



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2011년 2월
석사학위논문

전자처리 스펙클 간섭법을 이용한
맞대기 용접부의 잔류응력 측정

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 경 수

전자처리 스펙클 간섭법을 이용한 맞대기 용접부의 잔류응력 측정

Measurement of residual stress
on butt welded joints using ESPI

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 경 수

전자처리 스펙클 간섭법을 이용한 맞대기 용접부의 잔류응력 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2010년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 경 수

김경수의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김재열 인

위원 조선대학교 교수 장완식 인

위원 조선대학교 교수 김경석 인

2010년 11월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	IV
ABSTRACT	V
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 배경	5
제 1 절 스펙클과 간섭무늬 형성	5
1-1. 스펙클 형성과 크기	5
1-2. 간섭무늬 형성	9
제 2 절 정량해석을 위한 물체의 변형정보 추출	13
2-1. 위상이동(Phase shifting)	13
2-2. 결풀침(Unwrapping)	14
제 3 절 광학간섭계(ESPI)	16
3-1. 면내 간섭계(In-plane ESPI)	16
3-2. 면외 간섭계(Out-of-plane ESPI)	18
제 4 절 용접 잔류응력	20
4-1. 잔류응력의 개념	20

4-2. 용접 잔류응력의 발생원인 및 영향	21
4-3. 용접 잔류응력 측정 방법	24
4-4. ESPI를 이용한 잔류응력의 측정 방법	27
제 3 장 실험장치 및 구성	29
제 1 절 측정시스템	29
1-1. ESPI 시스템	29
1-2. MTS 시스템	32
1-3. 시험편	33
제 2 절 실험방법	35
제 4 장 실험결과 및 고찰	36
제 1 절 ESPI를 이용한 면내변형 측정결과	36
제 2 절 위상지도 해석 결과 및 고찰	38
제 5 장 결론	52
참 고 문 헌	53

LIST OF TABLES

Table 3-1	Technical data of ESPI system	30
Table 3-2	Technical data of PZT control device	31
Table 3-3	Specification of fatigue testing machine	32
Table 3-4	Chemical properties of base metal of specimen	33
Table 3-5	Mechanical properties of base metal of specimen	33
Table 4-1	ESPI phase-map by force variation of CO ₂ butt welded (both sides) specimen	36
Table 4-2	ESPI phase-map by force variation of TIG butt welded (both sides) specimen	37
Table 4-3	ESPI phase-map of CO ₂ and TIG butt welded (one side) specimen (Fore=5kN)	37
Table 4-4	Results of CO ₂ butt welded (both sides) specimen by forces	50
Table 4-5	Results of TIG butt welded (both sides) specimen by forces	50
Table 4-6	Results of CO ₂ and TIG butt welded (one side) specimen (Fore=5kN)	51

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Light scattering on object surface	5
Fig. 2-2 Speckle pattern	5
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	15
Fig. 2-7 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement	17
Fig. 2-8 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to out-of-plane displacement	19
Fig. 2-9 Residual stress distribution on butt welded joint	21
Fig. 2-10 Schematic illustration of the weldments	24
Fig. 2-11 Figuration of welded specimen	27
Fig. 2-12 Equation expression of measuring residual stresses on weldment	28
Fig. 3-1 Schematic of ESPI system	29
Fig. 3-2 Shape and size of specimen	33
Fig. 3-3 Schematic illustration zig for welding	34
Fig. 4-1 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides butt welded specimen (F=5kN)	39
Fig. 4-2 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides butt welded specimen (F=7kN)	40
Fig. 4-3 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides butt welded specimen (F=9kN)	41
Fig. 4-4 Analysis results of phasemap of CO ₂ -both sides butt welded specimen(F=11kN)	42
Fig. 4-5 Analysis results of phasemap of CO ₂ -one side	

butt welded specimen(F=5kN)	43
Fig. 4-6 Analysis results of phasemap of TIG-both sides	
butt welded specimen(F=7kN)	44
Fig. 4-7 Analysis results of phasemap of TIG-both sides	
butt welded specimen(F=9kN)	45
Fig. 4-8 Analysis results of phasemap of TIG-both sides	
butt welded specimen(F=11kN)	46
Fig. 4-9 Analysis results of phasemap of TIG-one side	
butt welded specimen(F=5kN)	47
Fig. 4-10 Deformation comparison of CO2-both sides	
butt welded specimen by forces	48
Fig. 4-11 Deformation comparison of TIG-both sides	
butt welded specimen by forces	49

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3-1 Fatigue machine system	32
Photo. 3-2 Configuration of experiment system	35

ABSTRACT

Measurement of residual stress on butt welded joints using ESPI

Kyung-Su Kim

Advisor : Prof. Kyeong-Suk Kim, 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

용접은 일반적으로 열을 가하여 2개의 금속재료를 접합하는 기술로써 현대산업의 발전과 함께 다양한 용접법의 발달로 철 및 비철금속의 접합에 없어서는 안 되는 중요한 기술로 인식되고 있다¹⁾. 이러한 용접 이음은 종래 구조물 조립에 잘 사용되었던 리벳 이음보다도 접합강도가 높고, 가볍고 구조물을 단기간에 건조할 수 있다. 또한 수밀성·기밀성이 뛰어난 장점을 가지고 있어, 조선, 원자력, 항공기, 자동차, 건축 등 산업전반에 걸쳐 활용되어 산업현장에서 중추적인 역할을 담당하고 있다²⁾. 하지만 용접이 단시간 내에 높은 열을 가해 접합하는 방법이므로 재질의 변화, 잔류응력, 변형 또는 용접 결함이 생기기 쉬워 이로 인한 용접구조물의 갑작스런 파괴가 발생할 수 있다³⁾. 그중에서도 특히 용접 구조물의 결함 유발 및 파괴에 이르게 하는 주원인은 잔류응력이라 할 수 있다.

잔류응력(residual stress)이란 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력을 말한다. 특히, 용접 시 용접이음부에서 고온의 열에 의한 열응력과 용접 후 냉각 시 수축응력이 작용함으로써 잔류응력이 발생할 가능성이 높다. 용접에 의한 잔류응력의 발생은 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 용접부위의 열응력에 의한 것으로서 용접 시 모재의 외적 구속, 모재 크기, 용접입열, 판두께 등의 영향을 받는다. 용접구조물에서 용접잔류응력 크기 및 분포 상태는 취성파괴, 피로파괴, 응력부식균열 등 다양한 종류의 파손에 직접적으로 영향을 끼쳐 잔류응력을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다^{4),5)}.

잔류응력에 관한 연구는 세계대전을 전후로 하여 전투기, 군함 등의 군사장비에서 잔류응력으로 인한 파괴현상과 산업시설의 유지보수 및 파괴 후 원인규명 측면에서 이에 관한 인식의 정도가 점차 확산되었고 이 때 이론 확립과 더불어 산업현장에서의 적용에 대한 활발한 연구가 시작되었다. 이후 산업발달과 더불어 구조물 및 산업설비의 재료가 고강도화 됨에 따라 재료에 상당한 크기의 잔류응력 및 하중상태에 있으므로 이를 규명하기 위한 연구가 가속화되어 왔다^{6),7)}.

잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 크게 이론적 방법과 실험적 측정방법이 있

다. 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 데이터 획득이 안 될 수도 있다. 이 때문에 실험적인 방법에 의한 잔류응력 측정을 통한 데이터 획득이 점차 발전하고 있으며 이러한 실험에 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 파단시켰을 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 방법으로는 X-선 회절법(X-ray Diffraction method), 중성자 회절법(neutron diffraction method), 초음파 측정법(ultrasonic method) 등이 있다^{8)~11)}. 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 구멍일지라도 측정 대상물에 손상을 주어야 한다는 특징을 가지고 있다^{12),13)}. 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^{14)~16)}. 이러한 레이저 응용 계측 기술은 짧은 시간에 많은 대상체를 비접촉, 실시간, 고분해능으로 검사가 가능한 기술로써 Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Shearography 등의 광학기반의 비파괴검사기술들이 있으며 국내외 산업현장에서의 활용이 점차 높아지고 있

는 추세이다. 레이저응용 계측기술은 간섭계 기반의 변위측정기술에서 레이저유도 초음파, 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 활용을 하고 있다^{17),18)}. 비파괴 계측 및 검사를 위한 스페클 상관간섭법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 ESPI와 Shearography로 발전을 하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사 등의 분야로 적용되고 있다. 특히 ESPI는 초기 필름을 사용한 Speckle correlation interferometry에서 컴퓨터기술의 발전과 함께 필름을 CCD camera로 대체하고 영상처리기술을 융합하여 Digital 기술로 진화하여 현재 정밀한 수준으로 대상물 전체 영역에 걸쳐 실시간 측정 및 해석이 가능한 기술로써 산업현장에서 널리 활용되고 있다^{19)~22)}.

따라서 본 연구에서는 잔류응력을 측정하기 위하여 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전자 스페클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 현재 조선 및 원자력설비 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 기본 개념은 용접시험편을 동일하중으로 인장 또는 압축을 시켰을 경우 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것에 착안하였고 이를 ESPI 계측시스템을 이용하여 동시에 측정한 후 제시된 방법을 통하여 용접부위의 잔류응력을 측정하는 것이다. 본 연구에서 제안하는 용접부 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.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 스페클과 간섭무늬 형성

1-1. 스페클 형성과 크기

레이저 빛과 같은 가간섭성이 좋은 두 개의 광원이 Fig. 2-1과 같이 표면이 레이저 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 조사될 경우 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인해 보강간섭과 소멸간섭을 일으켜 스페클이 형성되고 Fig. 2-2와 같이 희고 검은 알갱이들이 모여 있는 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타난다^{23),36)}. 이와 같이 밝고 어두운 반점형태의 무늬가 무작위로 변화되는 밝기분포로 나타나는 현상을 스페클효과(speckle effect)라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭을 일으켜 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 측정 대상체에 변화가 생기면 레이저의 광경로에 변화가 생김으로서 각 상태에 따른 스페클이 달라지는데 이는 광검출기에 광강도 분포로 기록되어져 각각의 상태를 비교함으로써 물체표면의 거칠기, 변형 등의 정보를 얻을 수 있다.

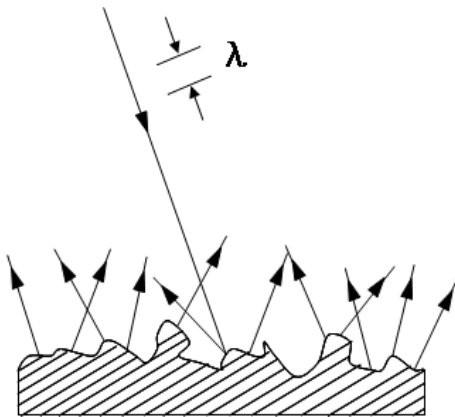


Fig. 2-1 Light scattering on object surface

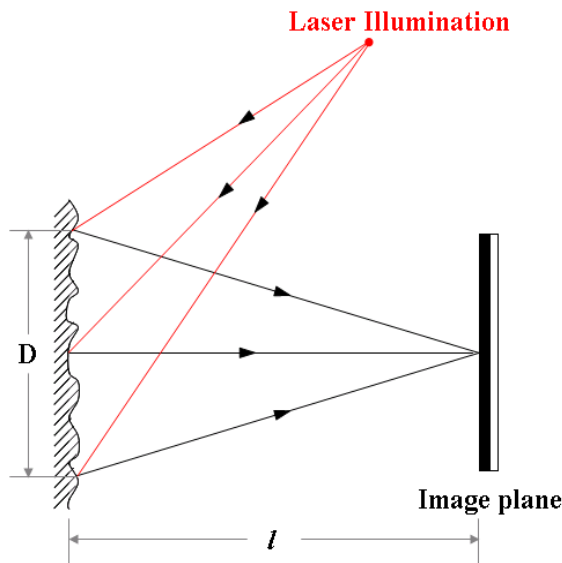
Fig. 2-2 Speckle pattern

스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나뉘게 되며 Fig. 2-3에서 objective speckle과 subjective speckle의 형성을 보여

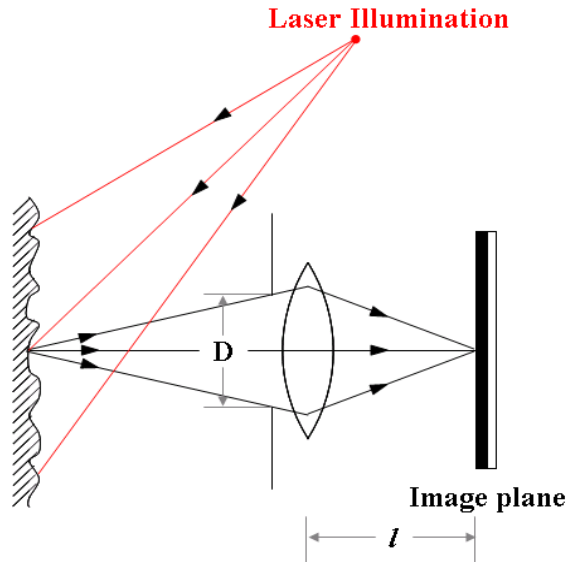
주고 있다. 결상렌즈의 사용 여부에 따라 구분되어 지는 이 두 스페클은 그 크기 또한 다르게 나타난다. 스페클의 크기는 결상면 (image plane) 위에서 보강간섭과 소멸간섭에 의해 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다²⁴⁾. 즉, 서로 상관하지 않는 광각도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다. Objective speckle 크기의 정의는 물체표면 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 viewing plane (AB plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식(2-1)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다²⁵⁾.

