

2013년 2월

석사학위논문

적외선 열화상 카메라를 이용한  
용접 조건별 파단면 온도 변화와  
표면조도 측정

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 동 율

적외선 열화상 카메라를 이용한  
용접 조건별 파단면 온도 변화와  
표면조도 측정

Measurement for temperature changes and surface  
roughness of fracture according to welding conditions  
by using infrared thermography

2013년 2월 24일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 동 율

적외선 열화상 카메라를 이용한  
용접 조건별 파단면 온도 변화와  
표면 조도 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2012년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 동 율

# 김동율의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 장 완 식 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

2012년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
LIST OF PHOTOGRAPHS .....	IV
ABSTRACT .....	V
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이 론 .....	4
제 1 절 CCD Camera 이론 .....	4
1-1. CCD 카메라의 구성 및 원리 .....	4
제 2 절 포아송의 비(Poisson' s ratio) .....	6
2-1. 체적 변화율(Unit volume change) .....	6
제 3 절 용접 잔류응력 .....	8
3-1. 잔류응력의 개념 .....	8
3-2. 용접잔류응력의 발생원인 및 영향 .....	9
제 4 절 적외선 열화상 기술 .....	13
4-1. 적외선 열화상 기초 이론 .....	13
4-2. 적외선 열화상 온도의 감지 원리 .....	15

제 3 장 실험장치 및 방법 .....	18
제 1 절 시험편 .....	18
1-1. 용접 시험편 .....	18
제 2 절 실험장치 .....	19
2-1. 인장시험기(UTM) .....	19
2-2. 적외선 열화상 카메라(IR) .....	21
2-3. CCD(Charge coupled device) 카메라 .....	22
2-3. 3차원 미소 형상 측정 시스템(SIS-1000) .....	23
제 3 절 실험방법 .....	24
제 4 장 실험결과 및 분석 .....	26
제 1 절 인장 시험에 따른 온도 및 체적의 변화 측정 ·	26
1-1. CCD Camera를 이용한 체적변화 측정 .....	28
1-2. 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도변화 측정 ..	29
제 2 절 측정 영역별 시험편의 표면 온도 변화 측정 .....	33
제 3 절 용접 시험편의 파단에 따른 표면 거칠기 변화 ·	38
제 5 장 결 론 .....	40
참 고 문 헌 .....	41

# LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of Tension tester machine .....	20
Table 3-2 Specification of infrared thermography system .....	21
Table 3-3 Specification of CCD Camera .....	22
Table 3-4 Specification of SIS-1000 .....	23
Table 4-1 2D and 3D images acquired from SIS1000 .....	38
Table 4-2 2D and 3D images acquired from SIS1000 .....	39

# LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Configuration & principle of CCD Camera .....	5
Fig. 2-2 Test of tension members .....	6
Fig. 2-3 Residual stress distribution on butt welded joint .....	9
Fig. 2-4 Schematic illustration of the weldments .....	12
Fig. 2-5 Detection principle of IRT .....	15
Fig. 2-6 Temperature calibration .....	17
Fig. 3-1 Manufactured Welding specimen .....	18
Fig. 3-2 Tension tester system .....	19
Fig. 3-3 Infrared thermography system .....	21
Fig. 3-4 Measurement of volume by CCD Camera .....	22
Fig. 3-5 3D precise shape measurement .....	23
Fig. 3-6 Experimental setup .....	24
Fig. 4-1 Measurement of temperature and volume by CCD and Infrared Camera .....	26
Fig. 4-2 Welded Specimen result by tensile speed .....	27
Fig. 4-3 Images of specimen from CCD .....	28
Fig. 4-4 True stress-strain curve .....	28
Fig. 4-5 Data comparison of the temperature evolution and volume by tensile speed .....	29
Fig. 4-6 Data comparison of each other temperature by tensile speed .....	31
Fig. 4-7 Data comparison of the temperature evolution and volume by welded speed .....	32
Fig. 4-8 Temperature Area .....	33
Fig. 4-9 Temperature graph of welding Specimen by tensile speed ..	34
Fig. 4-10 Temperature difference of adjacent failure surface .....	36
Fig. 4-11 Ra and Rz by welding conditions .....	39



# ABSTRACT

## **Measurement for temperature changes and surface roughness of fracture according to welding conditions by using infrared thermography**

Kim Dong Lyul

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

Dept. Advanced Parts & Materials

Engineering.

Graduate School of Chosun University

The objective of this paper is to investigate volume and temperature evolutions of fracture crack surfaces of welded specimen. In the test, Welded specimens were loaded by a fatigue machine with loads until they were broken. On the basis of fracture experiments, the variation of outside condition is appeared to the temperature and volume, surface roughness of specimen. Fracture experiments were performed to with development of Computer technology and CCD' s(Charged Coupled Devices). In the accordance with, the evolution is detected to Infrared camera and charged coupler device(CCD). This condition is associated with each other. The thesis found it the association. That research isn't attempt to other technician so it has important things. The analysis of experiment will explain the next contents. Firstly, the tendency of volume variation according to temperature was measure liner. So the variation of temperature increase fracture moment. Also the surface roughness of fractured surround district increase abruptly because of fracture influence. The infrared thermography(IRT) measures the radiated energy of object and translate to thermal image of surface of object. IRT has merits such

as non-contact, non-destructive, real time measurement technique. Mechanical deformation by temperature evolutions is very important to industries. In this paper, relationship between volume and temperature evolutions is investigated under different tensile speed. The result shows that temperature evolution of specimen depends on volume evolution and tensile speed. As a result, Temperature evolution of specimen could be predicted by known volume evolution. The roughness of the fracture crack surfaces thereafter were measured by 3D Surface Profiling System. From the results, it was confirmed that Surface profiling System could measure the roughness of the various types of the crack surface. In this paper, finally a possibility to predict the magnitude of loads by roughness measurement of the fracture crack surface was proposed. As a result of this study, It was identified that the average roughness are similar at the position that has a same loads by comparing the results with the loads on the specimen according to the position. Secondly, the fractured surface roughness isn't has variation in the changed tensile speed. This result explained which that roughness according to changed tensile speed influence the surround district. Third, the analysis explain the specimen surface appear to necking situation. Also using the above analysis data measured necking position. Lastly, the temperature and surface roughness are detectable in the required distance of fractured surface. That result is very useful in the nondestructive testing method in industry. 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, Because of these technology development, Metal fracture experiments will change to digitalized CCD camera and IR has evolved to digital technology that is united with image process technique. In the Future, Metal Fracture experimental research is needed on the Poisson' s ratio of the welded specimens.

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 배경

용접은 일반적으로 열을 가하여 2개의 금속재료를 접합하는 기술로써 현대산업의 발전과 함께 다양한 용접법의 발달로 철 및 비철금속의 접합에 없어서는 안 되는 중요한 기술로 인식되고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 용접 이음은 종래 구조물 조립에 잘 사용되었던 리벳 이음보다도 접합강도가 높고, 가볍고 구조물을 단기간에 건조할 수 있다. 또한 수밀성·기밀성이 뛰어난 장점을 가지고 있어, 조선, 원자력, 항공기, 자동차, 건축 등 산업전반에 걸쳐 활용되어 산업현장에서 중추적인 역할을 담당하고 있다<sup>2)</sup>. 하지만 용접이 단시간 내에 높은 열을 가해 접합하는 방법이므로 재질의 변화, 잔류응력, 변형 또는 용접 결함이 생기기 쉬워 이로 인한 용접구조물의 갑작스런 파괴가 발생할 수 있다<sup>3)</sup>. 그중에서도 특히 용접 구조물의 결함 유발 및 파괴에 이르게 하는 주원인은 용접부와 열영향부에 밀접한 관련이 있다. 실제 구조물에서는 소재 내에 많은 노치나 개재물등 결함의 잠재 가능성이 존재하고 사용 중 외적환경의 부하조건에 의해 결함이 존재하게 된다. 이와 같이 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 결함으로부터 균열이 생성 또는 성장하여 재료 파괴로 이어지는 경우가 대부분이므로 피로균열의 원인 규명은 매우 중요하다. 파괴는 인명이나 물적 재산에 막대한 손실 및 용접 설비를 취급하는 산업분야에서 광범위하게 발생되고 있으며 이러한 현상에 대한 원인을 분석하고 안전대책을 수립하기 위하여 파괴현상에 밀접하게 관여되는 균열 발생원인 파악 및 균열성장에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히, 용접 조건(속도, 전압, 전류)의 변화는 입열량의 영향으로 용접이음부에서 고온의 열에 의한 열응력과 용접 후 냉각 시 수축응력이 작용함으로써 용접 결함이 발생할 가능성이 높다. 용접 조건에 의한 결함 발생은 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 용접부위의 열응력에 의한 것으로서 용접 시 모재의 외적 구속, 모재 크기, 용접입열, 판두께 등의 영향을 받는다. 용접구조물에서 용접 조건 및 응력분포 상태는 취성파괴, 피로파괴, 응력부식균열 등 다양한 종류의 파손에 직접적으로 영향을 끼쳐 용접 시험편의 변형량을 정량적으로 해석하기 위한 지속적인 연구가 필요한 실정이다<sup>4),5)</sup>. 그리하여 컴퓨터기술의 발전과 함께 CCD camera로 대체하고 영상처리기술을

융합하고 Digital 기술로 진화하여 현재 정밀한 수준으로 대상물 전체 영역에 걸쳐 실시간 측정 및 해석이 가능한 기술로써 산업현장에서 널리 활용되고 있다. CCD Camera를 이용한 측정은 비접촉·비파괴 검사에 기초가 되는 연구로써 대면적 복잡한 형상에 구애 받지 않으며, 용접부의 응력 측정 시 주의 환경 제약조건에 영향을 받지 않는다. 또한 대상체의 거동에 따라 변형 정보를 가시화 할 수 있어 정량적 데이터 획득이 가능함을 알 수 있다. 이러한 기술을 이용하여 본 연구에서는 기계나 구조물의 최적 용접 조건별 시험편 제작을 통하여 용접시험편을 동일하중으로 인장 또는 압축을 시켰을 경우 시험편의 모재부 및 용접부에서 변형 및 변형을 차이가 발생한다는 것에 착안하였고 이를 CCD Camera와 IR(적외선열화상카메라) 계측시스템을 이용하여 동시에 측정한 후 제시된 방법을 통하여 용접부위의 체적의 변화에 따른 온도 변화를 확인한다. 체적의 변화는 균열을 발생하고 균열 길이의 측정방법은 지금까지 많은 연구자들에 의하여 개발되어져 왔다. 예로 광학현미경을 이용하여 육안으로 직접 균열길이를 측정하는 방법과 컴플라이언스, 초음파, AE 등 전기적 신호를 통하여 얻어진 결과로부터 균열을 확인하였다. 그에 반해 본 연구는 적외선열화상기술(Infrared thermography : IRT)의 적용은 피로균열측정의 새로운 방법이 될 수 있다. 하중을 받는 물체는 변형과 함께 일부의 에너지를 적외선(열) 에너지로 방사하고, 방사된 적외선은 이에 상응하는 응력으로 환산가능하다는 이론적인 내용을 토대로 하중 하에서 부재의 응력이 가장 높은 부분(노치, 크랙, 용접 조건) 온도값을 나타내고 이 최고 온도점의 이동을 확인함으로써 비파괴적으로 피로균열의 진전을 예측 할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 용접 시험편의 용접부, 모재부의 체적의 변화에 따른 파괴현상 및 원인을 고찰하고 이를 3차원 미소 형상 측정장치를 이용하여 조건별 시험편에 따른 표면 조도와와의 관계를 규명 함에따라 및 건전성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 용접구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대한다.

