



## 저작자표시 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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2013년 2월  
석사학위논문

레이저 간섭계를 이용한  
배관 용접부의 잔류응력 평가

조선대학교대학원

첨단부품소재공학과

문 찬 식

레이저 간섭계를 이용한  
배관 용접부의 잔류응력 평가

Evaluation of residual stress on pipe welded joints  
using laser interferometry

2013년 2월 25일

조선대학교대학원

첨단부품소재공학과

문 찬 식

# 레이저 간섭계를 이용한 배관 용접부의 잔류응력 평가

지도교수 김 경 식

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2012년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

문 찬 식

문찬식의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김재열



위원 조선대학교 교수 양인영



위원 조선대학교 교수 김경석



2012년 11월 27일

조선대학교대학원

# 목 차

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| LIST OF TABLES .....                  | I  |
| LIST OF FIGURES .....                 | II |
| ABSTRACT .....                        | IV |
| <br>                                  |    |
| 제 1 장 서 론 .....                       | 1  |
| <br>                                  |    |
| 제 2 장 이론적 배경 .....                    | 4  |
| 제 1 절 스펙클과 간섭무늬 형성 .....              | 4  |
| 1-1. 스펙클 형성과 크기 .....                 | 4  |
| 1-2. 간섭무늬의 형성 .....                   | 8  |
| 제 2 절 정량해석을 위한 물체의 변형정보 추출 .....      | 11 |
| 2-1. Phase Shifting(위상이동) .....       | 12 |
| 2-2. Unwrapping(결필침) .....            | 14 |
| 제 3 절 광학간섭계(ESPI) .....               | 16 |
| 3-1. 면내 변위 측정 간섭계(In-plane) .....     | 16 |
| 3-2. 면외 변위 측정 간섭계(Out-of-plane) ..... | 19 |
| 제 4 절 잔류응력(Residual Stress) .....     | 20 |
| 4-1. 잔류응력의 정의 .....                   | 20 |
| 4-2. 용접부 잔류응력의 발생 .....               | 20 |
| 4-3. 잔류응력의 측정 방법 .....                | 26 |
| 4-4. ESPI를 이용한 잔류응력의 측정법 .....        | 30 |

|         |                               |    |
|---------|-------------------------------|----|
| 제 3 장   | 실험장치 및 구성                     | 32 |
| 제 1 절   | 잔류응력 측정시스템                    | 32 |
| 1-1.    | ESPI 시스템                      | 32 |
| 1-2.    | 용접시험편                         | 37 |
| 제 2 절   | 실험 방법                         | 42 |
| <br>    |                               |    |
| 제 4 장   | 실험결과 및 고찰                     | 43 |
| 제 1 절   | 평판 용접시험편의 인장하중에 의한<br>잔류응력 측정 | 43 |
| 1-1.    | 평판 용접시험편 잔류응력 측정 결과           | 43 |
| 1-2.    | 평판 용접시험편 잔류응력 분석 결과           | 46 |
| 제 2 절   | 배관 용접시험편의 인장하중에 의한<br>잔류응력 측정 | 51 |
| 2-1.    | 배관 용접시험편 잔류응력 측정 결과           | 51 |
| 2-2.    | 배관 용접시험편 잔류응력 분석 결과           | 55 |
| <br>    |                               |    |
| 제 5 장   | 결론                            | 62 |
| <br>    |                               |    |
| 참 고 문 헌 |                               | 63 |

# LIST OF TABLES

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Table 3-1 | Specification of fatigue testing machine .....  | 28 |
| Table 3-2 | Chemical composition(wt.%) of SS400 steel .....   | 29 |
| Table 3-3 | Mechanical properties of SS400 Stee .....   | 29 |
| Table 3-4 | Chemical composition(wt.%) of A106 Gr.B steel .....   | 29 |
| Table 3-5 | Mechanical properties of A106 Gr.B Steel .....  | 29 |
| Table 3-6 | Welded condition flat panel specimen .....  | 31 |
| Table 3-7 | Welded condition pipe specimen .....  | 33 |
| Table 4-1 | Phase map of flat panel welded specimen<br>_Speed control .....   | 35 |
| Table 4-2 | Phase map of flat panel welded specimen<br>_Current controls .....  | 35 |
| Table 4-3 | Phase map analysis results of flat panel welded specimen<br>_Speed Control .....                            | 36 |
| Table 4-4 | Phase map analysis results of flat panel welded<br>specimen_current Control .....                           | 37 |
| Table 4-5 | Residual stress measurement results of flat panel<br>welding specimen according to the load variation ..... | 40 |
| Table 4-6 | Phase map of pipe welded specimen .....   | 43 |
| Table 4-7 | Phase map analysis results of pipe welded specimen .....  | 44 |
| Table 4-8 | Deformation Comparison of pipe welded specimen<br>in a section .....  | 48 |
| Table 4-9 | Residual stress measurement result of pipe welded<br>specimen according to the load change .....            | 50 |



# LIST OF FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Fig. 2-1 Form of laser speckle .....   | 3  |
| Fig. 2-2 objective speckle .....   | 4  |
| Fig. 2-3 subjective speckle .....  | 4  |
| Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave .....  | 6  |
| Fig. 2-5 Four-step cross algorithm .....   | 11 |
| Fig. 2-6 In-Plane displacement sensitive interferometer .....  | 13 |
| Fig. 2-7 Out-Of-Plane displacement sensitive interferometer .....                                    | 15 |
| Fig. 2-8 Change of Yield point and Young's modulus .....   | 17 |
| Fig. 2-9 Expansion due to the heating .....  | 17 |
| Fig. 2-10 Residual stress of butt welds .....  | 18 |
| Fig. 2-11 Principles of the Hole Drilling Method .....   | 21 |
| Fig. 2-12 Hole drilling measurement device .....   | 22 |
| Fig. 2-13 Residual stress measurement principles using the<br>X-Ray Diffraction .....                | 22 |
| Fig. 2-14 Residual stress measurement equipment using the<br>X-Ray Diffraction .....                 | 23 |
| Fig. 2-15 Measurement formula welding residual stress .....  | 24 |
| Fig. 3-1 Welded specimen deformation difference .....  | 26 |
| Fig. 3-2 Device configuration of residual stress measurement .....                                   | 27 |
| Fig. 3-3 Device configuration of tensile tester .....  | 28 |
| Fig. 3-4 Design drawings of flat panel welded specimen .....   | 30 |
| Fig. 3-5 Produced flat panel welded specimen .....   | 30 |
| Fig. 3-6 Design drawings of pipe welded specimen .....   | 32 |
| Fig. 3-7 Produced pipe welded specimen .....   | 32 |
| Fig. 3-8 Device configuration for welding residual stress<br>measurement .....                       | 34 |
| Fig. 4-1 Deformation graph of flat panel welded specimen<br>according to the speed and current ..... | 38 |

Fig. 4-2 Deformation comparison of base metal and weld metal  
in flat panel welded specimen ..... 39

Fig. 4-3 Elastic modulus of base metal and weld metal in the  
flat panel welded specimen ..... 41

Fig. 4-4 Residual stress of flat panel welded specimen ..... 41

Fig. 4-5 MTS loading results ..... 42

Fig. 4-6 Deformation graph of pipe welding specimen ..... 46

Fig. 4-7 Deformation comparison of base metal and weld metal  
in pipe welded specimen ..... 47

Fig. 4-8 Elastic modulus of base metal and weld metal in the  
pipe welded specimen ..... 52

Fig. 4-9 Residual stress of pipe welded specimen ..... 52

# ABSTRACT

## Evaluation of residual stress on pipe welded joints using laser interferometry

Chan-Sik Mun

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 접합하고자 하는 2개 이상의 재료의 접합부를 가열, 용융시켜 서로 다른 재료의 원자 결합을 재배열하여 결합시키는 방법으로 현대산업의 다양한 용접법의 발달과 더불어 금속 및 비금속의 접합에 없어서는 안 되는 중요한 기술로 인식되고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 용접은 접합 강도가 높고 단기간 건조가 가능하며, 선박, 차량, 항공기, 건축, 각종 산업기계나 가전기기의 제조에 필수적인 가공 기술로 활용된다. 하지만 용접은 단기간에 고열을 수반하는 복잡한 금속접합이고, 부주의시 심한 재질열화, 변형, 잔류응력 등의 용접 결함을 일으켜 재료에 매우 큰 손상을 입히게 된다. 이중에 잔류응력은 용접 구조물의 결합 유발 및 파괴의 주원인 요소이다.

용접에 의해 접합부가 국부적으로 가열과 냉각 과정의 열사이클을 받으면 불균일한 열변형을 분포와 고온에서의 소성변형을 및 용접금속의 수축 등에 의해 응력이 발생하게 되며 실온까지 냉각한 후에도 이 응력은 잔류하게 된다. 이처럼 접합부가 완전히 냉각한 후에 잔류하는 응력을 용접 잔류응력이라고 한다. 즉 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력이 잔류응력이다<sup>2)</sup>. 이러한 잔류응력은 국부적인 가열에 의해 발생하여 취성과괴, 피로파괴 및 응력부식균열 발생을 야기 시키는데 큰 영향을 미친다. 용접 잔류응력은 모든 용접 이음부에서 필연적으로 발생하지만 이음부에 따라 발생하는 용접 잔류응력의 분포는 서로 다르다. 또한 같은 용접 이음부에서도 종방향과 횡방향의 잔류응력이 종단면 및 횡단면에 따라 서로 상이한 상태로 분포한다. 따라서 이러한 잔류응력을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다<sup>3)~5)</sup>.

용접 잔류응력은 열탄소성 해석을 통한 이론적 방법으로 추정 가능하나 용접부재의 형상이나 재질, 용접조건, 구속조건 등에서 편차가 심하기 때문에 정확한 추정이 매우 어렵다. 그러므로 직접적 측정을 통해 잔류응력을 구하는 방법이 사용되며 크게 파괴 시험과 비파괴 시험으로 구분된다. 파괴 시험은 측정하고자 하는 대상물에 스트레인 게이지를 부착하고 구조물의 일부를 절단하거나 스트레인 게이지 사이에 구멍을 뚫었을 때 발생하는 응력 이완에 의해 나타나는 변형률을 측정하여 응력의 크기를 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 구조물에 직접적인 손상을 입히

고 시간이 많이 소요되는 단점이 있지만 비교적 정확한 응력을 측정할 수 있기 때문에 용접 잔류응력 측정에 널리 사용되고 있다<sup>6)</sup>. 다음으로 비파괴 시험은 X선 회절기법(X-Ray Diffraction Method), 중성자 회절기법(Neutron Diffraction Method), 초음파 측정기법(Ultrasonic Method) 등이 있으며 X선 회절기법을 제외하고는 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질을 측정해야 하기 때문에 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들의 영향력을 배제시켜줄 필요성이 있다. 또한, X-선 회절기법은 표면 상태에 따라 영향을 많이 받는다는 가장 큰 단점이 있으며, 중성자 회절기법은 내부응력까지 측정 가능한 장점이 있으나 비용이 많이 들어가는 중성자 발생원이 필요하다. 초음파 측정기법은 측정 시간도 짧고 장비도 간편하며, 내보내는 파의 종류에 따라서 표면응력과 내부응력 모두를 측정할 수 있으나 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력분포에는 측정이 용이하지 않다<sup>7)</sup>. 그렇기 때문에 본 논문을 통해 레이저를 이용한 비파괴·비접촉 잔류응력 측정 기법을 제시하고자 한다.

비파괴 계측법은 검사 대상체의 물리·화학적 상태나 운전 조건을 변화, 파손시키지 않고 물리적 특성을 측정하는 기술로써 대형 구조물의 안전 진단에서부터 소형 제품의 신뢰성 평가 분야까지 산업 전반에 걸쳐 중요한 역할을 맡고 있다. 그중 레이저를 응용한 비파괴 측정법은 비접촉 측정으로 대상물의 형상에 관계없이 측정이 가능하고 장비의 이동이 편리하여 현장에서 알맞은 조건으로 측정이 가능하다. 이러한 레이저 응용 계측 기술에는 Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Shearography, Thermography, Holography 등의 광학기반 비파괴검사 기술이 있으며, 산업현장에서의 활용도 또한 점차 높아지고 있는 추세이다. 특히 ESPI는 초기 필름을 사용한 Speckle Correlation interferometry에서 컴퓨터 기술의 발전과 함께 CCD Camera를 통해 영상처리 기술을 융합하여 디지털 기술로 진화하여 현재 정밀한 수준의 대상물 측정 및 해석 기술로 산업현장에서 활용되고 있다<sup>8)~11)</sup>.

따라서 본 논문에서는 현장 적용성 및 정확도 면에서 뛰어난 기술을 자랑하는 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 전자 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 용접부의 잔류응력을 측정하기 위한 방법을 고안하고, 그 이론적 방법을 제시하여 실험을 통



해 검증하고자 한다. 이에 대한 기본 개념은 용접 시험편을 동일한 하중으로 인장, 압축 시켰을 경우 시험편에 변형이 발생할 것이고, 모재부 및 용접부에서의 변형률이 상이하게 발생할 것이라는 추측을 바탕으로 이를 ESPI를 이용하여 측정된 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 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대된다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 스페클과 간섭무늬 형성

#### 1-1. 스페클 형성과 크기

레이저 스페클(laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성(coherency)으로 인하여 나타나는 현상으로 물체의 표면에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되는데, 물체의 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 가지면 레이저의 간섭으로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 희고 검은 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클패턴(speckle pattern)이라 하며 Fig. 2-1은 레이저 스페클의 형태이다<sup>12)</sup>. 물체 표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위와 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 광강도(intensity) 분포로 기록된다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어지는데, Fig. 2-2는 objective speckle의 형성을 보여주고 있으며 Fig. 2-3은 subjective speckle의 형성을 보여주고 있다. 결상렌즈에 의해 두 스페클의 차이가 구별되며, 그 크기 또한 다르게 형성된다. 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있으며, 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다<sup>13)</sup>.

