

PREFLEX BEAM 제작시의 용접부 역학적 특성에 관한 연구

방한서* · 주성민** · 안해영***

*조선대학교 항공·조선공학부

**조선대학교 선박해양공학과 대학원

***(주)삼현 P.F

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

HAN-SUR BANG*, SUNG-MIN JOO**, AND HAE-YOUNG AN**

*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

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

KEY WORDS : Preflex Beam 프리플렉스빔, Finite Element Method 유한요소법, Welding Residual Stress 용접잔류응력, Pre-compressive Stress 초기압축응력

ABSTRACT : Since the preflex beam is fabricated through welding, the pre-compressive stresses that should occur over the concrete pier are diminished by the welding residual stresses. Therefore welding residual stresses must be relieved during the fabrication. Therefore, the analysis and examination of the accurate welding residual stress distribution characteristics are necessary. In this study, accurate distribution of welding residual stress of the preflex beam is analyzed by the finite element method, using 2 dimensional and 3 dimensional elements. Further, the thermo-mechanical behavior of the preflex beam is also studied. After the finite element analysis, real distribution of welding residual stress is measured using the sectioning method, and then is compared with the simulation results. The distribution of welding residual stress by finite analysis agreed well with the experimental results.

1. 서 론

콘크리트재와 강재의 합성부재에 있어서 압축에는 강하지만 인장에 저항하는 힘이 약한 콘크리트재의 단점을 보완하기 위하여, 강재에 탄성한도내의 굽힘을 가하고(preflexion) 하부플렌지에 콘크리트를 타설하여 양생한 후, 릴리즈함에 따라 콘크리트가 초기 압축응력을 지니게 함으로써, 취성재료인 콘크리트가 인장응력에 견딜 수 있도록 하는 부재를 프리플렉스합성보(이하 프리플렉스빔이라 함.)라고 한다. 즉 콘크리트 케이싱부에 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 있는 등의 좋은 장점을 지닌 교량을 제작할 수 있으나 사용중에 예기치 못한 균열이 발생하는 등의 문제가 보고되고 있다.

프리플렉스 공법에서 가장 중요한 것은 콘크리트 케이싱부에 압축의 초기 스트레스를 정확히 유발시키는 것이나 초기 프리플렉스거더의 제작공정에서 발생하는 용접에 의한 잔류응력의 영향으로 압축응력이 거더내에서 불균일하게 적용되고 상당부분 소실되기 때문에 외부하중을 충분히 상쇄시키지 못하여 장기적인 사용환경에서 제품이 비선형적으로 거동하고 이에 예기치 못한 균열발생 등으로 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 직사각형의 두께 30mm의 SM490A이며 용접은 모재중심부에 모재의 길이방향을 따라서 Submerged Arc Welding(이하 SAW)을 자동으로 1회 bead-on-plate용접을 하였다. SAW용접시 사용된 플럭스와 와이어의 품명은 Table 1과 같으며 그 화학조성은 Table 2와 같다.

제1저자 방한서 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375

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

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 Mechanical properties

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	—

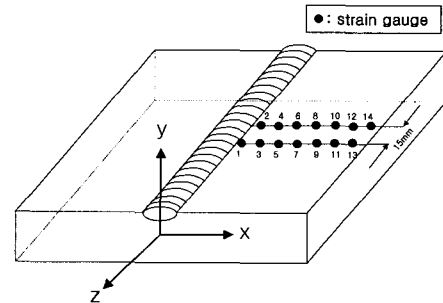
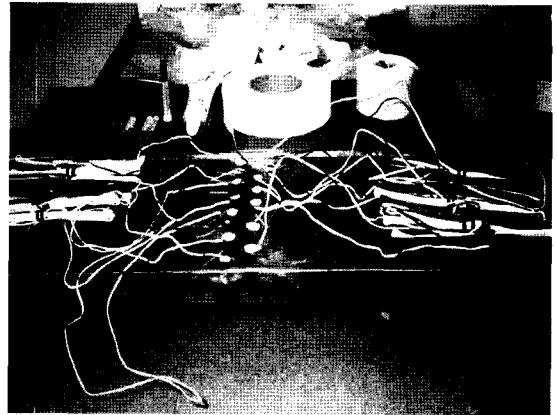
Table 4 Welding Conditions

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

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. 스트레인 측정을 위한 게이지의 부착위치는 용접비드의 중앙선으로부터 폭 방향으로 14개 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 실험하였으며, Fig. 1과 같이 스트레인 게이지의 정확한 부착 위치는 용접비드 중심으로부터 폭방향으로 15mm, 20mm, 30mm, 45mm, 60mm, 70mm, 90mm, 105mm, 120mm, 140mm, 170mm, 190mm, 210mm, 230mm지점이다.

