

## 열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구

장창두\*, 고대은\*, 김병일\*\*, 박정웅\*\*\*

### An Experimental Study of Characteristics of Plate Deformation by Heating Process

Chang-Doo Jang\*, Dae-Eun Ko\*, Byeong-Il Kim\*\*  
and Jeong-Ung Park\*\*\*

#### 요 약

선체 외판은 복잡한 3차원 곡면 형상이며 이의 제작을 위한 곡가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이다. 곡가공 공정은 주된 1차곡 성형을 위한 프레스 공정과 2차 이상의 나머지 곡 성형을 위한 열간가공 공정으로 이루어진다. 특히 선체 작업량의 50% 이상을 점하는 열간가공 공정은 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하고 있다. 이의 자동화를 위한 많은 연구가 있었으나 최근까지의 연구는 주로 선상가열에 한정되어 있으며 삼각가열에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 본 연구는 향후 삼각가열에 대한 효율적인 변형해석 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서 삼각가열에 의한 판의 변형특성을 명확히 하는데 그 주안점을 두었다. 우선, 실제 조선소에서 현장조건 그대로 일련의 선가열 및 삼각가열 실험을 수행하여 각각의 변형특성을 비교 분석하였으며 상변태온도 이상의 고온영역을 확인함으로써 그 변형특성을 합리적으로 해명하였다. 또한, 가열시편에 대한 물리시험을 통해 현재 조선소에서 행해지는 열간가공 방법이 선각재료의 성질 변화에 미치는 영향을 검토하였다.

#### Abstract

As the ship hull is a compound-curved structure, plate bending process is indispensable. The process includes press bending process for forming major 1st curvature and heating process for forming the rest curvature. Especially the heating process that is above 50 percents of entire bending work is carried out exclusively by skillful workers. Many researches have been made to automate the heating process but most of these are about line heating process and researches for triangle heating process are rare. This study is a fundamental study to develop a efficient analysis method for triangle heating and focused on clarifying the deformation characteristics of plate by triangle heating. In this paper, we carried

접수일자 : 2001년 3월 3일, 재접수일자: 2001년 4월 26일

\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과(E-mail: cdjang@snu.ac.kr, deko@dreamwiz.com)

\*\* 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부(E-mail: bikim@mmu.ac.kr)

\*\*\* 정회원, 삼성중공업 조선플랜트연구소(E-mail: park982@samsung.co.kr)

out heating experiments and analysed the deformation characteristics of plate to explain the deformation characteristics of plates rationally by showing the phase transformed high temperature region. Also we investigated the heating effect on the hull material properties by mechanical tests.

## 1. 서론

선체 외판은 복잡한 3차원 곡면 형상이며 이의 제작을 위한 곡가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이다. 대부분의 조선소에서는 주된 1차곡을 프레스로 성형하고 2차곡의 형성을 위해서는 가스토킨치를 이용한 열간가공을 이용하고 있다. 특히 전체 작업량의 50% 이상을 점하는 열간가공 공정은 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하고 있다.

선상가열과 삼각가열을 포함하는 열간가공은 가열과 냉각에 따른 열전도 과정, 불균일한 열응력 생성 과정, 온도 변화에 따른 재료의 기계적 성질 변화 등의 복잡한 역학적 과정을 거쳐 생성되는 잔류변형을 이용하여 원하는 형상을 생성시키는 방법으로, 최근 생산성 향상 및 작업 환경의 개선을 위한 자동화 기술의 요구가 증대되어 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

