

유한요소법에 의한 PREFLEX BEAM의 용접열분포 특성에 관한 연구

방한서* · 주성민** · 김하식***

*조선대학교 항공·조선공학부

**조선대학교 선박해양공학과 대학원

***조선이공대학 컴퓨터응용기계학부

A Study on the Numerical Analysis of Welding Heat Distribution of Preflex Beam

HAN-SUR BANG*, SUNG-MIN JOO** AND HA-SIG KIM***

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju, Korea

***Division of Computer Applied Mechanics, Chosun College of Science and Technology, Gwangju, Korea

KEY WORDS: Preflex Beam 프리플렉스보, Finite Element Analysis 유한요소해석, Welding Residual Stress 용접잔류응력

ABSTRACT: Preflex beam is a method of construction designed to hold the pre-compressive stresses over the concrete pier by the preflexion load. During the fabrication of the girder, welding causes residual stresses. The welding residual stresses must be relieved in order to generate the accurate compressive pre-stresses. In this study, to determine the thermal distribution characteristics on the girder by welding, both three-dimensional finite element analysis and two-dimensional finite element analysis, in a quasi-steady state, is carried out. After comparing each result between the three-dimensional analysis and the two-dimensional analysis, finite element analysis is carried out against the actual girder, and the welding thermal distribution characteristic over the preflex beam is analyzed. It is possible to provide the input data for the analysis of the welding residual stresses.

1. 서 론

철근콘크리트보는 콘크리트부에 균열이 빈번히 발생하고 일단 발생한 균열은 가속화되어 기대수명에 못미치게 된다. 인장 응력에 취약한 콘크리트재의 단점을 보완하기 위해 사용하중에 의한 인장력을 상쇄시킬 수 있도록 콘크리트에 초기의 압축 응력을 부여하는 공법이 개발되고 있으며 이와 같이 미리 압축 응력을 준 콘크리트를 프리스트레스트 콘크리트 (prestressed concrete)라고 한다.

보통 PS 콘크리트 또는 PSC, PC 등으로 약칭되는 이러한 공법들 중 프리플렉션합성보는 I형의 강재에 탄성한도 내의 초기 하중(프리플렉션하중)을 주어 굽힘이 유지된 상태에서 하부플렌지에 콘크리트를 타설하고, 양생 후에 프리플렉션하중을 제거 하면서 복원되는 힘에 의해 콘크리트부에 압축의 초기 응력을 발생시키는 합성형 부재로 제작에서의 핵심기술은 정확한 프리스트레스를 발생시키는 것이다. 하지만 거더의 제작과정 중에 용접에 의해 발생하는 잔류응력의 영향으로 균일한 프리스트레스의 발생이 어렵고, 제품의 내구성에도 문제가 발생된다.

용접잔류응력은 거더에 공급되는 용접입열에 의해 국부적인 열이력을 경험하고 이에 따른 용융, 응고와 구속력이 복합적으로 작용하여 발생되는 것이므로 반드시 용접입열량에 의한 부재내의 정밀한 열해석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 프리플렉스보 제작시의 용접잔류응력 제거에 대한 연구를 위한 선행연구로서 먼저 용접에 의한 프리플렉스 거더 내의 열거동을 해석하고자 한다.

2. 3차원 열전도 해석

본 연구는 실구조물인 프리플렉스보에 대한 용접잔류응력의 해석 및 실험에 의한 계측과 잔류응력 제거 실험을 위한 선행 연구로 프리플렉스거더의 플렌지 사이즈와 동일한 평판모델에 대하여 3차원 유한요소해석을 평판용접부에 대해 수행한 후 분석한다. 다음 동일 모델에 대한 2차원 유한요소해석을 한 후, 결과를 비교 분석한 후에 실제 프리플렉스거더의 형상과 동일한 모델로 해석하여 용접시의 거더내 열거동을 분석한다.

