





[UCI]1804:24011-200000267540

### 2019년 8월

석사학위 논문

# 카고 크레인 붐 측판 용접 시 용접변형저감 방안에 대한 연구

## 조선대학교 대학원 용접·접합과학공학과 양 창 식



# 카고 크레인 붐 측판 용접 시 용접변형저감 방안에 대한 연구

Study on Reduction of Welding Deformation in Boom Side Plate of Cargo Crane

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

양 창 식





# 카고 크레인 붐 측판 용접 시 용접변형저감 방안에 대한 연구

### 지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

#### 2019년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

양 창 식





## 양창식의 석사학위논문을 인준함

## 위원장 조선대학교 특임교수 <u>방한서 (인)</u> 위 원 조선대학교 교수 <u>방희선 (인)</u> 위 원 조선대학교 조교수 <u>손윤철 (인)</u>

2019년 5월

## 조선대학교 대학원





## CONTENTS

List of Figures	
List of Tables	IV
Abstract	V

1	장.	서론	2		•••••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	1
	1.1	연구	배경	••••	•••••		1
	1.2	연구	목적	및	방법		6

2 장. 연구 방법
2.1 재료 및 용접 시험편 제작
2.2 용접 실험 장치
2.1.1 용접 장치
2.1.2 용접 시험편 고정 장치
2.1.3 변형 측정 장치 13
2.1.4 경도 시험
2.3 용접 조건
2.4 변형 측정 방법





3 장. 연구 결과 및 고찰 1	8
3.1 용접 조건별 변형량	18
3.1.1 양산조건 변형량	18
3.1.2 강제 냉각 조건 고려 시 변형량	20
3.1.3 용접순서 대칭 조건 고려 시 변형량	21
3.1.4 최저 입열조건 변형량	22
3.2 동일 측정위치에서 용접 조건별 용접특성 2	23
3.2.1 용접선에서 수직거리 10mm 위치의 변형 비교 2	23
3.2.2 용접선에서 수직거리 40mm 위치의 변형 비교 2	25
3.2.3 용접선에서 수직거리 70mm 위치의 변형 비교 2	27
3.2.4 용접선에서 수직거리 100mm 위치의 변형 비교 2	29
3.2.5 용접선에서 수직거리 130mm 위치의 변형 비교 3	31
3.2.6 용접선에서 수직거리 155mm 위치의 변형 비교 3	33
3.3 경도 분포 특성 3	35
4 장. 결론	6
참고문헌	37



## List of Figures

Fig. 1.1 각종 고소 작업용 건설장비의 예
Fig. 1.2 측판두께가 3.2㎜인 붐의 용접 길이방향 좌굴변형 상태
Fig. 1.3 용접 길이방향의 최대 좌굴 변형량 측정 사진
Fig. 1.4 인입과 출입 시 붐 간 마찰로 인한 측판 표면 손상 사례 4
Fig. 1.5 좌굴변형의 타격교정 작업
Fig. 2.1 측판 두께 3.2mm가 적용된 제품의 용접부 형상
Fig. 2.2 용접 시험편의 규격 10
Fig. 2.3 용접 장치의 구성
Fig. 2.4 용접 시험편과 고정 장치
Fig. 2.5 용접 시험편 변형 측정 장치
Fig. 2.6 용접 열변형 측정 위치
Fig. 2.7 용접조건1(시험편1)의 용접 전과 후의 변형량 측정
Fig. 2.8 측정 부호의 방향
Fig. 3.1 용접선 수직거리 10mm(Y1) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.2 용접선 수직거리 40mm(Y2) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.3 용접선 수직거리 70mm(Y3) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.4 용접선 수직거리 100mm(Y4) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.5 용접선 수직거리 130mm(Y5) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.6 용접선 수직거리 150mm(Y6) 선상에서 변형 비교
Fig. 3.7 용접조건별 경도 분포 ···································





## List of Table

Table.	2.1	ATOS780의 성분 및 재질 물성치
Table.	2.2	ZO-60의 성분 및 재질 물성치
Table.	2.3	용접 조건과 용접 입열값
Table.	3.1	양산조건의 변형량
Table.	3.2	강제 냉각 조건 고려 시 변형량
Table.	3.3	용접순서 대칭 조건 고려 시 변형량
Table.	3.4	최저입열조건 변형량
Table.	3.5	용접선에서 수직거리 10mm(Y1) 위치의 변형량
Table.	3.6	용접선에서 수직거리 10mm(Y1)의 최대 변형값과 변형 감소율 23
Table.	3.7	용접선에서 수직거리 40mm(Y2) 위치의 변형량
Table.	3.8	용접선에서 수직거리 40mm(Y2)의 최대 변형값과 변형 감소율 25
Table.	3.9	용접선에서 수직거리 70mm(Y3) 위치의 변형량
Table.	3.10	용접선에서 수직거리 70mm(Y3)의 최대 변형값과 변형 감소율 28
Table.	3.11	용접선에서 수직거리 100mm(Y4) 위치의 변형량
Table.	3.12	용접선에서 수직거리 100mm(Y4)의 최대 변형값과 변형 감소율 30
Table.	3.13	용접선에서 수직거리 130mm(Y5) 위치의 변형량
Table.	3.14	용접선에서 수직거리 130mm(Y5)의 최대 변형값과 변형 감소율 32
Table.	3.15	용접선에서 수직거리 155mm(Y6) 위치의 변형량
Table.	3.16	용접선에서 수직거리 155mm(Y6)의 최대 변형값과 변형 감소율 34

- IV -





### ABSTRACT

### Study on Reduction of welding Deformation in Boom Side Plate of Cargo Crane

Yang Chang Sik Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D. Department of Welding and Joining Science Engineering, Graduate School of Chosun University

The purpose of this study is to propose a deformation reduction method by considering the side plate deformation for cargo crane boom. For this, the amount of deformation of welded specimens has been measured and compared, which fabricated under four kinds of welding conditions such as current applied welding process, additional cooling process, symmetric welding process and minimized heat input process. As a result of study, Among the four welding conditions, the minimum deformation occurred in the "welding condition 4" of a minimized heat input process, followed by the welding sequence symmetry method and the forced cooling method. And, For the deformation amount of a minimized heat input process, which is "welding condition 4", the strain reduction effect was about 34% compared to the existing mass production condition.





#### 제 1 장 서 론

#### 1.1 연구 배경

각종 건설 공사에서 고층 건물에 자재 및 소형건설 장비를 운반하거나 또는 작 업자를 탑승시켜 고층작업을 수행하는 차량 탑재형태의 건설장비 중 보편적인 것 은 카고 크레인과 고소 작업차가 사용되고 있다.

