대 한 조 선 학 회 논 문 집
제38권 제4호 2001년 11월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 38, No. 4, pp.66-74, November 2001

삼각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션

장창두*, 고대은**, 문성춘***, 서용록****

Simulation of Plate Deformation by Triangle Heating Process

Chang-Doo Jang*, Dae-Eun Ko**, Sung-Choon Moon***
and Yong-Rok Seo****

요 약

선체 외판 제작을 위한 곡가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이다. 프레스를 이용한 냉간가공과 가스토치를 이용한 열간가공이 주를 이루는데, 특히 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하는 열간가공 공정에 대한 자동화 요구가 증대되어 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 향후 삼각가열에 대한 효율적인 변형해석 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서 삼각가열에 의한 판의 변형특성과 그 주요인자를 파악하고자 하였다. 실제 조선소에서 현장조건 그대로 Jang 등(2001)이 실시한 일련의 삼각가열 실험 결과를 토대로 열탄소성 해석을 위한 수치해석 모델을 개발하고 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션하였다. 또한, 총 투입 열량이 같은 경우 선상가열과 삼각가열에 의한 변형 양상을 비교하여 각 가열법에 따른 변형 특성을 보다 명확히 하였다. 마지막으로, 단위부피당 투입열량에 따른 각 변형 성분의 변화 특성을 살펴보았다.

※Keywords: Heating Process(열간가공), Triangle Heating(삼각가열), Thermal-elastic-plastic Analysis(열탄소성해석), Deformation Characteristic(변형특성)

Abstract

Plate bending process is indispensible in shipbuilding. The process includes press bending process and heating process. Especially the heating process is carried out exclusively by skillful workers. Many researches have been made to automate the heating process. This study was carried out as a fundamental study to develop a efficient analysis method for triangle heating and focused on clarifying the deformation characteristics of plate by triangle heating and the essential elements

접수일자: 2001년 4월 21일, 승인일자: 2001년 9월 20일
* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수 (E-mail: cdjang@snu.ac.kr)
** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사후 연구원 (E-mail: deko@dreamwiz.com)
*** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사 (E-mail: mschoon@dreamwiz.com)
**** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 석사

effect on the deformation. In this paper, we proposed an analysis model for thermal-elastic-plastic analysis and simulated the deformation by triangle heating using ANSYS based on the experimental results of Jang et al.(2001). Also, we showed the deformation characteristics more clearly by comparing the deformation due to triangle heating and line heating in case that the total heat input is same.Finally, we investigated the change characteristics of deformation elements according to the volumetric heat input.

1. 서론

선체 외판 제작을 위한 곡가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이다. 프레스를 이용한 냉간가공과 가스토치를 이용한 열간가공이 주를 이루는데, 특히 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하는 열간가공 공정에 대한 자동화 요구가 증대되어 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

열간가공에 의한 변형은 가열과 냉각에 따른 열전도 과정, 불균일한 열응력 생성 과정, 온도 변화에 따른 재료의 기계적 성질 변화 등의 복잡한 역학적 과정을 거쳐 생성되는 잔류소성변형에 기인한다.

열간가공에 의한 변형을 이론적으로 해석하는 방법으로는 열탄소성 해석법과 고유변형도법을 들 수 있다. 열탄소성 해석법은 전산기의 발전에 힘입어 실용화 된 것으로 매트릭스 연산의 수치적 방법을 이용하여 열전도에 따라 구조물에 발생하는 탄소성 반복 과정을 역학적으로 추적하는 방법이다. 그러나 이 방법은 전산기의 급속한 발전에도 불구하고 재료의 비선형성과 기하학적 비선형성을 고려하는데 따르는 막대한 계산시간으로 인해 실시간으로 변형을 제어하기 위한 목적으로 활용하기는 극히 곤란하다. 고유변형도법은 고유변형도를 가정하고 이 변형도에 따라 탄성적으로 응력 및 변형을 구하는 방법으로 간편성이 큰 장점인 반면 고유변형도의 적절한 가정 여부에 따라 결과가 크게 영향을 받으므로 다양한 경우에 대해 정확성을 보장하기가 곤란한 단점이 있다. 최근에는 열탄소성 해석법과 고유변형도법의 장점을 조합하려는 연구 경향이 지배적이다. 신상가열에 대한 연구로써, Nomoto 등(1990)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. Jang 등(1997)은 고유변형도법에 기초한 열탄소성 해석법을 제시하고 탄성 대변형 해석을 통해 선상가열에 의한 판의 변형을 실시간으로 제어 할 수 있는 해석법을 제안하였다.

