

## 상 변태를 고려한 HY-100강 용접부의 수축 및 잔류응력 예측에 관한 연구

이 희 태\* · 신 상 범\*

\*현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

### A Study on the Prediction of Shrinkage and Residual Stress for the HY-100 Weldment Considering the Phase Transformation

Hee-Tae Lee\* and Sang-Beom Shin\*\*

\*Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Ulsan 682-792, Korea

\*\*Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd./Ulsan Univ., Ulsan 682-792, Korea

#### Abstract

For high performance and structural stability, application of high strength steel has continuously increased. However, the change of the base metal gives rise to problems with the accuracy management of the welded structure. It is attributed to the martensite phase transformation of the high strength low alloy steel weldment. The purpose of this study is to establish the predictive equation of transverse shrinkage and residual stress for the HY-100 weldment. In order to do it, high speed quenching dilatometer tests were performed to define a coefficient of thermal expansion (CTE) at the heating and cooling stage of HY-100 with various cooling rates. Uncoupled thermal-mechanical finite element (FE) models with CTE were proposed to evaluate the effect of the martensite phase transformation on transverse shrinkage and residual stresses at the weldment. FEA results were verified by comparing with experimental results. Based on the results of extensive FEA and experiments, the predictive equation of transverse shrinkage and longitudinal shrinkage force at the HY-100 weldment were formulated as the function of welding heat input/in-plane rigidity and welding heat input respectively.

\* Corresponding author : hiteace@hhi.co.kr

(Received October 26, 2006)

Key Words: HY-100, Phase transformation, Transverse shrinkage, Residual stress, Heat intensity, Finite element analysis (FEA)

#### 1. 서 론

용접공정은 급열, 급냉 과정을 동반하기 때문에 용접부에서는 열 변형이 발생하며, 이들 열 변형은 소성 변형을 유발한다<sup>1)</sup>. 열 변형에 의해 단위 용접부에서 발생하는 응력들은 각 변형, 좌굴 변형, 그리고 횡 및 종 수축 변형을 유발시킨다. 이러한 단위 용접부에서의 변형량이 증첩되어 전체 용접 구조물의 정도를 떨어뜨리기 때문에 단위 용접부의 잔류응력과 변형 제어가 용접

구조물의 정도를 향상시키는데 아주 중요하다. 이런 이유로 1930년대 이후부터 용접 변형에 대한 연구가 지속적으로 이루어져왔다<sup>2)</sup>. 하지만 지금까지의 대부분의 연구 결과는 탄소강이나 일반 구조용 강의 용접부에 집중되어 고강도강, 저온용강 등과 같이 비교적 최근에 개발된 고기능성 강재의 용접 변형 및 잔류응력에 대한 연구 결과는 매우 제한적이다. 따라서 대부분의 산업 현장에서는 경험하지 못한 강재를 이용한 용접 구조물의 제작시 mock-up 제작을 통하여 선정된 정도 관리 방법에 의존하고 있다. 그러나 이러한 접근 방법은 동

일 제품의 대량 생산에 있어서는 매우 효과적이지만 재료와 용접 공정이 변경될 경우 여러 번의 시행착오를 반드시 수반하게 된다. 특히, HY-100강과 같이 기계적 물성을 향상시키기 위하여 다수의 합금 원소들이 첨가된 고강도강의 경우 용접부의 역학 특성에 미치는 상 변태의 영향이 매우 크므로<sup>3-5)</sup> 정도 관리 방안을 확보하기 위해서는 이를 고려한 정량적인 변형 예측 기법의 개발이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 용접시 발생하는 상 변태를 고려한 HY-100강 용접부 역학 특성 평가 기법을 정립하고, 이를 토대로 용접부의 횡 수축 및 잔류 응력 예측 기법을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 균일 분포의 체적 열원을 이용하여 용접부의 냉각 속도를 평가하고, high speed quenching dilatometer로 측정된 열 변형 거동 특성 결과를 토대로 상 변태를 고려한 유한요소해석 기법을 정립하고자한다. 그리고 제안된 해석 기법을 통하여 HY-100강의 횡 수축과 종 수축을 유발하는 잔류응력 거동을 평가하고, 이 결과를 토대로 변형 및 응력에 의한 종 수축 하중 예측 기법을 제안하고자 하였다.

