



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](#)

2016년 8월

석사학위 논문

용접후방의 냉각에 의한 용접 잔류응력과  
변형 저감 효과에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

신 정 수

# 용접후방의 냉각에 의한 용접 잔류응력과 변형 저감 효과에 관한 연구

Study on mitigation of welding residual stress  
and distortion using trailing heat sink

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

신 정 수

용접후방의 냉각에 의한 용접 잔류응력과  
변형 저감 효과에 관한 연구

지도교수 주 성 민

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

신 정 수

## 신정수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

## 목차

List of Figures .....	III
List of Tables .....	IV
Abstract .....	V

### 1장 . 서론

1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 방법 .....	2

### 2장 . 이론적 배경

2.1 용접 잔류응력과 용접 변형 .....	4
2.1.1 용접 잔류응력과 용접변형의 영향 .....	7
2.1.2 용접 잔류응력과 용접변형의 방지 및 저감 대책.....	8
2.2 유한요소 해석 이론 .....	12
2.2.1 비정상 열전도의 유한요소 해석 이론 .....	12
2.2.2 3차원 열탄소성의 유한요소 해석이론 .....	15

### 3장 . 유한요소 해석 모델

3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링 .....	20
3.2 열원 함수 .....	21
3.3 해석 모델 .....	22
3.3.1 기존 용접 해석 모델.....	22
3.3.2 냉각 용접 해석 모델.....	23
3.3.3 재료의 물성치 .....	24
3.3.4 용접 해석 조건 .....	26

### 4장 . 연구 결과

4.1 Bead on plate 용접 해석 결과 .....	27
4.1.1 Bead on plate 용접 면외 변형량 및 잔류응력 해석 .....	27
4.2 Heat sink welding 해석 결과 .....	30
4.2.1 Heat sink welding 면외 변형량 및 잔류응력 해석 .....	31
4.3 결과 요약 .....	51

### 5장 . 결 론.....56

참고문헌.....	58
-----------	----

## List of Figures

Fig 2.1 용접부 및 위치에 따른 잔류응력 .....	3
Fig 2.2 용접 시 온도 분포 .....	4
Fig 2.3 용접 변형의 종류 .....	5
Fig 2.4 저온 응력 완화법 적용 시 잔류응력의 변화 .....	8
Fig 3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링 .....	19
Fig 3.2 용접 열원 함수와 냉각 열원 함수의 열적 분포도 .....	20
Fig 3.3 기존 용접의 해석 모델링 .....	21
Fig 3.4 냉각 용접의 해석 모델링 .....	22
Fig 3.5 온도에 따른 비열 .....	24
Fig 4.1 Bead on plate 용접 시 면외 변형 .....	26
Fig 4.2 Bead on plate 용접 시 시간에 따른 면외 변형량 .....	27
Fig 4.3 Bead on plate 용접 시 잔류응력 분포 .....	28
Fig 4.4 Bead on plate 용접 시 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력 .....	28
Fig 4.5 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 1mm 일 때의 면외 변형 .....	30
Fig 4.6 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 3mm 일 때의 면외 변형 .....	30
Fig 4.7 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 6mm 일 때의 면외 변형 .....	31
Fig 4.8 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 9mm 일 때의 면외 변형 .....	31
Fig 4.9 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 10mm 일 때의 면외 변형 .....	32
Fig 4.10 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 12mm 일 때의 면외 변형 .....	32
Fig 4.11 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형 .....	33
Fig 4.12 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 1mm 일 때의 면외 변형 .....	33
Fig 4.13 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 3mm 일 때의 면외 변형 .....	34
Fig 4.14 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 6mm 일 때의 면외 변형 .....	34
Fig 4.15 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 9mm 일 때의 면외 변형 .....	35
Fig 4.16 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 12mm 일 때의 면외 변형 .....	35
Fig 4.17 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형 .....	36



Fig 4.18 냉각부 온도 30° C, 이격거리 30mm, 반경 16mm 일 때의 면외 변형 .. 36  
 Fig 4.19 냉각부 온도 20° C, 이격거리 20mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형 .. 37  
 Fig 4.20 각 조건별 HSW 시 시간에 따른 면외 변형량(1) ..... 38  
 Fig 4.21 각 조건별 HSW 시 시간에 따른 면외 변형량(2) ..... 38  
 Fig 4.22 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 1mm 일 때의 잔류응력 .... 40  
 Fig 4.23 냉각부 온도 30° C, 이격거리 24mm, 반경 3mm 일 때의 잔류응력 .... 40  
 Fig 4.24 냉각부 온도 20°C, 이격거리 20mm, 반경 14mm 일 때의 잔류응력..... 41  
 Fig 4.25 각 조건별 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력(1) ..... 42  
 Fig 4.26 각 조건별 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력(2) ..... 42  
 Fig 4.27 Bead on plate 용접 시 면외 변형 ..... 44  
 Fig 4.28 최적 조건 HSW 시 면외 변형 ..... 44  
 Fig 4.29 Bead on plate 용접과 최적 조건 HSW 시 면외 변형량 비교 ..... 45  
 Fig 4.30 Bead on plate 용접과 최적 조건 HSW 시 잔류응력 비교 ..... 46  
 Fig 4.31 BOP 용접과 최적 조건 HSW 시 시간에 따른 온도 이력 비교 ..... 47

## List of Table

Table 2.1 탄소강재의 응력완화 열처리의 온도 및 시간.....	7
Table 3.1 열전달 해석의 경계조건.....	23
Table 3.2 온도에 따른 열전도.....	23
Table 3.3 온도에 따른 열팽창 계수 .....	23
Table 3.4 온도에 따른 재료의 기계적 특성 .....	24
Table 3.5 Heat sink welding 해석 조건 .....	25

## ABSTRACT

### Study on mitigation of welding residual stress and distortion using trailing heat sink

Jung-su Shin

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

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

The problems created by welding in industrial site are deformation and residual stress. They not only cause the nonlinear deformation but also have an influence on weldability, moreover the problems are harmful that cracks could be created when using structure. At industrial sites, some postprocesses which take a lot of time and cost are conducted to fix the deformation and residual stress. Researches about deformation of welding and residual stress should be carried out to develop high value products.

In this study, research of decreasing the deformation and residual stress

during welding process by a way of Heat sink with numerical analysis when welding a thin plate would be done. With a way of Heat Sink, the parameters would be changed variously to deduct an optimum condition which has the lowest deformation and residual stress. Afterwards, the numerical values of residual stress with optimum condition of Heat Sink Welding and other existing way of welding would be compared to find out the level of reduction.

As a result, the deformation for the existing welding is 2.6mm and that for the Heat Sink Welding is 0.02mm. In comparison with the existing welding, the result shows about 99% of reduction of deformation with Heat Sink Welding. In the case of residual stress, generally it is decreased more with Heat Sink Welding than the other way. Judging from the result, by applying a cooling source to the rear of a heat source of welding, the existence of the best condition that doesn't occur the deformation is confirmed.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

용접·접합기술은 제조기술에 있어서 가장 근본이 되는 기술로 소성가공, 금형, 표면처리, 열처리, 주조와 더불어 뿌리기술로 지정되어 있다. 자동차, 선박, 우주항공, 건축 등과 관련된 많은 산업현장에서 제품을 생산·가공하기 위해서 필수적으로 사용되는 가공기술이다. 이러한 용접·접합기술은 앞으로 더욱 발전해야 할 필요가 있으며 현재 다방면의 연구가 진행 중에 있다.

산업현장에서 용접을 할 경우 발생하는 문제점으로 저응력 파괴, 응력부식균열, 좌굴(비틀림) 등의 발생 원인이 되는 용접 잔류응력(residual stress)이 있다<sup>1)</sup>. 일반적으로 용접은 국부적으로 급격한 가열, 급격한 냉각 과정을 동반하기 때문에 용접 시공에서 용접 잔류응력을 피할 수 없다. 이와 같이 용접 시에 발생하는 용접 잔류응력은 용접성에 많은 영향을 줄 뿐만 아니라 용접부의 비선형적인 변형의 원인이 되고 있다. 또한 용접 구조물의 사용 중에 있어서도 균열 발생 또는 균열의 전파에 직·간접적으로 악영향을 미치게 된다. 이러한 용접구조물의 용접성에 영향을 주는 용접 잔류응력 문제를 해결하기 위해서는 용접부의 잔류응력 분포를 정확히 이해하고 해석할 필요가 있으며, 나아가 보다 신뢰성과 경제성이 있는 새로운 예측법과 방지법이 요구된다<sup>2)</sup>.

용접 잔류응력과 더불어 용접 시 발생하는 또 다른 문제점으로 구조물의 강도를 저하시키고, 미관을 손상시킬 뿐만 아니라 구조물의 치수를 변화하여 생산성을 저하하는 용접변형이 있다. 용접 시에 발생하는 용융금속의 수축 및 팽창에 의해 압축 및 인장 응력이 발생하고 이 압축 및 인장 응력은 구조물의 변형을 가져온다. 용접 변형은 모재의 열팽창 계수가 클수록 발생되기 쉬우며, 용접 형상의 영향을 받는다. 또한 용접속도가 느릴수록 발생되기 쉬우며, 용접 패스수가 많을수록 많이 발생된다<sup>3)</sup>.

일반적으로 용접 시 구조물의 구속을 크게 한 경우 용접 변형은 작아지지만 용접 잔류응력은 커지게 되며, 구속을 작게 한 경우 용접 변형은 커지지만 용접 잔류응력은 작아지게 된다.

현재 우주 항공, 자동차 및 선박 산업 등에서는 용접 잔류응력 및 용접 변형을 개선하기 위하여 많은 시간과 고비용이 드는 후처리 작업을 하고 있으며, 이는 용접 산업에서 차지하는 비중이 크다. 또한 용접 변형에 대한 교정 공정에 대한 경우 체계적인 데이터가 적립되어 있지 않고 대부분 임시방편적으로 대처하고 있는 상황이다. 고부가 가치의 제품을 개발, 생산하기 위해서는 보다 체계적이고 지속적으로 용접 잔류응력과 용접 변형에 대한 연구 및 관심이 필요하다<sup>4)5)</sup>.

본 연구는 변형이 특히 문제가 되는 박판 용접 시 용접부 가까이에 냉각열원을 주어 실시간으로 용접 잔류응력 및 용접 변형을 저감할 수 있는지에 대하여 수치해석적 방법으로 연구하고자 한다.

## 1.2 연구 방법

실험적인 방법으로는 용접 변형과 용접 잔류응력을 정밀 제어하기가 어렵고 용접 상황 및 조건에 따른 응력 분포 및 온도 분포를 알아내는데 많은 시간과 경제적 비용이 든다. 따라서 수치해석적인 방법을 통하여 용접 변형과 잔류응력 저감에 최적 조건이 존재하는 지를 고찰하고자 한다<sup>6)7)</sup>.

연구 방법은 3차원 열전도도 및 열탄소성 이론을 정립하여 정식화하였으며, MSC사의 수치해석 프로그램인 MARC 프로그램을 통하여 유한요소 모델링을 하였다. 또한 용접에 따른 열 분포에 대한 것을 설정하기 위하여 열원 함수를 정의하였으며, 재료의 온도에 따른 물성치의 변화를 설정하기 위하여 문헌을 통하여 온도에 따른 재료의 특성을 입력하였다. 기존의 용접법과 비교하기 위하여 해석 모델을 기존 용접 모델과 냉각 용접 모델 2가지로 구분하였으며, 냉각 용접 모델은 여러 가지 조건을 달리하여 최적 조건을 도출하고자 하였다.

최종 결과는 냉각열원이 있는 경우와 기존 용접법을 비교하여 용접 잔류응력과 용접 변형의 방지 및 저감에 어느 정도 효과가 있는지 알아보하고자 하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 용접 잔류응력과 용접 변형

용접을 할 때, 용접부에 집중된 열에 의해 금속은 국부적으로 용융되었다가 주변으로 열이 전달 및 전도됨에 따라 냉각되며 급격한 온도 변화를 겪게 된다. 반면 용접부에서 조금 떨어진 부분은 비교적 온도가 완만하게 상승하다가 실온으로 돌아오게 된다. 이 과정에서 구조물에 열응력이 발생하게 되며, 열응력이 구조물의 항복조건에 도달하면 소성변형률이 발생, 축적되며 냉각 후에도 용접부에 응력과 변형으로 잔류하게 된다. 이런 잔류응력은 용접 후, 열적 평형상태에 있고 외부에 하중이 없을 때에도 내부에 감금된 응력(Locked in stress)으로 존재하게 된다. 또한 용접공정이 완료된 후에도 영구적으로 남아 있는 변형을 용접변형이라고 한다<sup>8)</sup>.

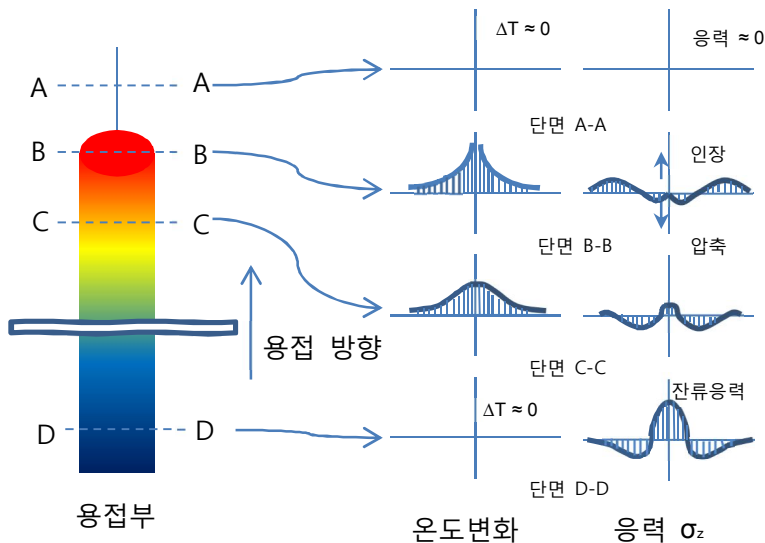


Fig 2.1 용접부 및 위치에 따른 잔류응력

잔류응력을 발생시키는 기구에는 크게 다음과 같이 두 가지로 나눌 수 있다.

- 1) 소성 및 열변위와 같은 변위의 불균일한 분포에 의한 발생
- 2) 구조적인 부정합(Structural Discontinuity)에 의한 발생

소성 및 열변위와 같은 변위의 불균일한 분포에 의한 발생은 예를 들어 철강을 볼 때 용접열에 의해  $\alpha$ 상(BCC구조)이  $\gamma$ 상(FCC 구조)로 상이 변할 때 체적이 증가하게 되고 이는 주변에 상이 변하지 않은 지역에 의해 구속이 된다. 결과적으로 상이 변하지 않은 지역의  $\alpha$ 상은 높은 압축응력상태가 되고 반면에 용접열에 의해  $\gamma$ 상이 된 용접부는 높은 인장응력상태가 된다. 이러한 상변태에 의한 응력은 미세구조의 변화로 확인할 수 있다. 구조적인 부정합에 의한 발생은 이음부의 모양, 용접입열, 모재의 두께와 크기, 용착순서, 용접순서, 외적 구속 등에 영향을 받는다. 특히 모재의 두께가 클 경우 용접변형은 거의 일어나지 않으나 그에 반해 잔류응력은 커진다. 반대로 모재의 두께가 작을 경우 용접변형은 많이 일어나나 잔류응력은 작아진다. 또한 외적 구속이 클 경우 잔류응력은 커지나 변형은 작아지고 외적 구속이 작을 경우 잔류응력은 작아지나 변형은 커진다<sup>9)</sup>.