그러나, 이러한 최근까지의 연구는 주로 선상가열에 한정되어 상대적으로 복잡한 삼각가열에까지 확장하기에는 무리가 따른다. 곡률이 큰 선수미의 소형 후판에 주로 적용되는 삼각가열은 선가열에 비해서 몇 배의 많은 작업시수를 요하며 작업 난이도 또한 월등히 높다.

본 연구는 향후 삼각가열에 대한 효율적인 변형해석 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서 삼각가열에 의한 판의 변형특성과 그 주요인자를 파악하고자 하였다. 실제 조선소에서 현장조건 그대로 실시한 일련의 삼각가열 실험 결과를 토대로 열탄소성 해석을 위한 수치해석 모델을 개발하고 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션하였다. 또한, 총 투입 열량이 같은 경우 선상가열과 삼각가열에 의한 변형 양상을 비교하여 각 가열법에 따른 변형 특성을 보다 명확히 하였다. 마지막으로, 단위 부피당 투입열량에 따른 각 변형 성분의 변화 특성을 살펴보았다.

2. 삼각가열 수치해석

2.1 선상가열과 삼각가열의 차이점

삼각가열은 삼각형 모양으로 가열한다는 데서 나온 말이며 삼각형의 길이와 폭 및 가열시간에 대해 정해진 규칙이 있는 것은 아니다. 이는 전적으로 숙련된 기능공의 경험에 의존한 것으로써 수십년간 이러한 방법으로 선체의 외판이 제작되었다. 저자는 현장의 작업 know-how를 이론적 해석법으로 이끌어 내기 위해 장기간 실제 현장에서 관찰, 조사하였다.

삼각가열은 가열패턴 뿐만 아니라 결과로 발생하는 변형에 있어서도 선상가열과는 크게 구별된다. 우선 가열패턴에 있어서 선상가열은 말 그대로 선상을 따라가면서 균일하게 가열하는 반면 삼각가열은 가열 시작부에 비해서 가열 종반부로 갈수록 가열 면적이 점차 넓어지고 가열 시간도 비선형적으로 길어진다. 열원을 이동시킬 때는 판 표면을 손상시키지 않으면서 원하는 폭과 시간만큼 가열하기 위해 가스토치를 빙글빙글 돌리면서 전진시키는 이른바 weaving 패턴을 주로 사용한다. 이것은 선상가열과 삼각가열 모두에 적용되며 판 두께와 요구되는 곡량에 따라 가열 폭과 가열 속도를 결정한다.

선상가열은 판 경계에서 V-자로 꺾이는 knuckle 현상을 피하기 위해 되도록 끝단까지 가열하지 않지만 삼각가열은 이와는 달리 판 경계 부근을 집중적으로 가열하여 원하는 수축량을 발생시키는 가열방법이다. 이와같이 일반적으로 선상가열은 굽힘변형을 목적으로 실시하고 삼각가열은 수축변형을 목적으로 실시하는 것으로만 이해되고 있으나, 실제로는 선상가열에 의해 발생하는 수축변형은 미미하지만 삼각가열에 의해 발생하는 굽힘 변형은 무시할만한 것이 아니다. 가스토치로 편면을 가열하는 현재의 방식으로 굽힘변형 없이 수축변형만을 발생시키는 것은 가능하지도 않을뿐더러 효과적이지도 않다. 예를들어 선수미부에 주로 나타나는 대곡량의 concave-type 판을 만들기 위해서는 프레스로 1차곡을 준 후에 굽힘과 수축이 동시에 발생하는 삼각가열만으로 성형한다. 삼각가열은 선상가열로 대치될 수 있는 것이 아니다.