열전도 해석에서 재료정수들의 온도의존성을 Fig. 1과 같이 고려하였으며 해석모델의 크기는 길이 700mm, 폭 500mm, 두께 30mm이며 좌표계는 직교좌표계를 사용하여 용접선 직각방

제1저자 방한서 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375

062-230-7134 hsbang@mail.chosun.ac.kr

향(폭방향)을 x, 판두께방향을 y, 용접선(길이)방향을 z로 하였다. Fig. 2에는 해석모델의 크기와 좌표를 나타내었으며 유한요소 모델의 총절점수는 3312개, 총 요소수는 2310개이다.

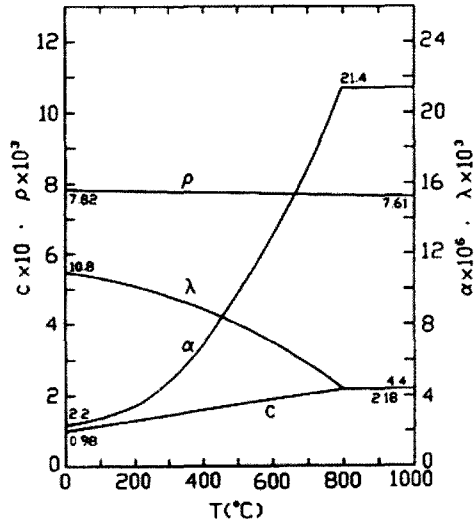


Fig. 1 Temperature dependency of material properties used in thermal analysis

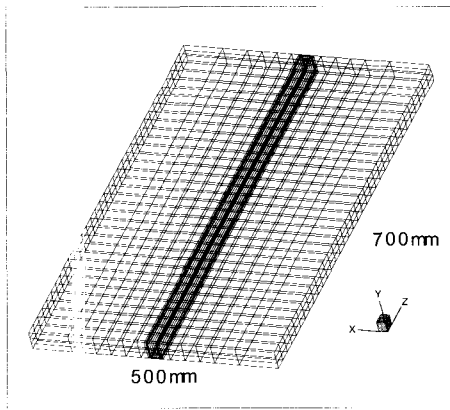


Fig. 2 Mesh division used three dimensional finite element analysis

모재와 용착금속의 화학조성은 Table 1 및 Table 2와 같으며 용접조건은 서브머지드 아크용접을 전압 35V, 전류 700A, 용접속도 4.5cm/mm, 용접효율 $\eta=0.9$ 로 Bead-on-plate용접을 하였으며 Table 3에 용접조건을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of base metal (SWS490A)

Chemical composition	C	Mn	Si	P	S
Base metal	0.18	1.60	0.35	0.035	0.035

Table 2 Chemical compositions of welding electrode (S-777MX×H-14)

Trade name	Dia (mm)	Chemical composition (%)					
		C	Si	Mn	P	S	Cu
H-14	4.0φ	0.11	Tr.	1.98	0.017	0.012	0.045

Table 3 Welding conditions

Test plate (Th.)	Joint preparation and layer details	Wire dia. (mm)	Welding condition			
			Curr.	Amp.	Volt	Cpm.
SM490A (30mm)		4.0φ	DC(+)	700	35	4.5

