

0.2% N을 첨가한 수퍼 2상 스테인리스강의 열처리 조건에 따른 특성 평가

- 제1보: 기계적 특성 및 미세조직

안석환* · 강홍주** · 남기우***

*부경대학교 기계공학부

**부산해사고등학교

***부경대학교 신소재공학부

Characteristic Evaluation Based on the Heat Treatment Conditions of Super Duplex Stainless Steel with 0.2% N as an Additive - Part 1: Mechanical Properties and Microstructure

SEOK-HWAN AHN*, HEUNG-JOO KANG** AND KI-WOO NAM***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Busan Maritime High School, Busan, Korea

***Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Super duplex stainless steel 수퍼 2상 스테인리스강, Mechanical property 기계적 특성, Heat treatment condition 열처리 조건, Microstructure 미세조직

ABSTRACT: Super duplex stainless steel has along life in severe environments because of its strength and corrosion resistance. If 0.2~0.3% Nitrogen in an interstitial solid solution is added, the austenite structure is reinforced. This improves the solid solution hardening and the anticorrosionability. In this study, the mechanical properties and structures of the super duplex stainless steel with the 0.2% N additive were investigated to determine the effect of various volume fractions on the austenite phase. The various volume fractions and distributions of the austenite structure in the applied test specimens were obtained by changing the heat treatment temperature and cycle. The characteristics by amounts of the σ phase obtained from the precipitation heat treatment were also investigated. From the results, when the austenite volume fraction increases, the tensile strength decreases and elongation increases. And the σ phase was rapidly increased by increasing the heat treatment time. When the volume fraction of the σ phase increased, tensile strength increased.

1. 서 론

2상 스테인리스강은 우수한 가공성의 오스테나이트 조직과 우수한 내식성의 페라이트 조직이 약 50 : 50으로 매우 미세하게 결합된 구조를 가지고 있다. 또한 침입형 강화 원소인 N을 0.2~0.3% 정도 첨가하면 페라이트 조직에 비하여 상대적으로 강도가 낮은 오스테나이트 조직을 강화할 수 있다 (Davis, 1994; 강홍주, 2008; 안석환 등, 2008).

2상 스테인리스강은 304나 316 오스테나이트 스테인리스강에 비하여 항복 강도는 약 2~3배 정도 높고, 연신율은 약간 낮은데, 이러한 기계적 특성은 2상 스테인리스강을 구성하는 페라이트와 오스테나이트, 각 조직의 개개의 특성에 기인한다 (Davis, 1994). 또한 2상 스테인리스강은 염화물 분위기에서

응력부식저항성이 우수하고, 공식(Pitting)과 틈 부식(Crevice corrosion)에 대한 저항성이 매우 뛰어나다. 그리고 2상 스테인리스강에는 비교적 고가인 Ni이 일반 오스테나이트 스테인리스강의 약 1/2 정도 포함되므로 경제적 이점을 지니고 있다. 따라서 2상 스테인리스강은 우수한 내식성과 고강도가 함께 요구되는 용도에 가장 적합한 소재로 평가되어, 제지산업, 해양, 화학공정, 농업, 정유, 발전 산업 등의 구조재 및 파이프 재료로 사용되며, 최근에는 인체용 재료로 의료산업에 사용되는 등 다양한 분야에 활용되고 있다.

이와 같이 2상 스테인리스강에 대한 최근의 개발 동향은, 점점 가혹화되는 산업환경에서의 극심한 부식 환경과 높은 하중을 견딜 수 있도록 합금 원소 중에 Cr, N, Mo이나 W의 함량을 증가시키는 쪽으로 진행되고 있다. 이와 같은 원소들의 첨가량을 증가시킴으로써 우리가 원하는 내식성이나 강도 값에 비교적 용이하게 도달할 수 있지만, 이를 위해서는 합금 원소의 증가에 따라 발생할 수 있는 여러 가지 문제점들이

교신저자 남기우: 부산광역시 남구 용당동 산100번지

051-629-6358 namkw@pknu.ac.kr

발생하게 된다.

