



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2012년 2월
석사학위논문

ESPI를 이용한 하중조건에 따른 용접부의 잔류응력 정량평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

홍 성 성

ESPI를 이용한 하중조건에 따른 용접부의 잔류응력 정량평가

Quantitative Evaluation of residual stress on Welds
according to Loading Condition Using ESPI

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

홍 성 성

ESPI를 이용한 하중조건에 따른 용접부의 잔류응력 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2011년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

홍 성 성

홍성성의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김재열 ㉠

위원 조선대학교 교수 장완식 ㉠

위원 조선대학교 교수 김경석 ㉠

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
LIST OF PHOTOGRAPHS	vi
ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	5
제 1 절 레이저 스펙클과 간섭무늬 형성	5
1-1. 레이저 스펙클 형성과 크기	5
1-2. 간섭무늬 형성	9
제 2 절 정량해석을 위한 물체의 변형정보 추출	12
2-1. 위상이동(Phase shifting)	12
2-2. 결필침(Unwrapping)	13
제 3 절 광학간섭계(ESPI)	15
3-1. 면내변위 측정간섭계(In-plane ESPI)	15
3-2. 면외변위 측정간섭계(Out-of-plane ESPI)	17
제 4 절 용접 잔류응력	19
4-1. 잔류응력의 개념	19
4-2. 용접 잔류응력의 발생원인 및 영향	21

4-3. 용접 잔류응력 측정 방법	24
4-4. ESPI를 이용한 잔류응력의 측정 방법	28
제 3 장 실험장치 및 구성	31
제 1 절 측정시스템	31
1-1. ESPI 시스템	31
1-2. MTS 시스템	34
1-3. 용접 시험편	35
1-4. 용접 지그	37
제 2 절 실험방법	38
제 4 장 실험결과 및 고찰	40
제 1 절 ESPI를 이용한 용접 잔류응력 측정결과	40
제 2 절 위상지도(Phase map) 해석 결과 및 고찰	41
제 5 장 결 론	50
참 고 문 헌	51

LIST OF TABLES

Table 3-1	Technical data of ESPI system	32
Table 3-2	Technical data of PZT control device	33
Table 3-3	Specification of fatigue testing machine	34
Table 3-4	Chemical properties of base metal of specimen	36
Table 3-5	Mechanical properties of base metal of specimen	36
Table 4-1	ESPI phase-map by force variation of CO ₂ bead welded (both sides) specimen	40
Table 4-2	Results of CO ₂ bead welded (base metal cross-section) specimen by forces	47
Table 4-3	Results of CO ₂ bead welded (weld zone cross-section) specimen by forces	48
Table 4-4	Mean value of Young's modulus and residual stress	48

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Light scattering on object surface	5
Fig. 2-2 Speckle pattern	6
Fig. 2-3 Optical arrangement for recording of objective and subjective speckle pattern	7
Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave	9
Fig. 2-5 Principle of fringe pattern formation	11
Fig. 2-6 Examples of the wrapped and unwrapped phase data	14
Fig. 2-7 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement	16
Fig. 2-8 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to out-of-plane displacement	18
Fig. 2-9 Thermal and residual stresses by local heating and cooling	19
Fig. 2-10 Residual stress distribution on butt welded joint	21
Fig. 2-11 Schematic illustration of the weldments	24
Fig. 2-12 Figuration of welded specimen	28
Fig. 2-13 Equation expression of measuring residual stresses on weldment	29
Fig. 3-1 Schematic of ESPI system	31
Fig. 3-2 Schematic illustration of bead weld specimen	35
Fig. 3-3 Shape and size of specimen	35
Fig. 3-4 Schematic illustration zig for welding	37
Fig. 3-5 Experimental Method using ESPI	38
Fig. 4-1 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides bead welded specimen (F=10kN)	42
Fig. 4-2 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides bead welded specimen (F=12kN)	42
Fig. 4-3 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides	

bead welded specimen (F=14kN)	43
Fig. 4-4 Analysis results of phasemap of CO2-both sides	
bead welded specimen(F=16kN)	43
Fig. 4-5 Analysis results of phasemap of CO2-one side	
bead welded specimen(F=18kN)	44
Fig. 4-6 Analysis results of phasemap of TIG-both sides	
bead welded specimen(F=20kN)	44
Fig. 4-7 Deformation tensile of CO2-both sides	
bead welded specimen by forces	45
Fig. 4-8 Young's modulus of base metal under loading	46
Fig. 4-9 Young's modulus according to the cross-section	
under loading	46
Fig. 4-10 Residual stress according to the cross-section	
under loading	47

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3-1 Fatigue machine system	34
Photo. 3-2 Welding jig for bead weld	37
Photo. 3-2 Configuration of experiment system	39

ABSTRACT

Quantitative Evaluation of residual stress on Welds according to Loading Condition Using ESPI

Hong Sung Sung

Advisor : Prof. Kim Kyeong-Suk, Ph.D.

Dept. Advanced Parts & Materials
Engineering.

Graduate School of Chosun University

Generally welding is a technique that joins two kinds of metal materials by heating. It has been recognized important technique that become an indispensable presence for joining of iron and nonferrous metals due to development of various welding methods with modern industry development. Adhesion Strength of welding joint is higher than the strength of rivet joint that is used in conventional structure joint. Also, a structure using welding joint could be made earlier than a structure using rivet joint.

Welding plays a pivotal role in various industry fields such as shipbuilding, nuclear power plant, airplane, automobile and architecture industry because welding has many strong points like watertightness and airtightness. However, welding structures can be able to destroy unexpectedly due to the fact that quality of the material, residual stress, deformation, welding defects have an aptitude to happen easily in welding structures because welding is a kind of joint method by increasing heat. Especially, a main reason for leading to defects or destruction of structure can be residual stress.

Residual stresses are stresses that remain after the original cause of the stresses (external forces, heat gradient) has been removed. In other words,

stress could be occurred in the welding joints according to the change of temperature when external force does not act on the object. Especially, stress remains after cooling at room temperature completely because contraction stress is bigger when cooling

The occurrence of welding residual stress caused by heat stress is influenced by external restriction of the parent metal, welding heat input, size and thickness of the parent metal when welding. Residual stresses occur for a variety of reasons, including inelastic deformations and heat treatment. Heat from welding may cause localized expansion, which is taken up during welding by either the molten metal or the placement of parts being welded. When the finished weldment cools, some areas cool and contract more than others, leaving residual stresses.

The size and distribution of welding residual stress and welding deformation in welding structures have an effect on various sorts of damage like brittle failure, fatigue failure and stress corrosion cracking. So, research for this problem is necessary continuously.

The study about residual stress has been started and realized the importance of the study of residual stress in view of the cause investigation of destruction after the destruction by residual stress at military equipment like fighters and battleship and at industrial facilities during and after the World War. Since then, as material of industry facilities are becoming more and more high strength with industrial development, the study for residual stress is accelerating because residual stress of fairly large size remain in the high strength material.

There are several techniques that are used to measure the residual stress. They can be classified as theoretical and experimental methods. The theoretical method can be calculated by using physical constant like stress-strain and the modulus elasticity. However, the result of the theoretical method for measuring the residual stress sometimes can not be acquired correctly because of the dynamic complexity and diverse variables used in the process of calculation. Because of these reasons, data acquisition

by experimental measuring method has been developed. These experimental methods can be classified as destructive and non-destructive methods. Measuring residual stress through destructive method has been established in various means but there is a fundamental problem that measuring objects has to be destroyed. So, nowadays non-destructive method has been developed rather than destructive one. There are lots of non-destructive method for measuring residual stress such as x-ray diffraction, neutron diffraction, ultrasonic method, and so on. X-ray diffraction is a non-destructive method which allows the measurement of residual stress in isolated spots spaced distances as small as 100 micrometers but it is easily affected by the surface condition. Neutron diffraction method can measure the internal stress of material but it needs very expensive neutron emission. Ultrasonic technique also has lots of merits, the short measurement time, simple equipment, measuring both the surface stress according to the sort of waves and internal stress. However, it can not easily measure the stress distribution that change in detail locally. Because of these existing problems in non-destructive method, this paper proposed the non-destructive and non-contact method using laser and optical interferometer as a method for measuring residual stress.

Non-destructive measurement techniques with the merits of rapid response and manifold applications of measuring object has been and important role in industries from the safety diagnosis of infrastructures to the reliability evaluation of products. Non-destructive and non-contact measuring techniques applied with laser were established as laser application has been widely spread in various industry fields with the advancement of non-destructive measuring technique. These laser applied measurement methods can measure lots of objects in a short time with non-destructive, non-contact, real-time and high resolution. These are Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Shearography based on optical metrology. Application of these techniques in internal and external industry fields is gradually growing.

Laser application techniques have been advanced from displacement measurement technique based on interferometer to laser based ultrasonic testing, Holography, speckle correlation interferometry, and so on. Particularly, holography and speckle correlation interferometry get the merits that it can the surface displacement on large area with real-time, high resolution and non-contact · non-destructive method, so these are utilized in various industry field for vibration analysis, deformation analysis and non-destructive testing. With advanced computer science and image processing technology, speckle correlation interferometry for non-destructive measurement and inspection has advanced to ESPI and Shearography. Because of these technology development, the film of ESPI technique was changed to digitalized CCD camera and has evolved to digital technology that is united with image process technique. So, ESPI as a technology that can measure and analyse the whole area of object in real-time precisely has been utilized in various industry fields currently.

In this study, therefore, the method for measuring residual stresses using ESPI technique that is one of the laser applied measurement technique excellent in the view of field application was proposed. Also, theoretical approaches was suggested and it was verified through experiments. The basic concept for measuring residual stresses is that there are difference of deformation and strain between the basic material part and welded part of a specimen when doing tensile and compression test for the welded specimen with equal force. So, the residual stress was measured through the proposed method with ESPI measurement system. The proposed measurement method as a basic study combined with theory and experiments applied for residual stresses prediction and developments of safety estimation technique will contribute to establishing a basis for improving the safety, integrity, conservativeness of weldment structures.

제 1 장 서 론

용접(welding)은 두 개의 접합 할 금속재료 부분에 열을 가하여 용융상태나 반용융상태로 하여 접합하는 기술로서, 두 금속사이에 용가재인 용접봉을 사용하여 접합하는 방법¹⁾으로 제 1차 및 제 2차 세계대전을 계기로 비약적으로 발달해서 현재로서는 선박, 원자력, 자동차, 항공기, 건축 및 각종의 구조물이나 산업기계의 제조에 필수 불가결한 가공기술로 되어 있다²⁾. 이러한 용접 이음은 종래 구조물 조립에 잘 사용되었던 리벳 이음보다도 접합강도가 높고, 가볍고 구조물을 단기간에 건조할 수 있으며, 수밀성 및 기밀성이 뛰어난 장점을 가지고 있다³⁾. 그러나 용접은 단시간에 고열을 수반하는 복잡한 금속학적 접합방법이므로 심한 재질열화, 변형, 잔류응력 또는 여러 가지의 용접 결함을 일으켜 이로 인한 용접 구조물의 성능을 손상시키기 쉽다⁴⁾. 그중에서도 특히 용접 구조물의 결함 유발 및 손상에 이르게 하는 주원인은 잔류응력이라 할 수 있다.

잔류응력(residual stress)이란 용접에 따른 모재의 자유로운 열변형이 주위의 구속력에 의해 구속되어 용접종료 후에도 모재에 남아 있는 응력을 말한다. 특히, 용접 시 용접이음부에서 국부적으로 집중적인 열이 가해짐에 따라 모재는 급속한 열팽창 및 수축으로 인하여 잔류응력이 발생할 가능성이 높다. 용접에 의한 잔류응력의 발생은 급속히 고온으로 가열된 용접부위의 열응력에 의한 것으로서 용접 시 모재의 외적 구속, 모재의 크기, 용접입열, 판두께 등의 영향을 받는다. 용접에 의한 잔류응력은 용접선 부근에서 그 재료의 항복응력에 가까운 인장응력이 발생한다. 따라서, 용접구조물에는 외력이 부가되기 이전에 비교적 큰 응력이 걸려있으므로 용접잔류응력 크기 및 분포 상태는 취성파괴, 피로강도, 응력부식균열, 좌굴, 시효변형과 같은 다양한 형태의 손상에 직접적으로 영향을 끼쳐 잔류응력을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다^{5)~8)}.

잔류응력에 관한 연구는 Boulton, Rosenthal 등에 의해 연구되었다. 이들의 연구에 의해 용접부재의 열탄소성 거동에 관해서 귀중한 기증이 얻어졌지만, 당시의 해석방법으로는 용접의 구체적인 문제에 적용하기에는 곤란한 점이 많았고, 일반적

으로 1차원 문제로서 취급되어 범위가 극히 단순하고 이상화된 경우에만 계산의 대상이 되었다. 1976년에 피로에 있어서 잔류응력의 효과를 연구하기 위한 팀이 J. Throop을 의장으로 ASTM Committee E-9로서 설립되었으며, 잔류응력장의 특성과 측정에 대한 중요성을 강조하기 시작하였다. 1978년에는 잔류응력 측정에 관한 기술위원회가 SESA(Society for Experimental Stress Analysis)에 의하여 설립됨과 같이 잔류응력 측정에 관한 정보를 널리 배포하고 관련 연구를 촉진시켰다. 이 때 이론 확립과 더불어 산업현장에서의 적용에 대한 활발한 연구가 시작되었다. 이후 산업발달과 더불어 구조물 및 산업설비의 재료가 고강도의 다양한 용접 구조용 재료의 적용이 확대되고, 용접구조물이 거대화되면서 용접잔류응력이 구조물에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다^{9)~11)}.

잔류응력의 분포를 측정하는 방법에는 크게 이론적 해석 방법과 실험적 측정 방법이 있다. 이론적 해석 방법은 응력-변형률과 탄성계수 등 필요한 물리상수를 이용하여 계산할 수 있지만 이론적으로 계산하는 과정에서 사용되는 여러 가지 변수 및 역학적인 복잡성에 의해 정확한 잔류응력 측정이 어려울 수도 있다. 이 때문에 실험적 측정 방법에 의한 잔류응력 측정이 점차 발전하고 있으며 이러한 실험적 측정에 의한 잔류응력 측정 방법에는 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 구분할 수 있다. 파괴적인 방법은 홀 드릴링(hole drilling) 방법, 톱 절단(saw cutting) 방법 등과 같이 측정 대상물을 부분적 또는 전체를 파괴시켜야 한다는 근본적인 문제점이 있는 반면 비파괴적인 방법은 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들의 영향력을 배제시켜 줄 필요성이 있다. 최근에 잔류응력의 측정은 비파괴적인 방법으로 나아가고 있으며, 측정방법으로는 X-선 회절법(X-ray Diffraction method), 중성자 회절법(neutron diffraction method), 초음파 측정법(ultrasonic method) 등이 다양히 연구되고 있다^{12)~15)}. 하지만 X-선 회절법을 제외하고는 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질을 측정해야 하기 때문에 이 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들의 영향력을 배제시켜줄 필요성이 있다. 한편 blind-hole drilling법과 같이 반 비파괴적인 방법도 많이 쓰이고 있으나 이는 두께 방향의 응력 분포가 심하지 않아야 하며, 존재하는 잔류응력이 항복응력의 반을 넘지 않아야 된다는 조건이 필요하고 미세한 구멍일

지라도 측정 대상물에 손상을 주어야 한다는 특징을 가지고 있다^{16),17)}. 또한, X-선 회절법(X-ray Diffraction method)은 표면 상태에 따라 영향을 많이 받는다는 가장 큰 단점이 있으며, 중성자 회절법(neutron diffraction method)은 내부응력까지 측정 가능한 장점이 있으나 비용이 많이 들어가는 중성자 발생원이 필요하다. 초음파 측정법(ultrasonic method)은 측정 시간도 짧고 장비도 간편하며, 내보내는 파의 종류에 따라서 표면응력과 내부응력 모두를 측정할 수 있으나 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력분포에는 측정이 용이하지 않다¹⁸⁾. 이러한 기존 잔류응력 측정 방법의 문제점 때문에 비파괴·비접촉 방법인 레이저를 응용한 잔류응력 측정 방법을 제시하고자 한다.

