



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월

석사학위 논문

실시간 면외변형 제어를 위한 무구속
용접기법에 관한 수치해석적 연구

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

홍종헌

실시간 면외변형 제어를 위한 무구속 용접기법에 관한 수치해석적 연구

Simulation based study on jig free in-situ control of welding
induced out of plane deformation

2017년 2월 28일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

홍종헌

실시간 면외변형 제어를 위한 무구속
용접기법에 관한 수치해석적 연구

지도교수 주 성 민

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2016년 10월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

홍 종 현

홍종헌의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

목차

List of Figures	VII
List of Tables	VIII
Abstract	IX

1장 . 서론

1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	4

2장 . 이론적 배경

2.1 용접 잔류응력	12
2.1.1 맞대기 용접부의 잔류응력 분포	12
2.1.2 잔류응력 감소방법	13
2.2 용접 변형	14
2.2.1 용접변형의 특성	14
2.2.2 용접변형의 방지 및 교정	14
2.3 열전달 해석	15
2.3.1 입열량	15
2.3.2 입열 시간	15
2.3.3 냉각 방법	15

2.4 유한요소 해석	16
2.4.1 비정상 열전도의 해석	16
2.4.2 3차원 열탄소성의 해석	16
3장 . 유한요소 해석 모델	
3.1 유한요소 모델링	24
3.2 Bead On Plate(BOP) 해석모델	25
3.3 Heat sink welding(HSW) 해석 모델	26
3.4 Heat sink welding(HSW) 해석 모델	28
3.5 HSW 해석조건별 변수	31
4장 . 해석 결과	
4.1 해석조건별 변형량	32
4.2 BOP와 HSW의 온도이력 비교	37
4.3 BOP와 HSW의 변형이력 비교	42
4.4 Heat sink welding 면외 변형량 및 잔류응력 해석.....	31
4.5 BOP와 HSW의 SOD증가 시 잔류응력비교	48
4.6 BOP와 저변형 HSW조건에서의 잔류응력 비교	51
5장 . 결 론.....	53
참고문헌	55

List of Figures

Fig 1.1 Guan의 LSND 모형	4
Fig 1.2 비드 온 플레이트에서 구속조건의 도식도	5
Fig 1.3는 선상가열을 이용한 소성역변형법의 적용순서	6
Fig 1.4 ADSAW 도식도	7
Fig 1.5 인장법 도식도	8
Fig 1.6 냉각의 범위와 위치	9
Fig 1.7 냉각 파이프를 이용한 Heat sink welding(HSW) 모식도	10
Fig 2.1 냉각의 범위와 위치	20
Fig 3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링	24
Fig 3.2 BOP 해석 모델링	27
Fig 3.3 HSW 용접의 해석 모델링	27
Fig 3.4 온도에 따른 비열	29
Fig 3.5 온도에 따른 열전도	29
Fig 3.6 온도에 따른 열팽창 계수	30
Fig 4.1 BOP와 HSW의 온도이력	38
Fig 4.2 BOP 높이(Z)방향 변형	40
Fig 4.3 HSW 높이(Z)방향 변형	40
Fig 4.4 BOP 시간에 따른 높이(Z)방향 변형이력	41
Fig 4.5 HSW 시간에 따른 높이(Z)방향 변형이력	41
Fig 4.6 BOP 잔류응력 (길이방향 σ_{YY} , 폭방향 σ_{XX})	44
Fig 4.7 HSW 잔류응력 (길이방향 σ_{YY} , 폭방향 σ_{XX})	45
Fig 4.8 HSW(위) BOP(아래) 윗면 Top 폭방향 잔류응력 (σ_{XX})	46
Fig 4.9 HSW(위) BOP(아래) 아랫면 Bottom 폭방향 잔류응력 (σ_{XX})	46
Fig 4.10 HSW(위) BOP(아래) 윗면 Top 길이방향 잔류응력 (σ_{YY})	47
Fig 4.11 HSW(위) BOP(아래) 아랫면 Bottom 길이방향 잔류응력 (σ_{YY})	47
Fig 4.12 BOP와 HSW의 SOD증가 시 윗면Top 잔류응력비교 폭방향 (σ_{XX})	49

- Fig 4.13 BOP와 HSW의 SOD증가 시 윗면Top 잔류응력비교 길이방향(σ_{YY}) … 49
- Fig 4.14 BOP와 HSW의 SOD증가 시 아랫면Bottom잔류응력비교 폭방향 (σ_{XX}) 50
- Fig 4.15 BOP와 HSW의 SOD증가 시 아랫면Bottom잔류응력비교 길이방향(σ_{YY})50
- Fig 4.16 BOP와 저변형 HSW조건에서의 폭방향 잔류응력 비교 폭방향(σ_{XX}) 50
- Fig 4.17 BOP와 저변형 HSW조건에서의 잔류응력 비교 길이방향(σ_{YY}) …… 50

List of Table

Table 1.1 Al5083과 연강의 물리적 성질	4
Table 3.1 열전달 경계조건	28
Table 4.1 Heat sink welding 해석 조건과 변형량	36
Table 4.2 HSW의 온도이력	38
Table 4.3 BOP BOP 잔류응력 비교	44
Table 4.4 HSW HSW 잔류응력 비교	45

ABSTRACT

Simulation based study on jig free in-situ control of welding induced out of plane deformation

Jong-heon Hong

Advisor : Prof. Sung-min Joo, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Welding residual stress and deformation cause various problems in the fabrication of welded structures. Welding residual stresses reduce the fatigue strength of the welded structure and facilitate the development of brittle cracks and stress corrosion cracks, and welding deformation may damage the appearance of the welded structure or cause a mismatch of the joints in the assembly process

To mitigate the residual stress and deformation that occurs in the welding

process, many conventional welding processes are designed to minimize the heat input of the welded structure and have used a process of applying heat load and mechanical force. However, the pre and post welding process for correcting welding deformation and residual stress is costly and time consuming.

In order to solve the problem, this study applied jig free in-situ control technique. Al5083-0, which has three times higher heat conductivity than iron and twice the thermal expansion coefficient of iron, was selected. Cooling temperature (Temp), the radius (R) of the cooling heat source and Standoff Distance (SOD) between the welding heat source and the cooling heat source were set as variables. Out of plane deformation, residual stress, and temperature distribution are observed through numerical analysis and then Bead On Plate (BOP) welding and Heat sink welding (HSW) were compared.

BOP welding occurred 6.557mm deformation, but the HSW was 0.857mm at SOD = 10mm, R = 6mm, temp = -56.6 °C. By applying HSW, the deformation was reduced by 86.92%. HSW showed less deformation as SOD was smaller. From SOD = 30mm or more, application of cooling heat source tends to intensify weld deformation. As the SOD was lowered, the tensile residual stress decreased and then changed to the compressive residual stress. As the lower cooling temperature was applied, it changed from tensile residual stress to compressive residual stress.

It is possible to control the welding residual stress and deformation through the finite element analysis using jig free in-situ control technique of welding induced out of plane deformation in Al5083-0 thin plate welding. Using jig free in-situ control technique is expected to increase the fatigue strength of

welded structures. In addition, it is expected that it will improve productivity and lower the production cost because it does not perform pre and post-treatment after welding.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 뿌리기술의 첨단화와 고도화가 시급하다는 인식하에 관련 법률을 제정했고 기본계획도 수립해 시행하고 있다. 그래서 주력산업의 글로벌 경쟁력 강화를 위해 반드시 필요한 첨단뿌리기술을 발굴하고 이러한 기술을 보유한 중소 뿌리기술 기업에 대한 지원을 하고 있다. 그 중 용접은 자동차, 조선, 반도체 등에 중요하게 사용되고 있으며 특히, 요즘 이슈가 되는 웨어러블 전자제품, 휘어지는 디스플레이가 제품화되기 위한 관건 중 하나도 용접 접합이라는 뿌리기술이다. 구겨지고 휘어지는 표면에다 초미세 전자부품들이 떨어지지 않도록 결합시키는 박판 용접 기술은 제품의 상업화에 필수적이기 때문이다. [1], [2]

본 연구에서는 항공, 자동차산업, 전자제품뿐만 아니라 경량 구조를 요구하는 선박에도 대표적으로 많이 사용하고 있는 Al5083계열의 박판용접을 모델로 하였다. 알루미늄 합금은 Mg, Cu, Si 등의 첨가성분에 따라 1000계열에서 9000계열로 나누어진다. Al-Mg계 합금인 5000계열은 저온에서 취성이 없으며 비 자성체인 장점을 가지고 있다. 그 중 Al5083합금은 비열처리 합금으로는 강도가 가장 우수하며, 용접성, 내식성, 인성, 저온 특성, 가공성 또한 양호하다. 반면 Al5083 합금의 용접 시 단점은 변형이 Fe에 비해 심하다는 것이다. 그 원인으로는 Al5083 용융온도가 Fe에 비해 매우 낮지만 비열과 잠열이 크기 때문에 용융에 필요한 열량이 Fe에 비하여 시을 용접할 때 보다 많은 열량이 필요하다는 것이다. 또한 철보다 3배 더

높은 열전도도와 철의 2배 이상인 열팽창계수와 더불어 탄성계수가 작고, 고온강도가 낮기 때문에 용접 열원에 따른 변형이 커지는 점을 원인으로 들 수 있다. Table 1.1을 통해 연강과 A15083의 물리적 성질을 확인할 수 있다. [3]

변형과 더불어 용접공정 중에서의 단점은 잔류응력이 발생한다는 것이다. 용접 시 국부적으로 열이 가해짐에 따라 국부적인 열에 의해 재료 내부에 불균일한 온도 분포가 생기게 된다. 이 때 부재의 자유로운 열 변형이 주변 모재에 의해 구속되어 열응력이 발생한다. 그 후 용접 종료 후까지의 과정에서 각 부분에 걸쳐서 팽창과 수축의 정도가 다르게 되며 이 과정에서 열응력이 항복응력을 넘게 되는 소성응력이 발생하며 냉각된 후에도 잔류하게 된다. [4] 일반적으로 용접 시 용접변형과 용접잔류응력은 서로 상반되는 효과를 나타내며, 용접시의 구속 상태가 작으면 용접잔류응력은 작게되나 용접변형은 크게 된다. 반면 용접금속이 자유롭게 수축될 수 없을 정도로 구조물의 구속상태가 크게되면 용접변형은 작게되나 용접잔류응력은 크게 된다고 말할 수 있다. 용접공정에서 이와 같이 발생하는 용접잔류응력과 용접변형은 용접구조물의 제작 시 여러 가지 장애를 유발할 뿐만 아니고 그 구조물의 사용 중에 있어서도 파괴의 발생 또는 파괴의 전파에 직간접적으로 기여하여 악영향을 끼치게 된다. 즉, 용접잔류응력은 용접구조물의 피로강도를 저하시키거나 취성균열 및 응력부식균열의 진전을 용이하게 하며, 용접변형은 용접구조물의 외관을 해치거나 조립공정에서 이음의 불일치를 유발한다. [5]

용접 시 문제가 되는 잔류응력과 변형을 완화하기 위해 기존에 많은 용접공정은 용접구조물의 입열량을 최대한 낮추기 위해 구조물을 설계하거나 열 하중 및 기계적 힘을 적용하는 방법으로 용접수축 및 잔류응력을 완화시키는 공정을 적용하고 있다. 그러나 이 같은 용접 변형을 교정하기 위한 용접 전·후 공정은 많은 비용과 시간을 소요하고 있다. 그리고 현장작업 중 작업자의 경험에 의지하여 변형교정과 잔류응력

감소작업을 하고 있는 실정이다. [6]

하지만 복잡한 전·후 처리과정에서 생산성하락과 고비용이 발생하므로 기존 방법과 달리 용접과정과 동시에 변형과 잔류응력을 제어 할 수 있는 Low stress no distortion(LSND)기술을 위한 연구가 진행 중이다. LSND기술은 낮은 잔류응력과 그리고 최소한의 변형을 제공하면서 용접부에서의 소성응력을 감소시키는 것을 목표로 용접부에 가까운 지역에 열원 혹은 냉각을 위한 장치를 적용하는 방식이다. 첫 번째 LSND연구는 Guan에 의해서 TWI Ltd(TWI)에서 수행되었다. 0.71mm에서 0.25mm까지의 Al 합금과 STS를 Tig용접하는 실험에 LSND기술을 적용하였다. Fig.1.10에 용접부 주위에 냉각과 가열사용한 Guan의 실험모형을 확인할 수 있다. [7] 하지만 아직 LSND 용접은 산업의 적용을 위해 자동화 되지 못한 실정이다. 따라서 기술의 선택과 다양한 재료에 대한 용접 파라메타 도출을 돕기 위한 방법으로 수치 해석 모델링을 통한 접근이 필요하다. 또한 구속이 상태가 없으면서 한 번의 용접공정에서 잔류응력과 용접변형을 모두 제어할 수 있다면 좀 더 효율적인 생산 공정이 될 것이다. [8]

본 논문에서는 변형과 잔류응력이 문제가 되고 있는 박판 Al5052-0의 Gas tungsten arc welding (GTAW) 과정 중에서 실시간 면외면형 제어를 위한 무(無)구속 용접기법을 적용하려고 한다. 또한 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 개선시키기 위한 가능성을 검토하기 위해 LSND용접법을 소개하고 범용 유한요소해석(Finite Elements Method)해석 코드인 MSC.Marc를 사용하여 수치해석적 연구를 하고자 한다.

