

비드의 용융상태를 고려한 가스메탈 아크용접의 3차원 열탄소성 변형 해석

이장현*, 신종계**, 김지훈***

Three Dimensional Thermal-Elastic Plastic Analysis of GMAW Considering the Melting of Weld Bead

Jang Hyun Lee*, Jong Gye Shin** and Ji Hoon Kim***

요 약

용접법은 선박 생산 공정에 있어서 금속 접합을 위해 가장 많이 사용되고 있다. 용접은 금속 접합을 위해 유용한 방법이지만 국부적 가열, 용융, 냉각으로 이어지는 열하중에 의하여 잔류응력과 잔류변형을 발생시킨다. 잔류응력은 구조물의 강도에 부정적인 영향을 끼치고, 잔류변형은 조립 작업에 부정적인 영향을 끼치게 된다. 그러므로 역학적 방법에 의한 잔류응력과 잔류변형의 예측은 이들을 제어할 수 있는 방법을 작업 전에 제시할 수 있도록 하므로, 선체 강도 확보와 선박 생산성 향상을 위하여 매우 중요한 문제라고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 배경에서 용접 현상을 가장 잘 시뮬레이션할 수 있는 방법인 유한요소법을 이용한 3차원 열탄소성 해석을 이용하였다. 열탄소성 해석을 위하여 온도분포를 계산한 후 계산된 온도분포를 이용하여 용접변형 및 응력을 순차적으로 계산하였다. 온도분포 계산을 위하여 용융과정을 엔탈피 방법을 이용하여 구현하였으며, 용접비드의 용입은 요소생성법을 이용하여 구현하였다. 본 연구에서 제안된 해석과정은 기존 연구에서 제시한 실험결과와 정성적으로 일치하는 결과를 주는 것을 확인하였다.

*Keywords: Welding(용접), Residual stress(잔류 응력), Thermal elastic plastic analysis(열탄소성 해석), weld bead(용접 비드)

Abstract

Welding is essential in ship production since welding is very popular method for joining two or more metals. However, welding causes residual stress and distortion and these give a bad influence to the structure strength and assembly of ship blocks.

접수일자: 2001년 10월 23일, 승인일자: 2002년 1월 2일

*정회원, 서울대학교 공학연구소 연구원 (jhlsk@gong.snu.ac.kr)

**정회원, 서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소 부교수 (jgshin@snu.ac.kr)

*** 정회원, 한국 IBM PLM 사업본부 연구원 (kimjhoon@kr.ibm.com)

Therefore, prediction and treatment of residual stress and distortion is a key to accuracy control in shipyard. In this paper, a computational procedure, based on thermal-elastic-plastic 3-dimensional FEA, has been suggested to simulate butt and fillet welding process. In the simulation process, temperature distribution at each time step is obtained by heat transfer analysis and then thermal deformation analysis is done with obtained temperature distributions to find the residual stress and distortion. In heat transfer analysis, enthalpy method is used to realize phase change at melting temperature. Also element birth and death method is used to simulate adding of weld metal in both heat transfer analysis and thermal elastic plastic analysis. The proposed procedure is verified by related researches and the results show good agreement with those of related researches.

1. 서언

선박의 조립작업에는 아크 용접과 같은 접합법이 주로 사용되고 있다. 용접은 금속접합에 유용한 방법이지만 국부적 가열, 용융, 냉각으로 이어지는 열하중에 의하여 금속의 성질변화와 불균일 온도분포에 따른 잔류응력, 잔류변형을 발생시킨다. 잔류응력은 구조물의 강도에, 잔류변형은 선체블록 조립작업에 부정적인 영향을 끼치고 있다. 따라서 용접에 의한 잔류응력과 잔류변형의 예측은 선체 강도 확보와 용접 및 조립 생산성 향상을 위하여 필요한 요소기술이라고 볼 수 있다.

현재까지 용접 잔류응력 및 잔류변형을 엄밀하게 파악하기 위하여 많은 연구가 시도되고 있다.

김병일/장창두(1997)는 용접 판구조물의 변형 및 잔류응력 해석을 위하여 초기변형도법에 기반한 방법을 제시하였다. Ueda/Yuan(1993)은 고유변형도를 이용하여 맞대기 용접 해석에 관한 연구를 수행하였다. 그러한 방법은 근사적인 기법으로서 효율적으로 열탄소성 해석을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으나 다양한 용접 구조물의 엄밀한 열전달 및 열탄소성 해석에는 다소 어려움을 가지고 있다. 방한서(1990)는 박판의 2차원 비정상 열전도 해석을 수행하였으나 박판의 온도 분포 파악에만 사용할 수 한계를 가지고 있다. 서승일/장창두(1990)는 2차원의 특성을 포함한 1차원 열탄소성 해석 기법을 개발하였으나 3차원 구조물의 용접해석에는 그 유용성이 떨어진다.

노재규/신중계(1999)와 장창두/이창현(2000)은 용접 변형현상의 변형관계식을 이용하여 선체 블록 조립의 변형 현상을 규명하고자 노력하였다.

용접 역학 연구와는 달리 박주용(1995)은 용접 작업을 위하여 퍼지 전문가 시스템을 이용한 효율적인 용접 변수 최적화 과정을 실현하여 응용성을 갖추었다. 이렇듯 다양한 접근법으로 용접에 관한 연구가 수행되었으나 용접 비드의 용융을 고려한 엄밀한 3차원 용접 해석연구가 보고 된 예는 많지 않다(김원훈/나석주 1997).