본 연구에서는 상용 수퍼 2상 스테인리스강보다 내식성과 고용강화를 상승시킬 목적으로 0.2%N을 첨가시킨 수퍼 2상 스테인리스강을 대상으로 하여 그 특성을 평가하였다. N의 첨가는 오스테나이트 상의 체적분률과 σ 상 석출 거동에 영향을 주고, 이들의 변화는 기계적 특성에 영향을 준다고 알려져 있다 (Charles, 1991; 1994; 강창룡 등, 1998; 도재운 등, 2001; 이상기 등 2000; 이상기, 2001). 이때 오스테나이트 체적분률은 열처리 조건을 변화시켜 달리하였다. 즉, 기계적 특성에 영향을 미치는 오스테나이트 체적분률과 σ 상 석출 거동을 조사하였다(강홍주, 2008; 안석환 등, 2008).

2. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 수퍼 2상 스테인리스강은 고주파 진공로를 사용하여 제작하였으며, 질소(N)는 용해 공정에 첨가하였다. 균질화 열처리는 1623K에서 실시한 후, 15mm 두께로 열간 압연하였다. 시험편의 화학성분은 Table 1에 나타낸다. 질소(N)는 고용강화에 의한 강도의 향상, 페라이트와 오스테나이트의 체적분률을 변화시키기 위하여 0.2% 첨가하였다.

오스테나이트 상의 체적분률 변화와 σ 상 석출을 위한 시험편의 열처리는 Fig. 1과 같은 조건으로 실시하였다. 열간 가공은 1623K에서 30분 동안 실시한 후 수냉하였다. 그 후 시험편은 다시 1323K, 1473K, 1573K에서 30분 동안 열처리 하고 수냉하였다. 또한 σ 상의 석출 거동을 조사하기 위하여 1323K에서 30분 동안 시효처리 하였다. 이것에 의한 오스테나이트상 체적

Table 1 Chemical compositions (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	Fe
0.035	0.13	0.11	25.0	7.1	3.6	0.2	0.5	1.95	Bal.

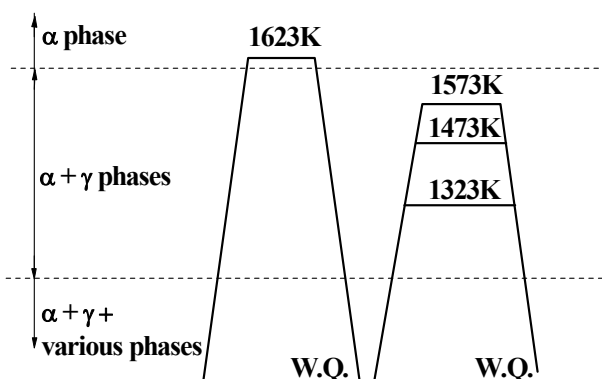


Fig. 1 Schematic of heat treatment

Table 2 Conditions of heat treatment

Specimen No.	Condition of heat treatment	
CT1	1323 K, 30 min, water cooling	-
CT2		873 K, 5 hr, air cooling
CT3	1323 K, 30 min, water cooling	873 K, 10 hr, air cooling
CT4		873 K, 150 hr, air cooling
CT5	1473 K, 30 min, water cooling	-
CT6	1523 K, 30 min, water cooling	-

분률은 53%였다. 그리고 일부 시험편은 내열강에서 자주 사용되는 온도인 873K에서 5시간, 10시간, 150시간 시효처리 하였다. 이것으로부터 시험편은 모두 분산상을 얻었다. 시험에 사용한 시험편의 열처리 조건을 Table 2에 나타낸다.

