

◆특집◆ 정밀공학에서의 광계측 기술

스펙클 패턴 간섭계의 원리 및 응용

강영준*

Principles and Applications of Speckle Pattern Interferometry

Young-June Kang*

Key Words : Speckle Pattern(스펙클 패턴), Laser(레이저), ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry, 전자 스펙클 패턴 간섭계), 상관간섭(Correlation Interference)

1. 서론

간섭성 광원인 레이저를 이용한 계측 및 검사기법 중 대표적인 것이 홀로그래피를 이용한 간섭법(Holographic Interferometry, HI)이다. HI는 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 물체변형에 대해 측정 감도가 좋고 비파괴 비접촉의 계측이 가능하다. 또한 삼차원 정보 추출이 가능해서 주어진 간섭무늬로부터 전 영역의 변형을 구할 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다. 그러나 일반적으로 홀로그래피용 필름은 기록 및 현상방법이 성가시고 그 속도 또한 느릴뿐만 아니라 간섭무늬 패턴도 매우 복잡해서 산업현장등 실제의 응용에는 현실적인 어려움이 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해 나타난 것이 전자 스펙클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)이다. ESPI는 기록 및 재생처리 과정이 간단하고 그 속도가 빠를 뿐만 아니라 HI에 비해 간섭무늬의 해석이 간단해서 정량적인 실시간

계측이 가능하다는 커다란 장점을 갖고 있다.

그래서 이 ESPI를 현장에 응용하기 위한 상용화가 1970년대 후반부터 이루어지고 있는데 그 당시에는 별 성과를 거두지 못했다. 주로 산업에서 새 기술을 기피하는 불신 탓도 있었지만 부피가 크고 무거울 뿐만 아니라 조작하기도 힘들다는 단점 때문이었다. 그러나 광학부품의 간결화 및 컴퓨터와 영상처리기술의 급격한 발달과 보급으로 인하여 현재에는 가장 각광받고 있는 계측기술이 되었다. 실제로 이 분야의 기술자 중에는 광학부분은 이미 완전하다고 생각하는 사람이 많다. 이러한 ESPI 장치 및 기술은 국내의 산업특성에 적합하고 특히 산업에 그 적용가치 및 잠재력이 많은 유용한 분야이다. 그러나 응용분야가 산업 및 의학 등 다양하고 현장성이 풍부함은 물론 국내의 연구개발 특성에 적합함에도 불구하고 국내에는 아직 이 기술에 대한 연구가 활발하지 못한 실정이다.

2. 원리

2.1 ESPI의 원리

ESPI는 레이저에 의해서 발생된 스펙클을 정보전달자로 이용하는 방법이라고 할 수 있다. 레이저 빛이 거친 표면에서 반사되거나 굴절률이 일정하지 않은 매질을 통과할 때 고운 입자 형태의 밝

* 전북대학교 기계공학부, 메카트로닉스연구센터

Tel. 0652-270-2453, Fax. 0652-270-2460

Email yjkang@moak.chonbuk.ac.kr

광계측을 전공하였으며, 홀로그래피, 전자스펙클 간섭법, 무아래를 이용하여 진동모드, 내부크랙, 변형량등을 측정하고 비파괴 레이저 기술의 산업에의 응용에 관심을 가지고 있다.

고 어두운 점이 고르게 무질서한 분포를 이루는 것을 볼 수 있다. 이것을 스페클 패턴(Speckle Pattern)이라 한다.⁽¹⁾(Fig. 1)

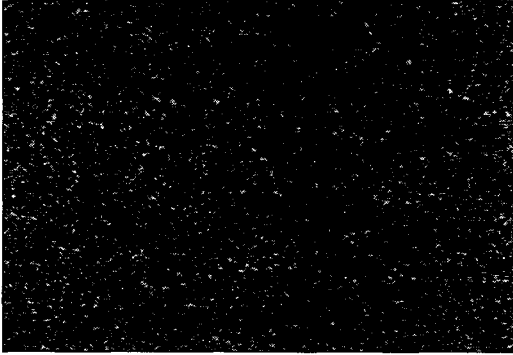


Fig.1 스페클 패턴

이 스페클 패턴은 관찰자의 움직임과 조리개의 구경에 의하여 영향을 받게 되는데, 관찰자가 움직이면 물체의 표면에서 관찰자를 따라 상대적으로 움직이며 눈을 가늘게 뜨면 스페클이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 스페클 현상은 레이저 광원과 같은 간섭성이 높은 빛의 고유성질로서 미시적인 관점에서 표면의 고저변이가 제멋대로 이고, 거친 표면에서 산란된 빛의 간섭에 의한 것으로 홀로그래피와 ESPI같은 파동광학 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 그 특성에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다. 여기서 '거칠다'는 것은 미시적인 관점에서 표면의 고저변이가 제멋대로 이고, 레이저의 파장보다 클 때를 의미하며, 간유리와 같은 산란 물체를 통과할 때도 생긴다.

