

# 필렛 용접부의 형상에 따른 역학적 특성에 관한 연구

방한서\*, \*김종명\*\*, 김성주\*\*\*

## A Study on the Mechanical Characteristics on the Shape in Fillet Welded Joint

### 1. 서 론

강 구조물의 제작시 주로 사용되는 필렛용접은 일반적으로 H형빔, I형빔 및 보강재등의 제작에서 널리 행해진다. 또한, 이러한 구조물을 제작할 때 용접개선각은 강판의 두께에 따라 각종 규정이나 규칙에 의거하여 일정하게 규정되어 있다. 그러나, 각종규정 및 규칙에 의하여 정해진 개선각에 대한 이론 및 실험결과와 작업조건을 고려한 체계적인 연구결과가 미흡한 실정이다. 이렇게 정하여진 용접개선각은 구조물 제작에 따른 시간과 가공경비 및 용착금속부의 증가로 인한 용접봉등의 소모량등으로 인해 생산성 및 경제성 측면에서 매우 불리하게 되며, 용접부의 변형 및 재질의 열화가 야기된다.

따라서, 본 연구에서는 필렛 용접이음부의 역학적 특성을 보다 과학적인 이론 및 실험의 결과를 통하여 필렛용접부의 최적(최소)형상을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 가장 먼저 선행되어야 할 연구는 열원의 이동효과를 고려한 용접체의 열분포 특성을 이론적으로 규명하는 것이다. 이 문제를 규명하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석용 비정상열전도 해석용 Software를 사용하여, 각종 시험편에 대해 수치해석을 수행하여 용접이음부의 열적 특성을 규명하였다.

또한, 용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 하여 용접체에 발생하는 역학적 거동을 정도좋게 해석하고 이들을 분석하여 최종적으로 용접이음부의 최적형상을 도출하고자 하였다. 먼저, 용접잔류응력을 정도좋게 해석하기 위하여 열탄소성 이론을 도입하였으며, 이들을 유한요소식으로 정식화한 후 아이소파라메트릭 3 또는 4절점 요소를 이용하여 개발된 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여, 필렛용접 시험편에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하여 용접잔류응력, 상당응력, 및 소성변형율등의 크기, 분포 및 발생기구를 규명하여 최적 용접이음부의 형상에 대한 이론적 근거를 체계적으로 제시하고자 하였다.

---

\* 조선대학교 선박해양공학과

\*\* 조선대학교 대학원

\*\*\* 한국선급

## 2. 유한요소 이론

열응력 문제에서는 맨처음 연속체의 비정상 열전도문제, 즉 시간과 함께 변화하는 온도분포를 구하여야만 한다. 이러한, 절점온도의 분포 및 변화양상에 따라서 절점의 열변형율이 변화하기 때문이다. 이를 위해 모델에 대한 용접입열(Q)의 계산은  $Q = \eta \frac{V \cdot I}{\nu}$  (Joule)에 의하여 산정하였으며, 용접금속의 각요소에 대한 입열은 아래식을 이용하였다.

$$q = \frac{Q \cdot \ell}{4.19 \cdot A \cdot \ell \cdot t} \quad (\text{cal})$$

여기서,  $t = (\ell / \nu)$  : 용접시간(sec), V:전압(V), I:전류(A), Q:입열량(joule), A:단면적(mm<sup>2</sup>),  $\nu$ :용접속도(mm/sec),  $\ell$ :용접길이(mm) 이다.

더우기 각요소를 구성하는 재료의 물리적 성질이 온도에 따라 변화하므로 이들의 영향을 고려한 절점력과 절점 변위의 관계식을 작성하여야 한다. 따라서 판의 용접응력의 가장 일반적인 해석을 위하여 재료의 등방성(isotropic)을 고려하여 탄성및 소성 전영역에 걸쳐 재료정수의 온도 의존성을 고려하였다. 또한 소성역에서는 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-Mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였으며, 사용요소는 아이소파라메트릭(isoparametric)4절점 요소를 사용하였다. 변형을 및 응력의 관계를 소성 유동(plastic flow)이론에 기본하여 증분으로 나타내었다.

