

고주파가열에 의한 Built-up재의 용접종굽힘 변형방지

박정웅* · 장경호** · 이해우*** · 안규백****

*조선대학교 토목공학과

**중앙대학교 건설환경공학과

***한진중공업(주),

****삼성중공업(주)

The Prevention of The Longitudinal Deformation due to Fillet Welding by using Induction Heating

Jeong-Ung Park*, Kyong-Ho Chang**, Hae-Woo Lee*** and Gyu-Baek An****

*Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chungang University, Seoul 156-756, Korea

***Hanjin Heavy Industries, HHIC Technology Institute, Youngdo-gu, Busan 606-796, Korea

****Welding Research Part of Samsung Heavy Industries, Koje-city 656-710, Korea

Abstract

Longitudinal deformation is produced by fillet welding during the fabrication of built-up beams and decreases productivity and quality because it needs an extra correcting process. The deformation is caused by welding moment, which is the value multiplied the welding shrinking force by the distance from the neutral axis. This welding moment can be offset by generating a moment in the same magnitude and in an opposite direction by induction heating. The location and quantity of the induction heating are decided via experiments and simple equations. This study, first, clarifies the creation mechanism of the longitudinal deformation with FEM analysis. Then, we presents the preventive method of this deformation by induction heating basing on the mechanism and verifies its validity through analysis and experiments.

* Corresponding author : jupark@mail.chosun.ac.kr

(Received January 7, 2005)

Key Words : Longitudinal deformation, Built-Up beam, Induction heating, Welding moment

1. 서 론

선체의 종강도부재로서 사용되는 built-up재는 조선소마다 다르나 연간 VLCC 4척을 건조하는 경우 약 1,050 개/월 필요하다. 이러한 built-up재는 일반적으로 플랜지 위에 웨브를 올려놓고 필렛용접하여 제작된다. Built-up재는 용접길이가 5~22m로 길고 용접부가 부재의 중립축으로부터 떨어져 있기 때문에 용접 후에는 종굽힘변형이 필연적으로 발생한다¹⁾. 따라서 현장에서는 용접 후 웨브에 삼각가열을 부분적으로 실시하

여 교정하는 방법, 프레스를 이용한 소성변형에 의한 교정방법, 또는 용접전 하중을 주어 역변형을 일으켜 용접후 용접부가 완전히 냉각하면 역변형을 제거하므로서 변형을 최소화하는 방법 등을 사용하여 종굽힘변형을 방지하거나 교정하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 제작공정과는 별도로 용접변형을 수정하기 위한 추가공정이 필요하고 역변형법의 경우 역변형을 발생시키기 위한 하중을 해제하는데 충분한 시간이 필요하여 생산성 저하의 원인이 되고 있다.

종굽힘변형량을 예측 및 교정하고 이를 방지하기 위한 연구의 필요성이 제기되어 Sasayama²⁾를 시작으로

일련의 연구들이 진행되었다. Sasayama²⁾는 단순보 이론을 이용하여 용접각장에 따른 종굽힘변형량을 예측하였다. Okerblom³⁾은 열탄소성 해석을 이용하여 종굽힘 변형량을 예측하는 간이식을 제시하였고 실험을 통해 그 신뢰성을 확인하였다. Tsuji⁴⁾는 열탄소성해석을 통해 띠판(strip plate)의 단부를 용접했을 때 발생하는 변형량을 구하고 이를 실험에 의해 얻어진 변형량과 비교하여 그 유용성을 확인하였다. Masubuchi⁵⁾는 T형 알루미늄 부재에 대해 1차원 열탄소성해석을 수행하여 최종변형을 구하고 이를 실험과 비교하였다. Akoi⁶⁾는 Tsuji⁴⁾의 연구결과를 토대로 해석과 실험을 통해 변형에 영향을 주는 인자를 정리하고 간이식을 제시하였다. Jang^{7,8)}은 간이 열탄소성기법을 이용하여 용접에 의한 종굽힘변형을 예측하고 종굽힘변형의 교정에 필요한 삼각가열량에 대한 추정식을 제안하였다. 그러나 이와 같이 기존 연구에서는 주로 종굽힘 변형량을 예측하는데 중점을 두었으며, Jang^{7,8)}에 의해 수행된 연구도 종굽힘변형을 교정하기 위한 별도의 곡직가열 작업공정을 다루었다.