## 제 2 절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 용접 속도별로 제작된 용접시험편을 대상으로 CCD Camera와 적외선 열화상카메라(IR)을 이용한 파단 될 때까지의 정밀계측을 통해 체적변화와 온도변화의 관계를 규명하고자 한다. 또한 조건별로 제작된 시험편의 파단부 표면 거칠기와의 상관관계를 규명함에 따라 기계적 응용을 증대 하고자 기술하였다. 기계분야에서 제품의 표면 거칠기는 그 정도에 따라 마모 및 내구성, 정밀도, 수명, 마찰, 유속 등에 심각한 문제를 야기하며 경제적이나 안전, 위생 등 여러 가지 측면에 큰 영향을 끼치기 때문에 기계제품의 표면 거칠기를 측정하는 것이 중요하다. 이와 같은 목적으로 용접 조건별 용접 시험편을 만들어 각 하중 부하에 따라 시험편의 파단된 표면 특성을 정량적으로 측정 하고자 한다. 먼저 기존의 표면 거칠기 측정은 접촉식 방법이나 분해능의 한계를 극복하는 단계로, 디지털 카메라를 이용하여 획득한 이미지를 대상으로 분석을 하였다. 그 후 용접 조건별 용접 시험편을 제작하고 이를 파단에 이르기까지 파단면의 각 위치별로 하중인가에 따라 파단면 내에서 거칠기를 측정하였다. 이 실험에서는 3D Surface Profiling System (SIS-1000)장비를 이용하여 2D, 3D 표면 형상 이미지를 얻었으며, 얻어진 위상정보를 이용함으로써 파단면의 형상을 정밀하게 측정하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 CCD Camera 이론

#### 1-1. CCD 카메라의 구성 및 원리

CCD(Charge-coupled device)카메라는 반도체 기판에 직접회로(IC)기술로 감광 소자, 주사 회로 등을 형성한 촬상 소자 중의 하나이며 진공관을 대신하는 신개념의 촬상장치이다. 기본적으로는 빛에너지를 전기적인 신호로 변환하는 수천만 화소를 포함하는 집적회로가 내장된 이미지 센서로서 원화상을 광학계를 이용해 고체소자에 결상시켜 그 상을 고체소자 내에서 전자적으로 주사하여 전기신호로 변환해 출력하는 소자를 말한다. CCD는 미세한 화소가 세밀하게 집적된 형태로 각 화소는 렌즈를 통해서 받은 빛을 전하로 바꾸어서 그 전하를 축적하는 것이 가능하다. 화소는 커패시터의 기능을 가지고 있는 것이다. 그래서 각 화소의 위치와 전하의 크기를 가지고 명암의 데이터를 얻을 수 있다. 주의할 것은 CCD 자체로서는 컬러 정보를 얻을 수 없다는 것이다. CCD Camera의 종류로는 Interline Transfer CCD, Frame Transfer CCD, Frame Interline Transfer CCD가 있다. Interline Transfer CCD는 빛을 받아드리는 부분과 전송하는 부분이 하나의 기판에 구분되어 있는 방식을 말하며, 칩 사이즈가 작고 노이즈가 많이 발생됨에 따라 smear 현상이 발생한다는 점이 단점이다. Frame Transfer CCD는 빛을 받아 드리는 부분과 전송하는 부분이 기판의 윗부분과 아랫부분으로 구분되어 있는 방식을 말하며 칩 면적이 넓으며 smear 현상이 발생할 가능성이 높다. 마지막으로 Frame Interline Transfer CCD는 smear 현상을 억제하고 전자셔터에 의해 동작할 수 있으며 칩 면적이 넓어 IT형과 FT형의 장점만을 채택한 이상적인 타입이라 할 수 있다. 현재 CCD 카메라 적용사례로 보안 감시카메라(CCTV), 전자내시경, PC카메라 등으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 CCD를 이용한 비파괴, 비접촉 검사에 이용한 컴퓨터와 CCD 같은 영상 저장장치의 발전으로 더욱더 매력적인 측정 도구로 자리매김할 것이다.

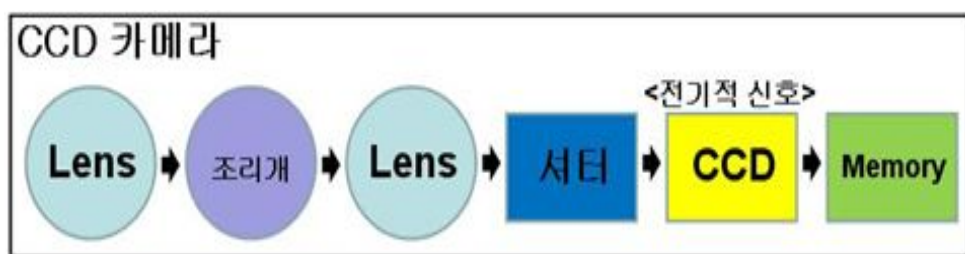
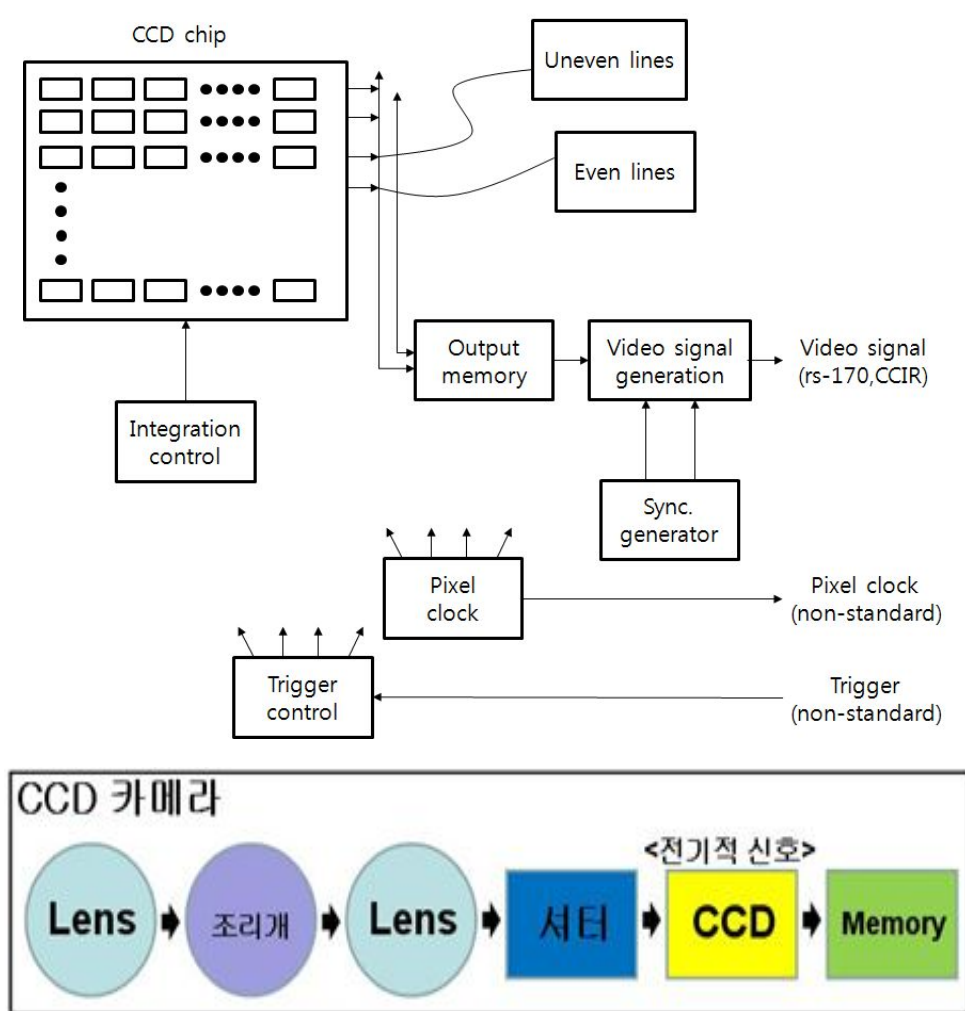


Fig. 2-1 Configuration & principle of CCD Camera

## 제 2 절 포아송의 비 (Poisson' s ratio) 이론

### 2-1. 체적변화율 (unit volume change)

Fig.2-1와 같은 인장부재를 시험하여 보면, 부재의 축신장은 반드시 횡수축을 동반하여, 탄성역 내에서는  $\mu$ 가 재료에 따르는 일정수임을 알 수 있다. 이 일정수  $\mu$ 를 그 재료의 Poisson비라고 한다. 등방성(等方性; isotropic)재료, 즉 모든 방향으로 똑같은 성질을 갖는 재료에 대하여, Poisson은  $\mu=1/4$ 이라는 결과를 얻었던 것이다. 구조용 금속재료의 인장 하에서의 정밀한 계측결과는 1/4에 극히 가까운  $\mu$ 의 값을 주고 있다. 구조용 강철에 대한 시험결과는 대략  $\mu=0.3$ 을 주고 있다. 주어진 재료의 탄성계수 E와 Poisson비  $\mu$ 를 알고 있으면, 그 재료로 만들어진 균일 단면봉의 인장 하에서의 치수와 체적의 변화를 다음에 보이는 바와 같이 쉽게 계산할 수가 있다. 즉, 변형 전에 그 봉의 길이가 L, 단면적이 A 였다면, 그 체적은  $V=AL$ 이었을 것이다. 체적변화율은 다음과 같이 식(1)에서 보여주고 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Al\epsilon(1-2\mu)}{Al} = \epsilon(1-2\mu) \quad (1)$$

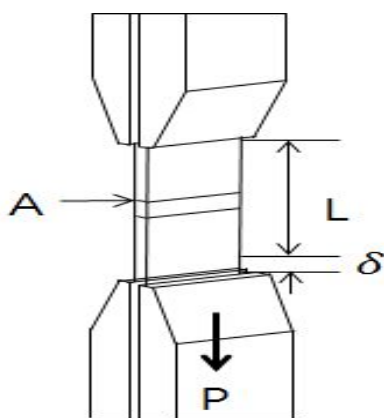


Fig. 2-2 Test of tension members



단위 길이 L에 대한 변형률은 변형률 T(두께)에 대하여 포아송의 비를 나타낼 수 있으며 변형률은 전체 길이에 대하여 길이의 변형값 으로 폭에 대한 두께의 변형 값을 나눴을 때 체적변화율은 다음 식(2)같이 주어진다.

$$\nu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_t} = -\frac{\delta_t/b}{\delta_l/l} = \frac{\delta_t/b}{L+\delta} \quad (2)$$

단위 길이 : L을 일정하다고 가정했을 때 체적의 변화율은 다음 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nu &= L \cdot b \cdot t & \nu &= L \cdot b' \cdot t' \\ \frac{\nu'}{\nu} &= \text{체적 변화율} & \nu - \nu' &= \Delta\nu \end{aligned} \quad (3)$$