2.2 조직과 기계적 특성 시험

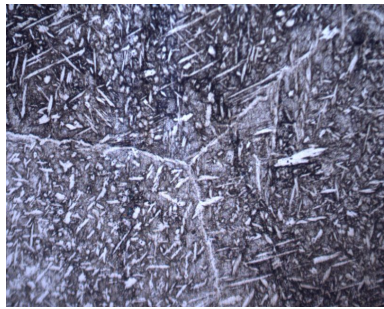
미세조직은 광학 현미경을 사용하여 관찰하였다. 이때 각각의 체적분률은 면적 해석법을 이용하여 구하였다. ASTM E8(Annual Book of ASTM Standards, 1977)에 의해 제작된 공칭지름 ϕ 12.5mm의 환봉인장시험편을 이용한 인장시험은 오스테나이트 체적분률과 σ 상 석출에 의한 영향을 조사하기 위하여 실온 대기 중에서 크로스헤드 속도 2mm/min으로 실시하였다. 또한 σ 상 석출에 의한 경도 변화는 2mm V 노치 시험편을 사용하여 1kg 하중의 경도시험기(HM-124, Akashi Co., Japan)를 사용하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

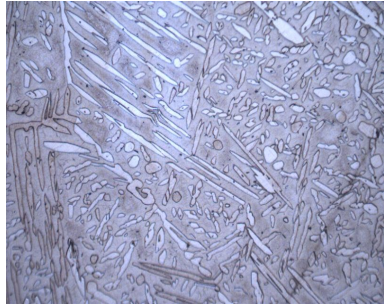
3.1 조직관찰

오스테나이트상과 페라이트상이 공존하는 2상 영역에서 어닐링 온도에 따르는 오스테나이트 체적분률을 조사하기 위하여 열간압연 하였다.

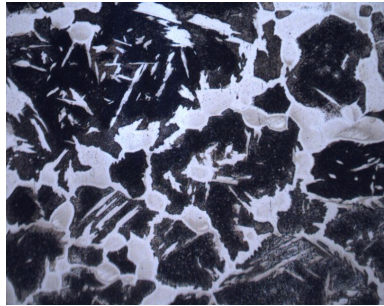
먼저 30분 동안 1623K에서 열처리한 후 수냉을 실시하여 단상 페라이트를 얻었다. 그 후 재차 30분 동안 1323K, 1473K 및 1573K에서 열처리한 후 수냉하여 오스테나이트상을 얻었다. 이렇게 하여 얻어진 오스테나이트상은 모두 분산상으로 분포하였다. Fig. 3에 나타낸 흰색 오스테나이트상은 필름 형상과 같이 페라이트 입자의 경계 뿐 아니라 침상으로 존재하였다. 더구나 원형 오스테나이트는 페라이트 입자의 경계 사이에 같이 존재하였다. 열처리 온도의 증가에 따라서 오스테나이트의 양은 감소하였으나, 입자의 크기는 증가하였다.



