

◆특집◆ 첨단 간섭계 계측기술

레이저 스페클 간섭법에 의한 구조물의 변형해석

김경석*, 강기수**

Strain Analysis of Mechanical Structure by Laser Speckle Interferometry

Koung Suk Kim* and Ki Soo Kang**

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리스페클간섭법), Non-contact strain analysis(비접촉 변형해석), Strain/stress analysis(응력 및 변형해석), Thermal strain analysis(열변형해석), Residual strain analysis(잔류응력해석), Mechanical property evaluation(기계물성평가)

1. 서론

최근 산업의 고도화와 함께 초고온, 방사선노출 등과 같은 극한환경에서 사용되는 구조물과 MEMS 와 같은 미소 구조물(Microstructure)이 많아지고 있으며, 이들의 변형해석을 위한 기존의 접촉식 기법들은 그 한계를 극복해야 할 필요가 있다. 해결방안으로 레이저를 이용한 비접촉 측정 방식이 많은 발전을 해오고 있으며, 특히, 스페클 간섭법(Speckle inteferometry)기반의 변형해석 기술이 가장 뛰어난 기술로 인정받고 있다. 스페클간섭법은 컴퓨터 화상처리기술에 힘입어 전자처리 스페클간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)으로 발전을 하고 있으며, 자동차와 같은 대형구조물의 변형해석에서 MEMS 구조물과 같은 미소구조물 변형해석까지 그 적용 범위가 매우 넓다. 본 논문에서는 ESPI 를 이용한 변형해석분야의 국내외의 기술현황 및 적용사례, 발전방향을 소개하였다.

2. 국내외 기술현황

1960 년대 레이저의 발명이후로 광학분야에 엄청난 발전이 있었던 반면에 레이저개발 초기에는 레이저로 조사한 물체에서 작은 알갱이들이 발견되어 유효 분해능(Effective resolution)에 한계가 있는 것으로 지적되어 많은 실망을 안겨주었다. 그러나, 그 후 알갱이는 스페클로 분류가 되면서 새로운 학문분야로 자리 잡았고 스페클효과를 이용한 다양한 학문이 파생되었다. 그 중의 하나인 스페클 포토그래피(Speckle photography)는 물체의 변위와 변형을 측정하는 공학분야에서 중요한 기술로 발전하게 된다. 1969 년 Brooks and Heflinger 는 이중빔(Double illumination)방식으로 변위의 정량분석에 성공하였다. 그 후 텔레비전의 카메라기술과의 접목이 1971 년 영국의 Buters and Leendertz, 미국의 Macovski, Ramsev and Schaefer 에 의해 거의 동시에 성공적으로 이루어졌으며, 이때가 ESPI 기술의 시작이라고 볼 수 있다. 그 이후 Løkberg and Høgmoen(1976), Beidermann and Ek(1975)에 의해 기반 이론과 산업적 활용이 엄청난 발전을 하게 되었다. 그 이후에도 Jones and Wykes 등에 의해 전문서적과 논문들이 다수 출판되면서 1990 년 중반에서 부터는 독일의 Ettermeyer GmbH, Steinbikler GmbH, 미국의 Karl Stetson Associates, Regognition technology Inc., GOM 등에 의해 상용제품의 개발

* 조선대학교 기계정보공학과
Tel. 062-230-7004, Fax. 062-230-7838
Email: gsckim@chosun.ac.kr

레이저 스페클간섭법을 이용한 변형해석 및 진동해석 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 조선대학교 대학원 기계설계공학과

