

# ESPI에 의한 레이저용접 조건에 따른 진동 특성 분석

김경석\*, 정현철<sup>§</sup>, 백상규<sup>#</sup>, 이유황<sup>#</sup>, 유득남<sup>†</sup>

## Vibration Characteristics Analysis as Laser Welding Condition by ESPI

K.S. Kim\*, H.C. Jung<sup>§</sup>, S.K. Baek<sup>#</sup>, Y.H. Lee<sup>#</sup>, D.N. You<sup>†</sup>

### Abstract

This paper describes the variations of resonance frequencies and vibration mode shapes of laser welded cold rolled carbon steel plate(SCP1) induced by thermal loading during laser welding processing. The characteristics of those are analyzed with stroboscopic ESPI. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) that the electronic processes were added to SPI is one of the very powerful method in the experimental vibration analysis field. Stroboscopic ESPI to make it reliable are compared with theory and experimental method: Finite Element Method(FEM) and Scanning Laser Doppler Vibrometer(SLDV). The results of stroboscopic ESPI are well agreed with SLDV and also the comparison with theory give good agreement within 5%.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry, Vibration analysis, Finite Element Method, Laser Doppler Vibrometer

### 1. 서론

1960년대 이후 레이저의 종류 및 기술이 발달함에 따라 레이저가 고출력화 되고 산업적 적용이 현실화 되면서 그 수요와 사용 범위가 확대되고 있다. 현재 상용화된 고출력 레이저는 약 20kW급의 레이저가 있으며 레이저를 이용한 생산공정은 다양한 분야에서 적용되고 있다. 레이저용접은 레이저 빛을 광학기구(렌즈)를 통하여 집광하고 집광된 레이저를 이용하여 두 금속을 녹여 붙이는 과정이다. 현재 용접재료에 대한 연구는 기계적(인장, 경도, 충격, 피로), 야

금학적(육안, 현미경조직검사), 용접성(노치취성, 용접균열), 물리적(물성, 전자기적), 화학적(화학분석, 함유수소 분석)방법으로 이루어지며 진동특성에 대한 연구는 주로 유한요소해석을 이용하고 있다.<sup>1</sup> 그러나 이러한 방법은 경계조건이 불명확한 경우 실제 조건을 완전히 표현할 수 없을 뿐만 아니라 용접변수가 다양하여 실제 진동특성과 상당한 차이를 발생한다. 본 논문에서는 레이저용접 가공된 차량용 냉간 압연강판(SCP1)에 대하여 레이저용접에 의한 진동모드변화와 레이저용접에 의해 발생하는 열적변형

\* 조선대학교 기계설계공학과 (gskkim@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주 동구 서석동 375

# 조선대학교 기계설계공학과

§ 조선대학교 대학원

† 남인

이 공진주파수에 미치는 영향을 분석하기 위해 비접촉 전 면검사가 가능한 전자처리 스페클을 이용한 실험적 기법을 적용하였다. 또한 용접되지 않은 시험편에 대하여 ANSYS를 이용한 FEM 해석을 통해 얻어진 공진주파수를 비교하였고, 추가적으로 SLDV에 의해 측정된 공진주파수와 ESPI에 의해 측정된 공진주파수를 비교하여 신뢰성을 확보하고자 하였다. 검증된 ESPI에 의해 SCP1 레이저용접 시험편의 용접조건에 따라 공진주파수와 공진모드형상을 측정하였고, 레이저 출력변화와 가공속도의 변화에 따른 분석결과에서 레이저 용접으로 인한 시험편의 물성변화가 없는 것으로 나타났다.