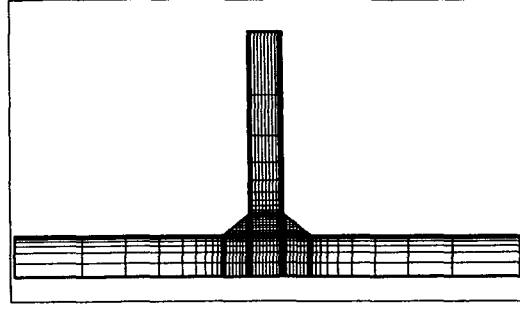
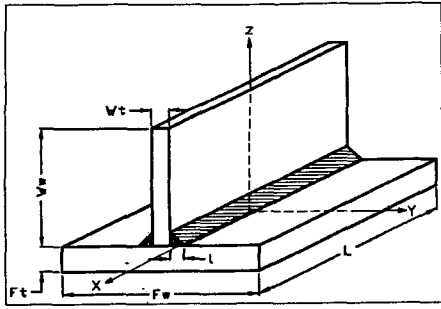
해석은 본 연구에서 개발한 아이소파라메트릭 요소를 도입한 유한요소 프로그램을 사용하여, 요소 및 절점온도 뿐만 아니라 임의의 점(요소의 길이, 넓이 및 두께내의 적분점)에서도 필요한 온도분포 특성을 알 수 있도록 하였으며, 또한 용접열원의 이동효과와 재료의 비선형화 즉 재료정수의 온도의존성을 고려하였다.

## 3. 해석모델 및 용접 재조건

필렛 용접시험편의 형상은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 용접시 용접부의 역학적 조건 즉, 시험편이 수축 및 팽창의 영향을 받지 않는(무한판의 역학적 조건) 최소크기로 선정하였으며, 해석모델에서 x는 용접선 방향, y는 판(Plate)의 폭 방향 및 웨브(Web)의 두께 방향을 나타내고, z는 웨브의 폭방향 및 플레이트의 두께방향을 나타낸다.

또한, 수치해석 모델 및 요소분할은 열분포 특성 및 응력변화 특성을 고려한 것으로 Fig. 2에 나타냈으며, 두께는 10mm, 20mm 및 30mm를 선정하였고, 개선각은 최소각 40° 에서 최대각 60° 로 하여 6종류의 필렛 시험편에 대해 해석을 수행하였다.

개선각 선정은 작업조건 및 현재 사용중인 각종 규정을 참고하여 최소각은 실제 작업 현장에서 작업가능한 최소값 40°를, 최대각 60°는 규정 및 규칙에서 정한 값으로 선정하였다.



**Fig. 1 Model of Analysis Model      Fig. 2 Mesh Division of Analysis Model**

재료는 연강을 사용하였으며, 용접은 자동 Submerged Arc 용접을 하였다.

용접 열분포 해석과 용접잔류응력 해석 시험편의 형상 및 크기는 동일하게 채택하였고, 용접은 Submerged-Arc 자동용접으로 용접 수행은 1층-1패스를 수행하였다. 수치해석은 유한요소법에 의한 비정상 열전도 해석과 열탄소성 평면변형 해석을 수행하였다.

요소분할은 아이소-파라미터(iso-parameter)를 도입하여, 사각형요소 와 삼각형 요소를 사용하였다. 또한, 비정상 열전도 해석시 열적 경계조건은 시험체 외부의 표면에서는 열전달이 발생하도록 하였으며, 용접잔류응력 및 소성변형률등의 해석에서 사용한 경계조건은 시험편의 대칭성을 고려하여, 시험편이 자유롭게 수축 및 팽창 할 수 있도록 필렛 용접 시험편은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 웨브(web) 상단의 중앙점( $x=0\text{mm}$ ,  $y=200\text{mm}$ )을 좌·우( $y$ 방향)로 구속하고, 판(plate) 하단의 중앙부( $x=0\text{mm}$ ,  $y=0\text{mm}$ )를 상·하( $y$ 방향), 좌·우( $z$ 방향)로 구속 하였다. 또한, 용접수행은 실제 작업현장에서 좌·우를 순차적으로 수행하므로 선행패스는 좌측을 수행하고, 후행패스는 우측을 수행하도록 하였다. 또한, 열탄소성 평면변형 수치해석에 하중으로 사용되어지는 용접열 온도분포해석은 비정상 열전도해석의 열적 특성의 결과를 사용하였다.

