로 저장한 다음 변형된 물체의 스펙클영상을 TV 카메라에서 얻는대로 저장된 영상으로 부터 빼고 그 출력을 고역통과필터와 정류회로를 거쳐서 TV 모니터에 나타내게 된다. 합의 경우도 비슷한데, 일반적으로 TV 카메라가 반응지속시간을 가지므로 영상을 저장할 필요없이 TV 카메라에서 자동적으로 합하게 된다. 따라서 저장장치가 필요없으므로 비교적

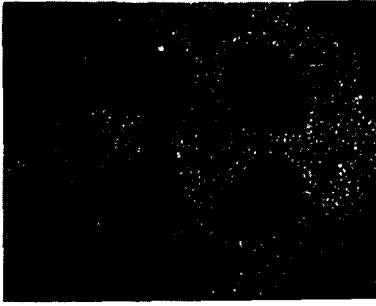


그림 6. 5300Hz로 진동하는 바퀴의 시간평균 ESPI 영상

단순하게 되지만 간섭무늬의 명확도가 떨어지는 단점이 있다. 이와 같이 간섭무늬를 얻어내는 방법을 실시간 ESPI라 하고, 이 외에도 HI에서와 같이 이중노출 ESPI, 시간평균 ESPI가 있으며, 각 간섭무늬곡선이 동일한 변형을 나타내고 간섭무늬간격이 스펙클크기보다 커야 한다는 점에서 ESPI는 HI와 매우 유사하다. 그러나 ESPI에서 물체의 변형을 나타내는 간섭무늬를 얻어내는 원리는 HI의 경우와 근본적으로 다르다. 즉, HI에서는 변형전과 후의 물체로부터 오는 빛이 물리적인 간섭을 하지만, ESPI에서는 변형전과 후의 물체로부터 생성된 스펙클무늬의 상관관계(합 또는 차)로부터 간섭무늬가 얻어지는 것이다.

그림 6에는 시간평균 ESPI를 이용하여 5300Hz로 진동하는 바퀴의 진동모우드를 측정하는 영상을 보였는데 스펙클무늬로 인하여 HI에 비하여 영상의 질이 훨씬 떨어진다.

그러나 ESPI는 HI와 거의 동등한 진동정보를 제공하며, 2.3절에서 열거한 대부분의 응용분야에 적용가능하다. 그림 7에 열적변형된 얇은 금속막의 ESPI 영상이 있으며, 그림 8은 벌집구조물을 ESPI로 검사한 것인데 간섭무늬가 모여있는 부분이 접착분리에 따른 결함을 나타낸다.

그림 2, 3, 4와 6, 7, 8을 비교하여 알 수 있는 바와 같이 EPSI는 HI에 비하여 영상의 질은 훨씬 떨어지지만, 복잡한 사진처리 과정이 필요없으므로 재래식 HI에 비하여 수천배 빠르게(1초에 30번) 간섭무늬를 TV모니터로 관찰할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 HI에서와 같이 해상력이 높은 기록매질이 필요없고, 실험장치 주변을 어둡게

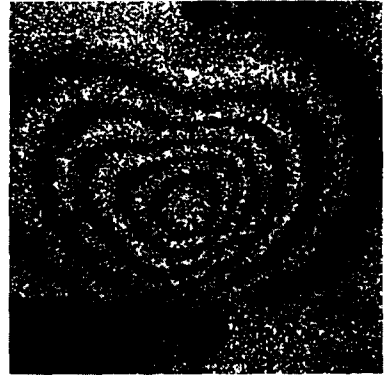


그림 7. 열적변형된 얇은 금속막의 ESPI 영상

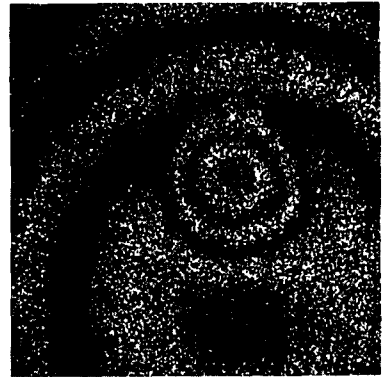


그림 8. 벌집구조물의 접착분리로 말미암은 결함을 보여주는 EPSI 영상

할 필요없이 실내등 아래에서 측정할 수 있으며 실험장비의 진동에 의한 문제가 완화되고, 측정가능한 변형범위가 상당히 크다는 장점을 가지고 있다. 그리고 정교한 영상처리기술을 손쉽게 적용할 수 있는데, 예를 들면 저역통과필터를 사용하여 ESPI 영상의 스펙클을 감소시키고 따로 기록한 물체의 백색광영상과 전자적으로 중첩시키므로써 영상의 질을 개선할 수 있다. 따라서 HI에 비하여 보다 융통성이 있고 많은 검사를 저렴하게 수행할 수 있으므로 생산현장에서의 즉석 검사에 적합하다.

4. 맺 음 말

레이저 계측의 광범위한 분야에서 홀로그래픽 간섭법과 전자스펙클무늬 간섭법을 중점적으로 살펴

보았다. 이 방법들은 거친 표면을 갖는 다양한 물체에 대해 간접적 방법에서 가능한 정밀도로 측정할 수 있으므로 매우 폭넓은 응용 가능성을 가지고 있고 지금도 새로운 아이디어들이 제시되고 있다. 특히 ESPI는 CCD카메라의 발전과 영상처리기술의 발전에 따라 비파괴검사 분야에서 중심적인 역할을 할 것으로 전망된다. 그러나 국내에서는 이제까지 이러한 첨단측정법들이 산업기술분야에서 별로 활용되지 못하고 있는 실정으로, 가까운 장래에 큰 역할을 할 것으로 기대해 본다. 그림 2, 3, 4, 6, 7, 8은 Newport Corporation으로 부터 제공받았는데 이에 도움을 주신 OMA의 이진호 사장님과 우양교역의 박종호 사장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. E. Torberg, W. J. Rowan, and J. R. Vyce, "Optical Instruments for Metrology," in *Handbook of optics*, W. G. Driscoll and W. Vaughan, eds. (McGraw-Hill, N. Y., 1978). pp. 16-1~16-68.
- [2] R. S. Sirohi and M. P. Kothiyal, *Optical Components, Systems, and Measurement Tec-*

hniques (Marcel Dekker, N. Y., 1991)

- [3] E. Wagner, R. Dändliker, and K. Spenner, eds., *Optical sensors* (VCH, Weinheim, 1991).
- [4] A. D. Gara, ed., *Optical Sensing and Measurement* (Springer, Berlin, 1989).
- [5] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, 2nd ed. (Cambridge, N. Y., 1989).



조두진(曹斗辰)

1956년 11월 22일생. 1978년 서울대 자연대학 물리학과 졸업. 1980년 한국과학원 물리학과 졸업(석사). 1989년 미국 Univ. of Rochester 졸업(이박). 현재 아주대 자연대학 물리학과 조교수.