

# Time-average ESPI에 의한 레이저용접 조건에 따른 공진주파수 특성 분석

이유황\*, 김경석<sup>1</sup>, 정성욱<sup>2</sup>, 최태호<sup>2</sup>

Resonance Frequency Analysis to Laser Welding Condition by Time-average ESPI

Y.H. Lee\* (Grad. School, Chosun U.), K.S. Kim<sup>1</sup> (Dept. of Mech. Information Eng., Chosun U.)  
S.W. Jung<sup>2</sup> (LARC, Chosun U.), T.H. Choi<sup>2</sup> (LARC, Chosun U.)

## Abstract

This paper describes the vibration characteristics of Nd:YAG laser welding plates analyzed time-average Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI). In laser welding, the travel speed has influence on a mechanical properties, such as elastic modules, response frequencies and so on, which is resulted on a residual stress of the welding zone. the response frequencies related to elastic modules are determined by time-average ESPI and the results, as compared to each condition, are used to estimate optimal condition of travel speed.

**Key Words** : ESPI, Nd:YAG laser welding, vibration characteristics, Travel speed

## 1. 서론

레이저의 시간적, 공간적인 가간섭성을 이용한 스페클 간섭법(Speckle interferometry)에 대한 연구가 최근 국내 외적으로 활발히 이루어지고 있다. 이러한 방식은 검사면의 전체에 광원을 조사하고 실시간으로 검사할 수 있을 뿐만 아니라 검사면 전체의 형상 및 응력 그리고 본 논문에서 다루고 있는 진동에 대한 측정까지 실시간으로 검사할 수 있다. 스페클 간섭법은 간섭계의 형태에 따라 구조물의 면 내·면의 변위 계측과 박막의 잔류응력 해석, 주파수 변화에

따른 진동 모드 해석 등에 이용할 수 있다. 본 논문은 최근 이루어지고 있는 용접방법 중 취급의 용이함과 자동화를 바탕으로 생산성 향상의 적합성을 들어 모든 산업현장에서 광범위하게 응용되고 있는 레이저 용접방법 중 하나인 Nd:YAG 레이저용접을 통하여 가공한 차량용 강판을 실험 대상으로 함으로써 스페클 간섭법의 자동차산업에서의 적용성을 고려하였다.

Nd:YAG 레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 열원으로 초점부근에서 국부적인 순간 가열로 접합하는 방법으로, 용접으로 인한 변형을 줄일 수 있으며 좁은 열 영향부를

\* 조선대 대학원 (laser@mail.chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375 조선대학교  
1 조선대 기계정보공학과  
2 조선대 레이저용접신기술개발연구센터

만들며 금속학적 특성이 우수하여 차량용 고강도 강판이나 특수부품의 섬세한 용접등 다양하게 이용되고 있다. 그러나, 레이저용접중에 발생하는 재료 내부의 열응력은 다른 용접법과 동일하게 여전히 존재한다. 용접부 잔류응력은 용접 구조물의 제작과정 중에 발생하여 그 구조물을 사용하는 도중에 파괴에 직·간접적으로 영향을 끼치게 되며, 용접 구조물의 피로강도를 저하시키거나 취성 균열 및 피로 균열의 진전을 촉진시킨다.[1]

본 논문은 ESPI기법을 이용한 시간-평균법을 적용하여 Nd:YAG 레이저용접을 통하여 가공된 재료의 가공조건에 따른 공진주파수와 진동모드를 분석함으로써 재료가 갖는 잔류응력에 의한 공진주파수의 변화 및 모드특성을 분석하였다.

## 2. 이 론

진동을 측정하기 위한 ESPI 시스템은 면의변위를 측정하기 위한 간섭계와 동일하게 구성된다. 물체로 조사되는 물체광과 CCD 카메라로 직접 들어가는 기준이 되는 참조광이 뚜렷이 구분된다. Fig. 1 에 나타낸 바와 같이, 물체광은 물체에 조사되고 물체의 표면에서 반사되어 렌즈와 빔결합기(Beam Combiner)를 지나 이미지 평면에 상이 맺힌다. 참조광은 빔결합기를 거쳐 곧바로 이미지 평면에 조사된다. 이 두 빔은 이미지 평면에서 스페클패턴을 형성하게 된다. 이를 수식적으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 + \phi_2) \quad (1)$$

여기서, I 는 물체광과 참조광이 결합하여 얻어진 이미지의

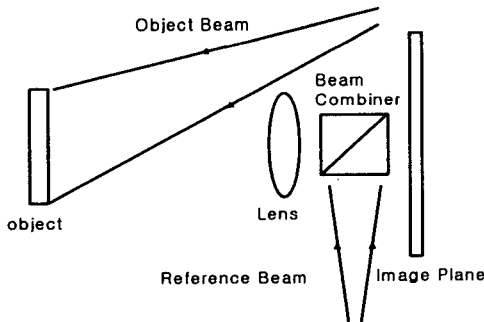


Fig. 1 Schematic of ESPI for measuring out of plane displacement.

