

Nb이 첨가된 주조 2상 스테인리스강의 열취성에 관한 연구

송명호·김용규*

한국원자력안전기술원 금속재료실

*홍익대학교 금속공학과

A study on the thermal embrittlement of Nb-containing cast duplex stainless steel

Myung-Ho Song and Young-Kyu Kim*

Metal & Materials Group, KINS

*Dept. of Metallurgical Engineering, Hongik University, Seoul 121-791

(1997년 4월 28일 받음, 1997년 6월 4일 최종수정본 받음)

초 록 본 연구에서는 주조 2상 스테인리스강의 열시효에 대한 시효온도, 시효시간 및 Nb 함유량의 영향을 관찰하기 위해 기계적 성질 및 조직을 조사하였으며 Nb를 함유한 주조 2상 스테인리스강의 파괴기구를 규명하기 위해 SEM에 의한 파단면 관찰과 WDS 성분분석을 통해 파괴기구의 특성을 고찰하였다. 시효온도와 시효시간이 증가함에 따라 페라이트의 미소경도가 증가하였으며 항복강도의 경우 시효온도와 시효시간에는 영향을 받지 않았으나 Nb를 함유한 재료들이 Nb를 함유치 않은 재료들에 비해 다소 낮은 항복강도 값을 보였다. 충격흡수에너지 값은 시효시간 및 시효온도의 증가에 따라 시험된 모든 재료에서 저하되었는데 0.4% Nb를 함유하는 경우 Nb를 약간 함유하거나 함유치 않은 재료들에 비해 시효시간에 따라 급격한 감소 경향을 보였다. 파단면 관찰결과 페라이트 기지 또는 페라이트/오스테나이트 상경계에서 석출된 NbC를 비롯한 탄화물들이 취성저항성을 낮추는데 크게 기여했음을 알 수 있었다.

Abstract The effect of aging temperature and time on the mechanical properties and microstructures for cast duplex stainless steels with Nb and without Nb was observed. To identify the fracture mechanism of Nb-containing duplex cast stainless steels the characteristics of fracture morphology by SEM and chemical analysis on metallic microstructures by WDS were investigated. The results showed microhardness of ferrite in aged cast duplex stainless steel increased with increasing aging temperature and aging time. There was little effect due to aging temperature and aging time on yield stress and Nb containing CF-8M material had somewhat lower values of yield stress than those without Nb. With increasing aging temperature and aging time, values of impact absorption energy for all specimens dropped. CF-8M material with 0.4% Nb had a tendency to decrease rapidly with increasing aging times compared to one with little niobium and one without niobium. As a result of observation of fracture surfaces, it was confirmed that carbides as well as NbC, which formed in the matrix of ferrite and at the ferrite/austenite interface, mainly contributed to lower the resistance of embrittlement.

1. 서 론

원자력발전소의 설비는 1차측 냉각재의 누설에 따른 방사성물질 오염 및 확산을 방지하기 위하여 무엇보다도 설비의 건전성확보가 요구되고 있다. 이에 따라 발전소 1차계통에는 내식성과 기계적 성질이 우수한 스테인리스강을 소재로 사용하고 있으며, 특히 1차 냉각재 배관, 엘보우, 펌프 케이싱, 밸브몸체 그리고 압력용기 노즐의 안전단 등에는 주조 2상 스테인리스강이 사용되고 있는데 이는 주조 스테인리스강의 우수한 기계적 성질과 hot cracking, 부식 및 응력부식균열에 대한 높은 저항성과 제조상의 장점이 있기 때문이다. 그러나 원전의 운전조건하에서 주조 스테인리스강 부품이 장기간 사용될 때, 부식, 피로, 열취화(thermal embrittlement) 그리고 응력부식균열 등에 의하여 재료가

손상을 받게 되는데, 특히 열취화에 의한 재료의 열화가 1차 압력경계의 건전성 유지에 있어 매우 중요한 인자로 알려져 있다¹⁾. 즉, 오스테나이트와 페라이트 2상조직으로 구성된 주조 스테인리스강의 경우 270~520℃의 온도범위에서 장시간 사용됨에 따라 인성이 저하되는 열시효취화가 발생한다^{2~9)}. 따라서 원전설비의 안전성 확보를 위해서는 주조 스테인리스강을 원전 운전온도(약 325℃)에서 장기간 사용할 경우 발생하는 페라이트 취화 및 오스테나이트/페라이트 계면에서의 석출물 생성 또는 조대화로 인한 열취화가 주요 관심사가 되고 있다.