본 연구에서는 Built-Up재 제작시 필렛용접에 의한 종굽힘변형의 생성기구로부터 종굽힘변형을 유발시키는 용접에 의한 굽힘모멘트를 웹 플레이트를 고주파로 가열할 때 발생하는 등가의 역방향 굽힘모멘트를 일으켜 상쇄시킴으로서 종굽힘변형을 방지하는 방법을 제시하였다. 또한 제시한 방법에 대해 유한요소법을 이용한 3차원 열탄소성해석을 이용하여 그 타당성을 검토하고 이를 실제 부재에 적용함으로써 그 신뢰성을 확인하였다.

2. 열탄소성해석을 통한 종굽힘변형 특성 및 방지대책

자체개발한 FEM을 이용한 3차원 열탄소성해석⁹⁾을 통해 Built-Up재 제작시 필렛용접에 의해 발생하는 과도변형 및 잔류 종굽힘변형의 발생 메카니즘을 규명하고, 해석결과를 고찰하여 종굽힘변형의 발생원인과 방지대책에 대해 알아 보았다.

2.1 해석모델 및 치수

Fig. 1은 해석모델의 형상을 보여주고 있으며, 해석은 부재의 대칭성을 고려하여 1/4모델을 사용하였다. 해석시 경계조건은 대칭조건과 강제운동을 일으키지 않으면서 용접에 의해 변형이 자유롭게 발생하도록 설정했다. 해석요소는 3차원 아이소 파라메트릭 Solid요소를 사용하였고 3차원 열전도해석을 수행하여 용접시 발생하는 온도분포를 구하여 이를 절점하중으로 하는 3차원 열탄소성해석을 수행하여 용접변형을 해석하였다. 또한 해석에서는 재료의 물리적정수 및 기계적성질의 온도의존성을 고려하였다.

Fig. 2는 built-up재의 단면으로 중립축(N.A)로부터 용접열원(Qw)까지의 거리(Nw), 중립축으로부터 고주파열원(Qi)까지의 거리(Ni)를 보여 주고 있다. Table 1은 해석에 사용한 부재치수 및 고주파가열 조건을 보여 주고 있다.

필렛용접은 1-Torch 2-Wire 서브머지드 아크용접, 와이어 직경은 2.0mm이고 양면 동시용접을 실시하였

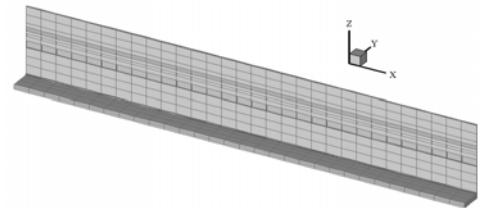


Fig. 1 Analysis model

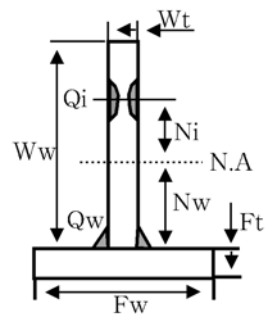


Fig. 2 Cross-section of built-Up beam

Table 1 Specimen dimension and analysis conditions

Model name	Flange plate(mm)		Web plate(mm)		Length L(mm)	Heat input of Induc. (cal/mm ³ ·sec)	Ni (mm)	Nw (mm)
	Fw	Ft	Ww	Wt				
A1	150	18	250	11.5	3,000	-	-	-
A2						0.640	90	60
A3						0.932	90	60
A4						0.448	90	60
A5		22	300	11.5	3,000	0.640	106.5	71

다. 용접조건은 전류 850(A), 전압 33(V), 속도 1004 (mm/min)이며, 각장은 5mm이다. 해석시 용접입열량은 1,676(J/mm)이며 효율(η)을 0.95 로 하였다.

