

## 듀플렉스 스테인리스강 용접부의 잔류응력 특징에 관한 실험적 연구

# Experimental Study on the Characteristics of Residual Stress in Welds of Duplex Stainless Steel

Juntai Jeon<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, 100, Inharo, Nam-Gu, Incheon 22212, Republic of Korea

---

### ABSTRACT

Duplex stainless steel finds increasing use as an alternative to austenitic stainless steel, particularly where chloride or sulphide stress corrosion cracking is of primary concern, due to the excellent combination of strength and corrosion resistance. During welding, duplex stainless steel does not create the same magnitude or distribution of weld-induced residual stresses as those in welded austenitic stainless steel due to the different physical and mechanical properties between them. In this work, an experimental study on the residual stresses in butt-welded duplex stainless steel is performed utilizing the layering technique to investigate the characteristics of residual stresses in the weldment.

---

### KEYWORDS

duplex stainless steel  
welds  
residual stress  
phase transformation

---

듀플렉스 스테인리스강은 일반 오스테나이트계 스테인리스강과는 다른 열적, 기계적 성질로 인하여 일반 스테인리스강과는 다른 잔류응력 크기와 분포를 가진다. 따라서 듀플렉스 스테인리스강을 강구조물에 적용시키기 위해서는 용접부의 잔류응력 특성에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 듀플렉스 스테인리스강 용접시 발생하는 잔류응력을 스트레인 게이지를 이용한 응력 이완법을 이용하여 실험적으로 측정하여 용접부의 잔류응력 특징을 조사하였다.

---

듀플렉스 스테인리스강  
용접부  
잔류응력  
상변태

---

© 2017 Society of Disaster Information All rights reserved

---

\* Corresponding author. Tel. 82-32-870-2235. Fax. 82-32-870-2510. Email. [jtjeon@inhac.ac.kr](mailto:jtjeon@inhac.ac.kr)

---

### ARTICLE HISTORY

Received Feb. 25, 2017  
Revised Mar. 8, 2017  
Accepted Jun. 30, 2017

## 1. 서론

스테인리스강은 전통적으로 구조공학분야에 쓰이기에는 사치스러운 재료로 여겨져 왔다. 결과적으로 스테인리스강의 주재료로서의 건설 분야에 적용은 특수 구조물에 제한되어 왔다. 이는 스테인리스강에 대한 이해부족, 제한된 설계기준과 표준화의 부재, 그리고 높은 초기비용 등의 이유 때문이었다. 하지만, 지난 20년간 스테인리스강에 대한 많은 연구로 인해 새로운 설계기준이 등장하고, 스테인리스강에 대한 이해의 폭이 커지고, 유지관리의 중요성이 대두 되면서 스테인리스강을 건설 분야에 적용하려는 움직임이 커지고 있다. 최근에는 일반 오스테나이트계 스테인리스강의 조직인 오스테나이트(austenite)와 탄소강의 주 조직인 페라이트(ferrite)가 거의 동일하게 섞여 있는 듀플렉스(duplex) 스테인리스강이 개발되어 각종 산업분야에서 적용되고 있으며 건설 분야에서도 일부 적용이 되고 있다(Diaz et al., 2010; Iris, 2008; Mourad et al., 2012). 듀플렉스 스테인리스강은 일반적으로 많이 쓰이는 오스테나이트계 스테인리스강과 많은 유사점을 가지고 있지만, 구조물 설계 시에 오스테나이트계 스테인리스강과는 다르게 다루어져야 할 물리적 성질을 가지고 있다. 영율과 항복응력 등과 같은 직접적인 차이점 이외에도 응력-변형을 곡선, 냉간 성형시 및 고온에서의 거동 등의 차이가 발생한다. 따라서 듀플렉스 스테인리스강을 강구조물에 적용하기 위해서는 이러한 역학적 특성에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

