

루트부 갭이 있는 양면 필릿용접 이음부의 용접잔류응력 분포

방한서*, 김성환**, 김영표***, 이창우****

Distribution of Welding Residual Stresses in T-joint Weld with Root Gap

H. S. Bang*, S. H. Kim**, Y. P. Kim*** and C. W. Lee****

요 약

용접구조물의 루트부는 외력에 의한 응력 집중에 의해 파손되기 쉽다. 따라서 구조물의 안전성 및 신뢰성 측면에서 홈 가공한 그루브 용접에 의한 완전용입 용접이 일반적으로 요구되어진다. 하지만 필릿 T-이음부 용접은 루트부의 갭과 같은 불완전 용입부를 만들어내기 쉬움에도 불구하고 홈 가공 시간 및 용접봉 소모량을 줄이기 위해 이러한 필릿용접이 자주 행해지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 필릿 용접구조물의 플레이트(또는 플랜지)와 웨브 부분에 발생하는 용접잔류응력과, 특히 불완전 용입에 의한 루트부 갭을 갖는 양면 T-이음부의 노치부분에 발생하는 잔류응력 분포를 해석하고자 하였다. 해석을 위해서 서브머지드 아크 용접에 의한 단층 및 다층패스용접 모델을 선정하였으며, 열전도 및 열탄소성 이론을 고려한 유한요소 프로그램을 사용하였다.

※Keywords: T-joint(T 이음), root gap(루트간격), single and multi-pass welding(단층 및 다층용접)welding residual stresses(용접잔류응력), finite element analysis(유한요소해석)

Abstract

The root joint in the welding structures are apt to failure by the stress concentration which is occurred by the external force. Therefore, in the safety and reliability of structure, the complete penetration joint welding which are obtained by the groove welding with edge preparation is generally required. Nevertheless, fillet T-joint welding without edge preparation is often carried out in the fields to reduce working time and consumption of welding electrode, however, this process is likely to produce inadequate joint penetration such as root gap.

접수일자: 2001년 11월 14일, 승인일자: 2002년 7월 24일

* 정회원, 조선대학교 항공·조선공학부 교수(E-mail: hsbang@mail.chosun.ac.kr)

** 학생회원, 조선대학교 접합가공기술연구소(E-mail: weldstar@yahoo.co.kr)

*** 정회원, 조선대학교 선박해양공학과 대학원 박사과정(E-mail: ypkim@stmail.chosun.ac.kr)

****정회원, 울산과학기술대학교 기계학부 교수(E-mail: cwlee@mail.ulsan-c.ac.kr)

In this paper, the focus of research is to investigate distribution of welding residual stresses in the plate(or flange) and web of T-joint weld, and especially in the near of root gap notch that is due to incomplete joint penetration. For the analysis, we have chosen model of T-joint weld in the cases of single and multi-pass welding with submerged arc welding and analyzed model by using finite element programs considering the heat conduction and thermal elasto-plastic theory.

1. 서언

강구조물의 제조공정에서 T-이음부 용접은 조립 H 형강의 제작이나 보강재 설치 등에서 일반적으로 행해진다. 이와 같은 T-이음부 용접은 웨브를 홈 가공하지 않을 경우 루트부에 갭이 존재하는 불완전 용입 상태가 되기 쉽다. 따라서 루트부의 갭의 존재 여부가 용접구조물의 강도에 미치는 영향을 예측하는 것은 대단히 중요한 과제가 된다.

또한, 기하학적 형상이 복잡하고, 용접공속에 작용하는 구속의 정도가 방향에 따라서 다르기 때문에 잔류응력 및 변형률이 위치에 따라 크게 변화하므로 해석에 어려움이 많아 이에 관한 연구는 그다지 활발하지 못한 편이며, 그 연구성과도 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 다층 T형 용접 이음부를 해석 대상으로 하여 열탄소성 유한요소 해석을 통하여 루트부 갭이 있는 양면 필릿용접이음부의 노치의 영향에 의해서 용접잔류응력이 분포하는 특성을 분석하는데 주안점을 두고, 노치근방에 분포하는 잔류응력의 특성에 따라 강도에 미치게 될 영향을 예측하고자 한다. 이를 위해서 우선 단층 용접체를 대상으로 하여 용접 이음부에 잔류하는 용접 열응력의 기본적인 분포 특성을 경계조건의 변화에 따라 분석하였다. 그리고, 2층/2패스의 다층 용접 이음부를 대상으로 하여 패스별 응력 이력을 보고자 하였으며, 최종적으로 루트부 갭의 노치 근방에서의 잔류응력의 분포 양상을 규명하고자 하였다.