본 연구에서는 3차원 유한요소해석법^[1]을 이용하여 가스메탈아크용접(GMAW)의 열전달 및 열탄소성 해석 과정을 제안하고, 맞대기 용접과 필릿 용접의 열전달 및 열변형 과정을 시뮬레이션 하였다. 특히, 용접비드의 용입과 용융을 구현함으로써 실제 용접 현상에 가깝게 시뮬레이션 하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 아크열에 의한 온도장 발생

용접에 의한 열변형 해석을 위해서는 열전달 해석과 열탄소성 해석이 필요하다. 용접봉과 모재

[1] 해석에는 유한요소 code인 ANSYS 5.5가 사용되었다.

사이에서 발생된 아크에 의하여 고온의 열이 발생되고 모재로 유입된다. 또한 용접봉으로부터 발생한 아크로 인하여 용융된 금속이 모재에 융착되며 고온의 열유입이 발생된다(Tekriwal 1991).

이러한 국부적, 불균일한 고온의 열유입이 용접 온도장 문제의 특성이며, 이로 인하여 발생하는 금속의 상변화(phase change)를 고려해야 한다. 연강의 경우 약 1450℃에서 발생하는 용융과 응고에 의한 고상, 액상간의 상변화가 발생한다. 아크 용접인 경우, 용융된 용입 금속의 온도가 2400℃까지 된다고 알려져 있으므로, 용접 시에는 상변화가 발생된다고 볼 수 있다. 상변화를 고려하기 위한 방법으로 엔탈피 모델을 이용하였다. 비열을 온도에 대하여 적분하면 엔탈피가 되므로 엔탈피는 비열과 같이 재료의 고유한 성질로 정식화된다.

2.2. 열탄소성 변형

용접은 재료를 국부적으로 가열하므로 불균일 온도분포가 나타나게 된다. 재료의 온도가 국부적으로 용융점 이상이 되므로 온도에 따른 재료성질의 변화에 의하여 소성변형이 발생하고 비선형성이 나타난다.

본 연구에서는 대변형 현상을 고려하기 위하여 Henky strain을 이용하였으며, 등방 소성 경화 조건 및 Mises 항복조건을 이용하였다. 비선형 수치 해석법은 Newton Rhapson 방법을 사용하였다.

3. 맞대기 용접의 3차원 유한요소해석

본 연구의 해석과정의 타당성을 검토하고자 기존 연구의 결과(이동욱 1995)와 비교하기 위하여 동일한 모델에 대하여 해석을 하였다. 맞대기 용접에 대한 3차원 열전달 해석을 수행한 후, 그 구해진 온도분포를 이용하여 열탄소성 해석을 수행하였다.

3.1. 열전달 해석

3.1.1 유한요소 모델

해석을 위하여 사용된 맞대기 용접 모델의 기하학적 특징은 Table 1 및 Fig.1과 같다.

Table 1 Geometric data of butt welding

Weld length (x)	80 mm
Thickness (z)	10 mm
Root angle	V-type, 90°
Root surface	2mm
Root opening	1mm

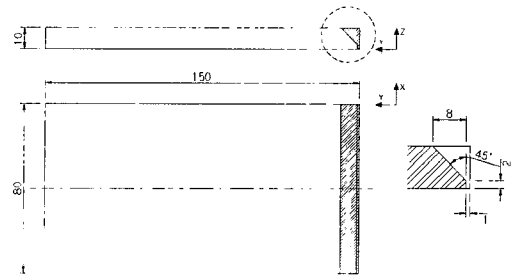


Fig. 1 Model for butt welding analysis

용접선에 대하여 대칭이므로 전체의 반을 유한 요소 모델링 하였으며, 8절점 등매개변수 3차원 열요소를 사용하였다. 절점은 1523개, 요소는 1080개이다(Fig.2).

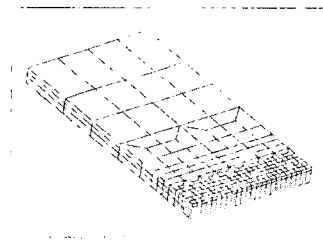


Fig. 2 FE model for butt welding analysis

3.1.2. 열유입 모델

용접 시, 용접 대상물에 유입되는 열은 아크에 의한 열과 용융상태로 유입되는 용입재의 잠재 에너지로 볼 수 있다(Fig.3). 이 때 아크에 의한 열유입(q)은 Gauss 분포로 모델링될 수 있으며 다음의 식과 같이 표현된다(이동욱 1995).

$$q = q_0 e^{-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2}, \quad q_0 = \eta_a \frac{VI}{\pi r_b^2} \quad (1)$$

여기서 η_a 는 아크효율, V 는 전압, I 는 전류, r_b 는 유효반경이다.

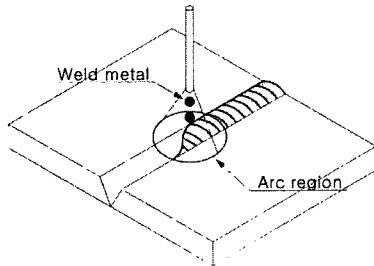


Fig.3 Schematic configuration of heat input in butt welding

3.1.3 용접 비드의 용입 모델링 기법

용접 비드의 용입 생성은 ANSYS의 ekill과 ealive 명령어를 사용하여 구현하였다. 용융상태로 용접봉으로부터 유입되는 용입금속에 의한 열유입은 초기온도가 2000℃인 요소가 용접봉의 뒤에서 생성되도록 하였다. 즉, 용입되기 전의 비드요소는 ekill을 이용하여 강성을 제거하고, 생성된 시점에서 ealive를 이용하여 새롭게 용입된 비드 부분의 강성을 전체 강성 행렬에 추가하는 방법이다.