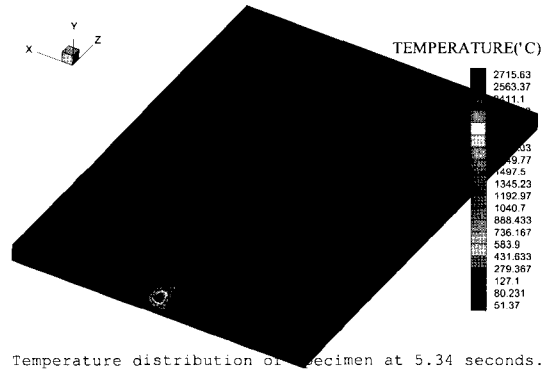


Fig. 3 Isotherm contours around the moving arc at 5.34 sec

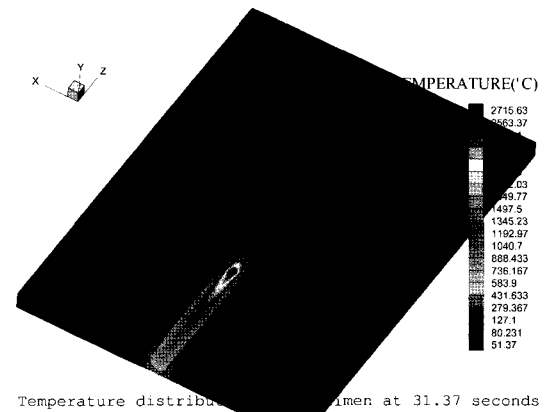


Fig. 4 Isotherm contours around the moving arc at 31.37 sec

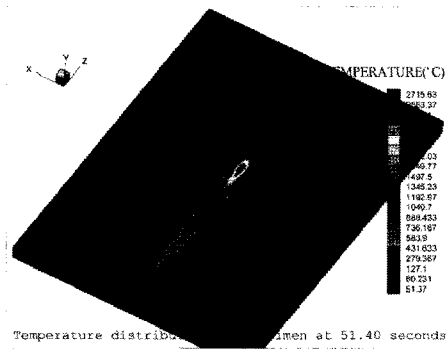


Fig. 5 Isotherm contours around the moving arc at 55.40 sec

위의 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 용접이 개시되어 열원이 이동해가면서 형성되는 온도장을 보여주고 있으며 Fig. 3과 같이 용접이 개시된 직후 또는 완료되기 직전의 온도분포, 다시 말하면 아크가 시편의 단부에 가까이 위치하고 있을 때에는 열이 전도될 수 있는 방향과 체적이 한정되어 아크가 중심부에 위치하였을 때 보다 온도가 증가하는 양상을 보인다. 또한 시, 중단부를 제외한 부분에서의 온도분포는 열원(아크)이 입력된 용접속도만큼 이동함에도 불구하고 동일한 분포양상을 나타내고 있으며, Fig. 6과 Fig. 7에서처럼 길이방향과 중심단면을 절단하여 각각의 열원이 이동하는 과도 순간에서의 각 단면의 온도분포를 출력하여 분석하여 보면 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11과 같다.

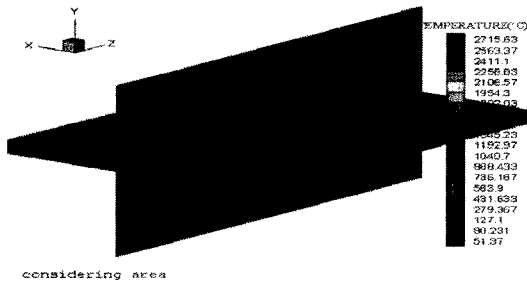
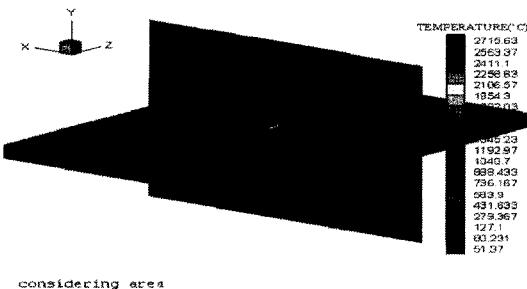


Fig. 6 Position of longitudinally sliced section to view sectional temperature distribution of the three dimensional model



7 Position of transversely sliced section to view sectional temperature distribution of the three dimensional model

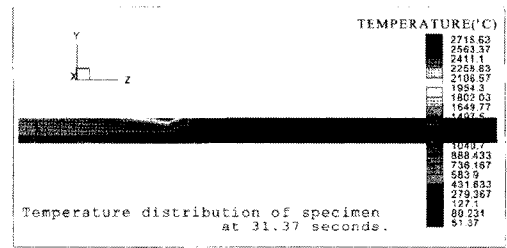


Fig. 8 Sectional view of temperature distribution at 31.47 sec

위의 결과값들에서 부터 용접열원이 시단부에서 어느 정도 떨어지면 재료가 경험하는 열이력은 임의의 어떠한 순간에서나 모두 동일하고, Fig. 11과 같은 각 순간의 단면에서의 온도 분포 역시 가열과 냉각 전 구간에서 열이력이 동일하게 된다.

