
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 32 卷 第 2 號 1995 年 5 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 32, No. 2, May, 1995

유한요소해석에 의한 선상가열 변형의 시뮬레이션

노인식*, 신종계**, 이광한***

Simulation of Line Heating Process by Finite Element Analysis

by

I. S. Nho*, J. G. Shin** and K. H. Lee***

요 약

생산현장의 판굽힘가공 자동화를 위한 기초연구로서 강판의 선상가열 변형을 역학적 측면에서 고찰하고 3차원 비선형 과도 열탄소성 유한요소해석을 통한 수치 시뮬레이션을 시도하였다. 가스 토치에 의해 가열되는 평판의 비정상 열전달 문제를 해석하여 온도분포의 시간이력을 계산하였고 이를 바탕으로 평판의 과도 열변형과정을 해석하였으며 그 결과를 상세히 고찰하였다.

Abstract

As a basic research for the automation of plate forming process, the theoretical aspect of plate bending by line heating was surveyed and numerical simulation of plate bending deformation was performed using the 3-dimensional nonlinear transient thermal elasto-plastic finite element analysis. Analyzing the unsteady heat conduction problem of the flat steel plate under heat flux input by gas torch, the time history of 3-dimensional thermal distribution was obtained. Transient thermal deformation process of the plate was analyzed under the thermal loading. And the calculated results are investigated in detail.

발 표 : 1994년도 대한조선학회 추계발표회('94. 11. 12.)

접수일자 : 1994년 12월 1일, 재접수일자 : 1995년 4월 8일

* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

*** 학생회원, 충남대학교 선박해양공학과

1. 서 언

선체구조는 여러가지 형상의 판재와 형재 등의 조합으로 이루어진 복잡구조물이며 특히 선수, 선미부 등의 외판은 기하학적으로 복잡한 곡면형상으로 성형되어있다. 이러한 선체외판의 곡면 굽힘가공에는 프레스, 롤러 등을 이용하는 기계적 냉간가공법과 가열에 의한 잔류 열소성 변형을 이용하는 선상가열법이 적용되고 있다. 일반적으로 한 방향으로 일정한 곡률을 갖는 단순한 1차곡면의 성형에는 제어의 편이성 때문에 기계가공법이 많이 이용되고 있으나 양축 방향으로 곡률이 존재하는 2차곡면의 경우 특히 선박과 같은 대형 중구조물에서는 고가의 대용량 대형설비가 필요하기 때문에 기계가공법의 경제성은 현저히 저하되며 따라서 대부분 선상가열에 의한 굽힘성형법이 적용된다. 선상가열법은 간단한 장비로 손쉽게 취급할 수 있다는 장점으로 인하여 판굽힘가공 뿐만 아니라 용접잔류변형의 제거작업에도 널리 이용되고 있다.

선상가열법에 의한 곡가공은 일반적으로 판의 크기, 형상, 입열량, 냉각방법 등 수많은 작업변수에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 기능인력의 작업경험에 전적으로 의존하고 있으며, 이러한 기능인력의 경험은 전혀 객관적인 기술자료로 체계화되어 있지 않다는 문제점이 있다. 또한 최근의 고임금, 힘든 작업기피, 노사분규 등의 사회적 배경은 전형적인 3-D 작업에 속하는 선상가열업종 기능인력의 감소 및 노령화 현상과 함께 기능의 승계에도 심각한 영향을 미칠 것으로 예측됨에 따라 생산성향상 목표와 더불어 선상가열법의 자동화기술 개발을 적극적으로 요구하게 되었다.

역학적인 측면에서 본다면 선상가열에 의한 평판의 단계적인 열변형거동은 3차원 과도 비선형 열탄소성 변형 문제로 정의할 수 있으나 고도의 비선형 문제이기 때문에 정상적인 해석수법으로는 상당한 계산시간이 필요하다. 따라서 선상가열에 의한 곡가공 공정을 자동화하기 위해서는 이러한 열탄소성 변형의 실시간 간이 시뮬레이션 기술의 개발이 우선되어야 할 것이다. 이 분야에서는 Nomoto 등[2][3], Ueda 등[4][5][6][7]의 연구가 선구적인 것으로 평가되고 있고 국내에서도 신종계 등[8], 이주성 등[9][10]의 연구노력이 대부분 여기에 집중되고 있으나 현재로서는 실용화까지 이르지 못하고 있는 실정이다. 이러한 선상가열 시뮬레이터의 개발을 위해서는 변형의 기본역학이론과 수치해석체계 연구와