이러한 건설장비의 특징은 차량에 탑재되어 이동이 빠르고 중량물 이동 시 전복 방지를 위한 지지 장치(아웃트리거)와 신속하게 높은 위치로 중량물 및 작업자를 위치시킬 수 있도록 인입과 출입이 가능한 유압실린더 구동 방식의 다단식 붐 조 립체로 구성되어 있다는 점을 들 수 있다.

Fig. 1.1은 붐 조립체를 사용한 다양한 종류의 건설장비를 보여주고 있다.



Fig. 1.1 각종 고소 작업용 건설장비의 예





건설장비의 구성에서 붐 조립체는 차량의 지지 장치인 아웃트리거보다 더 먼 반 경으로 인출되어 낮은 높이부터 높은 위치까지 중량물과 작업자를 원하는 위치에 인양 및 이동 시켜주는 핵심장치라고 할 수 있다.

이러한 사용조건에서 붐 조립체의 중량이 클수록 차량 전복의 위험성이 증가하 기 때문에 사용반경이 감소하고, 동일한 인양 능력 및 붐 인출반경을 갖고 있을 경우 최대한 작은 차량에 장착되는 것을 선호하는 수요시장의 요구로 인해 붐 조 립체의 경량화는 매우 중요한 사안이 되었다.

그래서 장비 총 중량의 감소와 그 중에서도 붐 조립체의 중량 감소를 위해 인장 강도가 높은 재질로 변경하면서 두께를 감소시키는 방법이 부분적으로 적용되었 다. (재질의 변화: ATOS60 -> ATOS780)

즉, 현재 6개의 붐 박스로 구성된 붐 조립체를 제작할 경우 부하하중을 크게 받 는 붐 박스 단별로 두께를 상이하게 적용하여 제작하고 있는데 기존에 ATOS60(인 장강도: 590MPa 이상)에서 4.5mm를 적용하던 제품의 측판을 인장강도가 24% 향상 된 ATOS780(780MPa 이상)의 3.2mm로 측판두께를 변경하여 동일 면적기준으로 중량 을 29% 감소시켜 사용하고 있다.

그런데 위와 같이 경량화를 위해 두께를 변경한 결과 측판에 용접부가 없는 형태 의 제품과 측판에 용접부는 있으나 측판두께가 4.5mm인 제품에서는 측판의 좌굴변 형에 의한 품질문제가 발생하지 않고 있으나 측판의 두께를 3.2mm로 적용한 제품의 측판에서는 용접 진행방향으로 좌굴변형(buckling distortion)이 발생하고 있다.

Fig. 1.2와 Fig. 1.3은 길이가 4,200mm인 붐 박스 용접 시 발생한 변형과 최대 변형량의 측정 결과를 촬영한 것으로 최대 4.5mm까지 변형이 발생하고 있다.

따라서, 제품에 대한 안전성 및 건전성을 확보하기 위해서는 용접 열변형에 의 한 좌굴변형 저감에 대한 해결방안이 요구되어지고 있다.







Fig. 1.2 측판두께가 3.2mm인 붐의 용접 길이방향 좌굴변형 상태



Fig. 1.3 용접 길이방향의 최대 좌굴 변형량 측정 사진





#### 1.1.1 좌굴변형이 붐 구조물에 미치는 영향

#### 가. 각 붐 박스의 인출과 인입 시 붐 간 마찰로 인한 손상

Fig. 1.4는 좌굴변형의 발생으로 인해 붐 간 여유간극(통상 3~4mm)이 없어지면 서 발생한 마찰로 도막손상과 측판두께가 얇아지는 현상이 발생한 실제 손상 사례 를 보여주고 있다.

또한, 야외현장에서 장비 사용 시 태양광의 반사로 인해 좌굴변형이 더 선명하 게 드러나게 되어 외관품질을 저하시키고 마찰 시 발생하는 소음은 사용자에게 큰 불안감을 조성하여 결국 붐 구조물의 교체를 초래하여 경제적 손실과 제품에 대한 신뢰도 하락으로 이어지게 된다.



Fig. 1.4 인입과 출입 시 붐 간 마찰로 인한 측판 표면 손상 사례





#### 나. 변형교정을 위한 추가 공수 발생

측판에 좌굴변형이 발생한 붐 구조물을 교정 없이 사용할 경우 마찰에 의한 손 상을 초래하므로 Fig. 1.5와 같이 타격교정 및 타격부 사상작업을 실시하게 되며 이로 인한 추가공수의 발생으로 원가 상승과 타격으로 인한 소음 및 타격부 사상 에 의한 분진 발생으로 작업환경 저해의 요인이 되고 있다.

또한, 붐 구조물 길이 방향 전체를 교정하기 때문에 타격 시 발생하는 충격이 작업 자의 손과 어깨에 전해지면서 통증을 유발하여 근골격계 질환의 원인이 될 수 있다.

현재 이러한 좌굴변형은 측판두께가 4.5mm 이상인 붐 구조물과 측판 두께가 3.2mm 이나 상·하판이 없이 2개의 측판으로 구성되어 용접부가 측판에 존재하지 않는 붐 구 조물에서는 매우 미미하게 발생하여 붐 박스 자체 교정을 필요로 하지 않고 있다.



Fig. 1.5 좌굴변형의 타격교정 작업





#### 1.2 연구 목적 및 방법

현재 카고 크레인 및 고소 작업차의 붐 구조물 박스 용접 시 용접 열변형에 의 해 발생하는 좌굴변형을 "용접열에 의해 발생하여 제어할 수 없는 변형"으로 간 주하고 별도의 체계적 연구가 없는 상태이다. 그래서, 본 연구에서는 붐 측판에 발생하는 좌굴변형의 저감에 적정한 용접조건을 제시하고자 한다.

1장에서는 카고 크레인과 같은 형태의 붐 측판 용접 시 발생하는 좌굴변형에 의 한 문제점을 분석하여 본 연구의 배경 및 필요성을 소개하였다.

2장에서는 용접변형 저감 효과가 가장 큰 용접조건을 도출하기 위한 연구방법 즉, 시험편의 제작과 실험장치, 용접순서, 강제 급냉조건, 변형측정방법을 소개하였다.

3장에서는 2장의 용접조건에 따라 제작된 시험편에 변형량을 측정하여 적용한 용접조건 별 용접 이음부의 건전성을 비교, 평가하였다.

4장의 결론에서는 변형저감효과가 가장 큰 최적의 용접조건을 소개하였고 향후 용접공정에 대한 적용 방안을 검토하여 변형저감 방안 수립의 방향성을 제시하였다.