열간가공에 대한 최근의 연구동향은 고유변형도법과 열탄소성 해석법의 장점을 조합하려는 연구 경향이 지배적이다. Nomoto 등(1991)은 입열량과 각변형 및 면내 수축량의 관계를 실험으로부터 구하고, 각변형 및 수축량을 등가의 모멘트 및 힘으로 치환하여 변형을 계산하는 방법으로 선상가열에 의한 곡면 가공 과정을 시뮬레이션하였으며, Ueda 등(1991)은 곡면의 전개도를 생각하여 전개도와 평판과의 차이만큼 고유변형도를 분포시킴으로써 원하는 곡면이 산출되는 고유변형도의 크기를 3차원 비선형 유한요소법에 기초하여 역으로 구하였다. 장 등(1997)은 고유변형도법에 기초한 간략한 열탄소성 해석법을 제시하고 탄성 대변형 해석을 통해 선상가열에 의한 판의 변형을 실시간으로 제어 할 수 있는 해석법을 제안하였다. 이러한 연구 경향은 곡가공의 자동화가 궁극적인 목표라는 관점에서 변형의 실시간 시뮬레이션을 지향

할 수 밖에 없으므로 당연하다고 여겨진다.

그러나, 최근까지의 연구는 주로 선상가열에 한정되어 있으며 상대적으로 삼각가열에 대한 연구는 미비한 실정이다. 선상가열과 삼각가열은 그 변형특성이 상당히 다른데, 일반적으로 굽힘변형을 위해서는 선상가열을, 굽힘변형과 수축변형을 동시에 발생시키기 위해서는 삼각가열을 실시하게 된다. 두께 20mm 내외의 곡량이 비교적 적은 대형판에 대해서는 빌지 부분의 만곡판과 같은 몇몇 경우를 제외하면 선상가열만으로 충분하지만, 곡량이 크고 두께가 30mm에서 50mm에 이르는 소형 후판에 대해서는 삼각가열이 주를 이루게 된다. 삼각가열은 선가열에 비해서 몇 배의 많은 작업시수를 요하며 작업 난이도 또한 월등히 높다.

본 연구는 향후 삼각가열에 대한 효율적인 변형 해석 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서 삼각가열에 의한 판의 변형특성을 명확히 하는데 그 주안점을 두었다. 실제 조선소에서 현장조건 그대로 일련의 선가열 및 삼각가열 실험을 수행하여 각각의 변형특성을 비교 분석하였으며 상변태온도 이상의 고온영역을 확인함으로써 그 변형특성을 합리적으로 해명하였다. 또한, 가열시편에 대한 물리시험을 통해 현재 조선소에서 행해지는 열간가공 방법이 선각재료의 성질 변화에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 가열 실험

### 2.1 실험 목적

선수미부 후판에 대해 전형적인 선상가열 및 삼각가열을 실시하여 기본적인 변형특성을 파악하고, 가열 시험편의 단면을 절단하여 소성변형이 집중되는 상변태온도(약 720℃) 이상 영역의 크기를 계측함으로써 변형해석모델 개발을 위한 기

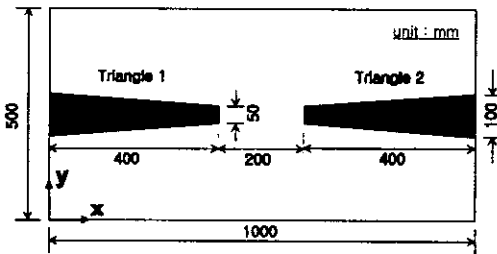
초자료를 확보한다. 또한, 삼각가열 영역에 대한 물리시험을 통해 열영향부의 물리적 특성 변화를 파악한다.

2.2 실험 방법

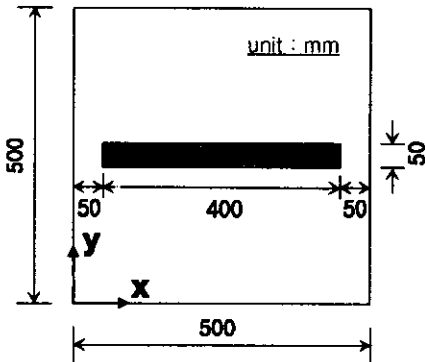
2.2.1 시험편 준비

- 삼각가열 대상  
: 500×1000×(20, 25, 30)×1EA  
(UNIT : mm)
- 선가열 대상  
: 500×500×(20, 25, 30)×1EA  
(UNIT : mm)
- 강종 : MILD A grade

Fig.1과 같이 가열영역을 마킹하였고, 가열후 변형계측을 위해 표점을 편칭하였다.