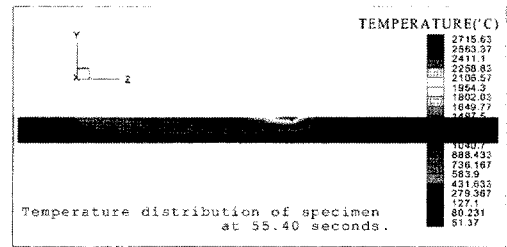


Fig. 9 Sectional view of temperature distribution at 55.40 sec

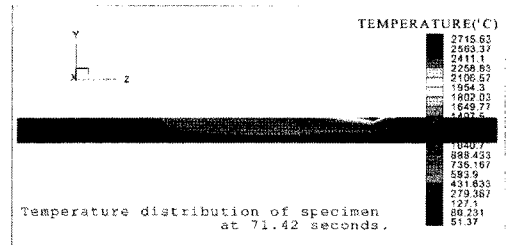


Fig. 10 Sectional view of temperature distribution at 71.42 sec

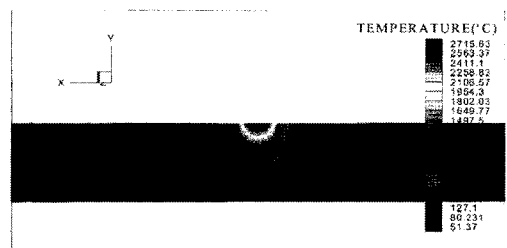


Fig. 11 Sectional view of temperature distribution at 31.47 sec, 55.40 sec and 71.42 sec along transversal area.

Fig. 12에서는 용접선방향(길이방향)에 걸친 온도분포를 시간대별로 도시하고 있으며 시단부와 중단부를 제외한 구간에서는 동일한 온도이력이 유지되고 있음이 명확하다. 즉 피 용접체의 역학적 사이즈가 열전도가 지속적으로 모든 방향으로 일어날 수 있을 만큼 충분하다면 각 단면의 임의의 위치에서의 수축과 팽창정도는 동일하게 되어 각 단면은 용접이 이루어지는 전 과정에서 같은 모양의 평면을 유지하게 된다. 다시 말하

만, 이동열원의 해석을 열이력이 동일하게 유지되는 준정상상태 구간 내에서의 단면해석으로도 역학적으로 동일한 결과를 얻을 수가 있는 것이다. 이를 증명하기 위해 다음 장에서 3차원 이동열원모델을 동일한 용접조건에서의 2차원 순간열원모델로 치환하여 해석하고 결과를 비교한다.

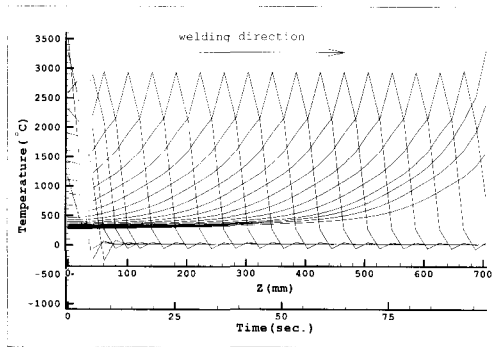


Fig. 12 Temperature distribution along the center of weld line (surface)

3. 2차원 열전도 해석

2차원 열해석을 위한 모델은 3차원 모델의 중앙 횡단면을 Fig. 13과 같이 모델링 하였으며 총 절점수는 116개, 총 요소수는 84개이다. 입열량은 요소에 순간열원으로 투입되었으며 온도변화에 따른 물리정수 변화를 3차원 해석과 마찬가지로 충분히 고려하였으며 용접조건 역시 동일하다. Fig. 14는 용접열원이 지나가고 2.25초가 경과한 뒤의 온도분포를 중심부를 확대하여 나타낸 그림으로, 열이 모재의 각 방향으로 전도되고 열영향부가 가장 확대되었을 때의 모습이다.