## 제 3 절 용접 잔류응력

### 3-1. 잔류응력의 개념

잔류응력(residual stress)이란 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 소재에 남아 있는 응력을 말한다. 용접부에는 소재에 외력이 작용하지 않아도 용접부의 온도변화에 따라서 응력이 발생하고 냉각 시 수축응력이 커져 실온에서 완전히 냉각한 후에는 결국 용접구조물 자신 또는 외부로부터의 구속에 의한 어떤 크기의 잔류응력이 발생하게 된다. 이 잔류응력은 외적구속, 용착순서, 이음현상, 용접입열, 판두께, 모재의 크기 등의 요인에 의하여 영향을 받아 다양한 형태로 발생한다. 실제 용접이음에 있어서는 대부분의 경우 외부로부터 구속이 있고, 더구나 용접에 의한 온도이력도 불균일하다. 따라서 일반적으로 용접부에 존재하는 잔류응력은 이들의 요인에 의해 생기는 내적 및 외적구속에 의한 응력이 합성되어 있다고 할 수 있다. 예를 들면, Fig. 3-1(a)와 같이 양단부가 구속된 2개의 강판을 맞대기 용접한 경우의 잔류응력 분포를 생각해보자. 간단히 y방향 응력  $\sigma_y$ 의 판두께에 대한 평균값에 대해서만 주목한다. x축 상에 대한  $\sigma_y$ 의 분포는 잘 알려진 것처럼 Fig. 3-1(b)에서와 같은 분포를 하고 있다. 여기서, 강판벽에 고정되고 있는 부분을 절단해서 외적구속을 제거하면, x축상의 잔류응력은 반드시 완전히 없어지지 않고, Fig. 3-1(c)와 같은 분포가 남는다. 즉, 용접선의 중앙에서 인장 응력이 최대이고 용접선의 끝을 향할수록 점차 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀌며 양단에서 압축응력이 최대가 된다. Fig. 3-1(d)는 외적 구속이 존재하기 때문에 생긴 잔류응력의 성분이므로 이것을 외적구속에 의한 잔류응력 성분이라고 할 수 있다. 또, Fig. 3-1(c)는 외적구속을 제거했음에도 불구하고, 존재하고 있는 응력성분이므로, 이것은 내적구속에 의한 잔류응력 성분이다. Fig. 3-1(e)의 E-F 단면의 응력분포 같이 용접선에 평행한 응력은 비드 중심에서 큰 인장력이 되고 용접선으로부터 모재 쪽으로 멀어짐에 따라 급격히 감소하는 점에서 압축응력으로 바뀔 수 있다<sup>15)</sup>.

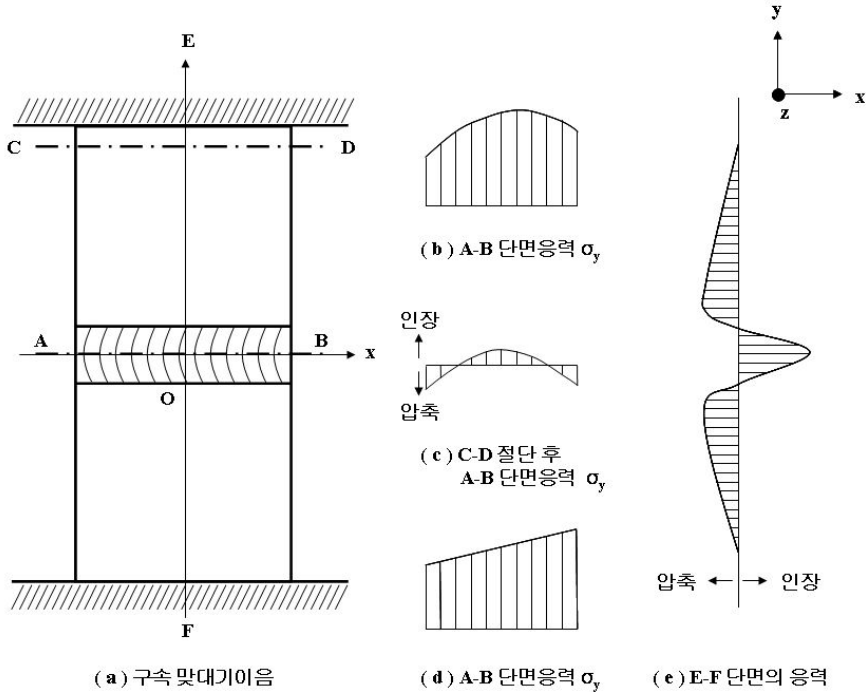


Fig. 2-3 Residual stress distribution on butt welded joint

### 3-2. 용접잔류응력의 발생원인 및 영향

용접 이음에서는 물체에 외력이 작용하지 않아도 용접부의 온도 변화에 의하여 응력이 발생하며, 특히 냉각시의 수축응력이 크므로 완전하게 실온까지 냉각한 경우에는 일정 크기의 응력이 잔류하게 되는데 이를 잔류응력이라 한다. 용접부 이음 형상, 용접 입열 상태, 판 두께, 모재의 형상, 용착 순서, 외적 구속 조건 등의 인자에 크게 영향을 받는다. 맞대기 이음의 경우 양 끝단이 자유로운 상태에서 용접하면 용접금속의 수축에 의해 이음에 대해 직각방향과 수축과 각 변형(angle distortion)이 일어난다. 양 끝단을 구속하고 용접하면 변형은 거의 발생하지 않지만 위의 수축과 각변형 대신에 응력이 잔류하게 된다(16).

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

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

#### (1) 연성 파괴(ductile fracture)

재료에 연성이 있어 파괴되기 직전까지 얼마간의 소성변형이 일어나는 경우에는 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하고 있어도 강도에는 영향을 미치지 않는다.

#### (2) 취성파괴(brittle fracture)

연성이 부족한 재료가 거의 소성변형을 하지 않고 파괴되는 경우에는 잔류응력의 영향이 나타나며, 전단면이 항복하기 전에 파괴가 일어나면 잔류응력이 클수록 작은 하중에서 파괴되게 된다. 또한 연강은 저온에서 연성이 상실되므로 선박, 교량, 압력 용기, 저장탱크 등이 동계의 저온, 정하중하에서 갑자기 유리나 도자기

와 같이 취성파괴가 될 수 있다. 용접이음에 있어서는 용접부 부근에는 항복점에 가까운 큰 잔류응력이 존재하므로 강재의 온도가 전파 저지온도보다도 낮을 경우에는 외부하중 또는 열응력에 의하여 약간의 응력이 용접부 잔류응력에 가산될 경우에도 취성파괴를 일으키게 된다. 그러나 강재의 온도가 전파 저지온도보다도 높을 때는 연성파괴가 일어난다.

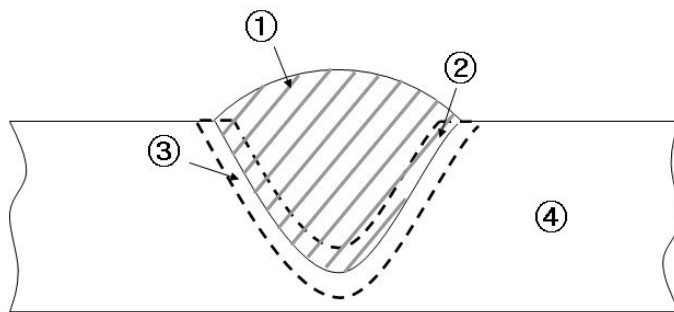
### (3) 피로강도(fatigue strength)

보통 연강용접 이음에서는 항복점에 가까운 정하중을 가하면 잔류응력이 크게 감소한다. 반복하중시험편에 있어서도 마찬가지이다. 예를 들어 두께 15mm 연강판의 한쪽에 비드 용접한 시험편을 피로강도보다 약간 낮은 하중으로  $2 \times 10^6$ 회 반복하중을 가한 경우 용접선에 직각인 단면내의 잔류응력은 약 절반으로 줄어든다. 이러한 예에서는 잔류응력은 피로강도에 별로 영향이 없다는 결론에 이른다. 하지만 용접부에 균열, 언더컷, 슬러지 혼입 등과 같이 예리한 노치가 되는 용접결함이 존재하고 있을 때에는 항복점에 비하여 훨씬 낮은 응력이 작용하여도 피로파괴가 일어나므로 이러한 적은 하중으로는 잔류응력이 별로 삭감되지 않게 되어, 결국 잔류응력의 존재로 인하여 피로강도가 감소할 가능성이 생기게 된다.

### (4) 부식(corrosion)

응력이 존재하는 상태에서는 재료의 부식이 촉진되는 경우가 많은데, 이것을 응력부식이라 한다. 용접부의 잔류응력은 항복점에 가까운 높은 큰 인장응력이 있으므로 이것이 응력부식의 원인이 될 위험성이 크다. 금속 재료에는 현미경적으로 보아 부식을 받기 쉬운 부분이 있으며, 그곳이 침식되면 작은 노치가 된다. 그때 인장응력이 재료에 가해지고 있으면, 이 노치부에 응력이 집중되어 선단에 작은 균열이 생기고, 이 균열의 끝이 다시 선택적으로 부식되어 어느 정도 약해지면 응력집중이 되어 다시 새로운 균열이 진행된다. 따라서 응력부식이 생기는 데는 재질, 부식매질, 응력의 크기 및 온도 등이 크게 영향을 미친다.

강재의 용접부는 크게 용접금속, 열영향부, 모재의 세부분으로 나눌 수 있다. 용접금속은 모재 및 용가재가 정련반응을 수반하여 용융 혼합되어 응고한 조직을 가리킨다. 한편 용융금속에 인접한 열영향부는 용접열에 의해서 용융점 직하에서 광범위한 각 온도로 급속 가열·냉각된 부분이다. 열영향부의 재질변화는 각 부분이 받은 열 사이클에 지배된다. 각 위치에 따른 재질 변화 상황을 Fig. 3-2에 나타내었다. 용접금속과 열영향부의 경계는 용융선 또는 용융경계부로 불린다. 용융선 근처는 용융점 또는 응고 온도범위까지 가열되어 용접금속과 열영향부간의 원소가 확산 이동하여, 소위 천이영역(transition region)을 형성하기 때문에 금속 조직학적으로 매우 문제가 많은 부분이다. 또한, 용접 용융선 근처와 열영향부에서는 과열에 의해 경화되고 균열이 발생하는 등 용접특성이 저하되기 쉽다. 따라서 열영향부는 용접금속과 용접이음 성능 면에서 가장 큰 영향을 일으키는 부분이다.



①, ② : **Composition zone**

③ : **Heat affected zone**

④ : **Unaffected base metal**

Fig. 2-4 Schematic illustration of the weldments

## 제 4 절 적외선 열화상 기술

### 4-1. 적외선 열화상 기초 이론

모든 물체는 온도를 가지고 있으며, 이 온도에 대응하는 적외선 파장 대역에서 적외선 에너지를 방출하게 된다. 아래 식(1)은 Planck의 흑체복사이론으로 흑체복사의 성질(에너지의 크기, 파장)과 흑체의 온도사이에 간단한 관계가 성립하고, 흑체복사체에서 단위시간에 방출되는 파장의 복사량은 온도에 의해서만 결정된다는 흑체 복사의 성질로부터 흑체의 온도를 구할 수 있다. 열화상기술(Infrared thermography technique)은 방출된 에너지량을 측정하여 검출 에너지량과 온도의 상관관계를 이용하여 온도 영상을 제공된다.