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. 2와 같다. 길이방향 응력성분은 용접비드에 가까울수록 큰 인장성분을 가지고 있으며 폭방향 응력성분은 전체 폭에 걸쳐 인장응력을 유지하고 있다.



(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 Location of strain gauge

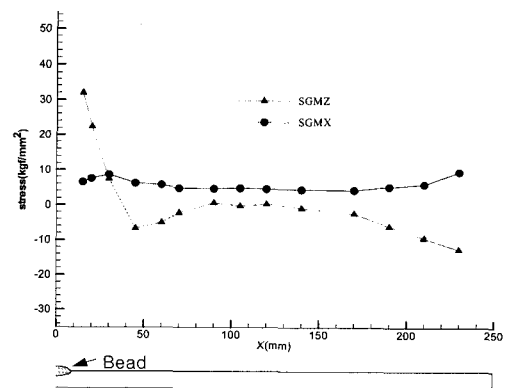


Fig. 2 Welding residual stresses of specimen by experiment

3. 용접응력의 유한요소해석

본 장에서는 프리플렉스 거더의 용접시 발생하는 용접응력, 탄성 및 소성 변형율, 소성일 및 상당응력 등을 탄성역과 소성역에 걸쳐 재료비선형성 및 온도증가에 따른 기계적성질의 변화를 고려하여 비정상 및 준정상상태에서의 증분시간별 온도 출력값을 입력데이터로 하여 열탄소성해석을 통하여 구하고, 각각의 결과를 실험에 의해 계측한 잔류응력값과 비교한다. 유한요소해석 프로그램은 상용의 것이 아닌 자체제작한 해석틀에 의한 것이며 정식화과정 및 개발프로그램의 검증과 관련된 논문들의 일부를 참고문헌에 소개하였다. 사용한 유한요소해석 모델과 기하학적 크기는 Fig. 3과 같으며 해석시 입력된 경계조건은 Fig. 4와 같다.

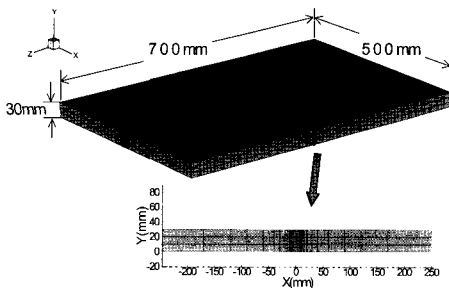


Fig. 3 Mesh division for three and two dimensional finite element analysis

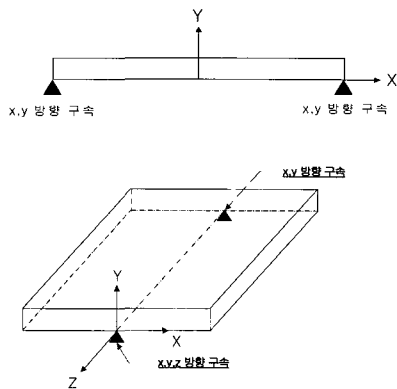


Fig. 4 Boundary condition of three and two dimensional finite element analysis

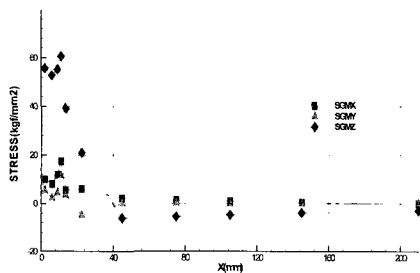


Fig. 5 Distribution of welding residual stresses along width of model (3D analysis)