비파괴 계측 기술은 검사결과의 신속성, 계측대상의 다양성 등의 장점으로 대형 구조물의 안전진단에서부터 소형제품의 신뢰성평가 분야까지 산업전반에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 비파괴 계측 기술의 발전과 함께 레이저의 활용이 산업 전반에 걸쳐 널리 확산됨에 따라 레이저를 응용한 비파괴·비접촉 검사 기술이 확립되었다^{19)~21)}. 이러한 레이저 응용 계측 기술은 짧은 시간에 많은 대상체를 비접촉, 실시간, 고분해능으로 검사가 가능한 기술로써 국내외 산업현장에서의 활용이 점차 높아지고 있는 추세이다. 레이저응용 계측기술은 간접계 기반의 변위측정기술에서 레이저유도초음파, 홀로그래피(Holography), 스페클 상관간섭법 (Speckle correlation interferometry) 등의 다양한 분야로 발전을 하고 있으며, 홀로그래피와 스페클 상관간섭법은 넓은 면적의 표면변위를 동시에 고분해능으로 측정한다는 장점으로 진동 또는 변형해석 분야에 많은 활용하고 있다^{22),23)}. 비파괴 계측 및 검사를 위한 스페클 상관간섭법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 Shearography로 발전을 하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사 등의 분야로 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 잔류응력을 측정하기 위하여 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하여 현재 선박 및 원자력 분야 등 여러 산업 분야에서 문제시 되고 있는 용접부의 잔류응력을 검출하기 위한 방법을 고안하여 그 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통한 검증을 하고자 한다. 본 연구에서 잔류응력을

측정하기 위한 기본개념은 용접시험편을 동일하중으로 인장을 시켰을 경우 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것에 착안하였고 이를 비드 용접으로 제작된 용접시험편을 ESPI 계측시스템으로 동시에 측정한 후 제시된 방법을 통하여 용접부위의 잔류응력을 측정하는 것이다. 본 연구에서 제안하는 용접부의 잔류응력 측정법은 잔류응력 예측 및 건전성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접에 따른 각종의 구조물이나 산업기계의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 스페클과 간섭무늬 형성

1-1. 스페클 형성과 크기

레이저 스페클(laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 Fig. 2-1과 같이 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 Fig. 2-2와 같이 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클 패턴(speckle pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사되니 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 스페클의 크기는 국소적인 영역에서 밝기의 최대치와 최소치 사이의 거리를 통계적으로 평균한 값으로서 Speckle size는 결상계의 분해능에 크게 좌우되며 조리개의 크기와 연관되어 있다. 다시 말해서 카메라 조리개를 열면 스페클은 작아지고, 조리개를 닫으면 스페클은 커지게 된다. 이 스페클 패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 빛의 강도(intensity) 분포로 기록되어진다.

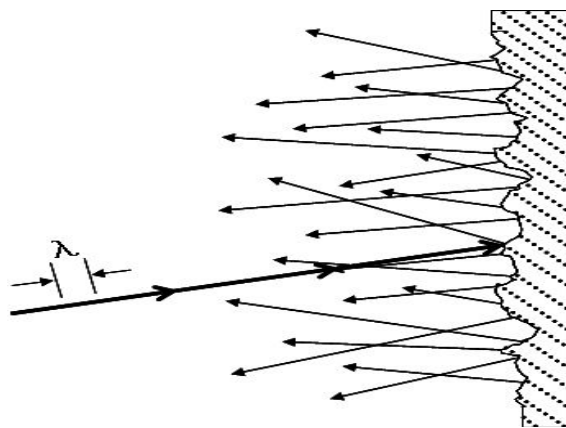


Fig. 2-1 Light scattering on object surface

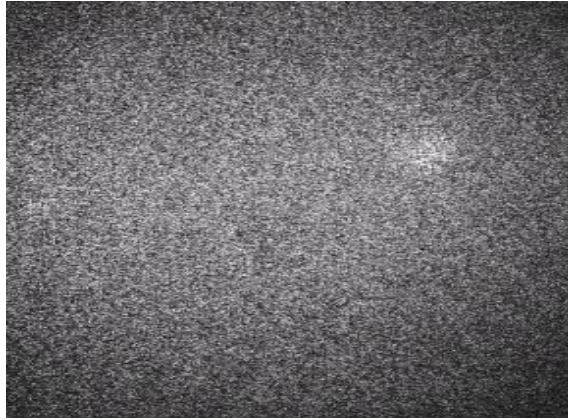
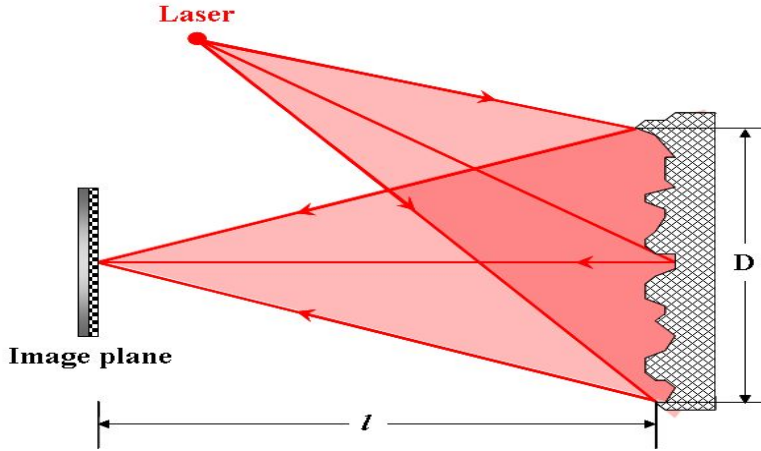


Fig. 2-2 Speckle pattern

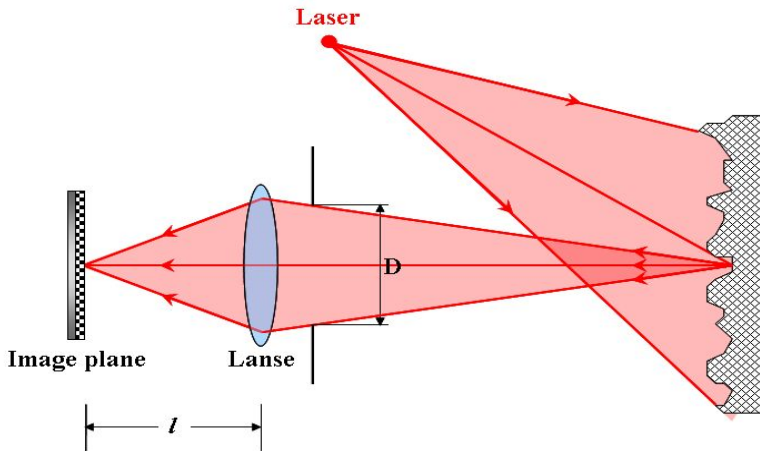
스펙클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나뉘게 되며 Fig. 2-3에서 objective speckle과 subjective speckle의 형성을 보여주고 있다. 즉, 이 두 스펙클의 차이는 결상렌즈의 사용여부에 따라서 구별되며, 그 크기 또한 다르게 나타난다. 스펙클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스펙클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스펙클 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 빛의 강도 사이의 거리를 스펙클 크기라고 추정할 수 있다^{24)~27)}. Objective speckle 크기의 정의는 물체표면 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 viewing plane(AB plane)에 형성되는 스펙클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식(2-1)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다²⁸⁾.

$$S_{obj} = 1.22\lambda \frac{L}{D} \quad (2-1)$$

여기서, λ : 물체표면에 조사되는 레이저의 파장, L : 물체표면과 결상면 사이의 거리, D : 물체에 조사된 면적이다.



(a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2-3 Optical arrangement for recording of objective and subjective speckle pattern

Fig. 2-3에서 확인할 수 있듯이 objective speckle은 결상렌즈를 사용하지 않으며 공간상의 평면에만 의존성이 있다. 하지만 subjective speckle은 ESPI와 같이 결상렌즈를 사용할 때 발생하며, 스페클의 공간분포는 결상시스템의 회절한계에 의해 결정된다.

스페클 상관 간섭법에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존한다. 결상렌즈가 사용되어 형성이

되는 스페클로 정의된 subjective speckle은 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 정의된다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상하여 물체의 한 점과 결상면의 한 점이 1:1 대응이 된다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못함으로, 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 subjective speckle의 크기는 조셉 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer)의 회절이론과 레일리 기준(Rayleigh criterion)에 따라 베셀 함수(Bessel function)의 중앙의 최대 밝기가 1차 최소밝기와의 중첩이 일어났을 때의 거리로 정의하고 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 다음 식과 같다.

$$S_s \approx 0.61 \frac{\lambda}{N.A} = 1.22(1+M)\lambda F \quad (2-2)$$

여기서, $N.A$: Numerical aperture, M : 렌즈 확대배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F : 렌즈의 구경비(f-number) 이다.

스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 zoom 렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6 배(1/2 inch format CCD 카메라와 15 inch 모니터(pixel pitch: 0.297 mm))를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 크기는 37.07 mm가 된다²⁹⁾.

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1+M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-3)$$

또한 subjective speckle의 물체표면에서 크기는 식(2-3)으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다^{30),31)}. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

1-2. 간섭무늬 형성

스페클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)는 물체의 변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 이러한 상관간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형 전의 스페클 패턴을 기준으로 물체변형에 따른 스페클패턴의 변화를 연속으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있다. 스페클 상관간섭무늬 형성을 위한 간섭계는 민감도를 높이기 위해 참조광을 사용하는데, 참조광의 종류에 따라 스페클 패턴과 uniform field의 합성, 두 스페클패턴의 합성으로 나눌 수 있다. ESPI에서는 전자의 경우를 면외변위 측정 간섭계로 많이 사용하고, 후자를 면내변위측정 간섭계로 많이 사용하고 있다.

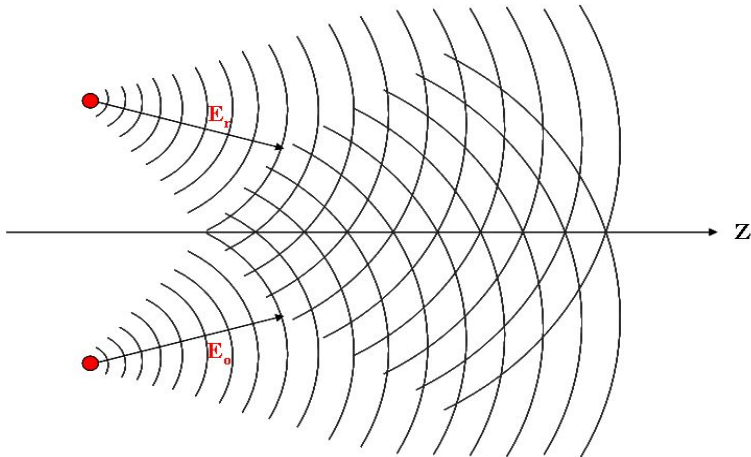


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

일반적으로 물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광, 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광이라 한다. Fig. 2-4는 두 개의 광파의 합성을 나타낸 그림으로서 여기서 참조광($E_{Reference}$)은 물체광(E_{Object})에 의해 형성된 스페클을 z -축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 물체광과 참조광의 파동방정식은 식 (2-4)와 같이 쓸 수 있다.

$$E_{Object} = A_O \cos(\delta_O - wt) \quad (2-4)$$

$$E_{Reference} = A_R \cos(\delta_R - wt)$$

여기서 E_{Object} : 물체광, A_O : 물체광의 진폭, δ_O : 물체광의 초기위상, $E_{Reference}$: 참조광, A_R : 참조광의 진폭, δ_R : 참조광의 초기위상, w : 전파속도, t : 시간이다. 참조광과 물체광은 간섭계에 의해 같은 공간상에서 선형적인 중첩할 수 있으며, 이때 발생한 합성광 E 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = E_{Reference} + E_{Object} \quad (2-5)$$

합성광을 CCD 카메라에서는 빛의 강도(intensity)로 나타내게 되며, CCD 카메라 하나의 화소에 기록되는 빛의 강도(intensity)는 식 (2-6)과 같이 표현이 된다.

$$\begin{aligned} I &= |A_O^2| + |A_R^2| + 2|A_O||A_R|\cos\phi \\ &= I_{Object} + I_{Reference} + 2\sqrt{I_{Object}I_{Reference}}\cos\phi \end{aligned} \quad (2-6)$$

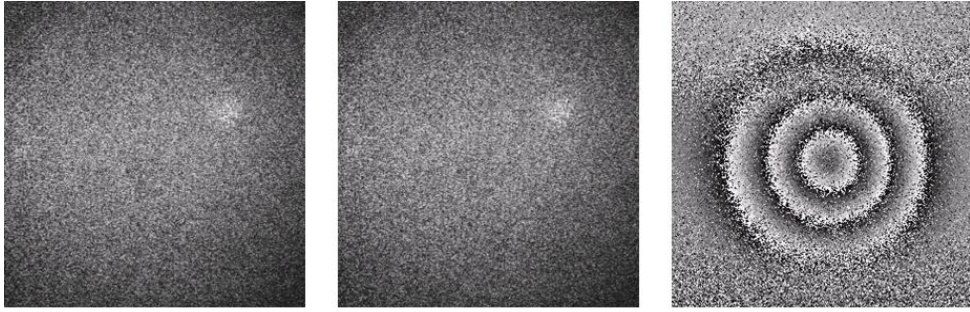
여기서 I : 합성광의 빛의 강도, $I_{Reference}$: 참조광의 빛의 강도, I_{Object} : 물체광의 빛의 강도 ϕ : 물체광과 참조광의 위상차이다.

물체의 변형 정보를 나타내는 스펙클 상관 간섭무늬는 앞에서 언급한 바와 같이 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(intensity)들은 CCD카메라의 cell에 결상되며 출력되는 시그널은 빛의 강도(intensity)에 비례하므로 대상체의 변형 전·후에 대한 스펙클 패턴의 비교를 통해 실시간적으로 가시화된다. ESPI에서는 물체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전·후의 스펙클 상태의 감산처리를 통하여 Fig. 2-5와 같이 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전·후의 CCD 카메라에 기록되어진 스펙클패턴을 아래 식으로 나타낼 수 있다^{32),33)}.

$$I_{before} = I_{object} + I_{reference} + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\phi \quad (2-7)$$

$$I_{after} = I_{object} + I_{reference} + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2-8)$$

여기서 I_{before} : 물체변형 전 빛의 강도, I_{after} : 물체변형 후 빛의 강도, $\Delta\phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다.



(a) Before

(b) After

(c) Phase map

Fig. 2-5 Principle of fringe pattern formation

주변 빛의 강도로 인해 선명도가 좋지 않은 addition에 의한 스펙클 상관 간섭무늬보다는 대비(contrast)면에서 우수한 subtraction에 의한 스펙클 상관 간섭무늬가 주로 이용되고 있다. 변형 전·후의 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-9)와 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_{subtraction} &= I_{before} - I_{after} \\
 &= 4\sqrt{I_{object}I_{reference}} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right)\sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

여기서, $I_{subtraction}$: 물체변형전후 빛의 강도 분포의 감산 처리된 빛의 강도이다. 실제적으로 모니터에서 관찰되는 빛의 강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_{object}I_{reference}} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right)\sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \right|
 \tag{2-10}$$

여기서 K : 모니터 밝기분포 상수 이다. 식(2-10)과 같이 변형 전후의 스펙클을 감산 처리함으로써 나타나는 줄무늬를 스펙클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)라고 한다. 식(2-10)에서 물체의 변형에 따른 위상변화($\Delta\phi$)를 추출함으로써 물체의 변형을 측정할 수 있다.

제 2 절 정량해석을 위한 물체의 변형정보 추출

식 (2-9)에서 물체의 변형에 따른 위상변화를 추출하기 위해서는 4개의 미지수가 존재하게 되어 물체의 변형위상을 직접 추출할 수 없게 된다. 물체의 변형위상을 추출하는 방법으로 등간격의 프린지패턴에 대해 화상처리를 이용하여 프린지패턴으로부터 line를 추출하고 이 사이를 보간함으로서 물체의 변형을 추출하는 방법, 상관간섭무늬 분포에 대한 2D 감산-합산 처리에 의한 방법(2D subtraction-addition method), 공간 위상이동기법(spatial phase shifting method)을 이용한 위상의 추출 등의 다양한 방법으로 위상을 추출하게 된다^{34)~36)}. 이러한 방법 중에서 K. Creath에 의해 제안된 시간의존성 위상이동기법(temporal phase shifting method)은 가장 적용이 용이하고 효과적인 방법이다. 이 위상이동기법은 식(2-7)에서 3개의 미지수(I_1, I_2, ϕ)를 구하기 위해 PZT(piezo-electro transducer)를 참조광의 빛의 경로에 삽입하여 위상변조를 하여 최소 3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구할 수 있는 방법이다. 위상이동기법을 적용하여 변형 전과 후의 위상을 구함으로서 물체의 변형위상을 직접 추출할 수가 있다.

