



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](#)

2014년 2월
석사학위논문

전자처리 스펙클 패턴 간섭법을 이용한
용접 및 하중 조건에 따른 구조용 강재의
용접부 잔류응력 측정

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

선 상 우

전자처리 스펙클 패턴 간섭법을 이용한
용접 및 하중 조건에 따른 구조용 강재의
용접부 잔류응력 측정

Measurement of residual stress on welded zones of
structural steel according to welding and loading
conditions Using ESPI

2014 년 2 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

선 상 우

전자처리 스펙클 패턴 간섭법을 이용한
용접 및 하중 조건에 따른 구조용 강재의
용접부 잔류응력 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2013년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

선 상 우

선상우의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 장 완 식 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 지 훈 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

2013년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	vi
ABSTRACT	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목표 및 내용	4
제 2 장 이론적 배경	5
제 1 절 스펙클과 간섭무늬 형성	5
1. 스펙클 형성과 종류	5
2. 간섭무늬의 형성	9
제 2 절 정량 해석을 위한 물체의 변형정보 추출	12
1. 위상이동(Phase Shifting)	12
2. 결필침(Unwrapping)	14
제 3 절 전자처리 스펙클 패턴 간섭계	17
1. 면내 변위 측정 간섭계(In-plane ESPI)	17
2. 면외 변위 측정 간섭계(Out-of-plane ESPI)	20
제 4 절 잔류응력	22

1. 잔류응력의 정의	22
2. 용접부 잔류응력의 발생 메카니즘과 영향	23
3. 잔류응력의 측정 방법	28
4. ESPI를 이용한 잔류응력 측정법	32
제 3 장 실험장치 및 구성	35
제 1 절 잔류응력 측정 시스템	35
1. ESPI system	35
2. MTS system	38
3. 용접 시험편	40
제 2 절 실험방법	49
제 4 장 실험결과 및 고찰	52
제 1 절 구조용 강재 시험편의 탄성계수 측정	52
1. 구조용 강재 시험편 인장하중에 의한 탄성계수 측정 ...	52
2. 구조용 강재 시험편 분석 결과	64
제 2 절 구조용 강재 용접 시험편의 잔류응력 측정	71
1. 구조용 강재 용접 시험편 인장 하중에 의한 잔류응력 측정	71
2. 구조용 강재 용접 시험편 잔류응력 분석 결과	83

제 5 장 결론	93
참 고 문 헌	95

LIST OF TABLES

Table. 3-1	Technical data of the ESPI system	37
Table. 3-2	Specification of MTS system	39
Table. 3-3	Mechanical properties of ASTM A131 Steel, Grade AH32	40
Table. 3-4	Electrical properties of AH32 specimen	40
Table. 3-5	Thermal properties of AH32 specimen	41
Table. 3-6	Component elements properties(%) of AH32 specimen	41
Table. 3-7	Welding condition of structural steel welded specimen	44
Table. 4-1	Phase map of structural steel base metal specimen with three types of welding speed control according to the different loading conditions	53
Table. 4-2	ESPI phase map analysis results of structural steel base metal specimen_6kN	56
Table. 4-3	ESPI phase map analysis results of structural steel base metal specimen_9kN	58
Table. 4-4	ESPI phase map analysis results of structural steel base metal specimen_12kN	60
Table. 4-5	ESPI phase map analysis results of structural steel base metal specimen_15kN	62
Table. 4-6	ESPI profile line data deformation comparison of structural steel base metal specimen by forces	65
Table. 4-7	Calculated young's modulus which was generated by structural steel base metal specimen_6kN	68
Table. 4-8	Calculated young's modulus which was generated by structural steel base metal specimen_9kN	68
Table. 4-9	Calculated young's modulus which was generated by structural steel base metal specimen_12kN	69
Table. 4-10	Calculated young's modulus which was generated by structure steel base metal specimen_15kN	69

Table. 4-11 Young's modulus of base metal results comparison of ASTM A131 Steel, Grade AH32 and experiment results ..	70
Table. 4-12 Phase map of structural steel welded specimen with four types of welding speed control according to the different loading conditions	72
Table. 4-13 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_6kN	75
Table. 4-14 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_9kN	77
Table. 4-15 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_12kN	79
Table. 4-16 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_15kN	81
Table. 4-17 ESPI profile line data deformation comparison of structural steel welded specimen by forces	84
Table. 4-18 Calculated young's modulus which was generated by structural steel welded specimen_6kN	87
Table. 4-19 Calculated young's modulus which was generated by structural steel welded specimen_9kN	88
Table. 4-20 Calculated young's modulus which was generated by structural steel welded specimen_12kN	89
Table. 4-21 Calculated young's modulus which was generated by structural steel welded specimen_15kN	90
Table. 4-22 Young's modulus of base metal and welded zone results comparison of structural steel welded specimen by forces	92
Table. 4-23 Residual stress of welded zone of structure steel welded specimen by forces	92

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Formation of laser speckle	5
Fig. 2-2 Principle of objective speckle	6
Fig. 2-3 Principle of subjective speckle	8
Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave	9
Fig. 2-5 Principle of ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) fringe pattern formation	11
Fig. 2-6 Principle of phase shifting	13
Fig. 2-7 Comparison wrapped phase and unwrapped phase	15
Fig. 2-8 Comparison wrapped phase and unwrapped phase graph	15
Fig. 2-9 Principle of least square method	16
Fig. 2-10 Arrangement of in-plane displacement sensitive interferometer	18
Fig. 2-11 Arrangement of out-of-plane displacement sensitive interferometer	21
Fig. 2-12 Thermal stress and residual stress of sectional heating and cooling	24
Fig. 2-13 Residual stress distribution on butt welded joint	25
Fig. 2-14 Residual stress measurement equipment using Hole drilling method	29
Fig. 2-15 Residual stress measurement equipment using the X-Ray diffraction method	30
Fig. 2-16 Residual stress measurement equipment using the Neutron diffraction method	31
Fig. 2-17 Residual stress measurement process using ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)	32
Fig. 2-18 Concept of measuring residual stress produced by welding	33
Fig. 3-1 Configuration of welded specimen	35
Fig. 3-2 Device configuration of residual stress measurement	36

Fig. 3-3 MTS system for tensile loading 38

Fig. 3-4 Welded specimen cutting by Electrical Discharge
Machining 43

Fig. 3-5 Fabrication of structural steel welded specimen 43

Fig. 3-6 Welding jig for automatic welding process 45

Fig. 3-7 Fabricated welding jig 46

Fig. 3-8 Device configuration of automatic welding machine 47

Fig. 3-9 Automatic welding machine in working state 48

Fig. 3-10 Residual stress measurement system 49

Fig. 3-11 Measurement area of structural steel welded specimen 50

Fig. 3-12 Location of profile line for deformation at each point 51

ABSTRACT

Measurement of residual stress on welded zones of structural steel according to welding and loading conditions Using ESPI

By Seon, Sang woo

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

Dept. Advanced Parts & Materials Engineering.

Graduate School of Chosun University.

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 waterproof 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.

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 during welding. The residual stress occurs 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.

The size and state of distribution of welding residual stress before external

load 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.

In this study, Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), one of the optical non-destructive techniques, is applied to measure the residual stress of a welded specimen. When a welded specimen of structure steel is loaded by the tensile loading, the entire behavior caused by the residual stress is observed and obtained by ESPI. From the results, the deformation of a specimen generated by the tensile loading is used to calculate the strain distribution on the entire measuring plane of a specimen. During this process, the strains of the base metal and the weld zone can be obtained. These strains are converted into the elastic modulus of each part. Finally, using these values of strain and the elastic modulus, the residual stress can be calculated.

제 1 장 서 론

제 1절 연구 배경

용접은 접합하고자 하는 2개 이상의 금속재료 재료 부분의 접합부를 가열 시키거나 용융 및 반용융 시켜 접합하는 기술으로써, 현대산업의 다양한 용접법의 발달과 더불어 금속 및 비금속의 접합에 없어서는 안 되는 중요한 기술로 인식되고 있다. 이러한 용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등 다른 방법들에 비해서 작업의 용이성, 구조물의 단순화, 우수성 등의 장점을 가지고 있다¹⁻²⁾. 그로 인해 현재 자동차, 항공기, 건축, 철도, 교량, 선박, 해양플랜트, 풍력, 원자력 등 많은 기계 구조물에 이용되고 있다³⁾. 그러나, 일반적으로 용접은 단시간에 가열, 냉각 되는 복잡한 금속접합이고, 이로 인해 용접부는 변형 및 수축이 발생하고, 용접 재료에 잔류응력이 생겨서 균열 및 파괴에 직, 간접적으로 기여하므로 안전성에 악영향을 미친다⁴⁾.

용접에 의해 용접부에는 잔류응력과 변형이 발생하게 되는데 이러한 현상은 열의 투입에 의해 일어난다. 집중된 열의 투입에 의해 금속은 국부적으로 온도가 올라가다가, 주변으로 전달 되면서 냉각되며, 이로 인해 용접부 주변은 시간에 따라서 급격하게 온도의 변화를 겪게 된다. 이렇게 용접에 의해 접합부가 가열 및 냉각 과정의 사이클을 거치게 되는데, 불균일한 열변형 분포 및 고온에서의 소성 변형 및 금속의 수축 등에 의해 응력이 발생하게 된다. 이 사이클에서의 응력을 용접 응력이라고 한다. 즉, 물체에 가해진 외력이 제거된 후에도 물체 속에 여전히 남아 있는 내부응력을 잔류응력이라 하며 용접이나 열처리 등의 과정에 의한 내부응력도 잔류응력이라 한다⁵⁻⁶⁾.

이러한 잔류응력은 절삭, 압연, 단조, 가열, 냉각, 용접, 도금 등으로 인해 급격한 환경변화로 금속이나 세라믹 등에 생기는 불균일한 소성변형의 내부응력으로서 잔류응력은 균열이나 응력에 의해 부식이 촉진되는 응력부식의 원인이 되고 재료나 구조물을 열화 시킨다⁷⁾.

최근 산업기술의 발전과 함께 구조물의 대형화와 경량화가 요구되면서 용접구조용 재료도 고강도 및 다양화되고 있으며, 생산에 있어서도 고능률화를 위해 잔류응력 및 변형은 더욱 중요하게 대두되고 있고, 따라서 이러한 문제의 원인과 해결을 위해서는 잔류응력의 정량적 예측을 통하여 기술의 전문화와 각종 산업 생산 공정 분야의 최적화의 기초를 마련할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

다양한 산업현장에서는 설비나 부품 등의 품질 검사, 수명 검사 등의 안전성을 확인하기 위하여 잔류응력을 측정하고 있는데 잔류응력의 측정법은 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법이 있는데 이중에서 파괴적인 방법의 대표적인 예로 기계적 응력 완화 방법(Mechanical stress relaxing), 절단법(Sectioning), 홀 드릴링(Holl-Drilling) 기법이 있다. 이들 시험법은 기계적인 시험방법으로 정량적인 결과값 도출이 가능하지만 말 그대로 파괴적인 방법이기 때문에 현장에서는 사용이 불가능하여 시편을 따로 제작해야 하고 파괴해야 한다는 문제점이 따른다. 다음으로 비파괴적인 방법으로는 X선 회절법(X-ray diffraction method), 중성자 회절법(Neutron diffraction method), 초음파 측정법(Ultrasonic method) 등의 방법이 있는데 비파괴적이고 현장에서 사용 가능한 것이 장점이지만 재료의 미세조직의 영향이 크다는 단점으로 인해 용접부와 같은 미세조직의 급격한 변화가 존재하는 영역에서의 적용이 불가능하다는 한계가 있고 재료 내부의 작은 요소나 주변 환경(온도, 습도, 진동, 자기장 등)과 분석을 진행하는 분석 조건에 따라서 그 결과값이 크게 차이가 난다. 또한, X-선 회절법(X-ray diffraction method)은 매우 미세한 양의 방사능이 발생하는데, 미량의 방사능일지라도 지속적으로 노출이 되면 인체에 매우 위험할 수 있다는 큰 단점이 있다⁸⁻¹²⁾. 이러한 기존 잔류응력 측정 방법의 문제점으로 인해 비접촉·비파괴 방법인 정밀 계측용 레이저 간섭법을 이용한 잔류응력 측정 방법을 제시하여 검증하고자 한다.

비파괴 계측법은 대상체의 상태나 조건을 변화시키지 않고 특성을 측정하는 기술로써 재료의 부하조건이나 환경조건을 파악하고 재료의 수명을 예측하여 종합적으로 재료의 건전성을 평가하는 비파괴 계측기법이다. 재료 및 구조물의 기능, 신뢰성을 종합적으로 판단하는 기술 요소로써 그중 레이저를 응용한 측정법은 비접촉 측정으로 실시간으로 측정결과를 확인 가능하고, 대상물의 형상과 크기에 관계

없이 측정이 가능하고 장비의 이동이 편리하여 현장에서 측정이 가능하다. 또한 이를 이용한 잔류응력 측정방법은 외부에서 인가된 인장력 또는 압축력에 의한 시편의 변형률을 토대로 시편의 잔류응력을 측정하므로 잔류응력의 측정과정 중 시편이 파괴되거나 미세조직에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 이러한 레이저 응용 계측 기술에는 전자처리 레이저 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry), 전단간섭법(Shearography) 등의 광학기반 비파괴검사 기술이 있으며, 산업현장에서의 활용도 또한 점차 높아지고 있는 추세이다¹³⁻¹⁶⁾. 특히 전자처리 레이저 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)은 광학장치를 이용하여 레이저 광원을 물체의 표면에 확산 조사하여 간섭 현상을 발생시키고, 이를 CCD카메라를 이용하여 간섭에 의해 물체의 정보를 기록하고, 이 기록된 정보를 재생하거나 영상처리 과정을 통하여 변형 전후의 정보를 비교함으로써 대상체의 변형에 따라 발생하는 간섭 줄무늬를 측정 및 해석하는 기술로써 산업현장에서 널리 활용되고 있고, 비접촉식 이미지를 이용한 반복 실험을 통하여 데이터의 신뢰성을 파악하기 쉽기 때문에 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

제 2절 연구 목표 및 내용

따라서 본 논문에서는 비접촉, 비파괴적이며 친환경 측정 기술인 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)을 이용하여 이론적 방법을 제시하고 실제 실험을 통해 검증하고자 한다. 용접 시험편을 용접 조건 및 하중 변화에 따라 인장 시켰을 경우 각 시험편에 변형이 발생할 것이고, 인장 하중 변화에 따라 위상지도를 획득하여 이를 상용 해석 프로그램을 이용하여 각 구간의 모재부 및 용접부에서의 변형률이 다르게 발생할 것이라는 추측을 바탕으로 이를 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)을 이용하여 측정 후 잔류응력 측정법을 적용하여 용접부 잔류응력을 측정하는 것이다. 본 논문에서 제안하는 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 측정 및 건전성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 원자력, 선박, 자동차 등 용접구조물의 신뢰성, 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있고 녹색 산업의 신성장동력 기술로서 수명 평가에 의한 에너지 절약 효과와 재료절감 효과의 기반 확립에 기여할 것으로 기대된다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 스페클과 간섭무늬 형성

1. 스페클 형성과 종류

레이저 스페클(Laser speckle)은 단색성(Monochromaticity)이며 우수한 간섭성(Coherency)으로 인하여 나타나는 현상으로 레이저 광이 물체의 표면에 조사될 때 반사거나 굴절율이 균일하지 않은 매질을 통과할 때 입자 형태의 밝고 어두운 점들이 표면에 나타나게 되는데 이를 스페클(Speckle)이라 하며 Fig. 2-1은 레이저 스페클의 형태이다¹⁷⁾. 스페클은 또 다른 스페클과 간섭을 일으켜 새로운 스페클을 형성할 수도 있고, 대상체에 변화가 생기면 레이저의 광경로에 변화가 생김으로서 각 상태에 따른 스페클이 달라지는데 이는 광검출기에 각각의 상태를 비교함으로써 물체표면의 거칠기, 변형 등의 정보를 얻을 수 있다¹⁸⁾.

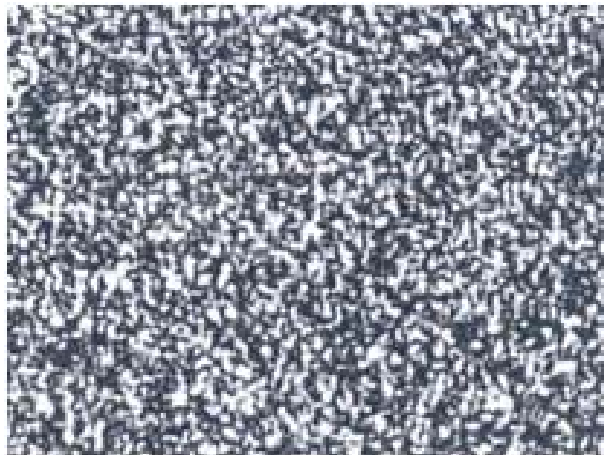


Fig. 2-1 Formation of laser speckle

스페클은 종류에 따라 Objective speckle과 Subjective speckle로 나누어지는데, 이 둘의 차이점은 결상 렌즈의 사용 여부에 따라서 달라진다. Fig. 2-2는

Objective speckle의 원리를 보여주고 있다.

Objective speckle은 대상물의 표면에 빛을 비출 때, 대상물의 각 점에서는 흡수와 재 방사가 일어나는데, 재 방사가 일어나는 점에서는 2차 파면과 유사한 구면 파를 생성한다. 대상물 표면의 모든 점은 점 Q에 영향을 미치고 Q의 위치가 변한다고 하더라도, 모든 점에서 발생하는 진폭 변화는 천천히 발생한다고 해도, 상대적인 위상은 급격하게 변한다는 특징이 있다. Fig. 2-2에서와 같이 공간상의 평면에만 의존성이 있으며, 결상 렌즈는 사용하지 않는다.

Objective speckle 크기는 물체의 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 plane에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 제안한 식 (2-1)로 Objective speckle의 크기를 정의하고 있다¹⁹⁾.

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

여기서 λ : 조사되는 레이저의 파장, L : 물체와 결상면 사이의 거리, D : 물체에 조사된 면적 이다.

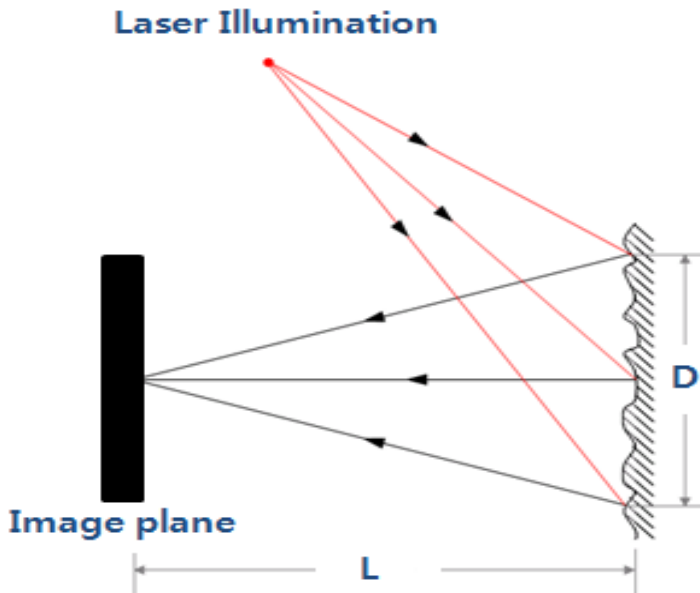


Fig. 2-2 Principle of objective speckle

Subjective speckle은 레이저를 물체에 비출 때, 표면의 이미지가 형성 되고, 빛의 세기가 변화하는 이미지가 보일 때 생기는 것을 말하며, 조사 면의 상을 형성할 때 광학계에 의존하여 형성 된다. Objective speckle와 다르게 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)에서와 같이 결상렌즈를 사용할 때 발생한다.

Fig. 2-3은 Subjective speckle의 원리를 보여 주고 있다. 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)에서는 Subjective speckle을 사용하며, 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의된 Subjective speckle은 렌즈의 회절한계로 인하여 Objective speckle과는 다르게 정의된다. Speckle의 공간 분포는 결상 시스템의 회절한계에 의해서 결정되는데, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상하여 물체의 한 점과 결상면의 한 점이 1:1 대응이 된다. Fig. 2-3에서 P는 점 Q의 중심에서 회절 패턴을 형성하고 진폭의 분포는 베셀 함수(Bessel function)로 설명되고, P점의 빛은 대상물 표면 높이의 무작위적 변화에 따라 Random한 위상을 갖는다는 특징을 가지고 있다.

Subjective speckle의 크기는 조셉 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer)의 회절이론에 따라 중앙의 최대 밝기가 1차 최소밝기와의 중첩이 일어났을 때의 거리로 정의하고 있으며, 결상면에서 형성되는 Subjective speckle의 크기는 다음 식 (2-2)와 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. Speckle은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 Zoom lens 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 된다²⁰⁾).

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

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 이상적이며, Uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

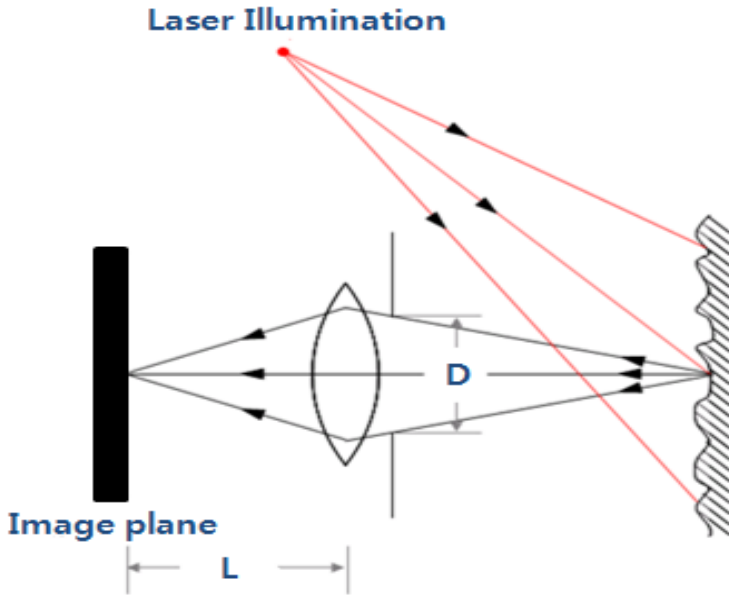


Fig. 2-3 Principle of subjective speckle

2. 간섭무늬의 형성

간섭무늬(Fringe pattern)는 두 갈래의 파동이 만났을 때 일으키는 상쇄, 보강 간섭에 의해 형성되는 무늬를 말하는데 진동수가 다른 파동끼리는 간섭현상을 일으키지 않으므로 여러 진동수의 빛이 섞인 백색광의 경우 각 진동수마다 각각의 간섭무늬를 형성한다. 즉, 간섭무늬가 시간과 함께 변하지 않고 안정하기 위해서는 파동끼리 완전 겹치거나 또는 파동의 위상차가 일정하게 유지되는 것이 필요한데, 이 조건을 만족시키는 파동은 서로 간섭성을 갖는다고 한다. 스펙클 간섭무늬의 형성을 위해서는 일반적으로 물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광(Object Beam), 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광(Reference beam)이 필요하다. Fig. 2-4는 두 개의 광의 합성을 나타내고 있는데 여기에서 참조광(E_R)은 물체광(E_O)에 의해 형성된 스펙클을 z -축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 빛의 파동에 대한 진폭은 복소수에 대한 함수로 표현 가능하므로 식 (2-4)와 같이 쓸 수 있다.

