

## SAF 2205 듀플렉스 스테인레스강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 냉각속도의 영향

오영주\* · 양원준\*\*† · 이종훈\*\* · 김두현\*\* · 유위도\*\* · 이재현\*  
\*창원대학교 재료공학과, \*\*재료연구소

### Effect of Cooling Rate on Microstructural and Mechanical Properties of SAF 2205 Duplex Stainless Steel

Y.J. OH\*, W.J. Yang\*\*†, J.H. Lee\*\*, D.H. Kim\*\*, W.D. Yoo\*\*, J.H. Lee\*  
†Dept. of Mat. Sci. & Eng., Changwon National Univ., Changwon 641-773, Korea  
\*\*Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon 642-831, Korea

**Abstract** Duplex stainless steel, which is a kind of stainless steel with a mixed microstructure of about equal proportions of austenite and ferrite, is generally known as a unique material with excellent corrosion resistance and high strength. However, toughness, strength, and corrosion resistance of the steel could be reduced due to precipitation of topologically closed packed phases such as sigma phase during cooling. In case of large forged products, they have strong possibility that  $\sigma$ -phase precipitates due to difference of cooling rate between surface and inner of the products. Investigation on sigma phase precipitation behavior of duplex stainless steel with change of cooling rate was carried out in this study. Forged SAF 2205 duplex stainless steel was used as specimens to examine the cooling rate effect. Dissolution behavior of sigma phase was also discussed through resolution test of duplex stainless steel containing lots of sigma phase. Experimental results revealed that impact energy was very sensitive to precipitation of small amount sigma phase. However, sigma phase could be removed by short term resolution treatment and impact resistance of the duplex stainless steel was restored.

(Received November 9, 2012; Revised December 22, 2012; Accepted January 7, 2013)

**Key Words** : Duplex Stainless Steel, Solution Treatment,  $\sigma$ -Phase

### 1. 서 론

오스테나이트 상과 페라이트 상이 동시에 존재하는 듀플렉스 스테인리스강은 우수한 내식성과 가공성의 장점을 지닌 강으로 극한 환경에서 높은 강도와 탁월한 내식성을 요구하는 구조재 등으로 널리 사용되고 있다. 극한환경에서 사용 증가로 인해 보다 향상된 특성이 요구됨에 따라 국내외적으로 이형스테인리스강의 특성을 개선하고자하는 연구가 다방면으로 진행 중이다[1-5]. 그러나 이형 스테인리스강은 높은 강도와 우수한 내식성의 장점이 있는 반면 Cr과 Mo의 함량을 증가시키기에 따라 특정 온도에서  $\sigma$ 상 같은 제 2상의 석출로 기계적 특성을 저하시키는 요인으로 문제시 되고 있다[1-8].

이러한  $\sigma$ 상의 석출은 생산 공정 중에 일정온도에 노출되어 생성되는데[8] 특히 대형 단조품의 경우 단조 및 열처리 후 냉각과정에서 내부까지의 냉각이 단시간에 균등하게 이루어지지 않아 생성되는  $\sigma$ 상으로 인해 인성과 내식성이 저하되고 있어 적절한 냉각으로  $\sigma$ 상의 생성을 억제하는 것이 중요하다.

이에 본 연구에서는 산업현장에서 광범위하게 사용되고 있는 SAF 2205의 듀플렉스 스테인리스강의 냉각속도에 따른  $\sigma$ 상의 석출거동과  $\sigma$ 상이 기계적 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

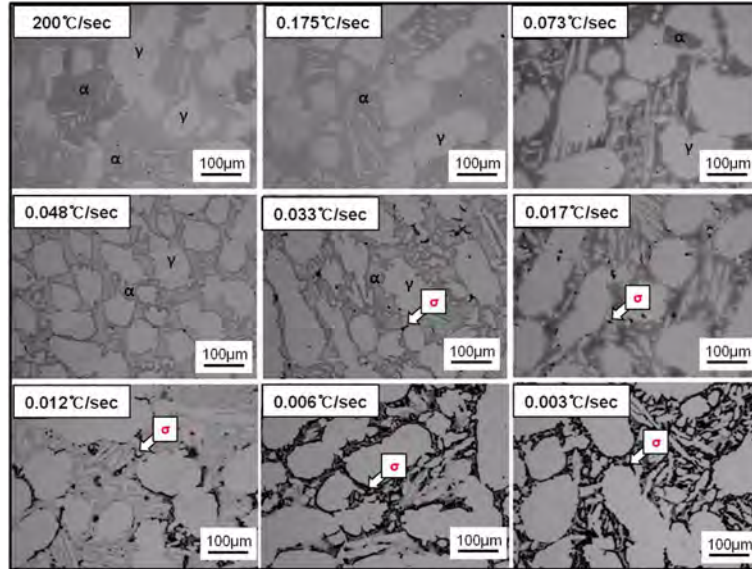
또한 열처리를 통한  $\sigma$ 상의 재고용열처리를 통한 거동과 기계적 특성과의 상관관계를 함께 알아보았다.