## 2. 실험 및 해석 방법

### 2.1 실험

Table 1은 본 연구에서 사용한 HY-100강의 화학 조성을 나타내고 있다. Table 1에서 HY-100강의 탄소 함량은 0.168wt% 수준이지만은 강도와 인성 향상을 위해 첨가된 합금원소에 의해 탄소 당량은 0.786으로 비교적 높은 수준이다.

HY-100강의 마르텐사이트 변태에 의한 부피 팽창 정도 및 실제 용접 조건에 따른 냉각 속도별 마르텐사이트 분율을 측정하기 위해 냉각 속도를 달리하며 high speed quenching dilatometer 실험을 수행하였다. Table 2는 본 실험에서 사용된 dilatometer 실험 장치의 제원을 나타낸 것이다. 실험시 사용된 냉각 속도는 HY-100강의 용접 조건에 대한 용접부 열전달 해석을 통해 평가된 용접부의 최소 및 최대 냉각 속도 범위로 부터 결정하였으며, HY-100강의 온도에 따른 열팽

**Table 1** Chemical compositions of HY-100 steel (unit : wt%)

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| C     | Si    | Mn    | P     | S     |
| 0.168 | 0.260 | 0.273 | 0.006 | 0.003 |
| Mo    | Cu    | Ni    | Cr    | Al    |
| 0.373 | 0.010 | 3.067 | 1.465 | 0.032 |

**Table 2** Specification of high speed quenching dilatometer

| Max. Heating Temp. [°C] | Max. rate [°C/min] |         | Specimen Size |
|-------------------------|--------------------|---------|---------------|
|                         | Heating            | Cooling |               |
| 1500°C                  | 4200               | 1800    | ∅3×10mm       |

**Table 3** Welding conditions and dimension of the test specimen

|                   |                |           |
|-------------------|----------------|-----------|
| Welding Condition | Current        | 600A      |
|                   | Voltage        | 29V       |
|                   | Speed          | 700mm/min |
|                   | Heat Intensity | 14.7kJ/cm |
| Specimen Size     | Width          | 400mm     |
|                   | Length         | 1000mm    |
|                   | Thickness      | 14.5mm    |

창 계수(coefficient of thermal expansion, CTE)를 계산하였다. 이상의 결과를 바탕으로 HY-100강 용접부의 용접 변형 및 잔류응력을 해석할 수 있는 유한요소해석 모델을 개발하고 Table 3의 용접 조건 및 시험편에서의 잔류응력 거동을 hole drilling method (ASTM E837)를 이용하여 평가함으로써 개발된 모델의 타당성을 검증하였다.

### 2.2 유한요소해석

냉각 속도 및 용접부 역학 특성 평가를 위한 용접부의 온도 구배는 준 정상 상태 조건<sup>6)</sup>을 가정하여 2차원 열 전달 해석을 이용하여 평가하였으며, 용접 아크에 의한 열 하중 조건으로 체적 열원(body heat flux)을 적용하였다. 그리고 용점(1450°C)이상으로 가열되는 영역에서는 고상에서 액상으로 천이되는 상 변화를 고려하기 위하여 잠열 효과를 도입하였으며<sup>7)</sup>, 액상 용착 금속의 유동에 따른 열 전달 효과는 유효 열 전달 계수를 도입하여 고려하였다.