2.2 종급힘변형 원인 및 방지대책

Fig. 3은 모델 A1에 대한 열탄소성해석 결과로부터 최종 변형형상을 100 배로 확대시켜 보여 주고 있다. Fig. 4은 웹 플레이트의 윗쪽 끝단에서의 과도 및 잔류 종급힘변형을 보여 주고 있다. 결과에 의하면 용접 중에는 용접부가 팽창하여 아래방향으로 볼록하게 휘어지고, 용접완료 후 용접부의 수축으로 인해 위로 볼록한 종급힘변형이 발생한다. 현재의 모델의 크기에서는 중앙부에서 최대 3.5mm가 발생하였으나 실험에 의하면 built-up재의 길이 20,000mm인 경우 100mm 정도의 변형이 발생된다.

Built-up재 용접시 발생하는 종급힘변형은 Fig. 5와 같이 용접부가 부재단면의 중립축의 위치보다 밑으로 N_w 만큼 떨어져 있기 때문에 용접에 의한 굽힘모멘트 (M_w)가 발생하여 종급힘변형이 위쪽으로 볼록한 형태

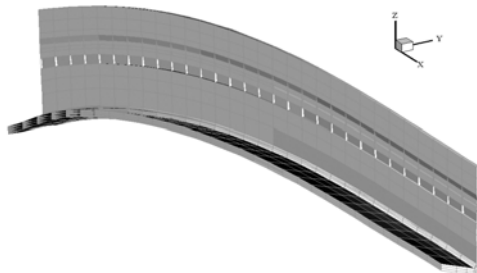


Fig. 3 Shape of longitudinal deformation

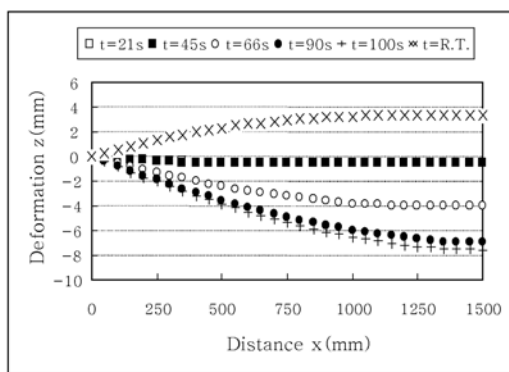


Fig. 4 Longitudinal deformation by welding(A1)

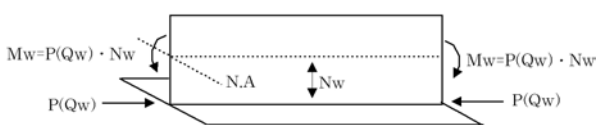


Fig. 5 Welding moment for a longitudinal deformation

를 갖는다. 이 때 발생하는 굽힘모멘트(M_w)는 용접부의 수축력($P(Q_w)$)과 부재단면의 중립축으로부터 수축력의 작용점까지의 거리(N_w)의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 종급힘변형의 크기는 수축력이 클수록, 중립축으로부터 열원까지의 거리가 멀수록 크게 발생한다.