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

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 형성되는 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 최소 밝기와의 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 된다¹⁹⁾.

$$S_s = 1.22(1+M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-3)$$

또한 subjective speckle의 물체표면에서 크기는 식(2-3)의 S_s 로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며²⁹, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다^{26),27)}. 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.

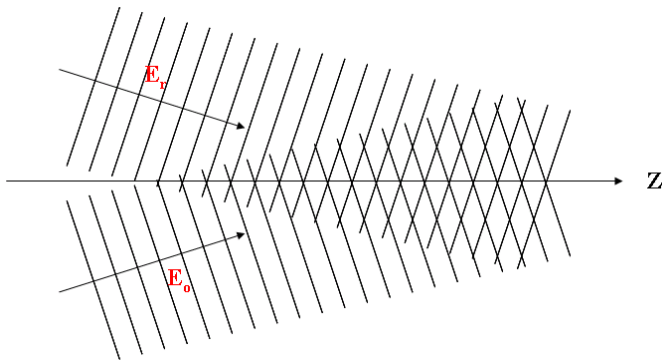


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

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_r)은 물체광(E_o)에 의해 형성된 스페클을 z -축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 일반적으로 빛의 파동에 대한 진폭은 복소수에 대한 함수로 표현 가능하므로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, y, z, t) = a e^{i\phi} e^{-i2\pi f t} \quad (2-4)$$

여기서, a 는 진폭, ϕ 는 공간 위상, f 는 주파수를 나타낸다. 스페클 상관 간섭에서는 일반적으로 공간적인 부분만 다루기 때문에 시간에 의한 부분은 생략이 가능하다. 따라서 공간적인 복소 진폭만을 고려한다면 스페클 간섭에 대한 물체광

(object beam)과 참조광(reference beam)의 진폭은 다음과 같이 식(2-5)와 식(2-6)으로 표현할 수 있다.

$$u_o = a_o \exp\left[-i\left(\phi + \frac{2\pi L_o}{\lambda}\right)\right] \quad (2-5)$$

$$u_r = a_r \exp\left[-i\left(\phi + \frac{2\pi L_r}{\lambda}\right)\right] \quad (2-6)$$

여기서, ϕ 는 beam의 임의 위상을 나타내며 L_o 와 L_r 은 물체광과 참조광의 광로를 나타낸다. Intensity는 진폭 자승의 절대값에 비례하기 때문에 식(2-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = u \cdot u^* = |u|^2 = a^2 \quad (2-7)$$

따라서, 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(intensity)는 식(2-8)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} I &= |u_o + u_r|^2 = u_o \cdot u_o^* + u_o \cdot u_r^* + u_r \cdot u_o^* + u_r \cdot u_r^* \\ &= |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2|a_o||a_r|\cos\left[\frac{2\pi(L_o - L_r)}{\lambda}\right] \\ &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\phi \end{aligned} \quad (2-8)$$

여기서 I_o 는 주변 광강도(background intensity)를 나타내며 위상차 ϕ 는 다음과 같이 식(2-9)로 표현할 수도 있다.

$$\phi = \phi_o - \phi_r = knL \quad (2-9)$$

여기서, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이고, n 은 매질의 굴절률을 나타내며, L 은 기하학적인 광 경로차를 나타낸다.

물체의 변형 정보를 나타내는 스펙클 상관 간섭무늬는 앞에서 언급한 바와 같이 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 intensity들은 CCD카메라의 cell에 결상되며

출력되는 시그널은 intensity에 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^{28),29)}.

$$I_b = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \phi \quad (2-10)$$

$$I_a = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2-11)$$

여기서 I_b : 물체변형전의 광강도, I_a : 물체변형후의 광강도, $\Delta\phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다.

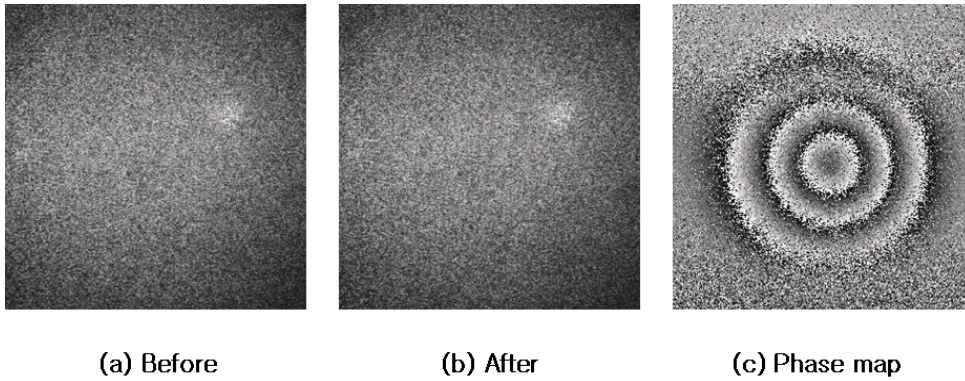


Fig. 2-5 Principle of fringe pattern formation

주변 광강도로 인해 선명도가 좋지 않은 addition에 의한 스펙클 상관 간섭무늬 보다는 대비(contrast)면에서 우수한 subtraction에 의한 스펙클 상관 간섭 무늬가 주로 이용되고 있다. 변형전·후의 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-12)와 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} I_s &= I_b - I_a \\ &= 4\sqrt{I_o I_r} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \end{aligned} \quad (2-12)$$

여기서, I_s : 물체변형전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도이다. 실제적으로 모니터에서 관찰되는 광강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_o I_r} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right| \quad (2-13)$$

여기서 K : 모니터 밝기분포 상수 이다. 식(2-13)과 같이 변형 전후의 스페클을 감산 처리함으로써 나타나는 줄무늬를 스페클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)라고 한다. 식(2-13)에서 물체의 변형에 따른 위상변화($\Delta\phi$)를 추출함으로써 물체의 변형을 측정할 수 있다.

제 2 절 정량해석을 위한 물체의 변형정보 추출

물체의 변형을 측정하기 위해서는 변형에 따른 위상변화를 추출해야하는데 이를 추출하기 위한 방법으로는 등간격의 프린지패턴에 대해 화상처리를 이용하여 프린지 패턴으로부터 line를 추출하고 이 사이를 보간 함으로서 물체의 변형을 추출하는 방법, 상관간섭무늬 분포에 대한 2D 감산-합산 처리에 의한 방법, 공간 위상이 동기법을 이용한 위상의 추출 등의 다양한 방법이 있다^{30)~32)}. 이러한 방법 중에서 K. Creath에 의해 제안된 시간의존성 위상이동기법이 적용이 용이하고 효과적이며 가장 잘 활용되고 있다. 이 위상이동기법은 식(2-7)에서 3개의 미지수를 구하기 위해 PZT를 참조광의 광경로에 삽입하여 위상변조를 하여 최소 3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구할 수 있는 방법이다. 이처럼 위상이동기법을 적용하여 변형 전과 변형 후의 위상을 구함으로서 물체의 변형위상을 직접 추출할 수가 있다.

2-1. 위상이동(Phase shifting)

PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다³³⁾.

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 (2-14)과 같이 얻게 된다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \phi \\ I_2 &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_3 &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos (\phi + \pi) \\ I_4 &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos \left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2-14)$$

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.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2-15)$$

ESPI에서 변형 해석을 위한 실험에서는 식(2-10)의 변형 전과 식(2-11)의 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(2-16)과 같이 측정할 수 있게 된다. 하지만 이 방법은 4개의 방정식을 얻기 위한 위상변조가 이루어지는 시간동안 안정된 상태를 유지하여야 하며, 위상이동 중에 발생하는 물체의 변형 또는 외부잡음은 오차의 요인이 된다.

$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a \quad (2-16)$$

2-2. 결핍침(unwrapping)

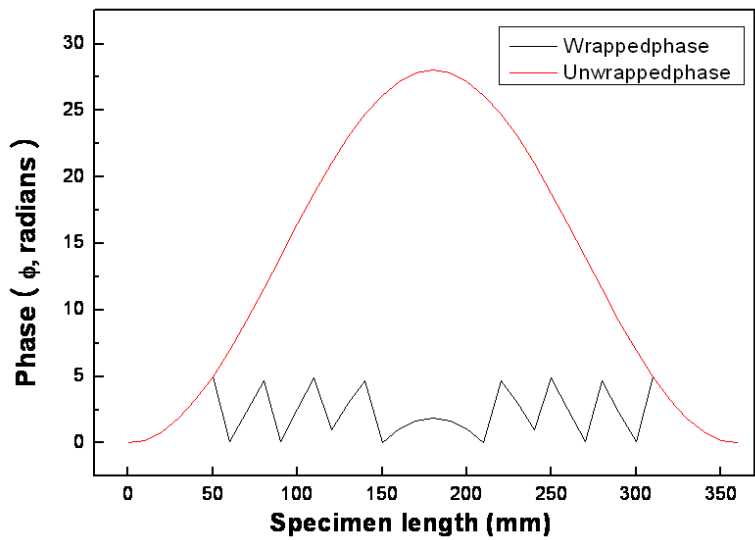
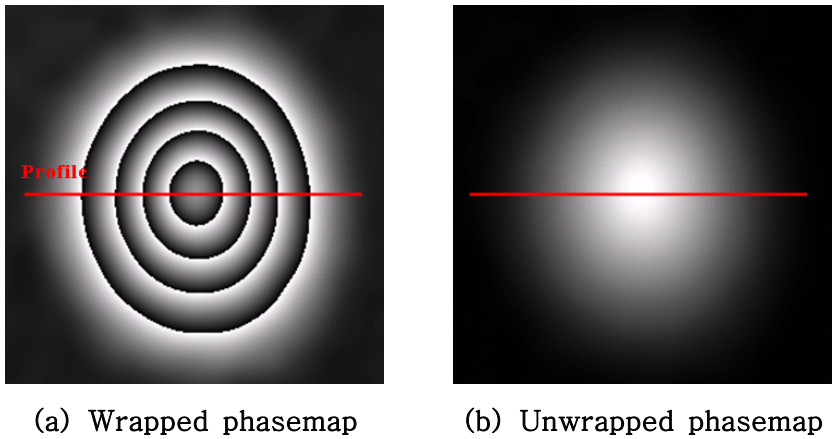
앞 절에서 설명한 위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상지도(phasemap)는 위상을 추정하기 위한 acrtangent함수의 modulo- 2π 특성으로 인해 $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 구성된 톱니 바퀴형상으로 모호성을 가지게 된다. 이렇게 arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정을 위상 결핍침(phase unwrapping)이라 하고 이에 대한 예를 Fig. 2-6에 나타내었다. 위상 결핍침에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있으며 적용하고자 하는 대상 및 조건에 따라 적절한 위상 결핍침 알고리즘을 적용하여야 한다^{34),35)}.

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(2-17)을 이용하여 결핍침 된 위상을 구하게 된다.

$$\phi_{unwrapping} = \phi_{wrapping} + 2\pi N \quad (2-17)$$

여기서, $\phi_{unwrapping}$: unwrapped phase, $\phi_{wrapping}$: wrapped phase, N : fringe order 이다.

여기서, 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.



(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 파장과 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 사용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 전자적으로 화상처리 및 변형 정보를 얻는 방법을 전자스페클패턴 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 참조광이 시편 조사면에서 난반사된 speckle field인지 조사되지 않은 uniform field 인지여 따라 면내 변위와 면외 변위에 민감한 간섭계로 결정된다. 본 연구에서는 인장·압축 실험을 통해 대상체의 면내 변형을 측정하기 위하여 면내 변위에 민감한 In-plane ESPI를 구성하여 실험하였다.

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 물체광과 참조광은 광학적으로 거친 표면에서 난반사되고 speckle field를 형성하여 중첩된 speckle들이 렌즈를 거쳐 image plane에 결상된다. 이때의 측정 대상체 표면에 대한 거칠기와 변위, 변형 정보를 포함하는 스페클 패턴은 대상체의 변형에 대한 스페클 패턴과 비교함으로써 in-plane 변위에 대한 정보만을 레이저 파장(laser wavelength) 단위로 얻어낼 수 있다.