그러나 이 스페클 패턴은 종래에는 잡 신호등의 부정적인 요소로 생각되었다. 그러던 중 1968년에 Groh⁽²⁾가 Cambridge대학에서 열린 '홀로그래피의 공학적 이용'이라는 논제의 1차 학술 토론회에서 비파괴 검사분야에 지금은 스페클 사진기법(Speckle Photography, SP)이라는 스페클 기법을 이용한 연구 논문을 발표하면서부터 스페클이 정보 전달자라는 사실을 인식하게 되었다. 비슷한 시기에 Loughborough 대학에서는 '홀로그래피 과정의 간단화'가 연구되고 있었는데, 간섭무늬의 위치 결정에서 스페클 패턴이 큰 난점으로 작용했다. 이 때 Loughborough 대학의 교환 연구원으로 있던 Leendertz⁽³⁾가 스페클이 간섭의 결과라는데 착안, 즉

스페클을 물체면으로부터 산란된 빛의 위상에 대한 정보전달자로 생각해서 이로부터 정보를 얻어내는 연구를 시작하였다. 그 후 스페클을 이용한 간섭법의 응용성을 확대시키기 위해 TV와 홀로그래피 기술과의 연계를 이용하여 실시간 계측의 영역이 열리게 되었는데,⁽⁴⁾ 이것을 TV 홀로그래피(TV Holography) 또는 TV 스페클 간섭법(TV Speckle Interferometry)이나 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)라고 한다. 이 여러 이름들은 이 방법에 접근하는 시각의 차이라고 할 수 있는데 편의상 일반적으로 ESPI라 부른다. 또한 TV 카메라를 이용하는 아날로그적 ESPI에 반해, 현재에는 디지털 데이터 처리를 위해 컴퓨터에 CCD카메라 등을 사용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이를 특히 디지털 스페클 패턴 간섭법(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)이라고 하는데, 일반적으로 특별한 구분없이 통상 ESPI라고 한다.

변형측정을 위해서는 물체의 두 상태에 대응되는 두 frame을 디지털 영상으로 저장하여 두 frame 데이터를 빼거나 더해서 간섭무늬가 얻어지는데 빼기나 더하기가 컴퓨터 프로그램에 의해 기억장치에서 이루어지므로 정확하고 빠르다. 이런 컴퓨터 처리는 아날로그 처리에 비해 디지털화된 신호를 다루는 것이 쉽고 편리하며 유연하다는 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 디지털 영상처리 기술과 접목이 쉽게 되어 해석의 자동화에 쉽게 접근할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 DSPI가 모든 데이터를 디지털화하여 레이저 계측의 용이한 자동화의 기반을 마련했다고 할 수 있다.

2.2 스페클 상관간섭

ESPI는 스페클 상관간섭(Speckle Pattern Correlation Interference)⁽⁵⁾의 원리에 의해 측정이 가능하다. Fig. 2는 마이켈슨 간섭계의 원리를 나타낸다. 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)는 하나의 광선을 두 개의 광선으로 나누고, 이들을 다시 결합함으로써 간섭 현상을 인위적으로 발생하도록 한 간섭계이다. 가간섭 광원은 45°로 경사진 광 분할기에 의해 두 개의 광 경로로 나뉜다. 각각의 광파들은 거울에 의해 반사되고 다시 광 분할기를 통해 검출기에서 합쳐진 후 간섭 무늬를 생성한다. 분리점에서 광파들은 위상을 담고 있다. 만약 광파들이 다시 합쳐지기 전에 경로가 같다면 극대

가 되는 위상을 포함하지만 둘 중 하나의 광경로가 다른 것의 반파장의 경로 차를 가진다면 이들의 합성파의 강도는 극소가 된다. 광파의 이 변화는 만약 한 거울이 연속적으로 이동한다면 주기적으로 반복된다. 그래서 등고선 간격이 광 파장의 정확히 반이 되는 거울 이동의 주기적인 결과를 얻는다. 이 간섭계에서는 동심원의 간섭무늬를 얻을 수 있는데 이로부터 거리 측정에 이용할 수 있다. ESPI는 이러한 마이켈슨 간섭계의 원리를 이용하여 물체의 변형이나 변위 구배 특성을 측정하는 간섭법이다.