## 2. ESPI이론

전자처리스펙클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)은 집속성과 간섭성이 우수한 레이저 광원을 바탕으로 광학 간섭계를 구성하여 물체광과 참조광을 합성시킴으로서 물체의 변위 량에 따라 발생하는 간섭패턴의 줄무늬를 해석하는 방법이다. 여기에서 스페클은 광학적으로 거칠기를 갖는 물체 표면에 간섭성이 우수한 레이저 광원이 조사되면 물체에서 난반사가 일어나고 이 난반사 된 빔들이 서로 겹치면서 간섭 현상이 발생하는데 이러한 스페클은 빛의 회도 분포로 물체 변위에 대한 중요한 위상정보를 갖게 되며, 그 위상 값은 CCD (Charge Coupled Device) 카메라와 화상처리 장치를 통해 변위의 정보로 바뀌게 된다.<sup>2</sup> 진동해석을 위한 기법으로는 진동모드만 구별이 가능한 Time-average ESPI<sup>3</sup>와 진동량의 정량해석이 가능한 Stroboscope ESPI<sup>4</sup> 방법이 있으며, 본 연구에서는 Time-average ESPI를 이용하여 공진주파수를 측정하고 Stroboscope ESPI를 이용하여 진동의 방향과 진동량을 정량해석하였다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 측정 시스템

ESPI 실험장치는 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며 구성은 Fig. 1과 같이 532 nm 파장의 Nd:YAG Laser source, ESPI Sensor, 위상이동기법 적용을 위한 PZT(Piezo-electric transducer) 제어장치, 화상처리장치 (Image processing system)로 구성되어 있다.

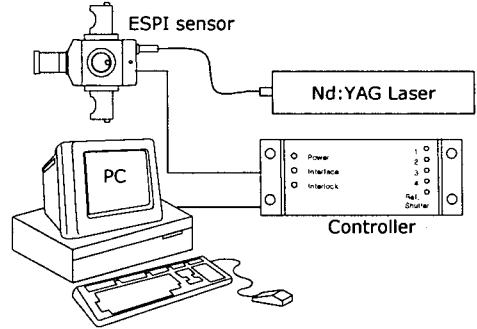


Fig. 1 Schematic of 3D-ESPI System

ESPI 시스템은 종전의 광학정반에서 여러 가지 광학부품을 사용하여 구성된 면내 및 면외 변위 측정 간섭계를 축소하여 진동 및 기타 여러 외란요소를 최소화하여 제작된 것으로서 광학 정반에서 간섭계를 꾸며 실험했을 때보다 환경적인 영향을 적게 받는다. 최초 레이저 소스로부터 광파이버를 통하여 레이저 빔이 센서 헤더로 입사되면 4개의 암으로 고르게 나누어져 대상체에 확산된 레이저 빔이 조사된다. 면외 변위 측정을 위해서는 이 4개의 암 중에서 하나 즉, 물체광과 센서 내부에서 CCD로 바로 들어가는 참조광이 만나 간섭을 일으켜 면외 변위를 측정하게 된다. PZT 제어장치는 참조광을 위상 이동시키기 위한 장치이며, PZT에 전압 차를 줌으로서 위상이 바뀌게 된다. 그리고 컴퓨터에는 프레임그래버가 설치되어 있어 화상을 저장하고 전용 프로그램에 의해 화상정보를 연산 및 처리하여 모니터 상에 그 결과를 나타내어 준다.

### 3.2 레이저용접 시스템

용접에 사용한 Nd:YAG 레이저는 파장 1.06  $\mu\text{m}$ , 최대출력 2.8 kW, 평균출력은 2 kW인 연속파이며, 레이저빔은 직경이 600  $\mu\text{m}$ 인 Step-Index-type 광섬유를 통해서 발산각 25 mrad으로 재료를 가공한다. 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 지면으로부터의 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 발전기에서 레이저빔은 광섬유를 통해 LASMA 1054에 장착되어있는 레이저 용접헤드에 전달된다. 작업대는 겐트리 타입으로 회전축이 부착되어 있는 가공장치로서 X, Y, Z 축 이송거리는 1000 mm×500 mm×400 mm이며, x축, y축에 대한 위치정밀도는  $\pm 5 \mu\text{m}$ , Z축에 대한 위치정밀도는  $\pm 1 \mu\text{m}$ , 반복정밀도는  $\pm 8 \mu\text{m}$ 이다. 공작물을 가공할 때 스페터에 의한 레이저 용접헤드의 렌즈를 보호하기 위한 보조가스 노즐과 용접하고 있는 상태를 모

니터링 할 수 있는 CCD 카메라가 레이저 용접헤드에 부착되어 있다. 보호 가스는 불활성가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하였다.