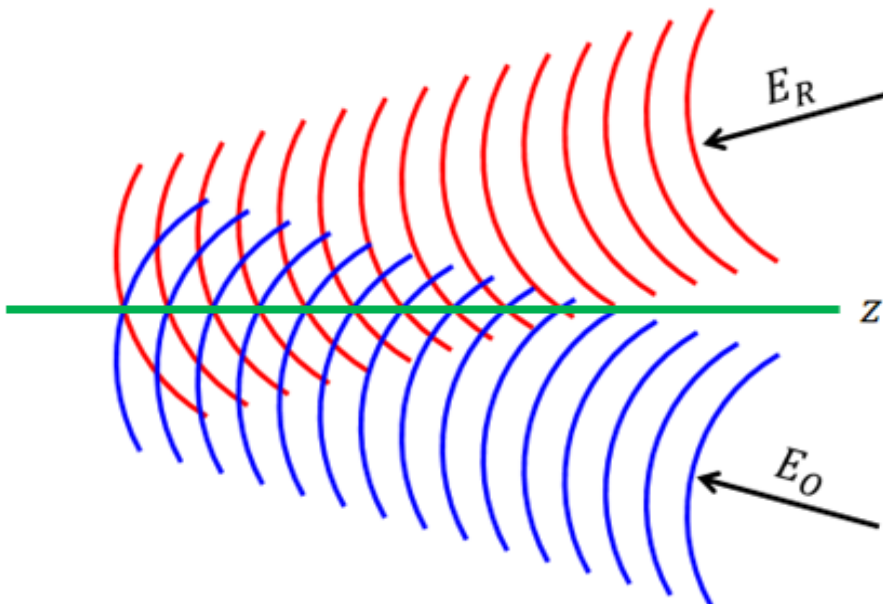


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

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

여기서, a 는 진폭, ϕ 는 공간 위상, f 는 주파수를 나타낸다. 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.

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

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

식 (2-7)은 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(Intensity)를 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} I &= |u_o + u_r|^2 = u_o \cdot u_o^* + u_o \cdot u_r^* + u_o^* \cdot u_r + u_r^* \cdot u_r \\ &= |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2|a_o||a_r|\cos\left[\frac{2\pi(L_o - L_r)}{\lambda}\right] \\ &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\phi \end{aligned} \quad (2-7)$$

여기서 I : 합성광의 빛의 강도, I_R : 참조광의 빛의 강도, I_O : 물체광의 빛의 강도 ϕ : 물체광과 참조광의 위상차이다. Fig. 2-5와 같이 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)에서는 물체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전후의 스페클 상태의 감산처리를 통하여 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD 카메라에 기록되어진 스페클 패턴을 아래 식 (2-8), 식 (2-9)으로 나타낼 수 있다.

$$I_b = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \quad (2-8)$$

$$I_a = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2-9)$$

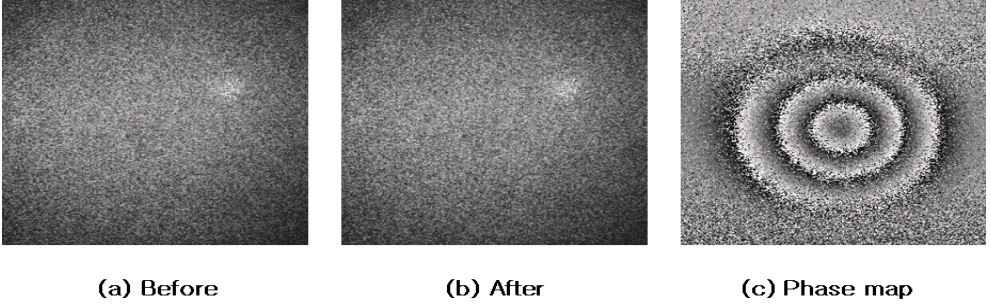


Fig. 2-5 Principle of ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) fringe pattern formation

여기서 I_b : 물체변형전의 빛의 강도, I_a : 물체변형후의 빛의 강도, $\Delta\phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스페클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-10)과 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} I_s &= I_b - I_a \\ &= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서 I_s : 물체변형전후의 광 분포의 감산 처리된 빛의 강도이다. 실제로 모니터에서 관찰되는 빛의 강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \right| \quad (2-11)$$

여기서 K : 모니터 밝기분포 상수 이다. 식 (2-11)과 같이 변형 전후의 스페클을 감산 처리함으로써 나타나는 줄무늬를 스페클 상관 간섭무늬(Speckle correlation fringe pattern)라고 한다²¹⁻²²).

제 2 절 정량 해석을 위한 물체의 변형정보 추출

1. 위상 이동(Phase shifting)

위상 이동자(PZT)를 이용한 위상이동기법은 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)과 전단 간섭법(Shearography)에 의해 형성되는 간섭으로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 방법이다. 위상이동 기법은 위상 이동자(PZT)에 의하여 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상을 이동하여 다음 식과 같이 4개의 방정식으로 기록하게 된다. 본 논문에서는 위상이동 기법의 4-Step으로 대상물의 변형측정이 가능하고 오차를 최소화하기 위하여 $\pi/2$ 위상이동을 사용하였다. 전체 표면에서의 한 점에서 기록된 빛의 강도는 식 (2-12)와 같이 나타낼 수 있다(23-26).

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + \alpha_i]] \quad (2-12)$$

위 식에서, I : 선명도, ϕ : 위상, α_i : 위상 이동 값을 의미한다. 4-Step technique은 연속적인 위상 이동에 의한 서로 다른 위치에서의 위상 값을 얻기 위하여 사용된다. 물체에 변위가 발생하면 새롭게 얻어진 화상을 다시 $\pi/2$ 씩 3번 위상이동 시킨 후에 저장하여 저장된 이미지를 이용하여 변형 전, 후의 각각의 위상 정보를 획득, 감산 처리하여 줄무늬(Fringe pattern)를 생성하게 된다. 즉, 참조광의 위상을 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 로 $\pi/2$ 씩 이동시켜 이들을 4단계 위상이동 기법에 의해 위상 값(ϕ)를 구하는 방법이다. 획득한 위상이미지를 식 (2-13), 식 (2-14), 식 (2-15)을 이용하여 위상 값을 계산하고 변형 전, 후의 이미지를 감산처리를 통하여 4-Step 위상지도를 얻을 수 있다²⁷⁾. 레이저 파장에 관련한 위상의 이동은 CCD 카메라와 위상을 이동시킬 수 있는 정밀한 장치와 컴퓨터를 이용해서 가능하다. CCD 카메라에서 저장된 이미지를 처리하면 대상물에 대한 위상정보를 획득할 수 있다. 또한 참조광은 물체광과 거의 일치하도록 검출기에 수직으로 입사된다.

물체에 변형이 발생하여 거리가 이동하였다고 하면, 물체광이 식 (2-16) 만큼 위상이동이 일어나기 때문에 간섭 무늬는 변하게 된다. Fig. 2-6은 위상이동의 원리에 대해서 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \\
 I_2 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi/2)] = I_0 [1 - \sin \phi] \\
 I_3 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi)] = I_0 [1 - \cos \phi] \\
 I_4 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 3\pi/2)] = I_0 [1 + \sin \phi]
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

$$\begin{aligned}
 I_4 - I_2 &= 2I_0 \sin \phi \\
 I_1 - I_3 &= 2I_0 \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{2-14}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]
 \tag{2-15}$$

$$\phi_2 = 4\pi d_2 / \lambda
 \tag{2-16}$$

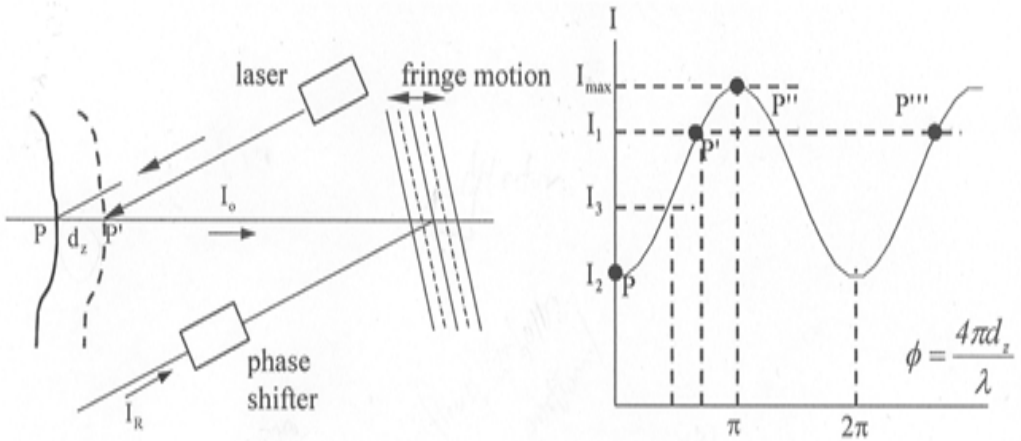


Fig. 2-6 Principle of phase shifting

2. 결핍침(Unwrapping)

위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상은 Arc-tangent 함수로 계산이 되었기 때문에 불연속성을 가지는 톱니 바퀴형상으로 나타나기 때문에 이러한 불연속성을 해결하기 위해 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위해서 Phase unwrapping 과정을 거치게 된다. 대상물의 형태가 복잡하고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡의 발생이 심하여 해석에 있어 상당한 어려움이 있다. 결핍침은 위상 이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 Arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정이다. 먼저 Arc-tangent 함수는 $0 \sim \pi$ 의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 연속 위상으로 변환을 위한 결핍침은 식 (2-17)을 이용하여 구하게 된다 (28-30).

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2-17)$$

여기에 ϕ_{unw} : Unwrapped phase, ϕ_w : Wrapped phase, N : Fringe order 이다. 여기서, 결핍침을 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. Fig. 2-7에서는 왼쪽의 Wrpped 상태의 Phase와 오른쪽의 Unwrapped된 Phase의 Image를 비교하였고, Fig. 2-8에서는 이 때 각 Image에 Profile을 그었을 때의 Phase graph를 나타내었다.

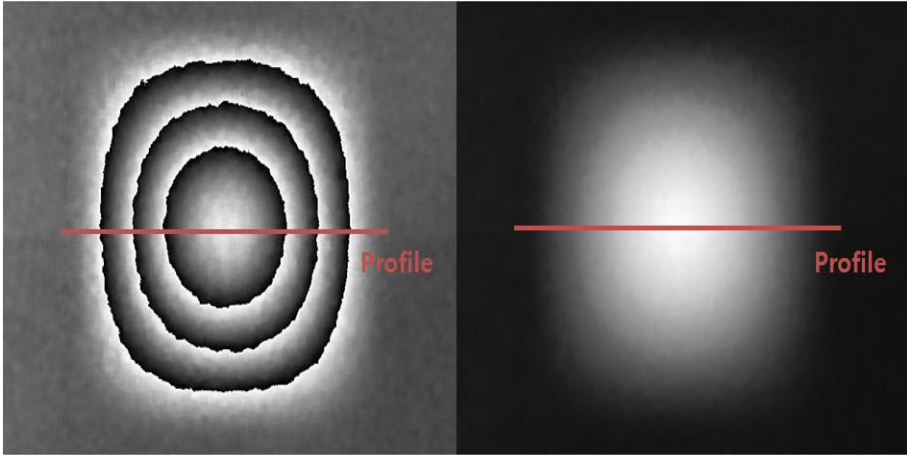


Fig 2-7 Comparison wrapped phase and unwrapped phase

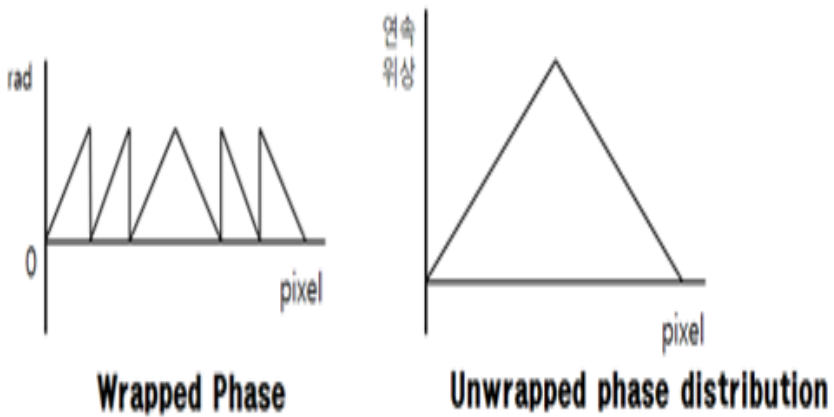


Fig 2-8 Comparison wrapped phase and unwrapped phase graph

본 논문에서는 Unwrapping method로 Least square method를 사용하였다. 최소자승법(Least square method)이란 Data가 주어졌을 때, 오차의 제곱을 물체의 전 영역에 걸쳐 합한 값이 최소가 되도록 하는 방법으로써, 이를 일반적으로 실험을 행할 때 실험 값(x, y)을 얻는다고 할 때, 이 Data들의 규칙성을 찾기 위해서 두 변수 간에 상관 관계를 함수로 표현해서 나타내서 하나의 공식으로 표현함으로써 두 변수 간의 상관 관계를 찾을 수 있게 해주는 방법이다. 보다 구체적으로는 직선으로 표현 하면서 각각의 에러를 최소화 하여 Fig. 2-9와 같이 0이 되는 해

를 구하는 방법이다.

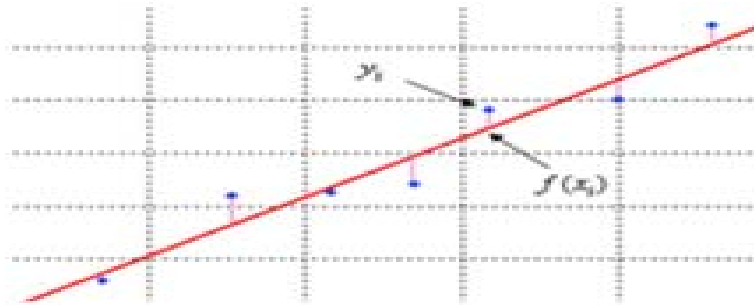


Fig 2-9 Principle of least square method

제 3 절 전자처리 스페클 패턴 간섭계 (ESPI)

1. 면내 변위 측정 간섭계(In-plane ESPI)

면내 변위 측정 간섭계(In-plane ESPI)의 원리는 Beam splitter에 의해 두 개로 분리된 Laser beam에 의해 구성된다. 측정 물체에 평행하게 물체광(Object beam)과 참조광(Reference beam)은 같은 각도로 조사되어 거칠기가 큰 대상물 표면에 난반사되고 스페클 패턴을 형성하게 되고 이러한 스페클이 중첩되어 CCD Camera의 Lens를 거쳐 Image plane에 결상된다. 이 때, 대상물 표면의 거칠기, 변위, 변형 정보를 포함하는 스페클 패턴은 대상물의 변형에 대한 스페클 패턴과 비교함으로써 In-plane displacement에 대한 정보만을 레이저의 파장 단위로 얻어낼 수 있다³¹⁾. Fig. 2-10은 면내 변위 측정 간섭계의 구성도이다.

면내 변위 측정 간섭계는 참조광(Reference beam)을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광(Object beam)을 같은 각도로 조사하여 측정하는 방법이다. 여기서 y방향이 지면에 수직일 때 대상물은 xy 평면상에 있으며 두 개의 광이 동일한 각도로 조사되고 있을 때 대상물 표면 위의 P점에서의 복사 조도는 식 (2-18)과 같다.

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

여기서 γ 는 P점에 조사되는 두 광의 위상차이고, I_1 , I_2 는 두 입사광의 복사조도이다.

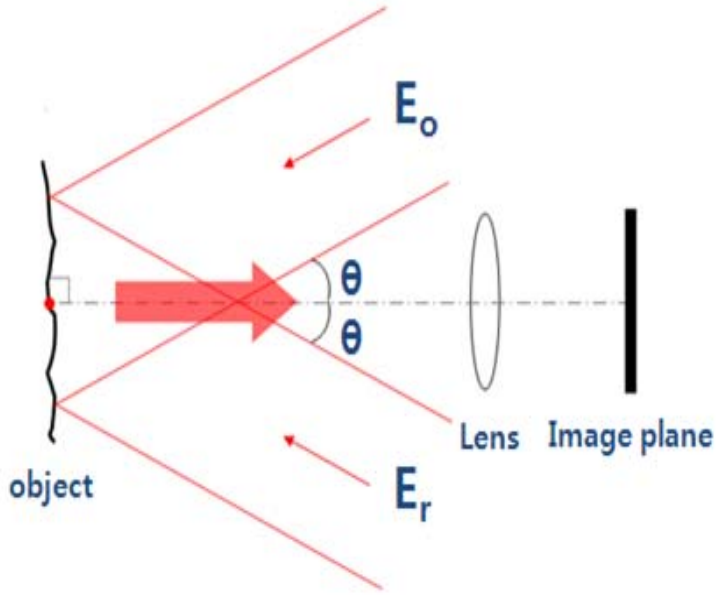


Fig. 2-10 Arrangement of in-plane displacement sensitive interferometer

P점이 $\vec{d}(d_x, d_y, d_z)$ 만큼 움직였을 때, 복사조도는 식 (2-19)와 같다.

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

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 식 (2-20)과 같다.

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

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 2에

서 총 위상차(δ_2)를 구하면 식 (2-21)과 같다.

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

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

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

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \tag{2-23}$$

2. 면외 변위 측정 간섭계 (Out-of-plane ESPI)

Fig. 2-11은 면외 변위 측정 간섭계 (Out-of-plane ESPI)로서 레이저 빔이 물체로 직접 조사되어 Subjective speckle을 형성하는 물체광(Objective beam)과 CCD 카메라에 직접 조사되는 참조광(Reference beam)으로 나눌 수 있다. 물체 변형 전에 물체광(Objective beam)은 참조광(Reference beam)과 간섭하여 제 2의 스페클 패턴인 변형 전 스페클 패턴을 형성하고, 물체가 변형 후에 물체광(Objective beam)은 참조광(Reference beam)과 간섭하여 변형 후의 스페클 패턴을 형성하게 되고 스페클 상관 간섭무늬는 변형 전과 변형 후의 감산처리로부터 형성 되고, 위상이동 기법을 적용하여 변형 전, 후의 위상을 추출하여 대상체의 변형을 측정할 수 있다³²⁾. 이 때, 발생하는 위상변화량을 식 (2-24)로 나타낼 수 있고, 이를 다시 식 (2-25)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o + n_s)d \quad (2-24)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_o + \cos\theta_s)d \quad (2-25)$$

여기서, $\Delta\phi$ 는 변형에 의한 위상변화이고, λ 는 레이저 빔의 파장, θ_o 는 대상물의 표면과 물체빔의 조사방향이 이루는 입사각, θ_s 는 대상물의 표면과 관측방향이 이루는 관측각, d 는 물체빔의 광경로차, n_o 는 조사방향이고, n_s 는 관측방향 벡터이다.

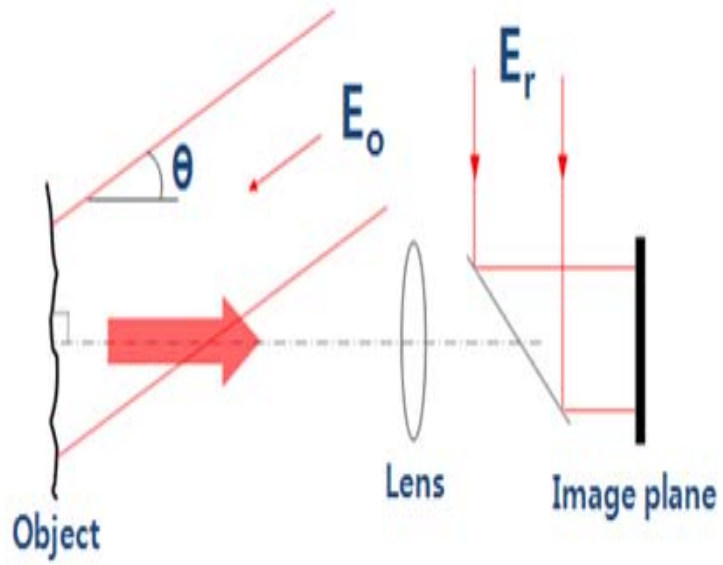


Fig. 2-11 Arrangement of out-of-plane displacement sensitive interferometer

제 4절 잔류응력

1. 잔류응력의 정의

용접에 의해 발생하는 여러 가지 현상들은 열의 투입에 의해 일어난다. 집중된 열의 투입에 의해 금속은 국부적으로 용융하기까지 온도가 올라갔다. 주변으로 전도 및 전달에 의해 냉각되며, 이런 과정에서 용접주 부근에 온도도 급상승하였다가 감소하게 된다. 이렇게 용접부 주변은 공간적으로 또한 시간에 따라 급격한 온도의 변화를 겪게 된다. 반면 용접부로부터 떨어진 부분에서의 온도는 비교적 완만하게 상승하였다가 용접부 영역 전체는 실온으로 되돌아 온다. 이렇게 하여 용접부는 용융상태로부터 시간에 따라 냉각되며, 강재의 경우 800℃ 정도로 냉각되면, 이음부의 각 부분은 신축을 구속하게 되어 열응력과 열변형이 발생한다. 이 상태에서의 응력이 항복조건에 도달하면 소성변형률이 발생하여 축적되며, 냉각 후 용접부 근방에는 응력과 변형이 잔류하게 된다. 이렇게 물체에 가해진 외력이 제거된 후에도 물체 속에 여전히 남아 있는 내부응력을 잔류응력이라 하며 용접이나 열처리 등의 과정에 의한 내부응력도 잔류응력이라 한다³³⁾. 이 잔류응력은 외적구속, 용착순서, 이음현상, 용접입열, 판두께, 모재의 크기 등의 요인에 의하여 영향을 받아 다양한 형태로 발생한다.

