

STS 304 TIG 용접시 발생하는 열응력 해석에 관한 연구

고준빈* · 최원두* · 이영호**

*충남대학교 대학원 기계공학과

**충남대학교 기계공학과

A Study on the Analysis of the Thermal Stress in Process of STS 304 TIG Welding

Joon-Bean Ko*, Won-Doo Choi* and Young-Ho Lee**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Deajon 305-764, Korea

**School of Mechanical Engineering, Chungnam University, Teajon 305-764, Korea

Abstract

Residual stress caused in the weldments with high restraint force are often during welding observed in the weldments of large size nozzles or radial tanks. The reason is that quantitative analysis about thermal stresses during welding is lack for this weldments.

To verify FEM theory, the temperature was measured with thermocouple in a real time in this paper. Also analysis of the thermal stress for welding condition is performed by ABAQUS program package on various welding condition in STS butt welding.

(Received August 6, 2001)

Key Words : Thermal stress, TIG welding, STS304, Thin plate welding, Abaqus

1. 서 론

용접시 발생하는 문제점 중의 하나는 모재에 국부적으로 가해지는 열원에 의해 발생하는 응력으로서 용접성에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 열의 전도에 따라 용접부에서는 비선형적인 변형이 발생하게 되고, 이러한 변형을 외력으로 구속하게 되면 용접부에 잔류응력으로 남게되어 치명적인 결함으로 작용하게 된다.

특히 STS 304는 내열성, 내식성이 우수하여 압력용기, 화학 플랜트 등에 널리 이용되고 있으나, 고온에서 장기간 사용하면 내압에 따른 하중 외에도 열응력, 열피로 등에 의해 기계적 성질, 특히 인성이 점진적으로 저하되는 열시효취화(Thermal aging embrittlement) 현상이 발생하여 구조물의 기능손상 및 전체설비의 안전성을 저하시키게 된다. 또한 대형 노즐이나 구형탱크의 원주 용접부 혹은 대형 압력용기의 용접부 등과 같이 자체 구속력이 높은 용접부에서

는 모재의 조성과 다양한 용접 조건을 제어하여 용접을 실행하여도 균열은 빈번하게 관찰되어지고 있다¹⁾. 이는 용접시 발생하는 열응력에 대한 정량적인 평가가 이루어지지 않고 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 STS304 TIG 용접시 발생하는 열응력을 정량적으로 평가하기 위하여 유한요소 상용 프로그램인 ABAQUS²⁾를 이용하여 용접 조건에 따라 모재에 발생하는 열전달³⁾ 및 열응력을 해석을 수행하였다. 열전대를 이용하여 측정된 온도와 해석치의 비교를 통하여 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 용접조건 및 온도측정

2.1 용접조건

온도 측정을 위하여 시편은 STS304 평판을 사용하였고, 두께는 3mm이고, 길이와 폭은 300mm, 120mm이다. 용접은 7.9KW TIG 용접기를 사용하였고, 용접조건은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Welding parameters

Diameter of electrode(mm)	2.3		
Arc length(mm)	3		
Flow rate of Ar gas(l/min)	4~5		
Angle of touch(°)	90°		
Welding speed((mm/s)	2.5	3.0	3.5
Welding current(A)	180	180	180
	200	200	200
	220	220	220

2.2 온도측정

용접부의 온도는 일반적으로 2000℃ 이상의 온도 분포를 보이기 때문에 열전대의 측정온도 범위를 벗어난다. 따라서 예비실험을 통하여 열전대의 부착위치를 설정하였다. 열전대는 0~1200℃ 범위의 온도를 측정할 수 있는 K-type을 사용하였고¹¹⁾, 예비실험의 결과를 토대로 용접 비드의 중심으로부터 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 30mm 지점에서 또한 용접 진행방향으로 10mm, 100mm, 200mm, 290mm 지점의 온도를 측정하였다. 용접을 실시하기 전 온도 측정부에 열전대를 용접으로 부착하였고, 온도를 좀더 정확하게 측정하기 위하여 표준접점으로 얼음조를 사용하였다. 이렇게 수집된 온도는 Data chart¹²⁾ 3600/4600를 이용하여 처리하였다. Fig. 1은 온도 측정과정을 나타내고 있다.