2. 단층용접의 잔류응력 분포 특성

일반적으로 용접시 잔류응력의 분포양상은 초층 패스나 입열이 가장 큰 패스에 지배를 받게 된다. 따라서, 본 장에서는 루트부 갭이 존재하는 양면 필릿용접 이음부에 발생하는 잔류응력의 기본적인 분포양상을 1패스/1층 즉, 단층 용접이음부를 대상으로 하여 경계조건의 변화에 따라 규명하고자 하였다.

2.1 해석모델 및 해석방법

1패스/1층 양면 필릿용접의 해석을 위해서 용접시 용접부의 역학적 조건 즉, 시험편의 수축 및 팽창의 영향을 받지 않는 최소 크기를 고려하여 플레이트 두께 30mm, 웨브의 두께 20mm인 필릿 이음부를 해석 대상으로 선정하였다. 또한, 용접사이즈는 미국용접학회 규격에 입각하여, 최소크기인 웨브 두께의 3이상의 크기로 하였으며, 해석모델 및 시험편의 크기를 Fig.1에 나타내었다.

Length of model (L)	600mm
Width of web (Ww)	170mm
Width of plate (Pw)	300mm
Thickness of web (Wt)	20mm
Thickness of plate (Pt)	30mm
Weld size (l)	16mm

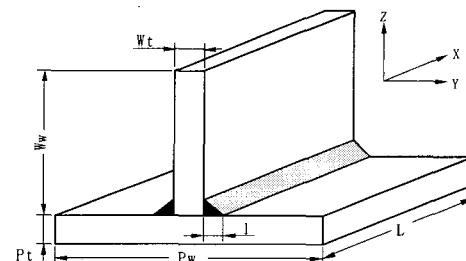


Fig. 1. Model for analysis

또한, 시험편 재료는 강구조물 제작 현장에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 SWS490을 사용하였고, 용접은 열효율 면에서 우수한 서브머지드 아크용접(sub-merged arc welding)으로 수행하였다.

사용된 시험편 재료와 용접봉(S-777MX×H-14)의 화학성분은 Table 1과 2에 나타내었으며, Table 3의 조건을 사용하여 용접을 실시하였다. 또한 입열량은 $Q=33312\text{J/cm}$, 열효율은 $\eta=0.9$ 로 하였다.

Table 1. Chemical composition of base metal(wt%)

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

Table 2. Chemical composition of welding electrode(wt%)

Chemical composition	C	Mn	Si	P	S
Electrode	0.08	1.23	0.48	0.013	0.011

Table 3. Welding condition

Pass	Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/min)
1, 2	790	32	41

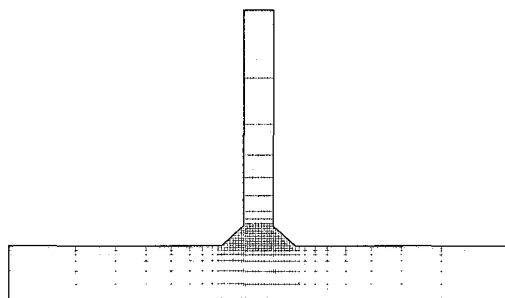


Fig. 2. Mesh division for analysis by FEM

해석은 기 개발된 2차원 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 파악하였고, 이를 입력 데이터로 하여 2차원 평면변형 열탄소성 유한요소

프로그램을 이용하여 시험편 중앙단면(길이 $L/2$ 인 지점)에 대해 해석하였다. 또한, 요소 분할은 4절점 아이소 파라메트릭 요소를 도입하여 Fig.2와 같이 4절점 사각형 요소와 4절점 삼각형 요소를 사용하여 총요소수 714개, 총절점수 774개로 분할하였다.