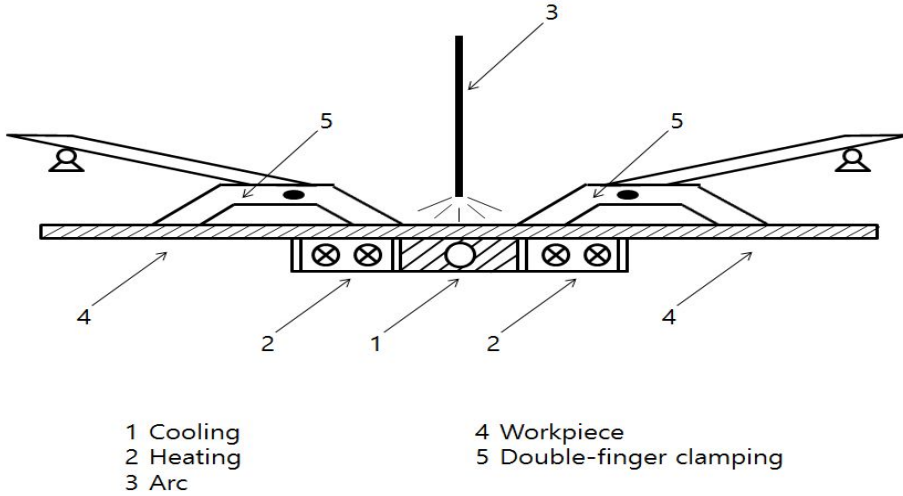


Fig 1.1 Guan의 LSND 모형

Table 1.1 Al5083과 연강의 물리적 성질

금속	비중	용융점	비열	팽창계수	열전도율	탄성계수	강성률	고유저항	도전율
Al5083	2.66	595-640	0.23	25	0.31	68,600	25,9570	0.062	29
연강	7.86	1,500- 1,527	0.11	12	0.12	205,800	82,320	0.12	16

1.2 연구 동향

용접구조물에 잔류응력과 변형예측에 관한 연구들이 International Institute of welding (IIW)에서 진행되어왔다. 잔류응력분포와 변형을 측정하기 위해서 모델링 하는 법과 실험적 방법을 최적화 하는데 상당히 큰 발전하고 있으며 이는 수치해석 기법의 발달로 인해 용접현상을 정량화 하려는 연구가 상당히 진행되어 왔기 때문이다. [9]

하지만 용접 잔류응력과 변형을 완화하는 방법에 있어서는 여러 접근법을 통한 연구가 시도 되고 있다. 기존에 많은 용접공정은 용접구조물의 입열량을 최대한 낮추기 위해 구조물을 설계하거나 열 하중 및 기계적 힘을 적용하는 방법으로 용접수축 및 잔류응력을 완화시키는 공정을 적용하고 있다. 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

1. 추환수는 박판에 대한 변형교정공수를 고려한 변형모드의 구분과 변형량 측정방법에 대한 연구를 하였다. 연구에서 단일 비드 온 플레이트 용접과 필릿용접에서의 좌굴변형 모드구분과 좌굴변형량에 대한 정량적인 방법을 제시하였다. 싱글 비드 온 플레이트 마그(MAG)펄스용접에서 용접조건과 구속조건, 냉각조건 및 용접순서에 따른 좌굴변형과 필릿용접에서의 변형형태와 변형량을 측정 하여 특징을 구분하고 정량화 시켰다. Fig.1.1 실험에 사용된 기계적 구속방법을 통한 모식도를 확인할 수 있다. [10]

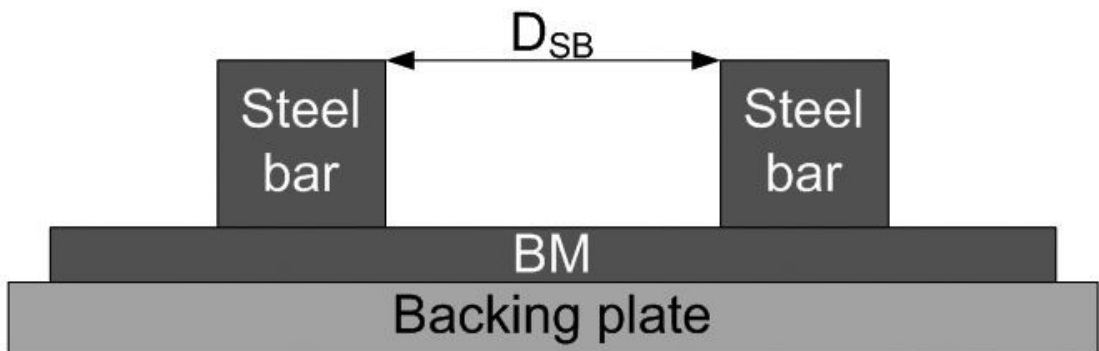


Fig 1.2 비드 온 플레이트에서 구속조건 의 도식도

2 김상일은 실제 박판 평 블록 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 최소화하였다. 새로운 개념의 변형 방지법으로 선상가열을 이용한 소성 역변형법을

구체적인 변형제어 방안으로 제시하였고, 이의 타당성을 다수의 수치해석을 통해서 검증하였으며, 이러한 방법이 변형 제어에 매우 효과적이라는 사실은 실물 적용을 통해서 확인하였다. Fig1.2는 선상가열을 이용한 소성역변형법의 적용순서를 보여주고 있다. [11]

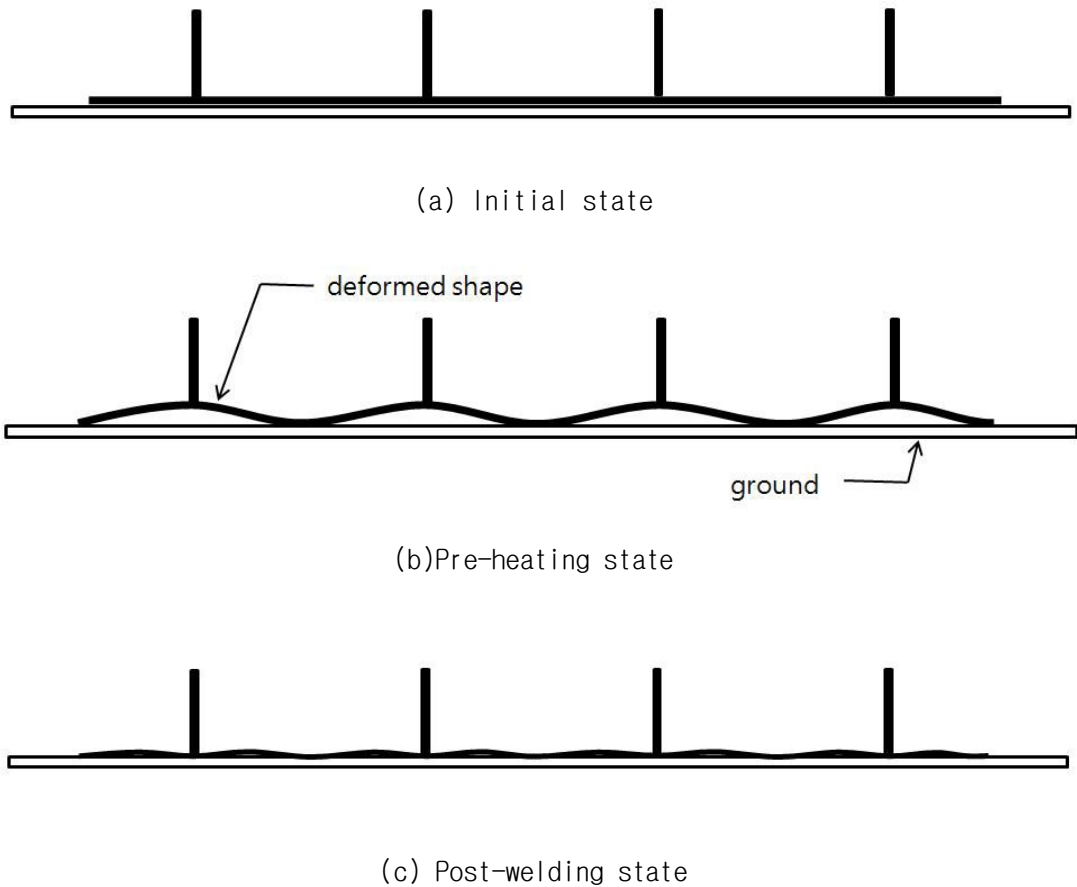


Fig 1.3는 선상가열을 이용한 소성역변형법의 적용순서

3. Florian Tölle는 잔류응력을 감소시키는 목적으로 연구를 하였는데 연구방법은 용접부 양측 면에 시편을 예열하는 것이었다. 그리고 예열을 위해 초점이 흐려진

빔을 사용하였다. 이 같은 방법으로 응력은 장치를 사용하여 표면에 접촉하는 것 없이 감소하였다. 다양한 프로세스 파라미터들은 레이저의 전력과 부품의 구조에 영향을 받았다. 파라미터들 메카니즘의 영향은 유한요소와 S355J2+N steel에 관한 실험에 의해 연구 되었으며 응력은 약73 % 감소하였다. [12]

4. Huajun Zhang은 asymmetrical double-sided double arc welding(ADSAW)에서의 두 개의 예열하는 아크의 거리와 입열량을 조건으로 용접 변형에 대한 연구를 진행했다. 용접변형을 연구하기 위해서 실험 적인 방법과 수치해석을 사용하였는데 ADSAW의 특징을 전방 TIG예열과 후방 TIG 예열 사이의 상호작용을 통해 표현하였다. 3-D 열 탄소성유한요소 모델이 개발 하여 순간적인 온도와 다양한 아크 거리와 입열량에서 용접 변형을 시뮬레이션 하였다. 그래서 잔류 각변형이 아크 거리와 두 아크의 입열과 관계가 있다는 것을 밝혔다. 적정한 아크 거리와 후방 아크의 입열량을 결정하는 것은 효과 적으로 각변형을 감소시킨다. [13]

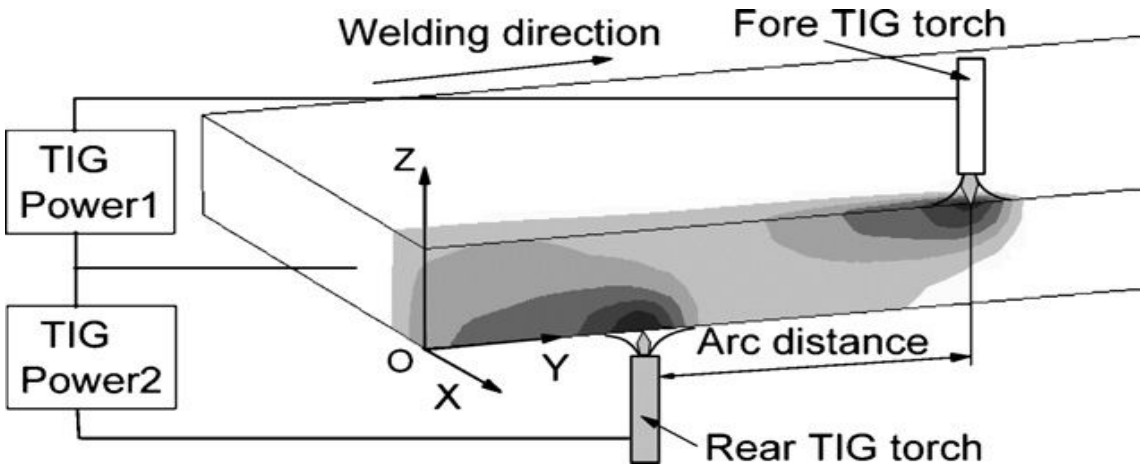


Fig.1.4 ADSAW 도식도

5. 이주성은 박판의 용접 시 기계적 인장법의 적용을 통해서 수축과 변형을

감소시키는데 효과가 있는지를 정량적으로 분석하고자 다수의 시편에 대하여 맞대기 용접과 필렛 용접 실험을 수행하였다. 용접선 방향으로 작용시킨 경우 장력의 크기에 따라 60% 정도의 변형감소 효과가 있으며, 용접선에 법선방향으로 작용시킨 경우에는 20~60% 정도의 변형감소 효과가 있다는 것을 알아냈다. 또한 입열량이 적은 경우보다 입열량이 많은 경우에 변형감소 효과가 더 크다는 점을 발견하였다. Fig.1.3을 통해 실험에 사용된 인장법의 모식도를 확인할 수 있다. [14]



Fig.1.5 인장법 도식도

이 같은 용접 변형을 교정하기 위한 용접 전·후 공정은 많은 비용 혹은 시간을 소요하고 있다. 하지만 복잡한 전·후 처리과정에서 생산성하락과 고비용이 발생하므로 기존 방법과 달리 용접과정과 동시에 변형과 잔류응력을 제어 할 수 있는 Low stress no distortion (LSND)기술을 위한 연구가 진행 중이다. LSND기술은 낮은 잔류응력과 그리고 최소한의 변형을 제공하면서 용접부에서의 소성응력을 감소시키는 것을 목표로 용접부에 가까운 지역에 열원 혹은 냉각을 위한 장치를 적용하는 방식이다.

6. Xitang Tian는 집중적인 후방 냉각과 기존의 용접을 비교하는 실험을 하였다. 온도 분포와 응력 분포를 해석하기 위해 비선형 유한요소법을 사용한 수치 시뮬레이션을 사용하였다. 그리고 집중적으로 후방에 냉각을 사용한 용접법이

고온균열을 방지하는 횡축응력을 낮추었다. 또한 이 방식을 사용한 용접 시 기계적 영향은 시편의 구속에 영향을 받는다는 사실을 알아냈다. 시뮬레이션과 실험을 이용해 고온균열의 예방 메커니즘을 상세히 설명 하였다. [15]

7. 박정웅은 용접과 동시에 용접토치로부터 일정한 거리 떨어져 있는 용접부를 냉각기체를 이용하여 냉각시켜 용접변형을 방지하는 실험을 하였다. 실험과 열탄소성해석 결과를 비교하여 열탄소성해석의 타당성을 검토하였다. 그리고 신뢰성이 검증된 열탄소성해석법을 이용하여 박판 맞대기용접을 대상으로 냉각범위(폭, 길이, 용접부로부터 냉각위치)을 변화시켜 용접각변형을 최소화시키는 범위를 도출하였다. Fig.1.4를 통해서 실험에서 적용된 냉각 범위와 위치를 알 수 있다. [16]

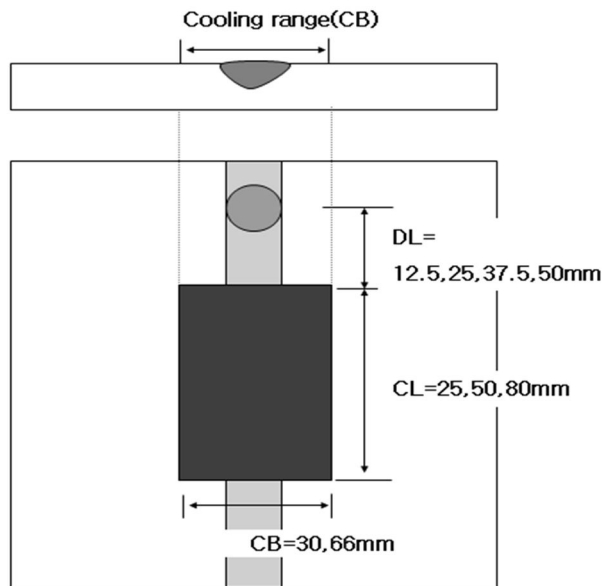


Fig.1.6 냉각의 범위와 위치

8. Wenchun Jiang은 316L stainless에 대한 용접잔류응력에 관한 heat sink의 영향을 연구하기 위해서 유한요소 방법을 사용하였다. 실험 시 heat sink 기술은 길이 방향의 잔류응력을 최대 20%까지 감소 시켰다. 냉각 부와 용접 플레이트의 접촉길이를 증가시키면 가로방향의 응력이 더 감소하였다. 길이 방향응력과 가로 방향을 감소시키는 것은 평균열전달 계수와 관련성이 있으며 열 전달 계수가 증가하면 응력은 감소한다는 것이다. 또한 어떠한 부분에서는 인장 잔류응력이 압축잔류응력으로 변화 하였다. Fig. 1.5를 보면 냉각 파이프를 이용한 heat sink welding(HSW) 모식도를 확인할 수 있다.[17]

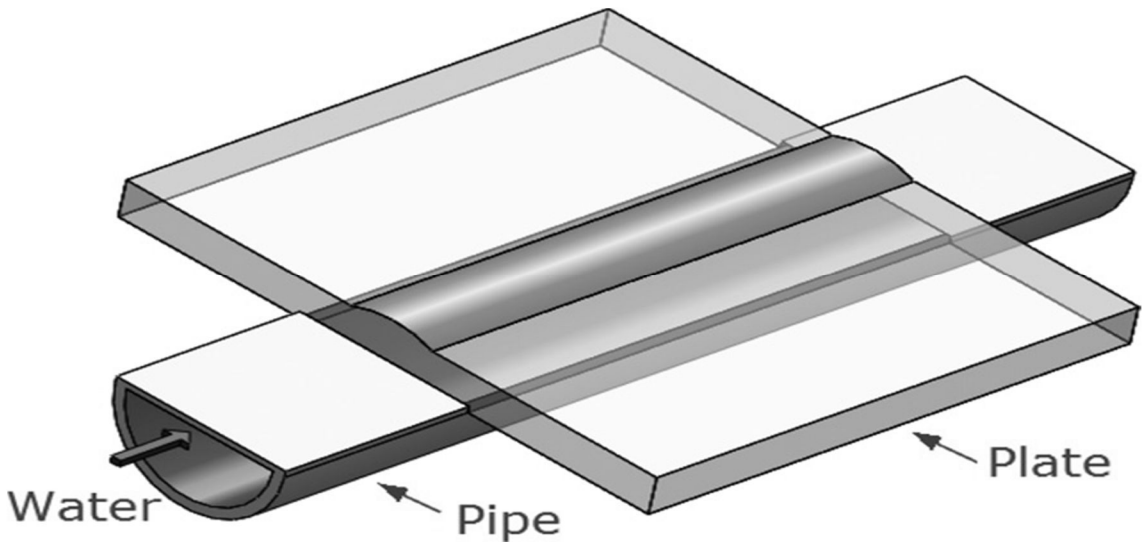


Fig. 1.7 냉각 파이프를 이용한 heat sink welding(HSW) 모식도

9. Y. Salehi Yegaie는 멀티패스 맞대기 용접 플레이트의 the GTAW and GTA - heat sink welding(HSW)를 위한 3D 열 기계적 모델 개발하였으며 실험을 통하여 검증하였다. 실험에서 Heat sink의 영향으로 인해 GTA-HSW과정은 고온영역이 열원근방으로 제한된다. 기존의 GTAW 프로세스와 비교했을 때 용접 시 최고 온도는 훨씬 감소했다. GTA-HSW공정에서, 중형 모두의 낮은 수준의 잔류응력만이 용접부

