

15Cr 페라이트계 스테인리스강의 겹침용접부 고온인장 특성에 관한 연구

이영기* · 이경철** · 김재성** · 한도석*** · 오승택*** · 이보영**

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

***현대-기아 연구개발총괄본부 선행개발센터 금속재료팀

A Study on the High Temperature Tensile Characteristics of Lap Weld of 15Cr Ferritic Stainless Steels

Young-Gi Lee*, Gyeong-Cheol Lee**, Jae-Seong Kim**, Do-Seok Han***, Seung-Taek Oh*** and Bo-Young Lee**

*Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang 412-791, Korea

**Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang 412-791, Korea

***Hyundai & Kia corporate Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

*Corresponding author : bylee@kau.ac.kr

(Received April 21, 2008 ; Revised May 22, 2008 ; Accepted August 25, 2008)

Abstract

Ferritic stainless steels of the 400 series have been available for automotive exhaust system, heat exchanger, radiator etc. in various industrial because heat resistance, corrosion resistance and strength are excellent. Especially, automotive exhaust system is required good heat resistance because typical temperature of exhaust system exposed during operation of engine is reach up to 800°C. However, research for effect of high temperature in ferritic stainless steels is not enough. In this study, high temperature tensile properties of lap weld of ferritic stainless steels(STS 429) were investigated. In accordance with heat input, lap welds had been produced and were evaluated at high temperature(800°C) to compare high temperature tensile properties. In addition, room temperature tensile tests were carried out for non-aging and aging specimens. As a result of R.T tensile test, non-aging specimens were fractured in base metal except for low heat input specimen and aging specimens were fractured in weld metal. Also high temperature tensile test were carried out by aging specimen. After high temperature tensile test, fracture of aged specimen was occurred in base metal except for low heat input specimen. Fracture surface of low heat input specimen in weld metal was confirmed as brittle fracture with observation using scanning electron microscope(SEM). Significant decrease in ultimate tensile strength (between 82 and 85%) was observed for aged ferritic stainless steels(STS 429) when tested at high temperature.

Key Words : High temperature tensile characteristics, Ferritic stainless steels, STS 429, Automotive exhaust manifold, Heat resistance, Grain growth

1. 서 론

최근 자동차의 품질보증 기간이 늘어나게 됨에 따라 특히 파워트레인 계통의 품질 향상이 필요하게 되었으

며, 내구성, 환경규제 및 경량화의 관점에서 새로운 배기매니폴드 소재의 사용이 요구되고 있다. 이전까지 배기매니폴드는 생산이 용이하고 가격이 저렴한 주물용 주철로 주로 제작되었으나, 주철 배기매니폴드의 경우 800°C 이상의 온도에서 열팽창에 의한 소성변형이 일

어나 수명이 현저하게 떨어지고, 다른 재질에 비해 무거워 자동차의 경량화가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다. 또한 주철로 제작한 배기매니폴드를 차량에 장착할 경우 큰 열용량으로 인해 공해물질이 아무런 여과 없이 외부로 방출되어 현재의 환경 규제 정책에 있어 적합하지 않은 소재로 판단된다. 이에 자동차 제작회사에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 주철을 대신하여 내열성과 내식성이 우수한 400계열의 페라이트 스테인리스강재를 사용하여 배기매니폴드를 제작하는 추세이다.