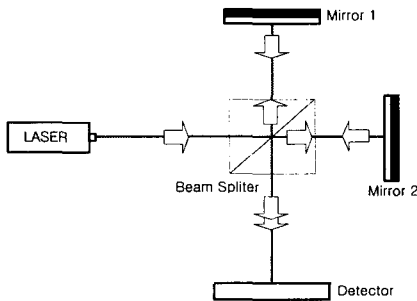


Fig. 2 마이켈슨 간섭계의 개략도

2.3 ESPI의 구성 및 특성

ESPI 시스템을 구성하는데 있어서 측정하고자 하는 물체에 나타나는 간섭무늬의 변위에 대한 감도는 물체빔과 기준빔의 기하학적 구조에 관계한다. 그러므로 ESPI 시스템은 그 민감한 변위성분에 따라 크게 면외변위(Out-of-plane Displacement), 관측방향에 수직한 면내변위(In-plane Displacement)와 변위 구배 미분(Displacement gradient derivative) 시스템으로 나눌 수 있다.⁽⁵⁾

Fig. 3에 면외변형에 민감한 간섭계의 구성도가 보여진다. 그러나 이 간섭계는 두 거친 산란면에서의 산란과 광분할기에 의해 적어도 50% 이상의 빛을 잃어버리므로 대단히 비효율적이다. 그러나 두 면의 상대적인 변위를 측정하고자 할 때 매우 효과적이므로 주로 그러한 경우에 사용된다. 또한 Fig. 4에는 면내변형에 민감한 간섭계가 보여지고 있다. 이 간섭계는 구성이 간단하고 조작이 편리하며, 면내의 변형 및 응력측정에 가장 적합한 시스템이다.

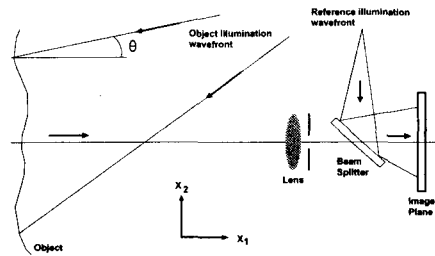


Fig. 3 면외변형에 민감한 간섭계

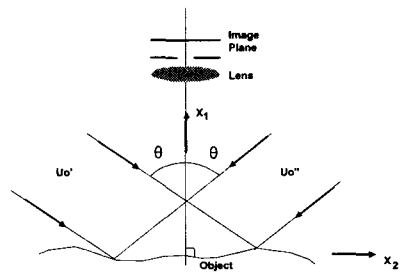


Fig. 4 면내변형에 민감한 간섭계

Fig. 5는 변위 구배 미분 시스템인 전단간섭계인데, 일반적으로 구조물의 결함을 검출하기 위해 많이 사용되며, 광학계의 구성상 외부환경의 영향을 거의 받지 않고 전단량의 조절로 측정감도의 조절이 가능하다. 또한 특기할만한 특징으로 물체의 구조적인 특성에 맞는 다양한 진단방법의 적용이 가능하다. 즉, 물체의 형태에 따라 측면(lateral), 방사형(radial), 회전(rotational)과 반전(reversal) 진단 등이 광학계의 구성에 따라 구현될 수 있다.

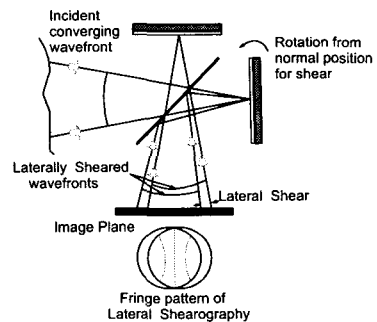


Fig. 5 전단 간섭계

Fig. 6은 면내변위 간접계를 응용하여 시편의 면내변형 및 응력을 측정할 수 있는 시스템의 예를 나타낸 것이다.