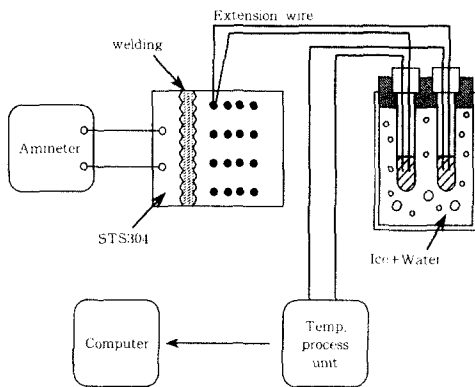


Fig. 1 Schematic drawing of device for measuring temperature

3. 응력해석 조건

열전달 및 응력의 해석을 위하여 상용 유한요소프로그램인 아바쿠스(Abaqus)를 사용하였고, 각 조건 값

은 다음과 같다.

열전달 해석¹³⁾시 필요한 경계조건으로서 초기의 온도는 20℃로 설정하였다. 비드에 평행한 면을 구속하였고, 열의 주된 손실은 전도, 대류, 복사에 의해서 이루어지는데 복사에 의한 영향은 대단히 작으므로 무시하였다. 대류에 의한 손실은 평판의 용접이기 때문에 윗면과 아랫면에 자연대류계수인 18W/m²·℃로 설정하였고, 밀도는 7817kg/m³, 비열(specific heat)은 460J/kg·℃로 설정하였다. 또한 고상과 액상의 상변화를 잠열(latent heat)의 형태로 고려하여 액화의 시작점 온도(solidus temperature)와 액화의 종료점 온도(liquidus temperature)를 1398℃~1421℃로 사용하였고, 잠열은 250kcal/kg의 값을 사용하였다. 열전도 계수는 본 열전달 해석에 가장 중요한 값이므로 온도에 따라 변화하는 값을 입력하였으며, 그 값은 Table 2에 나타내었다.

용접시 입열량을 해석에 적용하기 위하여 아크유효면적당 입열(flux)을 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$Q = \eta EL / bL \tag{1}$$

여기서, η 는 용접효율, E는 용접전압(V), I는 용접전류, b는 용접비드의 폭, L은 아크 유효면적의 용접방향 거리로 나타낸다.

응력의 해석을 위하여 사용한 물성치로서 열팽창계수, 탄성계수, 항복응력, 인장강도, 포아송의 비(Poisson's ratio)가 있는데, 포아송 비는 0.29를 사용하고, 나머지는 온도에 따라 값을 입력하였다. 그 값은 Table 3와 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서는 시간증분을 결정하는데 있어서 자동 시간추정알고리즘을 사용하였다. 이것은 시간 증분에 있어서 허용되는 최대온도변화량에 대하여 사용자가 정하는 간격에 기반을 두고 있으며, 비선형적 해석인

Table 2 Thermal conductivity at various temperatures

Temperature(℃)	20	200	400	600	800	1000
Thermal conductivity (W/m·℃)	16.3	17	19	22	27	31

Table 3 Thermal expansion coefficient at various temperatures

Temperature(℃)	100	316	538	649	982
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /℃)	17.3	17.8	18.4	18.7	20.2

Table 4 Properties at various temperatures

Temperature(°C)	37.78	148.89	260	371.11	482.22	593.33	648.89
Modulus of elasticity(GPa)	200.11	192.52	184.24	176.65	153.19	131.79	114.55
Yield stress (MPa)	171	127	111	91	71	56	44
Tensile strength (MPa)	586.42	520.28	506.56	492.74	447.96	354.96	306.64

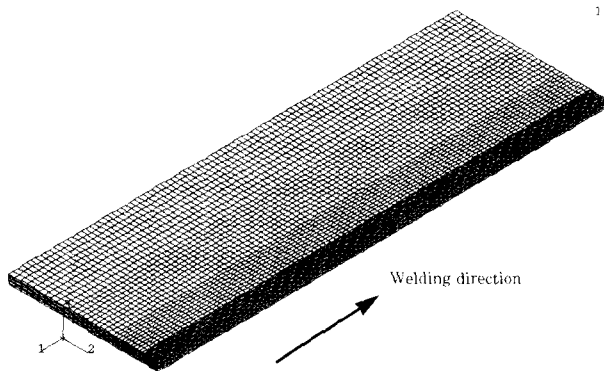


Fig. 2 Finite element model

경우에는 수렴율에 따라서 변화된다. 재료는 등방성(isotropic)으로 가정하였고, 재료의 항복거동은 폰미세스(Von-Mises) 항복조건을 사용하였다^{6,7)}. 또한 외적구속은 일반적으로 맞대기 용접에 사용되는 비드에 평행한 면을 구속조건으로 하였다.