아울러 조선소 현장의 곡가공기술 경험자료 및 각종 수치해석결과의 효율적인 체계화를 통한 database 구축이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 선상가열에 의한 평판의 굽힘변형을 가능한 한 정밀하게 계산하기 위하여 3차원 유한요소법에 의한 비선형 열전달 및 열변형해석을 시도하였다. 실제 수치계산은 범용 유한요소 구조해석 프로그램 ANSYS 의 8-절점 입체요소를 이용하였고, 비선형 과도 열전달 문제를 풀어 온도분포의 시간이력을 계산한 다음 이 결과를 열하중으로 입력하여 비선형 열탄소성 해석을 수행하는 2 단계 해석법을 적용하였다. 상당한 계산시간이 소요되고 입출력 자료처리에 많은 노력이 필요하기 때문에 다양한 실제 문제에 이 방법을 그대로 적용하여 해를 구하기는 곤란하다는 문제점이 있으나 앞으로 개발되는 여러 가지 간이 시뮬레이션 모델에 대한 기준해의 확립이 필요하며 가열과정의 과도적 변형거동에 대한 정확한 물리적 이해와 함께 구조의 안전성 측면에서도 고온가열로 인하여 평판에 잔류하는 응력의 분포 등에 대한 깊이있는 이론적 고찰은 반드시 이루어져야 할 것으로 생각된다.

2. 선상가열 변형의 특성

2.1 선상가열에 의한 변형의 발생기구

평판을 부분적으로 가열하였다가 냉각하면 그 가열과정에서 발생된 열에 의한 국부적인 소성변형이 단면의 수축 또는 굽힘 등의 잔류변형으로 남게 된다. Luebke[11], Malaret[12] 등은 여러가지 기초적인 실험을 통하여 선상가열 변형의 특성들을 정리하고 있다. 이러한 선행 연구결과들을 종합해 보면 변형의 발생기구는 다음과 같이 개념적으로 설명될 수 있다.(Fig.1)

(1) 열원이 이동하면서 평판을 가열한다.

(2) 가열된 상면이 부분적으로 팽창하면서 평판에는 탄성굽힘변형이 발생되며 내부적으로 압축응력 상태에 놓이게 된다.

(3) 온도가 높아지면 열팽창은 더욱 증가하는 동시에 재료의 항복점은 낮아지게 되므로 작용 압축응력에 의해 국부적으로 쉽게 소성변형이 발생된다. 이때 주위의 온도가 낮은 부분의 항복응력과 강성은 아직 높기 때문에 구속효과가 크고 따라서 소성흐름(plastic flow)은 자유단인 윗방향으로 집중됨으로써 두툼한 형상으로 부풀어 오르게 된다. 이렇게 작용

압축응력이 소성변형으로 흡수되어 감소되면서 각변형량도 작아진다.

(4) 열원이 지나가면 온도가 저하됨에 따라 평판이 본래대로 수축하여 원래 형상을 회복한다. 그러나 이미 상면에 발생되었던 압축 소성변형으로 인하여 평판에는 오히려 반대방향의 굽힘변형이 발생되며 전체적으로 보면 수축변형이 잔류하게 된다.