(a) Triangle heating



(b) Line heating

Fig.1 Specimens and marking

2.2.2 가열 조건

판 두께에 따른 가열방법 및 냉각방법은 기본적으로 현장의 실제 작업조건에 따랐다(15년 이상

의 경력자가 직접 가열). 입열원은 산소와 프로판의 혼합가스를 이용한 토치가열이며 최고가열 온도는 1300℃ 이상이다. 가열폭이 좁은 쪽부터 넓은 쪽으로 빙글빙글 원을 그리면서 전진하는 weaving 방식으로 가열했으며, 삼각가열시 가열 순서는 Triangle 1, 2의 순이다. 냉각방법은 수냉이며 각 가열선의 가열시간은 Table 1과 같다. 단, Table 1에서 삼각가열의 속도는 평균적인 값이며 실제로는 종단부에 이룰수록 속도가 느려진다.

2.2.3 변형 및 상변태 영역 계측

변형은 석정반 위에서 계측자를 이용하여 계측하였다. 가열이 대칭적이고 변형의 크기가 작으므로 판의 네 모서리가 한 평면에 있다는 가정하에서 계측 결과를 보기 편리하도록 가공하였다. 또한, 가열방향을 따라 일정 간격(선가열의 경우 100mm, 삼각가열의 경우 50mm)으로 절단 후, 각각의 횡단면과 종단면을 연마(研磨) 및 에칭하여 변태온도 이상 영역의 분포형상을 계측하였다.

Table 1 Heating speed

Plate Thickness (mm)	Heating Speed (mm/min)		
	Triangle 1	Triangle 2	Line
20	129.0	134.8	229.6
25	101.7	100.4	176.0
30	78.4	80.8	126.9

2.2.4 미세조직 관찰

각 두께별 삼각가열 시험편을 대상으로 주사전 자현미경을 이용하여 미세조직을 관찰함으로써 온도영역에 따른 조직의 특성을 파악하였다.

2.2.5 물리 시험

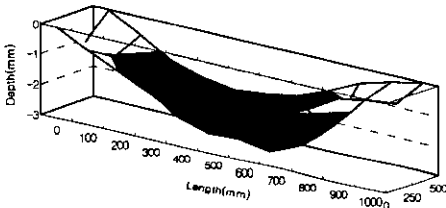
삼각가열 영역중 입열량이 가장 큰 부분(판의 경계 부근)에서 인장, 굽힘, 충격시험편을 제작하고 각 물리시험을 통해 열영향부의 물리적 특성 변화를 파악하였다.

### 3. 실험 결과

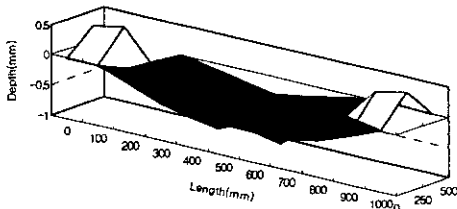
#### 3.1 변형 계측 결과

##### 3.1.1 삼각가열에 의한 변형 특성

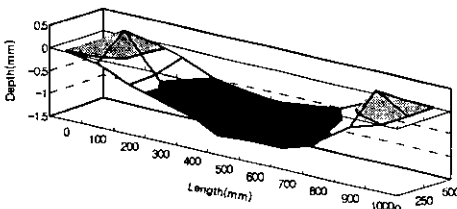
Fig.2에 시험편의 전체적인 변형형상을 보였으며, Fig.3에서는 가열 중심선 및 양쪽 경계에서의 변형 형상을 보이고 있다. 굽힘변형은 삼각가열의 시점 부근에서 집중적으로 일어나고 삼각가열의 종점(판의 경계)에서는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 판 두께가 20mm인 경우 삼각가열의 종점 부근에서 고온영역이 판 두께를 관통하여 두께방향의 온도구배는 크지 않지만 변형저항 능력을 거의 상실함으로써 약간의 굽힘변형이 발생하