까지 이르게 된다. ESPI 기술이 고분해능의 기술로 발전할 수 있는 또 하나의 계기는 화상처리기술의 발전과 함께 1985년 Creath에 의해 위상이동기법(Phase shifting method)이 ESPI에 결합되면서 부터이다. 위상이동기법과 결렬침(Unwrapping)기법이 적용되면서 스펙클 간섭무늬 해석의 자동화가 가능하게 되었으며, 최근에는 위상이동기법을 적용한 ESPI가 연구의 대부분을 차지하고 있다. 현재 국내외적으로 ESPI를 이용한 구조물의 변위 및 변형해석의 가능성은 일반적 사실로 인지되고 있으나, 고분해능 간섭계의 특성상 외부진동 등의 환경외란에 의해 민감하여 이를 개선하기 위한 연구와 ESPI를 이용한 대변형해석 연구가 많이 진행되고 있다. 다른 레이저응용 기술과는 달리 ESPI는 레이저를 확산하여 물체에 조사하기 때문에 조사된 전면에 대해 변형해석이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 대형 구조물 변형해석에 많은 활용이 되어왔으며, 최근에는 MEMS 분야에서 구조물의 거동해석 또는 박막재료 물성 평가에 많은 활용을 하고 있다. 가장 주목받는 연구로는 1987년 Malmo는 ESPI를 이용하여 3,000℃ 이상까지 금속재료의 용융과정을 계측한 결과가 있으며, 1995년 Pechersky에 의한 잔류응력해석, 1998년 Read D.T.의 박막재료의 물성평가 등이 있다. 국내에서 ESPI를 이용한 변형해석연구는 1990년 초부터 국내 학회지에 논문이 발표되기 시작했으며, 본격적인 관심은 1990년 후반부터 라고 할 수 있다. 최근의 국내연구동향은 MEMS용 재료에 대한 변형해석으로 많은 연구가 진행되고 있으며, MEMS 분야 연구로는 한국표준과학연구원 허용학박사팀은 박막재료(두께 18 μm)의 인장물성평가에 ESPI를 이용하였으며, 서울대 권동일 교수팀은 박막의 열탄성에 의한 잔류응력해석에 ESPI를 이용하였다. 산업현장에서는 대우전자 품질경영연구소에서 TV 및 냉장고, 세탁기 등의 품질개선 사례가 보고되었으며, 응용연구가 활발하게 진행되었다.

3. 적용사례

3.1 인장/압축 변형해석

지금까지 구조물의 변형해석은 스트레인게이지 기법이 가장 많이 사용되고 있으나, Point by point 와 접촉식 측정방식으로 많은 데이터를 확보

할 경우 미소 구조물에 대해서는 제한적인 요소가 있다. 이러한 측면에서 ESPI는 레이저가 조사된 물체 표면을 동시에 측정이 가능하므로 많은 양의 변형정보를 손쉽게 구하게 된다. 즉, ESPI를 이용하여 100×100 mm²의 면적을 갖는 구조물의 변형해석할 경우, 1 mm 스트레인게이지 10,000개의 정보를 동시에 획득할 수 있게 된다. Fig. 1(a)-(d)은 50×50 mm² 크기의 평판의 중앙에 12 mm의 원형구멍이 있는 시험편을 ESPI로 측정하여 획득한 스펙클상관간섭무늬이며, Fig. 1(e)는 간섭줄무늬의 해석을 통하여 획득한 변형 분포선도이다.

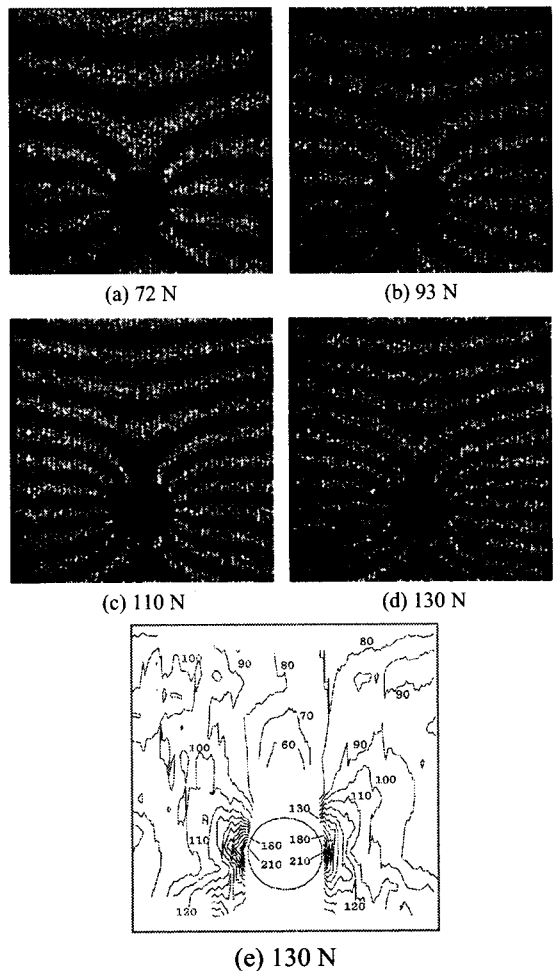


Fig. 1 Speckle correlation fringe pattern and strain distribution of plate with circular hole (12mm) under tension

