



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](#)

공학박사 학위논문

다중선상가열에 의한
강판의 열변형 특성에 관한 연구
A study on the thermal deformation
characteristics of steel plates due to
multi-line heating

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
이 상 훈

다중선상가열을 이용한
가열선 자동산출에 대한 연구

지도교수 서형석, 이주성


이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2022년 7월


울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
이상훈


이상훈의 공학박사학위 논문을 인준함

심사위원 유 정 수 

심사위원 오 민 재 

심사위원 장 호 윤 

심사위원 정 효 석 

심사위원 서 형 석 

울산대학교 대학원

2022년 7월

다중선상가열에 의한 강판의 열변형 특성에 관한 연구

이 상 훈

울산대학교대학원 조선및해양공학과

국문 요약

곡가공 공정(plate forming process)은 선박의 건조과정에서 가장 중요한 공정 중 하나임에도 불구하고 다른 공정에 비해 자동화가 이루어 지지 않고 있고, 아직까지도 숙련된 작업자의 경험과 기술에 전적으로 의존하고 있는 실정이다.

본 공정은 전형적인 3D 공정 (dirty, dangerous & difficulty) 으로서, 숙련된 작업자의 확보에 어려움이 예상되고 또한 본 공정의 생산성을 대폭 향상시키기 위해 기계화 내지는 자동화 시스템 구축이 시급하다.

기계화 내지는 자동화를 위해서는 가열선 정보를 정확하게 제공할 수 있는 시스템이 필수적이며 이를 위해 가열에 의한 변형을 정도 높게 예측하는 기술의 확보가 필요하고, 특히, 기계화 또는 자동화 장비의 생산성을 확보하기 위해서는 2개 이상의 가열선 (Multi-heating line)을 동시에 가열했을 때의 변형 결과를 정확하게 예측하는 기술의 확보가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 고효율의 곡가공 자동화 장치 개발을 위해 Multi-heating에 따른 변형의 특성을 분석하고 이를 통해 변형량을 정도 높게 예측할 수 있는 기술을 개발하는 데에 연구의 목적이 있다.

연구는 열원이 Gas torch인 Single 가열선에 대한 선상가열 실험 (1차 실험)과 열탄소성 해석을 수행하여 실험에서 사용한 토치의 열원 특성을 정의하고, Multi-line heating에 대한 실험 (2차 실험) 및 열탄소성 해석시 입열모델을 실시하여, Multi-line heating시 가열선 사이의 거리 (토치 사이의 거리), 판 두께 및 가열속도의 변화에 대한 Case study 및 결과 분석한다. 그리고 Multi-line heating시 횡수축과 각변형에 대한 변형 예측식 개발하여, Multi-line heating시 가열선 사이의 열속간섭이 없는 최소 거리 정의 및 실험을 통한 검증 (3차 실험)하는 순서로 진행한다.

시험은 울산대학교 열변형시험실에서 제작한 장비를 이용하여 실험을 진행하였으며, 토치간 거리, 이동속도, 토치와 강판의 거리를 조정할 수 있는 장비를 이용하여 각변수에 따른 선상가열을 직접 수행하였다.

도출된 결과를 기반으로 선상가열을 통한 목적곡면에 해당되는 가열선을 자동산출할 수 있도록 연구를 진행하였다.

목차

국문요약	i
목차	ii
그림 목차	iv
표 목차	vii
제1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	2
1.3 연구 내용	3
제2장 선상가열의 역학적 특성 및 모델의 이론적 배경	4
2.1 역학적 특성	4
2.2 선상가열 모델의 이론적 배경	5
2.2.1 선상가열 모델	5
2.2.2 열탄소성 해석	7
제3장 Single torch를 이용한 선상가열 실험 및 해석	13
3.1 선상가열실험	13
3.1.1 실험 모델 및 조건	13
3.2 수치해석	16
3.2.1 입열모델	16
3.2.2 열전달해석 및 열탄소성해석	19
3.3 실험과 수치해석의 비교	21
제4장 Multi torch를 이용한 선상가열 실험 및 해석	30
4.1 선상가열실험	30
4.1.1 실험 모델 및 조건	30
4.1.2 실험 결과	31
4.2 수치해석	42

제5장 열변형에 대한 다중선상가열의 영향	47
5.1 다중선상가열에 대한 case study	47
5.2 다중선상가열에 대한 해석결과 검증	59
5.3 Multi torch를 이용한 선상가열시 변형예측식 개발	61
5.4 Multi torch를 이용한 선상가열시 가열선 한계거리	64
제6장 다중선상가열을 이용한 가열선 자동산출	66
6.1 가열선 자동산출	66
제7장 결 론	73
참고문헌	74
Abstract	76

그림 목차

그림 1 동일한 열사이클을 가지는 주요공정	1
그림 2 열간가공을 위한 가열 로봇	2
그림 3 선상가열의 기계적 모델	5
그림 4 삼각가열의 기계적 모델	6
그림 5 열탄소성해석의 흐름도	7
그림 6 연강의 온도에 따른 물성치(열전도율, 비열, 밀도)	8
그림 7 연강의 온도에 따른 물성치(탄성계수, 항복응력, 열팽창계수)	12
그림 8 연강의 변형도 경화 모델	12
그림 9 자동가열장치	14
그림 10 시험편의 가열 이면 열전대 부착	15
그림 11 싱글토치 선상가열 시험	15
그림 12 1차 및 2차 화염 길이 측정	17
그림 13 1차 화염 길이 측정	17
그림 14 이중 가우시안 열원의 형상	19
(a) 3차원 열원모델	18
(b) 열원의 단면 모양의 1/2	19
그림 15 유한요소모델링	20
그림 16 유한요소모델링	23
(a) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$	22
(b) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 400 \text{ mm/min}$	22
(c) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 500 \text{ mm/min}$	23
(d) $t = 19.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$	23
그림 17 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$)	24
(a) 실험 결과	24
(b) 해석 결과	24
그림 18 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 400 \text{ mm/min}$)	25
(a) 실험 결과	25
(b) 해석 결과	25
그림 19 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 500 \text{ mm/min}$)	26
(a) 실험 결과	26
(b) 해석 결과	26
그림 20 변형 형상 비교 ($t = 19.0 \text{ mm}$, $v = 500 \text{ mm/min}$)	27
(a) 실험 결과	27
(b) 해석 결과	27
그림 21 실험과 수치해석의 평균 변형량 비교	29
(a) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$	28

(b) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 400 \text{ mm/min}$	28
(c) $t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 500 \text{ mm/min}$	29
(d) $t = 19.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$	29
그림 22 다중 선상가열 시험조건	30
그림 23 시험편의 가열 이면 열전대 부착	31
그림 24 토치 3개를 이용한 가열선 거리에 따른 시험	32
(a) 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$	32
(b) 가열선 사이의 거리 $d=150\text{mm}$	32
(c) 가열선 사이의 거리 $d=200\text{mm}$	32
그림 25 토치 3개를 이용한 가열선 거리에 따른 시험	33
(a) Before heating	33
(b) After heating	33
그림 26 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=100\text{mm}$	34
그림 27 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=100\text{mm}$	35
그림 28 각 열전대의 최고온도 : $d=100\text{mm}$	35
그림 29 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=150\text{mm}$	36
그림 30 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=150\text{mm}$	37
그림 31 각 열전대의 최고온도 : $d=150\text{mm}$	37
그림 32 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=200\text{mm}$	38
그림 33 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=200\text{mm}$	39
그림 34 각 열전대의 최고온도 : $d=200\text{mm}$	39
그림 35 가열선 거리에 따른 변형 형상	41
(a) $d=100\text{mm}$	41
(b) $d=150\text{mm}$	41
(c) $d=200\text{mm}$	41
그림 36 다중선상가열의 입열모델 비교((좌)비중첩열원, (우)중첩열원)	43
그림 37 입열모델에 따른 다중선상가열시 실험과 수치해석의 최고온도 비교	44
그림 38 입열모델에 따른 다중선상가열시 실험과 수치해석의 변형 형상 비교	45
그림 39 2개의 입열모델에 따른 각변형 비교	46
(a) Non-overlap model	46
(b) Overlap model	46
그림 40 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 각변형	52
(a) $t = 13 \text{ mm}$	51
(b) $t = 16 \text{ mm}$	51
(c) $t = 19 \text{ mm}$	52
그림 41 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 횡수축	53
(a) $t = 13 \text{ mm}$	52

(b) $t = 16 \text{ mm}$	53
(c) $t = 19 \text{ mm}$	53
그림 42 H2 또는 H3(그림 25) 위치의 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 각변형	55
(a) $t = 13 \text{ mm}$	54
(b) $t = 16 \text{ mm}$	54
(c) $t = 19 \text{ mm}$	55
그림 43 H2 또는 H3(그림 25) 위치의 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 횡수축	56
(a) $t = 13 \text{ mm}$	55
(b) $t = 16 \text{ mm}$	56
(c) $t = 19 \text{ mm}$	56
그림 44 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 판두께에 따른 각변형	57
(a) $v = 400 \text{ mm/min}$	57
(b) $v = 500 \text{ mm/min}$	57
그림 45 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 판두께에 따른 각변형	58
(a) $v = 400 \text{ mm/min}$	58
(b) $v = 500 \text{ mm/min}$	58
그림 46 두 개의 토치를 이용한 400mm 토치거리 실험	59
그림 47 400mm 토치 거리에 대한 실험과 수치해석의 각변형 비교	60
그림 48 횡수축에 대한 실험 및 수치해석 결과와 식(12)의 비교	63
그림 49 각변형에 대한 실험 및 수치해석 결과와 식(14)의 비교	63
그림 50 토치간 간섭이 없는 한계거리의 정의	65
그림 51 3차원 비틈형 대상 곡면	66
그림 52 대상곡면의 전개도	66
그림 53 냉간가공 정보	67
그림 54 토치 1개를 사용한 가열선 15개 산출 결과	67
그림 55 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 1개 사용)	67
그림 56 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 1개 사용)	68
그림 57 토치 2개를 동시 사용한 가열선 12개 산출 결과	68
그림 58 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 2개 동시사용)	68
그림 59 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 2개 동시사용)	69
그림 60 토치 3개를 동시사용한 가열선 12개 산출 결과	69
그림 61 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 3개 동시사용)	70
그림 62 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 3개 동시사용)	70
그림 63 토치 4개를 동시사용한 가열선 10개 산출 결과	71
그림 64 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 4개 동시사용)	71
그림 65 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 4개 동시사용)	71

표 목차

표 1 선상가열과 삼각가열의 비교	5
표 2 선상가열 실험조건	14
표 3 싱글토치를 이용한 선상가열 실험조건	16
표 4 가우시안 열원모델의 인자 정의	18
표 5 싱글토치의 실험과 수치해석의 각변형 비교	21
표 6 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$)	34
표 7 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=150\text{mm}$)	36
표 8 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=200\text{mm}$)	38
표 9 Case study 모델	48
표 10 다중선상가열 수치해석의 각변형 결과, ϕ (unit : radian)	48
(a) In case that heating line is interfaced by two sides	48
(b) In case that heating line is interfaced by one sides	49
표 11 다중선상가열 수치해석의 횡수축 결과, S/t	50
(a) In case that heating line is interfaced by two sides	50
(b) In case that heating line is interfaced by one sides	50
표 12 판 두께와 가열속도에 대한 토치사이의 한계거리	65
표 13 동시가열 토치 수에 따른 공정단계 비교	72

제1장 서론

1.1 연구 배경

선박의 건조과정에서 입열 후 최고온도에 도달하고 급냉을 하게 되는 동일한 열사이클을 가지는 중요한 3 요소가 있는데, 이는 절단(Cutting), 굽힘(Bending) 또는 공가공(Plate forming), 그리고 용접(Welding)이다.

곡가공 공정(plate forming process)은 선박의 건조과정에서 가장 중요한 공정 중 하나으로써 일부 자동화가 진행되고 있으나, 다른 공정에 비해 자동화가 늦어지고 있는 실정이며, 주로 숙련된 작업자의 경험과 기술에 의존하고 있는 실정이다.

본 공정은 전형적인 3D 공정 (dirty, dangerous & difficulty) 으로서, 숙련된 작업자의 확보에 어려움이 예상되고 또한 본 공정의 생산성을 대폭 향상시키기 위해 기계화 내지는 자동화 시스템 구축 및 활성화가 시급하다.



(a) 자동화 절단 공정



(b) 자동화 용접 공정



(c) 곡가공 공정

그림 1 동일한 열사이클을 가지는 주요공정 (출처 : 삼성중공업)

선박의 크기에 따라 다르지만 선체 외판은 대형선박의 경우 약 40%, 중소형 선박의 경우 약 60~70%가 곡면으로 되어있다. 이러한 곡면의 가공 (plate forming)은 선박의 건조과정에서 중요한 위치를 차지하고 있는 공정이다.[5]

곡면가공 공정은 크게 3가지로 분류되는데, 프레스를 이용하는 순수 냉간가공과 1차 냉간가공 후 선상가열과 삼각가열에 의한 열가공, 그리고 선상가열 및 삼각가열에 의한 순수 열가공이다.

선체 중앙부의 빌지 플레이트와 같이 곡면이 길이방향으로 곡률이 일정한 경우 냉간가공만으로 곡면을 성형할 수 있고, 선수 또는 선미부와 같이 구 방향으로 곡률을 갖는 경우 냉간가공 후 열가공법을 적용한다. 이러한 곡면 성형에 대해 지난 수십년간 많은 연구가 진행되어 왔으며, 오늘날에도 생산성 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그간 주요 연구내용으로는 판 성형을 위한 시뮬레이터를 개발[13, 14]과 기계적 모델을 기반으로 선상가열에 대한 가열선 정보를 생성하는 알고리즘 개발[5, 6], 실험을 통해 선상가열과 삼각가열에 의한 강판의 열변형에 대한 예측모델제시[4], 열성형에 의한 변형 특성에 대한 연구[2], 가열 및 수냉효과를 고려한 변형예측 실험연구[1,3]이다.



(a) 유도가열장치 기반 가열로봇



(b) 가스토치 기반 가열로봇

그림 2 열간가공을 위한 가열 로봇 (출처 : (좌) 현대중공업(2019), (우)대우조선해양, 2020))

곡가공의 기계화 내지는 자동화를 위해서는 가열선 정보를 정확하게 제공할 수 있는 시스템이 필수적이며 이를 위해 가열에 의한 변형을 정도 높게 예측하는 기술의 확보가 필요하고, 특히, 기계화 또는 자동화 장비의 생산성을 확보하기 위해서는 2개 이상의 가열선 (Multi-heating line)을 동시에 가열했을 때의 변형 결과를 정확하게 예측하는 기술의 확보가 선행되어야 한다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 고효율의 곡가공 자동화 장치 개발을 위해 다중선상가열(Multi-line heating)에 따른 변형의 특성을 분석하고 이를 통해 변형량을 정도 높게 예측할 수 있는 기술을 개발하여 다중선상가열의 생산성 향상에 연구의 목적이 있다.

1.3 연구 내용

본 연구의 주요 내용과 범위는 다음과 같다.

1차로 곡가공을 위한 1개의 가열선인 Single 가열선에 대한 선상가열 실험 수행한다. 이는 실험에 사용한 가스 토치의 열속 모델링을 위한 특성 파악을 하기 위함으로, 실험을 수행할 때 열원은 가스토치를 이용하며, 가스는 LPG, 사용된 시험편의 재질은 연강(mild steel)이다.

2차로 다중 가열선(multi-heating line)에 대한 선상가열 실험 수행한다. 이는 다중 가열선의 동시가열 적용시 열속 모델링의 타당성을 검증하고 열탄소성 해석결과를 토대로 도출한 토치사이의 열속의 간섭이 없는 토치사이의 최소거리에 대한 검증을 위함이다. 해당실험도 1차와 동일하게 열원은 가스토치를 이용하며, 가스는 LPG, 사용된 시험편의 재질은 연강(mild steel)으로 진행한다.

실험결과를 토대로 열탄소성 해석을 수행하며 판의 두께, 가열속도 그리고 Multi-line heating 시 가열선 사이의 거리(또는 토치 사이의 거리)를 변화시켜서 동시가열에 대한 해석을 수행하며, 열탄소성 해석기법의 표준화 정립을 진행한다. 이때 사용한 입열 모델은 입열 모델은 Double Gaussian heat flux model을 사용한다.

열탄소성 해석 결과를 토대로 Multi-line heating에 대한 변형 특성 평가 및 변형에 측 기법 개발하고, 강판의 두께와 가열 속도에 대해 Multi-line heating 시 두 토치의 열속의 간섭이 없는 최소 거리를 정의한다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 열탄소성 해석을 위한 열속 모델 (Heat flux model)을 개발하고, 여러 경우에 대한 열탄소성 해석을 수행하여 다중가열선(Multi-heating line)을 동시에 가열하는 경우 즉, 동시가열(Simultaneous multi-line heating) 시 가열선들 사이의 열전달 및 열 변형 특성을 분석하는 것을 주된 연구주제로 설정하였다.

본 연구에서는 열원이 Gas torch인 Single 가열선에 대한 선상가열 실험 (1차 실험)과 열탄소성 해석을 수행하여 실험에서 사용한 토치의 열원 특성을 정의하고, Multi-line heating에 대한 실험 (2차 실험) 및 열탄소성 해석시 입열모델을 구축하여, Multi-line heating시 가열선 사이의 거리 (토치 사이의 거리), 판 두께 및 가열 속도의 변화에 대한 Case study 및 결과 분석을 실시한다. 이후 Multi-line heating 시 횡수축과 각변형에 대한 변형 예측식 개발을 개발하고 Multi-line heating시 가열선 사이의 열속 간섭이 없는 최소 거리 정의 및 실험을 통한 검증 (3차 실험)을 진행한다

이렇게 진행한 시험과 해석의 결과를 기반으로 목적곡면에 대한 선상가열시 자동가열선 정보를 도출하는 것을 목표로 연구를 진행한다.

제2장 선상가열의 역학적 특성 및 모델의 이론적 배경

선박 및 해양구조물의 외판에 사용되는 3차원 곡면을 제작하는 방법에는 롤러와 프레스를 이용한 냉간가공과 가열에 의한 열변형을 이용한 열간가공이 있다. 여기서 열을 이용한 성형방법이 주를 곡가공에 많은 부분을 차지하는데 본 장에서는 열간가공 중 선상가열의 역학적 특성과 이론적 배경에 대해서 나타내었다.

2.1 역학적 특성

선상가열은 가스토키 등을 이용하여 강판의 표면을 가열하고 가열된 강판의 표면이 냉각하는 과정에서 국부적인 수축으로 변형하는 현상을 이용하는 열 가공법이다. 선종과 선박의 크기에 따라 차이가 있으나 대략적으로 선박의 경우에는 선체 외판 곡가공 물량의 약 70% 를 선상가열이 차지한다. 이는 가열선 방향으로의 속도가 일정하고, 입열량 역시 일정하기 때문에 가열선 방향으로 성형시킬 변형량이 비교적 일정한 경우에 적용한다. 반면에 삼각가열은 선상가열에 비해 가열선 방향으로 단위길이당 입열량을 증가시켜 굽힘 변형뿐만 아니라 수축변형을 유발시켜 성형하는 열 가공법이다.

선상가열에 대한 수치해석 방법에는 크게 열탄소성 해석법과 고유변형도 해석법으로 나눌 수 있다. 후자는 계산 시간측면의 효율성이라는 관점에서는 유리할 수 있으나, 이 방법은 고유변형도 영역을 적절히 가정해야 한다는 어려움이 있다. 이에 용접실험을 통해 얻은 고유변형도 영역의 폭과 깊이를 제시하고 있다. 장창두 등[3]은 이 영역을 근거로 굽힘 모멘트와 수축력 등을 계산하여 탄성적으로 변형량을 구하는 방법을 제시하였다. 여기서 기존 연구에서 고유변형도 영역으로 제시한 열영향부(Heat affected zone: HAZ)라는 것은 재료의 상변태 완료시점(A3) 까지를 의미한다. 일단 재료는 상변태가 진행되면 높은 비열값과 낮은 열전도 계수를 갖는다. 따라서 상변태가 진행되는 구간이 발생하면 입열의 영향이 상대적으로 커지는 구간에 대한 경계를 형성하게 된다는 이유로 상변태와 열영향부를 관련시킨 기존 연구들이 비교적 합리적이라고 알려져 있다.

반면에 선상가열 시의 열탄소성해석은 이론적으로 열전달문제와 열변형문제가 연성된 형태이나 변형량이 판의 다른 치수들에 비해 상대적으로 크지 않은 경우 판의 기하학적 형상 변화가 열전달 문제에 영향을 주지 않는 것으로 가정하여 열전달문제와 열탄소성문제를 분리하여 독립적으로 해석하였다. 즉, 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 Time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열 하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 잔류변형을 계산하였다. 이것을 이론적 배경으로 이주성[7,8]은 선상가열을 합리적으로 대변할 수 있는 간단한 역학적 모델을 제시하였으며, 실험과 수치해석 결과를 토대로 역학적 모델링의 합당성을 확인하였다.

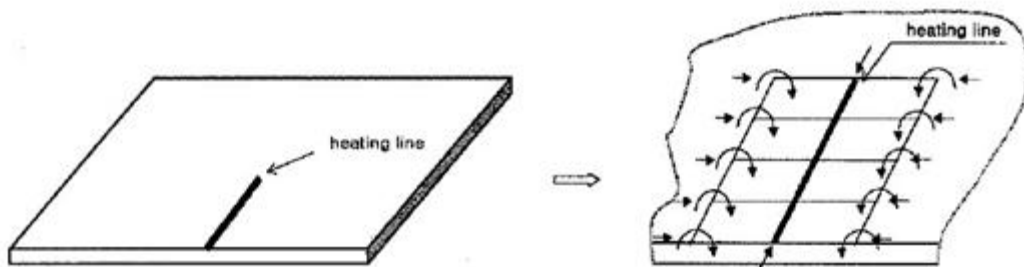
2.2 선상가열 모델의 이론적 배경

2.2.1 선상가열 모델

열가공에 의한 곡가공 작업방법은 선체외판의 곡면 형상에 따라 선상가열과 삼각가열 방법으로 구분 적용된다. 선상가열은 가열된 강판의 표면이 냉각과정에서 국부적인 수축으로 변형하는 현상을 이용하는 열가공법이며, 삼각가열은 선상가열에 비해 가열선 방향으로 단위길이당 입열량을 증가시켜 굽힘변형뿐만 아니라 수축 변형을 유발시켜 성형하는 열가공법이다. 선상가열과 삼각가열의 가열방법과 기본 메카니즘을 비교하여 표 1에 나타내었으며, 이것을 합리적으로 대변할 수 있는 역학적 모델을 그림 3과 그림 4에 나타내어 비교하였다.

표 1 선상가열과 삼각가열의 비교

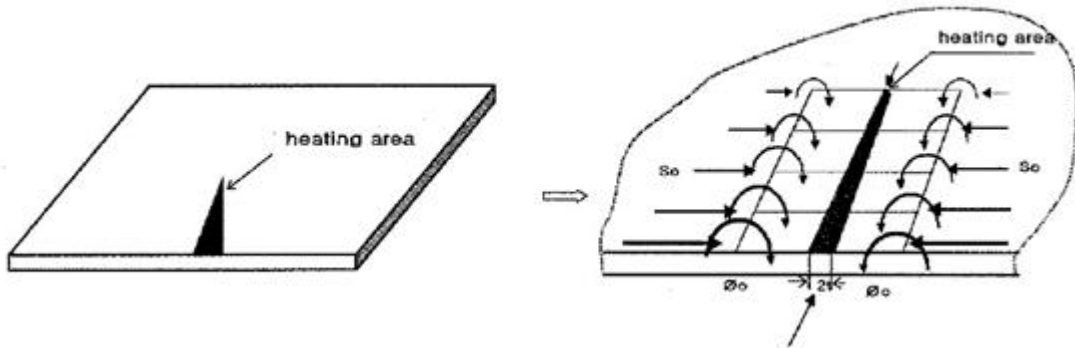
Item	Line Heating	Triangular Heating
Heat input	Regular	Irregular
Basic mechanism	Forming with bending deformation	Forming with bending and shrinkage deformation
Heat direction	Uniform	Non-uniform



M_0 is nearly constant

M_0 : bending moment per unit length

그림 3 선상가열의 기계적 모델



Φ_o and S_o vary linearly

Φ_o : angular distortion per unit length

S_o : shrinkage per unit length

그림 4 삼각가열의 기계적 모델

선상가열은 입열량과 소성변형 사이의 관계를 실험과 이론적 해석 결과를 이용하여 정량적으로 수식화할 수 있으며, 본 논문에서도 이 결과를 이론적 배경으로 활용하였다. 소성 각변형과 수축량은 입열량의 크기에 따라 달라지며, 개념적으로 강판의 두께, 화염의 온도와 토치의 이동속도 및 냉각방법 등 가열 조건들의 함수로 표시할 수 있다. 가스와 산소의 압력이 정해지면 토치에서 발산되는 화염의 온도는 거의 일정하고, 따라서 가열선 방향으로의 단위길이당 입열량은 가열속도에 의해 결정된다. 이것을 이용하여 Ueda[17]는 식(1)과 같이 가열선 방향으로의 투입되는 입열량을 계산하는 이론식을 제시하였다.

$$Q = \eta \cdot Q_t \quad (1)$$

여기서, Q : 단위 시간당 입열량 (cal/sec)

Q_t : 가스의 발열량

η : 열효율

단위 시간당 입열량(Q)을 가열속도(v)로 나누면 단위길이당 입열량(Q_o)은 식(2)와 같다.

$$Q_o = \frac{Q}{v} \quad (2)$$

2.2.2 열탄소성 해석

선상가열법이란 가열과 냉각과정을 거쳐 국부적인 수축작용으로 인한 굽힘변형을 얻는 방법으로서, 토치를 이용하여 가열선을 따라 일정한 열을 가하면 처음에는 가열된 부분이 먼저 열을 받아 팽창하여 부풀게 되고 그 후 냉각과정에서 팽창부분의 반대면으로 수축작용을 일으켜 잔류굽힘변형이 발생하게 된다.

선상가열시의 열·탄소성 해석은 이론적으로 열전달 문제와 열변형 문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상 변화가 열전달문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달문제와 열변형 문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다. 즉, 열전달 해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 잔류변형을 계산한다. 본 논문에서 수행한 열탄소성 해석에 대한 전체적인 흐름도는 그림 5에 보인 바와 같다.

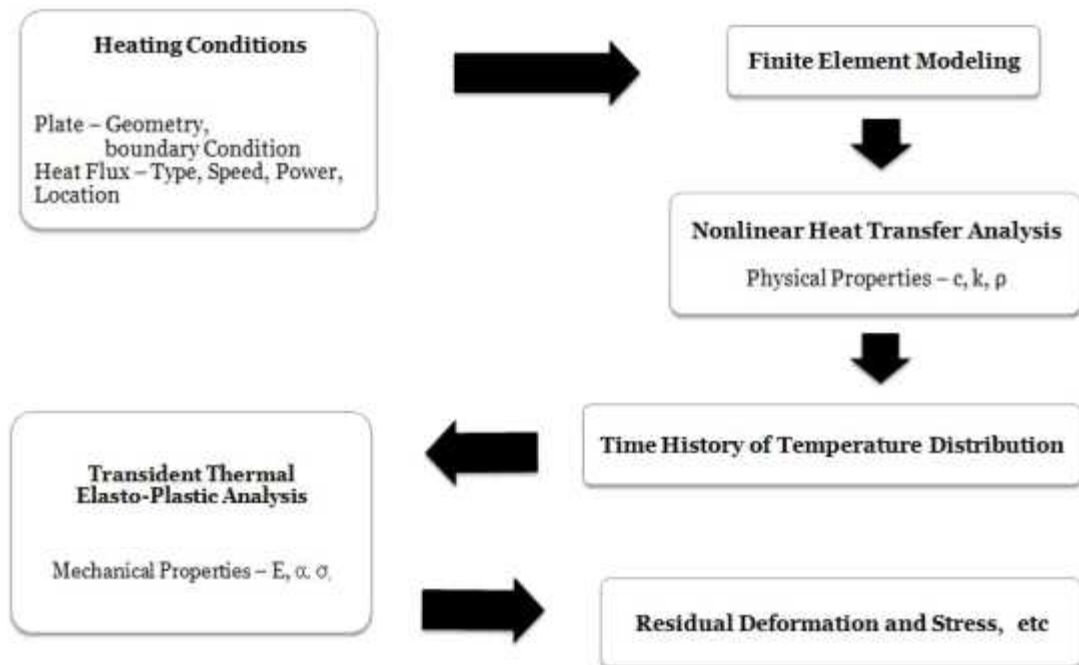


그림 5 열탄소성해석의 흐름도

선상가열은 강판에 국부적으로 높은 열을 가하게 된다. 이에 정확한 변형량을 얻기 위해서는 이동하는 열원을 고려해야 하기 때문에 시간에 따른 온도분포 이력을 알아야 하고, 온도에 따른 재료의 물성치의 변화가 명확히 정의해야 하는데 비선형의 형태를 취하고 있어 표현하기 어렵고, 높은 온도 구배로 인한 열 유동 현상을 발생시키

기 때문에 비선형 열전달 해석이 요구된다.

선상가열에 의한 잔류 굽힘 변형에 영향을 주는 인자들은 다음과 같이 생각할 수 있다.

- 1) 열원의 종류, 온도, 속도
- 2) 열원의 입열량
- 3) 열원의 이동속도
- 4) 재료적 특성치
- 5) 재료의 크기와 두께등 기하학적 형상
- 6) 토치 팁(torch tip)과 판 표면과의 거리
- 7) 토치 팁(torch tip)의 형상 및 크기
- 8) 주변 온도
- 9) 냉각방법

이러한 인자들 이외에도 실제로 밝혀지지 않은 많은 인자들이 있을 것이라고 유추해 볼 수 있다.

앞서 말한 온도변화에 따른 재료의 물성치 변화는 그림 6에서 보인 바와 같이 열전도율(thermal conductivity) k , 비열(specific heat) c , 밀도(density) ρ 등 열전달 해석과 관련된 물성치들은 온도 의존성을 갖도록 하였다.

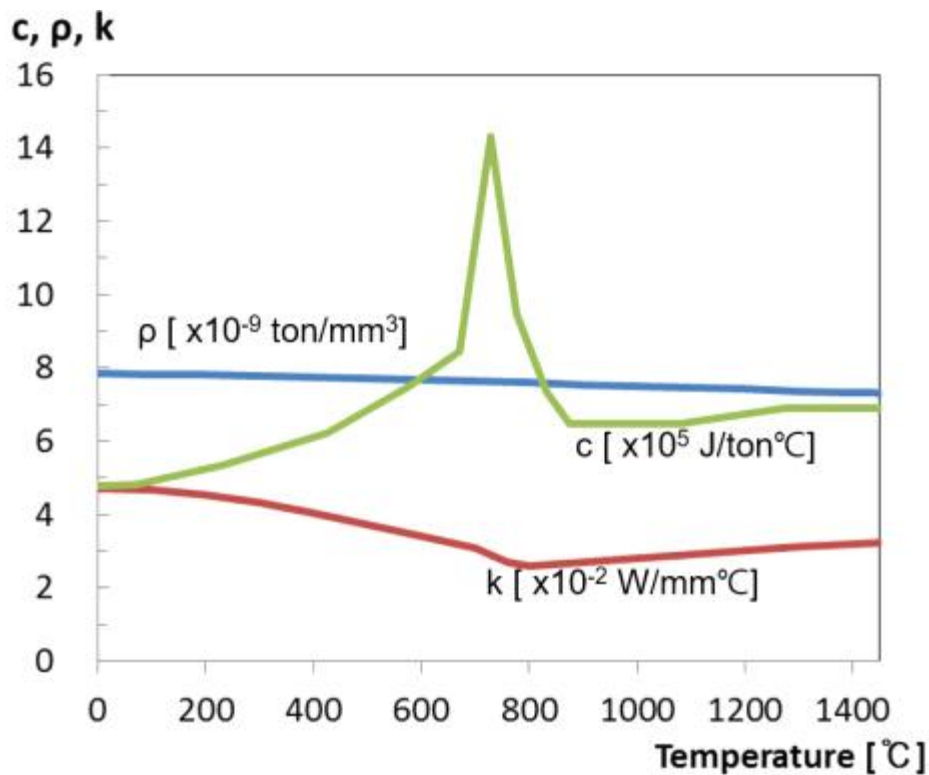


그림 6 연강의 온도에 따른 물성치(열전도율, 비열, 밀도)

본 논문에서는 열원의 종류, 입열량, 재료적 특성과 냉각방법등을 고정시키고 열원의 속도와 판의 두께, 곡률을 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 해석에 적용한 강재는 조선소에서 주로 사용하고 있는 선박용 강재로 상온에서부터 용융점 이상까지의 온도에 따른 재료 특성치의 변화를 반영하여 온도 의존성을 고려하였다.