또한, 해석에서 사용한 경계조건은 웨브의 대칭성을 고려하여 Fig.3에 나타낸 것과 같이 웨브 상단의 중앙점을 좌우로 구속(y 방향 구속)하고, 플레이트(또는 플랜지) 하단의 중앙부분을 상하좌우로 구속(z 및 y 방향 구속)한 경우(경계조건 I, Fig.3(a))와 플레이트 양단을 상하로 고정된 경우(경계조건 II, Fig.3(b))의 2가지를 대상으로 하였다(단, 경계조건은 모델형상의 1/2에 대해서만 표시하였다).

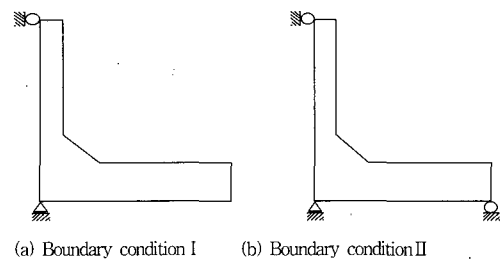


Fig. 3. Boundary conditions

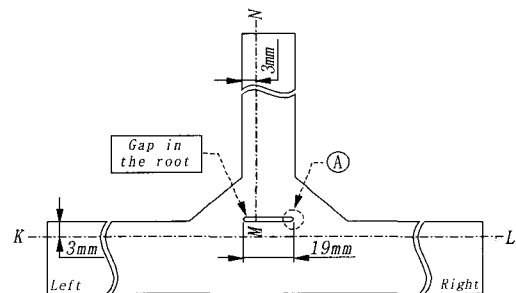


Fig. 4. Mesh division of notch-tip

그리고, 루트부 갭이 있는 경우의 응력분포를 살펴보기 위해 Fig.4와 같이 루트부 갭이 0.5mm, 갭의 길이가 19mm인 경우에 대해서도 해석하였다.

한편, 잔류응력을 검토한 시험편의 위치는 플레이트 상표면에서의 깊이 3mm($z=3\text{mm}$)인 지점

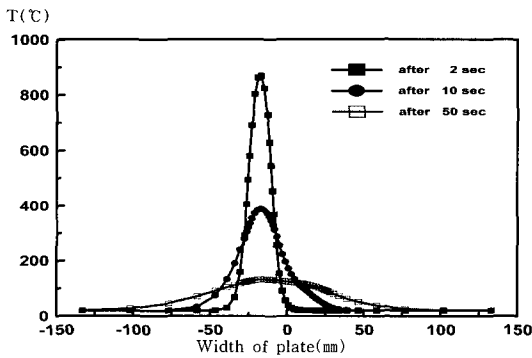
과 웨브의 좌측 표면에서의 깊이 3mm($y=3\text{mm}$) 지점이다.

2.2 결과의 분석 및 고찰

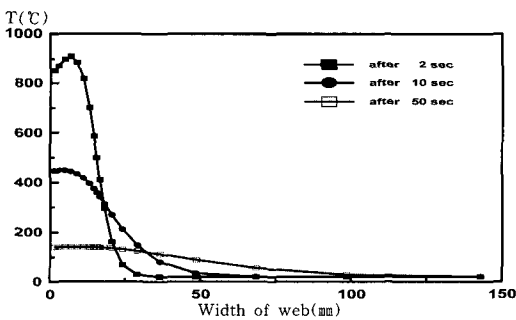
2.2.1 열분포 해석

Fig.5에 양면 필릿용접부에 대한 열분포 해석 결과를 도시하였으며, 용접잔류응력의 주목점과 동일한 위치에서의 플레이트와 웨브에 대한 열분포 특성을 Fig.5(a)와 Fig.5(b)에 각기 나타내었다.

이들 열분포 특성을 비교해 보면 동일한 시간에서 플레이트 부분의 온도가 다소 낮게 분포함을 알 수 있는데 이것은 플레이트는 2방향으로 열이 전도되고, 웨브는 1방향으로만 열이 전도되기 때문인 것으로 사료된다.