이와 같은 용접모멘트(M_w)에 의해 발생하는 종급힘 변형은 근사적으로 간단한 역학적관계로부터 부재단면의 중립축($N.A$)을 기준으로 반대편에 크기가 같고 방향이 반대인 모멘트($M_i = P(Q_i) \times N_i$)를 발생시켜 두 모멘트를 상쇄시킴으로서 방지할 수 있다. 실구조물 제작에 있어서는 부재가 결정되면 단면의 중립축, 용접 열원의 위치 및 입열량이 결정됨으로 이때 용접에 의해 생기는 모멘트(M_w)를 구할 수 있다. 여기에 크기가 같고 방향이 반대인 모멘트를 고주파 열원의 입열량과 중립축으로부터 고주파열원까지의 거리를 제어하여 생성 시킴으로서 용접변형을 방지할 수 있다. 고주파열원의 입열량이 일정하다고 가정하면 중립축으로부터 고주파 열원까지의 거리를 $N_i \approx Q_w \cdot N_w / Q_i$ 로 부터 구하여 그 위치에 고주파가열함으로써 종급힘변형을 방지할 수 있다.

3. 고주파가열에 의한 종급힘변형 특성해석

2절에서 제시한 종급힘변형 방지법에 대해 고주파가열 조건에 따른 영향을 열탄소성해석을 통해 검증하였다. 해석은 용접에 의한 종급힘변형을 방지하기 위해 웹에 고주파열원의 세기를 변화시켜 종급힘변형에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과를 부재치수가 다른 모델 A5 에 적용하여 타당성을 검증하였다.

3.1 해석 모델

해석은 Table 1에 보여 주고 있는 모델 A2~A4를 대상으로 수행하였으며, 용접조건은 2절의 모델과 동일하다. Fig. 6은 고주파 가열코일의 형상을 보여 주고 있다. 고주파 가열장치는 진공관 발전식으로 최대출력

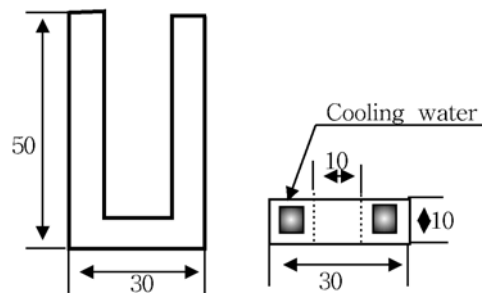


Fig. 6 Shape of induction coil

은 200kW이고, 또한 고주파 순간가열에 의한 가열코일의 손상방지를 위해 고주파 코일 내부에 냉각수가 흐른다. 고주파 장치는 이동이 용이하지 않음으로 고주파 가열부는 고정하고, 부재가 가이드레일에 따라 이동하면서 가열된다. 고주파가열 속도는 용접속도와 같으며, 고주파 가열단면은 실험에서 얻은 단면마크로으로부터 중심 깊이가 3mm이고 폭이 50mm인 반타원형의 형상으로 설정하였다. 고주파가열에 의한 입열량은 전자기장 해석을 이용하여 입열량을 계산해야 하지만 여기서는 실험에 의해 얻어진 고주파가열 단면으로부터 H.A.Z부가 700℃가 되도록 반복해석을 통해 단위체적당 입열량을 0.64(cal/mm³·sec)로 결정했다. 또한 가열위치는 가열의 용이성을 고려하여 웨브 플레이트의 위쪽 단부로 부터 플랜지방향으로 100mm 떨어진 위치로 설정하였다.

3.2 고주파가열에 따른 종굽힘변형 해석

Fig. 7은 모델 A2에 대해 고주파가열과 용접시 발생하는 온도분포(t=90sec)를 보여주고 있고, Fig. 8은 해석결과로부터 종굽힘 과도/잔류변형을 보여 주고 있다. 결과에 의하면 고주파 가열에 의해 최대과도변형은 필렛용접에 의해 발생하는 최대 과도변형량의 50%로 감소하였다.