선상가열에 대한 해석모델을 이동하는 열원인 토치가 강판의 중앙선을 따라 일정한 속도로 진행하며 강판을 가열하고 공냉에 의해 냉각되는 것으로 이상화하였다.

이 상태에서 강판 표면 위의 열원과 공기의 냉각에 따른 판의 온도 변화는 3차원 비선형 열전달 방정식과 경계조건으로 표현될 수 있다.

선상가열 중 평판에서 생기는 열전달 현상은 아래와 같이 전도, 대류, 복사 등 3가지의 전달기구로 분류될 수 있다.

- (1) 전도(conduction) : 평판의 경계면에서 복사나 대류에 의한 열손실이 없는 것으로 취급하여 외부계로의 열유출이 없는 독립된 영역으로 가정함
- (2) 대류(convection) : 고체와 유체의 경계면 근방에서 유체의 유동에 의한 열전달
- (3) 복사(radiation) : 고온의 물체 표면에서 방출되는 적외선에 의해 전자기 에너지를 전달하는 현상

선상가열 과정에서 온도 분포를 구하는 문제는 이동 토치에 의해 강판의 표면에 열이 가해질 때 강판의 온도변화의 과도 응답으로 앞 절의 열전달 현상 중에서 복사에 의한 열전달은 물리적 열전달 기구가 복잡하여 정확한 해석이 어려울 뿐만 아니라, 선상가열 문제에서는 전도 및 대류에 의한 열전달에 비하여 상대적으로 차지하는 비중과 중요성이 떨어지므로 무시할 수 있다. 따라서 3차원 비정상 열전도문제의 기본 미분방정식은 아래의 식과 같다.

$$k\nabla^2 T + q_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t_i} \quad (3)$$

여기서, T : 온도(°C)

k : 열전도율(cal/mm.sec.°C)

q_g : 열원에 의해 단위시간당, 단위체적당 생성되는 열량 (cal/sec.mm³)

ρ : 밀도(kg/mm³)

c : 비열(cal/kg.°C)

t_i : 시간(sec)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} : \text{미분 연산자}$$

이때 식 (3)은 k, c 등이 온도의 함수인 고체 내에서의 온도분포와 열전도를 지배하는 비선형 미분방정식이 되며, 이 식의 해는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS

를 이용하여 구하였다.

본 연구에서 열하중은 분포열속(distributed heat flux)으로 주었고, 열전달문제는 등속으로 이동하는 열원이 통과하는 과정에서의 온도분포를 각 time step에서 계산한다. 이 결과의 열 하중 분포를 열탄소성 입력 자료로 하여 선상가열에 의한 변형량을 계산하였다. 이 변형량을 모델의 폭으로 나눈 값을 각변형으로 정의 하였다.

하중조건으로는 유효 입열량(effective thermal power) Q_{eff} 는 39,867 J/sec를 주었으며, 이때 이용된 표면열속(surface heat flux) 값의 크기는 아래의 식에 의해 계산한다.

$$p = \frac{Q_{eff}}{A} \quad (4)$$

여기서, p : 표면 열속 (surface heat flux, cal/mm².sec)

Q_{eff} : 유효 입열량 (effective thermal power, cal/sec)

A : 입열 면적 (unit heat input area, mm²)

경계조건은 자연대류(free convection condition)로 하였다. 여기서 열손실 계수(heat loss coefficient)는 6.0×10^{-6} cal/mm².°C이다. 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)은 65×10^3 cal/kg으로 가정하였다.

선상가열로 인한 강판의 변형해석은 열탄소성 해석 범주에 속한다. 열탄소성 해석에서 소성변형률을 알아내기 위해서는 적절한 응력과 변형률 사이의 관계식이 필요하다. 열응력의 영향을 고려한 구성방정식은 통상의 응력-변형률 관계식에서 열팽창에 의한 변형률 항이 추가된 형태로 표현된다. 특히, 변형에 관련되는 재료의 특성치인 선팽창계수, 항복 응력, 탄성계수 등은 온도 변화에 따라 그 값이 달라지는 의존성을 보인다.

따라서 가열과 냉각과정에서의 판의 두께 방향에 생기는 온도 분포차가 열변형에 영향을 준다. 이런 영향을 종합적으로 열탄소성 문제를 해석하기 위해 필요한 증분형 구성방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon^{e_{ij}} + d\epsilon^{p_{ij}} + d\epsilon^{t_{ij}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
d\sigma_{ij} = & \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} dE \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} dE \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} \\
& + \frac{1}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^e dE + \frac{E}{1+\nu} d\varepsilon_{ij}^e \\
& - \frac{1}{1-2\nu} (\alpha T \cdot dE + ET \cdot d\alpha + E\alpha \cdot dT) \delta_{ij} - \frac{E}{1+\nu} \alpha'_{ij} d\lambda
\end{aligned} \tag{6}$$

ε_{ij} : 전체 변형을	ε_{ij}^e : 탄성 변형을	ε_{ij}^p : 소성 변형을
ε_{ij}^t : 열 변형을	ε_{kk}^e : 탄성주변형을	α : 열팽창계수
δ_{ij} : Kronecker δ	T : 온도	E : 탄성계수
ν : Poisson의 비	σ_{ij} : 응력	

$\alpha'_{ij} = \alpha_{ij} - \frac{1}{3} \alpha_{kk}$: 편차응력

$\bar{\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$: 등가응력

$\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon^{p_{ij}} \varepsilon^{p_{ij}}}$: 등가소성변형도

탄성계수(elastic modulus) E , 항복응력(yield stress) σ_Y , 열팽창계수 α 등 탄소성 해석과 관련된 재료적 특성치 역시 그림 7과 같이 비선형적인 온도 의존성을 반영하였고, poisson 비 ν 는 상수로 가정하였다. 그림 8은 연강에 대한 변형도 경화모델이다.

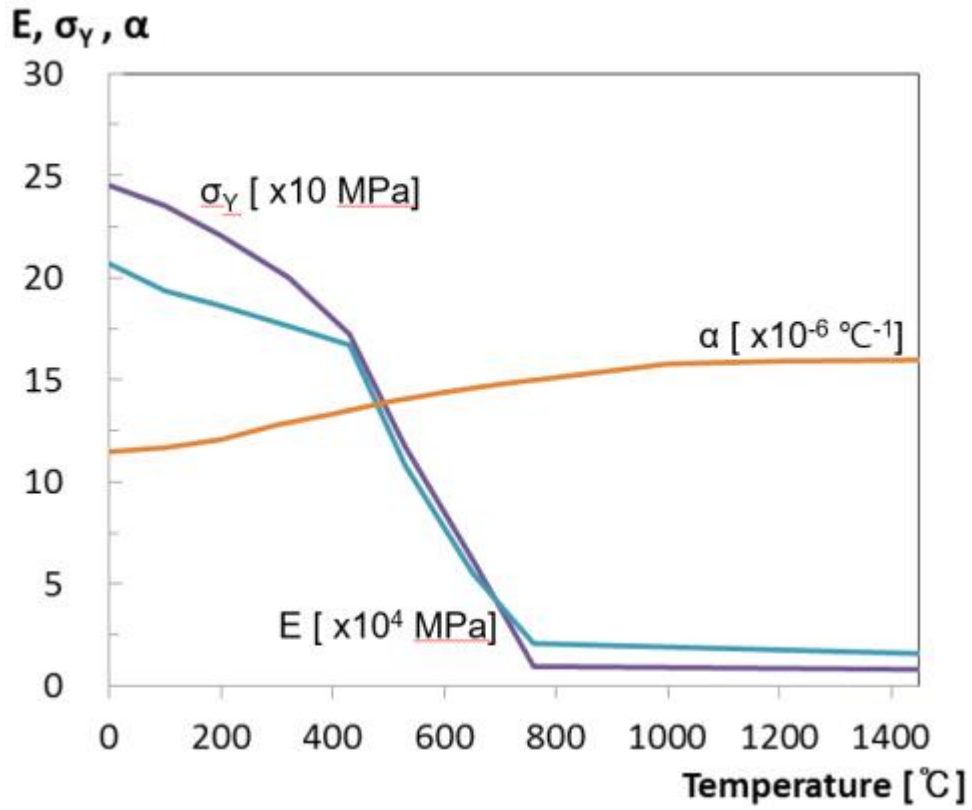


그림 7 연강의 온도에 따른 물성치(탄성계수, 항복응력, 열팽창계수)

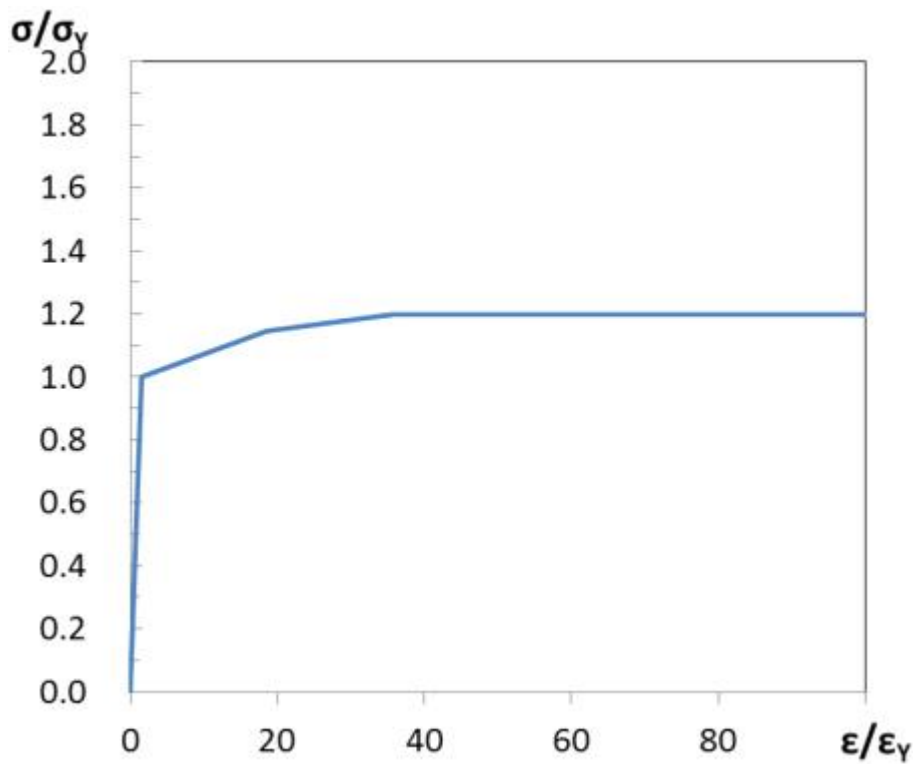


그림 8 연강의 변형도 경화 모델

제3장 Single torch를 이용한 선상가열 실험 및 해석

3.1 선상가열실험

3.1.1 실험 모델 및 조건

본 연구에서 사용한 가열장치의 특성치들을 정의하기 위해 그림 9에 보인 자동가열장치를 이용한 선상가열실험을 수행하였다. 본 연구의 선상가열실험에서 사용한 자동가열장치 (Automatic heating apparatus)는 아래와 같이 구성되어 있다.

- 구동 및 지지를 위한 Frame
- 위치제어를 위한 Main PC
- 가열작업을 수행하는 Torch unit
- 변위계측을 위한 Laser Sensor
- Torch unit와 변위계측 센서의 구동을 위한 x, y와 z-축 구동을 위한 모터
- 표면온도 계측용 적외선 온도계측장치

각 축의 구동 모터의 위치제어는 Main PC에 탑재된 MMC(Multi-motion controller) Board에 내장된 수치제어기능을 사용하여 이루어지며, 계측한 변위와 온도는 MMC Board에 내장된 기능을 이용하여 Excel File로 저장하도록 프로그램이 개발되어 있다. 사용하는 가스는 LPG이고, 변위를 계측하는 Laser Sensor의 Resolution은 $\pm 0.2\text{mm}$ 이다.

열원으로는 LPG를 사용하였으며 LPG와 산소의 압력 및 유량 등 선상가열 실험조건은 표 2와 같이, LPG의 유량은 23 l/min, 유압은 1.7 kgf/cm^2 이며, 산소의 유량은 50 l/min, 유압은 4.0 kgf/cm^2 로 설정하였으며, 토치팁은 3000번을 사용하고 토치와 강판과의 거리는 50mm로 설정하였다.

선상가열 실험 중 온도는 그림 10에 보인 바와 같이 가열선 중앙 위치 이면에 가열선에 수직방향으로 11개 위치에 부착한 열전대 (Thermal couple)를 이용하여 측정하였고 이는 열탄소성 해석 결과와 비교하는 데에 활용하였다. 그림 9에 보인 자동가열장치를 이용하여 선상가열 실험을 수행하는 것을 그림 11에 보였다.

수치해석을 위한 열원의 인자들을 구하기 위해 가열속도와 판두께에 따른 표 3에 보인 4가지 모델에 대한 선상가열 실험을 수행하였고 그 결과를 기준으로 2차원 열탄소성 해석을 통해 구한 결과에 활용하였다.

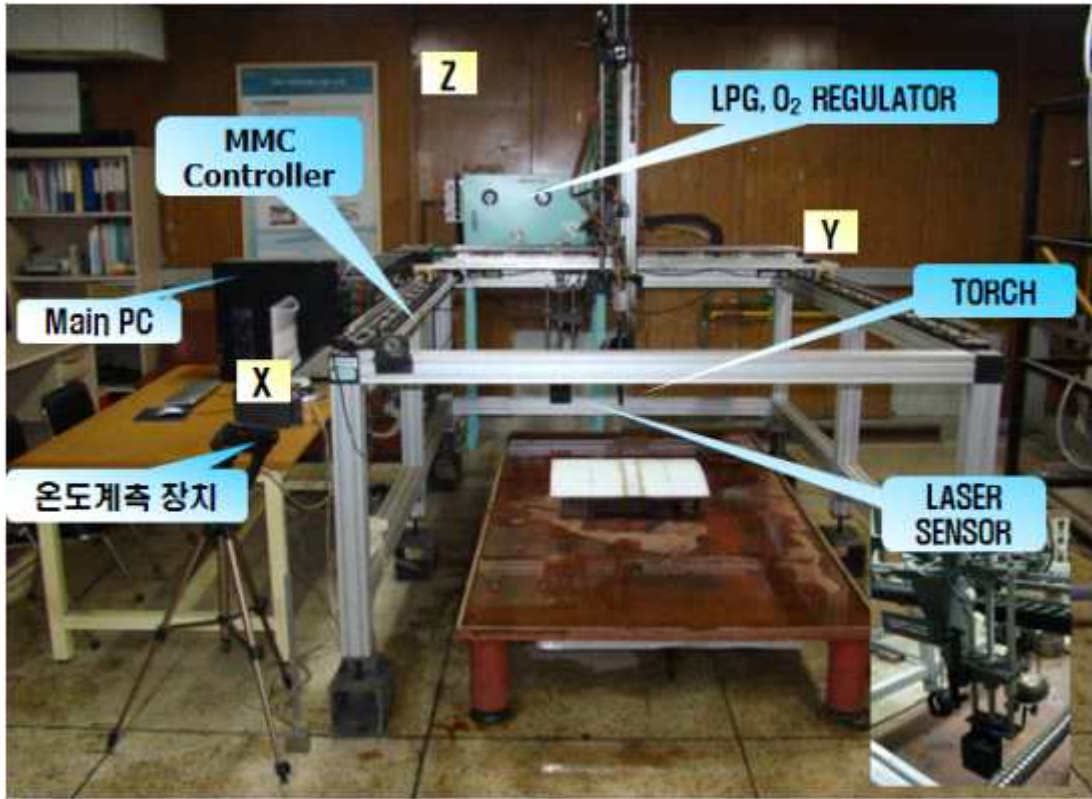


그림 9 자동가열장치

표 2 선상가열 실험조건

Item		Condition
Flow rate	LPG	23 L/min
	Oxygen	50 L/min
Pressure	LPG	1.7 kgf/cm ²
	Oxygen	4 kgf/cm ²
Distance between torch tip and plate surface		50 mm
Torch tip number		3000
Cooling method		Air cooling

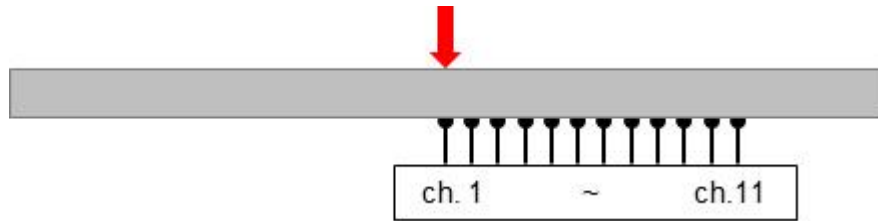
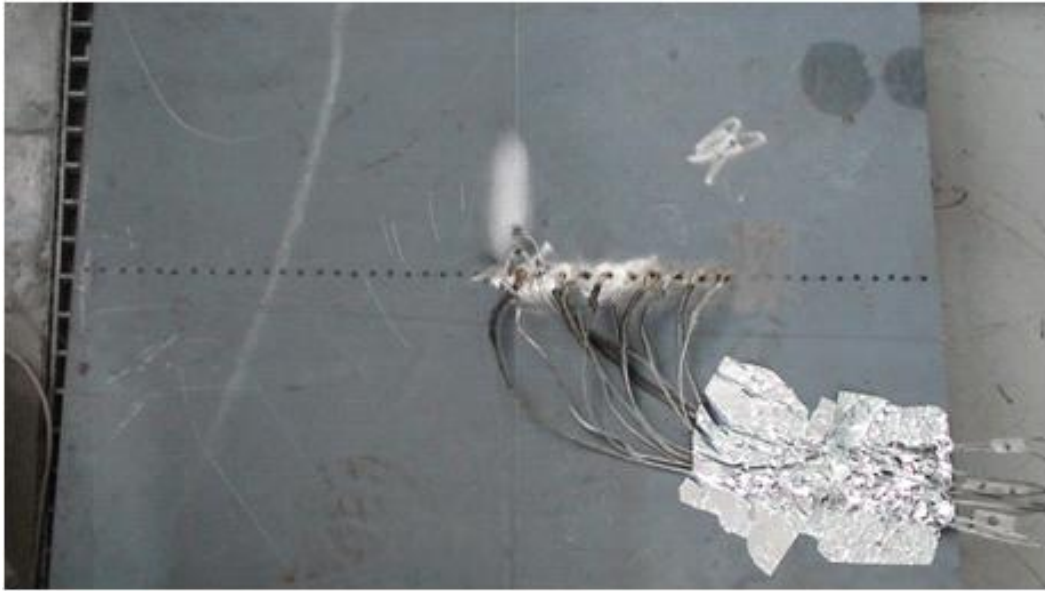


그림 10 시험편의 가열 이면 열전대 부착



그림 11 싱글토치 선상가열 시험

표 3 싱글토치를 이용한 선상가열 실험조건

model size ($L \times B \times t$ in mm)	heating speed (mm/min)
1000 × 700 × 13.0	300
1000 × 700 × 13.0	400
1000 × 700 × 13.0	500
1000 × 700 × 19.0	300

3.2 수치해석

3.2.1 입열모델

본 연구에서는 열탄소성 해석시 사용할 열속 모델로서 Double Gaussian 열속 모델 (Double Gaussian heat flux model)을 사용하였다.[16] 이는

$$q(r) = \frac{6\eta Q}{\pi(R_1^2 + \beta R_2^2)} \left[\exp\left(-\frac{6r^2}{R_1^2}\right) + \beta \exp\left(-\frac{6r^2}{R_2^2}\right) \right] \quad (7)$$

와 같이 주어진다.

여기에서 η : Heat efficiency

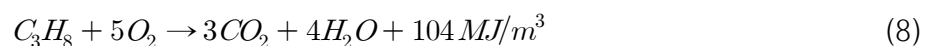
R_1 : Radius of 99.8% first heat flux frame

R_2 : Radius of 99.8% second heat flux frame

β : Second heat flux over the first heat flux

Q : Heat due to chemical reaction

본 연구에서 사용한 토치는 3000번으로 표 2에 주어진 LPG와 산소 압력 및 유량 조건에 의한 발열량(Q)은 아래와 같은 산소-LPG 발열 반응식[18]을 이용하여 계산하였다. 즉,



이므로 발열량은 $104 MJ/m^3 \times 23 L/min = 39867 J/sec$ 이다.

식(7)의 이중 Gaussian 열속 모델에 포함되는 인자들 중에서 1차(R_1) 및 2차(R_2) 화염의 반지름은 표 2의 선상가열 실험조건 상태에서 실험을 통해 화염의 길이로 정의하였다. 그림 12, 13은 1차 및 2차 화염의 길이를 낮과 밤에 측정한 장면이다.

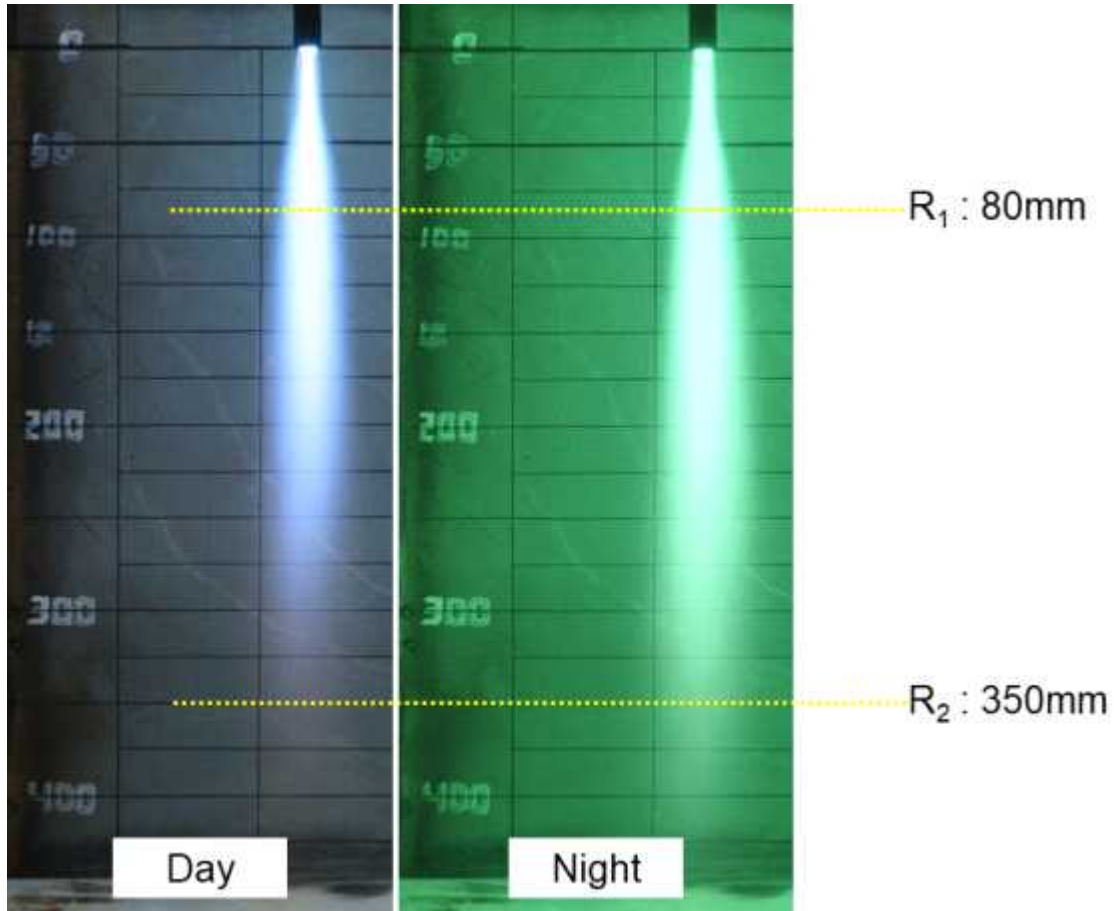


그림 12 1차 및 2차 화염 길이 측정

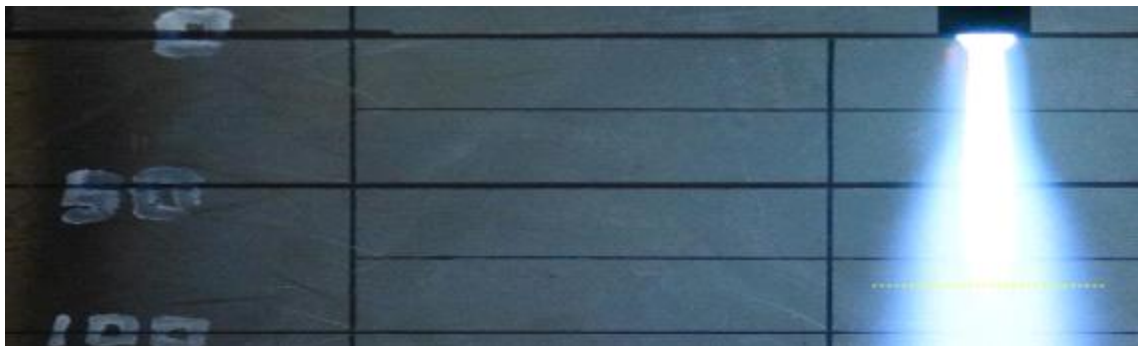


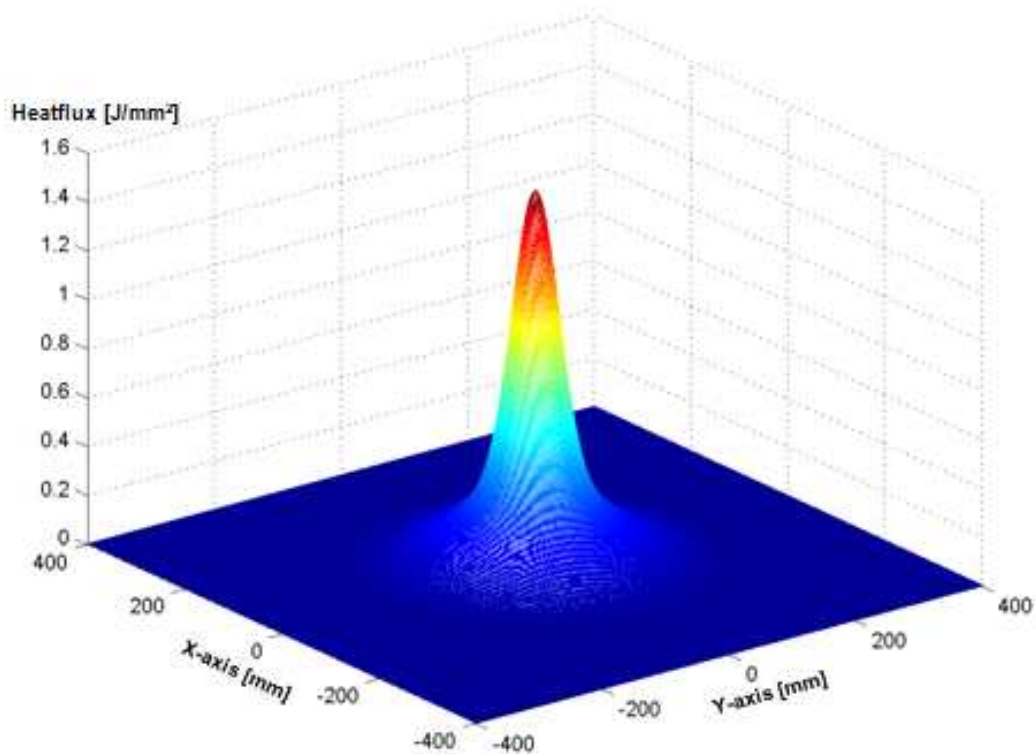
그림 13 1차 화염 길이 측정

식 (7)의 열효율(η)과 열원 중첩(β)은 실험시 시편의 이면에 부착한 열전대를 기준으로 수치해석을 통해 값을 찾았다. 열효율은 가열선 이면 중앙부의 최대온도를 기준으로 값이 정의되며, 열원중첩은 가열선을 중심에서 거리에 따른 이면의 온도분포에 대한 영향에 따라 값이 결정됨에 따라 실험값을 기반으로 수치를 산정하였다.

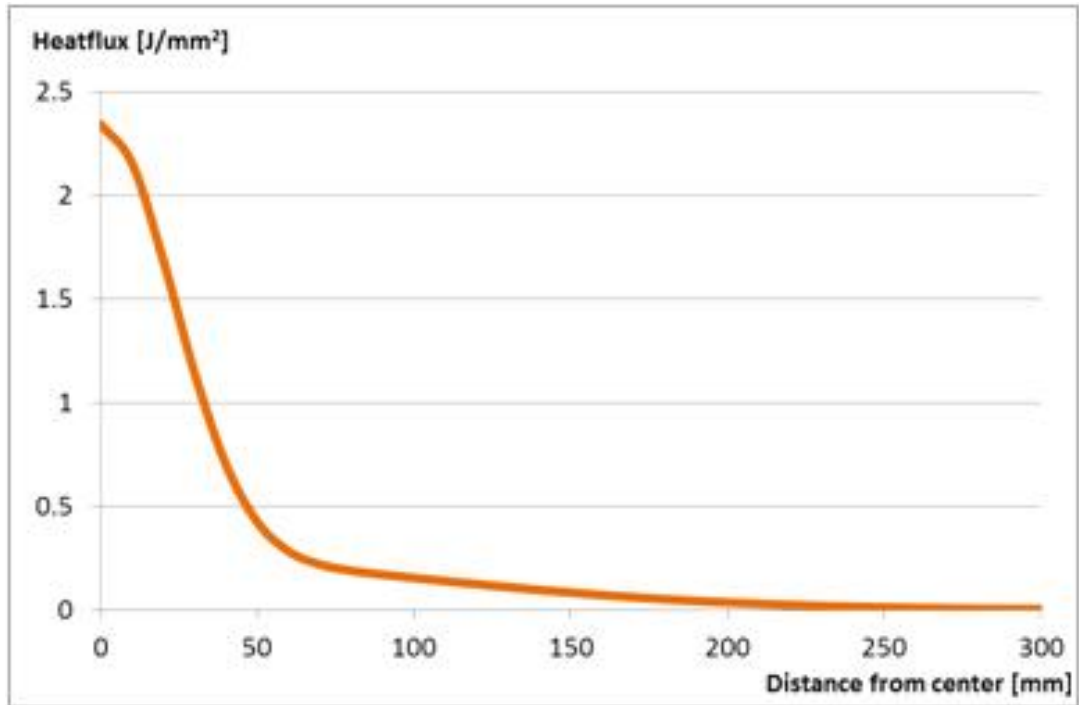
표 4 가우시안 열원모델의 인자 정의

parameter	value	description
η	0.58	Heat efficiency
R_1	80	Radius of 99.8% first heat flux frame
R_2	350	Radius of 99.8% second heat flux frame
β	0.12	Second heat flux over the first heat flux
Q	39867	Heat due to chemical reaction

표 4와 같이 구한 인자들의 값을 갖는 Double Gaussian heat flux의 모양이 그림 14와 같다. 그림 14(a)는 3차원 모양이고, 그림 14(b)는 단면 모양의 1/2이다.



(a) 3차원 열원모델



(b) 열원의 단면 모양의 1/2

그림 14 이중 가우시안 열원의 형상

3.2.2 열전달해석 및 열탄소성해석

선상가열로 인한 변형해석은 이동하는 열원으로 인한 열-탄소성해석 범주에 속하는 복잡한 역학적 문제이다. 가열되는 재료는 급열과 급냉의 열이력을 겪으며 열전달 문제와 관련되는 물리적 특성 값들 그리고 기계적 특성 값들이 온도 의존성을 보이는 대단히 복잡한 비선형 문제에 속한다.