변형 및 잔류응력을 위한 비선형 열 탄소성 해석은 용접선 방향으로의 변위를 제어하는 generalized plane strain condition을 적용하였으며, 용접 부재의 하부 표면에 위치한 절점에서 잔류 각 변형과 역 방향의 변형을 유발하는 자유도를 구속하였다<sup>8)</sup>. 그리고 모재의 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하며, 항복 개시는 von-Mises 항복 조건을 적용하였다. 또한, HY-100강의 상 변태 모델을 구현하기 위해 USDFLD와 UEXPAN으로 명명되는 2개의 ABAQUS용 user subroutine을 개발하였다<sup>9)</sup>. 본 고에서 개발한 subroutine 중 USDFLD는 열전달 해석을 통해 구한 온도 이력 데

이터를 이용하여 가열 및 냉각시 발생하는 상 분율을 결정하기 위하여 적용되었으며, UEXPAN은 USDFLD를 통해 결정된 각 상의 분율과 각 요소의 온도 이력을 통해 가열 및 냉각시 열 팽창율을 결정하는데 적용되었다.

### 3. HY-100강의 용접부 해석 모델 개발

#### 3.1 용접 입열 모델

HY-100강의 high speed quenching dilatometer 실험시 적용할 냉각 속도를 결정하기 위해서는 용접부의 온도 구배에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 한다. 이에, 본 연구에서는 용접부 온도 이력에 대한 용접 실험 결과 및 체적 열속을 적용한 해석 결과를 비교함으로써 입열 모델의 타당성을 평가하였다.

Fig. 1은 HY-100강의 SA butt 용접부에서 온도 이력에 대한 실험 및 해석 결과를 도시한 것이다. 용접부에 부착된 열전대를 통해 측정된 온도 이력은 해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 사용한 체적 열원을 이용한 각 용접 조건별 냉각 속도 결정 방법<sup>10)</sup>이 타당함을 의미한다.

#### 3.2 상 변태 해석 모델

HY-100강의 상변태 모델의 개발에 앞서 dilatometer 실험을 위한 냉각 속도 조건은 전질의 용접 입열 모델과 HY-100강의 용접 조건을 이용한 용접부 온도 이력 평가를 통해 결정하였다.

Fig. 2는 15mm 두께의 HY-100강 bead-on 용접부에서 22kJ/cm을 적용한 경우 용접부의 각 위치에서 온도 이력을 HY-100강의 연속 냉각 곡선에 도시한 것이다. Fig. 2에서 용접 입열량이 22kJ/cm인 경우 용접부의 최소 냉각 속도는 약 420°C/min (7°C/sec)로

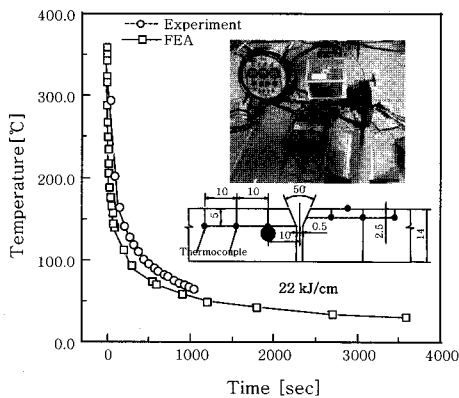


Fig. 1 Comparison of temperature changes of FEA and experiment at the SA butt weldment