†Corresponding author. E-mail : wjyang@kims.re.kr  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

**Table 1.** Chemical compositions of SAF 2205 duplex stainless steel

(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.019	0.23	1.36	0.033	0.002	5.71	20.77	3.13	0.19	0.14

**Fig. 1.** Optical metallographs obtained from 2205 duplex stainless steel at various cooling rates after 1hr holding at 1050°C.

## 2. 실험방법

### 2.1 소재 및 열처리

사용된 소재는 단조상태인 SAF 2205 듀플렉스 스테인리스강이며, 화학조성은 Table 1에 나타내었다. SIC BOX Furnace에서 1050°C에서 1시간 용체화 처리 후 200°C/sec, 0.175°C/sec, 0.073°C/sec, 0.048°C/sec, 0.033°C/sec, 0.017°C/sec, 0.012°C/sec, 0.006°C/sec, 0.003°C/sec의 냉각조건에 따라 실험을 진행하였다. 그리고 인위적으로  $\sigma$ 상을 충분히 석출시키기 위해 900°C에서 13시간 유지 후 1050°C에서 3분에서 60분까지 재고용 열처리를 수행함으로써  $\sigma$ 상 거동변화를 관찰하였다.

### 2.2 미세조직 관찰 및 상분율 측정

용체화 처리 후 냉각속도와 시효처리에 따른 시편의 미세조직 관찰을 위해 각 시편들을 40 g NaOH + 100 ml H<sub>2</sub>O 전해 에칭액을 사용하여 1 V~3 V에서 20초 전해연마 한 후 광학현미경을 사용하여 관찰하였다.

또한 10 ml HNO<sub>3</sub> + 20 ml Glycerol + 30 ml HCl 용액으로 에칭 후 주사전자현미경을 사용하여 냉각속도에 따라 미세조직 변화를 관찰하였다.

석출물의 상분율 측정을 위해 영상분석기(image analyzer)를 사용하여 측정하였다.

### 2.3 기계적 특성평가

냉각속도와 시효처리에 따라 열처리한 시편에 대하여 상온인장시험과 충격시험을 실시하였다. 상온인장시험은 표점거리 25 mm 길이에 변형률게이지를 부착하여, cross head speed를 2 mm/min의 변형률속도로 시험하였다.

충격시험은 ASTM E8규격의 시험편을 사용하여 시험을 실시하였다.

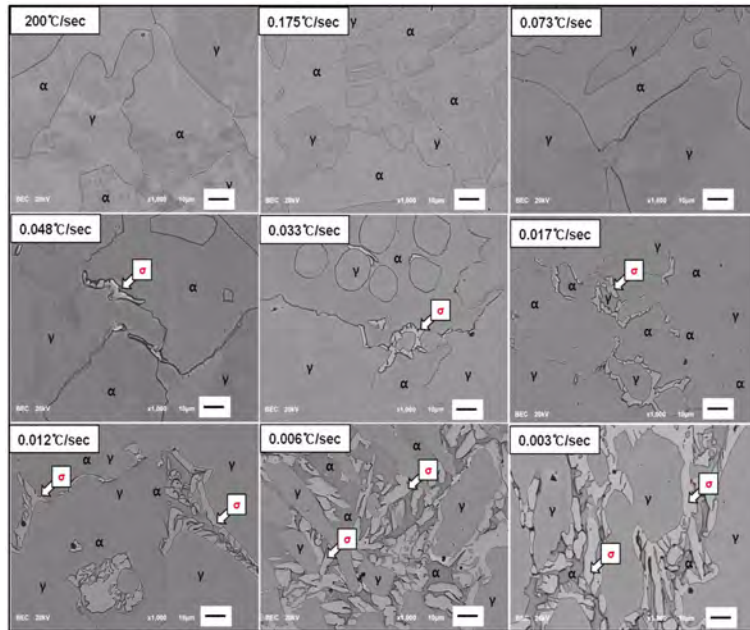
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 냉각 속도에 따른 미세조직 변화