선상가열에 의한 변형 해석은 이론적으로 이동 열원으로 인한 열전달 문제와 온도의 불균일한 분포로 인한 열변형 문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상 변화가 열전달 문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달 문제와 열변형 문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다. 즉, 열전달 해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도 분포를 각 시간 단계에서 계산한 다음, 이 결과를 열 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 변형을 구할 수 있다. 본 연구에서 수행한 열-탄소성 해석에 대한 전체적인 흐름도는 그림 5에 보였다. 열전달과 관련된 물리적 특성 값으로서 열전도율(thermal conductivity), k 와 비열(specific heat), c 의 온도 의존성은 그림 6에 보인 자료를 이용하였고, 밀도(density), ρ 는 $7.86 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 로서 상수로 가정하였다. 탄성계수

(Modulus of elasticity), E , 항복응력(yield stress), σ_Y 그리고 열팽창계수(thermal expansion coefficient), α 등 재료적 특성 값들의 비선형적인 온도 의존성은 그림 7에 보인 자료를 이용하였으며, Poisson의 비는 0.3으로서 상수로 간주하였다. 변형도 경화는 그림 10에 보인 모델을 이용하였다. 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)은 $65 \times 10^3 \text{ cal/kg}$ 으로 가정하였다.

열탄소성 해석을 위한 유한요소모델링의 예로서 판 두께가 19 mm인 경우에 대해 그림 15에 보였다. 사용한 요소는 8절점이고, 가열선의 위치가 변경될 경우를 감안하여 가로 \times 세로 = $10 \times 10 \text{ mm}$ 로 균일하게 모델링하였으며 두께 방향으로 1 mm 간격으로 모델링하여 두께 방향의 수는 판의 두께와 같도록 하였다.

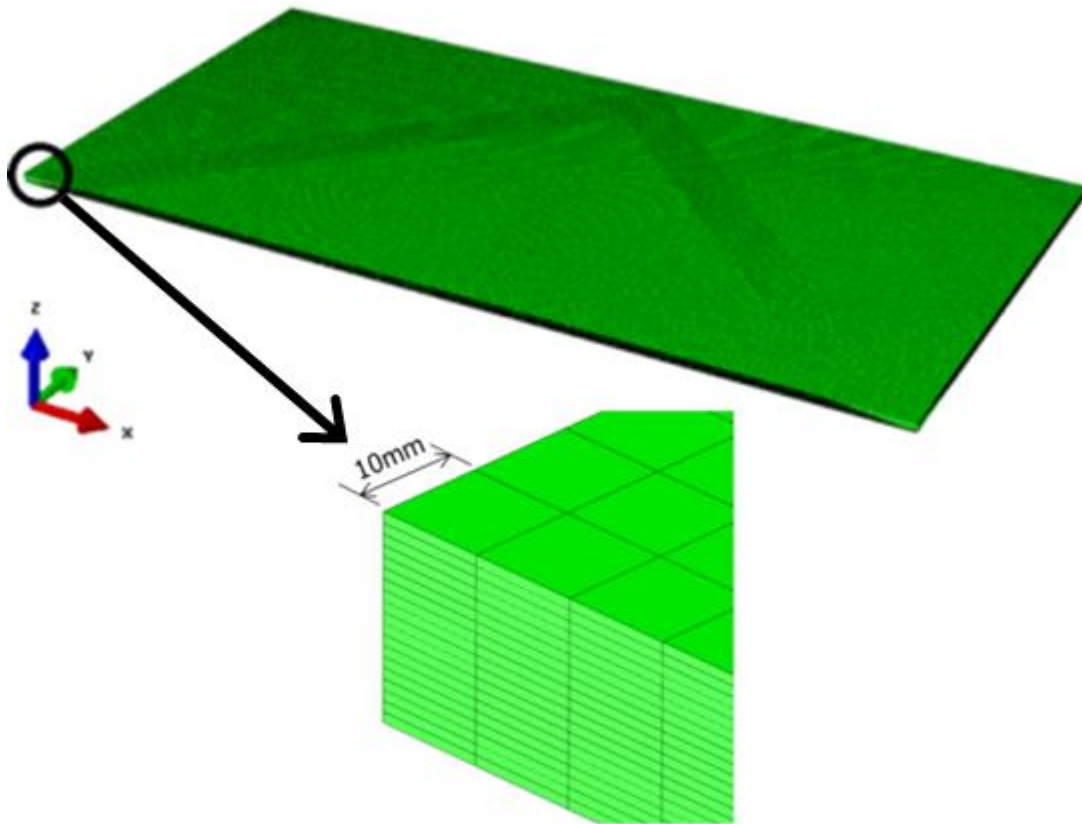


그림 15 유한요소모델링

3.3 실험과 수치해석의 비교

Single torch를 사용하여 표 3에 열거한 4가지 모델에 대해 수행한 선상가열 실험 결과와 표 4와 같은 특성치를 갖는 Double Gaussian heat flux를 사용하여 수행한 열탄소성 해석결과를 각변형 측면에서 비교해 보았다.

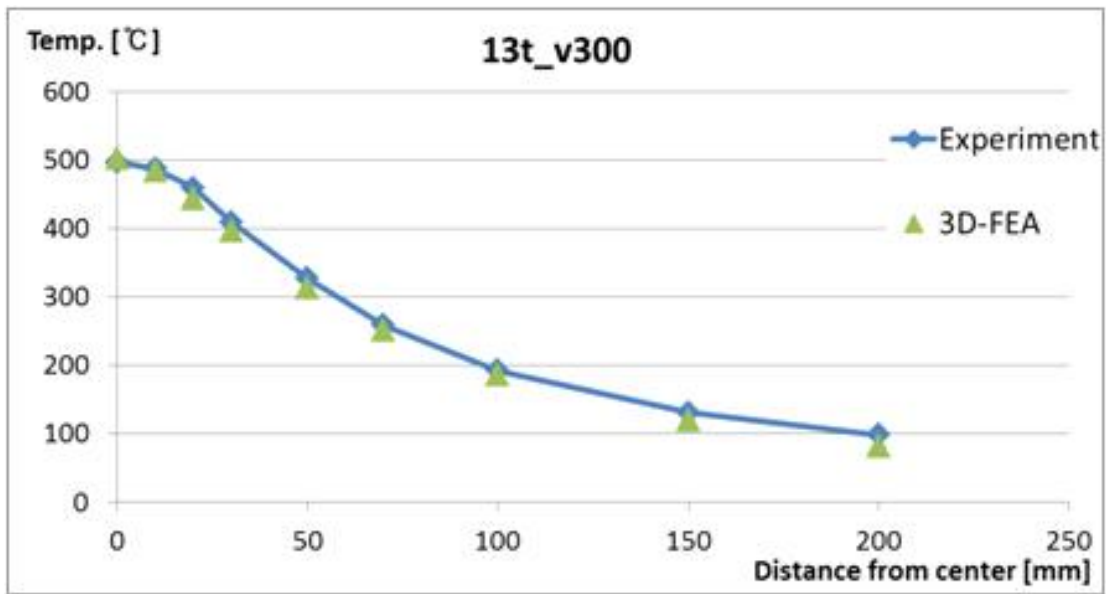
표 5는 각 모델에 대해 실험과 해석을 통해 구한 평균 각변형 (단위는 Radian)이다. 이후에서 모델 번호는 'thickness_heating speed'로 표시하였다. 각변형의 비 'test result / analysis result'인 표 5의 우측 열을 보면 최대 차이가 약 12%로서 열탄소성 해석 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있다.

그림 16은 열전대를 이용하여 각 모델의 이면에서 측정한 온도의 최대 값과 전술한 입열 모델을 사용한 열전달 해석으로 구한 온도의 최대 값을 비교한 그래프이다. 그림 16에서 'Experiment'는 실험에서 측정한 값이고, '3D-FEA'는 3차원 열전달 해석으로 구한 값인데, 모든 모델에 대해 좋은 일치를 보이고 있다. 그림 17부터 그림 20까지는 실험에서 계측한 최종상태에서의 변형 형상과 탄소성 해석에서 구한 변형 형상을 비교한 것이다. 실험에서 변위 계측을 위해 사용한 변위 계측장치가 ± 0.2 mm의 오차가 있기 때문에 계측한 변형 형태가 부드러운 형상을 갖지 못하였다.

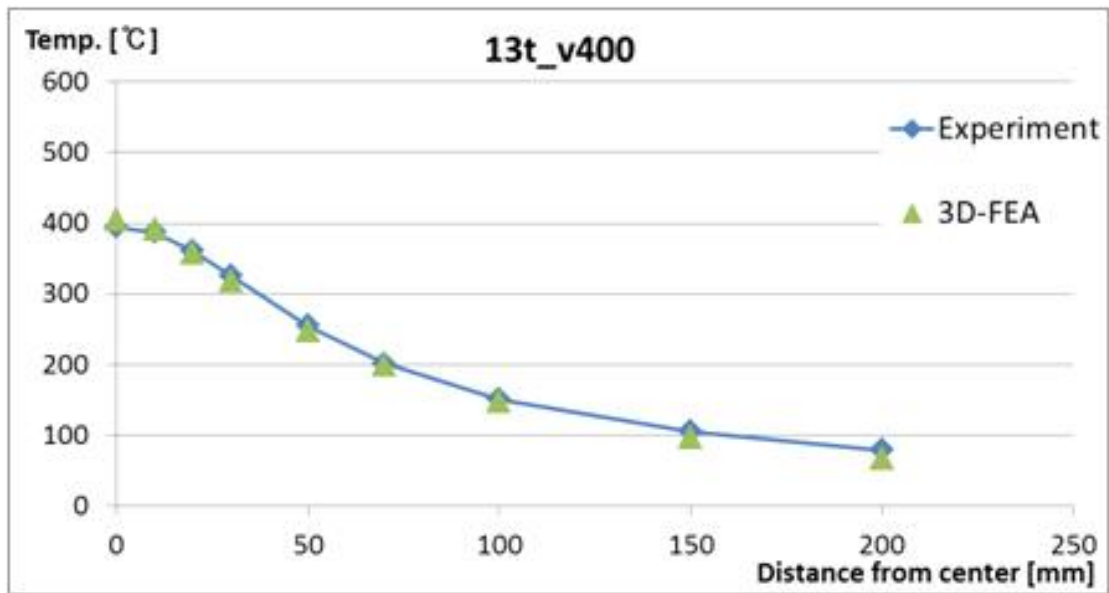
가열선의 길이 방향으로 여러 곳에서의 각변형의 평균을 취한 평균 각변형에 대한 비교를 그림 21에 보였다. 보는 바와 같이 각변형 측면에서 해석결과는 실험결과와 비교적 좋은 일치를 보이고 있다.

표 5 싱글토치의 실험과 수치해석의 각변형 비교

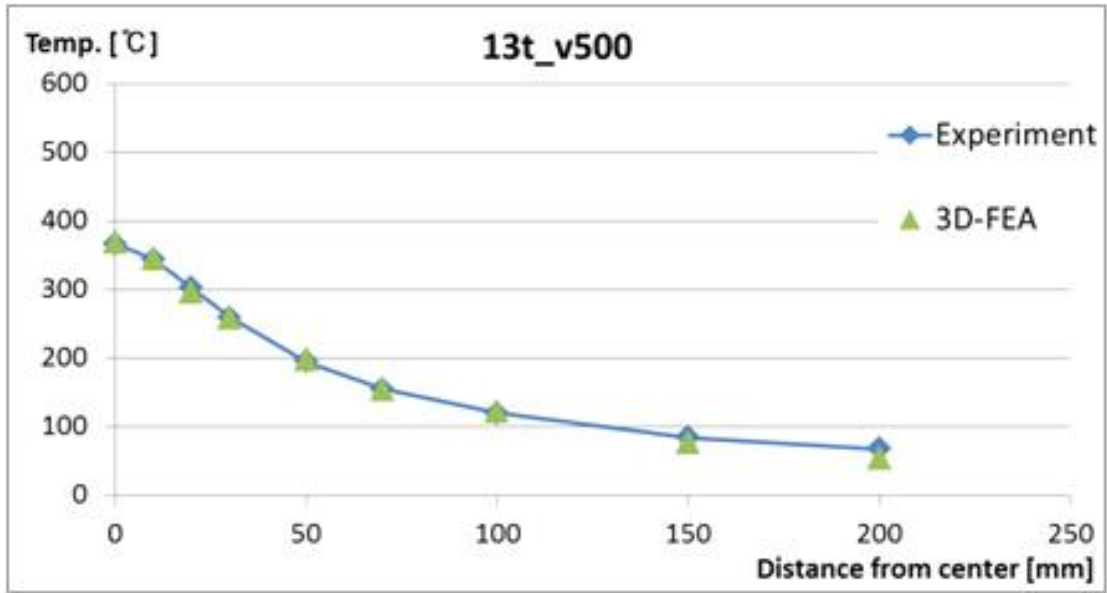
model (thickness_heating speed)	test result (a)	analysis result (b)	ratio (a)/(b)
13t_300v	0.0190	0.0177	1.073
13t_400v	0.0078	0.0076	1.026
13t_500v	0.0068	0.0059	1.152
19t_300v	0.0045	0.0051	0.882



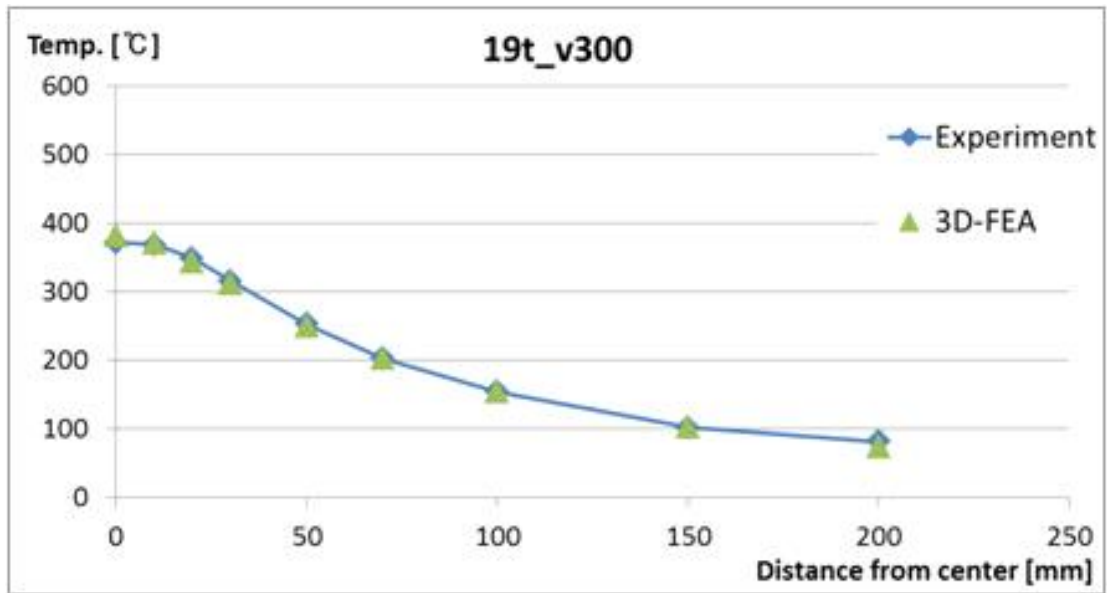
(a) $t = 13.0$ mm, $v = 300$ mm/min



(b) $t = 13.0$ mm, $v = 400$ mm/min

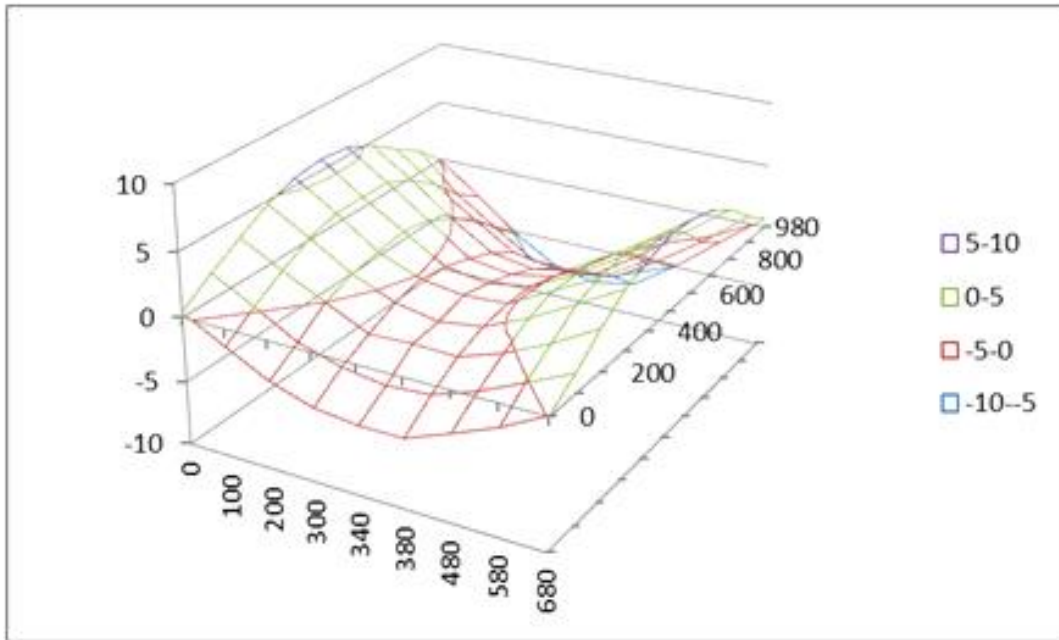


(c) $t = 13.0$ mm, $v = 500$ mm/min

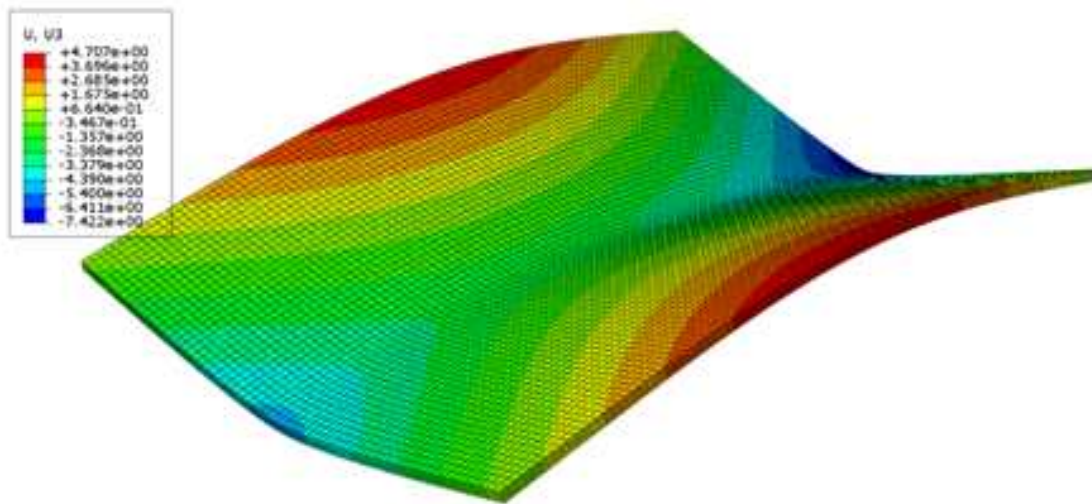


(d) $t = 19.0$ mm, $v = 300$ mm/min

그림 16 실험과 수치해석의 가열 이면 최대온도 비교

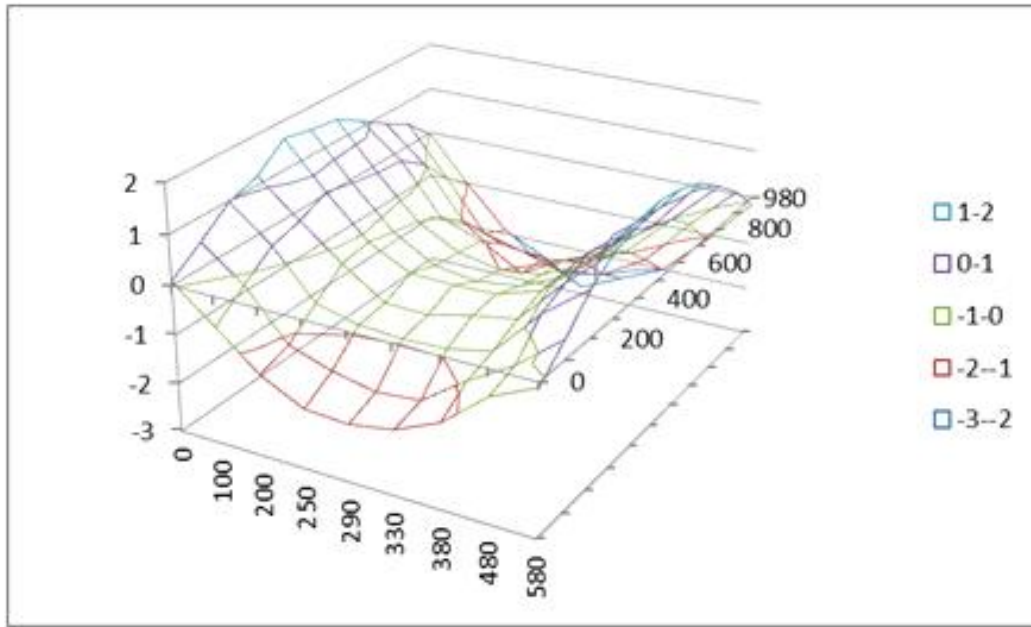


(a) 실험 결과

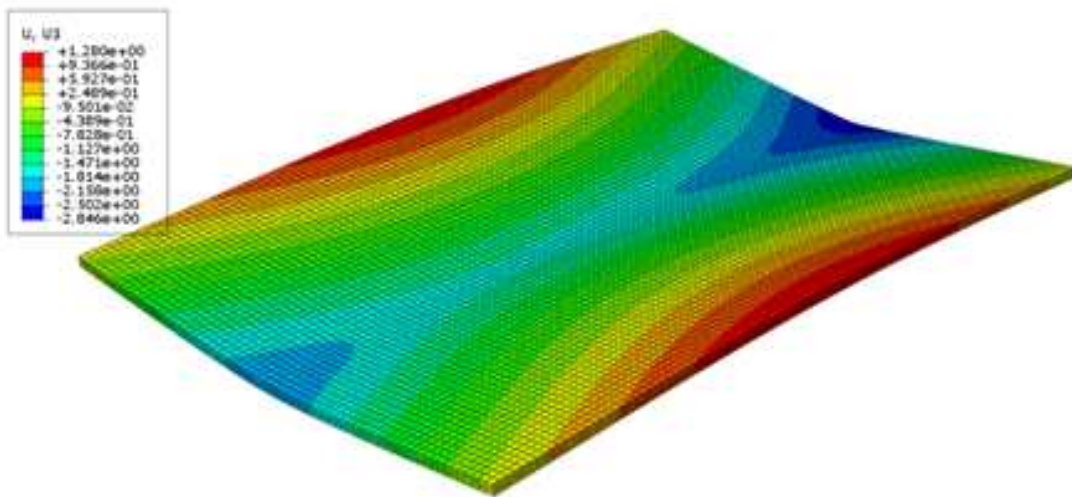


(b) 해석 결과

그림 17 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$)

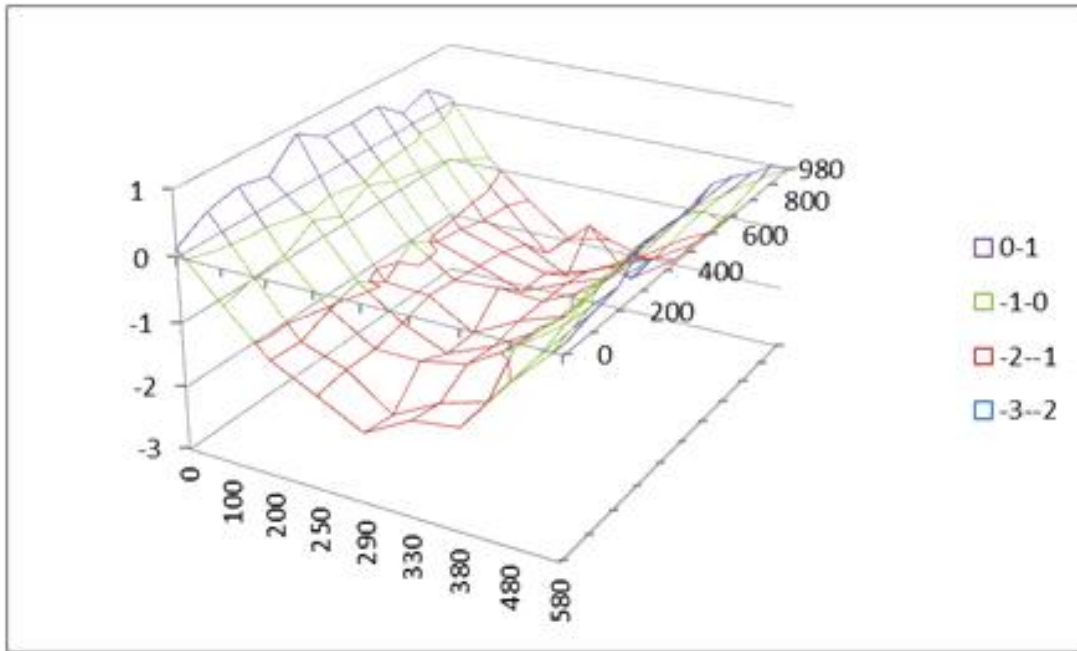


(a) 실험결과

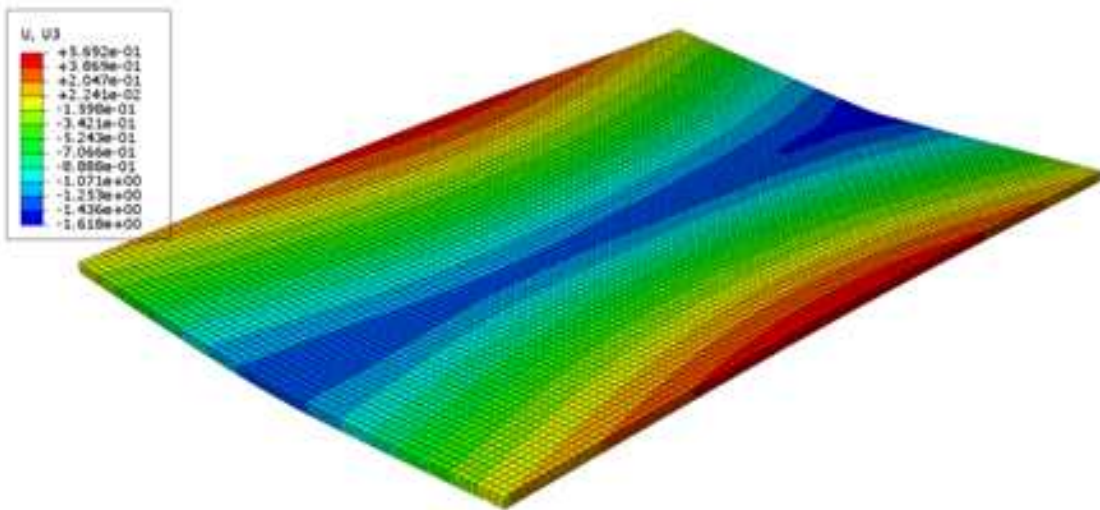


(b) 해석 결과

그림 18 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 400 \text{ mm/min}$)

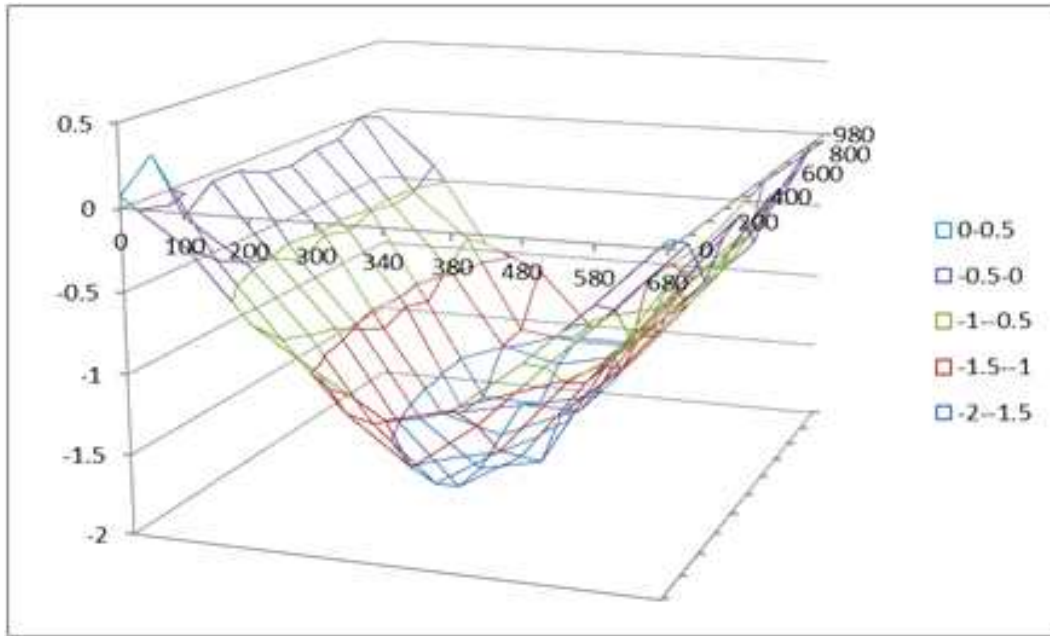


(a) 실험결과

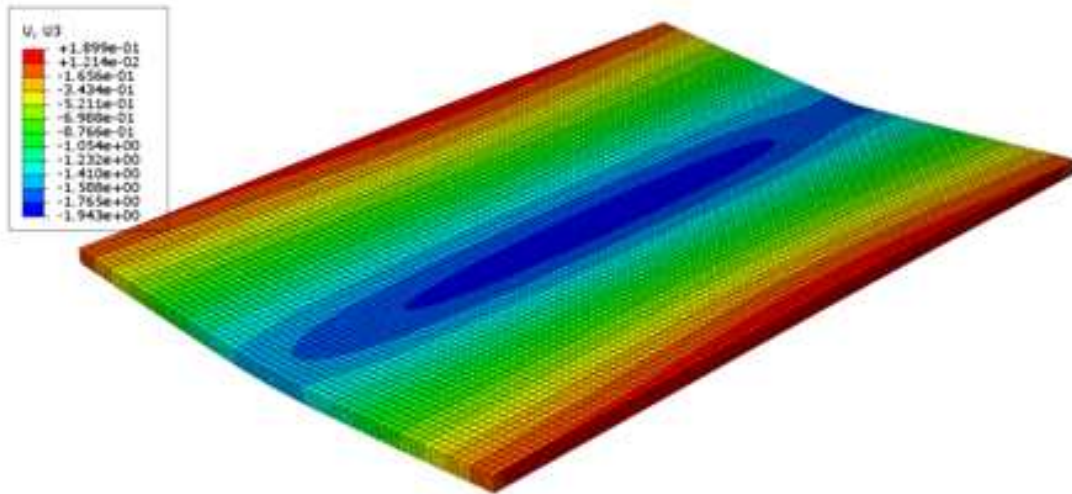


(b) 해석 결과

그림 19 변형 형상 비교 ($t = 13.0 \text{ mm}$, $v = 500 \text{ mm/min}$)