페라이트계 스테인리스강은 일반적으로 용접성이 나쁜 것으로 알려져 있는데, 결정구조가 온도에 관계없이 항상 페라이트이기 때문에 약 1100°C 이상의 온도로 상승하는 용접열영향부(HAZ)에서는 결정립이 현저하게 조대화되어, 연성 및 인성에 해로운 영향을 미친다. 또한 용접 후 HAZ에서는 강 중에 존재하는 C와 N이 Cr과 결합하여 크롬탄화물, 크롬질화물, 탄질화물 등을 형성한다. 이들은 결정립계와 입내의 전위에도 석출하며, 결정립이 성장하면서 면적이 감소하는 입계면에 농축된다. 이러한 강하고 취성이 큰 석출물은 응력집중원으로 작용하며, 파괴시에 석출물이나 석출물이 형성된 결정립내의 아결정립계(subgrain boundary)를 통하여 취성파괴를 조장한다고 알려져 있다^{1,2)}. 국내에서는 자동차 배기매니폴드용 재료로 적합하다고 판단되는 스테인리스 400계열 박판 강재의 경우 일정한 용접 품질이 확보되지 않아 용접부에 대한 신뢰도가 매우 낮은 상태이며, 고온 환경에서 사용되는 배기매니폴드에 대한 고온 특성에 관하여 명확한 규명이 이루어지고 있지 않기 때문에 배기매니폴드의 내구성에 큰 영향을 주고 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 현재 자동차 배기계에 주로 사용되고 있는 페라이트계 스테인리스강(이하 STS 429)의 겹침용접부에 대한 고온인장 특성을 파악하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서는 현재 국내의 자동차 제작회사에서 배기매니폴드 runner 재질로 가장 많이 사용되고 있는 STS 429(t=2mm) 소재와 STS 430LNb (Ø=1.2)

와이어를 사용하였으며, 화학적 조성은 Table 1과 같다.

2.2 겹침이음 용접

용접은 Hitachi社의 350CAII 용접기를 이용하고 Ar 98% + O₂ 2%의 보호가스를 사용하여 GMAW 겹침용접을 실시하였으며 용접조건은 Table 2와 같다. STS 429 겹침용접은 기초실험을 통해 도출된 적정 용접범위 내에서 입열량(고, 중, 저)을 달리하여 Table 3의 조건으로 용접을 실시하였다. 현재 자동차 용접에서 가장 많이 사용되고 있는 spot용접 KS 규격³⁾에 따라 인장시험편(20×200×2(t))을 입열량에 따라 Fig. 1과 같이 각각 3개씩 제작하였다.

2.3 시효처리 및 인장시험

고온상태로 페라이트계 스테인리스강을 지속적으로 유지할 경우 시간의 경과에 따라 크롬탄화물, 질화물 및 σ(시그마)상과 같은 제 2상들이 석출되어 내식성을 감소시키고 취화경향을 증가시키는 등의 기계적 물성을 변화시킨다고 보고된 바 있다⁴⁻⁶⁾. 이에 고온상태에서의 기계적물성 변화를 확인하기 위해 인장시험 조건에 시효처리 조건을 추가하였다. 시효처리는 Fig. 2과 같이 furnace에서 800°C로 4hr 승온, 30hr 유지 시킨 후 공냉시켰다⁷⁾.

Table 2 Welding conditions in GMAW

Shield gas flow (l/min)	17
*CTWD(mm)	13
Toach angle(°)	55

*CTWD(Contact tip to workpiece distance)

Table 3 Heat input conditions of lap weld

*Arc efficiency : 70%

Heat input (J/cm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (Cm/min)
High	2023	144.5	20
Middle	1370	108.5	18
Low	1100	92	17

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wire (wt%)

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb
Base metal	STS 429	0.007	1.02	0.27	0.02	0.001	15.0	0.13	0.01	0.33
Filler wire	STS 430LNb	0.01	0.50	0.50	0.013	0.003	18.5	-	-	0.45

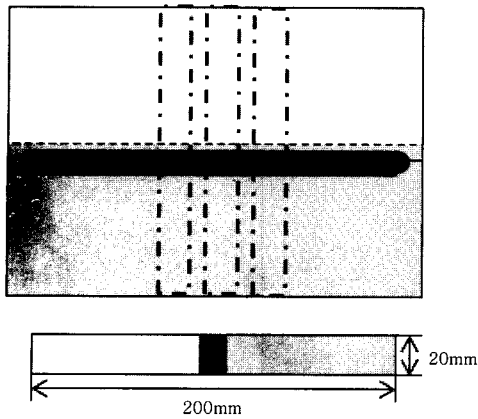


Fig. 1 Schematic illustrations of specimens used in room temperature and high temperature tensile tests

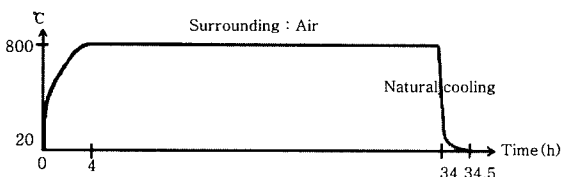


Fig. 2 Aging conditions for 800°C, 30hr

배기매니폴드가 사용되어지는 온도환경을 고려하여 상온(20°C)과 고온(800°C) 2가지 온도조건을 선정하여 고온인장특성을 비교하고자 하였으며, Table 4에서 보는 바와 같이 입열량(고, 중, 저)으로 구분하여 제작된 시편을 시효처리 여부에 따라 상온, 시효처리 후 상온, 시효처리 후 고온으로 나누어 인장시험 조건을 선정하였다.