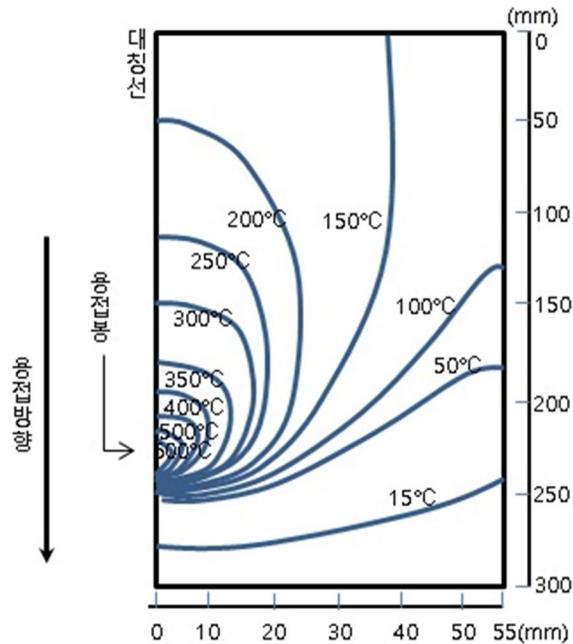


Fig 2.2 용접 시 온도 분포



구조물의 용접변형을 결정하는 인자 다음과 같다.

- 1) 구조적 인자
- 2) 재료적 인자
- 3) 제작적 인자

구조적 인자는 기하학적 형상, 판의 두께, 결합형태 등이 영향을 끼치고 재료적 인자는 모재와 용접봉의 종류가 영향을 끼친다. 제작적 인자는 용접방법과 용접전류, 전압, 용접속도, 예열조건, 외적 구속 등이 영향을 끼친다<sup>10)</sup>.

용접변형의 종류는 크게 횡방향 변형과 종방향 변형이 있다.

- 1) 횡수축 변형
- 2) 횡굽힘 변형(각변형)
- 3) 회전 변형
- 4) 종수축 변형
- 5) 종굽힘 변형
- 6) 좌굴 변형

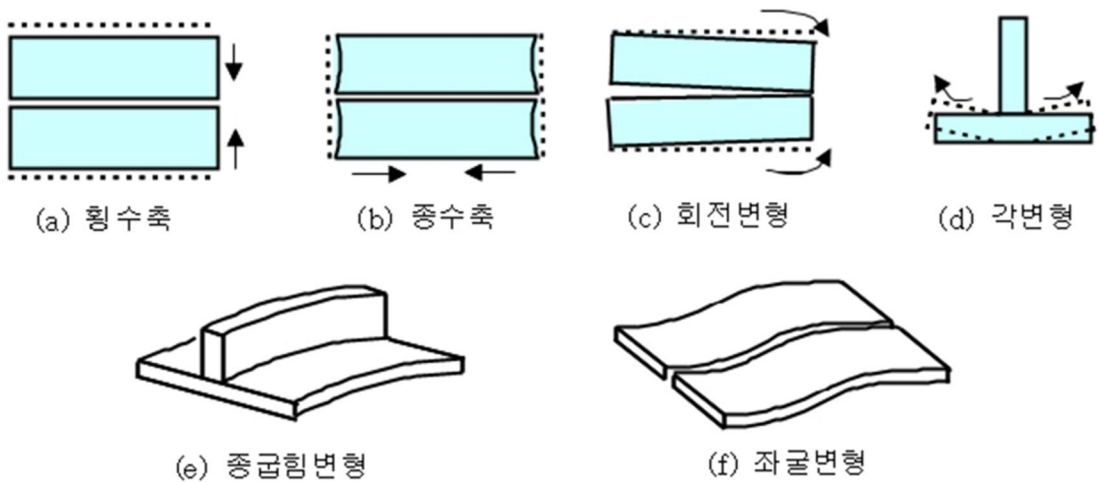


Fig 2.3 용접 변형의 종류

### 2.1.1 용접 잔류응력과 용접변형의 영향

용접부에 잔류응력이 영향을 끼치는 요인은 다음과 같다.

- 1) 구조물의 강도
- 2) 취성파괴
- 3) 피로파괴
- 4) 응력부식

용접 잔류응력은 외부에서 가해지는 하중과 같은 응력으로 구조물 내부에 존재하여 구조물의 강도에 영향을 끼친다. 또한 용접부 부근에서 항복점에 가까운 큰 잔류응력이 존재하므로 외부하중에 의한 근소한 응력이 추가되기만 해도 취성파괴의 가능성이 생긴다. 반복하중에 대한 피로강도에 대해서도 잔류응력은 반복되는 하중과 잔류응력이 합해져서 결국 피로파괴의 시작이 되는 균열을 발생시키고 더욱이 그 균열을 진전시키는 역할을 한다. 응력이 존재하는 상태에서 재료는 부식이 촉진되는 경우가 많으며, 이는 잔류응력의 경우도 마찬가지이다. 이런 경우를 응력부식(Stress Corrosion)이라고 한다<sup>11)</sup>.

용접변형은 구조물의 치수를 변화시켜 구조물의 가치를 저하시키고 용접 후 조립공정을 어렵게 만든다. 또한 이를 교정하기 위해 공정 전에 역변형을 주어 변형을 방지하거나 후공정을 통하여 변형을 방지하는 등, 많은 경제적 비용을 유발시킨다. 현재 선박의 경우 전체 변형에서 용접변형이 70%를 차지하고 있으며, 탑재불량으로 인한 변형이 20%, 절단변형이 10%를 차지하고 있을 정도로 용접변형은 변형에서 많은 비중을 차지하고 있고 그에 따른 후공정의 비용 또한 많은 비중을 차지하고 있다.

## 2.1.2 용접 잔류응력과 용접변형의 방지 및 저감 대책

용접 잔류응력을 완화하는 방법에는 다음과 같다.

- 1) 응력 완화 열처리 방법
- 2) 저온 응력 완화법
- 3) 기계적 응력 완화법

응력 완화 열처리 방법은 후열처리에 의해 잔류응력을 완화하는 것으로 온도의 상승에 따라 재료의 항복응력이 저하되고 다시 고온도로 유지하면 재료에 크리프(Creep)현상이 일어나 응력이 이완된다. 고온도에서 금속의 내부 스트레인이 회복되어 재결정이 생기는 현상으로 잔류응력을 완화하는 방법이다.

**Table 2.1 탄소강재의 응력완화 열처리의 온도 및 시간**

온도(°C)	두께 25mm당의 유지시간(hr)
600	1
570	2
540	3
510	4

응력 완화 열처리 방법에 대한 연구 중 Y.W. Qian<sup>12)</sup> 연구에서는 570°C로 2시간을 응력 완화 열처리를 하였을 경우 잔류 응력이 245MPa에서 154MPa로 약 37% 낮아진 것으로 나와 있다. 응력 완화 열처리 방법은 용접 잔류응력을 완화하는데 가장 일반적인 방법이지만 시간과 비용이 많이 들어가는 단점이 있다.

저온 응력 완화법은 용접선으로부터 조금 떨어진 부분의 양 옆을 150~200°C로 가열하고 즉시 냉각시키는 것으로 용접부에 존재하는 용접선 방향의 잔류응력을 완화하는 방법이다. 흔히 린데법(Linde's Method)이라고도 한다.

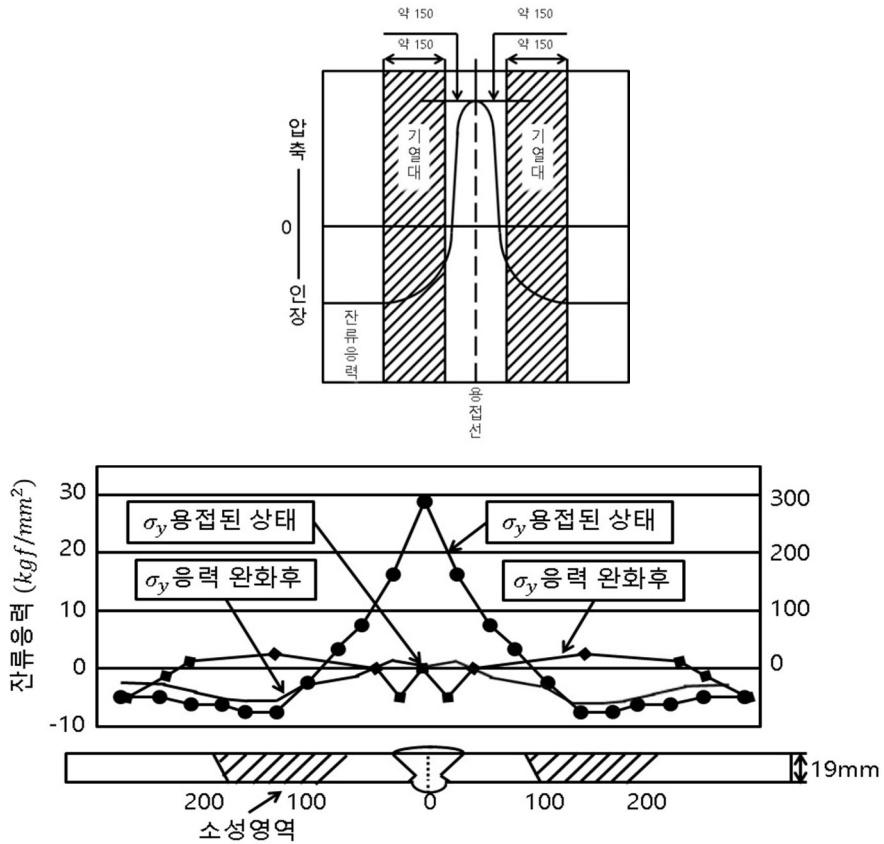


Fig 2.4 저온 응력 완화법 적용 시 잔류응력의 변화

기계적 응력 이완법은 외부에서 작용응력을 주어 내부의 잔류응력과 합이 항복점 이상이 되게 하는 방법이다. 일반적으로 원통형 압력용기와 같은 구조물에 많이 사용된다. 용접부의 표면을 끝이 둥근 해머 등으로 연속적으로 치면서 잔류응력을 완화하는 피닝법도 있다.

기계적 응력 이완법은 외부에 작용응력을 주어 잔류응력을 완화하므로 모재가 두꺼울 경우 내부 잔류응력은 완화하기 힘들며, 표면을 가공시키는 것으로 가공경화에 의해 연성이 낮아지는 단점이 있다.

용접변형을 완화하는 방법은 다음과 같다.

- 1) 용접 전에 변형을 고려하여 역변형(변형각)을 준다.
- 2) 용접부 이음의 형상이 가능한 용접부 단면에 대칭이 되도록 한다.
- 3) 용접부의 강도에 문제가 생기지 않을 정도 내에서 용착량이 과다하지 않도록 설계한다.
- 4) 가능한 용접 pass수를 줄이도록 한다.
- 5) 용접속도를 빠르게 한다.
- 6) 튼튼한 JIG로 변형이 적게 발생하도록 고정한다.
- 7) 용접부 Cooling 기법

용접 시공 전에 용접부에 변형을 고려하여 역변형을 주는 방법으로 변형을 완화하는 시공법이 많이 사용되고 있다. 하지만 역변형을 주더라도 완전히 변형을 막을 수는 없으며 용접 시 설계에 어려움을 가지고 있다.

용접부 이음 형상이 V형일 경우보다 X형일 경우가 용접부의 변형 방지에 유리하다. 이는 용접 시 발생하는 변형이 앞면과 뒷면에서 서로 상쇄되어 전체적인 변형이 작아지게 된다. 하지만 이 방법 또한 용접 설계에 제한이 있고 용접변형을 완전하게 방지하기는 매우 어렵다.

용접부에 용융금속을 줄이는 것은 용융금속이 응고할 때 발생하는 응력을 줄이는 것으로 용접변형을 줄이는 방법이다.

용접 pass수가 많을수록 그에 따른 열응력이 많이 발생하게 되므로 용접 pass수를 줄이는 것으로 용접변형을 줄이는 방법이다. 또한 용접속도를 빠르게 하는 방법도 용접에 따른 열응력을 낮게 하여 용접변형을 줄이는 방법이다.

JIG로 강하게 고정하는 방법은 물리적인 방법으로 변형이 발생하는 것을 억제하는 방법이다. 이 방법은 변형 방지에 효과가 있지만 그에 따른 용접부에 용접 잔류응력이 강하게 발생되어 적합하지 않은 용접시공법이다.

용접부 Cooling 기법은 본 연구에서 다루는 기법으로 용접 시에 냉각 열원을 주어 용접공정 내의 인프로세스에서 용접변형과 잔류응력을 완화하는 방법이다. 용접공정

중에 용접변형과 잔류응력을 완화하므로 후공정을 하지 않아도 되며 다른 방법보다 시간과 비용이 적게 들어가기 때문에 보다 경제적이고 효율적인 용접 잔류응력과 용접변형의 방지 및 저감 대책이라고 생각할 수 있다<sup>13)14)</sup>.

## 2.2 유한요소 해석 이론

용접 시 발생하는 입열에 의해 재료의 열전도율, 비열, 밀도 등이 변화하게 되므로 이를 해석하기 위해서는 재료의 비선형화(nonlinear analysis)적 해석이 필요하다. 또한 용접 잔류응력 및 용접 변형은 용접 입열에 의하여 발생되고 열전도에 의해서 변화하므로 열탄소성의 유한요소 해석과 열전도의 유한요소 해석 모두 필요하다<sup>15)16)</sup>.

### 2.2.1 비정상 열전도의 유한요소 해석 이론

재료가 등방성일 때, 3차원 비정상 열전도의 지배방정식은 아래의 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

이 식(2.1)을 3차원 직교좌표계로 기술하면 다음 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

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

이다.

식 (2.2)의 비정상 열전도 방정식을 Galerkin method를 적용하기 위하여 해석대상을 유한개의 요소로 분할하면 요소 내의 온도분포는 아래와 같이 표현된다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\varphi(t)\} \quad \text{-----} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 3차원 열탄소성의 유한요소 해석이론

용접 잔류응력과 용접 변형을 해석하기 위해 재료가 등방성임을 가정하였다. 재료의 기계적 특성(인장강도, 항복강도, 탄성계수, 열전도율, 비열, 열팽창계수 등)은 탄성 및 소성의 모든 영역에서 온도에 따라 변화하는 것을 고려하였으며 폰-미세스 응력(Von-Mises stress)을 이용하여 소성역에서 항복함수로 사용하였다<sup>17)</sup>.