2-1. 위상이동(Phase shifting)

PZT(piezo-electro transducer)를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다³⁷⁾.

본 연구에서 사용한 위상추출 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 $\pi/2$ 씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식 (2-11)과 같이 얻게 된다.

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \phi$$

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi + \frac{\pi}{2})$$

$$I_3 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi + \pi)$$

$$I_4 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (2-11)$$

4개의 방정식을 식 (2-12)와 같이 조합하여 CCD pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(phase map)를 형성하게 된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \quad (2-12)$$

ESPI에서 변형 해석을 위한 실험에서는 식(2-7)의 변형 전과 변형 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(ϕ_b)과 변형 후의 위상(ϕ_a)을 각각 구하고 그 차이를 구함으로써 실제 물체변형을 식 (2-13)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a \quad (2-13)$$

하지만 이 방법은 4개의 방정식을 얻기 위한 위상변조가 이루어지는 시간동안 안정된 상태를 유지하여야 하며, 위상이동 중에 발생하는 물체의 변형 또는 외부잡음은 오차의 요인이 된다.

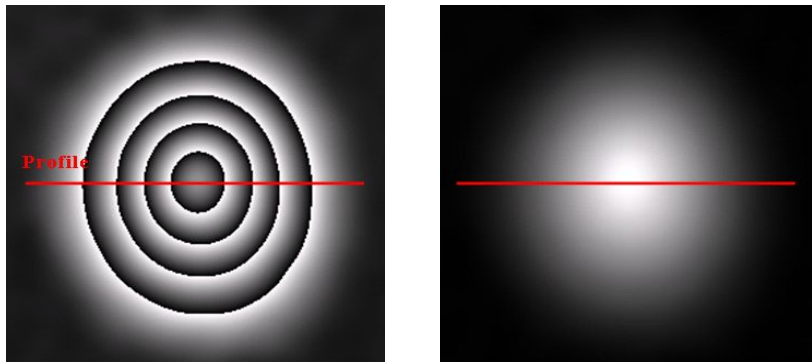
2-2. 결핍침(unwrapping)

위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상지도(phasemap)는 위상을 추정하기 위한 arc-tangent함수의 modulo- 2π 특성으로 인해 $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 구성된 톱니 바퀴형상으로 모호성을 가지게 된다. 결핍침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 식(2-12)의 arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정이며, 이에 대한 예를 Fig. 2-6에 나타내었다. 위상 결핍침에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있으며 적용하고자 하는 대상 및 조건에 따라 적절한 위상 결핍침 알고리즘을 적용하여야 한다^{38),39)}.

위상 결핍침을 하기 위해서는 먼저 arc-tangent 함수가 $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 이를 연속 위상으로 변환하여야 한다. 식(2-14)을 이용하여 결핍침 된 위상을 구하게 된다.

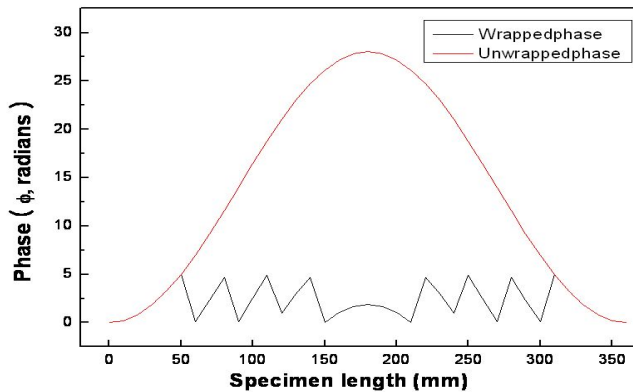
$$\phi_{unwrapping} = \phi_{wrapping} + 2\pi N \quad (2-14)$$

여기서, $\phi_{unwrapping}$: unwrapped phase, $\phi_{wrapping}$: wrapped phase, N : fringe order 이다. 결필침을 위한 차수(N)의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면 N 을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다. 본 연구에서는 위상이동 및 결필침 알고리즘을 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH., Germany)을 이용하였다.



(a) Wrapped phasemap

(b) Unwrapped phasemap



(c) Line profile data of the wrapped and unwrapped phasemap

Fig. 2-6 Examples of the wrapped and unwrapped phase data

제 3 절 광학 간섭계(ESPI)

가간섭성이 뛰어난 레이저를 물체의 표면에 조사하면 스페클이라 일컬어지는 밝고 어두운 작은 점들이 물체면 위에 뿌려진 것처럼 보이게 된다. 이때 우리 인간의 눈은 렌즈와 같은 역할을 하여 물체 표면에서 반사된 스페클이 눈에 결상하게 된다. 이와 같이 렌즈를 이용한 스페클의 결상을 주관적인 스페클이라 하며, 이때 주관적 스페클의 크기는 렌즈와 레이저의 파장과의 관계에 의해 결정된다.

이렇게 형성된 스페클에 같은 파장의 레이저 빛을 하나 더(reference beam) 조사하면 두 빛의 간섭성이 일어나 스페클 패턴이 형성된다. 이 스페클 패턴을 이용하여 물체 표면의 변위 발생 시에 발생하는 변형 전후의 스페클 패턴을 빼서 줄무늬를 만들고 이를 분석하여 위상차 및 변위량을 구하는 것이 스페클 패턴 간섭계이다. 여기서 CCD카메라를 이용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 전자적으로 화상처리 및 변형 정보를 얻는 방법을 전자 스페클 패턴 간섭계(ESPI)라 한다.

스페클 상관 간섭법에서는 변형 측정 목적에 따라 크게 면내 변위 간섭계(in-plane interferometry)와 면외 변위 측정 간섭계(out-of-plane interferometry)로 구분 지을 수 있으며 중첩에 의해 간섭을 일으키는 두 beam을 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)이라 정의하며 이 두 beam 중 참조광(reference beam)이 시험편 조사면에서 난반사된 speckle field 인지 조사되지 않은 uniform field 인지에 따라 면내 변위와 면외 변위에 민감한 간섭계로 결정된다. 본 연구에서는 인장 실험을 통해 대상체의 면내 변형을 측정하기 위하여 면내 변위에 민감한 In-plane ESPI를 구성하여 실험을 실시하였다.

3-1. 면내 간섭계 (in-plane ESPI)

면내 변위 측정 간섭계의 기본 개략도는 Fig. 2-7에 나타내었다. 광 분할기 (beam splitter)에 의해 분리된 두 빔은 측정 대상체의 변형 측에 평행하게 같은 각도로 조사되며 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)은 광학적으로 거친 표면에서 난반사되고 speckle field를 형성하여 중첩된 speckle들이 렌즈를 거쳐 image plane에 결상 된다. 이때의 측정 대상체 표면에 대한 거칠기와 변위, 변형 정보를 포함하는 스페클 패턴은 대상체의 변형에 대한 스페클 패턴과 비교함

으로써 in-plane 변위에 대한 정보만을 레이저 파장(laser wavelength) 단위로 얻어낼 수 있다.

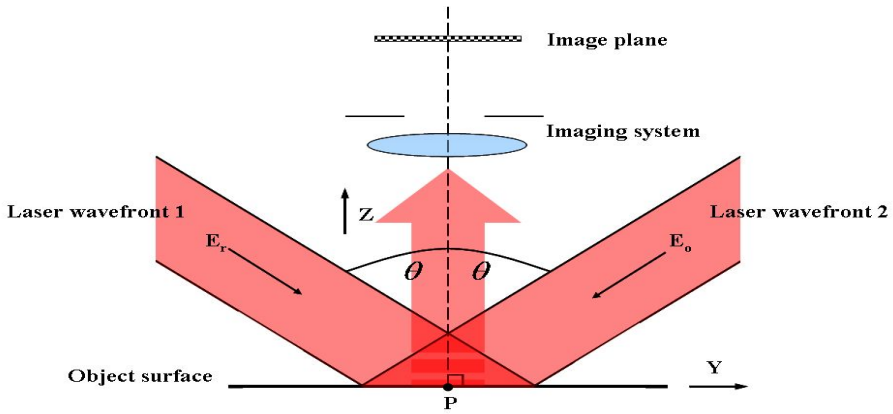


Fig. 2-7 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement

이러한 ESPI를 이용한 면내변위 측정법은 면내변위에 민감하게 레이저 빛의 조사 방향을 조정하여 측정하는 방법으로써 이 측정법은 Leendertz에 의해 제안된 방법으로 참조광(reference beam)을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광(object beam)을 같은 각도로 조사하여 측정하는 것이다. 여기서 y방향이 지면에 수직방향일 때 물체는 xy 평면상에 있고 두 개의 빛이 동일한 각도(θ)로 조사되고 있다. 이때 물체 표면 위의 P점에서 복사조도 I 는 아래와 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \gamma \quad (2-15)$$

여기서, γ 는 P점에 조사되는 두 빛의 위상차이고, I_1, I_2 는 두 입사광의 복사조도이다. 만약 P점이 $\vec{d}(d_x, d_y, d_z)$ 만큼 움직였을 때, 복사조도는 식(2-16)와 같이 된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\gamma + \Delta\phi) \quad (2-16)$$

여기서, $\Delta\phi$ 는 물체의 움직임에 의하여 생긴 위상차이다. 위상차와 물체의 변위 \vec{d} 와의 관계는 민감도벡터(sensitivity vector)를 이용하여 얻을 수 있는데 입사광 1에서 총 위상차(δ_1)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\delta_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} & (2-17) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)]
\end{aligned}$$

여기서 \vec{k}_1 는 입사광 1의 진행벡터이고, \vec{k}_3 는 관찰광의 진행벡터이며, i, j, k 는 각각 x, y, z 방향의 단위벡터(unit vector)이다. 이와 같은 방법으로 입사광 2에서 총 위상차(δ_2)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\delta_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_2) \cdot \vec{d} & (2-18) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)]
\end{aligned}$$

이때 \vec{k}_2 는 입사광 2의 진행벡터이다. $\Delta\phi$ 는 식(2-17), 식(2-18)의 차이이므로 두 식을 빼주면, 식(2-19)가 된다. 따라서 만약 어두운 줄무늬(dark fringe)가 나타나게 되면 $2n\pi$ 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 면내변위 d_x 는 식(2-20)와 같이 된다.

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)d_x \sin\theta \quad (2-19)$$

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (2-20)$$

3-2. 면외 간섭계 (out-of-plane ESPI)

Fig. 2-8은 면외 변위 측정을 위한 대표적인 간섭계로서 물체로 직접 조사되어 subjective speckle을 형성하는 물체광(object beam)과 CCD 카메라 촬상소자에 Uniform field 형태로 직접 조사되는 참조광(reference beam)으로 나눌 수 있다.

물체 변형 전에 objective speckle pattern은 참조광(reference beam)과 간섭하여 제 2의 스페클 패턴 즉, 변형 전 스페클 패턴을 형성하고, 물체가 변형 후에 objective speckle은 참조광(reference beam)과 간섭하여 변형 후의 스페클 패턴을 형성하게 된다. 스페클 상관 간섭무늬는 변형 전과 변형 후의 스페클 패턴의 감산처리로부터 형성이 되고, 위상이동기법을 적용하여 변형 전·후의 위상을 추출하여 물체의 변형을 측정할 수 있다.

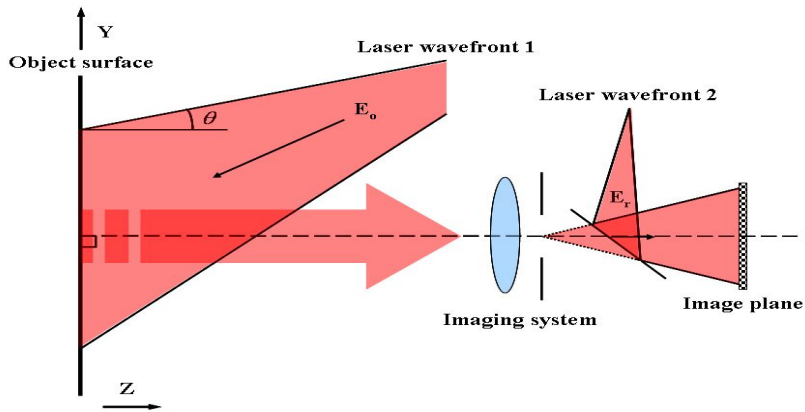


Fig. 2-8 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to out-of-plane displacement

제 4 절 용접 잔류응력

4-1. 잔류응력의 개념

용접에 의해 접합부재가 국부적으로 가열과 냉각과정의 열사이클을 받으면, 불균일한 열변형을 분포와 고온에서의 소성변형을 및 용접금속의 수축 등에 의해 응력이 발생하며, 실온까지 냉각한 후에도 이 응력은 잔류하게 된다. 이 용접열사이클 과정에서의 응력을 열응력 또는 용접응력이라 부르며, 접합부가 완전히 냉각한 후에 잔류하는 응력을 용접잔류응력이라고 한다. 용접부의 냉각과정에서의 응력은 용접금속의 수축에 동반하는 응력으로 여겨지기 때문에 일반적으로 수축응력이라고 불리어지기도 한다.

용접잔류응력의 발생 메카니즘을 설명하기 위해 Fig. 2-9에 나타난 직사각형 판재에 대해 A, B, C 세 개의 영역으로 나누고, 편의상 영역 B와 C는 제외하고 A만을 가열할 수 있다고 가정한다. Fig. 2-9(a)와 같이 영역 A만을 가열하게 되면 B와 C영역에 의해 구속되므로 영역 A는 자유롭게 팽창할 수 없게 되어 응력이 발생하게 된다. 즉, 판재에 발생하는 열응력은 Fig. 2-9(a)와 같이 A에는 압축응력 σ_1 이 생기고, 영역 B와 C에는 이것에 대응하는 인장응력이 σ_2 와 σ_3 가 발생한다. 이것은 영역 B와 C가 영역 A를 구속하기 때문에 생기는 현상이며, 그 결과로 인해 판재는 Fig. 2-9(a)에 표시한 것과 같은 변형이 동반된다.

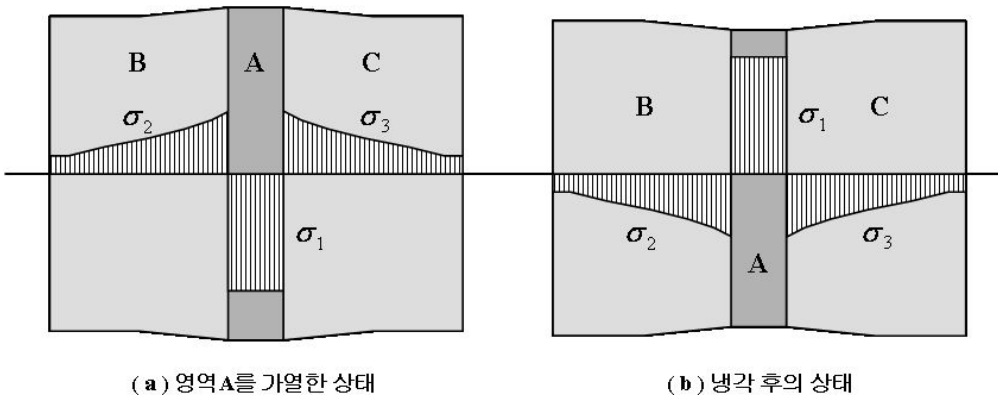


Fig. 2-9 Thermal and Residual Stresses by local heating and cooling

압축응력 σ_1 은 영역 A의 온도상승과 함께 점차 그 절대치가 증가하지만 그 값이

무한정 커지는 것은 아니다. 온도가 증가함에 따라 재료는 연화하여 변형저항이 감소하므로 이에 의해 압축응력은 한정되며 온도상승에 따른 지속적인 팽창은 압축소성변형을 일으키게 된다. Fig. 2-9(b)는 영역 A를 가열 및 냉각한 경우 냉각후 판재의 응력과 변형의 상태를 나타낸 것이다. 응력분포는 Fig. 2-9(a)와 정확히 반대 형상을 갖게 되었는데 영역 A에는 인장응력이 영역 B와 C에는 압축응력이 잔류하고 있다, 이는 가열시 압축소성변형이 축적된 영역 A가 냉각되면서 수축이 일어나 생기는 현상이다. 즉, 압축소성변형을 받은 영역 A가 냉각시에는 오히려 수축량이 B와 C영역보다 크게 되므로 이들의 구속을 받아 인장응력을 일으키며, Fig. 2-9(b)와 같은 잔류응력과 변형이 남게 된다.