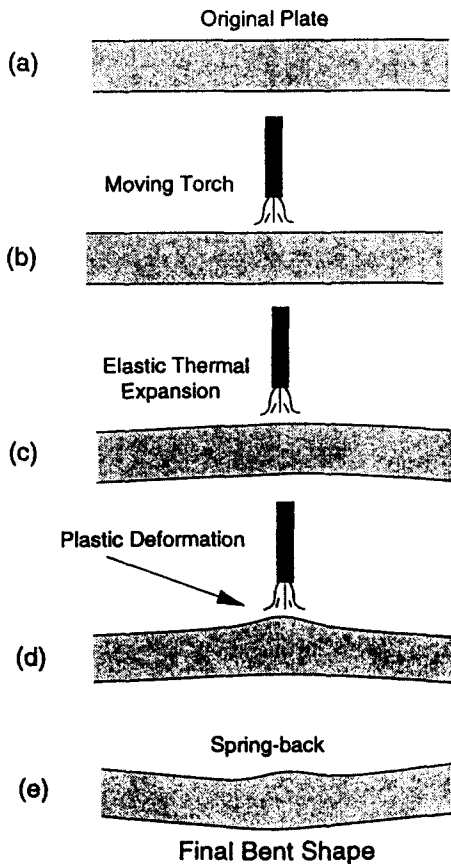


Fig. 1 Sequence of plate bending due to the line heating

2.2 선상가열 변형의 역학적 고찰

Fig.1에서 보인 잔류변형 발생기구를 분석하면 선상가열에 의한 평판의 단계적인 열변형거동을 3차원 과도 비선형 열탄소성 변형 문제로 정의할 수 있으며 토치의 입열에 의한 열전달문제와 연성된다.

(1) 열전달 문제

열원이 평판상에서 임의의 속도로 이동할 때 평판 전체의 온도분포를 계산하기 위해서는 다음과 같은 열전달 특성들을 고려해야 한다.

- ☒ 열하중이 평판의 표면에 분포 열속(heat flux)으로 주어진다.
- ☒ 열원이 임의형상의 판위를 임의속도로 이동하기 때문에 시간 의존적인 비정상 과도문제(time dependent unsteady transient problem)가 된다.
- ☒ 열전달계수(thermal conductivity), 비열(specific heat) 등 열전달과 관련된 재료특성치들이 온도에 따라 변화하는 온도 의존성을 보인다.
- ☒ 따라서 비선형 비정상 과도 열전달문제로 정식화된다.

(2) 열변형 문제

잔류변형을 예측하기 위해서는 온도분포의 시간이력을 입력하여 열탄소성 해석을 수행해야 한다.

- ☒ 이때, 탄성계수(Young's modulus), 항복응력, 경화계수, 열팽창률 등 열응력 해석과 관련된 재료특성 역시 비선형적인 온도의존성을 보이고 있다.
- ☒ 따라서 과도 열탄소성 대변형 문제 (Transient nonlinear thermal elasto-plastic large deformation analysis problem)로 귀착된다.

3. 유한요소해석에 의한 수치 시뮬레이션

3.1 개요

범용 유한요소 구조해석 프로그램 ANSYS 이용하여 엄밀한 비선형 해석을 수행하였다.

(1) 해석순서

앞서 설명한 바와 같이 본질적으로 열전달문제와 탄소성 변형문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상변화가 열전달 문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고 따라서 열전달 문제와 열변형 문제를 decoupling 하여 단계적으로 해석할 수 있다. 즉 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step 에서 계산한 다음 이 결과를

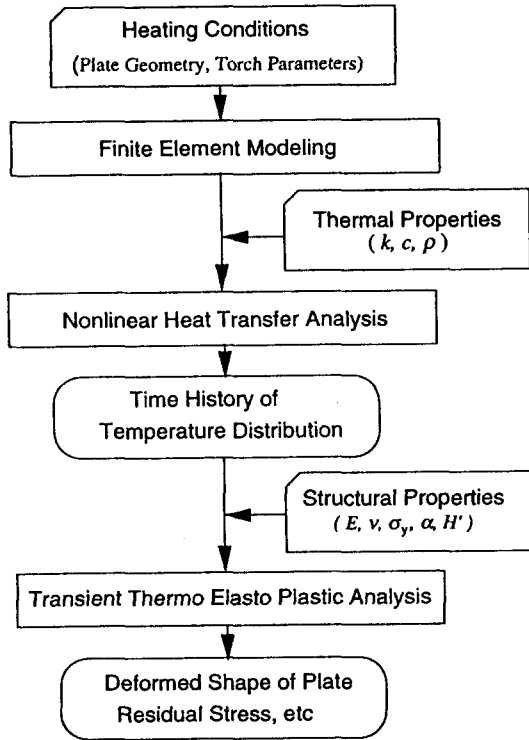


Fig. 2 Flow of numerical simulation by FEM

열하중으로 입력하여 열탄소성해석(thermo elasto plastic analysis)를 수행함으로써 잔류변형을 계산한다. 전체적인 계산의 흐름을 Fig.2에 보였다.