#### 1) 탄성역에서의 응력-변형 관계식

재료에 탄성역에서의 전변형률은 식 (2.12)의 열변형률이 적합조건을 만족하도록 탄성변형률과의 합이 되도록 해야 한다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\} \quad \text{-----} \quad (2.14)$$

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

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

여기서  $\{\varepsilon^e\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$  및 온도  $T$ 의 함수이므로 다음과 같은 식으로 증분할 수 있다.

$$\{d\varepsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \varepsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\varepsilon^e\}}{\partial T} dT \quad \text{-----} \quad (2.16)$$

식 (2.15)을 식 (2.16)에 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \quad \text{-----} \quad (2.17)$$

식 (2.17)을 식(2.12)와 식(2.14)에 대입하면 다음과 같은 식이 된다.



$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \quad \text{-----} \quad (2.18)$$

식 (2.18)을 다시 식 (2.14)에 대입하면 응력증분을 통한 구성방정식이 다음과 같은 식으로 구하여 진다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\left(\frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \left([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E}\frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad \text{-----} \quad (2.19) \end{aligned}$$

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)  $\sigma_y$ 는 온도  $T$ 와 소성일(plastic work)  $W^p(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^p)$ 의 함수로서  $\sigma_y(T, W^p)$ 로 하고, 항복함수  $F$ 는 응력  $\{\sigma\}$ 와 항복응력  $\sigma_y$ 로부터 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\varepsilon}^p, T) \\ &= \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\varepsilon}^p, T) \quad \text{-----} \quad (2.20) \end{aligned}$$

여기서  $dF = df - df_0 = 0$  일때 재료는 항복한다. 또한, 재료가 소성역에서 부하상태(loading state)에 있을 경우에는  $dF = 0$ 의 조건을 만족해야 하므로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$dF = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T \{d\sigma\} - \left\{\frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p}\right\}^T \{d\bar{\varepsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \quad \text{-----} \quad (2.21)$$

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 넘어선 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜(plastic potential)로 가정하면 소성변형을 증분은 다음과 같은 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \text{-----} (2.22)$$

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

또한, 전변형률의 증분  $\{d\varepsilon\}$ 는 탄성, 소성 및 열변형률의 합이므로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^t\} \text{-----} (2.23)$$

## 제 3 장 유한요소 해석 모델

### 3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링

용접 열원에 따른 용접 잔류응력과 변형에 대한 변화를 규명하기 위해 3차원 비선형 용접해석을 MSC사의 MARC 프로그램을 통해 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

해석에 사용된 요소는 8절점 아이소-파라메트릭(Iso-parametric) 3차원 요소를 사용 하였고 사용된 총 절점수는 9445 nodes, 총 요소수는 6000 elements를 사용하였다.

경계조건은 Y축의 상단과 하단에 4개의 node만들 all fixed 하였다. 이는 미미한 구속조건으로 Jig가 없어도 될 정도의 경계조건을 실험하기 위한 부분이다. 또한 시뮬레이션 중 내부 모재로의 열전도 및 대기 중으로 열전달이 되도록 하였으며 모재의 초기온도는 30℃, 대기의 온도는 30℃로 설정하였다.

총 해석 시간은 996 초로 용접시간 14초(140step), 1차 쿨링 시간2초(20step), 2차 쿨링 시간 980초(98step)으로 구성되어 있다.

용접선에 대해 좌우 대칭이 되는 상황이므로 대칭 구속조건을 경계조건에 추가하여 Half모델로 해석을 실시 하였다.

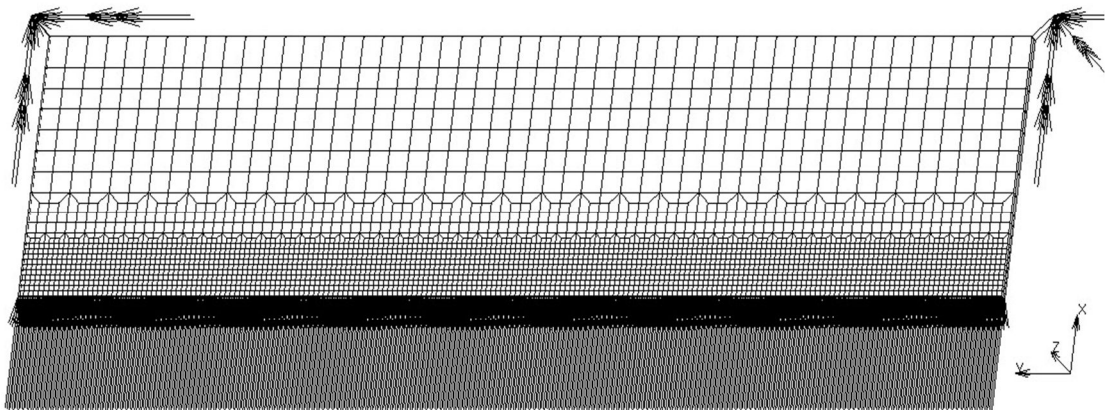


Fig 3.1 수치해석을 위한 유한요소 모델링

### 3.2 열원 함수

용접 방법은 GTAW(Gas tungsten arc welding)를 채택하였다. 그 이유는 GTAW 특성상 별다른 용가재 없이도 용접이 가능하며 특히 박판 용접 시 용접부의 표면에 열이 전달되어 그에 따라 열전도가 되는 형식이므로 본 연구에 적절한 용접법이라고 고려하였다.

GTAW 입열 모델 형태는 가우시안 분포를 가지며 그에 따라 열원 함수 또한 가우시안 분포를 갖는 표면 열원 함수를 이용하였다. 냉각열원 또한 입열 모델 형태가 가우시안 분포를 가지며 마찬가지로 가우시안 분포를 갖는 표면 열원 함수를 이용하였다.

본 해석에서의 열전도 방정식은 식(2.2)와 같으며 식(2.2)에서 단위 시간당 입열량을 나타내는  $\dot{Q}$ 는 Pavelic가 제안한 Pavelic's disc shape 이라는 함수를 적용하였다.

- Pavelic's disc shape

$$Film\_Coef(x,y,z) = \frac{3h}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{r^2}\right)$$

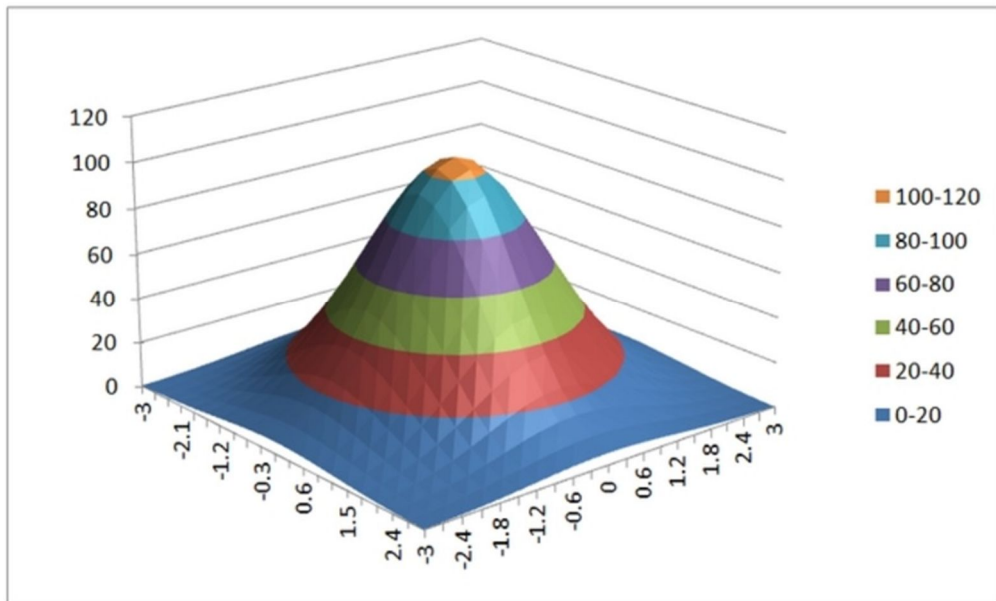


Fig 3.2 용접 열원 함수와 냉각 열원 함수의 열적 분포도

### 3.3 해석 모델

본 연구에서는 기존 용접 해석 모델과 냉각 용접 해석 모델을 비교하기 위하여 2개의 해석 모델을 설정하였으며 기존 용접 해석 모델은 BOP용접을 해석 모델로 선정하였고 냉각 용접 해석 모델은 Heat sink welding 을 용접 모델로 선정 하였다.

#### 3.3.1 기존 용접 해석 모델

용접은 두께 2mm의 박판을 GTAW 프로세스로 BOP용접 하였으며 전류는 100A, 전압은 10V, 용접속도는 10 mm/s로 하였으며 입열량은 다음과 같은 계산식을 통하여 1KJ/cm로 하였다.

$$Q = \frac{60 * E * I}{V} = 1 \text{ kJ/cm}$$

여기서  $E$  = 전압,  $I$  = 전류,  $V$  = 용접속도를 나타낸다.

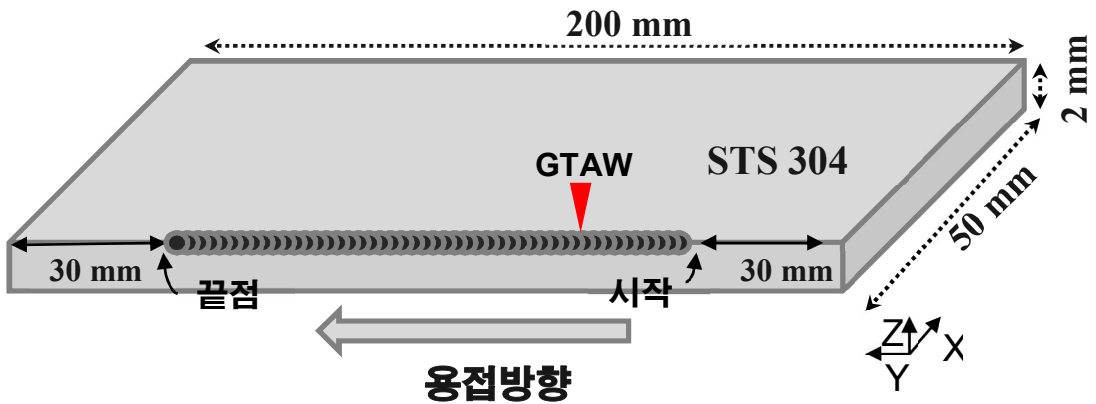


Fig 3.3 기존 용접의 해석 모델링

### 3.3.2 냉각 용접 해석 모델

냉각 용접 해석 모델은 기존 용접 모델과 모든 조건이 같고 용접 후 냉각 열원을 준다는 조건만 추가되었다. 따라서 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도 및 입열량 등은 모두 기존 용접 모델과 같다.

여기서 HSW는 Heat Sink Welding 의 약자로 냉각 열원을 나타내는 용어로 사용되었다. 또한 SOD는 Standoff Distance의 약자로 용접 열원과 냉각 열원의 이격 거리를 나타내는 용어로 사용되었다.

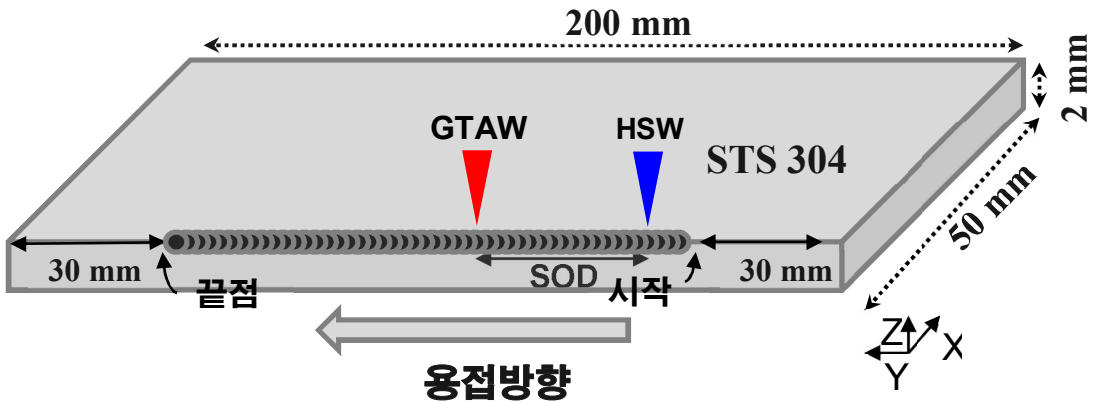


Fig 3.4 냉각 용접의 해석 모델링

### 3.3.3 재료의 물성치

재료는 STS304(Cr 18\_Ni8)로 설정하였으며 재료의 비열과 열전도, 열팽창 계수, 밀도 및 기계적 특성 등은 모두 온도에 따라서 그 물성치가 변화하는 온도 의존성을 고려하였다. 그렇기 때문에 용접 해석에 있어서도 그 온도 변화에 따른 재료의 물성치를 설정해줘야 한다. 이것은 재료의 온도 의존성을 나타내는 것으로 문헌을 참고 하여 온도에 따른 재료의 물성치를 설정하였다.

Table 3.1 열전달 해석의 경계조건

Initial temperature	20℃
Natural convection	18W/m <sup>2</sup> · °C
Density	7817kg/m <sup>3</sup>
Specific heat	460J/kg· °C

Table 3.2 온도에 따른 열전도

Temperature(°C)	20	200	400	600	800	1000
Thermal conductivity (W/m·°C)	16.3	17	19	22	27	31

Table 3.3 온도에 따른 열팽창 계수

Temperature(°C)	100	316	538	649	982
Coefficient of thermal expansion(10 <sup>-6</sup> /°C)	17.3	17.8	18.4	18.7	20.2

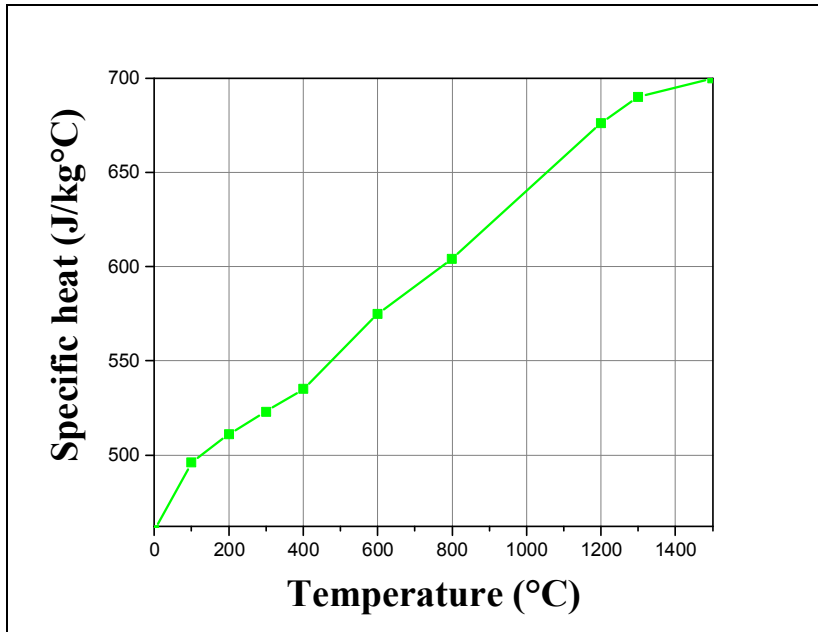


Fig 3.5 온도에 따른 비열

Table 3.4 온도에 따른 재료의 기계적 특성

Temperature(°C)	37.78	148.89	260	371.11	482.22	593.33	648.89
Modulus of elasticity (GPa)	200.11	192.52	184.24	176.65	153.19	131.79	114.55
Yield stress (MPa)	171	127	111	91	71	56	44
Tensile strength (MPa)	586.42	520.28	506.56	492.74	447.96	354.96	306.64



### 3.3.4 용접 해석 조건

용접부 냉각온도, 이격 거리(SOD), 냉각열원의 반경을 여러 가지로 변화시키면서 면외 변형이 최소가 되는 조건의 존재 여부를 확인하기 위하여 다음과 같은 조건표를 구성하여 용접 해석을 하였다.