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\{hc/\lambda kT\}} - 1} \quad (1)$$

식(2)는 Stefan-Boltzmann's law로 흑체의 단위표면적으로부터 단위시간에 방사되는 전방사 에너지는 절대온도 T의 4승에 비례한다는 이론이다. 여기서 T는 켈빈으로 주어지는 물체의 절대온도(K),  $R_t$ 는 흑체의 반사 강도이다. 위에서 서술한 식(1) Planck's law와 식(2) Stefan-Boltzmann's law을 이용하여 열화상 카메라를 통한 온도 측정이 가능하게 된다.

$$\int_0^\lambda \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \quad R_t = \sigma T^4 \quad (2)$$

본 실험에서 적외선 열화상 기술을 이용하여 용접시험편의 인장속도 (3mm/min, 5mm/min, 7mm/min)에 따른 온도 변화의 관계는 다음과 같다. 대상체가 외력에 의해 변형되면 탄성구간 내에서 열탄성 방정식은 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$pc \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{E}{1-2\nu} \alpha T_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (3)$$

여기에서,  $p$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $T$ 는 물체의 온도변화,  $t$ 는 시간,  $E$ 는 탄성계수,  $v$ 는 포아송 비,  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $T_a$ 는 주변온도,  $\epsilon$ 는 외력에 의한 물체 변형이다. 식(3)은 재료감쇠에 의한 비가역적  $\partial\epsilon/\partial t$  항과 시간에 의존하는  $T_a$ 항으로 인하여 비선형방정식으로 나타나며 응력-변형율의 관계가 선형을 유지한다고 가정한다면, 선형미분방정식으로 취급하여 식(3)은 다음 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{pc} T_a \frac{E}{1-2\nu} \Delta\epsilon = -K_m T_a \Delta\sigma_{1,2,3} \quad (4)$$

재료내부에는 미세한 결함을 갖고 있어서 이러한 미세 동공들이 합쳐져 파괴에 이르게 된다. 균열이 존재하는 계에 외력이 가해지면 재료의 단면적이 급격하게 변하므로 이 부분 주변에 응력 집중이 생기면서 이에 따라 소성영역의 발생에 따른 에너지가 발생된다. 본 실험에서는 인장시험기(UTM)를 이용하여 SS400 용접 시험편을 파단까지 인장을 하였다. 적외선 열화상 기술은 용접 시험편의 표면을 따라 온도에 관련된 징후, 증거가 되는 열 패턴을 검출하기 위해 사용되는 비접촉, 비파괴 시험의 한 형태이다. 정기적으로 수행되면 적외선 정밀검사는 초기에 장비 이상을 확인하는데 도움을 준다. 적외선 에너지는 온도의 직접적이고 비례적인 함수이기 때문에 열화상 동영상은 모니터에 온도 레벨을 나타내도록 되어있다. 최신 적외선 열화상장치는 0.08℃의 감도로 -20℃에서 1500℃의 물체의 온도를 감지 할 수 있다. 적외선 열화상은 열전도에 의해 방사되는 보이지 않는 적외선 광선을 검출하여 화상으로 만들어 주는 기술이며, 가장 전형적인 열화상 카메라는 캠코더와 유사하고 열복사 동영상을 측정 및 저장한다. 좀 더 정교한 카메라는 실제로 어떤 물체의 온도 혹은 화상 안에 있는 표면의 온도를 측정 할 수 있으며, 쉽게 열 패턴을 해석할 수 있는 칼라영상을 만들어 낼 수 있다. 열화상은 온도차로 인하여 보여 질 수 있는 문제 또는 조건에 어떤 상황이라도 적용될 수 있고 많은 사항에 대해서 적용하기가 쉽다. 적외선 열화상 기법은 적외선을 이용한 비파괴 검사 하나로서 적외선 영상장치의 발전과 함께 검사 방법이 다른 시험법에 비해 비접촉 측정으로 안전하며, 고속으로 측정이 가능하고, 기록의 보존 등의 용이한 장점을 가지고 있다9). 적외선의 에너지 복사(Radiation) 파장대는 가시광선과 마이크로



파 사이의  $0.75\mu\text{m}$ 에서  $1000\mu\text{m}$  파장대에 있는 전자기파이다. 적외선 복사를 전기적 신호로 바꾸는 장치를 적외선 감지기(Sensor)라 한다. 넓은 파장대에 있는 복사에너지의 감지를 위해 광 다이오드(Photodiode), 광전도 검출기(Photoconductive), 광기전 검출기(Photovoltaic detector), 초전기 검출기(Pyroelectric detector) 그리고 복합형 검출기(Hybrid detector) 등이 사용 된다<sup>10)</sup>. 특히, 주파수 대역에 따른 적외선 감지기는 근적외선 감지기와 원적외선 감지기가 있다. 원적외선 감지기는 상온에서 방출되는 적외선의 검출에 용이하고, 근적외선 감지기는 상온보다 훨씬 높은 온도에서 방출되는 적외선을 검출하는데 용이하다. 따라서 두 감지기의 감지할 수 있는 온도의 범위가 다르기 때문에 두 적외선 감지기를 융합하여 물체의 내부 상태를 파악하는데 이용할 수 있다<sup>11)</sup>.

#### 4-2. 적외선 열화상 온도의 감지 원리

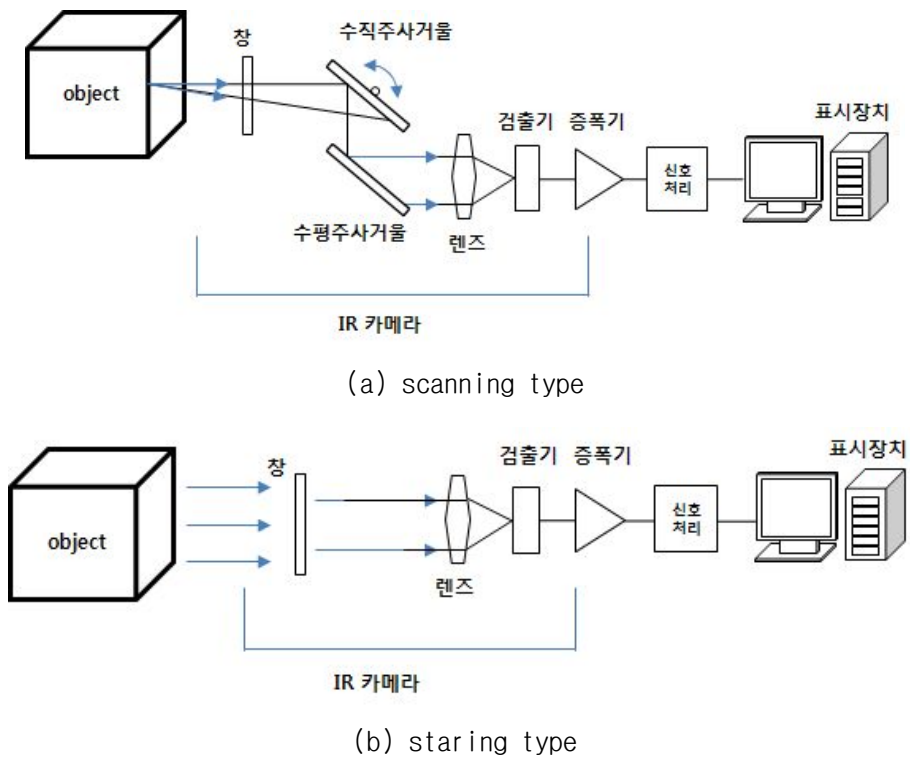


Fig. 2-5 Detection principle of IRT

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈알을 굴리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈알을 굴리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은 원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다. 먼저 Fig. 4-1(a)와 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type)과 Fig. 4-1(b)와 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(staring type)이 있다. 주사(Scanning)방법은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리 없이 보고자 하면 초당 24 frame은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는  $24 \times 250$  에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은  $6000 \times 250$  에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론이 나온다. 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다. 이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다. 주시(staring)방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는 대신에 센서의 소자 하나하나가 모니터의 한 픽셀에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다. 주시 방법에 사용되는 적외선 센서는  $256 \times 256$  이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우  $1024 \times 1024$  배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우  $512 \times 512$  배열까지 개발되어 있다.

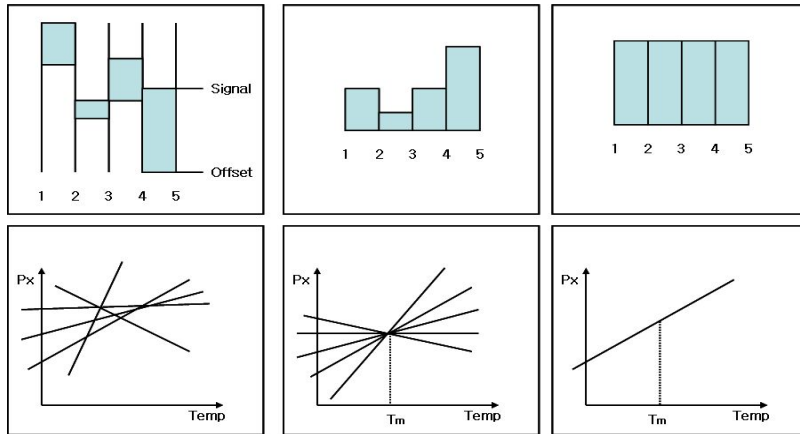


Fig. 2-6 Temperature calibration

주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리기에서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 2-9에 나타내었다. 첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다, 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다. 이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다<sup>12)</sup>.

## 제 3 장 실험장치 및 방법

### 제 1 절 시험편

#### 1-1. 용접 시험편

본 실험을 수행하기 위해 용접 구조용 압연강재인 SS400 재질로 시험편을 Fig. 3-1와 같이 제작하였다. CMT(Cold Metal Transfer)용접기 즉 저입열 용접기를 이용하였으며 용접 와이어는 ER70S 연강용 와이어로 CO<sub>2</sub> 맞대기 용접방법을 이용하여 제작하였다. 용접 시험편의 규격은 가로 20mm, 세로 160mm, 두께 5mm이며 맞대기 양면용접으로 제작하였다. 용접 시험편은 제작 조건은 용접 속도에 따라 20cm/s, 30cm/s, 40cm/s, 50cm/s, 60cm/s 속도로 제작하였다.

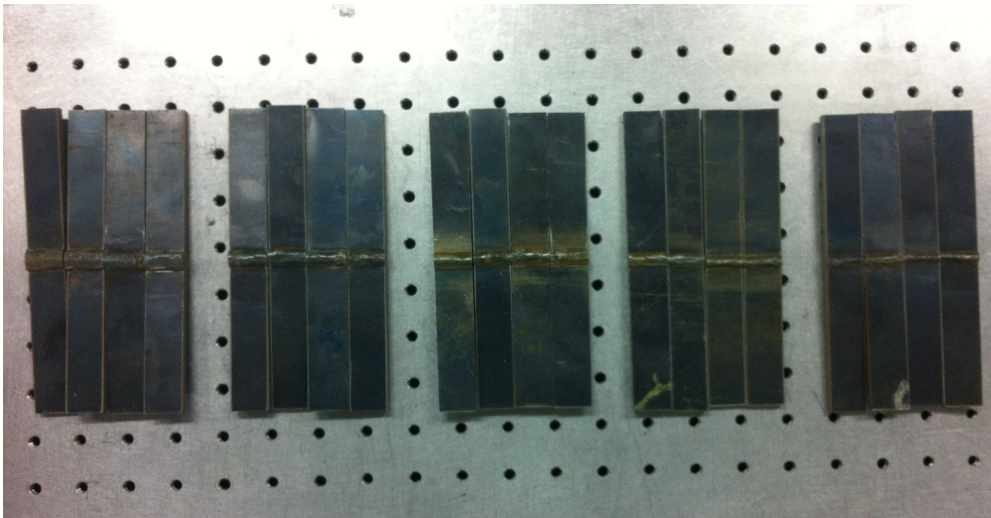


Fig. 3-1 Manufactured Welding specimen

## 제 2 절 실험장치

### 2-1. 인장시험기(UTM)

인장시험기(UTM)은 일본 Shimadzu사의 (AG-IS Trapezium) 제품을 사용하였으며, Fig. 3-1은 장비 사진을 보여주고 있다. 시간에 따른 load값을 detect하는 cell과 control board 및 cell이 보낸 load값을 바탕으로 시편의 strength을 계산하는 computer, cell을 움직이는 main body로 구성되어 있다. 인장 시험기는 주로 재료와 부품에 대한 동적(dynamic) 및 정적(static)시험을 수행하기 위한 장비이지만 여러 가지 형태의 실험프로그램을 직접 작성하여 실행 할 수 있기 때문에, 시험편의 인장길이를 정량적으로 제어하여 인장시킬 수 있도록 프로그램에 입력하여 사용하였다. Table 3-1는 실험에 사용된 인장시험기의 세부사양을 나타낸 것이다.