해석모델에서의 요소분할(mesh generation)은 국부적이며, 큰 입열로 인해 온도구배가 심한 용접부 주변은 보다 미세하게 하고, 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 온도구배가 작기 때문에 요소의 크기를 증가시켜 해석시간을 단축시켰다. 모델의 형상과 방향은 Fig. 2에 나타내었다⁸⁻¹¹⁾.

4. 해석 결과

4.1 측정온도와 해석온도의 비교

Fig. 3과 Fig. 4는 각 용접조건에서 실험에 의한 온도분포와 해석에 의한 온도분포를 비교한 것이다. 용접부의 온도분포의 특징은 비드에서 가까운 부분은 상당히 급격한 온도의 변화를 거치는데 실험값과 이론값은 최대의 온도값, 온도상승의 경향, 냉각의 경향이 거의 유사하게 나타나고 있다. 비드에서 가까운 부분은 먼 곳보다 급격한 온도변화를 일으키기 때문에 약간의 오차를 보이고 있으나 전체적인 온도의 수준에서 보면 미미한 오차의 수준이므로 해석 결과의 타당성을 알 수 있다.

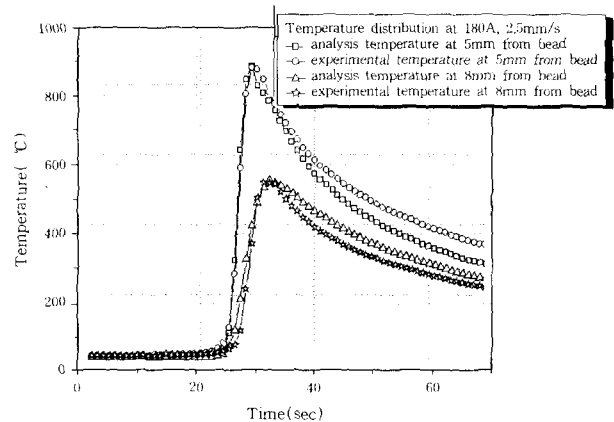


Fig. 3 Comparison on temperature distribution between experiment value and analysis value at welding conditions 180A, 2.5mm/s

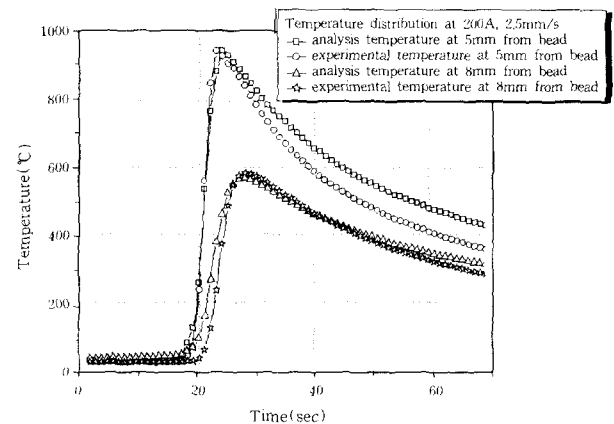


Fig. 4 Comparison on temperature distribution between experiment value and analysis value at welding conditions 200A, 2.5mm/s

4.2 방향에 따른 응력분포

Fig. 5와 Fig. 6은 모재의 중앙부에서 각 방향으로의 응력분포를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 전반적으로 시간에 따른 응력분포의 변화는 매우 유사하나, 입열량의 차이로 인하여 최대 응력의 크기와 최소 응력의 크기가 다르게 나타난다.

