[UCI]I804:24011-200000234082

2007년 2월
석사학위 논문

스페클간섭법을 이용한 맞대기용접부의 잔류응력측정

조선대학교 대학원
기 계 설 계 공 학 과
백 상 규

스페클간섭법을 이용한 맞대기용접부의 잔류응력측정

Measurement of residual stress butt welding using speckle interferometry

2007년 2월 23일

조선대학교대학원

기 계 설 계 공 학 과

백 상 규

스페클간섭법을 이용한
맞대기용접부의 잔류응력측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2006년 10월

조선대학교대학원

기 계 설 계 공 학 과

백 상 규

백상규의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조 선 대학교 교수 양 광 영 印

위원 조 선 대학교 교수 김 재 열 印

위원 조 선 대학교 교수 김 경 석 印

2006년 11월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

LIST OF TABLES ····· Ⅲ

LIST OF PHOTOGRAPHS ····· Ⅳ

LIST OF FIGURES ····· Ⅴ

ABSTRACT ····· Ⅸ

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 이 론 ····· 4

제 1 절 레이저와 스페클의 특징 ····· 4

1-1. 레이저의 발진 원리 및 특징 ····· 4

1-2. 스페클의 형성과 특징 ····· 6

제 2 절 스페클 간섭법 ····· 10

2-1. 스페클 상관 간섭무늬 ····· 10

2-2. 면내 간섭계(In-plane ESPI) ····· 14

제 3 절 위상 추출 ····· 17

3-1. 위상이동기법(Phase shifting method) ····· 18

3-2. 결펼침(Unwrapping) ····· 20

제 4 절 용접 잔류응력 ····· 21
4-1. 잔류응력의 개념 ····· 21
4-2. 잔류응력의 발생원인 및 영향 ····· 23
4-3. 용접 잔류응력의 측정법 ····· 26

제 3 장 실험장치 및 구성 ····· 29
제 1 절 측정시스템 ····· 29
1-1. ESPI 시스템 ····· 29
1-2. UTM 시스템 ····· 31
1-3. 시험편 ····· 33
제 2 절 실험방법 ····· 37

제 4 장 실험결과 및 고찰 ····· 39
제 1 절 ESPI 실험결과 ····· 39
제 2 절 UTM 실험결과 ····· 45

제 5 장 결 론 ····· 48

참고문헌 ····· 49

- LIST OF TABLES -

Table 1 Specification of the ESPI system ····· 30

Table 2 Specification of the UTM system ····· 32

Table 3 Chemical compositions of STS304 ····· 33

Table 4 Dimension and mechanical properties of GTAW ···· 34

Table 5 ESPI phase map according to force difference variation ····· 39

Table 6 Result of Young's modulus & residual stress ····· 47

- LIST OF PHOTOGRAPHS -

Photo 1 Speckle fringe pattern ····· 13

Photo 2 UTM system ····· 31

Photo 3 Welding conditions of GTAW ····· 35

Photo 4 Equipment of ESPI & UTM system ····· 38

- LIST OF FIGURES -

Fig. 2.1 Formation of speckle pattern ····· 7

Fig. 2.2 Subjective speckle size on the CCD image plane ····· 9

Fig. 2.3 Superposition of two continuous waves ····· 11

Fig. 2.4 In-plane displacement sensitive interferometer ····· 14

Fig. 2.5 Optical path change as the object deformation ····· 15

Fig. 2.6 Residual stress of reactional butt welding ····· 22

Fig. 2.7 Schematic illustration of the heterogeneous welldments ····· 25

Fig. 2.8 Stress-strain diagram ····· 28

Fig. 3.1 Schematic of 3D-ESPI system ····· 29

Fig. 3.2 Dimension and mechanical properties of specimen · 33

Fig. 3.3 Schematic illustration of producing specimen ····· 36

Fig. 3.4 3.4 Schematic of ESPI & UTM system ····· 37

Fig. 4.1 ESPI result of deformation, tensil-force

: 5.265kg_f ····· 40

Fig. 4.2 ESPI result of deformation, tensil-force

: 7.122kg_f ····· 41

Fig. 4.3 ESPI result of deformation, tensil-force

: 9.143kg_f ····· 41

Fig. 4.4 ESPI result of deformation, tensil-force

: 11.551kg_f ····· 42

Fig. 4.5 ESPI result of deformation, tensil-force

: 14.627kg_f ····· 42

Fig. 4.6 Result of deformation profile according to force

difference variation ····· 44

Fig. 4.7 Result of strain profile according to force

difference variation ····· 44

Fig. 4.8 Result of elastic modulus : Base metal part ····· 45

Fig. 4.9 Result of elastic modulus : Welding part ····· 46

Fig. 4.10 Result of strain comparison : UTM & ESPI ····· 46

- NOMENCLATURE -

d, d_1, d_2 : Displacement of the object point

$\vec{d}$: Displacement vector of the object point

$\vec{d}_1$, $\vec{d}_2$: Component of the $\vec{d}$

k : Propagation number

n : Fringe order

$\overline{n_o}$: Normal vector along the direction of illumination

$\overline{n_s}$: Normal vector along the direction of observation

x, y, z : Cartesian coordinate axis

A : Complex amplitude

A_O : Amplitude of object beam

A_R : Amplitude of reference beam

B : Brightness of a point on monitor

E : Complex wave

E_O : Object wave

E_R : Reference wave

I : Complex intensity

I_1 : Intensity of speckle pattern with 0step phase shifting amount

I_2 : Intensity of speckle pattern with 1step phase shifting amount

I_3 : Intensity of speckle pattern with 2step phase shifting amount

I_4 : Intensity of speckle pattern with 3step phase shifting amount

I_5 : Intensity of speckle pattern with 4step phase shifting amount

I_O : Intensity of object wave

I_R : Intensity of reference wave

I_{before} : Intensity before deformation

I_{after} : Intensity after deformation

K : Proportional constant

γ : Intensity modulation

α : Quantity of phase shift

δ_x : Shearing amount of the object surface in the x direction

ϕ : Phase of beam

ϕ_O : Phase of object wave

ϕ_R : Phase of reference wave

λ : wavelength of laser

θ : Illuminating angle

θ_1 : Phase of laser beam 1

θ_2 : Phase of laser beam 2

Δ : Relative Phase change(deg)

Δd : Range resolution

$\Delta\phi$: Phase difference before and after deformation

$\Delta\phi_P$: Phase difference for the point P

$\Delta\phi_Q$: Phase difference for the point Q

Δl : Optical path length difference by $\overline{d}$

Δl_1 : Optical path length difference by $\overline{d_1}$

Δl_2 : Optical path length difference by $\overline{d_2}$

E : Modulus of elasticity

E_w : Young's modulus of weldment

E_b : Young's modulus of base metal

σ_R : Residual stress

ϵ_w : Strain of weldment

ϵ_b : Strain of base metal

ABSTRACT

Measurement of residual stress butt welding using speckle interferometry

By Baek, Sang Kyu

Advisor : Prof. Kim, Koung Suk

Dept. of Mechanical Design Engineering,

Graduate School, Chosun University

The state that exists in the bulk of some materials without application of an external load or other stress sources such as thermal gradients, is known as residual stress. They may be produced by fabrication operations such as casting, rolling, welding, heat treating or forging, or may occur during the life of a structural or mechanical component. The magnitude and distribution of residual stresses are very important to be known since the mechanical behavior of different materials will be affected when they are present.

The hole drilling method is one of the most widespread techniques for measuring residual stresses. This technique involves monitoring the strains generated by the relieved stresses when a small hole is drilled into a stressed material. These strains are usually measured by means of strain gage rosettes. However, they have some practical and economical

drawbacks. For instance, the hole must be drilled in the centre of the rosette since misalignments can cause significant errors.

The difficulty can be overcome using optical techniques. Among them, electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is a technique which is very attractive in optical metrology not only for its non-contacting nature but also for its relative speed of inspection procedure, mainly due to the use of video detection and digital image processing. The application of digital techniques in ESPI allows the automation of the data analysis process, which is usually based on the extraction of the optical phase distribution encoded by the generated correlation fringes. From these data, in-plane displacement fields can be measured over the whole surface of any rough object without making contact with it.

The objective of this study is to measure residual stress of butt welding using in-plane displacement sensitive ESPI. In experiment, the butt-welded stainless steel specimen are extended by tensile testing machine and The strain distribution at right-angle to welding line is measured by y-axis displacement sensitive ESPI and the strain profile indicates base metal and welding zone. Also, Young's modulus of base metal and welding zone are respectively determined by tensile testing. The residual stress distribution of butt-welded specimen can be estimated from the strain profile of ESPI and two Young's modules. The presented method offers improved speed of evaluation due to elimination of the surface preparation time of hole-drilling technique.

제 1 장 서 론

일반적으로 금속의 접합방법중 한 분야인 용접은 현대산업의 발전에 중요한 역할을 담당하고 있다. 용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등 다른 접합방법에 비해 높은 이음효율, 뛰어난 기밀성, 재료절감 등의 많은 장점들로 인하여 그 적용이 확대되어 왔다. 또한 현재 원자력 발전소의 원전계통 배관 파이프 및 압력용기 등의 기계공업분야나 자동차, 조선 등의 설비분야에 널리 이용되고 있으며, 특히 항공기, 로켓, 미사일등 항공우주산업에도 크게 자리잡고 있다.[1] 용접부에 하중이 작용할 때, 용접부에 결함이 있으면, 그 부위는 응력의 집중으로 균열이 발생하여 파괴된다. 또한, 용착금속의 열영향과 응고과정에서 생기는 잔류응력과 하중에 의한 응력이 연계하여 용접부의 균열개시와 균열성장거동에 많은 영향을 미친다. 용접부에 작용하는 고하중은 용접잔류응력의 완화에 있어서 직접적인 영향 때문에 용접부에서 균열성장거동의 평가에 주된 요인으로 고려되며, 저하중에서 용접잔류응력은 용접부의 파손 및 균열개시에 영향을 미치는 중요요인으로 고려되고 있다.[2~6]

최근 각종 구조물에 사용되는 판재는 사용조건이나 하중조건도 점차 다양해지고 있으며, 신소재의 개발과 함께 산업 전반에 걸쳐 이러한 소형화, 경량화와 함께 고강도화의 요구에 부응하여 사용이 늘어나고 있다.[7] 산업적으로 응용하기 위해서는 그 재질의 인장, 압축에 대한 변위 측정과 용접 응력분포 및 잔류응력 측정 등이 필요하다. 현재 스테인레스 강재인 STS304는 강도와 재질면에서 우수하여 발전소의 원전배관에 주로 사용된다. 그러나 이러한 특성에도 불구하고 용접부만큼은 짧은 시간에 국부적으로 고열을 수반하는 복잡한 야금적 접합이 이루어지기 때문에, 제작 과정에서 열적 손상에 의한 결함을 초래하게 된다. 이때 발생하는 결함에는 용입불량, 기공, 불순물혼입 및 균일 등이 있고, 이것들의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성파괴를 초래하기도 한다. 이러한 잔류응력이 재료의 기계적 성질이나 구조물의 역하적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 잔류응력의 분포를 정량적으로

평가하는 방법을 확립하여야 하며, 그에 대한 잔류응력의 측정방법 및 해석에 관한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다. 잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 크게 이론적인 방법과 실험적인 계측방법이 있다. 이론적인 해석 방법은 응력-변형율과 탄성계수 등 필요한 물리상수를 이용하여 계산할 수 있다. 이 이론적인 방법은 계산과정에서 사용되는 여러 가지 변수 및 역학적인 복잡성에 의해 계산의 정도가 낮아질 수 있다. 이와 같은 이유로 실험적인 방법에 의해서 잔류응력이 측정되는데 실험적인 잔류응력의 측정방법에는 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 다시 나누어지고 있다. 파괴적인 방법은 여러 가지 확립된 방법이 있으나 측정 대상체를 파괴시켜야 한다는 근본적인 문제점이 있는 반면 비파괴적인 방법은 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질(초음파 속도, Barkhausen)을 측정함으로써 잔류응력을 측정하기 때문에 이 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들(현미경 조직, 집합조직)의 영향력을 배제시켜 줄 필요성이 있다. 한편 구멍 뚫기 방법(Hole Drilling Method)과 같이 반 비파괴적인 방법도 많이 쓰이고 있으나 이는 두께 방향의 응력분포가 심하지 않아야 하며 존재하는 잔류응력이 항복응력의 반을 넘지 않아야 된다는 조건이 필요하고 미세한 구멍이나마 측정대상물에 손상을 주어야 한다. 최근에 잔류응력의 측정은 비파괴적인 방법으로 나아가고 있으며 X-ray 회절, 중성자 회절, 초음파, 자기적 방법 등이 다양히 연구되고 있다. 그 중 비파괴적 방법으로 본 실험에 사용된 레이저를 이용한 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle pattern Interferometry: ESPI)은 대상물체의 표면변위를 실시간 및 고분해능으로 측정한다는 장점을 가지고 있으며, 화상처리장치를 이용함으로써 간섭 줄무늬를 해석하는데 가장 보편적인 광계측 기술로 발전하였다. 이 기술은 대상체의 면내・외 변위 측정, 미소 진동 측정, 초고온에서의 변형 측정 해석에 주로 이용되고 있다.[8~18]

따라서 본 연구에서는 스테인레스강 STS304를 Ar가스 GTAW 맞대기 용접하여 인장시험편을 제작한 후, UTM system으로 인장시험편의 탄성계수값을 구하고 하중을 가할 때 스페클간섭법인 ESPI로 면내변위를 관찰함과 동

시에 용접부위에서 응력분포의 잔류응력값을 측정하고자 하였다. 이를 기반으로 향후 타 검사기법과의 비교 및 신뢰성 검증을 위한 실험을 지속해 나간다면 용접공정에 따른 잔류응력 측정기법에 있어 스페클 간섭법이 신뢰성있는 비파괴 검사기술로 정착되리라 기대한다.