2. 용접부 잔류응력의 발생 메카니즘과 영향

(1) 용접부 잔류응력의 발생 메카니즘

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

용접잔류응력의 발생 메카니즘을 설명하기 위해 Fig. 2-12에 나타난 판재에 대해 A, B, C 세 개의 영역으로 나누고, 편의상 영역 B와 C는 제외하고 A만을 가열할 수 있다고 가정한다. 영역 A만을 가열하게 되면 B와 C영역에 의해 구속되므로 영역 A는 자유롭게 팽창할 수 없게 되어 응력이 발생하게 된다. 즉, 판재에 발생하는 열응력은 그림과 같이 영역 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 변형이 동반된다.

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. 2-12의 (b)는 영역 A를 가열 및 냉각한 경우 냉각후 응력과 변형의 상태를 나타낸 것이다. 응력분포는 Fig. 2-12의 (a)와 정확히 반대 형상을 갖게 되었는데 영역 A에는 인장응력이 영역 B와 C에는 압축응력이 잔류하고 있다. 이는 가열시 압축소성변형이 축적된 영역 A가 냉각 되면서 수축이 일어나 생기는 현상이다. 즉, 압축소성변형을 받은 영역 A가 냉각시에는 오히려 수축량이 B와 C 영역보다 크게 되므로 이들의 구속을 받아 인장응력을 일으키며, 최

종적으로 잔류응력과 변형이 남게 된다.

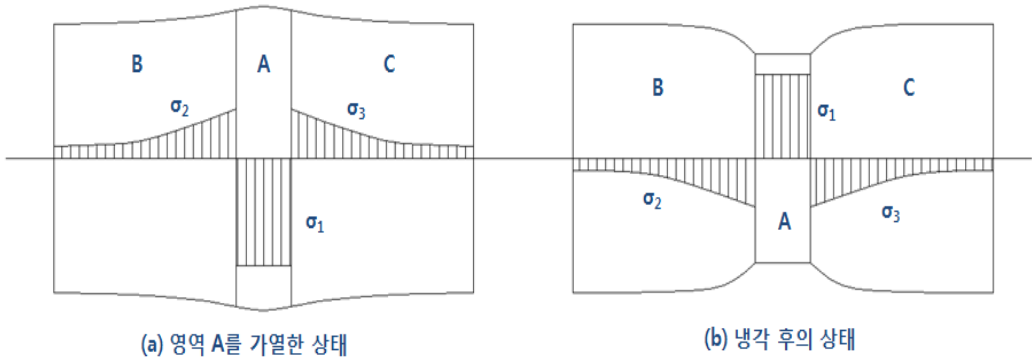


Fig. 2-12 Thermal stress and residual stress of sectional heating and cooling

Fig. 2-13의 (a)와 같이 양단부가 구속이 되어 있는 2개의 강관을 용접한 경우의 잔류응력 분포를 생각해 볼 수 있는데 간단히 y방향 응력 σ_y 의 두께에 대한 평균값에 대해서만 주목한다. x축 상에 대한 σ_y 의 분포는 Fig. 2-13의 (b)에서와 같이 분포를 하고 있다. 여기서, 강관 벽에 고정된 부분을 절단해서 외적구속을 제거하게 되면, x축 상의 잔류응력은 반드시 완전히 없어지지 않고, Fig. 2-13의 (c)와 같은 분포가 남게 된다. 즉, 용접선의 중앙에서 인장응력이 최대이고 용접선의 끝을 향할수록 점차 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀌며 양단에서 압축응력이 최대가 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 2-13 (d)는 외적 구속이 존재하기 때문에 생긴 잔류응력의 성분이므로 이것을 외적구속에 의한 잔류응력 성분이라고 할 수 있다.

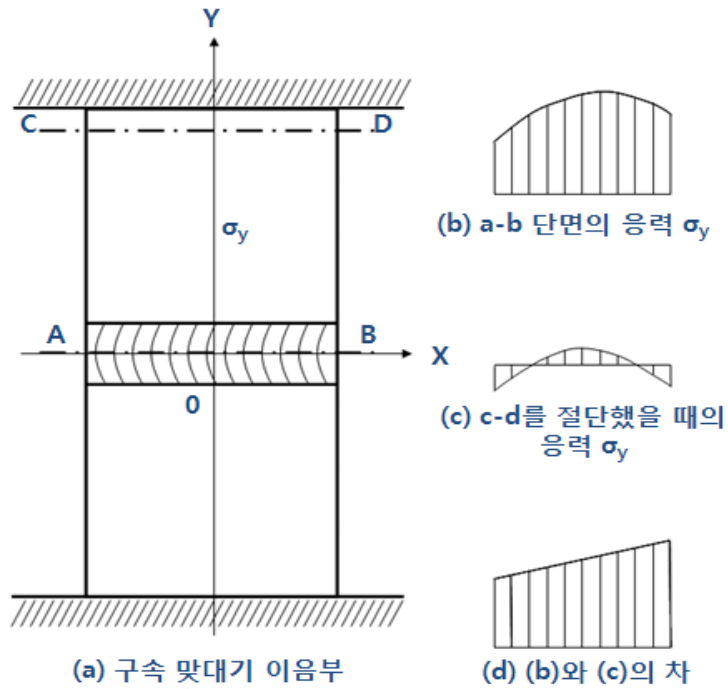


Fig. 2-13 Residual stress distribution on butt welded joint

(2) 용접부의 잔류응력의 영향

용접부에 발생하는 잔류응력은 모재의 두께, 이음 형상, 용착 순서, 용접 순서, 외적 구속력의 유무, 용접 전류 등에 따라서 차이가 있는데, 보통 두꺼운 판에는 재료의 항복점에 가까운 값이며, 연강에서는 $20\sim 30 \text{ kg/mm}^2$ 정도의 잔류응력이 발생하므로 구조물의 허용응력 값보다 훨씬 커서 구조물의 안정성에 문제가 되고 있다. 구조물의 강도에 대해서 잔류응력의 영향은 중요한 문제이고 또한 용접과 동시에 발생한 변형들도 중요한 문제로 작용한다. 용접잔류응력의 값은 설계 되어진 응력에 비해서 훨씬 크기 때문에, 그것이 구조물의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 실행되고 있으며, 용접부의 잔류응력이 미치는 영향 들을 살펴보면 다음과 같다.

① 연성 파괴의 발생

재료에 연성이 있어서 파괴되기 직전까지 소성변형이 일어나는 경우에 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하고 있다고 해도 강도에는 거의 영향이 미치지 않는다. 그 이유는 잔류응력이 있는 물체에 인장력이 작용하게 되면 bead 부분에서 높은 인장응력이 잔류하고 있다가 외력을 높게 증가시키게 되면 용접물은 즉시 소성변형이 일어나게 되지만 응력에는 거의 영향을 끼치지 않는다.

② 취성 파괴의 발생

연성이 부족한 재료가 소성변형이 거의 일어나지 않고 파괴되는 경우는 잔류응력의 영향이 크게 작용하며, 특히 담금질된 강이나 확인이 가능한데 이와 같은 현상은 전단면이 항복하기 이전의 하중에서도 잔류응력의 영향에 의해서 파괴를 일으킨다. 연성을 갖고 있는 강판에서의 취성파괴는 저온에서 연성이 상실되기 때문에, 이것이 작은 응력의 크기로도 연속적으로 파괴가 된다. 실제로 용접부의 잔류응력은 용접부 표면에 작은 노치가 존재하여도 취성파괴가 잔류응력의 영향 때문에 쉽게 발생하게 된다.

③ 피로 강도의 감소

잔류응력이 용접이음의 피로 강도에 영향을 미치는지 여부는 실험 조건 및 주변 환경들이 까다로워서 확실하게 결론을 내기 어려운 부분이 있다. 다만 균열이나 언더컷 등의 노치부가 있으면 항복점 보다도 낮은 응력에서도 파괴가 일어나기 때문에, 결국 잔류응력은 피로 강도감소에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 잔류응력 제거를 위해 풀림 처리를 통해서 피로 강도를 다소 증가시키고 용접에 의한 열영향부가 연화시킴에 따라서 연성이 증가하게 되지만 잔류응력의 존재가 피로 강도의 감소에 영향을 끼친다고 할 수만은 없다.

④ 응력 부식의 발생

응력이 존재한 상태에서 잔류응력이 존재하는 용접부는 재료의 부식이 촉진되기 쉬운데, 용접부에 존재하는 잔류응력에서는 항복점에 가까운 높은 인장응력이 존재하여 응력 부식이 일어난다. 응력 부식의 발생은 재질, 부식매질, 응력의 크기, 유지 시간, 온도 등에 따라 다르다. 응력 부식이 생기는 과정을 보게 되면 금속 재료에는 부식을 받기 쉬운 부분이 존재하는데, 그곳이 침식되면 작은 노치가 생긴다. 이 때, 인장응력을 가하게 되면 노치부에 응력이 집중되어 노치 끝부분에 균열이 생기고 이 균열의 끝이 다시 부식이 되어져 어느 정도 약해지게 되면 응력의 집중으로 인해 다시 새로운 균열이 진행 된다. 따라서 응력 부식의 제거를 위해서는 잔류 응력의 제거가 필요하다³⁴⁾.

3. 잔류응력의 측정 방법

소재의 소성변형이나 열응력으로 발생하는 잔류응력은 재료의 피로강도, 파괴 물성 등의 기계적 성질을 떨어뜨리고, 후가공을 곤란하게 하는 등 여러 문제점을 야기한다. 특히, 최근 사용이 급증한 박막소재의 경우, 이중 소재 접합부에서 발생한 잔류응력이 기계적 물성을 좌우하는 중요한 요소로 보고되고 있으며 벌크 소재에 있어서도 용접 중에 발생한 잔류응력의 중요성은 이미 알려져 있다.

현재까지 잘 알려진 잔류응력 측정방법은 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 하나는 시편을 파괴해서 측정 해야 하는 기계적 응력 완화 방법(Mechanical stress relaxing)으로 대표적으로 홀 드릴링 기법(Hole drilling)이 있고, 다른 하나는 비파괴로 측정이 가능한 물리적 방법으로 X-선 회절법(X-Ray Diffraction method), 중성자 회절법(Neutron diffraction method), 광학을 이용한 잔류응력 측정법 등이 있다.

(1) 파괴 시험(Destructive Tests)

① 홀 드릴링 기법(Hole-drilling method)

대표적인 파괴 시험법으로는 홀 드릴링 기법(Hole-drilling method)이 있는데 이는 대상체의 표면에 스트레인 게이지를 부착하고, 일정 깊이로 Hole-drilling 가공을 하여, 이때 발생하는 스트레인을 측정하여 응력을 계산하는 방법으로 제품 표면으로부터 깊이 방향으로 분포하는 잔류응력을 분석할 때 효과적인 방법이지만 대상체에 손상을 준다는 단점이 있다. 단조, 열처리, 용접, 사출 등의 소재 내부의 용접부 잔류응력이 측정이 가능하고 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 방법으로 널리 쓰이고 있다. Fig. 2-14는 홀 드릴링 기법(Hole-drilling method)을 이용하여 잔류응력을 측정하는 장비이다.

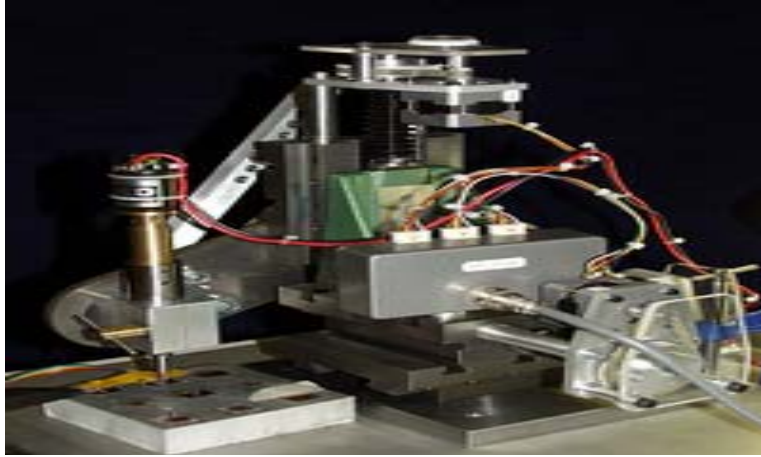


Fig. 2-14 Residual stress measurement equipment using Hole drilling method

(2) 비파괴 시험(Non-destructive Tests)

① X-선 회절법(X-Ray Diffraction method)

잔류응력을 평가하는 방법으로 X-선 회절법(X-Ray Diffraction method)이 있는데 X-선을 표면에 조사하여 시료의 결정립 방향에 따른 X-선 회절 피크의 위치를 측정하여 격자 면간거리(d-spacing)의 변화 정도에 따라 시료의 잔류응력을 평가하는 방법으로 널리 사용되고 있다. X-선 회절의 강도와 진행 방향은 물질을 구성하는 원자의 배열 상태에 따라 달라진다. 그러한 특징을 이용하여 X-선을 조사함으로써 주로 제품 표면에 분포되어 있는 응력을 측정하고자 할 때 편리하다. Fig. 2-15에서는 실제로 쓰이고 있는 X-선 회절법(X-Ray Diffraction method)을 이용하여 측정 가능한 장비를 보여주고 있다.

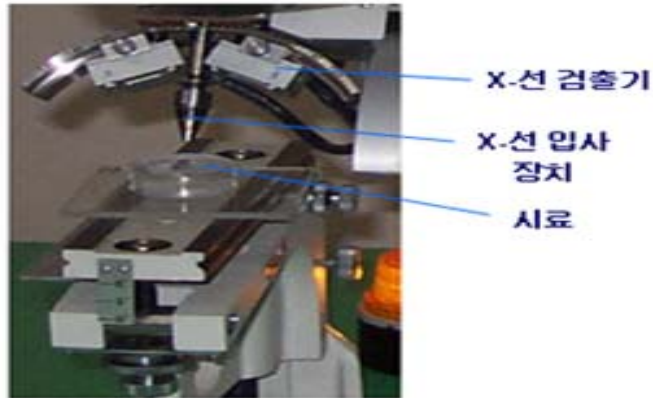


Fig. 2-15 Residual stress measurement equipment using the X-Ray diffraction method

② 중성자 회절법 (Neutron diffraction method)

가공 후 재료 내부에 잔존하는 잔류응력은 각종 구조물과 부품의 기계적 성질을 크게 열화 시킨다. 이러한 잔류응력을 비파괴적으로 측정하는 한가지 방법으로 중성자 회절법 (Neutron diffraction method)이 잘 발달되어 널리 이용되고 있다. 기본원리로는 중성자가 재료 내부의 원자핵으로부터 회절시 (Bragg's law) 격자면 거리 (D-spacing)를 측정하게 된다. 이 값을 고유한 변형 게이지 (Strain gauge) 값으로 보아 이로부터 변형 값 (Strain)을 계산하고 Hooke's law을 이용하여 응력 (stress)를 결정하는 방법이다. 중성자 회절법은 재료내부 특성을 부피 평균값으로 측정할 수 있으며 3차원 측정 (Mapping)이 가능하다는 장점이 있다. 최근에는 잔류응력 측정 외에도 이 장치를 이용하여 상변태, 변형거동 및 각종 실시간 연구 등이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. Fig. 2-16에서는 실제로 쓰이고 있는 중성자 회절법 (Neutron diffraction method)을 이용하여 측정 하는 장비를 보여 주고 있다.

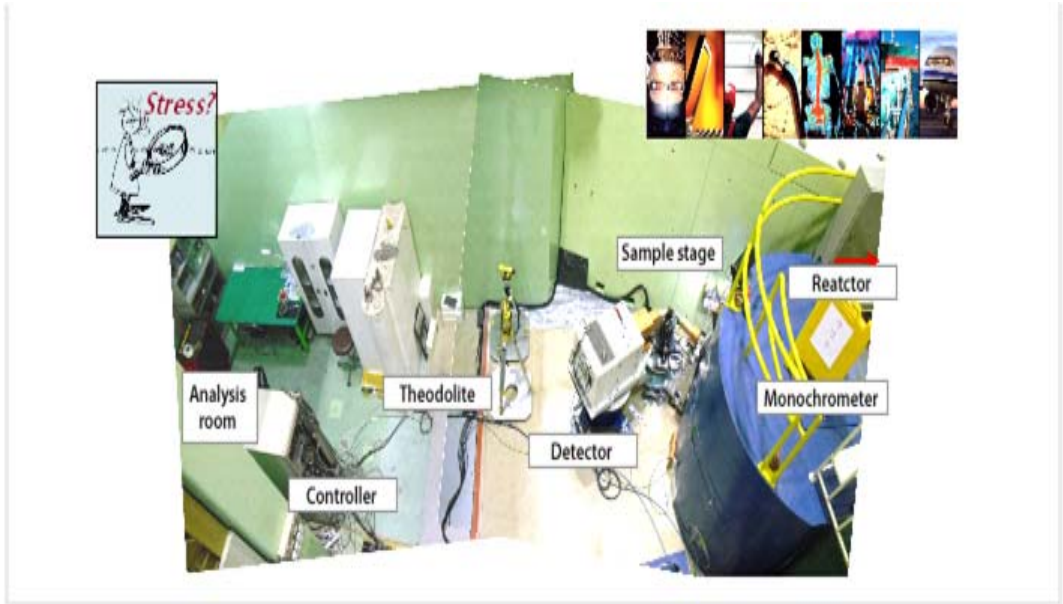


Fig. 2-16 Residual stress measurement equipment using the Neutron diffraction method

③ 광학을 이용한 잔류응력 측정법

잔류응력을 측정하기 위해 연구자들은 광탄성법, 무아레 등을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 이러한 잔류응력 측정법들은 비파괴, 비접촉적으로 친환경적인 계측 기법이고 실시간으로 측정결과가 확인이 가능하다는 장점을 가지고 있고, Camera를 이용하여 측정하기 때문에 점 단위 측정 방법을 면 단위 측정법으로 변형하여 데이터의 획득 시 전체 영역이 측정이 가능하다는 기법이라는 점 때문에 측정 결과의 신뢰성이 높다는 큰 장점을 가지고 있다. 그로 인해 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

4. ESPI를 이용한 잔류응력 측정법

잔류응력을 측정하기 위해 Laser를 이용한 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 비접촉, 비파괴적인 방법인 Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리 레이저 스페클 간섭법)을 이용하여 기계, 항공, 자동차, 원자력, 선박, 중공업 등 다양한 산업 분야에서 문제시 되고 있는 잔류응력을 검출하기 위해서 그 이론적 방법을 제시하고 이를 통해 측정 결과를 수치적으로 계산함으로써 잔류응력 및 탄성계수를 정량적으로 획득하고 실험을 통해서 검증을 하려고 한다.

본 논문에서는 용접된 구조용 강재의 용접부 잔류응력을 측정하고자, 구조용 강재 용접 시험편에 각각 다른 인장하중이 가해졌을 때 용접 조건에 따라서 모재부와 용접부의 변형 및 변형률을 측정하고 이를 이용하여 잔류응력 계산식에 대입하여 잔류응력을 측정하였다. Fig. 2-17은 실제로 Electronic Speckle Pattern Interferometer(전자처리 레이저 스페클 간섭계)를 이용하여 해석을 통해 변형 Data를 얻는 과정을 나타내었다. 시스템의 구성 후 측정 시 반점이 생성되고 변형을 주었을 때 Fringe pattern이 생성을 통해 이를 영상처리를 통하여 Phase map을 획득하여 이를 해석하여 정량적인 변형 값을 얻을 수 있다.

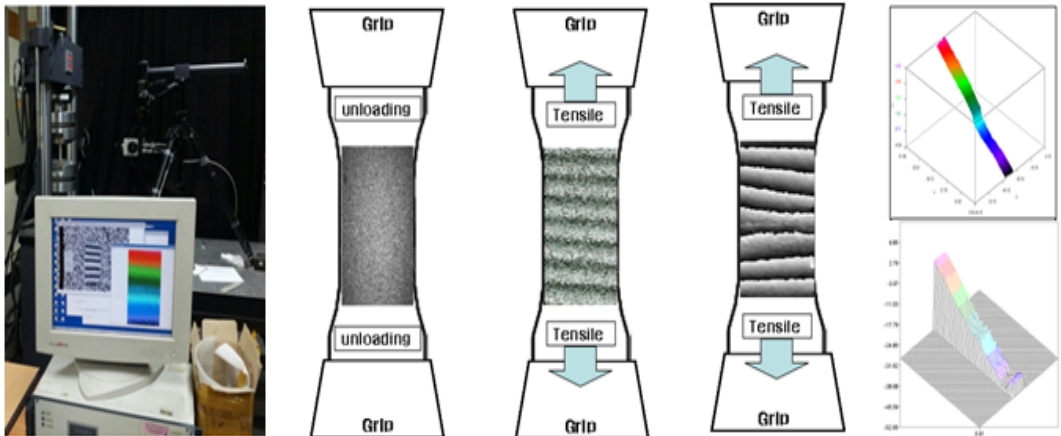


Fig. 2-17 Residual stress measurement process using ESPI
(Electronic Speckle Pattern Interferometry)

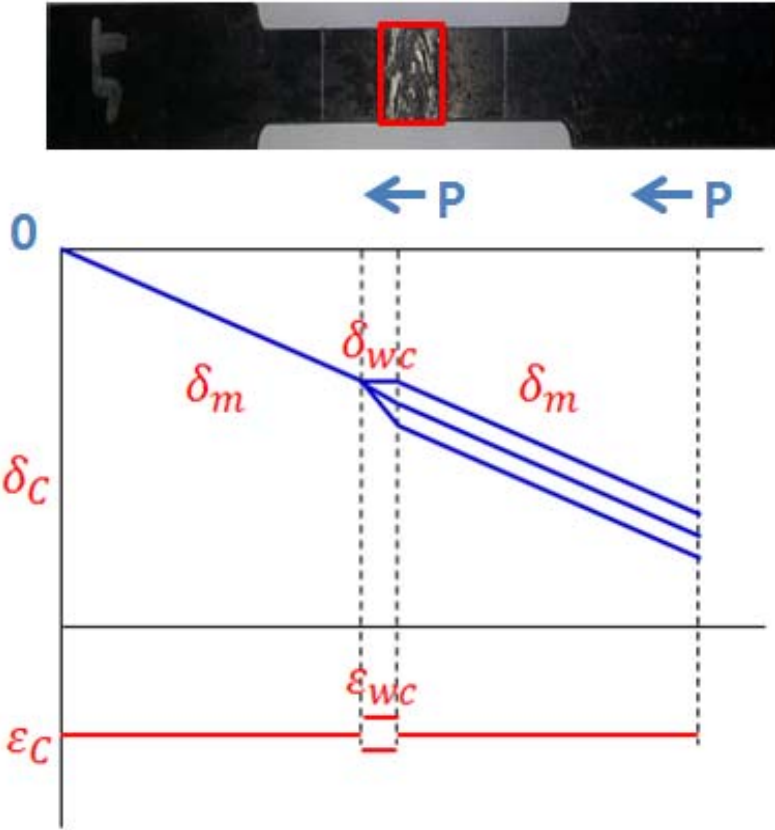


Fig. 2-18 Concept of measuring residual stress produced by welding

여기에서 변형률(ϵ)은 응력(σ)와 비례하며, 탄성계수(E)는 $E = \sigma / \epsilon$ 임을 알 수 있다. 또한 탄성계수(E)는 Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리 레이저 스페클 간섭계)를 통해 측정된 변형과 MTS System의 작용 하중을 통해 알 수 있는 응력을 Fig. 2-18과 같이 그래프로 그려 얻어진 선도의 기울기를 통해 계산할 수 있다. 식 (2-26), 식 (2-27)은 용접 시험편의 모재부와 용접부의 탄성계수를 구하는 계산식이고, 측정된 탄성계수 값을 토대로 다음의 식 (2-28), 식 (2-29), 식(2-30)과 같은 계산식을 통해 논 논문의 최종 목표인 잔류응력 값을 측정할 수 있다. 여기에서, σ_m : 모재부의 응력, E_m : 모재부의 탄성계수, ϵ_m : 모재부의 변형률, σ_w : 용접부의 응력, σ_R : 용접부의 잔류응력, E_w : 용접부의 탄성계수이다.