일반 구조용 강재와 마찬가지로 듀플렉스 스테인리스강을 이용한 구조물 제작 시에는 필연적으로 용접이 이루어져야 한다. 용접은 고효율성 및 저비용 등의 장점으로 인하여 강 교량, 배, 자동차 등과 같은 많은 산업분야에서 폭넓게 사용되어지고 있다. 그러나, 용접시에는 용접열이 국부적으로 가해짐으로 인해 온도 차이가 발생하며, 이 온도차로 인해 국부적인 소성변형이 발생하여 필연적으로 용접잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 용접부 응력을 증가시키고, 피로강도를 감소시키며 취성파괴에 대한 취약성을 증가시킨다(Withers, 2007). 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 잔류응력에 대한 연구는 많이 수행되어져 왔으나, 듀플렉스 스테인리스강 용접부에서 발생하는 잔류응력에 대한 연구는 미진한 실정이다. 듀플렉스 스테인리스강은 일반 오스테나이트계 스테인리스강과는 다른 열적, 기계적 성질로 인하여 일반 스테인리스강과는 다른 잔류응력 크기와 분포를 가진다. 따라서 듀플렉스 스테인리스강을 강구조물에 적용시키기 위해서는 용접부의 잔류응력 특성에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 듀플렉스 스테인리스강 용접시 발생하는 잔류응력을 스트레인 게이지를 이용한 응력 이완법을 이용하여 실험적으로 측정하고, 수치해석을 통한 예측치와 비교함으로써 듀플렉스 스테인리스강 용접부의 잔류응력 특징을 조사하였다.

## 2. 듀플렉스 스테인리스강 용접부의 잔류응력 특징

### 2.1 실험편의 제작

듀플렉스 스테인리스강의 용접 시 발생하는 잔류응력의 특징을 조사하기 위해 미세조직 관찰 및 잔류응력 측정 실험을 수행하였다. 이를 위해 용접시편을 제작하였으며 시험편의 전체 폭(B)과 길이(L)는 500mm이고 두께(t)는 10mm의 크기로써 Fig. 1과 같은 형태로 제작하였다. 시편 제작 시 용접방법 및 용접재료는 Table 1과 같으며 용접재료의 기계적 성질 및 화학성분은 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 용접재료의 기계적 성질은 제조자의 성적서를 인용하였다. 예열은 하지 않고 본 용접을 실시하였으며 본 용접은 Table 4와 같이 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)로 총 6PASS 용접을 실시하였다. 패스 층간 온도는 150℃ 온도 쇼크를 사용하여 150℃ 이하가 되게 하였다.

Table 1. Welding Process and Material

| Base metal  | Welding process | Welding material      |
|-------------|-----------------|-----------------------|
| Duplex 2205 | GTAW            | Thermanit 22/09(2.4Φ) |

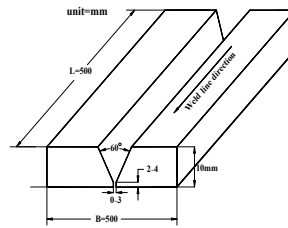


Fig. 1. Configuration of the test specimen

Table 2. Mechanical properties of duplex stainless steel

| Yield Stress (MPa) | Ultimate Stress (MPa) | Elongation (%) |
|--------------------|-----------------------|----------------|
| 550                | 700                   | 25             |

Table 3. Chemical composition of duplex stainless steel (mass, %)

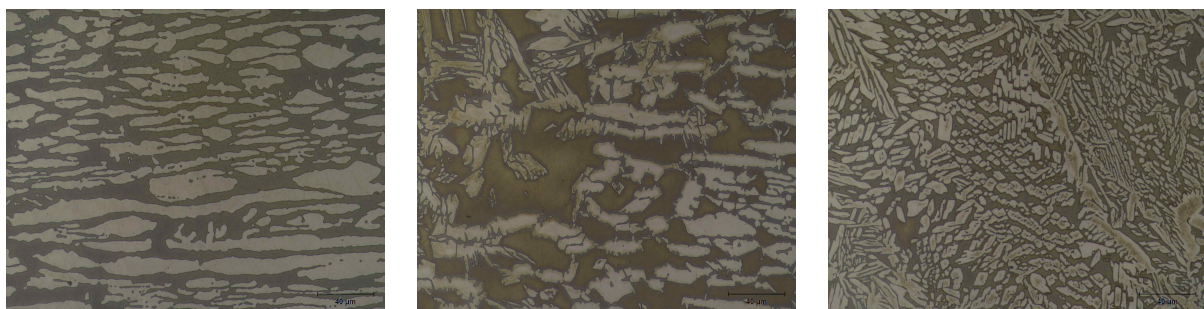
| C     | Si  | Mn  | Cr   | Mo  | Ni  | N    |
|-------|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 0.025 | 0.5 | 1.6 | 23.0 | 3.0 | 9.0 | 0.14 |

Table 4. Welding condition

| PASS | Current (A) | Voltage (V) | Speed (time) |
|------|-------------|-------------|--------------|
| 1    | 140         | 12          | 19' 11"      |
| 2    | 160         | 12          | 4' 45"       |
| 3    | 170         | 12          | 4' 50"       |
| 4    | 170         | 12          | 6' 50"       |
| 5    | 170         | 12          | 6' 15"       |
| 6    | 160         | 12          | 8' 20"       |