따라서 원전 1차 압력경계의 주요 소재인 주조 스테인리스강을 대상으로 원전의 가동조건을 고려하여 손상의 주원인이 되는 열취화 거동을 규명하는 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 Nb가 첨가된 주조 스테인리스강의 경우 강중의

Table 1. Chemical compositions of duplex stainless steel specimens.

(Unit : wt%)

Specimen	Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb
A	CF-8M	0.056	1.43	1.44	0.030	0.012	10.88	18.54	2.32	0.003
B		0.051	1.32	1.41	0.029	0.012	10.64	18.60	2.42	0.121
C		0.056	1.37	1.26	0.030	0.012	11.03	18.55	2.21	0.421

Nb이 파괴인성을 상당히 낮게 하며 그 원인으로 NbC의 석출과 이 석출물들이 균열의 생성 및 성장과 관련있을 것이라고 추정된 보고가 있으며¹⁰⁾ 국내 원전중 주조 스테인리스강으로 만들어진 1차 냉각재계통의 부품들을 프랑스로부터 도입한 울진 1 2호기의 경우 제조시 recycling 재료로서 type 348 스테인리스강이 사용되었을 가능성이 있다는 사실과 함께 Nb의 함유가 의심되는 Y-계열의 heat number를 가진 부품들이 상당수 확인되어 Nb이 주조 스테인리스강의 열취성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요케 되었다. 본 연구는 Nb이 함유된 주조 2상 스테인리스강의 열취성을 평가하기 위해 미소경도, 항복강도 및 인장강도 그리고 충격흡수에너지를 측정함으로써 시효온도, 시효시간 및 Nb의 첨가가 열취성에 미치는 영향을 알아 보았으며 파단면 관찰을 통해 NbC 석출이 파괴에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

시편준비

Nb이 함유된 주조 2상 스테인리스강의 열시효 취화정도를 관찰하기 위하여 Nb 함량을 달리한 3가지 종류의 ASME SA 351 CF-8M 2상 스테인리스강을 제조하였으며, 표 1에 각 시편의 화학조성을 나타내었다. 용해는 500kg급 고주파유도로를 사용하여 판상 형태로 주조하였다. 그후 1,050°C에서 1시간 열처리후 수냉하여 용체화처리하였다. 열시효 효과를 조사하기 위하여 300, 350, 400°C에서 2,000시간까지 열시효시켰다.

미세조직 및 파단면 관찰

δ 페라이트의 함량은 Institut Dr. Förster사의 ferrite content meter 1.054를 사용하여 측정하였다. 이때 δ 페라이트의 함량은 시편 A, B, C 모두 6% 이내였으며 실제 원자력발전소의 주조 스테인리스강 부품들중 δ 페라이트의 함량이 낮은 부품들이 상당수 사용되고 있음을 고려할 때 낮은 페라이트 함량의 재료들에 대해 열시효 영향을 평가하는 것도 의미가 있다. 따라서 δ 페라이트 이외의 취화기구를 규명하기 위해 Akashi Beam Technology사의 주사전자현미경을 이용하여 미세조직 및 파단면을 관찰하였으며 특정상의 분석을 위해 WDS를 사용하였다.

기계적성질 측정

주조 2상 스테인리스강의 열시효에 따른 페라이트 상의 미소경도를 측정하기 위해 Akashi사의 Vickers 경도기를 사용하였다. 이때 하중 25gf, 유지시간 10초로 5회 이상 측정하였다. 또한 5 ton 용량의 Instron을 사용하여 인장강도 및 항복강도를 측정하였으며 이때 crosshead speed

는 5mm/min였다. 샤르피 충격흡수에너지는 Satek사의 30 kgf급 충격시험기를 사용하여 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