(a) In case of plate thickness = 20 mm



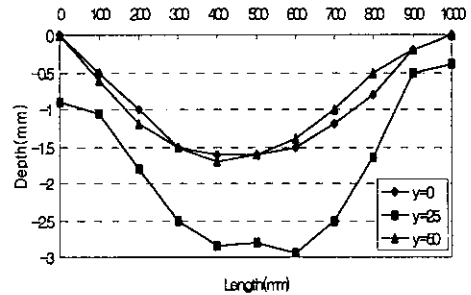
(b) In case of plate thickness = 25 mm



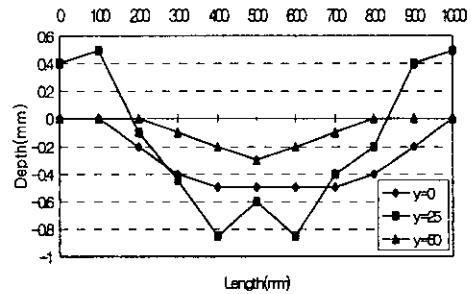
(c) In case of plate thickness = 30 mm

**Fig.2** Overall deformation due to triangle heating

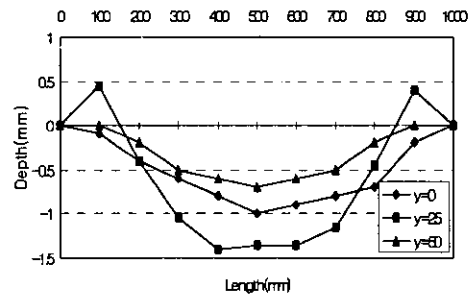
였다. 한편 판 두께가 25mm인 경우와 30mm인 경우에는 삼각가열의 종점에서 고온영역이 두께를 관통하지는 못했으나 판 두께의 2/3 정도까지 침투함으로써 두께방향의 온도구배는 그다지 크지 않다. 역방향으로 나타나는 변형은 굽힘변형이라기 보다는 가열의 종점 부근에서 발생한 열팽창이 두께방향의 변형저항을 이기지 못하고 표면으로 부풀어오른 것이다.



(a) In case of plate thickness = 20 mm



(b) In case of plate thickness = 25 mm



(c) In case of plate thickness = 30 mm

**Fig.3** Deformation due to triangle heating along heating direction

Fig.4에 삼각가열에 의한 횡수축량을 보였다. 횡수축량은 가열의 시점으로부터 종점에 이르기까지 거의 선형적으로 증가하여 종단부에서 최대수축량을 가지며 종단부 가열폭이 100mm일때 수축량은 2.5~3.5mm정도이다.