본 연구에서는 이를 위해 현재 양산 조건 "용접조건 1"과 현재 양산조건에 강 제 급냉(수냉)방식을 적용한 "용접조건 2", 현재 양산조건에 용접순서를 대칭법 으로 적용한 "용접조건 3", 최저입열조건을 적용한 "용접조건 4"의 4개의 용 접조건에 대하여 용접변형 특성을 비교 분석하고자한다.





#### 제 2 장 연구 방법

#### 2.1 재료 및 용접 시험편 제작

#### 2.1.1 용접 시험편의 제작 기준 설정

실제 제작되는 제품의 길이는 3.5m~7m로 실험을 위한 취급이 어렵기 때문에 시 험편의 구조를 연구 목적에 맞게 아래와 같은 기준으로 단순화하여 고려한다.

1) 용접부의 형상은 실제 제품과 동일하게 제작하고,

 8접선 방향의 길이(시험편 길이)는 현재 변형이 가장 심하게 발생하는 양산 품의 길이방향 좌굴변형 패턴을 측정하여 결정한다.

그래서, 실제 제품의 좌굴변형 발생 특성을 조사한 결과 Fig. 1.2와 같이 발생 하고 평균적으로 600mm 정도 간격으로 반복 발생하는 경향을 보이고 있어 용접 시 험편의 길이는 600mm로 설정하여 제작하도록 한다.

#### 2.1.2 실제 제품의 용접부 형상

Fig. 2.1은 실제 제작되는 제품의 용접부 형상에 대한 확대 도면으로 붐 구조물 은 2개의 용접부를 동시에 용접한 후 180°회전시켜 다시 나머지 2개의 용접부를 동시에 용접하는 방식으로 제작된다.

그리고, 제품의 형태를 보면 "용접방향"으로 표기한 측판을 양 쪽에서 150°로 절곡된 부재가 고정하고 있는 형태로 용접부에서 발생하는 응력으로 인한 변형은 구 조 상 측판에 집중되며 측판은 이 변형을 방지할 수 있는 구조로 되어 있지 않다.

이런 구조적 특성을 고려하여 본 연구에서는 시험편의 형상과 치수를 결정하였다.

- 7 -







Fig. 2.1 측판 두께 3.2mm가 적용된 제품의 용접부 형상



#### 2.1.3 용접 시험편의 규격 및 용접재료

#### 가. 재료(material)

본 연구에 사용한 재료는 인장강도가 780MPa 이상인 ATOS780이고 두께는 3.2mm 이다. 소재의 화학성분과 기계적 특성은 아래의 Table. 2.1에 나타내었다.

용접재료 중 용접와이어는 지름이 ∅1.2인 "ZO-60"을 사용하였고 보호가스는 Ar(80%) + CO₂ (20%) 혼합가스를 사용하였다. 용접공정은 MAG(Metal Active gas) 용접을 적용하였다. Table. 2.2에 ZO-60의 성분과 재질 물성치를 나타내었다.

Table. 2.1 ATOS780의 성분 및 재질 물성치

적용두께	화학성분(%)									
(mm)	С		Si	Mn	Р	S				
3.2 ~ 12	0.0645		0.046	1.67	0.0098	0.0017				
			인장	방 시험						
Yield st	rength	Ter	nsile strength	) 연	연신율(%), Position					
(MP	a)	(MPa)		연신율	Po	Position				
866	6		887	21	21 E					

Table. 2.2 ZO-60의 성분 및 재질 물성치

와이어의 화학성분(wt%)										
С	C Si		Mn		Р		S	Mo		Ti
0.07	0.07 0.84		1.95	1.95 0.0		0.005		0.31		0.17
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)			연신율 (%)		충격인 -20	성(J) ℃		비 고
550			640		14 이상		14 C	비상		CO₂ Gas





#### 다. 용접 시험편 규격

본 연구의 경우 정해진 시험편의 표준 규격이 없어 붐 측판 변형이 가장 심하게 발생하는 형태인 측판 두께 3.2mm에 상판과 하판의 두께가 4.5mm로 적용된 제품을 선정하여 동일한 용접부의 형태로 아래 Fig. 2.2와 같이 제작하였다.



Fig. 2.2 용접 시험편의 규격

Collection @ chosun



#### 2.2 용접 실험 장치

#### 2.2.1 용접 장치

본 연구에 사용된 용접기는 인버터 방식의 "PFC500"을 사용하였고 가스메탈아 크용접을 위해 용접속도와 용접전류, 용접전압을 조정할 수 있게 자체 제작한 "자동주행 용접장치"를 사용하였다.

용접조건에서 전류와 전압은 Fig. 2.3의 "PFC500"용접기 본체에 부착된 디지 털계측기를 기준으로 설정하였고, 용접속도는 "자동주행 용접장치"에 부착된 디 지털 속도 조절기를 기준으로 설정하였다.



#### Fig. 2.3 용접 장치의 구성



#### 2.2.2 용접 시험편 고정 장치

Fig. 2.4는 길이 600mm로 제작된 시험편(Fig. 2.2 참고)을 실제 붐 측판과 동일한 구속 상태로 만들기 위해 양 끝단에 토글 클램프를 설치하여 고정시키는 장치이다.

실제 제작되는 제품의 용접개소는 Fig. 2.4와 같은 용접 시험편이 대칭으로 2개 소에 존재하고 동시에 용접을 진행하여 제작되나 본 연구의 목적은 어떤 용접조건 이 변형 저감에 가장 큰 영향을 주는지에 대해 분석하고자 용접 시험편은 1개소에 설치하도록 한다.



Fig. 2.4 용접 시험편과 고정 장치





#### 2.2.3 변형 측정 장치

Fig. 2.5는 "리니어 가이드"와 자석식 고정 장치에 "디지털 다이얼 게이지" 를 부착하여 총 4개의 시험편을 용접 전과 후에 측정하여 용접 열변형에 의한 변 형량을 수치화된 데이터로 만들기 위한 장치이다.

"리니어 가이드"의 조립부와 시험편 고정부는 밀링 가공하여 측정의 정밀도를 향상시켰고 "디지털 다이얼 게이지"고정 장치는 시험편의 폭 전체를 측정할 수 있도록 별도 제작하였다.



Fig. 2.5 용접 시험편 변형 측정 장치



#### 2.2.4 경도 시험

용접조건 별 용접부 특성을 고찰하기 위해 Micro Vickers 경도기를 사용하여 경 도 측정을 하였다.

4가지의 용접조건으로 제작된 시험편의 용접 시작점에서 150mm 이격된 지점에서 경도시험을 위한 시료를 채취하였다.