근처에서 형성되었다. 용접부에 따라 시편의 아랫면에는 길이방향 잔류응력이 압축응력으로 변했다. GTA-HSW 공정에서 히싱크파이프 직경과 물 유속을 증가시키는 것은 길이방향과 가로 방향의 잔류응력을 감소시킨다는 결론을 도출하였다. [18]

낮은 응력 저 변형을 목표로 한 LSND기술은 상당한 효과가 있는 것으로 앞서 행한 실험을 통하여 밝혀졌다. 그리고 LSND기술의 다른 특징은 실시간으로 변형을 제어하므로 별도의 구속 장치가 필요하지 않다는 점이다. 변형 혹은 잔류응력에 대한 추가 공정을 필요로 하지 않는 LSND기술은 현장에 적용 시킨다면 생산 공정을 단축시켜 좀 더 높은 생산성을 실현시킬 것으로 기대된다. 따라서 현장에 적용하기 위해서는 다양한 재료에 대한 용접 파라메타가 필요하며 이를 도출을 돕기 위한 방법으로 수치 해석 모델링을 통한 접근은 시급한 과제이다.

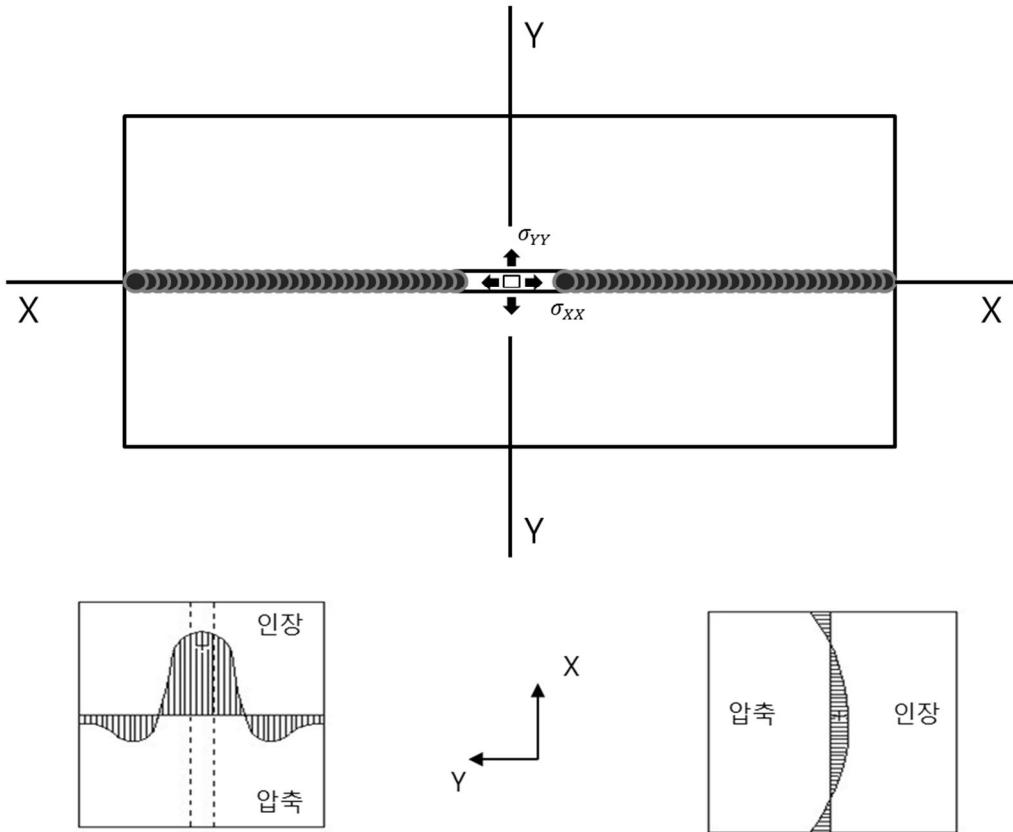
제 2 장 이론적 배경

2.1 용접 잔류응력

용접부가 용융되고 다시 실온으로 돌아오는 과정을 살펴보면 실온상태의 모재에 열원이 가까워지면서 열팽창에 의한 압축응력이 발생한다. 재료가 가열됨에 따라 탄성변형범위와 항복응력을 넘는 압축응력이 발생하게 되면 재료가 소성변형이 발생하게 된다. 그 이후 용접부가 최고 온도에 다다름에 따라 재료가 용융되는데 이 시점에서는 항복응력과 탄성계수의 값이 낮아지다가 결국 용융되고 용융 풀에는 응력이 존재하지 않는다. 용접 열원이 지나고 냉각이 시작되게 되면 소성변형이 일어난 영역은 탄성적으로 수축한다. 이 때 처음에 열팽창에 의한 압축응력이 인장응력으로 서서히 변하게 되며 실온으로 냉각되었을 시점에는 수축에 의한 인장응력으로 인해 잔류응력이 생성되게 된다.

2.1.1 맞대기 용접의 잔류응력 분포

맞대기 용접에서 용접열원에 가까운 부분은 팽창하고 상대적으로 온도가 낮은 용접부와 먼 부분은 팽창 부분을 구속하게 된다. 만약 재료 전체에 열이 균일하게 분포되면 균일한 팽창과 냉각을 형성하기 때문에 잔류응력은 존재 하지 않는다. 맞대기 용접에서의 잔류응력 분포형상은 Fig.2.1 통해 개략적으로 알 수 있다.



Y축에서 잔류응력(σ_{XX})

X축에서 잔류응력(σ_{YY})

Fig.2.1 냉각의 범위와 위치

2.1.2 잔류응력 감소방법

잔류응력 완화방법은 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있다. 첫 번째는 용접 후 구조물을 재료의 변태점 이하에서 가열하고 유지한 후 균일하게 서랭하는 방법이다. 이를 통하여 기계적 성질을 개선하고 용접잔류응력을 감소시킬 수 있다. 두 번째는 기계적으로 하중을 가해 소성변형을 생성시켜 잔류응력을 완화하는 방법이 있다.

2.2 용접 변형

용접변형의 양상과 크기는 용접부 근방의 열탄소성거동에 의해 발생된 고유변형도 (탄성변형을 + 소성변형을 + 열변형을 + 크리프변형을)의 분포양상과 크기에 의해 결정되며, 고유변형도의 크기는 그 지점의 최고 도달온도와 구속크기에 의해 결정된다. 즉, 용접공정 중 국부적으로 가해지는 용접열에 의해 용접부는 급속한 열팽창 및 수축이 발생하나 주위의 구속력에 의해 자유로운 열변형이 제한된다.

2.2.1 용접변형의 특성

용접 변형은 횡수축, 종수축, 회전변형, 횡굽힘 변형 또는 각변형, 종굽힘 변형, 좌굴형식 변형이 있다. 이것은 용접변형은 외관뿐만 아니라 치수를 변화시켜 구조물의 성능 및 교정하는 작업에 의해 생산성 저하 요인이 된다.

2.2.2 용접변형의 방지 및 교정

용접변형의 경감 및 방지 대책으로는 크게 다음과 같은 세 가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫째, 설계상의 대책(용접부 저감, 이음부위치 및 형태변경, 구조변경) 둘째, 용접시공상의 대책(용접입열량의 저감, 용접법의 변경, 용접순서, 적층법의 변경, 지그 사용) 셋째 역변형법 이있다. 그리고 용접변형의 교정방법으로는 열을 이용한 선상 가열법, 점가열법, 소성가공에 의한 프레스나 롤러에 의한 교정법등이 있다.

2.3 열전달해석

2.3.1 입열량

Al5083의 Gas Tungsten Arc Welding(GTAW) 용접부의 냉각속도는 입열의 값과 거의 반비례해서 감소된다. 본 연구의 시뮬레이션에서 사용된 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC.MARC의 경우 표면 열유속(Thermal face flux)를 통해 입열을 구현 하였으며 체적 열유속 형태의 입열량 산출식은 다음과 같다.

$$Q(KJ/cm^2) = \frac{\eta VI}{Av\Delta t} \text{-----} (2.1)$$

여기서, η 는 용접효율로서 GTAW의 경우 0.7정도의 값을 가진다. [16] V 는 아크 전압, I 는 아크 전류, A 는 용접 비드의 단면적, v 는 용접 속도, t 는 용접 시간을 나타낸다.

2.3.2 입열 시간

입열 시간은 축 대칭 2차원 모델에서는 다음과 같이 계산하여 사용할 수 있다.

$$\Delta t_{\text{heating}} = \frac{1}{v} \text{-----} (2.2)$$

여기서, v 는 용접 속도를 나타낸다.

2.3.3 냉각 방법

용접 시 용융부는 이웃한 재료와의 열전도(conduction), 대기와의 대류(convection) 및 복사(radiation)를 통해 냉각된다.

2.4 유한요소 해석

용접공정은 폭 넓은 온도변화를 수반하기 때문에 유한요소 해석 시 온도변화에 따른 재료의 성질 변화를 고려하여 해석한다. 즉, 온도변화에 따라 변화하는 열전도율, 열팽창계수, 비열, 항복응력, 탄성계수 등에 대해 온도별 물성치를 적용해야 한다는 것이다. 또한 정확성 높은 해석을 수행하기 위해 재료를 비선형화하여 재료의 온도의존성을 반영하였다. 이를 바탕으로 잔류응력과 변형은 용접열전도해석을 먼저 수행하고 각 시간 증분에서의 온도분포값을 열탄소성 해석에서의 입력값으로 적용하여 탄소성해석을 수행한 후 열응력을 통해 구한다.

2.4.1 비정상 열전도의 해석

재료가 등방성(isotropic)이라고 가정하면, 비정상 열전도의 지배방정식은 다음의 식과 같다. [19]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad \text{-----} \quad (2.3)$$

이 식을 3차원 직교좌표계의 식으로 표현 할 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad \text{-----} \quad (2.4)$$

여기서, $T = T(x, y, z, t)$: 온도(° C), ρ : 밀도 (g/cm^3),
 \dot{Q} : 단위 시간당 입열량 (cal/ sec) , t : 시간(sec) ,
 λ : 열전도율 (cal/cm · sec · °C) , c : 비열 (cal/g · °C) 이다.

식 (2.4)의 비정상 열전도 방정식을 열전도 해석을 위해 유한개의 요소로 분할 하한 후 Galerkin method에 적용할 수 있다. 다음의 식은 요소의 온도분포를 나타낸 식이다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\varphi(t)\} \quad \text{-----} \quad (2.5)$$

여기서, T : 요소의 온도

$[N]$: 절점의 온도와 요소 내의 온도를 관계시키는 형상함수행렬(Matrix)

$\{\varphi(t)\}$: 시간이 t일 때 요소의 절점온도에 대한 Vector

식 (2.4)에 Galerkin 함수를 적용하면 다음과 같은 식을 도출해 낼 수 있다.

$$\int_{V_e} [N]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad \text{-----} \quad (2.6)$$

여기서, T : 전치행렬

v^e : 요소의 영역

식 (2.6)의 좌변을 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분적분하고, 열경계조건으로 열전달을 고려하여 $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_c(T - T_c)$ 를 적용하면

$$\begin{aligned}
 & \int_{v^e} [N]^T \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dV \\
 &= - \int_{v^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \\
 & \quad + \int_{s^e} \lambda [N]^T \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) dS \\
 &= - \int_{v^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \\
 & \quad - \int_{s^e} q [N]^T dS \\
 &= - \int_{v^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \\
 & \quad - \left(\int_{s^e} \alpha_c T [N]^T dS - \int_{s^e} \alpha_c T_c [N]^T dS \right) \quad \text{-----} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

여기서, s^e : 요소의 경계 T : 모재의 경계 온도

α_c : 열전달계수 T_c : 대기의 온도

식 (2.6)에 식(2.7)와 요소-절점간의 온도관계를 나타내는 식(2.5)을 대입하면 다음의 식을 도출 할 수 있다.

$$- \int_{v^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \cdot \{ \varphi(t) \}$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_{S^e} \alpha_c [N]^T [N] dS \cdot \{ \varphi(t) \} + \int_{S^e} \alpha_c T_c [N]^T dS \\
 & + \int_{V^e} \dot{Q} [N]^T dV - \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV \cdot \frac{\partial \{ \varphi(t) \}}{\partial t} = 0 \quad \text{-----} \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

3차원 비정상 열전도함수 식(2.6)을 행렬화 하여 식으로 표현하면 식(2.9)과 같다.

$$[K] \{ \varphi \} + [C] \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right\} = \{ F \} \quad \text{-----} \quad (2.9)$$

여기서, $[K]$: 열전도 Matrix $\{ F \}$: 열유속 Vector

$[C]$: 열용량 Matrix

이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [K] = & \int_{V^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \\
 & + \int_{S^e} \alpha_c [N]^T [N] dS \quad \text{-----} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

$$[C] = \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV \quad \text{-----} \quad (2.11)$$

$$\{ F \} = \int_{S^e} \alpha_c T_c [N]^T dS + \int_{V^e} \dot{Q} [N]^T dV \quad \text{-----} \quad (2.12)$$

2.4.2 3차원 열탄소성의 해석

앞서 설명 하였듯이 용접공정은 폭 넓은 온도변화를 수반하기 때문에 유한요소

해석 시 온도변화에 따른 재료의 성질 변화를 고려하여 해석한다. 따라서 3차원 열탄소성 해석은 탄성 및 소성의 모든 영역에서 온도에 따라 변화하는 것을 고려하여 폰-미세스 응력(Von-Mises stress)을 사용하여 응력과 변형에 대한 해석을 수행해야 한다. [17]

가. 열탄소성 해석을 위한 응력-변형 관계식

용접 응력문제에서의 응력-변형의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. [19]

$$\{\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{\sigma\} - \{\varepsilon^t\} \quad \text{-----} \quad (2.13)$$

여기서, $[D^e]$: 탄성 응력-변형률 Matrix ε^t : 열변형률

식 (2.13)을 증분법을 사용하여 표현할 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon - d\varepsilon^t\} \quad \text{-----} \quad (2.14)$$

재료가 온도에 따라 변화하는 물리적 성질을 고려하여 응력증분영향을 $[C]dT$ 라 정하고 식 (2.14)는 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - [C]dT \quad \text{-----} \quad (2.15)$$

- 1) 탄성역에서의 응력-변형 관계식

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 전변형률은 식 (2.14)의 열변형률이 적합조건을 만족하도록 탄성변형률과의 합이 되도록 해야 한다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\} \quad \text{-----} \quad (2.16)$$

또한, 응력 $\{\sigma\}$ 과 탄성변형률 $\{\varepsilon^e\}$ 을 탄성 matrix를 이용하여 아래와 같이 증분으로 나타내면

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon^e\} \quad \text{-----} \quad (2.17)$$

여기서 $\{\varepsilon^e\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 T 의 함수로 표현하며 탄성변형률의 증분은.

$$\{d\varepsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\varepsilon^e\}}{\partial T} dT \quad \text{-----} \quad (2.18)$$

식 (2.17)을 식 (2.18)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT \quad \text{-----} \quad (2.19)$$

식 (2.19)을 식(2.14)와 식(2.16)에 대입하면 다음과 같이 표현하였다.