실제 용접접합부에 있어서는 많은 경우 외부로부터의 구속이 있고, 게다가 용접에 의한 온도이력도 불균일하다. 따라서 일반적으로 용접부에 존재하는 잔류응력은 그러한 요인에 의해 생기는 내적 및 외적구속에 의한 응력이 합성되어 있다고 할 수 있다. 예를 들면, Fig. 2-10(a)와 같이 양단부가 구속된 두 개의 강판을 맞대기 용접한 경우의 잔류응력 분포를 생각해보자. 간단화를 위하여 y방향 응력 σ_y 의 관두께에 대한 평균값에 대해서만 주목한다. x축 상에 대한 σ_y 의 분포는 잘 알려진 것처럼 Fig. 2-10(b)에서와 같은 분포를 하고 있다. 여기서, 강판의 벽에 고정되고 있는 부분을 절단해서 외적구속을 제거하면, x축상의 잔류응력은 일률적으로 완전히 소실되어 Fig. 2-10(c)와 같은 분포가 잔류한다. 즉, 용접선의 중앙에서 인장응력이 최대이고 용접선의 끝을 향할수록 점차 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀌며 양단에서 압축응력이 최대가 된다. 그래서 (b)로부터 (c)를 빼서 남는 것이 (d)가 되는데 그 응력분포는 일반적으로는 거의 직선에 근접한 형태가 된다. Fig. 2-10(d)는 외적 구속이 존재하기 때문에 생긴 잔류응력의 성분이므로 이것을 외적구속에 의한 잔류응력 성분이라고 할 수 있다. 또, Fig. 2-10(c)는 외적구속을 제거했음에도 불구하고, 존재하고 있는 응력성분이므로, 이것은 내적구속에 의한 잔류응력 성분이다. Fig. 2-10(e)의 E-F 단면의 응력분포 같이 용접선에 평행한 응력은 비드 중심에서 큰 인장력이 되고 용접선으로부터 모재 쪽으로 멀어짐에 따라 급격히 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀌음을 알 수 있다.

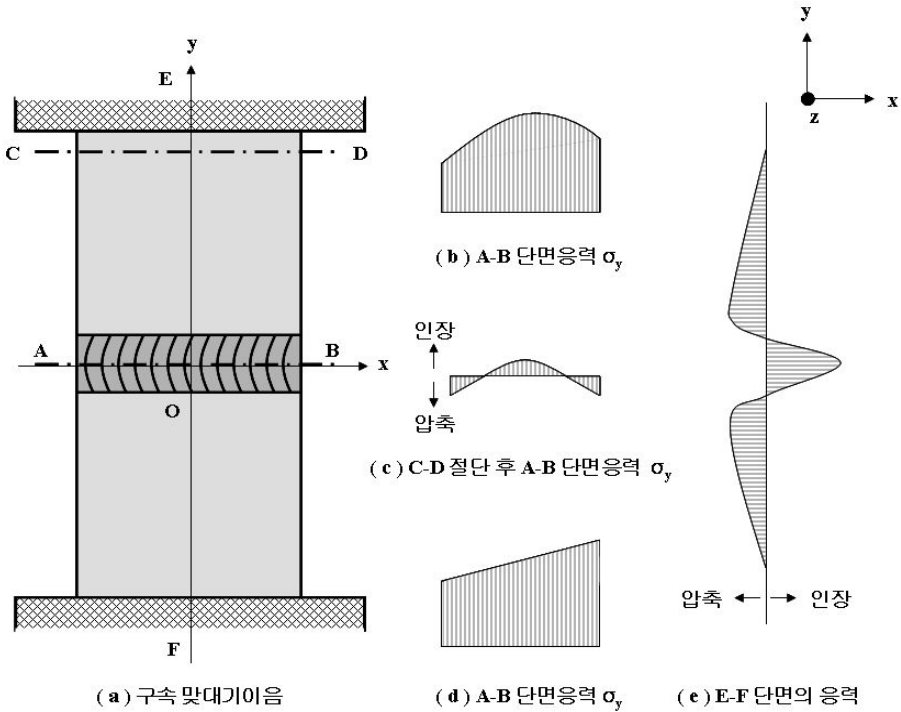


Fig. 2-10 Residual stress distribution on butt welded joint

4-2. 용접잔류응력의 발생원인 및 영향

용접과정에서 재료는 열에 의해 팽창, 수축을 반복하게 된다. 이때 용착금속이 냉각되면서 저온상태의 체적으로 수축하려고 하지만 인접되어 있는 모재로부터 제한을 받기 때문에 거동이 자유롭지 못하게 된다. 이 때문에 용접부에 응력이 존재하게 되는데 이를 용접잔류응력(weld residual stress)이라고 한다. 이 응력은 거의 재료의 항복응력에 가까운 값을 가지기도 한다.

용접에 의한 잔류응력을 발생원에 따라 분류하면, 직접적 응력, 간접적 응력, 조직적 응력으로 분류한다. 직접적 응력은 가열 및 냉각시의 온도 구배에의해서 나타난 응력으로 용접잔류응력의 주원인이며, 간접적 응력은 용접 전 이력에 의한 것이다. 잔류응력은 경우에 따라서는 용접에 의한 잔류응력으로 합쳐지고 또한, 용접 후의 변형에 의해서도 부가적인 영향을 가지는 것도 있다. 조직적 응력은 조직의 변화에 의해서 생기는 응력이다. 즉 변태에 의한 비용적인 변화에 의해서 생기는

응력이다. 이것은 탄소함량이 재료 조성에 의해서 미치는 영향은 다르다는 뜻이다. 그러나 일반적으로 이 영향은 직접적 응력의 경우에 비교해서 2차원적이다. 그리고 이 영향을 고려하지 않으면 안되는 경우는 열영향부에 있어서 변태가 일어나는 부분의 폭 및 조직적 응력의 발생 상황과 관련된다. 온도구배에 의한 영향을 받는 직접적 응력에 대해서 고찰해 보면, 물체 내에서 각부가 불균일한 온도의 상태로 있을 때는 각 부분의 열팽창의 상태는 다르게 된다. 이 때문에 상호 간섭하여 열응력이 발생한다.

용접에 의한 잔류응력의 발생은 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 용접부분에서 열응력에 의한 것이다. 이 발생과정은 열처리나 냉간가공의 경우와 비교했을 때 단순하지만 실제로는 잔류응력의 발생은 용접이 행해지는 부재의 형상, 치수, 시행 방법 및 용접법에 따라 다르며 여러 상황에 따라 복잡한 형태로 나타난다. 용접하는 동안 발생하는 열이 용접재의 팽창과 모재의 냉각에 의한 수축으로 인하여 변형과 용접 잔류응력을 발생시킨다. 잔류응력은 외력 없이 자기 평형 모드에서 구조물에 존재하며, 거시적 잔류응력과 미시적 잔류응력으로 분류된다. 거시적 잔류응력은 용접과 조립 및 금속 형성과정에서 발생되며, 구조물의 미시적 잔류응력은 몇 개의 입자나 원자 집단만큼 작은 영역 내에서 미시조직 변형과 국부결합의 원인이 되지만, 구조물의 역학적인 성질과는 직접적인 관련이 없다.

용접구조물의 강도에 대해서 잔류응력의 영향은 중요한 문제이고 이 크기 및 분포의 상태에 따라서 취성파괴, 피로파괴, 응력부식균열 등 각 종류의 파손에 나쁜 영향을 준다. 또한 용접과 동시에 발생한 각종의 변형도 설계상 중요한 문제이다. 용접잔류응력의 값은 설계응력에 비해서 훨씬 크므로, 그것이 구조물의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 실행되어, 잔류응력이 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 연성 파괴(ductile fracture)

재료에 연성이 있어서 파괴되기까지 얼마간의 소성변형이 일어나는 경우에는, 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하더라도 정적인 강도에는 영향을 미치지 않는다. 그 이유는 잔류응력이 존재하는 재료에 외력을 가하면 잔류응력이 존재하는 부위에서 먼저 소성변형이 시작되나 응력은 별로 증가하지 않기 때문이다.

(2) 취성파괴(brittle fracture)

재료가 연성이 부족하여 거의 소성변형을 하지 않고 파괴되는 경우에는 잔류응력의 영향이 나타나며, 전단면이 항복하기 전에 파괴가 일어나면 잔류응력이 클수록 작은 하중에서 파괴되게 된다. 또한 연강은 저온에서 연성이 상실되므로 선박, 교량, 압력 용기, 저장탱크 등이 동절기의 저온, 정하중하에서 갑자기 유리나 도자기와 같이 취성파괴가 될 수 있다. 취성파괴는 일단 개시되면, 낮은 응력으로 전파되지만 취성파괴가 시작되는 데는 항복점 정도의 높은 인장응력이 노치부분 부근에 작용할 필요가 있다. 그런데 용접이음에 있어서는 용접부 부근에는 항복점에 가까운 큰 잔류응력이 존재하므로 강재의 온도가 전파 저지온도보다도 낮을 경우에는 외부하중 또는 열응력에 의하여 약간의 응력이 용접부 잔류응력에 가산될 경우에도 취성파괴를 일으키게 된다. 그러나 강재의 온도가 전파 저지온도보다도 높을 때는 연성파괴가 일어난다.

(3) 피로강도(fatigue strength)

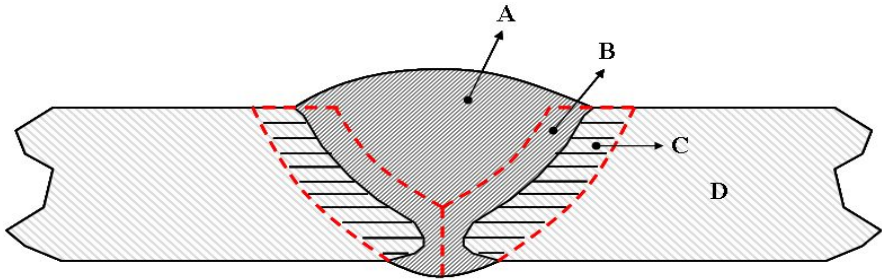
보통 연강용접 이음에서는 항복점에 가까운 정하중을 가하면 잔류응력이 크게 감소한다. 반복하중시험편에 있어서도 마찬가지이다. 예를 들어 두께 15mm 연강판의 한쪽에 비드 용접한 시험편을 피로강도보다 약간 낮은 하중으로 2×10⁶회 반복하중을 가한 경우 용접선에 직각인 단면내의 잔류응력은 약 절반으로 줄어든다. 이러한 예에서는 잔류응력은 피로강도에 별로 영향이 없다는 결론에 이른다. 하지만 용접부에 균열, 언더컷, 슬러지 혼입 등과 같이 예리한 노치가 되는 용접결함이 존재하고 있을 때에는 항복점에 비하여 훨씬 낮은 응력이 작용하여도 피로파괴가 일어나므로 이러한 적은 하중으로는 잔류응력이 별로 삭감되지 않게 되어, 결국 잔류응력의 존재로 인하여 피로강도가 감소할 가능성이 생기게 된다.

(4) 부식(corrosion)

응력이 존재하는 상태에서는 재료의 부식이 촉진되는 경우가 많은데, 이것을 응력부식이라 한다. 용접부의 잔류응력은 항복점에 가까운 높은 큰 인장응력이 있으므로 이것이 응력부식의 원인이 될 위험성이 크다. 금속 재료에는 현미경적으로 보아 부식을 받기 쉬운 부분이 있으며, 그곳이 침식되면 작은 노치가 된다. 그때 인장응력이 재료에 가해지고 있으면, 이 노치부에 응력이 집중되어 선단에 작은 균열이 생기고, 이 균열의 끝이 다시 선택적으로 부식되어 어느 정도 약해지면 응력집

중이 되어 다시 새로운 균열이 진행된다. 따라서 응력부식이 생기는 데는 재질, 부식매질, 응력의 크기 및 온도 등이 크게 영향을 미친다.

강재의 용접부는 크게 용접금속, 열영향부, 모재의 세부분으로 나눌 수 있다. 용접금속은 모재 및 용가재가 정련반응을 수반하여 용융 혼합되어 응고한 조직을 가리킨다. 한편 용융금속에 인접한 열영향부는 용접열에 의해서 용융점 직하에서 광범위한 각 온도로 급속 가열·냉각된 부분이다. 열영향부의 재질변화는 각 부분이 받은 열 사이클에 지배된다. 각 위치에 따른 재질 변화 상황을 Fig. 2-10에 나타내었다. 용접금속과 열영향부의 경계는 용융선 또는 용융경계부로 불린다. 용융선 근처는 용융점 또는 응고 온도범위까지 가열되어 용접금속과 열영향부간의 원소가 확산 이동하여, 소위 천이영역(transition region)을 형성하기 때문에 금속조직학적으로 매우 문제가 많은 부분이다. 또한, 용접 용융선 근처와 열영향부에서는 과열에 의해 경화되고 균열이 발생하는 등 용접특성이 저하되기 쉽다. 따라서 열영향부는 용접금속과 용접이음 성능 면에서 가장 큰 영향을 일으키는 부분이다.



A, B - 용접금속, C - 열영향부, D - 모재 원질부

Fig. 2-11 Schematic illustration of the weldments

4-3. 용접 잔류응력 측정 방법

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 용접부위의 불균일한 온도분포에 중점을 두고 있다. 이러한 온도분포에 의해 용접부 주위에서는 복잡한 응력변화가 발생하며 냉각 후에 응력이 잔류하게 되고 용접변형이 발생하게 된다. 또한 용접에 의한 잔류응력은 연성과파괴, 취성과파괴, 피로강도, 부식 등에 영향을 미치는 것으로 알려졌다.

이에 따라 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하여야 한다. 잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 이론적인 해석 방법과 실험적인 계측방법이 있다.

이론적인 해석 방법은 응력-변형률과 탄성계수 등 필요한 물리상수를 이용하여 계산할 수 있다. 이 이론적인 해석 방법은 계산과정에서 사용되는 여러 가지 변수 및 역학적인 복잡성에 의해 계산의 정도가 낮아질 수 있다. 이와 같은 이유로 실험적인 계측방법에 의해서 잔류응력이 측정되는데 실험적인 잔류응력의 계측방법에는 파괴적인 측정방법과 비파괴적인 측정방법으로 다시 나누어지고 있다. 파괴적인 측정방법은 홀 드릴링(hole drilling) 방법, 톱 절단(saw cutting) 방법 등과 같이 대상물의 부분 또는 전체를 파단 시켰을 때 발생하는 변형률의 변화를 스트레인 게이지로 측정하고 이로부터 탄성영역에서의 선형적인 관계를 이용하여 잔류응력을 평가하는 기법으로 비교적 정확한 측정이 가능하나 측정 대상체를 파괴시켜야 한다는 근본적인 문제점이 있다. 비파괴적인 측정방법으로는 X-선 회절법(x-ray diffraction method), 중성자 회절법(neutron diffraction method), 초음파 측정법(ultrasonic method) 등이 있다. 한편 blind-hole drilling법과 같이 반 비파괴적인 측정방법도 많이 쓰이고 있으나 이는 두께 방향의 응력 분포가 심하지 않아야 하며, 존재하는 잔류응력이 항복응력의 반을 넘지 않아야 된다는 조건이 필요하고 미세한 구멍일지라도 측정 대상물에 손상을 주어야 한다는 특징을 가지고 있다.

비파괴적인 측정방법별로 간단히 살펴보면, X-선 회절법은 표면 상태에 따라 영향을 많이 받는다는 가장 큰 단점이 있으며, 중성자 회절법은 내부응력까지 측정 가능한 장점이 있으나 값이 비싼 중성자 발생원이 필요하다. 초음파 측정법은 측정 시간도 짧고 장비도 간편하며, 내보내는 파의 종류에 따라서 표면응력과 내부응력 모두 측정할 수 있으나 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력분포를 측정하기에는 어려움이 있다. 이러한 기존 잔류응력 측정 방법의 문제점 때문에 새로운 비파괴·비접촉 방법인 레이저를 응용한 잔류응력 측정 방법을 제시하고자 한다. 이에 앞서 기존의 잔류응력을 측정하는 기법들의 특징에 대해 살펴보면 다음과 같다.