(a) Distribution of temperature along the width of plate



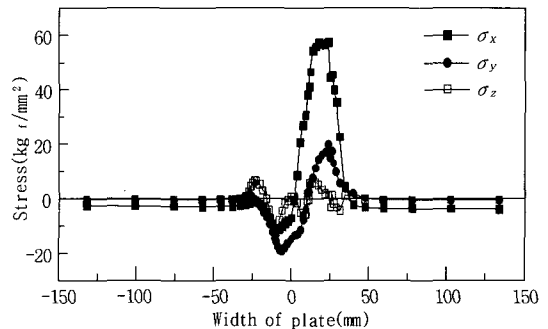
(a) Distribution of temperature along the width of web

Fig. 5. Distribution of temperature

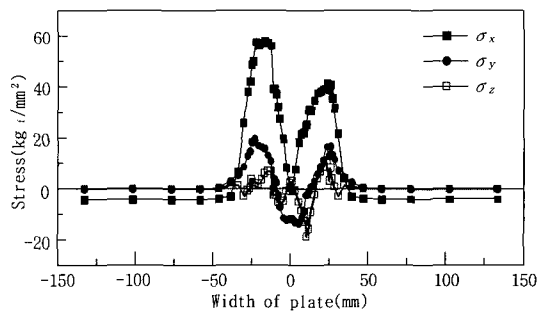
2.2.2 외부구속이 없는 경우(경계조건 1)

먼저 Fig.6과 Fig.7은 경계조건 1을 이용해서 루트부 갭이 0.5mm이고 갭의 길이가 19mm인 모델에 대해 해석한 결과이다. 여기서 Fig.6(a)는 1패스/1층-우측 용접 후에 플레이트 쪽에 걸쳐서 분포하는 용접 잔류응력값 들이고, Fig.6(b)는 1패스/1층-좌측 용접 후에 분포하는 잔류응력값 들이다. 그리고 Fig.7은 1패스/1층 용접후 웨브의 폭방향으로 잔류하는 응력값이다. (그림에서 R은 우측(right) 부분을, L은 좌측(left) 부분을 용접하였음을 의미한다.)

그림에서 플레이트와 웨브의 잔류응력을 비교해 보면 플레이트 부분의 응력이 다소 크게 분포함을 볼 수 있는데 이것은 플레이트는 열전도 방향이 2방향이어서 열전도 방향이 1방향인 웨브쪽 보다 빨리 냉각하여 온도기울기가 급하게 된 것과 열영향부의 수축에 대한 주위에서의 구속이 심하기 때문인 것으로 사료된다.



(a) After 1pass/1layer-R welding



(b) After 1pass/1layer-L welding

Fig. 6. Distribution of residual stresses along the width of plate(boundary condition 1)

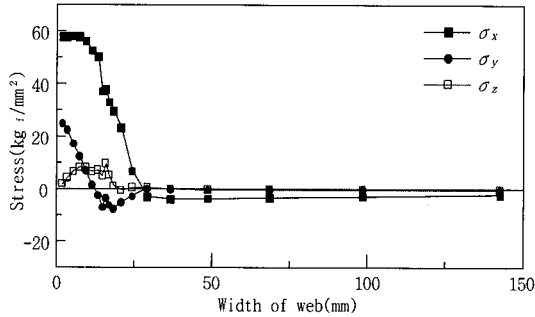
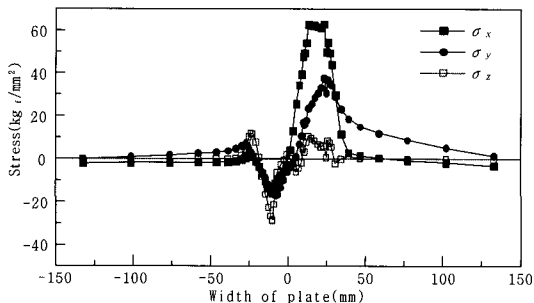