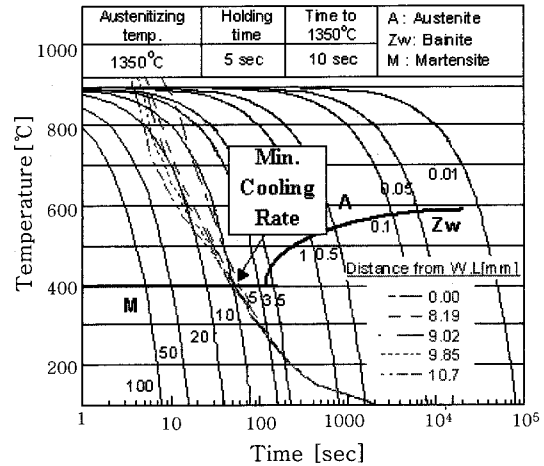


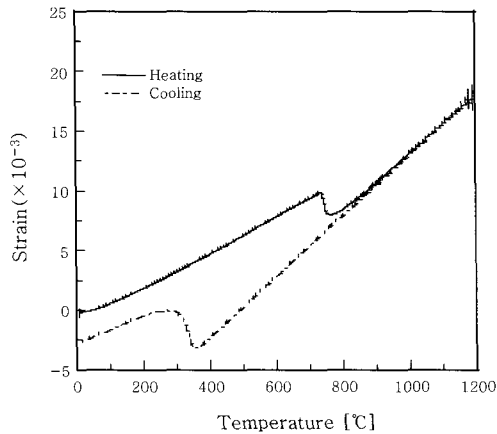
Fig. 2 Temperature changes at the butt weld when heat input is 22kJ/cm and CCT diagram of HY-100 steel

마르텐사이트 변태가 발생하는 냉각 속도인 210°C/min (3.5°C/sec)보다 빠름을 알 수 있다. 일반적으로 용접부의 냉각 속도는 입열량과 주판의 두께가 증가함에 따라 감소하기 때문에 HY-100강 용접부에서의 냉각 속도는 420°C/min보다 클 것으로 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2의 결과를 바탕으로 dilatometer 실험시 냉각 속도 기준을 240~1200°C/min (4~20°C/sec)로 선정하였다

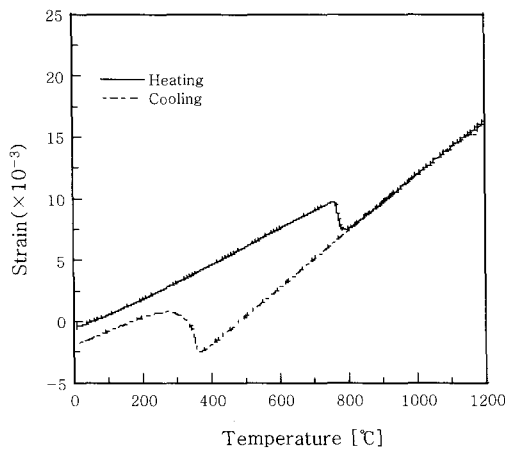
Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 최소 및 최대 냉각 속도에 대한 dilatometer 실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 3과 같이 최소 및 최대 냉각 속도에 따른 열 변형율의 변화는 거의 유사함을 알 수 있으며, 마르텐사이트 변태 개시 온도(Ms)와 종결 온도(Mf)는 359와 275°C이다. 여기서, 냉각 속도의 차에 따른 열 변형율의 유사성은 본 고에서 선정된 냉각 속도 조건하에 HY-100강 용접부의 마르텐사이트 생성율이 거의 유사함을 의미하는 것이다.

열 변형율과 상 변태에 의해 발생하는 변형율이 등방성이고 재료가 저합금강일 경우, dilatometer 실험 결과를 통해 평가된 상 변태 구간에서의 열 변형율과 재료의 격자 상수들을 이용해 상 변태 영역에서 온도에 따른 상 분율을 계산할 수 있다<sup>11)</sup>. Fig. 4는 각 냉각 속도별 상 변태 온도 영역에서의 마르텐사이트 상 분율의 변화를 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 각 냉각 속도 조건에서 온도에 따른 마르텐사이트 생성률은 거의 유사하며, 냉각 종료시 마르텐사이트 분율은 모두 0.9를 초과함을 알 수 있다.