연강의 경우 약 1450℃에서 용융과 응고에 의한 고상, 액상간의 상변화가 발생한다. 아크 용접인 경우, 용융된 용입 금속의 온도가 2400℃까지 된다고 알려져 있으므로 용접 시에는 상변화가 발생된다고 볼 수 있다. 상변화를 고려하기 위해서는 잠열을 비열에 포함시키는 방법이 있으나 해의 안정성이 크게 저하되므로, 본 연구에서는 엔탈피 방법을 사용하였다. 엔탈피(H) 방법에서는 시간 증분 Δt 동안 내부 에너지 변화량 (δU)을 다음과 같이 엔탈피의 함수로 정의하여 사용한다.

$$\delta U \equiv {}^{t+\Delta t} H - {}^t H \equiv \delta H \quad (2)$$

따라서 본 연구에서는 비드의 용융과 응고에 의한 상변화를 고려한 온도 분포 계산을 위하여 온도에 따른 엔탈피값을 열전달 재료 특성값으로 이용하였다. Fig.4에 엔탈피 재료 특성값의 온도에 따른 변화를 보였다.

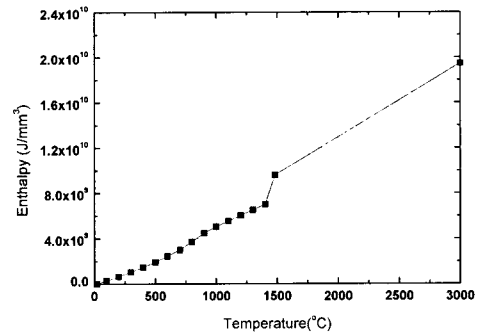


Fig.4 Material coefficient: enthalpy

3.1.4. 경계조건 및 재료 특성

용접이 진행되는 동안과 용접이 끝난 후에 대류와 복사에 의하여 냉각이 발생된다. 본 연구에서는 대류와 복사현상이 동시에 고려된 실험적인 대류열전달 경계조건식을 이용하였다. 대류 열전달에 의한 열유속(q_n)을 다음과 같이 가정하였다 (Patel 1985).

$$q_n = h^\sigma (T - T_a) \\ h^\sigma = h^c + \sigma \epsilon^r = 24.1 \times 10^{-4} \epsilon^r T^{1.41} \quad (3)$$

여기서 h^c 는 대류 열전달 계수, T 는 열전도체의 온도, T_a 는 주변 공기의 온도, σ 는 슈테판-볼츠만 상수, 그리고 ϵ^r 은 방사율이다.

용접해석에는 상온에서부터 용점이상까지의 열전달 재료 상수를 가정하였다(Appendix 참조).

3.1.4. 해석결과

위의 해석과정을 이용하여 열전도 해석을 수행하였다.

열전달 재료 특성값이 온도에 따라 변화하므로 용접 열전달은 비선형 문제이며, 비선형 수치해를

구하기 위하여 Newton Raphson방법과 Pre-conditioned Conjugate Gradient iterative 방법을 이용하였다(이장현 1999).

용접시간은 42초, 용접시간과 냉각시간을 포함하여 총 3600초에 대해 해석을 수행하였다. 총 해석 시간은 용접 후 부재가 상온까지 충분히 냉각될 수 있는 시간이 될 수 있도록 1시간으로 가정하였다. 용접조건은 전압 28V, 전류 220A, 용접 효율 0.67인 GMAW로 하였고 용접속도는 2mm/s 이다.

용접시간을 26구간으로 나누어 처음 2구간은 용접봉이 시작 위치에서 예열하며 정지하고 있으며 나머지 24구간은 시간간격을 5/3초씩 하여 한 구간에 한 개의 요소길이를 지나가도록 하였다. 각 시간간격마다 하중과 냉각조건이 다시 적용되도록 하여 이동열원의 효과를 재현하였다. 용접이 끝난 후 3558초 동안은 82구간으로 나누어 대류 냉각시간으로 가정하였다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 시간에 따른 온도변화에 대한 이동열(1995)의 계산결과 및 실험결과와 본 해석에서의 계산결과를 나타내고 있다. 위치는 x 방향 중심에서 y방향으로 7mm와 15mm 떨어진 지점이다. 두 연구 결과를 비교하였을 때 본 연구를 통하여 얻은 온도 분포 결과가 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있으므로 본 해석에서 제시한 온도 분포 해석 모델 및 과정이 타당함을 확인할 수 있었다.

3.2. 열탄소성 해석

열전달 해석과 동일한 형상의 요소가 사용되었고 요소의 종류를 3차원 8절점 구조 요소로 바꾸었다. 하중은 각 시각에 따라 절점에 분포하는 온도이며 열전달 해석에서 용접과 냉각과정동안 108 구간별로 저장된 온도분포가 이용되었다. 해석과정에서 요소 생성과 이동 열원의 효과 때문에 실제 용접현상과 같이 면내 회전이 발생되며, 이를 방지하기 위한 강제 지그의 효과를 Fig.7과 같이 폭 방향의 217mm 지점과 끝부분에 경계조건을 부여하였다. 상온에서부터 용융점 이상까지의 온도에 따른 재료 특성값 변화를 고려하였다

(Appendix 참조).