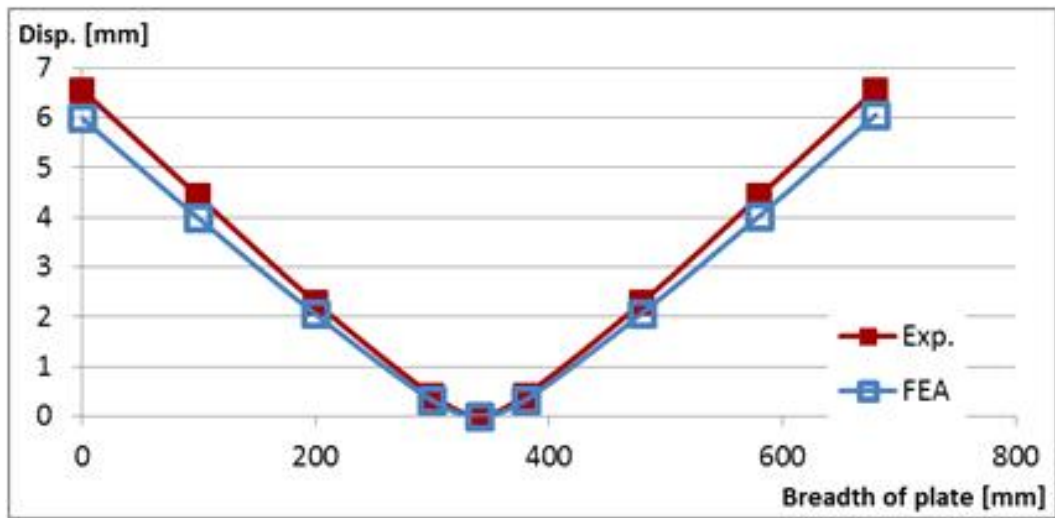


(a) 실험결과

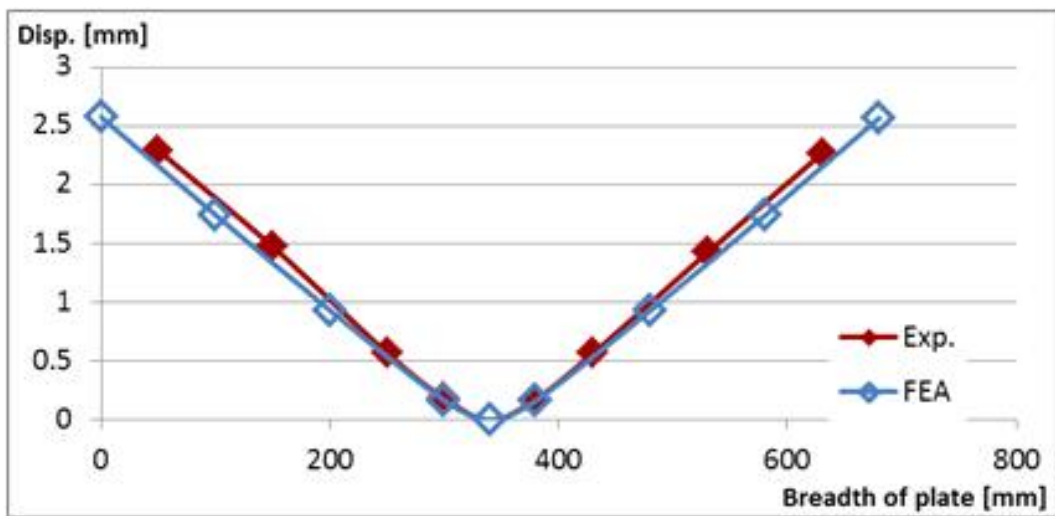


(b) 해석 결과

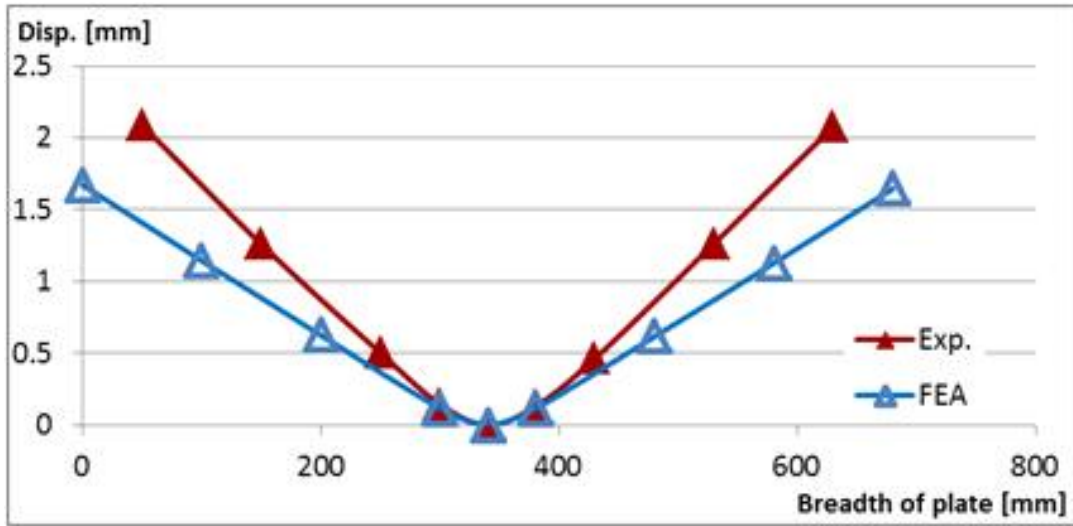
그림 20 변형 형상 비교 ($t = 19.0 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$)



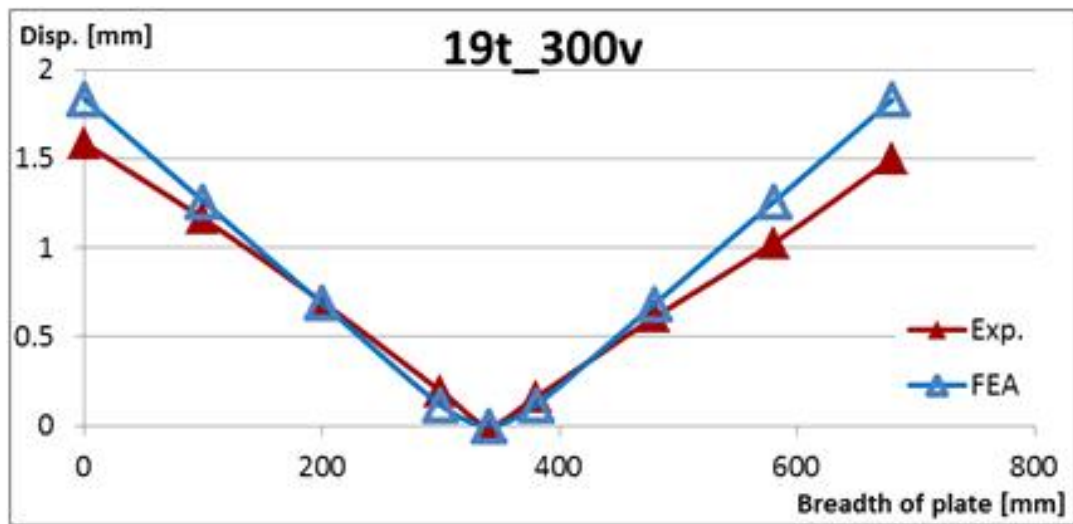
(a) $t = 13.0$ mm, $v = 300$ mm/min



(b) $t = 13.0$ mm, $v = 400$ mm/min



(c) $t = 13.0$ mm, $v = 500$ mm/min



(d) $t = 19.0$ mm, $v = 300$ mm/min

그림 21 실험과 수치해석의 평균 변형량 비교

제4장 Multi torch를 이용한 선상가열 실험 및 해석

4.1 선상가열실험

4.1.1 실험 모델 및 조건

2개 이상의 가열선을 동시에 가열하는 경우 가열선 사이에 열전달 특성 및 열변형 특성의 간섭으로 하나의 가열선을 가열하는 경우와는 열탄소성 해석시 적용할 입열 모델이 달라질 것으로 예상된다. 이에따라 다중가열선에 대한 실험과 열탄소성 해석을 수행하여 그 결과를 분석함으로써 열탄소성 해석시 적용하는 입열 모델을 정의하였고 또한 가열선 사이의 거리가 변형에 주는 영향을 파악하였다. 여기에서는 다중 가열선에 대한 실험을 2차 실험이라 한다.

본 연구의 실험에서는 그림 22와 같이 3개의 토치를 사용하였고, 그림 25는 가열선 시작 측에서 보았을 때 가열 위치를 보인 그림으로, 가열선 사이의 거리를 여기에서는 d 라고 하였다. 가열선 사이의 거리 d 가 가열선 사이에 열전달 및 열변형 특성의 간섭이 발생하는 정도라면, 중앙 가열선인 H1은 양쪽 가열선, H2와 H3 모두의 영향을 받는 경우이고, H2와 H3는 중앙가열선 H1만의 영향을 받는 경우이다. 즉, 두 가열선과 간섭이 있는 경우와 하나의 가열선과 간섭이 있는 경우 열변형 특성이 달라질 것으로 예상되어 3개의 Torch를 사용하였다.

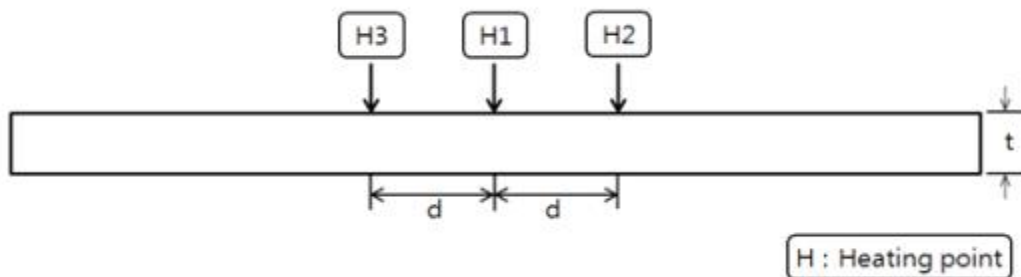


그림 22 다중 선상가열 시험조건

실험시 다중가열선에 대한 선상가열실험에서의 실험조건은 다음과 같이 수행하였다. 가스의 조건은 LPG와 산소에 대해서 싱글토시 시험과 동일한 유량과 유압으로 진행하였으며, 토치팁은 3000번을 사용하고, 시편의 크기는 $1000 \times 740 \times 19\text{mm}$ (가로×세로×두께), 가열속도는 300 mm/min , 토치간 간격은 100, 150, 200mm로 지정하고 동시가열을 수행하며, 냉각은 공냉을 적용하였다.

Single torch에 대한 실험의 경우와 마찬가지로 강판의 이면에서의 온도 이력을 계측하기 위해 그림 23과 같이 가열선 방향으로 중간 위치에서 중앙가열선과 한쪽 측면 가열선 사이에 11곳에 열전대를 부착하여 기록하였다.

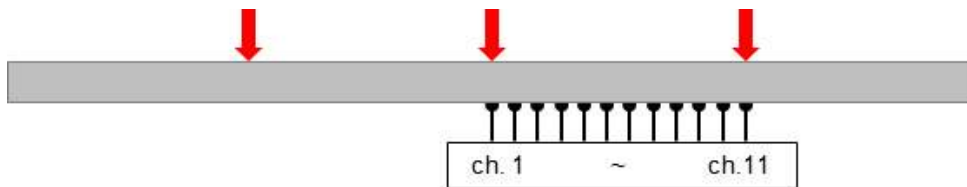
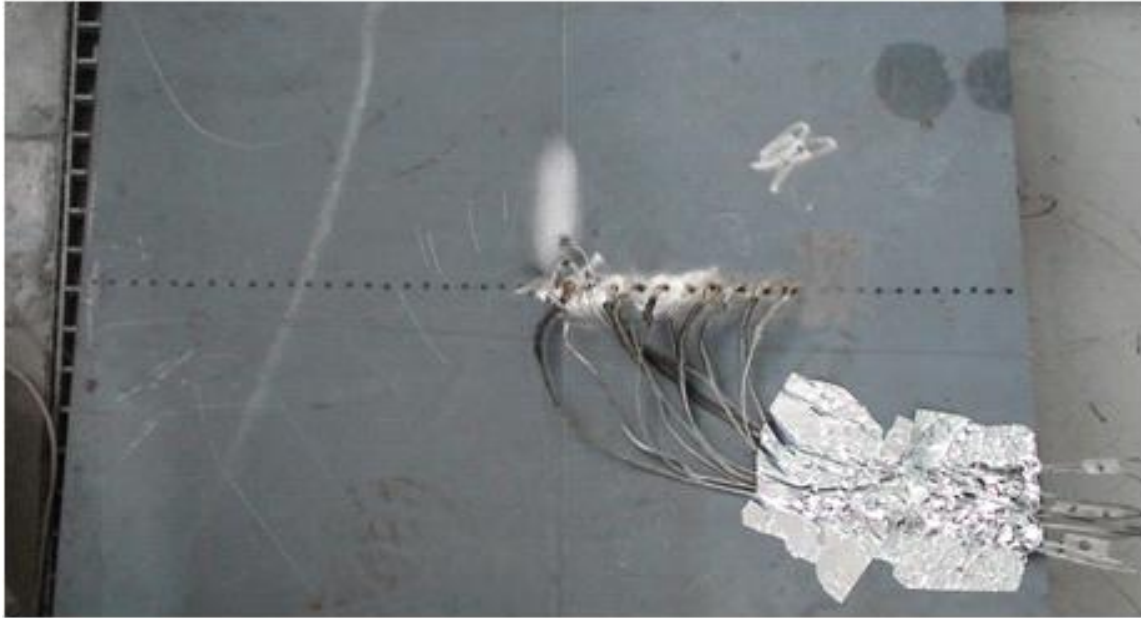
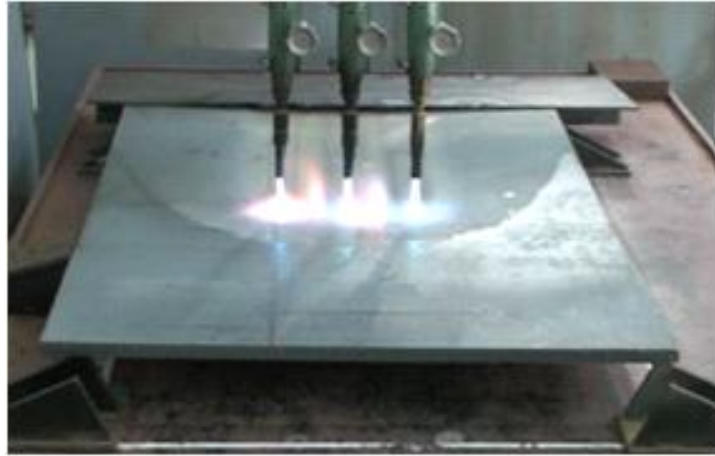


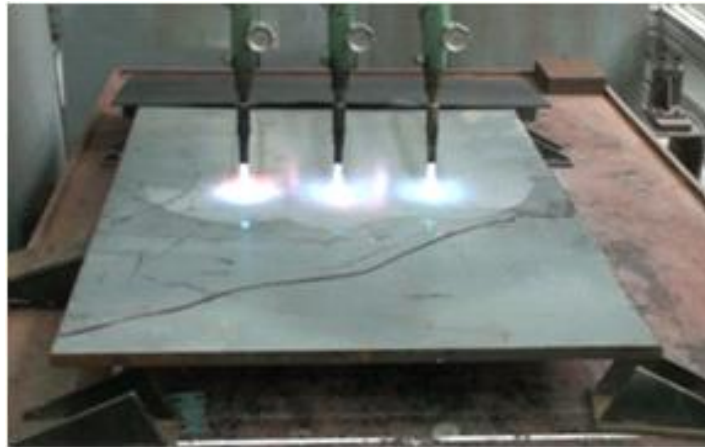
그림 23 시험편의 가열 이면 열전대 부착

4.1.2 실험 결과

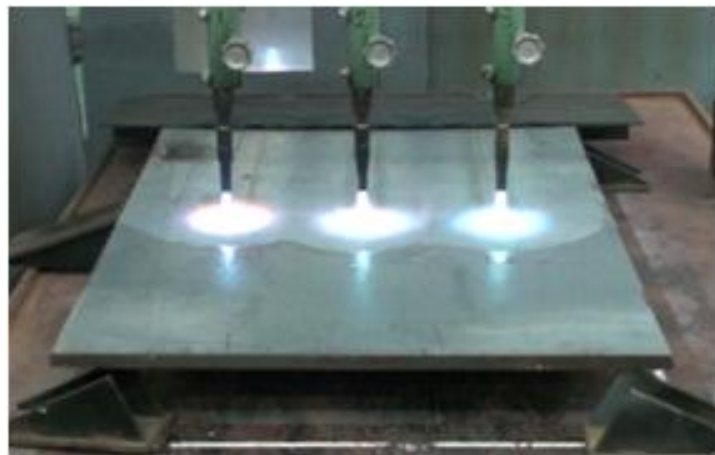
3개의 토치를 사용하여 가열선 사이의 거리 d 가 100 mm, 150 mm 그리고 200 mm인 경우 실험시 토치에서 분사되는 화염의 간섭 정도를 그림 24에 예시하였다. 보는 바와 같이 Torch tip에서 분사되는 화염의 폭이 넓어서 인접 토치들 사이에 화염의 간섭을 뚜렷하게 볼 수 있으며 이는 가열선 사이의 거리 d 가 작을수록 더 두드러짐을 볼 수 있다. 이로서 가열선들 사이에 열전달 및 열변형 현상의 간섭이 예상되어 가열선 사이의 거리 d 와 변형 사이에 뚜렷한 관계를 예상할 수 있다.



(a) 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$



(b) 가열선 사이의 거리 $d=150\text{mm}$



(c) 가열선 사이의 거리 $d=200\text{mm}$

그림 24 토치 3개를 이용한 가열선 거리에 따른 시험

또한, 그림 25(a)와 (b)는 가열선 사이의 거리 d 가 100mm인 경우 실험 전과 후의 모습을 보여주는데, 상당한 변형이 발생했음을 확인할 수 있다.



(a) Before heating



(b) After heating

그림 25 다중선상가열을 이용한 실험 전후 사진(가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$)

그림 26은 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 인 경우 강판의 이면에 부착된 열전대의 위치를 보여 주는 것으로서 중앙 가열선 H1과 그 우측 가열선 H2 사이에 10mm 간격으로 11개의 열전대를 부착한 것이다. 각 채널에서의 온도이력을 그림 30에 예시하였다. 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 인 경우 두 개의 모델에 대해 실험을 수행하였으며, 중앙가열선 H1의 위치를 영(Zero)로 할 때 우측 방향으로 각 채널에서의 최고 온도를 Table 5에 정리하였다. 2회에 걸쳐 수행한 실험에서 측정한 각 위치별 최고 온도간의 최대 차이는 약 14%로서 실험은 성공적으로 수행되었다고 판단된다. 두 모델에 대한 각 채널에서의 평균 값을 표 6에서 확인할 수 있으며 이를 그림 27~28에 도시하였다. 예상한 바와 같이 두 토치 사이의 중간 위치에서 최고온도가 가장 낮으며 토치에 근접할수록 최고온도가 상승함을 볼 수 있다. 실험시 소모되는 가스 및 산소의 유량이 같다면, 각 가열선 H1과 H2 위치에서의 최고 온도가 같아야 하나 채널 1 즉, H2 위치 기준으로 채널 1 즉, H1 위치에서의 최고 온도가 6.9% 정도 낮았다. 이는 H2 보다 H1에서의 가스 및 산소 유량이 약간 적었다는 것을 의미한다. 가스토치의 경우 모든 토치에 대해 가스 및 산소의 유량을 정확하게 같도록 하는 것이 쉽지 않다는 점을 감안 한다면 실험은 합리적으로 이루어 졌다고 볼 수 있다.

표 6 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$)

Point	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Test-1	467.5	469.4	439.6	422.9	418.2	425.9	423.2	447.8	472.1	472.9	-
Test-2	463.43	481.33	459.29	459.36	437.91	435.72	440.78	440.55	476.44	495.30	499.90
Average	465.47	475.36	449.44	441.13	428.06	430.81	431.99	444.17	474.27	484.10	499.90

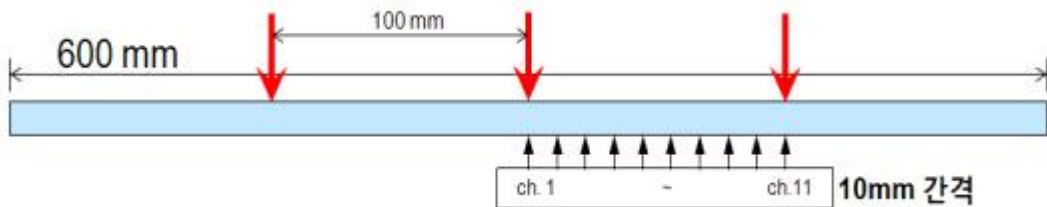


그림 26 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=100\text{mm}$

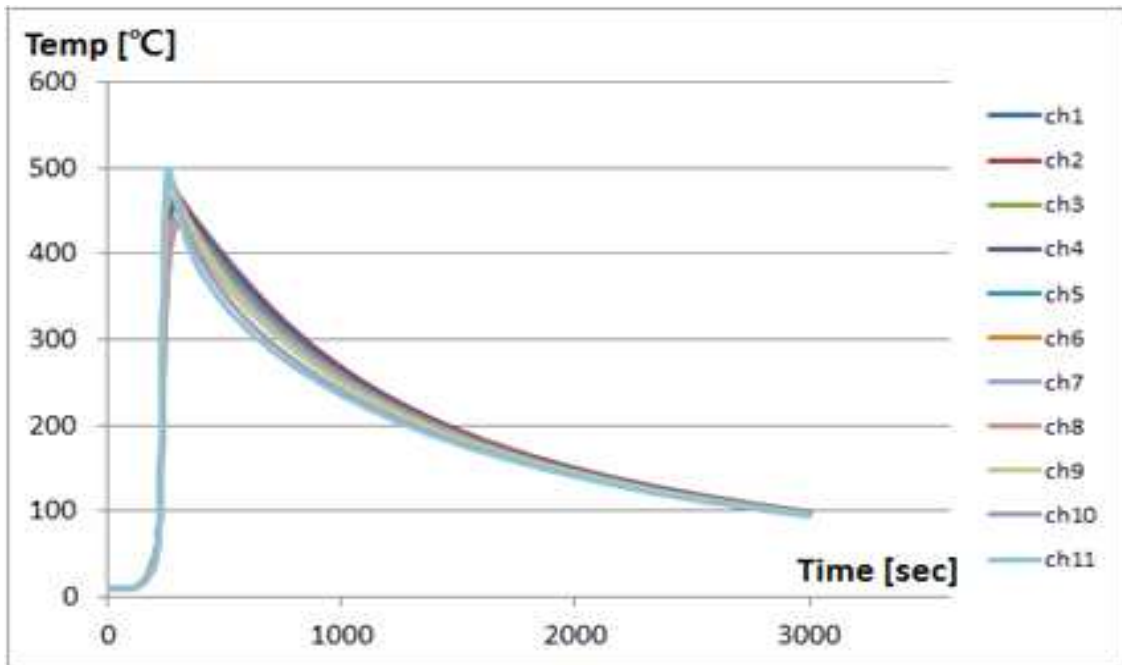


그림 27 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=100\text{mm}$

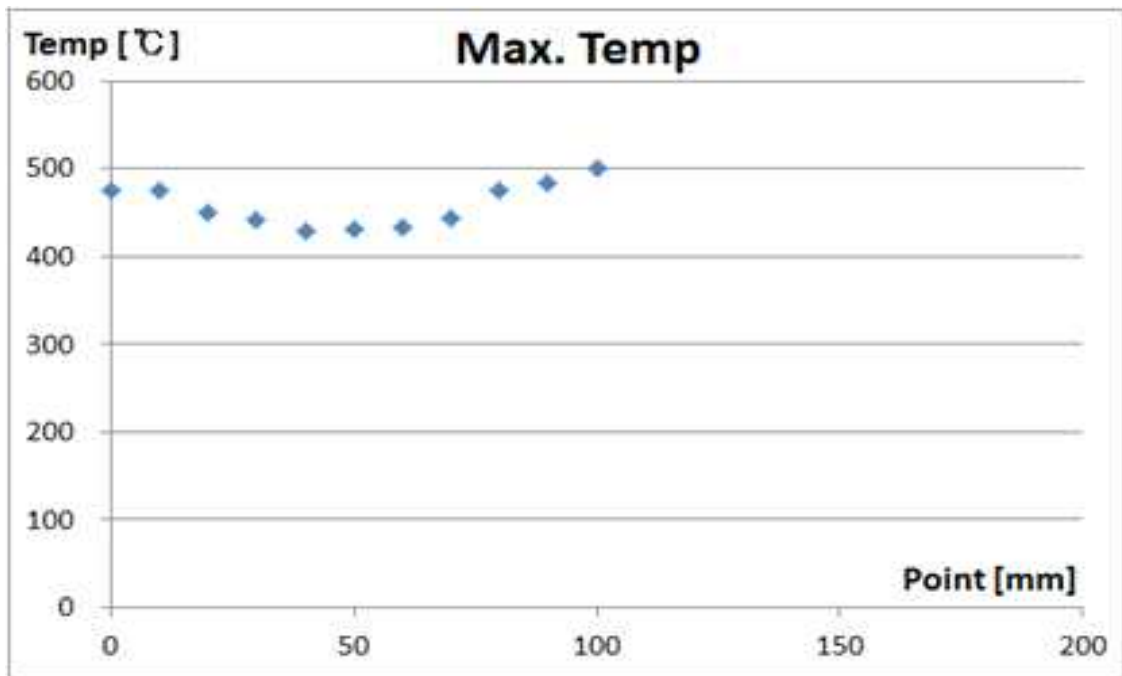


그림 28 각 열전대의 최고온도 : $d=100\text{mm}$

한편 그림 29~31, 그리고 표 7은 가열선 사이의 거리가 $d=150\text{mm}$ 인 경우에 대한 강판의 이면에 부착된 열전대의 위치, 각 채널에서의 온도이력, 각 채널에서의 최고온도 그리고 이를 도식적으로 표현한 것이다. 가열선 사이의 거리 $d=150\text{mm}$ 이므로 중앙 가열선 H1과 그 우측 가열선 H2 사이에 15mm 간격으로 11개의 열전대를 부착하여 온도를 계측하였다. 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 인 경우와 마찬가지로 두 개의 모델에 대해 실험을 수행하였다. 앞의 경우와 마찬가지로 중앙가열선 H1의 위치를 영(Zero)로 할 때 우측 방향으로 각 채널에서의 최고 온도를 정리한 표 7을 보면, 2회에 걸쳐 수행한 실험에서 계측한 최고 온도의 최대 차이는 약 30%로서 두 모델 사이에 상대적인 온도에는 차이가 커 보이지만 절대 값을 기준으로 한다면 최대 30°C 이내로서 실험은 비교적 합리적이었다고 볼 수 있다. 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 인 경우와 마찬가지로 두 토치 사이의 중간 위치에서 최고온도가 가장 낮으며 토치에 근접할수록 최고온도가 상승함을 볼 수 있다. H1과 H2 위치에서의 최고 온도를 비교해 보면, 채널 11 즉, H2 위치 기준으로 채널 1 즉, H1 위치에서의 최고 온도가 6.0% 정도 낮았다. 이는 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 인 경우와 마찬가지로 H2 보다 H1에서의 가스 및 산소 유량이 약간 적었다는 것을 의미하지만, 실험은 합리적으로 이루어졌다고 볼 수 있다.

표 7 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=150\text{mm}$)

Point	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
Test-1	477.7	446.2	380.3	335.7	326	327.5	325.1	338.1	380.1	445.8	-
Test-2	448.49	441.20	388.73	365.06	351.79	349.28	353.63	355.96	394.40	447.02	492.58
Average	463.10	443.70	384.51	350.38	338.89	338.39	339.36	347.03	387.25	446.41	492.58

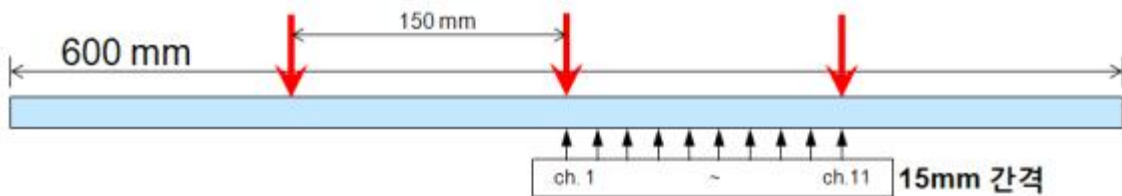


그림 29 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=150\text{mm}$

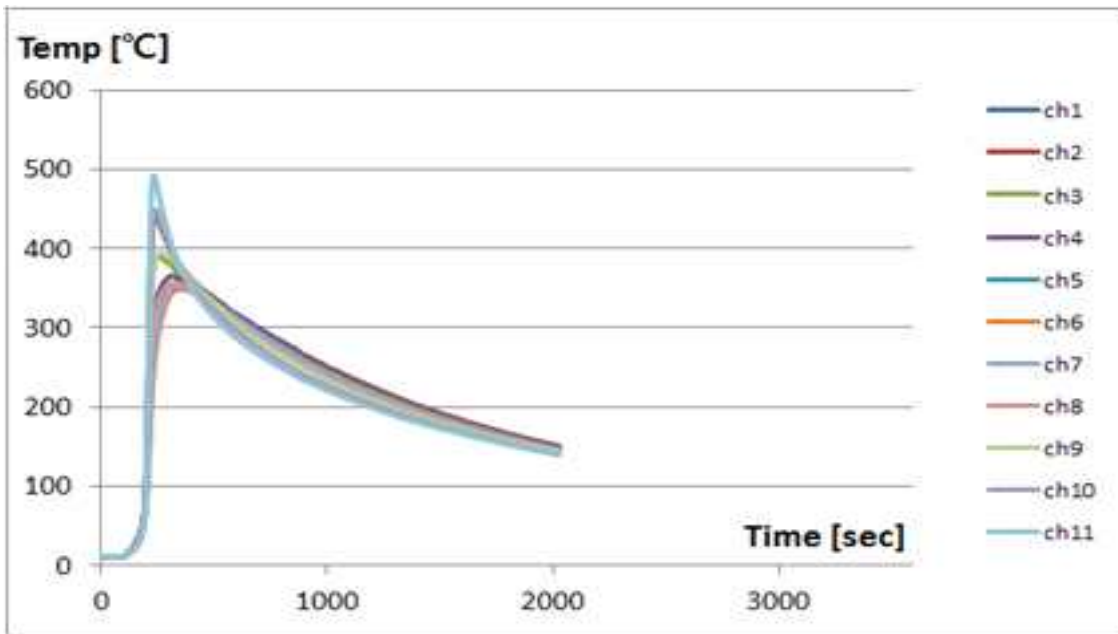


그림 30 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=150\text{mm}$

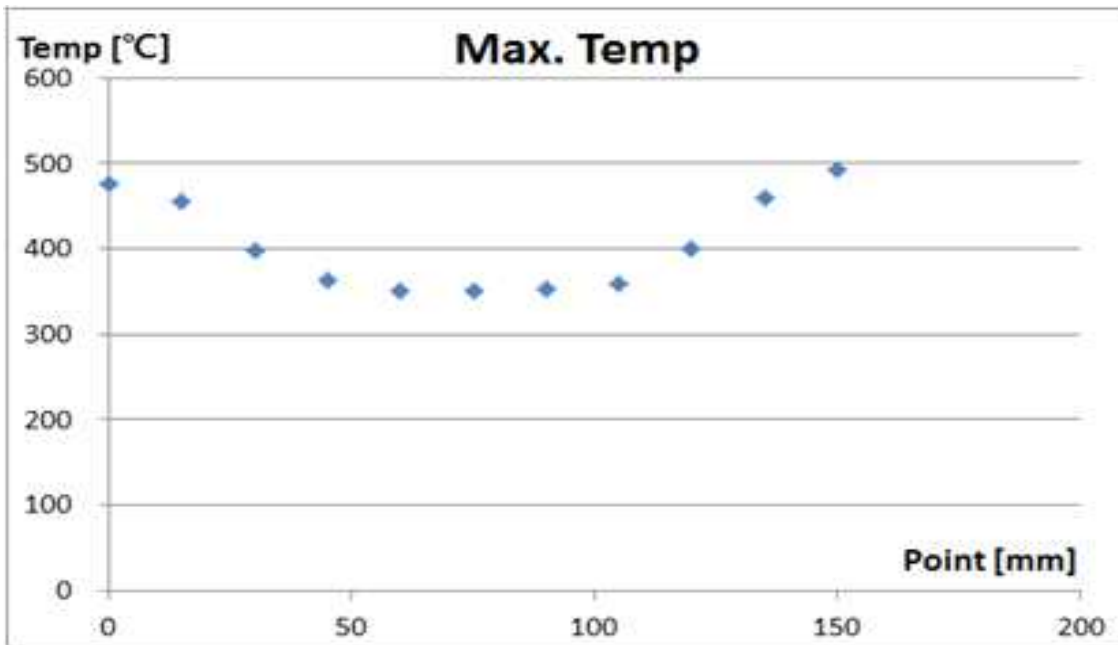


그림 31 각 열전대의 최고온도 : $d=150\text{mm}$

가열선 사이의 거리가 $d=200\text{mm}$ 인 경우에 대한 결과로서 강판의 이면에 부착된 열전대의 위치, 각 채널에서의 온도이력, 각 채널에서의 최고온도 그리고 이를 도식적으로 표현한 것이 각각 그림 32~34 그리고 표 8이다. 가열선 사이의 거리 $d=200\text{mm}$ 이므로 중앙 가열선 H1과 그 우측 가열선 H2 사이에 20mm 간격으로 11개의 열전대를 부착하여 온도를 계측하였는데, 중앙 가열선 위치 H1에서 우측으로 $80, 120$ 그리고 180mm 위치에서는 온도이력이 기록되지 않았다. 실험은 한 개 모델에 대해 수행하였다. 앞의 두 경우와 마찬가지로 중앙가열선 H1의 위치를 영(Zero)로 할 때 우측 방향으로 각 채널에서의 최고 온도를 정리한 표 8을 보면, 가열선 사이의 거리 $d=100\text{mm}$ 와 150mm 인 경우와 마찬가지로 두 토치 사이의 중간 위치에서 최고온도가 가장 낮으며 토치에 근접할수록 최고온도가 상승함을 볼 수 있다. H1과 H2 위치에서의 최고 온도를 비교해 보면, 채널 11 즉, H2 위치와 채널 1 즉, H1 위치에서의 최고 온도의 차이가 불과 1.6% 로서 두 토치에서 소모된 가스와 산소의 유량은 거의 같았을 것이라고 판단된다.