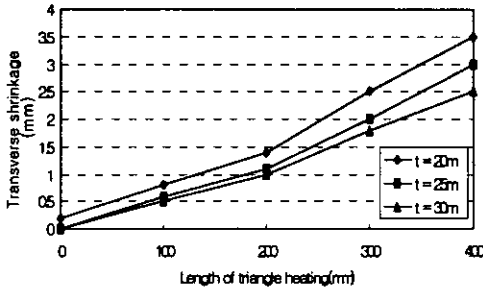


Fig.4 Transverse shrinkage by triangle heating

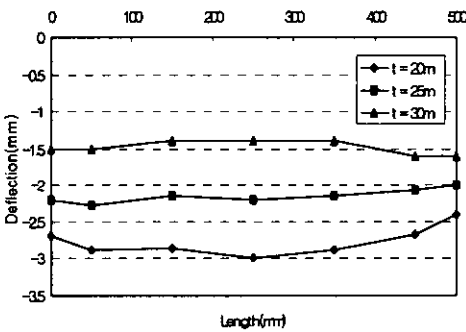


Fig.5 Deflection by line heating

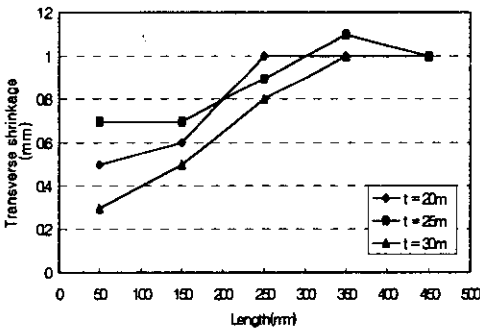


Fig.6 Transverse shrinkage by line heating

### 3.1.2 선가열에 의한 변형 특성

Fig.5와 Fig.6에 가열선에 따른 처짐과 횡수축량을 보였다. 굽힘 변형은 가열의 시점과 종점을 제외하면 거의 일정한 값을 가지며, 판 두께가 20mm인 경우와 25mm인 경우 가열중앙부가 양 끝보다 약간 변형이 크게 나타나는데 이는 종굽힘 모멘트의 영향으로 판단된다. 횡수축량은 전체적인 크기는 작지만 가열의 종점으로 갈수록 점점 증가함을 알 수 있다. 이는 가열의 후반부로 갈수록 판의 온도가 상승할 뿐 만 아니라 수축에 저항하는 비가열 부위도 적어지기 때문이다.

이로부터 등 간격의 선가열이 필요할 경우 가열 방향을 교대로 바꾸어 변형의 관점에서 전체적인 대칭성을 유지할 필요가 있음을 알 수 있으며 실제의 작업 요령도 이와 같음을 확인하였다.

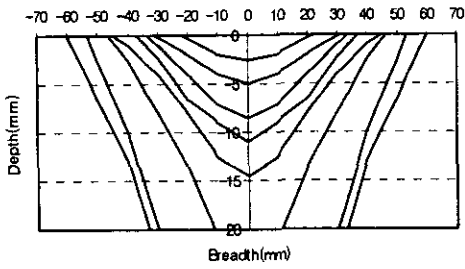
## 3.2 상변태온도(약 720℃) 이상의 고온영역 계측 결과

### 3.2.1 삼각가열

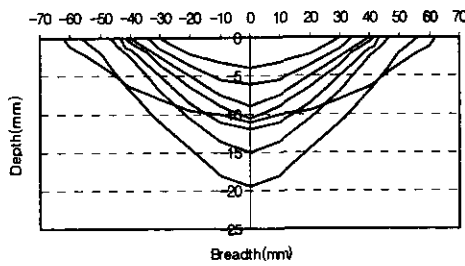
판 두께가 20mm인 경우 고온영역(약 720℃ 이상)의 판 두께 방향으로의 침투가 점점 증가하여 종단부로부터 약 100mm 떨어진 지점에서 판 두께를 관통하였다. 판 두께가 25mm 및 30mm인 경우 두께에 따라 다소 차이는 있으나 종단부로부터 약 50mm 떨어진 지점에서 최대깊이를 가지며, 끝단에서는 영역의 폭은 약간 증가하였으나 깊이는 오히려 감소하였다. 각 절단면에 대해서 횡단면의 침투형상 계측 결과를 중첩시켜 판 두께별로 Fig.7에 보였고, 종단면의 침투형상 계측 결과를 가열방향으로 연결하여 판 두께별로 Fig.8에 보였다.

### 3.2.2 선가열

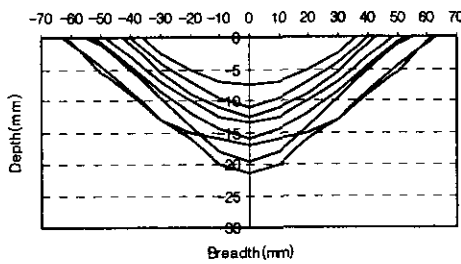
선가열에 의한 변태온도(약 720℃) 이상의 고온영역 계측 결과를 보면 가열의 종점으로 갈수록 폭과 깊이 방향으로 침투영역이 조금씩 증가하고 있으나 전체적으로는 거의 일정하다. 각 절단면에 대해서 횡단면의 침투형상 계측 결과를 중첩시켜 판 두께별로 Fig.9에 보였다.