Table 3.5 Heat sink welding 해석 조건

조건번호	냉각온도, temp(° C)	아크열원과 냉각 열원과의 이격 거리, SOD (mm)	냉각열원의 반경, r (mm)
1	30	24	1
2	30	24	3
3	30	24	6
4	30	24	9
5	30	24	10
6	30	24	12
7	30	24	14
8	30	30	1
9	30	30	3
10	30	30	6
11	30	30	9
12	30	30	12
13	30	30	14
14	30	30	16
15	20	20	14

## 제 4장 . 연구 결과

### 4.1 Bead on plate 용접 해석 결과

본 절에서는 3차원 비정상 열전도 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 Bead on plate(BOP) 용접 시 용접 변형 및 용접 잔류응력의 분포에 대한 특성에 대하여 고찰해 보았다. 이 해석을 통하여 현재 기존의 용접 시 발생하는 용접 변형과 용접 잔류응력에 대한 기본적인 경향을 판단할 수 있을 것이라고 생각한다.

해석 진행은 용접시간을 총14초로 설정한 후 0.1초씩 진행을 하여 총 140step을 수행한 후 1차 냉각시간을 2초로 하여 0.1초씩 총 20step을 수행하였다. 그 후 2차 냉각시간을 980초로 하여 10초씩 총 98step을 수행하였다.

#### 4.1.1 Bead on plate 용접 면외 변형량 및 잔류응력 해석

##### 1) 면외 변형량 해석

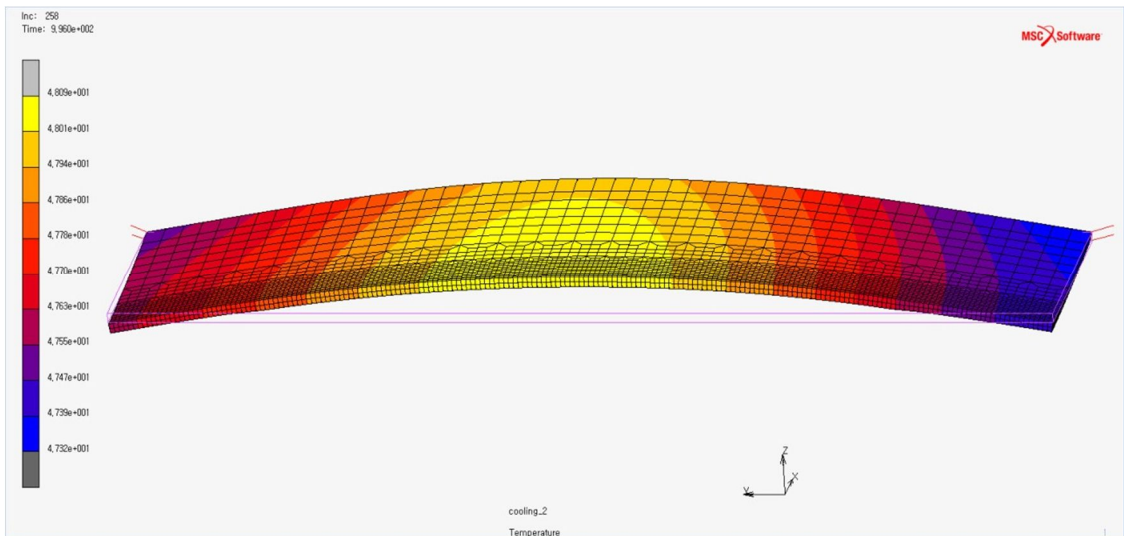


Fig 4.1 Bead on plate 용접 시 면외 변형

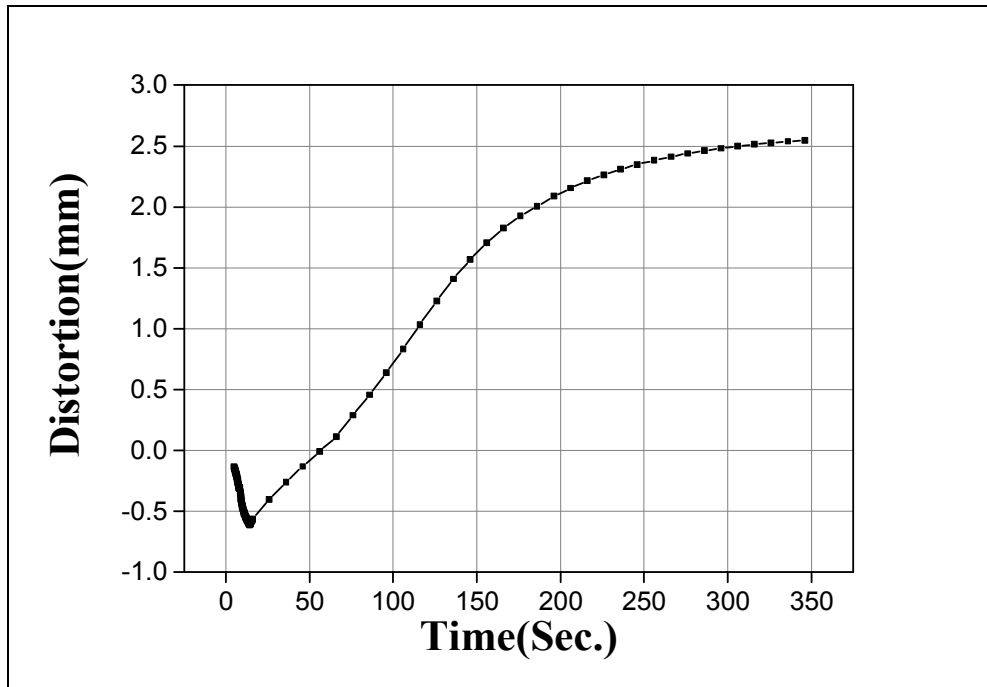


Fig 4.2 Bead on plate 용접 시 시간에 따른 면외 변형량

0 초부터 56 초까지 아래 방향으로 면외 변형이 발생하다가 56 초부터 998 초까지 위 방향으로 면외 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 최종 면외 변형은 위쪽 방향으로 최대 2.6483mm의 면외 변형이 발생하였다.

이 해석을 통하여 현재 기존의 용접법을 통해서 발생하는 용접 변형에 대해서 확인할 수 있었다.

2) 용접 잔류응력 해석

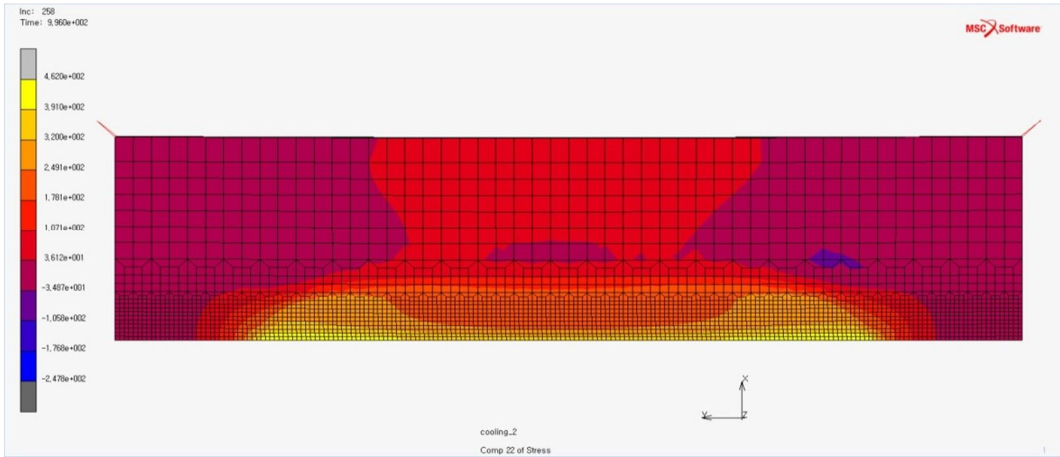


Fig 4.3 Bead on plate 용접 시 잔류응력 분포

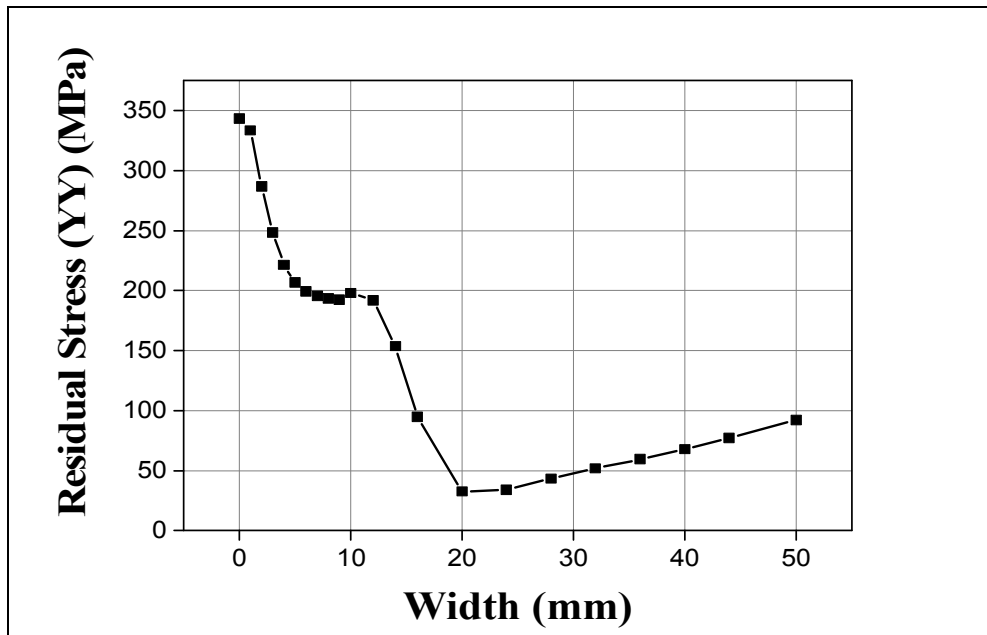


Fig 4.4 Bead on plate 용접 시 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력

Fig 4.3을 통하여 용접 후 재료에 남아 있는 전체적인 잔류응력의 분포를 알 수 있다. 또한 잔류응력은 용접 시단부와 종단부에서 가장 큰 잔류응력이 발생되었다.

현재 Fig4.4는 재료의 세로와 가로의 중앙인 Node 5804에서 측정한 데이터로 용접부로부터 재료의 폭 방향의 잔류응력을 측정한 것이다.

잔류응력은 용접부에서 343.3MPa의 가장 큰 인장 잔류응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 폭의 거리에 걸쳐서 모든 값이 인장 잔류응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

## 4.2 Heat sink welding 해석 결과

본 절에서는 용접 시 발생하는 용접 변형과 잔류응력을 저감시키기 위하여 Heat sink welding을 3차원 비정상 열전도 유한요소 해석 프로그램을 통하여 해석하였다. 용접에 의하여 발생하는 변형의 정도를 확인하기 위하여 면외 변형량을 Table 3.5에 따른 조건을 구성하여 각각 확인하였으며, 변형이 최소가 되는 최적 조건을 도출하기 위하여 다양한 조건으로 해석을 실시하였다. 또한 각 조건에 따른 잔류응력을 측정하여 잔류응력이 발생하는 경향과 저감시키는 방법에 대하여 고찰해 보기로 하였다.