Fig. 3-2 Tension tester system

Table 3-1 Specification of Tension tester machine

Description	Technical data
MODEL	AG-100KNIC
Maximum Load Capacity	100KN
Test Force Precision	High-precision type Within $\pm 0.5\%$ of indicated test force (at 1/500 to 1/1 load cell rating) Within $\pm 0.5\%$ of indicated test force (at 1/250 to 1/1 load cell rating) Standard-precision type: Within $\pm 1\%$ of indicated test force (at 1/500 to 1/1 load cell rating) Within $\pm 1\%$ of indicated test force (at 1/250 to 1/1 load cell rating)
Test Speed	0.0005 mm/min to 1,000 mm/min

## 2-2. 적외선 열화상 카메라(IR)

인장 시험기를 이용하여 시험편에 인장하중을 인가하는 동시에 적외선 열화상 카메라를 이용하여 인장하중을 받는 시험편의 표면온도 변화를 측정하였다. 적외선 열화상카메라는 프랑스 FLIR systems사의 silver480 모델을 사용하였고, 세부사양은 Table 3-2에 나타내었다.



Fig. 3-3 Infrared thermography system

Table 3-2 Specification of infrared thermography system

Description	Technical data
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스텐링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0um
Number of Pixels	320*256
Pitch	30um*30um
NETD	25mK@25도 (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000도
Frame rate	5Hz~380(400)Hz
Frame rate resolution	1Hz Step

### 2-3. CCD(Charge coupled device) 카메라

본 실험에서 인장시험기(UTM)를 이용하여 시험편에 인장을 가 할 때 광학용 측정 장비인 CCD카메라를 이용하여 기록하기 위해 카메라(IMI TECH) 사를 이용하였다. CCD로 기록된 이미지를 각 픽셀 값으로 실제 길이로 환산하여 각 부위별 측정영역을 용접부, 모재부 등으로 나눠 계산 하였다. 실험에서 CCD카메라와 적외선 열화상 카메라를 동시 촬영함에 따라 각 조건별 제작된 용접 시험편의 체적 변화 및 온도변화를 관찰하여 조건별 용접 시험편의 차이를 확인하였다. Table 3-3은 CCD Camera의 세부 사항을 보여주고 있다.



Fig.3-4 Measurement of volume by CCD Camera

Table 3-3 Specification of CCD Camera

Description	Technical data
Model	IMC-16FT
Sensor type	CCD
Sensor size	1/3 "
pixel(size, number of pixcels)	3.75um x 3.75 μm 1.3MP
Video Resolution	1292 x 960
Max.Frames/sec	22



#### 4. 3차원 미소형상 측정 시스템(SIS-1000)

용접시험편 파단을 하기 위한 장치구성으로 하중인가를 통한 파단된 후 각 지점에서 용접 시험편의 표면 거칠기의 관계를 알아보고 위한 실험이다. Fig. 3-5에서 보는거와 같이 3차원 미소형상 측정 장치를 이용하여 각 위치별로 전면부 영역에 대한 표면 거칠기를 측정하였고 마이크로 스테이지를 이용하여 각 용접별 시험편을 동일 위치에서 측정하였다. 측정된 위치는 시험편의 용접 열영향부, 파단부, 파단면의 각 위치별로 측정을 수행하였다.



Fig. 3-5 3D precise shape measurement

Table 3-4 Specification of SIS-1000

Specification	
■ Scanner Stroke	200 $\mu$ m
■ Sample Stage	Manual : X, Y, Z, Tip/Tilt
■ Objective Mounting	Single Mount Adapter
■ Stage Stroke	X 150mm, Y 100mm, Z 30mm, Tip/Tilt $\pm$ 3 $^{\circ}$
■ Scan Speed	Up to 5 $\mu$ m/sec
■ Scanner Stroke	Lens : x2.5, x5, x10, x20, x50 Step Height Standard

### 제 3 절 실험 방법

본 논문에서는 조건별 용접시험편의 체적의 변화를 확인하기 위해 인장시험기 (UTM)을 이용하여 시험편이 파단 될 때까지의 진행과정을 CCD Camera를 이용하여 영상처리 함에 따라 변형량을 확인하였다. CCD를 이용하여 시험편의 인장 시 변화하는 시편의 폭과 두께를 픽셀(Pixel) 값으로 측정하여 실제거리로 환산하였다. 각 길이를 측정 후 체적을 계산하였다. 체적 계산 시 길이는 국부수축이 발생하는 위치를 기준으로 길이로 고정 하였다. 용접 시험편의 체적의 변화에 따른 온도를 측정하기 위해 시험편의 표면에 방사율은 1에 가깝게 유지하도록 흑색 방사페인트 (방사율 :0.95) 시험편에 고르게 도포하였다. 그리하여 시험편의 인장 속도를 3mm/min, 5mm/min, 7mm/min 의 3가지 속도로 인장하였을 때 인장과 동시에 IRT를 이용하여 각 인장 속도별 온도를 측정하였다. 본 실험에서 시험장치의 구성도는 Fig.3-6와 같다.

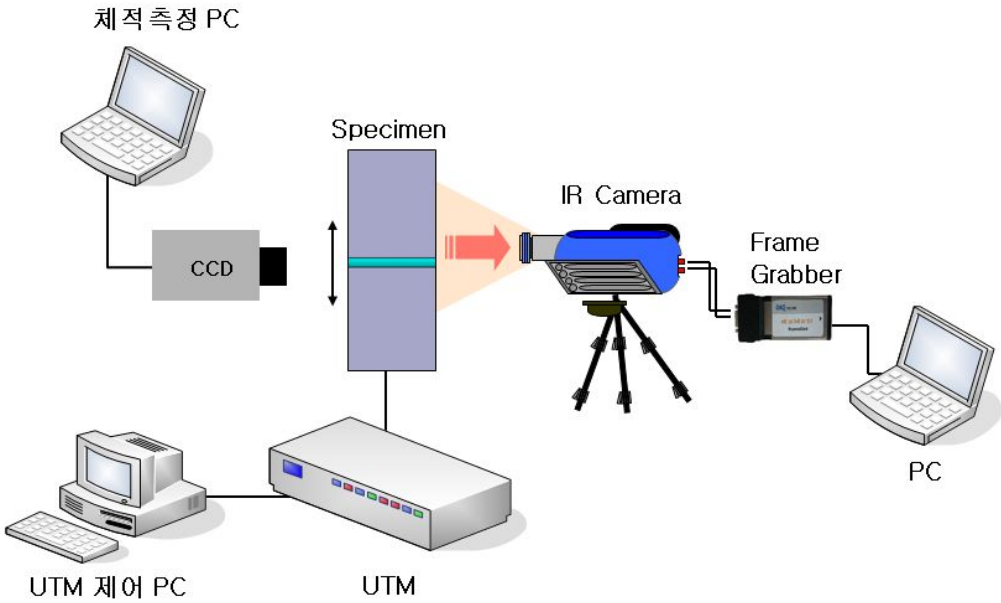


Fig. 3-6 Experimental setup

파단된 시험편은 3차원 형상 측정 시스템 (SIS-1000)을 이용하여 용접 시험편의 용접 열영향부, 파단부, 파단면을 각각 측정하여 최대 거칠기 점을 찾아내었다. 그리하여 인장속도 별 및 용접 속도별 파단 조도 거칠기와의 상관관계를 살펴보았다.

## 제 4 장 실험결과 및 분석

### 제 1 절 인장 시험에 따른 온도 및 체적의 변화 측정

용접시험편을 인장시험기(UTM), 적외선열화상카메라(IR), CCD 카메라를 동기화하여 용접 속도별 시험편을 3mm/min, 5mm/min, 7mm/min 변위 제어를 통한 시험편이 파단 될 때까지의 용접부와 모재부의 체적 변화와 온도변화를 측정하였다. Fig. 4-1은 인장 속도에 따른 시험편의 파단 실험에 대한 구성을 보여주고 있다.

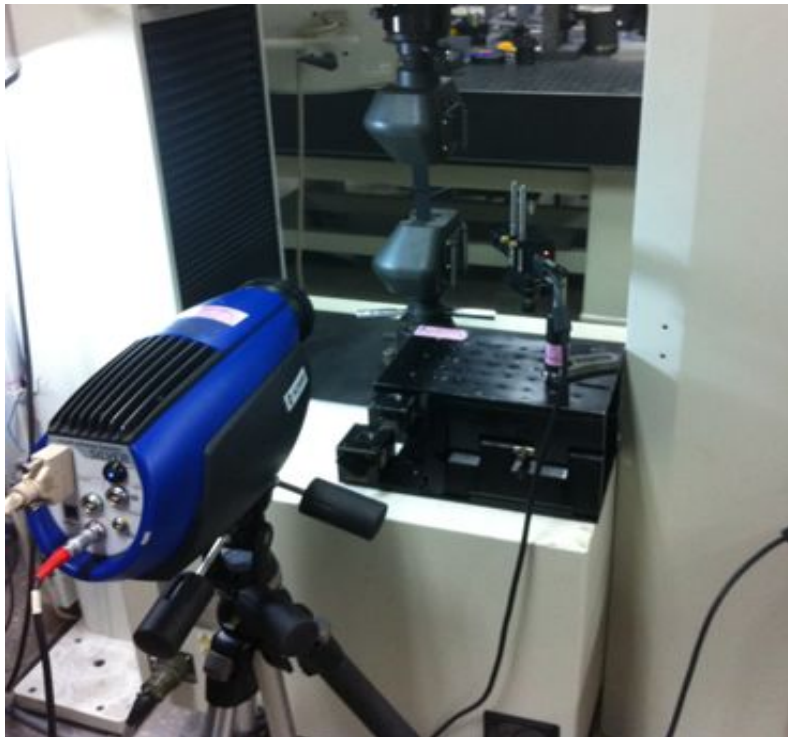


Fig. 4-1 Measurement of temperature and volume by CCD and Infrared Camera

Fig. 4-2은 용접 속도별 인장 속도에 따른 시험편의 파단 실험에 대한 실험(實形)을 보여주고 있다. 각각의 시험편은 인장속도가 빠를수록 인장 길이가 상대적으로 변화되어 체적의 변화가 발생한다. 또한 체적 변화에 따른 온도변화가 일어나며 표면 거칠기가 변화하게 된다. 이와 같은 현상을 측정하기 위해서 시험편의 인장 실험에서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 온도 변화를 측정하여 체적에 따른 온도 변화를 분석 하였다.