(a) In case of plate thickness = 20 mm

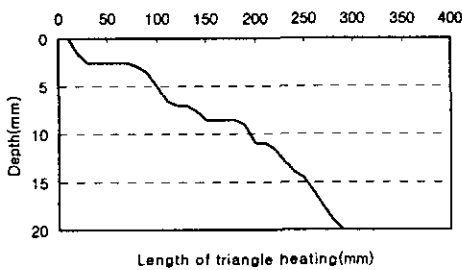


(b) In case of plate thickness = 25 mm

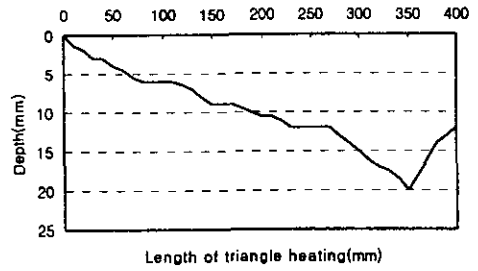


(c) In case of plate thickness = 30 mm

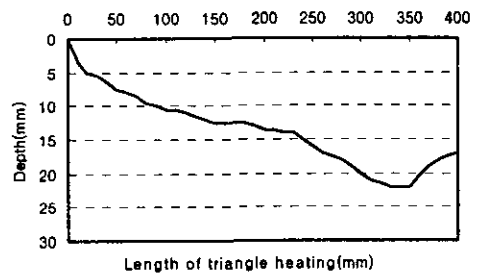
Fig.7 High temperature region of transverse section by triangle heating



(a) In case of plate thickness = 20 mm

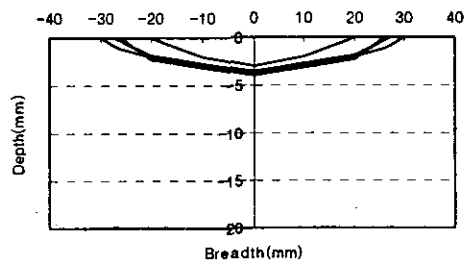


(b) In case of plate thickness = 25 mm

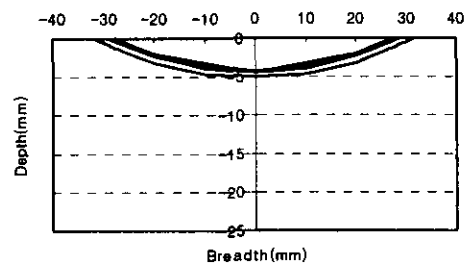


(c) In case of plate thickness = 30 mm

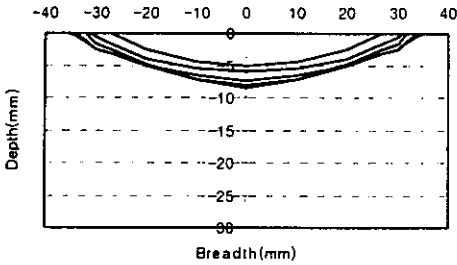
Fig.8 High temperature region of longitudinal section by triangle heating



(a) In case of plate thickness = 20 mm



(b) In case of plate thickness = 25 mm

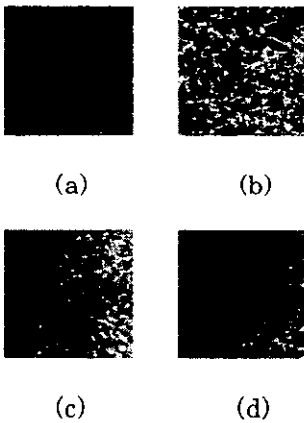


(c) In case of plate thickness = 30 mm

**Fig.9** High temperature region of transverse section by line heating

3.3 미세조직 관찰 결과

가열후 판 표면으로부터 깊이에 따른 현미경 조직 사진을 Fig.10에 보였다.