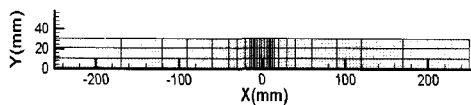


Fig. 13 Mesh division used two dimensional finite element analysis

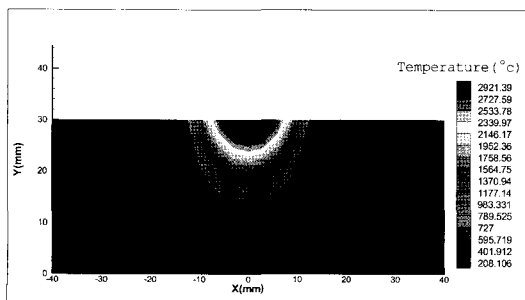


Fig. 14 Isotherm contours at 2.25 sec after welding arc passed

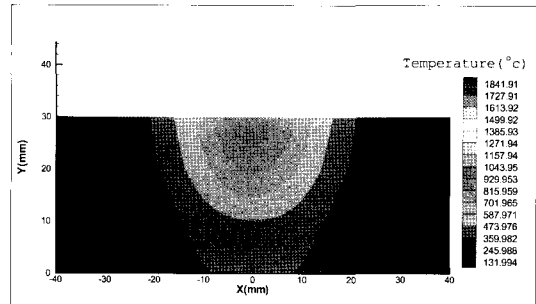


Fig. 15 Isotherm contours at 21.96 sec after welding arc passed

Fig. 15는 용접열원이 해석단면을 통과하고 21.96초가 지났을 때의 열분포도이며, 이와 같이 열원이 투입되고 실온으로 냉각되기까지의 전과정에서 살펴보고자하는 어떠한 시간에서도 온도분포를 구할 수가 있다.

다음으로는 2차원과 3차원해석의 결과를 비교하여 보기로 한다. 먼저 3차원과 2차원해석시의 실온으로의 온도냉각과정에서의 시간경과에 따른 온도변화를 냉각시 온도가 1000°C 미만으로 냉각될 때부터 Fig. 16과 Fig. 17에 도시하였으며 각 시간대에서의 온도분포는 2차원 해석과 3차원 해석에서 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서 온도분포가 준정상상태를 나타내는 구역에서의 해석은 2차원 해석으로도 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 다음 장에서 실물 프리플렉스거더의 용접시 발생하는 열분포특성을 해석한다.

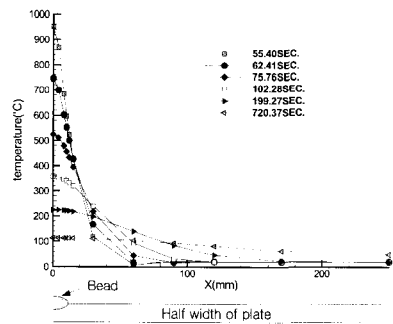


Fig. 16 Temperature history of three dimensional analysis in cooling state

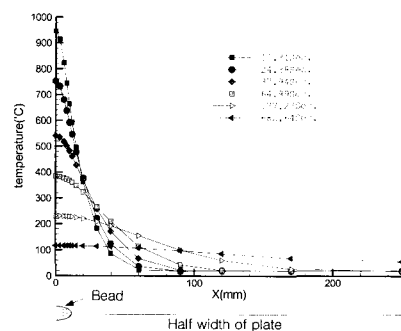


Fig. 17 Temperature history of two dimensional analysis in cooling state

4. Preflex girder의 용접 Simulation

2차원 유한요소해석에 의해 Fig. 18과 같은 용접순서에 따라 프리플렉스거더의 용접입열에 의한 열해석을 수행하였다. 총절점수는 2113개, 총 요소수는 1920개이며, 모델의 크기는 상, 하 플랜지가 앞서 수행한 평판의 치수와 같으며 용접조건 역시 동일하다.