### 3.2 시험편

본 논문에서 사용된 시험편은 SCPI 차량용 냉간 압연강판으로 현재 차량제작에 널리 사용되고 있으며, 실험을 위해 치수를  $150 \times 75 \times 1.1 \text{ mm}^3$  로 와이어 커팅하여 제작하였다. 시험편의 탄성계수는 203Gpa이고 밀도는  $8000 \text{ kg/m}^3$ 이다. 시험편은 측정기법의 신뢰성 확보를 위한 용접이 없는 일반 평판을 제작하였고, 용접 시험편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시험편 중심에 상하로 용접가공 하였다. 보호 가스는 불활성가스인 아르곤(4 L/min)을 이용하였고, 렌즈의 초점거리는  $-0.2 \text{ mm}$ 이며, 용접가공 중 발생할 수 있는 가공변수의 최소화를 위한 용접방법으로 비드 온 플레이트(Bead on plate) 용접법을 사용하였다. 시험편의 용접조건과 시험편 구별을 Table 1에 나타냈다.

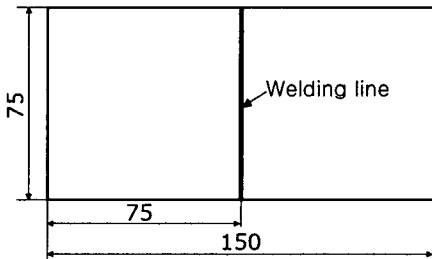


Fig. 2 Geometry of butt welding specimen

Table 1 Welding condition

Specimen No.	Velocity(V)	Power(P)
A	2000 mm/min	1500 W
B		1350 W
C		1200 W
D	2500 mm/min	1500 W
E		1350 W
F		1200 W
G	3000 mm/min	1500 W
H		1350 W
I		1200 W

### 3.3 실험방법

실험에서는 함수발생기(Function Generator)에서 정현파를 생성하고 증폭기(Amplifier)로 증폭시킨 후 이것을 스피커(Speaker)에 전달하여 시험편을 가진하였다. TA-ESPI에서는 연속파 레이저를 센서에 입사하여 CCD camera의 이미지를 합산처리하여 진동모드를 보여 주게되며, Strobe-ESPI에서는 레이저 빔을 Acousto-Optic Modulator(AOM)을 사용하여 가진 주파수와 같은 주파수로 센서에 입사하고 위상이동기법을 적용하여 물체의 변위를 정량측정하게 된다. Fig. 3에 진동측정을 위한 전체 시스템 구성을 나타냈다. 시험편은 좌우를 고정하는 양단 고정으로 실험을 하였다.

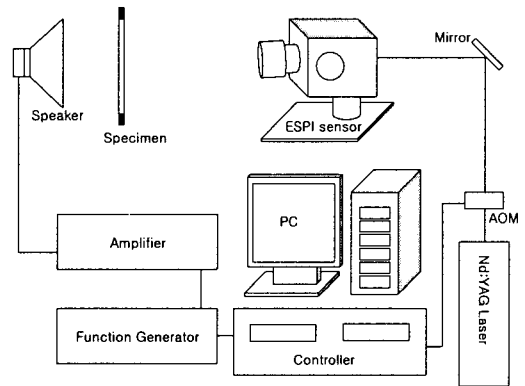


Fig. 3 vibration measurement system

### 3.4 공진주파수의 결정

TA-ESPI에서는 물체의 표면 변위변화량에 대응하여 레이저의 상관간섭무늬를 이미지로 표현하게되며 주파수 정보는 획득된 측정결과에서 직접적으로 측정이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 공진모드를 실시간 분석하여 공진주파수를 결정하는 방법을 이용하였다. 즉, 공진주파수에서 물체는 최대변위를 갖게되며, 변위량의 증가에 따라 TA-ESPI의 상관간섭무늬의 간격이 좁아진다는 사실을 이용하여 공진 주파수를 찾게된다. 가진주파수가 공진주파수에 접근할수록 물체 변위량이 커지고, 물체변위량의 변화에 따라 실시간 상관간섭무늬를 관찰하여 Nodal line이 최소가 되는 주파수를 공진주파수로 결정하게 된다. Nodal line의 간격은 광학 간섭계의 기하학적 구성을 고려하여 270 nm 변위량(약 사용레이저 파장의 1/2)의 민감도를 가지고 반응하게되며, 가진주파수 1 Hz의 변화에도 쉽게 구별이 가능하다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