Jang 등(2001)은 실제 조선소의 현장 조건 그대로 일련의 선상가열 및 삼각가열 실험을 수행하여 각각의 변형특성을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 이를 토대로 삼각가열용 수치해석 모델을 개발하고, 각 가열조건에 따른 변형을 시뮬레이션하여 잔류변형에 미치는 인자들의 영향을 파악함으로써 향후 고유변형도법 등을 결합한 효과적인 변형해석법 개발의 기초를 마련하고자 하였다.

2.2 삼각가열 수치해석 모델

Jang 등(2001)의 실험결과에 따르면 삼각가열에 의한 굽힘변형은 삼각가열의 시점 부근에서 집중적으로 일어나고 종점(판의 경계)에서는 거의 발생하지 않으며, 횡수축량은 가열의 시점으로부터 종점에 이르기까지 거의 선형적으로 증가하여 종단부에서 최대수축량을 갖는다. 또, 시험편의 절단가공 및 에칭을 통한 고온영역 계측 결과에서 상변태온도(약 720℃) 이상의 고온영역은 판 두께 및 가열조건에 따라 다소 차이가 있었으나 판 두께를 관통하는 경우를 제외하면 가열의 시점으로부터 종점에 이르기까지 깊이 방향으로의 침투가 점점 증가하여 종단부로부터 약 50mm 지점에서 최대 깊이를 가지며 판 두께의 70~80%에 이르렀다.

삼각가열에 의한 판의 변형을 열탄소성 해석법으로 시뮬레이션하는데 있어서 우선적으로 필요한 것은 합리적인 해석모델의 도출이다. 또한, weaving하며 전진하는 토치의 경로를 그대로 따라가며 입열 모델링 하는 것은 매우 비효율적이며 해석시간 등의 문제로 사실상 불가능에 가까우므로 합리적으로 이상화된 수치해석 모델이 필요하다. 본 연구에서는 상기한 삼각가열에 대한 고찰을 바탕으로 합리적이면서도 되도록 간단한 수치해석 모델을 설정하고자 하였다.

삼각가열용 수치해석 모델의 도출을 위한 가정은 다음과 같다.

(가정 1) : 가스토치의 단일 열속은 가우스 분

포를 따른다.

(가정 2) : Weaving은 제안된 단일 열속이 일렬로 전진하는 것과 같다.

(가정 3) : (가정 1), (가정 2)로부터 전체 열속의 최대 크기는 일정하며 외부 경계는 가우스 분포를 이룬다(Fig. 1).

(가정 4) : 가열 폭과 가열 시간은 선형적으로 증가한다.

(가정 5) : 가열의 진행은 각 step 변적에 순차적으로 입열시키는 것과 같다(Fig. 2).