**Fig.10** Microstructures of heat affected zone and base metal

가열표면에서부터 pearlite가 분해되기 시작하여 모재 부분인 (d) 영역보다 grain size가 작아지고 균일 미세하게 되는 전형적인 normalizing 효과가 나타났다. 미세조직의 관찰을 통해 추정 가능한 최고도달온도는 다음과 같다.

- (a) 영역 : 1300℃
- (b) 영역 : 950℃
- (c) 영역 : 720℃

판 두께방향으로 변화하는 미세조직의 관찰을 통해 변태온도 이상으로 되는 영역의 크기를 정밀 계측할 수 있었으며 (c) 영역과 (d) 영역의 경계는 단면 가공 및 에칭을 통해 육안으로도 확인가능하였다.

3.4. 물리시험 결과

3.4.1 인장시험

판 두께 25mm의 삼각가열 시험편에 대해 삼각가열의 끝단부와 가열하지 않은 모재부분에서 각각 1개의 인장시험편을 제작하여 항복강도, 인장강도 및 연신율을 측정하였다. 이때, 표점거리는 50mm로 하였다. 삼각가열 끝단에서의 가열폭이 100mm이므로 끝단에서 폭방향으로 채취한 인장시험편의 표점거리 안에는 비가열 부위가 포함되지 않는다. 또한, 인장시험편의 두께는 판 두께와 같고, 가열에 의한 변형을 따로 교정하여 시험편을 제작하지는 않았다.

Fig.11에서와 같이 모재시험편은 시험편의 중앙에서 파단되었고, 가열 시험편은 열받은 부위가 아닌 곳에서 파단되었으며, Table 2에서와 같이 항복강도와 인장강도는 가열시험편의 경우가 모재시험편의 경우보다 크게 나왔으나 연신율은 50% 이하로 저하되었다. 두 경우 모두 선급규정을 충분히 만족하고 있다.

**Table 2** Results of tensile test

	Specimen 1 (Base metal)	Specimen 2 (Triangle heated)	Rule requirement
Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	275.7	422.8	235
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	326.5	539.7	400
Elongation (%)	48.3	20.7	-

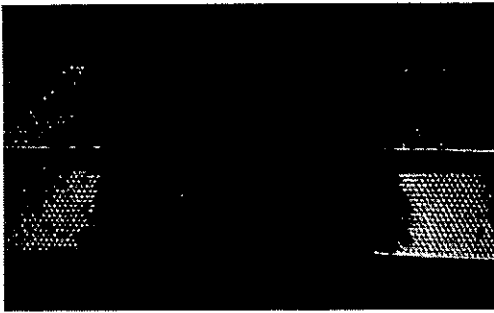


Fig.11 Photo of tensile test specimens

3.4.2 굽힘시험

판 두께 20mm의 삼각가열 시험편에 대해 삼각가열 끝단부에서 시험편 2개를 제작하여 180° 굽힘시험을 실시하였다. 이때, 곡률반경 38R의 굽힘 JIG를 이용하였다. 열영향부가 과도하게 경화될 경우 굽힘시험에서 크랙이 발생하여 전파하는 경우가 발생하지만 곡가공시 열영향부가 판 두께를 관통하는 경우에 대해서도 Fig.12에서 보이는 바와 같이 파단은 발생하지 않았다.

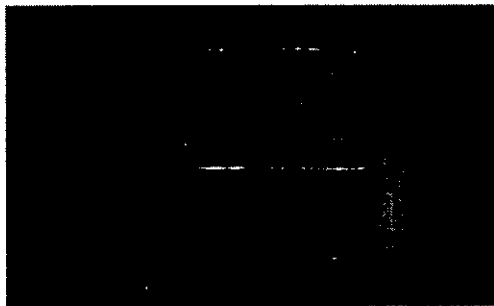


Fig.12 Photo of bending test specimens

3.4.3 충격시험

판 두께 30mm의 삼각가열 시험편에 대해 삼각가열 끝단부 표면 1mm이하 부분과 가열하지 않은 모재부분에서 가열선에 수직한 방향으로 각각 6개의 시험편을 제작하여 CHARPY V-notch impact test를 실시하였고 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

0℃와 상온(24℃)에서 각각 3개씩의 시험편에

대해 실시하였으며, Table 3에서 볼 수 있듯이 측정된 충격치는 시험편에 따라 다소 기복이 있으나 평균적으로 가열시험편의 충격치에 특별한 문제는 없었다.