## 4. 고찰

### 4.1 열분포 특성

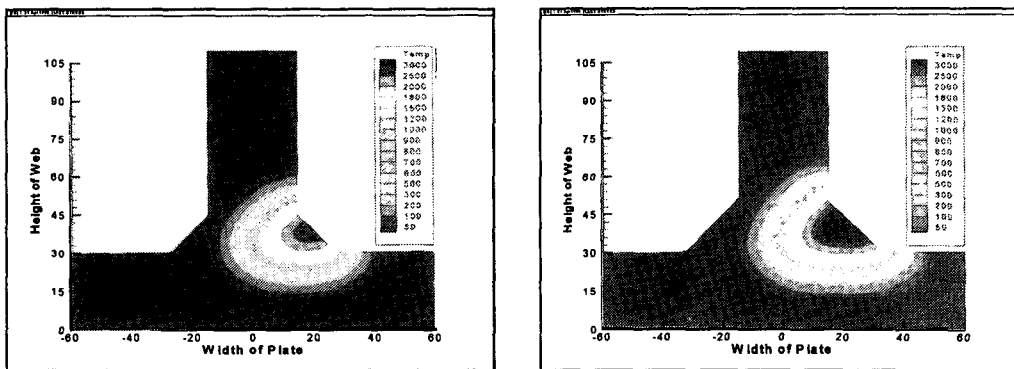
필렛용접부 열분포 해석은 온도구배가 가장 심한 초층패스를 고려하기 위해 1층-1패스 (1Layer-1Pass)양면 필렛용접부를 해석대상으로 하였으며, 용접중 시험편의 수축과 팽창을 고려하여, 하단의 판(Plate) 두께를 30mm로 일정하게 유지하고, 상단 웨브(Web)두께를 10mm, 20mm 및 30mm로 선정하였다. 또한, 개선각은 각기 40° 및 60° 로 된 양면 “T”자형 필렛 용접부를 선정하였다. 또한 용착금속, Root 및 Root-Face의 크기는 각종규격에 입각하여 선정하였다. 해석은 실제 작업을 고려하여, 좌·우로 용접한 형태를 취했으며, 개선각의 변화 및 두께변화에 따라 시간별, 위치별 온도분포 특성을 해석하였다.

먼저, 필렛 용접이음부의 개선형상에 따라 아래와 같이 고찰 하였다.

웨브(Web)두께를 10mm, 20mm 및 30mm로 일정하게 하고, 개선각을 양면 40° 및 60°로 주었을 때, 용접을 수행한 결과 시험편에 나타난 온도분포 특성은 각 시험편 공히, 개선각이 커짐에 따라 용접에 의한 입열량의 증가로 용접종료후 3sec.가 경과한 초기 시점에

서부터 30sec.가 경과할 때까지는 냉각과정에 있어서 개선각이 적을 때보다 냉각과정에 있어서 높은 온도를 유지 하면서 냉각됨을 보이고 있으나, 그 이후 냉각이 완료될 시점(300sec.)에 가서는 큰 차이가 없음을 보이고 있다. 그러나, 주목해야 할 점은 개선각이 클수록 용착금속부가 커지고, 입열량이 증가하게 되므로 고온 분포 영역이 개선각이 적을 때보다 커짐을 보이고 있음이다. 또한, 필렛용접부 중앙인 zero지점을 기준으로 열원 분포가 좌·우 대칭구조를 나타내지 않고 중심을 기준으로 우측으로 치우쳐져 있는 이유는 용접을 좌측을 먼저 수행하고, 우측을 수행하였기 때문이다.

