

PREFLEX BEAM 제작시의 용접부 역학적 특성에 관한 연구

방한서* · 주성민* · 김규훈* · 이창우** · 이형훈***

*조선대학교 선박해양공학과

**울산과대학 기계공학부

*** (주)삼현 P.F

The Study on the Analysis for Welding Residual Stress of Preflex Beam

HAN-SUR BANG*, SUNG-MIN JOO*, KYU-HOON KIM*, CHANG-WOO LEE**, AND HYUNG-HOON LEE**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, CHO-SUN UNIVERSITY

**Department of Mechanical Engineering, ULSAN COLLEGE

***SAMHYUN P.F Co. Ltd.,

KEY WORDS : Preflex Beam, Finite Element Method, Welding residual Stress, Pre-compressive stress

ABSTRACT : Since the preflex beam is fabricated by welding, the precompressive stresses that should occur over the concrete pier are diminished by the welding residual stresses. Therefore the welding residual stresses must be relieved during the fabrication. So the analysis and examination of the accurate welding residual stress distribution characteristic are necessary.

On this study, accurate distribution of welding residual stress of preflex beam is analyzed by finite element method.

1. 서 론

콘크리트재와 강재의 합성부재에 있어서 압축에는 강하지만 인장에 저항하는 힘이 약한 콘크리트재의 단점을 보완하기 위하여, 강재에 탄성한도내의 굽힘을 가하고(preflexion) 하부플랜지에 콘크리트를 타설하여 양생한 후, 릴리프함에 따라 콘크리트가 초기 압축응력을 지니게 함으로써, 취성재료인 콘크리트가 인장응력에 견딜 수 있도록 하는 부재를 프리플렉스합성보(이하 프리플렉스빔이라 함.)라고 한다. 즉 콘크리트케이싱부에 발생시킨 압축의 초기응력에 의한 힘과 사용중에 발생하는 하중에 의한 힘이 서로 상쇄가 되어 콘크리트부가 탄성한도 내에서 거동하게 함으로써 균열발생을 저지하게 된다. 프리플렉스빔 공법에 의해서 외관이 미려하고, 형고가 낮으며 프리스트레스에 의한 강성증가로 지간을 넓힐 수 있는등의 좋은 장점을 지닌 교량을 제작할수 있으나 사용중에 예기치 못한 균열이 발생하는 등의 문제가 보고되고 있다. 프리플렉스공법에서 가장 중요한 것은 콘크리트케이싱부에 압축의 초기 스트레스를 정확히 유발시키는것이나 초기 프리플렉스거더의 제작공정에서 발생하는 용접에 의한 잔류응력의 영향으로 압축응

력이 거더내에서 불균일하게 적용되고 상당부분 소실되기 때문에 외부하중을 충분히 상쇄시키지 못하여 장기적인 사용환경에서 제품이 비선형적으로 거동하고 이에 예기치 못한 균열발생등으로 수명과 안전성에 문제로 제기될 수 있다. 이에 본 연구에서는 프리플렉스빔을 용접하여 제작할 때 발생하는 과도 및 최종 용접잔류응력을 유한요소해석과 실험에 의해 구한다.

2. 용접잔류응력 측정실험

실험에 사용된 모재의 재질은 SM490A이며 용접은 모재중심부에 길이방향으로 Submerged Arc Welding(이하 SAW)을 1회 bead-on-plate용접을 하였다. SAW용접시 사용된 플럭스와 와이어의 품명은 Table 1과 같으며 그 화학조성은 Table 2와 같다.

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

Table 1 Chemical compositions of base metal (SWS490A)

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

Consumables	Tensile test			
	YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EL (%)	RA (%)
S-777MX × H-14	48.2	53.7	33.2	72.2
AWS A5.17 Spec.	Min. 40.8	49.3 ~66.8	Min. 22.0	...

