한국해양공학회지 제14권 제2호, pp 65~69, 2000 (ISSN 1225-0767)

수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열진전 특성에 미치는 미세조직의 영향

이상기* · 도재윤** · 남기우*** · 강창룡*** · 이해우**** · 안석환***
*부경대학교 대학원, **부산기능대학 전산응용기계과
***부경대학교 재료공학부, ****삼성중공업

Effect of Microstructure on the Characteristics of Fatigue Crack Propagation of Super Duplex Stainless Steel

SANG-KEE LEE*, JAE-YOON DO**, KI-WOO NAM***, CHANG-YONG KANG***, HAE-WOO LEE****
AND SEOK-HWAN AHN***
*Department of Materials Science and Engineering, Pukyung National University, Pusan, 608-739, Korea.
**Pusan, Polytechnic College, Pusan, 616-101, Korea.
***Division of Materials Science and Engineering, Pukyoung National University, Pusan, 608-739, Korea.
****Samsung Heary Industries, Koje City, South Kyongsang Province, 656-800, Korea

KEY WORDS: Duplex stainless steel 이상스테인리스강, Young's Modulus 탄성계수, Fatigue crack growth rate 피로균열성장속도, Sound velocity 음속, Volume fraction 체적분율, Anisotropy 이방성

ABSTRACT: *This study is to investigate the characteristics of fatigue crack propagation in rolled super duplex stainless steel that was changed austenite-ferrite volume fraction by heat treatment. It was used two kinds of specimen, the rolling and the transverse directions. δ-phase fraction affected sound velocity, hardness and Young's modulus. Characteristics of fatigue crack propagation was affected by anisotropy and ($\delta + \gamma$) phase volume fractions.*

1. 서 론

내공식지수(pitting resistence eqrivalent number, PREN) 값을 40이상 갖는 수퍼 2상 스테인리스강은 페라이트(δ)와 오스테나이트(γ)상으로 이루어진 것이다. 이것은 국부부식 및 응력부식균열에 대한 저항성을 향상시킨 강으로서(Charles and Dr-ring, 1994; Nicholls, 1994), 내식성과 기계적 성질이 기존의 2상 스테인리스강에 비하여 대단히 우수하다. 따라서 염수용 펌프, 화학공장의 용기, 유전의 파이프라인, LNG 탱크등과 같은 가혹한 부식환경 및 저온에서의 고강도 재료로 사용이 기대된다(Nilson, 1992; Wensley and Reid, 1992).

그러나 수퍼 2상 스테인리스강은 고합금이며, 특히 질소의 함량이 높아서 고온가공 또는 열처리후 탄화물, 질화물과 같은 금속간 화합물이 석출하여 상변태를 일으키기 쉬운 단점이 있다. 그러므로 합금원소를 첨가하여 내식성을 향상시키면서 조직의 안정성을 기대할 수 있는 많은 연구가 수행되고 있다(Gadgil and Kein, 1994; Atkinsen and King, 1993; 주 등, 1996). 그러나 실용적인 측면에서 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율 변화와 조직의 이방성을 고려한 피로특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

일반적으로 단일상 조직으로 이루어진 재료의 피로균열 진전속도는 결정입계와 결정방위등에 영향을 받으나, 2상 스테인리스강과 같이 결정구조가 다른 2상이 존재하면서 두 상의 체적분율이 달라지면 피로균열 진전특성등이 단일상의 경우와 다른 거동이 나타날 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 열처리온도를 달리하여 수퍼 2상 스테인리스강의 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율을 변화시켰다. 이 강의 균열진전방향을 압연방향에 평행한 방향(TL 방향)과 수직인 방향(LT방향)의 시험편을 사용하여, 2상의 체적분율 및 이방성에 따른 피로균열진전특성을 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 Cu와 W가 첨가된 수퍼 2상 스테인리스강은 고주파 진공용해로에서 용해, 제작하여 사용하였다. 그 기계적성질과 화학조성을 Table 1에 나타낸다. 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율의 변화에 따른 특성을 관찰하기 위하여 열처리는 압연상태의 시료를 각각 1050℃, 1200℃, 1300℃의 온도에서 15분간 열처리 후 수냉시켜 페라이트와 오스테나이트상의 체적분율을 변화시켰다. 그리고, 열처리가 완료된 시료의 미세조직은 광학현미경에 의해 관찰하였고, 페라이트상과 오스테나이트상의 체적분율은 화상분석시험기와 점분석법을 이용하여 10회이상 측정한 후 평균하여 구하였다. 또한, 경도측정은 비커스 경도시험기를 사용하여 각 상의 경도값을 측정하였고, 페라이트와 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 음속변화는 디지털 초음파 탐상기를 사용하여 측정하였다. 한편, 탄성계수 측정은 초음파의 음속을 측정하여 다음의 식(Dayal, 1992)을 사용하여 계산하였다.