페라이트양 및 미세조직

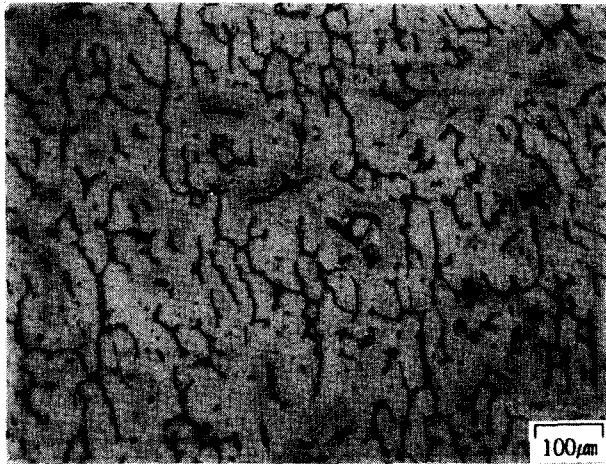
시편 A, B, C의 δ 페라이트 평균함량(% F)은 5.6 % F, 5.6 %F 그리고 2.6 %F 였다. 이는 시편의 제조시 판상형으로 주조됨에 따라 냉각속도가 빨라져서 페라이트 상의 성장을 위한 Cr 이나 Ni 등의 확산에 필요한 시간이 충분치 못했기 때문으로 생각된다. 실제 원자력발전소에서는 낮은 δ 페라이트 함량의 주조 스테인리스강 부품들이 상당수 사용되고 있기 때문에 δ 페라이트 상의 취화와 더불어 입내 또는 입계에서 생성된 탄화물에 의한 취약부위 형성이 예상된다. 따라서 δ 페라이트상의 취화에 의한 영향이 적을수록 Nb 함유 주조 스테인리스강의 열취화에 미치는 NbC의 영향을 보다 정확히 규명할 수 있다.

시편 A, B 그리고 C를 400°C에서 각각 2,000시간 열시효시킨 후 미세조직사진을 관찰한 결과, 그림 1~3에서와 같이 Nb 함량에 관계없이 페라이트의 양이 거의 비슷한 것으로 관찰되었고 Nb을 0.4% 함유하는 시편 C는 페라이트의 양이 적게 나타났다. 한편 여러 연구자들에 의해 제안된 주조 스테인리스강의 δ 페라이트 함량 추정식¹¹⁾을 이용하여 계산한 결과들과 페라이트미터를 이용하여 측정한 결과들이 잘 일치하였다. 그림 1, 2에서 알 수 있듯이 Nb을 함유치 않거나 0.1% 함유한 시편들은 전체적으로 vermicular 형을 보이며 부분적으로 방향성을 가지고 있었고 각각 400°C에서 2,000시간 열시효시킨 경우에도 페라이트의 모양에는 큰 변화가 없었다. 그림 3에서와 같이 시편 C의 페라이트 형태는 island형으로 400°C에서 2,000시간 열시효 후에도 페라이트는 같은 모양을 유지하고 있다.

기계적 특성 평가

- 미소경도 -

표 2는 시효온도와 시효시간 변화에 따른 각 시편의 페라이트상 미소경도 변화를 나타낸 것이다. 300°C의 시편 A 경우를 제외하고, 모든 온도 조건에서 시효시간이 길어짐에 따라 미소경도가 전반적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 시효온도 변화에 따른 경도변화에 있어서, 시효온도가 증가하더라도 시효초기 각 시편의 경도치 증가폭이 크지 않으나, 2,000시간 경과시 시효온도가 높을수록 경도값이 크게 증가하는 경향을 보였다. 한편 400°C의 결과를 도시한 그림 4에서 알 수 있듯이, Nb함량이 가장 많으며 시편 A, B에 비해 페라이트양이 상대적으로 가장 적은 시편 C의 미