그리고, 시료의 마운팅 작업 후 #400, #800, #1200, #1500, #2000, #2400의 순서 대로 연마하였으며, 다시 Diamond paste (9/ → 3/ → 1/ → )의 순서로 연마하였 다. 경도 시험조건은 현미경 배율 50/ , 136 ° diamond 피라미드형 압입자를 사용 하고 가압하중은 0.5kgf에 가압시간은 10초로 설정하였다. 시험 위치는 용접금속 의 중심부인 시험편 표면에서 중심방향으로 "2.25mm"인 위치에서 경도시험을 하 였다.





#### 2.3 용접조건

용접조건은 붐 측판에 최대의 좌굴변형을 발생시키고 있는 양산품 용접 조건을 "용접조건1(시험편1)"에 적용하였다. 그리고, 용접 열변형을 예상할 수 있는 3 가지 종류의 용접조건을 고려하여 적용하였다.

"용접조건2(시험편2)"의 경우 용접 조건은 양산품과 동일하나 아크 발생으로 용융지가 형성되는 지점에서 "50mm" 후방에 물을 분사하여 강제(수냉) 냉각하는 방식을 채용한다. "용접조건3(시험편3)"은 양산품과 동일한 용접조건에서 용접 의 순서를 용접 시작점에서 300mm 지점인 시험편의 중간부에서부터 용접 시작점에 서 600mm 지점인 시험편의 끝부분으로 향하여 용접을 진행한 후 다시 시험편의 중 간부로 복귀하여 용접 시작점으로 용접하는 방식이다. "용접조건4(시험편4)"는 완전용입이 되는 "최저입열조건"을 적용하였다.

용접 입열값으로 구분하면 "용접조건 2, 3"은 양산품 용접 조건인 "용접조건 1"과 동일한 용접 입열값이 적용되었고 "용접조건4"는 "용접조건 1~3"과는 다른 "최저입열조건"이 적용되었다. 아래의 Table. 2.3에 적용된 용접조건을 나 타내었고 용접 입열값은 다음의 식으로 계산하였다.

H= 
$$\frac{60EI}{v}[J/cm]$$
 I: 아크전류, E: 아크전압, v: 용접속도

구 분	전류[I]	전압[E]	용접속도[v]	용접 입열값	추가 적용 조건
시험편 1	220 <i>A</i>	21.5 <i>V</i>	49.3 <i>cm</i> /min	5,757 <i>J/cm</i>	양산품 기준
시험편 2	220 <i>A</i>	21.5 <i>V</i>	49.3 <i>cm</i> /min	5,757 <i>J/cm</i>	강제(수냉) 냉각
시험편 3	220 <i>A</i>	21.5 <i>V</i>	49.3 <i>cm</i> /min	5,757 <i>J/cm</i>	대칭법 적용
시험편 4	160 <i>A</i>	19.2 <i>V</i>	49.3 <i>cm</i> /min	3,739 <i>J/cm</i>	최저입열조건

Table. 2.3 용접 조건과 용접 입열값



#### 2.4 변형 측정 방법

용접 전과 후의 변형량을 정확한 비교하기 위해 측정위치의 선정이 필요하여 용 접진행방향과 용접진행 방향의 수직인 거리로 구분하였다. 먼저, 용접 시작점을 기준으로 용접진행방향을 향해 "15mm"이격된 위치를 "X1", "X2"는 "X1" 에서 "85mm"이격된 위치이고, "X3~X6"은 서로 "100mm"의 간격이며, "X7" 은 "X6"과 "85mm"가 이격되었다. 용접진행 방향과 수직인 거리는 용접선의 중 심에서 "10mm"이격된 위치를 "Y1"으로 하고 "Y2~5"까지 "30mm"의 간격을 설정하였고 "Y6"은 "Y5"에서 "25mm"이격된 지점으로 설정하였다.

Fig. 2.8에 용접 열변형을 측정할 위치를 도면으로 나타내었다.



Fig. 2.6 용접 열변형 측정 위치





그리고, 측정 방식은 용접 전에 "X1"에서의 "Y1~6"지점에서 디지털 다이얼 게이지를 "0"으로 설정한 후 각각의 측정 포인트에서 측정값을 기록한 후 시험 편의 용접이 완료되고 15분이 경과한 후 용접 전에 측정했던 방식을 그대로 적용 하여 측정한다. 그렇게 측정된 용접 전과 용접 후의 측정값을 비교하여 실제 발생 한 변형량을 구하는 방식으로 진행하였다. Fig. 2.9는 용접 전과 후의 변형량 측 정하는 사진이고 Fig. 2.10은 측정 시 변형방향에 따른 부호를 나타낸다.



Fig. 2.7 용접조건1(시험편1)의 용접 전과 후의 변형량 측정



Fig. 2.8 측정 부호의 방향







#### 제 3 장 연구 결과 및 고찰

#### 3.1 용접 조건별 변형량

#### 3.1.1 양산조건 변형량

양산조건인 "용접조건1(시험편1)"을 용접이 시작되는 X1에서 다이얼 게이지를 "0"으로 조정한 후 용접 진행방향에서 수직 거리인 Y1~Y7까지 각각의 용접 진행 방향으로 용접 시작점인 X1에서 X7까지 용접 전의 측정값을 기록한 후 시험편의 용접이 완료되고 15분이 경과 시 용접 후의 변형량을 측정하였다.

측정된 변형값의 부호는 변형 방향을 나타낸 것으로 변형 측정값이 "○"인 경 우 시험편이 오목하게 변형된 것으로 Fig. 2.10을 참고하도록 한다.

시험편 1		X1	X2	ХЗ	X4	X5	X6	X7
		(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
	용접 전	0.00	-0.06	-0.31	-0.53	-0.66	-0.70	-0.83
Y1	용접 후	0.00	-0.72	-1.38	-1.66	-1.65	-1.18	-0.67
	변형량	0.00	-0.66	-1.07	-1.13	-0.99	-0.48	0.16
	용접 전	0.00	0.03	-0.19	-0.39	-0.48	-0.51	-0.63
Y2	용접 후	0.00	-0.72	-1.32	-1.60	-1.55	-1.11	-0.59
	변형량	0.00	-0.75	-1.13	-1.21	-1.07	-0.60	0.04
	용접 전	0.00	0.08	-0.10	-0.27	-0.33	-0.36	-0.50
Y3	용접 후	0.00	-0.67	-1.31	-1.59	-1.53	-1.07	-0.50
	변형량	0.00	-0.75	-1.21	-1.32	-1.20	-0.71	0.00
	용접 전	0.00	0.07	-0.06	-0.19	-0.23	-0.26	-0.40
Y4	용접 후	0.00	-0.50	-1.11	-1.41	-1.34	-0.89	-0.40
	변형량	0.00	-0.57	-1.05	-1.22	-1.11	-0.63	0.00