Fig. 1은 냉각속도에 따라 광학현미경을 이용하여 미세조직변화를 나타낸 것이다. Fig. 1에서와 같이

**Table 2.** Volume fraction of  $\sigma$ -phase according to various cooling rates

	200°C/sec	0.175°C/sec	0.073°C/sec	0.048°C/sec	0.033°C/sec
$\sigma$ -phase (%)	0	0	0	0.25	0.33
	0.017°C/sec	0.012°C/sec	0.006°C/sec	0.003°C/sec	–
$\sigma$ -phase (%)	0.64	3.07	13.85	18.29	–

**Fig. 2.** SEM-BS images of 2205 duplex stainless steel at various cooling rates after 1hr holding at 1050°C.

냉각 조건에 따라 미세조직 관찰한 결과 구형에 가까운 오스테나이트와 기지조직의 페라이트로 혼합된 조직을 보여주고 있다. 냉각속도가 빠른 경우 (200°C/sec, 0.175°C/sec, 0.073°C/sec)는  $\sigma$ 상 석출이 일어나지 않았지만, 냉각속도 0.033°C/sec 조건에서부터는 페라이트/오스테나이트상 경계에  $\sigma$ 상이 석출되기 시작하였고, Table 2에서와 같이 정량 결과 냉각속도가 느려질수록  $\sigma$ 상의 분율이 급격히 증가하는 양상을 보였다. 0.048°C/sec에서부터 미세하게 석출되기 시작하여 0.012°C/sec에서 대략 3%, 0.006°C/sec 및 0.003°C/sec 에서는 10% 이상으로 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는  $\sigma$ 상의 생성은 냉각속도에 밀접한 영향이 있는 것으로 나타났다. 또한 냉각속도 0.003°C/sec부터 상대적으로 페라이트상의 분율은 감소하는 경향을 보였다. 이는 2차 오스테나이트와  $\sigma$ 상으로 페라이트의 변태가 이루어지면

서 나타나는 영향으로 보여진다[9].

Fig. 2는 10 ml HNO<sub>3</sub> + 20 ml Glycerol + 30 ml HCl용액으로 에칭 후 전자현미경으로 미세조직을 관찰한 것이다. 관찰한 결과  $\sigma$ 상의 형태는 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있었으며, 전체적으로 Fig. 1과 같이 동일하게 나타났다. 이에 각 상들에 대한 EDS (Energy Diffraction Spectroscopy)로 합금원소의 화학조성을 분석하였다(Table 3참조).  $\sigma$ 상은 오스테나이트와 페라이트에 비해 Cr과 Mo 함량이 높았으며, Ni량은 줄어들고 Cr과 Mo의 양이 늘어났다. 이는 기존 연구결과와 유사하게 나타났다[10].

Fe와 Cr, Mo는  $\sigma$ 상 형성에 용이하며,  $\sigma$ 상은 매우 단단하고 취성을 발생시키는 상으로 보고되고 있다 [7]. 또한, 냉각 속도 조건에 따른  $\sigma$ 상 석출 양상은 냉각속도가 느려질수록 페라이트의 분율이 감소하고 있음을 확인 할 수 있으며,  $\sigma$ 상의 분율이 증가하는