(2) 해석 모델

일반구조용 강판을 3차원 입체요소로 분할하였다. 대칭성을 고려하여 가열선을 중심으로 1/2 만 모델링하였다. 모델링범위와 좌표계를 Fig.3에 나타내었고 모델의 형상을 Fig.4에 보였다. 유한요소해석 모델의 개요는 다음과 같다.

- ☒ 모델크기 : 2m(L) x 1m(B) x 19mm(T)
- ☒ 절점 수 : 5,016 개
- ☒ 요소 수 : 3,224 개의 8절점 입체요소

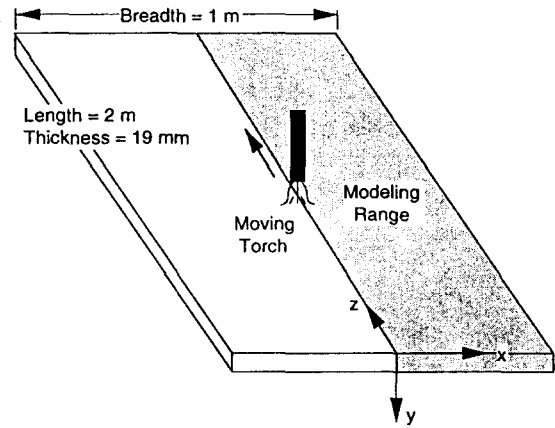


Fig. 3 Modeling range and coordinate system

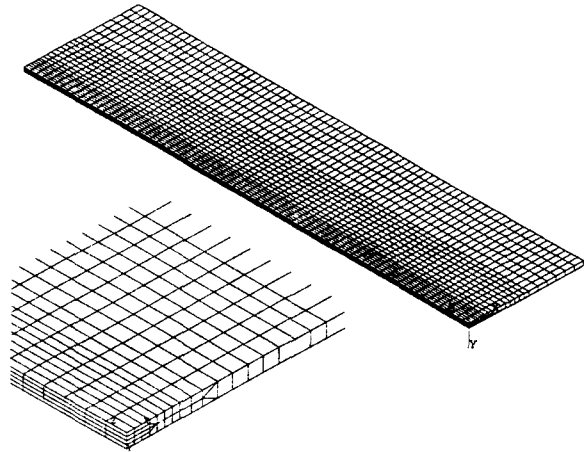


Fig. 4 Finite element analysis model

3.2 열전달 해석

이동 열원인 가스토치에 의해 가열되는 강판의 과도적인 온도분포의 시간이력을 계산하였다. 이때 강판표면에서의 대류 또는 복사에 의한 열손실을 무시하고 순수한 강판내부의 열전도 현상만 고려하였다.(adiabatic 가정) 온도의존적인 재료특성치들을 Table 1 에 보였으며 각 구간에서는 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다. 토치의 가열 특성은 다음과 같이 입력하였다.

- ☒ 토치의 이동속도는 7.5 mm/sec 이다.
- ☒ 열하중은 토치 중심 주위에 열속(heat flux)이 (1)식의 Gauss 정규분포 형태로 작용하는 것으로 가정하여 입력하였고(Fig.5 참조), 이때 등가열전달율(equivalent heat transfer rate) q_{eff} 는 다음과 같다.

$$q''(r) = q_{max} \exp(-\gamma r^2)$$

$$q_{eff} = \frac{\pi q_{max}}{\gamma} = 1920 \text{ cal/sec}$$

$$\gamma = 0.164 \text{ cm}^{-2}$$

= concentration coefficient of torch

Table 1 Material properties for heat transfer analysis

Temperature T(°C)	0	80	540	650	800
Specific heat c (cal/g °C)	0.11	0.11	0.16	0.23	0.23
Temperature T(°C)	0	100	700	800	
Thermal conductivity k (cal/mm · sec °C)	0.016	0.016	0.009	0.009	
Density ρ	7.8 g/cm ³				