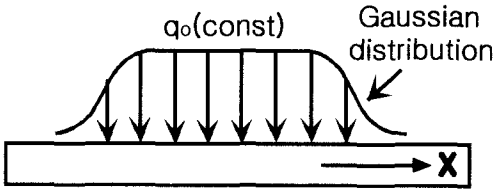


Fig.1 Shape of proposed heat input

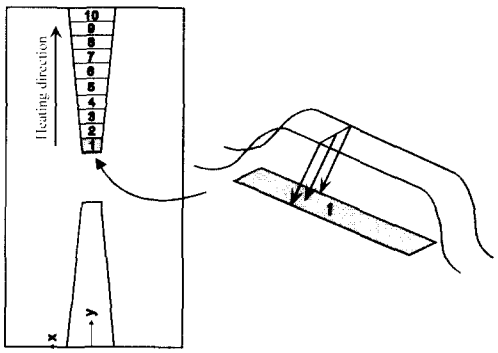
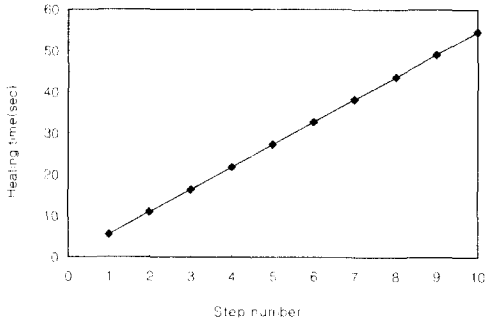
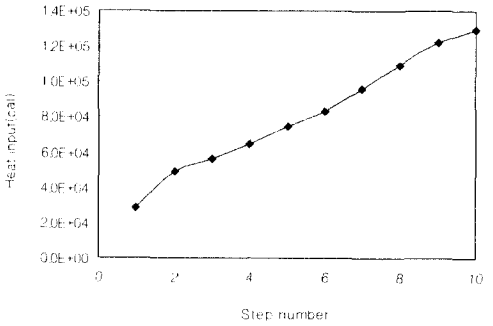


Fig.2 Heating step

판 두께 30mm, 열속의 평균 이동속도 1.333 mm/sec인 해석 모델의 경우 각 step별 가열 시간과 입열량은 Fig.3과 같다.



(a) Heating time



(b) Heat input

Fig.3 Heating time and heat input according to each step in case of plate thickness=30mm

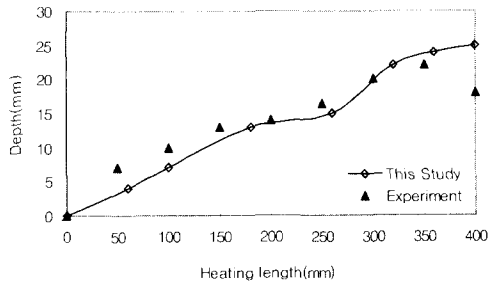
3. 해석결과 및 고찰

3.1 고온 영역의 분포형상

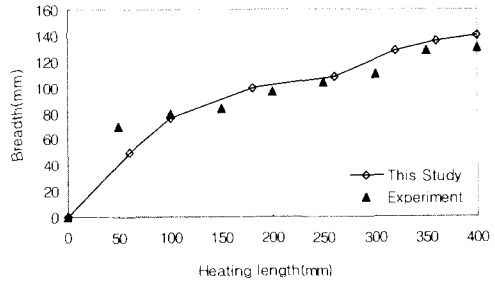
Jang 등(2001)은 가열시험편에 대하여 판 두께 방향으로 변화하는 미세조직의 관찰을 통해 변태온도 이상으로 가열된 고온 영역의 크기를 계측하였다. 본 연구에서는 수치해석 결과의 보증을 위해 과도 열전도 해석 결과를 실험결과와 비교하였다. 선각의 재료로 쓰이는 연강재는 대체로 700℃ 이상의 온도에서는 인장 시험에 의한 항복점이 극히 작으며 따라서 변형에 저항하는 능력을 거의 상실한다고 볼 수 있으므로 Ko 등(1999)은 선상가열에 의한 변형을 시뮬레이션하기 위해 제안한 열탄소성 해석법에서 이러한 고온 영역을 소

성변형이 집중되는 고유변형도 영역으로 가정하기도 하였다. 상변태라는 것은 금속의 조직변화를 나타내는 야금학적 용어이지만, 상변태 영역이 비교적 쉽게 확인 가능하고 그 온도가 약 720℃로서 앞서 언급한 온도와 거의 일치하므로 향후 삼각가열을 위한 고유변형도 법의 정립에 있어서 고유변형도 영역의 결정에 활용할 수 있을 것이다.

예로써, 30mm 두께의 판에 실시한 삼각가열에 대하여 실험으로 계측한 상변태온도 이상의 영역과 과도 열전도 해석으로 얻은 720℃ 이상의 영역을 Fig.4에서 비교하여 보였다. 실험결과와 마찬가지로 해석결과에 있어서도 고온영역의 폭과 깊이는 가열 종반부로 갈수록 선형적으로 증가하였으며, 이를 통해 제안된 입열 모델이 타당함을 알 수 있다. 열전도 해석시 재료의 물성치 및 기계적 성질은 Lee(1999)의 논문을 참고하였다.