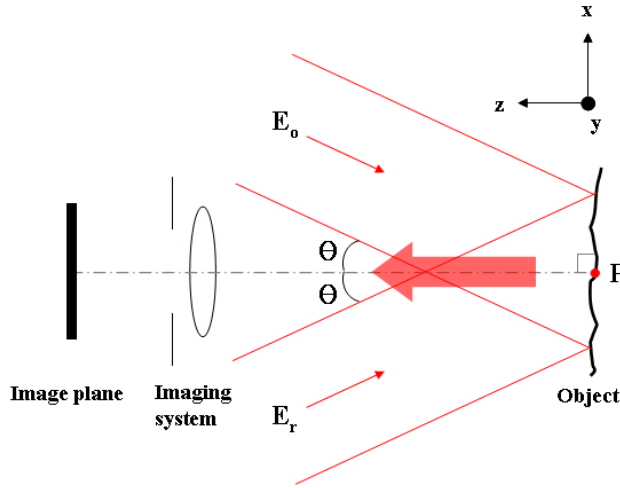


Fig. 2-7 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement

이러한 ESPI를 이용한 면내변위 측정법은 면내변위에 민감하게 레이저 빛의 조사 방향을 조정하여 측정하는 방법으로써 이 측정법은 Leendertz에 의해 제안된 방법으로 참조광을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광을 같은 각도로 조사하여 측정하는 것이다. 여기서 y 방향인 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.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \gamma \quad (2-18)$$

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(2-19)와 같이 된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\gamma + \Delta\phi) \quad (2-19)$$

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.

$$\begin{aligned}
\delta_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} & (2-20) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)]
\end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned}
\delta_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_2) \cdot \vec{d} & (2-21) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)]
\end{aligned}$$

이때 \vec{k}_2 는 입사광 2의 진행벡터이다. $\Delta\phi$ 는 식(2-20), 식(2-21)의 차이이므로 두 식을 빼주면, 식(2-22)가 된다. 따라서 만약 어두운 줄무늬(dark fringe)가 나타나게 되면 $2n\pi$ 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 면내변위 d_x 는 식(2-23)와 같이 된다.

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) d_x \sin\theta \quad (2-22)$$

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (2-23)$$

3-2. 면외 간섭계 (out-of-plane ESPI)

Fig. 2-8은 면외변위 측정을 위한 대표적인 간섭계로서 물체로 직접 조사되어 subjective speckle을 형성하는 물체광과 CCD 카메라 촬상소자에 Uniform field 형태로 직접 조사되는 참조광으로 나눌 수 있다.

물체 변형 전에 objective speckle pattern은 참조광과 간섭하여 제 2의 스펙클 패턴 즉, 변형 전 스펙클패턴을 형성하고, 물체가 변형 후에 objective speckle은

참조광과 간섭하여 변형 후의 스페클패턴을 형성하게 된다. 스페클상관 간섭무늬는 변형 전과 변형 후의 스페클 패턴의 감산처리로부터 형성이 되고, 위상이동기법을 적용하여 변형전후의 위상을 추출하여 물체의 변형을 측정할 수 있다.

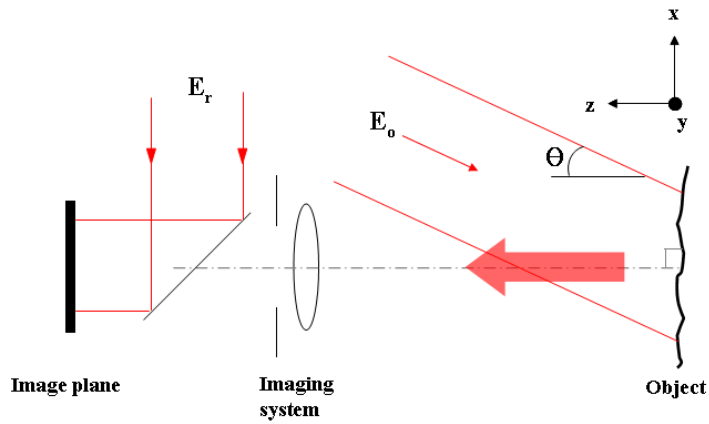


Fig. 2-8 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to out-of-plane displacement

제 4 절 용접 잔류응력

4-1. 잔류응력의 개념

잔류응력(residual stress)이란 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력을 말한다. 용접부에는 소재에 외력이 작용하지 않아도 용접부의 온도변화에 따라서 응력이 발생하고 냉각 시 수축응력이 커져 실온에서 완전히 냉각한 후에는 결국 용접구조물 자신 또는 외부로부터의 구속에 의한 어떤 크기의 잔류응력이 발생하게 된다. 이 잔류응력은 외적구속, 용착순서, 이음현상, 용접입열, 판두께, 모재의 크기 등의 요인에 의하여 영향을 받아 다양한 형태로 발생한다.

실제 용접이음에 있어서는 대부분의 경우 외부로부터 구속이 있고, 더구나 용접에 의한 온도이력도 불균일하다. 따라서 일반적으로 용접부에 존재하는 잔류응력은 이들의 요인에 의해 생기는 내적 및 외적구속에 의한 응력이 합성되어 있다고 할 수 있다. 예를 들면, Fig. 2-9(a)와 같이 양단부가 구속된 2개의 강판을 맞대기 용접한 경우의 잔류응력 분포를 생각해 보자. 간단히 y방향 응력 σ_y 의 판두께에 대한 평균값에 대해서만 주목한다. x축 상에 대한 σ_y 의 분포는 잘 알려진 것처럼 Fig. 2-9(b)에서와 같은 분포를 하고 있다. 여기서, 강판벽에 고정되고 있는 부분을 절단해서 외적구속을 제거하면, x축상의 잔류응력은 반드시 완전히 없어지지 않고, Fig. 2-9(c)와 같은 분포가 남는다. 즉, 용접선의 중앙에서 인장응력이 최대이고 용접선의 끝을 향할수록 점차 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀌며 양단에서 압축응력이 최대가 된다. Fig. 2-9(d)는 외적 구속이 존재하기 때문에 생긴 잔류응력의 성분이므로 이것을 외적구속에 의한 잔류응력 성분이라고 할 수 있다. 또, Fig. 2-9(c)는 외적구속을 제거했음에도 불구하고, 존재하고 있는 응력성분이므로, 이것은 내적구속에 의한 잔류응력 성분이다. Fig. 2-9(e)의 E-F 단면의 응력분포 같이 용접선에 평행한 응력은 비드 중심에서 큰 인장력이 되고 용접선으로부터 모재 쪽으로 멀어짐에 따라 급격히 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀔 수 있다³⁷⁾.

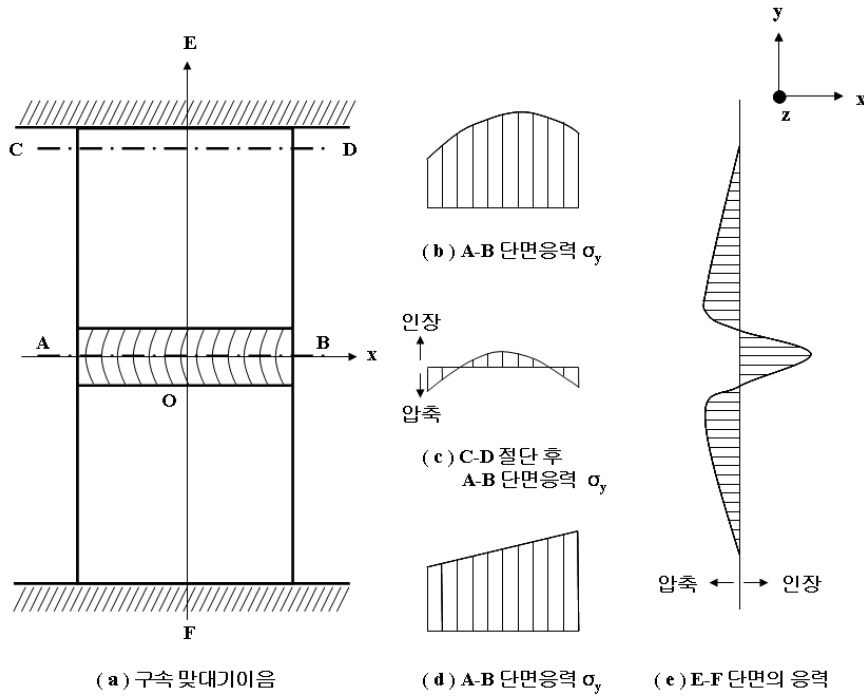


Fig. 2-9 Residual stress distribution on butt welded joint

4-2. 용접잔류응력의 발생원인 및 영향

용접 이음에서는 물체에 외력이 작용하지 않아도 용접부의 온도 변화에 의하여 응력이 발생하며, 특히 냉각시의 수축응력이 크므로 완전하게 실온까지 냉각한 경우에는 일정 크기의 응력이 잔류하게 되는데 이를 잔류응력이라 한다. 용접부 이음 형상, 용접 입열 상태, 판 두께, 모재의 형상, 용착 순서, 외적 구속 조건 등의 인자에 크게 영향을 받는다. 맞대기 이음의 경우 양 끝단이 자유로운 상태에서 용접하면 용접금속의 수축에 의해 이음에 대해 직각방향과 수축과 각 변형(angle distortion)이 일어난다. 양 끝단을 구속하고 용접하면 변형은 거의 발생하지 않지만 위의 수축과 각변형 대신에 응력이 잔류하게 된다³⁸⁾.

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. 용접하

는 동안 발생하는 열이 용접재의 팽창과 모재의 냉각에 의한 수축으로 인하여 변형과 용접 잔류응력을 발생시킨다. 잔류응력은 외력 없이 자기 평행 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 국부결함의 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 문제로 작용한다. 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 있어 파괴되기 직전까지 얼마간의 소성변형이 일어나는 경우에는 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하고 있어도 강도에는 영향을 미치지 않는다.

(2) 취성파괴(brittle fracture)

연성이 부족한 재료가 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 동계의 저온, 정하중하에서 갑자기 유리나 도자기와 같이 취성파괴가 될 수 있다. 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)

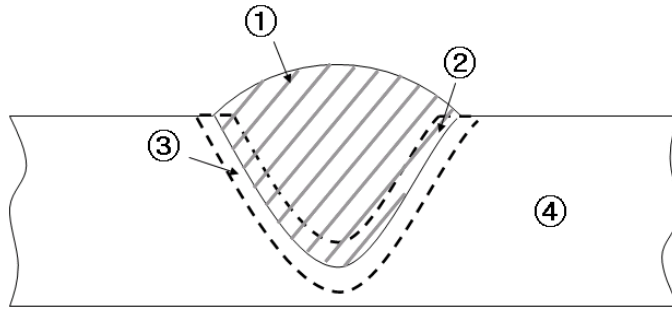
보통 연강용접 이음에서는 항복점에 가까운 정하중을 가하면 잔류응력이 크게 감소한다. 반복하중시험편에 있어서도 마찬가지이다. 예를 들어 두께 15mm 연강

판의 한쪽에 비드 용접한 시험편을 피로강도보다 약간 낮은 하중으로 2×10^6 회 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 응력집중이 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.



- ①, ② : **Composition zone**
 ③ : **Heat affected zone**
 ④ : **Unaffected base metal**

Fig. 2-10 Schematic illustration of the weldments

4-3. 용접 잔류응력 측정 방법

잔류응력 측정은 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 구분할 수 있다. 파괴적인 방법은 홀 드릴링(hole drilling) 방법, 톱 절단(saw cutting) 방법 등과 같이 대상물의 부분 또는 전체를 파단시켰을 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 방법으로는 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 방법도 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.

비파괴 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 측

정할 수 있으나 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력분포를 측정하기에는 어려움이 있다. 이러한 기존 잔류응력 측정 방법의 문제점에 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 스트레인 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 게이지 길이로서 어떤 격자 평면들의 원자간의 간격을 사용한다. 이 방법의 응력 분석 원리는 위와 같은 X-선의 성질과 아래의 Bragg 회절 방정식을 기본으로 하여 측정한다.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2-24)$$

여기에서, n 은 회절 차수를 말하며, λ 는 입사 X-선의 파장, d 는 다결정 재료의 평면간의 간격 그리고 θ 는 X-선의 입사각을 말한다.

X-선 회절을 이용한 방법은 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. 입사빔과 회절빔으로 인한 파장의 다양한 강도 분포가 나오면 그에 따라 $\Delta\lambda/\lambda$ 를 구할 수 있으며 그게 바로 측정하고자 하는 부재의 변형률 ϵ 이 되는 것이다. 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 여러 가지 방법 중에서 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전자 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 현재 조선 및 원자력설비 분야 등 여러 산업 분야에서 문제시되고 있는 잔류응력을 검출하기 위한 방법을 고안하여 그 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통한 검증은 하고자 한다. 본 연구에서 잔류응력을 측정하기 위한 기본개념은 용접시험편을 동일하중으로 인장 또는 압축을 시켰을 경우 Fig 2-11에서 볼 수 있듯이 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것에 착안하여 이를 ESPI 계측시스템을 이용하여 동시에 측정한 후 제시된 방법을 통하여 용접부위의 잔류응력을 측정하는 것이다. 즉, 모재부와 용접부의 변형률을 ESPI를 이용하여 측정할 수 있으며, 인장·압축 시 작용 응력의 차이를 통하여 잔류응력값 소거를 통해 용접부의 탄성계수 및 잔류응력을 아래에서 제시한 식을 통해 구할 수 있다.