Table. 3.1 양산조건의 변형량



Y5	용접 전	0.00	0.17	0.08	-0.05	-0.06	-0.09	-0.25
	용접 후	0.00	-0.49	-1.08	-1.35	-1.26	-0.82	-0.29
	변형량	0.00	-0.66	-1.16	-1.30	-1.20	-0.73	-0.04
Y6	용접 전	0.00	0.18	0.12	0.02	0.03	0.00	-0.17
	용접 후	0.00	-0.40	-0.97	-1.25	-1.15	-0.70	-0.19
	변형량	0.00	-0.58	-1.09	-1.27	-1.18	-0.70	-0.02



#### 3.1.2 강제 냉각 조건 고려 시 변형량

"용접조건2(시험편2)"는 현재 양산조건에 용접 아크 발생지점에서 용접 진행 반대 방향으로 50mm 이격하여 강제(수냉)냉각 하는 방식이 적용되어 제작되었다. 이격거리가 50mm 이하일 경우 선행 용접부에 근접하여 이를 피하기 위해 50mm로 선정하였다. 측정위치는 동일한 위치 Y=10~155mm, X=15~585mm에서 측정하였다. 측 정시간은 용접조건1과 동일하게 용접이 완료되고 15분이 경과 후 측정하였다.

시험편 2		X1	X2	ХЗ	X4	X5	X6	Х7
		(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
	용접 전	0.00	-0.15	-0.30	-0.48	-0.52	-0.53	-0.63
Y1	용접 후	0.00	-0.80	-1.30	-1.54	-1.46	-0.98	-0.53
	변형량	0.00	-0.65	-1.00	-1.06	-0.94	-0.45	0.10
	용접 전	0.00	-0.10	-0.23	-0.44	-0.42	-0.45	-0.55
Y2	용접 후	0.00	-0.71	-1.26	-1.52	-1.45	-0.97	-0.48
	변형량	0.00	-0.61	-1.03	-1.08	-1.03	-0.52	0.07
	용접 전	0.00	-0.04	-0.16	-0.31	-0.28	-0.30	-0.41
Y3	용접 후	0.00	-0.65	-1.21	-1.54	-1.47	-0.98	-0.48
	변형량	0.00	-0.61	-1.05	-1.23	-1.19	-0.68	-0.07
	용접 전	0.00	-0.01	-0.09	-0.23	-0.18	-0.21	-0.34
Y4	용접 후	0.00	-0.52	-1.03	-1.33	-1.26	-0.81	-0.30
	변형량	0.00	-0.51	-0.94	-1.10	-1.08	-0.60	-0.04
	용접 전	0.00	0.06	0.00	-0.10	-0.06	-0.07	-0.22
Y5	용접 후	0.00	-0.50	-1.06	-1.38	-1.31	-0.82	-0.29
	변형량	0.00	-0.44	-1.06	-1.28	-1.25	-0.75	-0.07
	용접 전	0.00	0.08	0.04	-0.05	0.01	0.00	-0.12
Y6	용접 후	0.00	-0.46	-1.00	-1.22	-1.21	-0.75	-0.19
	변형량	0.00	-0.54	-1.04	-1.17	-1.22	-0.75	-0.07

Table. 3.2 강제 냉각 조건 고려 시 변형량

#### 3.1.3 용접순서 대칭 조건 고려 시 변형량

"용접조건3(시험편3)"은 현재 양산조건에 용접순서를 "대칭법"으로 적용하여 제작되었고, 용접 시험편 중앙부(용접 시작점에서 300mm 이격된 거리)에서 X7의 방향으로 용접을 완료한 후 다시 용접 시험편 중앙부에서 X1의 방향으로 용접을 완성하는 방식으로 적용하였다. "시험편 3"도 용접이 완료되고 15분이 경과 후 변형량을 측정하였다. Table. 3.3은 상기 조건의 용접순서 대칭 조건 고려 시 Y=10~155mm, X=15~585mm에서 변형량을 측정한 결과이다.

(X=15mm) (X=100mm)   용접 전 0.00 0.00	(X=200mm) -0.24 -1.11	<b>(X=300mm)</b> -0.40	<b>(X=400mm)</b> -0.55	(X=500mm)	(X=585mm)
용접 전 0.00 0.00	-0.24 -1.11	-0.40	-0.55	0 56	
	-1.11			-0.00	-0.70
Y1 용접 후 0.00 -0.64		-1.39	-1.43	-1.12	-0.77
변형량 0.00 -0.64	-0.87	-0.99	-0.88	-0.56	-0.07
용접 전 0.00 0.00	-0.20	-0.38	-0.48	-0.48	-0.60
Y2 용접 후 0.00 -0.63	-1.10	-1.33	-1.31	-1.03	-0.64
변형량 0.00 -0.63	-0.90	-0.95	-0.83	-0.55	-0.04
용접 전 0.00 0.04	-0.13	-0.30	-0.36	-0.36	-0.49
<b>Y3</b> 용접 후 0.00 -0.57	-1.00	-1.21	-1.14	-0.87	-0.48
변형량 0.00 -0.61	-0.87	-0.91	-0.78	-0.51	0.01
용접 전 0.00 0.10	-0.04	-0.18	-0.23	-0.22	-0.38
Y4 용접 후 0.00 -0.39	-0.82	-1.01	-0.92	-0.63	-0.26
변형량 0.00 -0.49	-0.78	-0.83	-0.69	-0.41	0.12
용접 전 0.00 0.12	0.01	-0.11	-0.12	-0.12	-0.29
<b>Y5</b> 용접 후 0.00 -0.43	-0.86	-1.03	-0.92	-0.59	-0.24
변형량 0.00 -0.55	-0.87	-0.92	-0.80	-0.47	0.05
용접 전 0.00 0.13	0.06	-0.04	-0.04	-0.04	-0.22
Y6 용접 후 0.00 -0.38	-0.78	-0.95	-0.81	-0.50	-0.17
변형량 0.00 -0.50	-0.84	-0.91	-0.77	-0.46	0.05

Table. 3.3 용접순서 대칭 조건 고려 시 변형량

#### 3.1.4 최저 입열조건 변형량

"용접조건4(시험편4)"는 완전용입이 가능한 최저입열조건(3,739*J/cm*)을 고려 한 조건이다. 양산조건의 입열량이 적용된 "용접조건1~3"의 계산된 입열량 (5,757*J/cm*)보다 "용접조건4"는 입열량이 "35%" 감소된 상태로 용접이 진행 되었고 용접 완료 후 15분이 경과하고 변형량을 측정하였다.

Table. 3.4는 상기 조건에서의 변형량 측정값이다.