Table 3 Results of CHARPY V-notch impact test (UNIT:Joule)

	Test Temp.	1st	2nd	3rd	Avg.
Normal	0℃	128.0	31.2	129.9	96.3
	24℃	261.1	258.4	134.2	217.9
Heating	0℃	79.3	155.6	244.1	159.6
	24℃	254.3	249.6	249.5	251.1

4. 결론

선수미 후판의 곡가공에 실시하고 있는 전형적인 선가열 및 삼각가열에 대한 일련의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선가열 및 삼각가열에 의한 판의 변형특성을 파악하였다. 선가열에 의한 횡굽힘은 가열의 시점과 종점을 제외하면 거의 일정한 값을 갖으며 횡수축은 전체적인 크기는 작지만(최대 수축량 : 1mm) 가열의 종점으로 갈수록 점점 증가하는 경향을 보인다. 삼각가열에 의한 굽힘변형은 가열의 시점 부근에서 집중적으로 일어나고 가열의 종점(판의 경계)에서는 거의 발생하지 않는다. 또한, 삼각가열에 의한 횡수축량은 가열의 시점으로부터 종점에 이르기까지 거의 선형적으로 증가하여 종단부에서 최대수축량을 가지며 그 크기는 종단부 가열폭이 100mm일때 2.5~3.5mm 정도이다.

2. 두께방향으로 변화하는 미세조직의 관찰을 통해 가열에 의한 변태온도(약 720℃) 이상 고온 영역의 크기를 확인함으로써 변형특성을 합리적으로 해명하였다. 변태온도 이상으로 되는 고온영역의 크기는 소성변형이 집중되는 영역의 크기를 나타내는 것으로 볼 수 있고 이를 통해 변형특성과의 상호 연관성을 쉽게 찾을 수 있다.



3. 가열시험편에 대한 물리시험을 통해 현재 조선소에서 행해지는 열간가공 방법이 선각재료의 성질 변화에 미치는 영향을 검토하였다.

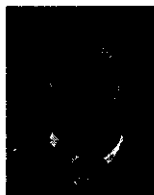
4. 본 연구 결과는 향후 효과적인 변형해석 기법의 개발을 위해 활용할 수 있으며, 고주파가열 등 입열량을 정량적으로 제어할 수 있는 가열방법과 함께 고품질 자동화에 크게 기여 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 장창두, 김병일 1993 "선상가열에 의한 판굽힘 변형에 대한 연구", 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집
- 장창두, 서승일, 고대은 1997 "간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제34권, 제3호
- 고대은, 장창두, 서승일, 이해우 1999 "곡가공 자동화 시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션", 대한조선학회논문집, 제36권, 제4호
- 고대은 1998 "열탄소성 해석 모델을 이용한 선상 가열시의 판의 변형 예측에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사 학위 논문
- Nomoto, T., Ohmori, T., Sutoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K., and Saitoh, M. 1990 "Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168 (in Japanese)
- Nomoto, T., Takechi, S., Shouki, K., Aoyama, K., Enosawa, M. and Saitoh, M. 1991 "Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating Considering In-Plane Shrinkage", Jour. of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 170 (in Japanese)
- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J. 1991 "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(1st Report). Relation Between Final Form of the Plate and Inherent Strain", Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170 (in Japanese)
- Satoh, K. and Terasaki, T. 1976 "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials", Jour. of the Japanese Welding Society, Vol. 45, No. 4 (in Japanese)
- 渡辺正紀, 佐藤邦彦 1965 溶接力學とその應用, 朝倉書店, 東京



〈 장 창 두 〉



〈 고 대 은 〉



〈 김 병 일 〉



〈 박 정 웅 〉