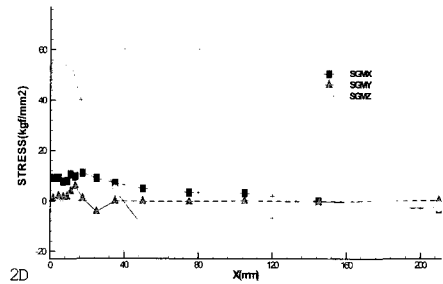


Fig. 6 Distribution of welding residual stresses along width of model (2D analysis)

해석에서의 결과는 과도응력 및 최종 용접잔류응력분포가 Fig. 5 및 Fig. 6에서 보듯이 3차원과 2차원해석에서 유사한 결과를 보이고 있으며 실험 결과와 비교하였을 때 Fig. 6과 같이 세 가지 방법에 의한 결과값이 비교적 잘 일치하였다. 따라서 다음장에서는 순간열원해석에 의한 프리플렉스 거더의 용접에 의해 발생하는 역학적 제특성을 해석하여 분석한다.

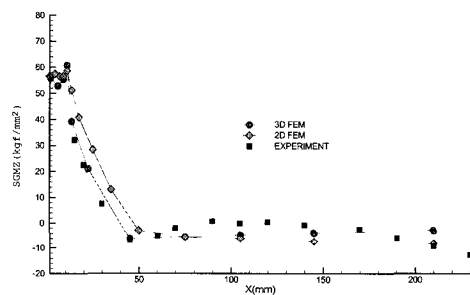


Fig. 7 Longitudinal welding residual stresses(σ_z)

4. Preflex Beam의 유한요소해석

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 후행패스시의 발열에 의한 영향을 받아 약하지만 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉 후행패스에 의한 잔류응력분포가 약간 더 우세하나 지배적이지는 않으며 선행과 후행패스시의 잔류응력의 최대값에는 증감이 없다.

값이 후행패스시의 발열에 의한 영향을 받아 약하지만 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉 후행패스에 의한 잔류응력분포가 약간 더 우세하나 지배적이지는 않으며 선행과 후행패스시의 잔류응력의 최대값에는 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

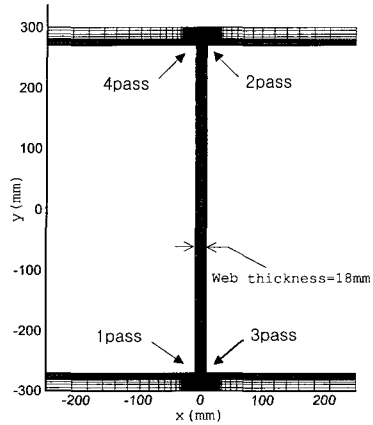
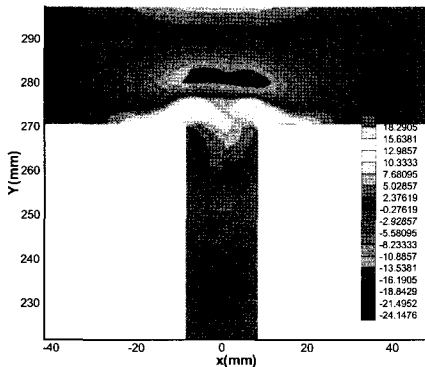
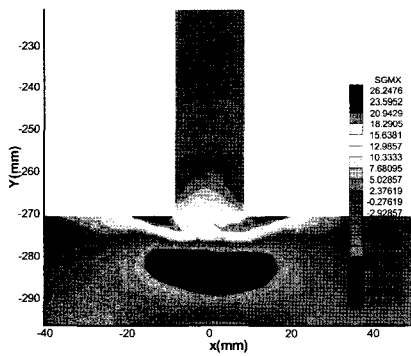


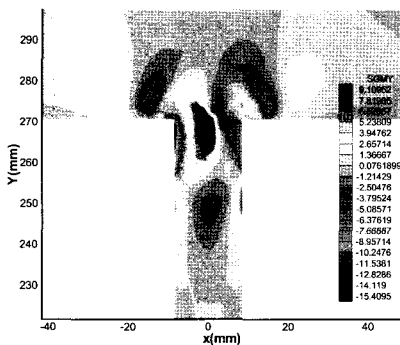
Fig. 8 Finite element mesh of preflex girder