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot V^2$$

여기서 ν는 포와송비(0.3), ρ는 밀도(7.8g/㎤), V는 초음파의 음속을 나타낸다.

피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 용량 10톤의 만능피로시험기를 사용하여 실온 · 대기중에서 실시하였다. 모든 시험편에 예비균열을 25mm까지 삽입한 후, 정현파를 이용하여 하중반복수 5Hz, 응력비 R=0.1, P=1300kgf의 일정하중으로 실시하였다. 이때 사용한 CT 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition (wt%) of the specimen

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	Fe
0.02	0.41	0.69	25.1	7.0	3.6	0.24	0.56	0.62	Bal.

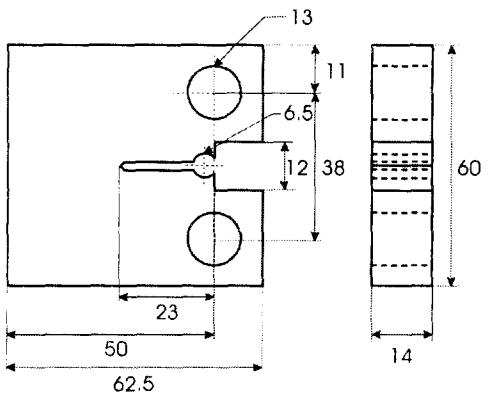


Fig. 1 Dimensions of specimen; all dimensions in *mm*

3. 실험결과 및 고찰

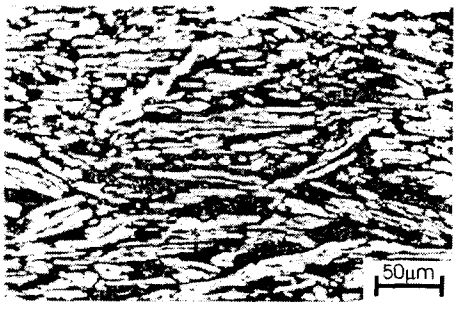
3.1 미세조직관찰

오스테나이트상과 페라이트상의 체적분율을 달리하기 위하여 시료를 1050℃, 1200℃ 및 1300℃의 2상영역에서 15분 유지 후 수냉시켰을 때 얻은 미세조직을 Fig. 2에 나타낸다. 이 사진에서 열처리 온도에 관계없이 압연방향을 따라 오스테나이트상이 길게 신연되어 섬유상조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 열처리온도가 증가할수록 페라이트상의 체적분율과 결정립 크기가 증가하며, 오스테나이트상의 체적분율은 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 오스테나이트상은 체적분율이 감소함에 따라서 연결상태에서 끊어진 상태로 존재하고 있음을 알 수 있다.

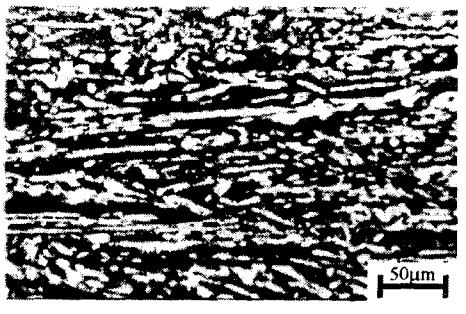
3.2 오스테나이트상의 체적분율에 따른 물리적 및 기계적 특성

열처리 온도를 변화시켜 열처리한 다음 페라이트와 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 경도, 음속 및 탄성계수의 변화를 조사하였다.

Fig. 3은 열처리 온도변화에 따른 페라이트와 오스테나이트상의 체적분율 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 열처리 온도가 높을수록 페라이트상의 체적분율이 증가하며, 오스테나이트상의 체적분율은 감소하고 있다.