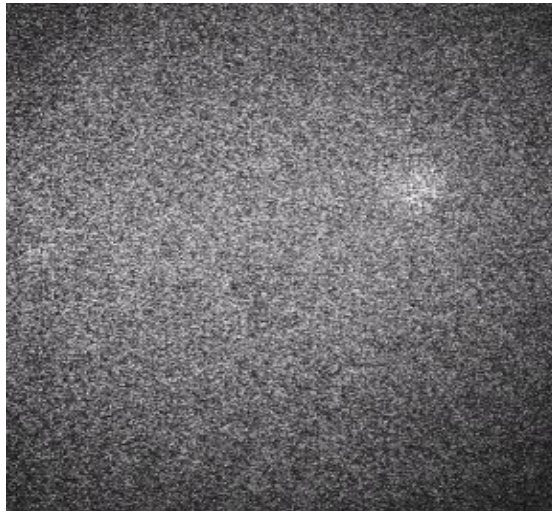


Fig. 2-1 Form of laser speckle

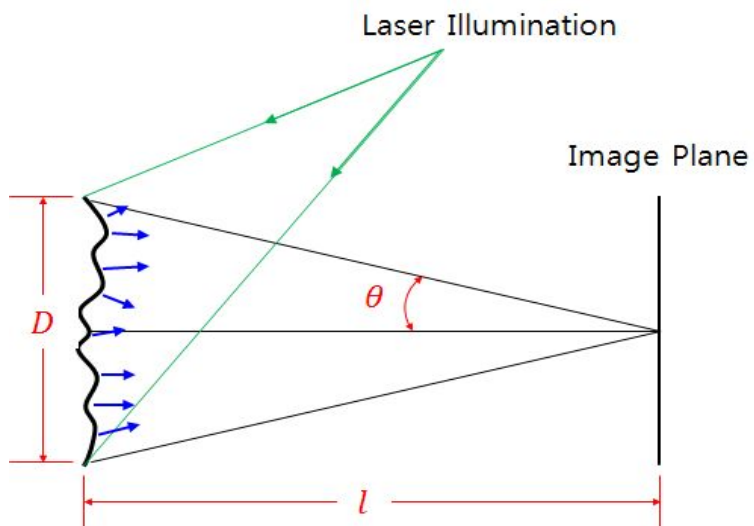


Fig. 2-2 objective speckle

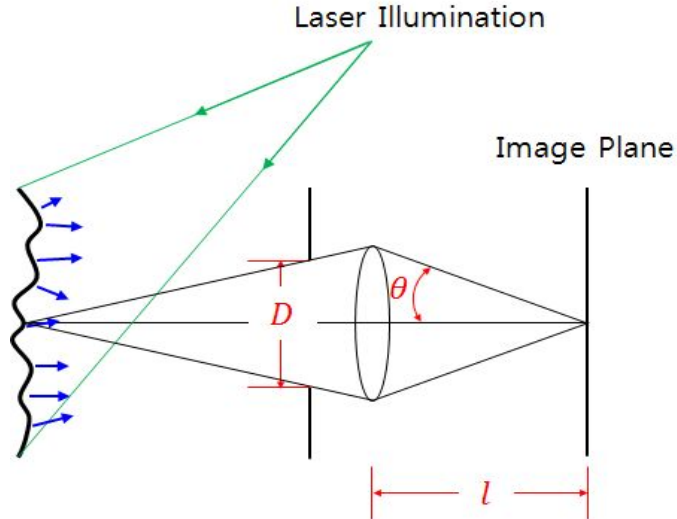


Fig. 2-3 subjective speckle

objective speckle 크기의 정의는 물체표면의  $D$ 의 면적에 레이저광이 조사되고 면적  $D$  위의 모든 점은 AB plane(viewing plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식 (2-1)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다<sup>14)</sup>.

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

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

스페클 상관 간섭법(Speckle Correlation Interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존하게 된다. subjective speckle은 결상렌즈를 사용하여 형성 되는 스페클이며, 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 구분된다. 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로써 물체의 한 점과 결상면의 한 점은 1:1 대응이라 할 수 있다. 따라서 수차가 없는 렌즈에서 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나

실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못하므로 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절 크기만큼 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 subjective speckle의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 primary maximum와 first minimum사이의 거리라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 식(2-2)와 같이 정의된다.

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

여기에서  $M$ : 렌즈 확대배율,  $\lambda$ : 조사된 레이저의 파장,  $F$ : 렌즈의 f-number 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 zoom 렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6배를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 크기는 37.07 $\mu$ m가 된다<sup>15)</sup>. 또한 subjective speckle의 물체표면에서 크기는 식(2-3)으로 정의된다.

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

위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위 측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다<sup>16)17)</sup>. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

## 1-2 간섭무늬의 형성

스페클 간섭무늬(Speckle Fringe Pattern)는 물체의 변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상점의 연결로 이루어진 것이며, 간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형 전의 스페클 패턴을 기준으로 물체변형에 따른 스페클 패턴의 변화를 연속으로 감산처리 하여 실시간으로 관찰할 수 있다. 스페클 간섭무늬의 형성을 위한 간섭계는 민감도를 높이기 위해 참조광(Reference Beam)을 사용하는데, 참조광의 종류에 따라 스페클 패턴과 uniform field의 합성, 두 스페클패턴의 합성으로 나눌 수 있다. ESPI에서는 스페클 패턴과 uniform field의 합성에 면의 변위 측정 간섭계를 주로 사용하고, 두 스페클 패턴의 합성에 면내변위 측정 간섭계를 주로 사용한다. 일반적으로 물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광(Object Beam), 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광(Reference beam)이라 한다. Fig. 2-4는 두 개의 광파의 합성을 나타낸 그림으로 여기에서 참조광( $E_R$ )은 물체광( $E_O$ )에 의해 형성된 스페클을 z-축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 물체광과 참조광의 파동방정식은 식 (2-4)와 같이 쓸 수 있다.

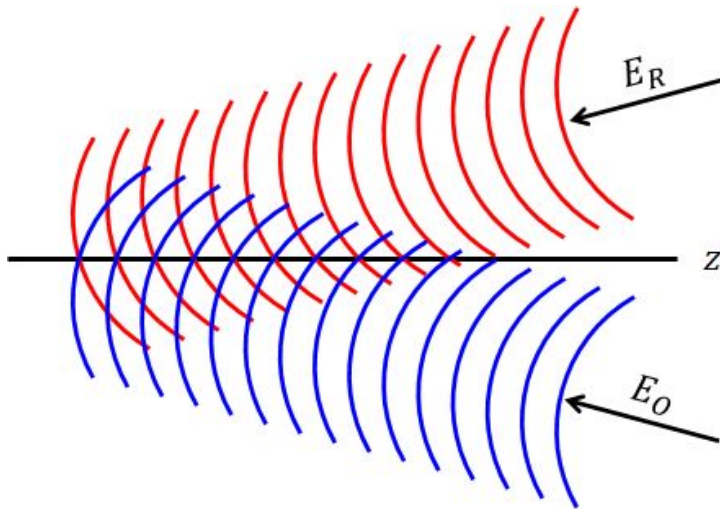


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

$$E_O = A_O \cos(\delta_O - \omega t) \quad (2-4)$$

$$E_R = A_R \cos(\delta_R - \omega t)$$

여기서  $E_O$  : 물체광,  $A_O$  : 물체광의 진폭,  $\delta_O$  : 물체광의 초기위상,  $E_R$  : 참조광,  $A_R$  : 참조광의 진폭,  $\delta_R$  : 참조광의 초기위상,  $\omega$  : 전파속도,  $t$  : 시간이다. 참조광과 물체광은 간섭계에 의해 같은 공간상에서 선형적인 중첩할 수 있으며, 이때 발생한 합성광  $E$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = E_R + E_O \quad (2-5)$$

합성광을 CCD 카메라에서는 광강도로 나타내게 되며, CCD 카메라 하나의 화소에 기록되는 광강도는 식 (2-6)과 같이 표현이 된다.

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

여기서  $I$  : 합성광의 광강도,  $I_R$  : 참조광의 광강도,  $I_O$  : 물체광의 광강도  $\phi$  : 물체광과 참조광의 위상차이다. 실제적으로 획득되는 광강도는 화소의 크기에 대한 평균값으로 스페클의 크기가 화소의 크기보다 작다면 하나의 화소에 포함된 스페클들의 평균 광강도가 기록되어 진다. ESPI에서는 물체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전후의 스페클 상태의 감산처리를 통하여 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD 카메라에 기록되어진 스페클패턴을 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \quad (2-7)$$

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

여기서  $I_{before}$  : 물체변형전의 광강도,  $I_{after}$  : 물체변형후의 광강도,  $\Delta\phi$  : 물체변

형에 따른 위상변화이다<sup>18)19)</sup>. 변형전후의 두 개의 스페클패턴의 감산처리는 화상 처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-9)와 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_{sub} &= I_{before} - I_{after} \\
 &= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\Phi + \frac{1}{2}\Delta\Phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\Phi\right)
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

여기서  $I_{sub}$  : 물체변형전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도이다. 실제로 모니터에서 관찰되는 광강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_O I_R} \sin\left(\Phi + \frac{1}{2}\Delta\Phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\Phi\right) \right|
 \tag{2-10}$$

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



## 제 2 절 정량 해석을 위한 물체의 변형정보 추출

앞서 제시한 식 (2-9)은 4개의 미지수가 존재하므로 물체의 변형에 따른 위상 변화를 직접 추출할 수 없게 된다. 물체의 변형위상을 추출하는 방법에는 다음 세 가지 방법이 있다. 하나는 등간격의 프린지 패턴에 대해 화상처리를 이용하여 프린지 패턴으로부터 line를 추출하고 이 사이를 보간함으로서 물체의 변형을 추출하는 방법, 상관간섭무늬 분포에 대한 2D 감산-합산 처리에 의한 방법(2D subtraction-addition method), 공간 위상이동 기법(spatial phase shifting method)을 이용한 위상의 추출 등의 방법으로 위상을 추출하게 된다<sup>20)~22)</sup>. 이러한 방법 중에서 K. Creath<sup>21)</sup>에 의해 제안된 시간의존성 위상이동기법(temporal phase shifting method)은 가장 적용이 용이하고 효과적인 방법으로 이 위상이동 기법은 식(2-7)에서 제시한 3개의 미지수( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\phi$ )를 구하기 위해 Piezo-electro transducer(PZT)를 참조광의 광경로에 삽입하고 위상변조 하여 3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구하는 방법이다. 위상이동기법을 적용하여 변형 전과 후의 위상을 구함으로서 물체의 변형위상을 직접 추출할 수가 있다.

## 2-1. Phase Shifting (위상이동)

PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 방법이다<sup>23)</sup>. 위상이동 기법은 위상이동자(PZT)에 의하여  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상을 이동하여 다음 식과 같이 4개의 방정식으로 표현되는 스페클패턴을 기록하게 된다. 본 논문에서는 위상이동 기법의 4-Step으로 대상물의 변형측정이 가능하고 Phase calibration 오차를 최소화하기 위하여  $\pi/2$  위상이동을 사용하였다. 전체 표면에서의 한 점에서 기록된 강도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + \alpha_i]] \quad (2-11)$$

위 식에서,  $I$  : 선명도,  $\phi$  : 위상,  $\alpha_i$  : 위상 이동 값을 의미한다. 4-Step technique은 연속적인 위상 이동에 의한 서로 다른 위치에서의 위상 값을 얻기 위하여 사용된다. 스페클 간섭계에 있어서 변위 정보를 갖는 스페클 화상은 CCD Camera에 의해 입력되고, 초기의 변형 전 화상을  $\pi/2$ 씩 3번 위상이동을 하고 저장한다. 물체에 변위가 발생하면 새롭게 얻어진 화상을 다시  $\pi/2$ 씩 3번 위상이동 시킨 후에 저장하여 저장된 이미지를 이용하여 변형 전, 후의 각각의 위상정보를 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( $\phi$ )를 구하는 방법이다. 위 식에 의거하여 획득한 위상이미지를 아래의 식을 이용하여 위상 값을 계산하고 변형 전, 후의 이미지를 감산처리를 통하여 4-Step 위상지도를 얻을 수 있다<sup>24)</sup>.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 [1 + \gamma \cos[\phi]] \\
 I_2 &= I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + 90^\circ]] \\
 I_3 &= I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + 180^\circ]] \\
 I_4 &= I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + 270^\circ]]
 \end{aligned}
 \tag{2-12}$$

$$\begin{aligned}
 I_4 - I_2 &= 2I_0 \sin\phi \\
 I_1 - I_3 &= 2I_0 \cos\phi
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]
 \tag{2-14}$$

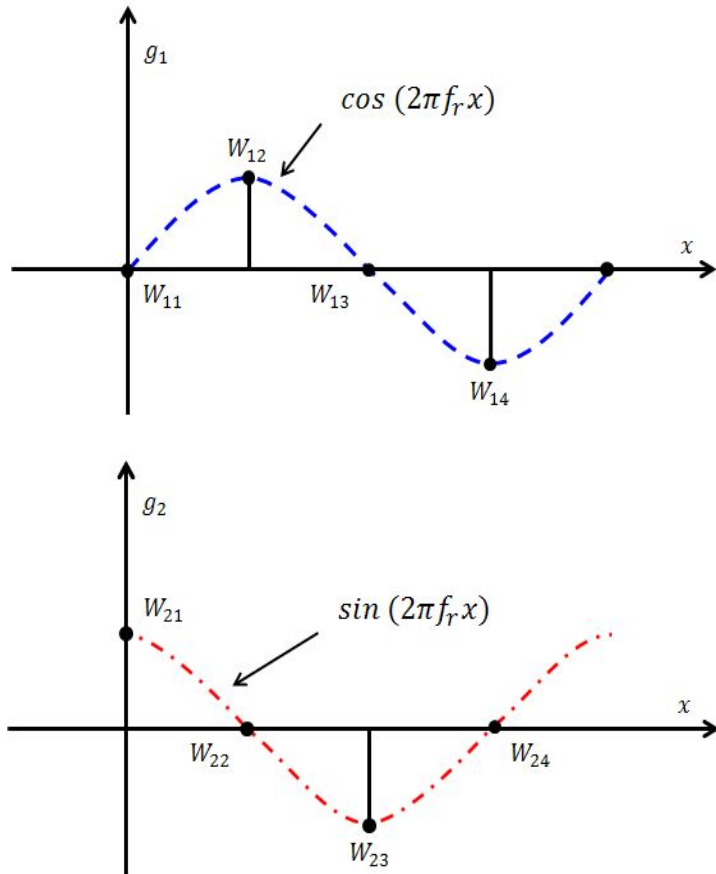


Fig. 2-5 Four-step cross algorithm

## 2-2. Unwrapping (결필침)

위상지도의 분리된 위상정보를 변형기울기로 표현하고 이를 정량해석 하기 위해 Unwrapping Method가 필요하다. 대상물의 형태가 복잡하고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡의 발생이 심하기 때문에 해석에 있어 상당한 어려움이 있다. 하지만 이러한 이미지를 Unwrapping 하여 보다 나은 해석 결과를 얻어낼 수 있다. 결필침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 식(2-12)의 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 결필침은 식 (2-14)을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2-15)$$

여기에  $\phi_{unw}$  : unwrapped phase,  $\phi_w$  : 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 논문에서 Unwrapping method로 least Square Method를 사용하였다. Least Square Method(최소자승법)란 오차의 제곱을 물체의 전 영역에 걸쳐 합한 값이 최소가 되도록 하는 방법으로써, 수학적으로 이 합을 나타내는 함수의 최소점을 찾는 방법이다. 보다 구체적으로는 오차값과 이 오차의 변화율을 곱하여 문제 영역 전체에 대해 합한 값이 0이 되는 해를 구하는 방법이다.

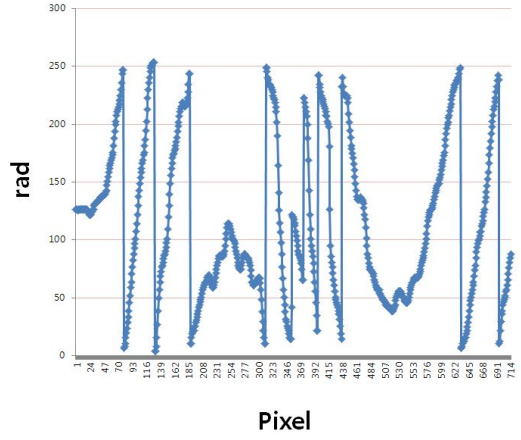
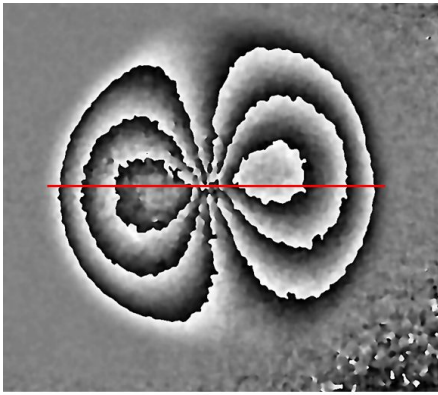


Fig. 2-6 Unwrapping Before

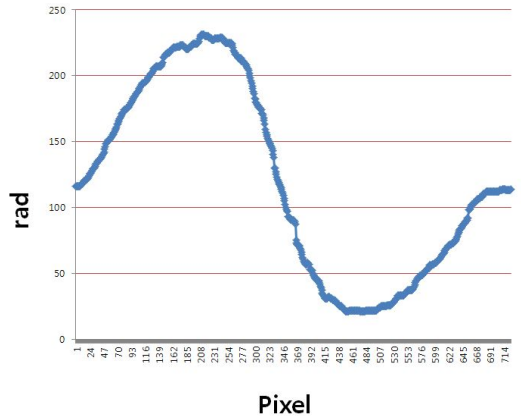
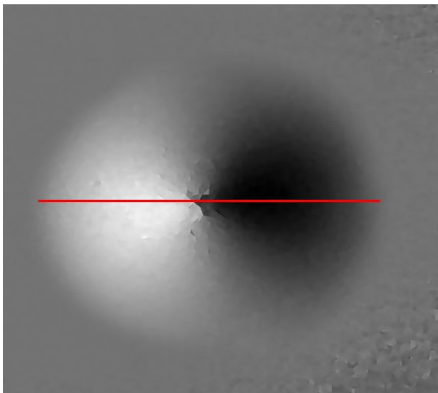


Fig. 2-7 Unwrapping After

## 제 3 절 광학 간섭계 (ESPI)

### 1-1. 면내 변위 측정 간섭계 (In-Plane)

광분할기(Beam Splitter)에 의해 두 개로 분리된 광(물체광과 참조광)은 대상물에 같은 각도로 조사되어 거칠기가 큰 대상물 표면에 난반사되면서 스펙클 패턴을 형성하게 되고 이러한 스펙클이 중첩되어 CCD Camera의 렌즈를 거쳐 상면에 결상된다. 대상물 표면의 거칠기, 변위, 변형 정보를 포함하는 스펙클 패턴은 대상물의 변형에 대한 스펙클 패턴과 비교함으로써 면내 변위에 대한 정보만을 레이저의 파장 단위로 얻어낼 수 있다. Fig. 2-8은 면내 변위 측정 간섭계의 구성도이다.