Table 3 Mechanical properties

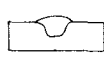
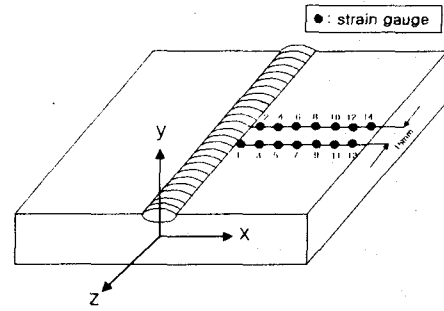
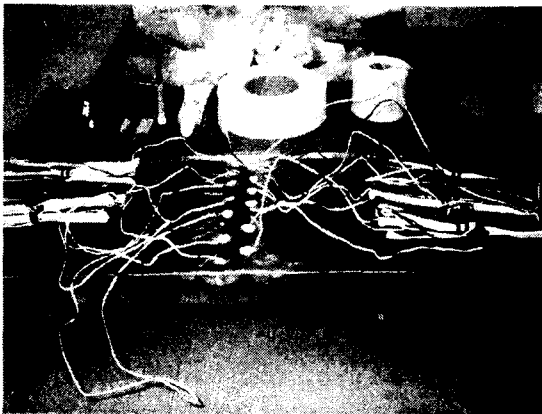
Test plate (Th.)	Joint preparation and layer details	Wire dia. (mm)	Welding condition			
			Curr.	Amp.	Volt	Cpm.
SM490A (30mm)		4.0Φ	DC(+)	700	35	4.5

Table 4 Welding Conditions

용착금속의 항복강도 및 인장강도는 Table 3과 같고 실험에 적용한 용접조건은 Table 4와 같다. 시험편의 사이즈는 길이(Z) 700mm, 폭(X) 500mm, 두께(Y) 30mm이며 응력측정을 위해 사용한 게이지의 크기는 2mm의 2축 스트레인 게이지를 사용하였다. 스트레인측정을 위한 게이지의 부착위치는 용접비드의 중앙선으로부터 폭방향으로 14개 지점에 스트레인게이지를 부착하여 실험하였으며, Fig.37과 같이 스트레인 게이지의 정확한 부착 위치는 용접비드 중심으로부터 폭방향으로 15mm, 20mm, 30mm, 45mm, 60mm, 70mm, 90mm, 105mm, 120mm, 140mm, 170mm, 190mm, 210mm, 230mm 지점이다.



(단위:mm)

게이지 부착순서	1	2	3	4	5	6	7
부착위치	x=15	x=20	x=30	x=45	x=60	x=70	x=90

게이지 부착순서	8	9	10	11	12	13	14
부착위치	x=105	x=120	x=140	x=170	x=190	x=210	x=230

Fig.1 strain gauge의 부착위치

용접을 한 후에 게이지를 부착하고자 하는 곳을 표면 연마를 한 후에 스트레인 게이지를 부착위치에 정확히 부착하여 초기값을 읽고, 게이지가 부착된 시편 주위를 각각 절단하여 내적구속력을 해방시켜 이때 측정된 스트레인값과 초기값과의 차에서 잔류응력분포를 구하였다. 이를 도시한 것이 Fig.2 와 같다. 길이방향 응력성분은 용접비드에 가까울수록 큰 인장성분을 가지고 있으며 폭방향응력성분은 전체 폭에 걸쳐 인장응력을 유지하고 있다.