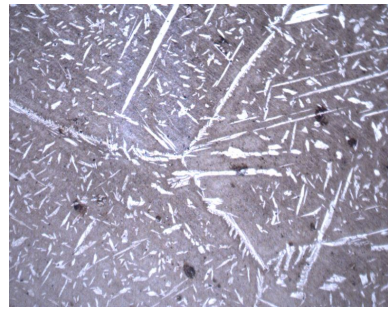
1323 K



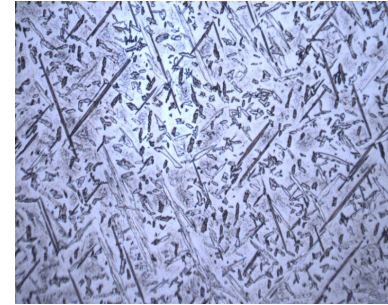
1473 K



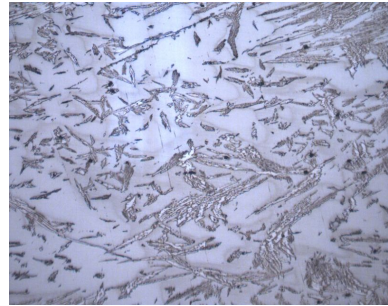
1573 K



5 hrs in 873 K



10 hrs in 873 K



150 hrs in 873 K

Fig. 3 Optical micrographs showing the effect of temperature

Fig. 5 Optical micrographs showing the effect of aging time

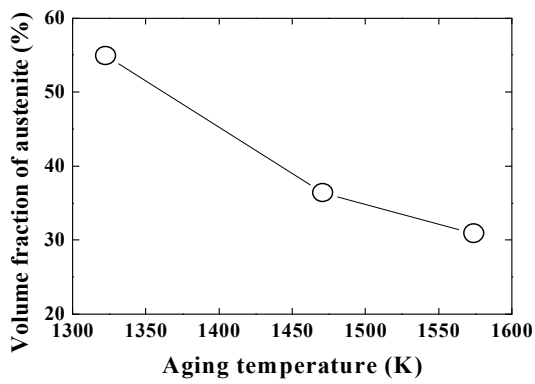


Fig. 4 Effect of annealing temperature on the volume fraction

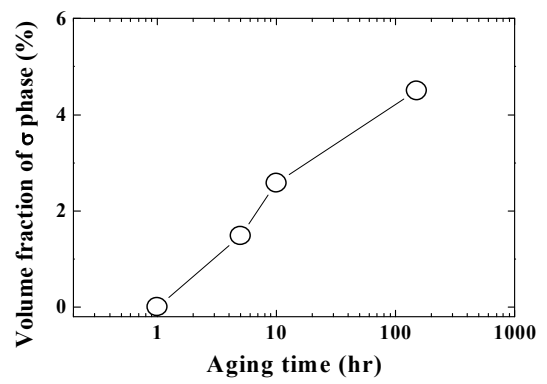


Fig. 6 Effect of aging time at 873 K on the volume fraction of σ phase

질소를 첨가함으로써 오스테나이트 입자 크기는 증가하고 원형이 나타났다. 그러므로 질소는 성형하는 동안 오스테나이트를 안정화시키는 역할을 한다고 판단된다.

Fig. 4에 열처리 온도와 오스테나이트 체적분률 관계를 나타낸다. 열처리 온도가 증가할수록 오스테나이트 체적분률은 감소하였다. 그러나 질소를 첨가하지 않은 것에 비하여 오스테나이트 체적분률 감소는 적게 나타났다.

1623K에서 30분 동안 열처리 하고 수냉에 의하여 단상 페라이트를 얻은 후, 1323K에서 30분 동안 열처리 후 수냉하여 오스테나이트상을 얻었다. 이것을 사용하여 σ 상의 석출 영향을 보기 위하여 873K에서 5시간, 10시간, 150시간 열처리한 후에 공냉하였다. 열처리를 실시한 결과의 금속현미경 사진을 Fig. 5에 나타낸다. 오스테나이트 분산상의 조직은 시간이 길어짐에 따라서 입자가 커지고 둥근 형상으로 변화하였다.

σ 상과 열처리 시간과의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. σ 상은

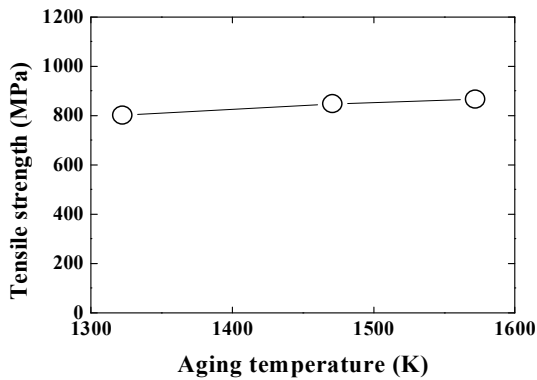


Fig. 7 Effect of annealing temperature on the tensile strength

열처리 시간이 길어질수록 급격하게 증가하였다. 이것은 질소가 페라이트 상과 반응하기 때문으로 판단된다.

3.2 기계적 특성

수퍼 2상 스테인리스강에서 오스테나이트 체적분률과 σ 상은 열처리에 의하여 변하고, 인장특성은 오스테나이트 체적분률과 σ 상의 변화에 영향을 받는다고 판단된다. 그러므로 오스테나이트 체적분률과 σ 상 변화에 따른 인장특성을 조사하였다.

Fig. 7은 수퍼 2상 스테인리스강의 인장특성이 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상에서 열처리와 함께 변화하는 것을 보여준다. 2상에서 열처리 온도의 증가와 함께 인장강도는 약간 증가하였다. 이것은 Fig. 4에서 열처리 온도의 증가와 함께 오스테나이트 체적분률이 감소하였다. 대조적으로 오스테나이트보다 인장강도에 영향을 주는 페라이트의 체적분률은 감소하였다.