용접봉이 지나가는 순간에는 폭방향(yy-방향)으로 압축응력이 가장 크게 나타나는데, 이는 용접 비드에서

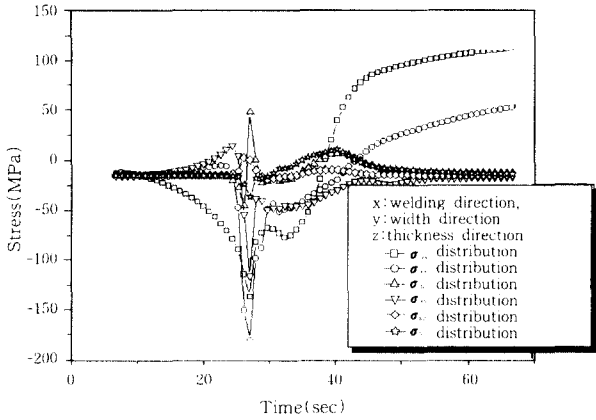


Fig. 5 Stress distribution on 4mm distance from bead at welding condition 200A, 3.0mm/s

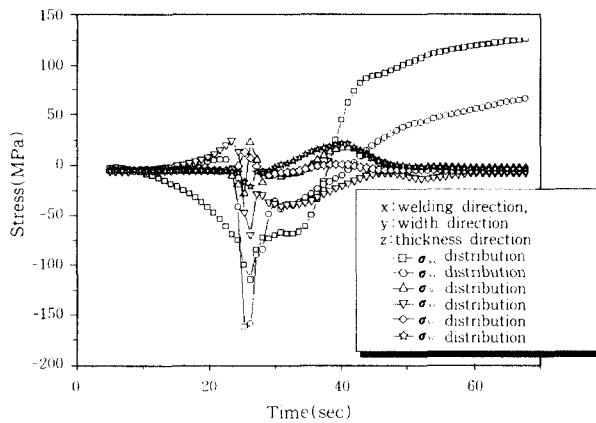


Fig. 6 Stress distribution on 4mm distance from bead at welding condition 180A, 3.0mm/s

yy-방향의 거리에 따라 불균일한 온도분포에 의한 모재의 열팽창이 달라지기 때문이다. 또한 아크가 진행한 후의 응력 상태를 고려할 때 폭방향(yy-방향)의 응력에 비해 진행방향(xx-방향)의 응력이 커졌는데 이는 아크 열로 인한 열응력에서 모재의 변형에 의한 응력으로 전환됐기 때문으로 사료된다. 두께방향(zz-방향)은 모재가 얇기 때문에 구속이 거의 없고, 자유로운 변형이 발생하므로 응력은 거의 발생하지 않는다. 평판의 용접공정에 있어서 가장 영향을 많이 미치는 응력은 비드로부터의 폭 방향과 진행방향의 응력이고, 이것이 용접부의 기계적, 물리적 성질에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

Fig. 7은 진행거리가 75mm 이고, 용접 비드로부터 20mm 떨어진 지점에서의 응력 분포를 나타낸다. 용접 비드에서 4mm 지점의 응력분포와 매우 다른 양상을 나타낸다. 즉 비드에서 거리가 멀어지면 폭방향(yy-방향)의 응력은 작게 나타난 반면 진행방향(xx-방향)의 응력은 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

이는 비드에서 멀리 떨어진 지점은 열응력을 발생시킬 수 있는 온도차가 작아져서 열응력이 작게 발생하기 때문이다.

폭방향의 응력은 비드부근의 팽창에 의한 반작용으로 발생하는 응력뿐 아니라 평판 용접에서 일어나는 판의 변형 즉, 좌굴에 의한 응력의 복합적인 결과라고 할 수 있다.

4.3 상당응력과 폭방향응력의 비교

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 용접전류 200A와 180A에 s서 용접속도 3.0mm/s의 조건으로 용접시 비드로부터의 거리는 3mm이고, 용접의 진행거리에 따른 비드에서 폭방향으로의 시간에 따른 응력의 분포와 상당응력 분포를 나타내고 있다.

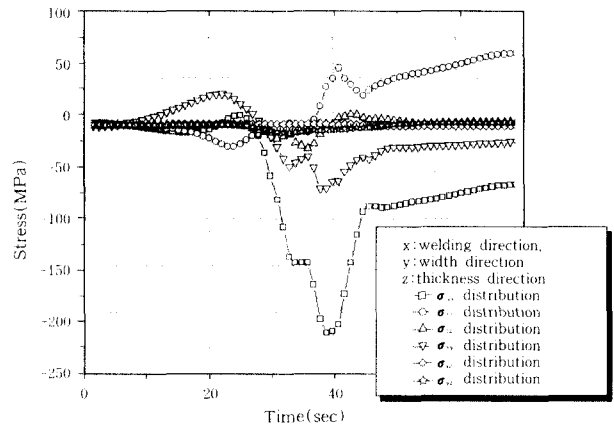


Fig. 7 Stress distribution on 20mm distance from bead at welding conditions 200A, 3.0mm/s