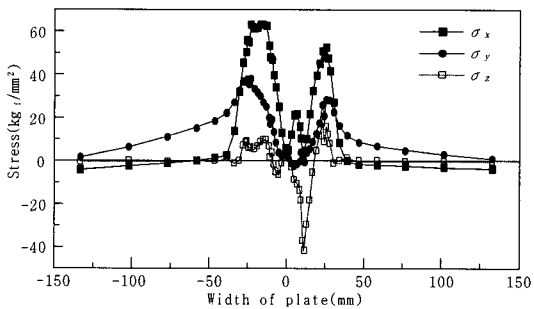
Fig. 7. Distribution of residual stresses along the width of web(boundary condition I)

2:2:3 외부구속이 있는 경우(경계조건 II)

다음으로 루트부 갭이 0.5mm인 모델에 대해 경계조건 II를 이용하여 해석한 결과를 Fig.8과 Fig.9에 나타내었다. 이들 결과값을 보면 경계 조건 I의 웨브만의 구속이 부가적으로 플레이트의 외부구속에 의한 응력값이 더해져서 경계조건 I일 때보다 경계조건 II일 때가 응력이 크게 분포함을 알 수 있다.



(a) After 1pass/1layer-R welding



(b) After 1pass/1layer-L welding

Fig. 8. Distribution of residual stresses along the width of plate(boundary condition II)

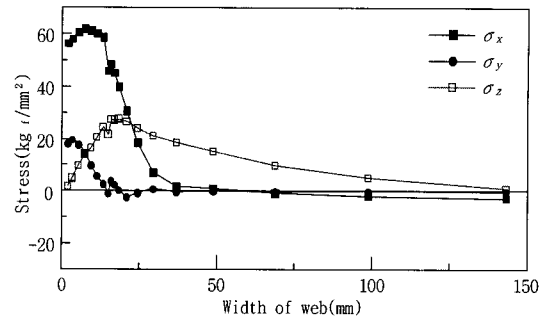


Fig. 9. Distribution of residual stresses along the width of web(boundary condition II)

이상의 Fig.6~Fig.9의 경계조건의 변화에 따른 최종 패스시의 플레이트 폭에 걸쳐 분포하는 각 용접 잔류응력성분 σ_x , σ_y 및 σ_z 를 상호 비교하여 보면, 이 중에서도 특히 σ_y 값에 있어서 대단히 많은 차이를 보이고 있는데 이것은 질점구속력(플레이트 두께방향으로의 구속력)에 의해 플레이트 폭방향으로의 자유로운 수축이 구속되기 때문인 것으로 판단된다.

그리고 σ_z 는 루트부 갭 근방에서 압축응력이 상당히 증가하였으나 나머지 부분에서는 그다지 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 플레이트를 양단 고정하여 z방향으로 구속되더라도 z방향의 수축 및 팽창량은 미소하므로 이것이 σ_z 에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 사료된다.

3. 다층용접의 잔류응력 분포 특성

본 장에서는 본 연구의 주안점인 루트부 갭이 존재하는 용접 이음부에 대한 해석을 통해 루트부 근방의 응력분포 양상을 규명하고 또한, 전장에서 간단하게 언급한 바 있는 다층 용접시 용접패스별 응력 변화과정을 좀 더 명확하게 규명하고자 2패스/2층 용접한 모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다.

해석모델의 규격은 전절과 동일하게 하였으며, 경계조건은 외부구속이 없는 I의 조건으로 하였다. Fig.10은 루트부의 노치 선단의 요소분할을 나타낸 것이며, 또한, 노치의 곡률반경은 0.25mm

로 하였다.