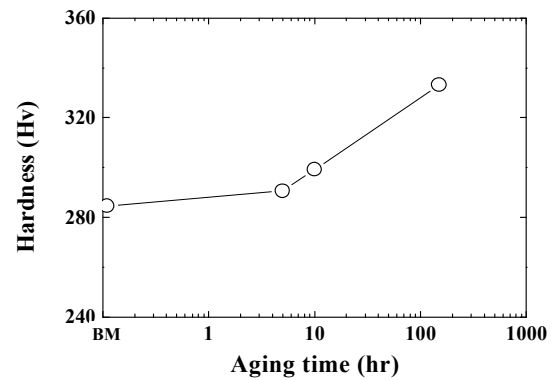


Fig. 9 Effect of aging time at 873 K on the hardness

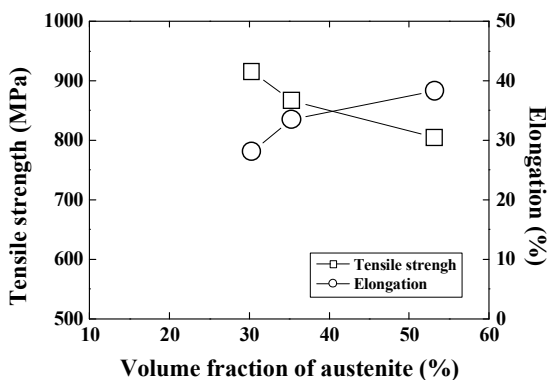


Fig. 8 Effect of volume fraction of austenite on tensile strength and elongation

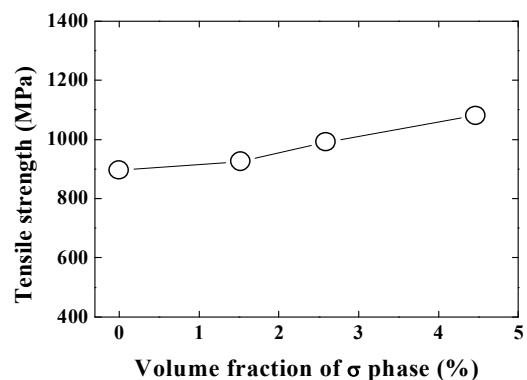


Fig. 10 Effect of volume fraction of σ phase on the tensile strength

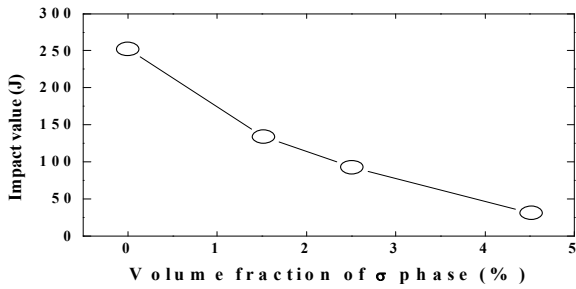


Fig. 11 Effect of volume fraction of σ phase on the impact values

따라서 인장강도에 대한 2상의 체적분률에 대한 영향을 조사하였다. 이때 2상의 열처리 온도는 오스테나이트 체적분률을 다르게 하기 위하여 변화하였다. 그리고 오스테나이트 체적분률에 따라서 인장강도와 연신률의 변화를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 오스테나이트 체적분률이 증가하면, 인장강도는 감소하였고, 연신률은 증가하였다. 이것은 2상의 기계적 특성이 오스테나이트상과 페라이트상의 의존하는 것이다. 특히, 오스테나이트보다 페라이트의 기계적 특성에 의존한다. 그러므로 인장강도는 페라이트의 체적분률의 증가와 함께 증가하고, 약 50% 체적분률에서 최고의 기계적 특성을 가진다고 하였다.