71	허며 시	X1	X2	ХЗ	X4	X5	X6	Х7
		(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
	용접 전	0.00	-0.03	-0.22	-0.41	-0.51	-0.56	-0.69
Y1	용접 후	0.00	-0.50	-0.99	-1.27	-1.32	-1.02	-0.65
	변형량	0.00	-0.47	-0.77	-0.86	-0.81	-0.46	0.04
	용접 전	0.00	-0.01	-0.19	-0.40	-0.47	-0.49	-0.63
Y2	( 명 전 ( ( ( ( (	0.00	-0.45	-0.94	-1.22	-1.25	-0.96	-0.58
	변형량	0.00	-0.44	-0.75	-0.82	-0.78	-0.47	0.05
	용접 전	0.00	0.03	-0.10	-0.29	-0.34	-0.38	-0.52
Y3	용접 후	0.00	-0.38	-0.80	-1.03	-1.04	-0.79	-0.43
	변형량	0.00	-0.41	-0.70	-0.74	-0.70	-0.41	0.09
	용접 전	0.00	0.10	0.02	-0.12	-0.16	-0.20	-0.36
Y4	용접 후	0.00	-0.26	-0.69	-0.93	-0.92	-0.65	-0.31
	변형량	0.00	-0.36	-0.71	-0.81	-0.76	-0.45	0.05
	용접 전	0.00	0.12	0.10	0.02	-0.03	-0.07	-0.25
Y5	용접 후	0.00	-0.26	-0.62	-0.82	-0.81	-0.56	-0.26
	변형량	0.00	-0.38	-0.72	-0.84	-0.78	-0.49	-0.01
	용접 전	0.00	0.15	0.15	0.07	0.05	0.00	-0.17
Y6	용접 후	0.00	-0.20	-0.53	-0.75	-0.71	-0.47	-0.18
	변형량	0.00	-0.35	-0.68	-0.82	-0.76	-0.47	-0.01

#### Table. 3.4 최저입열조건 변형량

#### 3.2 동일 측정위치에서 용접 조건별 용접특성

#### 3.2.1 용접선에서 수직거리 10mm 위치의 변형 비교

Table. 3.5은 용접선에서 수직으로 10mm 이격된 측정위치 Y1에서 용접 시작점 X1부 터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결과 현재 양산조 건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.13mm"로 가장 크고 최저 입열조 건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.86mm"로 변형이 "23.9%"가 감소하였다.

Table. 3.6에는 양산조건인 "시험편1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 10mm 이격된 Y1 선상에서 "시험편2~4"의 최대 변형감소율을 비교하였다.

							00
	X1	X2	ХЗ	Х4	X5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.66	-1.07	-1.13	-0.99	-0.48	0.16
시험편 2	0.00	-0.65	-1.00	-1.06	-0.94	-0.45	0.10
시험편 3	0.00	-0.64	-0.87	-0.99	-0.88	-0.56	-0.07
시험편 4	0.00	-0.47	-0.77	-0.86	-0.81	-0.46	0.04

Table. 3.5 용접선에서 수직거리 10mm(Y1) 위치의 변형량

Table. 3.6 용접선에서 수직거리 10mm(Y1)의 최대 변형값과 변형 감소율

	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.13	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.06	6.2%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.99	12.4%
시험편 4	최저입열조건	-0.86	23.9%



Fig. 3.1은 용접선에서 수직으로 10mm 이격된 측정위치 Y1의 선상에서 측정된 용접조건별 변형특성을 나타내고 있다. 각 시험편의 변형량의 차이는 있으나 시험 편의 중간인 X4(용접 시작점에서 300mm 이격된 위치)에서 최대 변형값을 나타내었 다. 최대 변형은 기존 양산조건에서 발생하였고 그 다음은 강제 냉각조건 그리고 용접순서 대칭 조건, 최저입열조건 순으로 발생하였다.



Fig. 3.1 용접선 수직거리 10mm(Y1) 선상에서 변형 비교

#### 3.2.2 용접선에서 수직거리 40mm 위치의 변형 비교

Table. 3.7은 용접선에서 수직으로 40mm 이격된 측정위치 Y2의 선상에서 용접 시작점 X1부터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결 과 현재 양산조건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.21mm"로 가장 크고 최저 입열조건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.82mm"로 변형이 "32%"가 감소하였다.

Table. 3.8에 양산조건인 "시험편 1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 40mm 이격된 Y2 선상에서 시험편 2~4의 최대 변형감소율을 비교하였다.

	X1	Х2	ХЗ	Х4	Х5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.75	-1.13	-1.21	-1.07	-0.60	0.04
시험편 2	0.00	-0.61	-1.03	-1.08	-1.03	-0.52	0.07
시험편 3	0.00	-0.63	-0.90	-0.95	-0.83	-0.55	-0.04
시험편 4	0.00	-0.44	-0.75	-0.82	-0.78	-0.47	0.05

Table. 3.7 용접선에서 수직거리 40mm(Y2) 위치의 변형량

Table. 3.8 용접선에서 수직거리 40mm(Y2)의 최대 변형값과 변형 감소율

	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.21	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.08	11%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.95	21%
시험편 4	최저입열조건	-0.82	32%

Fig. 3.2는 용접선에서 수직으로 40mm 이격된 측정위치 Y2의 선상에서 측정된 용접조건별 변형특성을 나타내고 있다.

Y2에서도 각 시험편의 변형량의 차이는 있으나 시험편의 중간인 X4(용접 시작점 에서 300mm 이격된 위치)에서 최대 변형값을 나타내는 특성을 볼 수 있고 이것은 Y1의 변형 패턴과 동일하게 시험편에 축적되는 열량의 증가와 변형을 방지할 수 없는 시험편의 구조에 기인한 것으로 사료된다. 최대 변형은 기존 양산조건에서 발생하였고 그 다음은 강제 냉각조건 그리고 용접순서 대칭 조건, 최저입열조건 순으로 발생하였다.



Fig. 3.2 용접선 수직거리 40mm(Y2) 선상에서 변형 비교



#### 3.2.3 용접선에서 수직거리 70mm 위치의 변형 비교

Table. 3.9은 용접선에서 수직으로 70mm 이격된 측정위치 Y3의 선상에서 용접 시작점 X1부터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결 과 현재 양산조건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.32mm"로 가장 크고 최저 입열조건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.74mm"로 변형이 "44%"가 감소하였다.

또한 "용접조건2(시험편2)"와 "용접조건(시험편3)"의 X4에서 최대 변형량의 차이가 "0.32mm"로 용접선에서 수직으로 40mm 이격된 Y2에서의 "0.13mm"보다 59%(0.19mm) 더 급격히 감소하는 현상을 나타내었다.