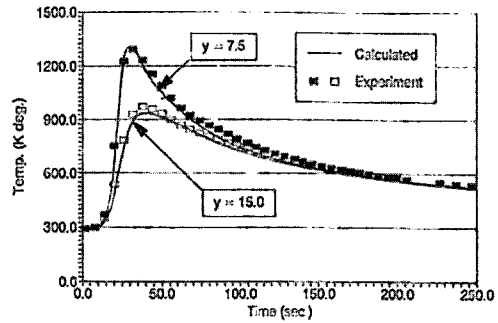


Fig.5 Temperature history: D.W. Lee(1995)

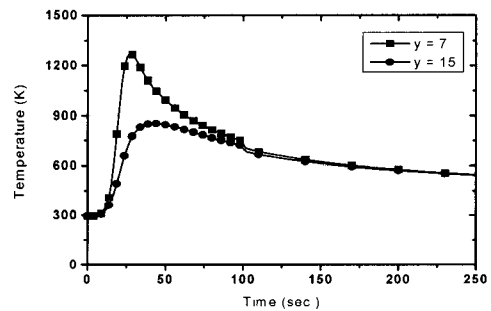


Fig.6 Temperature history: Present study

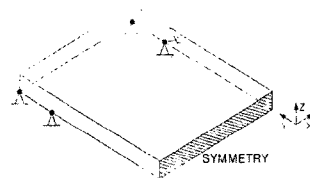


Fig.7 Boundary condition

3.2.1. 용접 비드의 용융 상태 모델링 기법

용접봉으로부터 유입되는 용입재는 모재에 응축한 이후에 냉각 과정만을 겪게 되므로 모재와는 다른 온도 이력(history)을 갖게 된다. 또한 용입재에서는 냉각만 발생하므로 결국 수축만 발생하며 팽창과 수축을 모두 겪게 되는 모재와는 다른 응력-변형을 이력을 갖게 된다. 이러한 현상을 해석에서 구현하기 위해서 열 변형률(ϵ^{th}) 계산을 위한 기준 온도(T_{ref})를 모재와 용입재에 다르게 적

용하였다. 다시 말하면 용입 되는 비드는 2000℃의 온도를 가진다고 가정하였으므로, 열팽창이 이미 이루어진 액상 상태에서 모재와 결합된다. 결합 후 용접 비드는 온도하강을 거치면서 액상에서 고상으로 변화하며 용접 모재에 열에너지를 전도시킨다. 용입 및 결합 순간에 비드는 액상이므로 응력을 가지지 않는 상태이다. 따라서 초기 열변형율을 제거하기 위하여 비드부분의 열변형율(thermal strain)의 기준 온도를 상온이 아닌 2000℃로 가정하는 것이 타당하다. 아래는 열변형율 계산을 위한 기본 식이다.

$$\epsilon^{th} = \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (4)$$

여기서 α 는 열팽창계수, T 는 온도이다. 따라서 용융비드 부의 기준 온도를 2000℃로 가정함으로써 초기 용입 상태에서 열변형율을 갖지 않는 상태로 모델링하였다.

금속의 경우 탄성계수, 항복응력, 소성계수 등은 용융점에 근접할수록 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러므로 용융점 이상에서의 응력거동은 용접과 냉각을 거친 후 발생하는 잔류응력에 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 이런 관점에서 제안된 것이 한계온도이며 한계온도 이상에서의 응력거동은 무시할 수 있다고 가정하며, 한계온도를 용융점보다 낮은 1000℃에서부터 용융점까지 변화시켜도 잔류응력에의 영향이 작다고 알려져 있다(이동욱 1995). 본 연구에서는 1100℃를 한계온도로 가정하여 한계온도보다 높은 온도를 한계온도로 치환하여 계산하였다.

3.2.2. 해석결과

열전달 해석에서 계산된 온도분포가 열변형 해석의 열하중으로 적용되었다. Fig.8, Fig.9, Fig.10은 용접 후 중앙부에서 x 방향의 잔류응력(σ_{xx})를 보이고 있으며, Fig.11과 Fig.12는 y방향 잔류응력(σ_{yy}) 분포를 보인 것이다. 이동욱(1995)의 결과와 본 연구결과를 비교하여 보면 전체적인 경향은 유사하지만 용입재와 모재의 경계에서부터 용입 비드 부분은 서로 다른 경향을

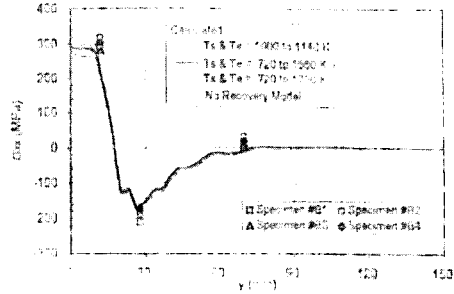


Fig.8 σ_{xx} distribution along y axis: D.W. Lee (1995)

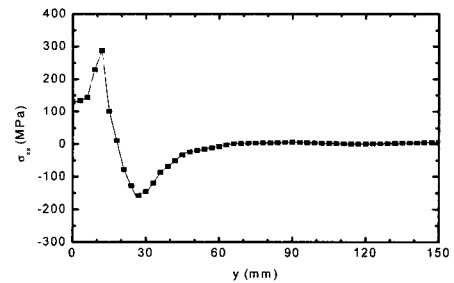


Fig. 9 σ_{xx} distribution along y axis: Present study

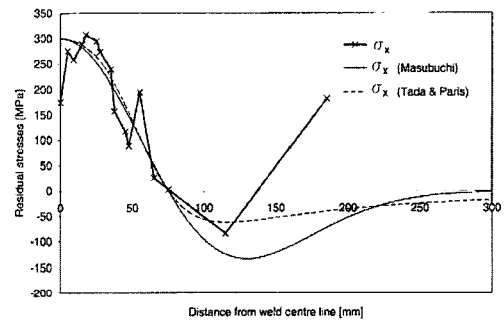


Fig.10 σ_{xx} distribution along y axis: Sørensen(1999)

나타내고 있다. 이동욱의 해석결과는 경계에서 중심부까지 σ_{xx} 와 σ_{yy} 가 거의 일정하게 유지되고 있으나 본 해석의 결과는 σ_{xx} 가 중심부로 갈수록 감소하는 경향을 보이며, σ_{yy} 는 경계부분에서 감소하다가 다시 중심부로 가면서 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 Fig.10에 보인 SØ

renson(1999)의 세부적인 실험결과에 의하면 σ_{xx} 는 모재와 용입재의 경계에서 최대이고 σ_{yy} 도 경계에서 감소하고 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 본 해석이 더 타당하다고 볼 수 있다.