**Table 3.** SEM-EDS analysis for microstructure of a 2205 duplex stainless steel

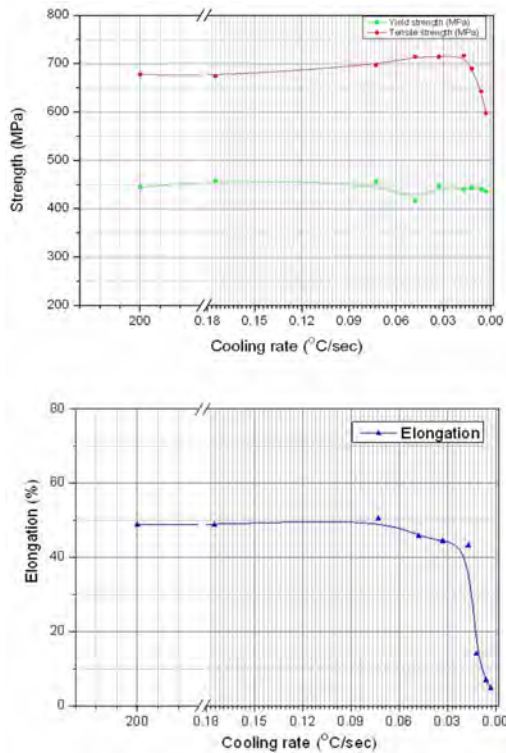
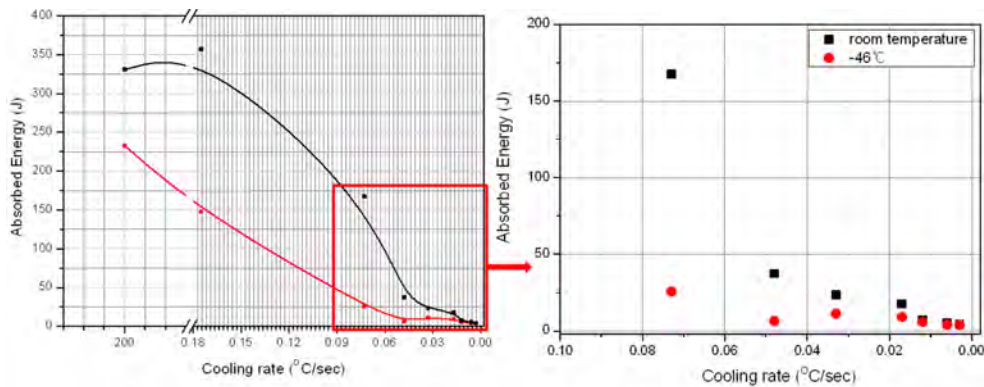
	Cr	Ni	Mo
$\gamma$	20.1	6.1	3.0
$\alpha$	25.9	2.8	3.5
$\sigma$	30.0	2.0	9.9

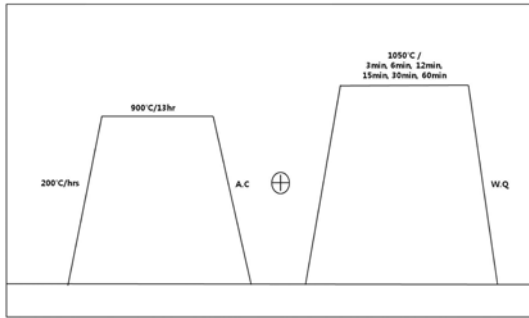
것을 확인하였다.

### 3.2 냉각 속도별 기계적 특성

Fig. 3은 냉각 조건별로 인장시험을 실시한 결과이다. 시험한 결과 냉각 조건별로 항복강도는  $\sigma$ 상의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났으며, 인장강도는 냉각속도가 느려짐에 따라 약간 증가하는 양상을 보이다 0.012°C/sec에서부터 조금씩 감소함을 보였다. 연신율의 경우 0.012°C/sec부터 급격히 감소하였다. 이 결과로 보아  $\sigma$ 상의 증가로 인해 강도적인 측면에서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 보여 지지만, 연신율의 경우에는  $\sigma$ 상의 증가에 따라 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 상온, 저온 충격시험을 실시한 것으로 상온 충격시험 결과 0.048°C/sec에서 급격히 감소함을 보이고 있다. 저온 충격시험 역시 같은 경향을 보이고 있으며,  $\sigma$ 상이 석출되기 시작하는 0.048°C/sec에서부터 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 인장시험에서와는 달리 0.25% 정도의 극소량  $\sigma$ 상으로도 충격인성이 급격히 저하되고 있음을 보여주고 있다. 따라서 충격인성 확보를 위해서는 제조과정 중에  $\sigma$ 상은 극소량이라 하더라도 제어되어야 할 것으로 판단된다.

**Fig. 3.** Tensile test results of 2205 duplex stainless steel for cooling rates.**Fig. 4.** Impact absorbed energy at room temperature and -46°C for 2205 duplex stainless steel for cooling rates.



**Fig. 5.** A diagram for  $\sigma$ -phase formation heat treatment and solution treatment time of 2205 duplex stainless steel.

### 3.3 $\sigma$ 상 생성 후 용체화 처리 시간에 따른 미세조직 변화 및 충격특성

앞선 냉각속도에 따른 충격시험에서 극소량의  $\sigma$ 상으로 충격인성이 급격히 저하됨을 확인하였다. 이에  $\sigma$ 상의 석출이 예상되는 온도 900°C에서 13시간 동안 유지시켜  $\sigma$ 상을 인위적으로 충분히 석출 시킨 다음 1050°C에서 유지시간을 변화시키는 재고용 처리를 하여  $\sigma$ 상의 분율 변화를 관찰하고자 하였다.