본 논문에서 ESPI를 이용한 면내 변위 측정법은 레이저 광의 조사 방향을 조정하여 측정하는 방법으로써, Leendertz에 의해 제안된 방법이다. ESPI를 이용한 면내 변위 측정 간섭계는 참조광을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광을 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 다음과 같다.

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

여기서  $\gamma$ 는 P점에 조사되는 두 광의 위상차이고,  $I_1$ ,  $I_2$ 는 두 입사광의 복사조도이다.

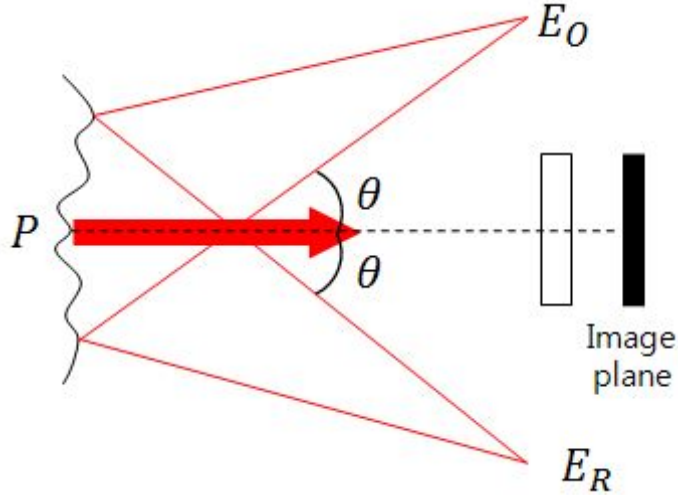


Fig. 2-8 In-Plane displacement sensitive interferometer

P점이  $\vec{d}(d_x, d_y, d_z)$  만큼 움직였을 때, 복사조도는 식(2-17)과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\gamma + \Delta\phi) \quad (2-17)$$

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( $\delta_1$ )는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)] \end{aligned} \quad (2-18)$$

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( $\delta_2$ )를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\delta_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_2) \cdot \vec{d} \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin\theta i - \cos\theta k)] \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin\theta + d_z (1 + \cos\theta)]
\end{aligned} \tag{2-19}$$

이때  $\vec{k}_2$ 는 입사광 2의 진행벡터이다.  $\Delta\phi$ 는 식(2-18), 식(2-19)의 차이이므로 두 식을 빼주면, 식(2-20)이 된다. 따라서 만약 어두운 줄무늬(dark fringe)가 나타나게 되면  $2n\pi$ 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 면내변위  $d_x$ 는 식(2-21)과 같이 된다.

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)d_x \sin\theta \tag{2-20}$$

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \tag{2-21}$$



## 1-2. 면외 변위 측정 간섭계(Out-Of-Plane)

Fig. 2-9는 면외 변위 측정 간섭계로서 레이저 광이 물체로 직접 조사되어 subjective speckle을 형성하는 물체광(objective beam)과 CCD 카메라에 Uniform field 형태로 직접 조사되는 참조광(reference beam)으로 나눌 수 있다.

물체 변형 전에 objective speckle pattern은 참조광과 간섭하여 제 2의 스페클 패턴인 변형 전 스페클 패턴을 형성하고, 물체가 변형 후에 objective speckle은 참조광과 간섭하여 변형 후의 스페클 패턴을 형성하게 된다. 스페클 상관 간섭무늬는 변형 전과 후의 스페클 패턴의 감산처리로부터 형성 되고, 위상이동 기법을 적용하여 변형 전, 후의 위상을 추출하여 물체의 변형을 측정할 수 있다. 면외 변위 정량해석은 물체광의 광로추적으로부터 식(2-21)으로 구할 수 있다.

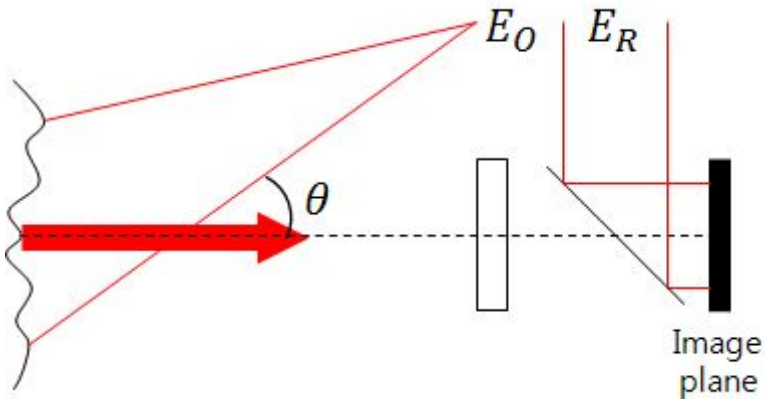


Fig. 2-9 Out-Of-Plane displacement sensitive interferometer

## 제 4절 잔류응력(Residual Stress)

### 1-1. 잔류응력의 정의

용접은 두 가지 이상의 재료에 국부적으로 집중적인 열을 가하여 금속을 용융시킨 후 냉각에 의해 응고되어 접합되는 공정으로 용접되는 구조 부재는 국부적으로 급속한 열팽창 및 수축 작용이 발생한다. 그러나 열이 국부적으로 가해짐으로 인해 열원에서 떨어져 있는 부위나 자유로운 열팽창 및 수축을 방해하는 부재에 의해 열팽창 및 수축이 구속되어 용접 종료 후에는 부재에 응력이 잔류하게 되고 동시에 수축을 동반한 변형을 일으키게 된다. 이와 같이 용접 후에 재료 내부에 발생한 응력이 그대로 남아 있는 응력을 잔류응력(Residual stress)이라고 한다<sup>9)</sup>.

### 1-2. 용접부 잔류응력의 발생

#### (1) 잔류응력의 발생

금속은 가열하면 팽창하게 되며 냉각하면 수축하게 된다. 물체 전체가 균일하게 가열 또는 냉각하면 팽창과 수축도 일정하게 일어나겠지만 실제 용접 시에는 극히 일부만 급열되고 급랭되는 경우가 보통이므로 각 부분의 팽창과 수축은 가열이 없었던 부분에 의해 억제가 생기게 된다. 그 결과 판의 외부는 매우 복잡한 수축 변형이 생기고 내부에는 응력(잔류응력)이 발생하게 된다<sup>26)</sup>.

#### (2) 잔류응력의 발생 기구

금속 재료는 가열하면 팽창하며 길이  $l$ 의 물체가 온도면화  $\Delta T$ 에 의해 늘어나는 길이  $\Delta l$ 은 식 (2-20)과 같다.

$$\Delta l = l\alpha\Delta T = l\alpha(T_2 - T_1) \quad (2-20)$$

연강의 고온에서의 항복점(yielding point)과 영률(Young's modulus)은 Fig. 2-10과 같이 온도가 높아짐에 따라 저하하며, 700°C에 이르면 항복점은 0이 되는 것을 나타내고 있다. 그러나 상온 부근에서는 약 120~150°C의 온도 변화에서 압축 응력이

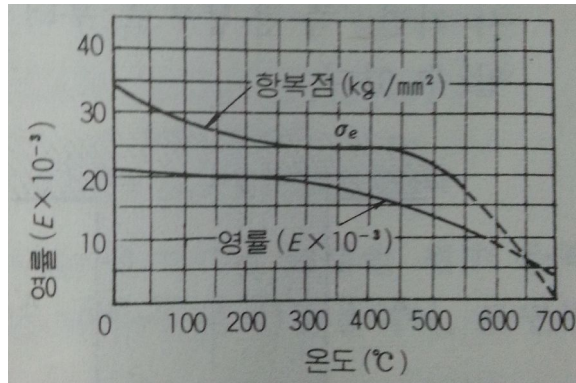


Fig. 2-10 Change of Yield point and Young's modulus

항복점에 도달하며, 그이상의 온도차에서는 압축의 소성변형으로 인하여 연강이 부풀어 오른다. Fig. 2-10에서 볼 수 있듯이 온도가 500°C에 이르게 되면 약간의 압축응력에 의해서도 항복이 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 2-11의 (a)와 같이 양끝이 자유로운 상태에서 재료를 가열하였을 때 팽창하며 냉각하였을 때는 수축하게 되지만 내부 응력은 발생하지 않는다. 하지만 Fig. 2-11의 (b)와 같이 양 끝을 고정 시켜 구속시켜 재료를 가열하면 팽창으로 인한 변형이 양 끝으로부터 구속되어 있으므로 재료 내부에는 압축에 대한 열응력이 발생하여 잔류응력으로 남게 된다. 이러한 잔류응력은 이음의 형상, 용접 입열, 용접 재료의 두께, 모재의 크기, 용착 및 용접 순서, 외적 구속 등의 요인에 크게 영향을 받는다. 특히 두꺼운 판재에서는 모재의 영향이 거의 허용되지 않기 때문에 잔류응력이 커져 균일이 발생할 우려가 있으며 얇은 판재에서는 변형이 일어나기 쉽기 때문에 잔류응력이 적게 발생하게 된다<sup>27)</sup>.

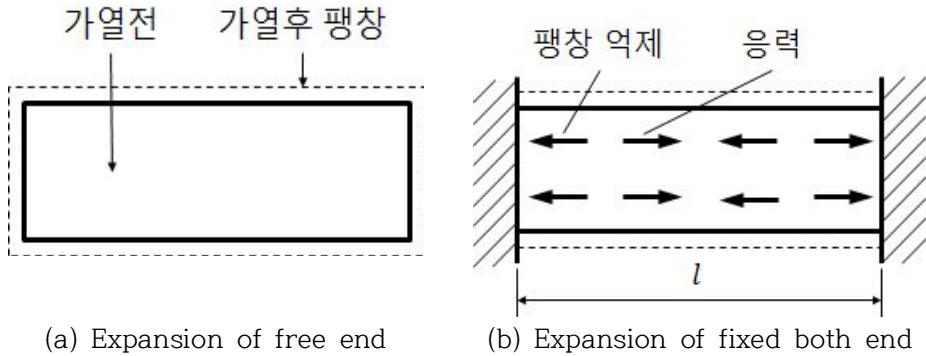


Fig. 2-11 Expansion due to the heating

### (3) 용접부의 응력 분포

Fig. 2-12는 양쪽 끝단에 외적 구속이 된 용접 시험편의 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 2-12의 (c)는 용접부로부터 멀리 떨어진 부분(모재부)의 응력을 나타낸 것으로, 상당히 큰 인장 응력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 인장응력을 구속응력(Locked stress)이라하며, 구속응력은 모재가 자유롭게 수축되지 못하였기 때문에 거의 일정한 값의 인장응력이 발생한다. Fig. 2-12의 (a)는 용접선에 수직인 부분의 단면 응력을 나타낸 것으로서, 용접 비드 부근에 큰 인장응력이 발생되고 있으며, 판 끝을 따라서 가면 용접부로부터 멀리 떨어지게 되면서 작은 압축응력의 영역이 있음을 알 수 있다. Fig. 2-12의 (d)는 A-A'에서 절단한 후의 모재의 용접선 단면의 응력을 나타낸 것으로서, 용접선 중앙에서는 그다지 크지 않은 인장 응력이 발생하지만, 용접선 처음과 끝 방향으로 나가면서는 인장응력이 감소되어 그 값이 0이 되고, 그 후 압축응력이 발생함을 알 수 있다. 이와 같이 외적 구속이 없으면 용접선의 방향이나 비드 부근에서 인장응력과 압축응력이 자유로이 발생되기 때문에 필연적으로 변형이 발생되면서 잔류응력의 크기는 감소하게 된다. 그러나 Fig. 2-12의 (b)의 경우 외적 구속을 가하면 전용접선에 대하여 완만한 곡선의 인장 응력만 발생하고 압축응력은 외적 구속

력 때문에 발생되지 않는 것이다. 따라서 열응력에 의한 수축변형이 발생되지 않는 대신 잔류응력의 값이 커지는 것이다<sup>28)</sup>.

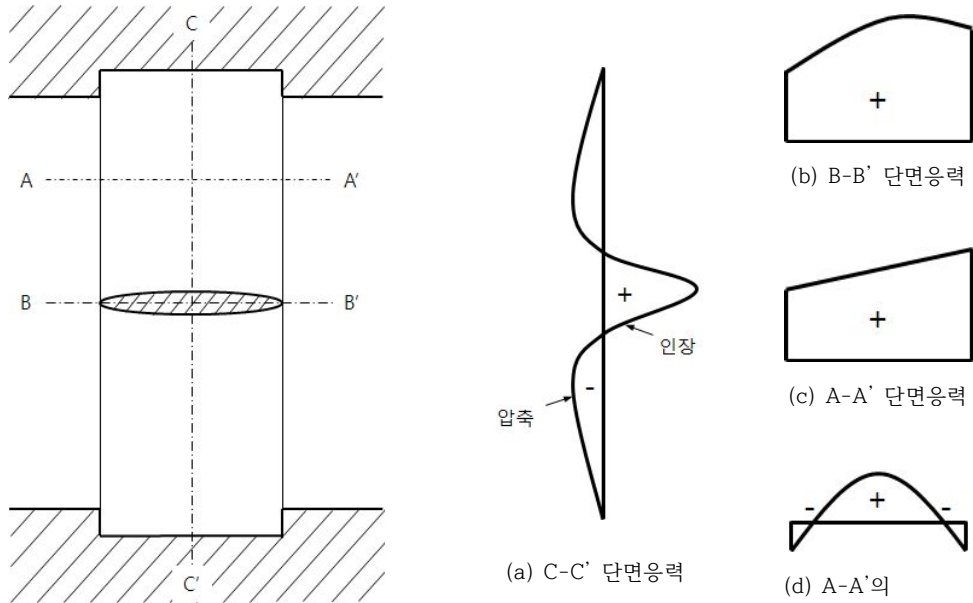


Fig. 2-12 Residual stress of butt welds

#### (4) 잔류응력의 영향

용접에 의한 잔류응력의 발생은 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 용접부의 열응력에 의한 것이다. 이 열응력의 발생과정은 열처리나 냉간가공의 경우와 비교했을 때 단순하지만 실제로는 잔류응력의 발생은 용접이 행해지는 부재의 형상, 치수, 시행 방법 및 용접 방법에 따라 다르다. 용접하는 동안 발생하는 열이 용접재의 팽창과 모재의 냉각에 의한 수축으로 인하여 변형과 용접 잔류응력을 발생시킨다. 잔류응력은 거시적 잔류응력과 미시적 잔류응력으로 분류되는데 거시적 잔류응력은 용접과 조립 및 금속 형성과정에서 발생되며, 미시적 잔류응력은 몇 개의 입자나 원자 집단만큼 작은 영역 내에서 미시조직 변형과 국

부결합의 원인이 되지만, 구조물의 역학적인 성질과는 직접적인 관련이 없다. 용접 구조물의 강도에 대한 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 설계상의 중요한 문제로 작용한다. 용접 잔류응력의 값은 설계응력에 비해서 훨씬 크기 때문에 그것이 구조물의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되었으며 잔류응력이 미치는 영향은 다음과 같다.