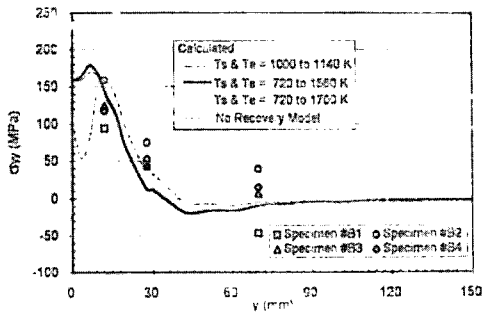


Fig.11 σ_{yy} distribution along y axis: D.W. Lee (1995)

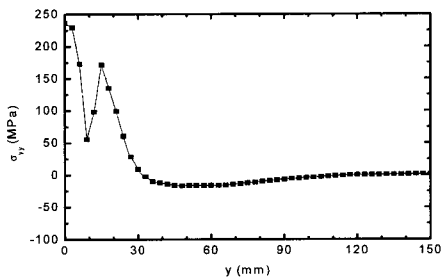


Fig.12 σ_{yy} distribution along y axis: Present study

3.3. 큰 모델의 맞대기 용접 해석

선박 후판의 잔류응력, 잔류변형을 특성을 파악하기 용접선 길이 180mm, 가로 길이 300mm, 두께 16mm, 개선 모양은 V형, 루트 면은 4mm, 루트 간격은 2.6mm인 모델에 대하여 베벨각이 30°, 35°, 40°, 45°인 4가지 모델을 생성하였다. 절점은 4788개이고, 요소는 3900개이다. 구속 조건은 Fig.7과 같으며, 기하학적 특징은 Table 2 및 Fig.13에 정리한 바와 같다.

Table 2 Geometric data of butt welding

Weld length (x)	180 mm
Plate width	300 mm
Plate thickness(z)	16 mm
Root angle	V-Type
Root surface	4 mm
Root opening	2.6 mm

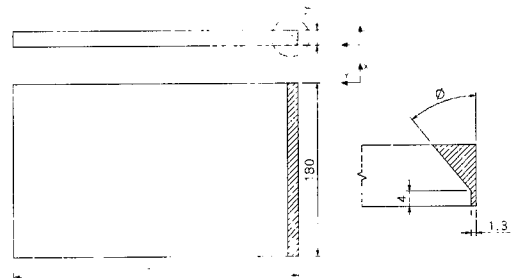


Fig.13 Model for butt welding analysis

3.3.1. 해석결과

용접은 36구간이고, 냉각은 50구간, 180초로 하여 열전달 해석과 열탄소성 해석을 하였다. 용접 조건은 전압 33V, 전류 300A, 용접효율 0.67인 GMAW로 하였다. 용접속도(Vt)가 5mm/s이고 베벨각이 30°, 35°, 40°, 45°인 4가지 모델의 x방향 중심에서 y방향으로의 상면에서 잔류응력 분포는 Fig.14 및 Fig.15와 같다. 베벨각이 45도이고 용접속도가 3, 4, 5, 6mm/s인 4가지 경우의 x방향 중심에서 y방향으로의 상면에서 잔류응력 분포는 Fig.16 및 Fig.17과 같다. σ_{xx} 와 σ_{yy} 는 모재와 용입재의 경계에서 급격한 변화를 보이고 있다. σ_{xx} 는 작은 모델에서와 달리 경계부에서 중심으로 가면서 감소하다가 다시 증가하며, 이것은 용융지의 크기와 경계조건에 영향을 미친다고 판단된다. 베벨각이 증가하면 σ_{xx} 는 최대값은 감소하였으나 응력의 분포영역은 증가하였다. σ_{yy} 는 최대값과 그 분포 영역이 증가하였다. 용접 속도에 따라서는 잔류응력의 변화가 크지 않았다.

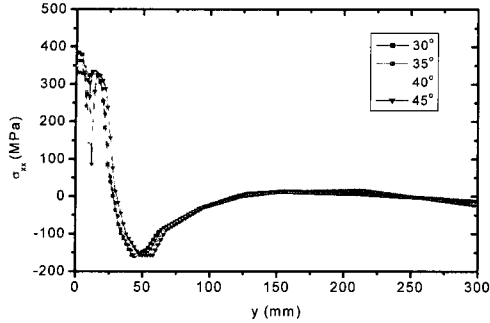


Fig. 14 σ_{xx} distribution along y axis (Vt = 5mm/s)

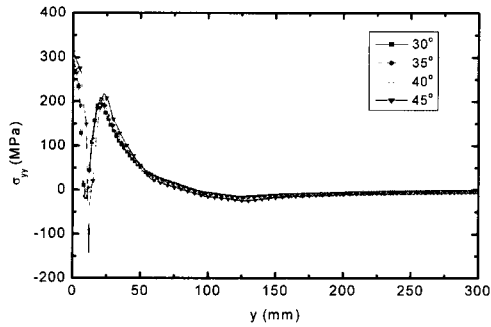


Fig. 15 σ_{yy} distribution along y axis (Vt = 5mm/s)