이런 현상은 "용접조건3(시험편3)"의 경우 최저 변형량이 측정되는 X4지점(용 접 시작점에서 300mm 이격된 위치)에서 용접을 시작하여 X7까지 용접 후 다시 X4 에서 X1까지 대칭으로 용접하는 방식에 의해 X4에 축적된 열량이 "용접조건1,2 (시험편1, 2)"보다 낮아 용접열원과의 이격거리가 70mm인 Y3의 측정선상에서의 온도가 Y2보다 낮아진 것에 의한 것으로 사료된다.

	X1	Х2	ХЗ	Х4	X5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.75	-1.21	-1.32	-1.20	-0.71	0.00
시험편 2	0.00	-0.61	-1.05	-1.23	-1.19	-0.68	-0.07
시험편 3	0.00	-0.61	-0.87	-0.91	-0.78	-0.51	0.01
시험편 4	0.00	-0.41	-0.70	-0.74	-0.70	-0.41	0.09

Table. 3.9 용접선에서 수직거리 70mm(Y3) 위치의 변형량

Table. 3.10에 양산조건인 "시험편 1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 70mm 이격된 Y3 선상에서 "시험편 2~4"의 최대 변형감소율을 분석하였다.



	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.32	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.23	7%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.91	31%
시험편 4	최저입열조건	-0.74	44%

Table. 3.10 용접선에서 수직거리 70mm(Y3)의 최대 변형값과 변형 감소율

Fig. 3.3은 용접선에서 수직으로 70mm 이격된 측정위치 Y3의 선상에서 측정된 용접 조건별 변형특성으로 시험편의 중간인 X4(용접 시작점에서 300mm 이격된 위치)에서 최대 변형값을 나타내었다. 최대 변형은 기존 양산조건에서 발생하였고 그 다음은 강 제 냉각조건 그리고 용접순서 대칭 조건, 최저입열조건 순으로 발생하였다.



Fig. 3.3 용접선 수직거리 70mm(Y3) 선상에서 변형 비교



#### 3.2.4 용접선에서 수직거리 100mm 위치의 변형 비교

Table. 3.11은 용접선에서 수직으로 100mm 이격된 측정위치 Y4의 선상에서 용접 시작점 X1부터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결 과 현재 양산조건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.22mm"로 가장 크고 최저 입열조건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.81mm"로 변형이 "34%"가 감소하였다.

또한, 측정위치 Y4에서는 X5 위치에서부터 "시험편3"보다 "시험편4"의 변형 이 "0.07mm" 더 발생하고 X6에서는 "0.04mm"가 더 변형되었다.

이런 현상은 대칭법이 적용된 "시험편3"의 경우 최저 변형량이 측정되는 X4지 점(용접 시작점에서 300mm 이격된 위치)에서 용접을 시작하여 X7까지 용접 후 다 시 X4에서 X1까지 대칭으로 용접하는 방식에 의해 X5부터는 최저 입열조건이 적용 된 "시험편4"가 더 커지는 현상에 의한 것으로 사료된다.

Table. 3.12에 양산조건인 "시험편 1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 100mm 이격된 Y4 선상에서 시험편 2~4의 최대 변형감소율을 분석하였다.

	X1	Х2	ХЗ	Х4	X5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.57	-1.05	-1.22	-1.11	-0.63	0.00
시험편 2	0.00	-0.51	-0.94	-1.10	-1.08	-0.60	-0.04
시험편 3	0.00	-0.49	-0.78	-0.83	-0.69	-0.41	0.12
시험편 4	0.00	-0.36	-0.71	-0.81	-0.76	-0.45	0.05

Table. 3.11 용접선에서 수직거리 100mm(Y4) 위치의 변형량



	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.22	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.10	10%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.83	32%
시험편 4	최저입열조건	-0.81	34%

Table. 3.12 용접선에서 수직거리 100mm(Y4)의 최대 변형값과 변형 감소율

Fig. 3.4는 용접선에서 수직으로 100mm 이격된 측정위치 Y4의 선상에서 측정된 용접조건 별 변형특성을 나타내고 있으며 위에 언급한 바와 같이 X5의 지점에 근 접하면서 "시험편3"의 변형이 "시험편4"보다 감소하는 경향을 보여준다.



Fig. 3.4 용접선 수직거리 100mm(Y4) 선상에서 변형 비교



#### 3.2.5 용접선에서 수직거리 130mm 위치의 변형 비교

Table. 3.13은 용접선에서 수직으로 130mm 이격된 측정위치 Y5의 선상에서 용접 시작점 X1부터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결 과 현재 양산조건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.30mm"로 가장 크고 최저 입열조건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.84mm"로 변형이 "35%"가 감소하였다.

또한 측정위치 Y5에서는 X5와 X6의 위치에서 변형량이 "0.02mm"의 차이를 보이는데 이는 Y4(용접선에서 수직으로 100mm 이격된 측정위치)의 X5인 위치에서의 "0.07mm"와 X6에서의 "0.04mm"보다 절반이상 감소되었음을 보여준다.

이러한 현상은 용접선에서 수직거리 130mm 이격된 위치에서는 대칭법의 적용에 의한 모재의 상승온도와 최저 입열조건으로 용접한 모재의 상승온도가 거의 유사 한 것으로 추정할 수 있다.

	X1	X2	ХЗ	Х4	Х5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.66	-1.16	-1.30	-1.20	-0.73	-0.04
시험편 2	0.00	-0.44	-1.06	-1.28	-1.25	-0.75	-0.07
시험편 3	0.00	-0.55	-0.87	-0.92	-0.80	-0.47	0.05
시험편 4	0.00	-0.38	-0.72	-0.84	-0.78	-0.49	-0.01

Table. 3.13 용접선에서 수직거리 130mm(Y5) 위치의 변형량

아래의 Table. 3.14에 양산조건인 "시험편 1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 130mm 이격된 Y5 선상에서 시험편 2~4의 최대 변형감소율을 분석하였다.



	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.30	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.28	2%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.92	38%
시험편 4	최저입열조건	-0.84	46%

Table. 3.14 용접선에서 수직거리 130mm(Y5)의 최대 변형값과 변형 감소율

Fig. 3.5는 용접선에서 수직으로 130mm 이격된 측정위치 Y5의 선상에서 측정된 용접조건별 변형특성을 나타내고 있다.



Fig. 3.5 용접선 수직거리 130mm(Y5) 선상에서 시험편 변형 비교



#### 3.2.6 용접선에서 수직거리 155mm 위치의 변형 비교

Table. 3.15는 용접선에서 수직으로 155mm 이격된 측정위치 Y6의 선상에서 용접 시작점 X1부터 X7까지 용접조건별 변형량을 측정한 결과이다. 변형량을 비교한 결 과 현재 양산조건인 "용접조건1(시험편1)"의 최대 변형량은 "-1.27mm"로 가장 크고 최저 입열조건인 "용접조건4(시험편4)"는 "-0.82mm"로 변형이 "35%"가 감소하였다.