(A) As received

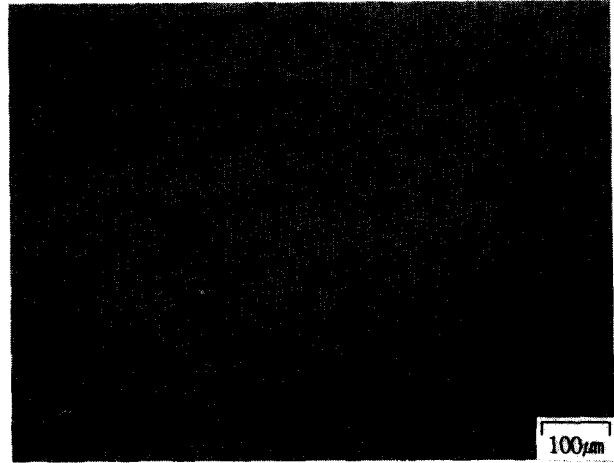


(B) Aged for 2,000 h at 400°C

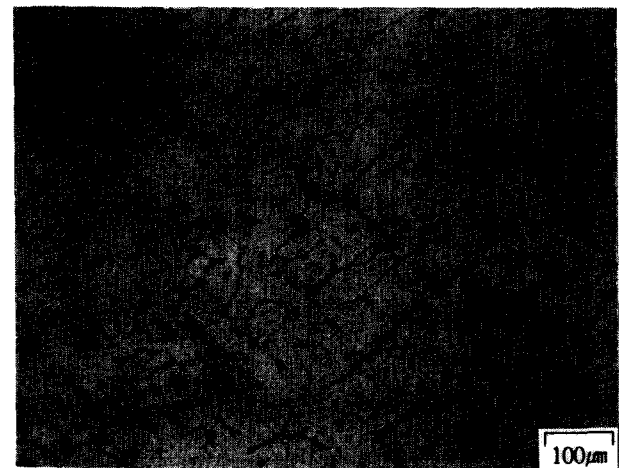
Fig. 1. Microstructure of CF-8M specimens

소경도값이 가장 크다는 점과 특히 2,000시간 경과시 경도값의 증가폭이 두드러진다는 점을 알 수 있다.

이와 같이 각 시효온도에서 시효시간에 따라 경도값이 전체적으로 증가하는 것은 주조 2상 스테인리스강 시편이 갖는 페라이트 상의 강화, 즉 스피노달 분해와 G상의 석출에 기인한 것으로 알려져 있으며, $M_{23}C_6$ 형 탄화물의 석출에 따른 영향으로 알려져 있다^{7,9)}. 따라서 본 실험에서 Nb을 함유하지 않은 시편 A의 페라이트 강화기구는 열시효에 따른 페라이트 상의 스피노달 분해에 의한 고Cr 농도구역 및 고Fe 농도구역으로의 조성유통에 기인되는 것으로 해석할 수 있으며, 반면 Nb을 0.4% 함유한 시편 C에서 경도가 두드러지게 증가된 결과는 이러한 효과 외에 NbC가 페라이트내에 석출되므로 나타나는 석출강화효과가 동시에 작용했기 때문으로 해석할 수 있다. 그러나 주조 2상 스테인리스강의 열시효에 따른 제 2상의 석출물 형성 및 이들에 의한 기계적 성질의 변화에 대한 영향에는 아직도 정확한 이론이 정립되어 있지 않다. 한편 열시효시간에 따른 경도치들의 편차가 큰 것으로 미루어 페라이트 기지에서의 경화가 균일