## 2.2 미세조직

용접이 끝난 후 용접부와 용접부 근방의 열영향부 및 모재를 절단하여 샘플을 채취 한 후 폴리싱(polishing)을 하고 2% Nital의 에칭제(etchant)를 이용하여 20~30초 동안 에칭한 후 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 사용한 광학현미경은 OLYMPUS PME3 모델로써 500배율의 크기로 미세조직을 촬영하였다. Fig. 2에 그 결과를 나타내었다. Fig. 2의 (a), (b), (c)는 각각 모재, 열영향부 및 용접부의 미세조직을 나타낸 것이다. 결과를 보면 모재에서는 오스테나이트와 페라이트(Austenite+Ferrite)의 혼합조직을 나타냄을 알 수 있으며, 용접시 오스테나이트화 온도 이상으로 가열된 열영향부에서는 오스테나이트와 페라이트 뿐만 아니라 마르텐사이트(Martensite)의 조직이 나타남을 알 수 있다. 그리고 용접부에서도 오스테나이트와 페라이트 및 마르텐사이트가 부분적으로 보이는 혼합조직을 나타냄을 알 수 있다. 즉, Duplex 2205 듀플렉스 스테인리스강은 용접중에 오스테나이트화 온도 이상으로 가열된 용접부와 열영향부에서 용접후 공기중에서 냉각하는 과정에서 상변태(마르텐사이트변태)가 발생함을 알 수 있다. 따라서 용접부 및 열영향부에서 상변태에 의한 잔류응력의 완화(Satoh 등, 1976; Taljat 등, 1998)는 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) Base metal (×500)

(b) Heated area (×500)

(c) Welding zone (×600)

Fig. 2. Images of Microstructure

### 2.3 잔류응력 측정

시편을 제작한 후 절단법으로 잔류응력을 측정하기 위해 게이지를 부착하였다. 사용된 게이지의 제원은 Table 5와 같으며 부착한 게이지의 위치는 Fig. 3.에 나타내었다. 용접부 및 열영향부에서의 잔류응력의 특징을 관찰하기 위해 용접부와 열영향부에 게이지를 집중해서 부착하였다. 게이지를 부착하고 초기변형률을 측정한 후 시편을 게이지 부분별로 Fig. 4.와 같이 절단법을 실시하여 잔류응력을 측정하였다.

Table 5. Characteristic of Gage

| Type           | EA  | Gage Factor | Size |
|----------------|-----|-------------|------|
| 2축 Strain Gage | 26개 | 2.09±1.0%   | 1mm  |

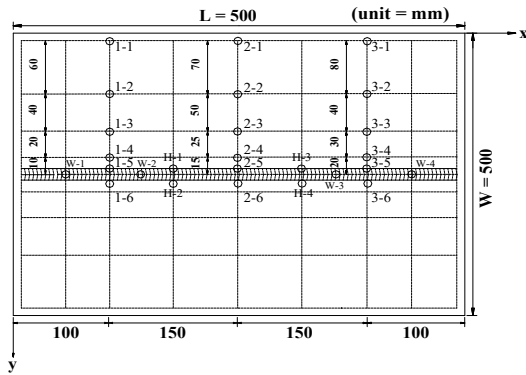


Fig. 3. Gage Point

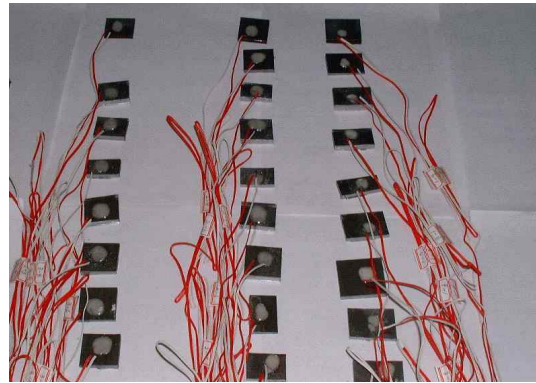


Fig. 4. Test Specimen

### 3. 듀플렉스 스테인리스강 용접부의 잔류응력 해석

#### 3.1 해석이론

기하학적 비선형 및 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 재료학적 비선형을 고려하였다. 8절점 Isoparametric 입체 유한요소를 도입하였으며, 기본식은 아래와 같다.