밝기 분포이며,  $I_1$  과  $I_2$  는 물체광과 참조광의 밝기 분포,  $\phi_1$  과  $\phi_2$  는 물체광과 참조광의 위상이다.

변형 전과 변형 후의 변형 상태를 확인하기 위해 변형 전, 후의 이미지를 각각 얻어서 감산처리를 하여 모니터에 출력한다. 이 과정은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_s &= (V_{before} - V_{after}) \propto (I_{before} - I_{after}) \\ &= 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos \Psi - \cos(\Psi + \Delta \phi)] \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2} \sin(\Psi + \frac{1}{2} \Delta \phi) \sin \frac{1}{2} \phi \end{aligned} \quad (2)$$

이때,  $V_s$  는 CCD 카메라로부터 출력되는 신호이며,  $V_{before}$  와  $V_{after}$  는 변형 전, 후의 신호,  $I_{before}$  와  $I_{after}$  는 변형 전, 후의 이미지 밝기 분포,  $\psi = \phi_1 - \phi_2$ ,  $\Delta \phi$  는 변형으로 인한 위상 변화량을 각각 나타낸다.

식 (2)에 의해 얻어진 값은 음수와 양수를 갖기 때문에, 모니터에 출력되는 밝기 분포 B 는 식 (3)에 의해 얻어진 값을 갖는다.

$$B = 4K \left[ I_1 I_2 \sin^2(\Psi + \frac{1}{2} \Delta \phi) \sin^2 \frac{1}{2} \Delta \phi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서 K 는 상수이다.[2]

## 3. 실험

### 3.1 시험편

본 논문에서 사용된 시험편은 현재 차량제작에 널리 사용되고 있는 SCP1 차량용 강판으로 시험편 가공 치수는 각각 150mm×75mm×1.1mm (a×b×t)이며 시험편의 중심 상하방향으로 Nd:YAG Laser를 통한 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접을 실시하였다. 비드 온 플레이트 용접으로 가공한 것은 가공 간격에서 오는 변수를 제거하여 보다 정확한 시험편의 공진주파수와 공진모드를 측정하기 위한 것이다. Nd:YAG Laser 용접은 시험편의 중심(75mm)에 수직방향으로 가공하였고 그 출력은 1350W이며 용접 가공 속도를 각각 3000mm/min, 2500mm/min, 2000mm/min로 하여 속도에 따른 3종을 제작하였다. Table 1과 Table2에는 시험편의 화학성분과 KS B 0802 (금속재료인장시험)에 의하여 실험한 시험편의 기계적 성질을

각각 나타냈고, Table 3에는 Nd:YAG Laser 용접의 가공 조건을 나타내었다.[3]

Table 1 Chemical compositions of base metal(%)

C	Si	Mn	P	S
0.12이하	-	0.50이하	0.040이하	0.045이하

Table 2 Material properties of specimen

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Elongation [%]
166.7	308.4	203	0.31	46.4

Table 3 Laser welding conditions

Applied laser power	1350W
Travel speed	3000mm/min 2500mm/min 2000mm/min
Shielding gas	Ar
Shielding gas pressure	4L/min
Position of focus	-0.2mm
Joint configuration	bead on plate

### 3.2 실험방법

시험편(SCP 1)의 양쪽 끝을 고정하여 실험 하였으며 시험편의 측정영역의 크기는 가로 세로 150mm×75mm이다.

Fig 4는 진동계측시스템의 전체적인 구성으로 실험 대상체는 JIG에 의하여 양단 고정되어 있고 후면에서 스피커에 의한 가진이 이루어지도록 하였다. 가진 스피커는 삼미전자의 SMX-101이며, 함수발생기는 Agilent사의 33120A를 이용하였다. 대상물측정에 사용된 ESPI 시스템은 독일 Ettemeyer사의 Q-500 3D Vibro ESPI를 이용하였다. 본 실험에 앞서, 스피커의