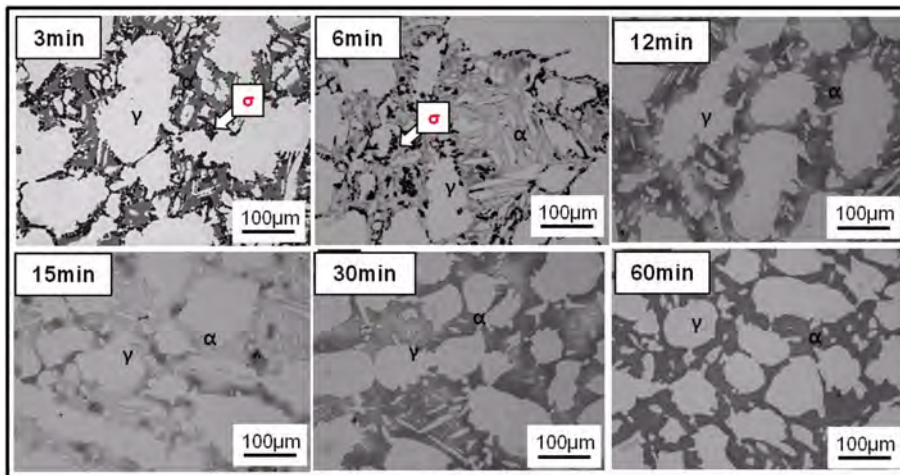
Fig. 6은 앞서 언급한바와 같이  $\sigma$ 상의 거동변화를 관찰하고자 900°C에서 13시간동안  $\sigma$ 상을 생성 시키는 열처리를 한 후 용체화 처리시간에 따라 미세조직 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 3분 정도의 용체화 처리에는  $\sigma$ 상이 거의 재고용이 되지 않았지만, 시간이 지남에 따라  $\sigma$ 상이 점점 고용

**Table 4.** Volume fraction changes of  $\sigma$ -phase for solution treatment time at 1050°C

	$\sigma$ -phase (%)
(a) 900°C-13 hr	15.6
(b) 1050°C-3 min	14.7
(c) 1050°C-6 min	12.6
(d) 1050°C-12 min	0.0
(e) 1050°C-30 min	0.0

되는 것을 알 수 있었다. 이에  $\sigma$ 상 정량 분석을 실시한 결과 900°C에서 13시간 동안 유지한 시험편의 경우 15.6% 정도의  $\sigma$ 상이 석출되었다. 용체화 처리 온도인 1050°C에서 3분, 6분 유지한 경우 14.7%, 12.6%로  $\sigma$ 상이 약간 감소하였으며, 유지시간 12분 이후부터는  $\sigma$ 상이 완전 고용된 형태를 보였다. 또한 주사전자현미경을 통해 관찰하여본 결과 용체화 처리 시간에 따른  $\sigma$ 상의 거동을 Fig. 7에서와 같이 재확인 할 수 있었다. 따라서  $\sigma$ 상이 석출되더라도 대략 30분 정도의 용체화 처리만으로도 충분히 재고용시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 용체화 처리 시간에 따른  $\sigma$ 상과 충격에너지의 상관관계를 나타낸 것이다.  $\sigma$ 상이 존재하는 3분, 6분은 각각 3.8J과 6.0J로 충격에너지가 매우 낮게 나타났다. 하지만 용체화 처리 시간이 12분, 15분, 30분인 경우는 328.1J, 327J, 320.1J로 나타났다. 이러한 결과로부터  $\sigma$ 상 재고용으로 인해 충격에너지가 회복되고 있음을 확인할 수 있었다.