Fig. 5는 모재의 냉각 속도가 각각 240, 660, 그리고 1200°C/min인 경우 dilatometer 시편의 경도치와



(a) 240°C/min (4°C/sec)



(b) 1200°C/min (20°C/sec)

Fig. 3 Behaviors of thermal strain of HY-100 steel with cooling rate using dilatometer test

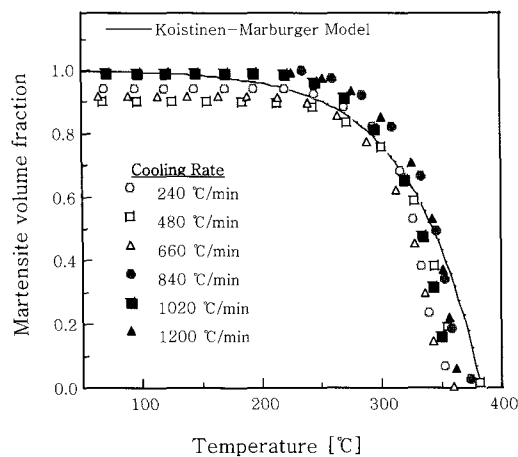


Fig. 4 Comparison of martensite volume fraction at various cooling rate

각 정도치에 해당하는 시편의 조직 사진을 도시한 것이다. Fig. 5에서 dilatometer 시편들의 정도는 모재 정도에 비해 크게 증가한다. 그러나 선정된 냉각 속도하에서 거의 일정한 값을 가지며, 미세 조직 또한 매우

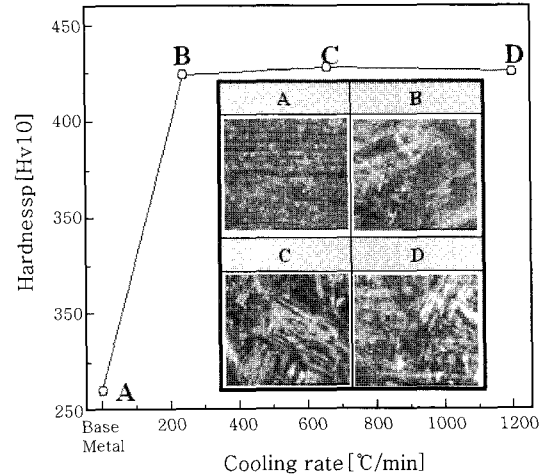


Fig. 5 Results of Vickers hardness test and microstructure of HY-100 after dilatometer experiment

유사하다. 이상의 결과로부터 본 고의 해석 조건 즉, 용접 입열량이 22kJ/cm이하이고 용접부의 두께가 15mm이상인 경우 HY-100강의 SA butt 용접부에서는 100% 마르텐사이트 변태가 발생함을 알 수 있다.

마르텐사이트 변태 영역에서 상 변태에 의한 상 분율의 변화는 식(1)의 율속(kinetics) 모델을 이용하여 평가하였다<sup>12)</sup>.

$$m = 1 - \exp[-K(Ms - T)] \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 마르텐사이트 분율,  $Ms$ 는 마르텐사이트 변태 개시 온도,  $T$ 는 분율 계산 온도 그리고, 상수  $K$ 는 Fig. 4의 상 변태 온도 영역에서의 온도에 따른 마르텐사이트 상 분율의 거동을 회귀 분석을 통하여 결정된 상수이다.

이상의 HY-100강 용접부의 상 변태 거동 특성 평가 결과와 2.2에서 기술한 상 변태를 위한 유한요소해석 모델의 타당성을 평가하기 위하여 dilatometer 실험 조건과 사용된 시편에 대하여 온도에 따른 열 변형률의 거동을 평가하고 이를 실험 결과와 비교하였다. Dilatometer 실험시 사용된 시편이  $\varnothing 3 \times 10$ mm의 중실 원통형이므로 해석시 축대칭 요소를 사용하여 실제 모델의 1/4의 단면에 대해서만 요소망을 구성하였다.

Fig. 6은 dilatometer 실험에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과의 비교를 도시하고 있다. Fig. 6에서 온도에 따른 변형량에 대한 유한요소해석 결과(○)와 실험 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 HY-100강의 상 변태 거동을 평가하기 위해 본 연구에서 개발된 해석 모델은 타당함을 알 수 있다.