(a) 1050 ℃



(b) 1200 ℃

(c) 1300 ℃

Fig. 2 Optical micrographs of specimens (ferrite : black, austenite : white)

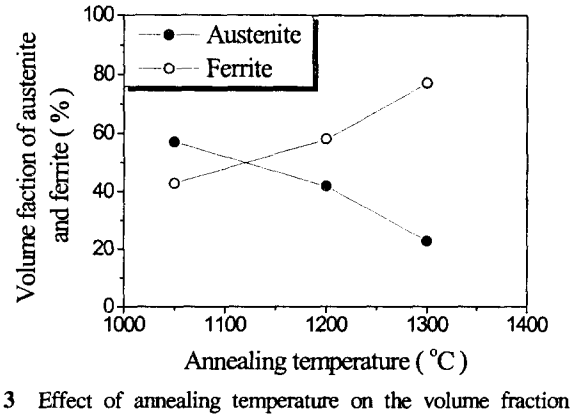


Fig. 3 Effect of annealing temperature on the volume fraction of austenite and ferrite in super duplex stainless steel

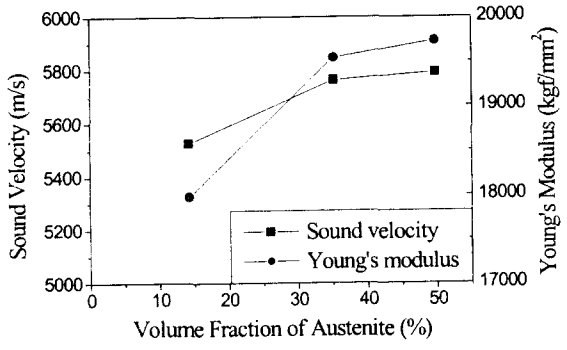


Fig. 4 Effect of volume fraction of austenite on the sound velocity of ultrasonic and Young's modulus in duplex stainless steels

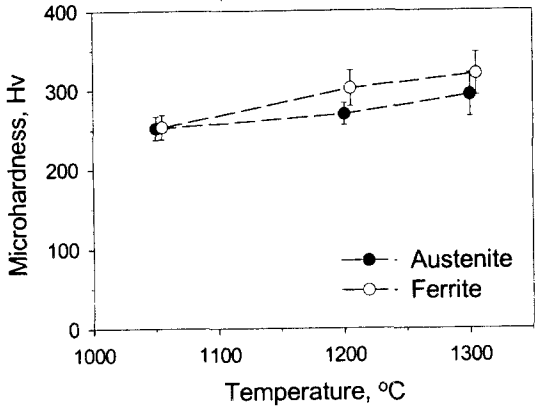


Fig. 5 Relationship between Vickers hardness and heat treatment temperature of ferrite and austenite phase in super duplex stainless steel

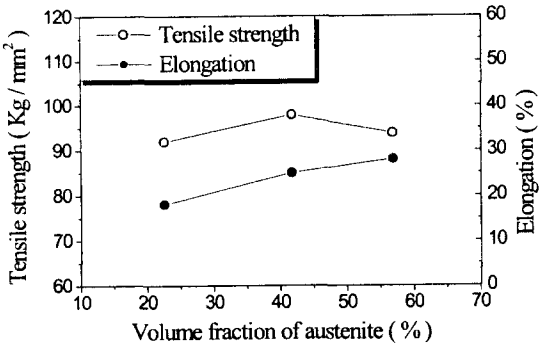


Fig. 6 Effect of volume fraction of austenite on the tensile properties in super duplex stainless steel

수퍼 2상 스테인리스강의 오스테나이트 체적분율 변화가 음속 및 탄성계수 변화에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타낸다. 이 그림에서 오스테나이트의 체적분율이 증가할수록 음속 및 탄성계수 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 현상은 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 오스테나이트의 체적분율은 열처리온도가 낮아지면 증가하지만 상대적으로 결정립이 미세화 된다. 따라서 음속은 결정립이 미세화하면 초음파의 파장이 결정립을 관통하여 진전하나, 결정립이 조대화하면 파장이 결정립경에서 산란하므로 음속이 감소하게 된다.