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \quad \text{-----} \quad (2.20)$$

식 (2.20)을 식 (2.16)에 대입하여 탄성영역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 식 (2.21) 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e] \left(\frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} + \{\alpha\} \right) dT \\
 &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \left([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E} \frac{E-E_1}{\Delta T} \{\sigma\} \right) dT \\
 &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \{C\} dT \quad \text{----- (2.21)}
 \end{aligned}$$

여기서, E_1 : 온도변화 후의 탄성계수

$$\{C\} : [D^e] \alpha \frac{1}{E} - \frac{E-E_1}{\Delta T} \{\sigma\}$$

2) 소성역에서의 응력-변형 관계식

재료의 항복응력(Yield stress) σ_y 는 온도 T 와 소성일(plastic work) $W^p(\bar{\varepsilon}^p, T)$ 의 함수로서 $\sigma_y(T, W^p)$ 로 하고, 항복함수 F 는 응력 $\{\sigma\}$ 와 항복응력 σ_y 로부터 식 (2.22)로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\varepsilon}^p, T) \\
 &= \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\varepsilon}^p, T) \quad \text{----- (2.22)}
 \end{aligned}$$

여기서 $dF = df - df_0 = 0$ 일때 재료는 항복한다. 또한, 재료가 소성역에서 부하상태(loading state)에 있을 경우에는 $dF = 0$ 의 조건을 만족해야 하므로 다음과 같은 식(2.23)으로 쓸 수 있다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} - \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p} \right\}^T \{d\bar{\varepsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \quad \text{----- (2.23)}$$

여기서, $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T$: 상당응력의 변화 $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon^p} \right\}$: 가공경화
 $\frac{\partial f_0}{\partial T}$: 온도 증분

항복응력을 넘어 소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜(plastic potential)로 가정해 보면 소성변형을 증분은 다음 식(2.24)이 된다.

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \text{-----} \quad (2.24)$$

여기서, $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$: 편차응력, λ : 양(+)의 스칼라 이다.

또한, 전변형률(total strain)의 증분 $\{d\varepsilon\}$ 는 탄성, 소성 및 열변형률의 합이므로 다음의 식과 같다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^t\} \text{-----} \quad (2.25)$$

제 3 장 유한요소 해석 모델

3.1 유한요소 모델링

용접 잔류응력과 변형을 해석하기 위해 MSC.MARC를 이용한 3차원 비선형 용접해석을 하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점 아이소-파라메트릭 (Iso-parametric) 3차원 요소를 사용 하였고 사용된 총 노드(node)는 9441개, 총 요소(element)는 6000개를 사용하였다. 경계조건은 강도가 없는 스프링을 이용하여 Y축의 상단과 하단에 4개의 노드만을 완전고정(all fixed)하였다. 이는 마크의 특성상 구속요소를 입력하여야 해석이 진행되기 때문이다. 총 해석 시간은 996 초로 용접시간 14초이며 0.1초 단위 140스텝(step)으로 해석 하였다, 냉각 시간 980초 10초 단위로 98스텝으로 구성되어 있다. 해석시간 절감을 위해 X축만 구속하여 용접모델의 한쪽 면만 해석을 실시 하였다.

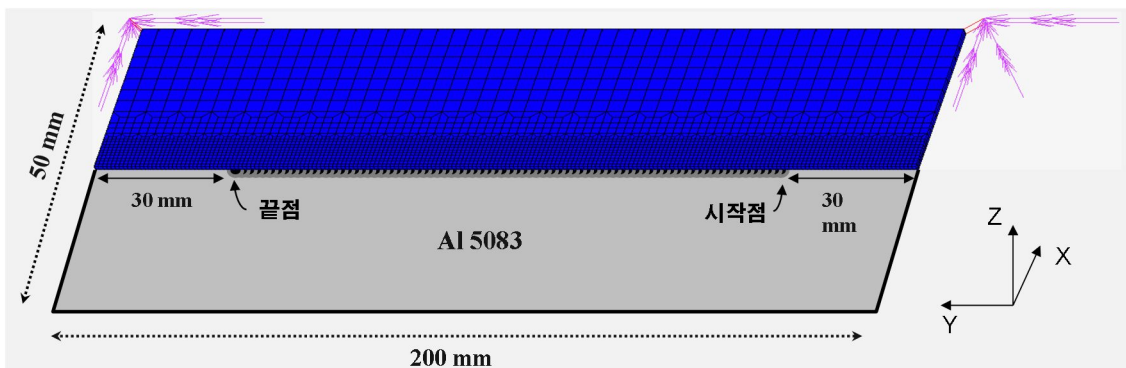


Fig 3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링

3.2 Bead On Plate(BOP) 해석모델

Gas tungsten arc welding (GTAW)은 전류 밀도가 높아 용착효율이 높고 보호가스로 Ar, He를 사용하기 때문에 슬래그를 형성하지 않아 슬래그 제거작업을 하지 않아도 되는 장점을 갖는다. 반면에 Si모재의 용융점과 모재표면 산화피막의 녹는점의 차이 때문에 용접의 적용이 어려워진다. 따라서 텅스텐전극이 양극(+)일 때 청정효과에 의한 산화막 제거가 가능한 GTAW공정이 Si용접에 이상적인 방법으로 알려져 있다.

이에 본실 험에서는 GTAW 공정을 채택 하였으며, GTAW 모델은 두께 2mm, 폭 50mm, 길이 200mm이다. 전류(I) 100A, 전압(V) 10V, 용접속도(v) 10 mm/s, 용접효율(η) 0.7이며 입열모델은 가우시안 분포를 갖는 표면열원함수 식(3.1)를 적용하였다. 여기서 용접 효율은 실험적으로 측정한 값으로 약0.7로 알려져 있다. [20] 용접해석 시 열전도 방정식은 식(2.4)와 같으며 체적 열유속형태의 입열량은 식(3.2)와 같고 (A)는 단위면적 (t)는 용접시간이다. 1 cm²의 단위면적과 1초당 당 체적 열유속 형태의 입력량은 0.7KJ/cm이며 도식화된 HSW모델링은 Fig 3.2 통해 확인 할 수 있다.

$$q(r) = \frac{3 \eta VI}{\pi r_0^2} \left(-\frac{3r^2}{r_0^2} \right) \text{ ----- (3.1)}$$

여기서, r_0^2 = effective radius of heat source

r = distance from arc centerline 이다.

$$Q = \frac{\eta VI}{Av \Delta t} = 0.7 \text{ KJ/cm}^2 \text{ ----- (3.2)}$$

3.3 Heat sink welding(HSW) 해석 모델

HSW 해석모델에서의 용접 조건은 BOP 모델에서의 용접조건과 동일하나 추가적으로 용접 열원 후방에 냉각열원을 추가하였다. HSW의 냉각열원은 -56°C 에서 100°C 의 온도를 상정하였다. Fig 3.3에서 Standoff Distance (SOD)는 의 용접 열원과 냉각 열원의 사이의 이격거리를 나타내는 용어이다. 냉각열원 모델은 가우시안 분포를 가지며 Pavelic이 고안한 열원분포 함수 식(3.3)를 적용하였다. [21] 도식화된 HSW모델링은 Fig 3.3 통해 확인 할 수 있다.

$$\text{Film_Coef}(x, y, z) = \frac{3H}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{r^2}\right) \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

여기서의 기호의 설명은 다음과 같다.

$$q_{\text{heat sink}} = h(T_s - T_a)$$

q_{heatsink} : heat sink flux

h : flux of local convective heat transfer coefficient

T_a : local ambient temperature of heat sink area

H : local convective heat transfer coefficient of heat sink area

x, y : distance from the heat sink center

r : distance from the heat sink center

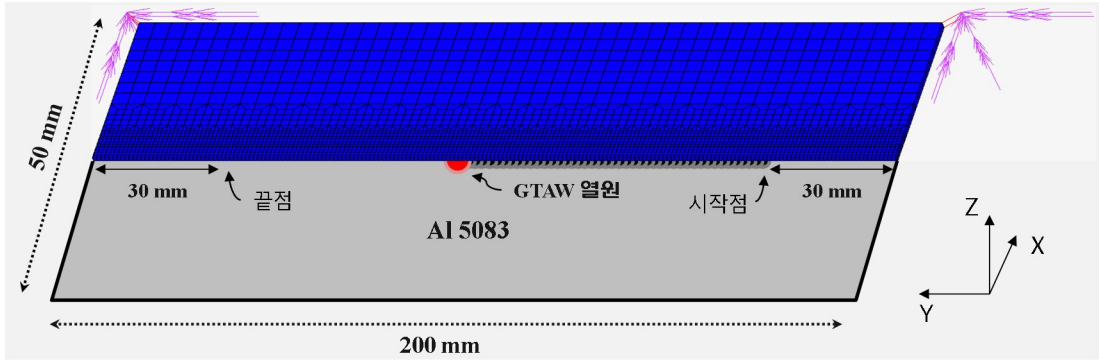


Fig 3.2 BOP 해석 모델링

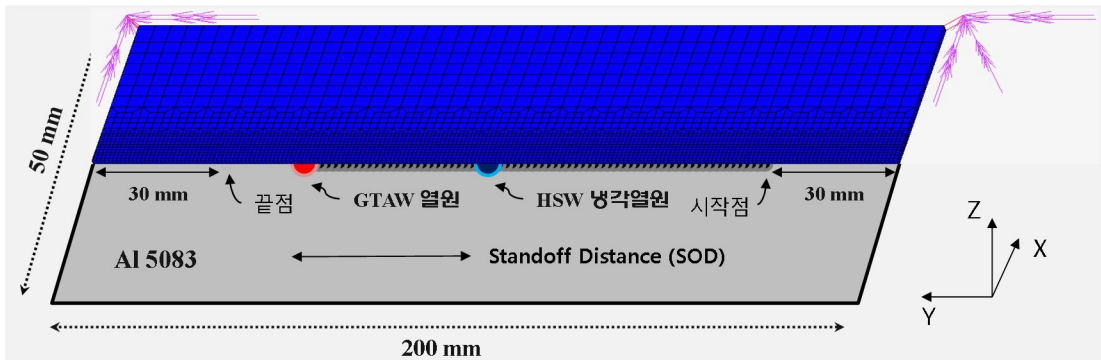


Fig 3.3 HSW 용접의 해석 모델링

3.4 열응력 해석을 위한 재료 물성

상용 유한요소 프로그램인 MSC.MARC를 이용한 응력과 변형의 해석은 열전달 해석 과정을 수반하므로 온도변화에 대한 경계조건과 물성치를 설정하여야 한다. 필요한 열전달 해석을 위한 경계조건으로 초기온도(Initial temperature)는 30℃로 설정하였다. 주위온도(ambient temperature) 또한 30℃로 설정하여 평판이 대기와의 접촉하는 면에 적용하였고 자연대류계수(Natural convection)는 18W/m²·℃로 설정하였다. 또한 액상과 고상의 상변화를 잠열(latent heat)의 형태로 반영하여 액화의 시작점 온도(Solidus temperature) 574℃ 와 액화의 종료점(liquidus temperature)을 648℃로 설정하였다. Table 3.1을 통해 열전달 해석의 경계조건을 확인할 수 있다. 또한 열 전달에 따른 응력과 변형의 해석을 위해서 온도변화에 따른 재료의 물성치가 필요로 하다. 따라서 물성치는 Fig 3.4 에서 3.8 그래프를 통해 A15083-0의 온도변화에 따른 값들을 나타내었다. [22]

Initial temperature	30℃
Ambient temperature	30℃
Natural convection	18W/m ² °C
Density	2665kg/m ³
Solidus temperature	574℃
liquidus temperature	648℃