(1) Hole-drilling 방법(hole drilling method)

Hole-drilling 방법은 잔류응력을 수반한 구조물에 구멍을 뚫을 때 생성되는 응력 또는 변형률의 변화를 탐촉자로 감지하여 그 값을 구하는 방법으로써 접촉식이며 파괴적인 방법 중의 하나이다. 변형률의 변화를 감지하기 위한 탐촉자로는 스트

레인 게이지, 편광탄성체(photoelasticity) 등이 사용되고 있다. 궁극적으로 측정 부재의 응력 이완 방향과 크기, 구멍의 크기와 부재의 물성치를 알고 있기 때문에 이러한 값들로부터 잔류응력을 실험적으로 산출해 낼 수 있는 것이다. 이 방법은 파괴적인 방법이므로 부재에 미세한 구멍이 나도 크게 고려되지 않는 구조물이나, 그렇지 않으면 구멍을 뚫고 나서 바로 볼트로 막거나 용접을 해주어야 하며 커다란 부재의 표면에 넓게 분포되어 있는 잔류응력을 측정하기에 가장 적합하다.

(2) X-선 회절법(X-ray Diffraction method)

X-선은 전자기 스펙트럼의 일부이므로 간섭, 반사와 회절 현상이 나타날 수 있으며 상대적으로 짧은 파장을 가지고 있어서 금속과 같은 물체를 통과 할 수 있다. X-선 기법은 미세한 변형에 의하여 발생하는 원자 위치의 변위를 측정하여 잔류응력을 측정한다. 이 방법의 응력 분석 원리는 위와 같은 X-선의 성질과 Bragg 회절 방정식을 기본으로 하여 측정한다. 이 방법은 비파괴 측정이므로 사용하고 있는 재료, 기계 및 구조물 등도 그대로 잔류응력측정이 가능하며, 응력분포가 극히 불균일할 때에도 표면의 극히 작은 부분에 존재하고 있는 잔류응력을 측정할 수 있다. 또한, 하중이 가해졌을 때 탄성구간에서 작용하는 탄성변형 측정은 용이하지만, 잔류응력과 같은 소성변형인 경우에는 측정 방법이 불편하여 측정하기에 어려움이 있다.

(3) 중성자 회절법(neutron diffraction method)

중성자 회절법은 원자로와 같은 중성자 원료가 필요하기 때문에 계측 장비를 운반하여 사용하는 것이나 현장에서의 사용이 불가능하여 아직까지 실험실 수준으로 제한되어 있다. 현재 이 방법은 캐나다에 있는 Chalk River 연구소와 영국에 있는 Harwell 연구소 등에서 사용하고 있다. 이 방법의 응력과 변형률 측정 방법 원리를 살펴보면 재료에 존재하는 응력은 원자들이 위치해 있는 평면의 분리 변화를 관찰하고 응력 계산을 위한 재료의 탄성 계수를 사용함으로써 측정할 수 있다. 중성자를 사용하는 다른 기법들과 마찬가지로 중성자 회절법은 절대적으로 변형률을 측정할 수 있는 능력을 가지고 있으며 응력을 측정하는 초음파법이나 Barkhausen noise 방법과 서로 보완하여 사용할 수 있다.

(4) 광학을 이용한 잔류응력 측정 방법

이미 오래 전에 Underwood는 잔류응력 측정을 위해 고전적인 간섭계를 구성한 적이 있다. 그러나 이러한 방법은 광학적 질을 향상하기 위하여 측정 대상물의 측정 영역을 폴리싱 해야만 했다. Nelson이라는 사람은 반 파괴적인 방법인 blind hole-drilling법을 이용하여 스트레인 게이지 대신에 홀로그래피 간섭법을 이용하는 잔류응력 측정 방법을 제시하였다. 이것을 필두로 현재까지 많은 광학적 방법을 적용하여 나름대로 잔류응력 측정 방법에 대한 연구가 계속되고 있다. 또한, Harthway는 잔류응력 측정법으로 blind hole-drilling법과 홀로그래피 간섭법을 이용한 혼합법에서 홀로그래피 간섭법 대신에 전단 간섭법(shearography)를 사용하였으며, Hung은 좀 더 발전한 위상이동 전단 간섭계를 구성하여 잔류응력을 측정하였다. 이 밖에도 선진국의 많은 연구자들이 반 비파괴적 방법인 blind hole-drilling법과 함께 스트레인 게이지를 대신하여 광탄성법, 무아레(moire techniques)와 간섭 스트레인 게이지(interferometric strain gage)를 사용하여 잔류응력을 측정하고 있다. 이러한 반 비파괴적인 방법과 광학적 측정 방법의 혼합법은 지금까지의 점 단위 측정 방법을 면단위 측정 방법으로 바꾸어 주고, 데이터 획득 시 비접촉식 방법이라는 점 때문에 결과에 신뢰감을 주는 것이 가장 큰 장점이다.

4-4. ESPI를 이용한 용접 잔류응력 측정 방법

본 연구에서는 잔류응력을 측정하는 방법 중에서 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 ESPI(electronic speckle pattern interferometry : 전자 스페클 패턴 간섭법)을 이용하여 여러 산업 분야에서 문제 시 되고 있는 용접부의 잔류응력을 검출하기 위한 방법을 고안하여 그 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통한 검증을 하고자 한다. 본 연구에서 용접부의 잔류응력을 측정하기 위한 기본개념은 용접시험편을 동일하중으로 인장을 시켰을 경우 Fig. 2-12에서 볼 수 있듯이 용접시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것에 착안하여 이를 ESPI 를 이용하여 동시에 측정한 후 제시된 방법을 통하여 용접부의 잔류응력을 측정하는 것이다. 즉, 모재부와 용접부의 변형률을 ESPI를 이용하여 측정할 수 있으며, 인장 시 작용 응력의 차이를 통하여 용접부위의 탄성계수 및 잔류응력을 아래에서 제시한 식을 통해 구할 수 있다.

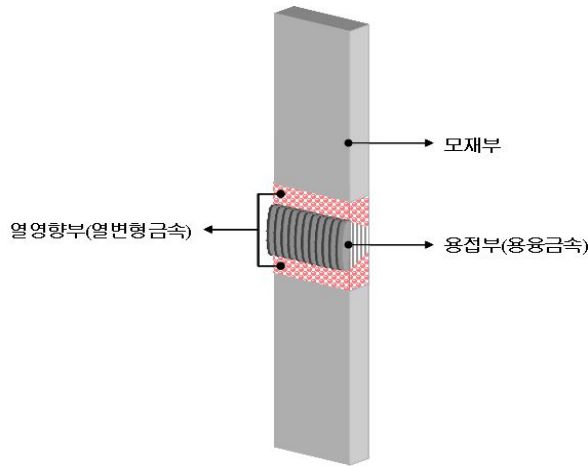


Fig. 2-12 Figuration of welded specimen

동일하중으로 용접시험편에 인장력을 순차적으로 부하하여 Fig. 2-12와 같이 소재에 변형을 가할 때, 용접부의 잔류응력을 내재한 시험편의 각 구간에 작용하는 응력을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{P}{A} = \sigma_m &= E_m \epsilon_m = E_m \frac{\delta_m}{\ell_m} = \sigma_w + \sigma_R \\ &= E_w \epsilon_w + \sigma_R = E_m \frac{\delta_m}{\ell_w} + \sigma_R \end{aligned} \quad (2-21)$$

여기에서, P 는 외력, A 는 시편의 단면적, σ_m 은 용접 시험편 모재부의 응력, E_m 은 모재부의 탄성계수, ϵ_m 은 모재부의 변형률, δ_m 은 모재부의 변형량, l_m 은 모재부의 길이, σ_w 은 용접 시험편 용접부의 응력, σ_R 은 용접부의 잔류응력이다. 또한, E_w 는 용접부의 탄성계수, ϵ_w 은 용접부의 변형률, l_w 은 용접부의 길이 이다.

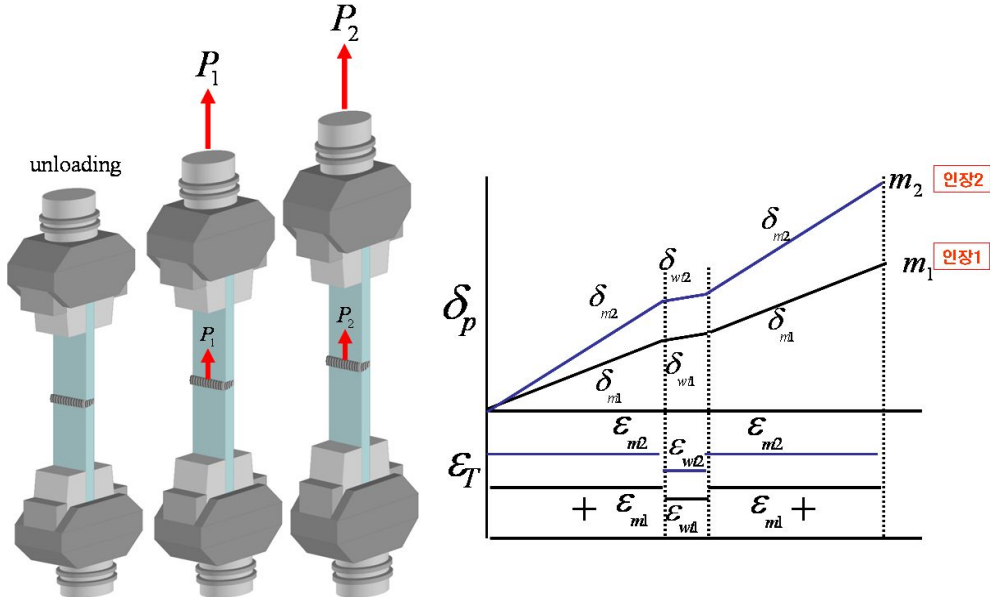


Fig. 2-13 Equation expression of measuring residual stresses on weldment

식 (2-22)는 모재부의 탄성계수(E_m)를 구하는 식이며, 식 (2-23)은 용접부의 탄성계수를 구하는 식으로써 식 (2-21)로 부터 구할 수 있다. 단, 여기서 σ_R 은 상수로 가정한다.

$$E_m : \sigma_m = E_m \epsilon_m \tag{2-22}$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= E_w \epsilon_w + \sigma_R \\ \Leftrightarrow \sigma_m - \sigma_R &= E_w \epsilon_w \end{aligned} \tag{2-23}$$

식 (2-22)와 (2-23)을 통하여 획득한 용접 시험편의 모재부와 용접부의 탄성계수와 ESPI를 통하여 측정된 모재부와 용접부의 변형률 값과 모재부 응력과 용접

부 응력 값을 이용하여 식 (2-24)와 같이 잔류응력 값을 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_R &= \sigma_m - E_w \epsilon_w \\ \sigma_R &= \sigma_w - E_w \epsilon_w\end{aligned}\tag{2-24}$$

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 측정 시스템

1-1. ESPI 시스템

ESPI 시스템은 독일 Dantec Ettemeyer 사의 상용제품(Model: Q-300)을 이용하였으며 Fig. 3-1과 같이 장치구성은 Nd:YAG laser (파장: 532nm), laser controller, polarization maintaining optical fiber, ESPI sensor, controller, PC 로 구성되어 있다. ESPI 센서 내부에는 x, y, z축 변위를 측정할 수 있는 3개의 간섭계가 구성되어 있다. polarization maintaining optical fiber를 통하여 Nd:YAG laser가 ESPI sensor로 입력되면 4개의 암을 통하여 대상물에 laser 빛이 조사되는데 이를 셔터 제어를 통한 광 경로의 차단으로 사용자가 상황에 맞게 간섭계를 선택하여 사용할 수 있다.

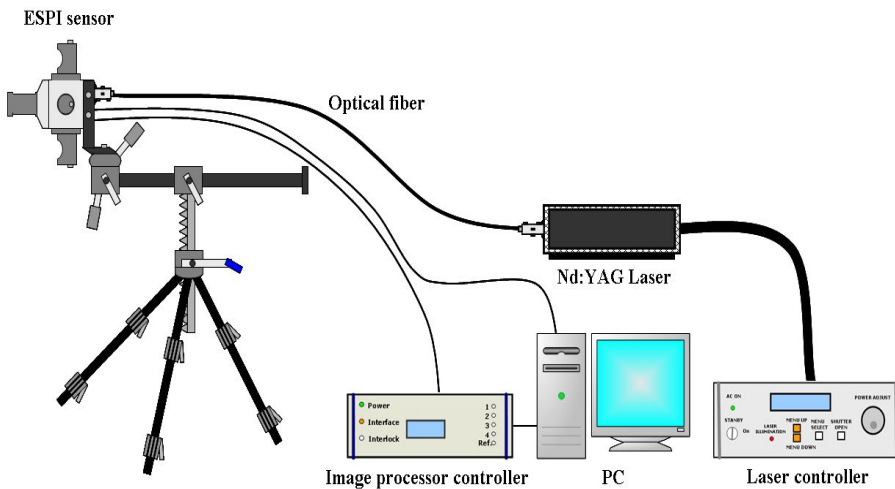


Fig. 3-1 Schematic of ESPI system

본 연구에서는 용접시험편의 인장시험방향인 Y축 면내 변위를 측정하기 위하여 4개의 암 중에서 상·하에 있는 암으로부터 나온 laser 빛이 물체에 조사되고 이들이 만나 간섭을 일으켜 면내 변위를 측정하게 된다. 위상 추출을 위해 4단계 위

상이동기법이 적용되었으며, 위상이동은 PZT로 수행하며 외부 controller에 의해 제어가 되고, 최적 위상이동량을 자동 검출하여 위상이동기법을 적용하였다. 또한, 위상이동기법에 의해 획득되어진 위상지도(phase map)는 Dantec Ettemeyer 사의 상용프로그램(ISTRA)을 이용하여 수치해석 함으로서 변위 및 변형률을 구할 수 있었다. Table 3-1과 Table 3-2는 ESPI 시스템의 제원과 위상이동에 쓰이는 PZT의 제원을 나타내었다.

Table. 3-1 Technical data of ESPI system

Description	Technical data
Displacement accuracy	0.03 ~ 1 mm adjustable
CCD-resolution	1380 × 1035 pixels
Measuring range	Adjustable to any measurement range by variation of measurement steps (10 - 100 μ m per step depending on measuring direction)
Measuring area	Up to 200 x 300 mm ² with built in illumination. larger areas with external laser
Working distance	Variable, 0.2 ... 1.0 m
Operation modes	Automatic, manual, 1D-, 2D-, 3D-Operation
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Data acquisition speed	3.5 sec for 3D-analysis
Data analysis	automatic or semi automatic
Dimensions of sensor head	80 × 130 × 120 mm ³ (without illumination arms)

Table. 3-2 Technical data of PZT control device

Description	Technical data
Operating voltage	selectable 110 ~ 230 VAC, 50/60 Hz
Typical mean power consumption	Max. 100W + Monitor Consumption, depending on system configuration
Dimensions H×W×D	380 × 560 × 600 (<i>mm</i> ³)
Ambient operative temperature range	15 ~ 35 °C
Storage temperature range	-10 ~ 50 °C
Piezo output voltage	-20 ~ +120 VDC
Piezo output current	Max. 140mV (max. 5ms)
Power supply output voltage	12 VDC
Power supply output current	Typ. 300mA

1-2. MTS 시스템

본 연구에서는 용접시험편에 인장력의 반복하중을 인가하여 제시한 방법으로 잔류응력을 측정하기위하여 피로시험기(MTS Co.)를 사용하였다. 피로시험기(MTS Co.)는 미국 MTS사의 상용제품(Model: MTS 793)을 사용하였으며, 구성은 H/W controller, S/W controller, servo-valve controller 그리고 PC로 구성되어 있다. Photo. 3-1과 Table 3-3은 피로시험기(MTS Co.)와 제원을 나타내었다.