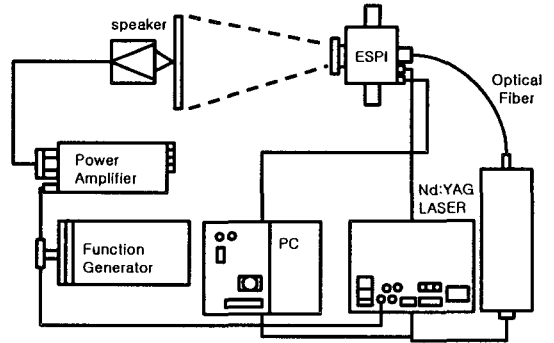


Fig. 2 Vibration measurement system







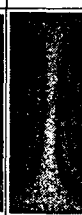

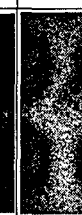
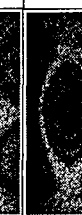
이상 유무를 파악한 후, SCP1 시험편에 대한 진동실험을 하였다. 본 실험은 시간-평균법을 이용하여 용접속도에 따라 제작된 시험편 즉, 용접이 이루어지지 않은 표준 시험편 (standard)과 용접 이송속도가 각각 3000mm/min(welding 1), 2500mm/min (welding 2), 2000mm/min(welding 3)인 4종의 시험편을 대상으로 공진주파수를 찾아내고 해당 시험편의 공진주파수를 비교 측정하는 순서로 실험을 하였다. 또한, 시험편에 가해진 주파수에 의하여 진동모드가 형성되면 그 진동모드가 나타나고 사라지는 주파수 범위내에서 줄무늬 수가 가장 많은 주파수 최대 공진주파수로 결정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Table 4에는 표준시험편(standard)의 공진주파수 및 모드 측정값과 ANSYS 해석에 대한 각 공진주파수별 진동모드 형상을 나타냈다. 평판의 진동 진폭이 최대일 때 진동모드를 저장한 것이다. ANSYS의 측정값과 ESPI의 측정값이 모드에 따라 차이가 있는데 이는 ANSYS 해석에 있어 시험편 양단고정 경계조건을 완전고정으로 하여 해석한 결과가 실제 실험에 있어서 JIG에 의한 시험편 양단고정 경계조건에 다소 차이가 있기 때문이다. 이는 시험편에 작용하는 JIG의 감쇄현상에 기인한다. 또한, 용접가공 후 시험편의 온도가 낮아지면서 시험편이 곡률의 갖는 문제를 야기하여 ANSYS 해석과 그 결과가 다르게 나타나게 된다.

Table 4에서의 보는 바와 같이 ANSYS의 모드형상과 시간평균기법에 의한 ESPI 측정 모드형태는 일치한다. 용접 이송속도에 따라 제작된 용접 시험편 welding1, welding2, welding3 은 표준 시험편(standard)과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 거의 동일한 형태의 기울기를 갖는다.

Table 4 Mode shapes at each natural frequency

ANSYS Mode	1st	2st	3st	4st	5st
Freq. (Hz)	257.0	416.7	708.7	955.9	1274
Shape					
ESPI Mode	1st	2st	3st	4st	5st
Freq. (Hz)	232	436	631	992	1423
Shape					

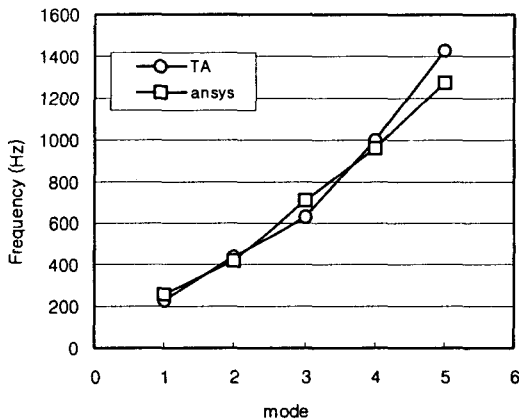


Fig. 3 Comparison of natural frequency obtained by ANSYS analysis and Time- average ESPI experiment for standard specimen

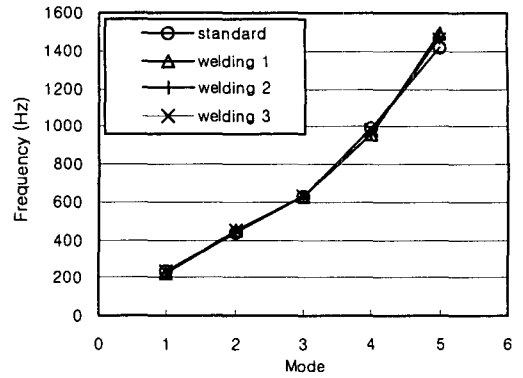


Fig. 4 Comparison of natural frequency obtained by Time-average ESPI for standard and welded specimen