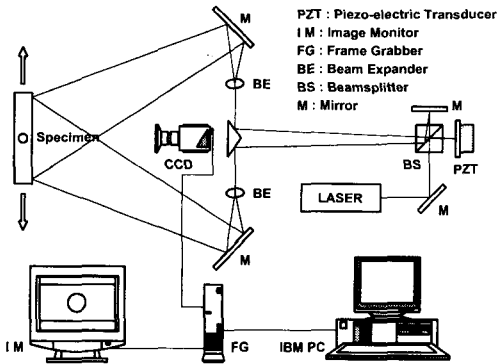


Fig. 6 Experimental Setup

3. 응용분야

3.1 3차원 형상측정

ESPI를 이용한 3차원 형상의 측정법은 기존의 방법들에 비해 많은 장점들을 가지고 있는데, 첫째로 측정 프로브를 측정 대상물에 주사시키기 위한 기계적 구동의 제한에 영향을 받지 않으므로 측정 시간이 매우 짧고 이 때문에 생산공정의 고속화에 알맞고, 둘째로 측정 대상물에 접촉하지 않고 확산된 레이저 빔을 사용하기 때문에 물체의 손상이 없으며, 실시간 개념에 의한 자동측정이 가능하게 된다. Fig. 7과 8에 탁구공과 25센트 동전의 측정결과가 나타나 있다.⁽⁶⁾

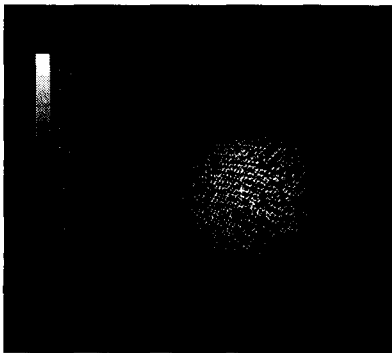


Fig. 7 탁구공의 형상 측정결과



Fig. 8 25센트 동전 형상 측정결과

3.2 변형량 및 응력 계측

Fig. 9와 10은 각각 원형 구멍과 노치가 있는 시편의 면내변형 측정결과를 보여준다. 면내변형이 비록 수 μm 인 미소변형임에도 불구하고 정량적으로 측정이 가능함을 보여주고 있다.⁽⁷⁾

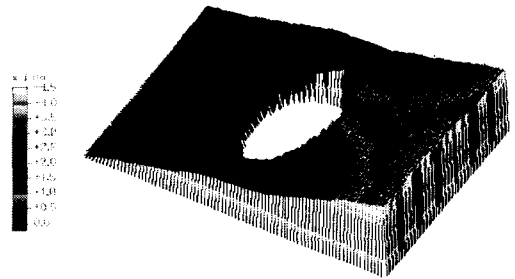


Fig. 9 원형구멍 시편의 면내변형량 측정결과

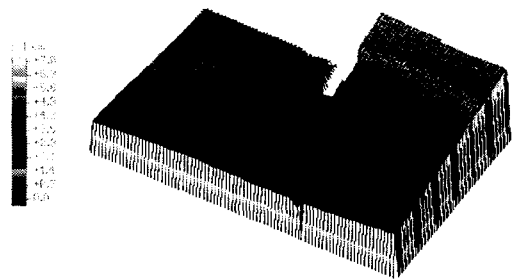


Fig. 10 노치가 있는 시편의 면내변형량 측정 결과

Fig. 11에는 면내 변위 구배(du/dx)의 분포를 보이는 간섭무늬 그림으로서 x방향에서의 변형률을 나타내고 있다.

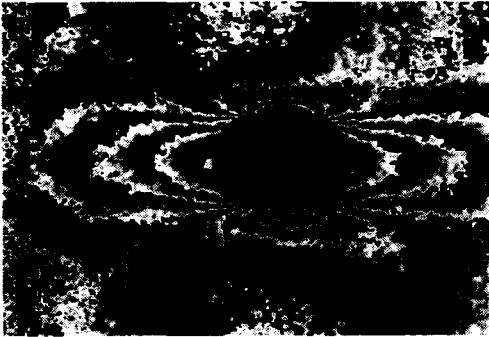


Fig. 11 면내변위 방향(x)에서의 미분을 통해 얻은 면내방향의 변형률

3.3 표면조도 측정

3.1절에서 언급한 형상측정법에 화상증분 방법(Technique of Incremental Image)을 적용하면 물체 표면의 조도까지 측정할수 있게 된다. Fig. 12에 평균조도가 $1.6\mu\text{m}$ 인 표면의 조도를 표현한 것이다.⁽⁸⁾