Table 3.1 열전달 경계조건

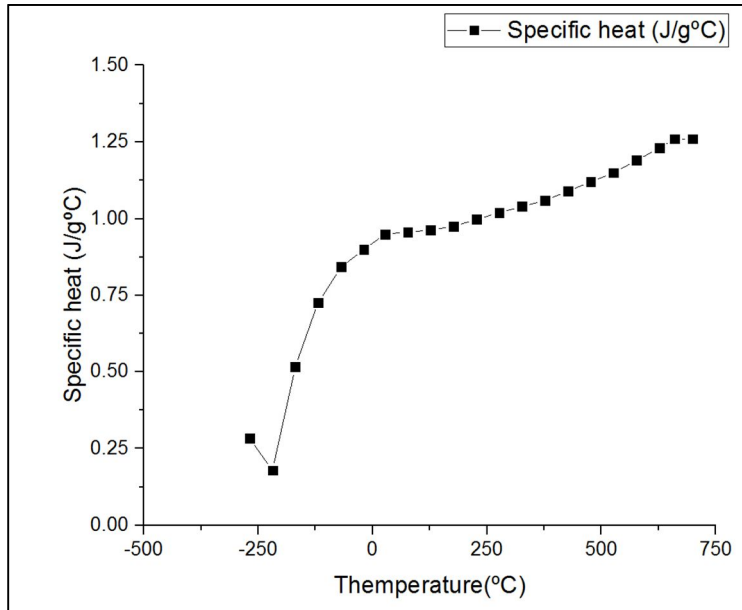


Fig 3.4 온도에 따른 비열

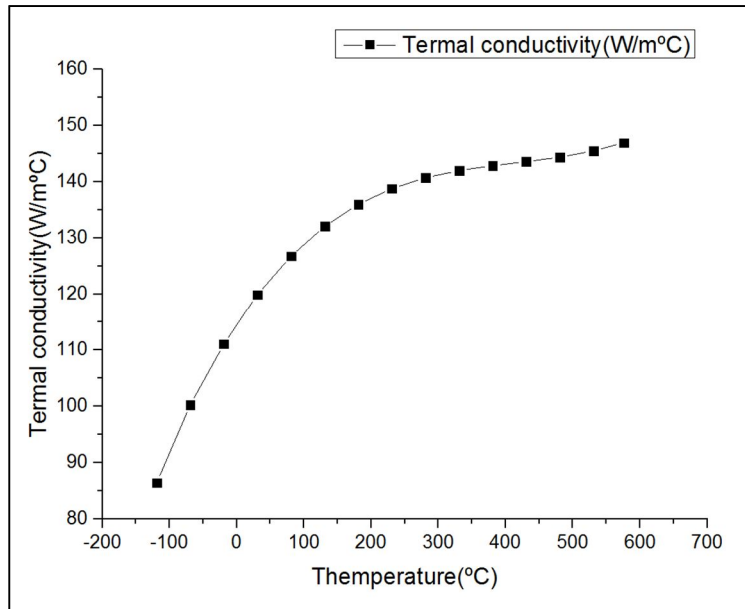


Fig 3.5 온도에 따른 열전도

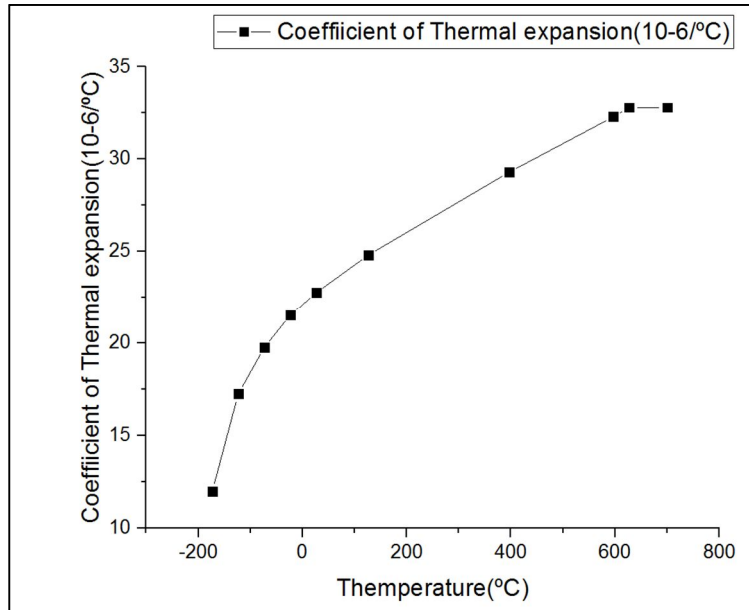


Fig 3.6 온도에 따른 열팽창 계수

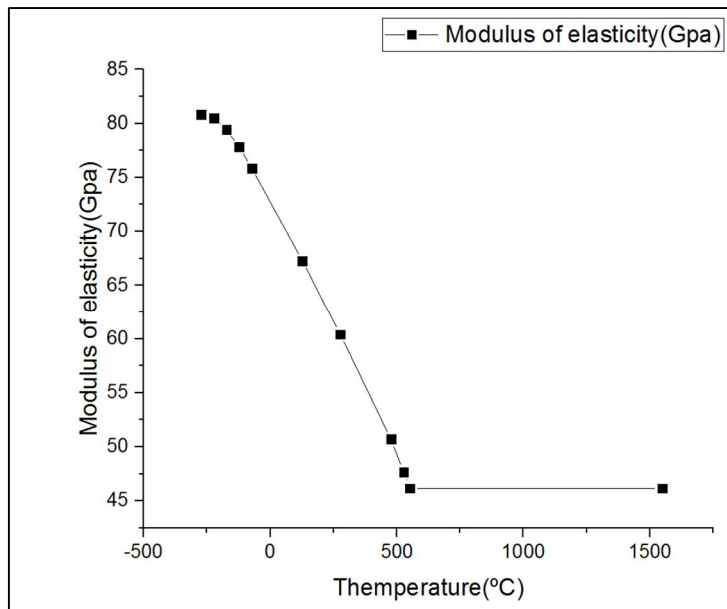


Fig 3.7 온도에 따른 탄성계수

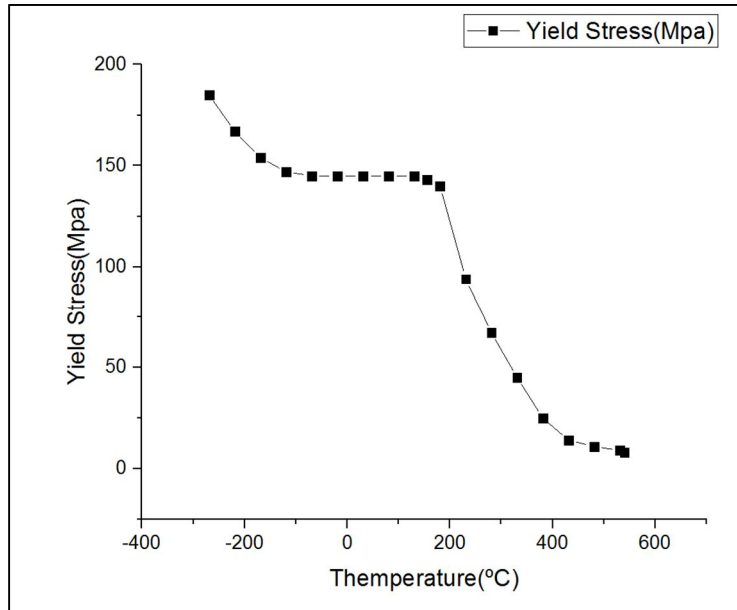


Fig 3.8 온도에 따른 항복응력.

3.5 HSW 해석조건별 변수

잔류응력과 면외변형을 최소화 하기 위한 조건을 찾기 위해 냉각온도(Temperature, Temp), 이격거리 (Standoff Distance, SOD) 냉각열원의 반경(Radius, R)을 변수로 하였다. Table 4.1을 통해 해석조건을 확인할 수 있다.

제 4장 . 해석 결과

4.1 해석조건별 변형량

Heat sink welding(HSW)에서는 Bead On Plate(BOP)용접 과 용접 조건은 동일 하지만 HSW에서는 잔류응력과 면외변형을 최소화하기 위한 조건을 찾기 위해 변수를 추가로 적용하였다. Table 4.1를 통해 변수는 냉각온도(Temperature, Temp), 이격거리 (Standoff Distance, SOD) 냉각열원의 반경(Radius, R)이며, -56°C , $\text{SOD}=10$ $\text{Radius}=6$ 의 조건에서 변형이 0.857mm만큼 나타났음을 확인 할 수 있다. 반면에 BOP해석의 결과는 최대 6.557mm로 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 전반적으로 SOD가 작을수록 냉각열원의 R이 클수록 변형량이 감소하나 SOD가 30mm 이상에서는 HSW를 적용할 시 BOP보다 변형량이 커지는 것을 알 수 있다.

조건 번호	냉각온도 temp($^{\circ}\text{C}$)	이격 거리 SOD (mm)	냉각열원 반경 R (mm)	변형량 (mm)
1	-56.6	10	3	2.323
2	-56.6	10	6	0.857
3	-56.6	20	3	5.922
4	-56.6	20	6	5.785
5	-56.6	20	9	5.444
6	-56.6	20	12	4.922
7	-56.6	20	15	4.029

조건 번호	냉각온도 temp(°C)	이격 거리 SOD (mm)	냉각열원 반경 R (mm)	변형량 (mm)
8	-56.6	20	18	2.395
9	-56.6	30	3	6.306
10	-56.6	30	6	7.028
11	-56.6	30	9	7.044
12	-56.6	30	12	7.157
13	-56.6	30	15	7.255
14	-56.6	30	18	7.271
15	-56.6	30	21	7.161
16	-56.6	30	24	6.873
17	-56.6	30	27	6.55
18	-56.6	40	3	7.82
19	-56.6	40	6	7.8
20	-56.6	40	9	7.837
21	-56.6	40	12	7.894
22	-56.6	40	15	7.989
23	-56.6	40	18	8.109
24	-56.6	40	21	8.234
25	-56.6	40	24	8.3
26	-56.6	40	27	8.304
27	-56.6	40	30	8.191
28	-56.6	40	33	8.058
29	-56.6	40	36	7.861
30	-40	10	3	2.3425
31	-40	10	6	0.9112

조건 번호	냉각온도 temp(°C)	이격 거리 SOD (mm)	냉각열원 반경 R (mm)	변형량 (mm)
32	-40	20	3	5.876
33	-40	20	6	5.81
34	-40	20	9	5.521
35	-40	20	12	4.986
36	40	20	15	4.031
37	-40	20	18	2.1564
38	-30	10	3	2.3856
39	-30	10	6	0.9358
40	-30	20	3	5.821
41	-30	20	6	5.819
42	-30	20	9	5.562
43	-30	20	12	5.021
44	-30	20	15	4.0167
45	-30	20	18	5.562
46	-20	10	3	2.498
47	-20	10	6	0.9236
48	-20	20	3	5.728
49	-20	20	6	5.7192
50	-20	20	9	5.038
51	-20	20	12	5.9039
52	-20	20	15	3.5751
53	-20	20	18	2.469
54	-10	10	3	1.67
55	-10	10	6	0.8766

조건 번호	냉각온도 temp(°C)	이격 거리 SOD (mm)	냉각열원 반경 R (mm)	변형량 (mm)
56	-10	20	3	5.571
57	-10	20	6	5.826
58	-10	20	9	5.625
59	-10	20	12	4.586
60	-10	20	15	3.805
61	-10	20	18	2.5231
62	1	10	3	2.571
63	1	10	6	0.8183
64	1	20	3	5.622
65	1	20	6	5.818
66	1	20	9	5.65
67	1	20	12	5.12
68	1	20	15	4.082
69	1	20	18	2.536
70	10	10	3	2.6296
71	10	10	6	0.7653
72	10	20	3	1.9855
73	10	20	6	5.8
74	10	20	9	5.664
75	10	20	12	5.135
76	10	20	15	4.174
77	10	20	18	2.54
78	20	10	3	2.6873
79	20	10	6	0.7018

조건 번호	냉각온도 temp(°C)	이격 거리 SOD (mm)	냉각열원 반경 R (mm)	변형량 (mm)
80	20	20	3	5.844
81	20	20	6	5.765
82	20	20	9	5.668
83	20	20	12	5.137
84	20	20	15	3.819
85	20	20	18	2.512
86	100	10	3	3.605
87	100	10	6	0.2902
88	100	20	3	5.8
89	100	20	6	5.262
90	100	20	9	5.256
91	100	20	12	4.337
92	100	20	15	3.687
93	100	20	18	3.064

Table 4.1 Heat sink welding 해석 조건과 변형량

4.2 BOP와 HSW의 온도이력 비교

본 절에서는 3차원비정상열전도 유한요소해석프로그램을 이용하여 BOP와 HSW공정에서의 온도분포를 고찰해 보았다. 실험에서는 GTAW 공정을 채택 하였으며, BOP 모델은 두께 2mm, 폭 50mm, 길이 200mm이다. 전류(I) 100A, 전압(V) 10V, 용접속도(v) 10 mm/s, 용접효율(η) 0.7이며 입열모델은 가우시안 분포를 갖는 표면열원함수를 적용하였다. 반면 HSW는 BOP용접 조건에 새로운 변수로 냉각열원은 -56°C 에서 100°C 의 온도를 상정하였다. 냉각열원 모델은 가우시안 분포를 가지며 Pavelic이 고안한 열원분포 함수를 적용하여 해석하였다. 온도 이력의 측정 지점은 ($X=0, Y=100, Z=0$)으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였고 아래의 Fig 와 Table를 통해 BOP와 HSW(-56.6°C , $\text{SOD}=10\text{mm}$, $\text{Radius}=6\text{mm}$)의 온도이력을 비교해 보았다.

Fig 4.1과 Table 4.2를 보면 용접열원이 지나감에 따라 BOP와 HSW모두 6초에서 7초 사이에 온도가 급격히 상승하여 최고점에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 냉각 시에는 BOP용접에서는 실온까지 서랭되는 반면에 HSW용접에서는 0.4만에 급격히 냉각됨을 확인 할 수 있었다.

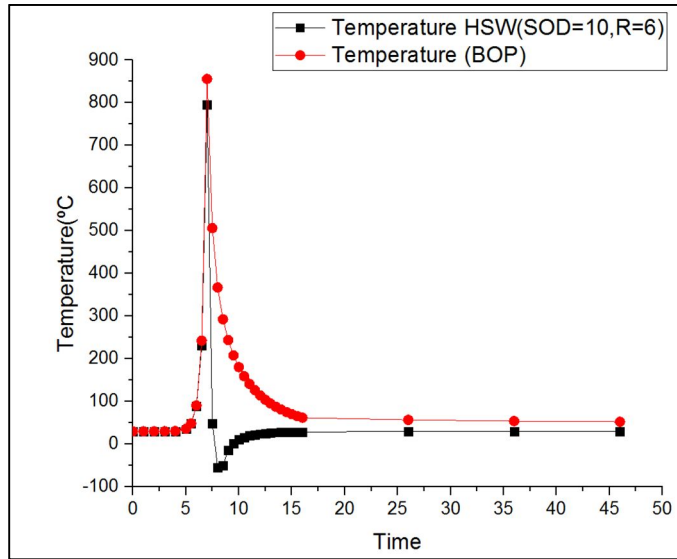


Fig 4.1 BOP와 HSW의 온도이력

TIME (sec)	Temperature (BOP)	TIME (sec)	Temperature (BOP)
5	34.991	7.4	195.048
6	89.403	7.5	48.633
6.5	231.55	7.6	-18.853
6.6	305.136	7.7	-43.624
6.7	412.724	7.8	-51.616
6.8	562.681	7.9	-54.318
6.9	715.296	8	-55.320
7	795.392	9	-14.546
7.1	755.967	10	10.457
7.2	620.609	11	19.74

Table 4.2 HSW의 온도이력

4.3 BOP와 HSW의 변형이력 비교

Fig 4.2 BOP는 면외변형의 분포도를 나타내었고 Fig 4.4는 시간에 따른 Z방향 변형이력을 그래프를 도시한 것이다. Fig 4.4 BOP의 측정 지점은 ($X=0, Y=100, Z=0$)으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였고 이 지점에서의 최대 변형량은 6.557mm이었다. -56.6°C , $SOD=10\text{mm}$, $R=6\text{mm}$ 에서 HSW는 Fig 4.3의 면외변형의 분포도를 나타내었고 Fig 4.5는 시간에 따른 Z방향 변형이력을 그래프를 도시한 것이다. Fig 4.5 측정 지점은 ($X=0, Y=100, Z=0$)으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였고 이 지점에서의 최대 변형량은 0.857mm이었다. 이 때, Fig 4.5의 위부분 점선은 BOP용접에서의 최대 변형량을 표시한 것이다. 변형이력 비교를 통해 HSW에서의 냉각 효과가 변형을 감소 시킨다는 사실을 확인할 수 있다. 변형의 절감은 냉각 열원을 통해 용접부 부근에서 열을 차단함으로써 모재에 전달되는 입열량이 감소하기 때문이라고 사료된다.