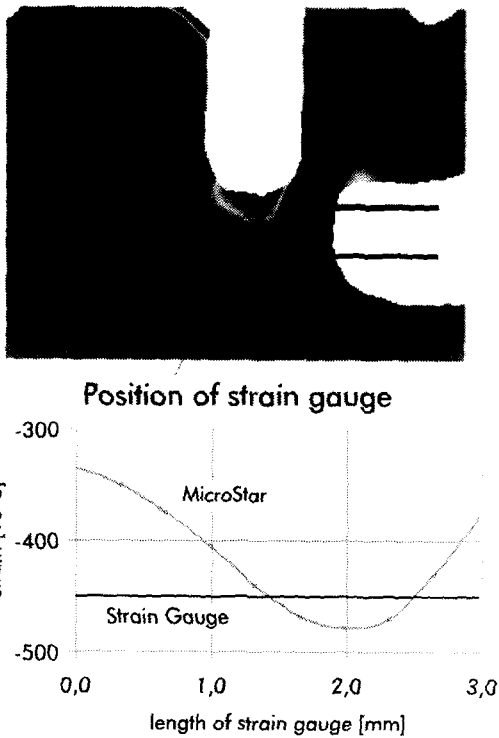


Fig. 2 Strain measurement at a clamp (Microstar, Ettmeyer GmbH.)

Fig. 2 는 클램프(Clamp)구조물의 변형해석을 스트레인게이지와 결과를 비교하였다. 스트레인게이지 기법에서는 3 mm 게이지에서 얻게 되는 변형정보는 평균값으로 $450 \mu strain$ 이나 ESPI 에 의해 측정된 결과는 3 mm 의 영역 내에서 9 개의 Data 를 제공하고 있다. (Data 의 개수는 CCD camera 의 분해능과 관련됨). 이들 Data 의 평균값은 Straingage 기법과 3%이내로 일치하고 있다. 시험편 전면에 대해서 CCD camera 의 화소수 만큼 정보를 제공하게 되고, 변위 분해능은 He-Ne laser 를 사용하여 $0.03 \mu m$ 까지 가능하다. 그 외에도 자동차용 엔진블럭에서 변형해석, 볼트체결부와 같이 형상이 복잡한 영역에서 비접촉에 의한 변형해석으로 많은 활용을 하고 있다.

3.2 열변형해석

고온에서 재료의 변형해석은 매우 복잡한 문제로 스트레인게이지 기법의 경우 온도보상이 필요하며 접촉식기법으로 $800^{\circ}C$ 이상에서는 적용이

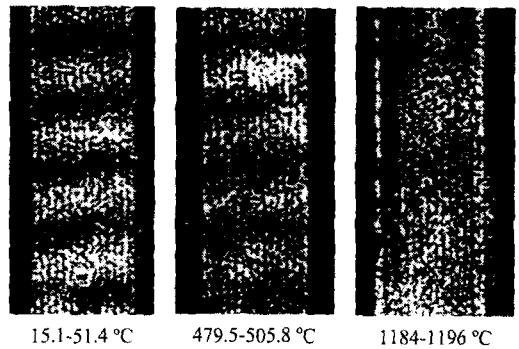


Fig. 3 Speckle Correlation fringe pattern of INCONEL 601 at high temperature

되지 않는다. Moiré 기법이 많이 이용되고 있으나, 고온 또는 용융점에서 격자가 깨지는 문제가 발생하게 된다. $1,000^{\circ}C$ 이상의 초고온에서 구조물 해석에서는 비접촉 측정기술은 필수적인 기술이다. 초고온에서 대표적인 적용실험으로는 $3,000^{\circ}C$ 이상의 온도에서 재료의 용융상태를 정성적으로 모니터링 하는데 ESPI 를 이용하였으며, 본 연구팀에서는 진공챔버와 ESPI 를 이용하여 원자력 압력용기로 사용되는 INCONEL 601 의 열팽창계수를 $1,200^{\circ}C$ 까지 측정하였다. Fig. 3 은 INCONEL 601 재료의 온도변화에 따른 상관간섭줄무늬를 보여주고 있다. ESPI 실험 결과는 재료 공급사(Nilaco Co., Japan)의 자료(Moiré 기법)와 비교하였다. $600^{\circ}C$ 이내에서는 약 0.3%이내의 오차를 가지고 있었으나, $700^{\circ}C$ 이상에는 많은 오차가 발생하고 있었다. 그러나, 공급사의 자료가 Moiré 기법으로 제공된 결과라는 점($800^{\circ}C$ 가 측정 한계온도로 보고됨)을 감안한다면 그 이상의 온도에서는 ESPI 결과가 매우 타당한 결과라 볼 수 있다. 그 외에도 이방성 재료인 복합재료의 열팽창계수 측정, 자동차용 피스톤의 열변형해석, 세라믹소재의 열변형 해석등 다양한 분야에서 활용하고 있다. ESPI 기법을 사용함으로써 기존의 측정한계온도 이상에서 재료의 변형해석을 할 수 있으며, 열팽창계수 등의 물성평가에도 많은 활용이 되어 오고 있다.