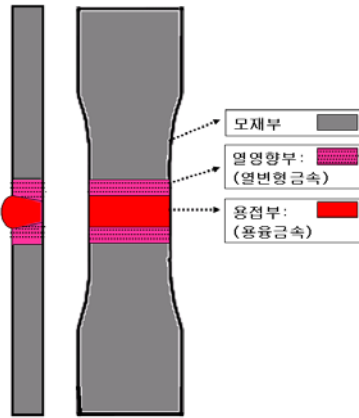


Fig. 2-11 Figuration of welded specimen

동일하중으로 시험편에 인장력과 압축력을 순차적으로 부하하여 Fig. 2와 같이 소재에 변형을 가할 때, 용접부 잔류응력을 내재한 시험편의 각 구간에 작용하는 응력을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\langle \text{인장시} \rangle \quad \frac{P}{A} = \sigma_m = E_m \epsilon_m = \sigma_w + \sigma_R = E_w \epsilon_{wt} + \sigma_R \quad (2-25)$$

$$\langle \text{압축시} \rangle \quad -\frac{P}{A} = -\sigma_m = -E_m \epsilon_m = -\sigma_w + \sigma_R = -E_w \epsilon_{wc} + \sigma_R \quad (2-26)$$

여기에서, σ_m : 모재부의 응력, E_m : 모재부의 탄성계수, ϵ_m : 모재부의 변형률, σ_w : 용접부의 응력, σ_R : 용접부의 잔류응력, E_w : 용접부의 탄성계수, ϵ_{wt} : 인장 시 용접부의 변형률, ϵ_{wc} : 압축 시 용접부의 변형률이다.

식 (2-25)에서 식 (2-26)을 빼면 잔류응력 값은 소거되어 식 (2-27)로 표현할 수 있다.

$$\langle \text{인 장 - 압 축} \rangle \quad 2\sigma_m = 2E_m\epsilon_m = E_w(\epsilon_{wt} + \epsilon_{wc}) \quad (2-27)$$

식 (2-22)에 ESPI를 통해 측정된 모재부와 용접부의 변형률값을 이용하여 미지수인 용접부의 탄성계수 값을 획득할 수 있다. 이를 식(2-11)에 대입하여 계산하면 잔류응력 값이 얻어진다.

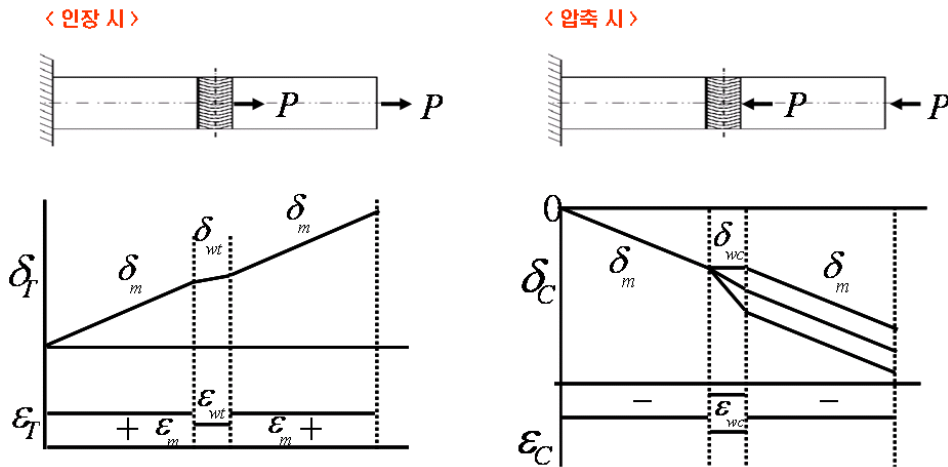


Fig. 2-12 Equation expression of measuring residual stresses on weldment

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 측정 시스템

1-1. ESPI 시스템

간류응력을 측정하기 위한 전자처리 스펙클패턴 간섭(ESPI) 시스템은 독일 Ettemeyer 사의 상용제품을 이용하였으며 장치의 구성은 Fig. 3-1과 같이 532 nm 파장의 Nd:YAG laser source, laser controller, polarization maintaining optical fiber, ESPI sensor, controller, PC로 구성되어 있다. ESPI 센서 내부에는 x, y, z축 변위를 측정할 수 있는 간섭계가 구성되어 있다. 최초 레이저 소스에서 광파이버를 통하여 ESPI sensor로 입력되면 4개의 암으로 고르게 나누어져 대상체에 레이저 빛이 조사되는데 이를 셔터 제어를 통한 광 경로를 차단함으로써 각각의 상황에 맞게 사용자가 간섭계를 선택하여 사용할 수 있다.

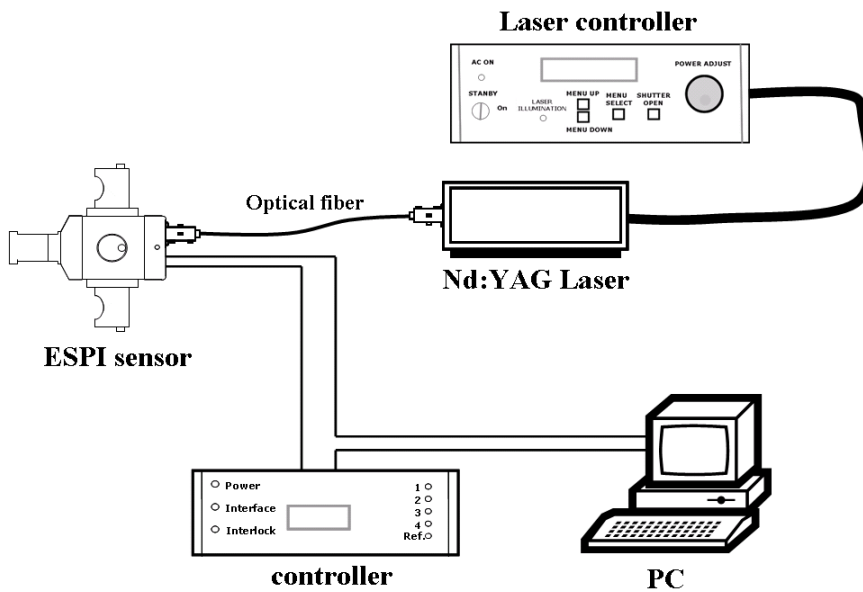


Fig. 3-1 Schematic of ESPI system

본 실험에서 Y축 면내 변위를 측정하기 위해서는 4개의 암 중에서 상·하에 있는 암으로부터 나온 레이저 빛이 물체에 조사되고 이들이 만나 간섭을 일으켜 면내 변위를 측정하게 된다. 위상 추출을 위해 4단계 위상이동기법이 적용되었으며, 위상이동은 외부 controller로 piezo electronic transducer(PZT)에 전압차를 주어 제어함으로써 위상이동기법을 적용하였다. 또한, 위상이동기법에 의해 얻어진 위상지도는 Ettemeyer 사의 상용프로그램인 ISTRA를 이용하여 수치해석 함으로써 변위 및 변형률을 구할 수 있었다. Table 3-1은 ESPI 시스템의 제원을, Table 3-2는 위상이동에 쓰이는 PZT의 제원을 나타내었다.

Table. 3-1 Technical data of ESPI system

Description	Technical data
Operating voltage	12VDC
Measuring resolution	0.03 ~ 1 mm adjustable
Measuring range	static 1 ~ 20 mm per measuring step, any with serial measurement dynamic 0.3 ~ 3 mm amplitude
Measuring area	static up to 1 m ² dynamic up to 400×600 mm ² (16"×24")
Working distance	variable, 0.1 ... > 2.5 m (4 ... >60")
Operation modes	automatic, manual, static, dynamic 1D-, 2D-, 3D- operation
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Dimensions of sensor head without illumination arms	80 x 80 x 120 mm ³
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D-analysis
Data analysis	automatic or semi automatic

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. 140mA (max. 5ms)
Power supply output voltage	12 VDC
Power supply output current	Typ. 300mA

1-2. MTS 시스템

본 연구에서 제시한 방법으로 잔류응력을 측정하기 위해 용접시험편에 인장력과 압축력의 반복하중을 인가하기 위한 피로시험기(MTS Co.)를 Photo. 3-1과 같이 사용하였다. 피로시험기는 미국 MTS 사의 상용제품(Model: MTS 793)을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servo-valve controller로 이루어져 있다. 피로시험기에 대한 제원을 Table 3-3에 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. 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 강도와 재질면에서 우수하여 선박 및 각종 대형 용접 구조물에 주로 사용되고 있는 용접구조용압연강재인 SM490을 재질로 하여 Fig. 3-2와 같이 제작하였으며 이 때 시험편 종류는 용접방법(CO₂, TIG 용접)과 양면·단면 용접 등으로 나누어 총 4 type으로 제작하였다. SM490 재료에 대한 화학적·기계적 물성치를 Table 3-4, Table 3-5에 나타내었다.

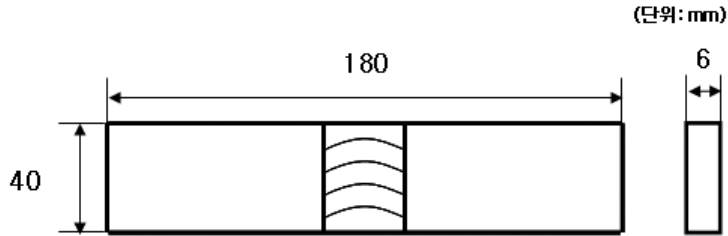


Fig. 3-2 Shape and size of specimen

Table 3-4 Chemical properties of base metal of specimen

Type	Chemical components (%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM490	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.035

Table 3-5 Mechanical properties of base metal of specimen

Type	E(GPa)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
SM490	204	345	513	29.6

이때 용접 시험편 제작방법은 CO₂와 TIG 맞대기 용접법을 사용하였다. ESPI 및 MTS 인장 · 압축실험을 위해 두께가 6.0mm인 강판을 용접 비드가 최소 10mm이상의 폭으로 CO₂와 TIG맞대기 용접을 양면과 단면으로 하였다. 얇은 두께로 인해 용접 시 수축 및 비틀림, 휨 등의 변형이 발생할 수 있으므로 이를 최소화 하기위해 Fig. 3-3에서와 같이 양 끝단을 무게 있는 판으로 고정시킨 후 이를 클램프로 고정시켜 용접을 하였다. 그 후 강판을 와이어 커팅으로 절단하여 Fig. 3-2와 같은 크기로 시험편을 제작하였다.

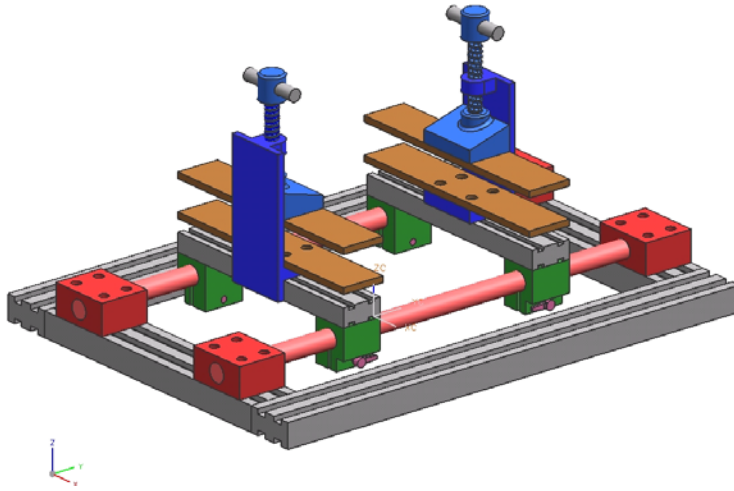


Fig. 3-3 Schematic illustration zig for welding

제 2 절 실험 방법

본 논문에서 제시하는 방법으로 잔류응력을 측정하기 위하여 Photo. 3-2와 같이 실험장치를 구성하였다. 용접시험편에 MTS를 이용하여 동일한 크기의 반복하중을 인가하여 인장과 압축을 시켜 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률을 ESPI를 이용하여 동시에 계측함으로써 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 실험적으로 검증 하였다. 이때 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다.

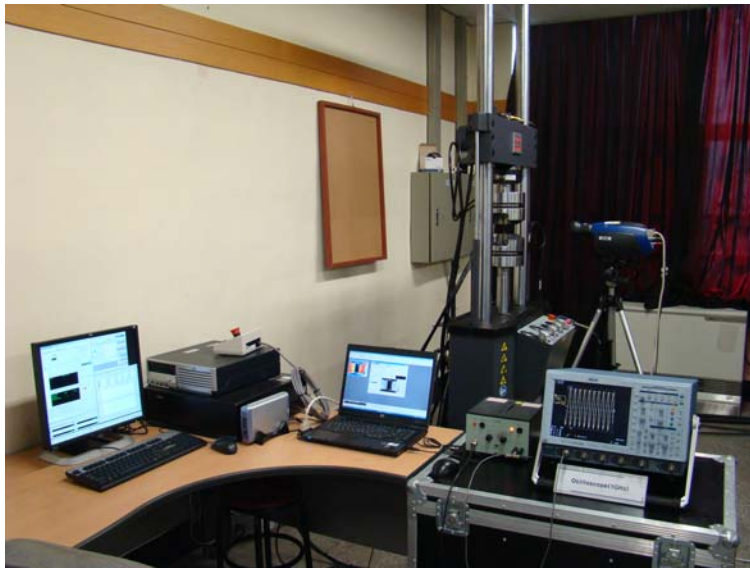


Photo. 3-2 Configuration of experiment system

실험을 통해 하중에 따른 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 논문에서 제시한 용접부 잔류응력 측정방법의 실험적 검증을 위하여 SM490 용접 시험편에 MTS를 이용하여 동일한 하중으로 인장력과 압축력을 가하였고 시험편의 모재부 및 용접부위에 발생하는 변형 분포를 ESPI를 이용하여 측정하였다. 이 때 시험편 용접부의 정밀한 관찰을 위하여 최대한 확대하여 모재부 및 용접부의 변형 분포를 관측하였다. Table 4-1, 4-2, 4-3은 프린지 형성의 결과로써, 각 시험편에서 인장·압축하중 변화에 따른 위상지도의 변화를 나타내었다.