인장시험기는 Shimadzu社의 AG-10TA를 사용하였으며, 고온인장시험은 시효처리한 시험편에 K-type의 thermo couple를 부착한 후, 정확한 온도 유지를 위해 Labview로 제작한 프로그램을 이용하여 인장시험기에 장착된 heater의 온도를 제어하였다. 시편의 균일한 온도구배를 위해 800°C에서 20분간 유지한 후 100mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다. 또한, 시험편을 800°C로 가열하는 과정에서 발생할 수 있는 열팽창을 고려하여 한쪽 인장그립을 승온 시간동안 개방하여, 열응력에 의한 시험편의 변형을 방지하였다. Fig. 3은 고온인장 시험장치 구성을 개략적으로 나타내고 있다.

2.4 X-선 회절시험

X-선 회절시험은 Bruker-axa社의 D8 Discover with 2Dmension Detector를 사용하였다. X-ray는

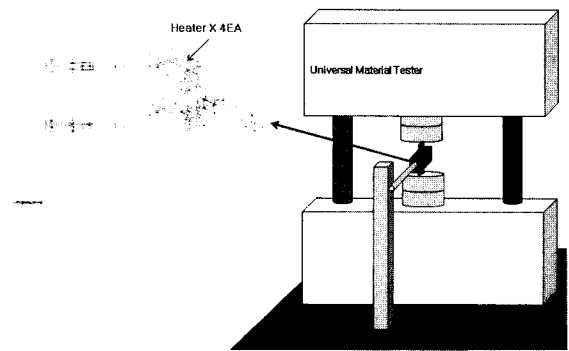


Fig. 3 Schematic illustrations of heat temperature tensile test

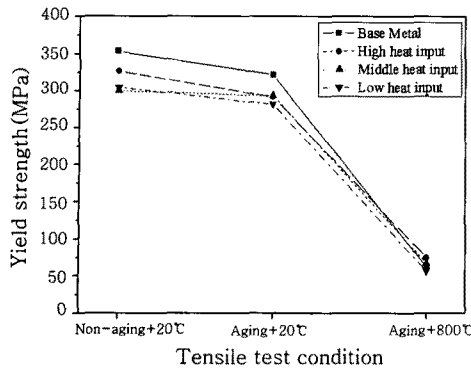
Co Source로 Fe의 형광을 제거하였고, 0.8mm의 point beam과 Laser / Video Alignment tool을 이용하여 측정하였다. XRD를 사용하여 추출된 상들의 종류는 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 카드와 X-선 회절패턴을 정성적으로 분석할 수 있는 Bruker-axa社의 EVA 프로그램을 이용하여 각각의 회절패턴으로 규명하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

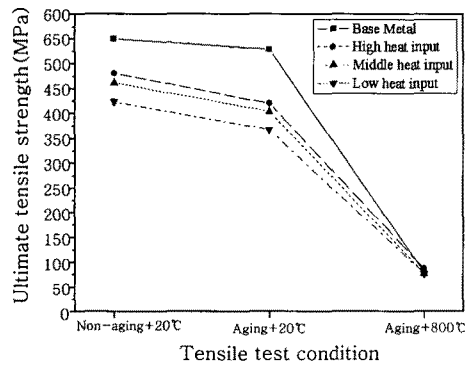
3.1 인장물성

Fig. 4는 입열량과 Table 4의 인장시험 조건에 따른 항복강도(a)와 인장강도(b)를 비교하였고, 강도값과 파단위치는 Table 5에 나타내었다. 무처리 상온인장(No.1, 2, 3)에 비해 시효처리 후 상온인장(No.4, 5, 6)의 경우 항복강도는 2~10%인장강도는 2~24%로 감소하였다. 또한 무처리 상온인장(No.1, 2, 3)에 비해 시효처리 후 고온인장(No.7, 8, 9)의 경우 항복강도는 77~82%, 인장강도는 82~85%로 크게 감소하였다.