### ① 연성 파괴의 발생

재료에 연성이 있어 파괴에 이르기까지 얼마간의 소성변형이 일어나는 경우에는 항복점에 가까운 잔류응력이 있다고 해도 강도에는 거의 영향이 없다. 그 이유는 잔류응력이 있는 물체에 인장력이 작용하면 비드 부근에서 높은 인장응력이 잔류하고 있다가 외력을 더욱 높게 증가시키면 용접물은 즉시 소성변형이 일어나게 되지만 응력의 증가는 거의 없게 된다.

### ② 취성 파괴의 발생

재료가 연성이 부족하여 소성변형이 거의 없이 파괴되는 경우는 잔류응력의 영향이 크게 나타난다. 특히 담금질된 강이나 주강에서 현저하게 확인이 가능하며 이와 같은 현상은 전단면이 항복하기 이전의 작은 하중에서도 잔류응력의 영향 때문에 취성파괴를 일으킨다. 연성을 갖고 있는 강판에서의 취성파괴는 이것이 일단 개시되면 적은 응력의 크기로도 연속적인 파괴가 되지만, 취성 파괴가 발생되기 위해서는 인장응력이 항복점에 가깝게 커야한다. 실제로 용접부 부근의 잔류응력은 항복점에 가까울 정도로 크기 때문에 용접부 표면에 작은 노치가 존재해도 취성파괴가 잔류응력 때문에 쉽게 발생하게 된다.

### ③ 피로 강도의 감소

잔류응력이 용접 이음의 피로 강도에 영향 미치는지의 여부에 대해서는 실험 여건이 까다로워 확실한 결론이 어려운 실정이다. 다만 용접 균열이나 언더컷, 슬래그 섞임 등의 노치부가 있으면 항복점 보다 훨씬 낮은 응력에서도 파괴가 일어나므로 결국 잔류응력의 존재는 피로 강도에 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 잔류응력 제거를 위한 풀림 처리는 피로 강도를 다소 증가시키고 용접에 의한 열영향부가 연화되어 연성이 증가한다고 하지만 잔류응력의 존재가 피로 강도에 영향이 있다고 속단할 수만은 없는 것이다.

### ④ 응력 부식의 발생

잔류응력이 존재하는 용접부는 재료의 부식이 촉진되기 쉽다. 이것을 응력부식(Stress corrosion)이라고 하는데, 용접부에 존재하는 잔류응력에서는 항복점에 가까운 높은 인장응력이 존재하여 이것이 원인이 되어서 응력부식이 일어난다. 응력부식은 재질, 부식매질, 응력의 크기, 유지 시간, 온도 등에 따라 다르며 응력부식이 생기기 쉬운 재질로는 알루미늄, 마그네슘 합금, 오스테나이트계, 스테인레스강 및 연강 등이 있다.

응력부식이 발생하는 과정을 보면 금속재료에 인장응력이 가해지면 노치부에 응력이 집중되어 노치 끝부분에 작은 균열이 생기게 되고 이 균열의 끝이 다시 선택적으로 부식되어 어느 정도 약해지면 응력 집중으로 다시 새로운 균열이 진행되어 파괴를 일으키게 된다. 연강 및 저합금강은 알칼리성에 특히 응력부식이 발생하기 쉬우며 균열은 입계에 연하여 일어난다.

결국 응력부식의 제거를 위해서는 잔류응력의 제거가 필요하다<sup>29)</sup>.

### 1-3. 잔류응력의 측정 방법

잔류응력은 열탄소성 해석을 통한 이론적인 방법으로 추정이 가능하지만 용접부의 형상이나 재질, 용접 및 구속 조건 등에 의한 편차가 매우 크기 때문에 정확한 추정은 매우 어렵다. 따라서 직접적인 측정을 통해 잔류응력의 크기와 분포를 구하는 방법이 널리 이용되고 있다. 잔류응력 측정법은 크게 파괴 시험과 비파괴 시험으로 구분된다<sup>30)</sup>.

#### (1) 파괴 시험(Destructive Tests)

파괴 시험은 측정 대상물에 스트레인게이지를 부착하고 구조물의 일부를 절단하거나 스트레인게이지 사이에 구멍을 뚫어 그 때 발생한 응력 이완에 의해 나타나는 스트레인을 측정하여 응력의 크기를 측정하는 방법이다. 이 방법은 구조물의 일부가 손상되며 시산이 많이 소요되는 단점이 있지만 비교적 정확한 응력을 측정할 수 있기 때문에 용접 잔류응력 측정에 주로 사용되고 있는 방법이다. Fig. 2-13은 원주 상에 3개의 스트레인 게이지를 부착하고 원 중심에 구멍을 뚫어 잔류응력을 측정하는 홀드릴링 잔류응력 측정법(Hole drilling method)의 원리이고 Fig. 2-14는 홀드릴링 잔류응력 측정 장비이다.



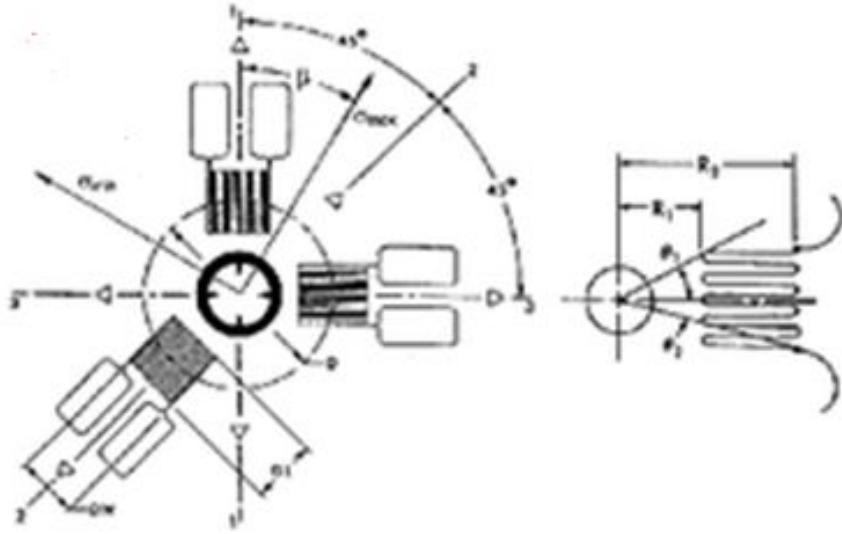


Fig. 2-13 Principles of the Hole Drilling Method



Fig. 2-14 Hole drilling measurement device

## (2) 비파괴 시험(Non-destructive Tests)

이 방법은 용접 구조물에 손상을 주지 않고 잔류응력을 측정하는 방법이다. 대표적인 비파괴 측정에는 X-선 회절법(X-Ray Diffraction method)과 중성자 회

절법(Neutron diffraction method), 그리고 최근 새롭게 알려지고 있는 광학을 이용한 잔류응력 측정법이 있다.

① X-선 회절법(X-Ray Diffraction method)

금속의 원자는 일정 형태로 배열된 결정 구조로 되어 있는데 외력이 작용하면 Fig. 2-15와 같이 원자 상호간의 거리가 커지게 된다. 이 때 X-선 회절법을 이용하여 금속 원자 간의 거리를 측정하면 응력을 알 수 있다. 이 방법은 표면에서 0.01mm 깊이 내의 표면 응력밖에 측정할 수 없지만 최대응력이 대부분 표면에 존재하기 때문에 중요한 요인이 된다. 또한 응력 분포가 불균일할 때에도 표면의 국소지역의 응력을 측정할 수 있는 장점이 있다.

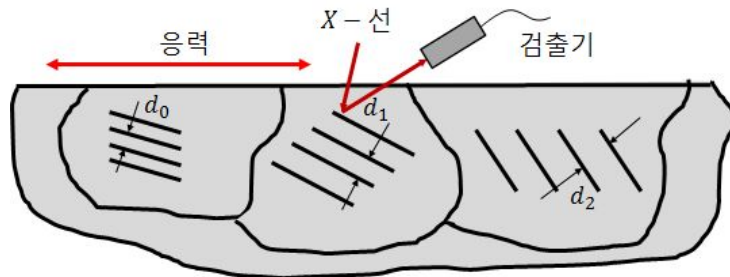


Fig. 2-15 Residual stress measurement principles using the X-Ray Diffraction



Fig. 2-16 Residual stress measurement equipment using the X-Ray Diffraction

## ② 중성자 회절법(Neutron diffraction method)

중성자 회절법은 원자로와 같은 중성자의 원료가 필요하기 때문에 계측 장비를 운반하여 사용하는 것이나 현장에서의 사용이 불가능하여 실험실 수준으로 제한되어 있다. 이 방법의 응력과 변형률 측정 원리를 살펴보면 재료에 존재하는 응력은 원자들이 위치해 있는 평면의 분리 변화를 관찰하고 응력 계산을 위한 재료의 탄성계수를 사용함으로써 측정할 수 있다. 입사빔과 회절빔으로 인한 파장의 다양한 강도 분포가 나오면 그에 따라  $\Delta\lambda/\lambda$ 를 구할 수 있으며, 측정하고자 하는 부재의 변형률( $\epsilon$ )이다. 중성자를 사용하는 다른 기법들과 마찬가지로 중성자 회절법은 절대적으로 변형률을 측정할 수 있는 능력을 가지고 있으며 응력을 측정하는 초음파 기법이나 Barkhausen noise 방법과 서로 보완하여 사용할 수 있다.

## ③ 광학을 이용한 잔류응력 측정법

잔류응력을 측정하기 위해 Underwood는 고전적인 간섭계를 구성한 바 있으나 이 방법은 광학적 질을 향상시키기 위해 대상물의 측정 영역을 폴리싱 가공해야만 했다. 또한 Nelson은 반파괴적인 방법인 Blind hole-drilling method를 사용하여 홀로그래피 간섭법을 이용한 잔류응력 측정법을 제시하였다. 이것을 기초로 현재까지 많은 광학적 잔류응력 측정법에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 외 여러 연구자들은 반파괴적 방법과 함께 스트레인게이지를 대신하여 광탄성법, 무아레와 간섭 스트레인게이지를 사용하여 잔류응력을 측정하였다. 이러한 잔류응력 측정법들은 점 단위 측정 방법을 면 단위 측정법으로 변형하여 데이터의 획득 시 비접촉 기법이라는 점 때문에 측정 결과의 신뢰성이 높다는 큰 장점을 가지고 있다.

## 1-4. ESPI를 이용한 잔류응력 측정법

본 논문에서는 잔류응력을 측정하기 위해 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 전자 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 조선 및 원자력 설비 분야 등 여러 산업 분야에서 문제시 되고 있는 잔류응력을 검출하기 위한 방법을 고안하여 그 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통한 검증을 하고자 한다. 본 논문은 용접된 배관의 용접부 잔류응력을 측정하고자, 배관 용접시험편에 압축하중이 가해졌을 때 모재부와 용접부의 변형량 및 변형률을 측정하고 잔류응력 계산식에 적용하여 잔류응력을 측정하였다. 입력된 하중의 시간 변화에 따른 변형량 측정을 위해 다음 식이 적용되었다.

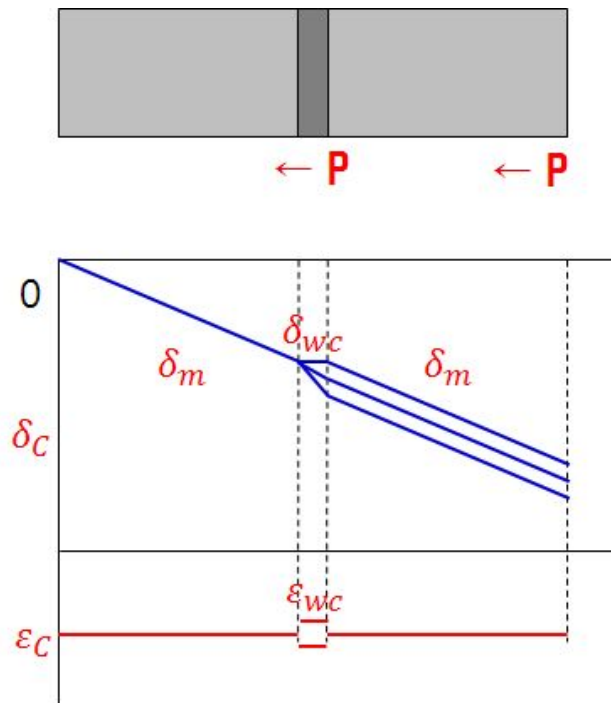


Fig. 2-17 Measurement formula welding residual stress

변형률( $\epsilon$ )은 응력( $\sigma$ )와 비례하며, 탄성계수( $E$ )는  $E = \sigma / \epsilon$  임을 알 수 있다. 또한 탄성계수( $E$ )는 레이저 스펙클 간섭계를 통해 측정된 변형량과 인장시험기의 작

용 하중을 통해 알 수 있는 응력을 그래프로 그려 얻어진 선도의 기울기를 통해 계산할 수 있다. 식(2-21), 식(2-23)은 모재부와 용접부의 탄성계수의 계산식이고, 탄성계수 값이 측정되면 다음의 최종 계산식을 통해 잔류응력을 측정할 수 있다.

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} = \frac{P_1/A_m}{\delta_1/\ell_m} \quad (2-21)$$

$$E_w = \frac{\sigma_m - \sigma_R}{\epsilon_w} \quad (2-22)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{A_m} = \sigma_w + \sigma_R = \frac{P}{A_w} + \sigma_R \quad (2-23)$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_m = E_w \epsilon_w + \sigma_R = \frac{P}{A_w} + \sigma_R \quad (2-24)$$

여기에서,  $\sigma_m$ : 모재부의 응력,  $E_m$ : 모재부의 탄성계수,  $\epsilon_m$ : 모재부의 변형률,  $\sigma_w$ : 용접부의 응력,  $\sigma_R$ : 용접부의 잔류응력,  $E_w$ : 용접부의 탄성계수이다.

## 제 3 장 실험장치 및 구성

### 제 1 절 잔류응력 측정 시스템

#### 1-1. ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 시스템

본 연구에서는 잔류응력을 측정하는 여러 가지 방법 중에서 현장 적용성과 정확도면에서 뛰어난 정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용하여 용접시험편을 인장시켰을 경우 Fig. 3-1에서 볼 수 있듯이 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생하는 것을 정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용하여 동시에 측정한 후 개발된 기법을 통하여 용접부위의 잔류응력을 측정하였다.

정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용한 용접 잔류응력을 측정하기 위하여 Fig. 3-2와 같이 실험장치를 구성하였다. 용접시험편에 MTS를 이용하여 동일한 크기의 반복하중을 인가하여 인장 시켜 모재부 및 용접부의 변형 및 변형률을 정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용하여 동시에 계측하였다. 이때, 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다. 측정을 통해 하중에 따른 시험편의 모재부 및 용접부의 프린지 패턴을 관찰함으로써 그 때의 변형률을 측정하고 이를 이론식에 대입하여 잔류응력을 계산하였으며 하중을 단계적으로 증가시켜 그 변화를 살펴보았다.