Fig. 5는 수퍼 2상 스테인리스강에서 열처리온도 변화에 따른 페라이트상과 오스테나이트상의 경도변화를 조사하여 나타낸 것이다. 2상영역 열처리온도가 높아질수록 페라이트와 오스테나이트상의 경도값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 열처리온도가 높아지면 더많은 탄화물, 질화물이 분해될 뿐만 아니라, 분해된 용질원자가 보다 빠른 속도로 페라이트와 오스테나이트상으로 확산되어 가기 때문에 각 상에 고용되는 용질원자 농도가 높아지기 때문이라 생각된다.

Fig. 6은 압연방향에 평행한 섬유조직을 갖는 오스테나이트의 체적분율이 다른 시험편을 인장시험하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 오스테나이트의 체적분율에 대해 나타낸 것이다. 오스테나이트의 체적분율이 증가함에 따라 인장강도와 연신율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 현상은 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 오스테나이트상의 체적분율이 증가하게 되면, 2상스테인리스강에서 기계적 성질을 주로 반영하는 (Solomon and Dedine, 1983; 片山, 藤田, 1986) 페라이트상의 결정립이 미세화 된다. 그리고 상대적으로 열처리온도가 낮아 페라이트에 고용되는 질소의 농도가 증가하게 되는데 이러한 질소첨가 효과와 결정립 미세화의 영향에 의해 강도도 상승하고 연신율도 상승한다고 생각된다.

3.3 오스테나이트상의 이방성과 체적분율에 따른 피로균열의 성장거동 특성

Fig. 7은 수퍼 2상 스테인리스강에서 오스테나이트상의 섬유상조직 분포가 균열진전 방향에 평행 또는 수직방향으로 분포되어 있을 때, 이러한 조직의 이방성과 체적분율이 피로균열 성장거동(a-N 선도)에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

이 그림에서 이방성에 대한 피로균열 성장거동은 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 균열진전방향이 오스테나이트상의 섬유조직 압연방향과 평행한 시료(TL시험편)의

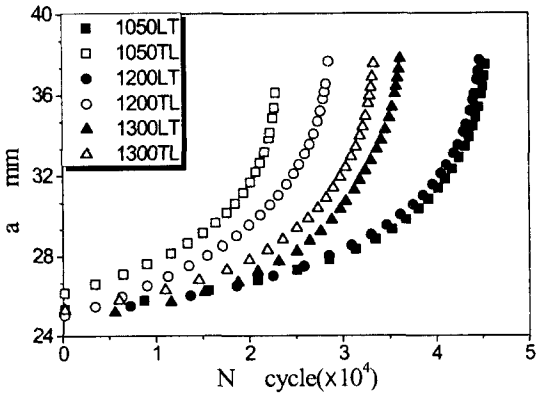


Fig. 7 a-N curves on the austenite volume fraction and anisotropy in super duplex stainless steel

경우가 압연방향과 수직한 시료(LT시험편)보다 피로수명이 짧게 나타나고 있다. 이러한 경향은 체적분율에 관계없이 같이 나타나고 있다. 또한 같은 온도에서 열처리한 시험편의 조직 이방성에 따른 수명의 차이는 오스테나이트상의 체적율이 감소할수록 적게 나타났다. 이와 같이 균열진전방향이 압연방향에 평행한 섬유조직을 갖는 경우가 수직한 섬유조직을 갖는 시료에 비해 피로수명이 짧은 이유는 압연방향과 평행한 섬유조직을 갖는 시료의 경우는 균열진전방향이 섬유조직의 배열방향과 평행하기 때문에 균열전파가 용이하기 때문이다. 즉, 균열진전이 길게 신연된 페라이트상과 오스테나이트상의 계면을 따라 용이하게 진전하였기 때문에 피로수명이 짧게 나타났다고 판단된다. 한편 오스테나이트의 체적분율이 감소할수록 이방성에 따른 피로수명의 차이가 적게 나타나는 이유는 오스테나이트의 체적분율이 적게되면 균열진전이 용이한 페라이트와 오스테나이트의 계면이 적어지기 때문이라고 판단된다.