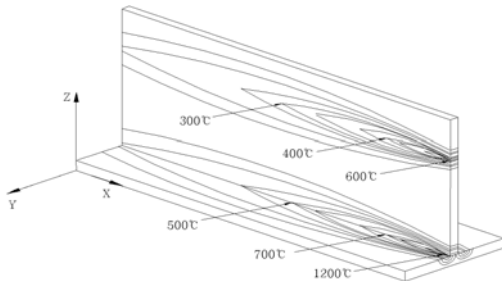


Fig. 7 Temperature distribution by welding and induction heating(A2,t=90sec)

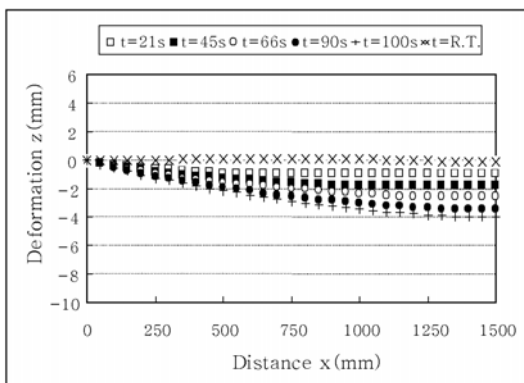


Fig. 8 Longitudinal deformation by welding and induction heating(A2)

Fig. 9는 입열량의 증감에 따른 종굽힘변형의 영향을 검토하기 위해 A2의 고주파 가열량을 30%로 증가시킨 모델 A3와 30% 감소시킨 A4의 종굽힘변형량을 보여 주고 있다. 결과에 의하면 입열량의 변화에 따라 최종 종굽힘변형이 약 ± 1mm로 거의 비례적으로 변화하여 입열량에 따라 종굽힘변형이 제어될 수 있음을 알 수 있다.

3.3 해석에 의한 타당성 검토

고주파가열에 의한 종굽힘변형방지법의 타당성을 검토하기 위해 용접조건 및 고주파 가열조건은 모델 A2와 동일하게 설정하고, built-up제의 형상을 A5로 설정하여 해석을 수행하였다. 종굽힘변형을 방지하기 위해 용접입열량(Qw=1,676(J/mm))과 부재의 중립축으로부터 용접부 까지의 거리(Nw=50mm)의 곱에 의한 용접굽힘모멘트에 의해 발생되므로, 용접굽힘모멘트(Mw)와 크기가 같고 방향이 반대인 고주파모멘트(Mi)가 작용하도록 설정해야 한다. 모델 A2에서 중립축으로부터 고주파열원까지의 거리(Ni)가 90mm이므로 고주파입열량(Qi)을 다음과 같이 근사적으로 계산할 수 있다.

$$Qw \times Nw = Qi \times Ni$$

$$\therefore Qi = (Qw \times Nw) / Ni \tag{1}$$

식(1)에 의해 고주파 입열량(Qi)은 1,117(J/mm)로 계산되었으며 이는 해석에 사용된 고주파 입열량보다 10% 작은 값이다. 이것은 용접과 고주파의 입열조건 및 효율이 다르기 때문이다. 식(1)에 의한 고주파 입열량 예측은 다양한 형태의 고주파 코일로부터 고주파장치의 출력을 결정하는데 중요한 근거자료로 활용될 수 있다. 한편, 본 해석에 사용하는 built-up제의 단면

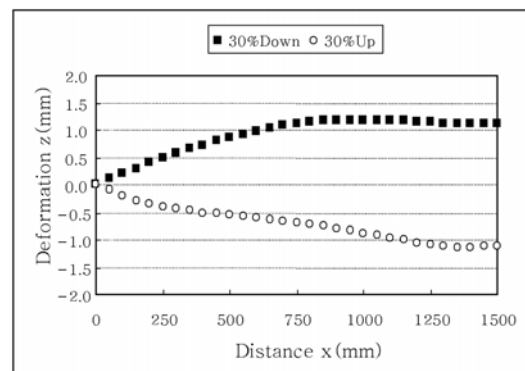


Fig. 9 Longitudinal deformation by change the induction heating(A3, A4)

의 중립축으로부터 용접부까지의 거리(Nw)가 71mm 이므로 식(1)에 의해 고주파가열 위치(Ni)를 106.5 mm 로 계산되어 이를 모델 A5의 해석에 적용하였다.