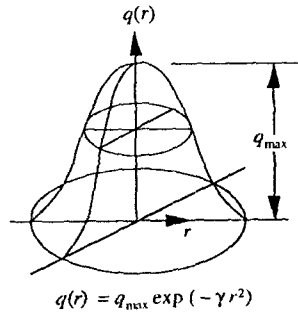


Fig. 5 Gaussian distribution of heat flux on the plate surface

각 time step에서 가열선상의 길이방향 온도분포를 Fig.6에 나타내었다. 길이방향의 온도분포를 살펴보면 초기에는 단부효과로 인하여 최고온도가 800°C에 가까운 과도적인 응답을 보이고 있으나 토치가 평판의 중앙쪽으로 이동하면 거의 동일한 형태를 유지하는 정상상태로 환원되며 정상상태의 최고온도는 토치 바로 아래부분에서 약 500°C 정도로 나타나고

있다. 그러나 토치가 평판의 마지막 부분에 이르게 되면 또다시 최고온도가 1,000°C 까지 달하는 단부효과가 발생된다. 이것은 토치를 중심으로 볼 때 입열량은 항상 일정한데 반하여 양단부에서는 열전도 영역의 축소에 의한 열의 발산이 제한되기 때문인 것으로 추측된다. Time step 130sec 에서는 재료상수로서 200°C에서의 값을 평균치 개념으로 사용하여 계산된 Moshaiov and Latore[15]의 결과 와 비교 하였으며 그다지 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다

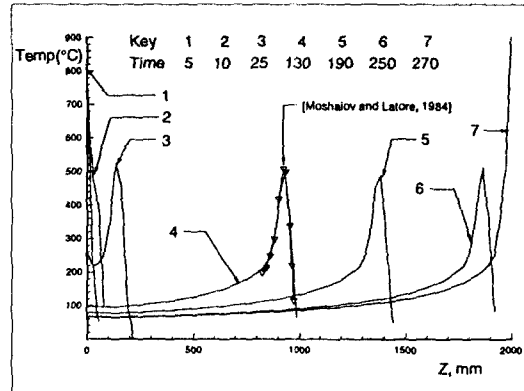


Fig. 6 Transient temperature distribution in z-direction

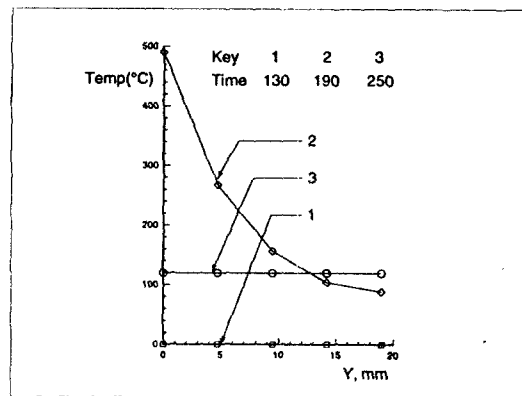


Fig. 7 Transient temperature distribution in y-direction

Time step 190sec 에서 토치 중심이 지나게되는 $z=1,013.3\text{mm}$ 단면에서 폭방향과 깊이방향의 온도분포를 각각 Fig.7, Fig.8에 도시하였다. 열원이 지나가게 되면 깊이방향(y)으로는 거의 온도차이가 없어지지만 폭방향(x)으로는 상당한 온도차이가 잔류한다. 이것은 두께의 치수가 다른 차원에 비하여 무시할 수 있을만큼 작기 때문이다. Fig.9에는 같은 단면의 3지점에서 온도의 시간이력을 도시하였으며 Fig.10 에서는 평판전체의 온도분포 형태를 보이고 있다. 토치에 의한 열영향부가 평판의 크기에