(a) Depth of high temperature region

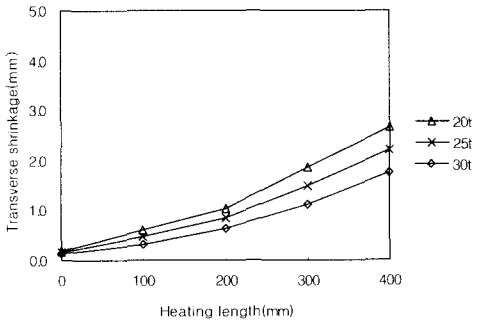


(b) Breadth of high temperature region

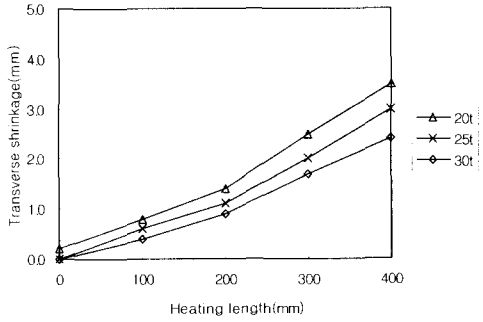
Fig.4 Comparison of high temperature region in case of plate thickness=30mm

3.2 횡수축

Fig.5에 보인 바와 같이 본 연구의 해석 결과와 실험 결과는 대략 20% 오차 범위에서 일치하고 있다. 가열방향에 대해 수직으로 발생하는 횡수축량은 전체 판의 크기에 비하여 거의 미미한 수준에 불과하다는 점과 실제 삼각 가열 작업은 매우 불규칙하다는 점을 감안하면 비교적 잘 부합하는 것으로 판단된다.



(a) By analysis

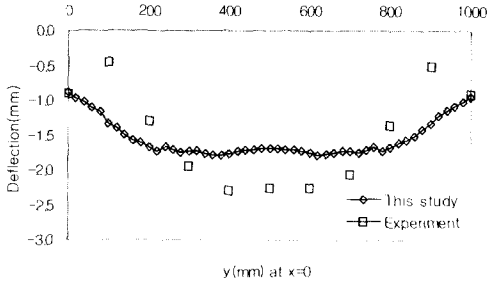


(b) By experiment

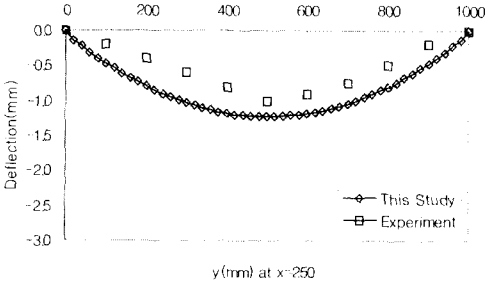
Fig.5 Comparison of transverse shrinkage

3.3 횡굽힘

Fig.2의 가열선 중심부(x=0)와 판의 끝단(x=250)에서 처짐량을 비교하여 Fig.6에 보였다. 실험 결과와 수치 해석 결과는 대체로 잘 부합한다.