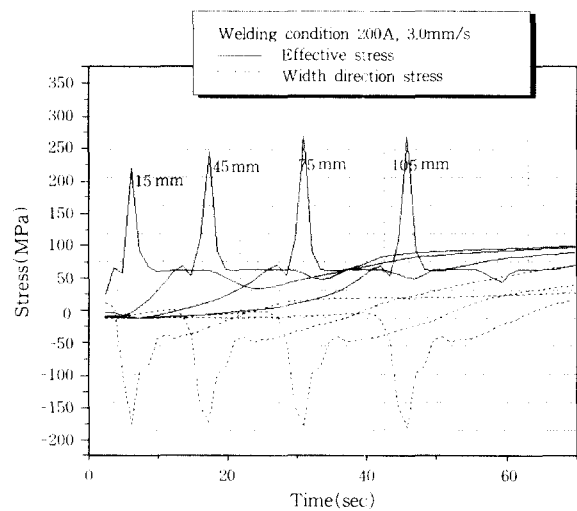


Fig. 8 Distribution of effective and width-direction stress on a welding direction at welding conditions 200A, 3.0mm/s

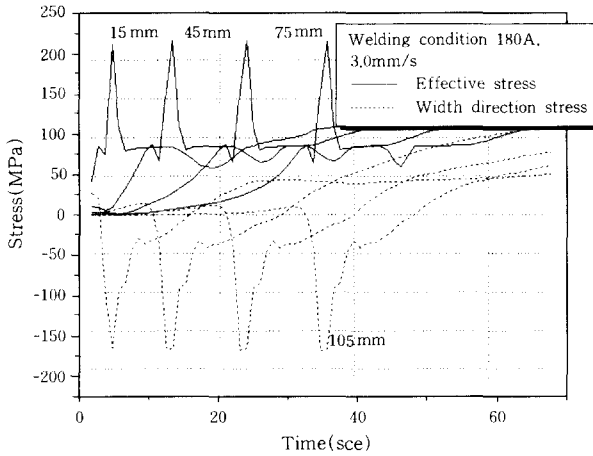


Fig. 9 Distribution of effective and width-direction stress on a welding direction at welding conditions 180A, 3.0mm/s

용접의 진행과정에 있어서 판재에 분포하는 응력은 시작점으로부터의 거리에는 거의 상관없고, 지점의 이동만큼 시간축으로의 이동을 한 형태를 보이고 있다. 이는 용접시 모재에 남는 응력의 분포는 비드로부터의 거리에 따라 다르고, 진행거리와는 거의 관계가 없음을 보여주고 있다. 상당응력의 분포는 폭방향으로의 응력의 분포와 유사한 형태를 보이고 있다. 즉 주응력의 방향이 폭방향으로의 응력임을 나타내고 있다.

4.4 용접속도에 따른 응력분포의 비교

Fig. 10과 Fig. 11는 비드에서의 거리가 5mm, 3mm일 때 폭방향의 응력 분포를 나타내고 있다.

용접시 입열량은 전류와 전압이 같기 때문에 용접점의 입열량은 같지만 속도의 차이에 따라 가열되는 시간 차이가 있으므로 총 조사되는 입열량에 차이가 생기게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적 경향은 용접