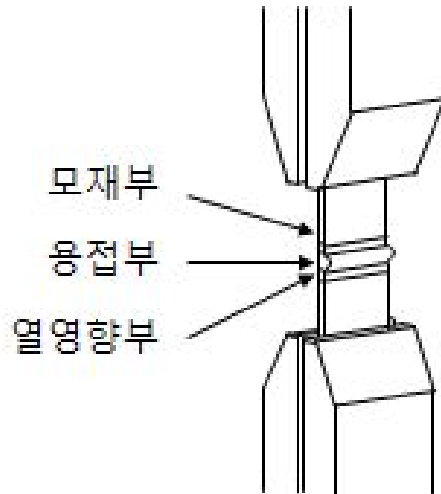


Fig. 3-1 Welded specimen deformation difference

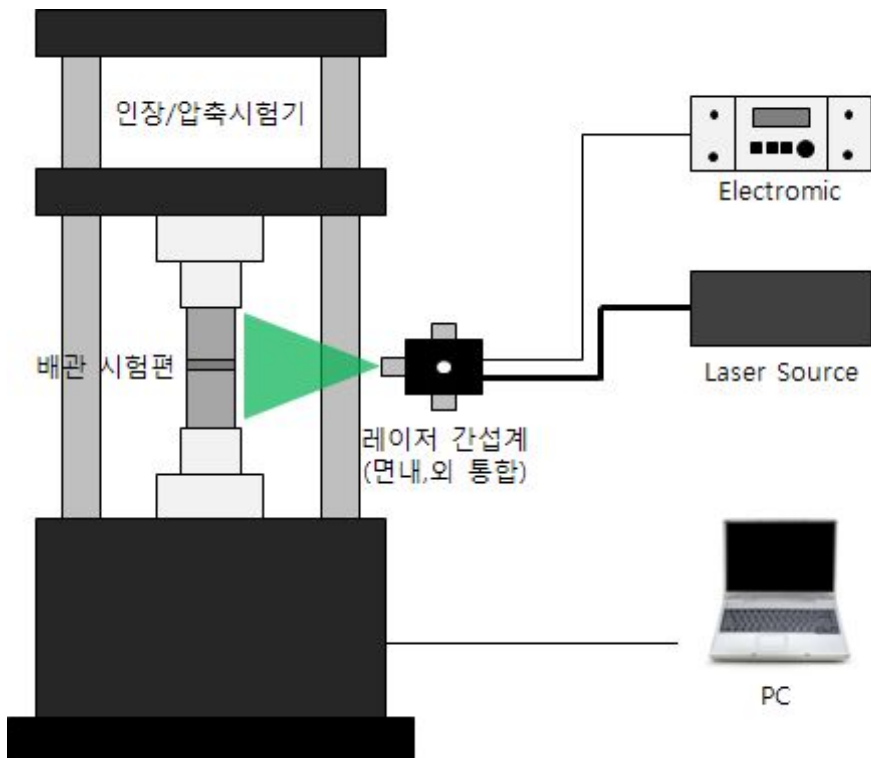


Fig. 3-2 Device configuration of residual stress measurement

정밀 계측용 레이저 간섭계는 레이저 소스장치에서 광파이버를 통하여 입력되면 광분할기에 의해 분리된 두 빔이 측정 대상물에 평행하게 같은 각도로 조사된다. 분리된 물체광과 참조광은 광학적으로 측정 시험편의 표면에서 난반사되고 Speckle Field를 형성하여 중첩된 Speckle들이 Lens를 거쳐 CCD Camera에 결상된다. 이때의 측정 대상물의 표면 거칠기와 변위, 변형 정보를 포함하는 Speckle Pattern은 대상물의 변형에 대한 Speckle Pattern과 비교함으로써 변위에 대한 정보만을 레이저 파장 단위로 얻어낼 수 있다.

위상 추출을 위하여 정밀 계측용 레이저 간섭계 제어프로그램의 Phase Shifting 4-step algorithm을 적용하였으며, 위상이동은 외부 Controller로 Piezo electronic transducer(PZT)에 전압차를 주어 제어함으로써 Phase Shifting 4-Step algorithm 적용하였다. 또한, Phase Shifting 4-Step algorithm에 의해 얻어진 Phase map을 Unwrapping 프로그램을 이용하여 수치해석 함으로서 변위 및 변형률을 측정하였다.





Fig. 3-3 Device configuration of tensile tester

잔류응력을 측정 시 용접시험편에 인장 및 압축 하중을 인가하기 위해 인장시험기(MTS Co.)를 사용하였으며 Fig. 3-3은 인장시험기 장치이다. 인장시험기는 미국 MTS 사의 상용제품(Model: MTS 793)을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servo-valve controller로 이루어져 있다. Table. 3-1은 인장시험기의 제원이다. 용접 시험편에 MTS를 이용하여 하중을 인가하였고, 시험편의 모재부 및 용접부위에 발생하는 변형 분포를 정밀 계측용 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다.

Table 3-1 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             | $\pm 10$ V (full scale)    |
| Excitation frequency       | 10 kHz ( $\pm 100$ mm)     |
| Data sampling rate         | 122.88 kHz                 |

## 1-2. 용접시험편

용접부 잔류응력 측정 및 비교/검증을 위하여 평판 용접시험편과 배관 용접시험편을 제작하였다. 사용된 시험편의 재질은 평판시험편은 SS400이고 배관시험편은 ASTM A106 Gr.B이며, 실제 원자력 발전설비 및 중화학 배관설비 재료로 많이 사용되고 있는 재질이다. 사용된 시험편의 재질에 대한 화학적, 기계적 물성치를 Table. 2~5에 나타내었다.

Table. 3-2 Chemical composition(wt.%) of SS400 steel

| C | Mn | Si | P    | S    | Ni | Cr | Mo | Cu |
|---|----|----|------|------|----|----|----|----|
| - | -  | -  | 0.05 | 0.05 | -  | -  | -  | -  |

Table. 3-3 Mechanical properties of SS400 Steel

| SS400 | Yield strength (MPa) |       |        |      | Tensile strength (MPa) |
|-------|----------------------|-------|--------|------|------------------------|
|       | thickness(t)         |       |        |      |                        |
|       | 1~15                 | 16~40 | 41~100 | 100~ |                        |
|       | 245                  | 245   | 245    | 205  |                        |

Table. 3-4 Chemical composition(wt.%) of A106 Gr.B steel

| C   | Mn   | Si   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   | Cu   |
|-----|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 0.2 | 1.02 | 0.25 | 0.017 | 0.005 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.01 |

Table. 3-5 Mechanical properties of A106 Gr.B Steel

| A106 Gr.B  | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) |
|------------|----------------------|------------------------|
| Base metal | 430                  | 486                    |

### (1) 평판 용접시험편 제작 및 용접

평판 용접시험편 제작에 앞서 Fig. 3-4와 같은 평판 용접시험편 제작 도면을 작성하였다. 가로 265mm, 세로 160mm, 두께 5mm이고 재질은 SS400이다. 평판 제작 후 평판의 가로방향 중심으로 비드 용접을 실시하였다. 이 때 용접 조건은 용접 속도와 용접 전류를 변수로 하여 용접 하였으며 총 10개의 시험편을 용접 하였다. 용접에 사용된 용접기는 Austria Frunius 사의 CMT(Cold Metal Transfer) 용접기(저입열 용접기)이고, CO<sub>2</sub> 가스와 ER70S 연강용 와이어를 사용하여 CMT mode로 용접하였다. Table. 6은 평판시험편 별 용접 조건이다. 용접이 완료된 시험편은 Fig. 3-5와 같이 폭 40mm로 와이어 컷팅하여 하나의 평판 용접시험편을 완성하였다.

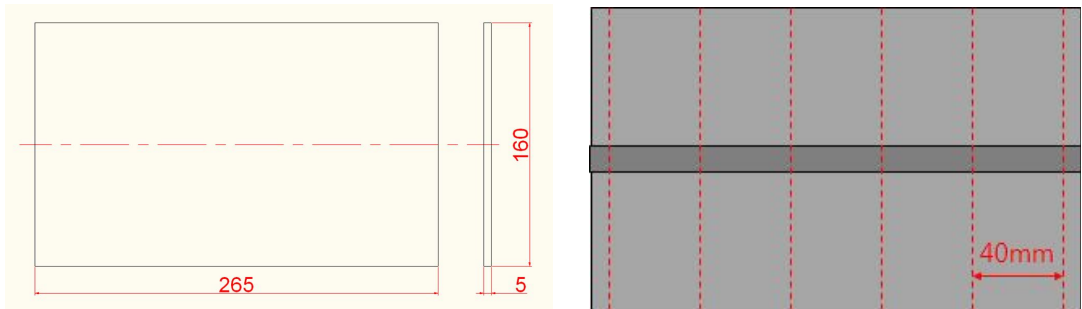


Fig. 3-4 Design drawings of flat panel welded specimen



Fig. 3-5 Produced flat panel welded specimen

Table. 3-6 Welded condition flat panel specimen

|           | 용접 방법              | 용접속도<br>(cm/min) | 전류<br>(A) |
|-----------|--------------------|------------------|-----------|
| 비드용접_전류제어 | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 150       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 133       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 127       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 115       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 99        |
| 비드용접_속도제어 | CO <sub>2</sub> 용접 | 20               | 164       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 30               | 170       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 40               | 173       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 50               | 170       |
|           | CO <sub>2</sub> 용접 | 60               | 170       |

## (2) 배관 용접시험편 제작 및 용접

배관 용접 시험편 역시 Fig. 3-6과 같은 제작 도면을 작성하였으며 내경 102mm(4"), 길이 150mm의 배관을 Groove 가공된 면을 맞대기 용접하여 하나의 용접 배관으로 제작하였다.

평판과 동일한 장비와 조건의 용접을 하였고, Root pass 용접 이외의 나머지 pass의 경우 전압 213A에 Arc length correction 30%로 하여 용접하였으며, 용접 속도는 50cm/min으로 용접하였다. Fig. 3-7은 제작된 배관 용접시험편의 사진이며, Table. 7은 10개의 시험편에 대해 용접한 조건을 나열한 것이다.

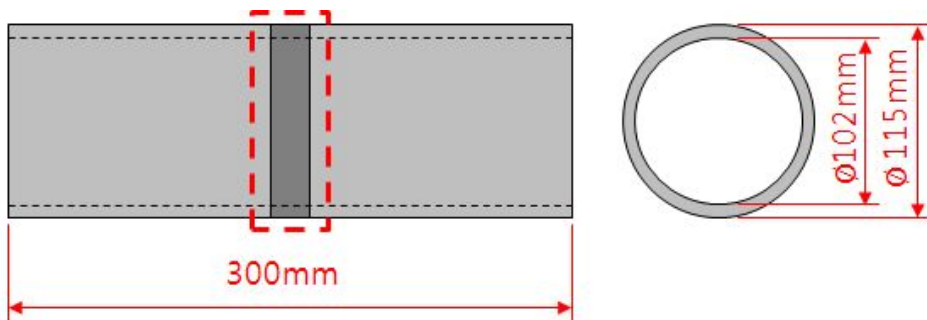


Fig. 3-6 Design drawings of pipe welded specimen



Fig. 3-7 Produced pipe welded specimen

Table. 3-7 Welded condition pipe specimen

| No. | Root gap (mm) | Root pass |             | pass 수 | 층간온도 (°C)                                |
|-----|---------------|-----------|-------------|--------|--|
|     |               | 전류 (A)    | 속도 (cm/min) |        |  |
| 1   | 0.6           | 130       | 44.1        | 6      | - 50이하 유지                                |
| 2   |               |           |             | 6      | - 50이하 유지                                |
| 3   |               |           |             | -      | -  |
| 4   |               |           |             | 4      | - 연속 용접                                  |
| 5   |               |           |             | 7      | - 연속 용접                                  |
| 6   |               |           |             | 8      | - 1~5pass까지 50이하 유지<br>- 6~8 pass는 연속 용접 |
| 7   |               |           |             | 8      | - 50이하 유지                                |
| 8   |               |           |             | 8      | - 50이하 유지                                |
| 9   |               |           |             | 8      | - 50이하 유지                                |
| 10  |               |           |             | 6      | - 50이하 유지                                |

## 제 2 절 실험 방법

본 논문에서 제시하는 방법으로 잔류응력을 측정하기 위하여 인장시험기(MTS)를 이용하여 동일한 크기의 하중을 인가하여 인장 및 압축 시켜 모재부와 용접부의 변형 및 변형률을 측정하였다. Fig. 3-8은 용접부 잔류응력 측정을 위한 장치의 구성이다. ESPI System을 이용하여 계측하고 본 논문에서 제시한 잔류응력 측정 방법을 통하여 잔류응력을 검증 하였다. 이때 인가된 하중은 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다.

실험을 통하여 하중 변화에 따른 시험편의 모재부 및 용접부의 프린지 패턴을 관찰함으로써 그 때의 변형률을 측정하고 같은 방법으로 여러 차례 반복한 후 이를 이론식에 대입하여 탄성계수 및 잔류응력 값을 계산하였다.



Fig. 3-8 Device configuration for welding residual stress measurement



## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 제 1 절 평판 용접시험편의 인장하중에 의한 잔류응력 측정

#### 1-1. 평판 용접시험편 잔류응력 측정 결과

평판 용접시험편의 잔류응력 측정을 위해 제작된 평판시험편에 35kN의 인장하중을 인가하여 모재부와 용접부 각각의 변형을 측정하였다. 시험편 종류는 시험편 제작 시 고려하였던 용접 조건별로 하였으면 그 조건은 용접 속도와 용접 전류이다. 속도별 시험편 5개, 전류별 시험편 5개를 측정하였으며 Table. 4-1과 Table. 4-2는 각각의 시험편의 측정 결과에 대한 Phase map이다.