Fig. 9는 열처리 시간에 따른 경도 변화를 보여준다. 열처리 시간 약 1시간 이내에서는 거의 변화하지 않았다. 그러나 1시간 이후부터는 급격하게 증가하였다. 5시간 이상의 열처리에서 경도는 증가하였다. 이것은 R상, σ 상 등의 석출에 의한 것이다.

1323K에서 30분간 수냉한 시험편을 사용하여, 873K에서 열처리 시간(5시간, 10시간, 150시간)을 변화시켜 σ 상의 양이 다르게 석출되도록 하였다. 이러한 σ 상은 인장강도에 영향을 미친다. 그 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 인장강도는 σ 상의 양과 함께 증가하였다.

Fig. 11은 σ 상 체적분률과 충격값과의 관계를 나타낸다. 그림에서 충격값은 σ 상의 영향을 많이 받아 급격하게 감소하였다. 슈퍼 2상 스테인리스강을 열처리 하면 R상은 열처리 초기 단계에서 석출하고, 충격값은 R상 및 σ 상의 양과 함께 감소한다는 보고가 있다. 이 그림에서 충격값은 초기단계에서 σ 상의 작은 석출량에도 급격하게 감소하였다. 이와 같이 충격 및 인장 특성은 초기 단계에서 R상 및 σ 상 등의 석출에 많은 영향을 받는다.

4. 결 론

0.2% N을 첨가시킨 슈퍼 2상 스테인리스강을 대상으로 하여 그 기계적 특성과 미세조직을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열처리 온도의 증가에 따라서 오스테나이트의 양은 감소하였으나, 입자의 크기는 증가하였다. 질소를 첨가함으로써 오

스테나이트 입자 크기는 증가하였다.

(2) σ 상의 석출 영향을 보기 위하여 873K에서 5시간, 10시간, 150시간 열처리 후에 공냉한 결과, σ 상은 열처리 시간이 길어질수록 급격하게 증가하였다. 이것은 질소가 페라이트 상과 반응하기 때문이라고 사료된다. 또한 σ 상의 체적분률이 커질수록 인장강도는 증가하였다.

(3) 오스테나이트 체적분률이 증가하면, 인장강도는 감소하였고, 연신률은 증가하였다.

후 기

본 논문의 원본은 대한민국 제주도에서 2008년 5월29일-5월30일에 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 것임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- Annual Book of ASTM Standards (1977). pp 56-76.
- Charles, J. (1991). "Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties", Proc. of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, France, Vol 1, pp 151-168.
- Charles, J. (1994). "Structure and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels", 4th International Conf., Duplex Stainless Steels, Scotland, Paper XI.
- Davis, J.R. (1994). ASM Specialty Handbooks Steels, ASM International, Oh, pp 13.
- 강창룡, 김효정, 김창규, 김익수, 주동원, 성장현 (1998). "25Cr-7Ni-3Mo 2상 스테인리스강의 미세조직과 기계적성질", 한국열처리공학회지, 제11권, 제3호, pp 192-199.
- 강홍주 (2008). 슈퍼 2상 스테인리스강의 부식, 피로균열진전과 음향방출 특성, 부경대학교 박사학위 논문.
- 도재운, 이상기, 안석환, 남기우, 강창룡, 박인덕 (2001). "슈퍼 2상 스테인리스강의 피로균열 진전시 발생하는 음향방출신호 특성에 미치는 σ 상 석출의 영향", 대한금속재료학회지, 제39권, 제12호, pp 1339-1405.
- 안석환, 강홍주, 남기우 (2008). "슈퍼 2상 스테인리스강의 열처리 조건에 따른 피로균열진전과동 및 부식특성", 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집, 제주국제컨벤션 센터, pp 343.
- 이상기 도재운, 남기우, 강창룡, 이해우, 안석환 (2000). "슈퍼 2상 스테인리스강의 피로균열진전 특성에 미치는 미세조직의 영향", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 66-70.
- 이상기 (2001). "슈퍼 2상 스테인리스강의 σ 상 석출에 따른 피로균열진전특성과 음향방출신호의 시간-주파수 해석", 부경대학교 석사학위논문.

2008년 7월 14일 원고 접수

2008년 7월 29일 최종 수정본 채택