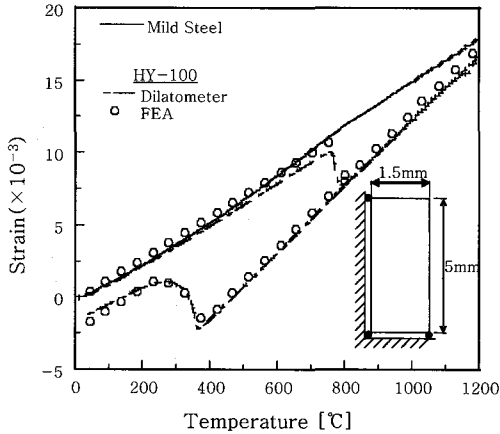


Fig. 6 Comparison of thermal strain obtained from FEA and dilatometer test

#### 4. HY-100강 용접부의 잔류 응력 및 수축량

##### 4.1 HY-100강의 SA 용접부 잔류 응력

Fig. 7은 주판의 두께가 15mm인 HY-100강 bead-on SA 용접부의 중심에서 상 변태 고려 유무와 가열 및 냉각시 온도에 따른 용접선 방향의 잔류 응력의 변화를 나타내고 있다. 가열 초기 용접부는 압축 응력을 받으나 온도 상승에 따라 항복 응력의 감소로 인해 압축 응력이 감소함을 알 수 있다. 또한, 오스테나이트 변태 구간에서의 상 변태에 따른 응력의 변화는 보이지 않는데, 이는 용접중 발생하는 전체 변형률이 탄성 변형률, 소성 변형률, 온도 증가에 따른 열 팽창률, 그리고 변태에 따른 변태 팽창률의 합으로 나타나는데 변태에 따른 변태 수축률이 온도 증가에 따른 열 팽창률에 비하여 매우 작기 때문이다. 용접부의 냉각시 용접부의 수축이 모재의 구속에 기인하여 인장 응력이 유발되며,

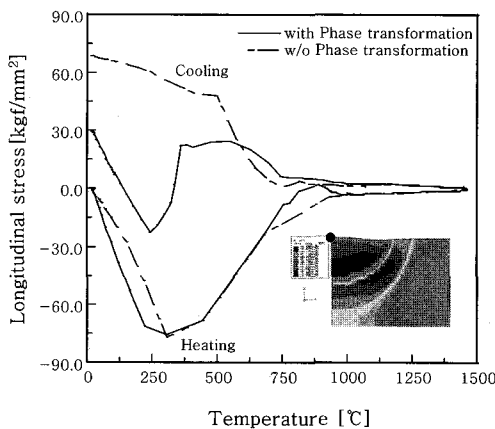


Fig. 7 Changes of the longitudinal residual stress at the center of the bead-on SA weldments of HY-100 with and without phase transformation

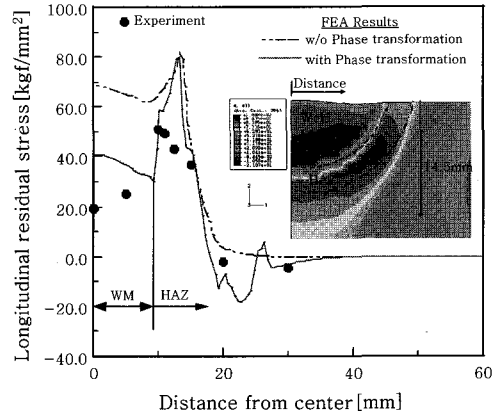


Fig. 8 Comparison of longitudinal residual stress distribution at the SA bead-on weldment of HY-100 using FEA and experiment