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




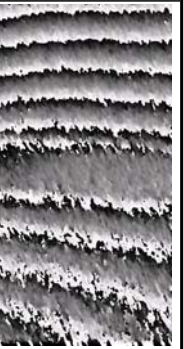
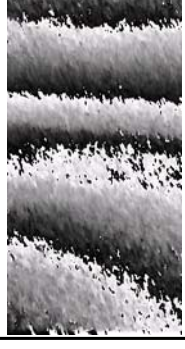
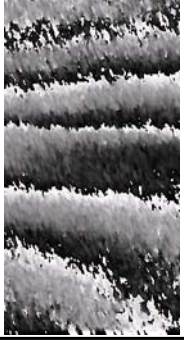

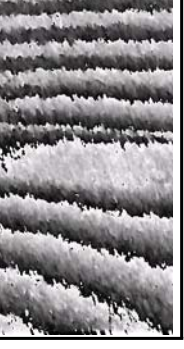
	5kN	7kN	9kN	11kN
Tensile				
compression				

Table 4-2 ESPI phase-map of TIG butt welded (both sides) specimen

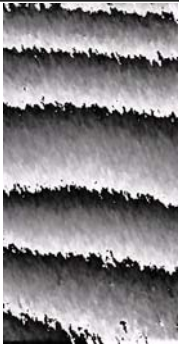

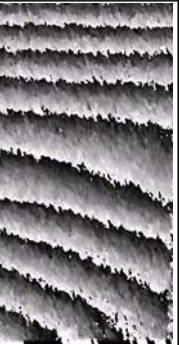
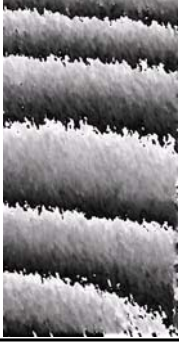
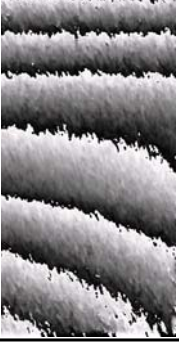
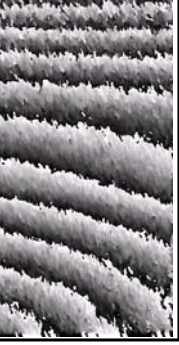
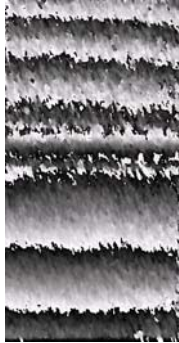
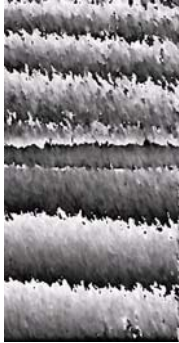
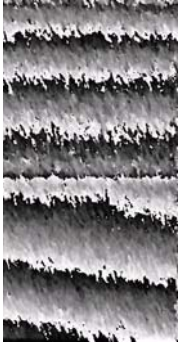
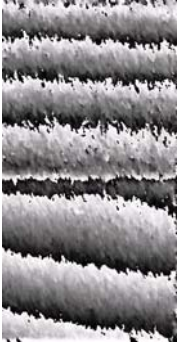
	7kN	9kN	11kN
Tensile			
compression			

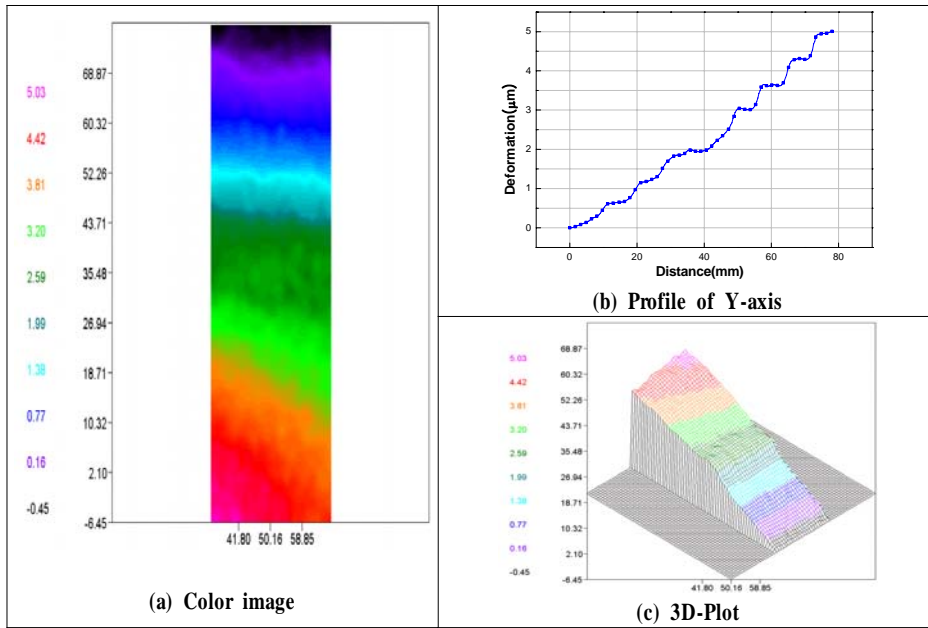
Table 4-3 ESPI phase-map of CO2 and TIG butt welded (one side) specimen

CO2 butt welded (F=5kN)		TIG butt welded (F=5kN)	
Tensile	compression	Tensile	compression
			

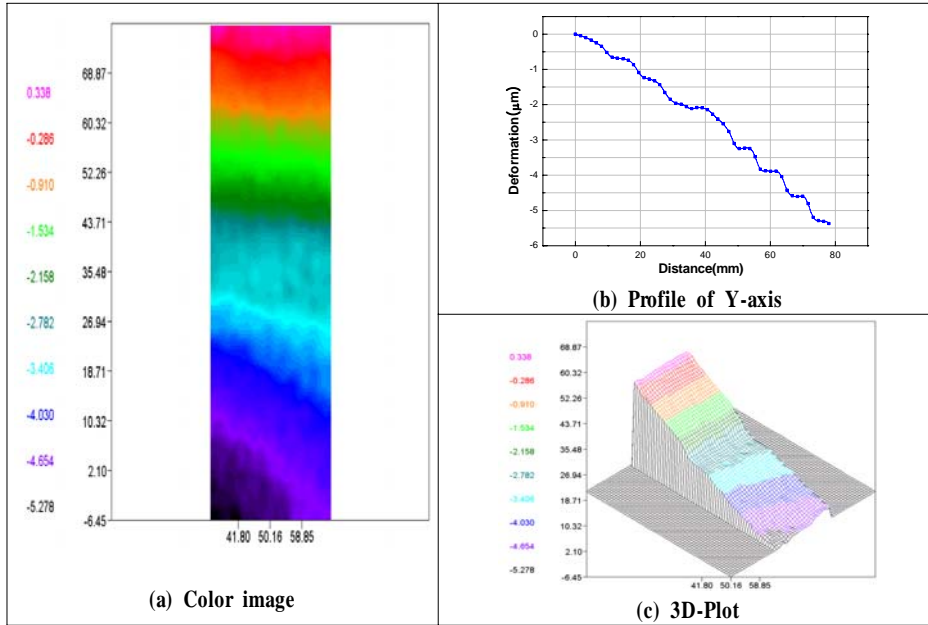
제 2 절 위상지도 해석결과 및 고찰

위의 위상지도에서 확인할 수 있듯이 시험편에 인가된 하중이 증가됨에 따라 ESPI를 이용하여 측정된 각 시험편의 위상지도에 나타난 간섭 줄무늬의 수가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있어 변형 및 변형량이 점점 증가함을 알 수 있다. 또한, 같은 시험편에서 모재부에서의 변형과 용접부에서의 변형이 다르게 나타남을 확인할 수 있었으며 이때 용접부의 변형은 모재부보다 작음을 알 수 있었다.

변형 및 변형량을 정량적으로 계산하기 위하여 ESPI로부터 얻은 위상지도를 상용 프로그램(ISTR, Ettemeyer GmbH., Germany)을 이용하여 분석하여 각각의 시험편 별로 color image, profile, 3D-plot을 Fig. 4-1에서 Fig. 4-9에 나타내었다.

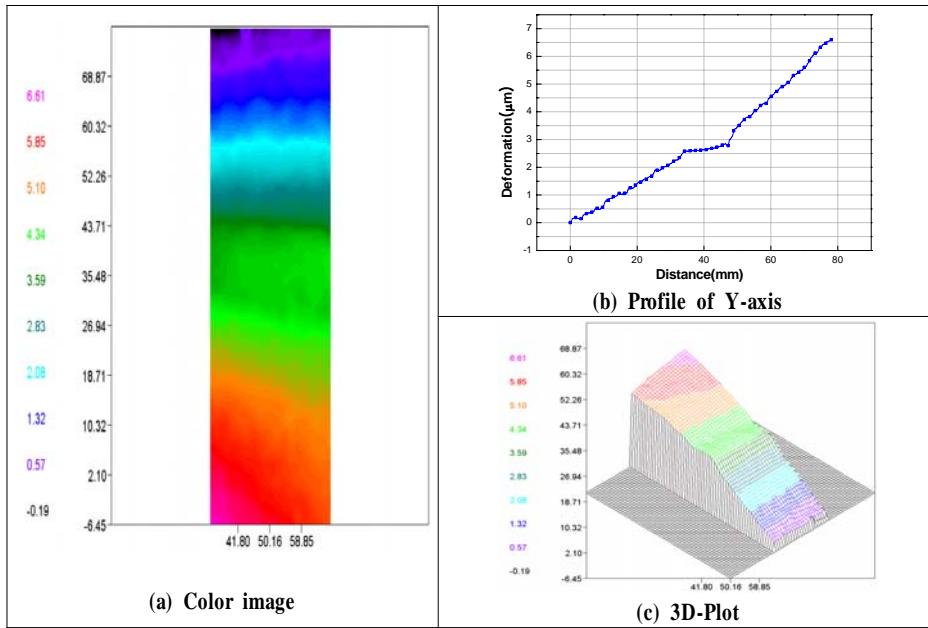


(A) Tensile

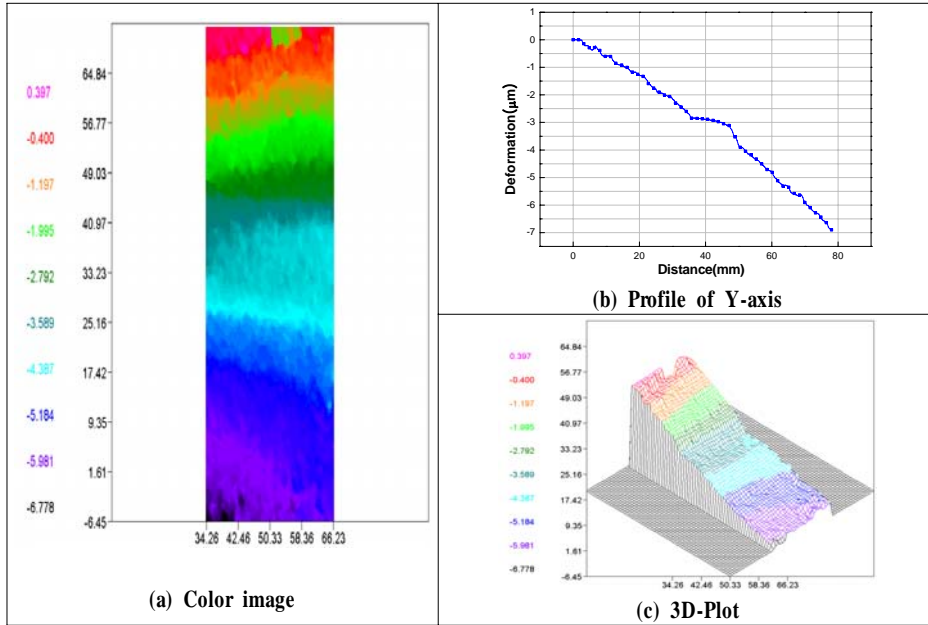


(B) Compression

Fig. 4-1 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides butt welded specimen (F=5kN)