제 2 장 이 론

제 1 절 레이저와 스페클의 특징

1. 레이저의 발진원리 및 특징

레이저는 원자핵 주위를 도는 기저상태에 있는 전자를 자극시켜 여기상태로 된 다음 다시 기저상태로 천이될 때 에너지를 방출하게 된다. 기저상태에서 여기된 원자가 여기상태에서 비교적 수명이 길어 기저상태의 원자 수보다 여기상태의 원자수가 더 많게 된다. 이와 같은 상태를 반전분포라 한다. 따라서, 에너지 준위가 높은 상태에서 자연전이가 일어나기 전에 광자가 입사하면 이 광자가 자격하여 일종의 공명현상을 일으켜 원자는 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 천이할 때 광자(전자파)를 방출하는데 이것을 유도방출이라 한다. 이와 같은 원리에 의한 LASER는 “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”의 머리글자를 따서 만들어진 말로 “복사의 유도방출에 의한 광증폭”을 뜻한다. 이는 1950년대 초반에 메이저(Maser)가 개발된 이후 이 원리를 가시광선 영역으로 확장시키고자 1958년 Schawlow, Townes에 의해 이론적으로 제안된 이후 1960년 Maiman에 의해 세계 최초의 레이저인 루비 레이저가 발진되었다.[9]

레이저의 특징은 크게 간섭성, 단색성, 지향성, 고휘도성 4가지로 말할 수 있다. 첫 번째 레이저 광은 음파와 같이 시간적, 공간적으로 위상을 유지한다. 전등 또는 형광등의 보통 광원은 공간적, 시간적으로 일정하지 못함은 물론 광파의 진폭, 주파수가 서로 다른 불규칙한 파의 집합으로 간섭현상이 일어나지 않는다. 파동의 간섭성은 임의의 파가 정확한 사인 곡선과 같은 형태로 전파됨을 말하고, 부분적 파의 간섭현상은 제한된 시간과 공간 내에서 관측되어진 파형이 사인파인 경우를 말한다. 특히 시간적 관점에서 보면, 부분적인 간섭 현상은 시간적 간섭성이라 하며 시간적 간섭은 하나의 연속광선을

간섭계를 사용하여 두 개의 서로 다른 광 경로를 가진 두 개의 광선으로 광 경로의 차가 시간지연을 나타내게 될 때 스크린에 간섭무늬를 나타낸다. 간섭무늬의 명암 밝기는 시간 지연에 의하여 생겨진 것이기 때문이다. 두 번째 단색성이란 단일 주파수, 즉 단일 색으로 구성된 빛을 말한다. 세 번째 레이저 파면은 평면 또는 약간의 곡률을 가진 구면을 하고 있어서, 다른 방향으로 나아가는 파동은 섞여 있지 않다. 그러므로 좁은 각도의 범위에 일정한 에너지가 집중하고 있는 것이다. 따라서 레이저 광은 가늘고 긴 광으로 보통 광원과 다르다는 것을 알 수 있다. 네 번째 레이저 광은 평행도가 우수하고 퍼짐성이 아주 적은 광이기 때문에 렌즈로 집광하면 파장의 수 배 정도로 집광이 가능하다. 레이저 광의 휘도성이 높다는 것은 빛의 에너지가 고밀도로 됨을 의미한다.[9]

이와 같은 레이저의 특징을 이용하여 오늘날 레이저는 비디오, CD-ROM에서 디스크를 읽어내고, 공장에서 강철을 자르거나 붙이고, 슈퍼마켓에서 바코드를 읽어내며, 병원에서 절개, 봉합, 암 조직 제거 등에 쓰이고, 시계, 계산기, 컴퓨터의 수백만 개의 광 표시 장치가 전 세계적으로 빛을 발하고 있다. 이처럼 현대 산업에서 빼놓을 수 없는 레이저는 주변산업의 발전과 함께 다양한 분야에서의 적용으로 발전을 거듭하고 있다. 특히 통신 분야 및 정보처리, 계측, 의료, 생활기기, 우주과학 분야 등에서 중요한 부분을 차지하고 있다.

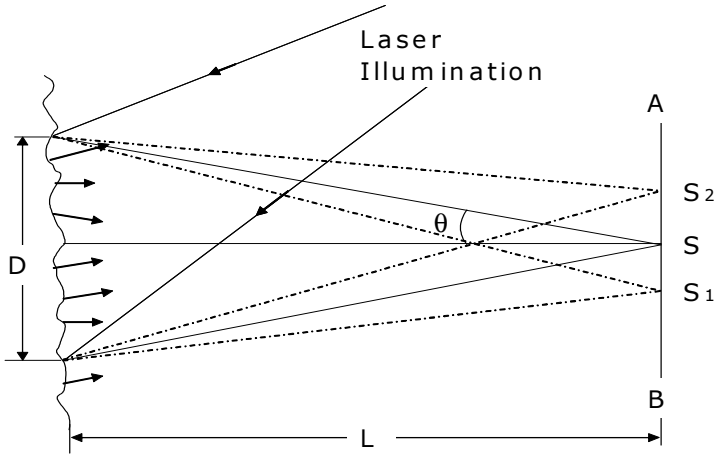
급속한 레이저 산업의 발전은 여느 통계적 자료에서도 볼 수 있듯이 국가 경쟁력에도 큰 영향을 미치고 있으며, 특히, 본 논문에서 소개하고자 하는 비파괴 계측분야에서도 그 활용가치를 더해가고 있다. 본 논문에 사용된 비파괴검사 기법인 SPI(Speckle Pattern Interferometry)는 최근 레이저 계측분야에서 두드러지게 사용되고 있으며 이를 응용한 계측기의 국산화, 이미지 화상처리 알고리즘 개발 등의 관련기술의 발달로 더욱 정밀하고 정확한 측정이 가능할 것으로 전망하고 있다.

2. 스페클의 형성과 특징

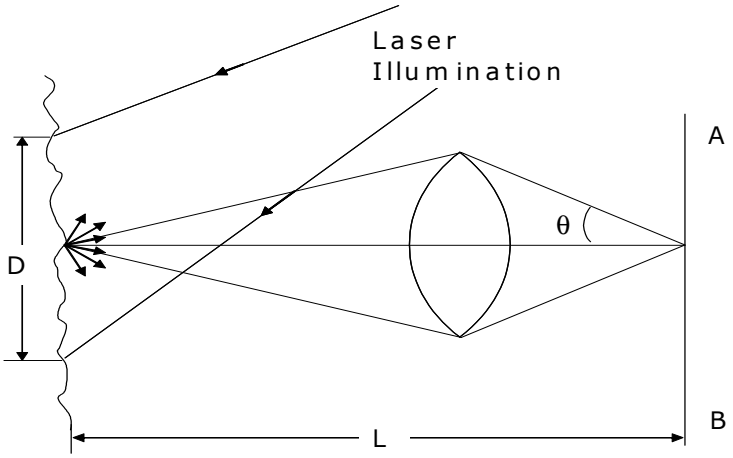
레이저 스페클(laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클패턴(speckle pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광 검출기에 광강도(intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 대상체의 스페클(objective speckle)과 참조된 스페클(subjective speckle)로 나누어진다. Fig. 2-1은 대상체의 스페클과 참조된 스페클의 형성을 보여 주고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별되며, 그 크기 또한 다르게 된다. 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다33. 대상체의 스페클 크기의 정의는 물체표면의 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 AB 면(viewing plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식 (2-1)로 대상체의 스페클의 크기를 정의하고 있다.[12]

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

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



a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2.1 Formation of speckle pattern

스페클 상관 간섭법 (speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 참조된 스페클의 크기에 의존하게 된다. 참조된 스페클은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의를 하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 대상체의 스

페클과는 다르게 정의하고 있다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로 물체의 한점과 결상면의 한 점은 1:1 대응이라 할 수 있다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못함으로, 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 참조된 스페클의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 초기 최대점과 첫 번째 최소점사이의 거리(Bessel 함수의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 참조된 스페클의 크기는 식 (2-2)와 같이 정의된다.

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

여기에서 M: 렌즈 확대배율, λ: 조사된 레이저의 파장, F: 렌즈의 f-number 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 줌렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6 배(1/2 inch 비율 CCD 카메라와 15 inch 모니터(화소거리: 0.297 mm))를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 크기는 37.07 mm가 된다. 또한 참조된 스페클의 물체표면에서 크기는

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

으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, 동일한 면과 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는

스페클의 크기가 2배로 커지게 된다.[14] 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD 화소 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

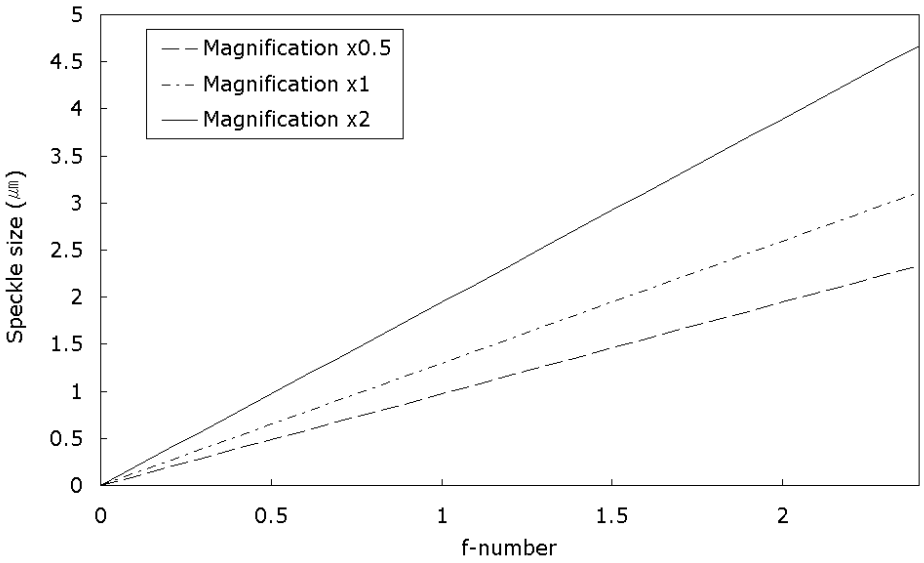


Fig. 2.2 Subjective speckle size on the CCD image plane

Fig. 2.2는 광학배율과 f-number에 따른 CCD 촬상소자에 형성되는 스페클의 크기를 나타내었다. 스페클의 크기가 CCD cell 크기보다 작을 경우에 광강도는 형성적인 스페클패턴의 합성 또는 매끄러운 상태로 관찰되게 된다.

제 2 절 스페클 간섭법

1. 스페클 상관 간섭무늬

스페클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)는 물체의 변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있으며, 상관간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형전의 스페클 패턴을 기준으로 물체변형에 따른 스페클패턴의 변화를 연속으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있다. 스페클 상관간섭무늬 형성을 위한 간섭계는 민감도를 높이기 위해 참조광을 사용하는데, 참조광의 종류에 따라 스페클 패턴과 동일한 면의 합성, 두 스페클패턴의 합성으로 나눌 수 있다. ESPI에서는 전자의 경우를 면외변위 측정 간섭계로 많이 사용하고, 후자를 면내변위측정 간섭계로 많이 사용하고 있다. 일반적으로 물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광, 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광이라 한다. Fig. 2.3은 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.

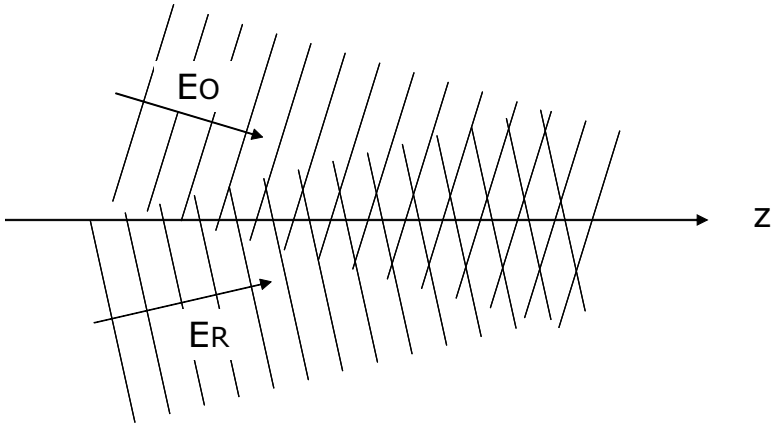


Fig. 2.3 Superposition of two continuous wave

$$E_O = A_O \cos(\delta_O - wt)$$
$$E_R = A_R \cos(\delta_R - wt) \qquad (2\text{-}4)$$

여기서 E_O : 물체광, A_O : 물체광의 진폭, δ_O : 물체광의 초기위상, E_R : 참조광, A_R : 참조광의 진폭, δ_R : 참조광의 초기위상, w : 전파속도, t : 시간이다. 참조광과 물체광은 간섭계에 의해 같은 공간상에서 선형적인 중첩할 수 있으며, 이때 발생한 합성광 E는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = E_R + E_O \qquad (2\text{-}5)$$

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

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

여기서 I: 합성광의 광강도, I_R : 참조광의 광강도, I_O : 물체광의 광강도 ϕ : 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.