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} = \frac{P_1/A_m}{\delta_1/\ell_m} \quad (2-26)$$

$$E_w = \frac{\sigma_m - \sigma_R}{\epsilon_w} \quad (2-27)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{A_m} = \sigma_w + \sigma_R = \frac{P}{A_w} + \sigma_R \quad (2-28)$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_m = E_w \epsilon_w + \sigma_R = \frac{P}{A_w} + \sigma_R \quad (2-29)$$

$$\sigma_R = E_m \epsilon_m - E_w \epsilon_w \quad (2-30)$$

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 잔류응력 측정 시스템

1. ESPI system

본 연구에서는 잔류응력을 측정하기 위해 현장 적용성 및 정확성이 뛰어난 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 구조용 강재의 용접 시험편을 인장 시켰을 경우 Fig. 3-1에서와 같이 용접 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형의 차이가 발생하는 것을 이용하여 측정한 후 개발된 기법을 통하여 용접부위의 잔류응력을 실험을 통해 검증하고자 한다.

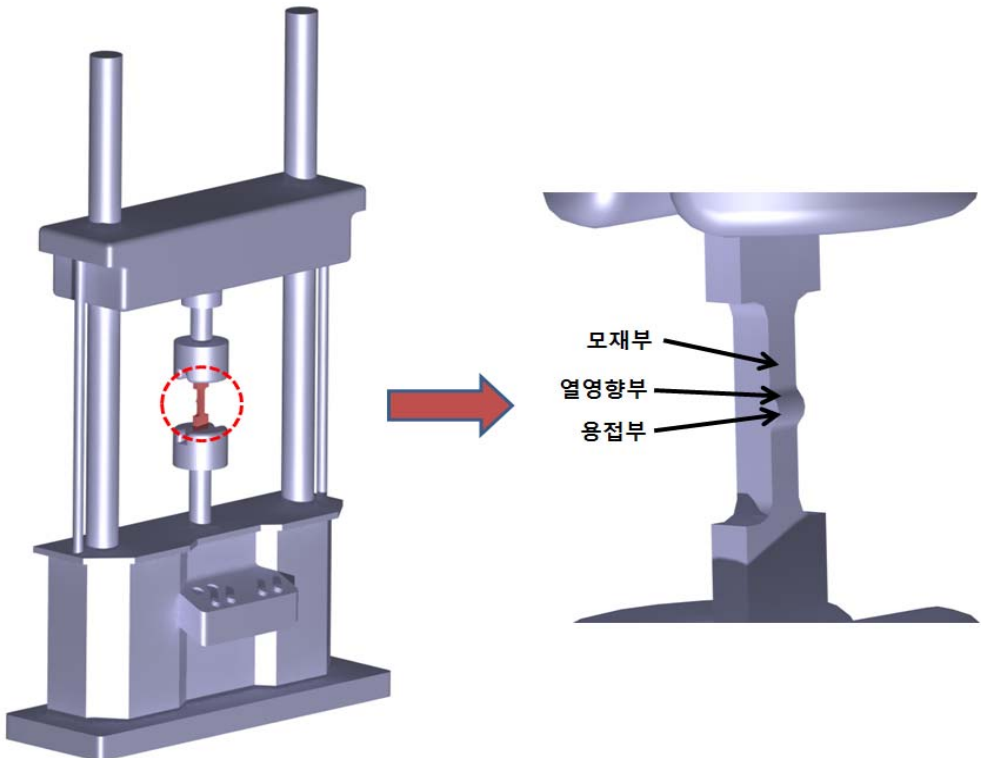


Fig. 3-1 Configuration of welded specimen

전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 용접부의 잔류응력을 측정하기 위해 Fig. 3-2와 같이 532nm ND:YAG laser source, laser controller, polarization maintaining optical fiber, ESPI sensor, 인장 시험기(MTS 793), MTS controller, MTS cooling system, PC로 구성하였다. 인장 시험기를 이용하여 구조용 강재 용접 시험편에 각각의 다른 하중을 인가하여 인장 시켜 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률을 전자처리 스페클 패턴 간섭계를 이용하여 계측하였다. 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 내부는 x, y, z 축 변위를 측정할 수 있게 구성되어 있는데 이때, 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다. ND:Yag Laser source에서 Optical fiber를 통하여 4개의 각각의 Arm에서 Laser 빛이 조사되는데 이를 Shutter 제어를 통해서 실험 조건에 맞게 측정을 할 수 있게 되어 있다.

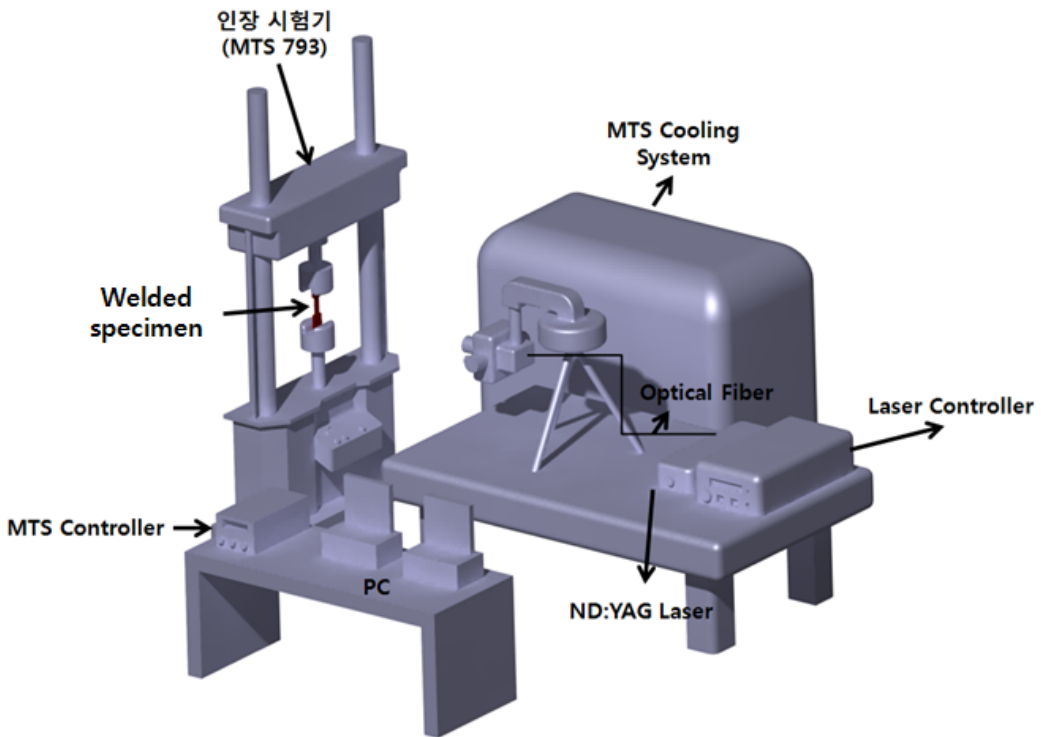


Fig. 3-2 Device configuration of residual stress measurement

구조용 강재 용접 시험편의 Y축 인장시험시 면내 변위를 측정하기 위해서 위, 아래의 Arm으로부터 Laser 빛을 물체에 조사시켜 이를 Phase Shifting 4-step Algorithm 위상 추출을 통해 측정 하였다. 위상 추출을 위해 위상이동은 외부 controller에서 Piezo electronic transducer에 전압차를 주어 제어하고 이를 통해 얻어진 위상지도는 상용프로그램을 이용하여 해석함으로써 변위 및 변형을 측정 할 수 있었다. Table. 3-1은 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry)의 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

2. MTS system

본 연구에서 용접부의 잔류응력을 측정하기 위해 구조용 강재 용접 시험편에 인장하중을 가하기 위한 인장시험기(MTS Co.)를 Fig. 3-3과 같이 사용하였다. 인장시험기는 미국 MTS 사의 MTS Landmark Servohydraulic Test Systems을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servo-valve controller, MTS Cooling System으로 이루어져 있다. Table. 3-2은 MTS system(인장시험기)의 제원이다.



Fig. 3-3 MTS system for tensile loading

Table. 3-2 Specification of MTS system

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

3. 용접시험편

용접부 잔류응력 측정 및 비교/검증을 위하여 구조용 강재 용접 시험편을 제작하였다. 사용된 시험편의 재질은 시험편은 ASTM A131 AH32이며, 실제 원자력 발전설비 및 선박, 자동차, 중화학 배관설비 재료 등으로 많이 사용되고 있는 재질이다. 사용된 시험편의 재질에 대한 화학적, 기계적 물성치를 Table. 3-3, Table. 3-4, Table. 3-5, Table 3-6에 나타내었다.

Table. 3-3 Mechanical properties of ASTM A131 Steel, Grade AH32

Tensile Strength, Ultimate	470 - 585 MPa (68200 - 84800 psi)	
Tensile Strength, Yield	315 MPa (45700 psi)	
Elongation at Break	19 %	in 200 mm
Modulus of Elasticity	22 %	in 50 mm
Bulk Modulus	200 GPa (29000 ksi)	
Poisson' s Ratio	140 GPa (20300 ksi)	
Shear Modulus	0.29	
Density	80.0 GPa (11600 ksi)	

Table. 3-4 Electrical properties of AH32 specimen

Electrical Resistivity	0.0000170 ohm-cm
------------------------	------------------

Table. 3-5 Thermal properties of AH32 specimen

CTE, linear	12.0 $\mu\text{m}/\text{m}-^{\circ}\text{C}$ (6.67 $\mu\text{in}/\text{in}-^{\circ}\text{F}$)
Specific Heat Capacity	0.470 $\text{J}/\text{g}-^{\circ}\text{C}$ (0.112 $\text{BTU}/\text{lb}-^{\circ}\text{F}$)
Thermal Conductivity	52.0 $\text{W}/\text{m}-\text{K}$ (361 $\text{BTU}-\text{in}/\text{hr}-\text{ft}^2 -^{\circ}\text{F}$)

Table. 3-6 Component elements properties (%) of AH32 specimen

C	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Nb	P	Si	S	V
0.18	0.25	0.35	97.09	0.90 ~ 1.6	0.080	0.40	0.050	0.040	0.10 ~ 0.50	0.040	0.10

(1) 구조용 강재 용접 시험편 제작 및 용접

구조용 강재 용접 시험편 제작에 앞서 Fig. 3-4와 같은 용접 시험편 제작 도면을 작성하였다. 가로 320mm, 세로 260.25mm, 두께 6mm이고 재질은 ASTM A131 Steel, Grade AH32이다. 시험편을 제작 후 두 개의 시험편을 용접 지그에 고정 시킨 후 가로방향 중심으로 단면 비드 용접을 실시하였다. 이 때 용접 조건은 용접 전류를 변수로 하여 4가지 조건에서 용접 하였다. 용접에 사용된 용접기는 Inverter CO2 용접기(Model : 500LC)를 사용하였고 CO2 가스와 AWS ER 70S-6 연강용 와이어를 사용하여 Solid mode로 용접하였다. Table. 3-7은 시험편 별 용접 조건이다. 용접 속도는 2mm/sec로 자동 용접 모드로 하였고, 용접 전압은 23V로 각각의 시험편에 동일하게 주었고, 용접 와이어의 두께는 1.2 \emptyset 로 용접을 실시하였다. 용접이 완료된 시험편은 Fig. 3-4와 같이 가로 20mm, 세로 200mm로 11개씩 Wire cutting하여 구조용 강재 용접 시험편을 제작을 하였고, 실제 시험편의 탄성계수와 비교 실험을 위해서 각 조건 별로 2개씩 모재부 시험편을 제작 하였다. Fig. 3-5는 실제로 제작된 시험편의 형상을 나타내었는데 왼쪽 부터 150A, 140A, 130A, 120A의 용접 전류를 조건으로 한 용접 시험편과 4가지 조건의 시험편 중 150A, 140A, 130A의 모재부 시험편을 제작하였다.

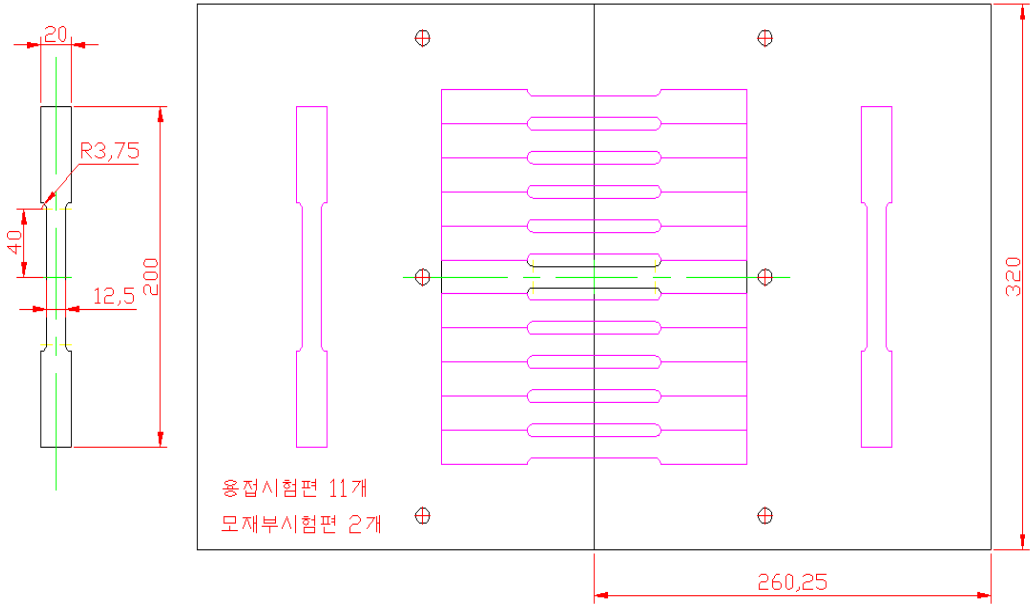
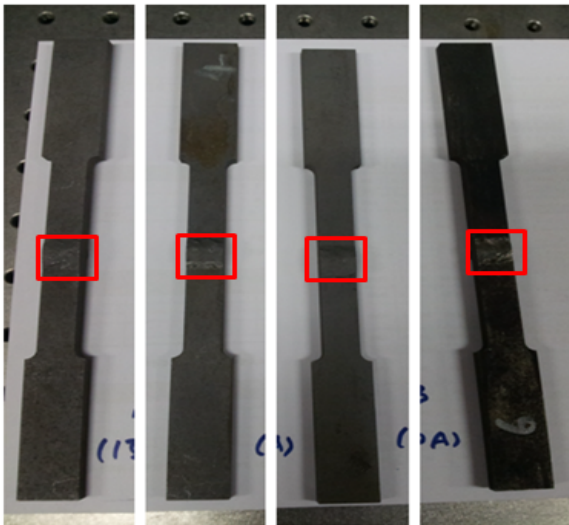
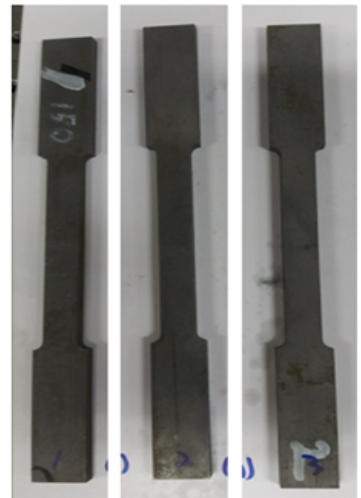


Fig. 3-4 Welded specimen cutting by Electrical Discharge Machining

: 용접부



(a) 용접 조건별 용접 시험편



(b) 용접 조건별 모재부 시험편

Fig. 3-5 Fabrication of structural steel welded specimen

Table. 3-7 Welding condition of structural steel welded specimen

	Welding Method	Welding wire thickness (Ø)	Welding Speed (mm/sec)	Welding Voltage (V)	Welding Current (A)
Bead Welding (Current Control)	CO ₂ 용접	1.2	2	23	150
					140
					130
					120

(2) 용접 시험편 Jig 제작

구조용 강재 용접시험편 제작에 앞서 Fig. 3-6와 같이 용접부 잔류응력의 손실을 최소화하기 위하여 용접시험편의 Jig를 제작하였다. 가로 320mm, 세로 600mm, 두께 20mm이고 재질은 SM45C이다. 용접 후 시험편과 Jig와의 접촉을 방지 하기 위하여 가운데 홈 부분에 세라믹 재질의 Back plate를 집어 넣어 용접을 실시하였다. Fig. 3-7은 실제로 자동 용접 장비에 Jig 가운데 홈 부분에 Seramic back plate를 넣은 상태에서 시험편을 고정 시킨 상태를 나타내었다.

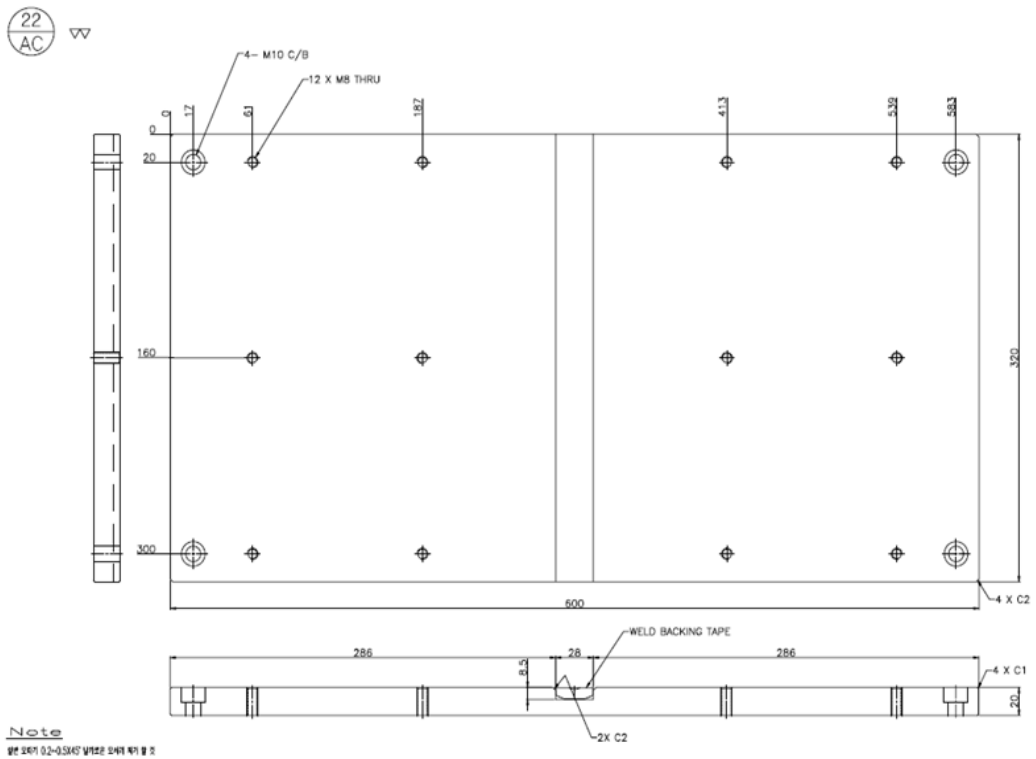


Fig. 3-6 Welding jig for automatic welding process



Fig. 3-7 Fabricated welding jig

(3) 용접 시험편 자동 이송 장치 제작

실제로 수동으로 용접시 조건과 용접 비드의 형상이 달라짐을 방지하기 위하여 사용자의 작업 조건에 맞춰 자동으로 용접을 할 수 있게 이송시켜 주는 장치를 제작하였다. Fig. 3-8과 같이 Automatic welding machine, Controller, Welding wire(CO₂ Wire)로 구성되어 있다. Fig. 3-9와 같이 실제로 용접 system 구축 후 용접을 실시하였다.