(1) 변위-변형률 관계식

요소의 전변형률은

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\}^T \quad \{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + \{\epsilon_L\} \quad (1)$$

여기서,  $\{\epsilon_0\}$ 와  $\{\epsilon_L\}$ 은

$$\{\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \partial_u / \partial_x \\ \partial_v / \partial_y \\ \partial_w / \partial_z \\ (\partial_w / \partial_y) + (\partial_v / \partial_z) \\ (\partial_u / \partial_z) + (\partial_w / \partial_x) \\ (\partial_v / \partial_x) + (\partial_u / \partial_y) \end{Bmatrix}$$

$$\{\varepsilon_L\} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{array} \right\}$$

{ε}을 증분형으로 나타내면,

$$\{d\varepsilon\} = [B]\{dw\} \tag{2}$$

[B] : 변위-변형을 매트릭스

(2) 응력-변형을 관계식

응력-변형을 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D_\sigma]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \tag{3}$$

여기서, [D<sub>σ</sub>] : 탄성의 경우는 [D<sub>σ</sub><sup>e</sup>],

소성의 경우는 [D<sub>σ</sub><sup>p</sup>]로 분리된다.

{C} : 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력증분에서의 영향

3) 평형방정식

유한요소의 절점력 {dF}와 절점변위 {dw}의 관계를 가상변위의 원리를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\{dF\} + \{L\} - \{dR\} = [K]\{dw\} \tag{4}$$

여기서

[K] : 요소의 구성 매트릭스

{dF} : 외력에 의한 요소의 등가 절점력 증분

{L} : 하중 수정 항

{dR} : 온도변화에 의한 요소의 등가 절점력 증분

식 (4)는 요소에 대하여 구하는 것이다. 따라서 이것을 계 전체에 대하여 구성해서 경계조건을 고려해 연립일차방정식을 풀면 절점변위증분 {dw}이 구해진다. 절점변위증분이 구해지면, 변위-변형을 관계식으로부터 요소의 변형이 계산되고, 구성 방정식으로부터 응력을 계산할 수 있게 된다.

**3.2 해석모델**

본 연구에 사용된 해석 모델은 Fig. 5.에 나타난 것과 같다. 실험조건과 동일한 시편 및 용접조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 수차례 기 발표 논문에서 검증된 3차원 해석 프로그램(장경호 등, 2002; 장경호 등, 2003)으로

써, 8절점 Isoparametric 입체유한요소를 도입하여 용접패스의 진행속도를 고려한 시간에 따른 이동열원을 이용하여 3차원 비정상 열전도 해석을 반모델(half model)로 수행하였다. 잔류응력의 해석은 열전도해석으로부터 구한 시간에 따른 각 절점에서의 온도를 하중으로 도입하여 3차원 열탄소성해석을 수행하였다. 3차원 비정상 열전도 해석 시 공기와 접하는 면에서 열은 대류가 되고 내부에서 열은 전도되는 것으로 하였다. 그리고 용접부를 모델링하기 위하여 용접이 진행되지 않은 요소는 강성이 없게 처리하고 용접이 끝난 후 온도에 따라 강성을 회복하는 것으로 하였으며 강제운동이 발생하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 온도 변화에 따른 재료의 물리정수는 및 기계적 성질은 각각 Fig. 6.과 Fig. 7.에 나타내었다.