Fig. 3(a),(b)의 그림은 필렛 용접부 해석 시험편(30mm)의 개선각의 변화(40° 및 60°)에 따라 단면의 전 영역에 걸쳐 도시한 냉각 시간대별 온도분포도이다. 그림에서 각 시험편 별로 최고온도 및 최저온도를 일정하게 유지하여, 동일한 그림 상태로 용접후 냉각과정에서의 온도분포 크기 및 영역을 손쉽게 파악할 수 있도록 구성하였다. 용접종료후 3초가 경과한 시점에서는 영역대별 온도분포의 차가 용접부 형상(개선각 및 두께)이 커짐에 따라 크게 발생되고 있지만, 시간이 경과함에 따라 그차가 차츰 감소하면서, 30초가 경과한 시점에서 부터는 전 영역에서의 온도분포 양상 및 그 크기가 일정해 짐을 나타내었다. 또한, 용접 종료후 초기시점(3sec후)에서는 개선각 및 두께가 증가함에 따라 전 영역에서 고온 영역이 차지하는 비율 또한 커짐을 보이고 있다.



(a) After 3sec-30mm40°

(b) After 3sec-30mm60°

Fig. 3 Distribution of Temperature in the Part of Full Model in Cooling Stage

#### 4.2 용접잔류응력 및 소성변형을 분포 특성

Fig. 4(a),(b),(c)그림은 필렛용접부 웹 두께가 일정(30mm)하고, 개선각이 40°에서 60°로 변화할 때, 판의 상표면에서 두께방향으로 2mm인 지점에서 플레이트의 폭방향에 걸친 용접잔류응력 성분( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ )을 나타낸 것이다. 주목점의 위치는 열분포 해석의 위치와 동일한 곳을 선정하여, 용접후 냉각과정에서의 온도분포와 연관성을 갖고 고찰해보았다. 그림에서 주목하여 보면, 필렛용접부의 개선형상이 40°에서 60°로 커질수록, 그 분포양상은 동일하게 나타났으나, 용접잔류응력의 크기는 다소 커짐을 보이고 있고, 용착금속부의 증가로 용접잔류응력의 분포가 플레이트 폭방향으로 상당부분 증가함을 보이고 있다. 또한, 용접잔류응력성분( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ ) 모두 플레이트 중심을 기점으로 용접

잔류응력의 분포가 좌·우 대칭을 나타내지 않는 이유는, 용접순서를 실제 작업상태를 기준으로 좌측을 먼저 수행하고, 우측을 수행한 순으로 행하였기 때문에, 후행패스(우측) 수행시의 입열효과로 먼저 형성된 선행패스(좌측)시의 용접잔류응력의 완화 현상 때문이라고 사료되어진다.

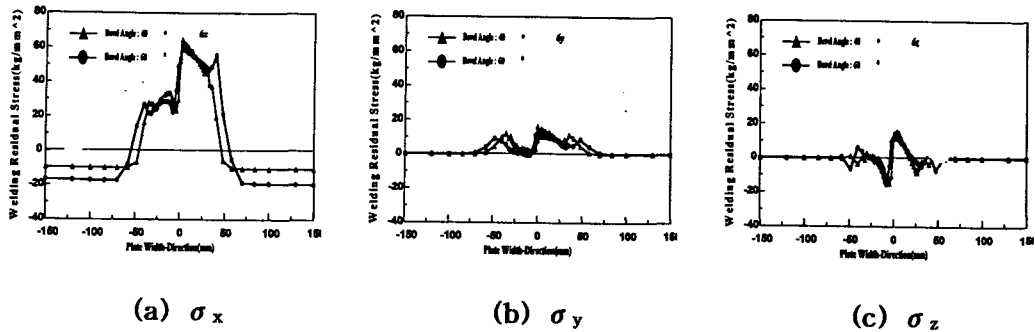
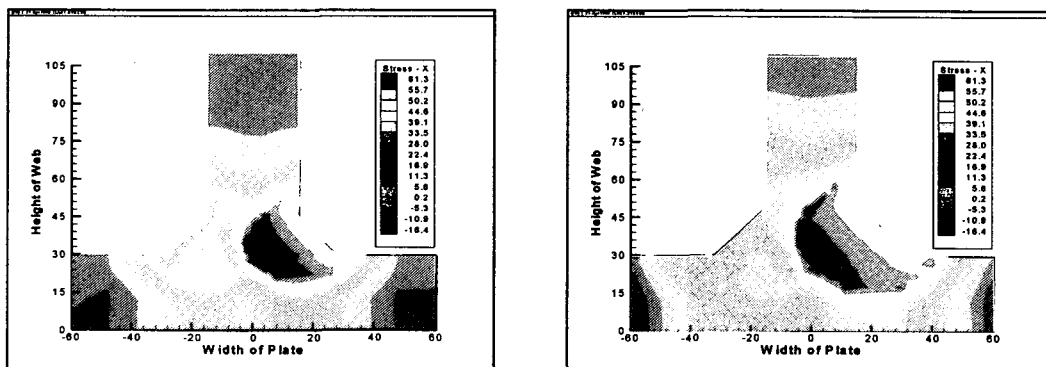