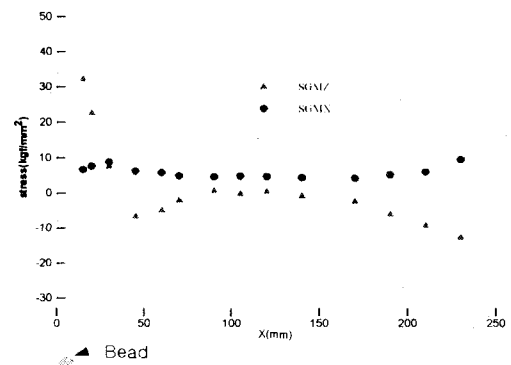


Fig.2 Welding residual stresses of specimen by experiment

3. 용접응력의 유한요소해석

본 장에서는 프리플렉스거더의 용접시 발생하는 용접응력, 탄성 및 소성 변형율, 소성일 및 상당응력등을 탄성역과 소성역에 걸쳐 재료비선형성 및 온도증감에 따른 기계적성질의 변화를 고려하여 비정상 및 준정상상태에서의 증분시간

별 온도출력값을 입력데이터로 하여 열탄소성해석을 통하여 구하고, 각각의 결과를 실험에 의해 측정한 잔류응력값과 비교한다. 해석에 사용한 유한요소해석모델과 기하학적 크기는 Fig.3 와 같으며 해석시 입력된 경계조건은 Fig.4와 같다.

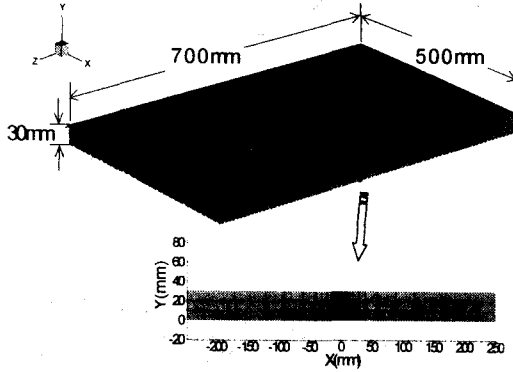


Fig.3 Mesh division for three and two dimensional finite element analysis

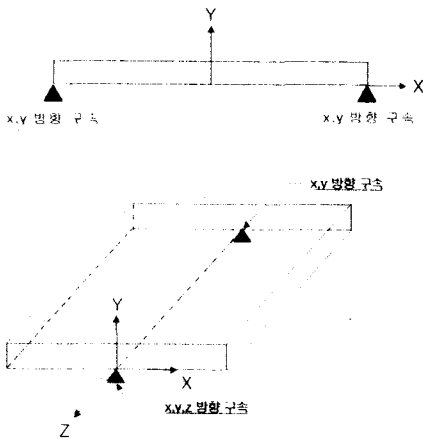


Fig.4 Boundary condition of three and two dimensional finite element analysis

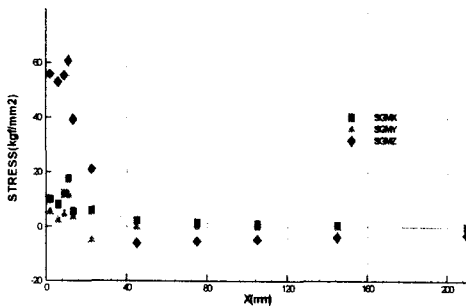


Fig.5 Distribution of welding residual stresses along width of model (3D analysis)

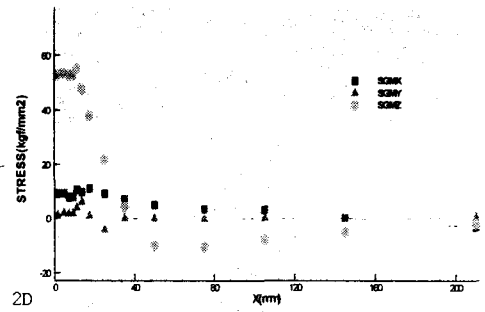


Fig.6 Distribution of welding residual stresses along width of model (2D analysis)

해석에서의 결과는 과도응력 및 최종 용접잔류응력분포가 Fig.5 및 Fig.6에서 보듯이 3차원과 2차원해석에서의 결과가 일치하고 있으며 실험 결과와 비교하였을 때 Fig.6과 같이 역시 세가지방법에 의한 결과값이 동일하였다. 따라서 다음 장에서는 순간열원해석에 의한 프리플렉스거더의 용접에 의해 발생하는 역학적 제 특성을 해석하여 분석한다.