(A) As received



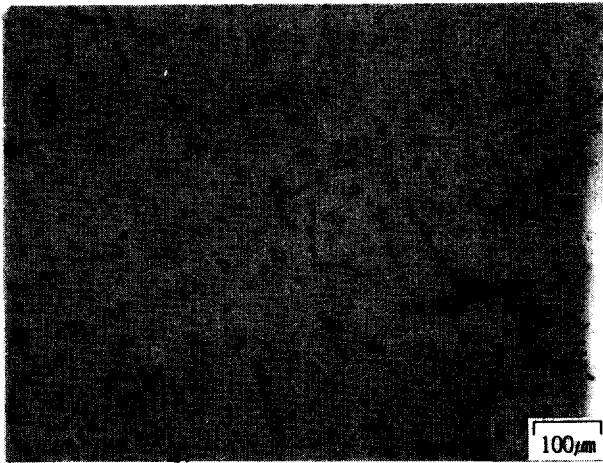
(B) Aged for 2,000 h at 400°C

Fig. 2. Microstructure of 0.1% Nb CF-8M specimens

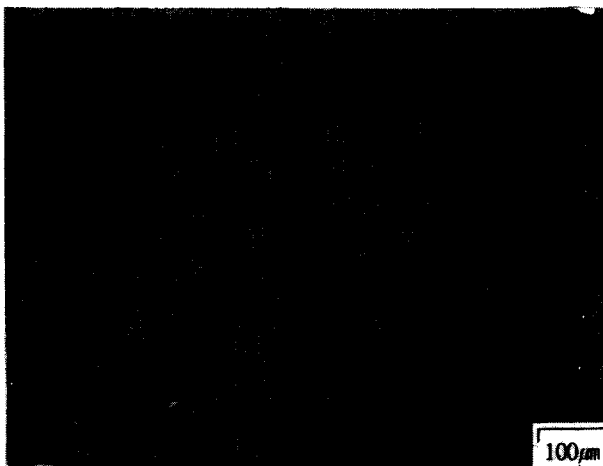
하게 일어나지 않았을 가능성이 있다. 이것은 시효동력학 (aging kinetics)에 영향을 주는 국부적인 조성들에 있어서의 작은 차이에 기인할 수 있다. 그러나 다른 설명도 가능한데 연마된 면에 수직한 면에서의 페라이트 두께를 관찰할 수 없기 때문에 측정치들 중의 어느 정도는 오스테나이트가 측정된 경도치에 영향을 주었을 것으로 생각되며 결과적으로 미소경도치에 있어서의 큰 편차는 페라이트 밑에 있는 오스테나이트에 기인한 것일 수 있다. 따라서 미소경도 측정치는 정성적인 취화경향만을 알려줄 수 있을 뿐이고, 미소경도 측정에 의한 취화량의 정량적인 특성을 설명할 수는 없다고 생각된다.

— 항복강도 및 인장강도 —

그림 5와 6은 각 시효온도에서 500시간 및 1,000시간 열시효시켰을 때 항복강도와 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 시효온도 변화에 따른 각 시편의 항복강도는 시효시간 500, 1,000시간에서 거의 변하지 않는 결과를 보이므로 시효온도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 인장강도의 경우 시효온도가 높아질수록 다소 증가된 결



(A) As received



(B) Aged for 2,000 h at 400°C

Fig. 3. Microstructure of 0.4% Nb CF-8M specimens

Table 2. Variation on microhardness of duplex stainless steel specimens with increasing aging time.

(Unit : vickers hardness number)

Aging temp.(°C)	Specimen	Aging time(hrs)		
		250	1000	2000
300	A	200	208	209
	B	197	218	230
	C	234	245	261
350	A	191	221	234
	B	193	230	251
	C	217	252	277
400	A	193	296	298
	B	195	307	314
	C	221	322	351

과를 보여 시효온도의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 400 °C 시효온도에서 Nb을 0.4% 함유한 시편 C의 인장강도가 다른 두 시편 A, B보다 약간 낮은 값을 가지며, 인장강도

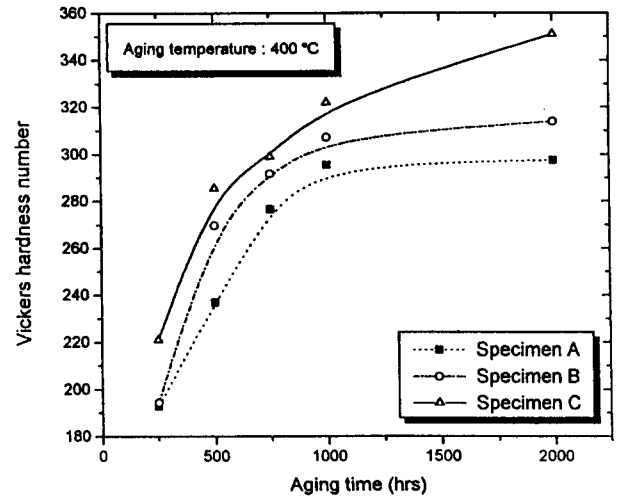


Fig. 4. Variation of micro-hardness after aging at 400°C.

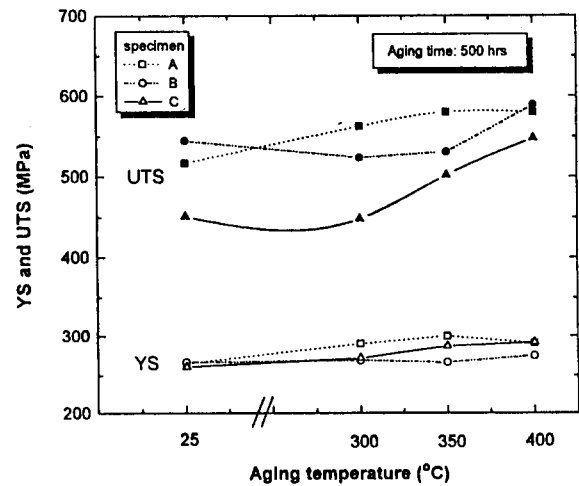


Fig. 5. Effect of aging temperatures on yield stress and ultimate tensile stress aged for 500 h.