표 8 다중선상가열시 이면 최고온도(가열선 사이의 거리 $d=200\text{mm}$)

Point	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Test-1	453.82	433.11	323.36	287.13	-	267.00	-	282.16	334.05	-	461.14

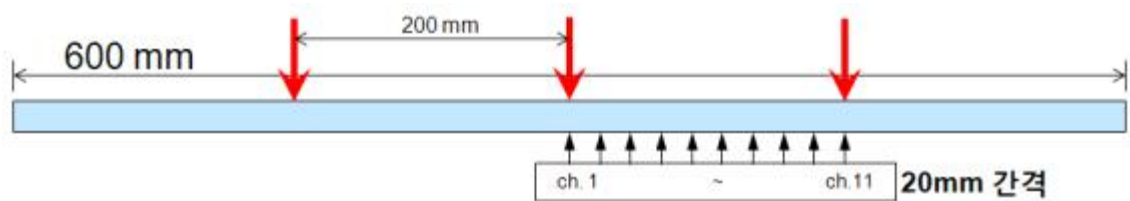


그림 32 가열선 이면의 열전대 부착 위치 : $d=200\text{mm}$

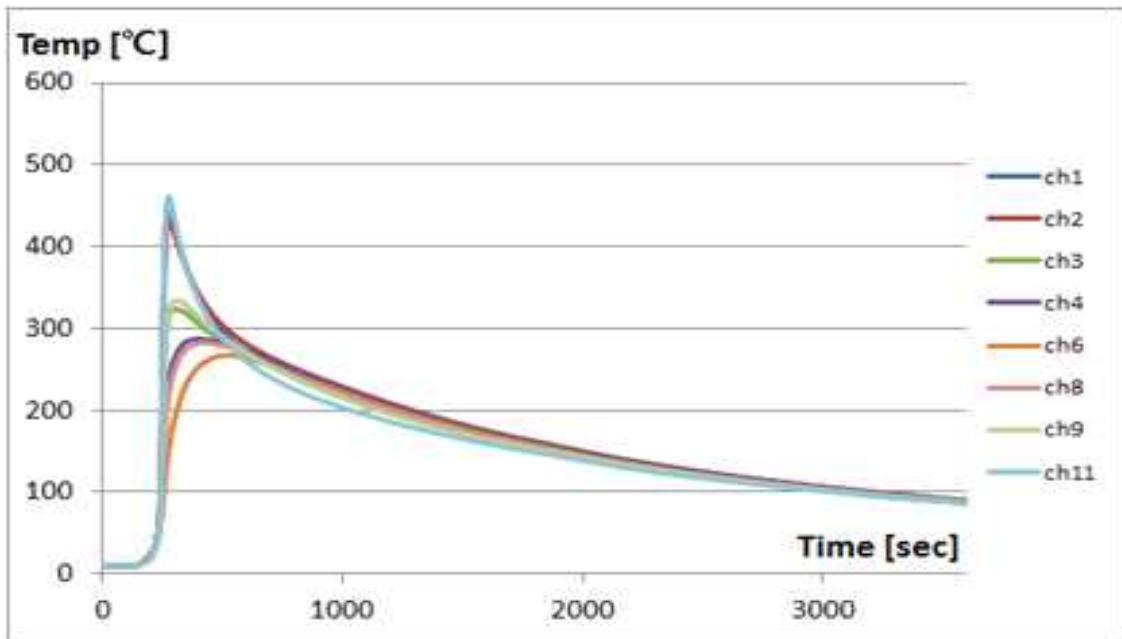


그림 33 각 열전대의 시간에 따른 온도이력 : $d=200\text{mm}$

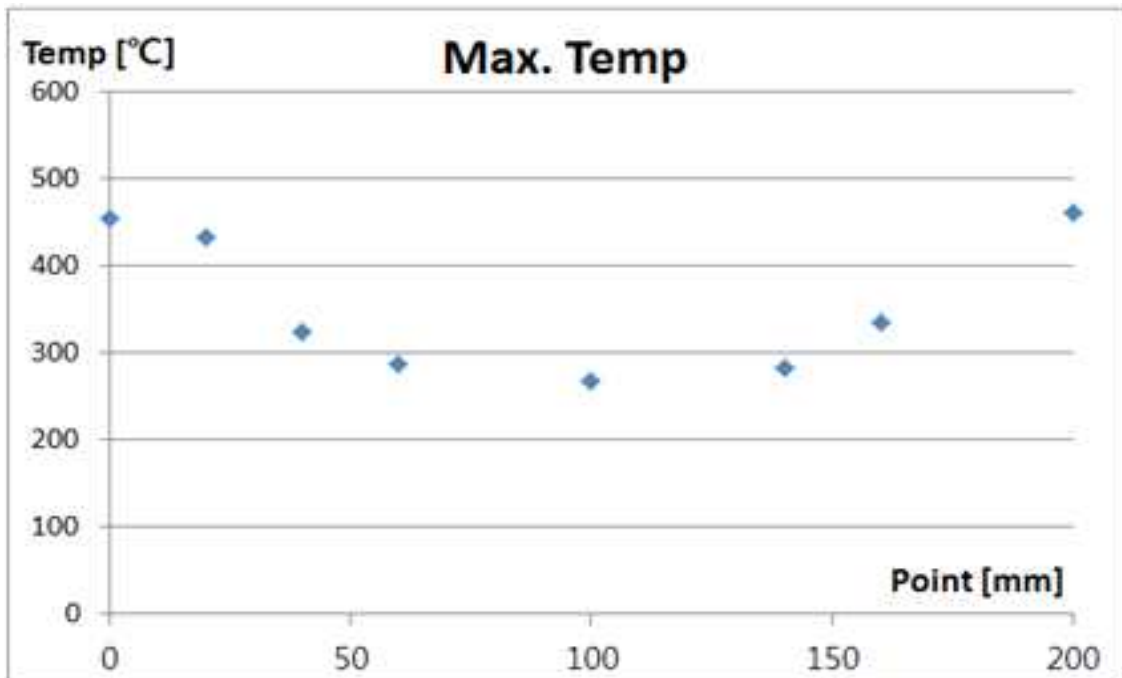
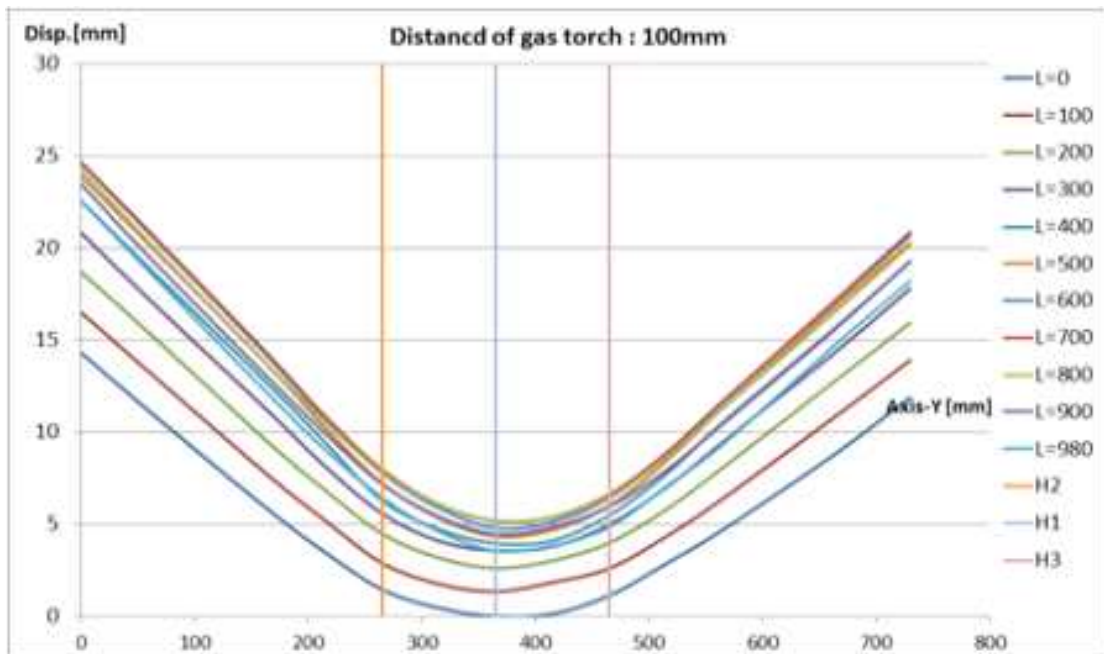


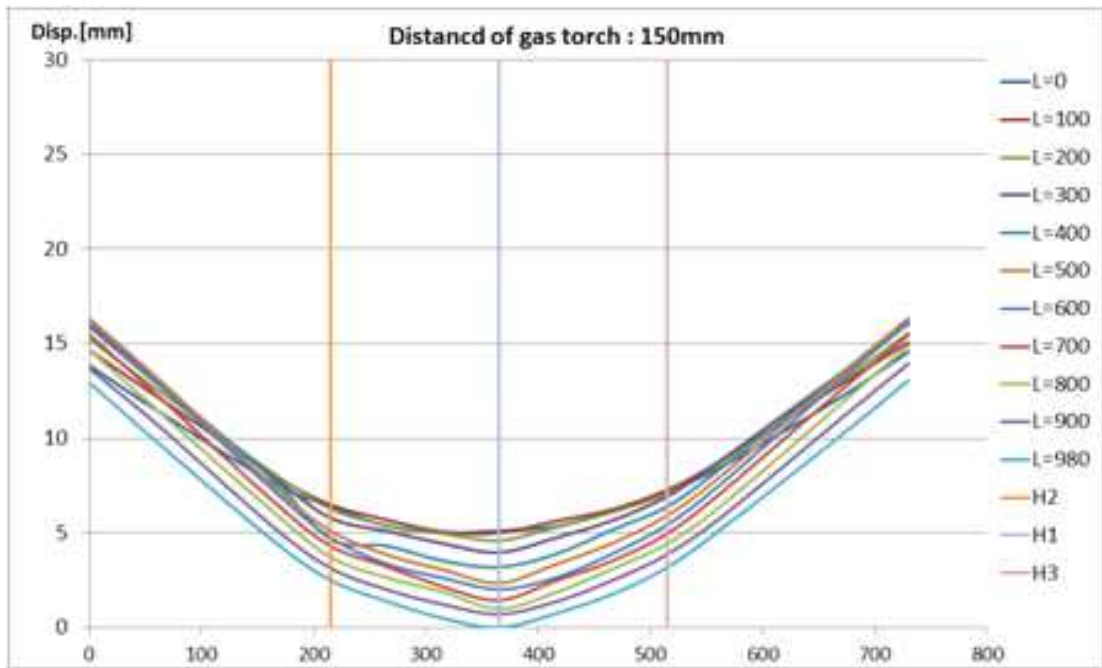
그림 34 각 열전대의 최고온도 : $d=200\text{mm}$

가열선 사이의 거리 d 에 따른 변형 형상을 보이기 위해 실험시 계측한 변위를 가열선 사이의 거리 d 별로 그림 35(a)~(c)에 보였다. 그림 35(a)~(c)에서 $L=0 \sim L=980$ 은 가열선 방향으로의 위치를 표시하는데, 가열선 길이 방향으로 모두 11 곳에서의 횡방향으로의 변형된 형상을 보여 주는 것이다. 가열선 사이의 거리 $d=100$ 과 200 mm인 경우 중앙가열선 H1에 대해 대칭이 되지 않은 것은 선상가열 실험시 판이 완전한 수평상태가 아니었기 때문으로 판단된다. 특히, 가열선 사이의 거리 $d=100$ mm인 경우 가열선 길이방향으로 11 곳에서의 횡각변형의 차이가 다른 경우보다 큰 것으로 나타났다. 가열을 판의 안쪽으로 10 mm 위치에서 시작하고 역시 안쪽으로 10 mm 위치에서 끝내어 종굽힘이 많이 발생한 것을 볼 수 있다. 이러한 가열시 종굽힘 변형량의 증가는 Fig. 29에서 보듯이 가열선 사이의 거리 d 가 각변형에 상당한 영향을 주고 있음을 뚜렷이 확인할 수 있다.

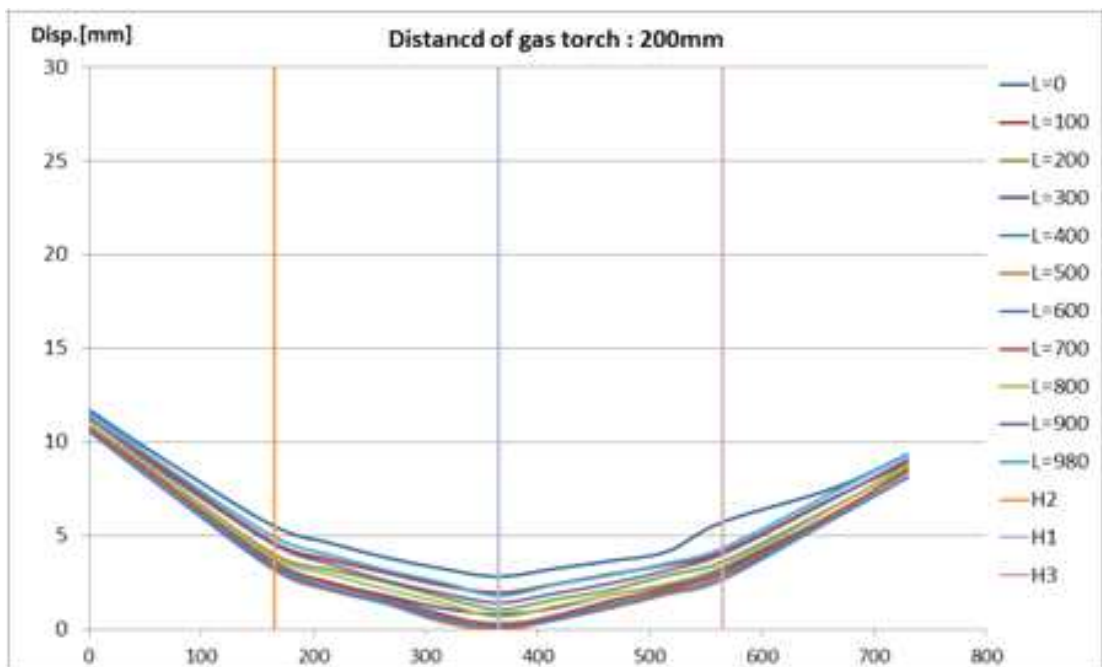
이상의 실험결과로부터 가열선 사이의 거리 d 가 작을수록 최대 각변형량은 증가하는데, 이는 세 토치사이의 거리가 상당히 작기 때문에 세 토치가 마치 폭 200 mm의 화염을 분사시키는 하나의 토치 역할을 함으로써 가열시 종굽힘 변형의 증가와 함께 냉각시 두께 방향의 수축량의 차이의 증가가 중첩되어 발생하는 것으로 보인다. 따라서 동시 가열시 정도 높은 변형 거동 특성을 예측하기 위해서는 토치간의 간격에 따른 열전달 및 열변형 현상의 간섭을 고려한 변형 해석 기법의 정립이 선행되어야 함을 알 수 있다.



(a) $d=100$ mm



(b) $d=150\text{mm}$



(c) $d=200\text{mm}$

그림 35 가열선 거리에 따른 변형 형상

4.2 수치해석

Single torch에 대한 실험과 열탄소성 해석으로부터 정의한 식(7)과 표 4에 주어진 Double Gaussian flux model을 다중 가열선에 적용할 때 두 가열선 사이에 간섭되는 Heat flux의 중첩 여부를 확인하기 위해 그림 39와 같이 두 가지 경우에 대한 검토를 수행하였다.

- (1) Non-overlap model(비중첩모델) : 두 가열선의 Heat flux가 중첩되지 않고 두 가열선 중간 지점까지 Heat flux가 부여되는 경우
- (2) Overlap model(중첩열원) : 두 가열선에 의한 Heat flux가 중첩이 되는 경우

그림 36은 이 두 Flux 모델에 대해 가열선 사이의 거리 d 가 2차 실험의 경우와 동일하게 100, 150 및 200 mm인 세 경우에 대한 Heat flux의 분포이다.[9]

입열모델 2종류에 대해 그림 37은 두 가열선 사이에서 어떤 최대 온도를 비교한 것으로서 'Overlap model'이 실험 시 측정한 온도에 보다 더 근접함을 볼 수 있다. 열변형을 비교하기 위해 평균 변형 형태를 최대 온도를 비교하는 경우와 마찬가지로 그림 38에 표시하였다. 변형 형태의 경우에도 'Overlap model'이 'Non-overlap model' 보다 실험에서 측정한 변형에 더 근접함을 확인할 수 있다.

가열선 사이의 거리 d 에 따른 각변형의 변화를 그림 39에 도식적으로 표시하였다. 그림 39에서 ' ϕ_1 '은 실험에서 측정한 변위로부터 계산된 그림 22에서 'H1'위치에서의 각변형이고 ' $aver.\phi_2\&\phi_3$ '는 'H2'와 'H3' 위치에서의 평균값이다. 'FEA ϕ_1 '은 열탄소성해석 결과를 토대로 계산한 'H1' 위치에서의 각변형이고, 'FEA $\phi_2\&3$ '는 'H2'와 'H3' 위치에서의 평균값이다. 보는 바와 같이 'Overlap model'이 'Non-overlap model' 보다 실험에서 측정한 각변형에 더 근접함을 확인할 수 있다.

이상의 비교 결과로부터 가열선 사이의 간섭의 영향을 반영하기 위해서는 수치해석을 위한 입열모델이 그림 39의 'Overlap model'이 더 타당성이 있음을 확인하였고, 이후의 다중가열선에 대한 열탄소성 해석에서는 입열 모델로서 'Overlap model'을 사용하였다.

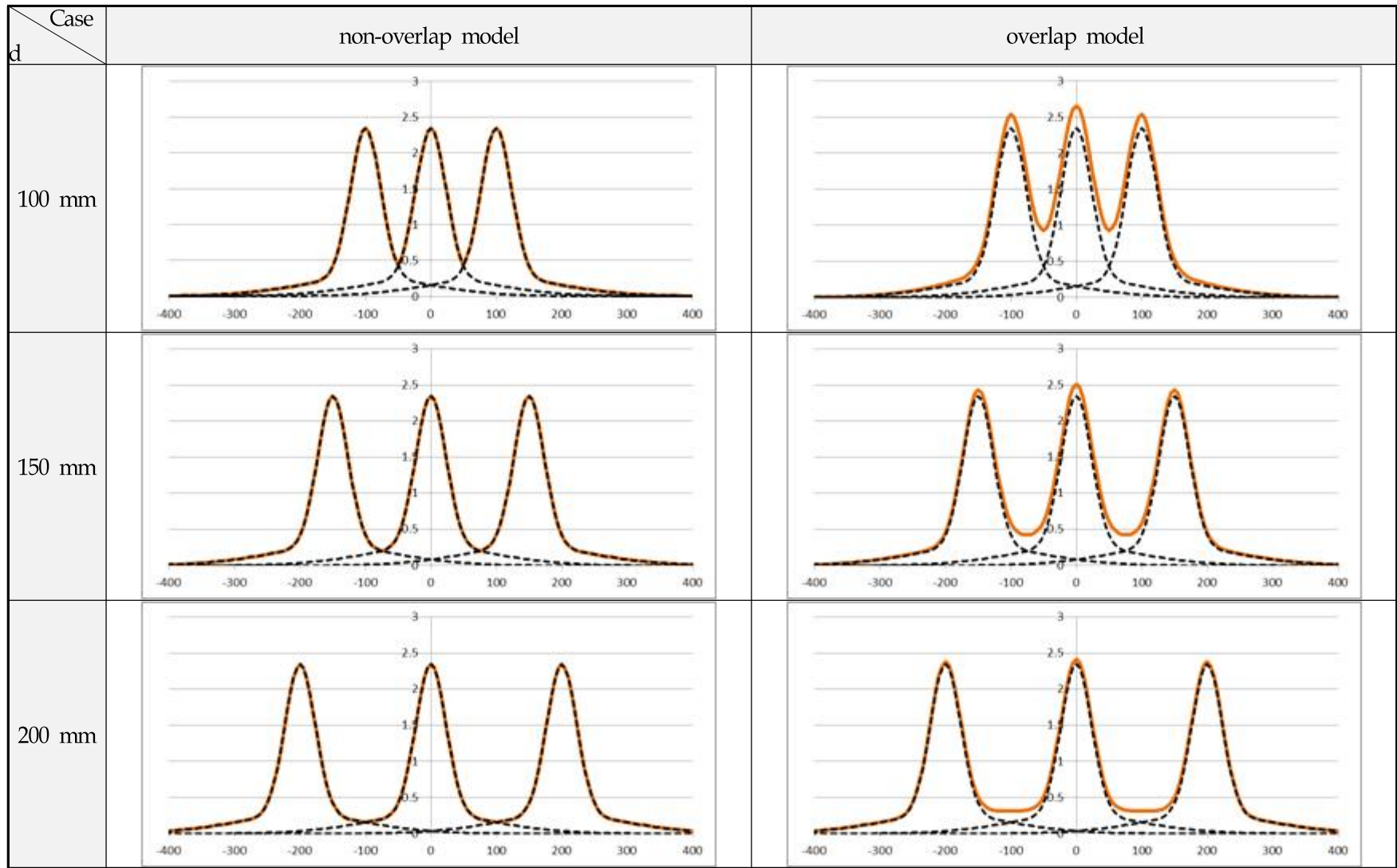


그림 36 다중선상가열의 입열모델 비교((좌)비중첩열원, (우)중첩열원)

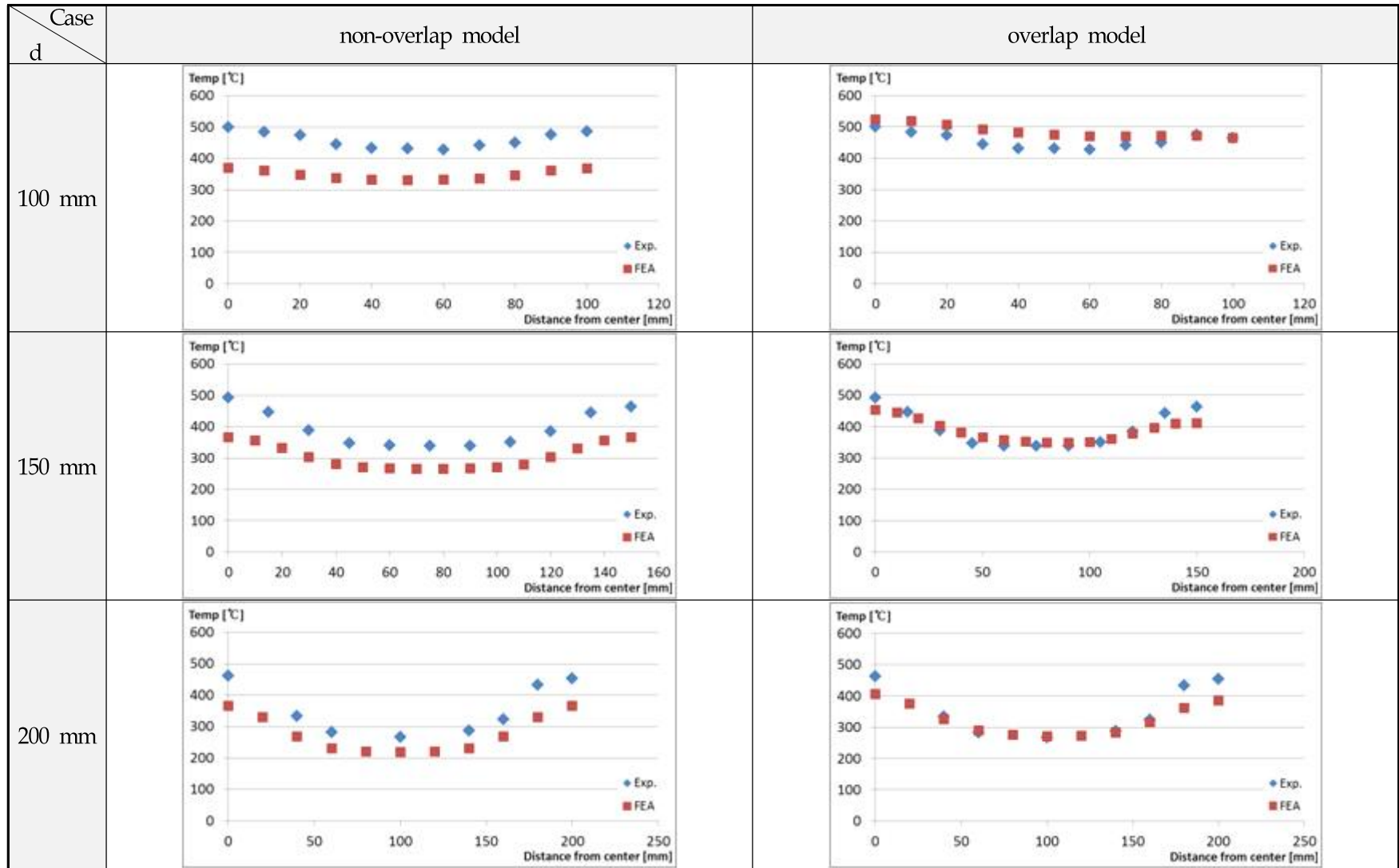


그림 37 입열모델에 따른 다중선상가열시 실험과 수치해석의 최고온도 비교

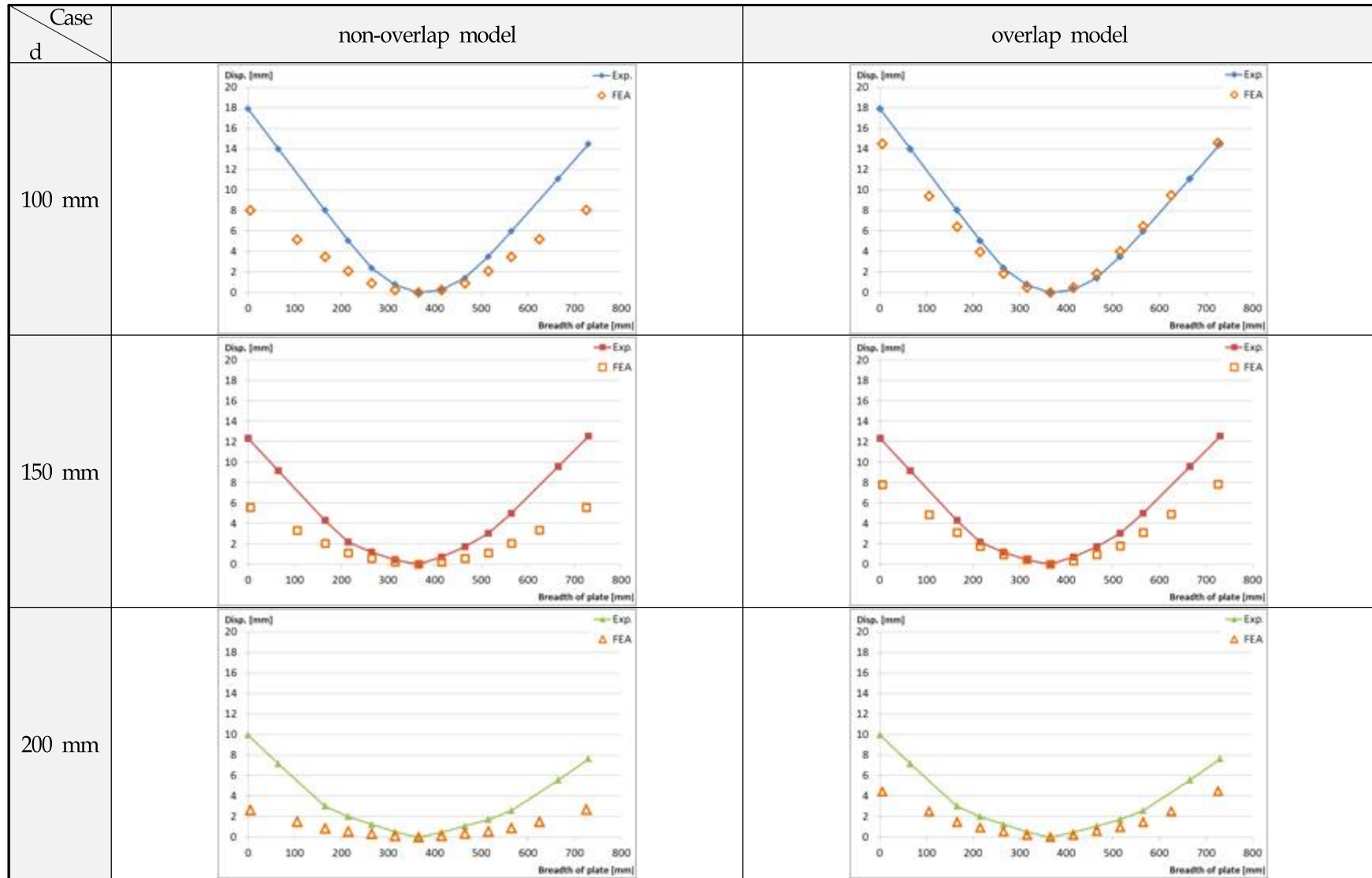
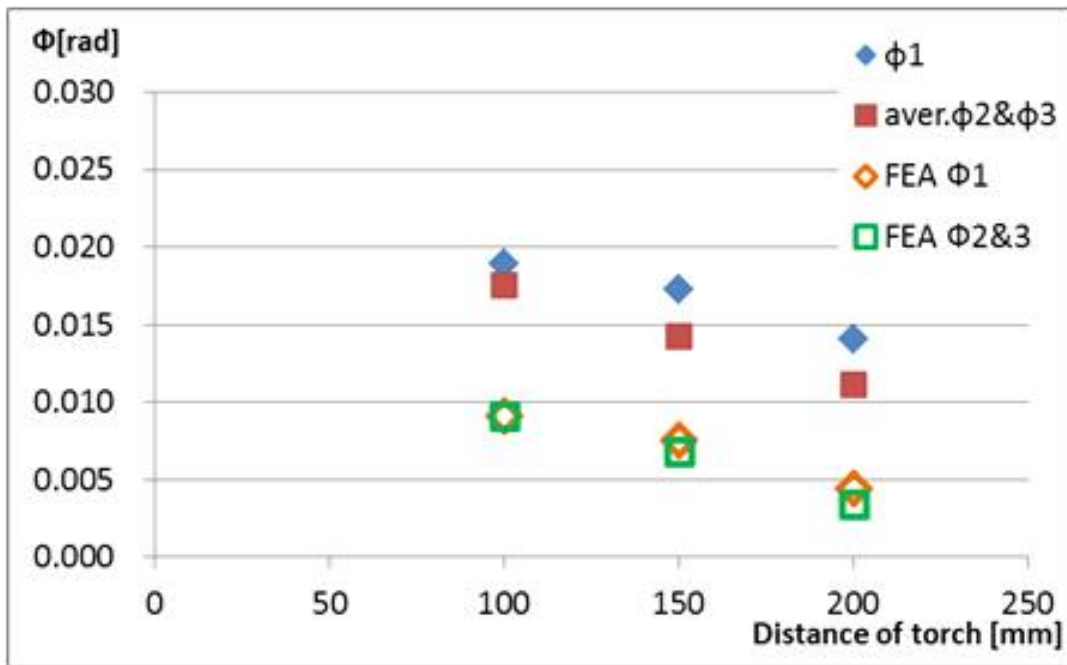
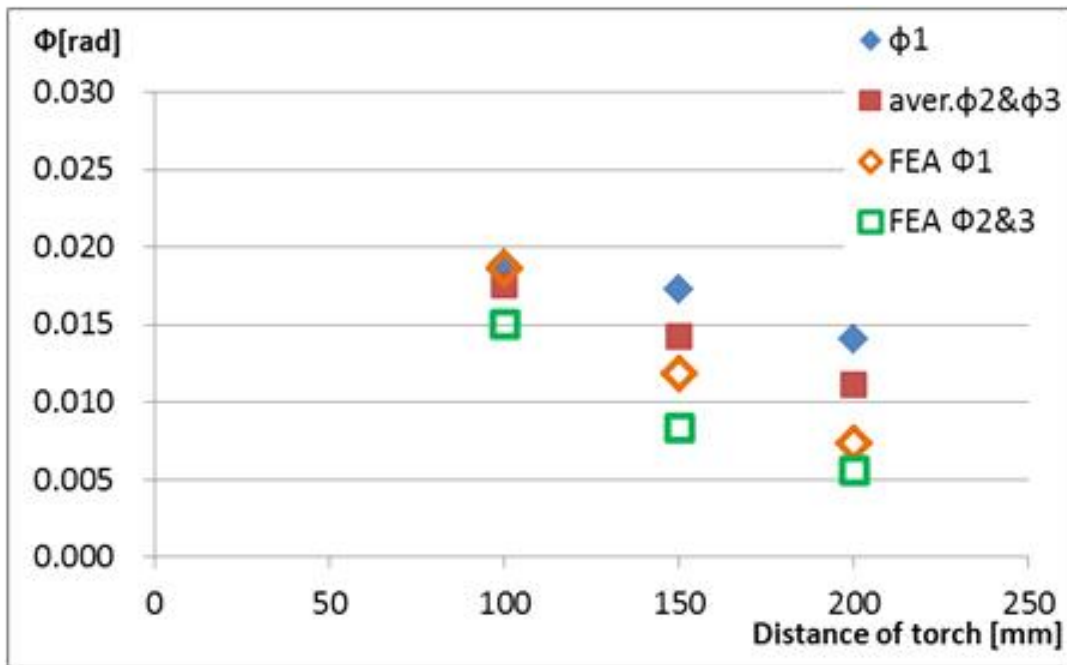


그림 38 입열모델에 따른 다중선상가열시 실험과 수치해석의 변형 형상 비교



(a) Non-overlap model



(b) Overlap model

그림 39 2개의 입열모델에 따른 각변형 비교

제5장 열변형에 대한 다중선상가열의 영향

5.1 다중선상가열에 대한 case study

가스와 산소의 압력이 일정하고 토치 팁에서 강판의 표면까지의 거리 및 냉각방법 등이 일정하다면 선상가열의 결과에 영향을 주는 중요한 인자는 강판의 두께와 가열속도(Heating speed)이다. 또한 다중가열의 경우에는 가열선들 사이의 거리가 또 하나의 중요한 인자가 될 수 있다. 이러한 점들을 감안하여 강판의 두께, 가열속도 그리고 가열선들 사이의 거리 (또는 토치 사이의 거리)를 변화시킨 여러 모델을 대상으로 동시가열에 대한 Case study를 수행하였다.