Fig. 10은 용접에 의한 과도/최종 종굽힘변형의 형상을 보여 주고 있고, Fig. 11은 식(1)에 의해 종굽힘 변형을 방지하기 위해 고주파 가열위치를 계산하여 웹 플레이트에 고주파 가열했을 경우 과도/최종종굽힘 변형을 보여 주고 있다. 결과에 의하면 예비해석과 식(1)에 의해 얻어진 가열위치를 적용하므로써 종굽힘 변형을 방지할 수 있음이 확인되었다.

4. 실험 및 고찰

3절에서의 열탄소성해석에 의해 검증된 고주파 가열을 이용한 종굽힘방지법에 대해 실험을 통해 검증하였다. 실험은 고주파 가열량 및 가열위치의 변화에 따른 종굽힘변형량의 영향에 대해 검토하고 이를 근거로 실제 부재에 적용시켜 고주파가열에 의한 종굽힘방지법에 대한 타당성을 검토하였다.

4.1 실험조건 및 측정방법

Table 2은 실험에 사용한 부재치수 및 실험조건을 보여 주고 있다. 필렛용접은 1-Torch 2-Wire 서브머지드 아크용접, 와이어 직경은 2.0mm 이고 양면 동시 용접을 실시하였다. 용접조건은 전류 720(A), 전압 26(V), 속도 1004(mm/min)이며, 각장은 5mm이다. 해석시 용접입열량은 1,118(J/mm)이며 효율(η)을 0.95 로 하였다. 한편, 고주파 가열조건은 3.1절의 해석조건과 동일하나, Table. 2의 고주파 가열온도를 제어하기 위해 고주파 전류만을 변화시켰다. 종굽힘변형 측정은 용접전 웹플레이트에 용접선방향으로 마킹을

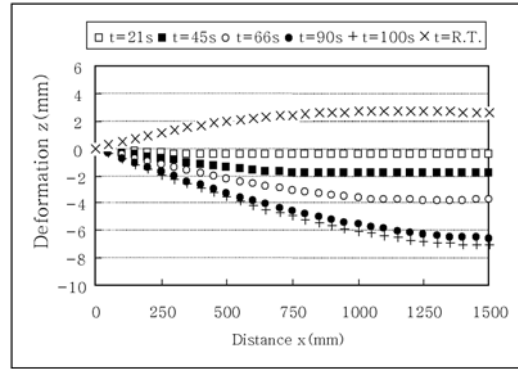


Fig. 10 Longitudinal deformation by welding(A5)

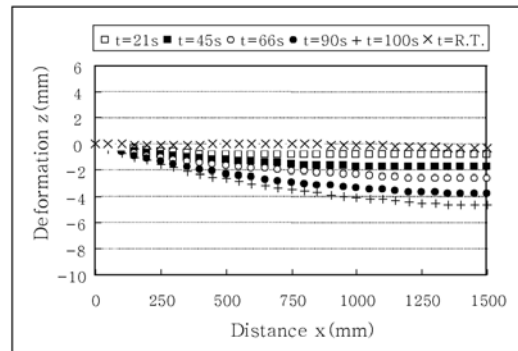


Fig. 11 Longitudinal deformation by welding and induction heating(A5)

실시한 후 용접 및 고주파가열부가 실온이 되었을 때 마킹선의 양 끝단에 피아노선을 일직선으로 연결하고 피아노선과 마킹선의 차이를 측정하여 구했다.