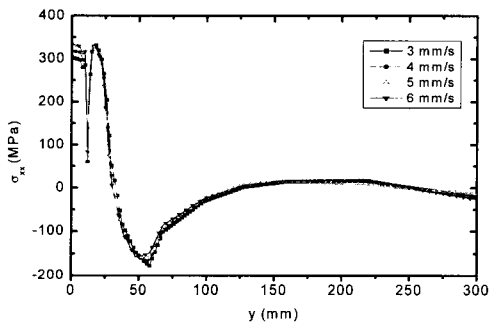


Fig. 16 σ_{xx} distribution along y axis (Bevel angle = 45°)

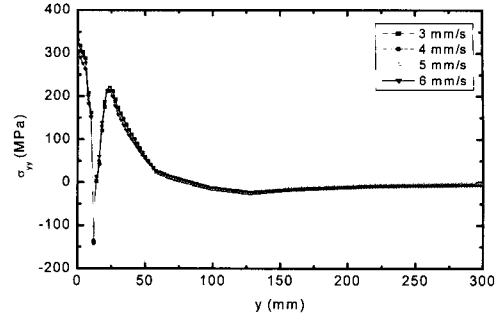


Fig. 17 σ_{yy} distribution along y axis (Bevel angle = 45°)

4. 필릿 용접의 3차원 유한요소해석

4.1. 열전달 해석

필릿 용접 수평판의 용접선 길이는 180mm, 가로 길이는 300mm, 두께는 16mm이며, 수직판은 높이가 119mm, 두께는 12mm이다. 이 규격에서 용접각장이 4, 5, 6, 7mm인 4가지 모델을 생성하였다(Table 3). 수평판과 수직판은 서로 1mm 간격을 가지고 있으며 양 끝의 5mm부분이 서로 연결되어 있다. 열전달 해석에서 용접 중에 용입재가 생성되도록 해석을 하였다. 용접은 36구간, 냉각은 50구간, 1800초로 하였다. 용접조건은 전압 33V, 전류 300A, 용접효율 0.67인 GMAW로 가정하였다. 필릿 모델의 기하학적 특성 및 유한요소 모델을 각각 Fig.18, Fig.19에 보이고 있다.

Table 3 Geometric data of fillet welding

Weld length (x)	180 mm
Web length	300 mm
Web thickness	12 mm
Flange length	119 mm
Flange thickness	12 mm

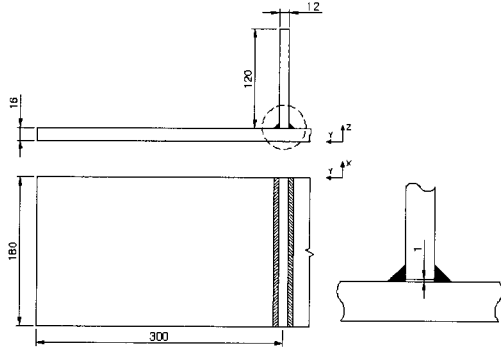


Fig.18 Schematic view of fillet welding

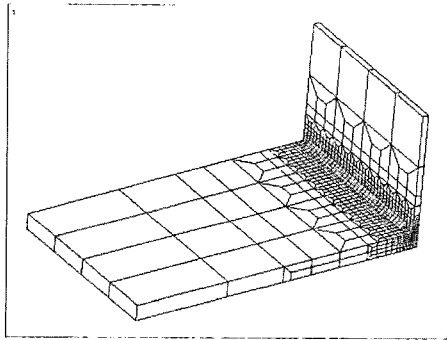


Fig.19 Finite Element Model of fillet welding

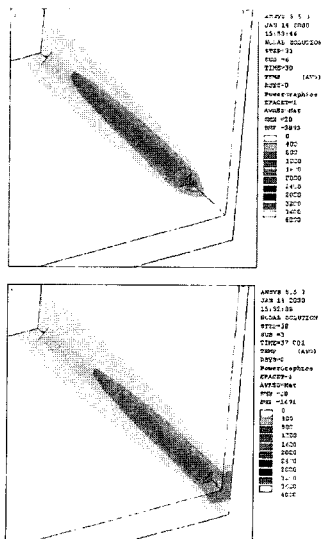


Fig. 20 Temperature contour during welding

용접이 진행 중인 과정의 온도분포는 Fig.20에 도시한 바와 같다.

4.2. 열탄소성 해석

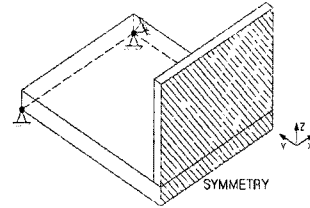


Fig.21 Displacement boundary condition

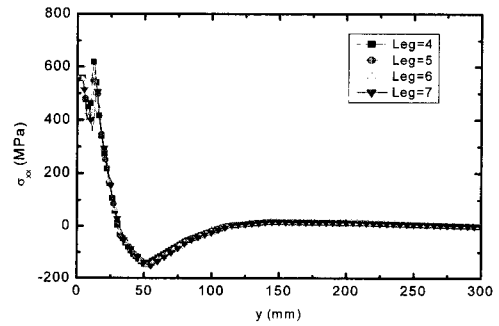


Fig.22 σ_{xx} distribution along y axis (Vt= 5mm/s)

열전달 해석결과를 이용하여 열탄소성 해석을 하였다. 경계조건은 Fig.21과 같으며, 요소생성법을 이용하여 용접재의 용입이 모델링되었다. 용접 속도가 5mm/s이고 각장이 4, 5, 6, 7mm인 4가지 모델의 수평판의 x방향 중심에서 용접 토우부터 y 방향으로의 상면에서 잔류응력 분포는 Fig.22, Fig.23과 같고, 잔류변형에 의한 수직변위는 Fig.26과 같다. 각장이 6mm이고 용접속도가 3, 4, 5, 6mm/s인 4가지 경우의 잔류응력 분포는 Fig.24, Fig.25에 보이고 있으며, 잔류변형에 의한 수직 변위는 Fig.27에 나타냈다. σ_{xx} 와 σ_{yy} 는 용접토우에서 좀 떨어진 부분에서 최대가 되었다. 각장이 증가하면 σ_{xx} 의 최대값이 감소하였고, σ_{yy} 의 최대값이 조금 증가하였다. 잔류응력 영역과 잔류변형은 각장에 따라 크게 변화하지 않았다.