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

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

여기서 I_{before} : 물체변형전의 광강도, I_{after} : 물체변형후의 광강도, $\Delta\phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스페클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-9)와 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} I_{sub} &= I_{before} - I_{after} \\ &= 4\sqrt{I_O I_R}\sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\sin(\frac{1}{2}\Delta\phi) \end{aligned} \qquad (2\text{-}9)$$

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

$$B = K\left|\sqrt{I_O I_R}\,\sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\,\sin(\frac{1}{2}\Delta\phi)\right| \qquad (2\text{-}10)$$

여기서 K는 모니터 밝기분포 상수이다. 식 (2-10)과 같이 변형 전후의 스페클을 감산 처리함으로서 나타나는 줄무늬를 스페클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)라고 한다. 식 (2-10)에서 물체의 변형에 따른 위상변화($\Delta\phi$)를 추출함으로서 물체의 변형을 측정할 수 있다.

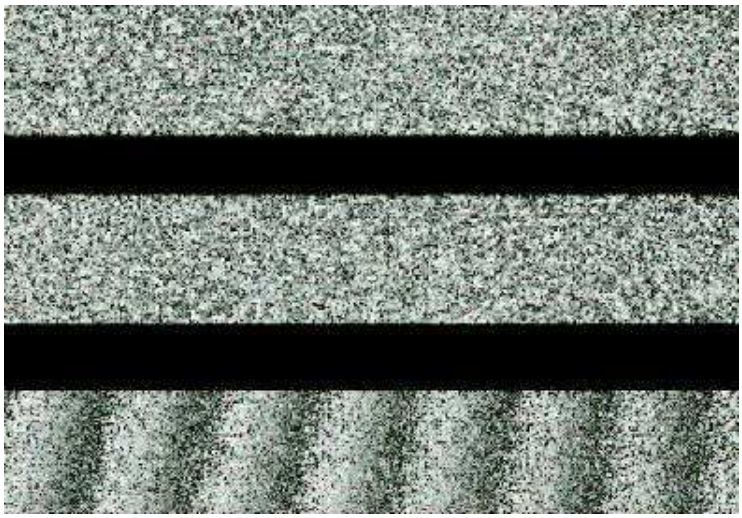


Photo 1 Speckle fringe pattern

2. 면내 간섭계(In-plane ESPI)

Fig. 2.4는 면내변위 측정을 위해 본 논문에서 사용한 간섭의 개략도이다. 조사되는 두 개의 레이저광은 조사면에 대해 같은 각도 θ로 두 방향에서 조사하게 되며, 조사된 레이저광은 각각 물체표면에서 스페클패턴을 형성하고 각 스페클패턴은 다시 간섭하여 제 2의 스페클패턴을 형성하게 된다. 제 2의 스페클패턴은 조사된 레이저광의 위상차에 의해 형성이 되며, 조사광의 광경로를 추적함으로서 물체 변위와 레이저광의 위상과의 상관관계를 규명할 수 있다.[15]

Fig. 2.5는 레이저로부터 결상면(Image plan, CCD camera)까지의 조사광 1(illumination 1)의 광경로를 나타낸 것이며, 이 때 광경로(δ_1)를 식 (2-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}[\, d_z \cos\Theta_i \cos\Theta_d + d_z \cos\Theta_v \cos\Theta_d + d_x \sin\Theta_i \sin\Theta_d - d_x \sin\Theta_v \sin\Theta_d] \tag{2-11}$$

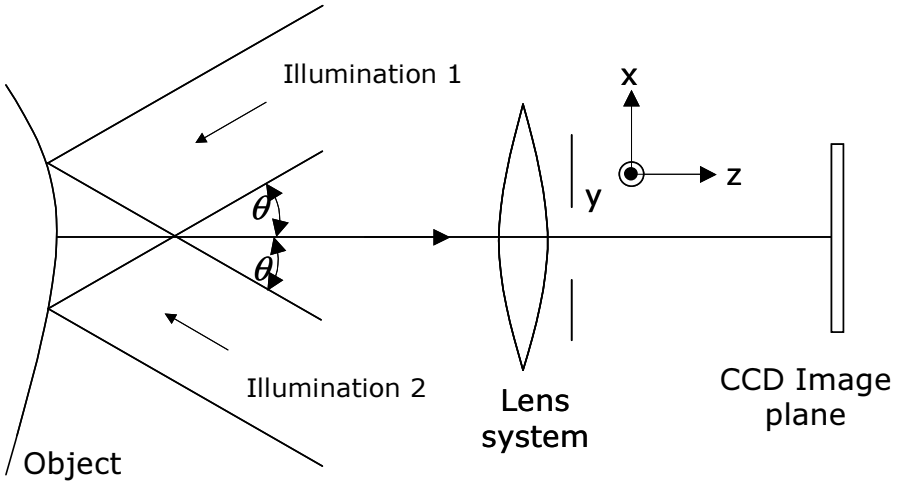


Fig. 2.4 In-plane displacement sensitive interferometer

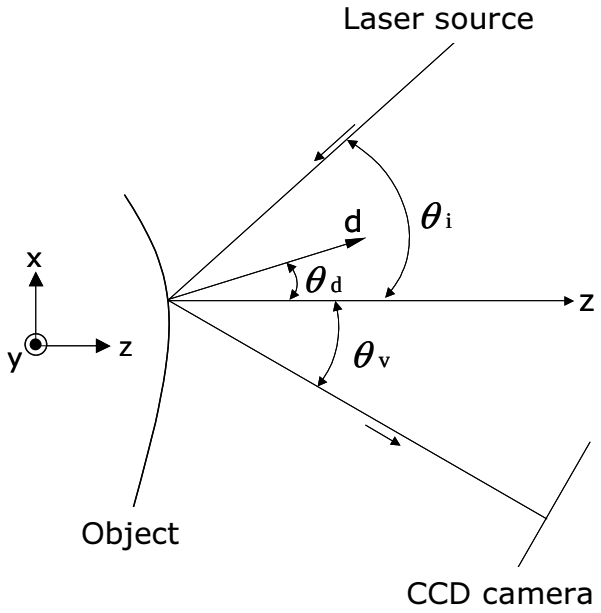


Fig. 2.5 Optical path change as the object deformation

여기에서 λ는 레이저의 파장, d_z는 물체의 z축 방향의 변위, d_x는 물체의 x축 방향의 변위이다. 간섭계에서는 결상면을 수직으로 위치하고, 물체와 결상면와의 측정거리가 크므로 $\theta_v \approx 0$ 이 될 수 있다. 따라서 식 (2-11)은 식 (2-12)와 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}[\, d_z(1+\cos\Theta_i)\cos\Theta_d + d_x \sin\Theta_i \sin\Theta_d] \qquad (2\text{-}12)$$

광로 2(illumination 2)에 대해서 광경로 차이를 다시 유도하면 식 (2-13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda}[\, d_z(1+\cos\Theta_i)\cos\Theta_d - d_x\sin\Theta_i\sin\Theta_d] \qquad (2\text{-}13)$$

면내 변위 측정간섭계에서는 두 개의 조사광의 광로차에 의해 제 3의 스페클이 형성되며, 이 때의 위상차(ϕ)를 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \delta_1 - \delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda}[\, d_x\sin\Theta_i\sin\Theta_d] \qquad (2\text{-}14)$$

즉, 면내변위 측정간섭계에서 면외변위 성분(d_z)은 제거가 되며 변위의 면내변위 성분(d_x)만을 측정할 수 있게 된다. 변위성분에 대해서 식 (4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d_x = \frac{\phi}{\sin\Theta_i\sin\Theta_d} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \qquad (2\text{-}15)$$

식 (2-15)에서 알 수 있듯이 면내변위 간섭계를 이용하여 물체의 면내변위 성분(d_x)측정, 즉 스페클패턴을 형성하기 위해서는 조사각도 및 조사광을 최대한 일치시켜야 만이 물체표면에서의 선명한 줄무늬를 얻을 수 있다.

제 3 절 위상추출

식 (2-9)에서 물체의 변형에 따른 위상변화를 추출하기 위해서는 4개의 미지수가 존재하게 되어 물체의 변형위상을 직접 추출할 수 없게 된다. 물체의 변형위상을 추출하는 방법으로 등간격의 프린지패턴에 대해 화상처리를 이용하여 프린지 패턴으로부터 선을 추출하고 이 사이를 보간함으로서 물체의 변형을 추출하는 방법,[15] 상관간섭무늬 분포에 대한 2D 감산 및 합산 처리에 의한 방법(2D subtraction-addition method),[16] 공간 위상이동기법(spatial phase shifting method)을 이용한 위상의 추출[17] 등의 다양한 방법으로 위상을 추출하게 된다. 이러한 방법 중에서 K. Creath[18] 에 의해 제안된 시간의 존성 위상이동기법(temporal phase shifting method)은 가장 적용이 용이하고 효과적인 방법이다. 이 위상이동기법은 식 (2-7)에서 3개의 미지수 (I_1, I_2, ϕ)를 구하기 위해 PZT(piezo-electro transducer)를 참조광의 광경로에 삽입하여 위상변조를 하여 최소 3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구할 수 있는 방법이다. 위상이동기법을 적용하여 변형 전과 후의 위상을 구함으로서 물체의 변형위상을 직접 추출할 수가 있다.

1. 위상이동기법(phase shifting method)

PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 위상추출 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 π/2씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식 (2-29)와 같이 얻게 된다.

$$
\begin{aligned}
I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos\Phi \\
I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\Phi + \pi/2) \\
I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\Phi + \pi) \\
I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\Phi + 3\pi/2)
\end{aligned}
\qquad (2\text{-}29)
$$

4개의 방정식을 식 (2-30)과 같이 조합하여 CCD 화소의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(phase map)를 형성하게 된다.

$$
\Phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \qquad (2\text{-}30)
$$

ESPI에서 변형해석을 위한 실험에서는 식(2-10)의 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(Φ_{before})과 변형후의 위상(Φ_{after})을 각각 구하고 그 차를 구함으로서 실제 물체변형을 식 (2-31)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \tag{2-31}$$

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

2. 결펼침(Unwrapping)

결펼침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 식 (2-30)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 결펼침은 식 (2-32)을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_{w} + (2\pi \times \mathcal{N}) \qquad (2\text{-}32)$$

여기에 ϕ_{unw} : unwrapped phase, ϕ_{w} : wrapped phase, $\mathcal{N}$: fringe order 이다.

결펼침을 위한 차수($\mathcal{N}$)의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 화소 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면 $\mathcal{N}$을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다. 본 연구에서는 위상이동 및 결펼침 알고리즘을 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH., Germany)를 이용하였다.

제 4 절 용접 잔류응력

1. 잔류응력의 개념

잔류응력(residual stress)이란 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력을 말한다. 용접이음에는 물체에 외력이 작용하지 않아도 용접부의 온도변화에 따라서 응력이 발생하고, 특히 냉각시의 수축응력이 커지므로, 완전히 실온에서 냉각한 후에는 어떤크기의 응력이 잔류한다. 이 잔류응력은 이음현상, 용접입열, 판두께, 모재의 크기, 용착순서, 용접순서, 외적구속 등의 인자에 의하여 영향을 받는다. 특히, 후판에서는 모재의 변형이 거의 허용되지 않으므로 잔류응력이 크게 되고, 그 때문에 용접부가 갈라지는 경우가 있다. 또, 박판에서는 모재가 변형되기 쉬우므로 잔류응력은 작아지지만, 그 대신 용접변형이 매우 크게 되고, 실제의 제품에서는 매우 곤란한 문제로 된다.