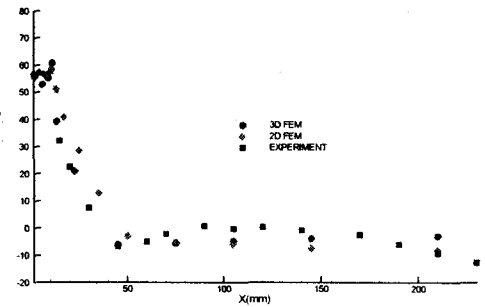


Fig.7 Longitudinal welding residual stresses(σ_z)

4. Preflex beam의 유한요소해석

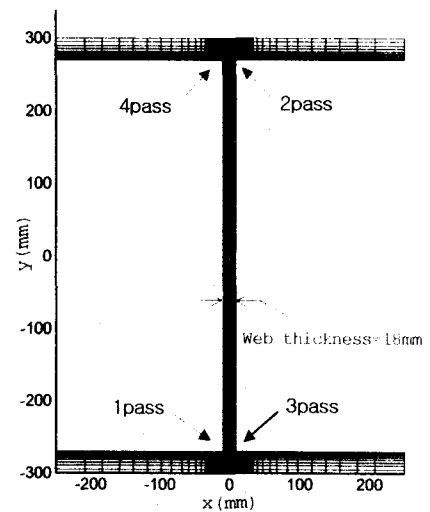
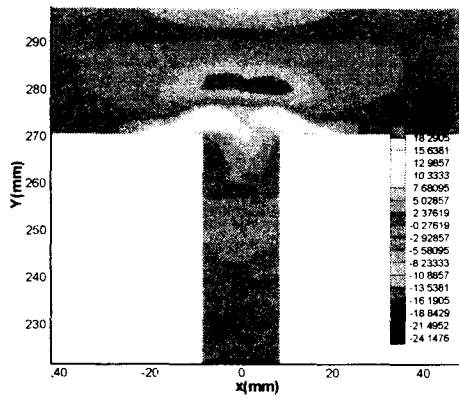
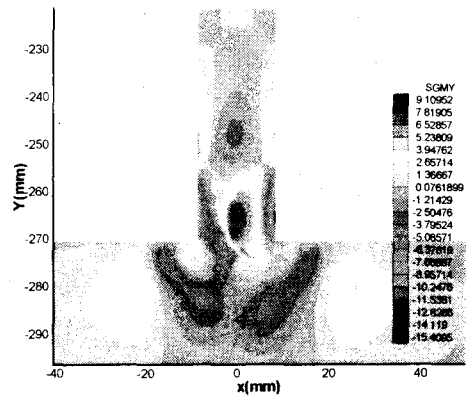


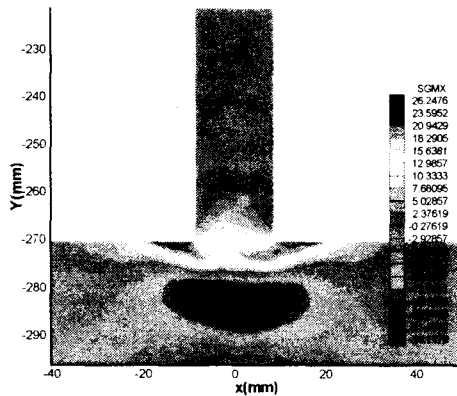
Fig.8 Finite element mesh of preflex girder



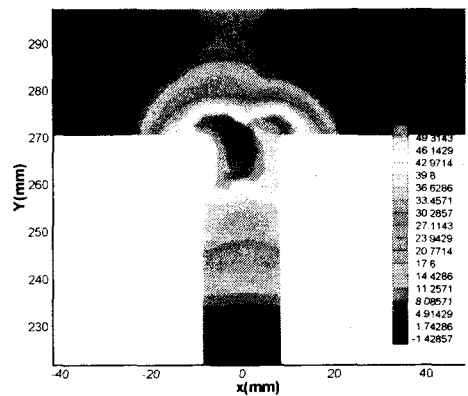
(a)