온도가 감소함에 따라 모재의 항복 응력과 비례하여 증가한다. 그러나, 용접부에 마르텐사이트 상 변태가 발생하는 경우 상 변태에 의한 체적 팽창으로 인해 압축 응력이 작용함으로써 용접부 중심에서 인장 잔류 응력이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8은 HY-100강 용접선 방향으로 발생한 잔류 응력에 대한 용접부의 마르텐사이트 상 변태를 고려한 유한요소해석과 HDM을 이용한 계측 결과를 비교하여 도시한 것이다. 일반적으로 용접선 방향의 잔류 응력은 용접선 근처에서 항복 응력 수준으로 크게 나타나지만, HY-100강 용접부에 대한 해석 및 실험 결과에서는 용접선 중심에서 모재 항복 응력의 절반 수준의 인장 잔류 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 HY-100강 용접부에서의 마르텐사이트 변태에 의한 체적 팽창으로 인해 발생한 압축 응력에 기인한 것이며, 해석 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 HY-100강 SA 용접부의 수축

Fig. 9는 용접 입열량(Q)과 용접부의 면내 강성(Di)의 비에 따른 HY-100강의 bead-on SA 용접부의 횡 수축량(δ)의 거동에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 도시한 것이다. Fig. 9와 같이 횡 수축량은 모재에 관계없이 면내 강성(Di)에 대한 입열량(Q)의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있으나, 마르텐사이트 상 변태에 따른 체적 팽창을 수반하는 HY-100강 SA 용접부의 횡 수축량은 일반 탄소강 SA 용접부의 변형률<sup>13)</sup>에 비하여 다소 낮은 수준임을 알 수 있다. 그리고, HY-100강 SA 용접부의 해석 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이상의 실험 및 해석 결과를 토대로 본 연구에서는 HY100강

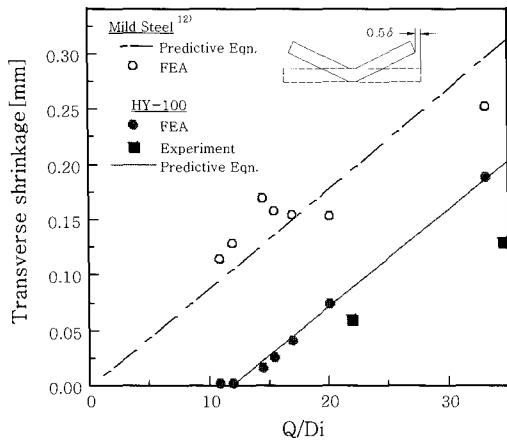


Fig. 9 Variation of transverse shrinkage obtained from FEM and experiments with Q/Di in the HY-100 weldment

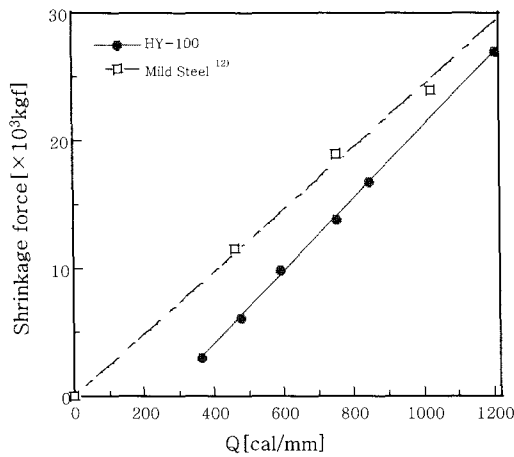


Fig. 10 Variations of longitudinal shrinkage force with heat input(Q) at the SA butt weldment

의 SA 용접부의 횡 수축량( $\delta$ )을 식(2)와 같이 용접 입열량(Q)과 면내 강성(Di)의 선형 함수로 정의하였다.