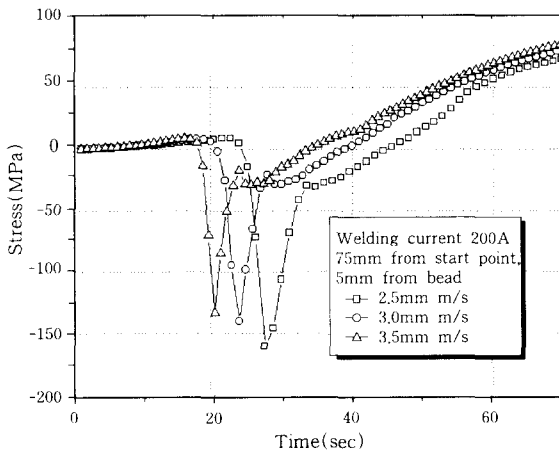


Fig. 10 Width-direction stress on welding speeds at 5mm distance from bead

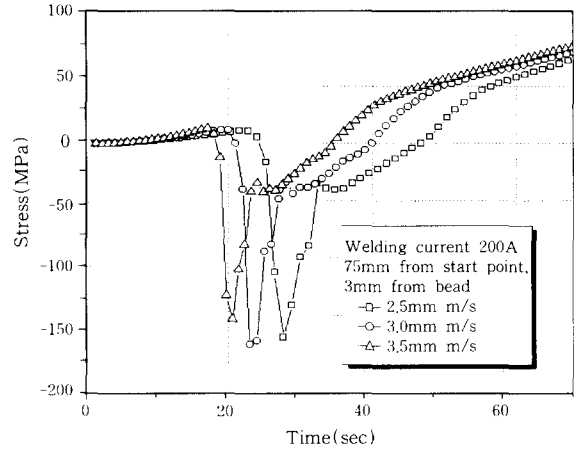


Fig. 11 Width-direction stress on welding speeds at 3mm distance from bead

속도가 느린 경우에는 상대적으로 입열량이 많으므로 용접 속도가 빠른 경우보다 응력의 변화가 큰 것으로 나타났다. 하지만 두 번째의 그림에서는 속도가 3.0mm/s의 경우가 2.5mm/s의 경우보다 큰 응력의 환경에 있음을 보여주고 있다. 즉, 비드에서 가까운 부분에서는 위치에 따라 속도가 빠른 용접의 조건이 속도가 느릴 때 보다 더 큰 응력의 분포를 보이는 지점도 생기는데, 이것은 각각 응력의 최대변화지점이 조건에 따라 다를 수 있으며, 용접열원에 의해 영향을 받는 열 영향부의 크기가 달라지는 것으로 해석할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 열전대를 이용하여 용접시 모재의 거리에 따라 온도를 실시간으로 측정하고, 상용 유한요소 프로그램인 아바쿠스(Abapus)를 이용하여 모재에 발생하는 열전달 및 열응력을 해석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 용접 중 모재의 최대온도는 용접전류와 속도에 따라 달라지며, 실험값과 해석값은 최대온도의 분포, 가열, 냉각 특성이 유사함을 보임으로서 해석결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 2) 용접과정 중의 주응력의 방향은 폭방향으로의 응력이며, 비드로부터 떨어진 지점의 용접진행방향의 응력이 크게 나타나는 것은 팽창에 의한 응력과 모재의 변형에 기인함을 확인할 수 있었다.
- 3) 용접 비드에서 가까운 모재부분(10mm 지점까지)은 용접이 진행되면서 압축응력에서 인장응력으로의 변화가 크게 나타나며, 비드에서 일정거리가 떨어진 지점은 응력의 변화가 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

4) 응력의 변화는 속도가 느릴수록 용접전류가 클수록 크게 나타나며, 최대응력을 나타내는 지점도 용접 비드로부터 먼 거리에서 나타남을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 강성수 : 이종 점용접재의 피로거동에 관한 실험적 연구, 경북대학교 박사학위논문 (1989)
2. Abaqus Theory Manual, Hibbitt, Kaulsson & Sorensen, Inc, Version5.5
3. Yunus A., Cengel : Heat Transfer, WCB Mc- Graw-Hill, (1998), 280~360
4. 우진(주) 부설계측기술연구소 : 열전대, 온도측정 (1990)
5. J. P. Holman : Heat Transfer, 7th, Mcgraw Hill (1990)
6. 김용환, J. L. Chenot : 금속주조공장에서 열전달과 상변화를 고려한 유동의 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 2-1 (1993), 73~82
7. K. Okita, M. Aritoshi, W. kishimoto : On the Friction Interface Temperature under steady state with convectional driving method, J. of Japan Welding Soc., 51-3 (1982), 62~67
8. J. N. Reddy : An Introduction to the Finite Element method, McGraw Hill (1985)
9. J. P. Thompson : Numerical Grid Generation Foundations and Applications, North-Holland (1985)
10. A.C.Ugural : Advanced Strength and Applied Elasticity, Prentice-Hall Inc. (1995)
11. P.Kohnke : ANSYS User's Manual: Theory, Swanson Analysis System, Inc. (1996)