용접속도가 증가하면 σ_{xx} 의 최대값이 증가하였고 영역은 감소하였다. 그리고 σ_{yy} 는 최대값은 큰 변화가 없고 영역이 감소하였다. 잔류변형은 용접속도가 5mm/s까지 증가함에 따라 증가하다가 6mm/s가 되면 조금 감소하는 경향을 보였다.

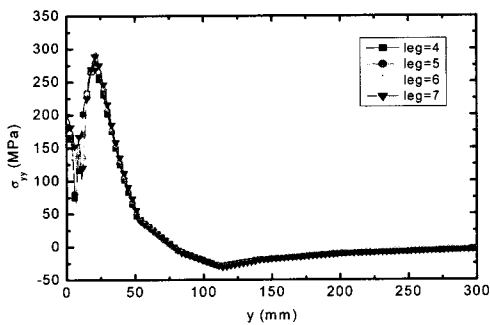


Fig. 23 σ_{yy} distribution along y axis (Vt = 5mm/s)

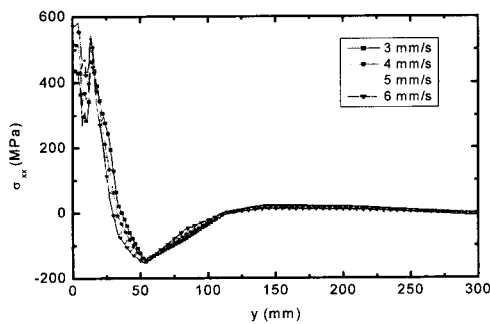


Fig. 24 σ_{xx} distribution along y axis (Leg length = 6mm)

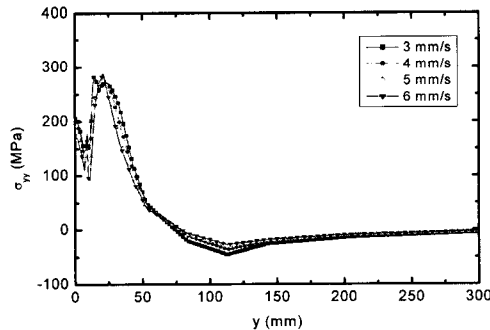


Fig. 25 σ_{yy} distribution along y axis (Leg length = 6mm)

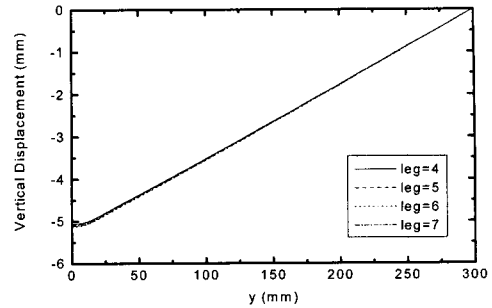


Fig. 26 Welding distortion (Vt = 5mm/s)

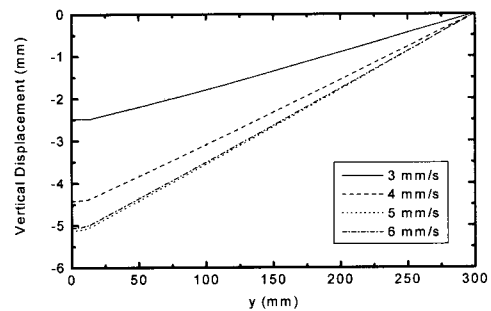


Fig. 27 Welding distortion (Leg length = 6mm)

5. 결론

본 논문에서는 맞대기 용접과 필릿 용접의 열전달 및 열변형 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 온도장 해석을 통하여 용접과 냉각이 진행되는 동안의 온도분포를 구하였으며, 이 결과를 이용한 열탄소성 해석을 수행하여 잔류응력, 잔류변형을 계산하였다. 용입 금속의 유입 현상을 모델링하기 위하여 온도장 해석과 열탄소성 해석에서 요소 생성법을 사용하여 구현하였으며 엔탈피법을 사용하여 온도장 해석에서 용융점 부근에서의 상변화가 고려되도록 하였으며, 액상 상태로 접합하는 비드의 용입상태를 고려하여 용입재의 초기 열변형을 제거함으로써 용접 잔류 응력을 계산하였다.

맞대기 용접의 온도분포와 잔류응력 결과를 기존 연구의 결과 및 실험결과와 비교하여 본 연구 해석과정의 타당성을 검토하였다. 베셀각과 용접속도를 변화시키며 잔류응력과 잔류변형을 계산하였다. 필릿용접의 경우에는 용접각장과 용접속도

에 따른 잔류응력과 잔류변형을 계산하여 용접조건과 잔류응력, 잔류변형과의 관계를 파악하였다.