3.3 용접부 변형해석

용접부 변형해석 분야의 대표적인 연구로 용접부의 열영향부(Heat affected zone) 해석과 잔류응력해석이라 할 수 있다. 용접부에 따른 열영향부의 측정을 위해 ESPI 를 이용한 시험편 전체에 대

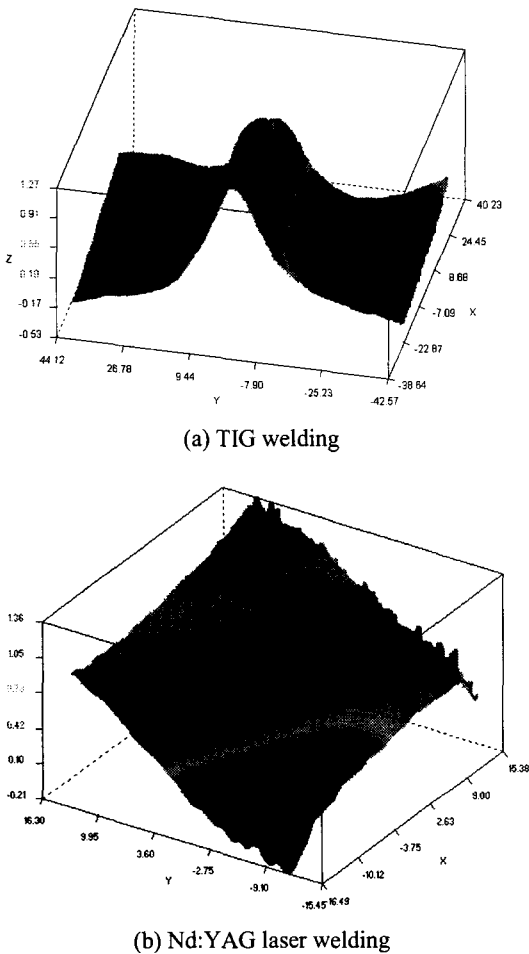
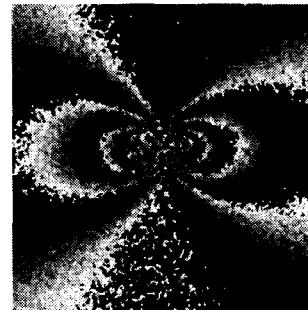
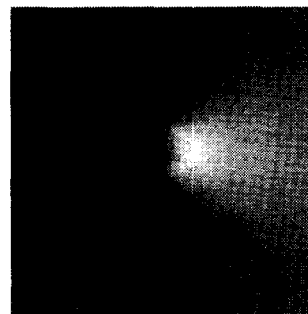


Fig. 4 Heat affected zone analysis of welding by ESPI

해 변형분포를 측정함으로써 용접부의 열영향부를 예측할 수 있게된다. 또한, 잔류응력해석을 위한 최근의 연구로는 Viotti and Kaufmann 은 hole drilling 기법과 ESPI 를 접목하여 성공적인 결과를 제시하였다. 전북대학교 강영준 교수팀에서는 레이저 가열방식을 이용하여 잔류응력해석을 하였다. Fig. 4 는 TIG 용접과 Nd:YAG 레이저용접 시험편에 대해 열영향부를 조사한 결과이다. TIG 용접과 Nd:YAG 레이저 용접시험편의 인장실험을 통하여 변형분포해석을 함으로서 용접시 발생하는 열영향부를 가시화가 가능하다. TIG 용접의 경우 중심을 중심으로 열영향부가 형성되어 있는 것을 볼 수 있으나, Nd:YA 레이저 용접에서는 열영향부가 거의 존재하지 않고 있다.