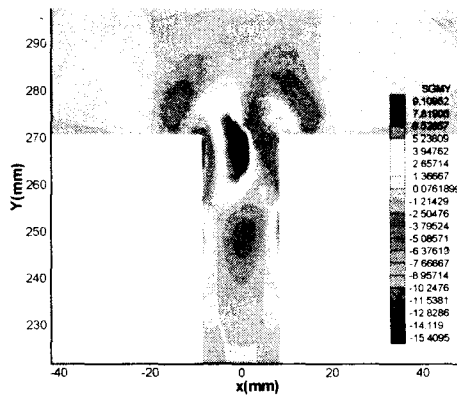
(d)



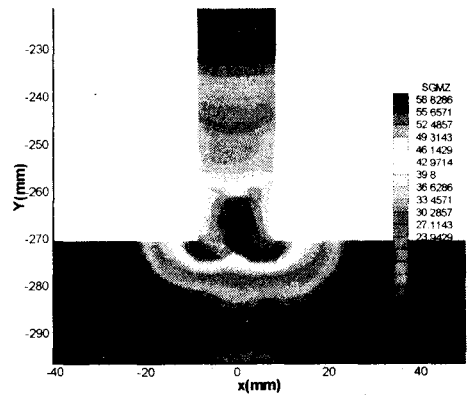
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig.9 Isocontours of welding residual stresses

잔류응력해석 모델은 Fig.8과 같으며 Fig.9는 용접잔류응력 분포를 성분별로 출력한 그림으로 압축이나 인장중에 어느 한 성분이 우세한 곳에서는 인접한 곳에서 그와 상응하게 반대성분의 응력성분이 우세하게 발달되어 균형을 이루는 모습을 볼 수가 있으며, 공통적으로 선행 패스의 잔류

응력값이 후행패스의 발열에 의한 영향을 받아 약하지만 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉 후행패스에 의한 잔류응력 분포가 약간 더 우세하나 지배적이지는 않으며 선행과 후행 패스시의 잔류응력최대값에는 증감이 없다.

Fig.10은 프리플렉스 거더의 하부 플렌지에서 웨브쪽 표면으로 0.5mm깊이, 즉 그림에서 하부 플렌지의 상측 표면에서 바닥쪽으로 0.5mm아래면의 용접잔류응력분포를 도시한 것으로 인장성분이 중앙부에서 각각 좌우로 30mm에 걸쳐 비교적 넓게 분포하고 있으며 그 크기는 길이방향 잔류응력성분(SGMZ로 표기)이 제일 우세하고 그다음이 폭방향 잔류응력성분(SGMX)이었으며 두께방향의 잔류응력성분인 SGMY는 비드근방에서 약간의 변동이 있을뿐 그 크기는 매우 작았다. 이러한 결과는 각방향별 시편의 크기와 연관이 있으며 부재의 치수가 큰 쪽, 즉 구속도가 클수록 용접후에 온도하강에 따라 강성을 회복하면서 발생하는 잔류응력이 증가하게 되는 것으로 사료된다. 즉 역학적구속력이 제일 작은 두께방향의 잔류응력은 거더의 웨브부에서 발생되고 마지막 패스 쪽에 인장응력이 잔존하게 된다.

Fig.11은 프리플렉스 거더의 하부 플렌지의 상표면에서 1.5mm 아래면의 폭에 걸친 용접잔류응력분포도이며 웨브로 인한 영향이 플렌지쪽으로 갈수록 적어지므로 Fig.10에 비해 웨브쪽 응력값의 요철부분이 완만해지고 있다.