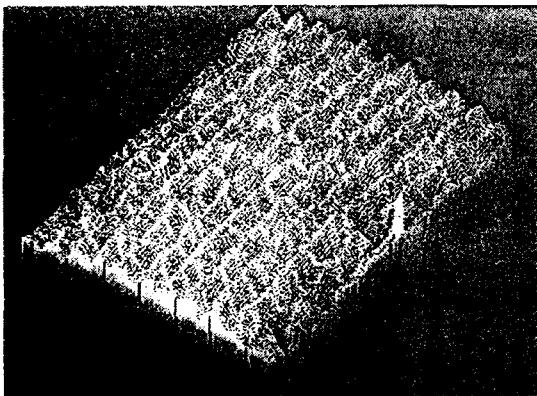


Fig. 12 ESPI에 화상증분방법을 적용한 표면조도 측정결과

4. 기타 응용분야

4.1 진동모드 계측

각종 기계부품들의 진동모드를 측정하기 위한 방법들에는 여러 가지가 있을 수 있겠으나, 대표적인 방법이 가속도계와 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용한 방법이 되겠다. 그러나 이들 방법은 접촉식이어서 진동모드에 영향을 주거나, 비접촉식이라도 점단위 측정이기 때문에 전면적인 분포를 측정하는데는 한계가 있다. 이에 반해 ESPI를 이용한 시간평균법, 스트로보스코픽 방법은 진동모드를 비접촉, 전면적으로 측정하는데 매우 효율적이고 강력한 측정기법이라고 말할 수 있다. Fig. 13와 14에는 자동차에 쓰이는 디스크 브레이크와 캘리퍼의 진동모드를 시간측정법으로 측정한 결과이며, 실시간으로 모드의 변화를 관찰할 수도 있다.⁽⁹⁾ 또한, 스트로보 효과를 낼 수 있는 장치를 추가하면 Fig. 15와 같은 진동진폭 분포를 정량적으로 측정할 수 있게 된다. Fig. 15는 스피커의 진동진폭 분포를 나타낸다.⁽¹⁰⁾