(a) Deflection at x=0



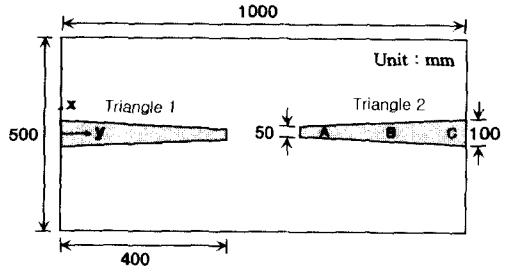
(b) Deflection at x=250

Fig.6 Comparison of deflection in case of plate thickness=30mm

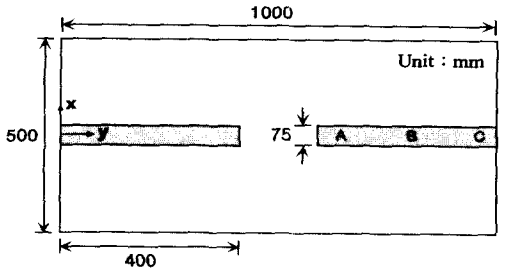
4. 삼각가열과 선상가열의 변형특성

4.1 비교 대상

원하는 곡면 형상을 얻기 위해 어떠한 가열법으로 어디를 얼마만큼 가열할 것인가는 현장의 작업자가 자신의 경험에 비추어 결정한다. 물론 concave나 convex 또는 twist-type의 개별적인 판에 대해서는 거의 정형화된 가열방법이 있고 누구나 이해할 만 한 것이지만 복잡한 형상의 판에 대해서는 수십년의 경력자조차 시행착오적인 방법에 의존할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 선상가열과 삼각가열에 의한 각각의 변형 특성을 보다 명확히 이해하기 위해 Fig.7과 같은 비교해석 모델을 설정하고 총 투입 열량이 같은 조건에서 각각의 변형을 구하였다. 판 두께는 모두 30mm이다. 삼각가열 모델인 Fig.7(a)의 경우 입열방법, 입열순서, 입열시간 및 입열량은 2.2절에 기술한 바와 같고, 선가열 모델인 Fig.7(b)의 경우는 가열폭이 일정하므로 총 가열시간 및 총 투입 열량이 같도록 입열시간 및 입열량을 균등 분배하였다. 열전도 해석시 재료의 물성치 및 기계적 성질은 Lee(1999)의 논문을 참고하였다.



(a) Triangle heating model



(b) Line heating model

Fig.7 Analysis models for comparison

4.2 해석결과 비교

4.2.1 고온 영역의 분포형상

ANSYS를 이용해서 열전도 해석을 통해 구한 상변태온도(약 720℃) 이상의 고온영역과 실험결과를 Fig.8, Fig.9에 비교하여 보였다.

삼각가열은 가열 종반부로 갈수록 고온영역의 깊이와 폭이 선형적으로 증가하는 양상을 보이며, 선상가열은 가열 시점을 제외하면 거의 비슷한 값으로 유지된다. 총 투입 열량이 같으므로 전체 고온영역의 넓이는 삼각가열과 선상가열 모두 비슷하지만 삼각가열은 선상가열에 비해 전체 투입 열량 중에서 가열 종반부에 투입되는 열량의 비중이 크며 고온영역도 가열 종반부에 넓게 분포한다.

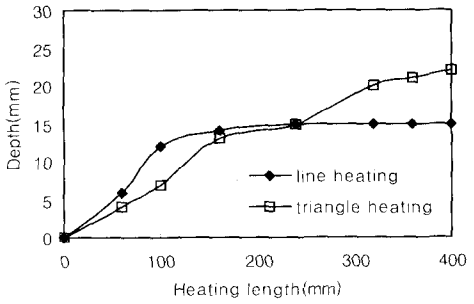


Fig.8 Comparison of depth of high temperature region in case of plate thickness=30mm

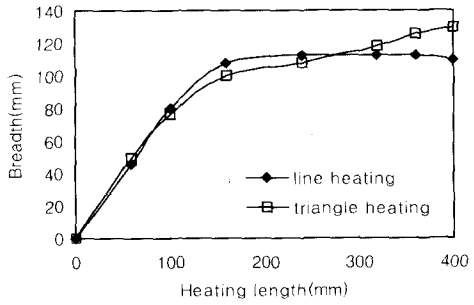


Fig.9 Comparison of breadth of high temperature region in case of plate thickness=30mm

4.2.2 횡수축

삼각가열과 선상가열에 의한 A, B, C 지점(Fig.7)에서의 횡수축량을 Table 1에 정리하였다. 삼각가열과 선상가열 모두 가열 초반부보다는 가열 종반부에서 횡수축량이 더 크게 나타나는데, 이는 가열의 종반부에서 수축에 대한 저항을 적게 받기 때문으로 이해된다. 전체적으로는 삼각가열의 횡수축량이 더 크며 이는 종반부로 갈수록 투입 열량이 많아져서 소성변형이 집중되는 고온영역의 폭과 두께가 증가하기 때문이다.