체적분율에 대한 피로균열성장 거동은 균열진전방향이 압연방향에 수직한 섬유조직을 갖는 LT시험편은 오스테나이트상의 체적분율이 감소함에 따라 피로수명이 짧아지고 있으며, 평행한 섬유조직을 갖는 TL시험편은 피로수명이 길어지고 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 균열진전방향이 압연방향에 수직하게 오스테나이트상이 섬유상으로 분포된 시료의 경우 오스테나이트 체적분율이 감소할수록 피로수명이 감소하는 이유는 오스테나이트상의 체적분율이 감소하게 되면 페라이트상이 조대화되는데 기인되어 체적분율이 증가하게 된다. 따라서 상대적으로 균열전파의 용이한 통로가 되는 페라이트와 오스테나이트상의 계면이 적어지게 됨으로서 계면에서의 응력집중이 많이 일어나게 되고 그 결과 균열이 쉽게 일어나 피로수명이 감소한다고 생각되며, 반대로 오스테나이트상이 압연방향에 평행하게 섬유상으로 분포되어 있는 경우, 오스테나이트 체적분율이 감소함에 따라 피로수명이 길어지고 있는 이유는 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 균열전파의 용이한 통로가 되는 계면이 적어지기 때문에 상대적으로 균열진전속도가 늦어 피로수명이 길어진다고 생각된다.

오스테나이트상의 체적분율과 이방성 변화에 따른 균열진전속도 da/dN과 응력확대계수의 변동폭 ΔK의 관계를 Fig. 8에 나타낸다.

균열진전방향이 오스테나이트상의 섬유조직과 수직한 LT시험편과 평행한 TL시험편은 각각 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 차이는 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 각각의 LT, TL시험편에서 1300℃의 경우가 1050℃, 1200℃에 비교하여 초기에는 균열진전속도가 다소 늦은 것을 알 수 있다.

같은 체적분율에 대한 이방성의 영향을 알아 보기 위하여 Fig. 8에서 피로균열진전속도인 paris식[$da/dN=C(\Delta K)^m$]의 C와 m값을 구하였다. 그 결과를 Table 2에 나타낸다. 여기서 균열진전방향이 오스테나이트상의 섬유조직과 수직한 LT시험편이 평행한 TL시험편보다 체적분율에 관계없이 m값이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 LT시험편이 초기에는 균열진전 속도가 늦지만, 균열이 진전함에 따라서 TL시험편보다 더 빠른 진전속도를 나타내기 때문이다.

그러나 전체적으로 보아 같은 응력확대계수 변동범위에서는 섬유상 조직에 평행한TL시험편이 섬유상 조직에 수직한 LT시험편보다 균열진전속도가 더 빠른 것을 알 수 있다.

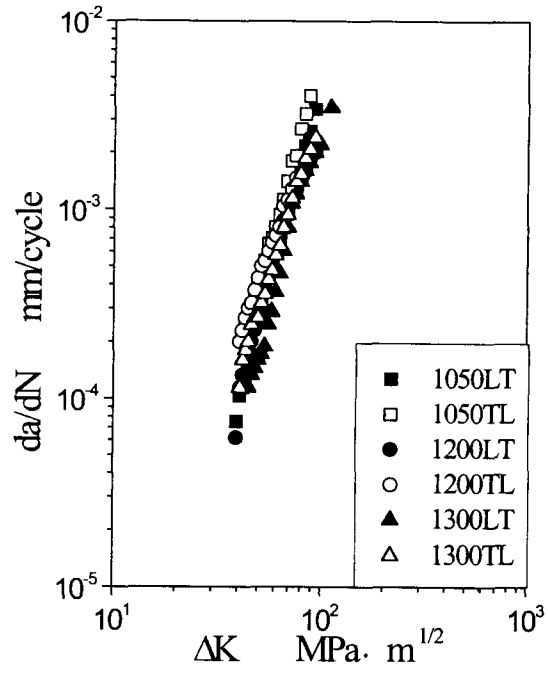


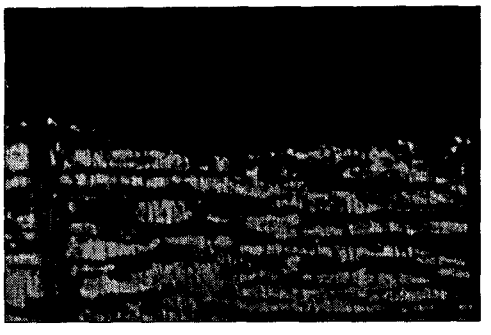
Fig. 8 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range in super duplex stainless steel