Fig. 4-2 Welded Specimen result by tensile speed

### 1-1. CCD Camera를 이용한 체적변화 측정

CCD Camera를 이용하여 5/Sec 1장의 이미지를 획득하여 각 지점의 픽셀위치를 선정하고 시간의 변화에 따라 픽셀위치의 변화를 확인함에 따라 시험편의 b: 폭변화, T: 두께, L: 길이 변화를 확인할 수 있었다. 폭 변화와 두께 변화를 확인함에 따라 단면적의 변화를 알 수 있었고 길이 변화를 측정함에 따라 체적의 변화를 계산할 수 있었다. 실험결과 값을 활용하여 변위제어를 통해 진응력-진변형을 선도를 Fig.4-4 와 같이 얻을 수 있었다. Fig.4-3은 시간에 따른 시험편의 실제 형상을 얻을 수 있었다. 시간이 지남에 따라 단면적이 감소하다가 파단 직전에 파단부 부근의 단면적이 국부적으로 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.



Fig. 4-3 Images of specimen from CCD

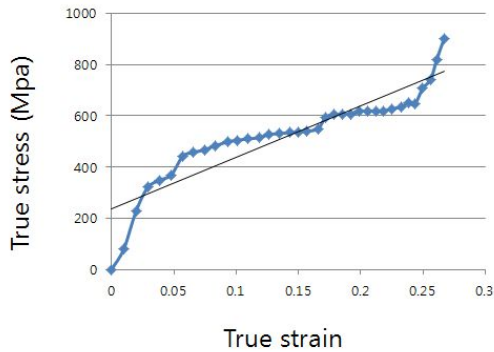
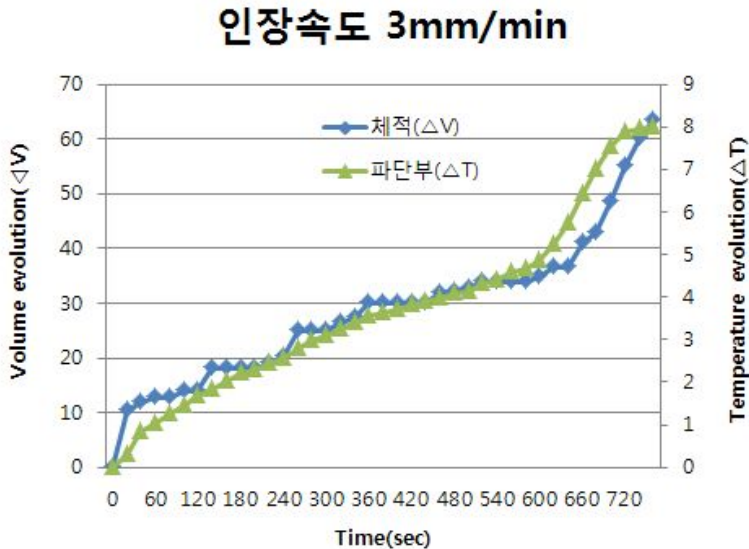


Fig. 4-4 True stress-strain curve

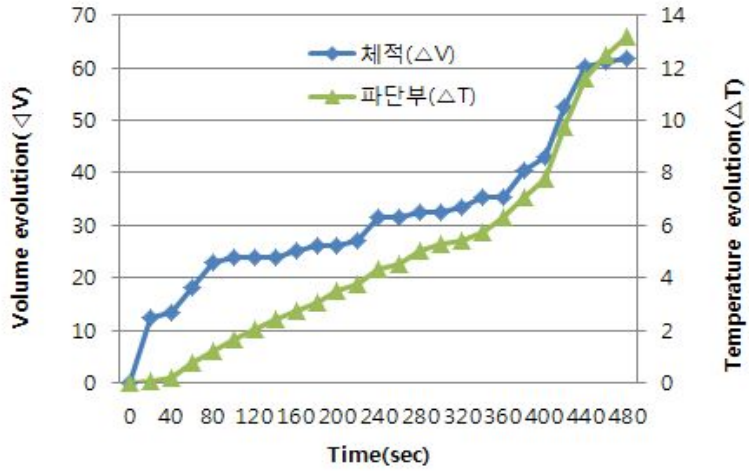
## 1-2. 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도변화 측정

인장속도별 온도변화에 따른 체적변화를 알아보기 위해 인장실험기로 시험편의 인장을 실시하였다. 주변온도는 최대한 일정하게 유지한 상태에서 IRT를 이용하여 온도를 측정하였으며 각속도별 시험편의 온도변화에 따른 시험편의 체적변화를 측정 하였고 실험결과는 Fig.4-5에 나타내었다. Fig.4-5는 현장에서 적용되는 용접 속도 30cm/min로 제작된 시험편을 이용하여 인장속도가 3mm/min, 5mm/min, 7mm/min일 때 온도변화와 그에 따른 체적변화를 나타내었고 시간이 지남에 따라서 온도변화와 체적의 변화가 거의 비슷하게 상승하는 것을 관찰할 수 있다. Fig.4-5 (b)그래프와 (a)그래프를 비교하면 하중의 속도가 증가함에 따라서 열에너지의 생성이 증가하여 온도가 더 빠르게 증가하였음을 Fig.4-6에서 확인 할 수 있었다. 그에 따라 파단부 체적의 변화도 비슷하게 증가함을 관찰할 수 있다. 이 결과에서 보여 주듯이 각 인장속도별 온도변화는 체적의 변화와 관련이 있다는 것을 실험결과를 통하여 검증 하였다.



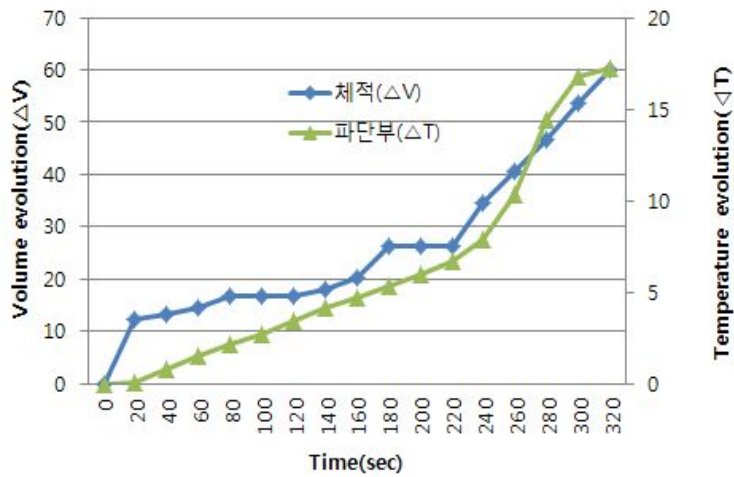
(a)

### 인장속도 5mm/min



(b)

### 인장속도 7mm/min



(c)

Fig. 4-5 Data comparison of the temperature evolution and volume by tensile speed



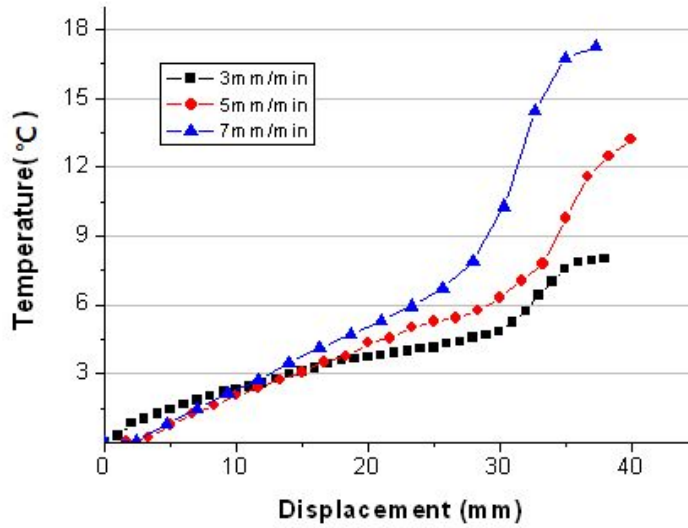
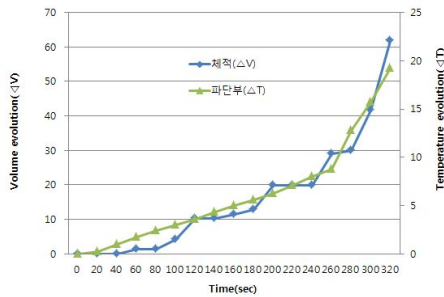


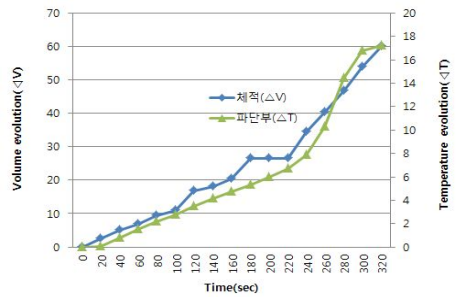
Fig. 4-6 Data comparison of each other temperature by tensile speed

본 실험에서는 인장 시 발생하는 시편의 온도변화에 따른 체적변화의 관계를 알아보기 위해 각 인장 속도별로 이들의 변화를 관찰하였다. 시간의 변화에 따른 온도변화가 체적의 변화와 비슷한 기울기를 가지고 증가 하였으며 인장속도가 증가됨에 따라(3mm/min, 5mm/min, 7mm/min) 시간에 따른 온도변화의 기울기가 증가하였고 이에 상관하여 체적의 변화도 비슷한 기울기를 가지고 변화 하였다. 또한 시험편이 인장될 시 국부수축(necking)이 일어나는 곳에 온도상승 추이가 급격하게 증가하고 이때의 체적변화도 급격하게 발생 하였다. 본 실험을 통하여 시험편의 인장에 의한 온도변화는 체적의 변화와 관련이 있음을 확인하였으며 체적 변화의 데이터를 통하여 그에 따른 온도변화를 예측할 수 있을 것이다.

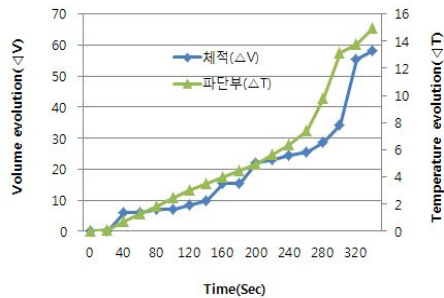
용접 조건의 입열량의 가장 큰 영향을 미치는 용접 속도, 전류량이 체적변화와 온도변화에 어떠한 영향을 미치는지 다음 Fig.4-7 같은 결과를 얻을 수 있었다. 다음은 용접 속도별 20cm/min, 30cm/min, 40cm/min, 50cm/min, 60cm/min 조건으로 제작된 용접 시험편을 인장속도 7mm/min에 따른 온도/체적 변화 그래프를 비교한 결과이다. 용접 속도가 늦을수록 입열량의 큰 영향으로 용접부의 잔류응력 발생과 금속의 조직이 경화되어 체적의 변화와 온도변화가 낮게 나타남을 확인하였다.