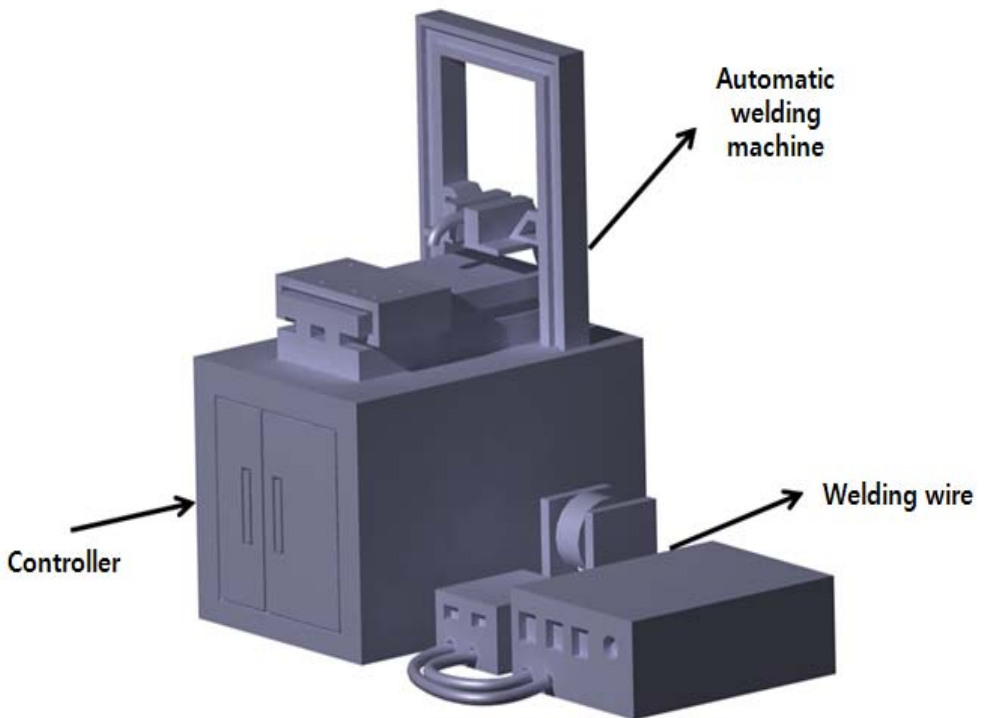


Fig. 3-8 Device configuration of automatic welding machine

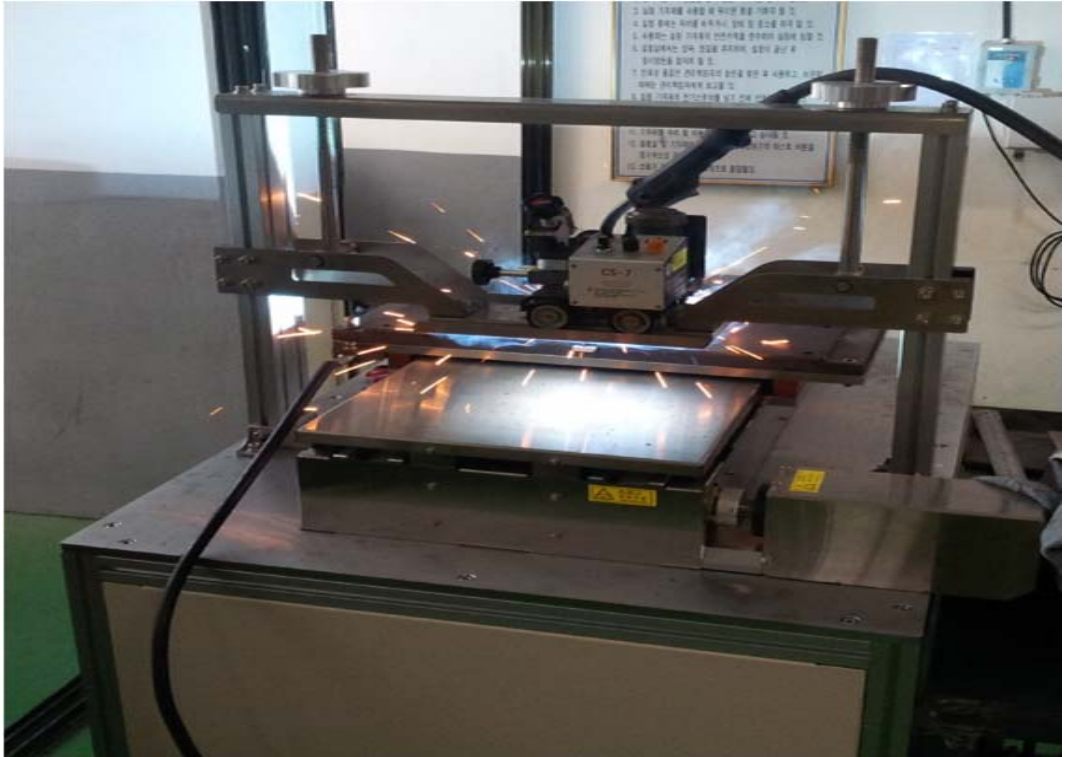


Fig. 3-9 Automatic welding machine in working state

제 2 절 실험 방법

본 논문에서 잔류응력을 측정하기 위하여 MTS(인장시험기)를 이용하여 각각 다른 크기의 하중을 인가하여 인장 시켜 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 계측하고 시험편의 변형을 측정하여 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 통하여 실험적으로 검증 하였다. Fig. 3-10은 용접부 잔류응력 측정 실험을 위한 장치의 구성이다. 이때 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받도록 하였다. Fig. 3-11과 실제 용접 시험편의 용접부를 중심으로 y방향으로 7cm의 영역을 측정 기준 영역으로 한 후 용접부와 모재부를 측정하였다. 각각의 시험편 중심에 Profile line을 통해 모재부 및 용접부의 변형을 Fig. 3-12와 같이 실험을 통하여 측정함으로써 하중 변화에 따른 용접 시험편의 모재부 및 용접부의 프린지 패턴을 관찰하고 그 때의 변형률을 측정하여 이와 같은 방법으로 여러 차례 반복한 후 이를 이론식에 대입하여 탄성계수 및 잔류응력 값을 계산하였다.

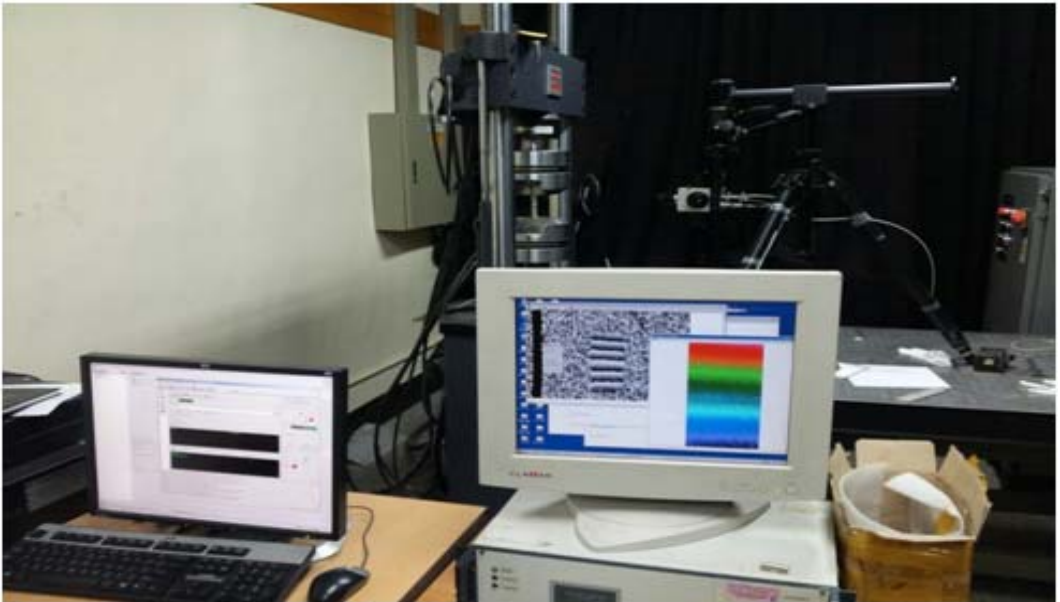


Fig. 3-10 Residual stress measurement system

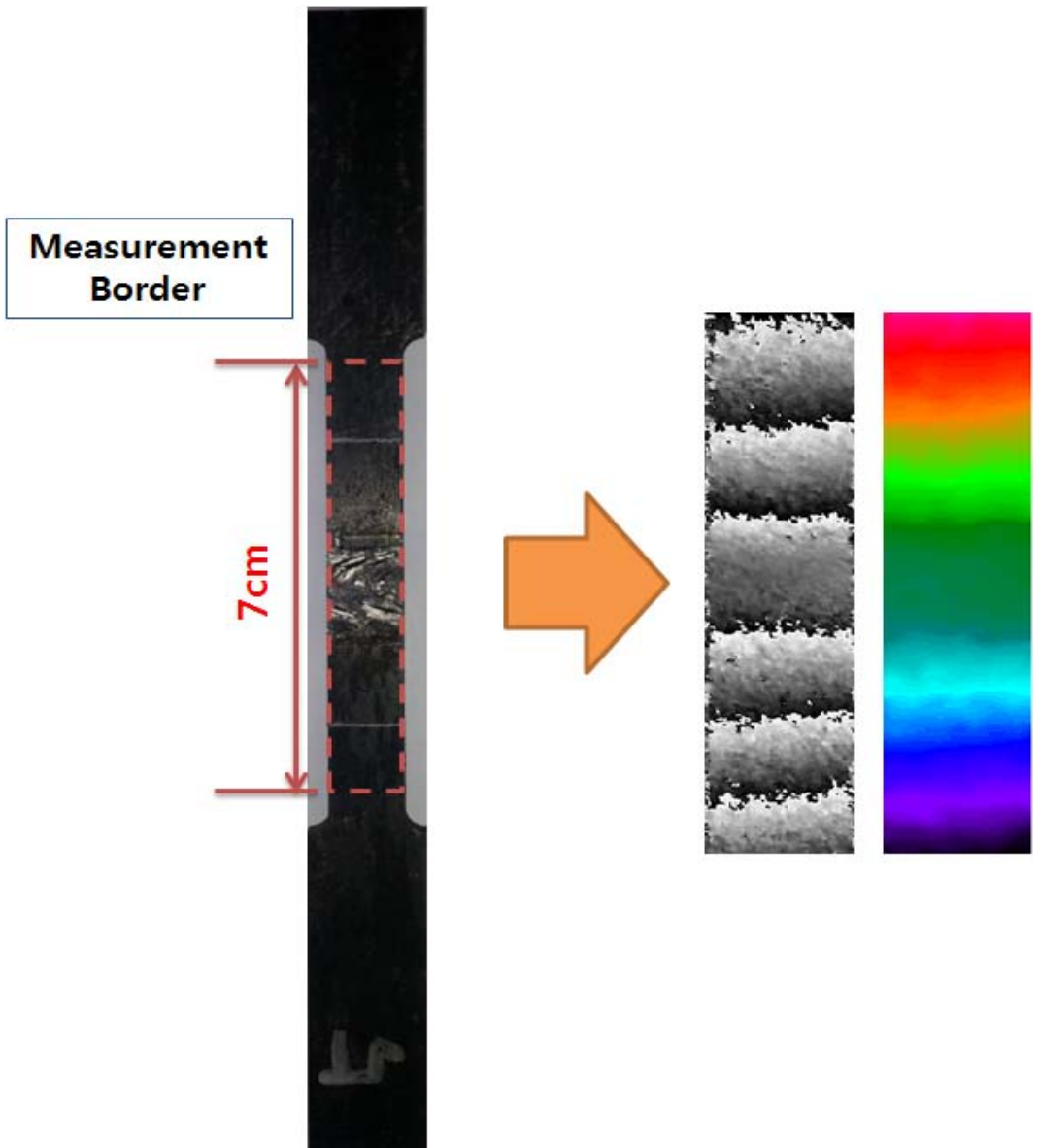


Fig. 3-11 Measurement area of structural steel welded specimen

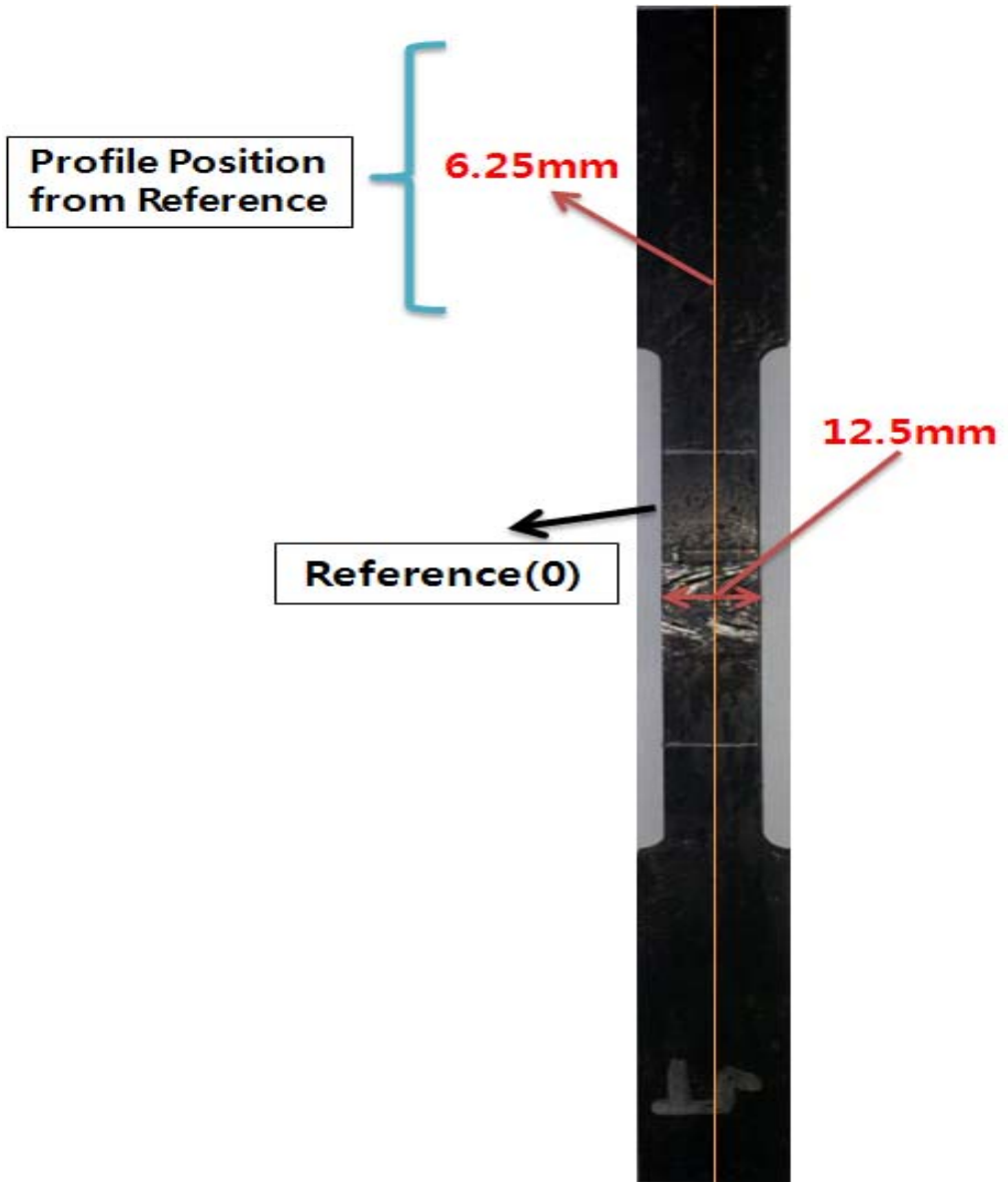


Fig. 3-12 Location of profile line for deformation at each point

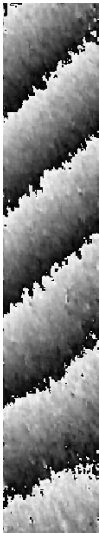
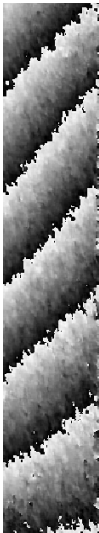


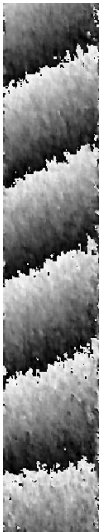
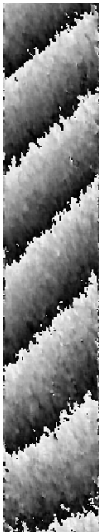
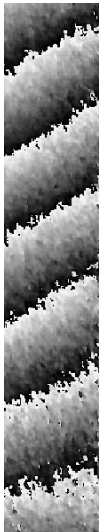

제 4 장 실험결과 및 고찰



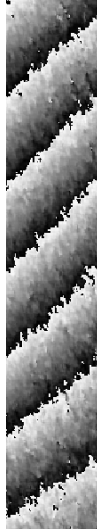
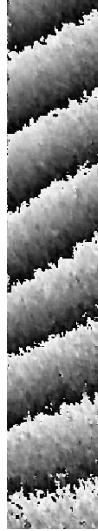
제 1 절 구조용 강재 시험편의 탄성계수 측정

1. 구조용 강재 시험편 인장하중에 의한 탄성계수 측정

구조용 강재 용접 시험편의 잔류응력 측정을 위해 앞서 제작된 시험편에 용접이 되지 않은 바깥쪽 부분에 모재부 시험편의 구해진 탄성계수 값과 실제 탄성계수 값과의 비교를 위해 6kN, 9kN, 12kN, 15kN의 인장하중을 인가하여 변형을 측정하였다. 시험편 종류는 시험편 제작 시 고려하였던 용접 조건별로 하였으며 그 조건은 용접전류이다. 각각의 인장하중 별로 전류별 시험편 3개를 측정하였으며 Table. 4-1은 각각의 시험편의 측정 결과에 대한 Phase map이다.


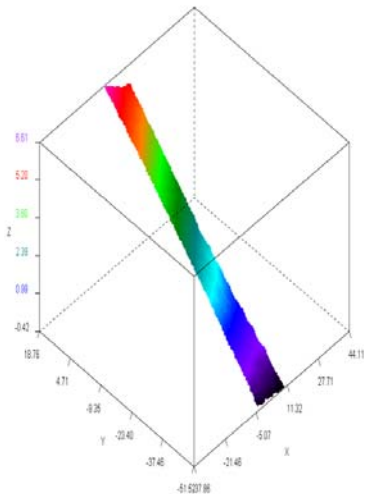
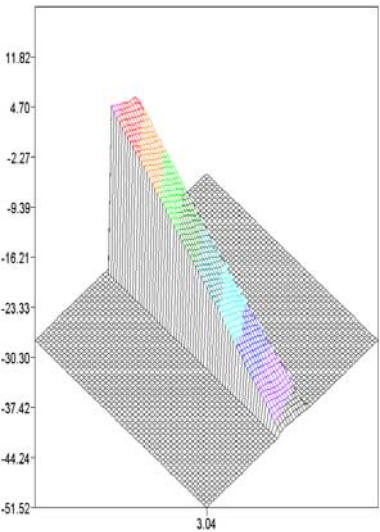

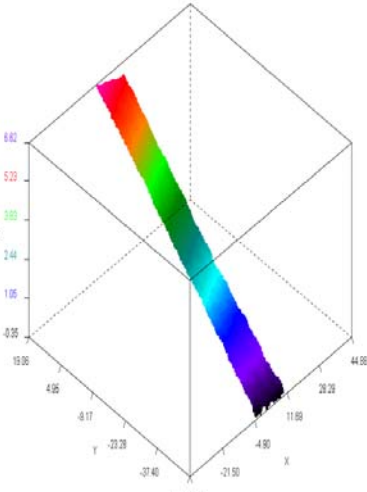
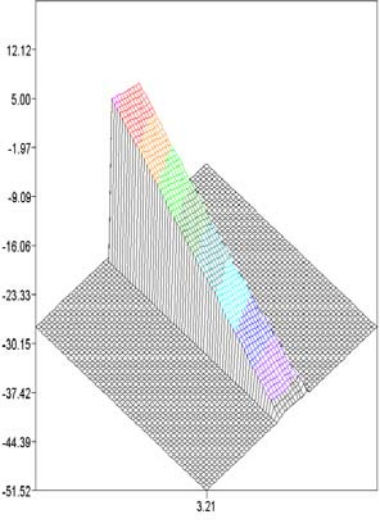
Table. 4-1 Phase map of structural steel specimen with three types of welding speed control according to the different loading conditions

		6KN	9KN	12KN	15KN
Phase map	150A				
	140A				

		6KN	9KN	12KN	15KN
Phase map	130A				

위의 Phase map 분석 결과 용접 전류가 낮고 가해지는 인장 하중이 클수록 각 시험편의 Phase map에 나타난 간섭 줄무늬의 수가 점차 증가함을 알 수 있었고 이를 통해 변형 및 변형량이 증가함을 알 수 있었다. Table 4-2, Table 4-3, Table 4-4, Table 4-5에서는 변형 및 변형량을 정량적으로 계산하기 위하여 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)로부터 얻은 위상지도를 상용프로그램을 이용하여 분석하여 각각의 하중 별로 Color Image, Profile of 3D, 3D-Plot을 나타내었다.