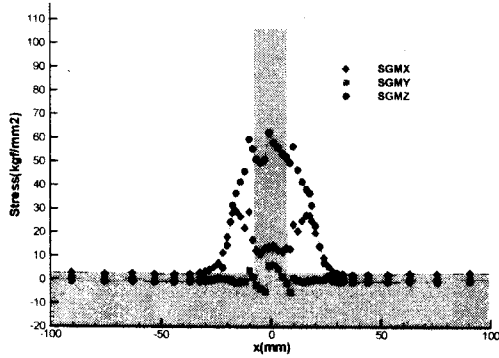


Fig.10 Welding residual stress along top surface of bottom flange

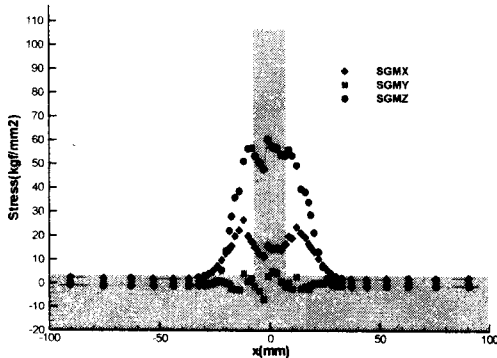


Fig.11 Welding residual stress of 0.5mm deep surface of bottom flange

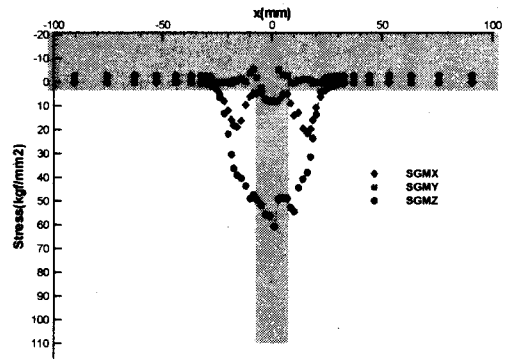


Fig.12 Welding residual stress along top surface of upper flange

Fig.12는 상부플렌지표면에서 0.5mm깊이의 폭방향 면에 걸친 용접잔류응력분포도이며 Fig.10과 동일한 응력분포를 보여주고있으나 역시 후행패스쪽으로 인장성분이 다소 이동하여 있음을 알 수 있다.

Fig.13은 웨브의 왼쪽면에서 안쪽에서 0.5mm 깊이면에 대하여 상하에 걸쳐서 잔류응력을 도시한 것으로 열이력을 급격하게 받은 비드 부근에서는 인장잔류응력이 국부적으로 발생하여 있음을 알 수 있으며 그외의 부근에서는 약한 압축응력이 전체적으로 발생하여 있음을 알 수 있다.

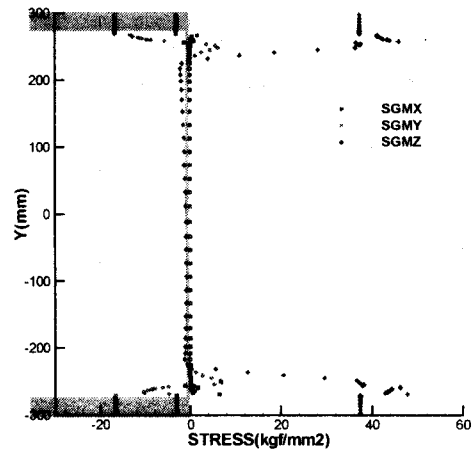


Fig.13 Distribution of Welding residual stresses along left wdb surface

Fig.14과 Fig.15는 잔류응력성분 중에 가장 크게 발생하는 길이방향응력성분에 대해서 용접입열에 따른 발열과 냉각에 따른 온도변화에 따라 부재내에서 응력이 어떻게 발생하는지를 추적한 응력이력곡선이다. 웨브의 중심면을 기준으로 좌우로 각각 한 지점에서의 응력값을 도시하였다. 먼저 Fig.14의 W.M(용착금속, weld metal)에서 1패스재의 입열에 의해 그림에서 ①부근의 용융온도 이상까지 발열되면 재료는 강성을 유지하지 못하므로 응력상태는 0이 된다. 입열이 끝나고 냉각되면서 재료는 강성을 회복하고 ②와 같이 점차 인장의 파도 용접응력이 성장하게 된다. 더 이상의 입열이