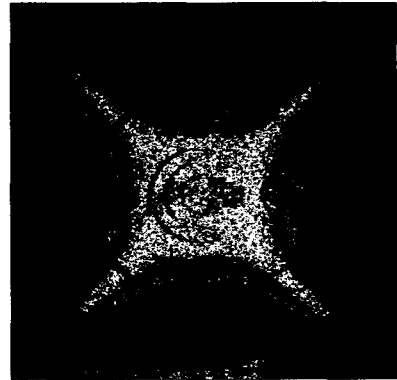


Fig. 13 디스크 브레이크의 진동모드

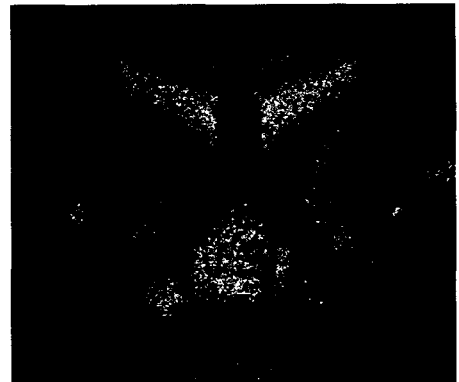


Fig. 14 캘리퍼의 진동모드

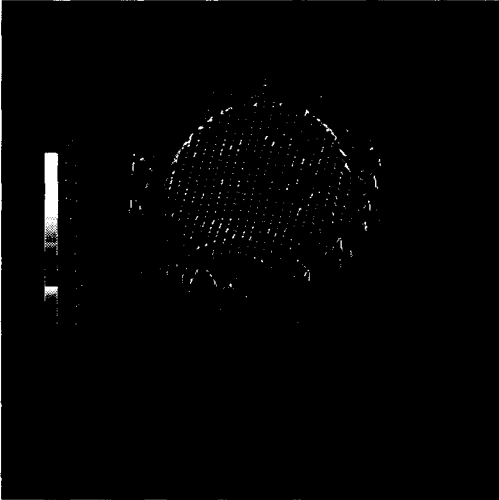


Fig. 15 스피커의 진동진폭 분포 정량화

4.2 잔류응력 측정

ESPI법에 유한요소법과 점가열법을 적용하여 잔류응력을 구할 수도 있다. 유한요소법은 시편 가열부의 온도와 그 외 변수들을 정하는데 사용되고, ESPI시스템은 측정 시편의 응력이 이완될 때의 면내변형을 측정하는데 사용된다. 그리하여, 잔류응력은 측정하고자 하는 부위의 가열 냉각에 의한 변형률에 의해 결정되어 진다. Fig. 16에 점 가열 후 냉각된 시편의 면내변형량을 측정한 결과가 나타나 있으며, 이로 인해 잔류응력을 산출할 수 있게 된다.⁽¹¹⁾

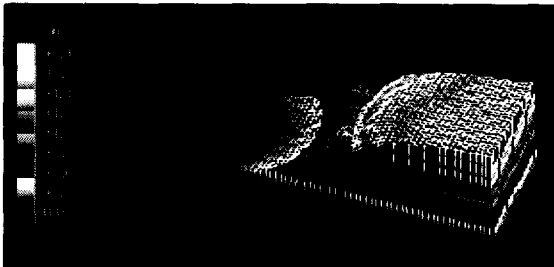


Fig. 16 잔류응력을 산출하기 위한 면내 변형 측정결과

4.3 균열검출

발전소나 송유관 같은 압력용기 등에 대한 유지보수는 매우 중요하다. 따라서 이들에 발생하는 균열을 검출해내는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있겠는데, 기존의 방법들은 시간소모적이거나, 측정범위가 작다는 단점이 있다. 그러나 ESPI 방법을 이용하면 짧은 시간안에 전면적으로 결함의 위치를 찾아 낼 수 있으며 그 크기도 정량적으로 측정이 가능하다. Fig. 17과 18에는 압력용기의 축방향 결함을 검출한 결과와 다양한 결함에 대한 검출예를 보여주고 있다.⁽¹²⁾



Fig. 17 압력용기의 내부결함 측정 예

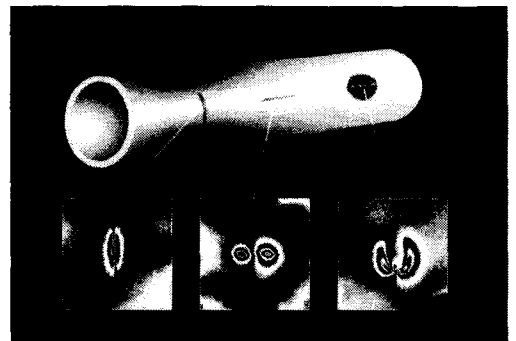


Fig. 18 다양한 결함의 검출 예

4.4 열, 유체 분포 계측

유체의 온도나 압력의 변화는 굴절률 변화를 유발하는데, 이러한 굴절률 변화는 보통의 영상장치로는 잘 보이지 않으므로 광학적인 가시화 방법으로 볼 수 있도록 한 다음 측정하는 방법이 많이 사용된다. ESPI로도 이를 실현시킬 수 있는데, Fig. 19과 20에 각각 알콜램프 불꽃의 가시화 결과와 온도 분포의 계산 결과가 나타나 있다.⁽¹³⁾

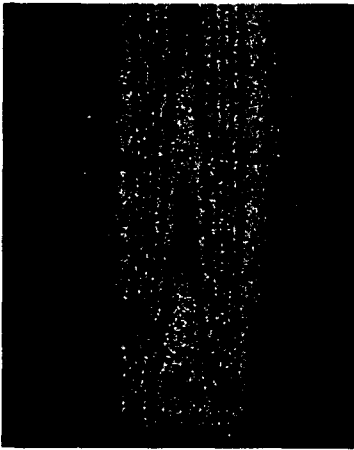


Fig. 19 알콜램프의 가시화

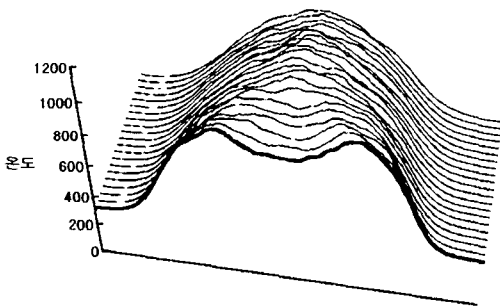


Fig. 20 알콜램프의 온도분포

ESPI는 기계장치, 구조물, 압력용기, 항공기 및 원자로등에서 현재 문제가 되고있는 변형, 응력, 진동, 결함 등의 측정 및 검출을 하기 위한 측정법으로써 기존의 방법을 탈피한 혁신적인 방법으로 사료된다. 즉, 기존의 방법은 접촉식 혹은 측정하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있으나, 본 방법은 레