Table. 4-2 ESPI phase map analysis results of structural steel specimen_6kN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


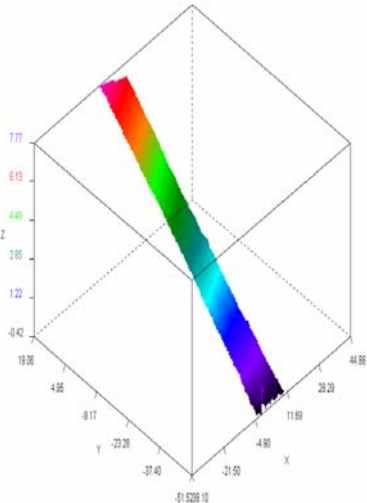
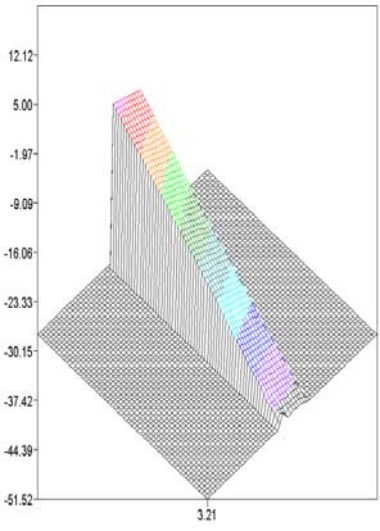

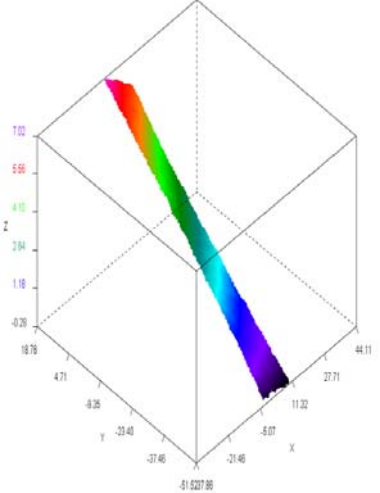
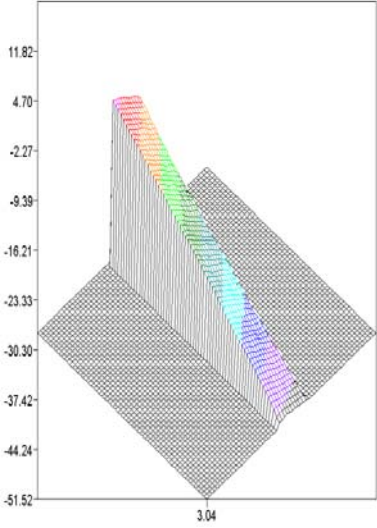

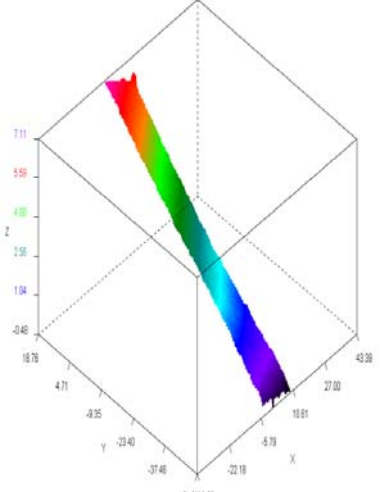
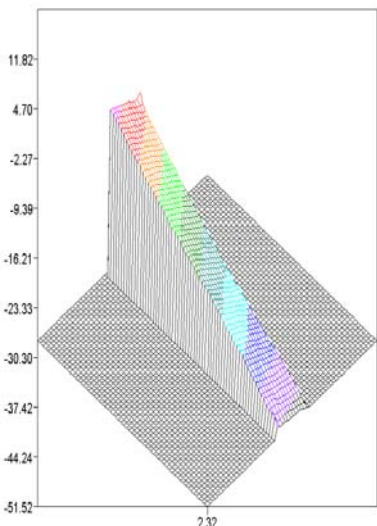
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			

Table. 4-3 ESPI phase map analysis results of structural steel specimen_9kN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


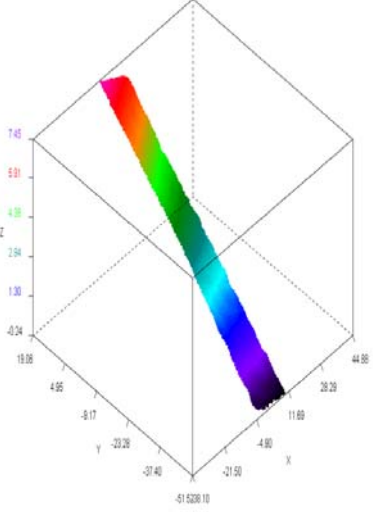
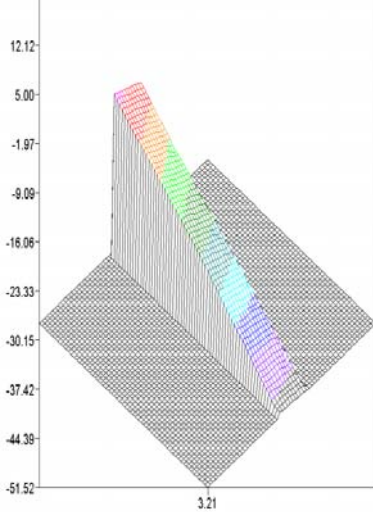
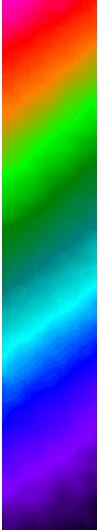
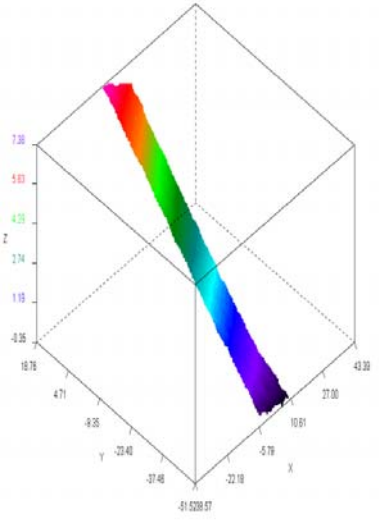
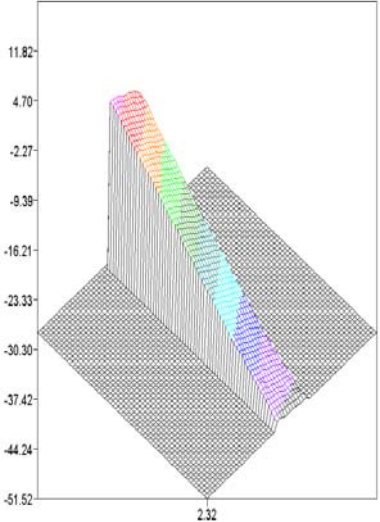

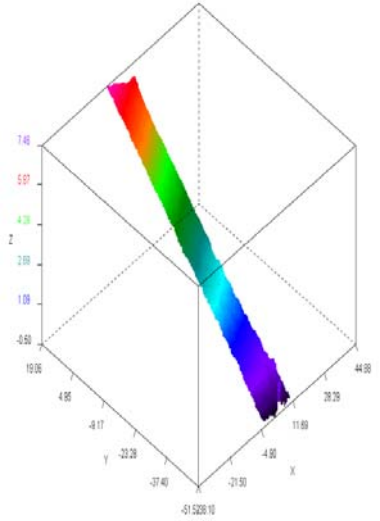
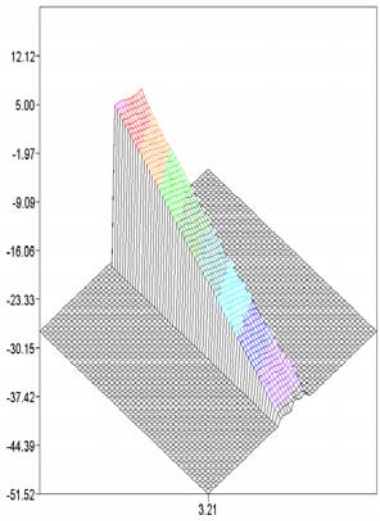
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			

Table. 4-4 ESPI phase map analysis results of structural steel specimen_12kN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


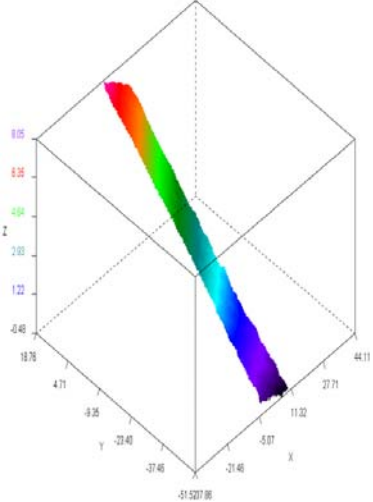
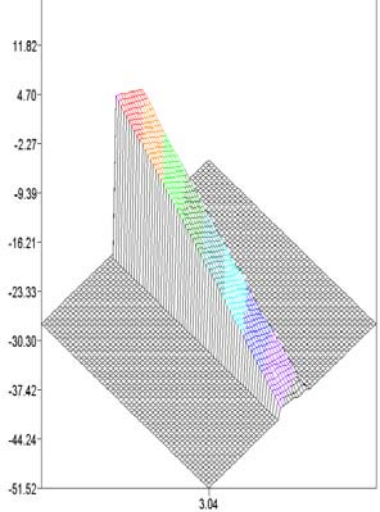
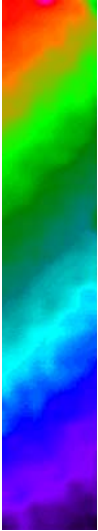
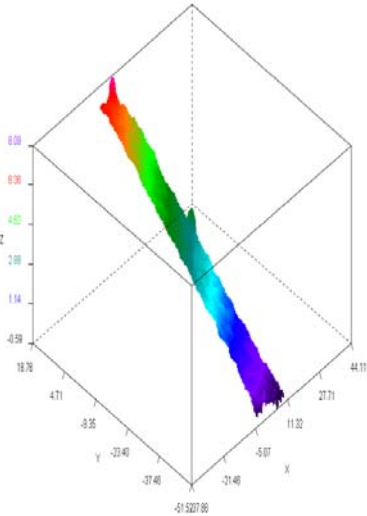
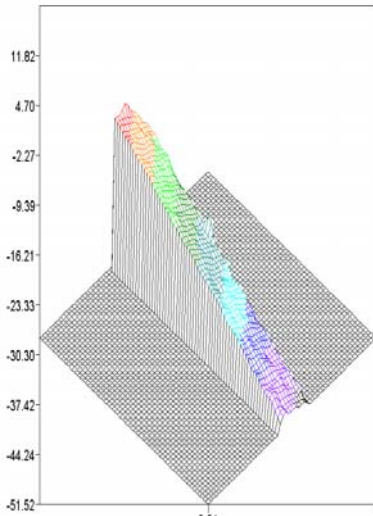

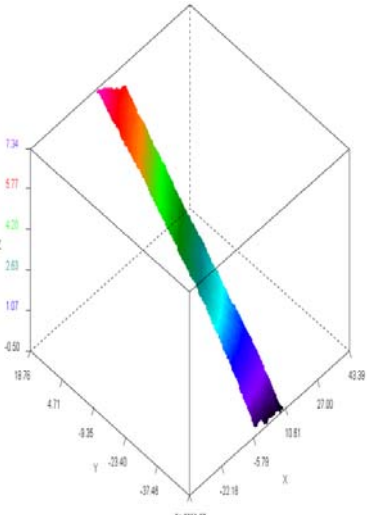
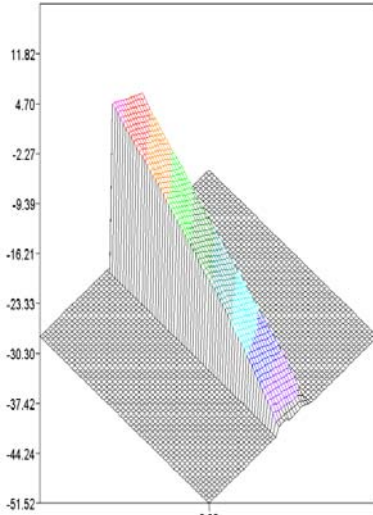

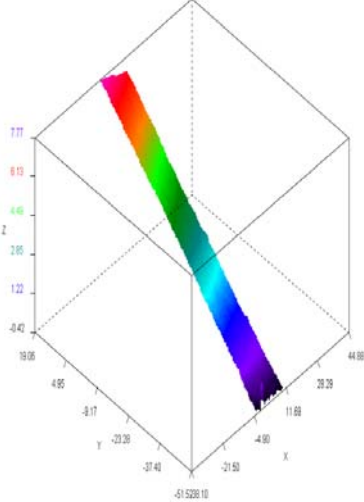
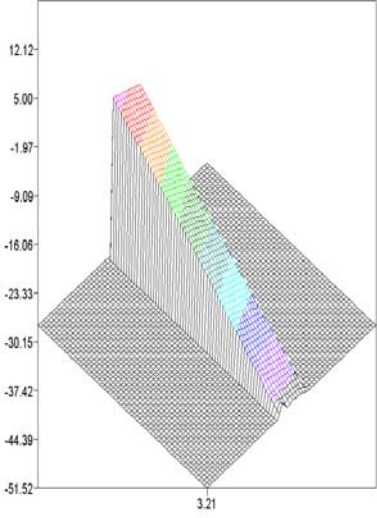
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			

Table. 4-5 ESPI phase map analysis results of structural steel specimen_15kN

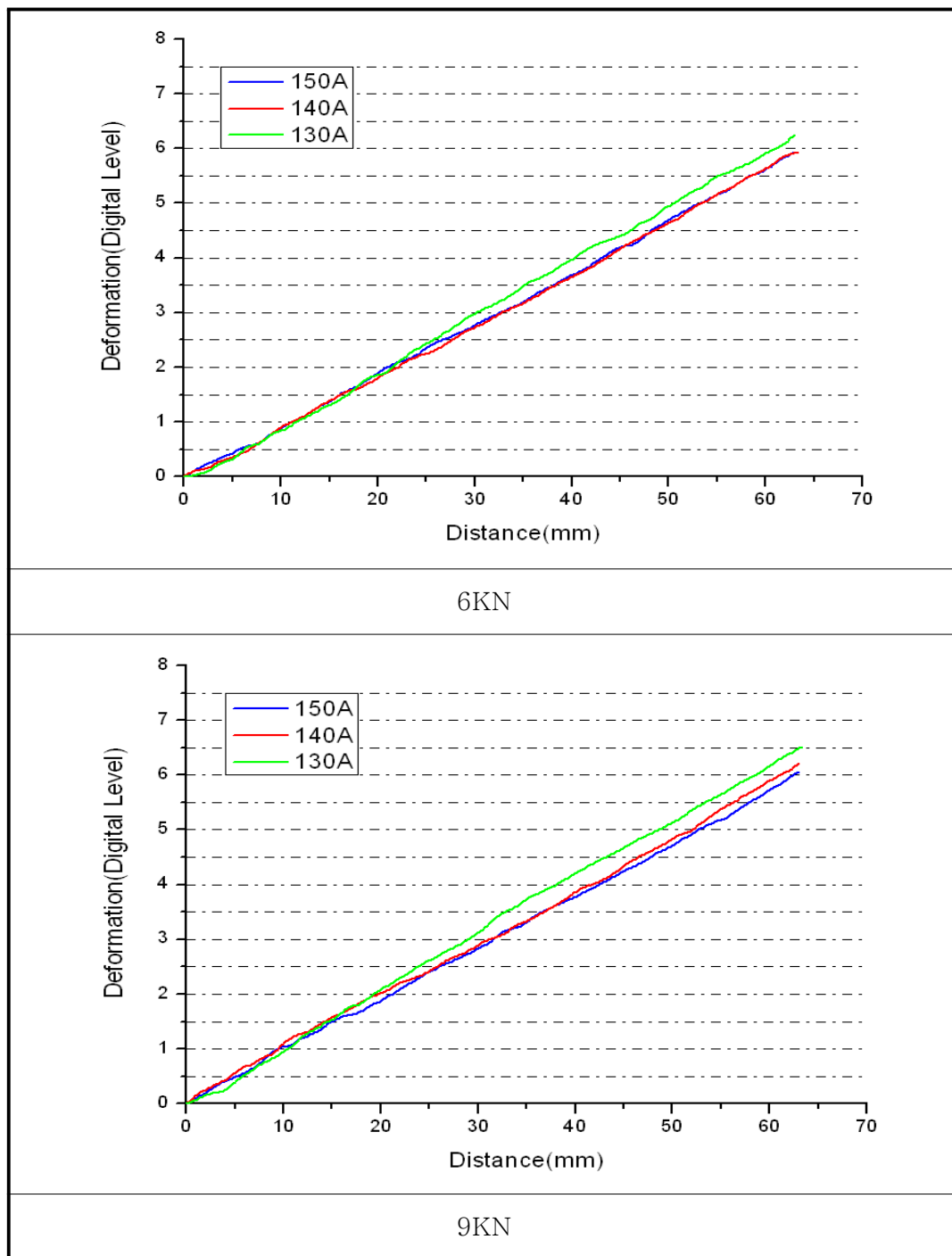
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			

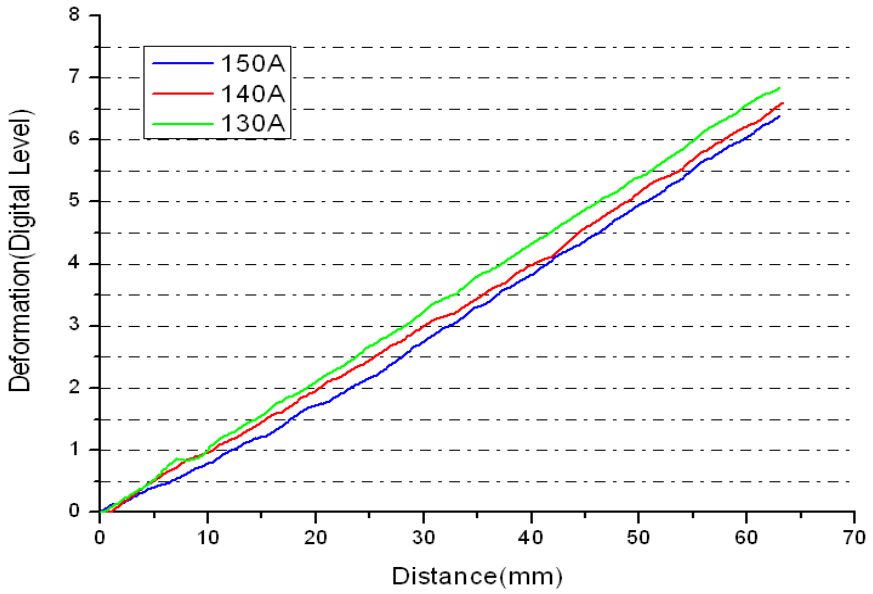
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			

2. 구조용 강재 시험편 분석 결과

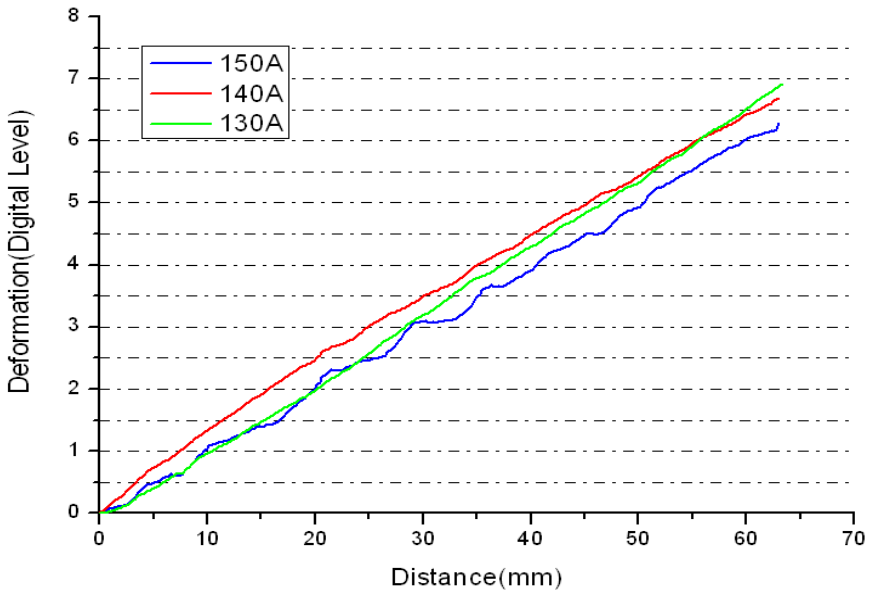
전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 각각의 시험편 중심에 Profile line을 그어 모재부의 변형을 정량적으로 측정된 결과, 변화 없이 거의 일정하였고, 용접 속도가 크고 가해지는 인장하중이 클수록 Digital level 값이 더 크게 나옴을 확인할 수 있었다. Table. 4-6은 하중 별로 구조용 강재 시험편의 Profile line data의 Digital level 값을 얻어 용접 조건별로 각 시험편을 비교하여 나타내었다.

Table. 4-6 ESPI profile line data deformation comparison of structural steel specimen by forces





12KN



15KN

실제 시험편의 탄성계수와 비교를 위하여 실제 변형 값을 이용하여 본 논문에서 제시한 식에 대입을 하여 변형률을 계산하고 이로부터 탄성계수를 획득한 결과 실제 시험편의 탄성계수 값과 거의 일치하였고, 이를 Table. 4-7, Table. 4-8, Table. 4-9, Table. 4-10과 같이 나타내었고, 하중과 상관 없이 모재부의 탄성계수는 동일한 값이 구해짐을 알 수 있었다.

Table. 4-7 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel specimen_6kN

	150A	140A	130A
Cross sectional areas of base metal (m2)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	8.00E+07	8.00E+07	8.00E+07
Deformation of base metal (μm)	27.9879	27.9879	27.9879
Strain of base metal	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09		

Table. 4-8 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel specimen_9kN

	150A	140A	130A
Cross sectional areas of base metal (m2)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	1.20E+08	1.20E+08	1.20E+08
Deformation of base metal (μm)	41.9804	41.9804	41.9804
Strain of base metal	6.00E-04	6.00E-04	6.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09		

Table. 4-9 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel specimen_12kN

	150A	140A	130A
Cross sectional areas of base metal (m ²)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	1.60E+08	1.60E+08	1.60E+08
Deformation of base metal (μm)	55.9748	55.9748	55.9748
Strain of base metal	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09		

Table. 4-10 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel specimen_15kN

	150A	140A	130A
Cross sectional areas of base metal (m ²)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	2.00E+08	2.00E+08	2.00E+08
Deformation of base metal (μm)	69.9702	69.9702	69.9702
Strain of base metal	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09		

이 결과로부터 시험편에 가해지는 하중이 커짐에 따라 변형 값이 커짐을 알 수 있었고, 변형 값에 따라 탄성계수를 측정한 결과 Table. 4-11에서 볼 수 있듯이 실제 시험편의 탄성계수와 실험에 의해 측정된 탄성계수를 비교하였을 경우 거의 동일하게 구해지는 것을 알 수 있었다. 이로 인해 실험을 통해 신뢰성을 확보할 수 있었다.

Table. 4-11 Young's modulus of base metal results comparison of ASTM A131 Steel, Grade AH32 and experiment results


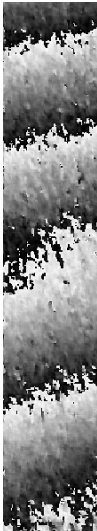



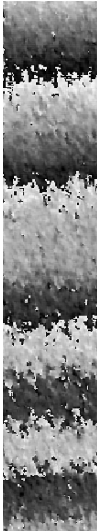
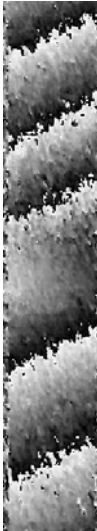

Young's modulus of base metal (ASTM A131 Steel, Grade AH32)	200 GPa
Young's modulus of base metal (Experiment Results)	200.09 GPa

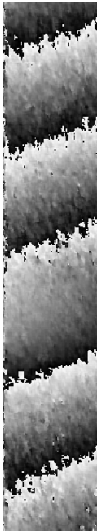

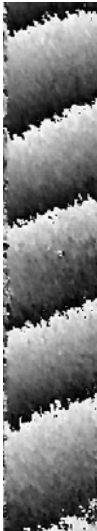



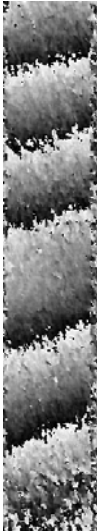
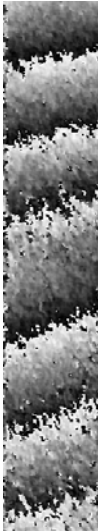
제 2 절 구조용 강재 용접 시험편의 잔류응력 측정

2-1. 구조용 강재 용접 시험편 인장 하중에 의한 잔류응력 측정

구조용 강재 용접 시험편의 잔류응력 측정을 위해 6kN, 9kN, 12kN, 15kN의 인장하중을 인가하여 변형을 측정하였다. 시험편 종류는 시험편 제작 시 고려하였던 용접 조건별로 하였으며 그 조건은 용접전류이다. 각각의 인장하중 별로 전류별 시험편 4개를 측정하였으며 Table. 4-12는 각각의 시험편의 측정 결과에 대한 Phase map이다.