Table 2 C and m obtained by paris' law

condition	symbol	C	m
1050LT	■	1.93×10^{-11}	4.20
1050TL	□	9.76×10^{-11}	3.90
1200LT	●	4.96×10^{-11}	3.97
1200TL	○	2.58×10^{-9}	3.06
1300LT	▲	4.17×10^{-12}	4.47
1300TL	△	2.44×10^{-10}	3.61

오스테나이트상과 페라이트상의 균열진전 상황을 조사하기 위하여 파단 시험편을 부식시켜 얻은 대표적인 외관사진을 Fig. 9에 나타낸다. 이 그림은 1050℃에서 얻어진 것이다. 이 그림에서 섬유조직과 수직한 LT시험편은 2상을 관통하면서 균열이 진전하였고, 평행한 TL시험편은 2상의 경계면을 따라서 균열이 진전하였음을 알 수 있다. 따라서 앞에서 언급하였듯이 오스테나이트상 체적분율이 감소함에 따라서 LT시험편은 경도가 높은 페라이트상의 체적분율이 상승하므로 피로수명이 증가하고 있다. 반면 TL시험편은 2상의 계면 인성이 감소하므로 피로수명이 감소하고 있다.

(a) LT



(b) TL

Fig. 9 Typical surface appearance obtained from 1050℃ specimen

4. 결 론

수퍼 2상 스테인리스강의 페라이트와 오스테나이트상의 체적분율 변화와 조직의 이방성이 물리적 성질 및 피로균열진전 특성등에 미치는 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오스테나이트상의 체적분율이 증가할수록 음속 및 탄성계수는 증가하였고, 인장강도와 연신율도 증가하였다.

(2) 오스테나이트상의 섬유조직이 압연방향과 평행한 경우가 수직한 경우에 비하여 균열진전이 용이하여 피로수명이 짧게 나타났다.

(3) 오스테나이트상의 체적분율이 감소할수록 이방성에 따른 피로수명의 차이는 적게 나타났고, 오스테나이트상의 체적분율이 감소할수록 TL시험편은 피로수명이 길어지며, LT시험편은 피로수명이 짧게 나타났다.

(4) 피로균열진전속도는 LT시험편과 TL시험편에서 오스테나이트상의 체적분율 변화에 따른 차이는 크지 않다. 그러나 같은 체적분율에서 이방성에 따른 피로균열진전속도의 m값은 LT시험편이 TL시험편보다 더 큰 값을 나타낸다. 그러나 전체적으로 TL시험편이 LT시험편보다 더 빠른 균열진전속도를 나타낸다.

참고문헌

주동원, 강창룡, 성장현(1996). "조직제어한 2상 스테인리스강의 저온인장거동에 미치는 합금원소의 영향", 대한금속학회지, Vol. 34 No. 10, pp 1312~1320.

Atkinson. R. F. and King. R. W.(1983). "Duplex Stainless Steel", R. A. Lula(Ed.) ASM, Metals Park, Ohio, pp 399.

Charles. J. Dr-ring(1994). Fourth International Conference, Duplex Stainless Steels, Vol. 1, Scotland, Paper K I.

Gadgil. V. J. and Kein. E. G.(1994). Fourth International Conference, Duplex Stainless Steels, Scotland, 2, pp 5.

Nicholls. J. M.(1994). Fourth International Conference Duplex Stainless Steels, Scotland, 1, Paper III.

Nilson. J. O.(1992). Mater. Sci. Tech, 8, pp 685.

Solomon. H. D. and Dedine. T. M.(1983). "Duplex Stainless Steel", R. A. Lulaed., ASM Metals Park, Ohio, pp 693.

Vinay Dayal(1992). "An Automated Simultaneous Measurement of Thickness and Wave Velocity by Ultrasound", Experimental Mechanics, September pp 197~202.

Wensley. A. and Reid. C.(1992). Stainless Steel Europe, April, 2.

片山哲也, 藤田廣志(1986). 日本金屬學會誌, 第 52券, 第10号, pp 35.

1999년 11월 30일 원고 접수
2000년 3월 15일 수정본 채택