예를 들면, Fig. 2.6과 같이 양끝을 고정한 판을 맞대기 용접한 경우의 잔류응력으로서는 양끝의 외적구속의 결과 용접부에서 떨어진 단면(a-a') 에서도 큰 인장응력이 생기면, 이것을 구속응력(reaction stress or locked-in stress)이라 한다. 또, 용접선에 직각인 횡단면(c-c') 내에는 용접 비드의 부근에 큰 인장응력이 생기고 있으며, 그 양쪽에는 낮은 압축응력의 영역이 있다. 또, a-a'로 절단하면 용접선에 평행한 b-b'단면의 직각응력분포는 중앙에 인장응력, 양쪽에 수축응력이 작용한다.[19]

이러한 잔류응력의 변화로 소재의 뒤틀림을 초래하며, 잔류응력의 평형상태는 장기간에 걸쳐 서서히 이루어지는 응력 이완 현상에 의해서도 깨어질 수 있으며, 이 경우 부품의 형상이나 치수는 이 기간동안 조금씩 변형된다. 정밀기계나 측정장비들의 경우에는 이러한 치수변화가 중요한 고려대상이 될 수 있다.[20]

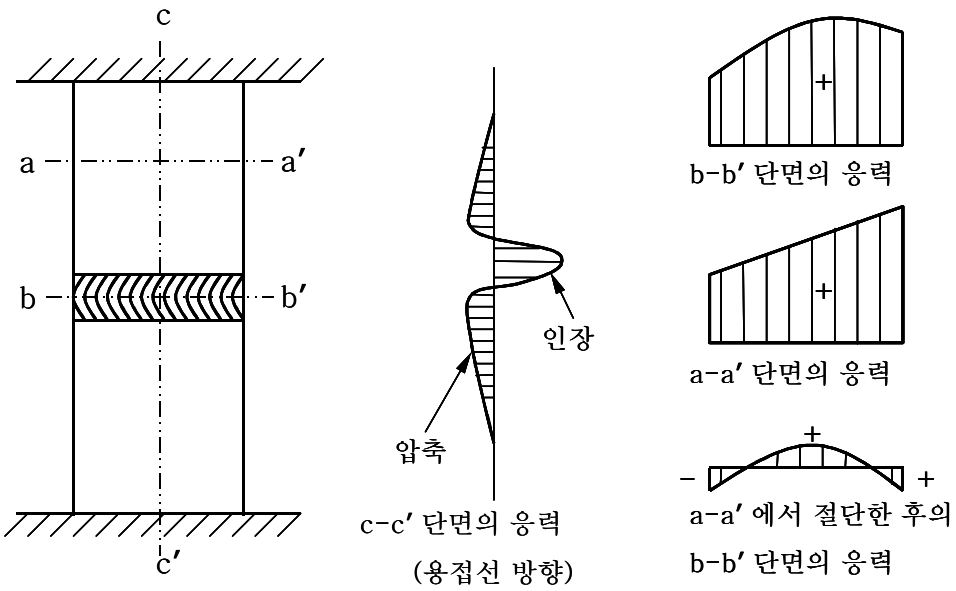


Fig. 2.6 Residual stress of reactional butt welding

2. 잔류응력의 발생원인 및 영향

잔류응력을 유발시키는 발생원인으로는 크게 세가지로 나눌 수 있다.

▪ 첫째, 불균일한 가열에 의해 나타나는 결과로서 가열 및 냉각시 온도기울기에 의존하는 응력이며 용접 잔류응력의 주원인이다.

▪ 둘째, 용접 전의 이력상태로 부재가 압연 또는 인발재일 때 이미 잔류응력을 갖고 있으며 이 잔류응력은 경우에 따라 용접에 의한 잔류응력과 중첩한다.

▪ 셋째, 조직의 변화에 의해 발생하는 응력으로 변태에 의한 비용적인 변화에 의해 발생한다.

용접에 의한 잔류응력의 발생은 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 용접부분에서 열응력에 의한 것이다. 이 발생과정은 열처리나 냉간가공의 경우와 비교했을 때 단순하지만 실제로는 잔류응력의 발생 상황은 용접이 행해지는 부재의 형상, 치수, 시행방법 및 용접법에 따라 다르며 상당히 복잡하다. 특히, 용접구조물의 강도에 대해서 잔류응력의 영향은 중요한 문제이고 이 크기, 분포의 상태에 따라서 취성파괴, 피로파괴, 응력부식균열 등 각 종류의 파손에 나쁜 영향을 준다. 또한 용접과 동시에 발생한 각종의 변형도 설계상 중요한 문제이다. 실제로 변형이 생기지 않게 구속하면 잔류응력은 증가하게 되고, 잔류응력을 생기지 않게 구속시키지 않고 용접하면 변형이 크게 나타난다.[20]

잔류응력이 미치는 영향에 대해 알아보자. 용접잔류응력의 값은 설계응력에 비해서 훨씬 크므로, 그것이 구조물의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 실행되어, 현재로서는 다음과 같이 결론지어지고 있다.

▪ 정적강도(연성파괴) : 물체에 인장 외력을 가할 시 항복점 근처가 되면 잔류응력이 거의 소실되어 버리기 때문에 재료에 연성이 있고 파괴까지 어느 정도 소성변형이 일어나는 경우에는 잔류응력은 강도에 영향을 미치지 않는다.

▪ 취성파괴 : 재료가 연성이 없이 거의 소성변형하지 않고 파괴되는 경우에는 잔류응력의 영향이 나타난다.

▪ 피로강도 : 용접이음의 피로균열은 덧살이 있는 경우는 통상 토우(toe)로부터 혹은 비드의 시종단과 같이 응력집중이 큰 부분부터 발생되기 쉽다. 덧살이 있는 경우의 피로강도는 모재 혹은 평활하게 절삭한 이음에 비해 상당히 낮은 편이다.

▪ 응력부식 : 응력이 존재하는 상태에서는 어떤 환경하에서 재료의 부식이 촉진된다.

▪ 시효변경 : 잔류응력이 있는 금속구조물은 오랜 시간의 경과 중에 서서히 잔류응력이 감소되어 탄성변형을 일으킨다. 이것은 정밀기계나 공작기계에 있어서는 바람직하지 못하므로 사전에 응력제거 열처리를 하고 있다.[21]

강재의 용접부는 용접금속, 열영향부(heat affected zone), 모재의 세부분으로 크게 나눌 수 있다. 용접금속은 모재 및 용가재가 정련반응을 수반하여 용융 혼합되어 응고한 조직을 가리킨다. 한편 용융금속에 인접한 열영향부는 용접열에 의해서 용융점 직하에서 광범위한 각 온도로 급속 가열・냉각된 부분이다. 열영향부의 재질변화는 각 부분이 받은 열 사이클에 지배된다. 각 위치에 따른 재질 변화 상황을 Fig. 2.7에 나타내었다. 용접금속과 열영향부의 경계는 용융선 또는 용융경계부로 불리운다. 용융선 근처는 용융점 또는 응고 온도범위까지 가열되어 용접금속과 열영향부간의 원소가 확산 이동하여, 소위 천이영역(transition region)을 형성하기 때문에 금속조직학적으로 매우 문제가 많은 부분이다. 또한, 용접 용융선 근처와 열영향부의 조립역에서는 과열에 의해 결정립이 조대화되어 경화되고 균열이 발생하는 등 용접특성의 저하가 일어나기 쉽다. 따라서 열영향부는 용접금속과 용접이음부 성능면에서 가장 큰 문제를 일으키는 부분이다.[20]

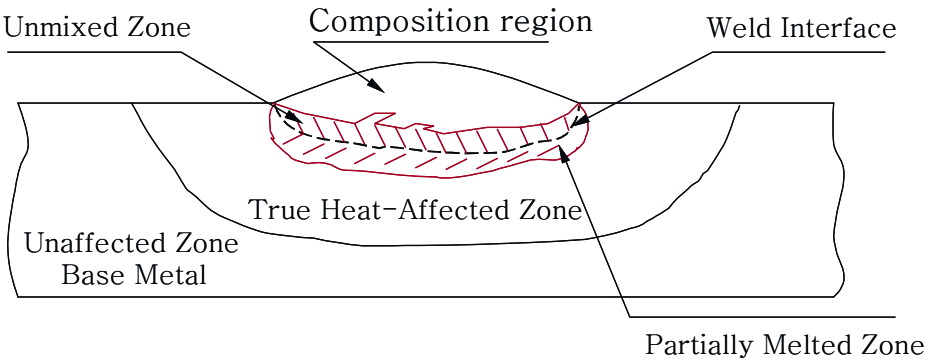


Fig. 2.7 Schematic illustration of the heterogeneous welldments

3. 용접 잔류응력의 측정법

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 용접부위의 불균일한 온도분포에 중점을 두고 있다. 이러한 온도분포에 의해 용접부 주위에서는 복잡한 응력변화가 발생하며 냉각 후에 응력이 잔류하게 되고 용접변형이 발생하게 된다. 또한 용접에 의한 잔류응력은 정적강도, 취성파괴, 피로강도, 응력부식, 시효변형 등에 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 이에따라 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하여야 한다. 잔류응력의 분포를 구하는 방법에는 이론적인 방법과 실험적인 계측방법이 있다.[20]

이론적인 해석 방법은 응력-변형율과 탄성계수 등 필요한 물리상수를 이용하여 계산할 수 있다. 이 이론적인 방법은 계산과정에서 사용되는 여러 가지 변수 및 역학적인 복잡성에 의해 계산의 정도가 낮아질 수 있다. 이와 같은 이유로 실험적인 방법에 의해서 잔류응력이 측정되는데 실험적인 잔류응력의 측정방법에는 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 다시 나누어지고 있다. 파괴적인 방법은 여러 가지 확립된 방법이 있으나 측정 대상체를 파괴시켜야 한다는 근본적인 문제점이 있는 반면 비파괴적인 방법은 잔류응력과 상관관계가 있는 물리적 성질(초음파 속도, Barkhausen)을 측정함으로써 잔류응력을 측정하기 때문에 이 물리적 성질에 영향을 주는 다른 인자들(현미경 조직, 집합조직)의 영향력을 배제시켜 줄 필요성이 있다. 한편 구멍 뚫기 방법(hole drilling method)과 같이 반 비파괴적인 방법도 많이 쓰이고 있으나 이는 두께 방향의 응력분포가 심하지 않아야 하며 존재하는 잔류응력이 항복응력의 반을 넘지 않아야 된다는 조건이 필요하고 미세한 구멍이나마 측정대상물에 손상을 주어야 한다. 최근에 잔류응력의 측정은 비파괴적인 방법으로 나아가고 있으며 X-ray 회절, 중성자 회절, 초음파, 자기적 방법, 레이저를 이용한 스페클간섭법 등이 다양히 연구되고 있다.[20]

대부분의 금속, 목재, 플라스틱 및 세라믹을 포함하는 많은 구조용 재료는 초기에 하중이 작용할 때, 탄성적이며 선형적으로 거동한다. 따라서, 이들의

응력-변형률 곡선은 원점을 통과하는 직선으로 시작된다.[22] 마찬가지로, 구조용 강의 응력-변형률 곡선은 Fig. 2.8처럼 원점 O에서 비례한도(점 A)까지 선형적이며 탄성적인 영역을 갖는다. 이에따라 시험편의 모재 및 용접시험편을 각각 하중을 가하여 인장시켰을 때, 그래프를 통해 선형탄성영역에서 응력-변형률 선도의 기울기인 재료의 **탄성계수**(modulus of elasticity) E값을 구할 수 있다.

단순인장을 받는 시험편에 대한 응력과 변형률 사이의 선형적인 관계는 유명한 영국 과학자인 Robert Hooke(1635~1703)의 이름을 따라 **Hooke의 법칙**(**Hooke's low**)의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2-33}$$

여기서 σ는 축응력, ϵ은 축변형률, E는 탄성계수로 알려진 비례상수이다. 식 (2-33)은 모재시험편에 해당되고, 용접시험편은 잔류응력이 존재하기에 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_R + \sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2-34}$$

σ_R은 잔류응력이다. 모재시험편의 식을 용접시험편에 대입하여 정리하면,

$$\sigma_R = E_w \cdot \varepsilon_w - E_b \cdot \varepsilon_b \tag{2-35}$$

여기서 R:residual stress, W:weldment, B:base metal이다.

또한, 모재부의 UTM & ESPI의 변형률차가 0이라면, 용접부의 잔류응력변형을 식 (2-36)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{if}, \epsilon_b = \frac{P}{AE} - \epsilon_{ESPI} = 0 \ , \quad \epsilon_w = \frac{P}{AE_w} - \epsilon_{ESPI} = \epsilon' \tag{2-36}$$

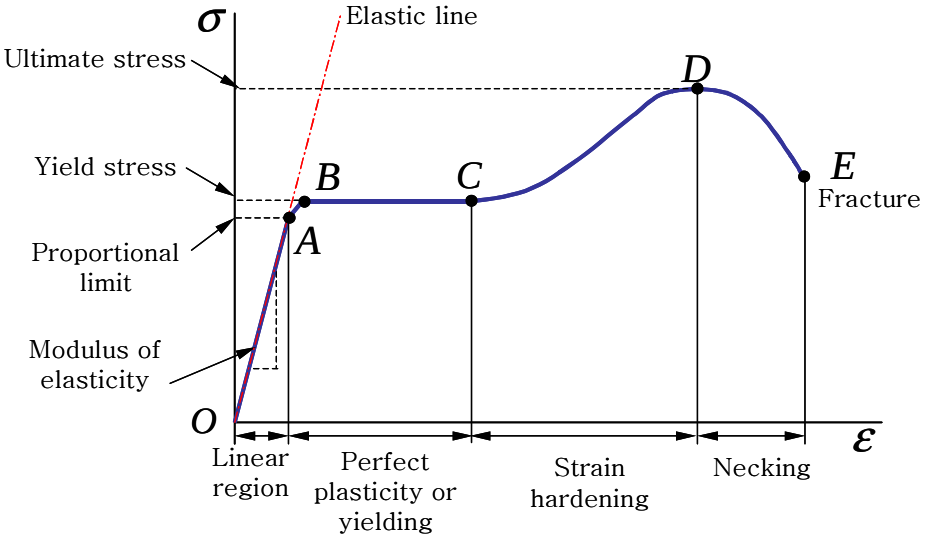


Fig. 2.8 Stress-strain diagram

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 측정시스템

1. ESPI 시스템

ESPI 실험장치는 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며 구성은 Fig. 3.1과 같이 532 nm 파장의 Nd:YAG Laser source, ESPI sensor, 532 nm 파장의 Nd:YAG Laser source 전용 광파이버(glass fiber couple), PZT(Piezo-electric transducer) 제어장치, 화상처리장치(Image processing system)로 구성하였다.