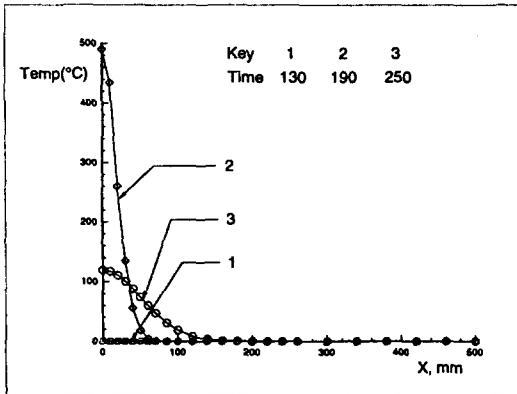


Fig. 8 Transient temperature distribution in x-direction

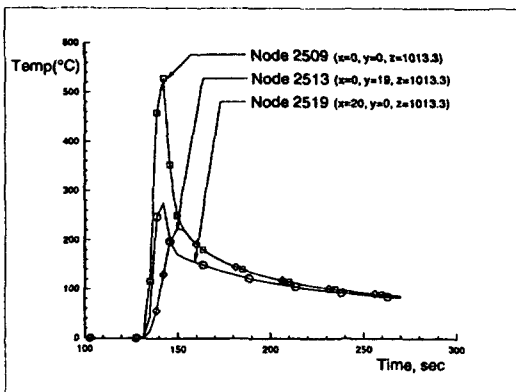


Fig. 9 Transient temperature distribution in section $z=1,013.3\text{mm}$

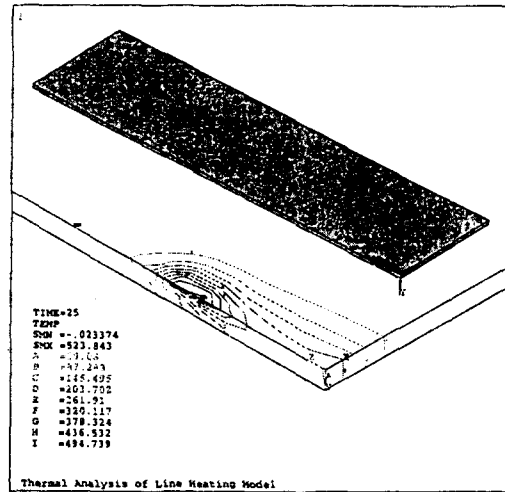


Fig. 10 Overall distribution of temperature in plate surface

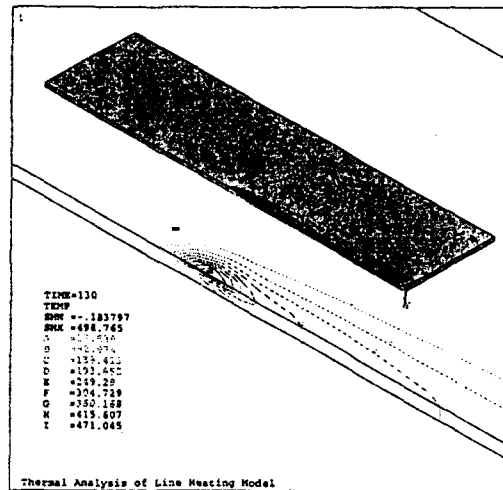


Fig. 10 Continued

비하여 상대적으로 좁은 범위에 한정되어 있음을 알 수 있다. 따라서 어느 정도 크기 이상이 되는 평판에서는 토치부근의 국부적인 온도분포가 거의 일정한 형태를 유지하는 것으로 생각할 수 있다.

3.3 열변형해석

열전달해석으로부터 얻어진 온도분포의 시간이력을 하중으로 입력하여 열탄소성 변형해석을 수행하였다. 이때 경계조건은 토치가 지나가는 중앙면에서 y-z평면에 대한 대칭조건을 적용하였고 나머지 두 귀퉁이는 단순지지된 것으로 간주하였다. 해석에 필요한 온도의존적인 재료상수는 Fig.11에 보인 Iwamura and Ribicki[16]의 연구결과를 이용하였다. 토치의 이동에 따른 평판의 변형과정을 Fig.12에 보였으며 가열선 부근의 최종적인 처짐량을 Fig.13에 도시하였다. 처음과 끝 부분에서의 변형량이 상대적으로 크게 나타나고 있는데 이것은 토치가 이 부근을 지날 때 다른 부분보다 온도가 높게 상승하는 단부효과 때문인 것으로 분석된다. Fig.14에서는 가열과정에서 발생하는 응력장을 나타내었으며 가열후 평판의 상면에 잔류하는 응력분포를 Fig.15에 보였다. 또한 중앙부 단면의 잔류응력분포를 Fig.16에 도시하였다. 역시 처음과 끝 부분에서 상대적으로 큰 잔류응력이 발생됨을 확인할 수 있다. 단면내에서의 잔류응력은 가열선상보다는 약간 좌우로 비켜선 위치에서 최대가 됨을 보이고 있다.