Photo. 3-1 Fatigue machine system

Table 3-3 Specification of fatigue testing machine

Description	Technical data
Force capacity	100 kN (Monotonic: 120 kN)
Available actuator ratings	25 kN
Dynamic stroke	100 mm
Output voltage	± 10 V (full scale)
Excitation frequency	10 kHz (± 100 mm)
Data sampling rate	122.88 kHz

1-3. 용접 시험편

본 연구에서 사용한 용접 시험편은 용접 구조물로 가장 널리 사용되고 있는 STS304를 재질로 하는 강판을 이용하여 Fig. 3-2와 같이 비드 용접을 시행 후 와이어 커팅을 이용하여 Fig. 3-3과 같이 비드 용접 시험편을 제작하였다. 강판의 재질은 STS304이며, 규격은 가로 350mm, 세로 160mm이며 두께는 5mm이다.

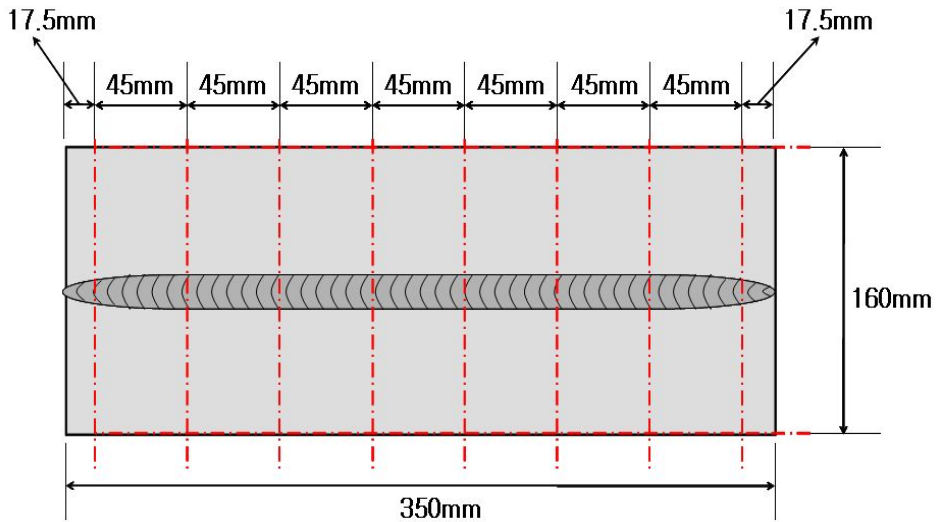


Fig. 3-2 Schematic illustration of bead weld specimen

이 때 ESPI 및 MTS 인장 실험을 위해 두께가 5mm인 강판에 용접 비드의 높이가 3mm, 폭이 9mm인 CO₂ 비드 용접을 양면으로 하였다. Table 3-4와 Table 3-5는 STS304 재료에 대한 화학적·기계적 물성치를 나타내었다.

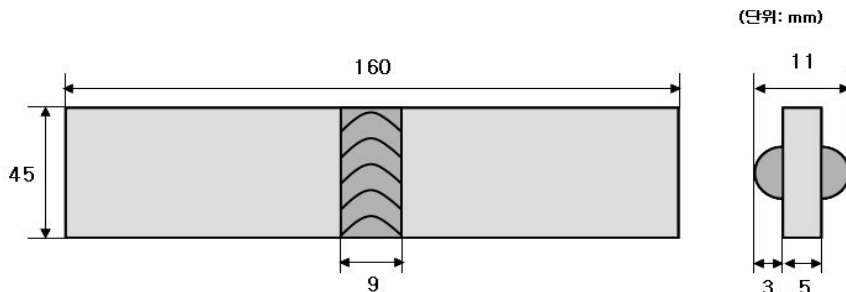


Fig. 3-3 Shape and size of specimen

Table 3-4 Chemical properties of base metal of specimen

Type	Chemical components (%)				
	C	Si	Mn	P	S
STS304	≤ 0.08	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.04	≤ 0.030

Table 3-5 Mechanical properties of base metal of specimen

Type	YS(N/min ²)	TS(N/min ²)	EL(%)	Hardness(Hv)
STS304	205	520	40	200max

1-4. 용접 지그

강판 위를 용접하여 비드 용접 시험편 제작 시 얇은 두께로 인해 용접 시 수축 및 비틀림, 휨 등의 변형이 발생할 수 있으므로 이를 최소화 및 방지하기 위함과 지그에 의해 시험편의 구속도가 증가하면 변형량은 감소하나 용접 후 잔류응력은 증가하기 때문에 용접 시험편 전용 지그를 설계 및 제작하여 시험편 제작에 이용하였다. Fig. 3-4에서와 같이 양 끝단을 지그로 고정시킨 후 이를 클램프로 고정시켜 용접을 하였다. Photo. 3-2은 설계 및 제작이 완료된 후 비드 용접에 사용된 용접 지그의 실제 모습이다.

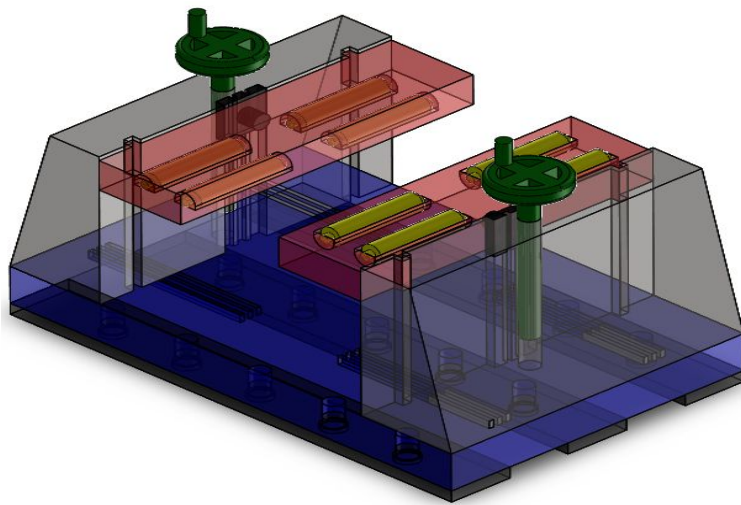


Fig. 3-4 Schematic illustration jig for welding

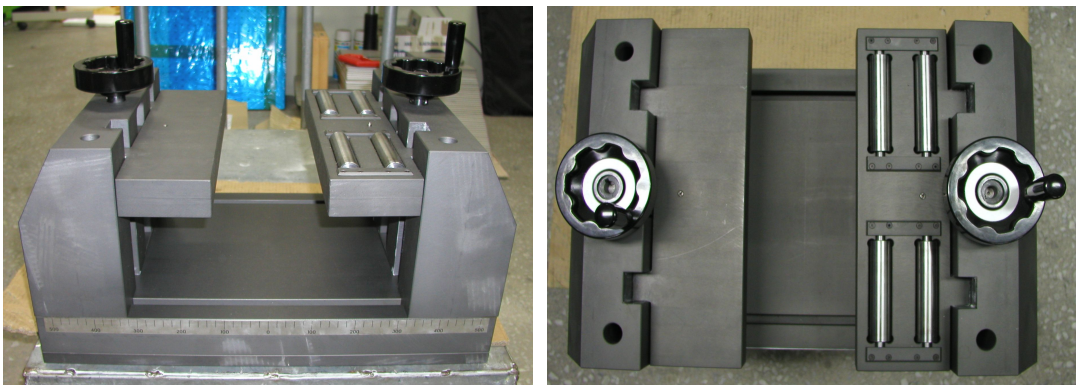


Photo. 3-2 Welding jig for bead weld

제 2 절 실험 방법

본 논문에서는 잔류응력을 측정하기 위해 용접시험편에 피로시험기(MTS Co.)를 이용하여 용접 시험편을 인장 시켰을 경우 Fig. 3-5에서 볼 수 있듯이 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생하는 것을 ESPI를 이용하여 동시에 측정할 수 있는 기법을 이용하여 용접부의 잔류응력을 측정하였다.

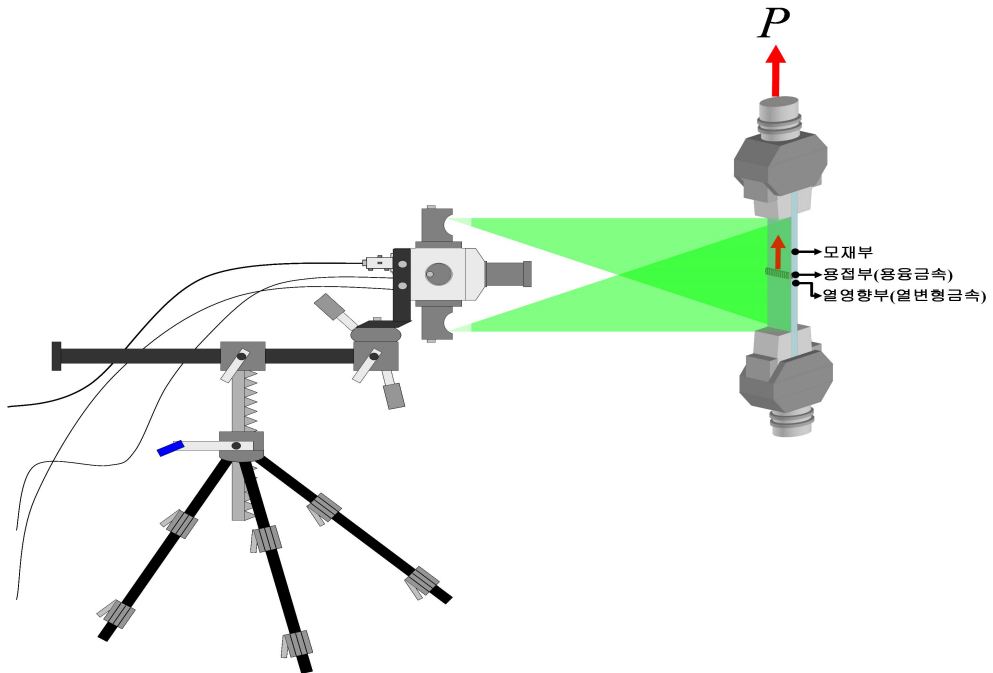


Fig. 3-5 Experimental Method using ESPI

ESPI를 이용한 잔류응력을 측정하기 위하여 Photo. 3-3과 같이 실험장치를 구성하였다. 용접 시험편에 피로시험기(MTS Co.)를 이용하여 동일한 크기의 인장하중을 인가하여 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률을 ESPI를 이용하여 동시에 측정함으로써 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 실험적으로 검증하였다. 이때 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다.

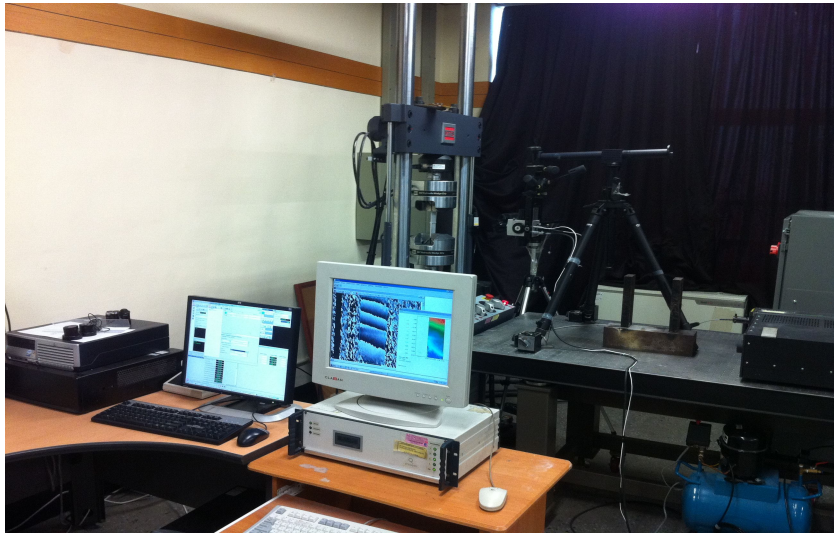


Photo. 3-3 Configuration of experiment system

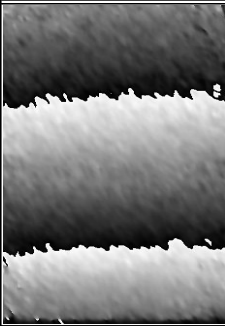
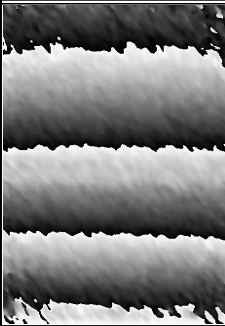
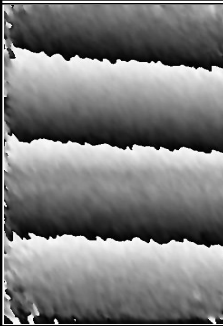
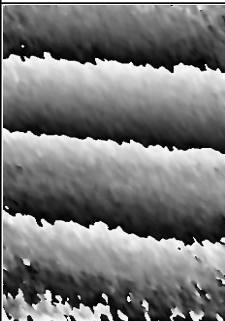
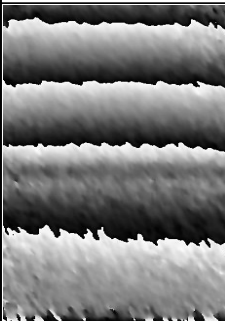
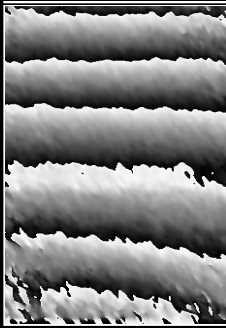
실험을 통해 하중에 따른 용접 시험편의 모재부 및 용접부의 프린지 패턴을 관찰함으로써 그 때의 변형률을 측정하여 이를 이론식에 대입하여 잔류응력 값을 계산하였으며 하중을 단계적으로 증가시켜 그 변화를 살펴보았다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

제 1 절 ESPI를 이용한 면내 변형 측정 결과

본 논문에서는 ESPI를 이용하여 용접부 잔류응력 측정방법의 실험적 검증을 위하여 STS304 재질의 CO₂ 비드 용접 시험편을 피로시험기(MTS Co.)를 이용하여 동일한 하중으로 인장력을 가하여 비드 용접 시험편의 모재부 및 용접부에 발생하는 변형 분포를 통하여 잔류응력을 측정하였다. 이 때 CO₂ 비드 용접 시험편 용접부의 정밀한 잔류응력 측정을 위하여 최대한 확대하여 모재부 및 용접부의 변형 분포를 관측하였다. Table 4-1은 CO₂ 비드 용접 시험편의 프린지 형성의 결과로써, CO₂ 비드 용접 시험편에서 인장하중 변화에 따른 Phase-map의 변화를 나타내었다.

Table 4-1 ESPI phase-map of CO₂ bead welded (both sides) specimen

	10kN	12kN	14kN
Tensile			
	16kN	18kN	20kN
			

제 2 절 위상지도 해석결과 및 고찰

Table 4-1의 CO₂ 비드 용접 시험편에 10kN, 12kN, 14kN, 16kN, 18kN, 20kN의 Phase-map에서 확인 할 수 있듯이 시험편에 인가된 하중이 증가됨에 따라 ESPI를 이용하여 측정된 각 시험편의 위상지도에 나타난 간섭줄무늬의 수가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 변형 및 변형량이 점점 증가함을 알 수 있다. 또한, 같은 CO₂ 비드 용접 시험편에서 모재부에서의 변형과 용접부에서의 변형이 다르게 나타남을 확인할 수 있었으며 이때 용접부의 변형은 모재부보다 작음을 알 수 있었다. CO₂ 비드 용접 시험편의 변형 및 변형량을 정량적으로 계산하기 위하여 ESPI로부터 얻은 Phase-map을 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH., Germany)을 이용하여 분석을 통한 각각의 시험편 별로 인장하중에 따른 color image와 y축 방향의 line profile data와 profile data에 따른 3D-plot을 Fig. 4-1에서 Fig. 4-6에 나타내었다.