## 4.2.1 Heat sink welding 면외 변형량 및 잔류응력 해석

### 1) 면외 변형량 해석

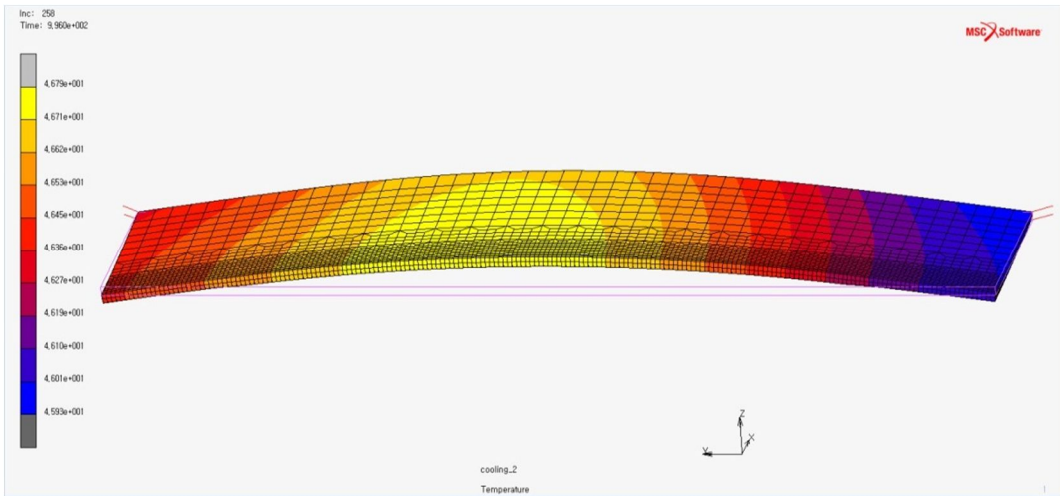


Fig 4.5 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 1mm 일 때의 면외 변형

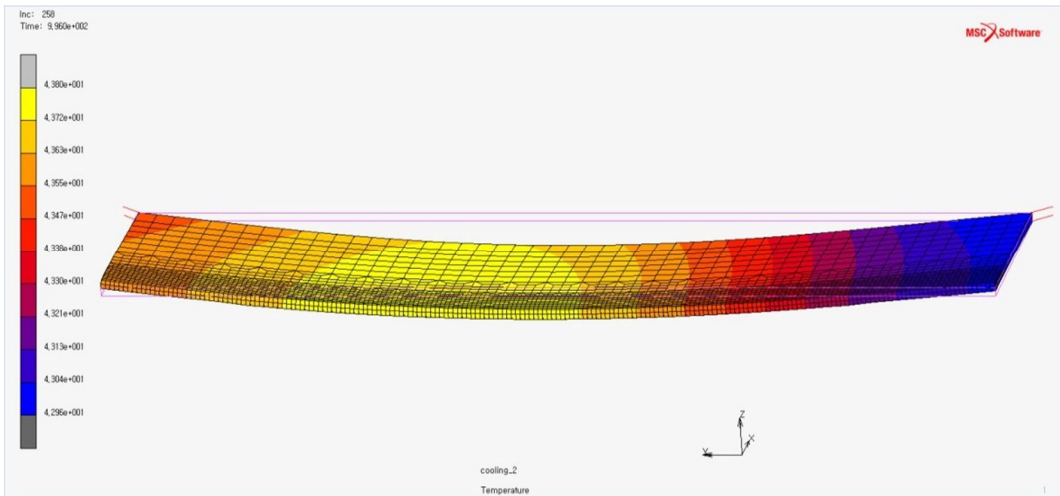


Fig 4.6 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 3mm 일 때의 면외 변형

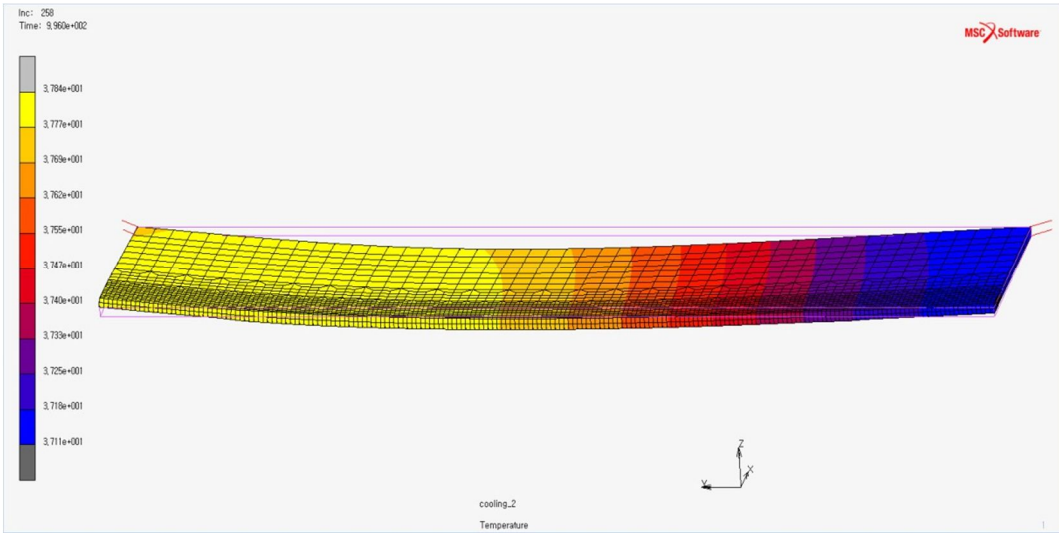


Fig 4.7 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 6mm 일 때의 면외 변형

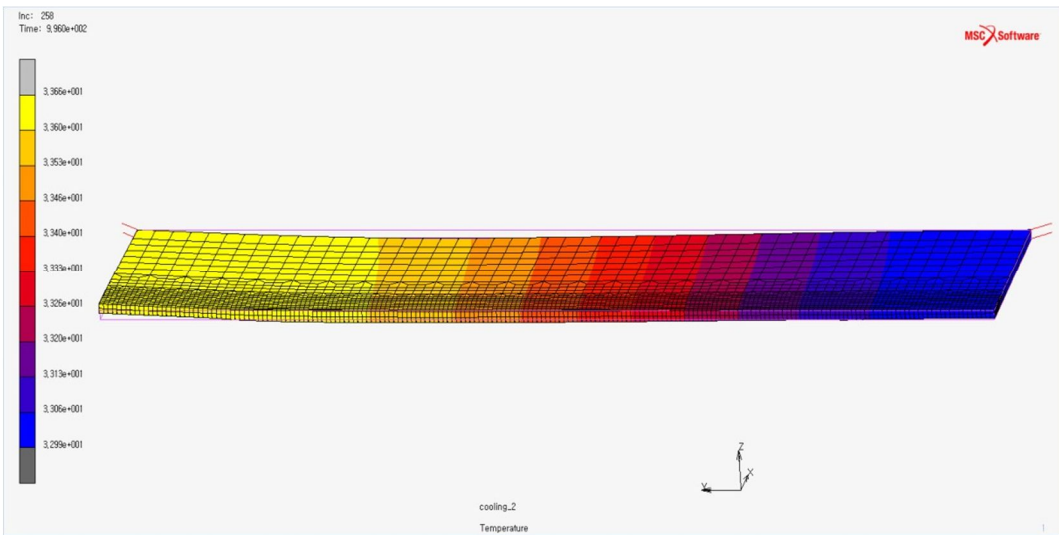


Fig 4.8 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 9mm 일 때의 면외 변형

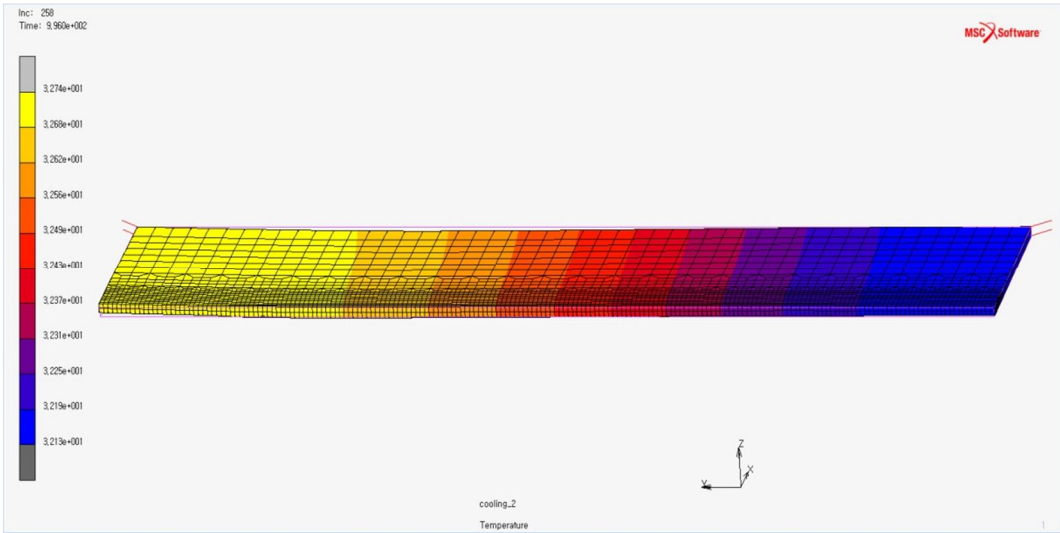


Fig 4.9 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 10mm 일 때의 면외 변형

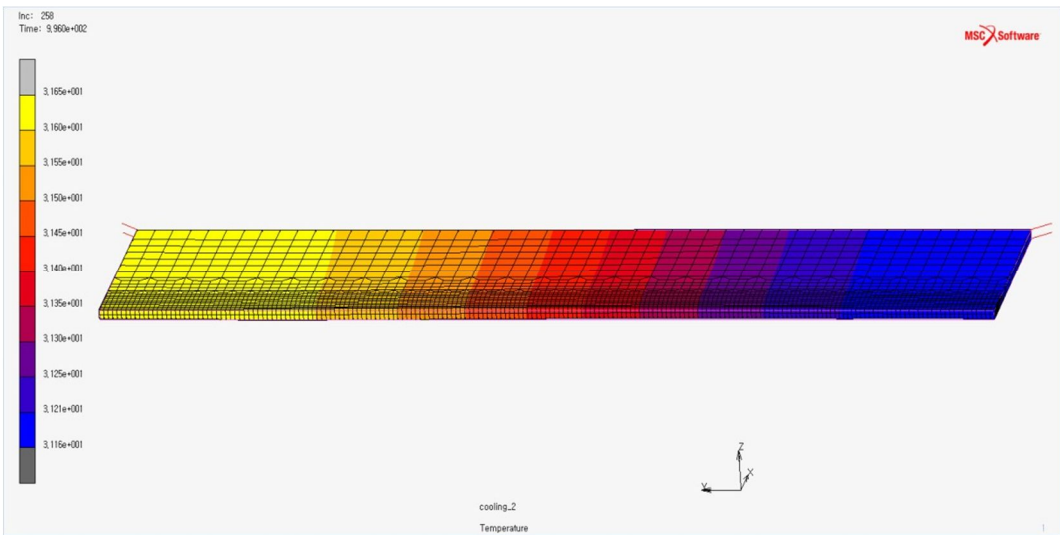


Fig 4.10 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 12mm 일 때의 면외 변형



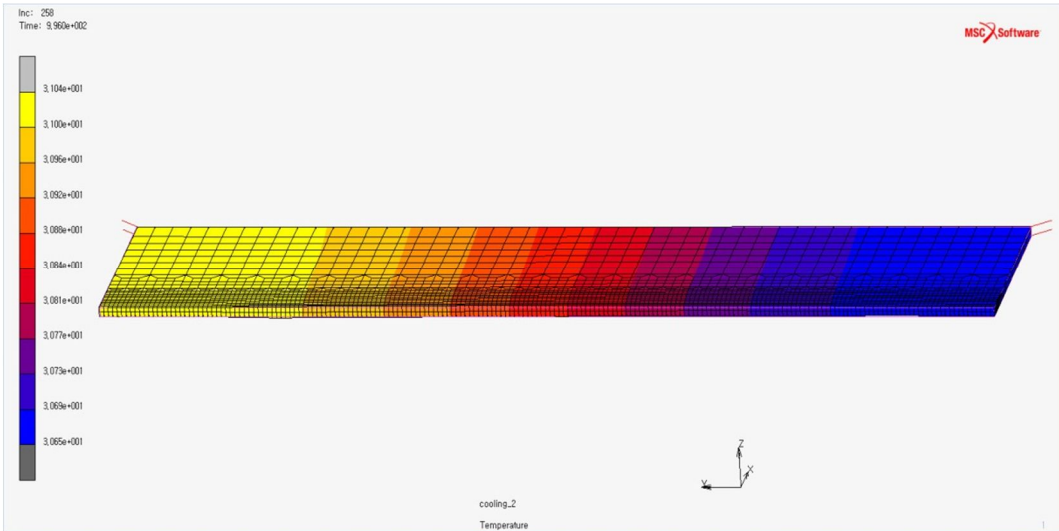


Fig 4.11 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형

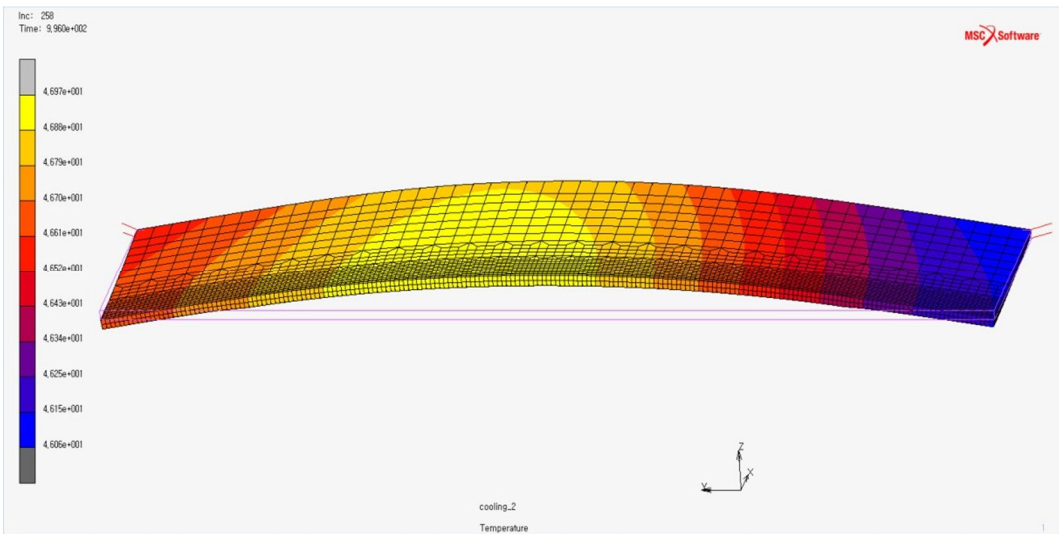


Fig 4.12 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 1mm 일 때의 면외 변형

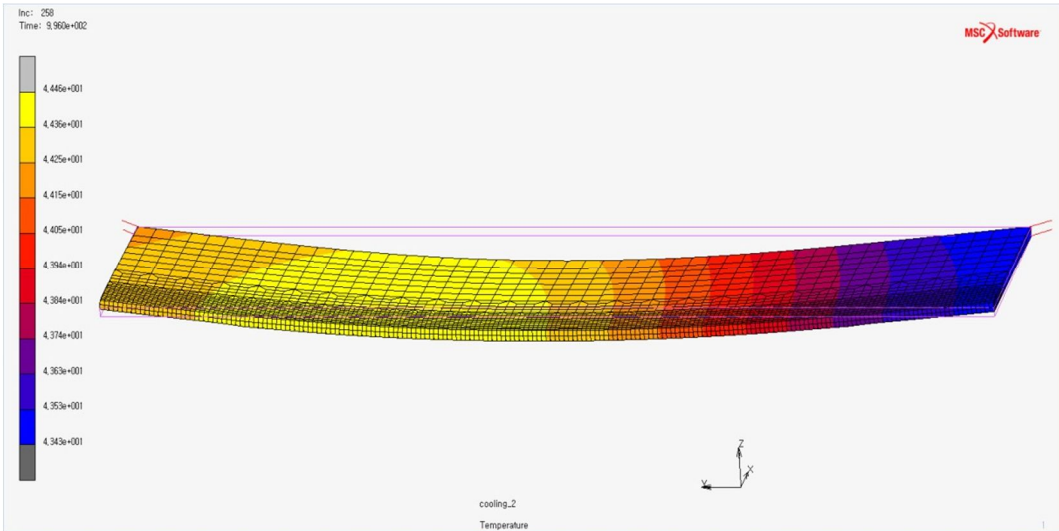


Fig 4.13 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 3mm 일 때의 면외 변형

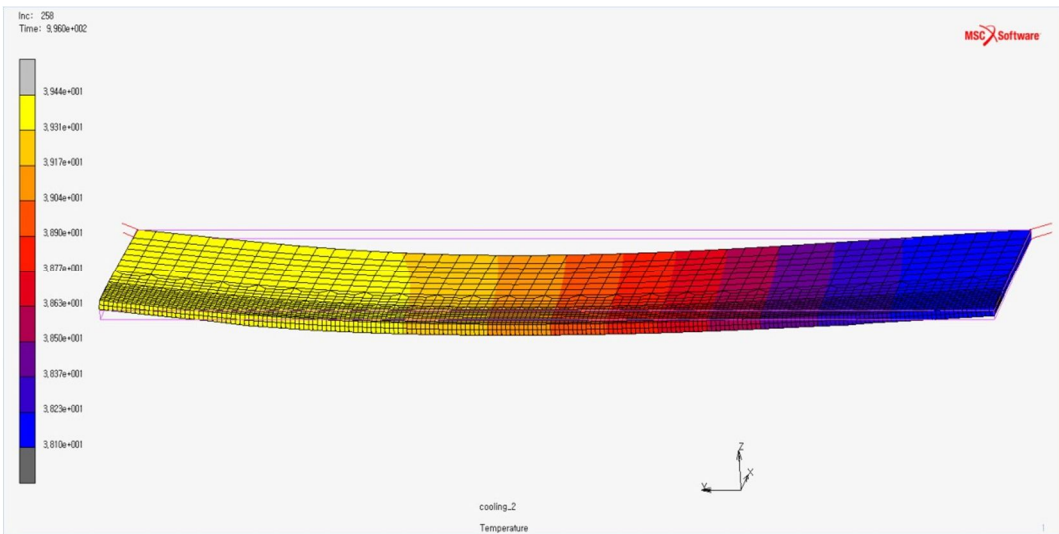