본 연구의 결과는 잔류응력 예측을 통한 용접부 피로강도 연구와 잔류변형 예측을 통한 선체 조립 작업 효율향상에 도움이 될 것이라고 생각된다. 그리고 앞으로 더욱 정확한 해석을 위해서는 실험 결과와의 비교와 다층 용접을 고려한 해석이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김병일, 장창두 1997 "관구조물의 열탄소성 해석," 대한조선학회논문집, 제34권 제1호, pp. 68-76.
- 김원훈, 나석주 1997 "용접 아크 및 용융 풀의 유동을 고려한 용접부 수치 해석," 대한용접학회지 제 15권 제1호, pp. 26-34.
- 노재규, 신중계 1999 "자중과 용접변형을 고려한 평블록 조립 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제36권 제3호, pp. 123-134.
- 박주용 1995 "퍼지 전문가 시스템을 활용한 적정 용접조건 설정과 최적화," 대한조선학회논문집, 제32권 제4호, pp. 136-141.
- 방한서(1990) "유한요소법에 의한 박판용접의 2차원비정상열전도 해석," 대한조선학회, 제27권 제4호, pp. 43-50.
- 서승일, 장창두 1990 "적층보 이론을 이용한 1차원 열탄소성 해석," 대한조선학회논문집, 제 27권 제4호, pp. 51-57.
- 이동욱 1995 "유한요소법을 이용한 GMAW의 열탄소성 모델링," 서울대학교 박사학위논문
- 이장현 1999 "유한요소법과 가변수 해석을 이용한 선상가열 가공조건과 변형량과의 관계," 서울대학교 박사학위 논문
- 장창두, 이장현 2000 "선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권 제2호, pp. 127-136.
- Birk-Sørensen, M. 1999 "Simulation of Welding Distortions in Ship Section," Ph. D. Thesis, Dept. of Naval architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark

- Patel, B. 1985 "Thermo-Elasto-Plastic Finite Element Formulation for Deformation and Residual Stresses Due to Welds," Ph. D. Thesis, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada
- Tekriwal, P. , Mazumder, J. 1991 "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.113, pp. 336-343.
- Ueda, Y. and Yuan, M. G. 1993 "Prediction of Residual Stresses in Butt Welded Plates Using Inherent Strains," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.115, pp. 417-423.

Appendix: Material properties

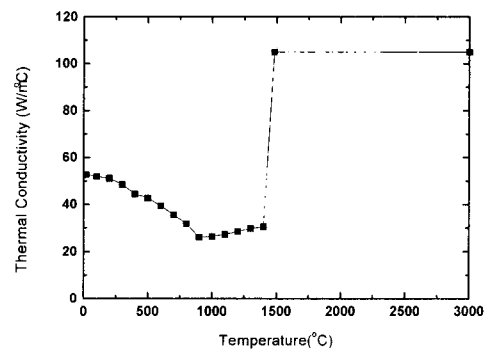


Fig.28 Thermal conductivity

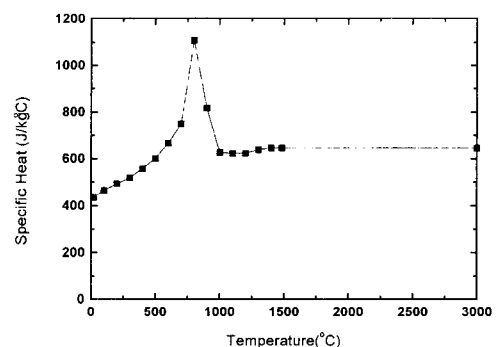


Fig.29 Specific heat

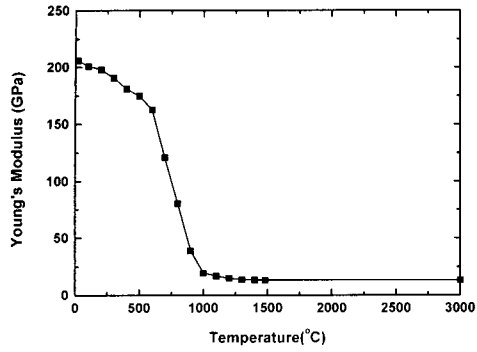


Fig.30 Young's modulus

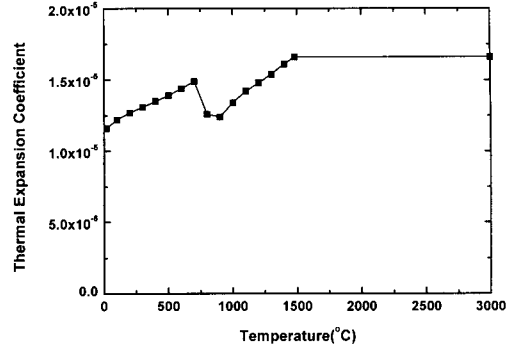


Fig.32 Thermal expansion coefficient

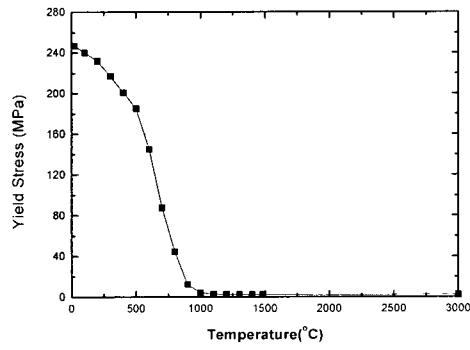


Fig.31 Yield stress

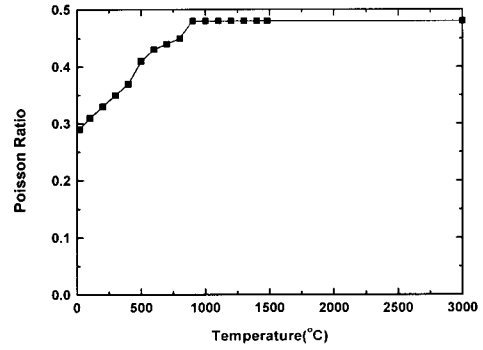


Fig.33 Poisson ratio