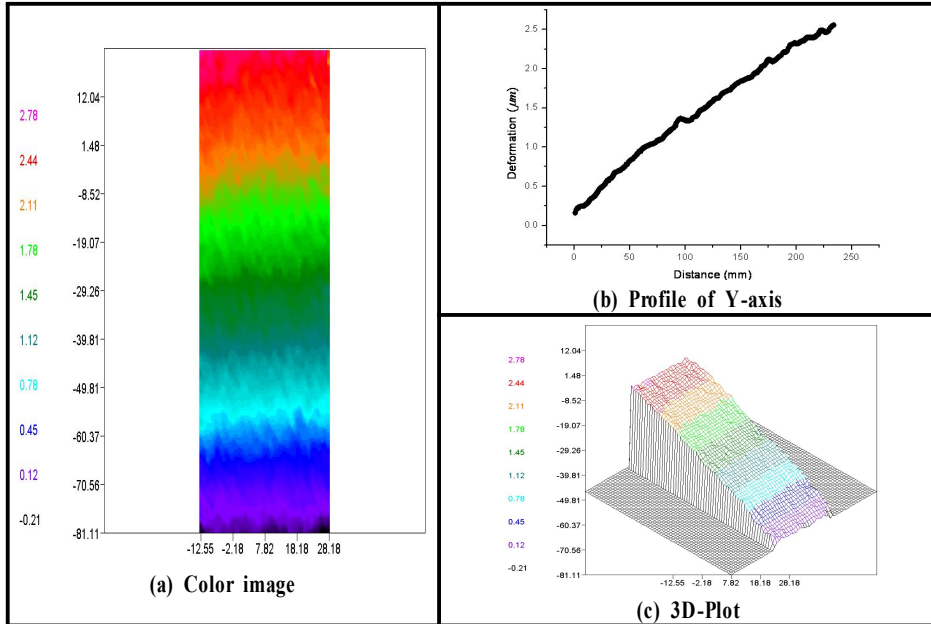


Fig. 4-1 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=10kN)

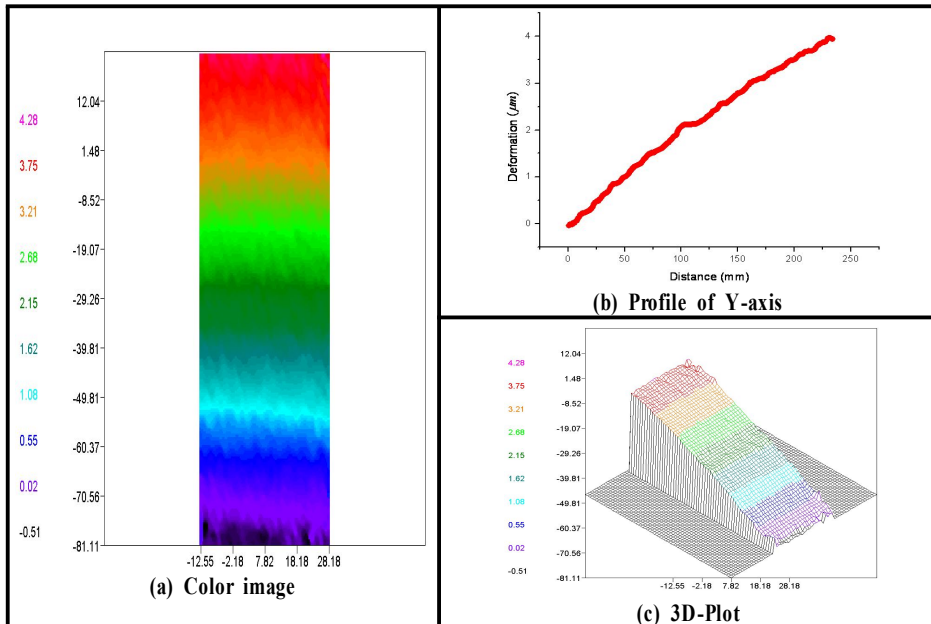


Fig. 4-2 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=12kN)

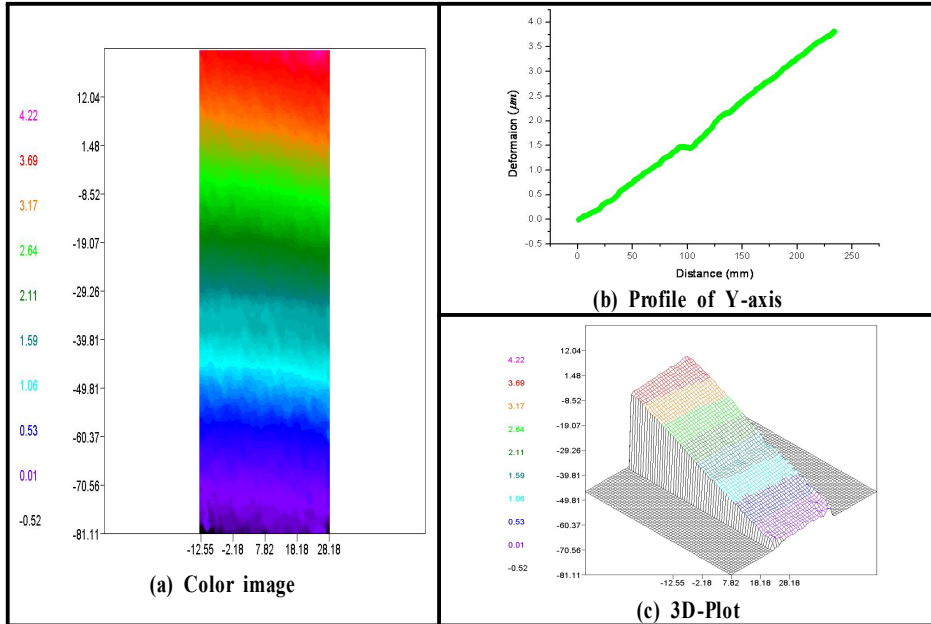


Fig. 4-3 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=14kN)

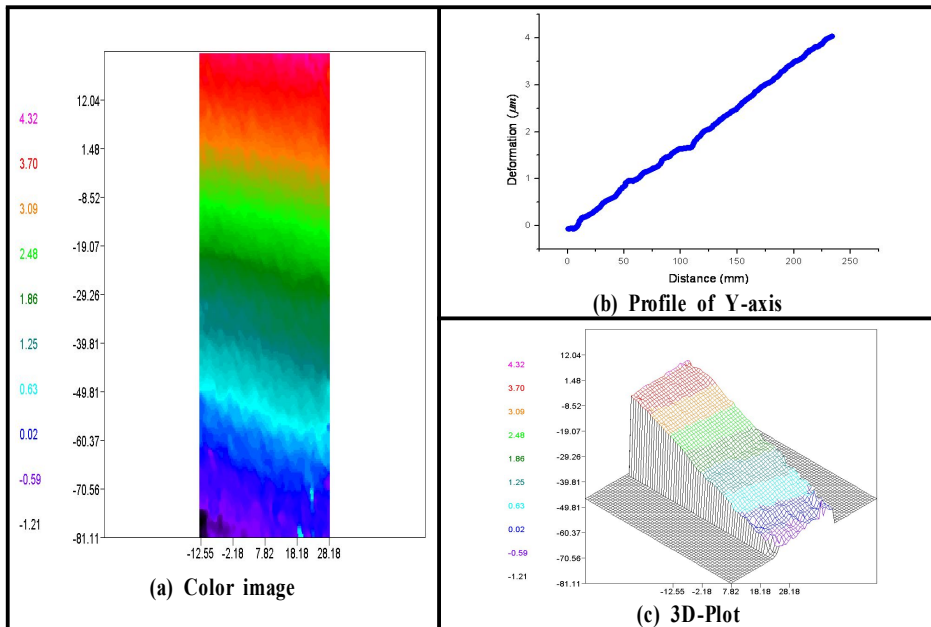


Fig. 4-4 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=16kN)

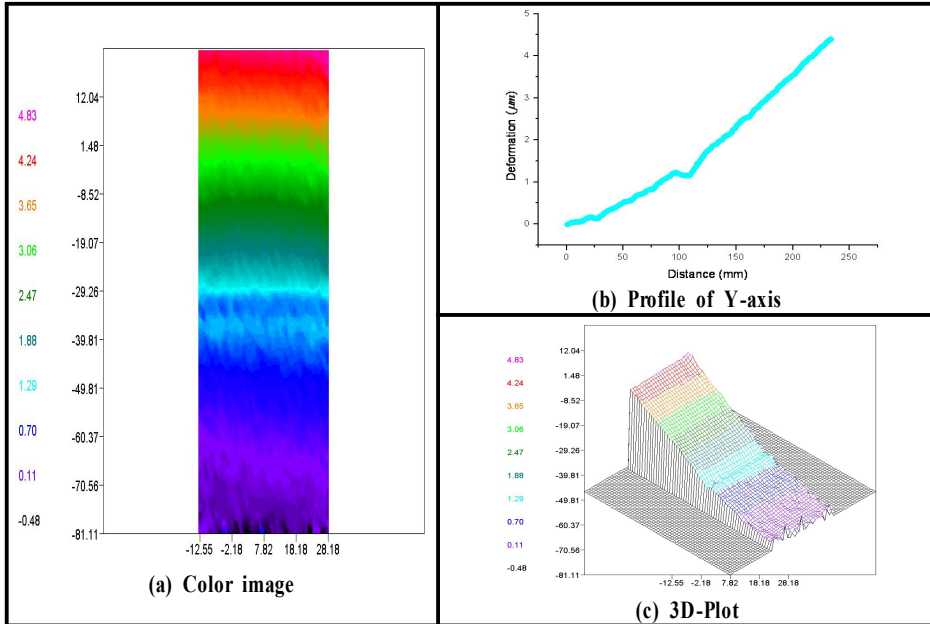


Fig. 4-5 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=18kN)

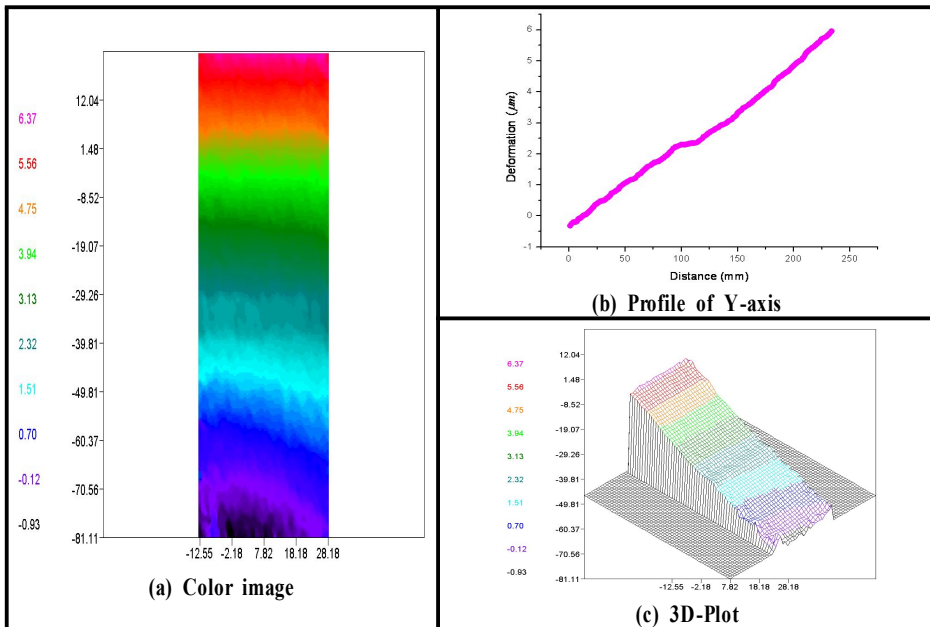


Fig. 4-6 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides bead welded specimen (F=20kN)

CO₂ 용접의 각각 인장하중에 따른 CO₂ 비드 용접 시험편 color image의 중심에 프로파일을 그어 모재부 및 용접부의 변형을 정량적으로 측정하고 CO₂ 용접 및 인장하중 조건에 따른 각각의 CO₂ 비드 용접 시험편 특성들을 확인해 본 결과, 측정한 CO₂ 비드 용접 시험편에서 용접부의 변형량이 모재부보다 작게 나타남을 확인하였다. 하중 변화에 따른 변화를 살펴보기 위해 CO₂ 양면 비드 용접 시험편의 프로파일 데이터를 Fig. 4-7에 비교하여 나타내었다.

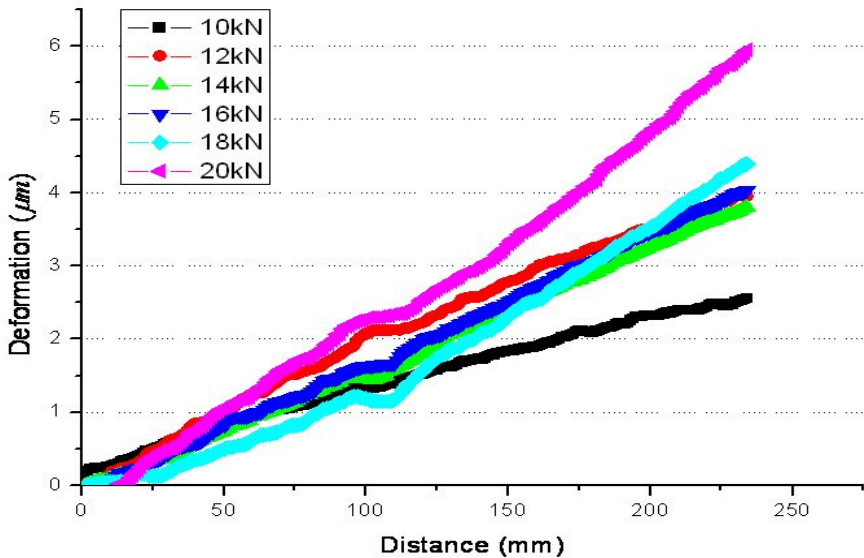


Fig. 4-7 Deformation tensile of CO₂-both sides bead welded specimen by forces

위의 line profile data로부터 인장하중이 증가됨에 따라 각각의 CO₂ 비드 용접 시험편의 모재부 및 용접부의 변형이 증가함을 확인할 수 있었으며, 실제거리에 대한 픽셀의 정보를 이용해서 측정부위에 대한 변위를 측정함으로써 변형률을 계산하였다. 계산된 결과로부터 인장하중이 증가함에 따라 모재부 및 용접부 모두 변형 및 변형률이 증가함을 알 수 있었다.

그리고 CO₂ 비드 용접 시험편의 용접부의 잔류응력을 계산하기 위해 line profile을 통해 획득된 data로부터 변형률을 계산한 후 본 논문에서 제시한 이론식에 대입하여 모재부와 용접부의 탄성계수를 획득하고 이로부터 잔류응력 값을 획득할 수 있었다. 또한, CO₂ 비드 용접 시험편의 모재부와 용접부의 단면적을 고려하여 인장하중에 따라 잔류응력을 획득할 시 용접부의 탄성계수와 잔류응력 값을 비교하였다. Fig. 4-8은 인장하중에 모재부의 탄성계수를 나타내며, Fig. 4-9와 Fig. 4-10은 모재부와 용접부의 단면적을 고려하여 획득한 용접부의 탄성계수와 잔류응력을 비교하여 나타내었다.