그림 35에서 'H1'은 'H2'와 'H3' 두 가열선의 영향을 받고, 'H2'와 'H3'는 'H1' 한 가열선의 영향을 받으므로 따라서 인접 두 가열선의 영향을 받는 경우와 한 가열선의 영향을 받는 경우 열변형에 미치는 영향이 다를 것으로 생각된다.

Case study를 위한 모델들은 표 9와 같이, 3 가지 두께(13, 16, 19 mm)에 대해 가열속도 3가지 그리고 가열선 사이의 거리를 6 가지로 변화시킨 모두 54 모델에 대한 열탄소성 해석을 수행하였다.

해석 결과로서 각변형과 횡수축을 각각 표 10과와 11에 열거하였다. 표 10에서 각변형은 'Radian' 단위로 표시한 것이고, 표 11에서 횡수축은 두께로 무차원화 시킨 것이다. 표 10(a)와 표 11(a)는 그림 35의 'H1'위치 즉, 두 개의 가열선의 영향을 받는 경우이고, 표 10(b)와 표 11(b)는 'H2' 또는 'H3' 즉, 하나의 가열선의 영향을 받는 경우이다. 이들을 판 두께별로 그림 43 ~ 그림 46에 도식적으로 표현하였다. 보는 바와 같이 각변형과 횡수축 모두 가열선 사이의 거리 d 가 증가할수록 점차적으로 감소함을 볼 수 있다.

그림 47과 48은 표 9에서 3 가지 판 두께에 대해 동일한 가열속도를 가질 때, 그림 25의 'H1' 위치에서의 각변형과 횡수축의 가열선 사이의 거리 d 에 따른 변화를 보여주는 것이다. 본 Case study의 결과만을 참고할 때 아래와 같이 분석된다.

가열선 사이의 거리 d 가 작을수록 가열선 사이의 열전달 및 열변형 특성의 간섭으로 각변형 및 횡수축이 증가하고,

가열선 사이의 거리가 약 200 mm 까지 증가할 때 열변형이 급격히 감소하며,

가열선 사이의 거리가 약 400 mm 이상이 되면 가열선들 사이의 열전달 및 열변형 특성 간섭현상이 없는 것으로 확인된다.

표 9 Case study 모델

Size ($L \times B \times t$ mm)	Heating speed (mm/min)	Distance between torches (mm)
1000 × 2000 × 13	400, 500, 600	100, 150, 200, 300, 400, 500
1000 × 2000 × 16	300, 400, 500	
1000 × 2000 × 19	300, 400, 500	

표 10 다중선상가열 수치해석의 각변형 결과, ϕ (unit : radian)

(a) In case that heating line is interfaced by two sides

t	Heating speed, v (mm/min)	Distance between torches, d (mm)					
		100	150	200	300	400	500
13	400	0.0298	0.0244	0.0190	0.0122	0.0102	0.0098
	500	0.0216	0.0161	0.0111	0.0063	0.0053	0.0050
	600	0.0157	0.0104	0.0062	0.0032	0.0029	0.0029
16	300	0.0283	0.0244	0.0198	0.0129	0.0108	0.0103
	400	0.0194	0.0144	0.0100	0.0060	0.0053	0.0053
	500	0.0131	0.0082	0.0049	0.0031	0.0030	0.0030
19	300	0.0196	0.0156	0.0116	0.0076	0.0069	0.0068
	400	0.0125	0.0083	0.0055	0.0038	0.0036	0.0036
	500	0.0080	0.0047	0.0032	0.0022	0.0021	0.0021

(b) In case that heating line is interfaced by one sides

t	Heating speed, v (mm/min)	Distance between torches, d (mm)					
		100	150	200	300	400	500
13	400	0.0201	0.0169	0.0144	0.0110	0.0099	0.0097
	500	0.0163	0.0119	0.0086	0.0058	0.0051	0.0049
	600	0.0125	0.0075	0.0047	0.0030	0.0029	0.0029
16	300	0.0216	0.0181	0.0154	0.0116	0.0104	0.0101
	400	0.0160	0.0113	0.0081	0.0056	0.0052	0.0052
	500	0.0107	0.0062	0.0040	0.0030	0.0030	0.0030
19	300	0.0171	0.0127	0.0097	0.0072	0.0067	0.0067
	400	0.0105	0.0065	0.0045	0.0036	0.0036	0.0036
	500	0.0061	0.0035	0.0025	0.0021	0.0021	0.0021

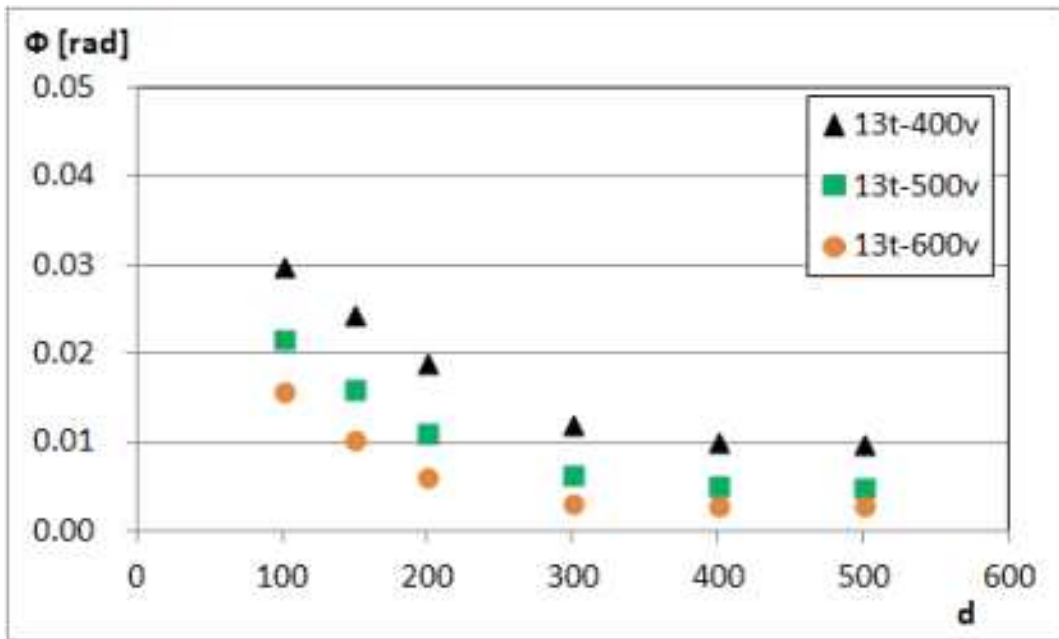
표 11 다중선상가열 수치해석의 횡수축 결과, S/t

(a) In case that heating line is interfaced by two sides

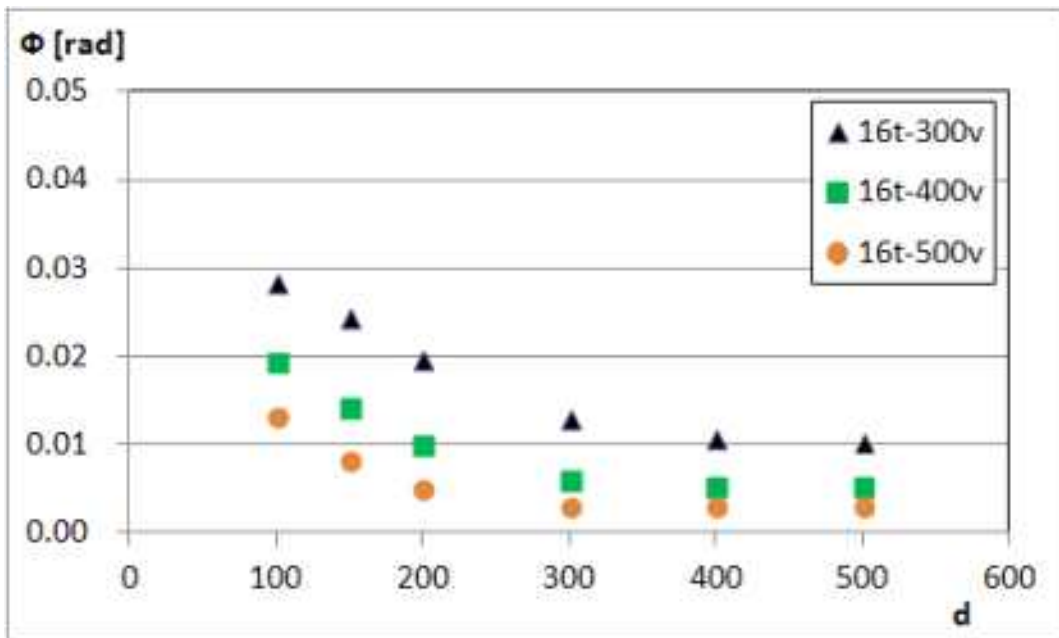
t	Heating speed, v (mm/min)	Distance between torches, d (mm)					
		100	150	200	300	400	500
13	400	0.0200	0.0150	0.0119	0.0083	0.0074	0.0071
	500	0.0113	0.0083	0.0062	0.0041	0.0039	0.0038
	600	0.0073	0.0051	0.0035	0.0021	0.0021	0.0021
16	300	0.0224	0.0176	0.0140	0.0092	0.0078	0.0074
	400	0.0103	0.0077	0.0058	0.0038	0.0035	0.0035
	500	0.0060	0.0042	0.0028	0.0018	0.0017	0.0017
19	300	0.0126	0.0095	0.0073	0.0049	0.0043	0.0043
	400	0.0061	0.0044	0.0031	0.0020	0.0019	0.0019
	500	0.0036	0.0024	0.0015	0.0010	0.0009	0.0009

(b) In case that heating line is interfaced by one sides

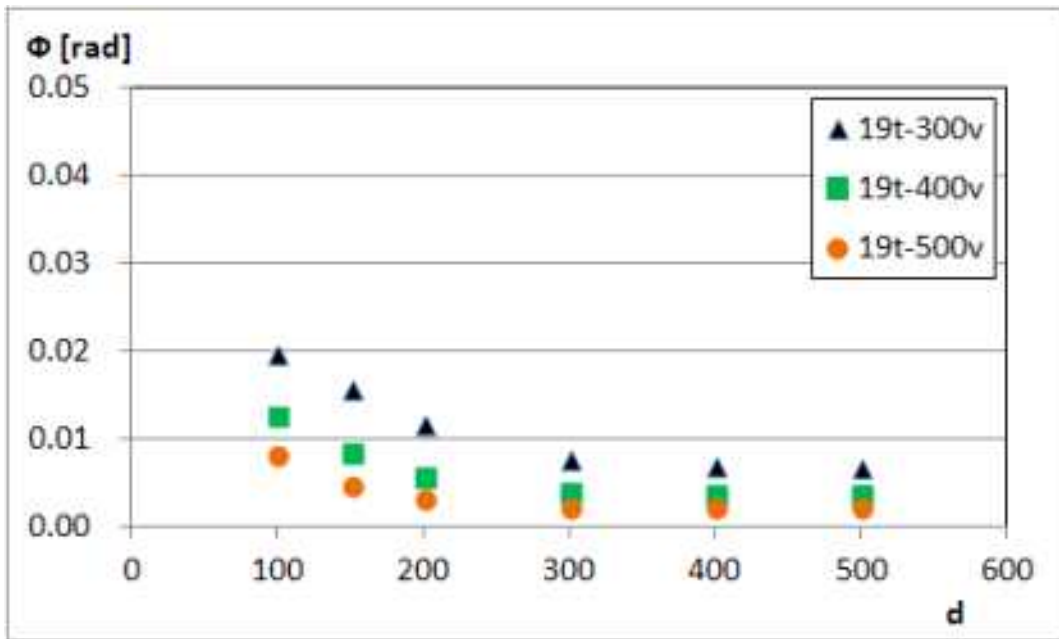
t	Heating speed, v (mm/min)	Distance between torches, d (mm)					
		100	150	200	300	400	500
13	400	0.0157	0.0111	0.0093	0.0082	0.0082	0.0082
	500	0.0092	0.0061	0.0049	0.0042	0.0042	0.0042
	600	0.0057	0.0035	0.0026	0.0022	0.0023	0.0023
16	300	0.0153	0.0137	0.0099	0.0086	0.0084	0.0084
	400	0.0077	0.0054	0.0045	0.0038	0.0038	0.0038
	500	0.0043	0.0028	0.0022	0.0019	0.0019	0.0019
19	300	0.0085	0.0063	0.0054	0.0046	0.0046	0.0046
	400	0.0042	0.0029	0.0023	0.0020	0.0020	0.0020
	500	0.0023	0.0015	0.0012	0.0010	0.0010	0.0010



(a) $t = 13$ mm

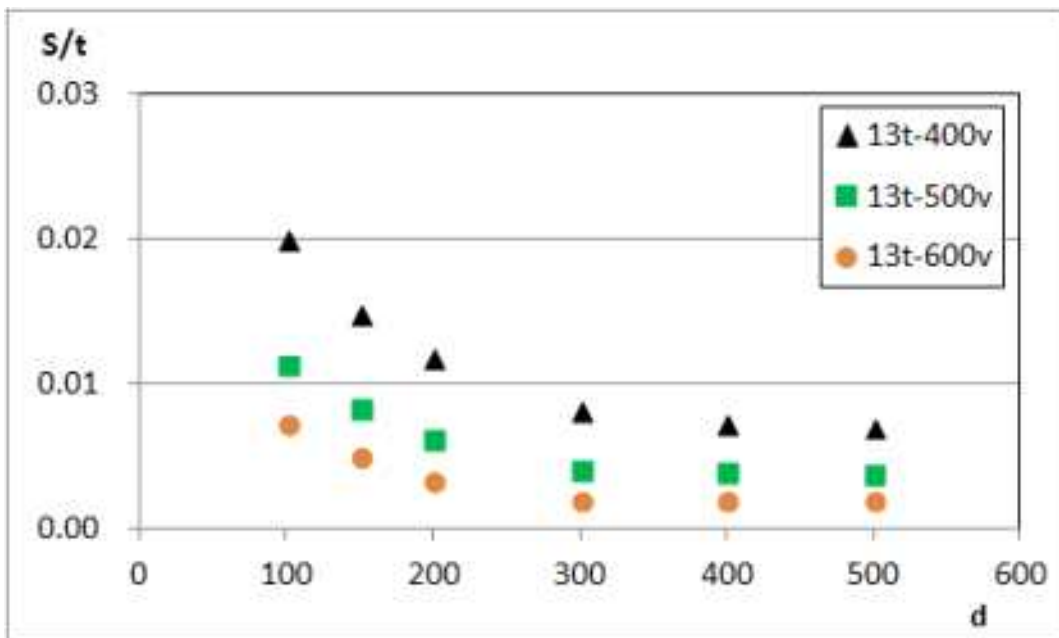


(b) $t = 16$ mm

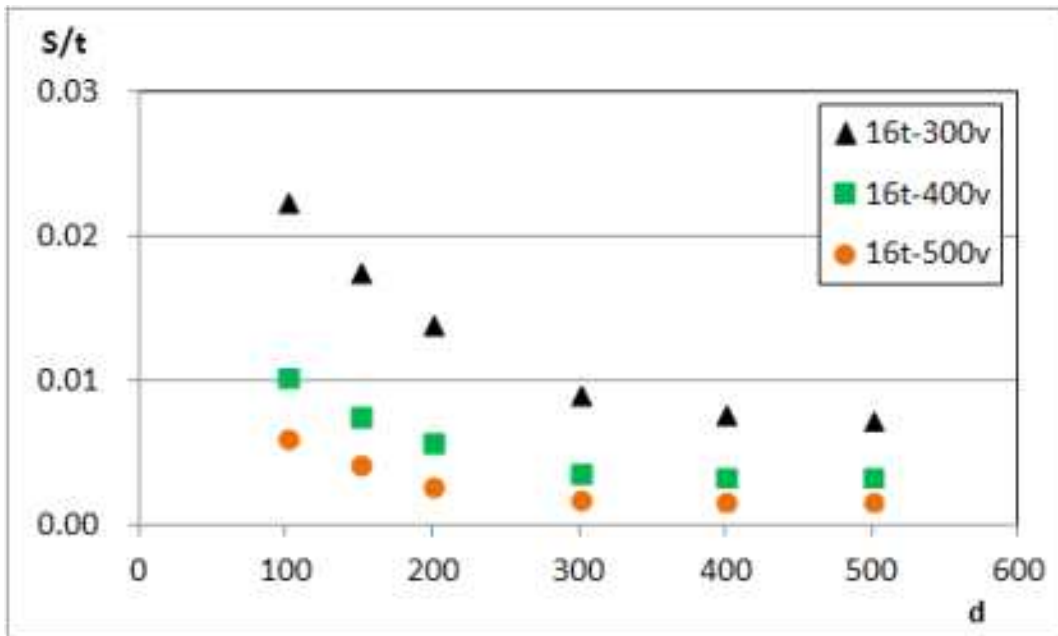


(c) $t = 19$ mm

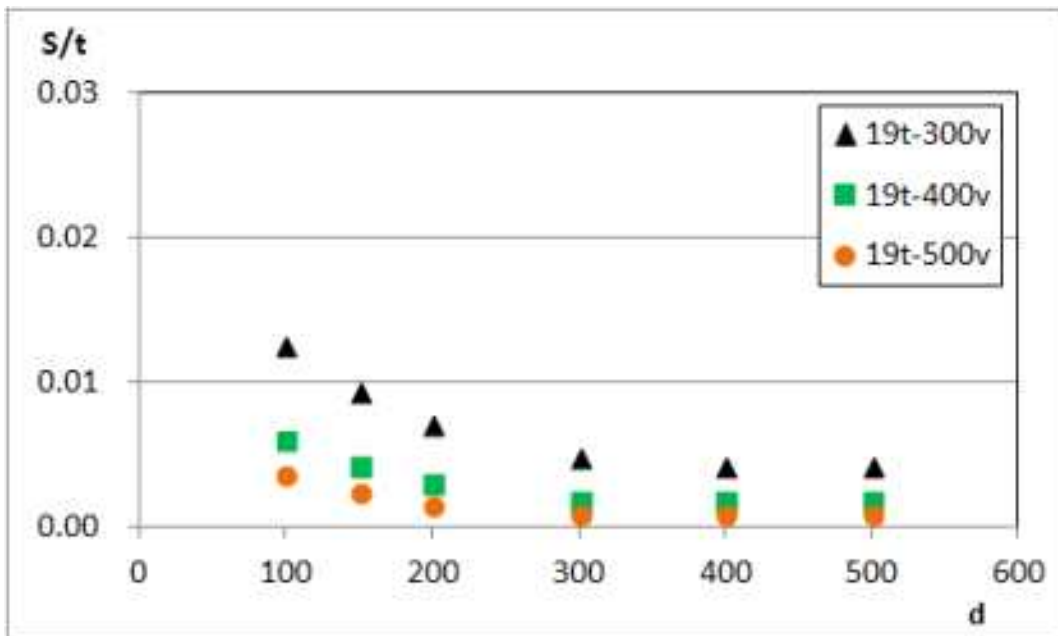
그림 40 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 각변형



(a) $t = 13$ mm

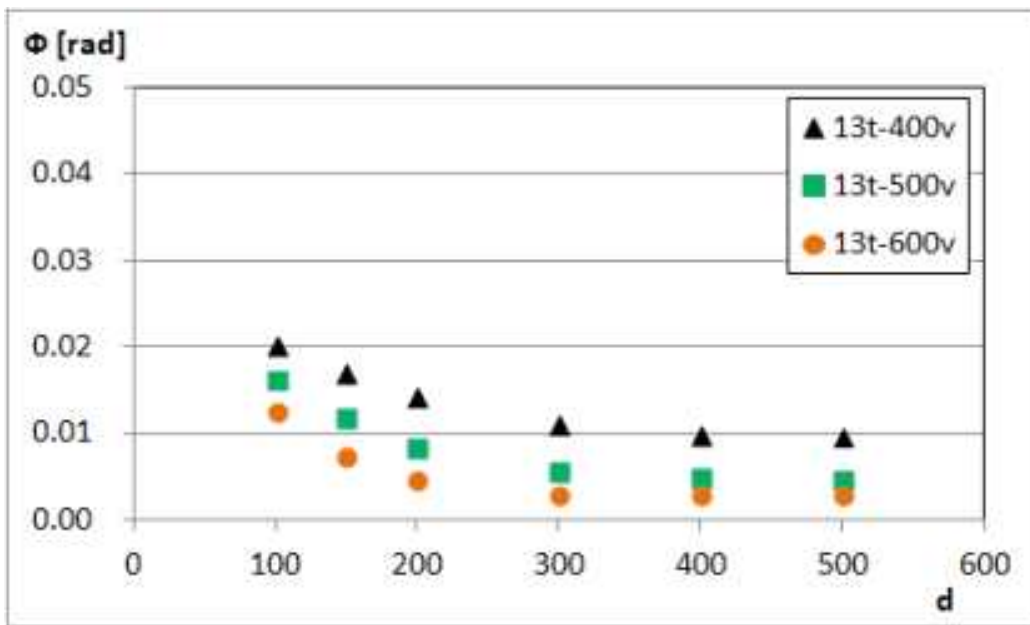


(b) $t = 16 \text{ mm}$

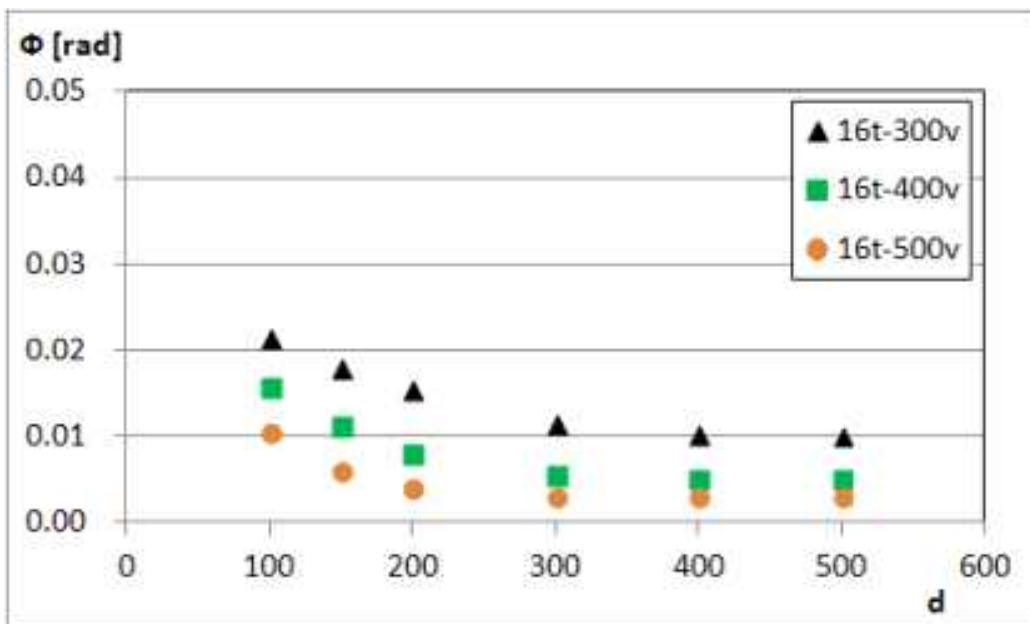


(c) $t = 19 \text{ mm}$

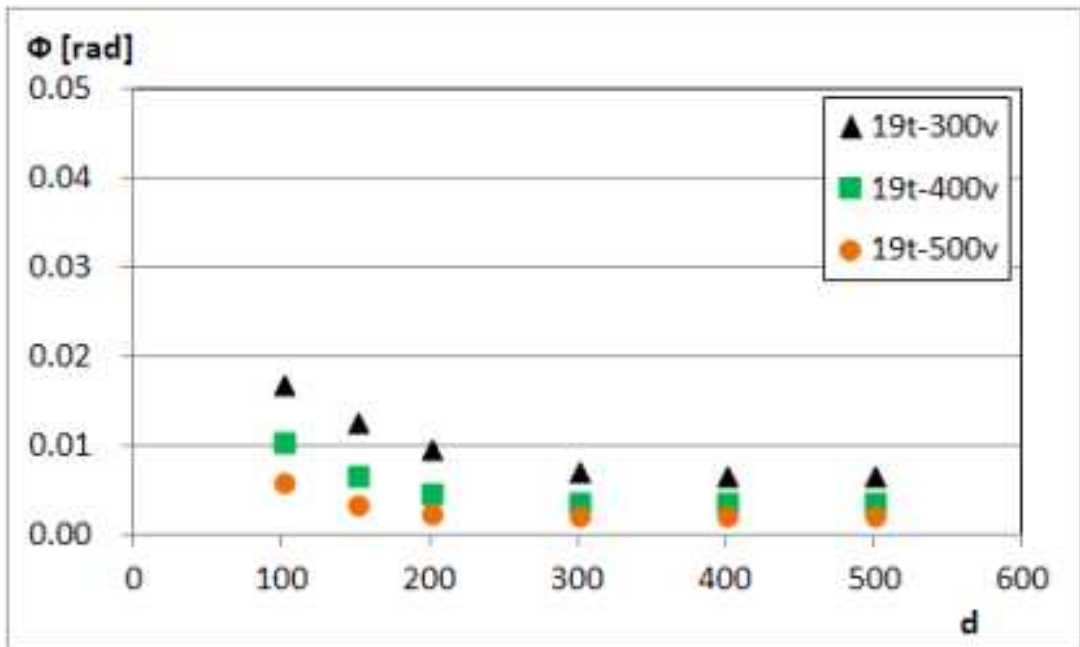
그림 41 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 횡수축