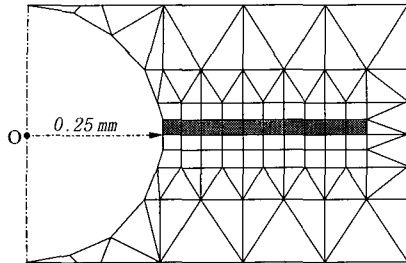
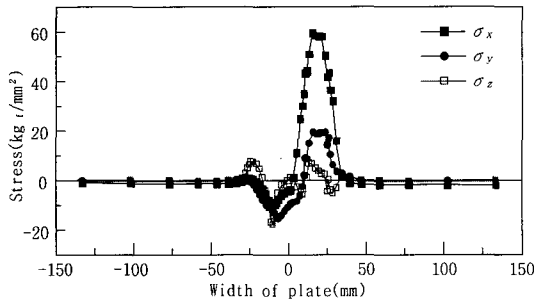
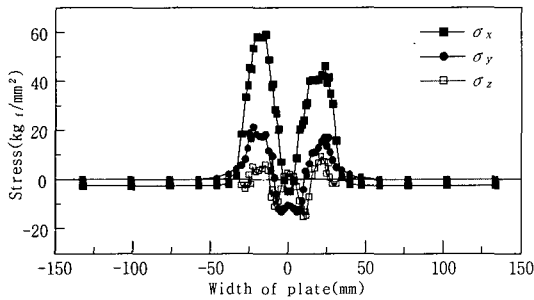


Fig. 10. Mesh division of notch-tip(Ⓐ part)

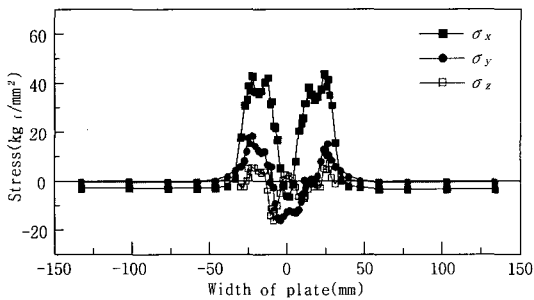
3-1 해석결과 및 고찰



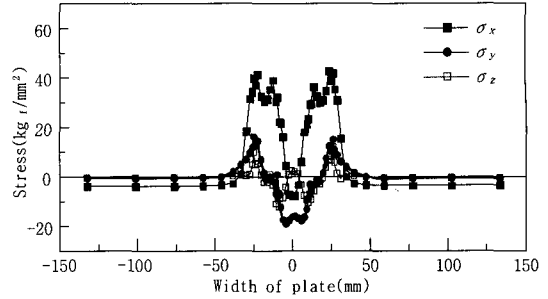
(a) After 1pass/1layer-R welding



(b) After 1pass/1layer-L welding



(c) After 2pass/2layer-R welding



(d) After 2pass/2layer-L welding

Fig. 11. Distribution of residual stresses along the width of plate

이상의 모델에 대한 해석 결과를 Fig.11과 Fig.12에 나타내었다. 위 그림들을 보면, 선행 패스 후에 잔류하는 응력들이 후행 패스시에 재 분포함을 알 수 있다. 따라서 후행 패스에 의한 입열의 영향에 의한 효과가 명확하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig.11(a)를 보면 Fig.6(a)와 매우 유사한 양상을 나타내고 있고, Fig.11(c)와 (d)를 보면 우측 노치 선단에서 σ_z 는 감소하지만 좌측은 약간 증가하여 양측이 거의 대칭을 이루고 있고, σ_y 는 증가하는 경향을 띠고 있다. 이것은 후행 패스시의 입열의 영향으로 노치 근방의 절점 구속력이 수축 쪽으로 크게 되었기 때문인 것으로 판단 된다. 이들 단층 필릿용접과 다층 필릿용접의 해석결과를 비교해 보면 σ_x 는 단층 필릿용접이 큰 응력분포를 보이고 있으며, σ_z 는 용접층수와는 상관없이 큰 응력분포를 보이고 있지 않다.