ESPI에 의한 공진주파수 분석 및 진동모드 해석의 정확도는 많은 논문에서 검증이 되어 왔으며, 본 연구에서는 경계조건과 측정시스템의 재검토를 위해 유한요소해석이 용이한 일반 사각평판에 대해 검증 실험을 수행하였다. Fig. 4는 ESPI, SLDV, FEM 해석결과를 보여주는 것으로 각 모드에서 공진주파수는 FEM에서 최대 12.5%의 오차율로 약간 낮게 평가되었으나, 두 개의 실험기법에서는 1% 이내의 오차율을 가지고 평가하고 있다. 이는 실험에서 물리적 한계로 경계조건의 구현이 완전구속을 할 수 없기 때문에 사료된다.

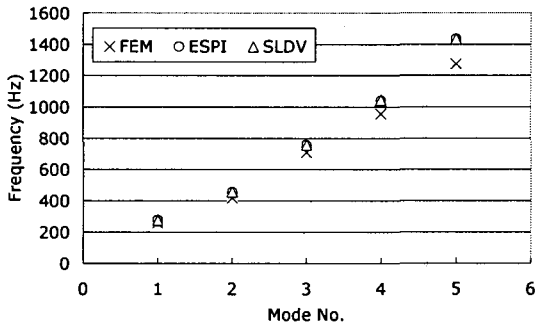


Fig. 4 Comparison of Resonance Frequencies by ESPI, SLDV and FEM

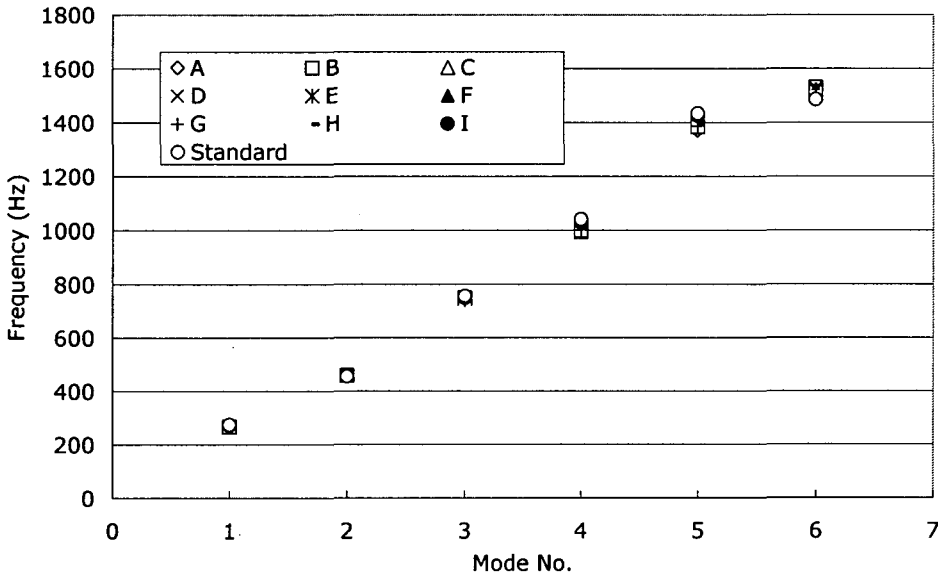


Fig. 5 Comparison of Resonance frequencies

#### 4.1 레이저 가공출력 변화에 따른 진동해석

레이저의 출력변화에 따라 공진주파수의 변화를 관찰하는 실험에서는 2000, 2500, 2500 mm/min 속도에서 출력의 변화를 1200, 1350, 1500 W로 변화하면서 가공하였으며, 공진주파수의 비교는 Fig. 5에서 보는 것과 같다. 실험결과에서 가공출력의 변화는 공진주파수의 변화에 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 특히, 용접을 하지 않는 표준시험편과의 비교에서도 공진주파수의 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 진동모드의 형상변화에서 제 1~4 진동모드는 같은 것으로 조사되었고 5모드와 6모드에서 Fig. 6과 같이 표준 시험편과는 다른 형태의 진동모드를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 용접 비드부의 두께에 대한 영향으로 판단된다.