(a) $t = 13 \text{ mm}$

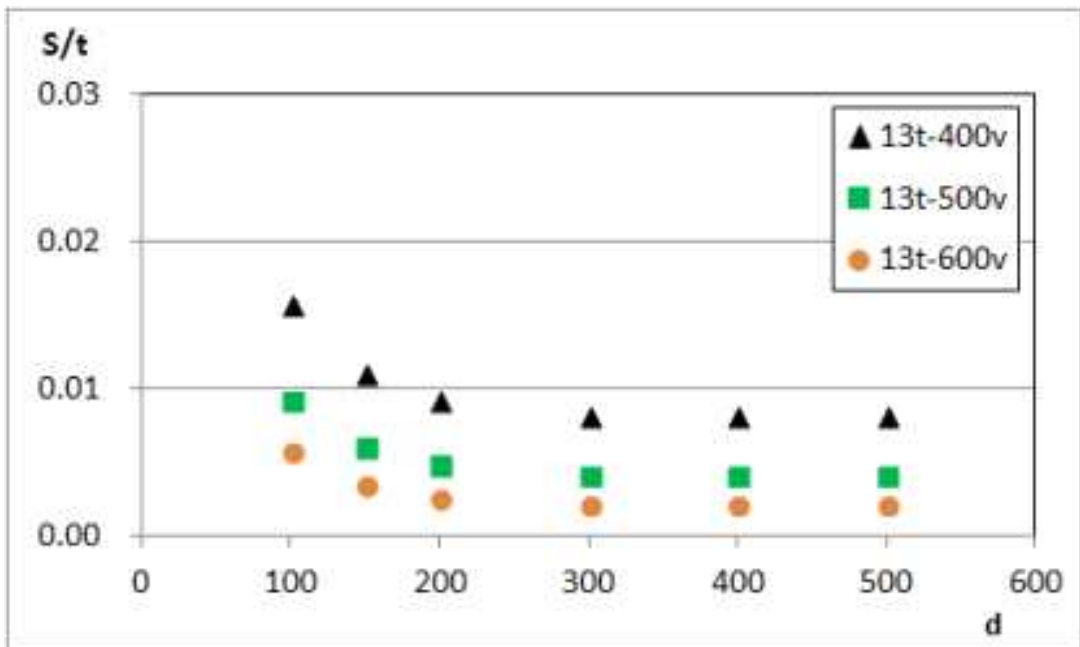


(b) $t = 16 \text{ mm}$

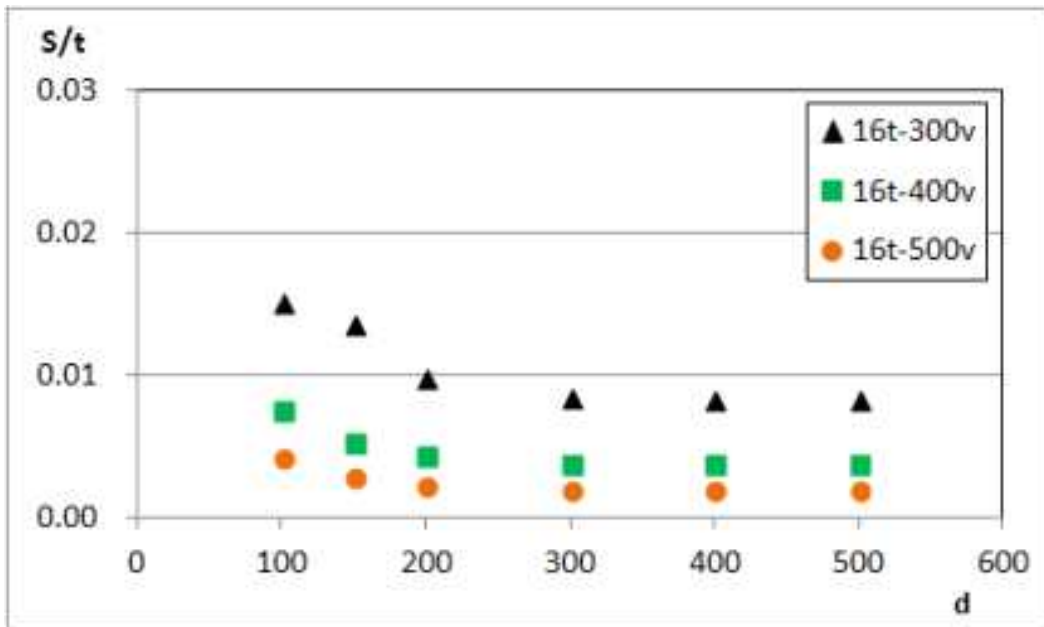


(c) $t = 19$ mm

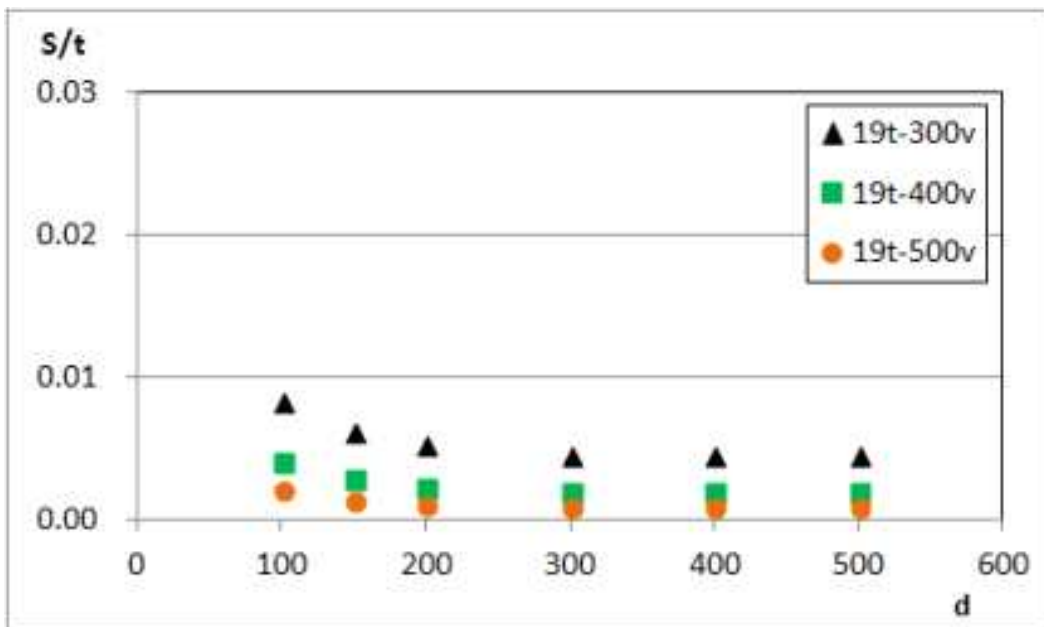
그림 42 H2 또는 H3(그림 25) 위치의 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 각변형



(a) $t = 13$ mm

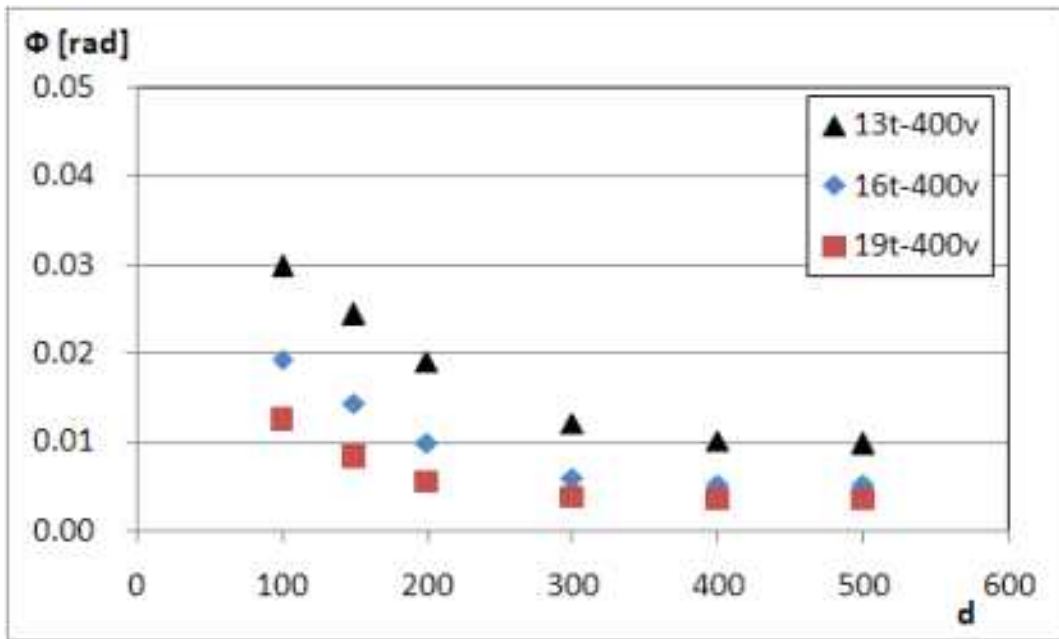


(b) $t = 16 \text{ mm}$

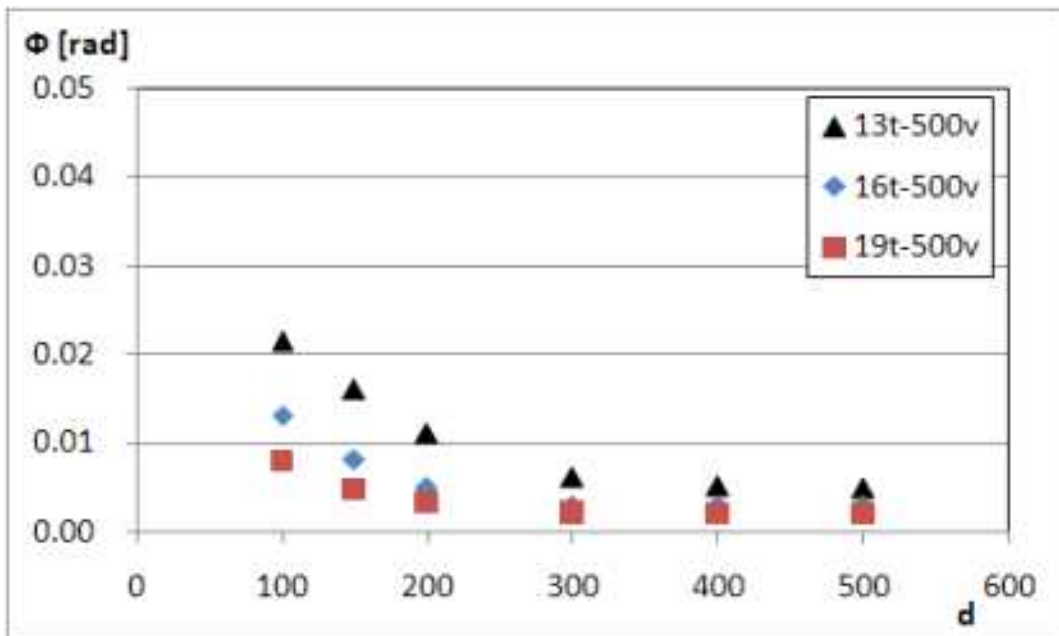


(c) $t = 19 \text{ mm}$

그림 43 H2 또는 H3(그림 25) 위치의 토치간 거리(d) 및 가열속도에 따른 횡수축

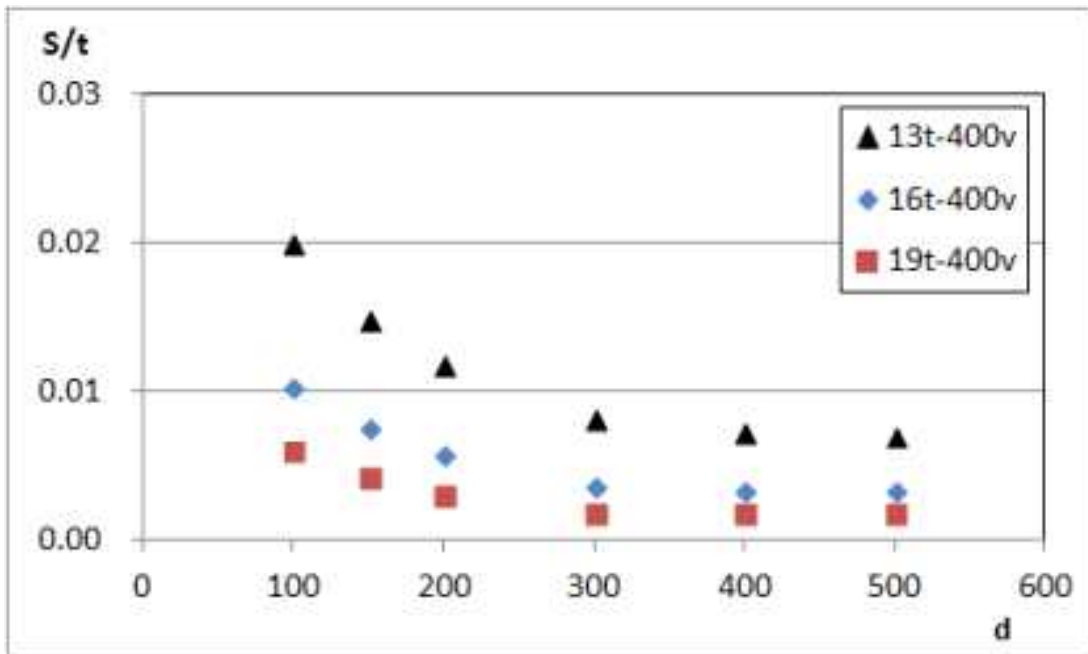


(a) $v = 400$ mm/min

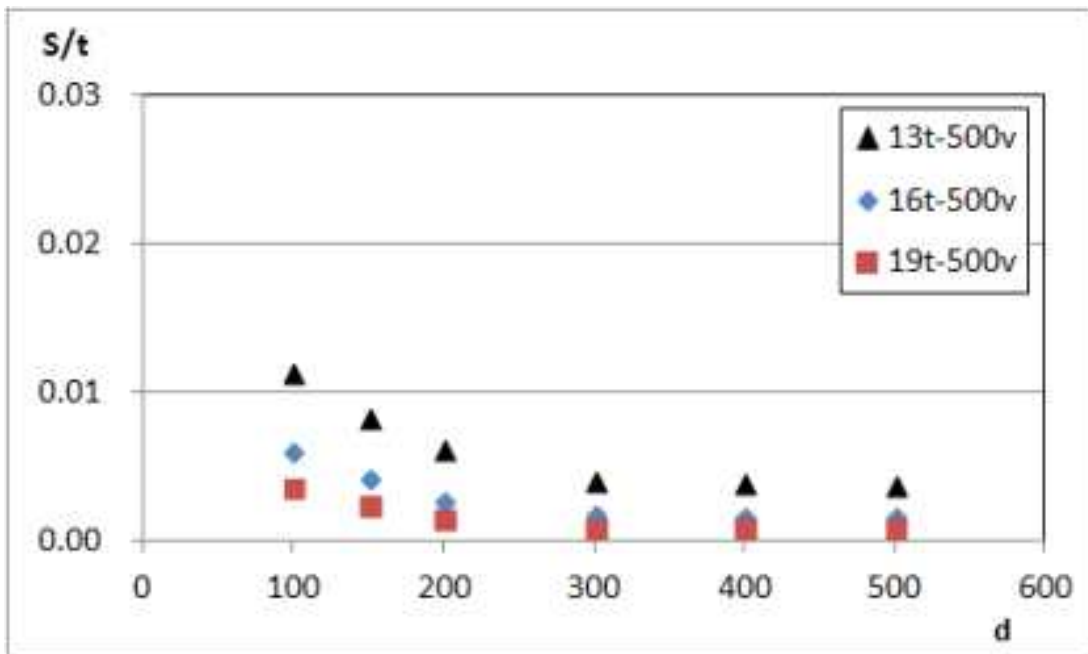


(b) $v = 500$ mm/min

그림 44 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 판두께에 따른 각변형



(a) $v = 400$ mm/min



(b) $v = 500$ mm/min

그림 45 H1(그림 25) 위치에서 토치간 거리(d) 및 판두께에 따른 횡수축

5.2 다중선상가열에 대한 해석결과 검증

다중 가열선을 동시에 가열할 경우 가열선 사이의 거리 d 에 따른 각변형의 변화 추이를 검증하기 위해 3차 실험을 수행하였다. 냉각방법은 1차 및 2차 실험의 경우와 마찬가지로 공냉이다. 자동가열장치에서 토치 사이의 거리가 최대 400 mm 까지 가능하기 때문에 그림 47과 같이 두 개의 토치를 사용하여 실험을 수행하였다. 선상가열실험을 위한 실험 모델 및 실험조건은 아래와 같다.

- Torch tip no. : 3000
- 판의 크기 : $L \times B \times t = 1000 \times 1200 \times 16\text{mm}$
- 가열속도 : $v=300, 400 \text{ mm/min}$
- 가열선 사이의 거리 : $d=200, 300, 400 \text{ mm}$

실험 결과와 열탄소성 해석 결과와의 비교를 그림 48에 보였는데, 비교적 좋은 일치를 보임을 알 수 있다.



그림 46 두 개의 토치를 이용한 400mm 토치거리 실험

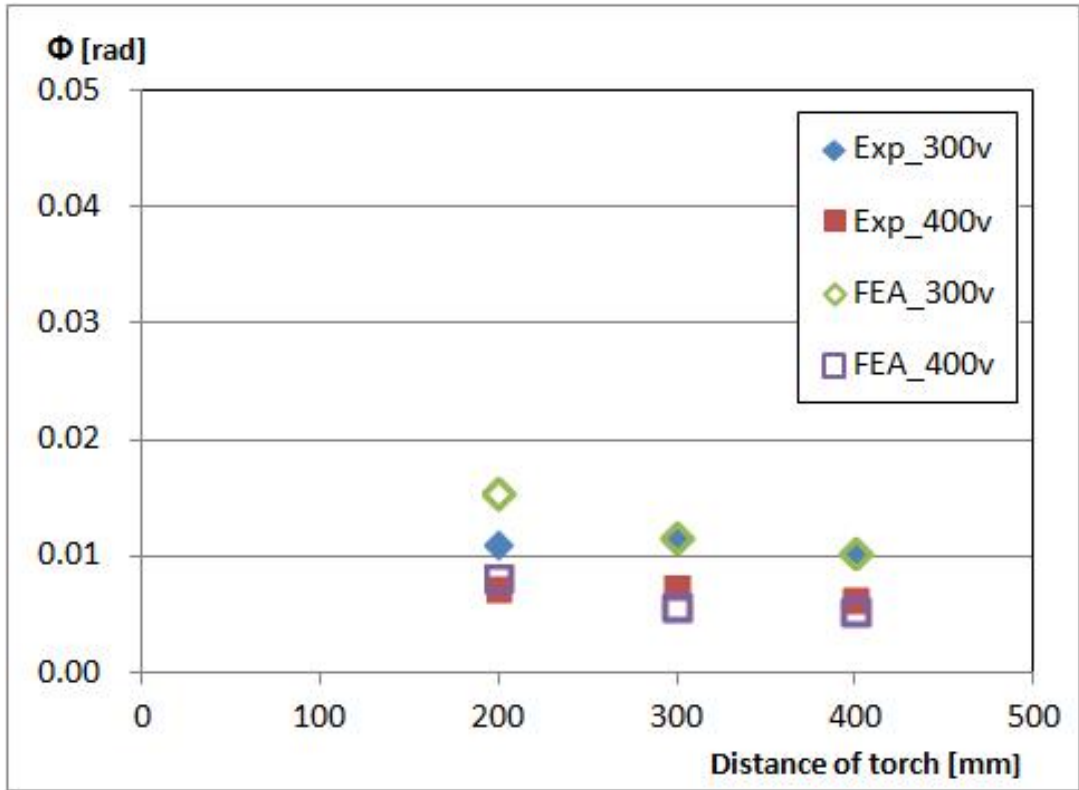


그림 47 400mm 토치 거리에 대한 실험과 수치해석의 각변형 비교

5.3 Multi torch를 이용한 선상가열시 변형예측식 개발

다중 가열선에 대한 변형은 개념적으로 판의 두께, 가열선의 속도 그리고 가열선 사이의 거리의 함수로 표현될 수 있다.

선상가열의 경우 변형 유형이 일반적으로 4가지가 있는데, 횡방향(가열선에 수직)으로 수축변형과 굽힘변형이 있고, 종방향(가열선에 수평)으로 수축변형과 굽힘 변형이 있다. 이중 용접변형[7, 12]의 경우에서도 볼수 있는 종변형보다 횡변형이 우세함으로 본 논문에서는 횡방향 수축과 각변형(횡방향 굽힘변형)으로 변형예측식을 진행하였다. 선상가열의 횡수축과 각변형에 대해서 입열계수 (Heat input parameter)에 대한 정의를 식(9)로 정의하였다.

$$q = \frac{Q_{eff}}{t \sqrt{vt}} \quad (9)$$

선상가열시 횡수축 (Transverse shrinkage)에 대한 변형 예측식의 형태는 여러 가지가 제안되어 왔는데, 아래의 식(9)으로 정의되는 입열계수 (Heat input parameter)의 항으로 표현되는 식(10)이 그 형태 중 하나이다.

$$S/t = C_1 q^{a_1} \quad (10)$$

여기에서 t 와 v 는 판의 두께 (mm)와 가열속도 (mm/sec)이고, q_{eff} 는 유효입열량 (Effective heat input)으로 주어지는 발열 반응식에서 구한 발열량에 열효율을 곱한 값이다. 즉, 본 연구에서 사용한 가스토키의 경우

$$q_{eff} = 0.58 \times 39867 \approx 23123 J/sec$$

이다. 앞서 가열선 사이의 거리 d 에 따라 횡수축이 점차적으로 감소하므로 이를 반영하기 위해 여기에서는 가열선 사이의 거리 d 를 포함한 횡수축을

$$S/t = C_1 q^{a_1} \times (d/t)^{-b_1} \quad (11)$$

의 형태로 표현하였다. 두 가열선과의 간섭 영향을 받는 표 11(a)의 결과를 이용하여 회귀분석법을 통해 미지 계수 C_1 와 지수 a_1 및 b_1 의 값을 구하면

$$\begin{aligned}
C_1 &= 0.185 \times 10^{-7} \\
a_1 &= 2.99 \\
b_1 &= 0.855
\end{aligned}
\tag{12}$$

와 같다. 열탄소성 해석 결과인 표 11(a)의 횡수축에 대한 식(12)의 계수 및 지수 값으로 갖는 식(11)로 추정된 횡수축의 비의 평균은 1.062이고 COV (Coefficient of variation)는 0.356이다.

한편 각변형 (Angular distortion)에 대한 예측식도 여러 형태가 있는데, 식(9)로 정의되는 입열계수로 표현되는

$$\phi = C_2 q^{a_2} e^{-a_3 q} \tag{13}$$

을 이용하고, 횡수축의 경우와 마찬가지로 가열선 사이의 거리 d 의 영향을 반영하기 위해

$$\phi = C_2 q^{a_2} e^{-a_3 q} \times (d/t)^{-b_2} \tag{14}$$

의 형태로 표현하였다. 두 가열선과의 간섭 영향을 받는 표 10(a)의 결과를 이용하여 회귀분석법을 통해 미지 계수 C_2 와 지수 a_2, a_3 및 b_2 의 값을 구하면

$$\begin{aligned}
C_2 &= 0.308 \times 10^{-7} \\
a_2 &= 3.17 \\
a_3 &= 0.0047 \\
b_2 &= 0.934
\end{aligned}
\tag{15}$$

와 같다. 열탄소성 해석 결과인 표 10(a)의 각변형에 대한 식(15)의 계수 및 지수 값으로 갖는 식(14)로 추정된 횡수축의 비의 평균은 1.043이고 COV는 0.291이다.

앞서 실험과 수치해석으로 획득한 데이터를 기반으로 변형예측식을 적용하여 비교한 결과 횡수축에 대해서는 그림 41과 같이 나타내었으며, 각변형에 대해서는 그림 42과 같이 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입열계수가 120을 넘어가는 경우는 매우 큰 입열로 인해 실험으로 구현이 불가함에 따라 각변형 및 횡수축의 데이터를 얻기 위해 수치해석으로 진행하였다.[11]

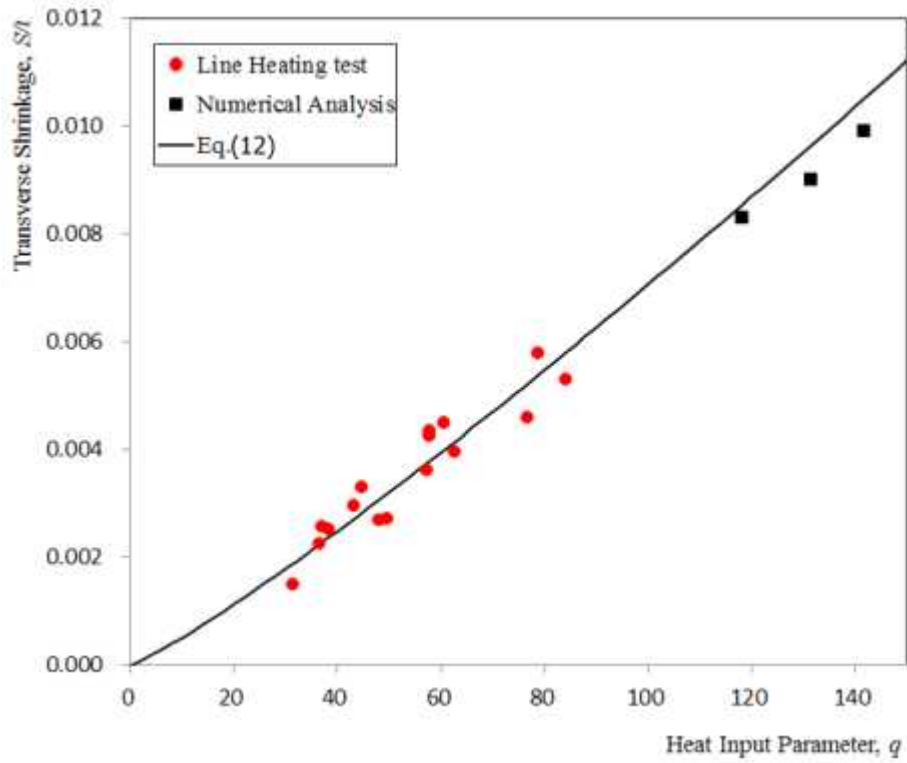


그림 48 횡수축에 대한 실험 및 수치해석 결과와 식(12)의 비교

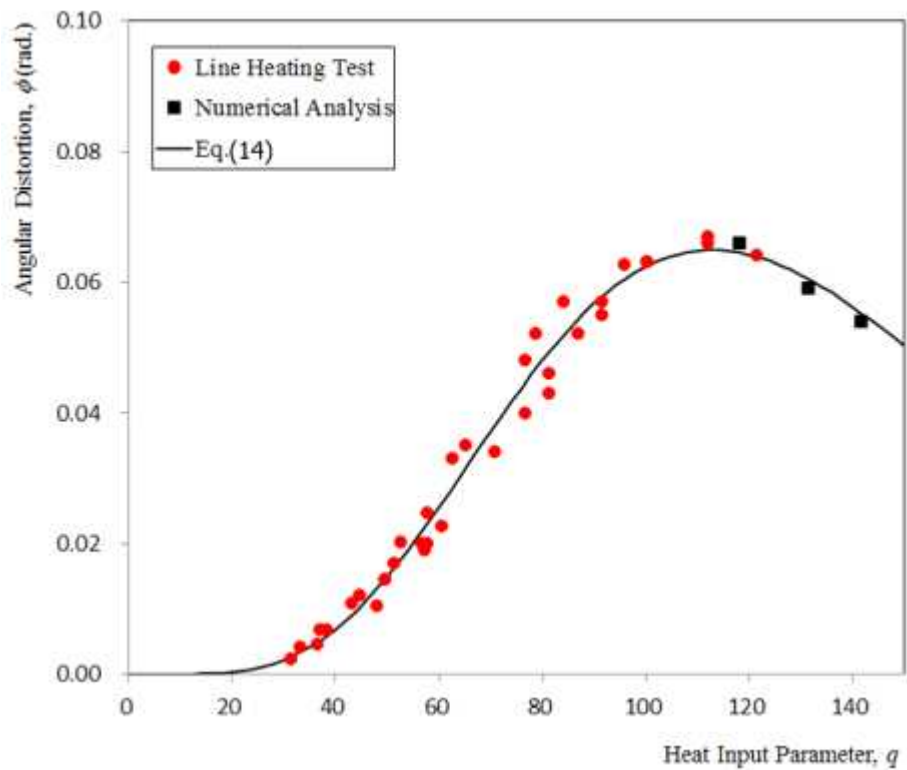


그림 49 각변형에 대한 실험 및 수치해석 결과와 식(14)의 비교

5.4 Multi torch를 이용한 선상가열시 가열선 한계거리

앞 절의 식(11) 또는 (14)를 이용하면 판의 두께와 가열속도가 주어졌을 때, 가열선 사이의 간섭의 영향이 없는 가열선 사이의 거리를 구할 수 있다. 이를 여기에서는 토치사이의 한계 거리 (Limit distance between torches), d_{Limit} 라 하였다. 이는 곧 식(11)로 주어지는 횡수축 또는 식(14)로 주어지는 각변형의 변화가 없는 거리이므로 이는 식(11) 또는 식(14)의 기울기 즉, 변수 d/t 에 대한 1계 도함수가 영 (Zero)이 되는 값이다. 이를 만족하는 값은 식(11) 또는 식(14)의 형태에서 이론적으로 무한대가 되므로, 실제로는

$$[\text{식(11) 또는 식(14)의 } d/t \text{에 대한 1계 도함수의 절대값}] = \epsilon \quad (16)$$

을 만족하도록 결정하는 것이 합리적이다 (그림 49 참고). 여기에서 ϵ 은 작은 수이다. ϵ 이 작으면 작을수록 한계 거리 d_{Limit} 가 증가하므로 합리적인 결과를 주는 적절한 값을 선택해야 한다.

횡수축 예측식 (11)를 식(16)에 대입하면 한계 거리 d_{Limit} 는 비선형 방정식

$$\left| \frac{d(S/t)}{d(d/t)} \right| = \left| C_1 q^{a_1} \times (-b_1 (d/t)^{-b_1-1}) \right| = \epsilon \quad (17)$$

의 해이고, 각변형 예측식 (14)를 식(16)에 대입하면 한계 거리 d_{Limit} 는 비선형 방정식

$$\left| \frac{d\phi}{d(d/t)} \right| = \left| C_2 q^{a_2} e^{-a_3 q} \times (-b_2 (d/t)^{-b_2-1}) \right| = \epsilon \quad (18)$$

의 해이다.

본 연구의 Case study 결과인 표 10과 11을 참고하면, 토치사이의 한계 거리, d_{Limit} 가 대략 300 mm에서 400 mm 범위인 점을 참고해서 한계 거리가 이 수준이 되도록 식(17)과 식(18)의 우변인 ϵ 을 $\epsilon = 10^{-5}$ 로 부여하여 비선형 방정식의 해법의 일종인 Newton 방법을 사용하여 Case study의 판 두께와 가열속도에 대해 구한 토치사이의 한계 거리, d_{Limit} 가 표 12와 같다.

본 연구에서 유도한 횡수축 및 각변형에 대한 변형 예측식 (11)과 (14)를 기준으로 하자면, 횡수축을 기준으로 할 때 한계 거리가 작은 값을 주고 있다. 또한 예상한 바와

같이 판두께가 같을 때 가열 속도의 증가에 따라 한계거리가 감소하고, 동일한 속도에 대해 판두께가 증가할수록 한계 거리가 작아짐을 볼 수 있다.

여기에서 제안한 토치사이의 한계 거리를 추정하는 방법은 변형 예측식이 다른 경우에도 적용할 수 있다.

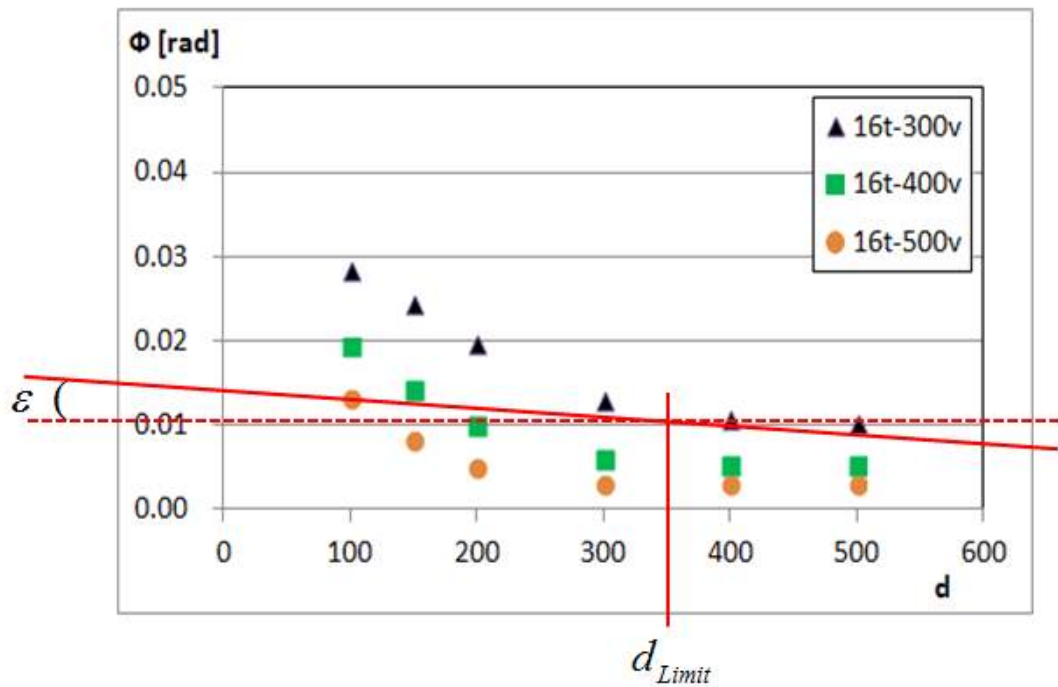


그림 50 토치간 간섭이 없는 한계거리의 정의

표 12 판 두께와 가열속도에 대한 토치사이의 한계거리

t	Heating speed, v (mm/min)	Limit distance, d_{Limit} (mm)	
		based on transverse shrinkage	based on angular distortion
13	400	395.5	411.5
	500	349.7	376.1
	600	316.2	348.5
16	300	404.6	441.8
	400	345.2	390.6
	500	305.3	353.8
19	300	361.5	419.2
	400	308.5	367.6
	500	272.8	331.1

제6장 다중선상가열을 이용한 가열선 자동산출

6.1 가열선 자동산출

2개 이상의 가열선을 동시에 가열하는 것에 대한 타당성을 보이기 위해, 가공할 곡면 즉, 주어진 곡면 (Given surface)과 특정 단계까지 성형된 곡면 (Current surface) 사이의 변위 차이를 이용하여 가열선을 생성하는 알고리즘을 적용하여 기개발된 프로그램인 COMHET (Computer program system of Marking generation for line heating)를 적용하여 다중 가열선을 생성한 예를 보였다.[5]

대상 곡면은 그림 52, 53에 보인 비틀림형 곡면 (Twisted surface)을 선택하였다. 그림 54는 냉간가공 (Cold bending)을 위한 정보를 보여주는데, 냉간가공을 위한 곡률 반지름은 7000 mm 이다.