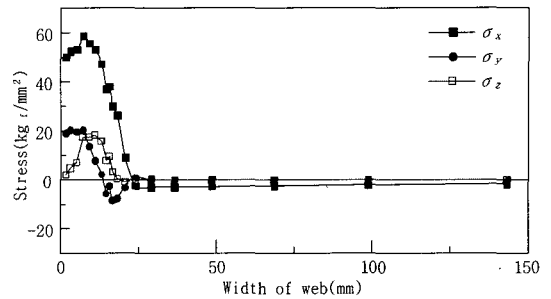
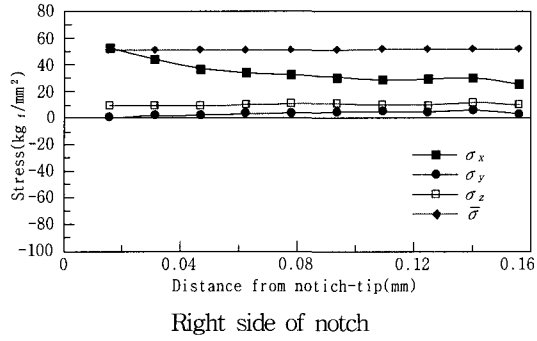


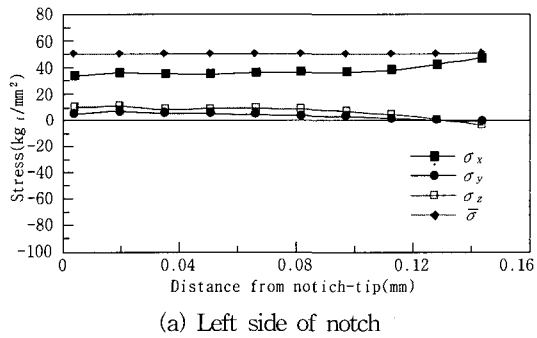
Fig. 12. Distribution of residual stresses along the width of web

3.2 루트부 갭의 양측 노치 선단의 잔류응력

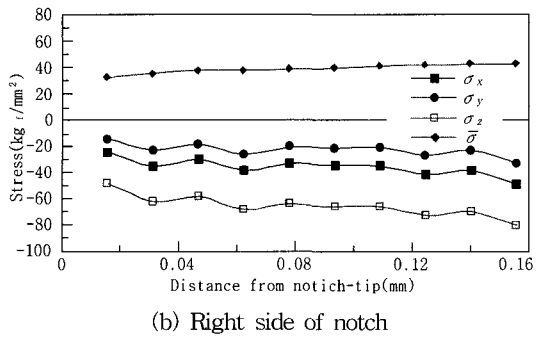


Right side of notch

Fig. 13. Distribution of residual stresses in notch-tip(after 1pass/1layer-R welding)



(a) Left side of notch

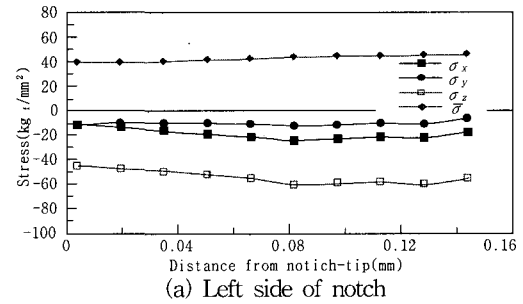


(b) Right side of notch

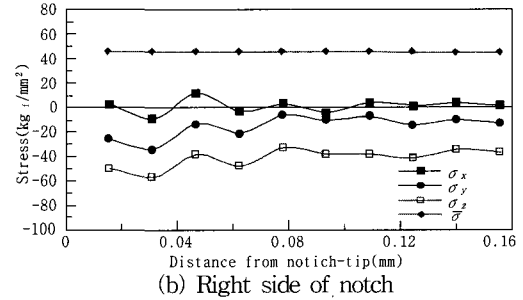
Fig. 14. Distribution of residual stresses in notch-tip(after 1pass/1layer-L welding)

최종적으로, 루트부 노치 선단에 분포하는 각각의 용접 잔류응력 성분 및 상당 잔류응력을 Fig.13 ~ Fig.16에 도시하였다. 이들 그림은 용접 후 양측 노치 선단에 분포하는 응력들이 용접순서에 따라 변화되어 가는 과정을 보여 준다.

Fig.13에서 보면 우측 노치 선단에서의 잔류 응력만을 도시하였는데 이것은 가장 선행된 패스시에는 루트부의 노치가 한쪽에만 존재하기 때문이다.