Fig 4.14 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 6mm 일 때의 면외 변형

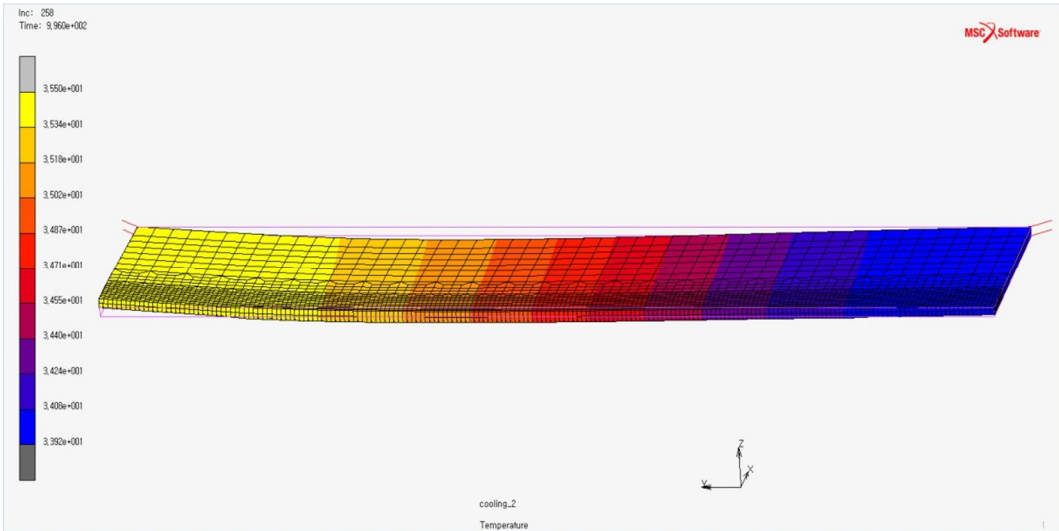


Fig 4.15 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 9mm 일 때의 면외 변형

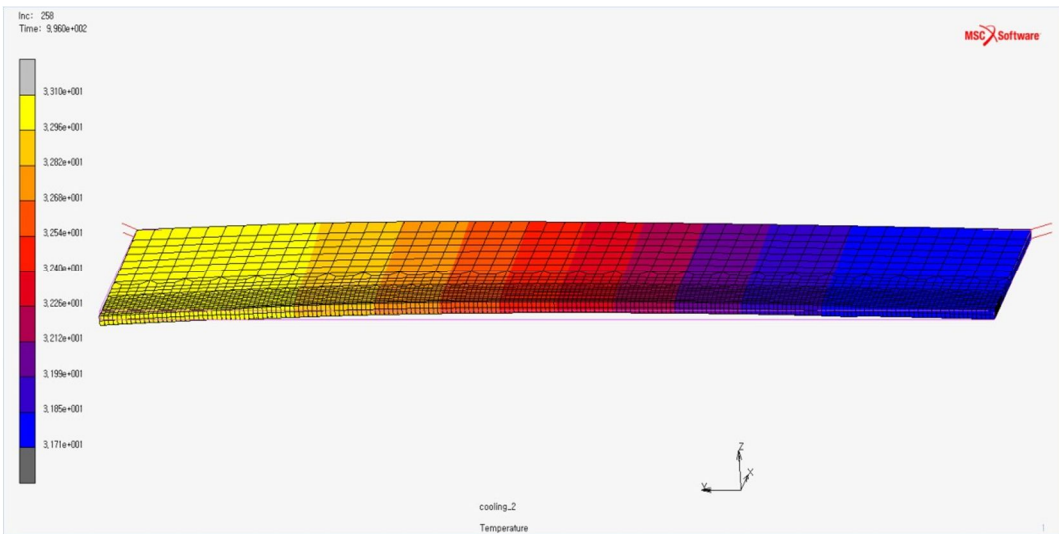


Fig 4.16 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 12mm 일 때의 면외 변형

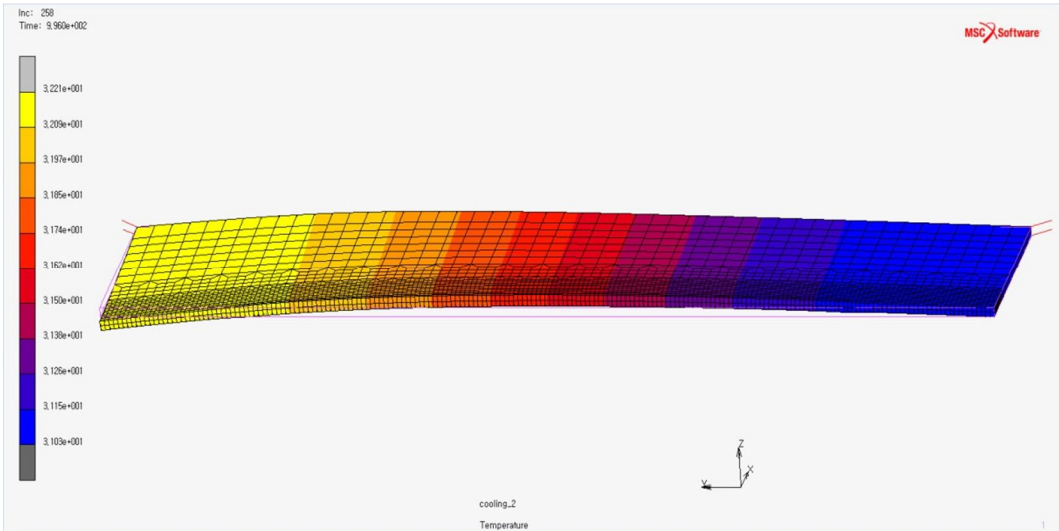


Fig 4.17 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형

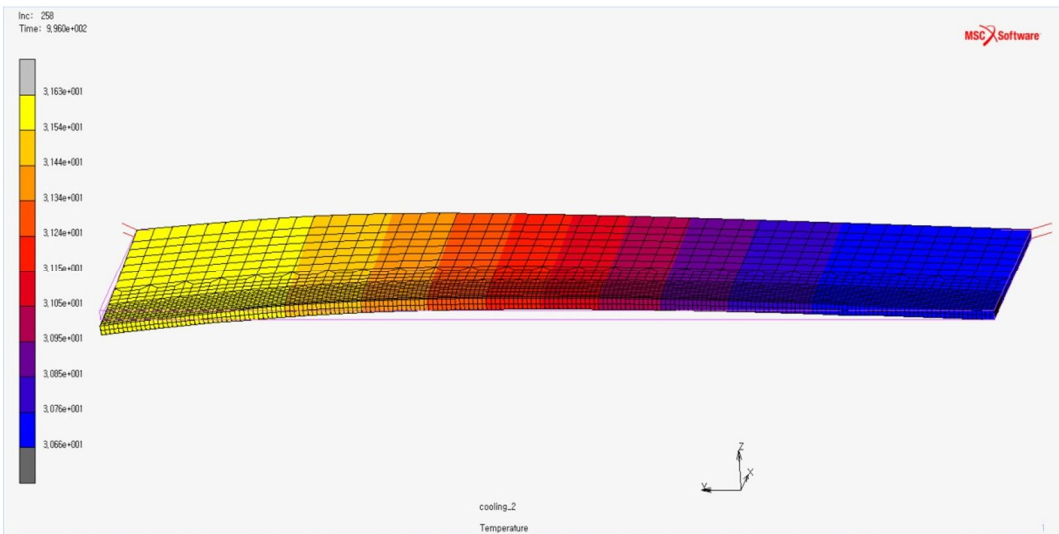


Fig 4.18 냉각부 온도 30°C, 이격거리 30mm, 반경 16mm 일 때의 면외 변형

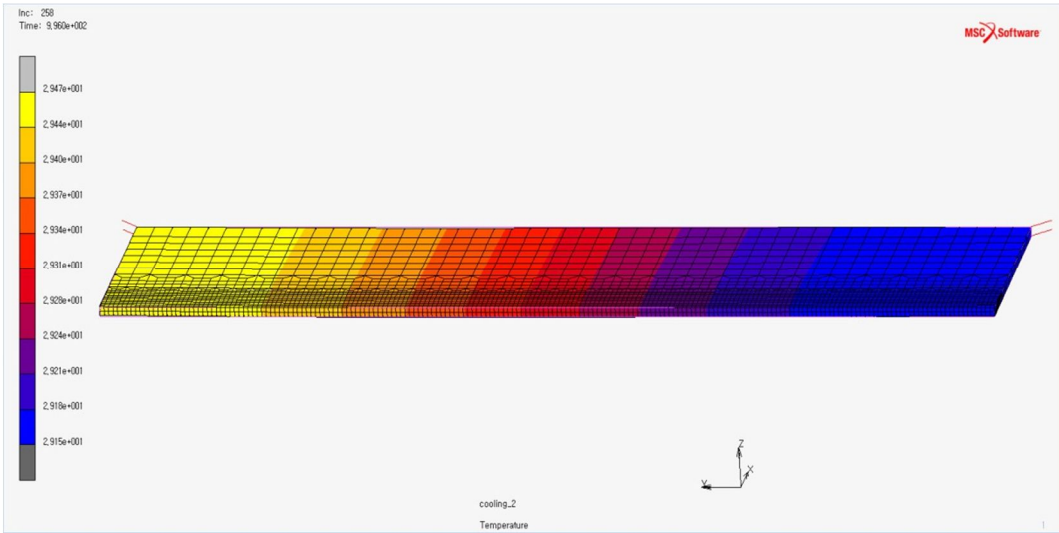


Fig 4.19 냉각부 온도 20°C, 이격거리 20mm, 반경 14mm 일 때의 면외 변형

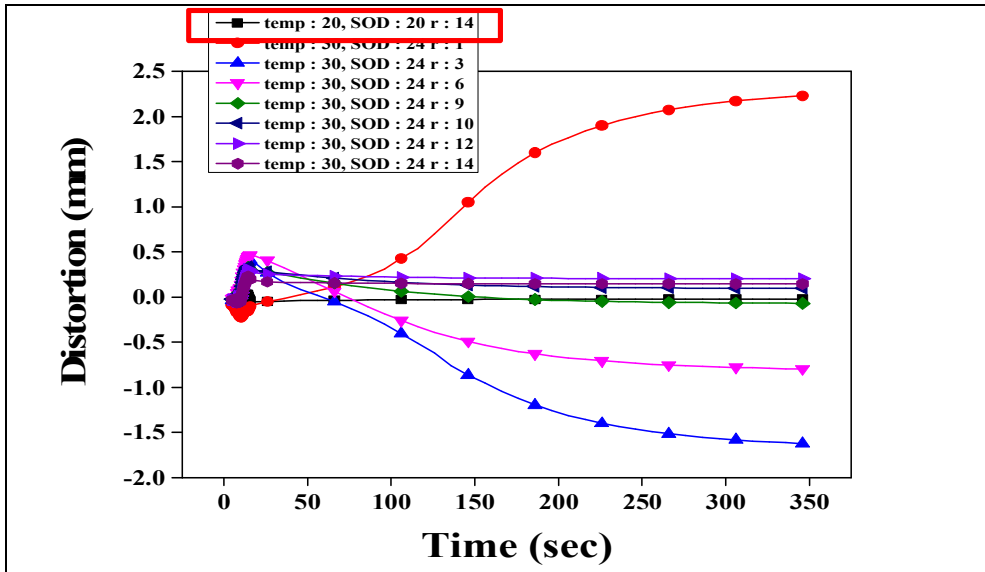


Fig 4.20 각 조건별 HSW 시 시간에 따른 면외 변형량(1)

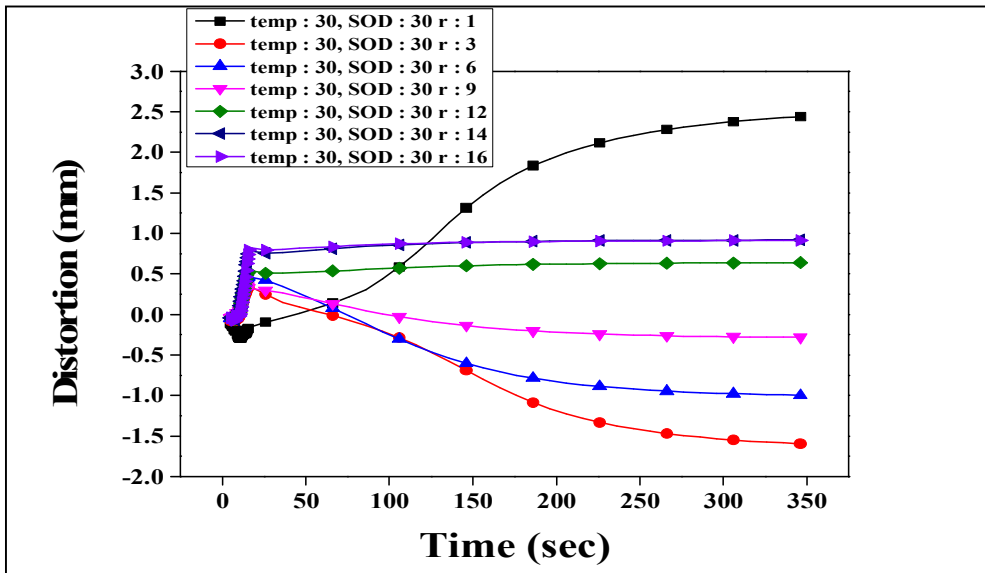


Fig 4.21 각 조건별 HSW 시 시간에 따른 면외 변형량(2)

Fig 4.5 부터 Fig 4.19 까지 Heat sink welding 시 면외 변형을 측정 한 결과를 나타내었다. 각 조건에 따라 면외 변형이 위쪽 부분으로 변형된 조건도 나타났으며 아래쪽 부분으로 변형된 조건도 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig 4.20 과 Fig 4.21 을 보면 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리가 30mm 일 때보다 24mm 일 때 보편적으로 변형이 적은 결과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 냉각 열원의 반경이 1~6mm 일 때보다 9~16mm 일 때 더욱 적게 변형이 나타나는 경향을 확인할 수 있었다.