Fig. 19와 Fig. 20은 각각 용접입열이 투입된 직후부터 2초가 경과 하였을 때의 온도분포도와 3패스째의 입열이 투입될 때의 거더 내의 온도분포이며 Fig. 21은 마지막 4패스째의 입열이 투입되고 난 직후의 전체 거더에 걸친 온도분포이다. 시간경과에 따른 프리플렉스거더 내의 특정지점에서의 온도분포를 알아보기 위해 Fig. 22와 같이 용착금속(WM)과 열영향부(HAZ), 그리고 모재(BM, BM-1)에 대한 온도이력곡선을 도시하였다.

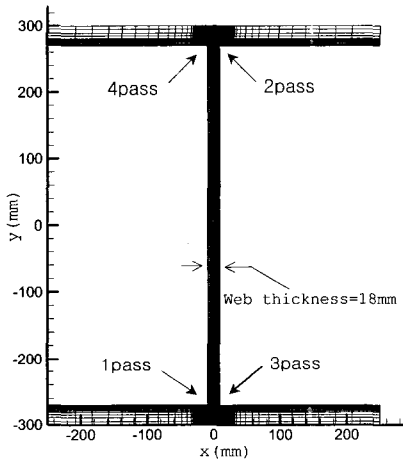


Fig. 18 Finite elemnt mesh divison for heat analysis of preflex girder

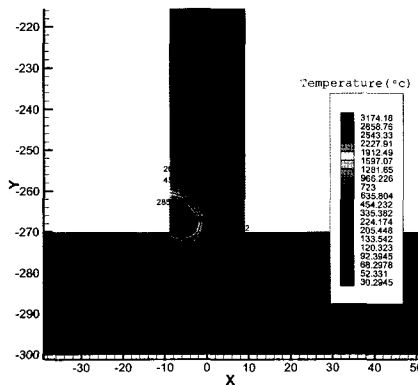


Fig. 19 Isotherm patterns of lower flange at 1pass (time=2 sec)

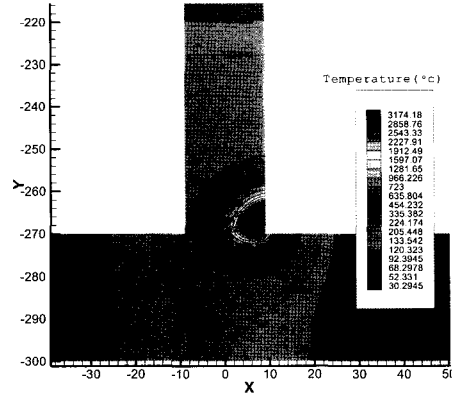


Fig. 20 Isotherm patterns of lower flange at 3pass (time=92 sec)

Fig. 22에서 1패스 용접시에는 모재부였던 곳이 용접이 완료되고 시간경과와 더불어 냉각되어 가다가 92초에 3패스째 용접이 이루어지면서 그곳이 용융부가 되어 다시 용융온도 이상의 온도로 상승하고 용접아크가 지나간 후에 실온으로 냉각되어가고있는 모습이고, 반대로 최초 1패스 때에 용융부였던 곳은 용접이 끝나고 냉각되어 가다가 3패스째의 입열에 의해 다시 온도가 상승하였다가 하강하는 모습을 볼 수가 있다. 이 온도분포는 하부플랜지 상표면에서 1mm 아래 폭에 걸친 온도분포이며 프리플렉스거더의 플랜지나 웨브의 위치에 따라 다양한 분포를 나타내고 있다. 그중에서도 열이력이 반복되고 온도구배가 제일 큰지점, 다시 말하면 고온도의 순간적인 발열과 급격한 냉각이 이루어지는 지점은 역시 상,하 플랜지와 웨브의 용접부이다. Fig. 23은 하부플랜지 폭에 걸친 온도분포가 시간경과에 따라 어떻게 변화하는지를 보여주는 그래프로 플랜지 중심에서부터 좌,우 20mm 지점내에서 대부분 급한 온도구배가 발생함을 알 수가 있다.