이저빔에 의하여 행해지는 방법으로서 비접촉, 비파괴적이고, 거의 실시간(real-time)으로 측정이 가능하기 때문에 산업현장에서 필요한 새로운 방법으로 생각된다. 따라서 ESPI의 응용분야는 대단히 광범위하다고 볼 수 있으며 대략 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 ESPI의 응용분야

자동차산업	엔진 block검사, 브레이크 등 자동차 부품의 진동 및 변형검사
항공기산업	엔진 부품검사, 터빈날개, 모터 하우징 및 재질 검사
전자산업	새로운 고체 device 연구, 전류에 의한 열 또는 응력에 의한 PCB건판
토목공학	건물의 decay검사
석유산업	압력용기 검사
기타산업	금속재료의 피로 또는 응력 변형 검사, 냉장고 모터의 compressor 디자인
스피커산업	진동패턴검사
원자력산업	용접상태검사, 압력용기 검사

5. 결론

ESPI기법은 홀로그래피 기법에 비해 상대적으로 안정성이 뛰어나고 장비의 소형화가 가능하며 컴퓨터를 이용하기 때문에 데이터 처리과정이 간결하다는 장점으로 인해서 산업현장에서의 적용에 한 발 더 앞서 있다고 할 수 있다. 또한 진보를 거듭하고 있는 광섬유 기술과의 접목으로부터 지금의 무비 카메라와 같은 크기의 소형화가 멀지 않은 일로 기대된다. 이와 같이 이 기술은 고부가가치를 가지고 있으며 산업에의 적용조건에도 큰 제약을 받지 않을 뿐만 아니라 그 응용분야의 다양성으로 인해 잠재적인 수요는 매우 많을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ennos, A. E., "Speckle Interferometry," Laser Speckle and Related Phenomena, pp. 203, 1975.
2. Butters, J. N., "Electronic Speckle Pattern Interferometry : A General Review," The

- Engineering Uses of Coherent Optics, pp. 155, 1976.
3. Leendertz, J. A., "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect," Journal of Physics E, Vol. 3, No. 214, 1970.
 4. Butters, J. N. and Leendertz, J. A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," Optics and Laser Technology, Vol. 3, No. 27, 1971.
 5. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge, 1989.
 6. 강영준, 김계성, "전자스펙클 패턴 간섭법을 이용한 형상측정에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제15권, 제10호, pp. 156-164. 1998.
 7. 강영준, 노경완, 나의균, "레이저 스펙클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구 (II)," 한국정밀공학회지, 제15권, 제12호, pp. 113-119. 1998.
 8. Hertwig, M., "Application of Improved Speckle Contouring Technique to Surface Roughness Measurements," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 26, pp. 115-130., 1997.
 9. 강영준, 김동우, "시간평균 ESPI를 이용한 디스크브레이크의 진동모드 측정에 관한 연구," 한국공작기계학회지, 제8권, 제4호, pp. 79-86, 1999.
 10. 강영준, 채희창, "전자 스펙클 간섭계에 의한 진동해석," 한국공작기계학회지, 제6권, 제4호, pp. 39-45, 1997.
 11. 강영준, 노경완, 홍성진, 강형수, "레이저 간섭법과 유한요소법을 이용한 잔류응력 측정방법에 대한 연구," 비파괴검사학회지, 제19권, 제1호, pp. 16-24, 1999.
 12. 강영준 외 5인, "홀로그래피 간섭법을 이용한 미소변형 측정법," 한국원자력연구소 제2차년도 보고서, 1994.
 13. 장종민, 강영준, 박성태, "전자스펙클간섭계를 이용한 원형축대칭 유체의 물성치 측정 및 가시화에 관한 연구," 대한기계학회 1999년도 추계학술대회논문집A, pp. 731-736, 1999.