**Fig. 6.** Microstructure changes by solution treatment times after 13hrs holding at 900°C.

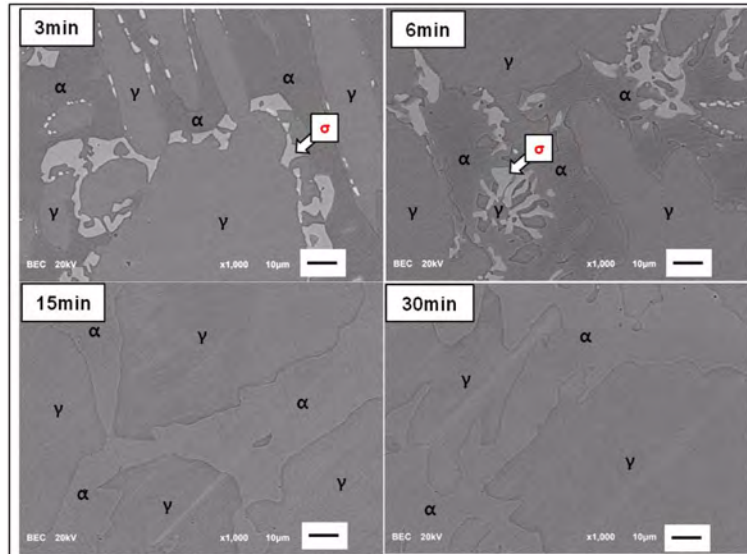


Fig. 7. SEM-BS images for microstructure treated by solution treatment with various holding times after 13 hrs holding at 900°C.

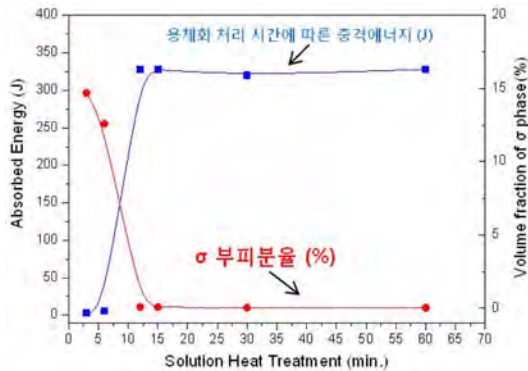


Fig. 8. A relationship between impact absorbed energy and volume fraction of  $\sigma$ -phase for 2205 duplex stainless steel treated by solution treatment time after 13hrs holding at 900°C.

#### 4. 결 론

SAF2205 듀플렉스 스테인리스강이 열처리 조건에 따른 상 분석 및 기계적 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉각속도가 빠른 경우  $\sigma$ 상이 석출되지 않았다. 그러나 0.048°C/sec의 조건에서부터 austenite와 ferrite의 경계에서 석출되기 시작하였고, 냉각속도가 느려질수록  $\sigma$ 상이 급격히 증가하는 경향을 보였다.
2. 냉각속도에 따른  $\sigma$ 상의 분율 증가는 항복강도와

인장강도에는 영향을 크게 미치지 않는 것으로 나타났다. 연신율의 경우 0.012°C/sec( $\sigma$ 상 분율 : 3.07%)부터 급격히 감소하였다. 충격시험은  $\sigma$ 상이 석출되기 시작하는 0.048°C/sec ( $\sigma$ 상 분율 : 0.25%)에서부터 급격히 감소하였다.  $\sigma$ 상의 석출은 듀플렉스 스테인리스강의 강도보다는 연신율과 충격 저항성을 급격히 감소시키는 것으로 판단된다.

3. 900°C에서 13시간 동안 노출시켜  $\sigma$ 상을 석출시킨 결과  $\sigma$ 상 분율은 15.6% 정도였으나, 재고용열 처리시간이 증가할수록  $\sigma$ 상 분율이 14.7%, 12.6%로 감소하다가 12분 이상 유지할 경우  $\sigma$ 상이 완전히 재고용되었으며, 이 조건의 충격에너지가 300J 이상으로 충격인성이 회복되는 것을 알 수 있었다. 따라서  $\sigma$ 상이 존재하더라도 최소 30분 정도의 용체화 처리로도 재고용시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

1. C. Y. Kang and J. H. Kim : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **49**, 3, 197-202.
2. F. B. Pickering, Int. Metals Reviews. December, p. **227** (1976).
3. C. S. Huang and C. C. Shih : Materials Science and Engineering A **402** (2005) 66-75.

4. L. H. Chiu, W. C. Hsieh, and C. H. Wu : Materials Science and Engineering A **354** (2003) 82-91.
5. J. I. Bae, S. T. Kim, T. H. Lee, H. Y. Ha, S. J. Kim, and Y. H. Park : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **49**, 2, 93-103.
6. J. I. Son, S. S. Kim, J. H. Lee, and B. H. Choi : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **41**, 3 (2003).
7. T. H. Lee, Y. C. Jung, and S. J. Kim : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **37**, 10 (1999).
8. T. H. Kang, Y. D. Lee, and C. S. Lee : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **36**, 7 (1998).
9. K. Massol, J. B. vofgt, and J. Foct, 310 (2002).
10. D. M. Escriba, E. Materna-Morris, R. L. Plaut, and A. F. Padilha : Materials Characterization **60** (2009) 1214-1219.