$$\delta = f \left( \frac{Q}{Di} \right) \quad (2)$$

Fig. 10은 HY-100강의 bead-on SA 용접부의 용접 입열량(Q)에 따른 용접선 방향의 잔류 응력을 이용하여 평가된 종 수축 하중(SFL)에 대한 유한 요소 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 10과 같이 연강<sup>13)</sup>과 HY-100강의 용접선 방향의 종 수축 하중(SFL)은 모두 용접 입열량에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 있으나, HY-100강 SA 용접부의 종 수축 하중은 연강의 SA 용접부의 종 수축 하중에 비해 작음을 알 수 있다. 또한, HY-100강의 항복 응력(70kgf/mm<sup>2</sup>)이 연강의 항복 응력(24kgf/mm<sup>2</sup>)의 약 3배임을 고려

하면 HY-100강의 항복 강도 대비 수축 하중은 연강에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 HY-100강의 마르텐사이트 변태로 인한 체적 팽창에 기인하여 인장 잔류 응력 크기가 감소하기 때문이다. 이상의 해석 결과를 토대로 HY100강의 SA 용접부의 종 수축 하중(SFL)을 식(3)과 같이 용접 입열량(Q)의 선형 함수로 정의하였다.

$$SF_L = f(Q) \quad (3)$$

### 5. 결 론

상 변태를 고려한 HY-100강 SA 용접부의 수축량 및 잔류응력 특성을 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HY-100강에 대한 열 변형을 실험 결과를 토대로 계산된 열팽창 계수와 유한요소해석기법을 토대로 HY-100강의 상 변태를 고려한 용접 변형 및 잔류 응력 평가 기법을 정립하고, 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.
- 2) HY-100강 SA 용접부에서 발생하는 최대 잔류 응력은 냉각시 마르텐사이트 상 변태에 의한 체적 팽창의 효과로 모재 항복 강도의 1/2 수준이며, 용접 수축량은 용접 입열량이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.
- 3) HY-100강 SA 용접부에서 발생하는 횡 수축량 및 종 수축 하중은 각각 용접 입열량(Q)과 면내강성(Di)의 비와 용접 입열량(Q)에 대한 선형 함수로부터 계산할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structure(1st Edition), Pergamon Press, 1980
2. Okerblom, N. O. : The Calculation of Deformations of Welded Metal Structures, Her Majesty's Stationery
3. R. I. Karlsson and B. L. Josefson : Three- Dimensional Finite Element Analysis of Temperature and Stresses in a Single-Pass Butt-Welded Pipe, J. Pressure vessel technol, Trans. ASME, **112-1** (1989), 76-84
4. V. J. Papazoglow and K. Masubushin : Numerical Analysis of Thermal Stresses During Welding Including Phase Transformation Effects, J. Pressure vessel technol., Trans. ASME, **104-3** (1981), 198-203
5. A. B. Andersson : Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations, Trans. of ASME, **100-10** (1978), 356-362
6. Yukio Ueda and Taketo Yamakawa : Analysis of

- thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element analysis, *Trans. of JWS*, **2-2** (1971), 90-98
7. E. Friedman : Thermo-mechanical analysis of the welding process using the finite element method, *J. Pressure vessel technol, Trans. ASME*, **97-3** (1975), 209-213
  8. Satoh K., Terasaki T. : Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials, *Trans. of JWS*, **45-4** (1976), 54-60
  9. HKS Inc. : ABAQUS User's Manual, Version 6.3., HKS Inc., 2003
  10. Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures : Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, *Journal of KWS*, **23-6** (2005), 1-7 (in Korean)
  11. S.-J. Lee, M.T. Lusk and Y.-K. Lee : Conversional Model of Transformation Strain to Phase Fraction in Low Alloy Steels, *Acta Materialia*, **55** (2007), 875-882
  12. D. P. Koistinen and R. E. Marburger : General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite transformation in Pure Iron-Carbon Irons and Carbon Steels, *Acta Metallurgica*, **7** (1959), 59-60
  13. S.B Shin and D.J. Lee : A Study on the Prediction of Shrinkage during the Manufacturing of a Deckhouse of RIG, the 13th annual conference of ISOPE, (2003)