Table. 4-1 Phase map of flat panel welded specimen\_Speed control

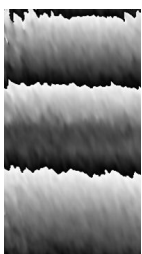
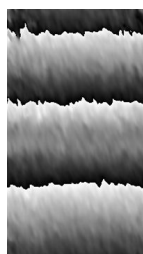
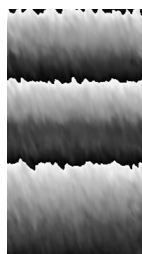
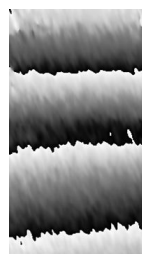
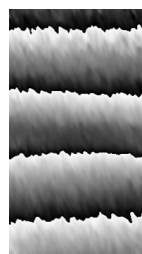
| Speed     | 20cm/min   | 30cm/min   | 40cm/min   | 50cm/min   | 60cm/min   |
|-----------|--|--|--|--|--|
| Phase map |  |  |  |  |  |

Table. 4-2 Phase map of flat panel welded specimen\_Current control

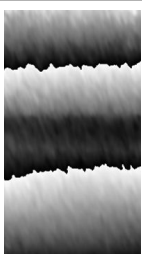
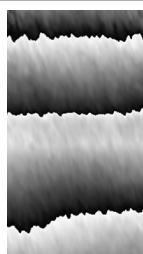
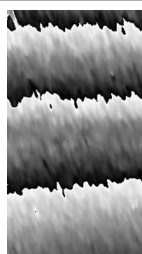
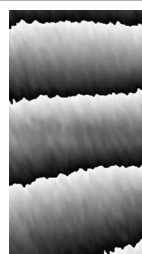
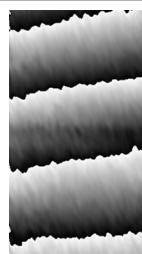
| Ampere    | 150A  | 133A  | 127A  | 115A  | 99A   |
|-----------|---|---|---|---|---|
| Phase map |  |  |  |  |  |

Table. 4-3 Phase map analysis results of flat panel welded specimen\_Speed Control

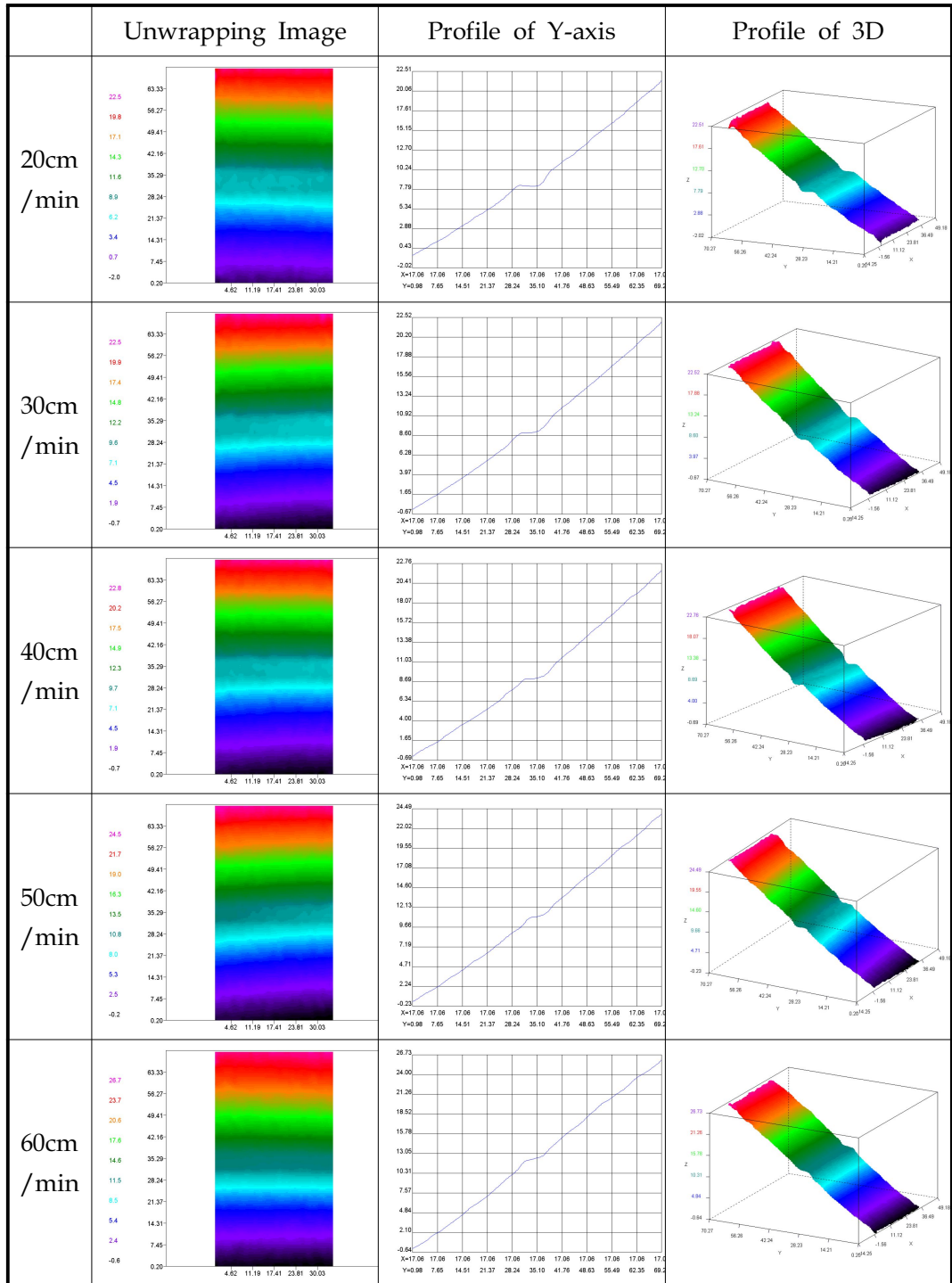
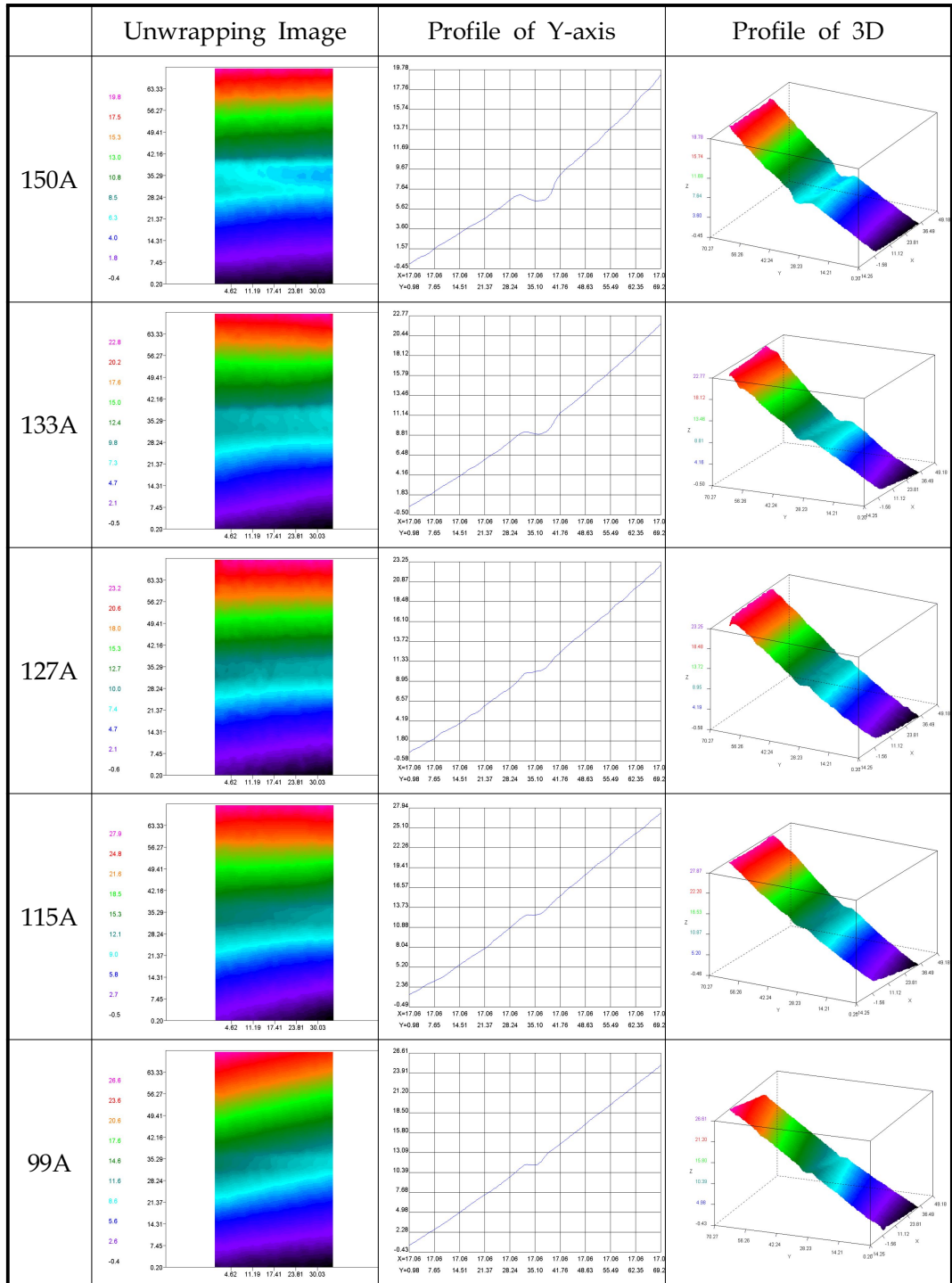


Table. 4-4 Phase map analysis results of flat panel welded specimen\_current Control



## 1-2. 평판 용접시험편 잔류응력 분석 결과

평판 용접시험편의 용접 조건에 따라 얻어낸 Phase map에 대한 분석 결과를 Table. 4-3과 Table. 4-4에 나열하였다. Phase map과 Unwrapping image에서 용접부를 육안으로 확인할 수 있었다. Unwrapping image의 일정 영역에 profile을 그어 속도 및 전류별 각각의 변형 선도와 변형의 형태를 3D로도 확인할 수 있었다. 결과적으로 용접부에서 발생하는 변형이 모재부에서 발생하는 변형보다 훨씬 적음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 4-1의 그래프를 통해 용접 속도가 빠를수록 변형량이 크게 발생하며 전류의 세기가 낮을수록 변형이 크게 일어남을 알 수 있다.

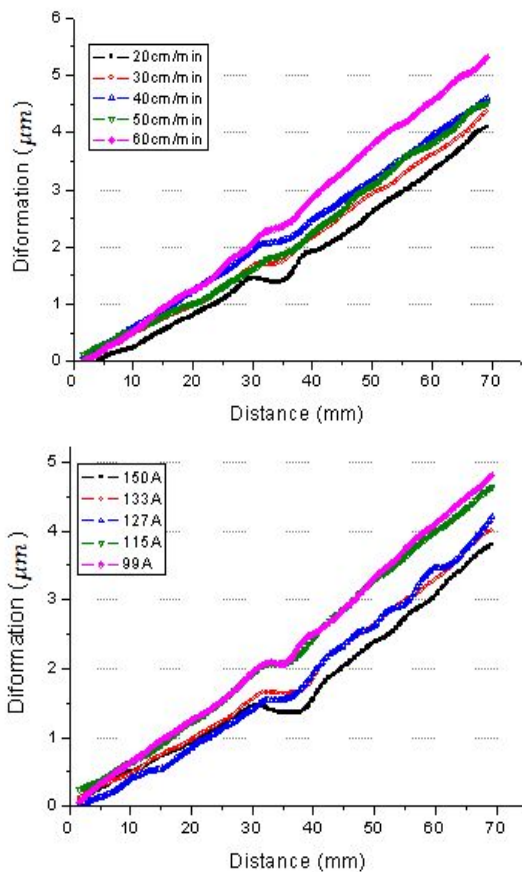


Fig. 4-1 Deformation graph of flat panel welded specimen according to the speed and current

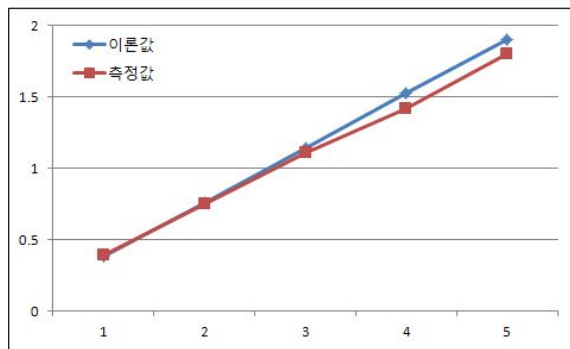
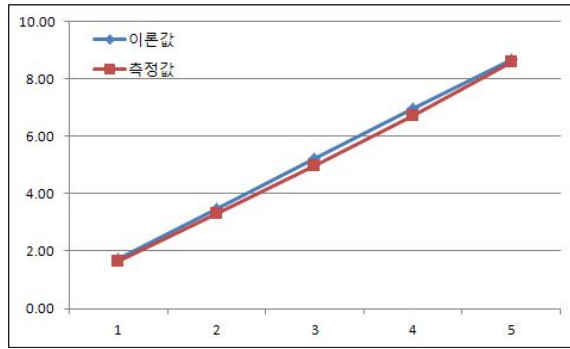


Fig. 4-2 Deformation comparison of base metal and weld metal in flat panel welded specimen

Table. 4-5 Residual stress measurement results of flat panel welding specimen according to the load variation

|                              | P2917    | P5833    | P8750    | P11667   | P14583   |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 하중 변화(N)                     | 2,917    | 5,833    | 8,750    | 11,667   | 14,583   |
| 모재부 단면적<br>(m <sup>2</sup> ) | 2.26E-04 | 2.26E-04 | 2.26E-04 | 2.26E-04 | 2.26E-04 |
| 모재부 응력<br>(MPa)              | 12.93    | 25.87    | 38.80    | 51.74    | 64.67    |
| 모재부 변형량<br>( $\mu$ m)        | 1.7387   | 3.4775   | 5.2162   | 6.9549   | 8.6936   |
| 모재부 변형률                      | 5.84E-05 | 1.18E-04 | 1.76E-04 | 2.38E-04 | 3.04E-04 |
| 모재부<br>탄성계수<br>(GPa)         | 211.41   |          |          |          |          |
| 용접부 단면적<br>(m <sup>2</sup> ) | 3.08E-04 | 3.08E-04 | 3.08E-04 | 3.08E-04 | 3.08E-04 |
| 용접부 응력<br>(MPa)              | 9.49     | 18.97    | 28.46    | 37.94    | 47.43    |
| 용접부 변형량<br>( $\mu$ m)        | 0.3914   | 0.7553   | 1.1077   | 1.4201   | 1.8023   |
| 용접부 변형률                      | 4.64E-05 | 8.96E-05 | 1.31E-04 | 1.68E-04 | 2.14E-04 |
| 용접부<br>탄성계수<br>(GPa)         | 229.16   |          |          |          |          |

Table. 4-5는 평판 용접시험편의 하중 변화에 따른 잔류응력 측정 결과이다. 모재부 및 용접부 각각의 변형량을 통해 탄성계수를 측정하였으며, 측정된 탄성계수 값은 모재부 탄성계수 211.41GPa, 용접부 229.16GPa로 용접부의 탄성계수 값이 약간 더 높게 측정 되었다. Fig. 4-3은 모재부 및 용접부의 탄성계수를 측정한 그래프이며 모재부 및 용접부 각각의 응력, 변형률 선도에 추세선을 그어 그 기울기 값을 구해 탄성계수를 산정하였다. 또한 모재부 및 용접부의 응력과 탄성계수, 변형률을 이용하여 평판 용접시험편의 용접부 잔류응력 값을 측정하였으며 그 값은 1.3MPa이다. Fig. 4-4는 평판 용접시험편의 용접부 잔류응력을 측정한 그래프이다.

|          |            |
|----------|------------|
| 모재부 탄성계수 | 211.41 GPa |
| 용접부 탄성계수 | 229.16 GPa |
| 잔류응력     | 1.3 MPa    |

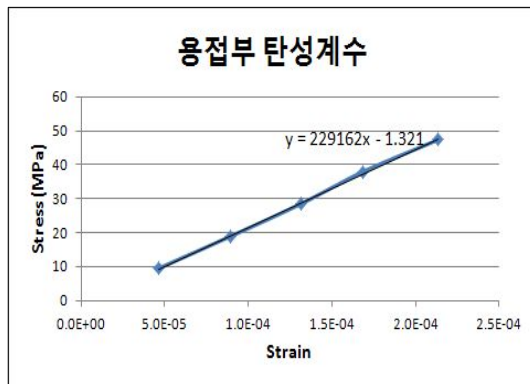
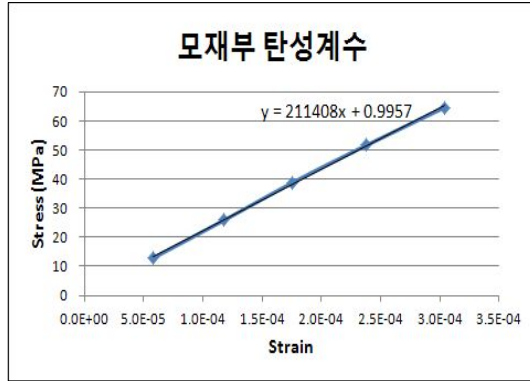