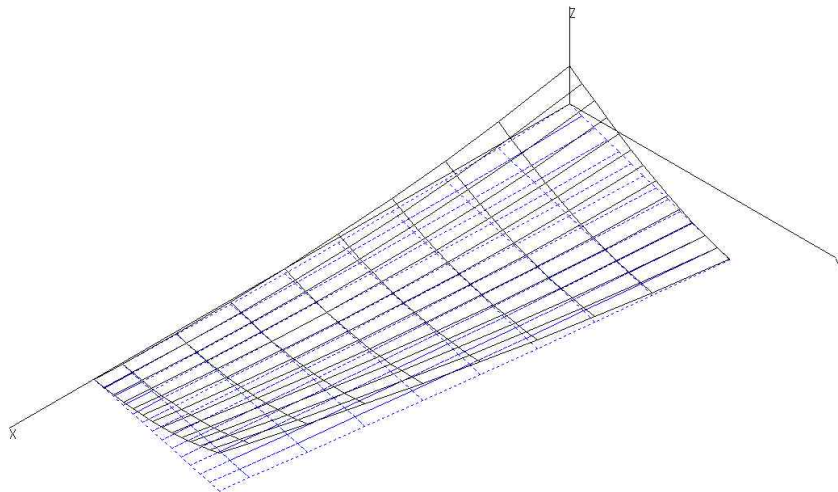


그림 51 3차원 비틀림형 대상 곡면

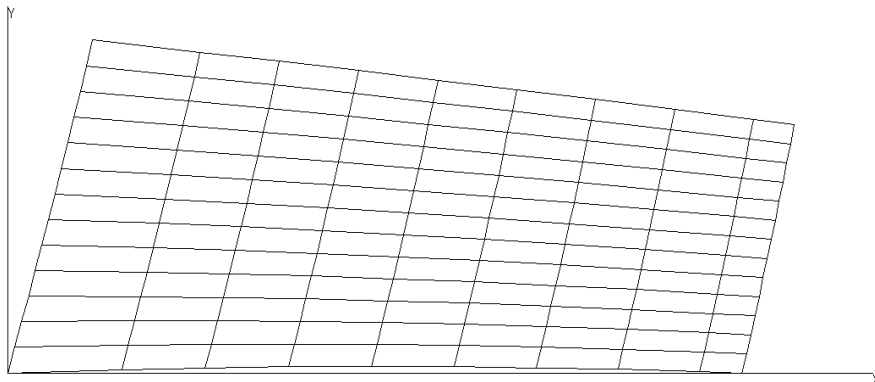


그림 52 대상곡면의 전개도

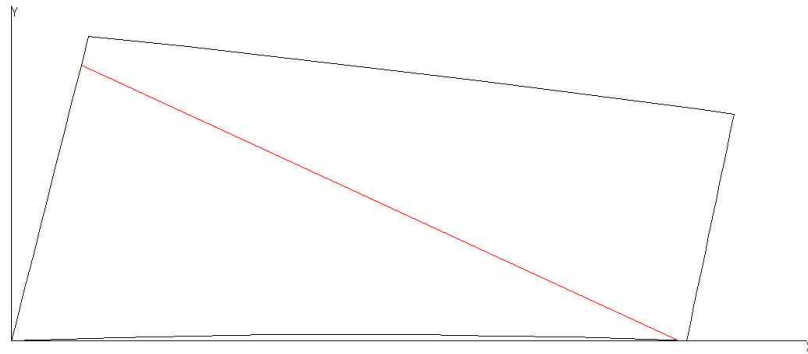


그림 53 냉간가공 정보

동시에 가열할 토치의 수가 1~4개일 때, COMHET를 적용하여 산출된 가열선을 그림 55~66에 보였다. 그림 55에서 보는 바와 같이 비틈형 곡면의 경우 거의 평행인 가열선 들을 산출 될 수 있어서 2개 이상의 가열선을 동시에 가열할 수 있다는 점을 보여 준다.

선상가열 토치를 1개를 적용하였을 때 가열선 정보 산출한 결과 가열선 15개를 가지며, 총 15회 선상가열을 실시하며 그림 55와 같다.

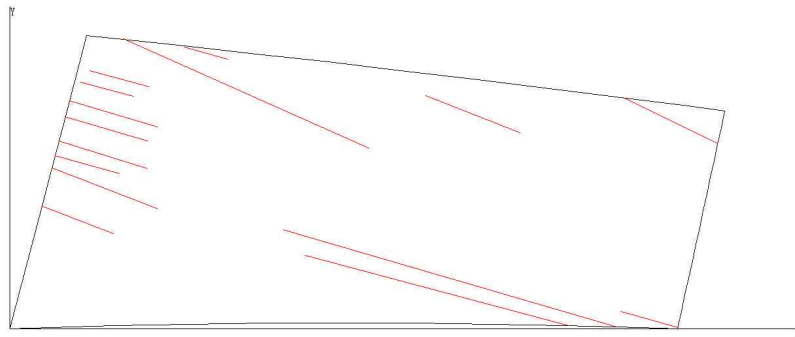


그림 54 토치 1개를 사용한 가열선 15개 산출 결과

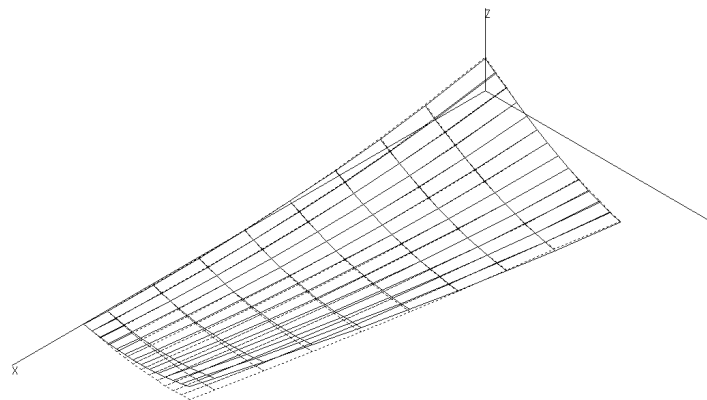


그림 55 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 1개 사용)

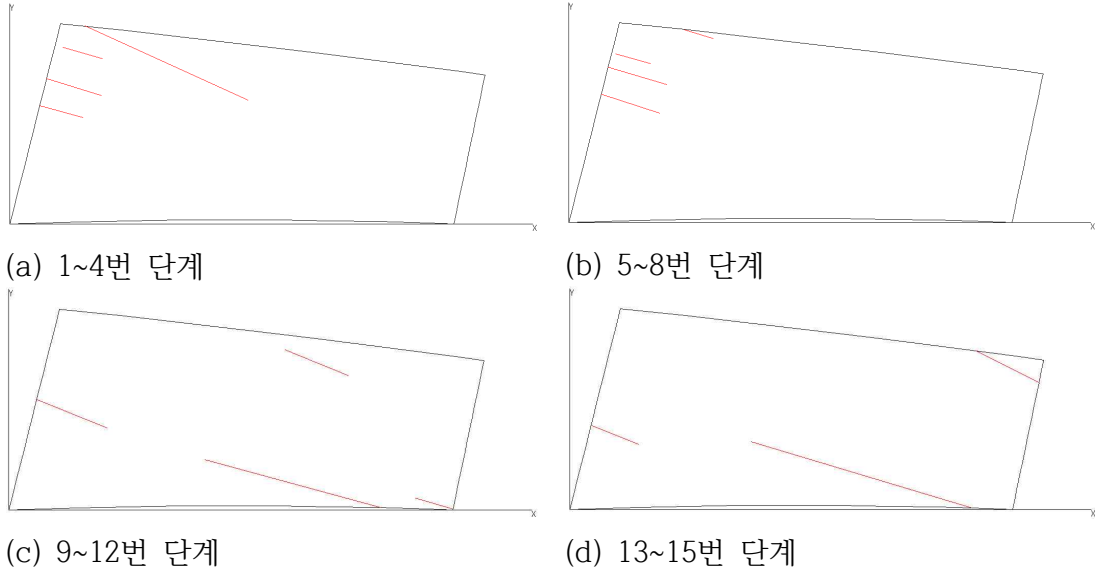


그림 56 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 1개 사용)

선상가열 토치를 2개 동시 적용하였을 때 가열선 정보 산출한 결과 가열선 12개를 가지며, 총 6회 선상가열을 진행하며 그림 58과 같다.

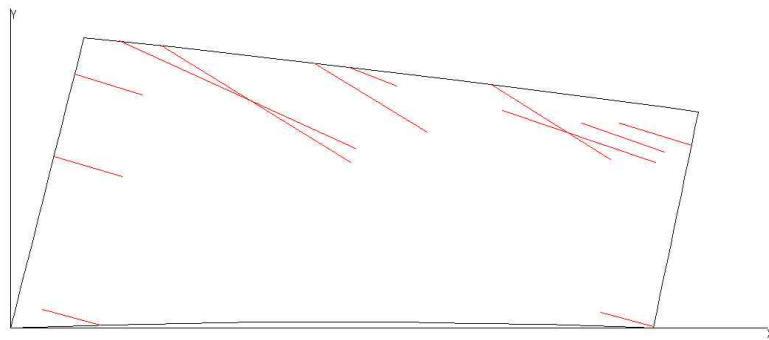


그림 57 토치 2개를 동시 사용한 가열선 12개 산출 결과

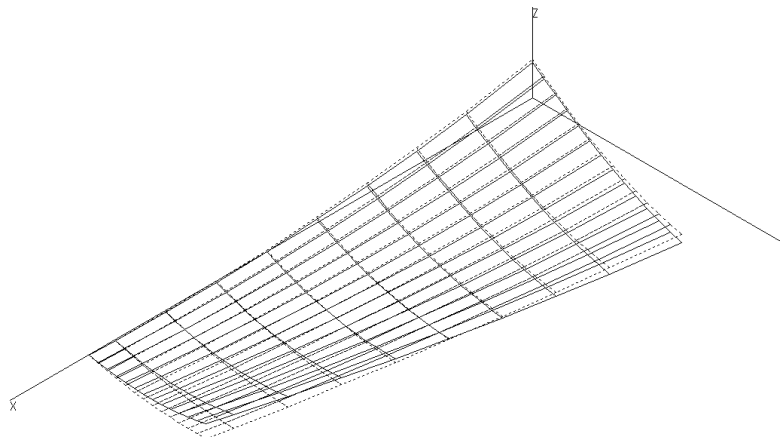


그림 58 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 2개 동시사용)

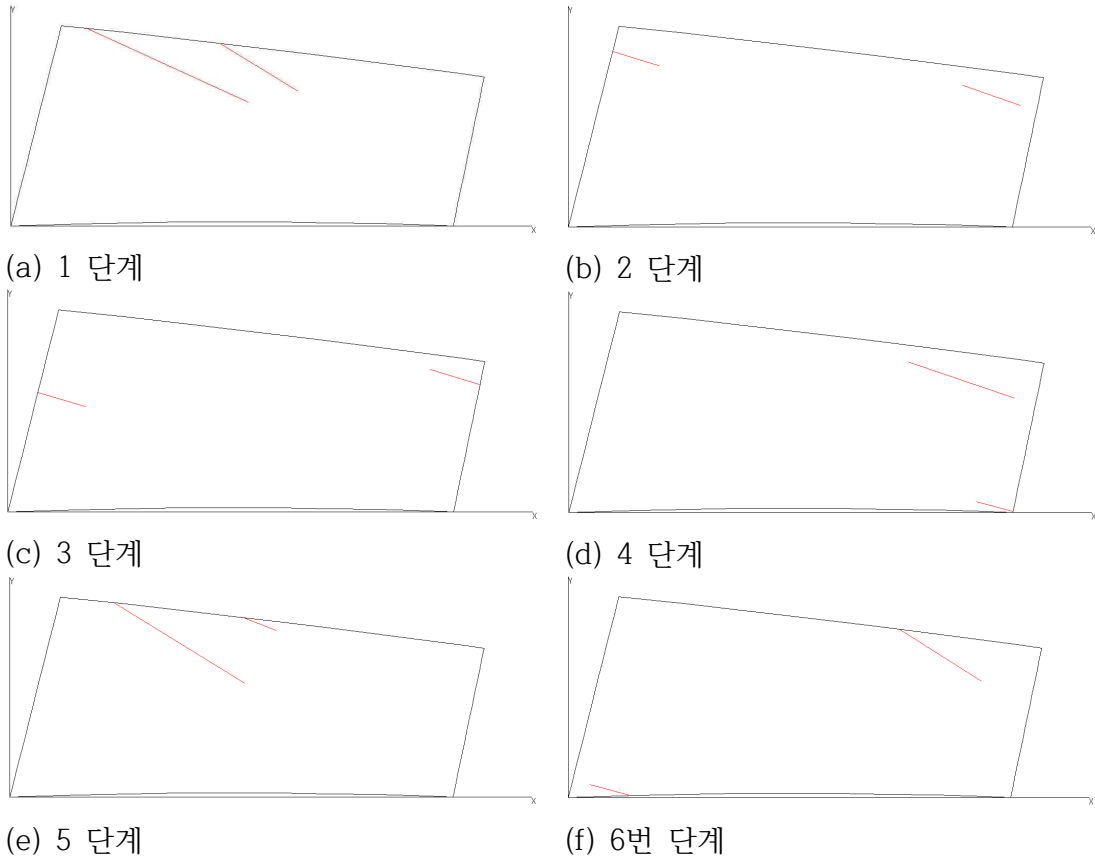


그림 59 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 2개 동시사용)

선상가열 토치를 3개 동시 적용하였을 때 가열선 정보 산출한 결과 가열선 12개를 가지며, 총 5회 선상가열을 진행하며 그림 61과 같다.

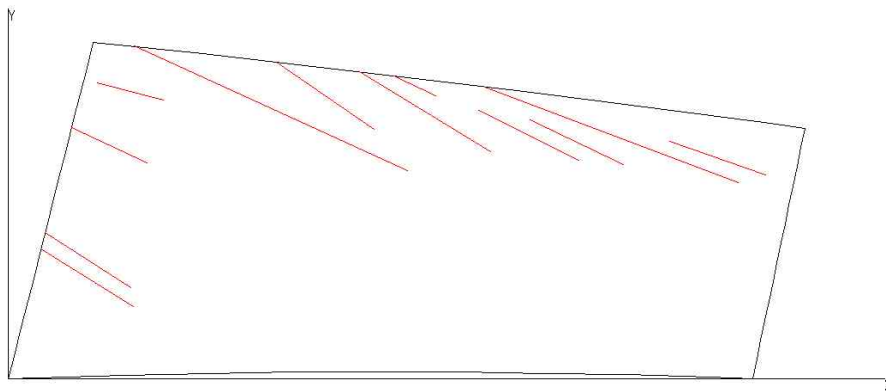


그림 60 토치 3개를 동시사용한 가열선 12개 산출 결과

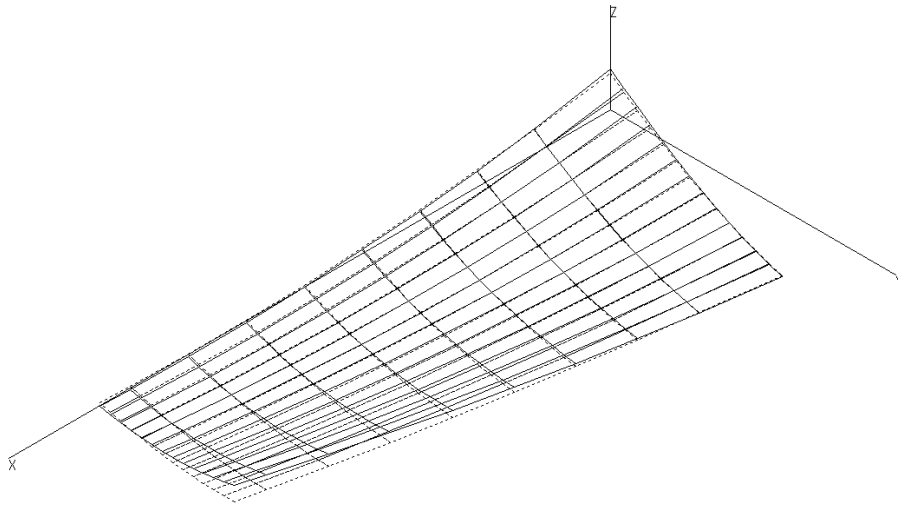


그림 61 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 3개 동시사용)

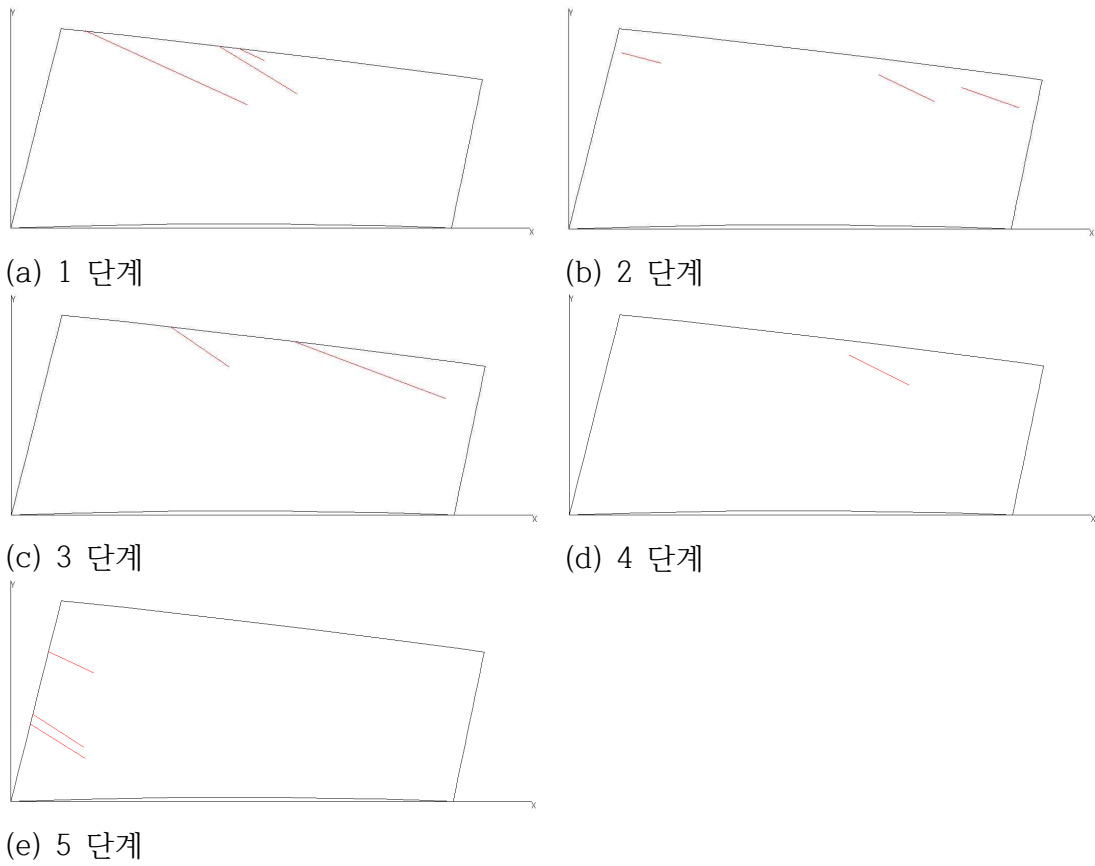


그림 62 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 3개 동시사용)

선상가열 토치를 4개 동시 적용하였을 때 가열선 정보 산출한 결과 가열선 10개를 가지며, 총 3회 선상가열을 진행하며 그림 64와 같다.

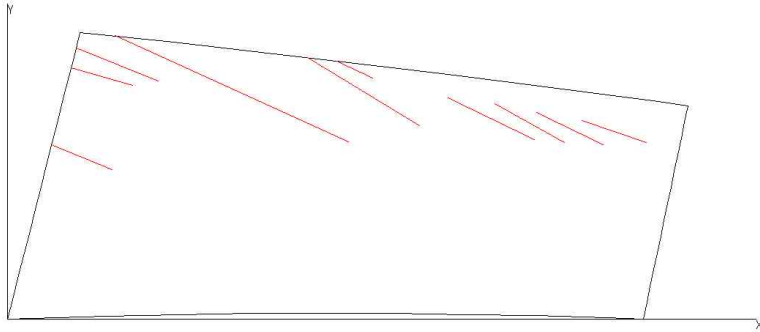


그림 63 토치 4개를 동시사용한 가열선 10개 산출 결과

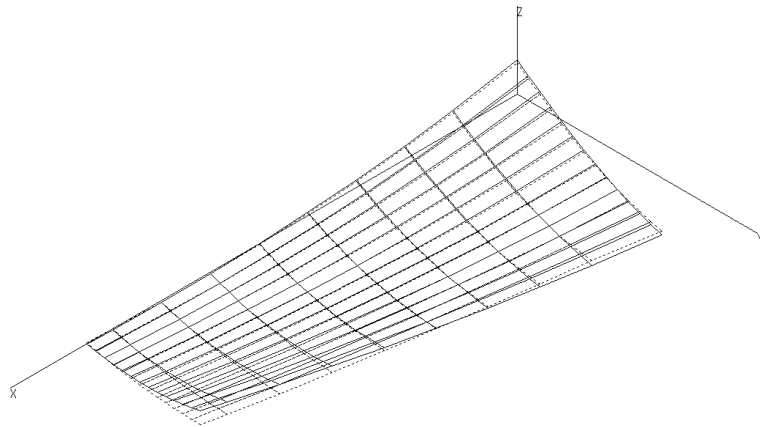
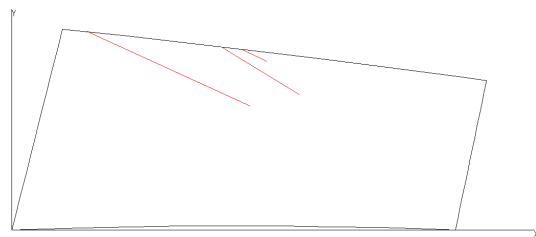
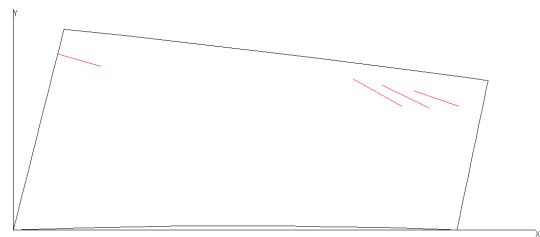


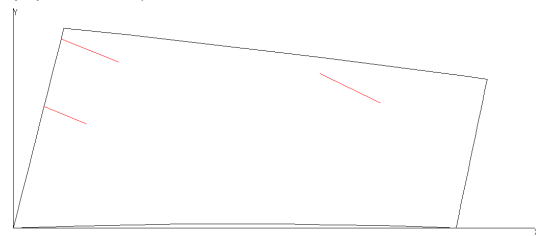
그림 64 목적곡면과 변형 형상 비교 (토치 4개 동시사용)



(a) 1 단계



(b) 2 단계











(c) 3 단계

그림 65 각 가열단계에서 생성된 가열선 (토치 4개 동시사용)

동시 가열을 진행한 결과 토치를 1개 사용할 때 보다 4개를 사용하면 공정효율이 매우 향상됨을 알수 있다.

목적곡면에 대한 유사성을 85%이상을 목표로 두고, 토치를 1개 사용할 경우 총 15 단계의 가열을 진행하였으며, 4개의 토치를 동시에 사용한 경우 총 3 단계의 가공공정만 진행하면 됨에 따라 횟수만 비교할 때 약 80% 생산성이 향상될 것으로 나타나지만, 실제 곡가공 공정에서 준비 및 관리 시간을 고려할 때 최소 50% 이상은 향상될 것으로 판단된다.

표 13 동시가열 토치 수에 따른 공정단계 비교

구분 (동시사용)	가열선 산출결과	목적곡면과 변형 형상 비교	공정단계	유사성
1개 토치			15	0.89497
2개 토치			6	0.88624
3개 토치			5	0.89636
4개 토치			3	0.90210

제7장 결 론

본 연구에서는 2개 이상의 가열선을 동시에 가열하는 다중 가열선에 대한 열변형 특성을 분석하기 위해 다음과 같은 연구내용을 수행하였다.

열원이 Gas torch인 Single 가열선에 대한 선상가열 실험 (1차 실험)과 열탄소성 해석을 수행하여 실험에서 사용한 토치의 열원 특성을 정의하였으며, Multi-line heating에 대한 실험 (2차 실험) 및 열탄소성 해석시 입열모델을 개발하였으며, 이에 대한 입열모델의 열원 중첩법에 대해 타당성을 검증하였습니다.

실험과 수치해석을 통해 각변형과 횡수축에 대한 예측식을 개발하였으며, 또한 Multi-line heating시 가열선 사이의 거리 (토치 사이의 거리), 판 두께 및 가열속도의 변화에 대한 Case study 및 결과 분석을 토대로 Multi-line heating시 가열선 사이의 열전달 및 열변형의 간섭이 없는 토치사이의 한계 거리를 정의하는 방법의 제안하며 가열선 사이의 거리 d_{limit} 에 따른 각변형의 변화 추이 검증을 위한 3차 실험을 수행하였습니다.

다중 가열선 산출을 위한 기 개발한 프로그램을 이용하여 가열선의 토치를 1개에서 동시사용으로 2~4개를 적용하였을 때 가열선 도출을 진행하였습니다.

이에 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

다중 가열선의 경우 가열선 사이의 열전달 및 열변형 특성의 간섭 효과를 반영하기 위해서는 열속의 중복을 고려해서 열탄소성 해석을 수행해야 됩니다.

각변형과 횡수축 모두 가열선 사이의 거리 d 가 증가할수록 점차적으로 감소하는 현상을 확인하였으며, 가열선 사이의 거리 d 가 작을수록 가열선 사이의 열전달 및 열변형 특성의 간섭으로 각변형 및 횡수축이 증가하고, 하나의 가열선과 간섭이 되는 경우보다 두 개의 가열선과 간섭이 되는 경우 이 경향이 증가하는 현상을 확인하였습니다.

또한, 가열선 사이의 거리가 약 200 mm 까지 증가할 때 열변형이 급격히 감소하고, 가열선 사이의 거리가 약 400 mm 이상이 되면 가열선들 사이의 열전달 및 열변형 특성 간섭현상이 매우 미비한 것을 확인하였습니다.

이를 토대로 가열선 사이의 거리에 대한 한계거리의 정의를 하였으며, 검증하였습니다. 그리고 실험 및 수치해석 데이터를 토대로 기 개발한 프로그램인 COMHET을 이용한 토치를 최대 4개 동시 사용하였을 때 1개를 사용한 경우 15단계인 가열단계를 3 단계로 축소되는 것을 확인하였습니다.

이는 선상가열 자동화시 생산성 향상을 위한 연구자료로 활용되며, 향후 가열선 생성에 대한 추가 연구를 통해 현장에 적용가능할 것으로 판단됩니다.

참고문헌

- [1] Ha Y.S., 2001. A Study on the Prediction of Plate Deformation by Heating of Weaving Path in Thick Plate Bending. MSC Thesis. Seoul National University.
- [2] Jang, C.D, Ko, D.E. Kim, B.I, Park, J.U., 2001. An Experimental Study of Characteristics of Plate Deformation by Heating Process. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 38 (2), 62-70.
- [3] Jang, C.D. Ha, Y.S. Ko, D.E. and Moon, S.C., 2002. Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 39(1), pp.82-89.
- [4] Lee, B.I. Yoo, H.S. Byun, G.G. and Kim H.G., 2002. A Study on Automation of Steel Plate Forming by Heating Method. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 39 (2), 34-44.
- [5] Lee, J.S., 1996. Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method (II), Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 33(3), pp.81-93.
- [6] Lee, J.S., 1997. Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method (III), Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 34(2), pp.85-89.
- [7] Lee, J.S., 2004. Simulator for Weld-Induced Deformation of Panel Blocks, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 41(1), pp.55-63.
- [8] Lee, J.S., 2010. Development of Knowledge-based Method to Automatically Derive the Deformation Estimation Formula due to Line Heating. Journal of Korean Welding and Joining Society, 28 (1), 92-99.
- [9] Lee, S.H. and Lee, J.S., 2012. A Study on the Thermal Deformation Characteristics of Multi-line Heating. Proc. 26th Asian-Pacific Technical Exchange & Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2012), Sept. 03-06, 2012, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 423-427.
- [10] Lee, J.S., Song, Y.J and Lee, S.H., 2014. On the Thermal Deformation Prediction of Steel Plates by Multi-line Heating. Proceedings of the 28th Asian-Pacific Technical Exchange & Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2014), Oct. 13-16, 2014, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 66-73.
- [11] Lee, J.S. and Lee, S.H., 2018. A study on the thermal deformation characteristics of steel plates due to multi-line heating. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 10, 48-59

- [12] Masubuchi, K., 1980. Analysis of Welded Structures. Pergamon Press, Oxford.
- [13] Nomoto, T., Ohmori, T., Enosawa, M., Aoyama, K., Saitoh, M., 1990. Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 168, pp. 527-535.
- [14] Shin, J.G., 1992. A Two-Dimensional Simulator for Plate Forming by Line Heating. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 29 (1), 191-200.
- [15] Simulia, 2013, Introduction to Abaqus, BB-Media, Korea.
- [16] Tsuji, I. and Okumura, Y., 1988. A study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steels, Journal of Western Society of Naval Architecture, 76, 149-160.
- [17] Ueda, Y. Kim, Y.C., Garatanti, K. Yamakia, T. and Hang, H.S., 1987. "Mechanical Characteristics of Repair Welds in Thick Plate(Report I)", Transactions of Welding Research Institute of Osaka University in Japan, 15-2, pp. 187-196.
- [18] Welding handbook, Vol.2, 8th ed., 1991. American Welding Society,

A study on the thermal deformation characteristics of steel plates due to multi-line heating

Sang-Hoon Lee

Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering
University of Ulsan, Ulsan, Korea

Abstract

Although the plate forming process is one of the most important processes in the shipbuilding process, it is not automated compared to other processes, and it still relies on the experience and technology of skilled workers.

This process is a typical 3D process (dirty, dangerous & difficulty), and it is expected that it will be difficult to secure skilled workers, and it is urgent to build a mechanized or automated system to significantly improve the productivity of this process.

For mechanization or automation, a system that can accurately provide heating wire information is essential. It is necessary to secure the technology to accurately predict the deformation result when the above multi-heating line is heated at the same time.

The purpose of this study is to analyze the characteristics of deformation according to multi-heating for the development of highly efficient grain processing automation equipment and to develop a technology that can predict the amount of deformation through this.

The study defined the heat source characteristics of the torch used in the experiment by performing a linear heating experiment (first experiment) and thermoelastic analysis on a single heating wire whose heat source is a gas torch, and an experiment on multi-line heating (second experiment).) and thermal-elasticity analysis, conduct a heat input model, and analyze the case study and results on the change in the distance between heating wires

(distance between torches), plate thickness and heating rate during multi-line heating. Then, during multi-line heating, deformation prediction formulas for lateral shrinkage and angular deformation were developed, and during multi-line heating, the minimum distance without heat flux interference between heating wires was defined and verified through experiments (3rd experiment).

The test was carried out using the equipment manufactured by Ulsan University's Thermal Deformation Lab. Using equipment that can adjust the distance between the torches, the moving speed, and the distance between the torch and the steel plate, linear heating according to each variable was directly performed.

Based on the derived results, a study was conducted to automatically calculate the heating wire corresponding to the target surface through linear heating.