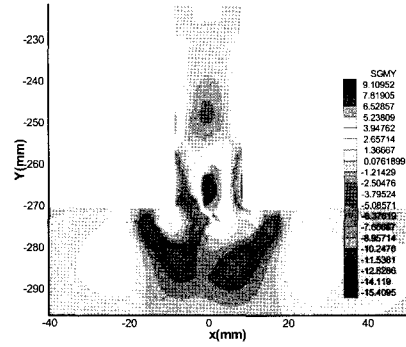
(a)



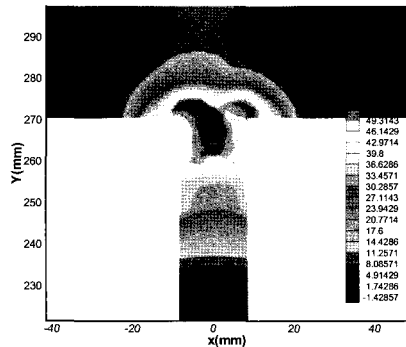
(b)



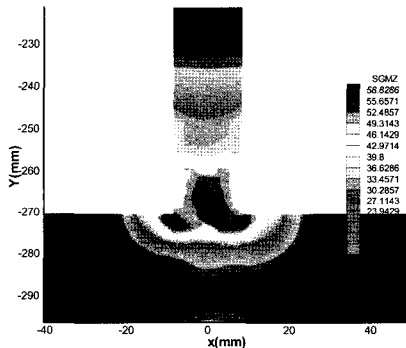
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 9 Isocontours of welding residual stresses (a) Welding residual stress(σ_x) of upper flange, (b) Welding residual stress(σ_x) of lower flange, (c) Welding residual stress(σ_y) of upper flange, (d) Welding residual stress(σ_y) of lower flange, (e) Welding residual stress(σ_z) of upper flange, (f) Welding residual stress(σ_z) of lower flange

(SGMZ로 표기)이 제일 우세하고 그다음이 폭방향 잔류응력 성분(SGMX)이었으며 두께방향의 잔류응력 성분인 SGMZ는 비드 근방에서 약간의 변동이 있을뿐 그 크기는 매우 작았다. 이러한 결과는 각방향별 시험의 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 잔류응력

은 거더의 웨브부부에서 발생되고 마지막 패스쪽에 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.

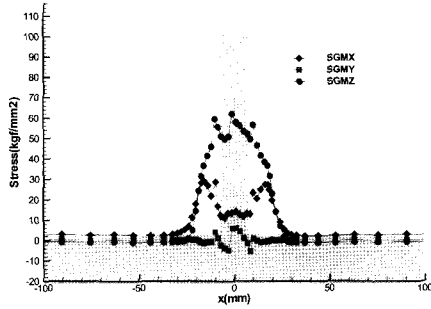


Fig.10 Welding residual stress along top surface of bottom flange

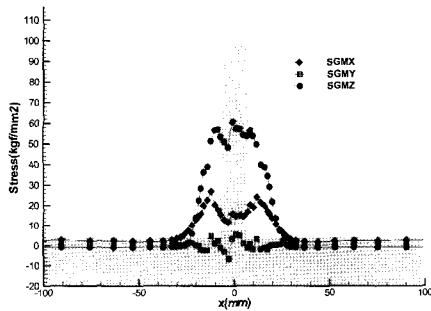


Fig.11 Welding residual stress of 0.5mm deep surface of bottom flange

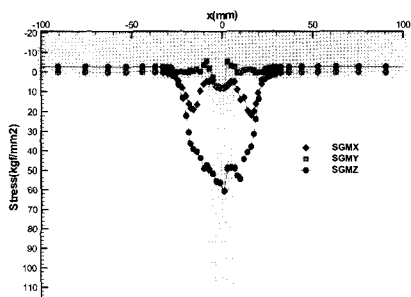


Fig.12 Welding residual stress along top surface of upper flange

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

Fig. 13은 웨브의 왼쪽면에서 안쪽에서 0.5mm 깊이면에 대하여 상하에 걸쳐서 잔류응력을 도시한 것으로 열이력을 급격

하게 받은 비드 부근에서는 인장잔류응력이 국부적으로 발생하여 있음을 알 수 있으며 그외의 부근에서는 약한 압축응력이 전체적으로 발생하여 있음을 알 수 있다.