4.2.3 횡굽힘

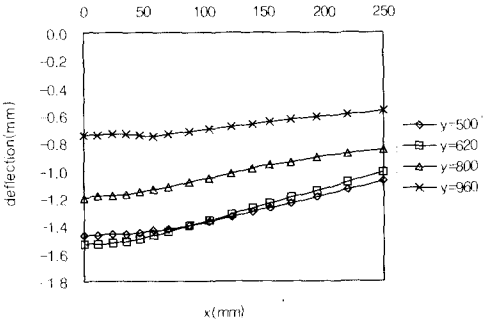
삼각가열과 선상가열에 의한 A, B, C 지점(Fig.7)에서의 횡굽힘량을 Table 2에 정리하였다. 선상가열 모델은 가열 시작부에서 가열 종반부까지 각변형이 비교적 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 삼각가열 모델은 가열 시작부에서 각변형이 가장 크고, 가열 중반부까지는 비슷한 값이 유지되면서 다소 감소하다가 가열 종반부로 가면서 그 값이 점점 더 떨어져서 판 끝에서는 거의 없어지고 있다. 한편, 처짐량 자체는 Fig.10에 보인 바와 같이 삼각가열의 경우가 더 크다.

Table 1 Comparison of transverse shrinkage(Unit : mm)

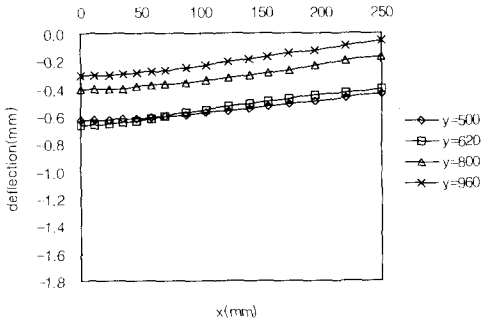
	Triangle heatibg	Line heating
A	0.14712	0.13145
B	0.52400	0.44148
C	1.13322	0.94796

Table 2 Comparison of angular deformation(Unit : degree)

	Triangle heatibg	Line heating
A	0.119	0.042
B	0.079	0.075
C	0.042	0.065

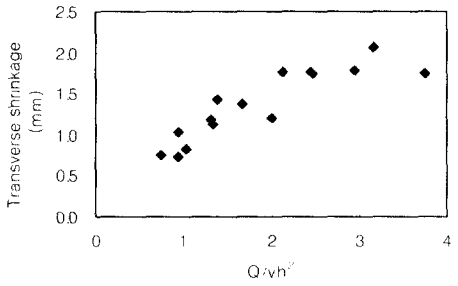


(a) Deflection by triangle heating

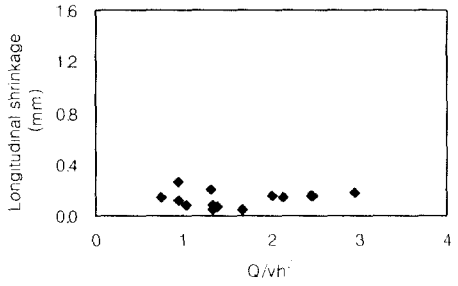


(b) Deflection by line heating

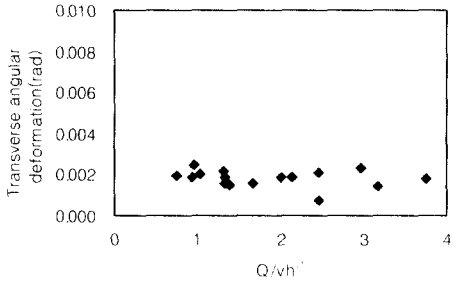
Fig.10 Comparison of deflection in case of plate thickness=30mm