용접부 단면은 입열량에 따른 용입깊이, 각장, 목두께의 변화량을 KS 규격에 따라 측정하였다⁸⁾. 입열이 많아 질수록 비드의 용입깊이, 각장 및 목두께가 크게 형성되었고, 이것은 Table 5의 입열에 따른 인장강도 변화와 비슷한 경향을 보였다. 특히 저입열조건(No.3, 6, 9)은 Table 4의 인장조건에 상관없이 용접부 파단을 보였다. 이는 비드형상치수와 인장강도를 비교해 보았을 때, 입열에 따라 일정량 이상의 모재부 용입이 없으면 용접부가 모재보다 강도가 낮아 용접부파단이 일어난다고 볼 수 있다. Fig. 5는 저입열 조건(No.3, 6, 9)에 대하여 용접부 파단면을 1000배율의 크기로 SEM을 이용하여 촬영한 결과 3개 시편 모두 용접부



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of strength in accordance with tensile test condition (a) Y.S (b) U.T.S

Table 5 Strength and fracture position in accordance with tensile test condition

Specimen No. (Heat input)	Y.S (Mpa)	U.T.S (MPa)	Fracture position
No.1 (High)	327	481	Base metal
No.2 (Middle)	300	462	Base metal
No.3 (Low)	305	424	Weld metal
No.4 (High)	292	366	Weld metal
No.5 (Middle)	294	405	Weld metal
No.6 (Low)	282	419	Weld metal
No.7 (High)	75	87	Weld metal
No.8 (Middle)	67	77	Weld metal
No.9 (Low)	57	76	Weld metal

취성파단임을 확인하였다.

3.3 제2상의 석출과 결정립 조대화

Fig. 6은 X-ray diffraction을 이용하여 정성적 분

Table 6 Cross section of weld metal according to heat input

Heat input (Specimen No.)	각장 (L)	목두께 (D)	용입 (A)	용입 (B)
High(1, 4, 7)	2.58	1.86	0.26	0.35
Middle(2, 5, 8)	2.18	1.54	0.24	0.32
Low(3, 6, 9)	1.46	1.03	0.08	0.25

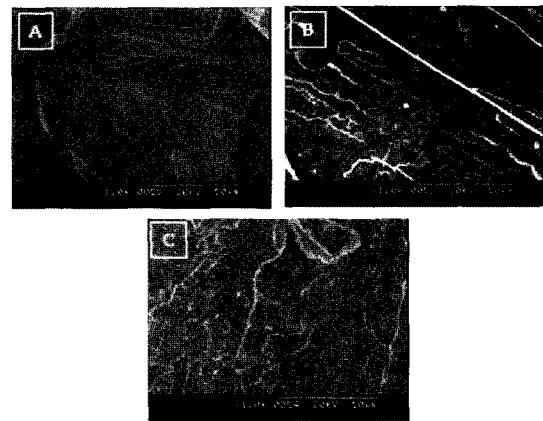


Fig. 5 Fracture surface microstructure for low heat input specimens (a) No. 3, (b) No. 6, (c) No. 9

석을 하여 고온환경에 따른 HAZ에서의 석출물들을 확인하였다. X-ray 회절패턴은 JCPDS 데이터를 참조하여 회절선들을 확인한 결과 크롬탄화물($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3) 등이 HAZ에서 석출하였다. 특히 시효처리시편(No. 4)에 비해 고온인장시편(No. 7) HAZ에서 크롬질화물(Cr_2N)과 TiN 등의 다양한 상들이 추가적으로 석출하였다. 이는 고온인장시편이 이미 시효처리로 경화된 상태에서 인장시험시 다시 고온으로의 노출로 인해 과시효 현상이 일어나 제2상의 석출물이 다양하게 석출되었고, 이는 강도의 저하와 취화경향을 증가시켰다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 모재(a)와 인장조건(b~d)에 따른 용접열영향부(HAZ)의 미세조직을 나타낸다. 결정립의 크기가 고온환경으로 갈수록 조대화됨을 알 수 있으며, HAZ의 결정립이 조대화됨에 따라 결정입계(Grain boundary)의 결속력이 약해지면서 강도가 크게 떨어졌다고 볼 수 있다.