Fig. 4-3 Elastic modulus of base metal and weld metal in the flat panel welded specimen

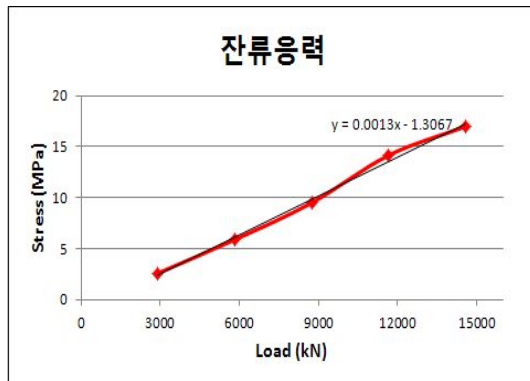


Fig. 4-4 Residual stress of flat panel welded specimen



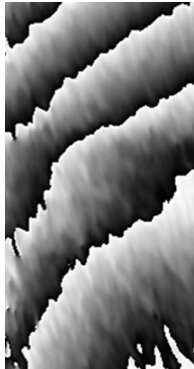
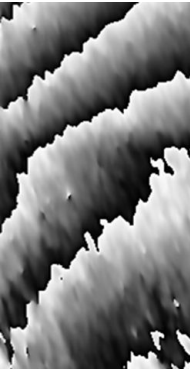
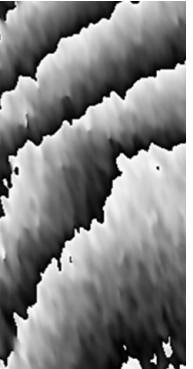
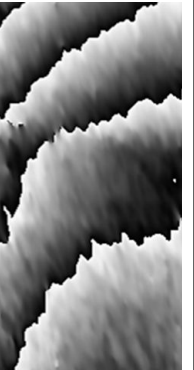
## 제 2 절 배관 용접시험편의 인장하중에 의한 잔류응력 측정

### 1-2. 배관 용접시험편 잔류응력 측정 결과

배관 용접시험편의 잔류응력 측정을 위해 제작된 평판시험편에 45kN의 압축하중을 인가하여 모재부와 용접부 각각의 변형을 측정하였다. 배관 용접시험편의 잔류응력 측정을 위해 인장시험기를 이용하여 배관의 모재부 및 용접부에 하중을 부여함에 따라 변형이 발생하게 된다. 이 때 위상지도(Phase map)가 형성되는데 위상지도는 1분 동안 45kN의 압축 하중이 인가되는 동안 5초 간격으로 변형을 측정하여 얻은 결과이다. Fig. 4-5는 1분 동안 인장시험기에서 인가된 하중을 그래프로 나타낸 것이다. Table. 4-6은 배관 용접시험편에 발생한 변형에 대한 Phase map이고, 이는 ESPI의 Series 방식으로 측정한 결과로서 매번 측정 시의 phase map를 얻어낸 것이다. 하중의 변화가 일정하기 때문에 얻어낸 Phase map 또한 거의 비슷한 형태임을 확인할 수 있다. Table. 4-7은 위의 Phase map을 Unwrapping한 후 Data를 분석한 것이다. Phase map을 통해 Unwrapping된 이미지의 중앙에 프로파일을 그어 Y축에 대한 Profile Data를 얻어 그래프를 획득하였다. 또한 시험편의 전 측정영역의 변형 분포를 3D로 확인할 수 있었다.

Fig. 4-5 MTS loading results

Table. 4-6 Phase map of pipe welded specimen

|           | P3750   | P7500   | P11250  | P15000   |
|-----------|---|---|---|--|
| Phase map |  |  |  |  |

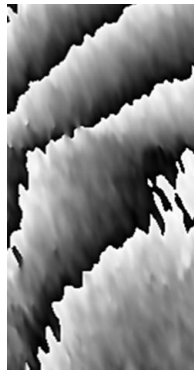
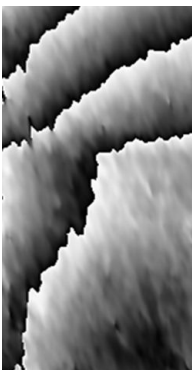
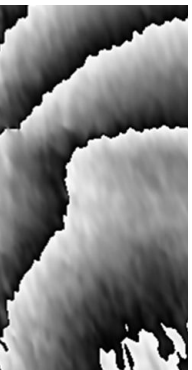
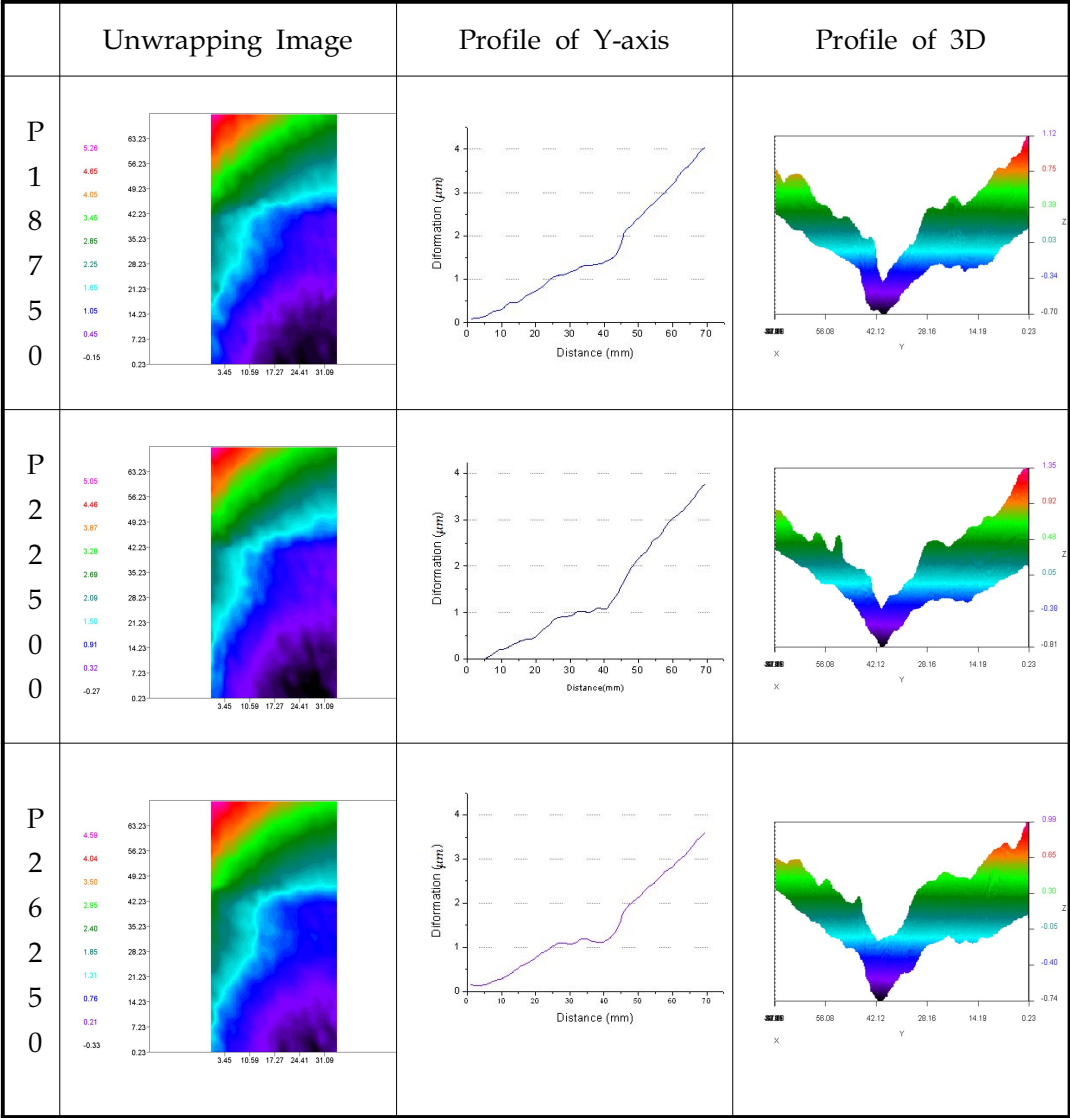
|           | P18750   | P22500   | P26250   |
|-----------|--|--|--|
| Phase map |  |  |  |

Table. 4-7 Phase map analysis results of pipe welded specimen

|                            | Unwrapping Image | Profile of Y-axis | Profile of 3D |
|----------------------------|------------------|-------------------|---------------|
| P<br>3<br>7<br>5<br>0      |                  |                   |               |
| P<br>7<br>5<br>0           |                  |                   |               |
| P<br>1<br>1<br>2<br>5<br>0 |                  |                   |               |
| P<br>1<br>5<br>0<br>0<br>0 |                  |                   |               |



## 1-2. 평판 용접시험편 잔류응력 분석 결과

Table. 4-7에 나타나있는 Profile Data를 적분시켜 Fig. 4-6과 같이 전체 Profile을 획득하였고, 그래프를 통하여 모재부와 용접부의 변형량의 차이를 육안으로 확인할 수 있었다. 모재부의 변형량이 용접부의 변형량 보다 크게 발생함을 알 수 있었고 이를 정량화하기 위하여 모재부와 용접부의 변형량을 비교해 본 결과 약 4배정도 차이가 났다. Fig. 4-7은 모재부와 용접부의 변형량을 각각 분리하여 비교한 그래프이다. 가운데 그래프는 전체 측정영역의 변형량이고 오른쪽 그래프는 모재부이며 왼쪽 그래프는 용접부이다. 그래프상의 Y축 범위는 모재부, 용접부 모두 동일하며 그래프의 기울기를 통해 모재부와 용접부의 기울기를 확인할 수 있다. 그래프를 통해 용접부의 변형량이 거의 발생하지 않음을 확인하였다.

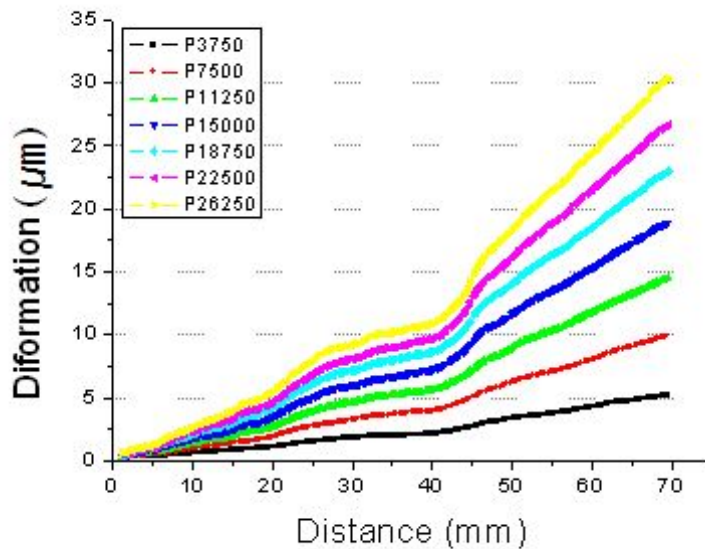


Fig. 4-6 Deformation graph of pipe welding specimen

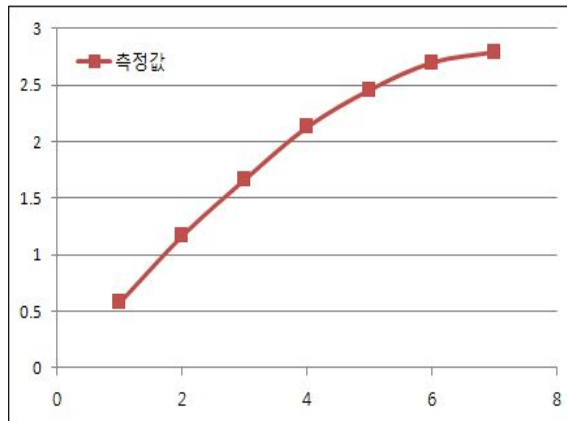
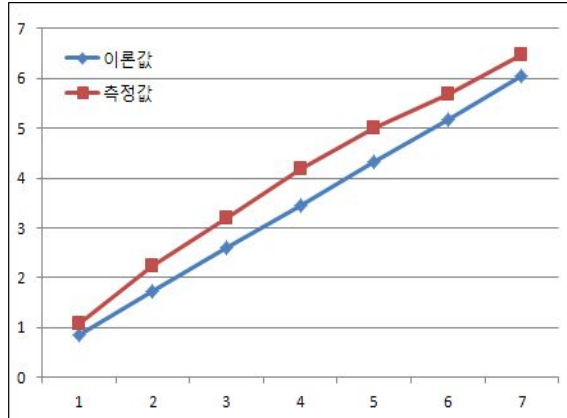
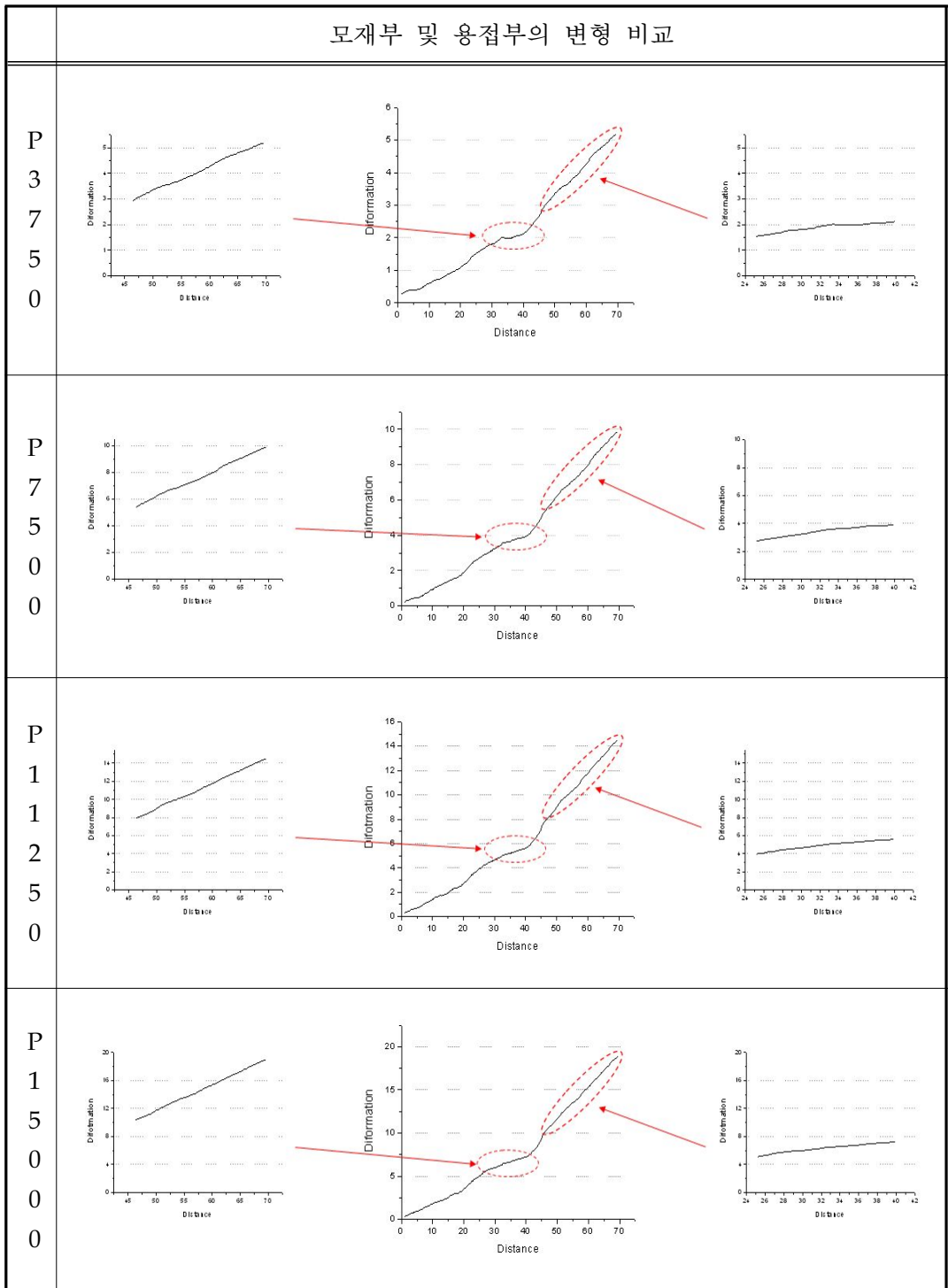