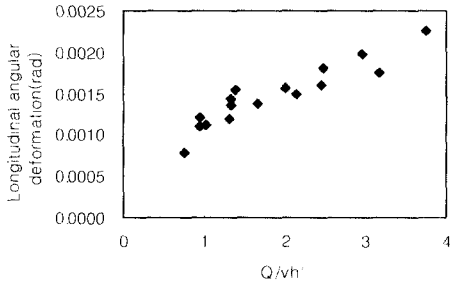
(a) Transverse shrinkage vs Q/vh^2



(b) Longitudinal shrinkage vs Q/vh^2



(c) Transverse angular deformation vs Q/vh^2



(d) Longitudinal angular deformation vs Q/vh^2

Fig.11 Relations between input parameter and residual deformations

5. 투입열량에 따른 각 변형 성분의 변화 특성

선상가열에 의한 판의 변형은 주로 투입 열속 Q(cal/sec), 판 두께 h(mm), 열속의 이동 속도 v(mm/sec)에 지배적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 삼각가열 역시 같은 인자들의 영향을 받는다고 가정하고 각 인자를 변화시켜가면서 가열 중심선(x=0)에서의 종수축량 및 종각변형과 판 끝단(y=1000)에서의 횡수축량 및 횡각변형을 구하여 Fig.11에 보였다.

Q/vh^2은 단위부피당 투입된 열량(volumetric heat input)이다. 횡수축량은 Q/vh^2에 대해서 양의 상관 관계가 있으나 투입 열량이 어느정도 커지면 더 이상 증가하지 않는 임계점이 존재하였고, 종각변형은 Q/vh^2이 커짐에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 나타냈다. 그러나 횡각변형과 종수축량은 Q/vh^2에 대한 뚜렷한 상관 관계가 발견되지 않았다. 삼각가열의 종점에 해당하는 판 끝단(y=1000)에서는 고온영역의 침투 깊이가 판 두께의 70%~80%에 이르러 횡각변형은 절대값이 작으며, Q/vh^2의 증가에 따라 다소 감소하는 경향이 있을 것으로 생각된다. 가열선 방향의 이동열원에 대해서 가열되고 있는 부위를 제외한 판의 대부분은 탄성상태에 있으므로 변형에 저항하는 힘이 크고, 따라서 가열중심선(x=0)에서의 종수축량 역시 투입열량에 민감하지는 않지만 Q/vh^2의 증가에 따라 다소 증가하는 경향이 있을 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 Jang 등(2001)이 수행한 일련의 삼각가열 실험 결과를 토대로 열탄소성 해석을 위한 수치해석 모델을 제안하고 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션하였으며 실험결과와 비교 검증하였다. 또한, 총 투입 열량이 같은 경우에 대해 선상가열과 삼각가열에 의한 변형 양상을 비교함으로써 각 가열법에 따른 변형 특성을 명확히

하였고 단위부피당 투입열량에 따른 각 변형 성분의 변화 특성을 고찰하였다. 본 연구는 향후 고유변형도법 등과 결합함으로써 보다 효율적인 변형해석 기법을 개발하기 위한 기초가 된다.

참 고 문 헌

- 고대은 1998 "열탄소성 해석 모델을 이용한 선상가열시의 판의 변형 예측에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사 학위 논문
- 고대은, 장창두, 서승일, 이해우 1999 "곡가공 자동화 시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션", 대한조선학회논문집, 제36권, 제4호
- 이장현 1999 "유한 요소법과 다변수 해석을 이용한 선상 가열 가공 조건과 변형량과의 관계", 서울대학교 대학원 박사 학위 논문
- 장창두, 서승일, 고대은 1997 "간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제34권, 제3호
- 장창두, 고대은, 김병일, 박정웅 2001 "열간가공에 의한 판의 변형특성에 관한 실험적 연구", 대한조선학회논문집, 제38권, 제2호
- 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)
- 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)
- 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)
- 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 〉