없다면 점선을 따라 최종잔류응력값에 도달하겠지만 3패스재의 입열의 영향으로 다시 ③과 같이 온도가 재상승하고 응력도 다시 압축으로 성장하였다가 냉각과 함께 최종 잔류응력값에 도달한다.

Fig.15에서 B.M(모재, base metal)라고 한 부분은 1패스재 입열에 의해 용융온도 이하까지(그림에서 500℃이하) 발열되면서 압축응력이 발생하게 되고 입열이 끝나고 냉각되면서 다시 인장의 과도 용접응력이 발달하지만 점선을 따르지 못하고 다시 3패스재의 입열에 의해 용융온도 이상으로 발열되고 냉각되면서 최종적으로 인장의 용접잔류응력값에 도달하는 것을 볼 수 있다.

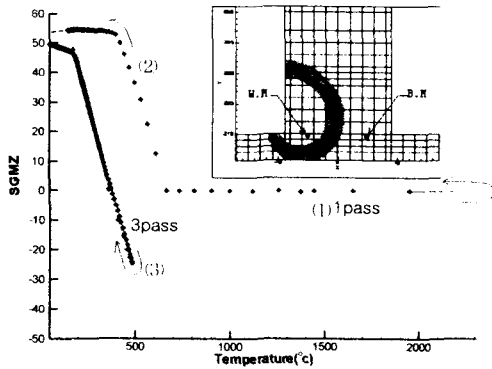


Fig.14 Stress history graph of weld metal

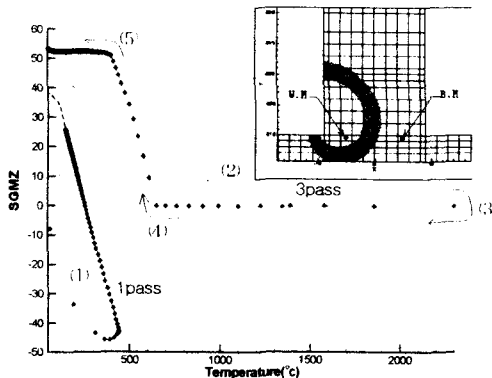


Fig.15 Stress history graph of base metal

5 결론

이상의 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 열이력이 준정상역을 경험하는 구역에 대한 2차원과 3차원의 열탄소성유한요소해석결과는 역학적으로 동일한 결과를 보여주었으며 용접잔류응력을 실측하여 비교한 결과에서도 일치성을 보였다.
- 2) 이차원 유한요소해석에 의해 프리플렉스거더의 용접시의 역학적거동에 대한 해석을 효율적으로 할 수 있었으며 최종 잔류응력분포를 구할 수 있었다.

후기

본 연구는 2002년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. 房洪瑞, "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解析", 大韓造船學會誌, 第27卷 第4號, pp.44~50, 1990.
2. 방한서, "후판용접부의 역학적 특성". 대한용접학회지, Vol.10, No.4, pp.250~258, 1992. 27卷 第4號, pp.44~50, 1990.
3. 房洪瑞, 金裕哲, "有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元非定常熱傳導解析", 大韓熔接學會誌, 9-2(1991), 37-43
4. 佐藤, 向井, 豊田, "溶接工學", 理工學社(第1版), 1979
5. Robert Englekirk, "Steel structures", John Wiley & sovs, Inc., 1994
6. 尖川元基 外1人, "有限要素法による熱應力・クリーフ・熱傳導解析", (株)サイエンス, 1985.