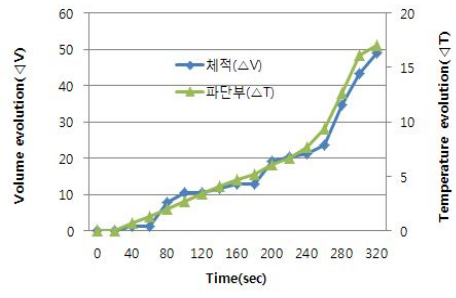
20cm/min



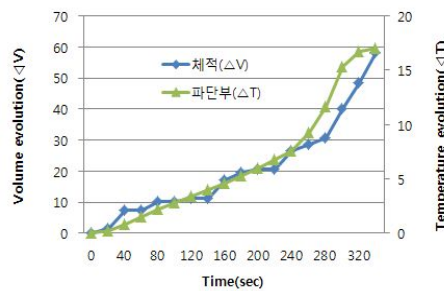
30cm/min



40cm/min



50cm/min



60cm/min

Fig. 4-7 Data comparison of the temperature evolution and volume by welded speed

## 제 2 절 측정 영역별 시험편의 표면온도 변화 측정

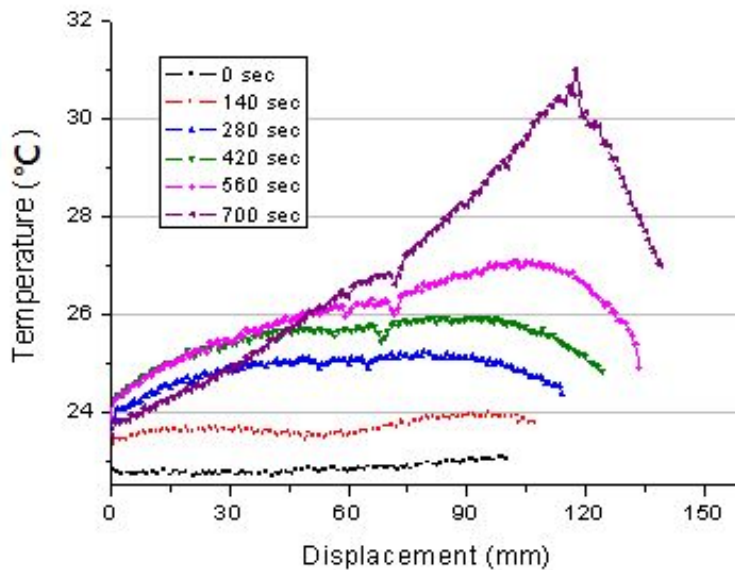
시험편의 측정 영역별 온도를 측정하기 위하여 용접시험편을 일정한 길이로 인장할 때 적외선 열화상카메라를 통하여 시험편의 표면온도가 어떻게 변화하는지 관찰하였다. Fig.4-8는 관찰 결과로써 각 시험편의 인장길이변화에 따른 표면온도 분포를 나타낸 것이다. 용접 조건으로 인한 단면적의 감소의 차이로 인하여 용접부 영역(용접부, 모재부)에 응력집중 현상의 차이가 발생하고 그에 따라 용접부에서 보다 모재부 영역에서 온도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다.



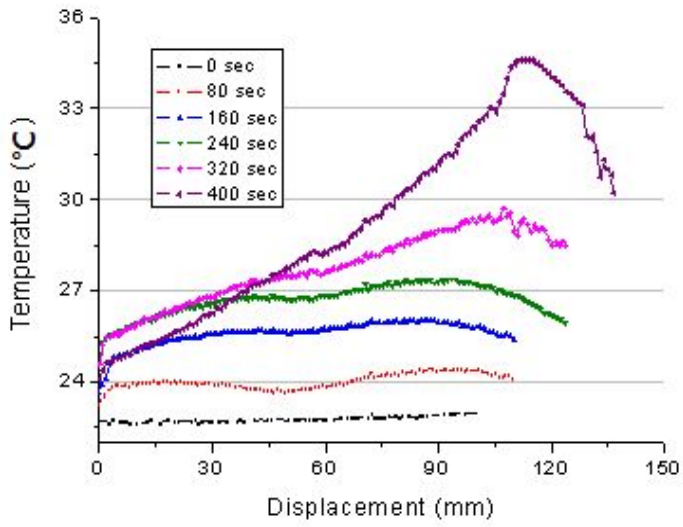
Fig. 4-8 Temperature Area

용접시험편의 온도분포해석을 위해서 인장시험기로 인장 실시하였다. 모재부와 용접부의 온도분포를 해석하기 위해 적외선열화상카메라를 이용하여 Fig.4-8와 같이 3개의 영역을 지정하여 측정하였다. 또한 시험편이 파단 될 때까지의 전체적인 온도 변화를 확인하기 위해 Line-profile 영역을 설정하였다.

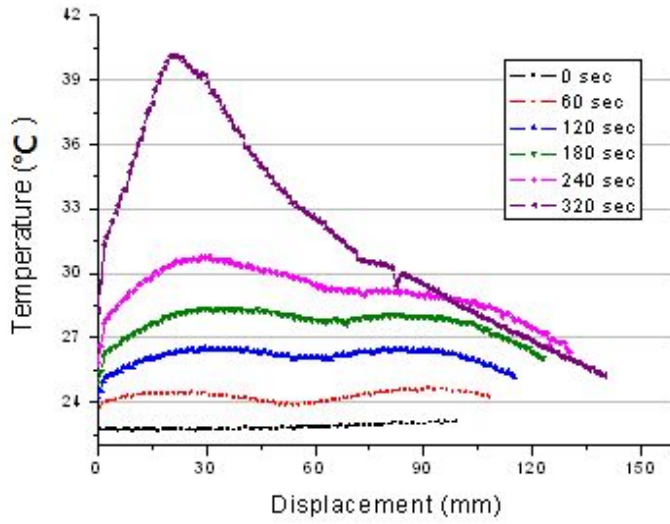
각 영역별 온도분포를 비교해 본 결과 인장시험편의 온도구배는 일정하게 온도가 상승하는 반면 열영향부가 아닌 영역에서의 파단영역에서의 온도증가폭이 시간이 지날수록 온도 차이가 커짐에 따라 파단 시에서 급격하게 상승함을 Fig.4-9에서 보여주고 있다. 전체온도에서 모재부와 용접부 사이의 온도변화폭을 확인할 수 있었고 용접부에서의 온도 변화는 모재부 보다 온도 변화가 적음을 확인하였다. 본 실험의 데이터를 통하여 파단 부분을 예측할 수 있었고 급격한 파단 시의 온도 변화가 높음을 확인하였다. 또한 실험 수행 시 방사율을 높이기 방사선 페인트를 분사하였으나 재료 파단으로 인한 방사선 페인트가 탈락 됨으로써 방사율이 떨어짐에 따라 온도가 낮아지는 현상을 확인하였고 이를 보완하기 위해 본 실험에서 이러한 데이터를 보정을 수행하였다.



(a) 3mm/min



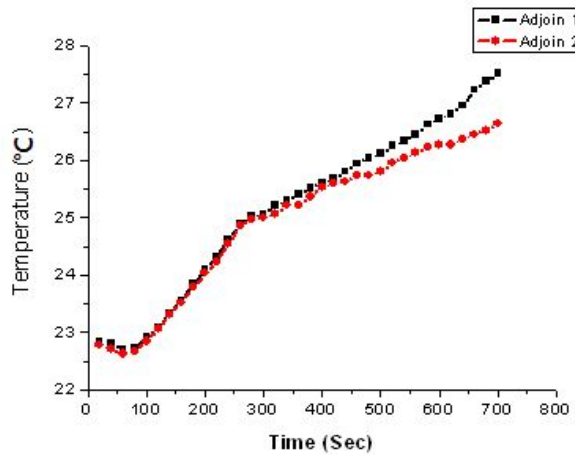
(b) 5mm/min



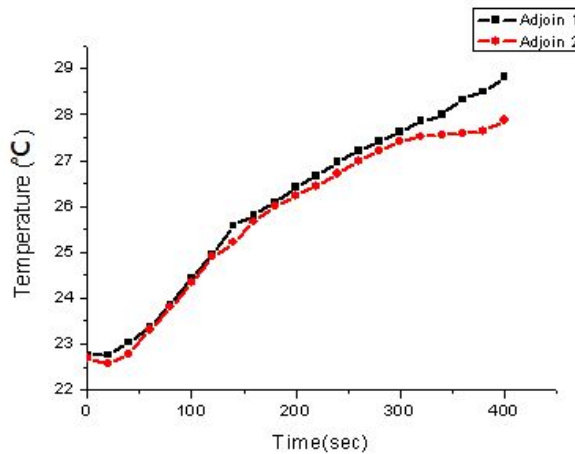
(c) 7mm/min

Fig. 4-9 Temperature graph of welding Specimen by tensile speed

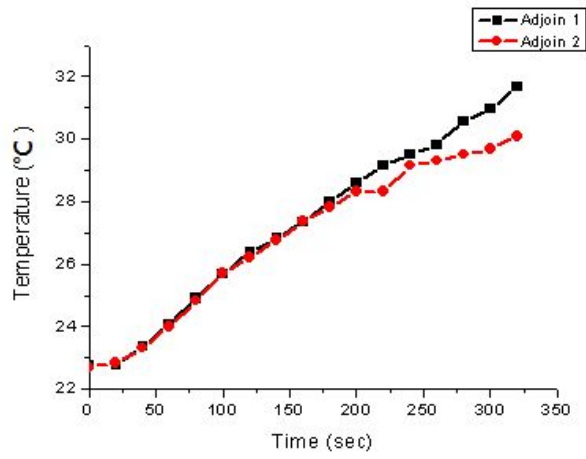
인장 시험 시 발생하는 온도는 용접부를 기준으로 파단부에서의 열원의 영향으로 온도의 변화가 발생한다는 결과를 얻었다. Fig 4-8에서 보여주는 포인트 3, 4는 파단부에서의 거리를 용접부를 중심으로 선정하였다. 파단부에서 가까운 인접 1은 200sec 이상의 시간이 지날 때 온도차 발생이 급격하게 생겼고 이는 파단부에서 생기는 열원으로 인한 인접부 3,4 지점의 온도차로 볼 수 있다. 이 결과 파단부 온도가 전도 되어 가장 인접한 Adjoin 1지점에서 온도가 더 높게 나타남을 보여주고 있다. Fig 4-10은 인장 속도별 인접부의 온도차를 보여주고 있다.



(b) 3mm/min



(c) 5mm/min



(a) 7mm/min

Fig. 4-10 Temperature difference of adjacent failure surface

### 제 3 절 용접 시험편의 파단에 따른 표면 거칠기 변화

Table4-1은 인장시험기(UTM)를 이용하여 시험편의 파단된 면을 SIS-1000(3D profiling system)으로 측정된 결과이다. 용접 속도 별 20cm/min, 30cm/min, 40cm/min, 50cm/min, 60cm/min으로 제작된 시험편의 표면을 측정하여 2D와 3D로 재생한 이미지를 나타낸 것이다. 3차원 형상 미소 측정기로 측정된 결과를 Average filter 실행으로 노이즈를 제거하고 중심부에 Line-profile을 그어 측정 부위의 Rt(최대 거칠기)와 Rz(10점 평균 거칠기)를 나타낸 것이며 속도 또는 전류에 따른 표면의 거칠기의 변화를 확인 할 수 있었다. 모든 시험편에서 이와 같은 현상을 관찰할 수 있었다. Table 4-1은 용접 시험편 파단 시 파단부에서의 표면 거칠기를 2D, 3D로 표현 하였다. 본 실험은 인장속도에 따른 표면 거칠기의 변화와 용접 속도 조건에 따른 파단면의 거칠기 변화의 상관관계를 규명하기 위해 수행되어 졌고 앞으로 금속 공학에서 연구가 필요한 사항이다.