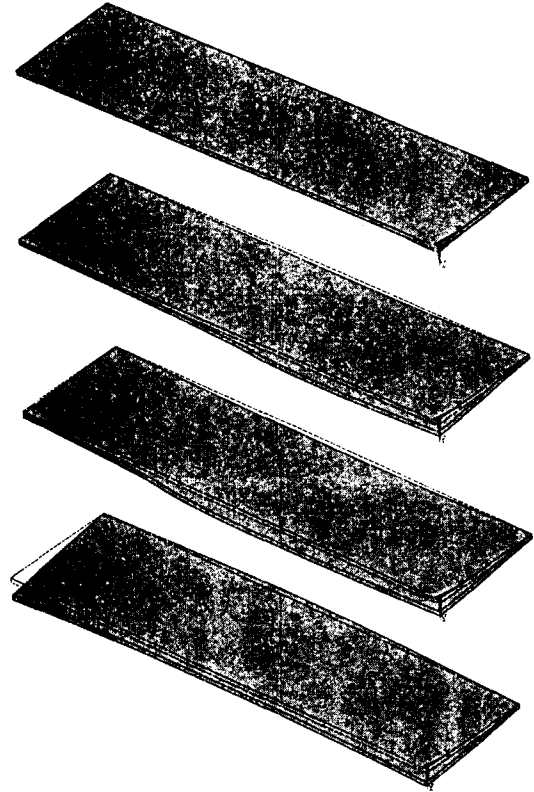


Fig. 12 Deformed process of plate by line heating

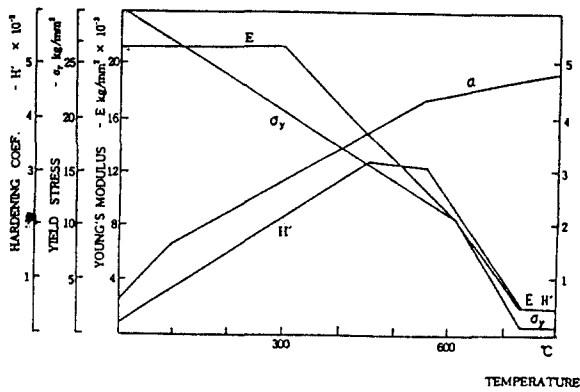


Fig. 11 Temperature-dependent material properties of mild steel

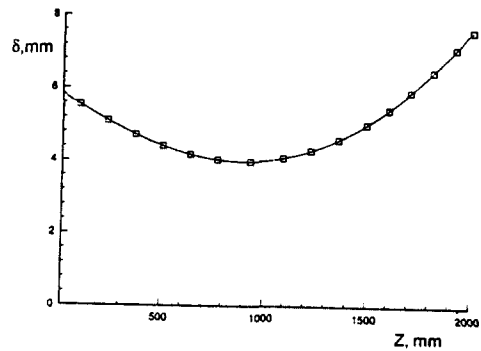


Fig. 13 Final deformed shape of torch path

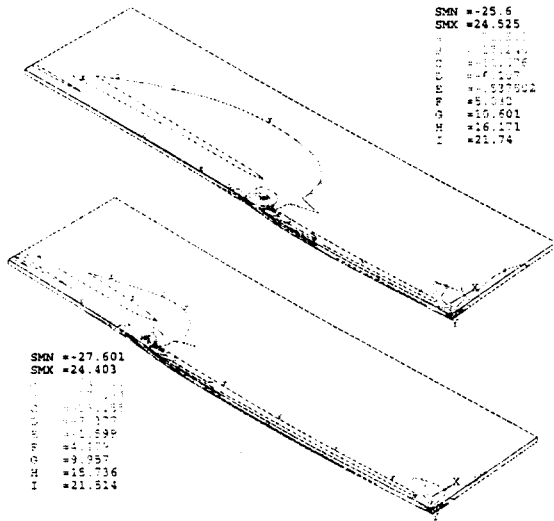


Fig.14 Stress (σ_x) distribution in heating process

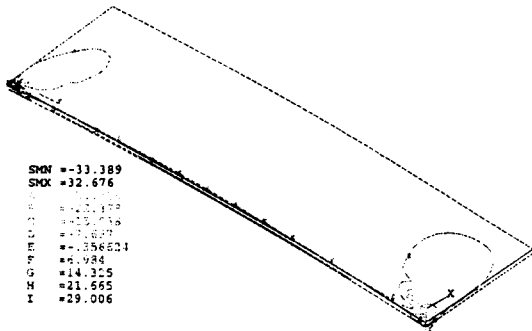


Fig.15 Distribution of residual stress (σ_x) in plate surface

4. 결 언

선상가열에 의한 열전달 및 열변형과정에 대하여 3차원 비선형 유한요소해석법을 이용한 정밀계산을 수행한 결과 다음과 같은 몇가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

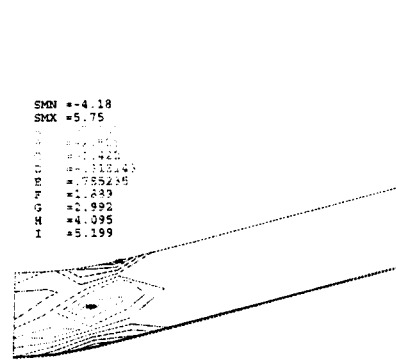


Fig.16 Distribution of residual stress (σ_x) in transverse section

(1) 온도분포해석시에는 재료상수들의 온도의존성을 무시하고 선형적으로 계산하여도 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

(2) 처음과 끝 부분의 양단을 제외하면 토치 주위의 온도분포 형상은 거의 일정한 정상상태를 유지한다.

(3) 단부효과로 인하여 양단에서 상대적으로 변형량이 크고 잔류응력도 큰 값을 보이고 있다. 이러한 현상을 회피하기 위해서는 양단부근을 가열하지 않는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