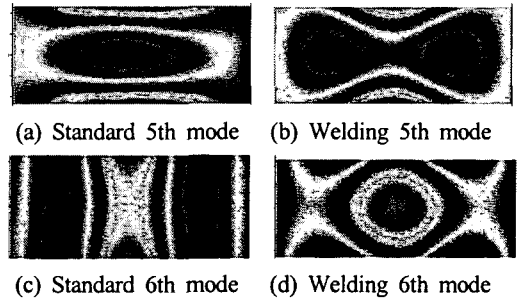


Fig. 6 Comparison of vibration mode shapes

## 4.2 레이저 가공속도 변화에 따른 진동해석

가공속도는 출력 1200, 1350, 1500 W에서 가공속도 2000, 2500, 3000 mm/min으로 하여 가공하였으며, 가공속도의 변화에 따른 공진주파수의 변화는 Fig. 5에서 보면 가공속도에도 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 짧은 시간 내에 에너지를 좁은 영역에 집중하여 재료를 접합함으로써 재료에 열영향이 거의 없어 재료의 물성변화가 없는 것으로 사료된다. Table 2는 Fig. 5의 수치 데이터이다.

Table 2 Comparison of Resonance frequencies (Hz)

No. Pow/Vel.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
A 1500/2000	265	459	740	992	1370	1517
B 1350/2000	267	460	750	995	1383	1530
C 1200/2000	268	460	745	999	1385	1520
D 1500/2500	268	460	747	999	1386	1526
E 1350/2500	265	457	746	999	1393	1519
F 1200/2500	269	460	748	1014	1406	1504
G 1500/3000	269	457	737	1001	1386	1496
H 1350/3000	265	455	738	1006	1396	1483
I 1200/3000	271	459	748	1027	1424	1484
Standard	275	455	756	1040	1433	1484

## 5. 결론

본 논문에서는 SCP1 시험편의 가공이 가능한 범위 내에서 레이저 출력과 속도변화에 따라 진동변화를 관찰하기 위해서 Time-average ESPI를 이용하여 공진주파수를 측정하였고 Stroboscope-ESPI를 이용하여 공진주파수에서 공진모드를 측정하였다. 또한 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 용접하지 않은 표준 시험편에 대해 유한요소해석, SLDV, ESPI 기법을 적용하여 검증하였다. 실험결과에서는 출력변화와 속도변화에 대해서 공진주파수의 변화는 거의 보이지 않았으며, 진동모드의 변화는 일반적으로 중요하게 취급되는 1~4 모드까지의 진동모드는 변화가 없었으며, 5모드와 6모드에서 진동모드에 변화가 있는 것으로 나타났다. 이 주파수에서 진동모드의 변화는 용접 비드의 형상에 따라 질량효과가 영

향을 주는 것으로 판단되며, 레이저 용접에 따른 직접적인 물성변화는 없는 것으로 관찰된다.

## 참고 문헌

- [1] Kim, S.S., Kim, D.H., Kim, C.J., Lee, J.M., 1991, "Investigation of Zircaloy-4 Weldability Using a Pulsed Nd:YAG Laser", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 9, No. 1, pp.23~31.
- [2] Jones, R. and Wykes C., 1989, Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition, Cambridge University Press, London, pp. 165-196.
- [3] Cloud, G. L., 1990, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, London, pp. 461-463.
- [4] Auweraer, Van der , Steinbichler, H., Vanlanduit H., Haberstok, S.C., Freymann, R., Storer, D., Linet, V., 2002, "Application of stroboscopic and pulsed-laser electronic speckle pattern interferometry (ESPI) to modal analysis problems", Measurement Science and Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 451-463.