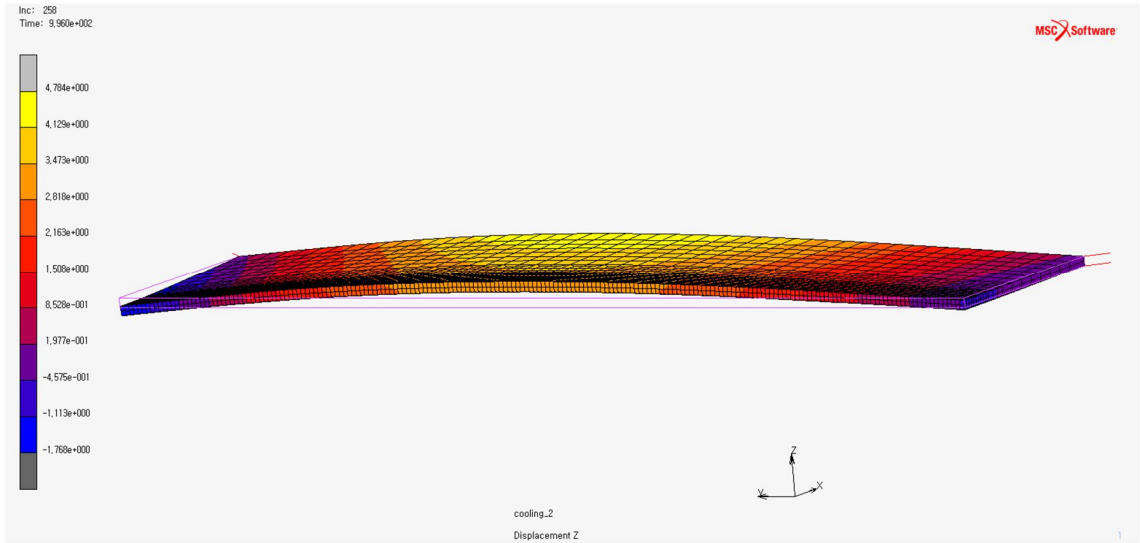


Fig 4.2 BOP 높이(Z)방향 변형

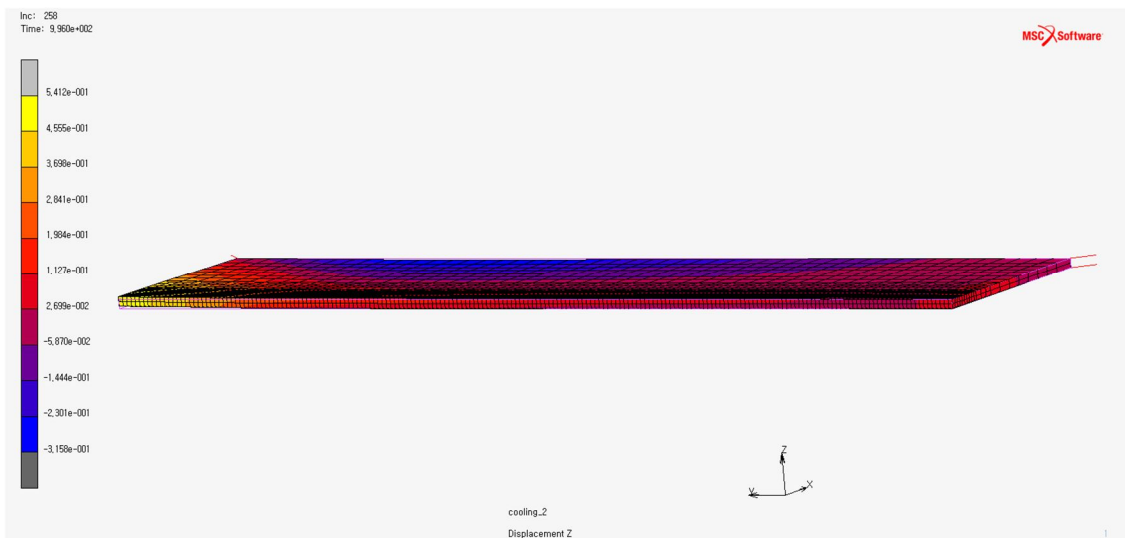


Fig 4.3 HSW 높이(Z)방향 변형

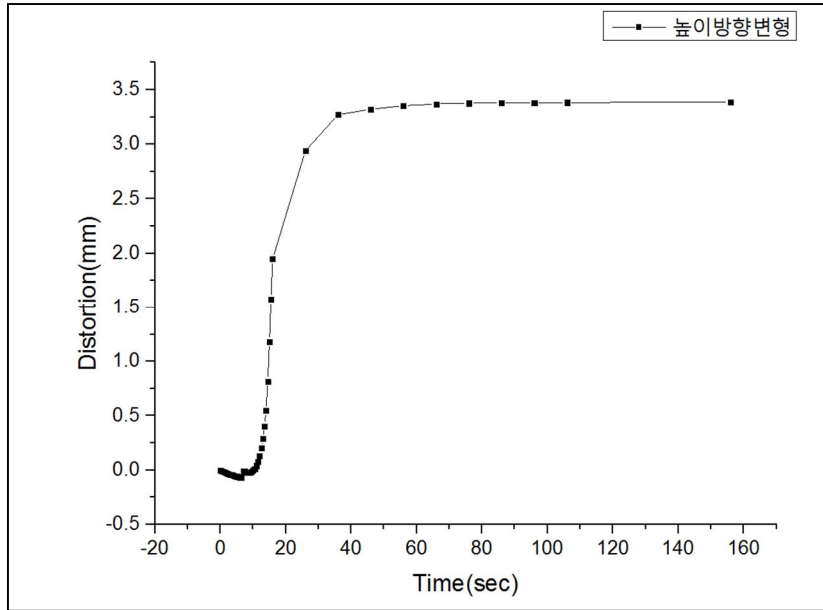


Fig 4.4 BOP 시간에 따른 높이(Z)방향 변형이력

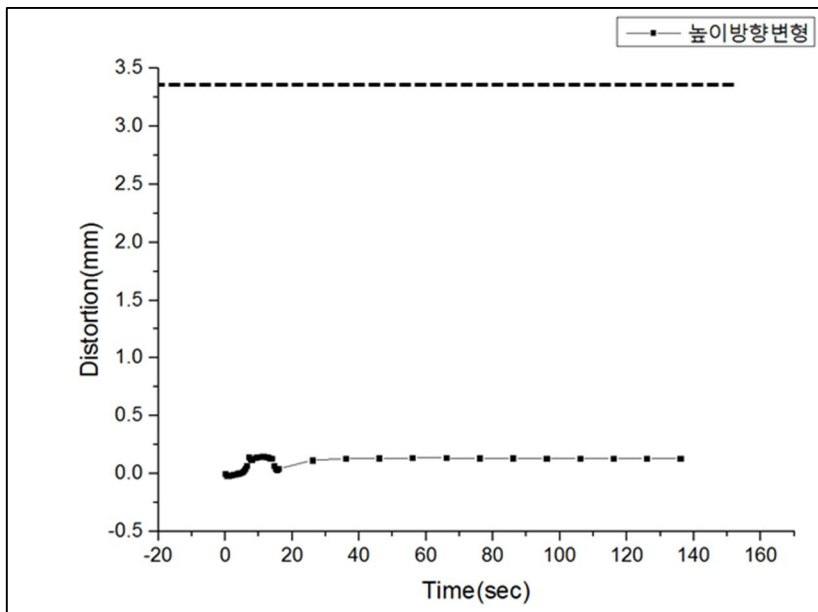


Fig 4.5 HSW 시간에 따른 높이(Z)방향 변형이력

4.3 BOP와 HSW의 잔류응력 비교

Fig 4.6 Table 4.3은 BOP의 윗면과 아랫면의 길이방향 σ_{yy} , 폭방향 σ_{xx} 의 잔류응력을 나타내고 있다. Fig 4.6 Table 4.3의 측정 지점은 (X=0, Y=100, Z=0)으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였다. Fig 4.6을 보면 윗면 길이방향에서는 인장잔류응력이 아랫면 길이방향에서는 압축잔류응력이 형성되어 있는데 이러한 현상 때문에 시편은 위로 볼록한 변형을 나타내고 있다. Table 4.3 를 보면 인장 잔류응력이 용접 부에 윗면 길이 방향에 최대 255.65 Mpa 아랫면 길이방향 최대 185.36 Mpa 아랫면 폭 방향에 79.78Mpa 만큼 분포하고 있다. 인장잔류응력은 용접구조물에 피로강도를 저하시키거나 취성균열 및 응력부식균열의 진전하게 하는 요소로 작용하므로 잔류응력을 완화하기 위한 용접 후처리 작업을 필요로 한다.

-56.6℃, SOD=10mm, R=6mm에서 HSW공정인 Fig 4.7 Table 4.4은 윗면과 아랫면의 길이방향과 폭 방향의 잔류응력을 나타내고 있다. Fig 4.7 Table 4.4 측정 지점은 (X=0, Y=100, Z=0)으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였다. Fig 4.7 를 보면 윗면과 아랫면 둘 다 길이방향에서는 압축잔류응력이 형성되어 있다. 그리고 용접 윗면과 아랫면의 잔류응력분포가 상당히 일치하는 것으로 판단하건대 BOP에 비해 변형이 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. Table 4.4 를 보면 인장 잔류응력이 용접부에 윗면 길이 방향에 최대 -178.91Mpa 윗면 폭 방향 -10.89Mpa 아랫면 길이방향 최대 -210.73Mpa 아랫면 폭 방향에 -24.54Mpa 만큼 분포하고 있다. 따라서 압축 잔류응력의 발생으로 BOP에 비하여 HSW를 사용한 구조물의 피로수명이 증가할 것으로 기대 된다.

Fig 4.8, 4.9는 BOP와 HSW모델의 윗면(Top)과 아랫면(Bottom)에서 폭 방향

잔류응력(σ_{xx}) 분포를 나타내고 있다. 전반적으로 BOP와 HSW모두 비슷한 양상의 잔류응력 분포를 보이고 있지만 BOP에서 인장응력응력이 최대값이 더 높은 값을 보이고 있다. Fig4.10, 4.11는 길이방향의 BOP와 HSW모델의 윗면(Top)과 아랫면(Bottom)의 잔류응력 분포(σ_{yy})를 나타내고 있다. 이 분포도에서 가장 눈에 띄는 점은 HSW모델 용접 부에서 압축잔류응력이 형성 된다는 것이다. 이 현상을 판단해 보면 용접 부에 걸쳐 발생한 압축잔류 응력으로 인하여 BOP에 비하여 HSW를 사용한 구조물의 신뢰성이 증가할 것으로 이 분포도를 통해 다시 한번 판단해 볼 수 있다. 또한 BOP 잔류 응력 분포를 통해 윗면에서는 인장잔류응력이 뒷면에서는 압축잔류응력이 전반적으로 분포되어 있다는 것으로 보아 모델은 위로 볼록한 형태를 가진다는 점을 전체적으로 파악 할 수 있다.

따라서 잔류응력 분석을 통해 변형의 모양을 확인 할 수 있고 HSW용접이 변형 및 잔류응력을 제어하는데 효과가 있다는 점을 확인 하였다.

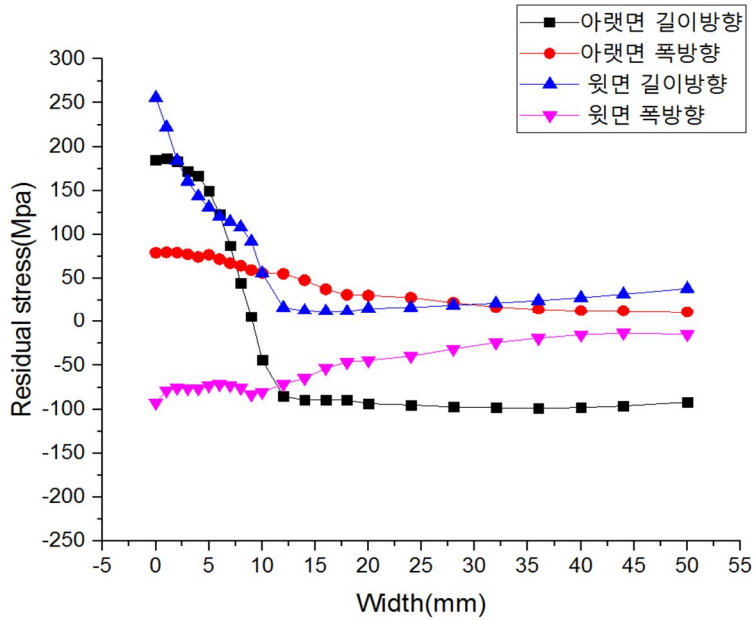


Fig 4.6 BOP 잔류응력 (길이방향 σ_{YY} , 폭방향 σ_{XX})

	아랫면 길이방향 (σ_{YY})	아랫면 폭방향 (σ_{XX})	윗면 길이방향 (σ_{YY})	윗면 폭방향 (σ_{XX})
최대인장 잔류응력	185.36	79.78	255.65	-13.16
최대압축 잔류응력	-98.78	11.38	11.92	-92.72

Table 4.3 BOP 잔류응력 비교

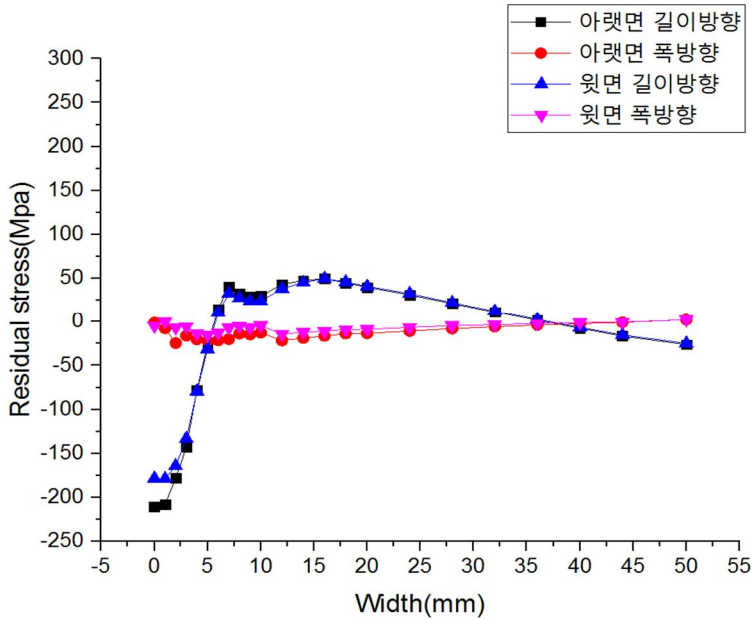


Fig 4.7 HSW 잔류응력 (길이방향 σ_{YY} , 폭방향 σ_{XX})

	아랫면 길이방향 (σ_{YY})	아랫면 폭방향 (σ_{XX})	윗면 길이방향 (σ_{YY})	윗면 폭방향 (σ_{XX})
최대인장 잔류응력	49.81	2.26	49.90	2.27
최대압축 잔류응력	-210.73	-24.54	-178.91	-10.89

Table 4.4 HSW 잔류응력 비교

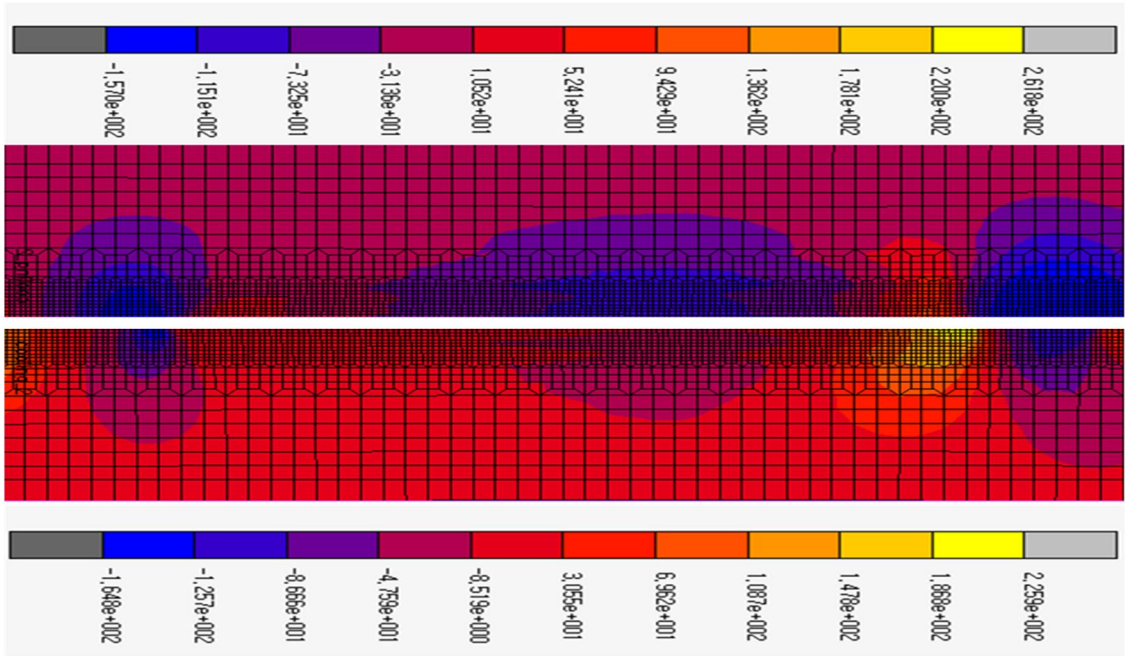


Fig 4.8 HSW(위) BOP(아래) 윗면 Top 폭방향 잔류응력 (σ_{xx})