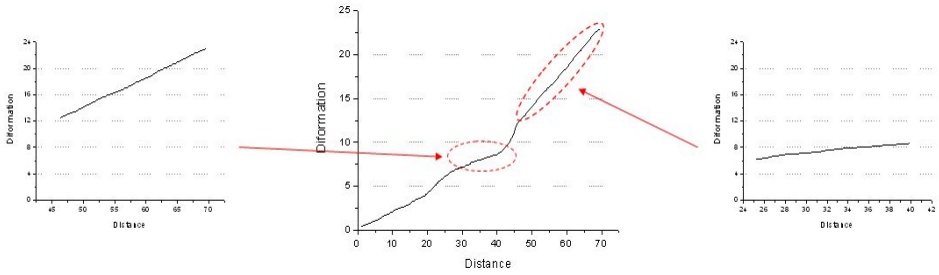
Fig. 4-7 Deformation comparison of base metal and weld metal in pipe welded specimen

Table. 4-8 Deformation Comparison of pipe welded specimen in a section

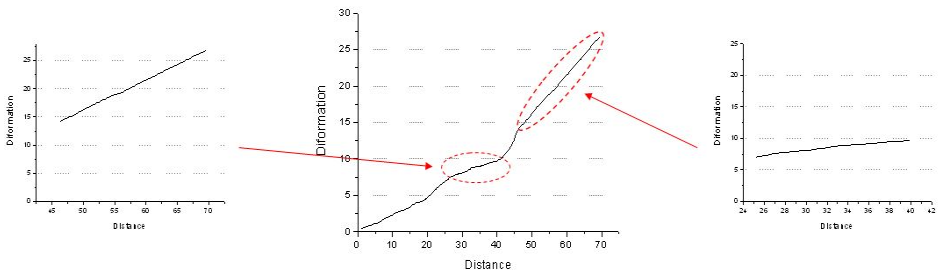


# 모재부 및 용접부의 변형 비교

P  
1  
8  
7  
5  
0



P  
2  
2  
5  
0  
0



P  
2  
6  
2  
5  
0

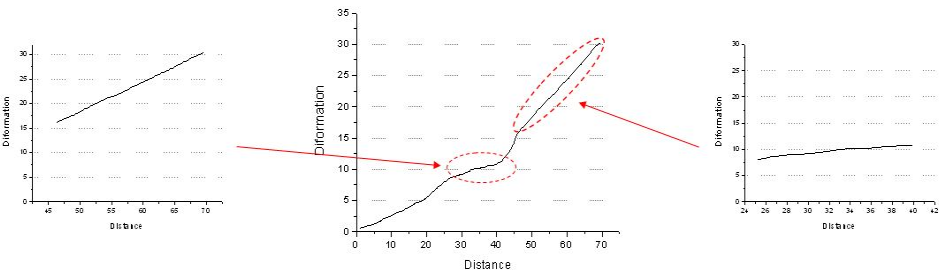




Table. 4-9 Residual stress measurement result of pipe welded specimen according to the load change

|                                 | P3750    | P7500    | P11250   | P15000   | P18750   | P22500   | P26250   |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 하중<br>변화(N)                     | 3,750    | 7,500    | 11,250   | 15,000   | 18,750   | 22,500   | 26,250   |
| 모재부<br>단면적<br>(m <sup>2</sup> ) | 4.54E-04 | 4.54E-04 | 4.54E-04 | 4.54E-04 | 4.54E-04 | 4.54E-04 | 4.54E-04 |
| 모재부<br>응력<br>(MPa)              | 8.26     | 16.53    | 24.79    | 33.05    | 41.32    | 49.58    | 57.84    |
| 모재부<br>변형량<br>( $\mu m$ )       | 1.0796   | 2.2223   | 3.1876   | 4.1741   | 5.0063   | 5.6786   | 6.4621   |
| 모재부<br>변형률                      | 4.92E-05 | 1.01E-04 | 1.45E-04 | 1.90E-04 | 2.28E-04 | 2.59E-04 | 2.95E-04 |
| 모재부<br>탄성계수<br>(GPa)            | 202.46   |          |          |          |          |          |          |
| 용접부<br>단면적<br>(m <sup>2</sup> ) | 6.6E-04  | 6.6E-04  | 6.6E-04  | 6.6E-04  | 6.6E-04  | 6.6E-04  | 6.6E-04  |
| 용접부<br>응력<br>(MPa)              | 5.68     | 11.36    | 17.03    | 22.71    | 28.39    | 34.07    | 39.75    |
| 용접부<br>변형량<br>( $\mu m$ )       | 0.5790   | 1.1679   | 1.6655   | 2.1292   | 2.4570   | 2.6994   | 2.7928   |
| 용접부<br>변형률                      | 3.94E-05 | 7.95E-05 | 1.13E-04 | 1.45E-04 | 1.67E-04 | 1.84E-04 | 1.90E-04 |
| 용접부<br>탄성계수<br>(GPa)            | 212.14   |          |          |          |          |          |          |

Table. 4-9에 모재부 및 용접부의 측정 결과를 정리하여 나열하였다. 측정 시 매 5초마다 작용하는 하중은 3,750N이고 그때의 모재부 단면적은  $0.000454\text{m}^2$ 이며, 이 단면적은 인장하중기의 구조상 원통의 배관을 1/3 등분하여 단면적을 축소시킨 단면적이다. 결과적으로 측정된 모재부의 탄성계수는 202.46GPa이고 용접부의 탄성계수는 212.14GPa로 용접부의 탄성계수가 약간 더 높게 측정되었다. 모재부와 용접부의 탄성계수는 측정된 모재부와 용접부 각각의 응력과 변형률을 이용하여 형성된 그래프에 추세선을 그어 그 기울기를 통해 측정할 수 있다. 그리고 각각의 탄성계수를 토대로 본 과제 의 최종 목적인 배관 용접부의 잔류응력을 측정할 수 있었으며, 측정된 잔류응력 값은 6.29MPa이다. 잔류응력은 모재부의 응력에서 용접부의 응력을 뺀 값으로 말 그대로 모든 응력을 제거한 후에도 잔류하는 응력을 말한다. Fig. 4-8은 모재부 및 용접부의 탄성계수를 측정한 그래프이고, Fig. 4-9은 용접부의 잔류응력을 측정한 그래프이다.

|          |            |
|----------|------------|
| 모재부 탄성계수 | 202.46 GPa |
| 용접부 탄성계수 | 212.14 GPa |
| 잔류응력     | 6.29 MPa   |

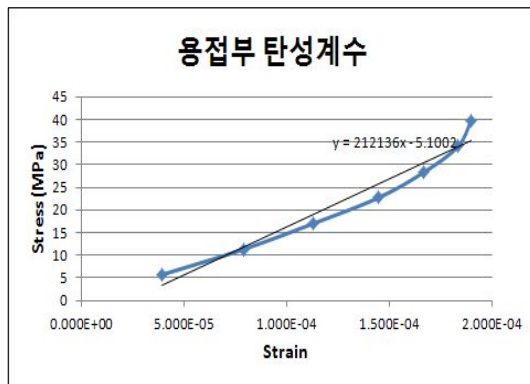
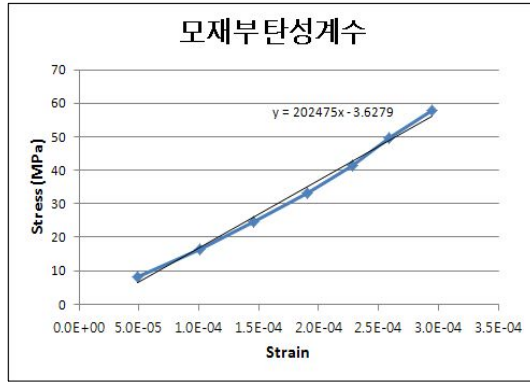


Fig. 4-8 Elastic modulus of base metal and weld metal in the pipe welded specimen

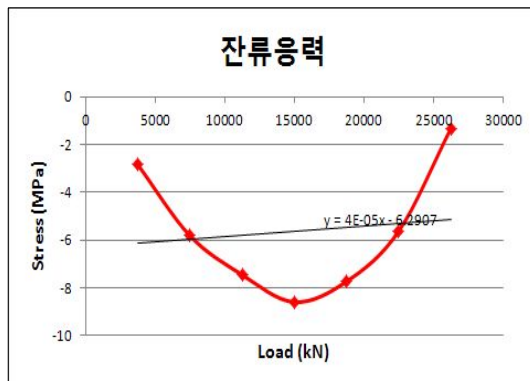


Fig. 4-9 Residual stress of pipe welded specimen

## 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) 평판 용접시험편에 하중변화를 동일하게 하여 인장 또는 압축하중을 가하였을 경우 이를 ESPI 시스템을 이용하여 관찰함으로써 시험편의 모재부와 용접부에서 변형 및 변형률 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 용접조건(용접 속도, 용접 전류)에 따라 시험편에 나타나는 변형분포가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 용접 속도가 빠를수록 변형이 크게 발생하고, 용접 시 전류의 세기가 낮을수록 변형이 크게 발생함을 알 수 있었다.

2) ESPI를 통해 측정한 변형 · 변형률 데이터를 본 논문에서 제시한 잔류응력 계산식에 대입한 결과 모재부와 용접부 각각의 탄성계수를 측정할 수 있었고, 측정된 탄성계수 값을 토대로 평판 용접시험편과 배관 용접시험편에 발생하는 잔류응력을 수치적으로 측정할 수 있었다. 평판 용접시험편의 측정 잔류응력은 1.3MPa이고, 배관 용접시험편의 측정 잔류응력은 6.29MPa로 측정되었다.

3) 하중의 변화가 동일하게 작용함에 따른 용접시험편의 변형은 항상 일정하게 측정되었으며, 같은 시험편의 모재부와 용접부의 변형을 비교하였을 때, 모재부의 변형이 용접부의 변형에 비해 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안하는 용접부 잔류응력 측정법은 잔류응력 예측에 대한 건정성 평가와 기술 개발의 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접 구조물의 안전성, 건정성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 크게 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. 김재웅, 양여우 저, "용접 잔류응력과 변형", 대한용접·접학회, 2011
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. 대한용접학회 편집부, "용접 접합 편람", 대한용접학회, 1998
7. 박주용 저, "용접 생산 공학", pp.333-335, 2010
8. K. S. Kang, "Quantitative Evaluatin of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2005.
9. 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.
10. M. H. Horman, "An applicatiioni of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333-336, 1965.
11. W. C. Hall, "Analysis of Mechanical Vibrations with Stroboscopic holographic interferometry in an industrial environment", SESA Spring Meeting, 1978.
12. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18-20, 2003.
13. J. C. Dainty, "Laser speckle and related phenomena 2nd edition", New

- York : Springer-Verlag, 1984.
14. J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle" , Journal of the Optical Society of America, Vol 66, pp.1145-1150, 1976.
  15. K. S. Kang, "Quantitative Evaluation of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2005.
  16. 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.
  17. G. L. Cloud, "Optical methods of engineering analysis" , London, Cambridge Univ. Press, pp. 469, 1990.
  18. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59-139, 2001.
  19. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
  19. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
  20. 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.
  21. 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.
  22. 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.
  23. K. Creath, "Phase-shifting Speckle Interferometry", Applied Optics, Vol.

- 24, pp. 3053, 1985.
24. Daniel Malacara, Manuel Servin, Zacarias Malacara, “Interferogram Analysis for Optical Testing” , Second Edition, pp. 274–278,
25. 박주용, “용접생산공학” , GS인터비전, pp. 323, 2010
26. 박종우, 이정일, “정밀 용접공학” , 일진사, pp. 301, 2010
27. 박종우, 이정일, “정밀 용접공학” , 일진사, pp. 301–302, 2010
28. 박종우, 이정일, “정밀 용접공학” , 일진사, pp. 302–303, 2010
29. 박종우, 이정일, “정밀 용접공학” , 일진사, pp. 304–305, 2010
30. 박주용, “용접생산공학” , GS인터비전, pp. 333, 2010

## 감사의 글

대학원에 입학한 지 2년이 흘러 벌써 학위 논문을 작성하게 되었습니다. 우선 2년 전 저를 좋은 길로 인도하여 주셔서 이곳에 올 수 있게 해주신 김경석 교수님께 감사의 말씀 전해드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사하여 주신 김재열 교수님, 양인영 교수님 감사드립니다. 저희를 가장 가까이서 지도하여 주신 정현철 박사님, 장호섭 박사님 감사드립니다. 모두 건강하시고 앞날에 좋은 일들만 가득하시길 기원합니다. 비록 힘들고 지친 세월이었지만 서로 위로와 격려를 아끼지 않았던 우리 실험실 식구들 감사합니다. 이 실험실에 들어와 처음으로 나를 맞이해 주신 방장 동수형, 나와 이름이 똑같았던 편한 형님 찬식이형, 학부생 동기였지만 대학원에 와서 엄한 선배가 되어버린 성성이, 홍일점이라 불리던 소영이까지 이분들의 조언 역시 저의 대학원 생활에 큰 가르침과 깨달음이 되었던 것 같습니다. 선배님들 언제나 행복하시고 번창하시길 기원합니다. 그리고 우리 동기 용찬이형, 동윤이, 경원이 함께한 2년 정말 수고 많았고 졸업 후에도 좋은 인연으로 남길 바랍니다. 우리 뒤를 이어갈 찬근이형, 상우말은 바 최선을 다해 앞으로 우리 실험실을 잘 이끌어 나가길 바라며 새로 들어오는 후배들까지도 잘 이끌어서 멋진 실험실이 되길 기원합니다. 마지막으로 우리 부모님 가족들, 2년 동안 매번 바쁘다고 가족들에게 소홀히 했던 점 대단히 죄송하게 생각합니다. 그럼에도 불구하고 저를 믿어주시고 끝까지 응원해주신 우리 부모님 정말 감사합니다. 이 분들의 격려와 지원이 저에게는 가장 큰 힘이 되었고 그 점 대단히 감사드리며 이 모든 분들에게 이 논문을 전합니다.



## 저작물 이용 허락서

|      |  |     |          |     |    |
|------|--|-----|----------|-----|----|
| 학 과  | 첨단부품소재<br>공학과  | 학 번 | 20117110 | 과 정 | 석사 |
| 성 명  | 한글 : 문찬식    한문 : 文燦植    영문 : Mun Chan-sik  |     |          |     |    |
| 주 소  | 전남 무안군 삼향면 용포리 168   |     |          |     |    |
| 연락처  | Tel : 010-5064-7819<br>E-mail : mcsgoodboy@naver.com   |     |          |     |    |
| 논문제목 | 한글: 레이저 간섭계를 이용한 배관 용접부의 잔류응력 평가<br>영어: Evaluation of residual stress on pipe welded joints<br>using lase interferometry |     |          |     |    |

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 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 의사 표시가 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(    )

2013년 2월

저작자 : 문 찬 식 (인)

**조선대학교 총장 귀하**