Fig. 4 Distribution of Welding Residual Stresses on the Bevel Angle 40° and 60°

개선각의 변화(40° 및 60°)에 따른 용접잔류응력 각 성분의 크기를 비교해 보면 40° 및 60° 공히  $\sigma_x > \sigma_y \geq \sigma_z$  순으로 나타났다. 용접잔류응력이 이러한 분포를 나타내는 이유는, 용접선 길이방향( $\sigma_x$ )으로의 역학적 구속력이 가장 크기 때문이며, 용접선 폭방향( $\sigma_y$ ) 및 두께방향( $\sigma_z$ )으로의 구속력은 필렛용접부 형상("T"형)의 특징상 구속력이 서로 비슷하기 때문인 것으로 사료되어진다. Fig. 5(a),(b)에서 도시한 것은, 필렛용접부 해석 시험편(30mm)의 전영역에 걸쳐 용접잔류응력 성분( $\sigma_x, \sigma_y$  및  $\sigma_z$ )중 각 성분을 주도하는 용접선방향 성분( $\sigma_x$ )을 개선각 및 두께변화에 따라 도시한 것이다. 또한, 각 두께별로 개선각이 40° 에서 60° 로 커짐에 따라 시험체에 잔류하는 용접잔류응력( $\sigma_x$ )성분의 분포양상은 동일하게 나타났으나, 그 절대치의 크기 및 분포영역이 시험체에 걸쳐 증가함을 뚜렷히 보여주고 있다. 이러한 결과는 두께가 두꺼워질수록 더욱 뚜렷히 나타나는 데, 두께가 두꺼워질수록 개선각이 40° 일 경우 보다 60° 일 경우에 용착금속이 차지하는 영역이 더욱 비례적으로 커지게 때문에 이로 인한 결과로 사료되어진다.



(a) 30mm40° - Stress x ( $\sigma_x$ ) (b) 30mm60° - Stress x ( $\sigma_x$ )

Fig. 5 Distribution of Welding Residual Stress( $\sigma_x$ ) in the Part of Full Model

## 5. 결 언

본 연구에서 얻어진 주요 해석결과는 아래와 같다.

- 1) 시험편 모두 폭방향의 용접잔류응력( $\sigma_y$ ) 및 두께방향의 용접잔류응력( $\sigma_z$ )은 양 시험편 모두 길이 방향성분( $\sigma_x$ )에 비해 그 절대크기도 작지만, 분포형태도 거의 일정하게 나타났다.
- 2) 두께가 일정하고, 개선각이  $60^\circ$  로 커짐에 따라 용착금속 및 HAZ에서 심한 온도 구배가 발생하였고, HAZ의 발생역 또한 증가하였다.
- 3) 개선각이 증가( $60^\circ$ )함에 따라, HAZ 및 인접모재에서 길이방향( $\sigma_x$ )의 용접잔류 응력 성분이 다소 크게 나타났으며, 그외의 영역에서는 크기 및 분포의 차가 거의 없었다.
- 4) 개선각의 변화에 따라, 용접잔류 소성변형률( $\epsilon_x^p$ ,  $\epsilon_y^p$  및  $\epsilon_z^p$ )각 성분의 분포양상은 일정하였으며, 개선각이 클수록 다소 크게 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 용접이음부의 개선각이 크면 클수록 개선각이 적은 것보다 열적조건이 좋지 않을 뿐 아니라, 이로 인해 용접잔류응력의 절대크기 및 그 분포영역이 커지게 되므로, 작업가능한 범위내에서는 열역학적,경제적 측면에서 개선 각이 적을수록 유리할 것으로 사료된다.