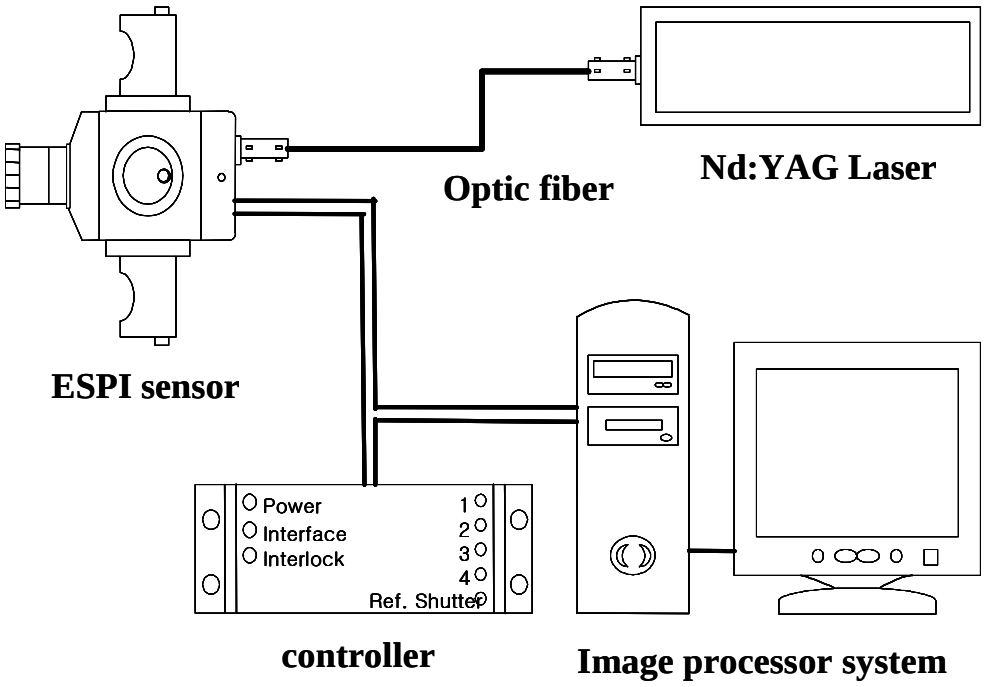


Fig. 3.1 Schematic of 3D-ESPI System

ESPI 시스템은 종전의 광학정반에서 여러 가지 광학부품을 사용하여 구성한 면내 및 면외 변위 측정 간섭계를 축소하여 진동 및 기타 여러 외란요소를 최소화하여 제작된 것으로서 광학 정반에서 간섭계를 꾸며 실험했을 때보다 환경적인 영향을 적게 받는다. 최초 레이저 소스로부터 광파이버를 통하여 레이저 빔이 센서 헤더로 입사되면 4개의 암으로 고르게 나누어져 대상체에 확산된 레이저 빔이 조사된다. 면내 변위 측정을 위해서는 이 4개의 암 중에서 하나 즉, 물체광과 센서 내부에서 CCD로 바로 들어가는 참조광이 만나 간섭을 일으켜 면내 변위를 측정하게 된다. Table 1에서는 ESPI 시스템의 제원을 나타냈다. 레이저 광원은 코히런트사의 Nd:YAG 레이저로서 파장은 532㎚이며 출력은 최대 2W이다

Table 1 Specification of the ESPI system

3D - ESPI System	
Description	**Technical data**
Measuring Sensitivity	0.03- 1㎛ adjustable
Measuring range	static 1 - 20 μm per measuring step, any with serial measurement dynamic 0.3 - 3 μm amplitude
Measuring area	static up to 1 m^2 dynamic up to 400×600 mm^3 (16"×24")
Working distance	variable, 0.1 ... > 2.5m(4 ... >60")
Operation modes	automatic, manual, static, dynamic 1D-,2D-, 3D-operation
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D-analysis
Data analysis	automatic or semi automatic

2. UTM 시스템

UTM(universal testing machine) 실험장치는 만능재료시험기로서 일본 SHIMADZU사의 상용 시스템을 이용하였으며 구성은 Photo 1 과 같이 크게 Main frame(floor-type)과 Control panel, 그리고 PC로 구성되어 있다.

Photo 2 UTM(Universal Testing Machine) system

UTM 시스템은 만능재료시험기로써 고강성의 프레임으로 인장시험, 압축시험, 굽힘시험, 점착시험 등 장기간의 시험이 가능하고 고속 샘플링으로보다 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 하중의 분해능이 1/500이고, 시험속도는 0.0005~1000mm/min, 정밀도는 ±0.5% 이내로 고정도의 시험이 가능한 각종 규격에 따른 시험・검사기기이다. Table 2에는 UTM 시스템의 제원을 나타내었다.

Table 2 Specification of the UTM system

UTM System	
Description	Technical data
Model name	AG-100kN IS / Floor type
Capacity	100kN
Crosshead speed range	0.0005~1000 mm/min
Crosshead-table clearance (tensile stroke)	Max. 1250mm (760mm)
Range	1,2,3,10,20,50,100 times (7steps)
Accessories Load cell	For 100kN
Frame rigidity (approx.)	300kN/mm
Dimensions main frame	W×D×H(mm) = 1170×750×2162
Precision	Within±0.5% if displayed test force Conforms to JIS B7721 class 0.5, EN 10002-2 grade 0.5, ISO 7500-1 class 1, BS1610 class 0.5, DIN 51221 class 1 and ASTM E4.

3. 시험편

본 실험에 사용한 재료는 스테인레스 강재인 STS304로써 강도와 재질면에서 우수하여 발전소의 원전배관에 주로 사용되고 있으며, 재료에 따른 화학적 성분을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Chemical compositions of ASTM A 240/A240M-05a Stainless Steel.

(Wt.%)

Carbon	Manganese	Phos-phorus	silicon	Chromium	Nikel	Sulfur
0.08	2.00	0.045	0.75	18.0-20.0	8.0-10.5	0.03

시험편은 ASTM A370-05에서 제시한 시험편 규격을 참조하여 제작하였으며,[23] Fig. 3.2에는 본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수를 나타내었다.

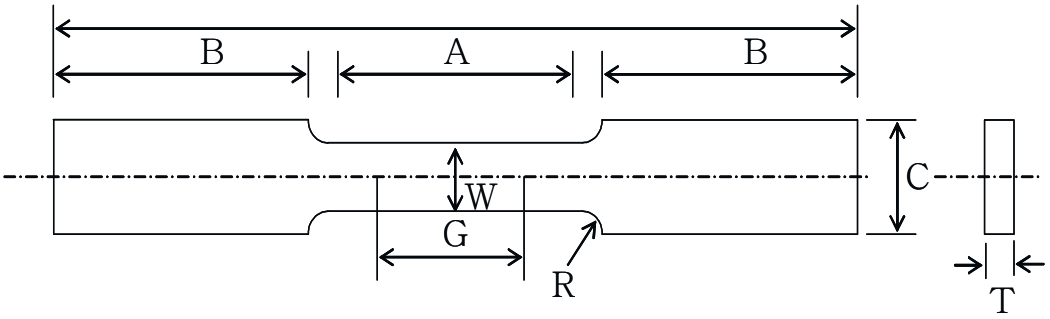


Fig. 3.2 Dimension and mechanical properties of specimen

Table. 4 Dimension and mechanical properties of specimen

(Unit:mm)

Abbrev.	Description	Dimension
L	Over-all length	200
A	Length of reduced section	60
B	Length of grip section	50
C	Width of grip section	40
G	Gage length	50
W	Width of reduced section	10
T	Thickness	1.0
R	Radius of fillet	20

Mechanical Properties	Specification
Material	STS 304
Young's modulus	206 GPa
Poisson's ratio	0.29
Density	7800 kg/m^2

제작방법은 박판두께의 재료에 용입 조정이 좋은 아르곤가스 GTAW(gas tungsten arc welding) 맞대기 용접법을 사용하였다. 용접기의 전격출력전류는 350A이고, 이송속도는 180mm/min이다. Photo 2와 같이 텅스텐 전극과 모재 사이에 전기 아크를 사용해서 열을 발생시켜 이 열을 이용하여 용접하는 방법이다. ESPI 및 UTM 인장실험을 위해 시험편을 Fig. 3.3과 같이 두께 1.0mm인 강판을 최소 5mm이상의 폭으로 맞대기 용접을 하였으며, 얇은 두께로 인해 용접시 수축 및 비틀림, 휨등의 변형이 발생할 수 있다. 이를 최소화 하기위해 양 끝단을 무게있는 판으로 고정시키고, 용접부위를 제외한 밑부분에 시편의 두께만한 판을 받쳐서 용접후 서냉시켰다. 그 후 모재 부분, 맞대기용접 부분, 전체용접 부분을 한 강판에서 와이어 커팅하였다.

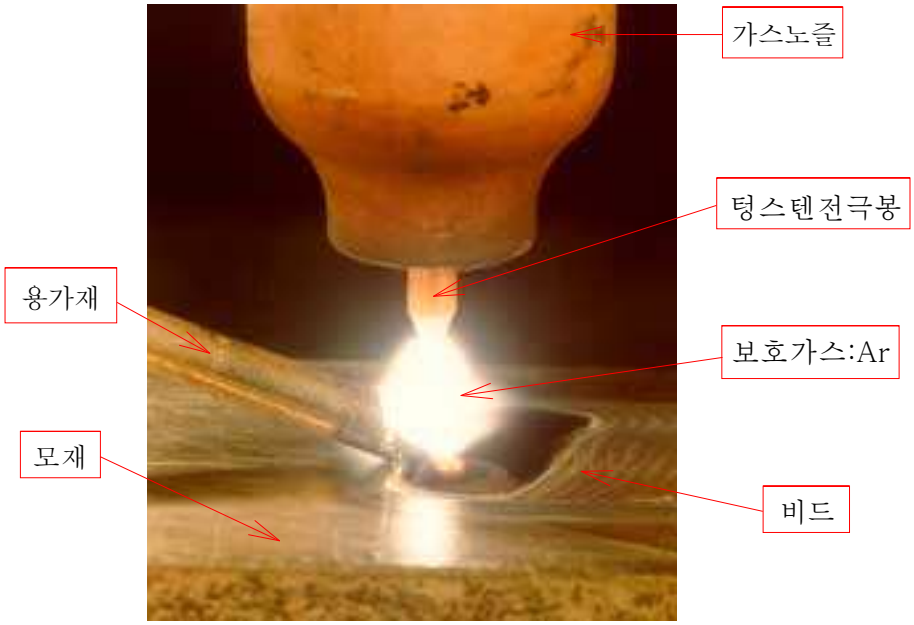


Photo 3 Welding conditions of GTAW

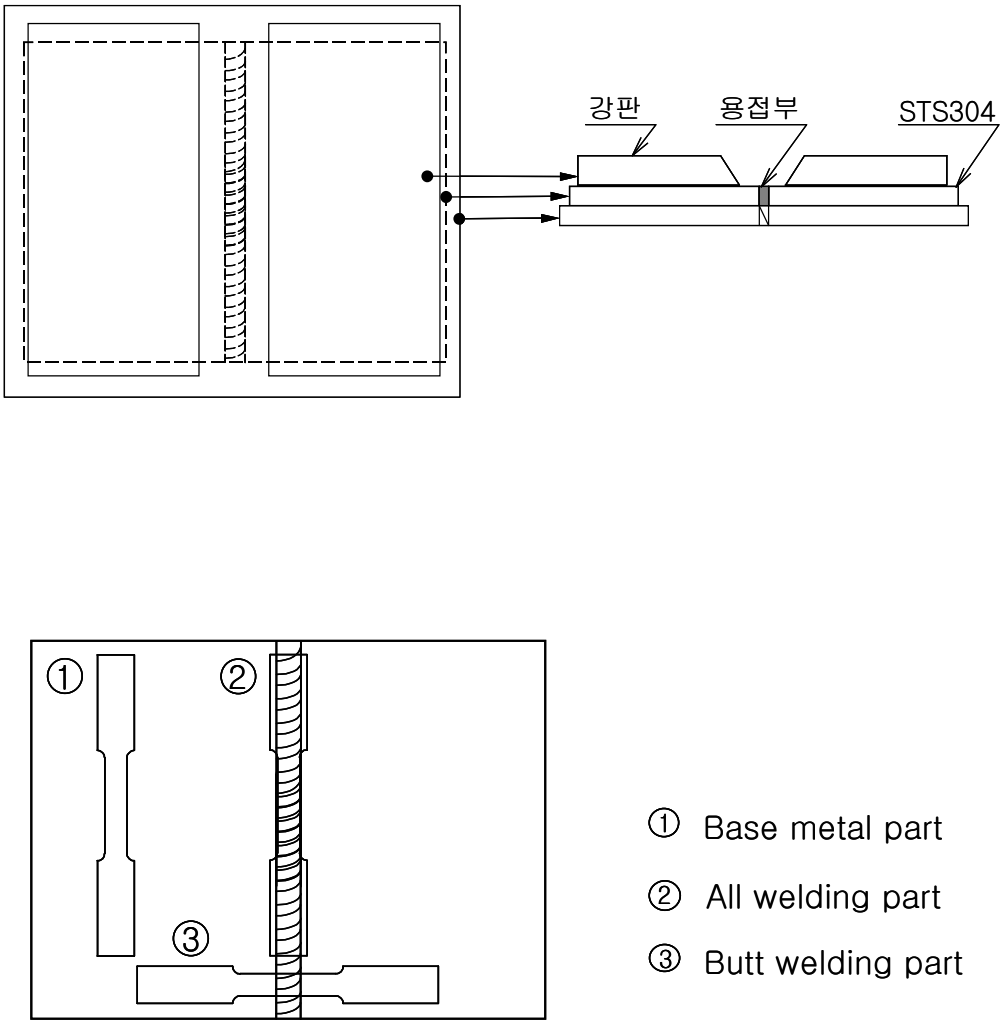


Fig. 3.3 Schematic illustration of producing specimen

제 2 절 실험방법

본 실험에서는 주로 원전배관에 사용되는 스테인레스 강판 STS304를 아르곤가스 GTAW 맞대기 용접을 시행하여 시험편을 제작하였다. UTM system으로 모재부 및 용접부의 탄성계수를 신율계를 사용하여 구하였으며, ESPI System을 이용해 인장하중의 증가에 따른 용접부의 스트레인 변화 및 응력분포를 측정하였다. 이론식에 대입하여 잔류응력값을 구하였고, UTM system으로 인장하중을 단계적으로 증가시키며, 동시에ESPI system으로 프린지를 관측함에 따라 하중과 변형률에 따른 잔류응력의 변화를 측정하였다.