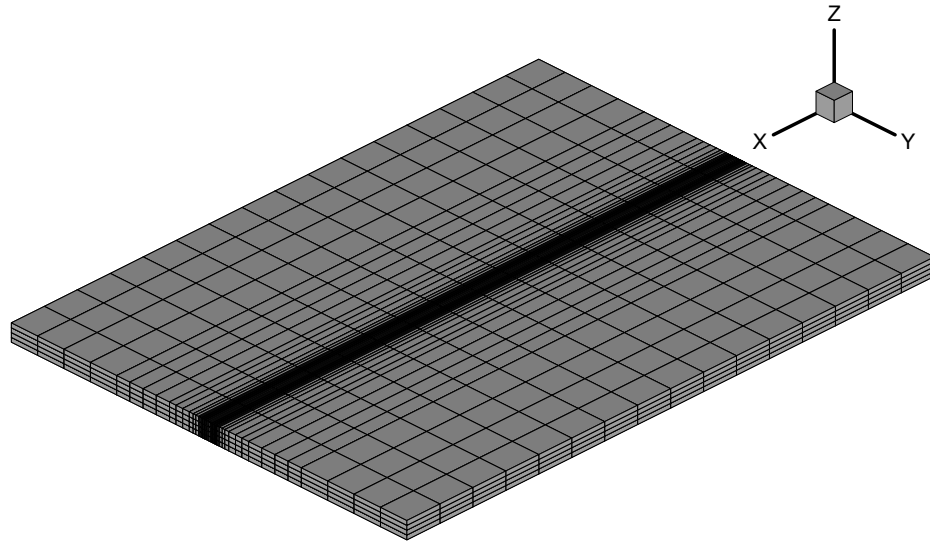


Fig. 5. FE Model

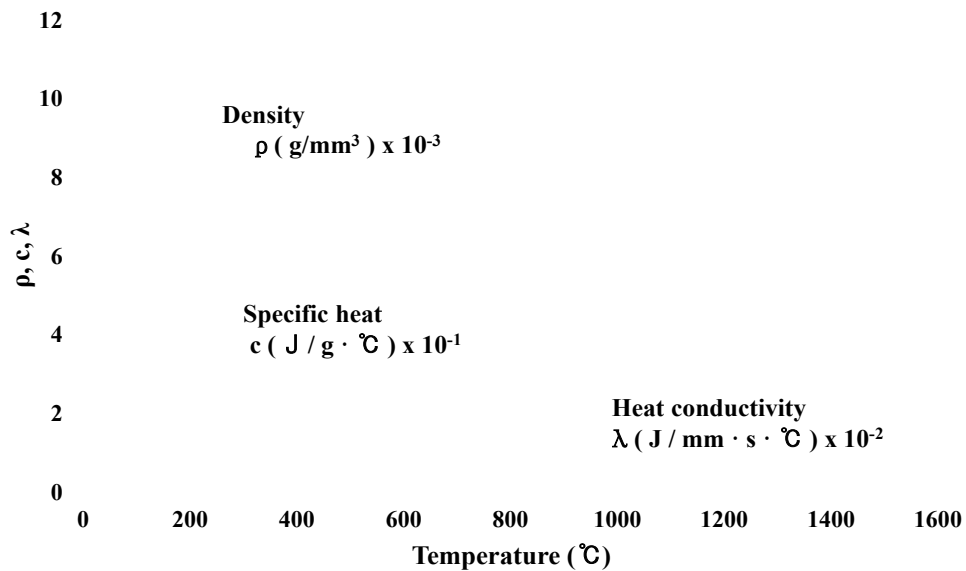


Fig. 6. Temperature-dependent thermo-physical constants of the material

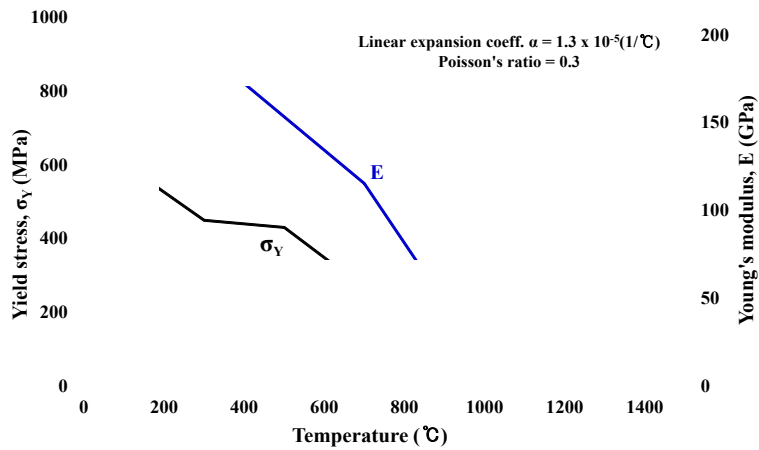


Fig. 7. Temperature-dependent thermo-mechanical properties of the material

### 3.3 잔류응력

Fig. 8.에 용접된 듀플렉스 스테인리스강 평판상단( $x = 250, z = 8$ )의 용접선방향축에서 직각방향으로의 잔류응력의 해석 결과를 나타내었다. 잔류응력은 용접선방향의 잔류응력에 주목하였다. 그리고 해석결과와의 비교를 위해서 절단법을 이용한 실험값을 함께 도시하였다. 결과를 보면 듀플렉스 스테인리스강의 용접부 및 열영향부에서는 실제 잔류응력 값이 해석치보다 상당히 작음을 알 수 있다. 이것은 Duplex 2205강은 용접 후 냉각하는 과정에서 상변태(마르텐사이트변태)에 의한 잔류응력의 완화가 발생하기 때문으로 사료된다. 따라서 듀플렉스 스테인리스강 용접부에서 발생하는 잔류응력을 정확하게 예측하기 위해서는 용접후 냉각하는 과정에서 발생하는 상변태를 고려해야 함을 알 수 있다.