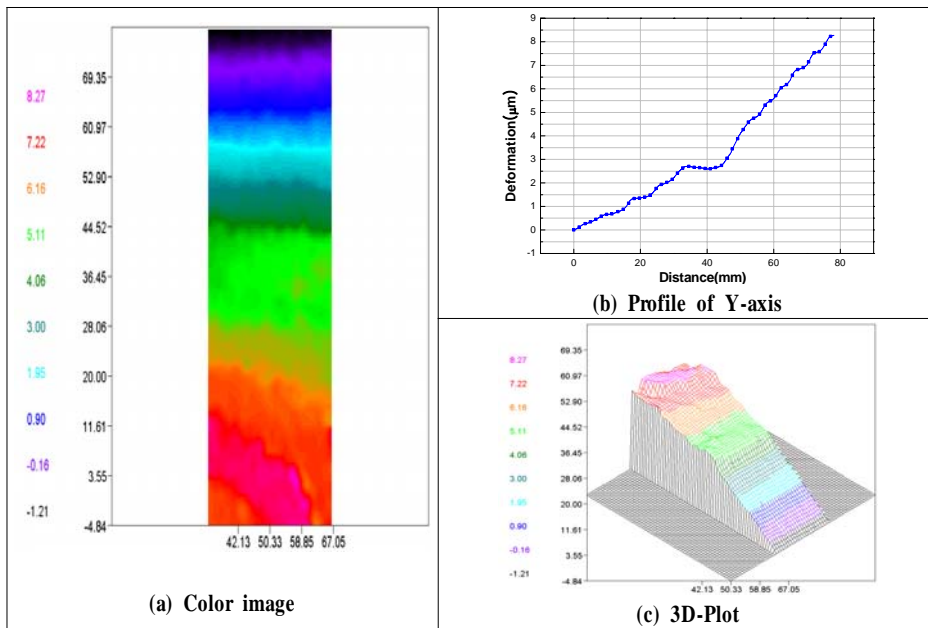


(a) Tensile

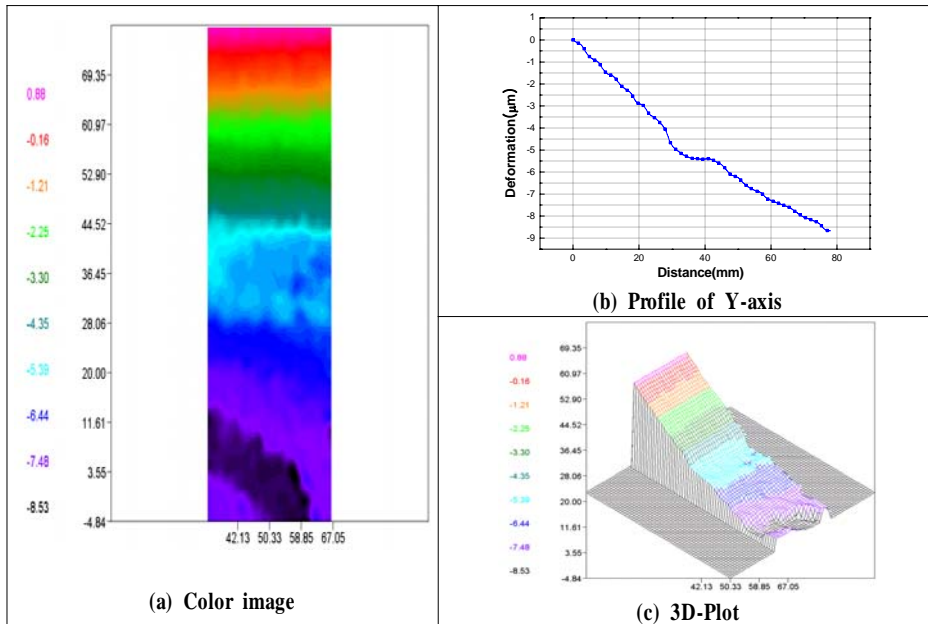


(b) Compression

Fig. 4-2 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides butt welded specimen(F=7kN)

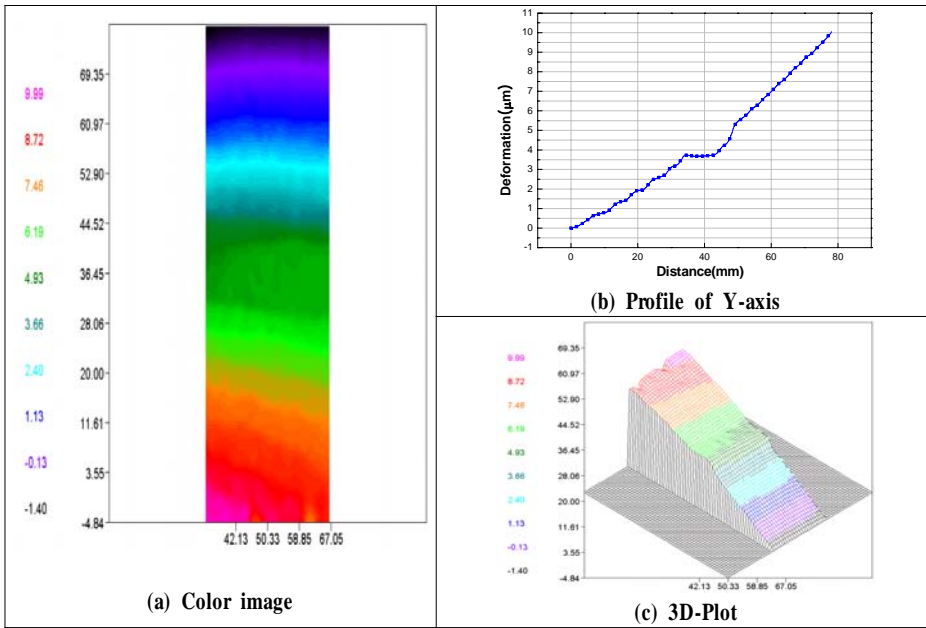


(a) Tensile

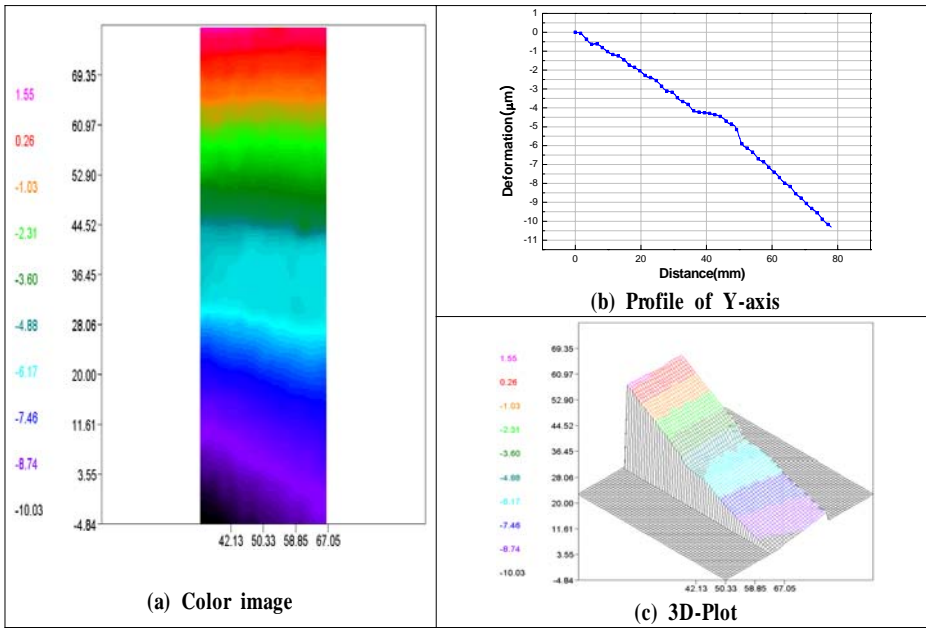


(b) Compression

Fig. 4-3 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides butt welded specimen(F=9kN)

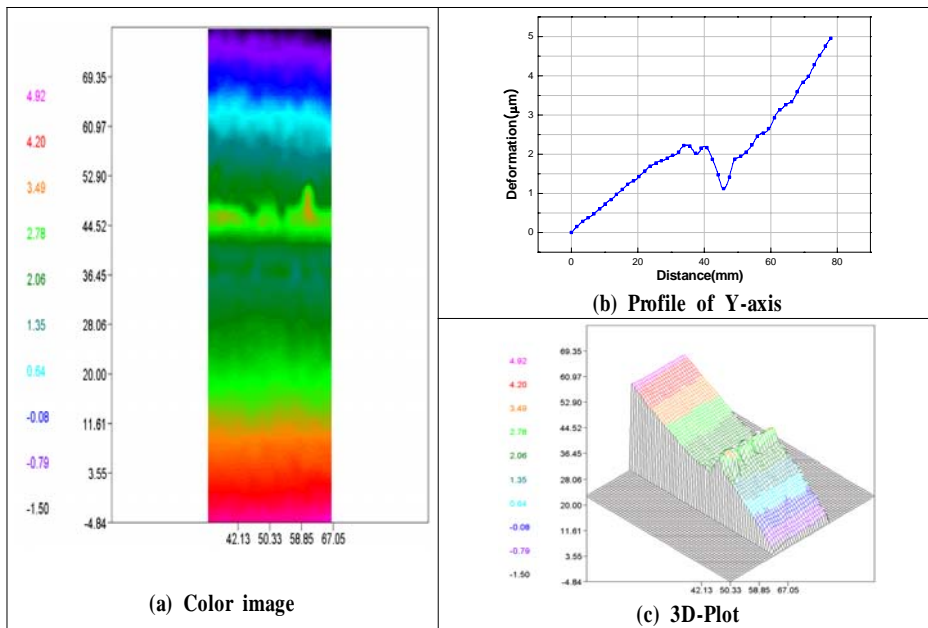


(a) Tensile

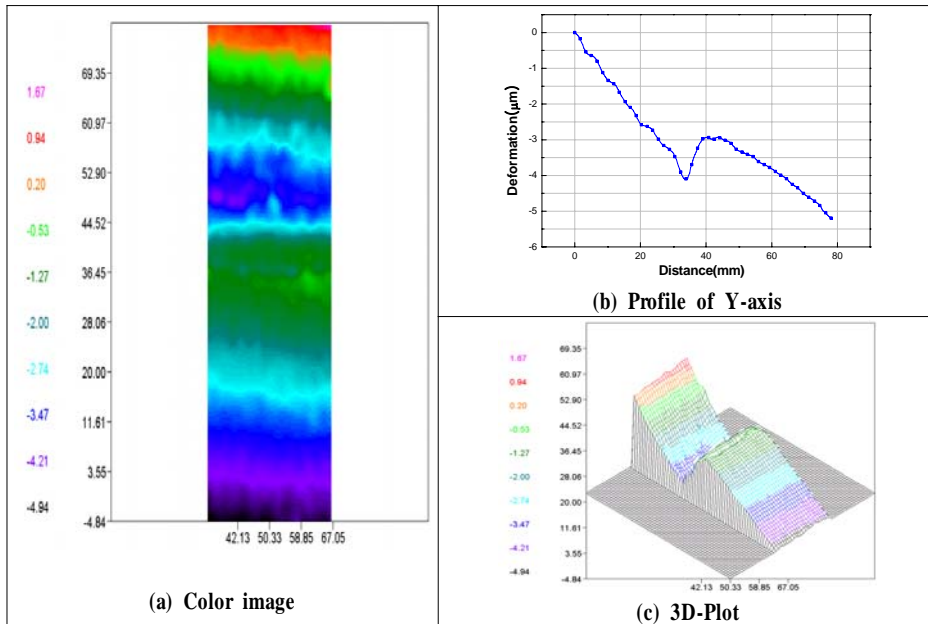


(b) Compression

Fig. 4-4 Analysis results of phasemap of CO₂-both sides butt welded specimen(F=11kN)

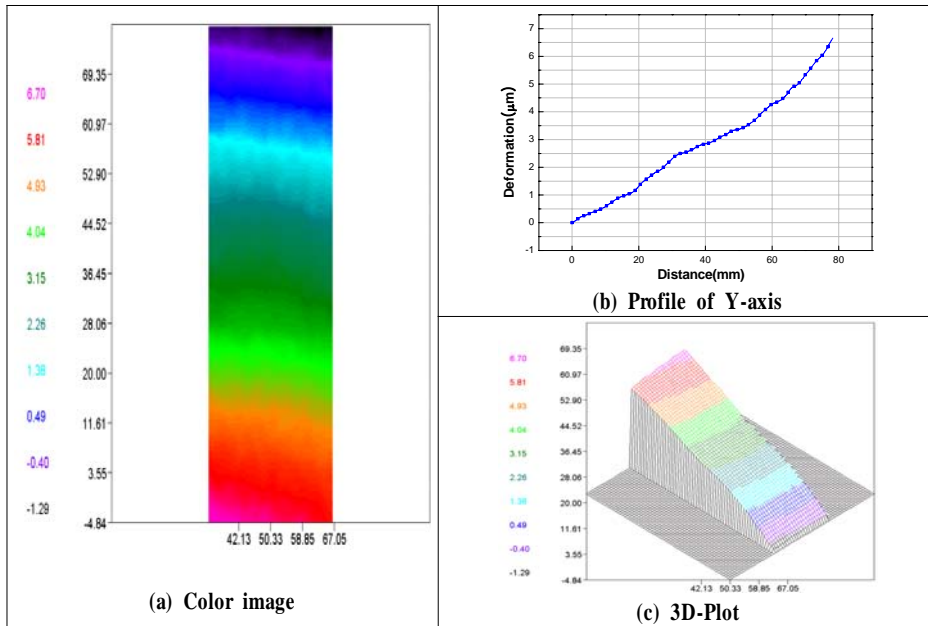


(a) Tensile

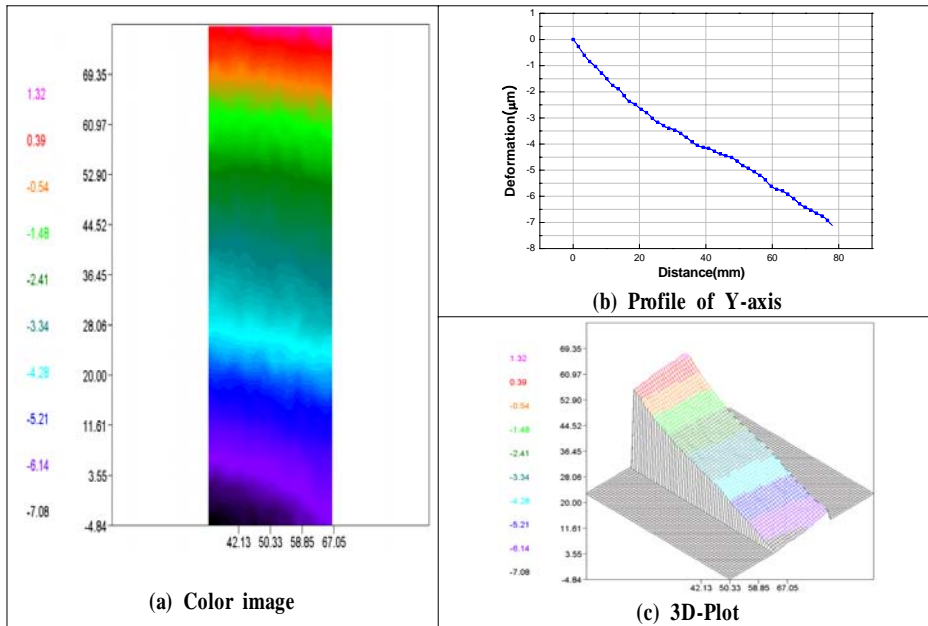


(b) Compression

Fig. 4-5 Analysis results of phase map of CO₂-one side butt welded specimen(F=5kN)