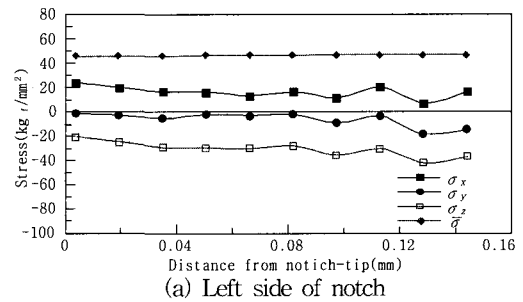


(a) Left side of notch

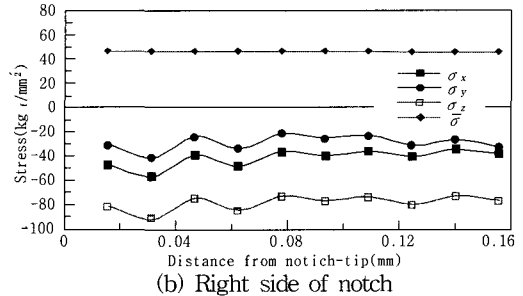


(b) Right side of notch

Fig. 15. Distribution of residual stresses in notch-tip(after 2pass/2layer-R welding)



(a) Left side of notch



(b) Right side of notch

Fig. 16. Distribution of residual stresses in notch-tip(after 2pass/2layer-L welding)

결국, 노치 선단에는 Fig.16과 같은 잔류응력이 존재하게 된다. 따라서, 이들 결과에서 최종 패스 후의 노치 선단의 잔류응력을 보면 대체적으로 압축응력이 크게 분포하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

이상의 양면 필릿 용접 이음부의 해석결과를 고찰해 보면

- (1) 필릿용접부의 플레이트를 외부 구속하지 않는 경우 용접부에 잔류응력이 적게 발생하였다.
- (2) 플레이트 폭에 걸쳐 분포하는 용접잔류 응력의 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.
- (3) 루트부 갭이 존재하는 다층 필릿용접부의 해석결과 우측 노치 선단에는 상당히 큰 압축 잔류응력이 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 의 순으로 분포하고, 좌측 노치 선단에는 σ_z (압축) $>$ σ_x (인장) $>$ σ_y (압축)의 순으로 분포하였다.
- (4) 양면 필릿용접에 대한 단층용접과 다층 용접의 해석을 통한 비교 결과, σ_x, σ_z 는 단층 용접의 경우가 크게 나타났으나, σ_y 는 다층용접의 경우가 조금 크게 분포하였다.

따라서, 루트부 갭이 존재하는 양면 필릿용접시 다층용접의 경우가 용접잔류응력 측면에서 유리하다고 판단되며, 또한 웨브의 폭방향으로 인장력이 작용할 경우, 루트부 노치 선단의 압축잔류응력의 영향으로 루트크랙의 발생을 억제하는 효과를 가져오리라 추측된다.

후 기

본 연구는 1999년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김효철 1976 “선체건조에 있어서 용접공작으로 인한 열응력 및 잔류응력에 대한 고찰: 용접작업으로 인한 열응력 해석” 대한조선학회지, 제13권, 제1호, pp.25-34.
- Y. C. KIM, T. YAMAKITA, H. S. BANG, Y. UEDA 1988 "Mechanical characteristics of Repair Welding in thick plate", Trans. JWRI Vol. 17, No.2.
- 방한서 1990 “유한요소법에 의한 박판용접의 2차원 비정상열전도 해석” 대한조선학회지, 제27권, 제4호, pp.43-50.
- 房漢瑞 1992 “厚板熔接部の 力學的 特性” 大韓熔接學會誌, 제10권, 제4호, pp.250-258.
- 방한서, 김종명 1999 “T-joint 용접부의 형상에 따른 역학적 메카니즘에 관한 연구” 대한 용접학회지, 제17권, 제6호, pp.53-61.
- 이장현, 신중계, 김지훈 2002 “비드의 용융상태를 고려한 가스메탈 아크용접의 3차원 열탄소성 변형 해석” 대한조선학회 논문집, 제39권, 제1호, pp.49-60.



< 방 한 서 >



< 김 성 환 >



< 김 영 표 >



< 이 창 우 >