(a) ESPI Phase map



(b) Displace distribution

Fig. 5 Residual stress analysis by ESPI and hole drilling method (Viotti, M.R. and Kaufmann, G.H.,)

Fig. 5 는 Hole drilling 기법과 ESPI 를 이용하여 알루미늄 평판의 열처리에 따른 잔류응력을 해석한 사례이다. 잔류응력해석은 원자력 발전설비 등 다양한 분야에서 중요한 관심 분야로 용접부 잔류응력해석을 비파괴적인 방법으로 할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 스트레이지 기법의 한계를 극복한 대체기술로 각광받는 레이저 스펙클 간섭법을 이용한 변형해석의 국내외 기술동향과 적용사례를 소개하였다. ESPI 를 이용한 변형해석은 기존의 point by point 측정방식의 한계와 접촉식 방식의 한계를 보완할 수 있으며, 해석결과를 쉽게 얻을 수 있어 다양한 산업에서 기반기술로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 최근의 ESPI 분야의 학문적 연구는 대변형해석과 고급화상처리 기술을 적용한 분해능 개선의 연구가 진행이 되고

있으며, MEMS 분야 및 반도체산업으로 활용에도 많은 연구사례가 발표되고 있다. 특히, MEMS 산업에서 ESPI 는 비접촉 고분해능의 장점을 살려 변형해석기술로 활용도가 매우 높을 것으로 예상하고 있다. 또한, 산업현장에서 대형구조물 변형해석분야에서는 아직까지는 가격의 문제로 실질적인 기술로 정착이 어려웠지만, 펄스레이저(Pulse laser) 을 이용한 pulse ESPI 기술도 많은 발전을 할 것으로 예상하고 있다.

후기

이 논문은 과학기술부/한국과학재단 지정 지역 협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2004 년도 연구비지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Løkberg, O.J., "Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Physics in Technology*, Vol. 11, pp.16-22, 1980.
2. Cloud, G.L., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, pp.453-476, 1990.
3. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, 1983.
4. Malacara, D., Servin, M. and Malacara, Z., "Interferogram analysis for optical testing," Marcel Dekker Inc., 1998.
5. Robinson, D. W. and Reid, G. T., "Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques," IOP publishing Ltd., 1993.
6. Rastogi, P. K. "Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques," John Wiley & Sons Ltd., 2001.
7. Moore, A.J. and Tyrer, J.R., "An Electronic speckle pattern interferometry for complete in-plane displacement measurement," *Measurement science and technology*, Vol. 1, pp. 1024-1030, 1990.
8. Tlusty, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
9. Malmo, J.T., Lokberg, O.J. and Slettemoen, G.A., "Interferometric Testing at Very High Temperatures by TV Holography (ESPI)," *Experimental Mechanics*, Sept., pp.315-321, 1987.
10. Kim, K.S., Kim, J.K., Lee, J.K. and Jarnng, S.S., "Measurement of thermal expansion coefficients by electronic speckle pattern interferometry at high temperature," *J. of material science letters*, Vol. 16, pp. 1753-1756, 1997.
11. Ratnam, M.M., Evans, W.T. and Tyrer, J.R., "Measurement of thermal expansion of a piston using holographic and electronic speckle pattern interferometry," *Optical Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 61-69, 1992.
12. Hack, Erwin and Brönnimann, Rolf, "Electronic speckle pattern interferometry deformation measurement on lightweight structures under thermal load," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, pp.213-222, 1999.
13. Perchersky, M. J., Miller, R.F. and Vikram, C.S., "residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry and local heat treating," *Optical Engineering*, Vol. 34, No. 10, pp. 2964-2971, 1995.
14. Read D.T., "Young's Modulus of Thin Films by Speckle Interferometry," *Measurement Science and Technology* 9, pp. 676-685, 1998.
15. Viotti, M.R. and Kaufmann, G.H., "Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 297-305, 2004.
16. Kang, Y.J., Kim, K.S., Kim, I.K., Rho, K.W., Ryu, W.J., and Cheong, S.K., "The Electronic laser interferometry and laser heating method for residual stress determination," *KSME international*, Vol. 14, No. 7, pp. 715-721, 2000.
17. Knauss, W. G., Chasiotis, I., Huang, Y., "Mechanical measurements at the micron and nanometer scales," *Mechanics of Materials*, Vol. 35, pp. 217-231, 2003.
18. Cookson, T.J., Butters, J.N., Pollard, H.C., "Pulsed lasers in electronic speckle pattern interferometry," *Optics and Laser Technology*, Vol. 10, pp.119-124, 1978.