비드부의 강성증가에 의한 영향을 크게 받게 되는 모드인 2모드는 가공 속도가 느려 입열량을 가장 많이 받은 시험편 welding1(3000mm/min)이 최대 공진주파수를 나타냈고, 가공 속도가 빠르고 입열량이 낮아 열 영향부가 가장 적은 시험편 welding3(2000mm/min)이 welding1(3000mm/min) 보다 낮은 공진주파수를 나타냈으나 2모드에서 최저 공진 주파수를 보인 welding2(2500mm/min)와 공진 주파수 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 2모드와 같이 비드부에 의한 영향을 크게 받게 되는 5모드에서도 이상과 같은

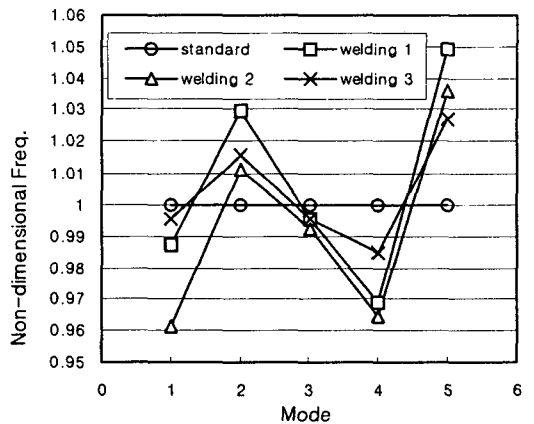


Fig. 5 Comparison of normalized frequency of which were shown in Fig. 4

결과를 볼 수 있었다. 3모드의 경우 비드부와 수평을 이루는 모드 형성으로 인하여 표준 시험편(standard)과 흡사한 공진주파수 대역을 모든 시험편이 나타내고 있다. 주목할 부분은 Fig.5에서 볼 수 있는 바와 같이 용접 가공 속도가 다른 시험편에 비해 가장 빨라 열 영향을 적게 받은 welding3(2000mm/min)이 표준용접 시험편(standard)에 가장 가까운 공진주파수를 나타내었다. 이것은 시험편에 용접 입열량이 적을수록 용접 가공되지 않은 재료와 비슷한 공진주파수를 이룬다는 것이다. 또한 열 영향이 많아 비드의 폭이 넓어질수록 진폭의 최대변위는 비드중앙에서 멀어진다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

이상과 같이 용접 가공속도에 따라 공진주파수와 공진모드의 특성을 파악하여 Nd:YAG 레이저의 용접 가공된 시험편에 대해 레이저가공을 전문으로 하는 연구소에 용접성 테스트를 의뢰한 결과 본 논문에서 용접성이 우수하다고 판단한 시험편에 대하여 동일한 평가를 하였다. 이를 통하여 ESPI기법중 하나인 시간평균법이 용접성의 평가에 이용할 수 있는 하나의 수단으로 사용 가능함을 알 수 있었다.

시간평균법은 대상의 표면적 전체에 대한 진동모드와 진동 주파수의 측정에 매우 유용하고 소음과 진동을 동반한 동적구조물 설계나 구조물에 대한 진동 측정에 적합하다. 또한 주파수의 변화에 따라 진동모드 형상이 실시간으로 변화되는 것을 볼 수 있기 때문에 진동모드 형상에 대한 공학적인 연구에 유용하게 사용 할 수 있다.

## 참고 문헌

(1) S. S. Kim, D. H. Kim, C. J. Kim, J. M. Lee, 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) H. C. Jung, K. S. Kim, J. S. Choi, S. S. Kim, K. S. Kang, S. T. Jung, T. H. Choi, 2003, "Development Non-contact Laser Measuring System for Vibration Analysis of Structures", *Korean Society of Precision Engineering Spring proceeding*, pp. 911~914.

(3) C. S. Cha, J. W. Park, I. Y. Yang, 2002, "Influence of Spot Weld Pitches on Collapse Characteristics for

SCP1 Vehicle Members", *Journal of KWS*, Vol. 20, No. 6, pp. 802~808.

(4) H. C. Jung, K. S. Kim, 2003, "Vibration Mode Shape Changed by Phase Angle in Vibration Testing Using Phase-Shifting ESPI", *Korean Society of Precision Engineering Spring proceeding*, pp.443~446

(5) K. L. Kwang, 2000, "A Study on the Measurement of Vibration Mode Shape using Holographic interferometry", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, vol. 9, No. 3.