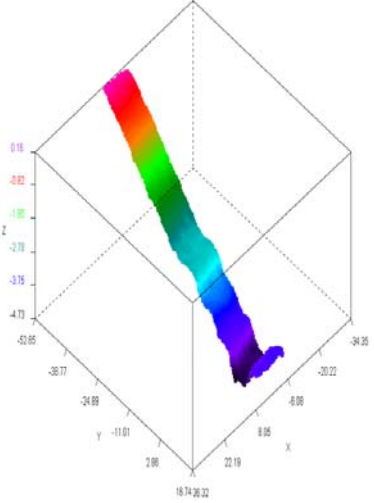
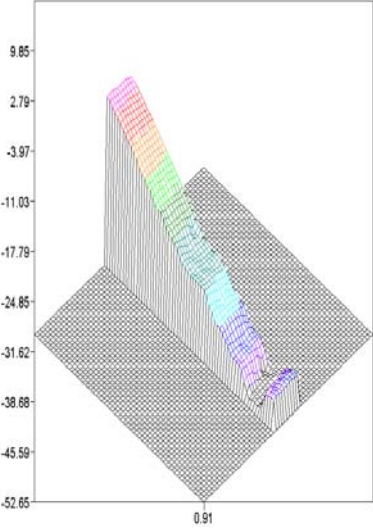

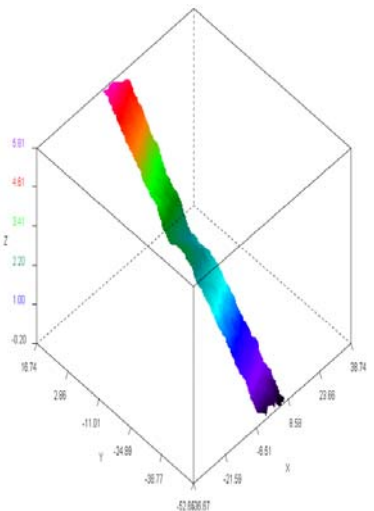
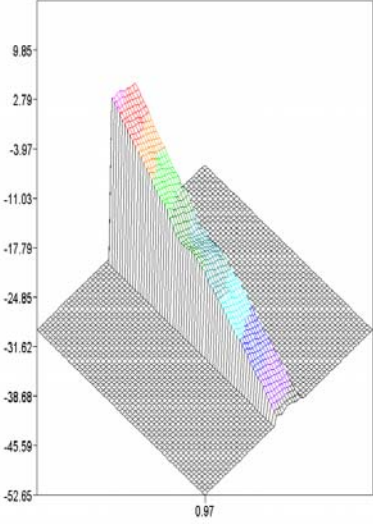
Table. 4-12 Phase map of structural steel welded specimen with four types of welding speed control according to the different loading conditions

		6KN	9KN	12KN	15KN
Phase map	150A				
	140A				

		6KN	9KN	12KN	15KN
Phase map	130A				
	120A				

위의 Phase map 분석 결과 용접 전류가 낮고 가해지는 인장 하중이 클수록 각 시험편의 Phase map에 나타난 간섭 줄무늬의 수가 점차 증가함을 알 수 있었고 이를 통해 변형 및 변형량이 증가함을 알 수 있었다. Table 4-13, Table. 4-14, Table 4-15, Table 4-16은 변형 및 변형량을 정량적으로 계산하기 위하여 전자 처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)로부터 얻은 위상지도를 상용프로그램을 이용하여 분석하여 각각의 하중 별로 Color Image, Profile of 3D, 3D-Plot을 나타내었다.

Table. 4-13 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_6KN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


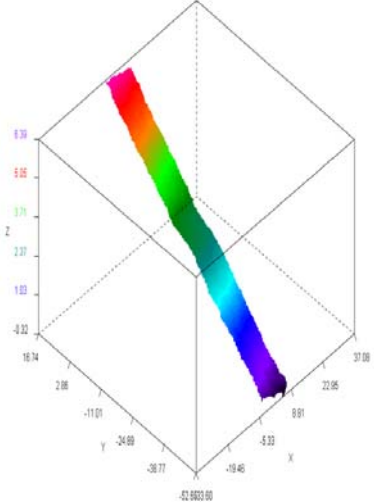
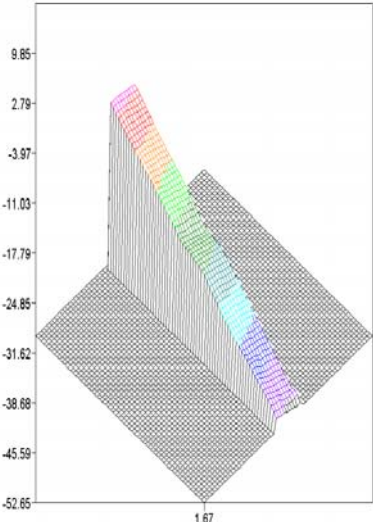

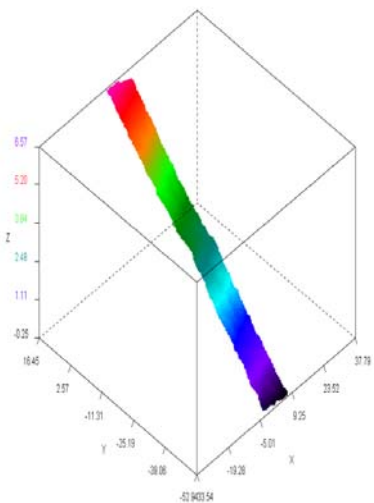
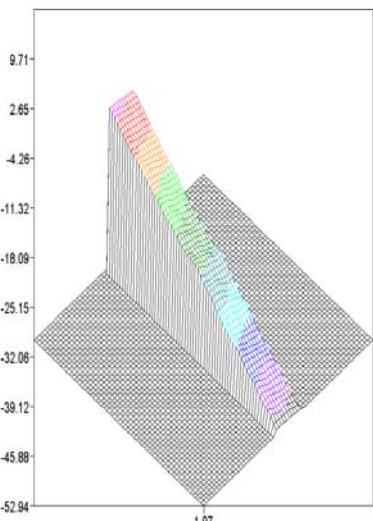

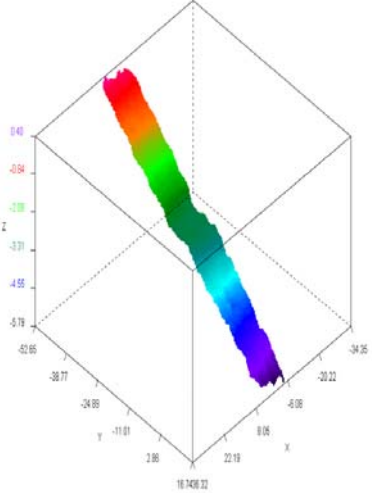
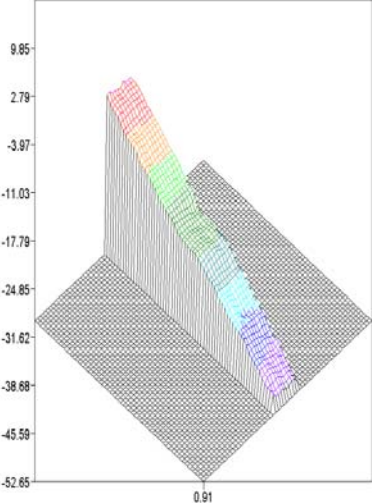

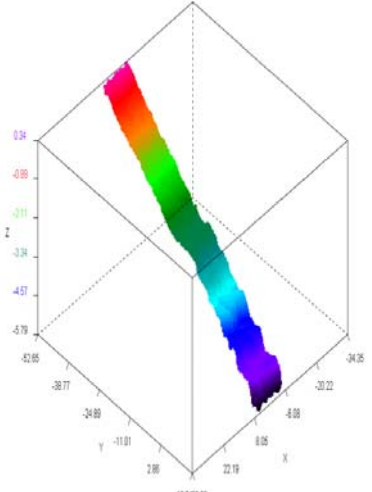
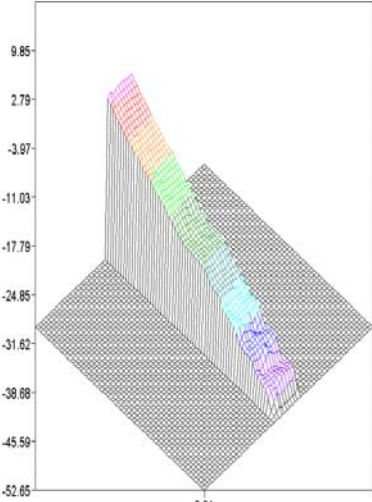
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			
120A			

Table. 4-14 ESPI phase map analysis results of structure steel welded specimen_9kN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


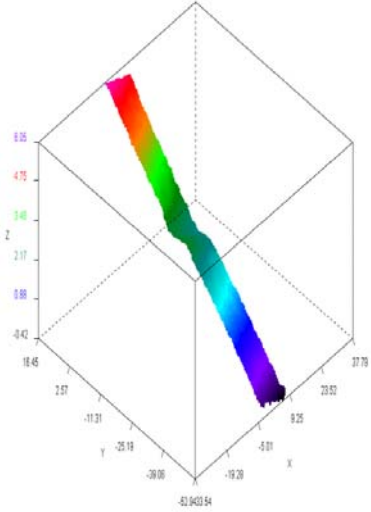
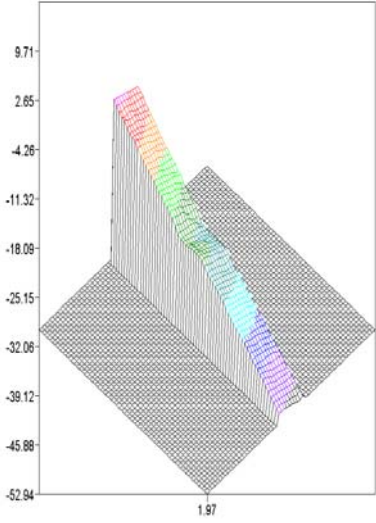

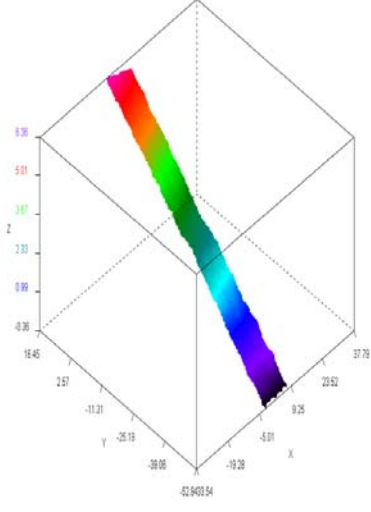
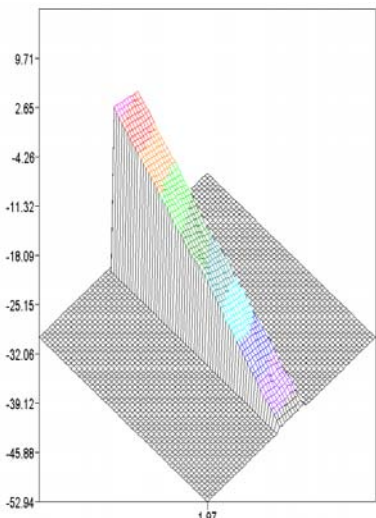

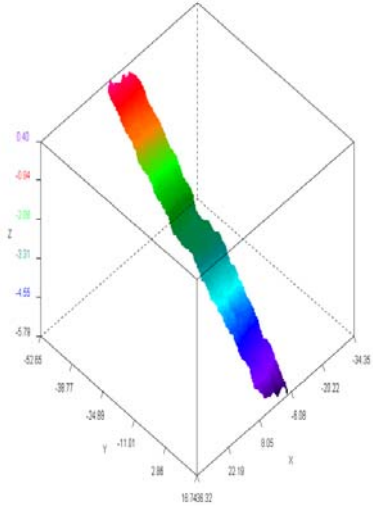
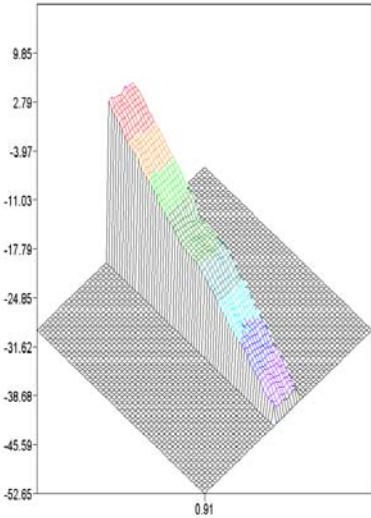

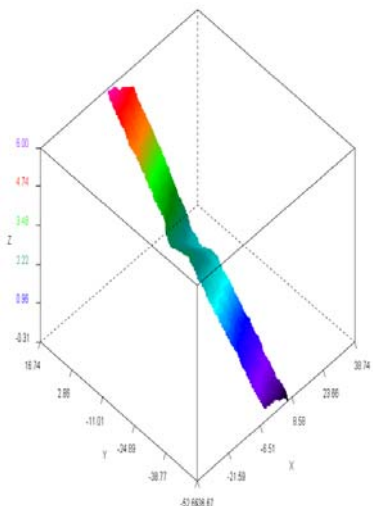
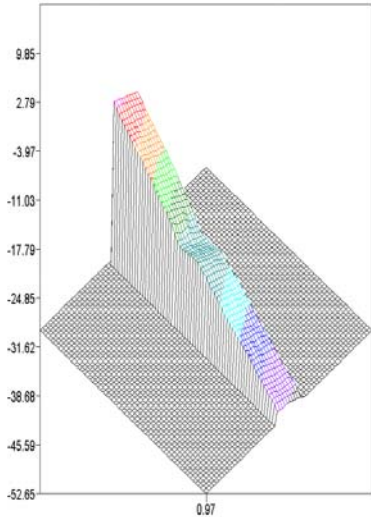
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			
120A			

Table. 4-15 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_12kN

	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			


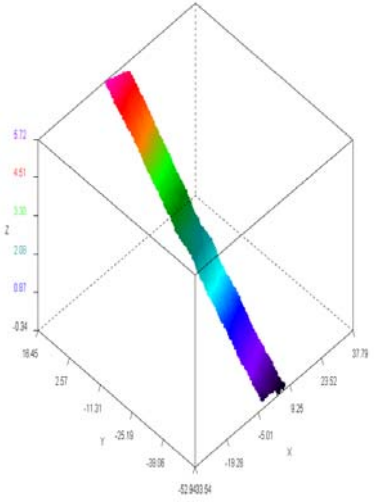
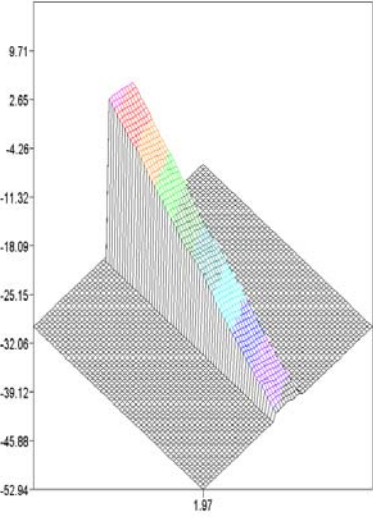

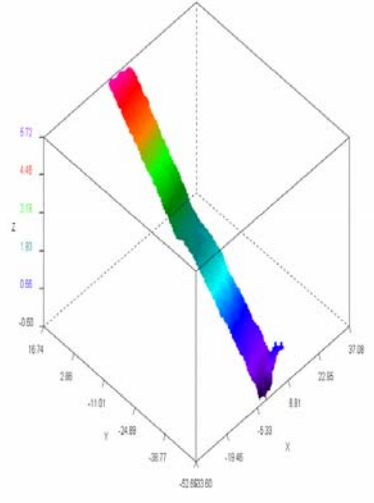
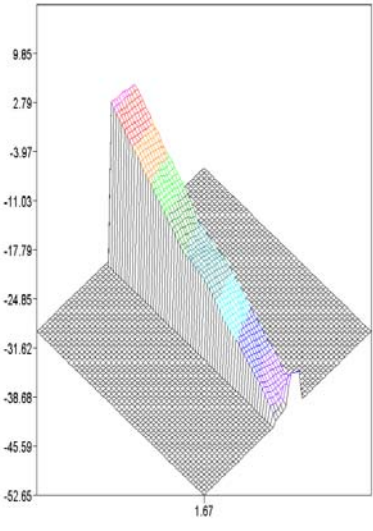

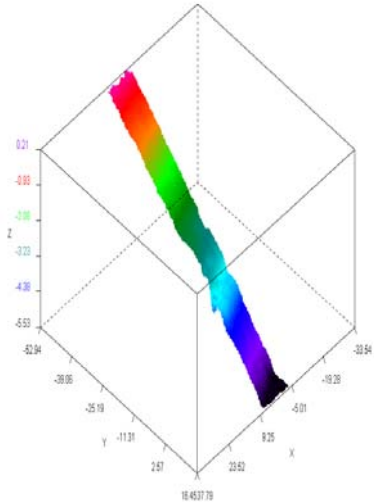
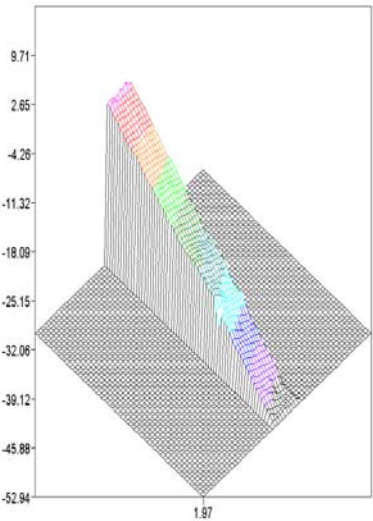

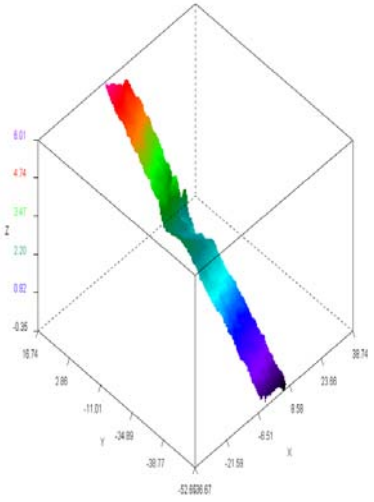
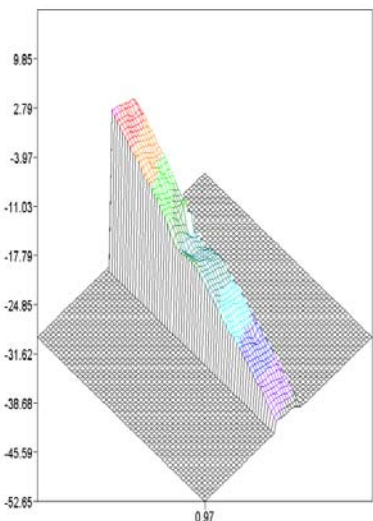

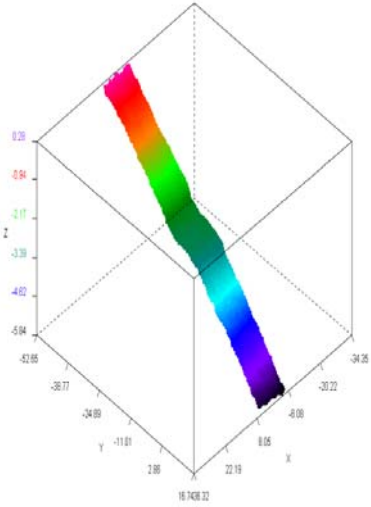
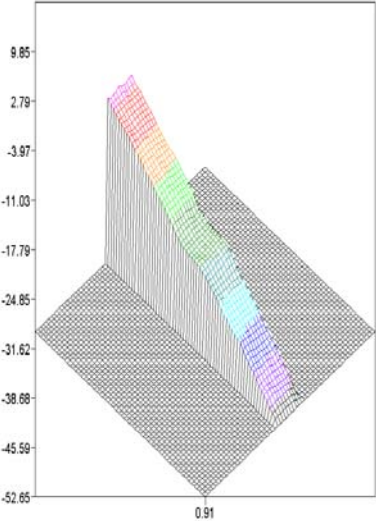

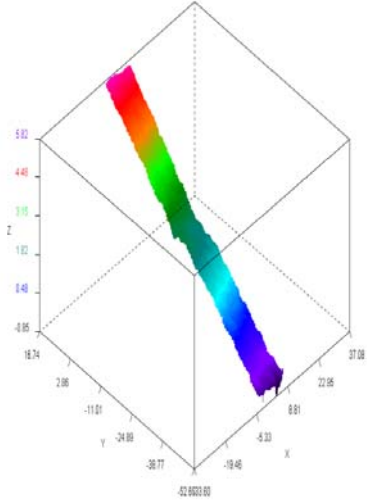
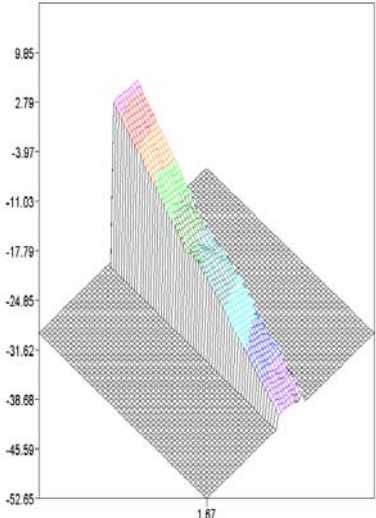
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			
120A			

Table. 4-16 ESPI phase map analysis results of structural steel welded specimen_15kN