의 증가폭에 있어서 약 100 MPa 정도 증가되므로써 다른 두 시편보다 약 50 MPa 이상 증가된 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 시효시간을 달리한 두 조건에서 모두 같게 나타나고 있다. 그리고 300°C 시효온도에서 인장강도의 변화가 두드러지지 않은 점으로부터 이보다 높은 온도에서 시효효과가 나타나는 것으로 해석할 수도 있겠으나, 이 온도에서 시효효과가 얻어지기 위해서는 더 긴 시효시간이 요구되는 것으로 해석할 수 있다.

시효온도가 높을수록 인장강도값이 증가하는 경향을 보이는 것은 Irvine 등⁽²⁾에 의해 보고된 것처럼 질소와 탄소가 오스테나이트로 분배된 결과로서 해석할 수 있다. 그러나 항복강도는 시효온도에 따른 현저한 증가 경향을 찾아볼 수 없어 δ 페라이트가 분산강화와 결정입도의 미세화에 의해 항복강도를 증가시킨다는 주장과는 일치하지 않았다.

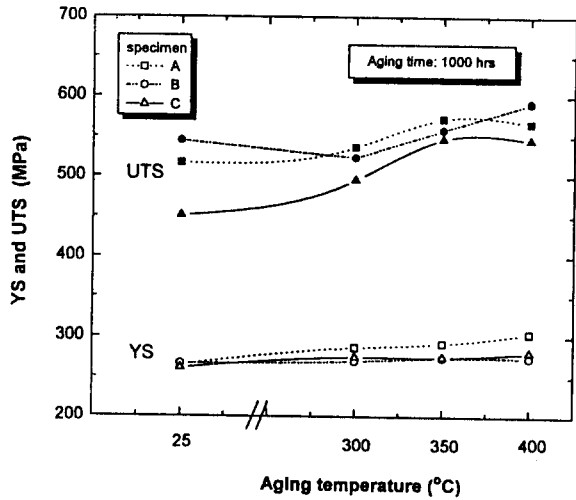


Fig. 6. Effect of aging temperatures on yield stress and ultimate tensile stress aged for 1,000 h.

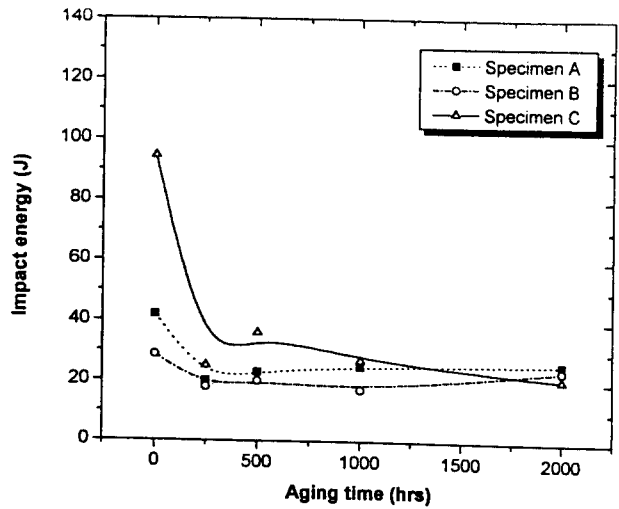


Fig. 8. Impact energy of cast stainless steels after aging at 350°C.

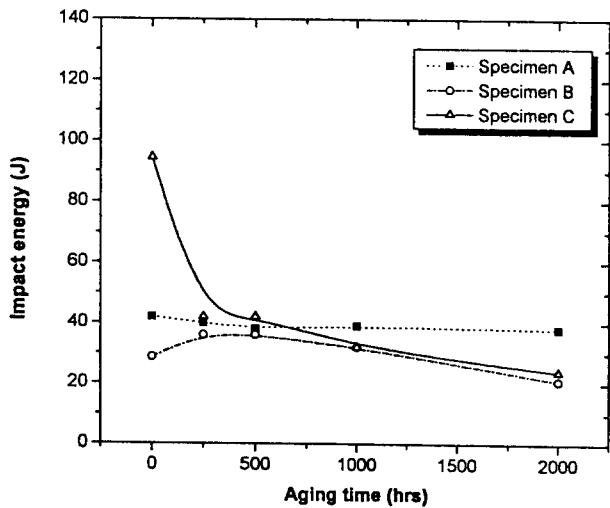


Fig. 7. Impact energy of cast stainless steels after aging at 300°C.