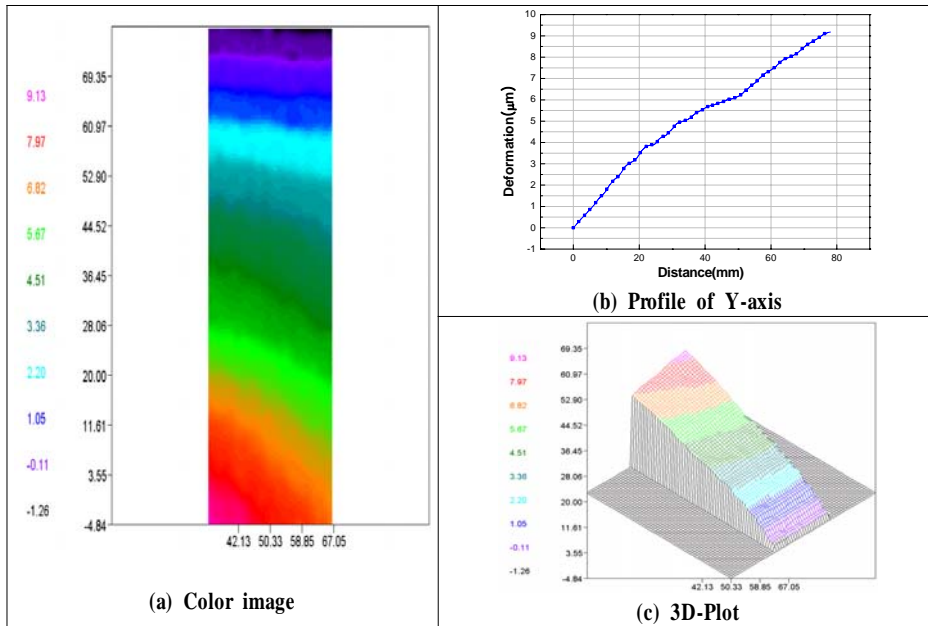


(a) Tensile

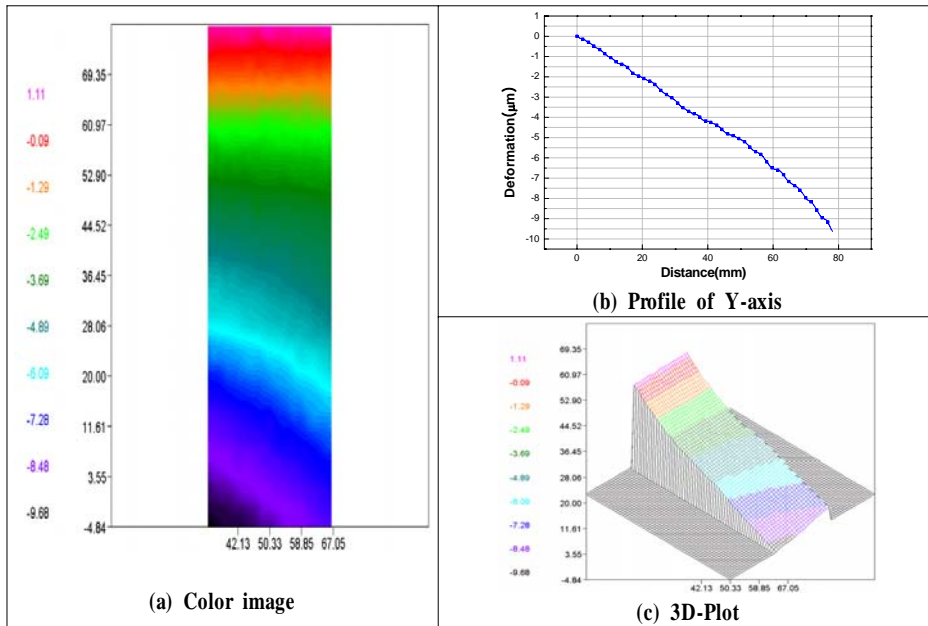


(b) Compression

Fig. 4-6 Analysis results of phasemap of TIG-both sides butt welded specimen(F=7kN)

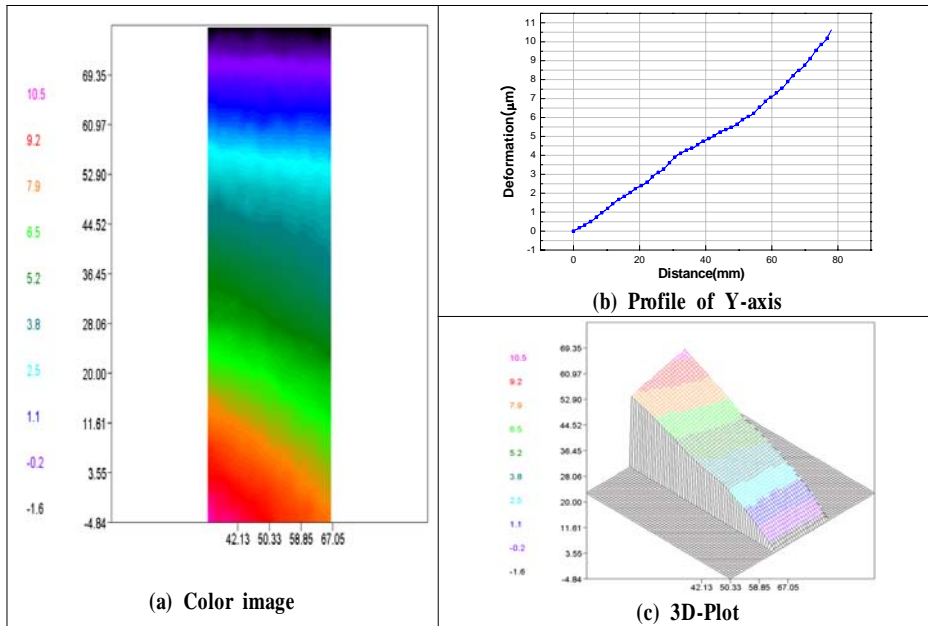


(a) Tensile

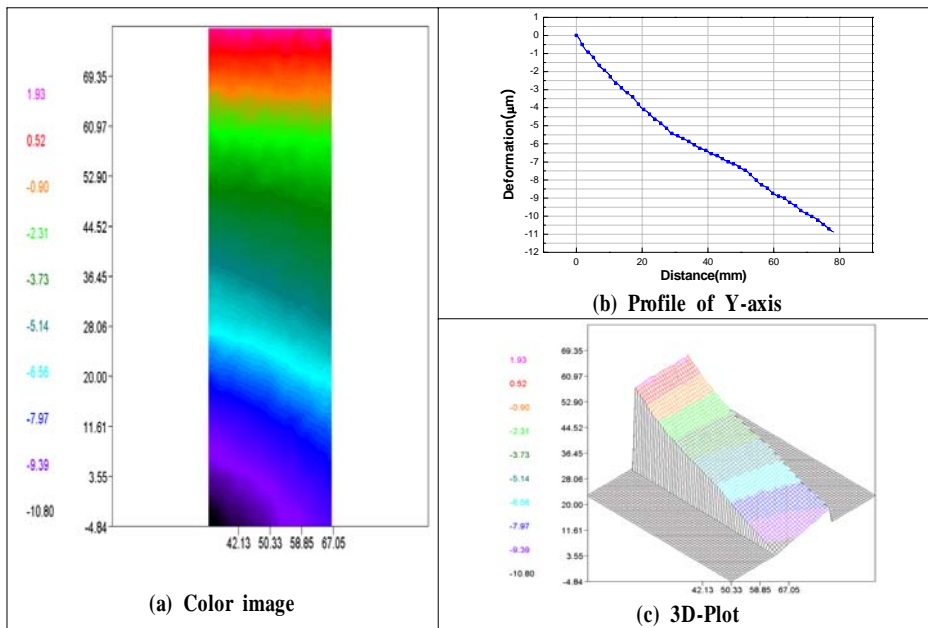


(b) Compression

Fig. 4-7 Analysis results of phasemap of TIG-both sides butt welded specimen(F=9kN)

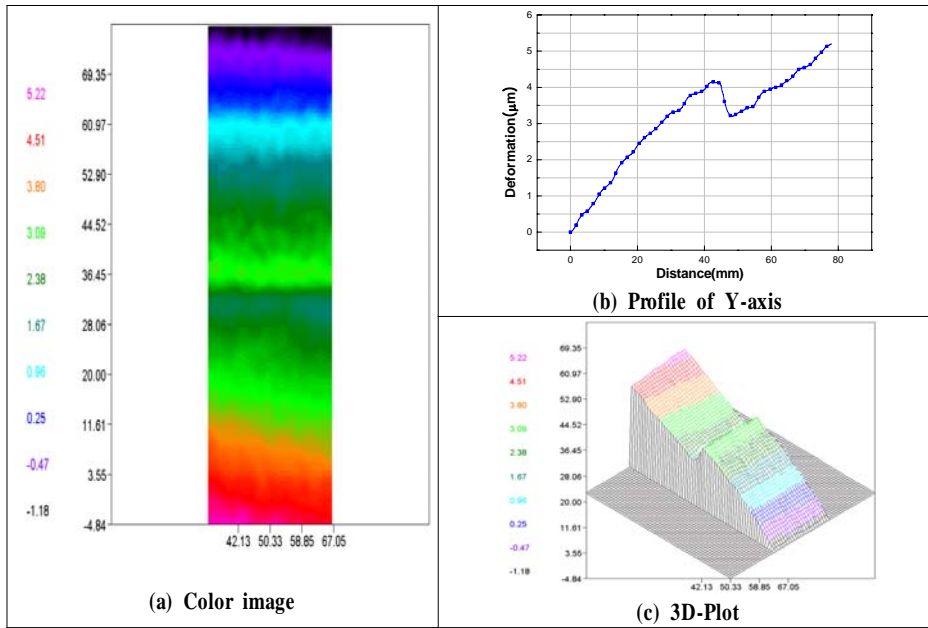


(a) Tensile

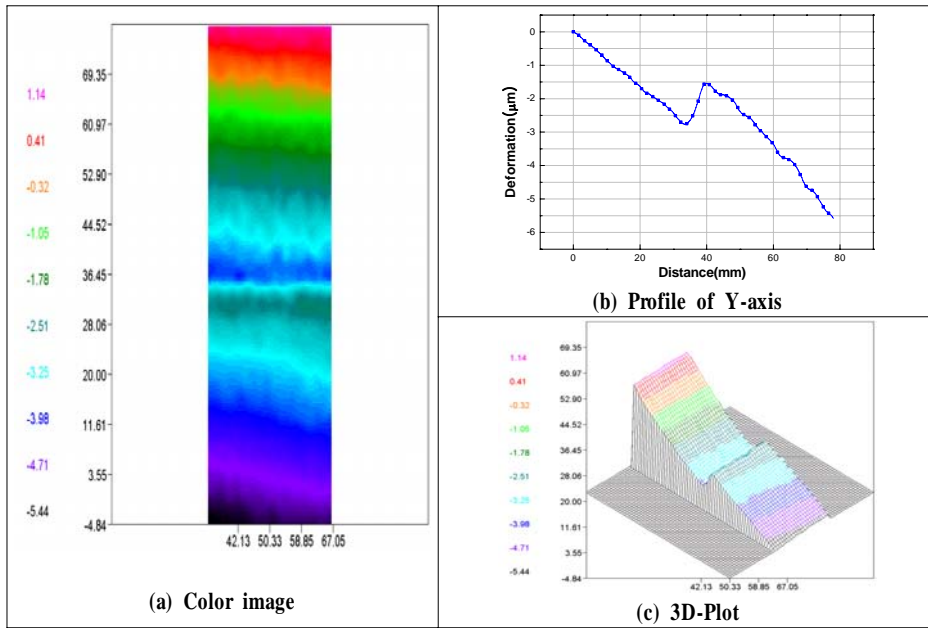


(b) Compression

Fig. 4-8 Analysis results of phasemap of TIG-both sides butt welded specimen($F=11\text{kN}$)