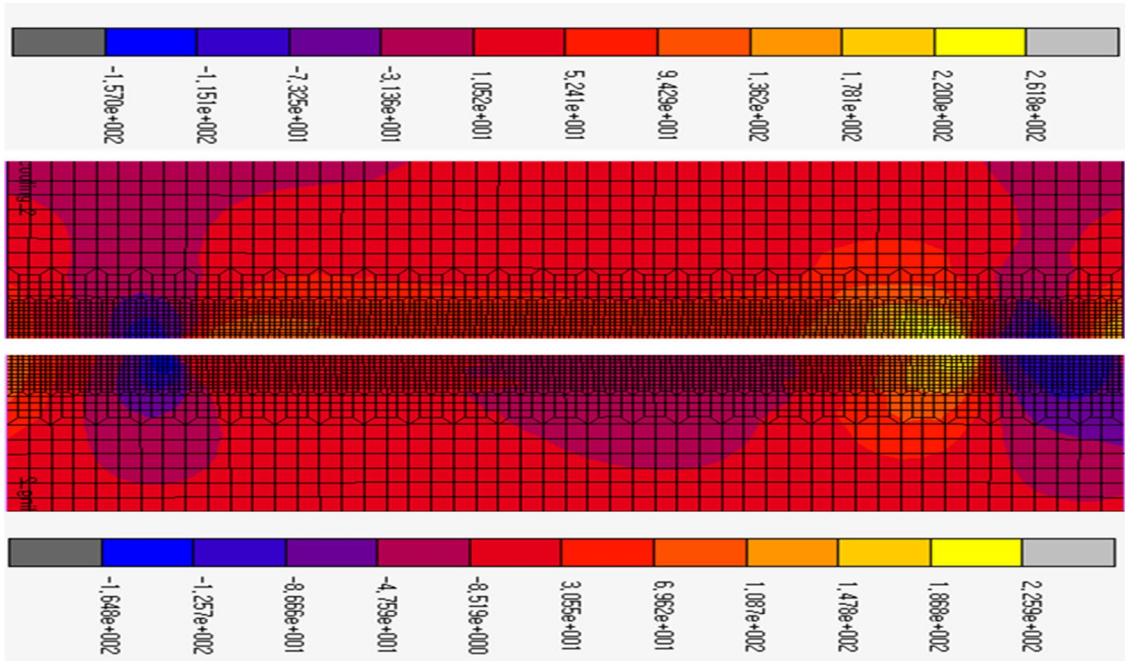


Fig 4.9 HSW(위) BOP(아래) 아랫면 Bottom 폭방향 잔류응력 (σ_{xx})

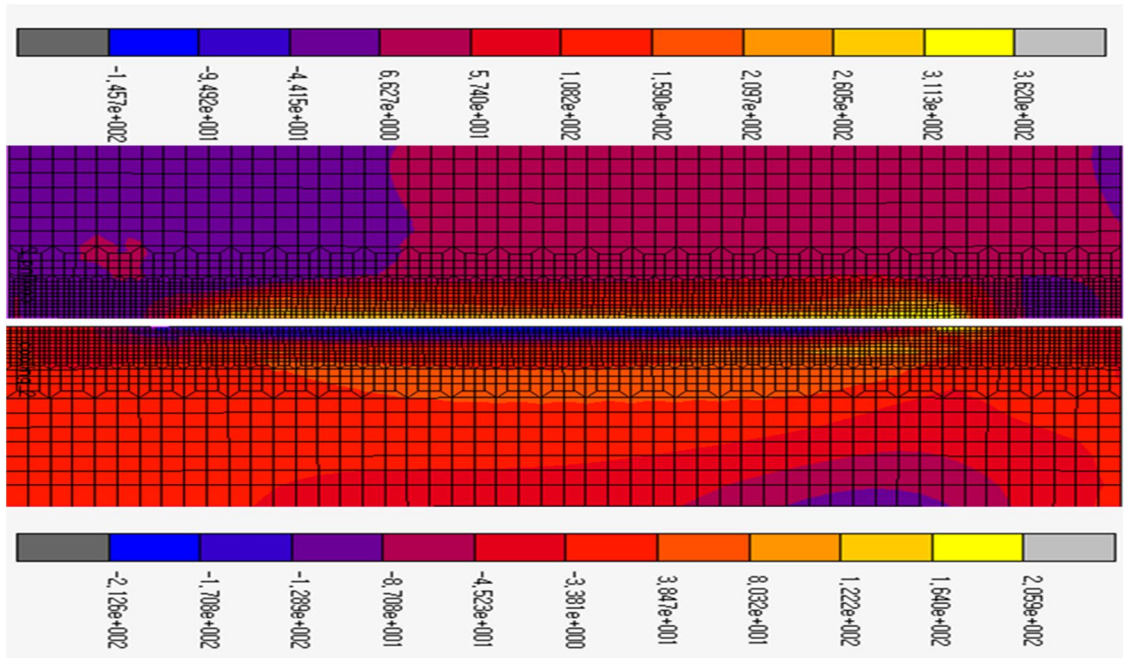


Fig 4.10 HSW(위) BOP(아래) Top 길이방향 잔류응력 (σ_{YY})

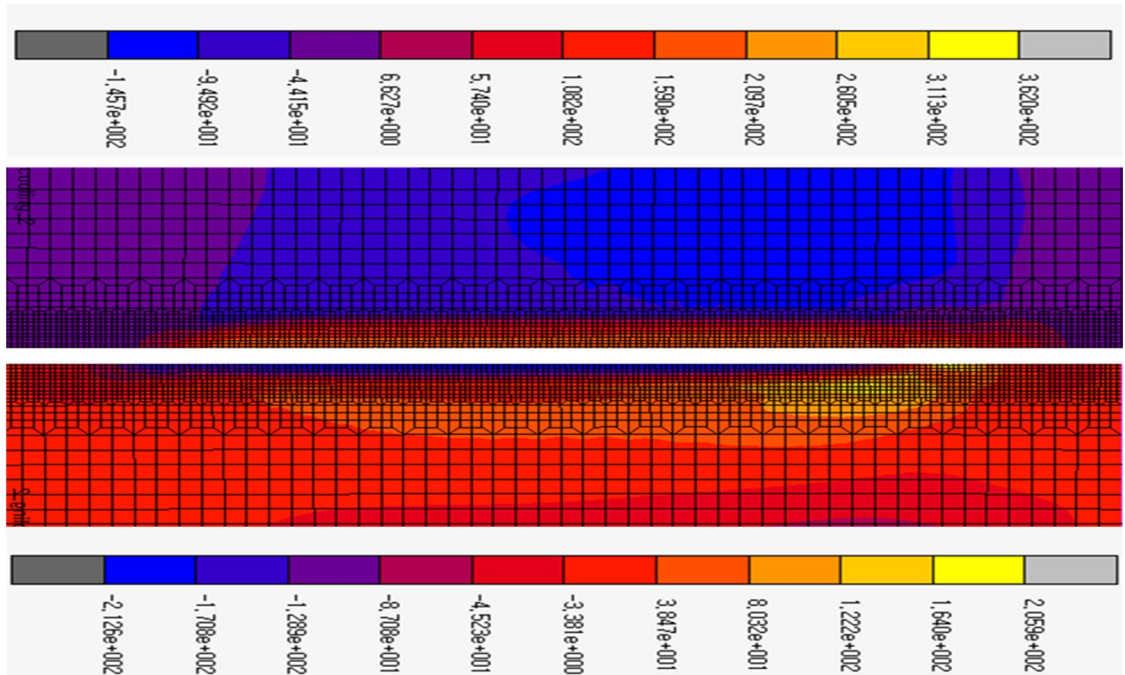


Fig 4.11 HSW(위) BOP(아래) Bottom 길이방향 잔류응력 (σ_{YY})

4.5 BOP와 HSW의 SOD증가 시 잔류응력비교

Fig 4.12, 4.13 BOP와 HSW의 SOD증가 시 모델의 윗면에서 폭 방향과 길이방향의 잔류응력을 나타내고 있다. 측정 지점은 ($X=0$, $Y=100$, $Z=0$)으로 용접부의 정 중앙 부분이고 HSW는 -56.6 °C, $R=6\text{mm}$ 의 변수에서 측정하였다. 우선 Fig 4.12 폭 방향 잔류응력을 살펴보면 SOD가 증가 할수록 용접 부에서의 잔류응력이 0점에서 멀어지는 현상을 발견할 수 있었다. 그리고 Fig 4.13 길이방향의 잔류응력에서는 SOD가 증가함에 따라서 인장 잔류응력에서 압축잔류응력으로 바뀌는 경향이 있음을 알 수 있었다.

Fig 4.14, 4.15 BOP와 HSW의 SOD증가 시 모델의 아랫면에서 길이방향과 폭 방향의 잔류응력을 나타내고 있다. 측정 지점은 ($X=0$, $Y=100$, $Z=0$)으로 용접부의 정 중앙 부분이고 HSW는 -56.6 °C, $R=6\text{mm}$ 의 변수에서 측정하였다. 아랫면에서도 Fig 4.14 폭 방향 잔류응력은 SOD가 증가 할수록 용접 부에서의 잔류응력이 0점에서 멀어지는 현상을 발견할 수 있었고 Fig 4.15 길이방향의 잔류응력에서도 마찬가지로 SOD가 증가함에 따라서 인장 잔류응력에서 압축잔류응력으로 바뀌는 경향이 있음을 알 수 있었다.

따라서 변수 SOD 가 작을수록 용접 잔류응력을 제어하는 영향이 크다는 점을 유한요소 분석을 통해 알 수 있었다. 또한 Table.4.1 에서 보았듯이 SOD 가 작을수록 변형제어에도 효과적이다라는 점을 확인 할 수 있다.

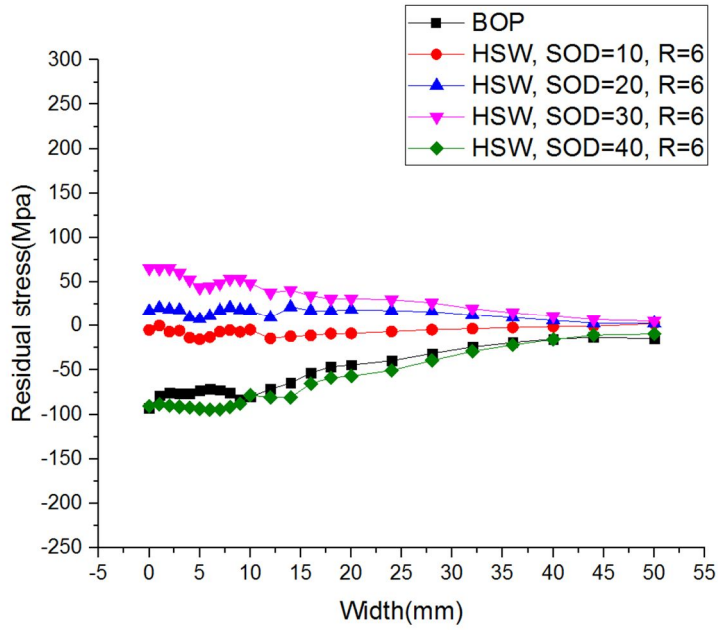


Fig 4.12 BOP와 HSW의 SOD증가 시 윗면Top 잔류응력비교 폭방향 (σ_{xx})

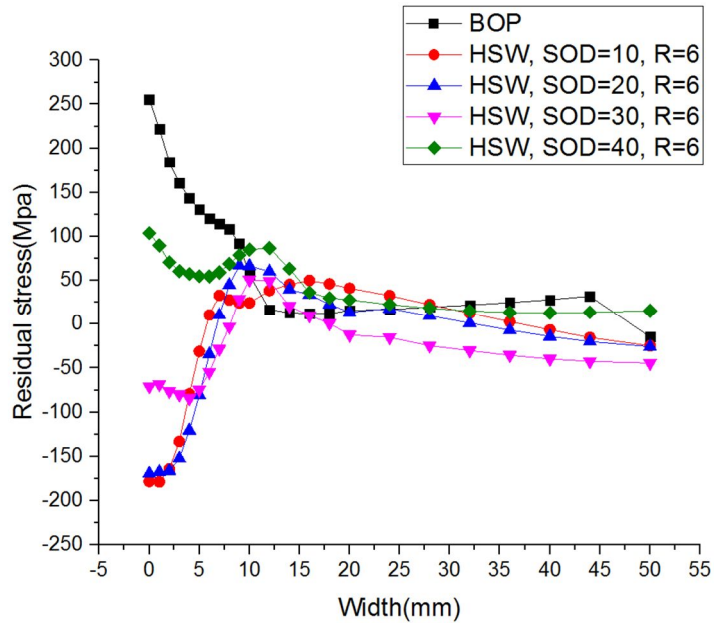


Fig 4.13 BOP와 HSW의 SOD증가 시 윗면Top 잔류응력비교 길이방향(σ_{yy})

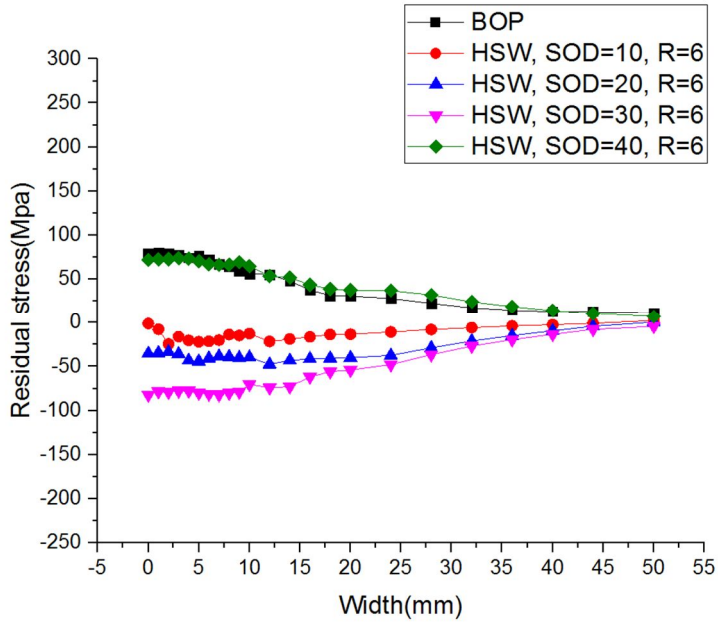


Fig 4.14 BOP와 HSW의 SOD증가 시 아랫면 Bottom 잔류응력비교 폭방향 (σ_{xx})

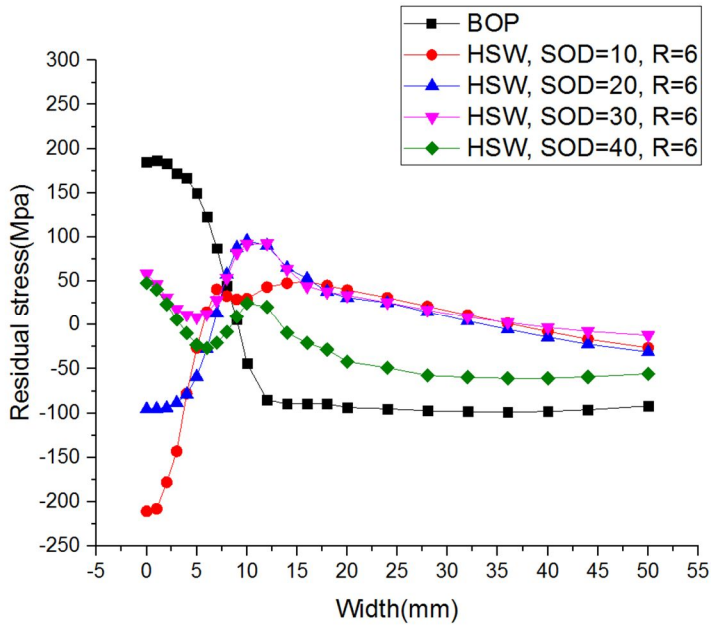


Fig 4.15 BOP와 HSW의 SOD증가 시 아랫면 Bottom 잔류응력비교 길이방향(σ_{yy})

4.6 BOP와 저변형 HSW조건에서의 잔류응력 비교

Fig 4.16, 4.17 은 BOP 와 HSW 모델의 윗면에서 각 온도 별 최소변형을 나타내는 길이방향과 폭 향의 잔류응력을 도시하였다. 측정 지점은 $(X=0, Y=100, Z=0)$ 으로 용접부의 정 중앙 부분에서 측정하였고 HSW 모델에서 $SOD=10mm, R=6mm$ 일 때 최적조건을 보였다. 이를 통해 판단하건대 최저 변형 조건에서의 폭 향 잔류응력은 Fig 4.16 를 보아 0 점에 분포한다는 점을 발견 할 수 있었다. 그리고 길이방향 잔류응력은 Fig 4.17 보아 냉각온도가 높아 질수록 인장 잔류응력에서 압축 잔류응력으로 변화 하는 양상을 확인할 수 있었다.