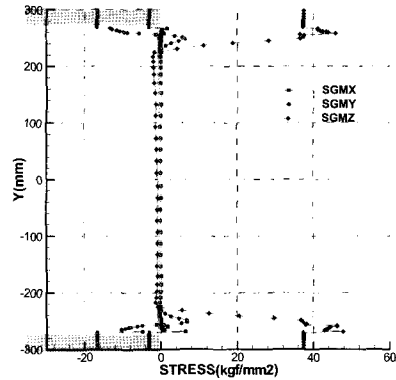


Fig.13 Distribution of Welding residual stresses along left wdb surface

Fig. 14과 Fig. 15는 잔류응력성분 중에 가장 크게 발생하는 길이방향 응력성분에 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 1패스째의 입열에 의해 그림에서 ①부근의 용융온도 이상까지 발열되면 재료는 강성을 유지하지 못하므로 응력상태는 0이 된다. 입열이 끝나고 냉각되면서 재료는 강성을 회복하고 ②와 같이 점차 인장의 과도 용접응력이 성장하게 된다. 더 이상의 입열이 없다면 점선을 따라 최종잔류응력값에 도달하겠지만 3패스째의 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 1패스째 입열에 의해 용융온도 이하까지(그림에서 500℃이하) 발열되면서 압축응력이 발생하게 되고 입열이 끝나고 냉각되면서 다시 인장의 과도 용접응력이 발달하지만 점선을 따르지 못하고 다시 3패스째의 입열에 의해 용융온도 이상으로 발열되고 냉각되면서 최종적으로 인장의 용접잔류응력값에 도달하는 것을 볼 수 있다.

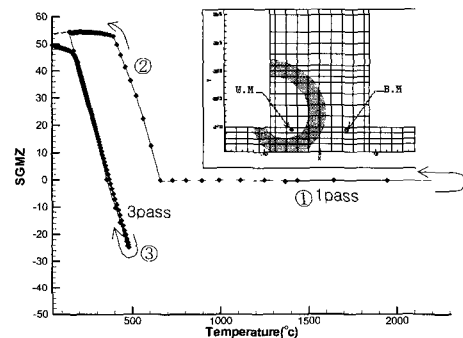


Fig. 14 Stress history of weld metal

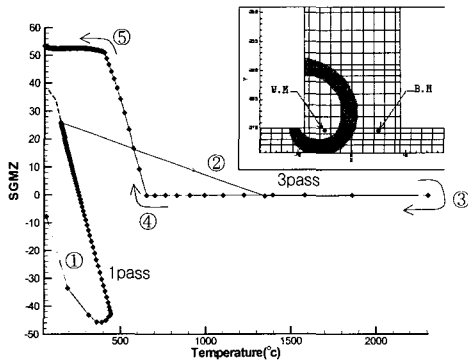


Fig. 15 Stress history of base metal

5. Preflex beam 재하실험

재하실험을 위해 Fig. 16과 같이 1,000톤용량의 UTM시험기를 이용하여 프리플렉션 공정을 재현하였다. 하중속도 5tonf/min으로 프리플렉스빔에 모재항복강도의 80%의 크기로 하중을 가하고 릴리즈 후에 잔류응력을 계측하였다. 시험체의 중심부와 재하지점에 설치한 wire type의 LVDT를 이용하여 하중시험 전과정에 따른 시험체의 변위량을 Fig. 17과 같이 구하였다.

하중크기가 모재항복강도의 80% 크기에도 불구하고 릴리즈 후에 시험체는 완전복원되지 못하고 영구변위를 갖는다. 이것은 시험체 전체에 걸쳐 잔존하고 있는 용접에 의한 잔류응력이 원인이며, 릴리즈후에 시험체내에 최초 존재하고 있던 용접잔류응력은 완화될 것으로 예상된다.