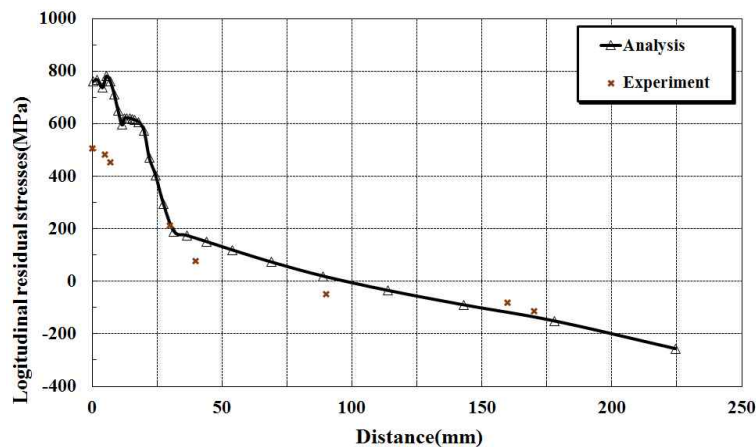


Fig. 8. Comparison of the FE result with the experiment (Longitudinal residual stress)

### 4. 결론

듀플렉스 스테인리스강은 일반 오스테나이트계 스테인리스강과는 다른 열적, 기계적 성질로 인하여 일반 스테인리스강과는 다른 잔류응력 크기와 분포를 가진다. 본 연구에서는 듀플렉스 스테인리스강 용접 시 발생하는 잔류응력의 특징을 조사하

기 위하여 듀플렉스 스테인리스강 용접시험체를 제작하여 모재를 비롯한 용접부 및 열영향부의 미세조직을 관찰하고 스트레인 게이지를 이용한 응력 이완법을 이용하여 용접시 발생하는 잔류응력을 실험적으로 측정하였다. 그리고 실험값을 3차원 열탄소성 유한요소 수치해석을 통한 예측치와 비교하였다. 본 연구를 통하여 Duplex 2205 듀플렉스 스테인리스강은 용접 후 냉각하는 과정에서 상변태(마르텐사이트변태)가 발생하며 이로 인하여 용접부 및 열영향부에서 잔류응력의 완화가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 통하여 듀플렉스 스테인리스강 용접부에서 발생하는 잔류응력을 정확하게 예측하기 위해서는 용접 후 냉각하는 과정에서 발생하는 상변태를 고려해야 함을 알 수 있었고 향후에는 상변태에 의한 잔류응력의 완화를 고려할 수 있는 수치해석 방법에 관한 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

## References

- Anderson, B.A.B. (1978). "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformation." Transaction of ASME, Vol.100, pp.110-123.
- Chang, K.H., Lee, J.H. (2002). "Analysis of Residual Stress in Welds Composed by Dissimilar Steels under Tensile Loads." Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.22, No.2-A, pp.201-210.
- Chang, K.H., Lee, J.H. (2003). "Characteristics of Residual Stress in Welds Composed of Similar or Dissimilar Steels." Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.15, No.3, pp.241-250.
- Díaz, J.J. del Coz., Menendez Rodriguez, P., Garcia Nieto, P.J., Castro-Fresno, D. (2010). "Comparative analysis of TIG welding distortions between austenitic and duplex stainless steels by FEM." Applied Thermal Engineering, Vol.30, pp.2448-2459.
- Iris, A-A. (2008). "Duplex stainless steels: brief history and some recent alloys." Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol.1, pp.51-57.
- Mourad, A-H.I., Khourshid, A., Sharef, T. (2012) "Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties." Materials Science Engineering A Vol.549, pp.105-113.
- Satoh, K., Terasaki, T. (1976). "Effect of transformation expansion on welding residual stresses distributions and welding deformation." Journal of JWS, Vol.45, No.7, pp.560-566.
- Satoh, K., Terasaki, T. (1976). "Effect of welding condition on residual stresses distribution in welded structures materials." Journal of JWS, Vol.45, pp.150-156.
- Withers, P.J. (2007). "Residual stress and its role in failure." Reports on Progress in Physics, Vol.70, pp.2211-2264.