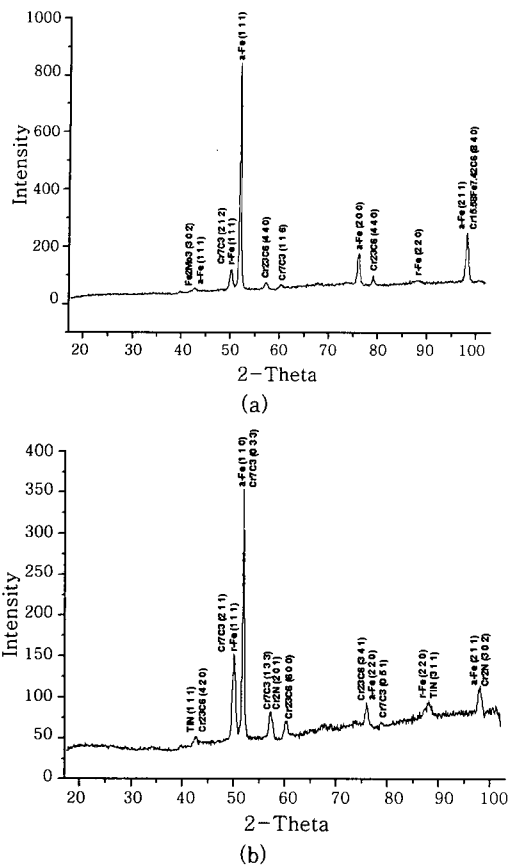


Fig. 6 XRD patterns of HAZ for tensile test condition

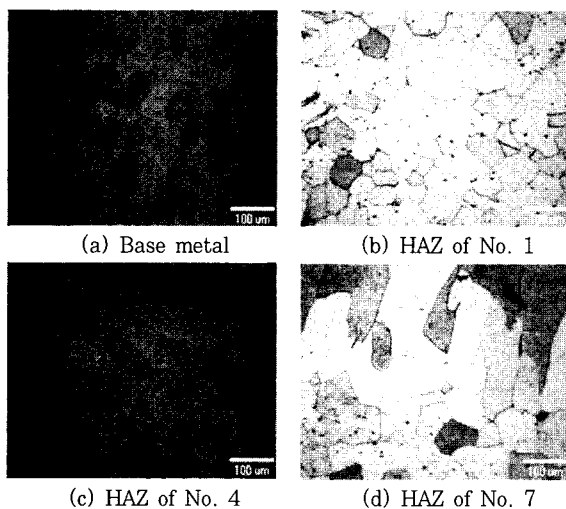


Fig. 7 Grain size of HAZ for specimen No. 1, 4, 7 and base metal

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 배기계에 주로 사용되고있는 페라이트계 스테인리스강(STS 429)에서 고온환경이 겹침용접부의 기계적 강도특성에 미치는 영향을 평가하

였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 저입열 시편은 고온환경에 상관없이 용접부 파단이 일어났다. 용접부 단면형상과 인장강도를 비교해 보았을 때, 입열에 따라 일정량 이상의 모재부 용입이 없으면 용접부는 모재보다 강도가 낮아 용접부파단이 일어났다고 볼 수 있다.

2) 고온인장에서 강도가 크게 감소한 것은 이미 시효 처리로 경화된 상태에서 인장시험시 다시 고온으로의 노출로 인해 과시효 현상이 일어나 제2상의 석출물이 다양하게 석출되었고, 이는 강도의 저하와 취화경향을 증가시켰다고 볼 수 있다.

3) 고온환경의 영향으로 HAZ의 결정립이 조대화됨에 따라 결정입계(Grain boundary)의 결속력이 약해지면서 강도가 크게 떨어졌다고 볼 수 있다.