4.2 고주파의 가열온도에 따른 영향

고주파의 가열위치에 따른 종굽힘변형의 영향을 검토하기 위해 중립축으로부터 고주파가열위치(Ni)를 200 mm로 일정하게하고, 고주파 전류만을 변화시켜 고주

Table 2 Specimen dimension and experimental conditions

Model name	Flange plate(mm)		Web plate(mm)		Length (mm)	Temperature (°C)*	Ni(mm)
	Fw	Ft	Ww	Wt			
E1	150	18	450	11.5	20,600	390	200
E2						430	200
E3						470	200
E4						430	145
E5						"	165
E6						"	205
E7						"	225
E8	150	22	500	11.5	20,200	430	240
E9	150	18	450	11.5	20,600	"	225

*: temperature of web plate on the location of 100mm away from coil after induction heating

과 가열온도를 E1(390℃), E2(430℃), E3(470℃)로 점차적으로 변화시켰다. 여기서 가열온도는 고주파 가열 후 코일로부터 100mm 떨어진 위치에서 적외선 온도측정기를 이용하여 측정한 결과이다.

Fig. 12은 고주파 가열온도를 변화시켜 용접하는 경우 종굽힘 변형량을 나타내고 있다. 고주파 가열온도가 증가할수록 종굽힘 변형량은 아래방향으로 증가(-)하고 있다. 이것은 고주파가열에 의해 발생하는 모멘트($M_i \approx N_i \times Q_i$)가 증가함으로서 일어나는 현상임을 알 수 있다.

4.3 고주파의 가열위치에 따른 영향

고주파 가열온도를 일정하게 설정하고 중립축으로부터 고주파열원까지의 거리를 변화시켜 종굽힘변형량의 변화를 검토하였다. 이때 가열온도는 430℃(코일로부터 100mm 떨어져있는 곳의 온도)이고 중립축으로부터 거리(N_i)를 E4(145mm), E5(165mm), E6(205mm), E7(225mm)로 변화시켰다.

Fig. 13은 고주파 가열위치에 따른 종굽힘변형량을 보여 주고 있다. 종굽힘변형은 가열위치가 225mm에서 ± 10mm 이내 변형이 제일 작게 나타났고 중립축으로

부터 열원까지의 거리가 짧을수록 위로 볼록한 변형이 최대 50mm까지 발생하였다. 이것은 중립축으로부터 고주파열원까지의 거리가 짧을수록 고주파가열에 의해 발생하는 모멘트(M_i)가 용접에 의해 발생하는 모멘트 (M_w)보다 작기 때문이다.

4.4 실험에 의한 타당성 검토

3절의 열탄소성해석과 실험결과로부터 Built-Up재 용접시 발생하는 종굽힘변형은 고주파의 가열온도와 가열위치에 의해 제어 가능하므로 이를 실제 부재에 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 사용한 모델은 Table 2의 E8, E9이며 고주파 가열온도 및 가열위치(N_i)는 4.2절과 4.3절의 실험과 식(1)에 의해 구했다.

Fig.14는 시험편을 2회 실험하여 얻은 종굽힘 변형량을 보여주고 있다. 실험결과에 의하면 부재 길이 20,000mm 에서 종굽힘변형이 ± 10mm 이내로 발생하여 실험과 식(1)에서 얻어진 고주파가열위치 및 가열 온도를 제어함으로서 부재의 치수가 변화해도 종굽힘 변형을 방지할 수 있었다.

5. 결 론

Built-up재 제작시 필렛용접에 의한 발생하는 종굽힘변형을 웨브 플레이트에 고주파 가열하여 방지하기 위해 열탄소성해석으로 종굽힘변형의 생성메카니즘과 고주파 가열량과 가열위치에 따른 종굽힘의 영향에 대해 검토하고, 실제 부재에 적용함으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열탄소성해석을 통해 종굽힘변형의 생성메카니즘을 규명하고, 열탄소성해석과 실제 실험에 의해 웨브 플레이트의 단부에 고주파 가열을 함으로서 종굽힘변형을 방지하는 방법을 제시하였다.