(4) 본 계산은 HP715/50 workstation 기종으로 약 116시간 정도의 CPU time 이 소요되었다. 따라서 대상모델이 조선소 현장에서 사용되는 실제 강판의 크기가 된다면 이러한 3차원적인 모델링에 의한 계산에 의한 시뮬레이션 방법은 계산시간과 기억용량의 한계를 극복하기 쉽지 않을 것으로 보인다. 그러나 앞으로의 간이 수치해석 혹은 간이 시뮬레이션 결과를 객관적으로 비교 평가할 수 있는 기준해를 제공하기 위해서는 반드시 필요한 과정으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 특정연구개발사업으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] 노인식 외, 선상가열 시뮬레이터에 관한 연구(I, 88II), 한국기계연구원 연구보고서, 1993.9,1994.9.
- [2] 野本敏治, 大森拓也, 須藤拓, 夏澤誠, 青山和浩, 齊藤政男, "선상가열에 의한 판굽힘 가공용 시뮬레이터의 개발", 일본조선학회논문집, 168호, pp.527-535, 1990.(일본어)
- [3] 野本敏治, 武市祥司, 將基孝一朗, 青山和浩, 夏澤誠, 齊藤政2男, "면내수축을 고려한 강판가열 작업용 시뮬레이터의 개발 -선상가열에 의한 판굽힘 가공용 시뮬레이터의 개발(속보)-", 일본조선학회논문집, 170호, pp.599-607,1990.(일본어)
- [4] 上田幸雄, 村川英一, Mohamed, R.A., 奥本泰久, 神近亮一, "계산기 지원 판굽힘 방안 자동작성 시스템의 개발 (제1보) 성형형상과 고유변형도의 관계", 일본조선학회논문집, 제170호, pp.577-586, 1991. 11.(일본어)
- [5] 上田幸雄, 村川英一, Mohamed, R.A., 奥本泰久, 神近亮一, "계산기 지원 판굽힘 방안 자동작성 시스템의 개발 (제2보) 고유변형도의 관점에서 본 현장에서의 작업순서", 일본조선학회논문집, 제171호, pp.405-415, 1992. (일본어)
- [6] 上田幸雄, 村川英一, Mohamed, R.A., 根木勳, 神近亮一, 石山隆庸, 小川潤一朗, "계산기 지원 판굽힘 방안 자동작성 시스템의 개발 (제3보) 가열조건과 고유변형", 일본조선학회논문집, 제173호, pp.409-419, 1993. (일본어)