재하후에 재배치된 용접잔류응력분포를 알아보기 위하여 재하실험후에 시편에 부착된 스트레인 게이지 주위를 절단하여 절단전후의 게이지값의 차로부터 용접잔류응력분포를 계측하였다. 절단과정에서 접촉식온도계를 이용하여 추가적인 온도상승이 없도록 주의하였으며 Fig. 18에 upper flange와 lower flange에서의 결과를 도시하였다.

그래프에서 볼 수 있듯이 용접잔류응력이 상당량 완화된 것을 확인할 수 있다. 이것은 부하량이 비록 모재항복강도 미만이나 내재된 용접잔류응력과 중첩되어 결과적으로 시험체가 소성거동을 하고 릴리즈 후에 내부 응력상태가 소실되는 기계적응력완화기구에 의한 것이다.



Fig. 16 Preflexion process of specimen

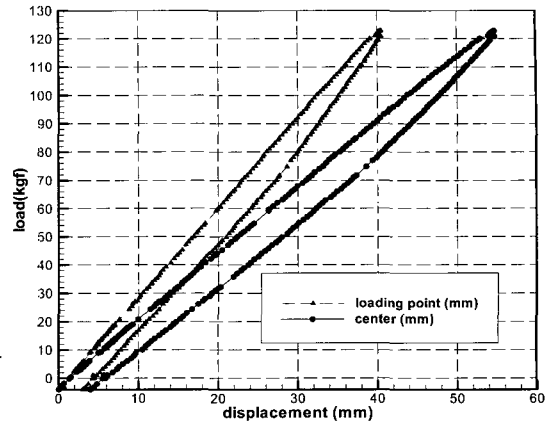


Fig. 17 Load-displacement

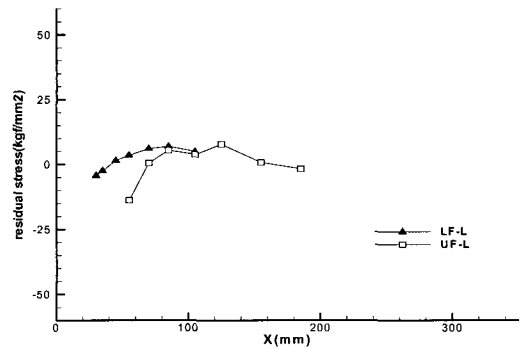


Fig. 18 Distribution of welding residual stress after preflexion test

6. 결론

이상의 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 열이력이 준정상역을 경험하는 구역에 대한 2차원 순간 열원에 의한 해석결과와 3차원 이동열원에 대한 열탄소성 유한요소해석결과는 비교적 잘 일치하였으며, 용접잔류응력을 실측하여 비교한 실험결과 역시 유사한 결과를 나타내었다.
- (2) 이차원 유한요소해석에 의해 프리플렉스 거더의 용접시의 역학적 거동에 대한 해석을 하여 용접과도응력 및 최종 잔류응력분포를 정도 높게 구할 수 있었다.
- (3) 실물시험체에 대하여 재하실험을 한 후, 재배치된 최종 용접잔류응력을 계측하였으며 잔류응력의 상당량이 경감된 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

방한서 (1994). "평판용접에 관한 평면변형 열탄소성 해석", 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp 33-40.

- 방한서 (1997). "점열탄소성 이론에 의한 용접후열처리에 대한 수치해석", 한국해양공학회지, 제11권, 제1호, pp 113-123.
- 방한서 (1990). "유한요소법에 의한 박판용접의 2차원비정상열 전도해석", 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.
- Ueda, Y., Kim, Y.C., Garatani, K., Yamakita, T. and Bang, H.S (1987). "Distributions of Three-dimensional Welding Residual Stresses and Plastic Strains and Their Production Mechanism", Trans. of JWRI, Vol 15, No 2, pp 187-196
- Ueda, Y. and Yamakawa, T. (1972). "Thermal Stress Analysis of Metals with Temperature Dependent Mechanical Properties", Proc Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Vol 3, pp 10-20

2003년 6월 5일 원고 접수

2003년 11월 11일 최종 수정본 채택