Table 4-1 2D and 3D images acquired from SIS1000

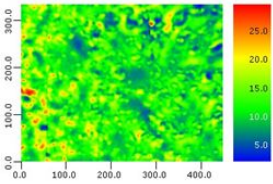
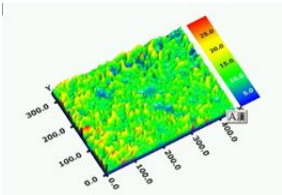
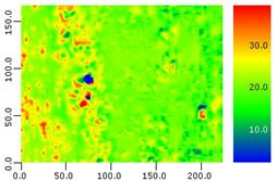
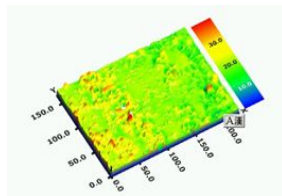
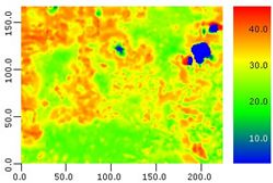
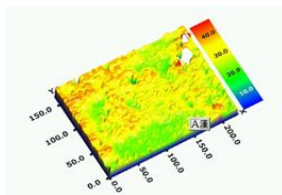
2D Images	3D Images
<p>115(A)</p> 	
<p>127(A)</p> 	
<p>133(A)</p> 	



Table 4-2 2D and 3D images acquired from SIS1000

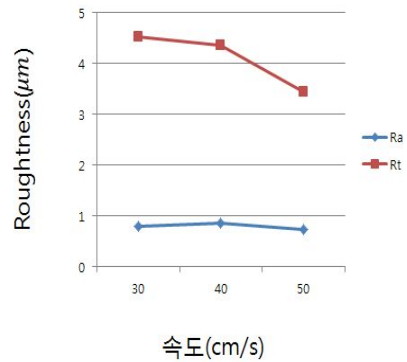
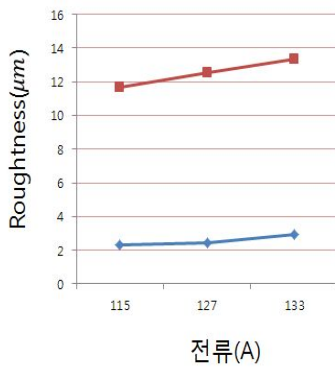
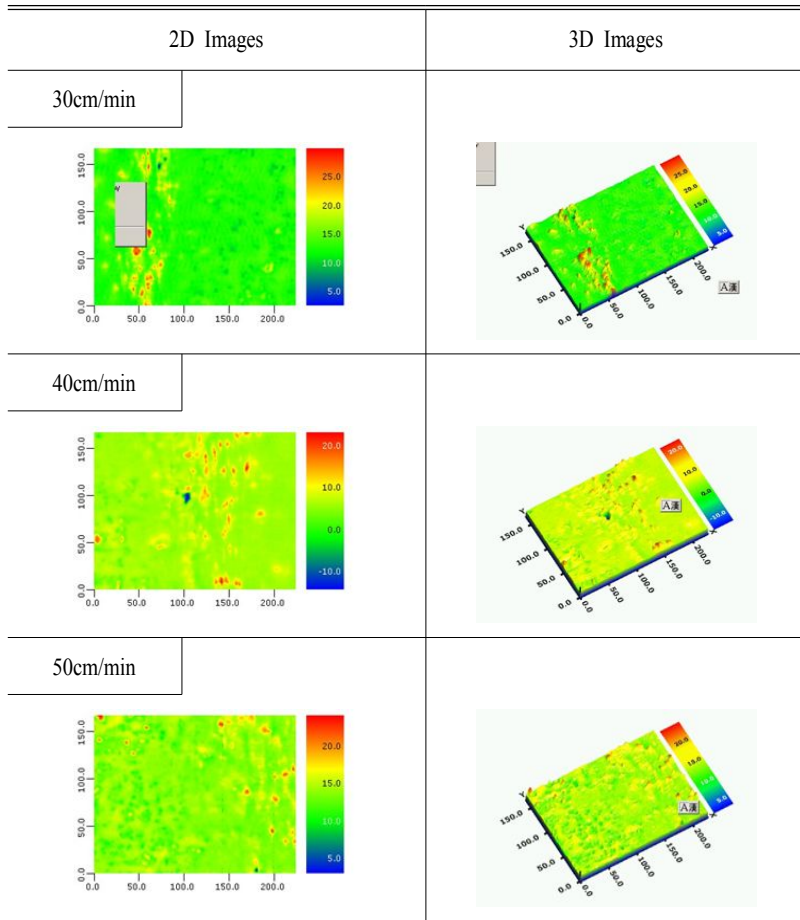


Fig. 4-11 Ra and Rz by welding conditions

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 용접 속도별로 제작된 용접 시험편을 인장 시 발생하는 시험편의 온도변화에 따른 체적변화의 관계를 알아보기 위해 각 인장 속도별로 이들의 변화를 관찰하였다. 또한 시험편 파단 시 발생하는 용접열영향부, 파단부, 파단면 조도측정을 통해 인장속도와 용접 속도에 대한 거칠기의 상관관계를 규명하였다.

1) 외부 변위조건에 의해 시험편은 내부 에너지를 발산하며, 이는 온도나 체적, 표면의 변화로 나타난다. 이러한 변화를 측정하는데 본 논문에서는 적외선 카메라를 이용하여 온도 변화를 측정하였으며, SIS-1000을 통하여 파단면을 관찰함으로써 상호연관 관계를 파악하였다.

2) 인장 시 발생하는 용접 시험편의 온도변화에 따른 체적변화의 관계를 알아보기 위해 각 인장 속도별로 이들의 변화를 관찰하였다. 시간의 변화에 따른 온도변화가 체적의 변화와 비슷한 기울기를 가지고 증가 하였으며 인장속도가 증가됨에 따라 (3mm/min, 5mm/min, 7mm/min) 시간에 따른 온도변화와 체적변화에 대한 기울기 변화를 확인하였다. 또한 국부수축(necking)이 일어나는 곳에 온도 상승이 추이가 급격하게 증가하고 이때의 체적 변화도 급격하게 발생하였다. 본 실험을 통하여 용접 시험편 인장에 의한 온도변화는 체적의 변화와 관련이 있음을 확인하였고 체적의 데이터를 통하여 온도변화를 예측 할 수 있고 파단부 영역을 찾아낼 수 있다.

3) 용접 열영향부, 파단부, 파단면에서의 표면 거칠기 측정은 변위가 클수록 또는 파단부에서의 거리가 가까울수록 평균 표면 거칠기가 거칠어진다는 것을 확인 할 수 있었다. 표면 거칠기는 하중, 변위 조건, 용접 조건별 제작된 시험편과 표면 거칠기와 상호관계 있음을 확인하였다.

4) 본 실험에서는 모재부에 대한 체적의 변화를 이용한 결과를 도출 하였지만 추후 연구를 통하여 용접부 영역의 체적의 변화를 알아내고 이를 이용한 포아성의 비를 도출한다. 또한 체적의 급격한 변화에서의 발생을 알아내기 위한 하중에 따른 금속 재료의 상태변화에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. W. H. Kearns, "Welding handbook", American Welding Society, 7th edition, Vol. 5, pp. 276-311, 1984.
2. J. F. Lancaster, "Metallurgy of welding", 3rd edition, pp. 1-5, 1980.
3. K. Masubuchi, "Analysis of welded structures-Residual stresses, distortion, and their consequences", Pergamon Press, Oxford, 1980.
4. P. Michaleris and A. DeBiccari, "Prediction of welding distortion," Welding Journal, Vol. 76, No. 4, pp. 172-179, 1997.
5. A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments(A review of contemporary measurement techniques", The welding institute, Abington, Cambridge, England, 1977.
6. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," Sov. Phys. Tech. Phys. 17, 333-334 (1972)
7. U. Schnars, and W. Juptner, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. 33, 179-181 (1994)
8. B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," Opt. Lett. 25, 610-612 (2000)
9. S.V.Patankar, "NumericalHeatTransferandFluidFlow", Hemisphere Pub.Co.1980.
10. Arch C.Luther, "Video Camera Technology", Artech House Inc, Section 3.1, 1998.
11. Nancy, K. DelGrande and P. F. Durbin, "Using Emissivity-Corrected Thermal Maps to Locate Deep Structural Defects in Concrete Bridge Decks", SPIE Symposium on Non-Destructive Evaluation of Aging Infrastructure Oakland, CA, June 06-08, 1995.
12. G. Gaussorgurs, "Infrared thermography," translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, (1994)
13. Anderson, T.L, "Fracture Mechanics", CRC press, Boca Raton pp.52-72, 1995
14. 임상전, 이성범, "재료역학", 문운당 출판사, 2008.
15. 오병욱, 고진현, 김덕중, "용접역학", 원창출판사, 2006.
16. 권혁준, 임진환, "일반용접공학", 선학출판사, 2006.

## 감사의 글

대학원에 입학한 게 엇그제 같은데 벌써 2년이란 시간이 지났습니다. 대학원 생활이 학문적이나 생활면이나 즐겁고 많은 배움을 안겨주신 김경석 교수님께 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사하여 주신 장완식, 양인영 교수님과 힘든 사항에도 항상 격려와 조언, 가르침을 아끼지 않으셨던 정현철, 장호섭 박사님께도 감사한 말씀 전해드립니다. 모두 건강하시고 앞날에 좋은 일들만 가득하시길 기원합니다.

힘들고 지칠 때마다 가족같이 동고동락한 실험실원들에게 깊은 감사의 말씀드립니다. 이제는 사회 각지에서 활약하고 있는 실험실에 지존 동수형, 후배들을 잘 챙겼던 찬식이형, 무뚝뚝하지만 군인같은 성성이, 흥일점 소영 선배들이 있어서 대학원 생활이 재미있고 힘들어도 생활할 수 있었습니다. 언제나 탁월한 성취 있으시길 바랍니다.

대학원 생활을 같이 시작하여 이제는 같이 졸업하는 욕심 많은 용찬이형, 옆에서 많은 연구와 고민 상담을 해준 친구 찬식이 동생이지만 자기 일에 자부심을 느끼는 경원이가 있어 큰 위안과 힘이 되어주어 감사합니다. 좀 더 오랜 시간을 같이하고 싶은 마음에 못내 아쉬움이 남습니다.

후배지만 항상 리더쉽을 발휘한 찬근이형, 국제 공동연구를 책임질 상우 덕분에 더욱 자극이 되고 많은 배울 점이 많아 좀 더 수월하게 대학원 생활을 할 수 있었던 것 같습니다. 앞으로도 남은 대학원 생활 마무리 잘하시고 좋은 일들만 있기를 기원합니다.

마지막으로, 가족은 저에게 가장 큰 힘이 되어 주었습니다. 항상 믿어주시고 묵묵히 지원해주신 아버지, 세심하게 신경써주시는 어머니, 그리고 똑똑한 우리 동생이 있어 큰 힘이 되었습니다. 마지막으로 내 옆에서 항상 응원해준 GGR 친구들과 여자친구에게 감사한다는 말을 전하며 앞으로 더 멋진 사람이 될 것을 약속드립니다.

# 저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20117106	과 정	석사
성 명	한글: 김 동 울    한문: 金 東 律    영문: Kim-dong-lyul				
주 소	전남 화순군 만연리 금호 아파트 106동 201호				
연락처	E-MAIL: <a href="mailto:pxgo@naver.com">pxgo@naver.com</a> H.P: 010-5065-6144				
논문제목	한글: 적외선 열화상 카메라를 이용한 용접 조건별 파단면 온도 변화와 표면 조도 측정 영문: Measurement for Temperature changes and surface roughness of fracture according to welding conditions by using Infrared Thermography				
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 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(    )					
2012 년    10월					
저작자:    김 동 울    (인)					
<h2 style="margin: 0;">조선대학교 총장 귀하</h2>					