따라서 냉각열원은 용접 잔류응력을 제어하는데 주된 영향을 미친다는 점을 유한요소 분석을 통해 알 수 있었다.

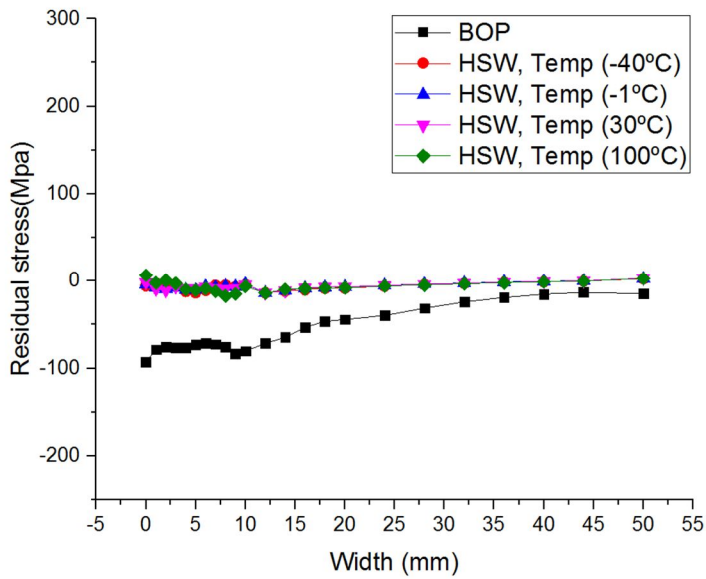


Fig 4.16 BOP와 저변형 HSW조건에서의 폭방향 잔류응력 비교 폭방향(σ_{XX})

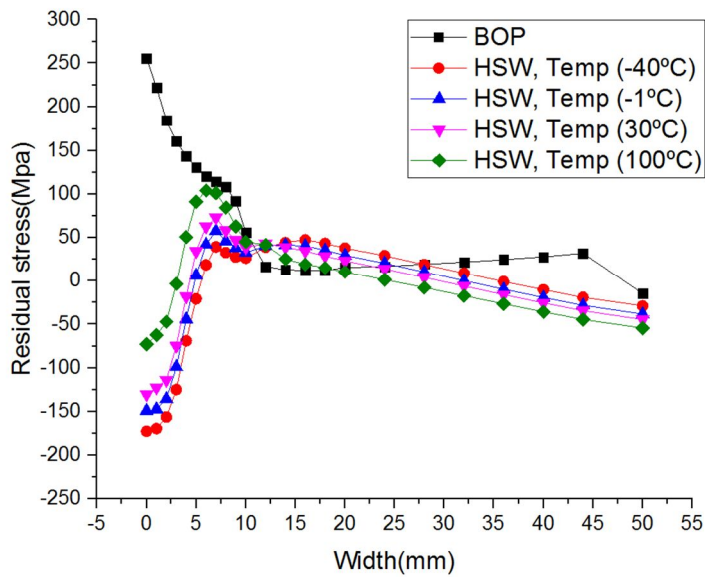


Fig 4.17 BOP와 저변형 HSW조건에서의 길이방향 잔류응력 비교 길이방향(σ_{YY})

제 5 장 결 론

본 연구에서는 AI5083-0에 무(無)구속 용접기법연구를 위해 냉각열원을 적용하였다. 이를 위해 유한요소해석을 통해 냉각온도(Temp), 냉각열원의 반경(R)과 용접 열원과의 거리(SOD)를 변수로 두어 면외변형, 잔류응력, 온도분포를 관찰하였다.

- 1) B.O.P용접에서는 최대 6.557mm의 변형이 발생하였으나 HSW용접(SOD=10mm, Radius=6mm, Cooling temperature =-56.6℃)에서 최소변형은 0.857mm(86.92% 변형감소)이 발생하였다. 윗면의 길이방향 잔류응력에서는 인장 잔류응력이 아랫면에서는 압축잔류응력이 우세 하여 위로 볼록한 변형이 관찰되어 위로 볼록한 형상을 나타내었다.
- 2) HSW용접에서는 윗면과 아랫면의 잔류응력이 유사하게 일치하므로 변형이 발생하지 않았다.
- 3) HSW용접에서 SOD가 작을 수록 변형이 적었으나 SOD=30mm이상부터는 냉각 열원을 적용하는 것이 오히려 용접변형을 심화 시키는 경향을 보였다. 그리고 SOD가 작을수록 인장 잔류응력이 감소하여 압축잔류응력으로 변화하는 경향을 보였다.
- 4) 전반적으로 냉각열원을 적용하면 인장 잔류응력에서 압축 잔류응력으로 변화되는 경향을 보이며 냉각온도가 낮을수록 경향이 강화되는 현상을 보였다.

해석결과를 통해 AI5083-0박판 용접 시, 용접 잔류응력 및 변형을 무(無)구속 용접기법을 통해 실시간으로 제어가 가능하였다. 이 과정에서 인장잔류응력에서 압축 잔류응력으로 변화되는 조건을 확인하였고 이것은 용접구조물의 피로수명이 증가할 것으로 기대 된다. 따라서 실제현장에서 무(無)구속 용접기법을 적용하면 변형 및 잔류응력 저감을 위해 전·후처리 작업을 하지 않으므로 생산성 향상과 생산비를 낮출 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. [기고] 뿌리기술은 우리 산업의 도약대, 한국경제신문, 윤상직 < 산업통상자원부장관 >
2. Bang, H. S. : “Optimizing Mutiple Quality Characteristics of Through Silicon Via(TSV) Interface and Solder Joint Interface by Numerical Analysis-based Taguchi Method” Journal of KWJS, Vol.29, No.3, pp291-294, 2011
3. 용접·접합 편람 I 철강 및 비철재료, 대한용접학회 P305-313
4. Bang, H. S. : “Analysis of Thermal and Welding Residual Stress for Hybrid Welded Joint by Finite Element Method, Journal of KWJS” , Vol. 25, No. 6, December 2007
5. Cho, S. H. : “A Study on the Numerical Analysis on the Weld Deformation and Straightening by Heating” , Yeungnam University, Ph. D. dissertation, 2001
6. Bang, H. S. : “A Numerical Analysis Study on the Reheating Crack around Welded Joint of Pressure Vessel With 2¼Cr-1Mo Steel” , Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.14, No.1, pp88-94 2000
7. Guan Q. : "Low stress non-distortion (LSND) TIG welding of thin-walled structural elements", Welding Institute Members report 374, 1988
8. Bang, H. S. : “Numerical analysis on the welding residual stress and fracture toughness of the heavy thick steel welded joints by welding processes” The Korean Welding & Joining Society, Vol. 33, No. 2, pp32-39, 2015
9. Janosch, J. J. : “International Institute of Welding work on residual

stress and its application to industry” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol85, No.3, pp183-190. March 2008

10. Chu H. S. : "A Study on the Buckling in Fillet Welds of Sheets “, Journal of KWJS, Vol. 27, No. 3, June 2009

11. Kim S. I. : "Control of Welding Distortion for Thin Panel Block Structure Using Plastic Counter-Deforming Method", The Korean Society of Ocean Engineers Vol. 23 No. 2, pp87-91, April 2009

12. Tölle, F. : "Post-weld residual stress mitigation by scanning of a defocused laser beam", Physics Procedia, Vol12, pp410-418, 2011

13. Zhang, H. : "Fundamental studies on in-process controlling angular distortion in asymmetrical double-sided double arc welding", Journal of materials processing technology, Vol205, pp214-223, August 2008

14. Lee, J. S. : “On the Fillet Weld-Induced Deformation Control by Applying the Tensioning Method” , Journal of KWJS, Vol. 27, No. 4, pp38-43, August 2009

15. Tian. X. : “Preventing welding hot cracking by welding with an intensive trailing cooler” , Journal of Materials Processing Technology Vol.97, pp30-34, January 2000

16. Park. J. U. : “Effect of Forced Cooling condition along with Welding on Welding Angular Distortion” , Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 4 pp. 2021-2026, 2013

17. Jiang. W. : Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.92, pp56-62, April 2012

18. Yegaie. Y. S. : Numerical simulation and experimental investigation of temperature and residual stresses in GTAW with a heat sink process of Monel 400 plates, Journal of Materials Processing Technology, Vol.210, pp1690-1701, October 2010
19. Joo S. M. : “A study on the thermal and mechanical behavior of resistance spot welding by using numerical simulation” , chosun university, Master's Degree dissertation, 2008
20. Bang. I. W. : "Heat Transfer and Stress Analysis During Multi-Pass Butt-Welding of NG Pipe by FEM", Korean J. Met. Mater, Vol.35, No. 8, pp.1066-1074 1997
21. Pavelic. V. : Experimental and Computed Temperature Histories in Gas Tungsten Arc Welding of Thin Plates, Welding Journal Research Supplement, Vol. 48, pp295-305, 1969
22. Bang, H. S. : “A Study on the Thermal and Mechanical Characteristic of Hybrid Welded Ship Structure A-grade Steel, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.21, No.1, 64-68, 2007

감사의 글

대학원에 입학해 연구와 공부를 하니 벌써 2년의 시간이 흘러 졸업을 하게 되었습니다. 대학원 생활에서 더 같이 못해 아쉬운 여운이 많이 남지만 항상 저를 위해 걱정해 주시고 지도해 주신 분들께 고마운 마음을 표현하고자 합니다.

저를 지도학생으로 삼아주시고 연구자로 만들어 주신 주성민교수님 감사의 말씀 드리고 싶습니다. 특별한 관심과 교육으로 이끌어 주신 덕분에 졸업 할 수 있었습니다. 앞으로 직장을 갖게 된다면 교수님으로부터 배운 성실함과 학문에 대한 지식을 활용하여 훌륭한 사회의 구성원이 되겠습니다. 정말로 교수님 께서 지도해주신 격언과 진심 어린 애정은 정말 잊지 못할 것입니다.

그리고 지식뿐만 아니라 대학원의 모든 일을 총괄 지도해주신 방한서 교수님 덕분에 전국 유일의 융접접합과학공학과 석사학위를 수여 받을 수 있었습니다. 어디를 가더라도 교수님의 당당한 모습처럼 당당하게 살것으며 사회에서 지켜야 할 예절조언은 항상 기억하며 사는 제자가 되겠습니다. 감사합니다 교수님

아침 일찍 출근하시고 저녁 늦게 퇴근하시는 방희선 교수님을 보고 성실함을 배울 수 있었습니다. 또 저의 논문을 심사해 주시고 융접과 대학원에 입학 할 수 있게 해주신 점 감사 드립니다. 교수님 덕분에 졸업논문과 졸업의 결실을 맺을 수 있었습니다. 앞으로 교수님처럼 열심히 사는 제자가 되겠습니다.

대학원 생활 2년 동안 동문수학한 우리 선배님, 동기, 후배님들에게도 감사의 말씀

전하고 싶습니다. 대학원 최고 선배이시고 많은 상식을 가지고 있는 용혁형과 함께한 토론시간 오래도록 추억이 될 것 같습니다. 그리고 부처의 덕을 가지고 있는 우람형, 사회성을 길러주신 경학형, 자신감 넘치는 준의형, 자애로운 미소를 가지신 용선형, 대성한 정국성, 누구보다 잘생긴 김종희, 오사카 박사 승엽이 선배덕분에 이전부터 내려온 유산 속에 공부 할 수 있게 해주신 점 감사 드립니다. 그리고 바로 한 학기 선배이신 정수형, 수옥형, 나민주에게도 감사의 말 전하고 싶습니다. 정수형은 수치 해석 기법을 전수해 주셨고, 수옥형은 많은 내공을 전수해 주셨습니다. 민주는 술선 수범하는 모범을 보여서 본받을 점이 많았다. 남호형님, 광록형님 훈영형님도 대학원에서 인생선배 역할을 많이 해주셨습니다. 2년동안 동거 동락한 신사다운 준영이, 인생에서 열정적인 민우, 부지런하며 듬직한 동훈, 키가 큰 병진이 같은 전일제 학생으로 많은 힘이 되었고 같이 할 수 있어 행복했다. 그리고 유머 있는 창조형, 광주의 큰형님 정진태사장님, 말을 잘하시는 민수형님, 상냥하게 대해주신 연식형님, 친구 지민이, 맛있는 중화요리 사주신 이상일씨, 국방호씨 같이 입학해서 같이공부할 수 있었고 앞으로 소중한 인연 지속되길 바랍니다. 얼마 짧은 기간이었지만 같이 고생할 수 있었던 후배님들 감사의 말을 전합니다. 이론 의 대가 동진이, 언제나 힘이 되어주신 형철형, 스타일 좋으신 주현형, 남다른 재치를 가진 영빈이, 똑똑한 우성이, 재미있는 세영이, 잘생긴 경우, 상냥하고 친절하 은결이 모두 같이 할 수 있어서 감사합니다. 마지막 학기를 같이한 막내들은 많은 시간 함께 하지 못해 같아 아쉬움을 전합니다. 착한 인철이, 예의 있게 대해준 재우, 누구보다 잘생긴 상훈이 앞으로도 계속 보고 잘 지내길 소원합니다.

마지막으로 대학원 이외의 사람들에게도 진심 어린 감사의 말을 전하고 싶습니다. 우선 제가 잘 되도록 항상 사랑으로 양육해주신 아버지, 어머니 앞으로 인생에서 두 고두고 효도 하겠습니다. 또한 제가 잘되도록 사랑이 듬뿍 담긴 조연과 격려를 해주

신 채수경 인생스승님, 부족한 것 있으면 도와주신 성민형님, 수철형님 감사의 말씀 전하고 싶습니다. 이 밖에도 광주에서 대학원 생활 속에서 많이 못 찾아 본 나의 친구들과 형님 동생들아 미안하다. 이제 앞으로 빛나는 인재가 되어서 많이 보답하겠습니다.