Fig 4.20 와 Fig 4.21 에서 각 조건에 따른 면외 변형량을 확인한 결과, 냉각부 온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm 에서 최적 조건을 도출할 수 있었으며, 그때의 면외 변형량은 0.026647mm 로 확인되었다.

2) 잔류응력 해석

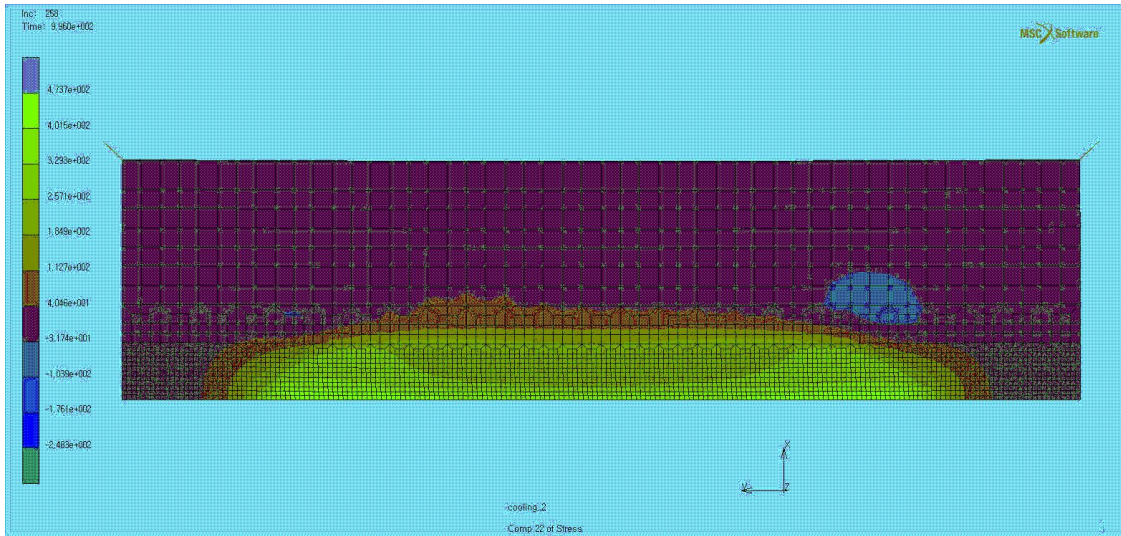


Fig 4.22 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 1mm 일 때의 잔류응력

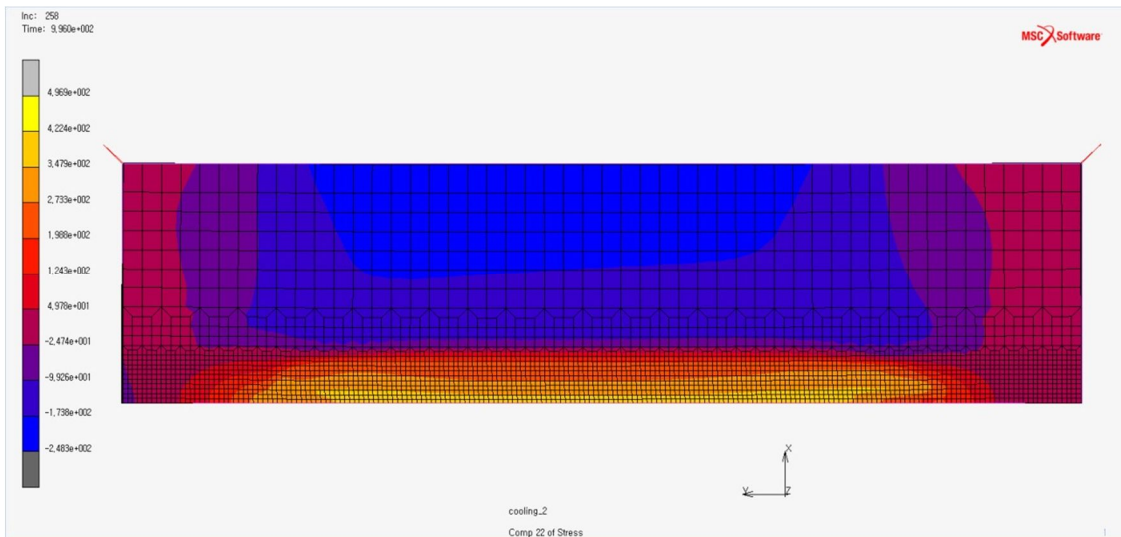


Fig 4.23 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 3mm 일 때의 잔류응력



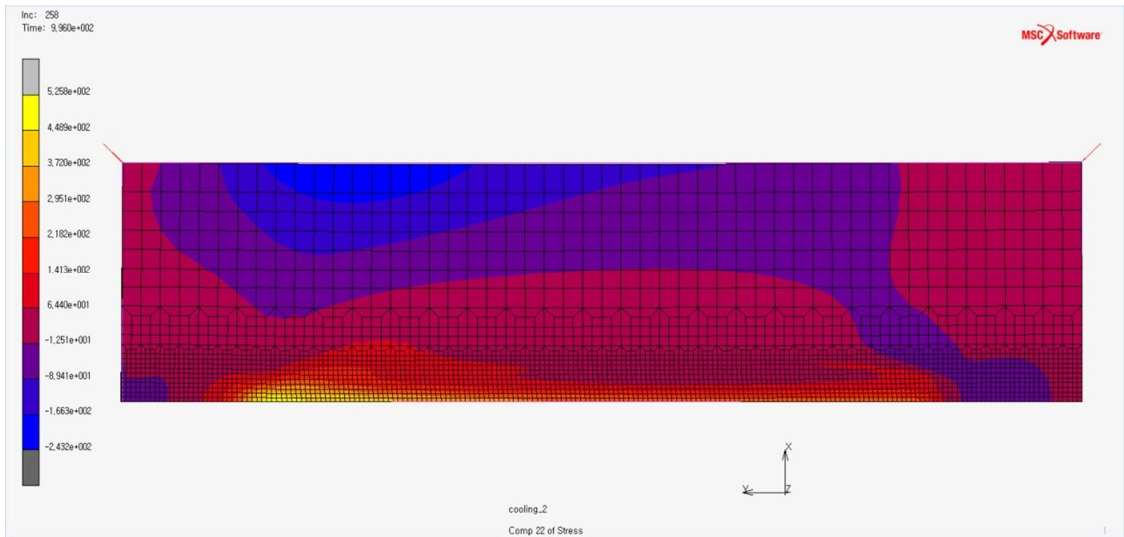


Fig 4.24 냉각부 온도 20°C, 이격거리 20mm, 반경 14mm 일 때의 잔류응력

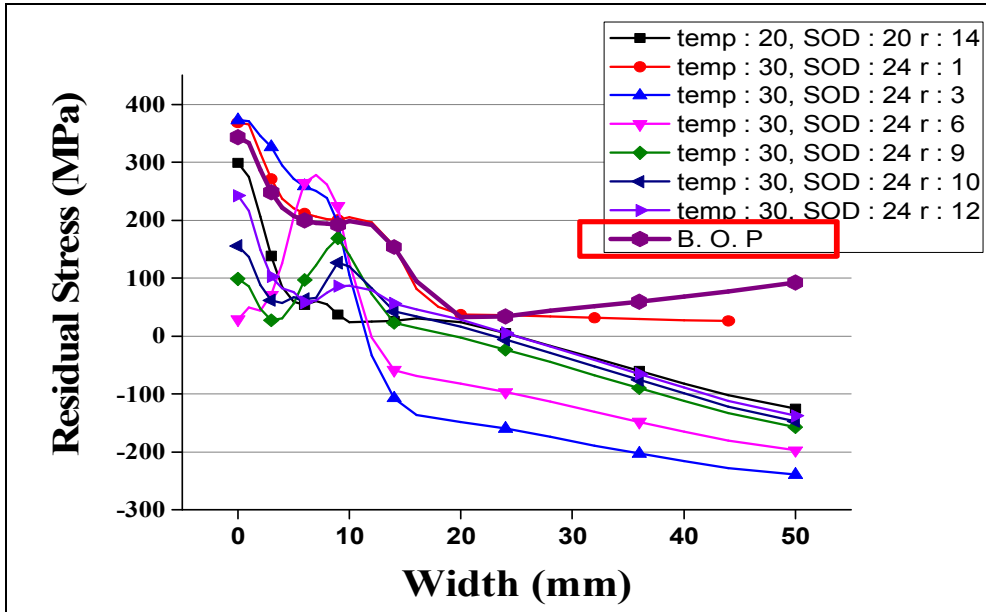


Fig 4.25 각 조건별 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력(1)

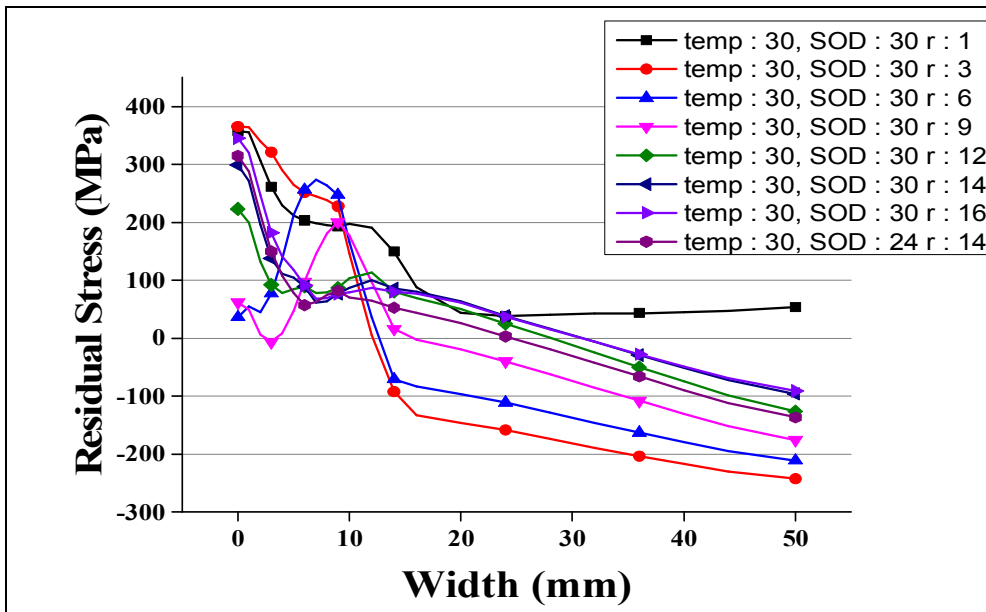


Fig 4.26 각 조건별 용접부에서의 거리에 따른 잔류응력(2)

Fig 4.22 부터 Fig 4.24 는 Heat sink welding 시 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 1mm 일 때와 냉각부 온도 30°C, 이격거리 24mm, 반경 3mm 일 때, 냉각부 온도 20°C, 이격거리 20mm, 반경 14mm 일 때의 잔류응력 분포를 나타내는 결과이다. 용접 시단부와 용접 종단부에서 잔류응력이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 용접부에서도 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig 4.25 과 Fig 4.26 은 각 조건에 따른 잔류응력 측정값을 나타내는 것으로 모두 용접부에서 인장 잔류응력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 Bead on plate 용접 시에는 용접부에서 거리가 떨어진 부분에서도 인장 잔류응력이 존재하였으나 Heat sink welding 시에는 일정 거리가 떨어진 부분에서는 인장 잔류응력이 압축잔류응력으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 인장 잔류응력과 압축 잔류응력이 균형을 이루는 상태로 이런 경향을 통하여 Bead on plate 용접 시보다 Heat sink welding 시 잔류응력이 완화되었다고 생각할 수 있다.

### 4.3 결과 요약

본 절에서는 Bead on plate 용접 시 발생하는 용접 변형과 잔류응력 및 열 이력 등의 결과와 Heat sink welding 시 발생하는 용접 변형과 잔류응력 및 열 이력을 비교하여 기존 용접 대비 Heat sink welding 시 나타나는 현상을 비교하고자 한다. 비교하는 대상은 Bead on plate 용접과 Heat sink welding 시 최적 조건인 냉각온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm의 조건을 비교하였으며 그에 따라 어느 정도 용접 변형과 잔류응력이 저감 또는 완화되었는지 확인하였다.