후 기

실제 배기매니폴드는 고온환경에서 열에 의한 반복적인 팽창과 수축으로 인해 용접부에서 결함 또는 강도의 저하가 나타난다. 향후 연구에서는 열피로 시험을 통한 페라이트계 스테인리스강의 고온환경에 따른 취화경향의 메카니즘에 대한 연구와 취화경향의 감소와 내열성을 향상시키는 소재에 대한 연구가 함께 진행되어야 할 것이다.

본 연구는 국가지정연구실(No. M20604005402-06B0400-40210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

참 고 문 헌

1. R. Castro et al : Welding Metallurgy of stainless and heat resisting steels, Cambridge university press, (1975), 17
2. E. Folkharde : Welding Metallurgy of stainless steels, Springer-verlag wein new york, (1988), 108
3. KSA : KS B 0851 : Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot and embossed projection welded joints, (2006)
4. S.S.M. Tavaresa, J.A. de Souzaa, L.F.G. Herculanob, H.F.G. de Abreub, C.M. de Souza Jr.c : Microstructural, magnetic and mechanical property changes in an AISI 444 stainless steel aged in the 560°C to 800°C range, Materials characterization, **59** (2008), 112-116
5. Cleiton C. Silvaa, Jesualdo P. Fariasa, Hélio C. Mirandaa, Rodrigo F. Guimarães, John W.A. Menezesb, Moisés A.M. Netoc : Microstructural characterization of the HAZ in AISI 444 ferritic stainless steel welds,

- Materials characterization, **59** (2008), 528-533
6. H.F.G. de Abreu, A.D.S. Bruno, S.S.M Tavares, R.P. Santos, S.S. Carvalho : Effect of high temperature annealing on texture and microstructure on an AISI-444 ferritic stainless steel, *Materials Characterization*, **57** (2006) 342 - 347
 7. Y. Uematsu, M. Akita, M. Nakajima, K. Tokaji : Effect of temperature on high cycle fatigue behaviour in 18Cr-2Mo ferritic stainless steel, *International Journal of fatigue*, **30** (2008) 642-648
 8. KSA : KS B ISO 5817 : Arc-welded joints in steel- Guidance on quality levels for imperfections, (2007)
 9. Kim JS, Kwon H-S : Effects of Tungsten on corrosion and kinetics of sigma phase formation of 25% chromium duplex stainless steels, *Corrosion*, **55** (1999), 512 - 21
 10. Young Il Kim, Jun Tae Choe, Dae Soon Kim : Evaluation of ferritic stainless steel FCA overlay weld metal ductility, *Journal of KWJS*, **46** (2006), 140-207 (in Korea)
 11. G.B.Hunter, T.W.Eagar : Ductility of stabilized ferritic stainless steel welds, *Metallurgical transactions A*, **11A** (1980), 213-218
 12. Ravindranath K, Malhotra SN : The influence of aging on the intergranular corrosion of 22 chromium-5 nickel duplex stainless steel, *Corros Sci*, **37** (1995), 121 - 32
 13. nickel duplex stainless steel, *Corros Sci*, **37** (1995), 121 - 32
 13. Davis JR, editor : *ASM speciality handbook—stainless steel*, Materials Park, ASM (American Society for Materials), 1994
 14. Grobner PJ : The 885°F(475°C) embrittlement of ferritic stainless steels, *Metallurgical and Materials Transactions B*, **4** (1973), 251 - 260
 15. Chih-Chun Hsieh, Dong-Yih Lin, Weite Wu : Precipitation behavior of sigma phase in 19Cr - 9Ni - 2Mn and 18Cr - 0.75Si stainless steels hot-rolled at 800°C with various reduction ratios, *Materials Science and Engineering A*, **467** (2007), 181 - 189
 16. Kaishu Guan, Xiaodong Xu, Hong Xu, Zhiwen Wang : Effect of aging at 700°C on precipitation and toughness of AISI 321 and AISI 347 austenitic stainless steel welds, *Nuclear Engineering and Design*, **235** (2005), 2485 - 2494
 17. Eui Soon Hwang, Ha Mi Lee, Sung Wook Kim, Young Dae Seo, Chang Hee Lee, Sang Kon Ahn, Yong Deuk Lee : Effects of Nitrogen and Precipitates on the Mechanical Properties of 26Cr-2Mo Superferritic Stainless Steel Welds, *Journal of KWJ*, **20-5** (2002), 63-71 (in Korean)