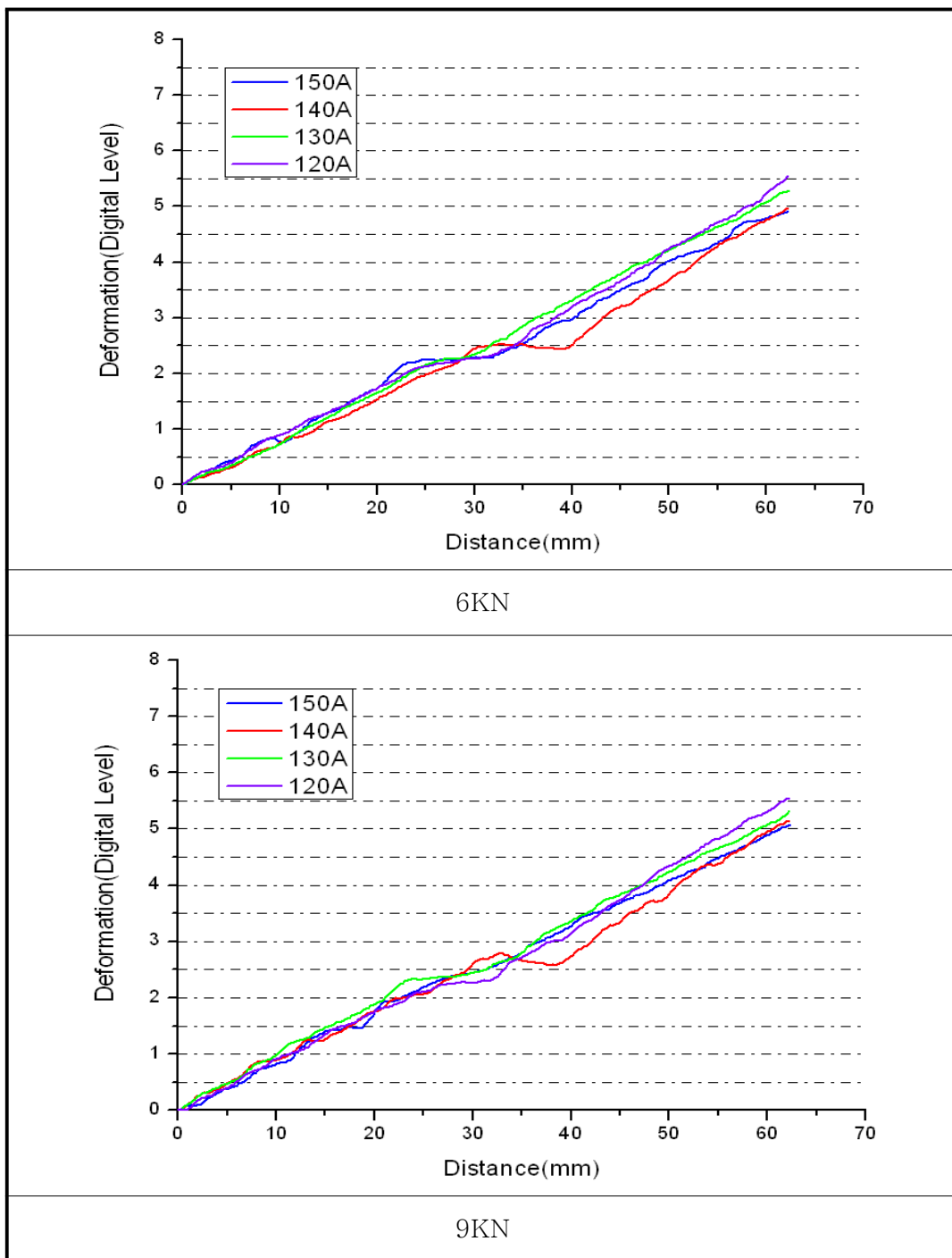
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
150A			
140A			

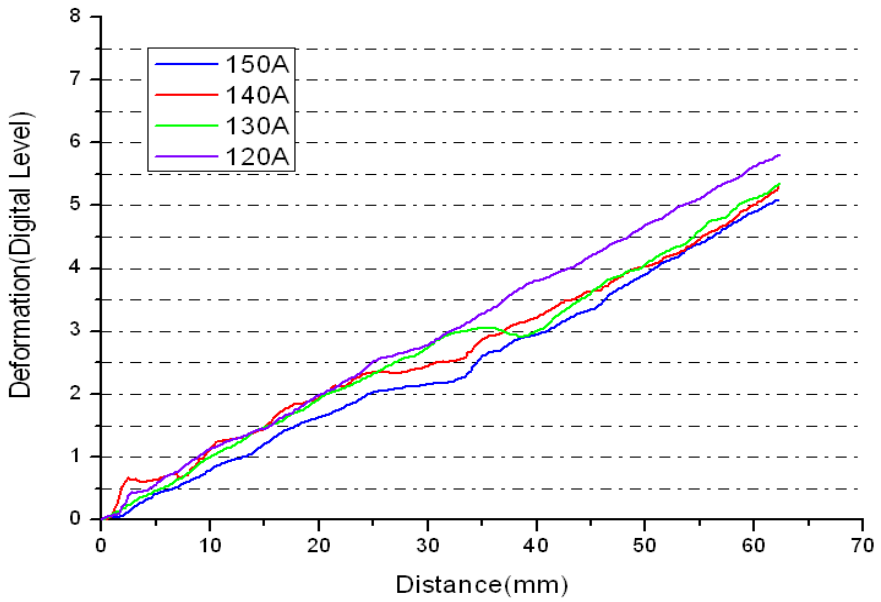
	Color Image	Profile of 3D	3D Plot
130A			
120A			

1-2. 구조용 강재 용접 시험편 잔류응력 분석 결과

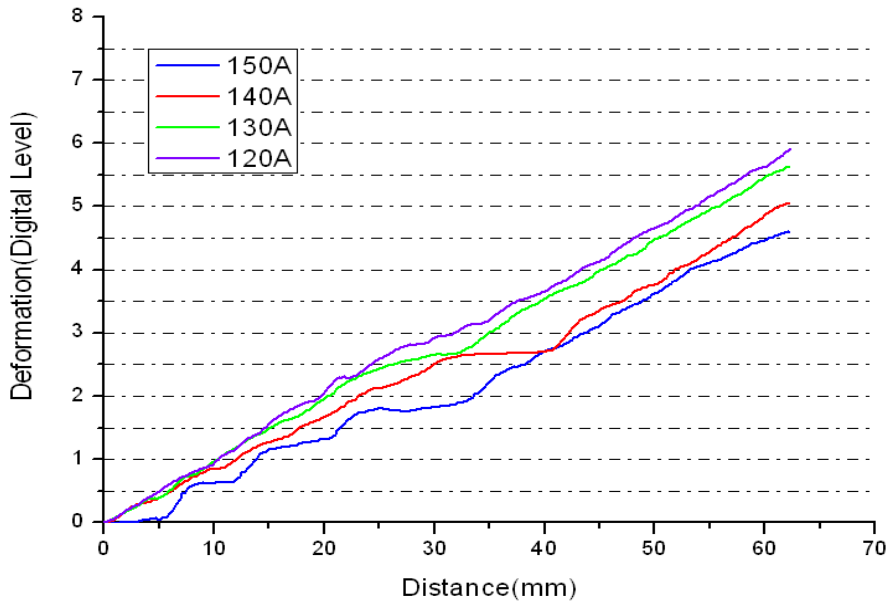
전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 각각의 용접 시험편 중심에 Profile line을 그어 모재부 및 용접부의 변형을 정량적으로 측정된 결과, 용접부의 변형 값이 모재부의 변형 값보다 작음을 알 수 있었고, 용접 속도가 크고 가해지는 인장하중이 클수록 변형 값이 더 크게 나옴을 확인할 수 있었다. Table. 4-17은 하중별로 구조용 강재 용접 시험편의 Profile line data의 Digital level 값을 얻어 용접 조건별로 각 시험편을 비교하여 나타내었다.

Table. 4-17 ESPI profile line data deformation comparison of structural steel welded specimen by forces





12KN



15KN

전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 통해 구해진 실제 변형 값을 이용하여 본 논문에서 제시한 식에 대입을 하여 변형을 계산하고 이로부터 탄성계수를 획득 할 수 있었고 이를 이용하여 각 시험편 별로 잔류응력 값을 구할 수 있었다. 이를 하중 값에 따라 Table. 4-18, Table. 4-19, Table. 4-20, Table. 4-21에 나타내었다.

Table. 4-18 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel welded specimen_6kN

	150A	140A	130A	120A
Cross sectional areas of base metal (m ²)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	8.00E+07	8.00E+07	8.00E+07	8.00E+07
Deformation of base metal (μm)	21.9897	22.3895	22.7894	23.1898
Strain of base metal	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09			
Cross sectional areas of mid-welded zone (m ²)	1.06E-04	9.58E-05	8.78E-05	7.88E-05
Stress of mid-welded zone (MPa)	5.69E+07	6.26E+07	6.83E+07	7.61E+07
Deformation of mid-welded zone (μm)	4.1308	4.2835	4.3867	4.5412
Strain of mid-welded zone	2.75E-04	3.06E-04	3.37E-04	3.78E-04
Young's modulus of welded zone (GPa)	206.52	204.70	202.52	201.20
Residual Stress (MPa)	23.1	17.4	11.7	3.86

Table. 4-19 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel welded specimen_9kN

	150A	140A	130A	120A
Cross sectional areas of base metal (m ²)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	1.20E+08	1.20E+08	1.20E+08	1.20E+08
Deformation of base metal (μm)	32.9851	33.5853	34.1854	34.7849
Strain of base metal	6.00E-04	6.00E-04	6.00E-04	6.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.19			
Cross sectional areas of mid-welded zone (m ²)	1.06E-04	9.58E-05	8.78E-05	7.88E-05
Stress of mid-welded zone (MPa)	8.53E+07	9.39E+07	1.03E+08	1.14E+08
Deformation of mid-welded zone (μm)	6.1962	6.4251	6.5799	6.8118
Strain of mid-welded zone	4.13E-04	4.59E-04	5.06E-04	5.68E-04
Young's modulus of welded zone (GPa)	206.52	204.70	202.52	201.20
Residual Stress (MPa)	34.7	26.1	17.5	5.79

Table. 4–20 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel welded specimen_12kN

	150A	140A	130A	120A
Cross sectional areas of base metal (m2)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	1.60E+08	1.60E+08	1.60E+08	1.60E+08
Deformation of base metal (μm)	43.9804	44.7808	45.5801	46.3799
Strain of base metal	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09			
Cross sectional areas of mid-welded zone (m2)	1.06E-04	9.58E-05	8.78E-05	7.88E-05
Stress of mid-welded zone (MPa)	1.14E+08	1.25E+08	1.37E+08	1.52E+08
Deformation of mid-welded zone (μm)	8.2614	8.5669	8.7735	9.0827
Strain of mid-welded zone	5.51E-04	6.12E-04	6.75E-04	7.57E-04
Young's modulus of welded zone (GPa)	206.52	204.70	202.52	201.20
Residual Stress (MPa)	46.3	34.7	23.3	7.72

Table. 4-21 Calculated young's modulus which was generated
by structural steel welded specimen_15kN

	150A	140A	130A	120A
Cross sectional areas of base metal (m2)	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
Stress of base metal (MPa)	2.00E+08	2.00E+08	2.00E+08	2.00E+08
Deformation of base metal (μm)	54.9751	55.9739	56.9737	57.9732
Strain of base metal	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Young's modulus of base metal (GPa)	200.09			
Cross sectional areas of mid-welded zone (m2)	1.06E-04	9.58E-05	8.78E-05	7.88E-05
Stress of mid-welded zone (MPa)	1.42E+08	1.57E+08	1.71E+08	1.90E+08
Deformation of mid-welded zone (μm)	10.3268	10.7085	10.9667	11.3531
Strain of mid-welded zone	6.88E-04	7.65E-04	8.44E-04	9.46E-04
Young's modulus of welded zone (GPa)	206.52	204.70	202.52	201.20
Residual Stress (MPa)	57.8	43.4	29.2	9.64

이 결과로부터 시험편에 가해지는 하중이 커짐에 따라 변형 값이 커지고 용접 전류가 낮을수록 변형 값이 커짐을 실험을 통해 알 수 있었고, 용접부의 탄성계수 값이 모재부의 탄성계수 값보다 약간 더 높게 측정 되었다. Table. 4-22에 나열된 탄성계수 값을 봤을 때 모재부의 탄성계수 값은 항상 일정한 값이 나왔고, 용접부의 탄성계수는 용접 전류가 높을수록 높은 값이 나왔다. 이를 통해 본 논문에서 제시한 식을 이용하여 용접부의 잔류응력을 측정할 수 있었으며, 측정된 잔류응력 값은 Table. 4-23과 같다. 잔류응력이란 모재부의 응력에서 용접부의 응력을 뺀 때 구해지는 값으로서도 응력을 제거한 상태에서도 남아있는 응력을 말한다. 각각의 하중 값과 시험편의 용접전류 값에 따라서 잔류응력 값이 각각 구해지고, 시험편에 가해지는 하중 값이 크고 용접 전류가 클수록 높은 값의 잔류응력 값이 구해지는 것을 알 수 있었다.

Table. 4–22 Young's modulus of base metal and welded zone results comparison of structural steel welded specimen by forces

		150A	140A	130A	120A
Young's modulus of base metal (GPa)	6KN	200.09			
	9KN				
	12KN				
	15KN				
Young's modulus of welded zone (GPa)	6KN	206.52	204.70	202.52	201.20
	9KN				
	12KN				
	15KN				

Table. 4–23 Residual stress of welded zone of structural steel welded specimen by forces

		150A	140A	130A	120A
Residual Stress (MPa)	6KN	23.1	17.4	11.7	3.86
	9KN	34.7	26.1	17.5	5.79
	12KN	46.3	34.7	23.3	7.72
	15KN	57.8	43.4	29.2	9.64

제 5 장 결 론

본 논문에서는 비접촉, 비파괴적이며 친환경 측정 기술인 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 전자처리 레이저 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하여 구조용 강재 용접시험편의 용접 조건 및 시험편에 가해지는 하중에 따라 변형 및 변형률을 계측함으로써 용접부의 잔류응력을 측정하였고 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조용 강재 용접시험편에 각각 다른 인장 하중을 가할 경우 이를 전자처리 레이저 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하여 관찰함으로써 시험편의 모재부와 용접부에서 변형 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 용접조건 및 시험편에 가해지는 하중에 따라 시험편에 나타나는 변형분포가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 용접 전류의 세기가 낮고 시험편에 가해지는 인장 하중이 커질수록 변형이 크게 발생함을 알 수 있었다.

2) 용접 시험편의 모재부 부분을 따로 MTS system과 전자처리 레이저 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 통해 측정한 변형 데이터를 본 논문의 잔류응력 계산식에 대입한 결과 모재부의 탄성계수를 측정할 수 있었고, 용접 전류 값에 따라 각 시험편 별로 변형이 크게 차이가 없음을 확인함으로써 실제로 용접을 하였어도 용접이 안 된 모재부 부분은 용접에 영향을 거의 안 받는다는 것을 확인 할 수 있었고, 실험을 통해 얻어진 탄성계수 값과 실제 ASTM A131 Steel. Grade AH32 시험편의 탄성계수 값이 거의 비슷하게 얻어지는 것(1% 이하)을 알 수 있었다.

3) 하중의 변화에 따라 용접 전류 세기가 낮을수록 용접시험편의 변형은 가장 크게 측정되었으며, 각 시험편의 모재부와 용접부의 변형을 비교하였을 때, 모재부의 변형 값이 용접부의 변형 값에 비해서 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이를 통해 시험편에 가해지는 용접 전류가 높을수록 탄성계수 값이 커짐을 실험을 통해 알 수 있었고, 용접부의 탄성계수 값이 모재부의 탄성계수 값보다 약간 더 높게 측정 되었다. 본 논문에서 제안하는 잔류응력 측정식에 대입을 한 결과 시험편에 가

해지는 하중 값이 크고 용접시 용접 전류가 높을수록 잔류응력이 가장 많이 남아 있음을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 측정 및 건전성 평가 기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 원자력, 선박, 자동차 등 용접구조물의 신뢰성, 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있고 녹색 산업의 신성장동력 기술로서 수명 평가에 의한 에너지 절약 효과와 재료절감 효과의 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. Lancaster, J. F., "Metallurgy of welding," 3rd Ed., 1-5, 1980.
3. 권혁준, 임진환, "일반 용접 공학", 선학출판사, 2006
4. 국정환, 김덕중, 연운모, "용접재료", 학선학출판사, 2006
5. 이운경 역, "용접-접합공학 편람", 일본용접학회편, 도서출판, 과학기술, pp. 30-33, 1996.
6. 김재웅, 양여우 저, "용접 잔류응력과 변형", 대한용접·접학회, pp 5-8, 2011.
7. A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments review of contemporary measurement techniques", The welding institute, Abington, Cambridge, England, 1977.
8. Katsuzi Takeuchi, "경금속 용접", 輕金屬溶接, pp. 151-157, 2010.
9. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures-Residual stresses, distortion, and their consequences", Pergamon Press, Oxford, 1980.
10. 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.
11. P. S. Prevey, "X-ray diffraction residual stress techniques", Metal Handbook, 9th Edition, American Society for Metals, Vol. 10, pp. 380-392, 1986.
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. K. S. Kang, "Quantitative Evaluatin of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2005.
14. 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.
15. 박익근 저, “비파괴검사개론”, 한국비파괴검사학회, 노드미디어, pp. 17–18, 2011.
 16. 고진현, 국정환, 권호영, 박종건 저, “최신비파괴검사개론”, 원창출판사, 2001
 17. M. Kujawinska and W. Osten, "Fringe pattern analysis methods: up-to-date review," Proc. SPIE 3407, 56–66, 1998
 18. J. C. Dainty, “Laser speckle and related phenomena 2nd edition” , New York : Springer–Verlag, 1984.
 19. Ulf Schnars, Werner Jueptner, “Digital holography” , Springer, pp. 18–20, 2005.
 20. M. H. Horman, "An application of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333–336, 1965.
 21. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59–139, 2001.
 22. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
 - 23 K. Creath, "Phase–measurement interferometry techniques," Progress in Optics XXVI, pp. 349–393, 1988
 24. K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant, and K. G. Larkin, "Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase–shifting errors," J. Opt. Soc. Am. A 12, pp. 761–768, 1995
 25. K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant, and K. G. Larkin, "Phase shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts," J. Opt. Soc. Am. A 14, pp. 918–930, 1997
 26. 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.
 27. 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.
28. D. J. Bone, "Fourier fringe analysis: two-dimensional phase unwrapping problem", *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 3627–3632, 1991.
 29. R. Jones and C. Wykes: *Holographic and speckle interferometry*, 2nd cambridge university, 1989
 30. Kim. K. S, Kim. D. S, Jung. H. C, Kim. K. S, Jeon. S. Y, Hong. D. P, "Deformation and detection frequency according to nuclear power pipe thickness by ESPI and Infrared camera", *Proceedings of the Annual Spring Conference of the KSNT*, pp. 478–483, 2010
 31. Kim. K. S, Jung. H. C, Kang. K. S, Lee. J. K, Jang. S. S, Hong. J. K, "In-plane strains measurement by using the electronic speckle pattern interferometry", *KSNT International Journal*, Vol. 12, pp. 215–222, 1998.
 32. Kim. K. S, Chang. H. S, Lee. S. S, Jung. H. C, Kwag. J. H, "Quantitative Comparison of Out-of-Plane Deformation Measured by Dual-Function Interferometer System", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 28, No. 1, pp. 33–39, 2008.
 33. 김재웅, 양여우 저, "용접 잔류응력과 변형", *대한용접·접합학회*, pp. 65, 2011.
 34. 박종우, 이정일, "정밀 용접공학", *일진사*, pp. 303–305, 2010.

감사의 글

2011년 취업과 대학원이라는 새로운 길을 앞두고 고민하던 시기에 낯선 연구실에 들어와 정신 없이 지냈던 짧지 않은 2년이라는 대학원 생활을 하고 논문을 마무리하면서 감사의 글을 쓰려고 하니 그동안 겪었던 일들이 주마등같이 지나가고 지나온 세월이 가슴 벅차게 다가옵니다. 지금 생각해보면 힘든 일도 많았고 아쉬움도 많지만 너무나도 값진 추억으로 간직할 것 같고 인생을 살아가는 중요한 가르침도 얻었습니다. 제가 이렇게 성장하기까지 격려를 함으로써 힘이 되어 주고 바른 길로 나아갈 수 있도록 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 2년동안 열심히 대학원 생활을 할 수 있게 해주시고 연구에 매진할 수 있도록 세심한 지도와 격려로 대학원 생활을 알차게 보낼 수 있게 해주신 김경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사를 해주신 장완식 교수님, 김지훈 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 대학원생과 같이 생활하면서 바쁘신 와중에도 격려를 아끼지 않으시고 많은 가르침을 주신 정현철 박사님, 처음 대학원에 들어올 때 많은 조언과 진학을 결심하게 용기를 주신 장호섭 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 대학원에 처음 들어와 많은 이야기를 주고 받고 도움을 주신 김우진 선생님, 김세경 선생님, 선배로써 조언을 아끼지 않고 도와주었던 태호형, 동수형, 용찬이형, 찬식이형, 동률이형, 경원이, 그리고 하나뿐인 내 동기 찬근이형, 형 때문에 2년이라는 시간을 잘 보냈고 많은 경험을 하고 나간 것 같아서 좋습니다. 박사과정 가게 되더라도 잘해낼거라 믿고 준비 열심히 해서 좋은 결과 있기를 바랍니다. 그리고 남은 1년동안 실험실을 이끌고 갈 현호, 경욱이, 현일이 졸업하기 전까지 준비 잘해서 다들 좋은 결과 있었으면 좋겠습니다. 아직은 실험실에 들어온지 얼마 안 되었지만 앞으로 잘해나갈 것이라고 믿고 있는 상채형, 혜준이형, 주엽이형, 성훈이, 현준이, 나연이 그리고 졸업논문 쓰기까지 많은 도움을 주신 모든 분들께 감사드리는 바입니다.

마지막으로 2년 동안 바빠서 제대로 신경도 못 써 드렸는데 항상 믿어주시고 대학원 생활에 큰 힘이 되어주셨던 아버지, 어머니께 감사의 말씀을 드립니다. 형에게 항상 많은 자극제가 되었고 지금 열심히 잘 하고 있을 종인이, 정우 이 모든 분들이 있었기에 지금의 제가 있다고 생각하며 사회에 나가서도 꼭 필요한 인재가 될 것이고, 먼저 나가서 좋은 기반 닦도록 열심히 노력하겠습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재공학과	학 번	20127119	과 정	석사
성 명	한글: 선 상 우 한문: 宣 相 宇 영문: Seon, Sang-Woo				
주 소	전라남도 광양시 광양읍 대림오성로 11, 102동 305호				
연락처	E-mail : goodterius@naver.com				
논문제목	한글: 전자처리 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 용접 및 하중 조건에 따른 구조용 강재의 용접부 잔류응력 측정 영문: Measurement of residual stress on welded zones of structural steel according to welding and loading conditions Using ESPI				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2013 년 12 월 19 일

저작자: 선 상 우 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하