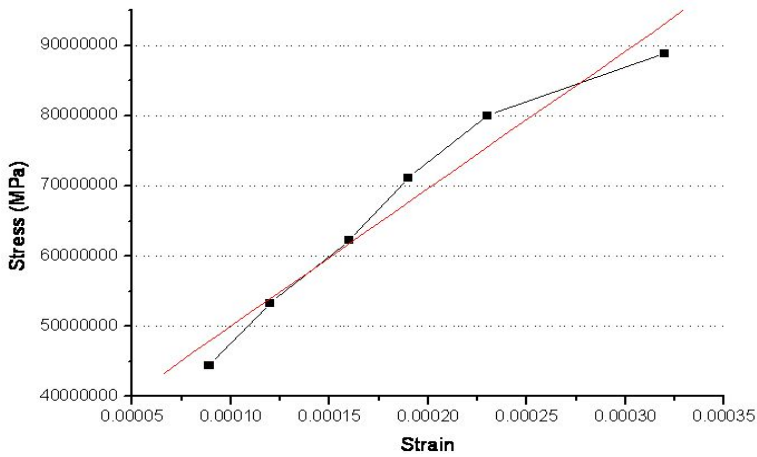


Fig. 4-8 Young's modulus of base metal under loading

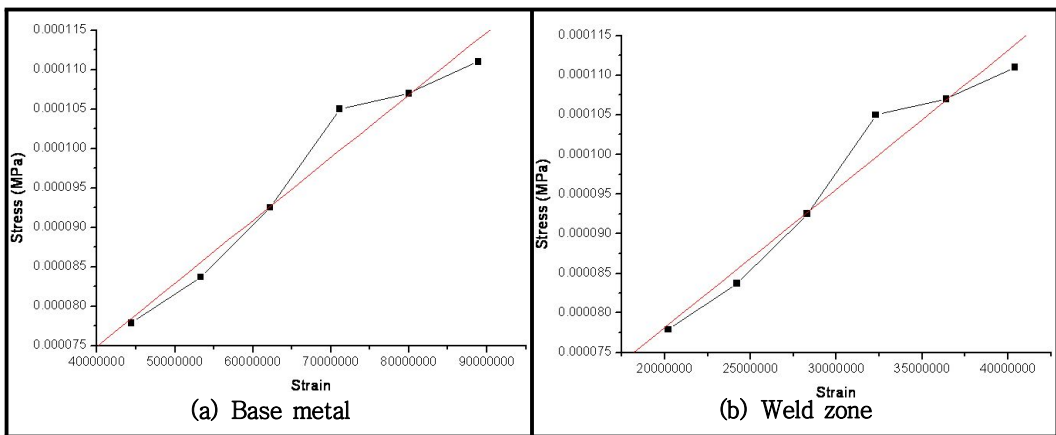


Fig. 4-9 Young's modulus according to the cross-section under loading

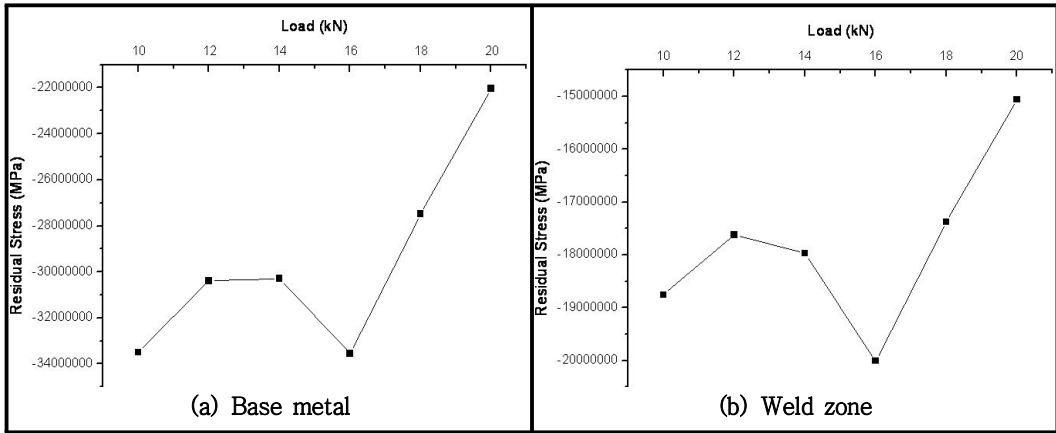


Fig. 4-10 Residual stress according to the cross-section under loading

Table 4-2 Results of CO₂ bead welded (base metal cross-section) specimen by forces

	CO ₂ 양면 비드 용접					
	10kN	12kN	14kN	16kN	18kN	20kN
Cross section (m^2)	2.25E-04	2.25E-04	2.25E-04	2.25E-04	2.25E-04	2.25E-04
Load (kN)	10	12	14	16	18	20
Stress of base metal (MPa)	44	53	62	71	80	89
Deformation of welded zone (μm)	1.9E-04	2.1E-04	2.3E-04	2.6E-04	2.7E-04	2.8E-04
Strain of welded zone (ϵ_{wt})	7.8E-05	8.4E-05	9.3E-05	10.5E-05	10.8E-05	11.1E-05
Residual stress (MPa)	33.49	30.39	30.29	33.56	27.49	22.04
Young's modulus of base metal (GPa)	200					
Young's modulus of weld zone (GPa)	1000					

Table 4-3 Results of CO₂ bead welded (weld zone cross-section) specimen by forces

	CO ₂ 양면 비드 용접					
	10kN	12kN	14kN	16kN	18kN	20kN
Cross section (m^2)	4.95E-04	4.95E-04	4.95E-04	4.95E-04	4.95E-04	4.95E-04
Load (kN)	10	12	14	16	18	20
Stress of weld zone (MPa)	20	24	28	32	36	40
Deformation of welded zone (μm)	1.9E-04	2.1E-04	2.3E-04	2.6E-04	2.7E-04	2.8E-04
Strain of welded zone (ϵ_{wt})	7.8E-05	8.4E-05	9.3E-05	10.5E-05	10.8E-05	11.1E-05
Residual stress (MPa)	18.76	17.62	17.97	20.01	17.38	15.06
Young's modulus of base metal (GPa)	200					
Young's modulus of weld zone (GPa)	500					

Table 4-4 Mean value of Young's modulus and residual stress

	Cross section (Base metal)	Cross section (Weld zone)
Young's modulus of welded zone (GPa)	1,000	500
Residual stress (MPa)	29	17

Table 4-2와 Table 4-3의 결과 data로부터 CO₂ 비드 용접 시험편 내에서 인장하중이 증가함에 따라 모재부 및 용접부 모두 변형률이 증가함을 알 수 있었고 모재부 단면적을 이용하여 획득한 용접부의 탄성계수는 1,000 (GPa)로 측정되었으며, 용접부의 단면적을 이용하여 획득한 용접부의 탄성계수는 500 (GPa)로 측정되었다. 즉, 평균적으로 용접부의 단면적을 이용하여 획득한 탄성계수는 모재부의 단면적을 이용하여 획득한 탄성계수보다 약 2배 정도 낮게 나왔다. 측정된 실

험 결과 data의 탄성계수로부터 본 논문에서 제시한 수식에 대입하여 잔류응력 값을 산출 할 수 있었으며, Table 4-4와 같이 CO₂ 양면 비드 용접 시험편은 10kN, 12kN, 14kN, 16kN, 18kN, 20kN의 인장하중이 인가되었을 때, 각 하중에 따른 잔류응력 값들의 평균값을 취하여 모재부와 용접부의 단면적 이용에 따라 29(MPa)와 17(MPa)의 잔류응력이 존재함과 약 1.7배의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 여러 산업분야에서 상당한 비중을 차지하고 있는 용접공정중 발생하는 용접구조물의 용접부에 대한 잔류응력의 분포를 이해하고, 분석하기 위하여 새로운 용접부의 잔류응력 측정법을 제안하고 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 ESPI 시스템을 이용하여 변형 및 변형률을 계측함으로써 용접부의 잔류응력을 측정하였으며 실험 및 data분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CO₂ 양면 비드 용접 시험편을 10kN, 12kN, 14kN, 16kN, 18kN, 20kN의 인장하중을 인가하였을 경우 이를 ESPI 시스템을 이용하여 측정함으로써 시험편의 모재부와 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것을 확인 할 수 있었다.

2) 다양한 인장하중이 작용함에 따른 CO₂ 양면 비드 용접 시험편의 특성을 알아보기 위하여 같은 CO₂ 양면 비드 용접 시험편을 다양한 인장하중으로 실험한 결과 하중이 증가함에 따라 변형률이 증가함을 알 수 있었다.

3) ESPI 시스템을 통하여 측정한 변형 및 변형률 data를 본 논문에서 제시한 탄성계수 및 잔류응력 계산식에 대입한 결과 용접부의 탄성계수를 획득하였고 이는 모재부의 단면적을 이용하여 획득한 탄성계수보다 용접부의 단면적을 이용하여 획득한 탄성계수가 약 2배 정도 낮게 나타났다. 또한, 잔류응력도 약 1.7배 정도의 차이가 있음을 확인 할 수 있었다.

4) 측정된 용접부 탄성계수로부터 잔류응력값을 산출 할 수 있었으며, CO₂ 양면 비드 용접 시험편들은 모재부와 용접부의 단면적 이용에 따라 평균적으로 1,000(GPa)과 500(GPa)로 용접부의 탄성계수가 측정되었으며, 29(MPa)와 17(MPa)의 잔류응력이 존재하였다.

본 논문에서 제안하는 용접부의 잔류응력 측정법은 잔류응력 예측 및 건정성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 권혁준, 임진환, "일반 용접 공학", 선학출판사, 2006
2. 국정환, 김덕중, 연윤모, "용접재료", 학선학출판사, 2006
3. J. F. Lancaster, "Metallurgy of welding", 3rd edition, pp. 1-5, 1980.
4. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures-Residual stresses, distortion, and their consequences", Pergamon Press, Oxford, 1980.
5. 대한용접학회 편집부, "용접 접합 편람", 대한용접학회, 1998)
6. 김재웅, 양영수, "용접 잔류응력과 변형", 사단법인 대한용접·접합학회, 2011
7. P. Michaleris and A. DeBiccari, "Prediction of welding distortion," Welding Journal, Vol. 76, No. 4, pp. 172-179, 1997.
8. A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments(A review of contemporary measurement techniques", The welding institute, Abington, Cambridge, England, 1977.
9. 오병욱, 고진현, 김덕중, "용접역학", 원창출판사_2006)
10. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures", International Series on materials science and technology, Vol. 33, pp. 1-10, 1980.
11. Y. H. Cha, D. J. Kim, and B. S. Sung, "A study on the strain measurement of spot welded joints using laser speckle pattern interferometer", KSME, pp. 86-91, 1997.
12. M. Francosis, F. Convert, S. Branchu, "French round-robin test of X-ray stress determination on a shot-peened steel", Journal of the Experimental Mechanics, Vol. 40, No. 4, pp. 361-368, 2000.
13. F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Grant, "A review of residual stress measurement methods", National Physical Laboratory Report MATC(A), 2004.
14. P. J. Wither, H. K. D. H. Bhadeshea, "Residual stress-I : Measurement techniques", Material Science Technology, 2000.
15. C. O. Ruud, "A review of nondestructive methods for residual stress measurement", J. Metals Park. OH, 1985.

16. X. Soudan, F. Lu., D. Gillereau, J. F. Flavenot, "Comparison of the X-ray diffraction method and the hole drilling method for the measurement of residual stress on the aeronautical materials", Proceedings of 1990 Spring conference on Experimental Mechanics, Vol. 30, No. 4, pp. 263–270, 1990.
17. "Determining residual stress by the hole-drilling strain-gage method", ASTM Standard E873–92, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
18. P. S. Prevey, "X-ray diffraction residual stress techniques", Metal Handbook, 9th Edition, American Society for Metals, Vol. 10, pp. 380–392, 1986.
19. M. J. Beesley, "Lasers and their Applications", Taylor–Francis, London, 1972.
20. J. Wilson, and J. F. B. Hawkes, "Lasers principles and Applications", Prentice Hall, 1987.
21. G. L. Cloud, "Optical methods of Engineering analysis", New York: Cambridge Univ. Press, pp. 347–476, 1995.
22. P. K. Rastogi, "Holographic interferometry principles and methods", Springer–Verlag, 1994.
23. A. E. Ennos, "Speckle interferometry in laser speckle and related phenomena", Topics in Applied Optics, Vol. 9, Verlin Heidelberg: Springer–Verlag, pp. 203–253, 1975.
24. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis", Cambridge University, pp. 395–408, 440–491, 1988.
25. Wolfgang Steinchen, Lianxiang Yang, "Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry", The Society of Photo–Optical Instrumentation Engineers, pp. 276–293, 2003.
26. Brian J. Thompson, "Speckle Metrology", Marcel Dekker, Inc., pp. 1–74, 1993.
27. J. C. Dainty, "Laser speckle and related phenomena 2nd edition", New

- York: Springer-Verlag, 1984.
28. J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 66, pp. 1145-1150, 1976.
 29. K. S. Kang, "Quantitative Evaluation of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2005.
 30. K. S. Kim, K. S. Kang, Y. J. Kang, S. K. Jung, " Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography", *Optics & Laser Technology*, Vol. 35, pp. 639-643, 2004.
 31. G. L. Cloud, "Optical methods of engineering analysis", London, Cambridge Univ. Press, pp. 469, 1990.
 32. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59-139, 2001.
 33. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
 34. K. S. Kim, H. C. Jung, K. S. Kang, J. K. Lee, S. S. Jang, J. K. Hong, "In-plane strains measurement by using the electronic speckle pattern interferometry", *KSME International Journal*, Vol. 12, pp. 215-222, 1998.
 35. V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti, H. Kaadono, "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase", *Optics Communications*, Vol. 212, pp. 35-43, 2002.
 36. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", *Journal of the Optical Society of America A*, pp. 72-156, 1982.
 37. K. Creath, "Phase-shifting Speckle Interferometry", *Applied Optics*, Vol. 24, pp. 3053, 1985.
 38. P. G. Charette and I. W. Hunter, "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", *Appl. Opt.*, Vol. 35, pp. 3506-3513, 1996.
 39. D. J. Bone, "Fourier fringe analysis: two-dimensional phase unwrapping

problem", *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 3627–3632, 1991.

감사의 글

2009년 10월 학부 졸업을 앞두고 많은 고민을 하던시기에 대학원에 들어와 생활을 하면서 정신없이 지낸지가 2년이란 시간이 되어 졸업을 앞두고 되었습니다. 지난 2년여 시간동안 어렵고 힘든일도 있었지만, 재미나고 즐겁게 보내며 논문과 함께 짝지 않았던 대학원 생활을 마무리 하려고 하니 그동안 지내온 일들이 주마등처럼 스쳐지나가며 생각에 잠깁니다. 지금 생각해보면 아쉬움도 많이 남지만 소중한 추억으로 간직할 것 같습니다. 많이 부족한 제가 이렇게 성장하기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 세월 속에서 격려를 함으로써 힘이 되어 주고 바른길로 나아갈 수 있도록 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 대학원 생활을 할 수 있게 해주시고 많이 부족한 저를 세심한 지도와 격려로 대학원 생활을 알차게 보낼 수 있게 해주신 김경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사를 해주신 김재열 교수님, 장완식 교수님께도 감사드리며 매 학기 큰 열정으로 심도 있는 강의를 통해 가르침을 주신 나기대 교수님, 양인영 교수님, 김택현 교수님, 정낙규 교수님, 김지훈 교수님, 박정우 교수님께도 감사드립니다.

항상 대학원생들과 같이 생활하면서 질책과 격려를 아끼지 않으시고 많은 가르침을 주신 자동화실험실의 어머니와 같은 정현철 박사님, 자동화실험실의 아버지와 같은 장호섭 박사님께도 감사드립니다. 자동화실험실의 방장이시면서 언제나 함께하며 세심하게 챙겨주시고 강원도의 힘을 보여주시던 동수형, 그리고 나와 함께 2년이라는 대학원 생활을 같이 하며 많은 시간을 함께 보낸 나의 대학원 동기인 맑고 맑은 천사표 찬식이형, 까칠한 부산 소녀 소영이 고맙고 감사드리며 꿈을 이룰 수 있길 기원합니다.

실험실의 후배이며 학부동기인 주변 상황 인지 능력과 언변술이 뛰어난 문찬식과 첫인상은 엘리트 그러나 실상은 2% 부족한 김동률 1년동안 실험실 선후배와 친구로 생활하고 고지식한 선배 밑에서 어려울때도 있고, 힘들어도 도와주며 힘이 되어 주어 감사합니다. 그리고, 나이 많은 후배이며 생각이 깊은 이용찬형, 실험실

의 막내이며 게임광 윤경원 1년동안 많이 혼나고 욕도 많이 들었지만 항상 뒤에서 도와주어 감사드립니다. 모두 같은 공간에서 생활하면서 헤어질 시간이 다가오니 못내 아쉽지만 앞으로 좀 더 힘을 내서 남은 대학원 생활동안 자신이 원하는 목표를 이루길 바랍니다.

마지막으로 가족은 저에게 가장 큰 힘이 되어 주었습니다. 언제나 묵묵히 지켜봐 주시던 아버지, 하나부터 열까지 세심하게 신경써주시는 어머니, 비가 오든 눈이 오든 춥고 더운날에도 시장에서 장사하시며 손주 걱정하시며 고생하시는 우리우리 할머니, 그리고 세상에 하나뿐인 여동생과 우리의 새가족인 매제에게 고맙고 감사하다는 말을 전합니다. 이 모든 분들이 있었기에 지금의 제가 있다고 생각하며 사회에 나가 꼭 필요가 인재가 될 수 있도록 항상 노력하겠습니다.