이상의 시스템은 광학정반위에 안정적으로 고정시켜 실험외적인 요소를 최소화 하였으며, Fig. 3.4에 ESPI와 UTM system의 구성도를 나타내었고, Photo 2에서는 시스템의 셋업된 장면을 보여주고 있다.

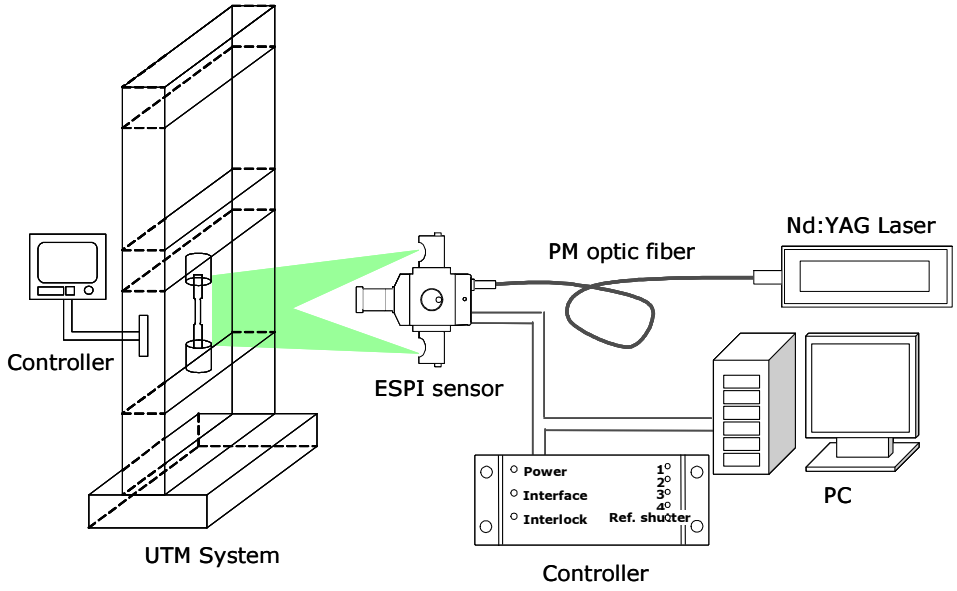
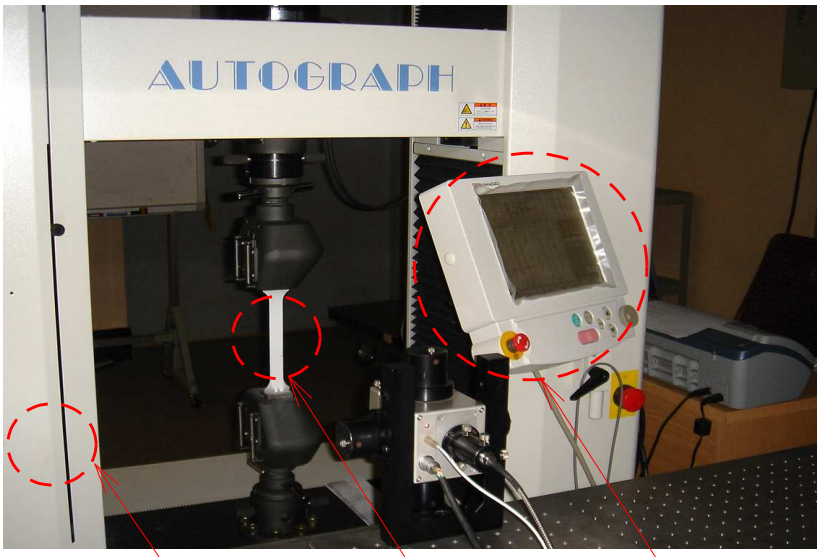
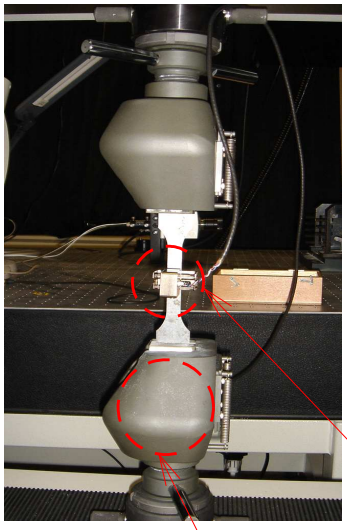
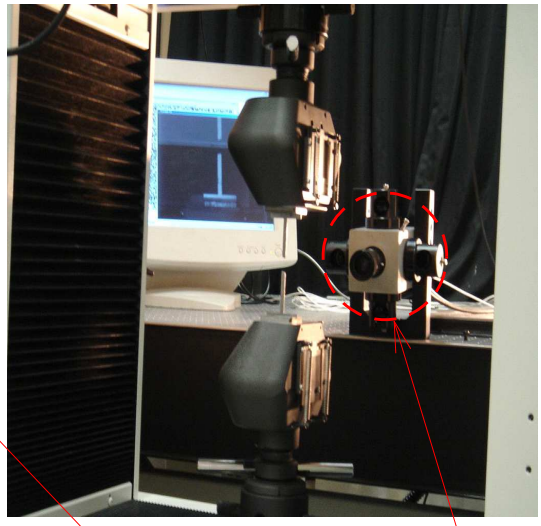


Fig. 3.4 Schematic of ESPI & UTM system



Static tester Specimen Controller





Grip Extensometer ESPI Sensor

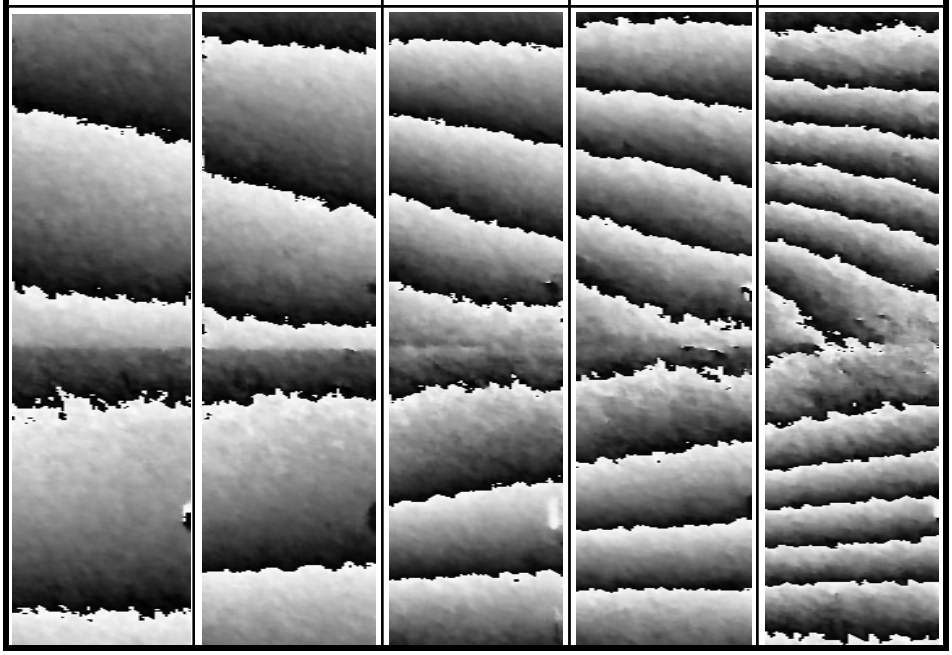
Photo 4 Equipment of ESPI & UTM System

제 4 장 실험결과 및 고찰

제 1 절 ESPI 실험결과

최대하중이 100kN인 인장시험기에 시험편을 고정시키고 변형량을 제어하여 인장하중을 가하였을 때, 용접부위에 발생하는 응력분포를 측정하였다. 시험편의 용접부를 최대한 확대하여 CCD 카메라로 프린지 형성을 관측하였다. Table 4는 프린지 형성의 결과로써, 변형량의 변화에 따른 위상지도의 변화를 나타내었다.

Table. 5 ESPI phase-map according to force difference variation

Phase map : $\Delta P(kg_f)$				
5.265	7.122	9.143	11.551	14.627
				

하중차가 증가함에 따라 위상지도에 나타난 간섭줄무늬의 수가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 용접부에서는 간섭줄무늬가 모재부에 비해 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 4.1에서 Fig. 4.5까지 각각의 하중에 따른 변형의 결과를 Profile, 3D-Plot, 3D-Deformation Distribution등으로 나타내어 비교하였다.