또한 측정위치 Y6에서도 Y3(용접선에서 수직으로 70mm 이격된 측정위치)에서부터 나타나는 양산조건에 강제(수냉)냉각 조건의 "시험편2"와 대칭법이 적용된 "시험편 3"의 최대 변형량에서의 급격한 차이를 계속해서 보이고 있으며 그 차이는 "0.26mm"로 측정위치 Y3에서의 차이 "0.32mm"와 같이 급격한 차이를 나타낸다.

이런 현상은 "시험편3"의 경우 최저 변형량이 측정되는 X4지점(용접 시작점에 서 300mm 이격된 위치)에서 용접을 시작하여 X7까지 용접 후 다시 X4에서 X1까지 대칭으로 용접하는 방식에 의한 것으로 사료된다.

	X1	Х2	ХЗ	Х4	Х5	Х6	Х7
	(X=15mm)	(X=100mm)	(X=200mm)	(X=300mm)	(X=400mm)	(X=500mm)	(X=585mm)
시험편 1	0.00	-0.58	-1.09	-1.27	-1.18	-0.70	-0.02
시험편 2	0.00	-0.54	-1.04	-1.17	-1.22	-0.75	-0.07
시험편 3	0.00	-0.50	-0.84	-0.91	-0.77	-0.46	0.05
시험편 4	0.00	-0.35	-0.68	-0.82	-0.76	-0.47	-0.01

Table. 3.15 용접선에서 수직거리 155mm(Y6) 위치의 변형량

Table. 3.16에 양산조건인 "시험편 1"을 기준으로 용접선에서 수직거리 155mm 이격된 Y6 선상에서 시험편 2~4의 최대 변형감소율을 분석하였다.



	용접 조건	최대 변형값	변형 감소율
시험편 1	양산 조건	-1.27	변형감소율 기준
시험편 2	양산 조건 + 강제(수냉)냉각	-1.17	8%
시험편 3	양산 조건 + 대칭법	-0.91	28%
시험편 4	최저입열조건	-0.82	35%

Table. 3.16 용접선에서 수직거리 155mm(Y6)의 최대 변형값과 변형 감소율

Fig. 3.6는 용접선에서 수직으로 155mm 이격된 측정위치 Y6의 선상에서 측정된 용접조건 별 변형특성을 나타내고 있다.



Fig. 3.6 용접선 수직거리 155mm(Y6) 선상에서 변형 비교





#### 3.3 경도 분포 특성

Fig. 3.7은 용접조건별 경도분포 특성을 나타내고 있다. ATOS780을 MAG 용접 시 열영향부에서 경도가 가장 높은 일반적인 경도 특성은 나타나지 않고 4가지의 용 접조건 모두 오히려 열영향부에서 경도가 저하되는 특성을 나타내었다.

그리고, 열영향부의 끝부분으로 갈수록 경도가 점차 상승하는 경향을 모두 나타 내었다. 또한, 용접금속부를 중심으로 급냉한 "용접조건2(시험편2)"의 경도는 "342.9 Hv"로 가장 높게 측정되었다.



Fig. 3.7 용접조건별 경도 분포





#### 제 4 장 결론

본 연구에서는 MAG 용접으로 두께 3.2mm인 고장력강재(ATOS780)를 붐 측판 용접 시 변형저감을 위한 방안으로, 용접조건(강제 냉각, 용접순서, 입열 최소화)에 따 른 열변형량(좌굴변형)에 대해 고찰하였다. 용접조건은 현 양산조건의 용접 입열 량을 기준으로 제작된 용접조건1(시험편1)과 양산조건에 강제 냉각(수냉)을 적용 한 용접조건2(시험편2), 양산조건에 대칭법을 적용한 용접조건3(시험편3), 최저 입열조건을 적용한 용접조건4(시험편4)를 제작하여 변형량을 비교하고 아울러 경 도분포 특성을 고찰하였다.

- 4가지 용접조건 중 최소변형은 최저입열조건의 "용접조건4"에서 발생하였고, 그 다음은 용접순서 대칭법, 강제 냉각법 순으로 나타남을 확인할 수 있었다.
- 2) "용접조건4"인 최저입열조건의 변형량의 경우 기존 양산조건 대비 약 34% 정도 가장 큰 변형저감효과를 얻을 수 있었으며, 또한 용접순서 대칭법의 "용접조건3"은 약 26%, 강제 냉각방식의 용접조건2는 약 7% 변형량이 감소 함을 확인할 수 있었다.
- 3) 경도 분포의 경우 강제 냉각방식(용접조건2)이 가장 높은 경도값 342.9Hv를 나타내는데, 이는 강제 냉각(수냉) 적용으로 인해 용접부가 급냉함으로써 경 도가 상대적으로 증가한 것으로 사료된다.
- 4) 4가지 용접조건에 대해 변형량 및 경도 분포 측면에서 동일 입열 조건의 사용시 붐 구조물의 측판과 용접되는 부착물의 용접 시 용접 순서를 대칭법(용접 구간의 중앙에서 분할하여 용접)으로 적용하는 것이 효과적이며, 3,500~7,000mm의 긴 용접구간의 경우 최저입열조건의 적용이 변형저감에 가장효과가 있다고 사료된다.





#### 참고문헌

- [1] 방한서, 방희선.(2009). "고장력강 용접의 실무" 외 3권. 백일출판사
- [2] 이윤기, 방희선.(2018). "용접부의 시험·검사". 다보원
- [3] 오범석, 최병진.(2001). "용접야금학". 원창출판사
- [4] 김재웅, 양영수.(2011). "용접 잔류응력과 변형". (사)대한용접접합학회
- [5] 엄기원.(2010). "최신 용접공학". 동명사
- [6] 백정환.(2013). "ATOS80 고장력강의 용접조건에 따른 제 특성에 관한 연구". 조선대학교 대학원
- [7] 유중돈, 나석주.(2011). "아크용접". (사)대한용접접합학회
- [8] 강보안, 이승희.(2007). "재료시험". 한국산업인력공단
- [9] 김정규, 최낙삼.(1997). "기계재료학". 문운당
- [10] 사단법인 대한용접접합학회.(2012). "용접·접합 편람".
- [11] 사단법인 용접학회.(2005). "新版 溶接·接合技術特論".
- [12] 서창민.(2013). "피로 및 파괴역학". 원창출판사
- [13] Klas Weman. (2012). "Welding processes handbook second edition", WP
- [14] 김대식.(2013). "용접과 WPS/PQR".21세기사