2) 종굽힘변형은 웨브 플레이트 단부에 고주파 가열량과 가열위치에 따라 종굽힘변형이 근사적으로 비례하

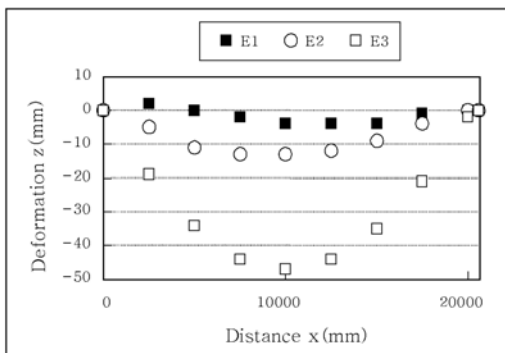


Fig. 12 Longitudinal deformation by heating temperature

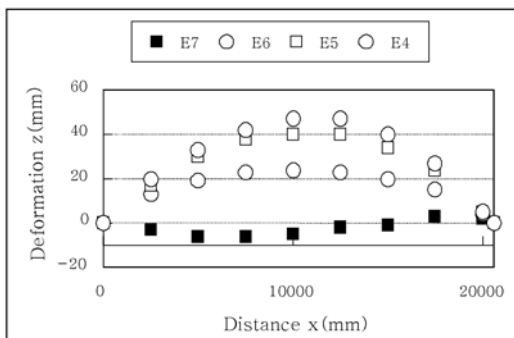


Fig. 13 Longitudinal deformation by location of induction heating

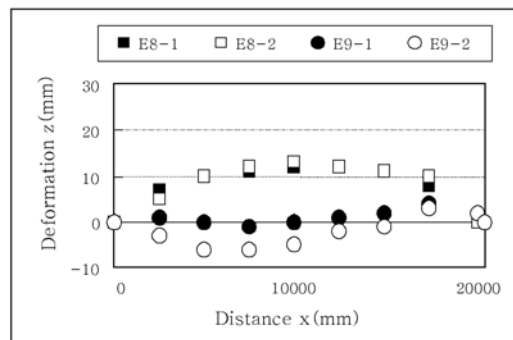


Fig. 14 Longitudinal deformation (E8, E9)

여 변화함으로 이를 이용하여 변형을 제어할 수 있었다.

3) 부재의 형상에 따른 가열 세기와 가열위치를 근사적인 간이식을 적용하여 결정할 수 있었다.

4) 위의 결과를 이용하여 부재형상이 변화하여도 종굽힘변형을 방지됨을 해석과 실험으로 검증되어 고주파가열에 의한 종굽힘변형 방지방법의 타당성을 확인되었다.

후 기

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참 고 문 헌

1. Kim, Y.C., Chang, K.H. and Horikawa, K., Production Mechanism for Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding and Investigation of Generality, *Journal of the Japanese Welding Society*, **17-2** (1999)
2. Sasayama, Y., Masubuchi, K. and Moriguchi, S., Longitudinal Deformation of a Long Beam due to Fillet Welding, *Welding Journal*, **34** (1955)
3. Okerblom, N. O., *The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures*, Her Majesty's Stationery Office, 1958
4. Tsuji, I. and Yamaguchi, K., Distortion and Shrinkage Stresses in Edge Welding of Beams, *Journal of the Western Society of Naval Architects of Japan*, **42** (1967) (in Japanese)
5. Masubichi, K. and Papazoglou, V.J., Analysis and control of Distortion in Welded Aluminum Structures, *SNAME Transaction*, **86** (1978)
6. Aoki, H., Nagai, K., Kuwajima, H. and Watanabe, M., Estimation of Welding Deformations for Actual Plate Girders, *Journal of the Japanese Welding Society*, **50-10** (1981) (in Japanese)
7. Jang, C.D. and Seo S. I., Basic Studies for the Automatic Fabrication of Welded Built-up Beams, *Journal of Ship Production*, **11-2** (1995)
8. Jang, C.D. and Seo S. I., On the Prediction of Deformation of Welded Built-up Beams, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **31**, 1994
9. Park, J.U.: Effects of Initial Defects on Welding Deformation and Residual Stress, *Journal of KWS*, **17-4** (1999)