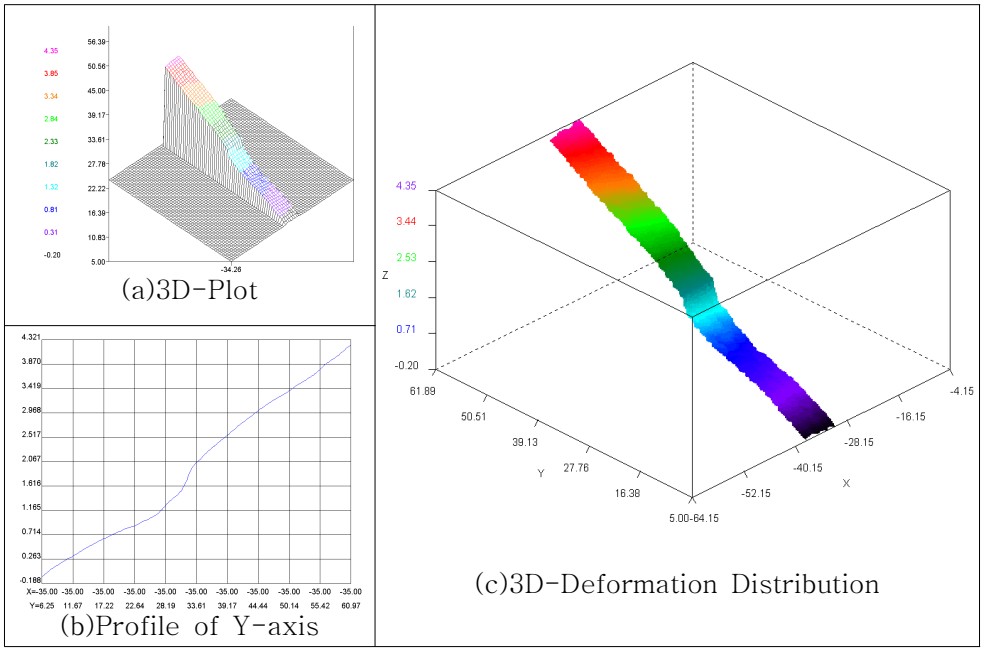


Fig. 4.1 ESPI Result of Deformation, Tensil-Force: 5.265kg$_f$

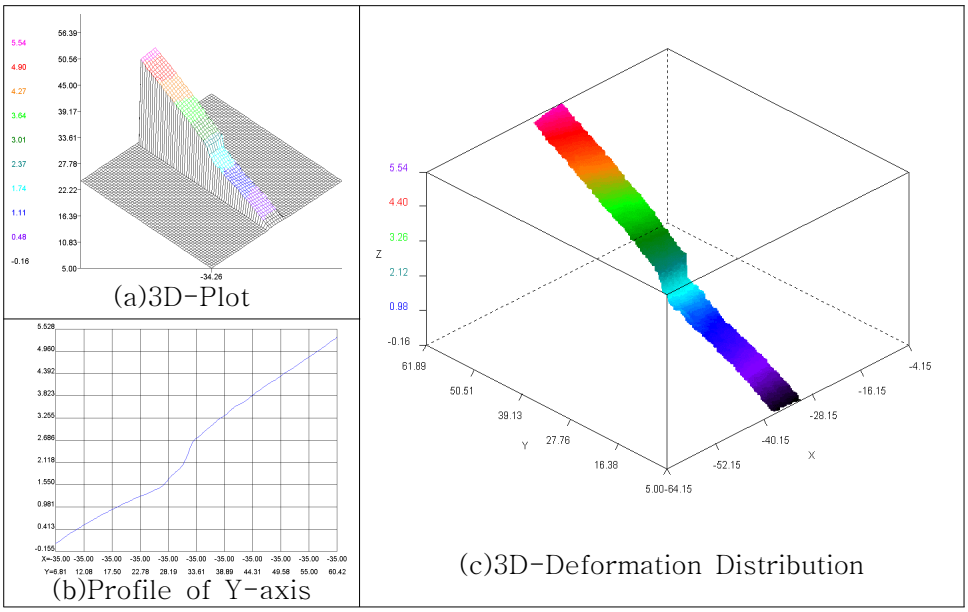


Fig. 4.2 ESPI Result of Deformation, Tensil-Force: 7.122kg$_f$

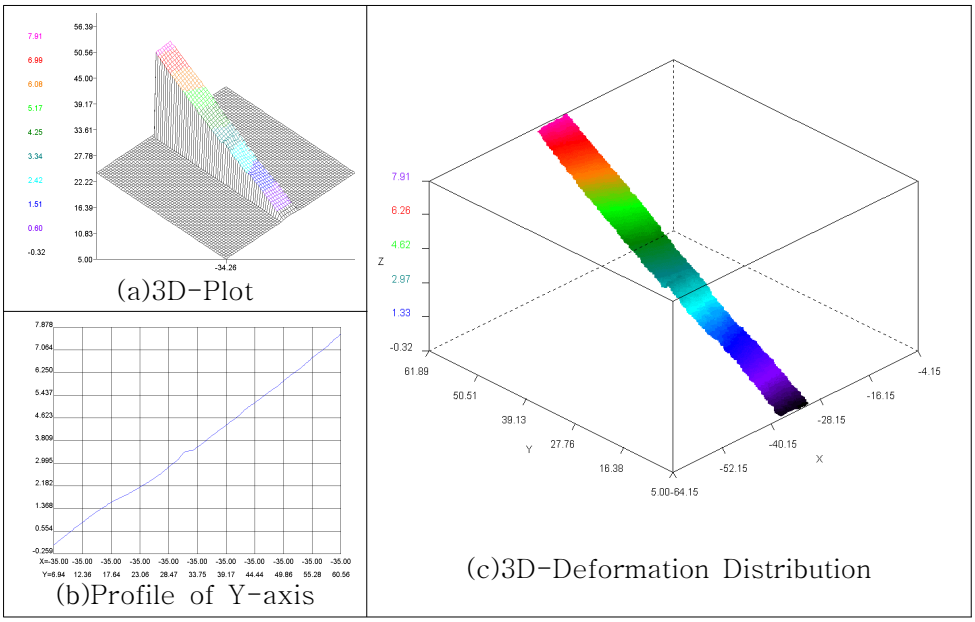


Fig. 4.3 ESPI Result of Deformation, Tensil-Force: 9.143kg$_f$

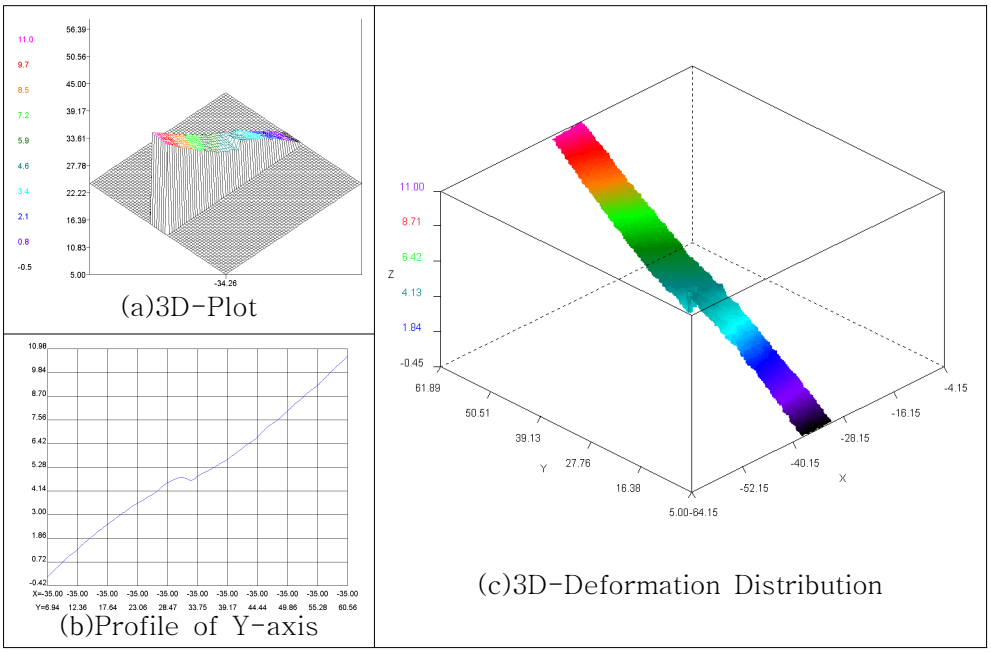


Fig. 4.4 ESPI Result of Deformation, Tensil-Force:11.551kg$_f$

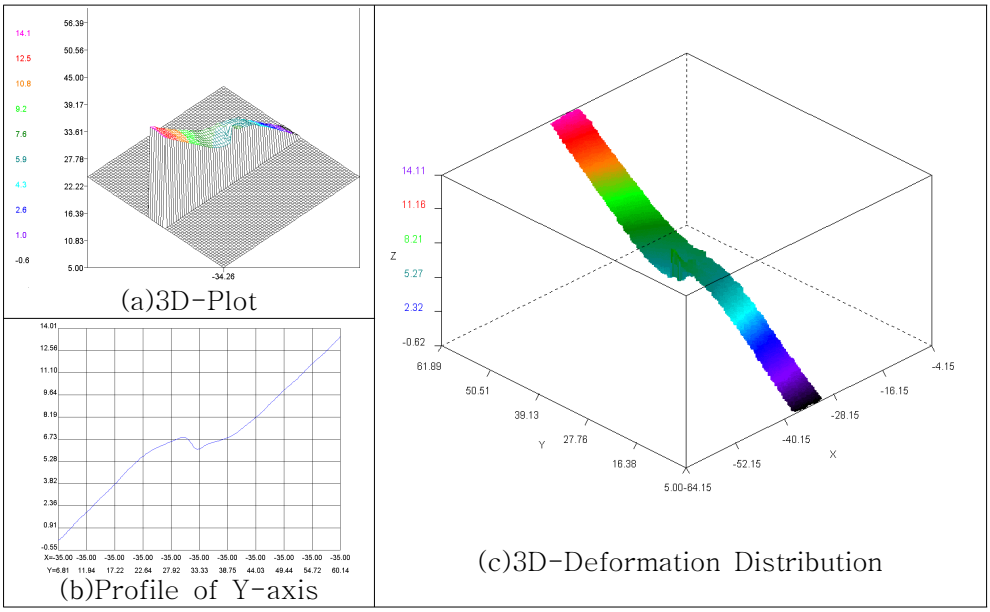


Fig. 4.5 ESPI Result of Deformation, Tensil-Force:14.627kg$_f$

측정부위에 대한 시험편의 스케일은 높이:폭 = 560:65[mm]이며, 프로파일의 중심선은 시작점 X축:35.0,Y축:60.8, 끝점 X축:35.0,Y축:6.3 이다. 측정결과, 프로파일을 살펴보면 10kg_f이상의 하중을 주었을 때 용접부 중심을 기준으로 압축영향을 크게 받고 있으며, 3D-변형분포도를 보면 용접중심부에서 왼편으로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 최소 5회의 반복실험 결과, 전체적으로 비슷한 측정형상을 볼 수 있었다. 용접부위의 잔류응력을 측정하기 위해 위 실험에서는 실제거리에 대한 픽셀의 정보를 이용해서 측정부위에 대한 변위를 측정함으로써 변형률을 구한다. 아래의 Fig. 4.6은 각각의 인장하중이 작용할 때, 하중차 변화에 따른 시험편 중앙의 프로파일로부터 구한 변형을 나타냈으며, Fig. 4.7은 Fig. 4.6의 데이터에서 인접한 픽셀의 차를 구한 것으로써, 단위픽셀을 실제거리로 변환시켜 하중에 따른 변형률을 나타내었다. 모재부분1과 2는 변형률이 거의 비슷하며 용접부에서는 변형률이 모재부분에 비해 높게 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러므로 동일한 하중이 작용하고 단면적이 일정하다고 가정할 때, 용접부의 탄성계수는 모재부에 비해 상대적으로 높아짐을 알 수 있다. 또한 모재부와 용접부의 탄성계수 측정값을 통해 잔류응력값은 약 0.7%씩 증가하고 있음을 알 수 있었다.

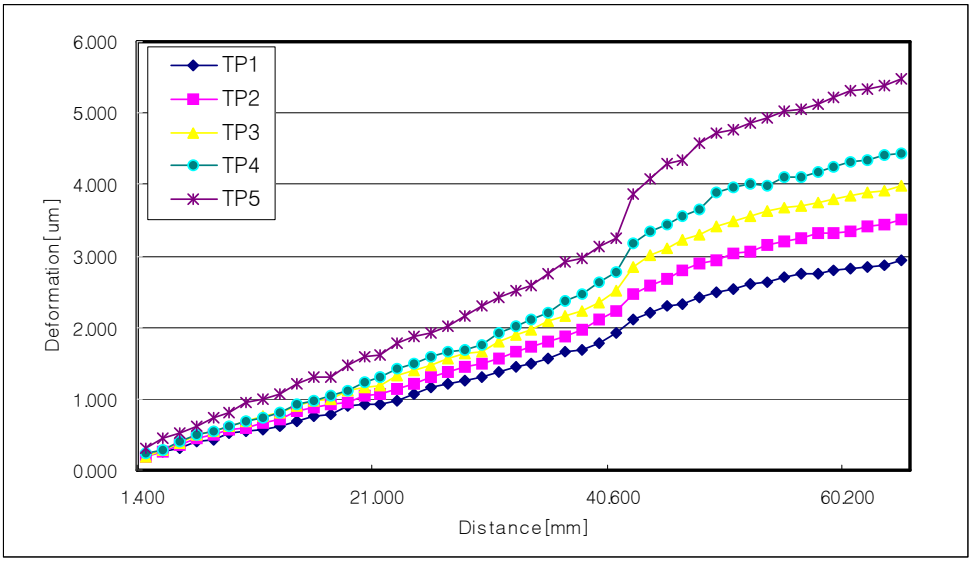


Fig. 4.6 Result of deformation profile according to force difference variation

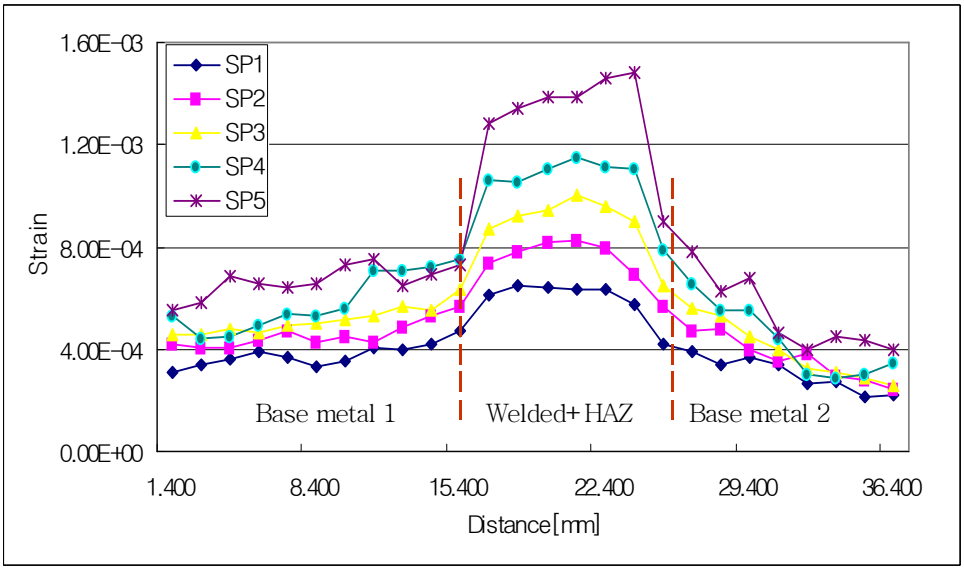


Fig. 4.7 Result of Strain profile according to force difference variation

제 2 절 UTM 실험결과

모재부의 탄성계수를 구하기위해 두께1.0mm, 폭10mm인 시험편을 인장시험기에 고정시킨후 길이가 10mm인 신율계를 부착하여 초기 시험조건으로 Test speed : 3mm/min, 하중범위 : 10kN, Sampling 시간간격 : 100msec으로 주고 측정한 결과, 강의 탄성계수 영역범위내의 근사값을 측정할 수 있었다. 또한 같은 실험방법으로 전체용접시험편의 탄성계수를 측정하였다. 그 결과, 모재부에 비해 용접부의 탄성계수 측정값이 약 40%정도 낮게 나타났다. Fig. 4.8과 Fig. 4.9는 인장실험을 통해 얻은 데이터값을 프로파일로 변환하였으며, 단위픽셀당 응력의 기울기를 선형적으로 나타냈고, 이를 통해 탄성계수 값을 구할 수 있었다. Fig. 4.10는 ESPI와 UTM의 변형률을 각각 비교하여 나타내었다. 오차율은 약 11%이내로 나타났다. Table 6은 ESPI실험과 UTM실험의 측정값을 통해 탄성계수와 잔류응력값을 산출할 수 있었다.