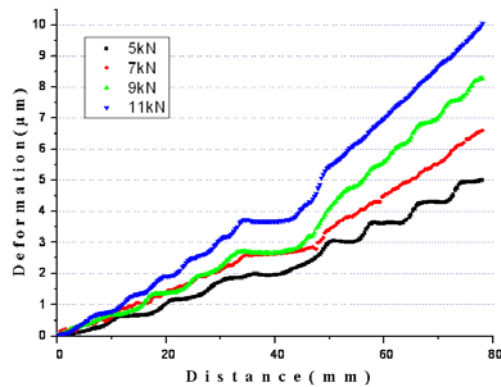
(a) Tensile



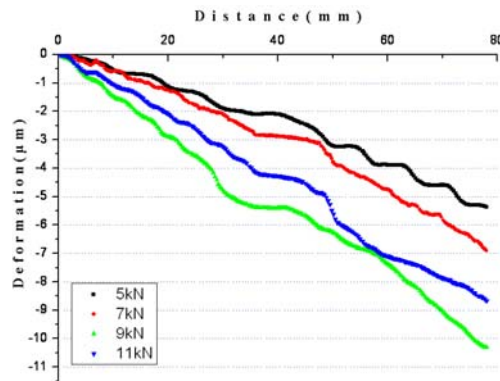
(b) Compression

Fig. 4-9 Analysis results of phasemap of TIG-one side butt welded specimen(F=5kN)

각각 시험편의 중심에 프로파일을 그어 모재부 및 용접부의 변형을 정량적으로 측정하고 시험 조건에 따른 각각의 특성들을 살펴보았다. 그 결과, 모든 시험편에서 용접부의 변형량이 모재부보다 작음을 확인하였고 CO₂ 용접 시험편은 TIG 용접 시험편보다 변형이 작게 발생하였다. 또한, 단면용접 시험편이 양면용접 시험편보다 같은 하중에서 변형이 약간 크게 나옴을 확인할 수 있었는데 단면용접 시험편의 경우 CO₂ 용접법 및 TIG 용접법에 의한 시험편 모두 용접부에서 변형이 급격히 상승 또는 하강하는 경향이 나타났으며 이는 용접 시 비틀림 및 용접비드 형상에 따른 것으로 사료된다. 하중 변화에 따른 변화를 살펴보기 위해 CO₂ 양면 용접 시험편 및 TIG 양면 용접 시험편의 프로파일 데이터를 Fig. 4-10과 Fig. 4-11에 비교하여 나타내었다.

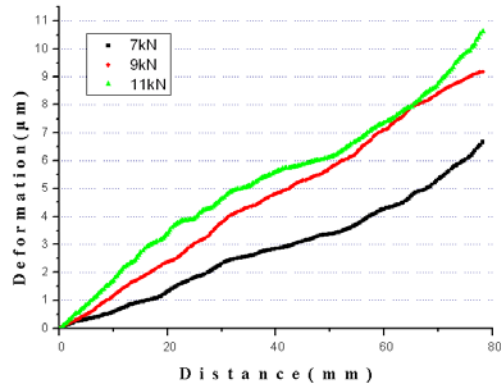


(a) Tensile

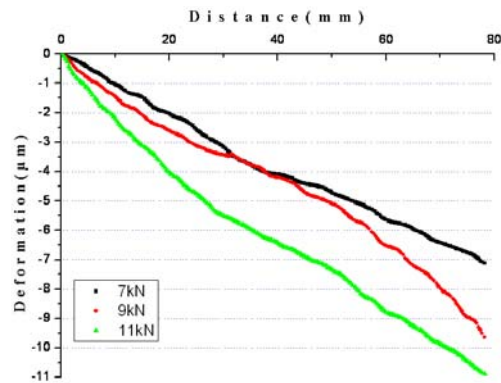


(b) Compression

Fig. 4-10 Deformation comparison of CO₂-both sides butt welded specimen by forces



(a) Tensile



(b) Compression

Fig. 4-11 Deformation comparison of TIG-both sides butt welded specimen by forces

위의 데이터로부터 하중이 증가됨에 따라 각 시험편의 모재부 및 용접부의 변형이 증가하였고 실제거리에 대한 픽셀의 정보를 이용해서 측정부위에 대한 변위를 측정함으로써 변형률을 구하였다. 이로부터 하중이 증가함에 따라 변형 및 변형률이 모재부와 용접부에서 모두 증가함을 알 수 있었다. 잔류응력을 계산하기 위해 프로파일을 통해 획득된 데이터로부터 변형률을 계산한 후 본 논문에서 제시한 식에 대입하여 탄성계수를 획득하고 이로부터 잔류응력 값을 얻을 수 있었으며 이를 각각 시험편별로 하중에 따라 Table 4-4, Table 4-5, Table 4-6에 나타내었다.

Table 4-4 Results of CO2 butt welded (both sides) specimen by forces

	CO2 양면용접			
	5kN	7kN	9kN	11kN
Deformation: tensile(μm)	5.006	6.599	8.274	10.049
Strain of base metal :tensile(ϵ_{mt})	2.275E-05	3.07E-05	3.425E-05	4.46E-05
Strain of welded zone :tensile(ϵ_{wt})	1.27E-05	1.59E-05	1.68E-05	1.83E-05
Deformation :compression(μm)	5.375	6.905	8.667	10.306
Strain of base metal :compression(ϵ_{mc})	2.405E-05	3.1E-05	3.73E-05	4.65E-05
Strain of welded zone :compression(ϵ_{wc})	1.610E-05	1.89E-05	1.94E-05	2.06E-05
Young's modulus of welded zone(GPa)	1446.76	1676.24	2071.82	2356.47
Residual stress(MPa)	2.46	2.51	2.69	2.71

Table 4-5 Results of TIG butt welded (both sides) specimen by forces

	TIG 양면용접		
	7kN	9kN	11kN
Deformation: tensile(μm)	6.655	9.18	10.623
Strain of base metal :tensile(ϵ_{mt})	3.215E-05	4.375E-05	0.0000499
Strain of welded zone :tensile(ϵ_{wt})	1.8E-05	2.79E-05	0.0000307
Deformation :compression(μm)	7.121	9.633	10.881
Strain of base metal :compression(ϵ_{mc})	3.26E-05	4.46E-05	5.0E-05
Strain of welded zone :compression(ϵ_{wc})	2.1E-05	3.14E-05	3.38E-05
Young's modulus of welded zone(GPa)	1495.73	1264.75	1421.19
Residual stress(MPa)	2.24	2.21	2.20

Table 4-6 Results of CO2 and TIG butt welded (one side) specimen

	CO2 단면용접	TIG 단면용접
	5kN	5kN
Deformation: tensile(μm)	4.954	5.203
Strain of base metal :tensile(ϵ_{mt})	2.885E-05	2.925E-05
Strain of welded zone :tensile(ϵ_{wt})	1.76E-05	2.05E-05
Deformation :compression(μm)	5.190	5.578
Strain of base metal :compression(ϵ_{mc})	3.085E-05	3.365E-05
Strain of welded zone :compression(ϵ_{wc})	2.2E-05	2.38E-05
Young's modulus of welded zone(GPa)	1052.19	940.56
Residual stress(MPa)	2.31	1.55

이 결과로부터 같은 시험편 내에서 하중이 증가함에 따라 모재부 및 용접부 모두 변형률이 증가함을 알 수 있었고 용접탄성계수는 하중 증가에 따라 약간의 증가는 있었지만 대략 CO₂ 양면 맞대기 용접 시험편의 경우 1887(GPa), TIG 양면 맞대기 용접시험편일 경우 1394(GPa)로 측정되었다. 즉, 평균적으로 용접부의 탄성계수는 모재부의 탄성계수보다 약 9배 정도 높게 나왔다. 측정된 탄성계수로부터 본 논문에서 제시한 수식에 대입하여 잔류응력값을 산출 할 수 있었으며 CO₂ 양면 맞대기 용접 시험편의 경우 2.6(MPa), TIG 양면 맞대기 용접시험편은 2.2(MPa)의 잔류응력이 존재함을 알 수 있었다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 여러 산업분야에서 사용되고 있는 용접구조물의 용접부위에 잔류응력을 측정하기 위하여 비파괴 방식으로 측정하는 새로운 잔류응력 측정법을 제안하고 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 전자 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)를 이용하여 변형 및 변형률을 계측함으로써 용접부의 잔류응력을 측정하였고 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접시험편을 동일하중으로 인장력 또는 압축력을 가하였을 경우 이를 ESPI 시스템을 이용하여 관찰함으로써 시험편의 모재부와 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 용접방법(CO₂ 용접 · TIG 용접, 단면 용접 · 양면용접)에 따라 시험편에 나타나는 변형분포가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, CO₂ 용접 시험편은 TIG 용접 시험편보다 변형이 작았으며 양면용접이 단면용접에 비해 변형이 작게 나타났다.

2) ESPI를 통해 측정한 변형 · 변형률 데이터를 본 논문에서 제시한 잔류응력 계산식에 대입한 결과 용접부의 탄성계수를 획득하였고 이는 모재부의 탄성계수보다 약 9배 정도 높게 나왔다. 측정된 탄성계수로부터 잔류응력값을 산출 할 수 있었으며 CO₂ 양면 맞대기 용접 시험편의 경우 2.6(MPa), TIG 양면 맞대기 용접 시험편은 2.2(MPa)의 잔류응력이 존재하였다.

3) 다양한 하중이 작용함에 따른 용접 시험편의 특성을 알아보기 위해 같은 시험편을 다양한 하중으로 실험한 결과 하중이 증가함에 따라 변형률이 증가함을 알 수 있었고 잔류응력은 거의 동일하게 측정되었다.

본 연구에서 제안하는 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 예측 및 건정성 평가 기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. W. H. Kearns, "Welding handbook", American Welding Society, 7th edition, Vol. 5, pp. 276–311, 1984.
2. J. F. Lancaster, "Metallurgy of welding", 3rd edition, pp. 1–5, 1980.
3. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures—Residual stresses, distortion, and their consequences", Pergamon Press, Oxford, 1980.
4. P. Michaleris and A. DeBiccari, "Prediction of welding distortion," Welding Journal, Vol. 76, No. 4, pp. 172–179, 1997.
5. A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments(A review of contemporary measurement techniques)", The welding institute, Abington, Cambridge, England, 1977.
6. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures", International Series on materials science and technology, Vol. 33, pp. 1–10, 1980.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. P. J. Wither, H. K. D. H. Bhadeshea, "Residual stress–I : Measurement techniques", Material Science Technology, 2000.
11. C. O. Ruud, "A review of nondestructive methods for residual stress measurement", J. Metals Park. OH, 1985.
12. 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.
13. P. S. Prevey, "X-ray diffraction residual stress techniques", Metal Handbook, 9th Edition, American Society for Metals, Vol. 10, pp. 380–392, 1986.
 14. M. J. Beesley, "Lasers and their Applications", Taylor–Francis, London, 1972.
 15. J. Wilson, and J. F. B. Hawkes, "Lasers principles and Applications", Prentice Hall, 1987.
 16. G. L. Cloud, "Optical methods of Engineering analysis", New York: Cambridge Univ. Press, pp. 347–476, 1995.
 17. P. K. Rastogi, "Holographic interferometry principles and methods", Springer–Verlag, 1994.
 18. 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.
 19. K. S. Kang, "Quantitative Evaluatin of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2005.
 20. G. Groh, "The Engineering Uses of Laser Produced speckle pattern: Edited by E. Robertson and J. M. Harvey", Cambridge Univ. Press, pp. 483–494, 1970.
 21. M. H. Horman, "An applicatiioni of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333–336, 1965.
 22. W. C. Hall, "Analysis of Mechanical Vibrations with Stroboscopic holographic interferometry in an industrial environment", SESA Spring Meeting, 1978.
 23. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18–20, 2003.
 24. J. C. Dainty, "Laser speckle and related phenomena 2nd edition", New York: Springer–Verlag, 1984.
 25. J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", Journal of

- the Optical Society of America, Vol. 66, pp. 1145–1150, 1976.
26. 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.
 27. G. L. Cloud, "Optical methods of engineering analysis", London, Cambridge Univ. Press, pp. 469, 1990.
 28. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59–139, 2001.
 29. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
 30. 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.
 31. 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.
 32. 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.
 33. K. Creath, "Phase–shifting Speckle Interferometry", *Applied Optics*, Vol. 24, pp. 3053, 1985.
 34. 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.
 35. D. J. Bone, "Fourier fringe analysis: two–dimensional phase unwrapping problem", *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 3627–3632, 1991.
 36. H. S. Jang, "Quantitative measurement method of out–of–plane deformation using the shearography", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2006.

37. 오병욱, 고진현, 김덕중, “용접역학”, 원창출판사, 2006.
38. 권혁준, 임진환, “일반용접공학”, 선학출판사, 2006.