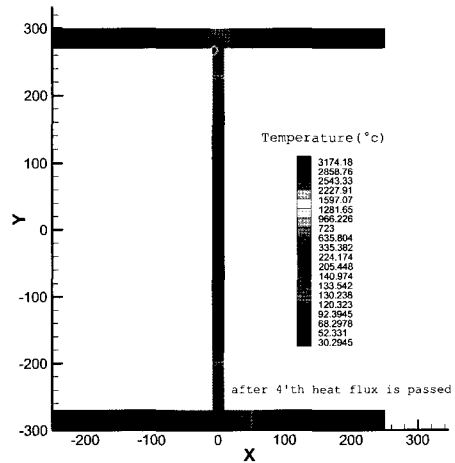


Fig. 21 Isotherm patterns of whole section in the girder at 4pass (time=164 sec)

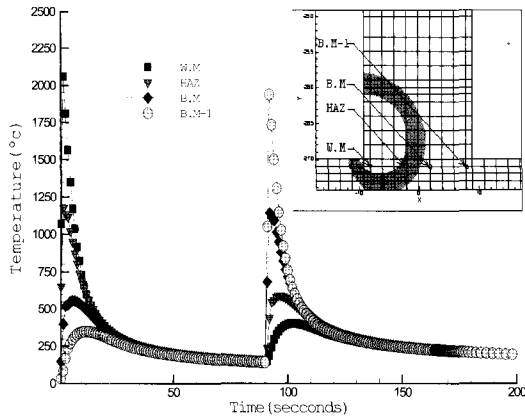


Fig. 22 Temperature history of weld metal, HAZ and base metal along time

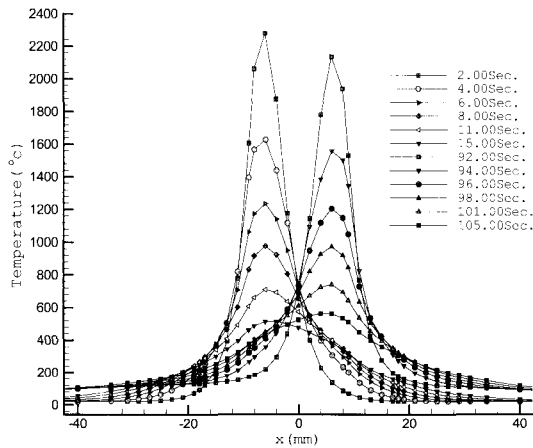


Fig. 23 Temperature distribution in perpendicular direction of welded line

5. 결 론

이상과 같은 연구에서 얻어진 결론은 아래와 같다.

(1) 3차원비정상 열전도 해석을 온도변화에 따른 물성치변화를 충분히 고려하고 열원의 이동효과를 반영하여 해석할 수 있었으며, 용접의 시단부와 종단부를 제외한 곳에서는 열이력이 동일한 준정상구역이 존재하고 있음을 알 수 있었다.

(2) 동일한 해석모델과 용접조건에 대하여 준정상상태를 경험하는 구역에 대한 2차원 순간열원 해석을 수행한 결과 재료 내의 모든 지점에서의 온도분포 및 열이력이 3차원 이동열원 해석시와 동일한 것을 확인하였다.

(3) 위의 (1),(2)의 결과에 의해 프리플렉스거더를 용접하는 과정에서 발생하는 거더 내의 모든 지점에서의 온도분포를 2차원 순간열원해석에 의해 시뮬레이션하여 구할 수 있었으며, 차후에 용접열에 의해 발생하는 과도 용접응력 및 최종 용접 잔류응력해석을 위한 데이터를 구할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2001년도 조선이공대학 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

방한서 (1990). "유한요소법에 의한 박판용접의 2차원비정상 열전도해석", 대한조선학회지, 제27권, 제4호, pp 44-50.
 방한서 (1990). "후판용접부의 역학적 특성". 대한용접학회지, 제 10권, 제4호, pp 250-258.
 방한서, 김유철 (1991). "유한요소법에 의한 후판용접시의 3차원 비정상 열전도해석", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp 37-43.
 Englekirk, R. (1994). Steel Structures, John Wiley and Sons Inc.

2003년 6월 5일 원고 접수

2004년 2월 16일 최종 수정본 채택