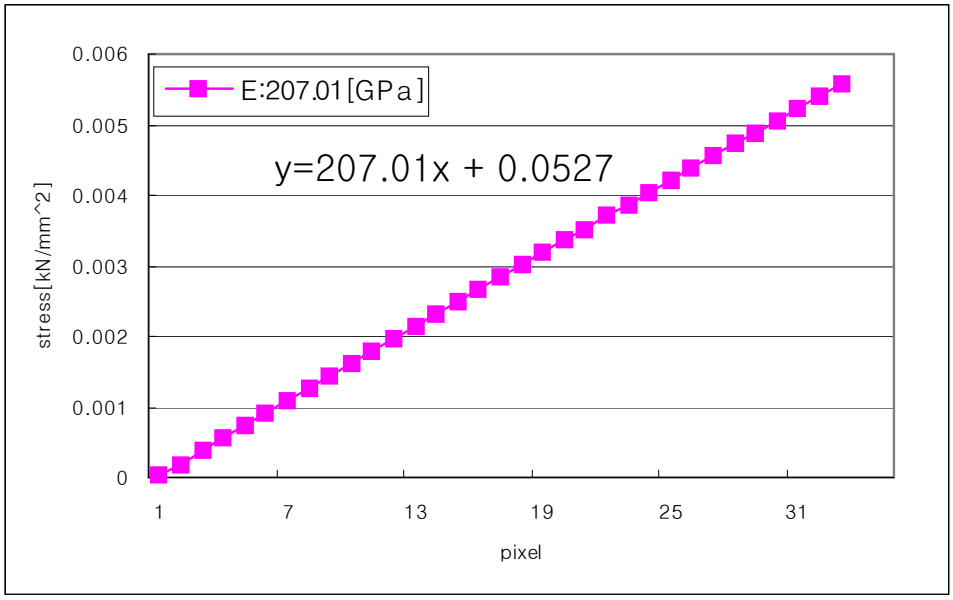


Fig. 4.8 Result of elastic modulus : Base metal Part

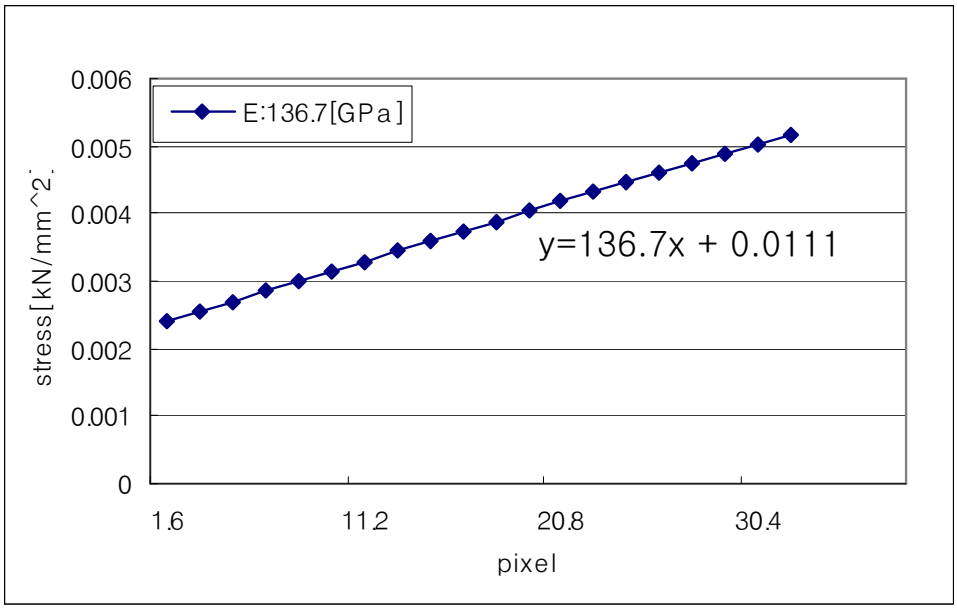


Fig. 4.9 Result of elastic modulus : Welding Part

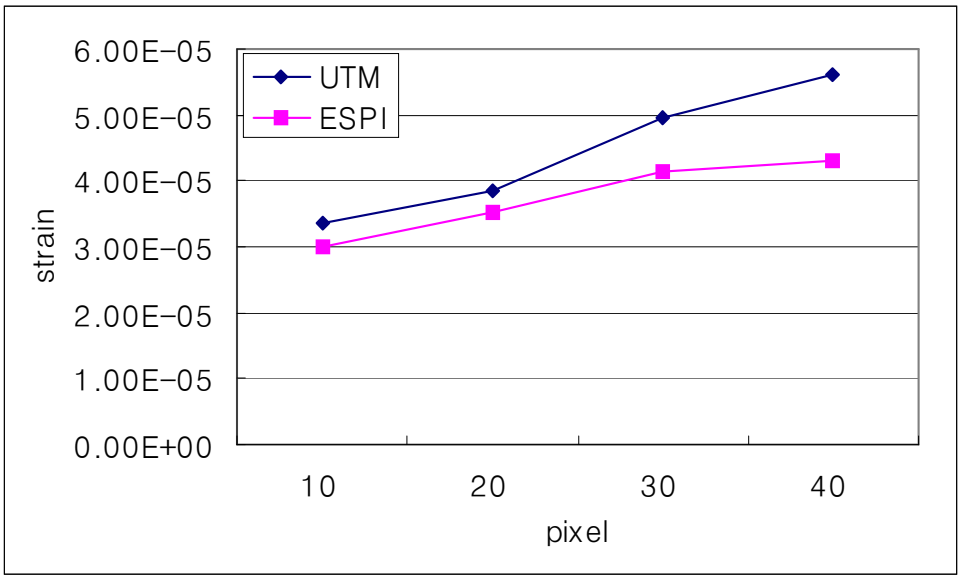


Fig. 4.10 Result of Strain Comparison : UTM & ESPI

Table. 6 Result of Young's Modulus & Residual Stress

Data	P1	P2	P3	P4	P5
Force[kgf]	5.265	7.122	9.143	11.551	14.627
Stress[kgf/mm^2]	0.468	0.633	0.813	1.027	1.301
Stress[MPa]	4.588	6.206	7.967	10.065	12.745
Strain : Base metal	2.22E-05	3.00E-05	3.85E-05	4.86E-05	6.16E-05
Strain : Welded	3.36E-05	4.35E-05	5.35E-05	6.43E-05	7.45E-05
Strain Ratio	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
E_welded[GPa]	136.7	136.7	136.7	136.7	136.7
Residual stress[MPa]	2.36	3.19	4.10	5.18	6.56

제 5 장 결론

용접공정은 압력용기, 배관및 각종 구조물의 접합방법으로서 산업 전반에 걸쳐 상당한 비중을 차지하고 있는 산업공정 중의 한 분야이나 그 특성상 단점인 용접균열, 기공, 슬래그 혼입등과 같은 외부 또는 내부결함이 발생할 수 있다. 용접중 발생하는 잔류응력의 문제를 해결하기 위해 용접부의 잔류응력 분포를 이해하고, 해석할 필요가 있다.

본 실험의 결과, 인장하중이 작용할 때 하중이 증가함에 따라 위상지도에 나타난 간섭줄무늬가 증가하고 용접부를 포함한 열영향부의 변형률도 하중차에 따라 일정하게 증가하고 있음을 알 수 있으며 이는 곧, 맞대기용접부의 잔류응력분포를 나타내고 있다. ESPI와 UTM의 변형률을 각각 비교한 결과 약 11%이내의 오차율을 보였으며, 모재부에 비해 용접부의 탄성계수는 상대적으로 낮게 나왔으며, 잔류응력 측정값은 점차적으로 약 0.7%씩 증가함을 알 수 있었다.

본 실험을 통해 잔류응력과 용접변형은 서로 관련된 현상으로, 용접조건이 같다면 구속을 강하게 해서 용접하면 용접변형은 감소하나 잔류응력은 상대적으로 증대하게 된다. 만약 용접부의 구속의 정도가 같으며 용접변형이 작아지도록 용접조건을 적절히 선택하면 용접잔류응력을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 이와 같은 용접조건을 채택하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

이론적인 계산과정에서 여러가지 복잡한 변수를 고려하고 표준화 된 비교실험을 통하여 좀 더 신뢰성을 확보할 수 있는 연구가 필요하다. 이에 따라 비파괴적 방법중 스페클 간섭법을 이용한 잔류응력 측정을 통해 용접 결함 검출에 대한 새로운 방법론이 정립된다면 산업 현장 제시 및 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Lancaster, J.F., "Metallurgy of welding", 3rd Ed, pp.1-5, 1980
2. Shi, Y,W., and Chen, B.Y., "Effects of Welding Residual Stersses on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol.36, No.6, pp.893-902, 1990
3. Ramamurti, V, and suresh, S, "Residual Stress Analysis in Weldments", Engineerring Fracture Mechanics, Vol.38, No.6, pp.385-391, 1991
4. Nair, S., and Dix, R.C., "Residual Stress Generation and Relaxation in Butt-Welded Pipes", Transactions of the ASME, Vol.104, pp.188-192, 1982
5. Averbach, B.L., and Lewis, R.E., "Fatigue Crack Propagation Through Residual Stress Fields", ICF(Fracture 84), Vol.3, pp.1631-1640, 1986
6. Weismam, C., "Welding Handbook", American Welding Society, Seventh Edition, Vol.1, pp.222-268, 1976
7. Masubuchi, K., "Analysis of Welded Structures", International Series on Materials Science and Techology, Vol.33, pp.1-10, 1980
8. 조재흥, 장수, 황보창권, 조두진, "광학", 4th Edition, 두양사, 2002.
9. Beesley, M.J., "Lasers and Their Applications", Taylor-Francis, London, 1972.
10. Wilson, J., and Hawkes, J.F.B., "Lasers principles and Applications", Prentice Hall, 1987.
11. 강기수, “레이저 스페클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가”, 조선대학교 박사학위논문, 2005.
12. Goodman, J.W., “Some Fundamental Properties of Speckle”, Journal

of the Optical Society of America Vol.66, pp.1145-1150, 1976
13. Kim, K.S., Kang, K.S., Kang, Y.J., Jung, S.K., "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography", Optics & Laser Technology Vol.35, pp.639-643, 2004
14. Cloud, G,L. "Optical Methods of Engineering Analysis", London Cambridge University Press, pp.446-469, 1990
15. Kim, K.S., Jung, H.C., Kang, K.S., Lee, J.K., Jang, S.S., and Hong, J.K., "In-Plane Strains Measurement by Using the Electronic Speckle Pattern Interferometry", KSME international Journal, Vol.12, pp.215-222, 1998
16. Madjarova,V., Toyooka, S., Widiastuti, R., Kadono, H., "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase", Optics Communications Vol.212, pp.35-43, 2002
17. Takeda, M., Ina, H., Kobayashi, S., "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", Journal of the Otocal Society of America A Vol.72, pp.156, 1982
18. Creath, K., "Phase-shifting Speckle Interferometry", Applied Optics Vol.24, pp.3053, 1985
19. 오환교, 정재강, 차용훈. “신편 용접공학”, 원창출판사, pp.329-336, 1999
20. V.T.Em, 신은주, 심해섭, 성백석, 이창희, 김헌준. “중성자 회절에 의한 잔류응력 측정법 개발”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1343/99, 2001
21. 국정한, 김덕중, 연윤모., “용접 재료학”, 선학출판사, 2006, pp.67-71
22. 이종원, 김문생, 변근주., “재료역학”, 반도출판사, 2001.
23. "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel roducts," Designation: A370-05, Annual Book of ASTM Standards 2006, Vol.01.03, pp.87-133, 2006.

저작물 이용 허락서

학 과	기계설계공학과	학 번	20057119	과 정	석사
성 명	한글: 백 상 규 한문: 白 湘 圭 영문:Baek, Sang Kyu				
주 소	광주광역시 광산구 소촌동 스위트밸리3차 302동 1301호				
연락처	062)945-4380	E-MAIL	baek0408@hanmail.net		
논문제목	한글: 스페클간섭법을 이용한 맞대기용접부의 잔류응력측정				
	영문: Measurement of Residual Stress Butt Welding Using Speckle Interferometry				

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( )

2007 년 2 월 일

저작자: 백 상 규 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하