#### 1) Bead on plate 용접과 최적조건 HSW 면외 변형 비교

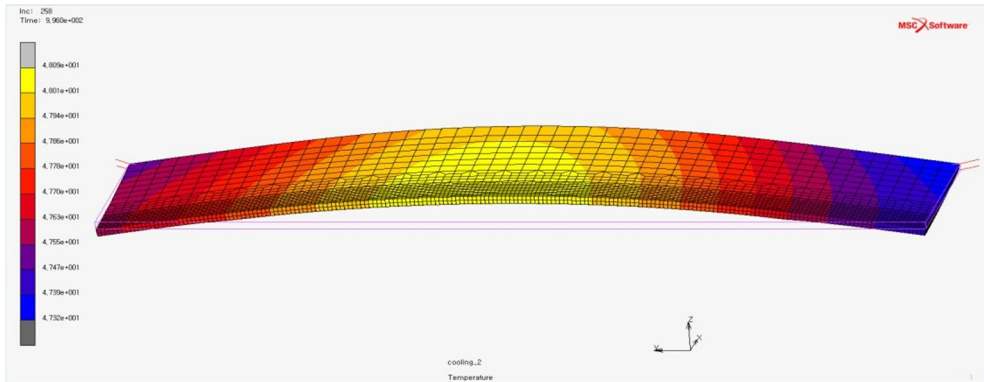


Fig 4.27 Bead on plate 용접 시 면외 변형

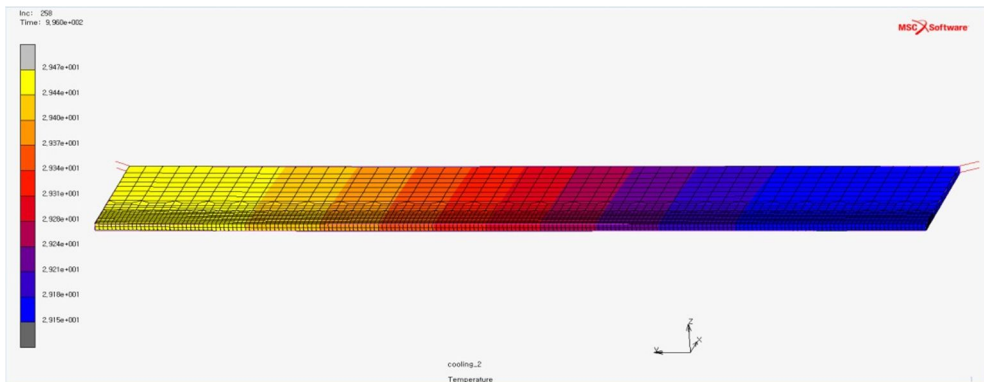


Fig 4.28 최적 조건 HSW 시 면외 변형

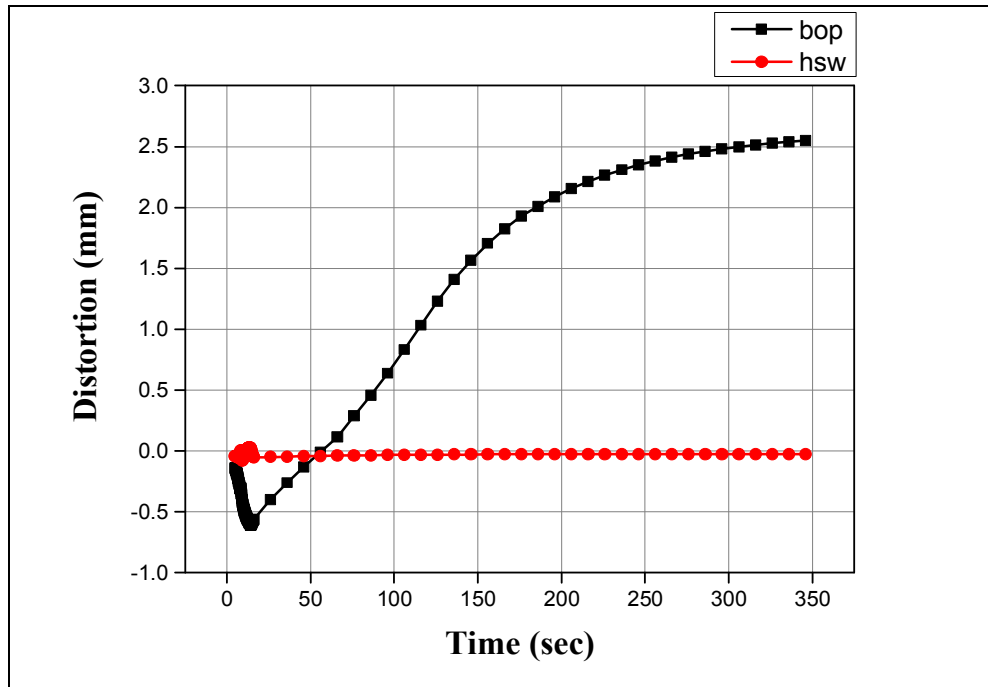


Fig 4.29 Bead on plate 용접과 최적 조건 HSW 시 면외 변형량 비교

Bead on plate 용접 시 최대 면외 변형량은 2.6483mm 로 확인되었으며 조건이 냉각부 온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm 인 Heat sink welding 시 최대 면외 변형량은 0.026647mm 로 확인 되었다. 이 결과값을 통하여 약 99% 변형이 저감된 것을 확인할 수 있었다.

2) Bead on plate 용접과 최적조건 HSW 잔류응력 비교

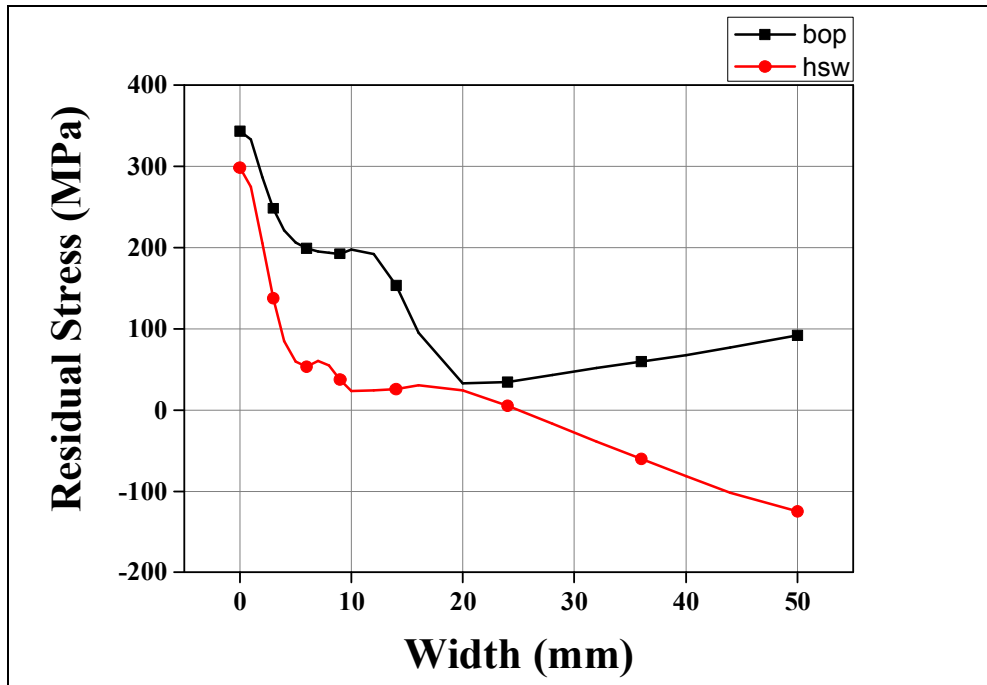


Fig 4.30 Bead on plate 용접과 최적 조건 HSW 시 잔류응력 비교

Bead on plate 용접과 Heat sink welding 의 잔류응력을 비교하였을 때 두 경우 모두 용접부에서 잔류응력이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 전체적인 경향에서 Bead on plate 용접에 비하여 Heat sink welding 이 잔류응력이 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 특히 Bead on plate 용접 시에는 용접부에서 거리가 떨어진 부분에서도 인장 잔류응력이 존재하였으나 Heat sink welding 시에는 용접부로부터 25mm 떨어진 거리부터는 인장 잔류응력이 압축잔류응력으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 인장 잔류응력과 압축 잔류응력이 균형을 이루는 상태로 인장 응력이 분포하고 있는 부분의 면적과 압축 응력이 분포하고 있는 부분의 면적이 거의 동일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 시편 내부에서 인장과 압축이 평형을 이루고 있다는 것을 의미하며 변형이 최소화된 상태의 내부 역학적 상태를 보여주고 있다.

3) Bead on plate 용접과 최적조건 Heat sink welding 온도 이력 비교

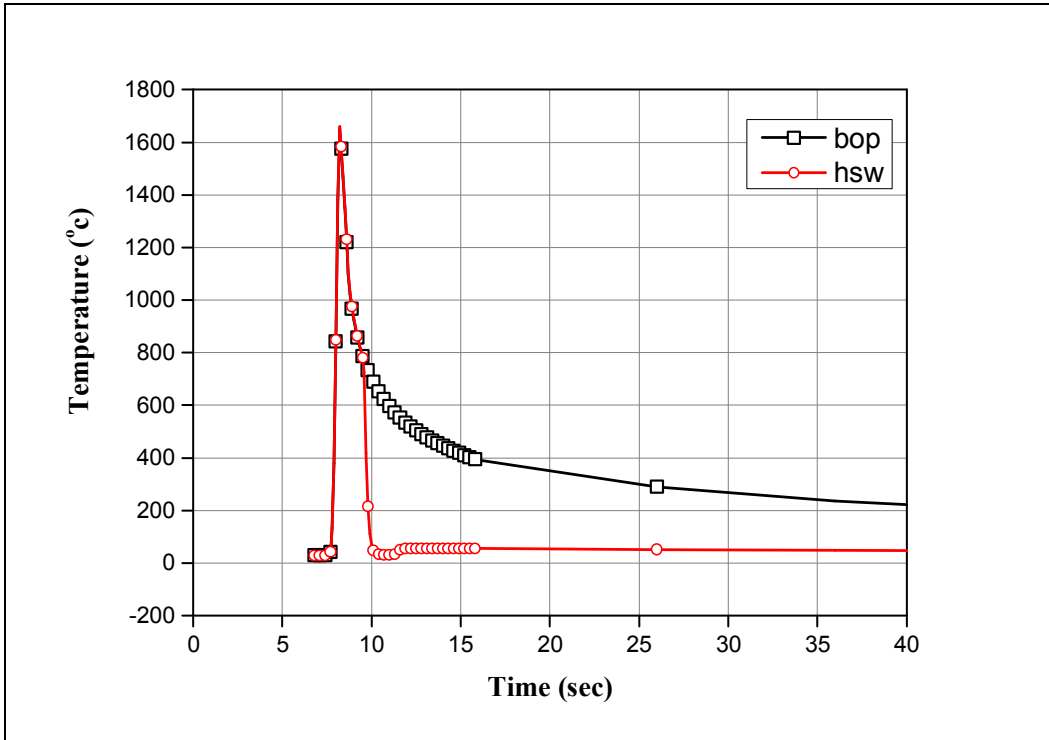


Fig 4.31 BOP 용접과 최적 조건 HSW 시 시간에 따른 온도 이력 비교

Fig 4.31 은 Bead on plate 용접과 냉각부 온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm 인 조건의 Heat sink welding 의 온도 이력을 측정 한 그림이다. 측정 위치는 재료의 가장 중앙에 위치한 node 5804 에서 측정 하였으며 용접 시작부터 용접이 끝날 때까지의 온도 이력을 측정 하였다.

일반적으로 Cr 을 15~70% 함유한 Fe-Cr 계 스테인레스강은 400°C~500°C 구간에서 장시간 유지하면 경도가 급격하게 증가하는 반면에 연성은 급격하게 감소를 일으키는 열시효 취화(Thermal aging embrittlement) 현상을 일으킨다. 또한 용접에 의해 500°C~800°C 정도로 가열된 후 이 온도 역에서 서냉하게 되면 HAZ 입계에 Cr 탄화물이 석출하게 되어 입계 예민화 현상이 나타나 내식성을 떨어트리게 된다.

Fig 4.31 에서 보면 알 수 있듯이 Bead on plate 용접에 비하여 Heat sink welding 은 약 10 초 정도에 약 30°C 로 온도가 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수

있다. 이를 통하여 400°C~500°C 구간에서 발생하는 취화 현상을 방지할 수 있으며 연성이 감소되는 것을 방지할 수 있다. 또한 500°C~800°C 구간에서 발생하는 입계 예민화를 감소하는 유리한 역할로 작용한다고 생각된다.



## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 용접 공정 중에 실시간으로 냉각 열원을 적용할 경우 최종 용접 변형과 잔류응력의 변화를 기존 용접 공정과 비교하여 용접 변형 발생이 적고 잔류응력이 완화되는 최적 용접 공정 조건이 존재하는지 평가하고자 하였다.

이를 위해 유한요소 해석(FEM)을 수행하여 여러 가지 각 조건에 따른 용접 변형과 잔류응력을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접 변형의 해석 결과 Bead on plate 용접에서는 최대 2.6483mm의 면외 변형이 발생하였으나 냉각온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm인 Heat sink welding 시 최대 면외 변형량이 0.026647mm가 발생되었다. 이는 Bead on plate 용접 대비 약 99% 변형이 감소된 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 용접 잔류응력의 해석 결과 Bead on plate 용접 대비 냉각온도 20°C, 용접 열원과 냉각 열원과의 이격 거리 20mm, 냉각 열원의 반경 14mm인 Heat sink welding 시 전체적으로 잔류응력이 낮아진 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 연구 목적과는 별개로 용접부의 온도를 급격하게 떨어트린 결과, 스텐인레스의 400°C~500°C 구간에서 발생하는 취화 현상을 방지할 수 있을 것이라고 예상이 되며, 500°C~800°C 구간에서 발생하는 입계 예민화를 방지하여 이를 통하여 내식성이 감소되는 것을 방지할 수 있을 것이라고 예상된다.

- 4) 수치해석적 방법을 통하여 용접 변형과 용접잔류응력이 저감된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결론을 기반으로 실험적인 방법을 통한 실측에서도 용접 변형과 용접 잔류응력이 저감되는지에 대하여 추후에 실험을 통한 검증이 필요하다.
  
- 5) 연구 결과 용접 공정 중에 용접 열원 후방에 냉각 열원을 적용함으로써 용접 변형이 발생하지 않는 최적 조건이 존재함을 확인하였다.  
실제 현장에 적용할 경우 지그를 사용하여도 발생하는 박판의 좌굴 변형 방지에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.  
또한 현장에서 용접 지그를 사용하지 않아도 충분한 변형 저감 효과를 얻을 수 있으며 추가적인 공정 비용의 저감도 기대된다.

## 참고 문헌

- 1) J.B. Go : STS304 TIG 용접 시 발생하는 잔류응력과 열응력 해석에 관한 연구, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 2008.10, Vol.17 No.5, pp1-9
- 2) Korea Institute of Nuclear Safety : 용접잔류응력에 따른 기기 건정성 평가 동향 연구 보고서, 2013
- 3) H.S. Bang : 용접부의 강도 및 변형, 대한용접·접합학회, 1995, pp211-237
- 4) H.S. Bang : 平板熔接에 關한 平面變形 熱彈塑性 解析, 한국해양공학회, 1994, Vol.8 No.1, pp33-40
- 5) K.S. Lee : 구조용 탄소강과 오스테나이트 스테인리스강 이종용접부의 용접 잔류응력 평가, 충북 대학교, 박사, 2011
- 6) N Bagshaw: Numerical simulation and experimental validation of low stress no distortion(LSND) welding in 304 stainless steel, The Welding Institute, 2003.11, 780
- 7) N Bagshaw : Low stress no distortion(LSND) welding in 304 stainless steel, The Welding Institute, 2004.11, 813
- 8) S. k. Kang : 용접 변형 연구 동향, Journal of KWJS, 2012, Vol.30 No.2, pp141-146
- 9) H.S. Bang : 극후판 Box Column 코너이음부의 용접잔류응력 및 Groove형상 특성에 관한 연구, 대한용접학회, 1999, Vol.17, pp97-103
- 10) W.R. Lee : 레이저를 이용한 용접 공정에서 잔류응력의 저감 방안에 관한 연구, 서울 과학 기술 대학교, 공학박사, 2014
- 11) S.M. Joo : 수치 Simulation에 의한 저항점용접부의 역학적 거동에 관한 연구 , 대한용접학회, 1998, Vol.1, pp91-95
- 12) Y.W. Qian : Influence of PWHT on the Residual Stress in Under-Matching Welded Joint, Procedia Engineering, 2015, Vol.130, pp966-972
- 13) Tapas Bajpei : Mitigation of residual stresses and distortions in thin aluminium alloy GMAW plates using different heat sink models, Journal of

- Manufacturing Processes, 2016.04, Vol.22, pp199-210
- 14) Roger O' Brien : The development of an industrial robotic low stress no distortion(LSND) welding system, International Institute of Welding, 2014.04, pp164-170
- 15) H.S. Bang : 수치시뮬레이션에 의한 박판 용접 변형 예측에 관한 기초적 연구, 대한용접·접합학회, 2003, Vol.21 No.1, pp93-98
- 16) H.S. Bang : 유한요소법에 의한 평판의 용접 변형에 관한 기초적 연구, 한국해양공학회, 1997, Vol.11 No.4, pp1-6
- 17) J.S. Lee : “유한요소법 입문” , 동명사, 1985