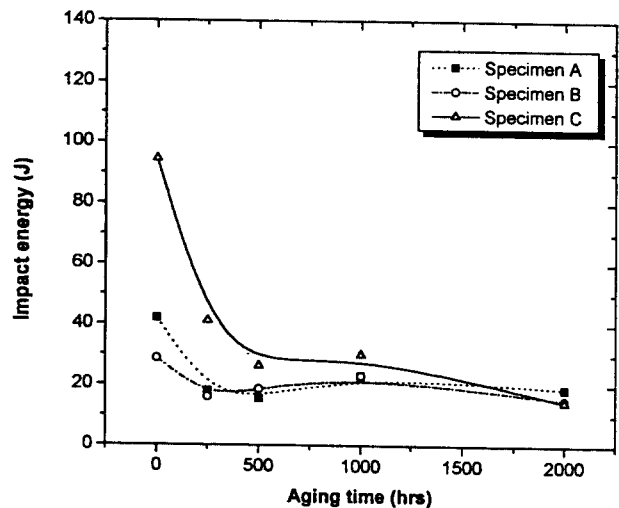


Fig. 9. Impact energy of cast stainless steels after aging at 400°C.

이것은 본 실험의 경우 전위의 운동을 억제하는 석출물 등의 형성이 짧은 시효시간으로 인해 충분치 못하기 때문인 것으로 생각되며 또한 시효온도 및 시효시간의 증가에 따른 페라이트 면적의 감소 현상이 뚜렷이 나타나지 않았었다는 점이 가장 큰 이유인 것으로 생각된다. 또한 재료에 함유되어 있는 Nb이 탄소, 질소 등과 결합해서 Nb화합물을 형성하므로써 이들 원소가 오스테나이트로 분배되는 것을 억제하고 NbC가 생성된 지역들은 균열에 취약한 부위로 작용하여, Nb을 함유한 재료가 함유하지 않은 재료보다 다소 낮은 항복강도 및 인장강도를 갖는 것으로 생각된다. 한편 Chopra¹³⁾는 열시효가 항복강도 및 최대인장강도를 증가시키나 연신율은 약간 감소시킨다고 보고하는 한편 모든 등급의 CF 재료들에서 최대인장강도의 증가가 항복강도의 증가보다 실제로 더 컸지만 몇몇 heat 재료의 경우 항복강도

에서의 변화가 관찰되지 않았다고 주장하였다. 그러나 현재 계속되고 있는 본 실험의 기계적 성질 측정자료들 중에는 고온에서 짧은 시간동안, 예를 들어 400°C에서 ~3,000 시간정도 시효된 시편들이 가끔 항복강도와 최대인장강도가 동시에 감소되거나, 항복강도값은 변화가 없는 반면 인장강도는 증가하는 등의 결과들이 나타나는 것으로 미루어 시효온도 및 시효시간이 항복강도와 인장강도에 미치는 영향은 아직도 정립되어 있지 않아 앞으로 이에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

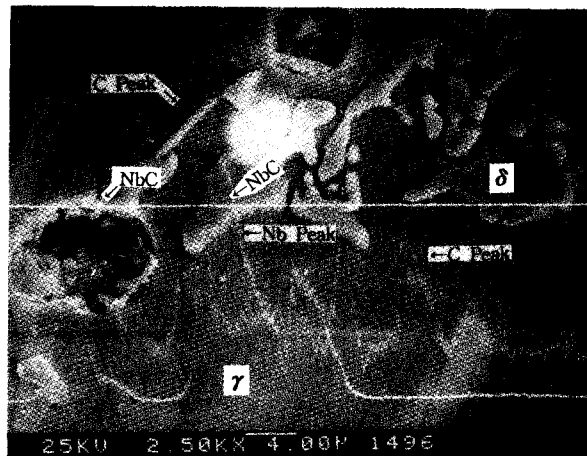
—충격 특성—

충격특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 300, 350, 400°C에서 시효시간을 달리한 시편들에 대한 상온 샤르피 충격에너지 변화를 조사하였으며 그 결과를 그림 7~9에 나타내었다. 그림 7~9의 충격에너지 변화로부터 다음의

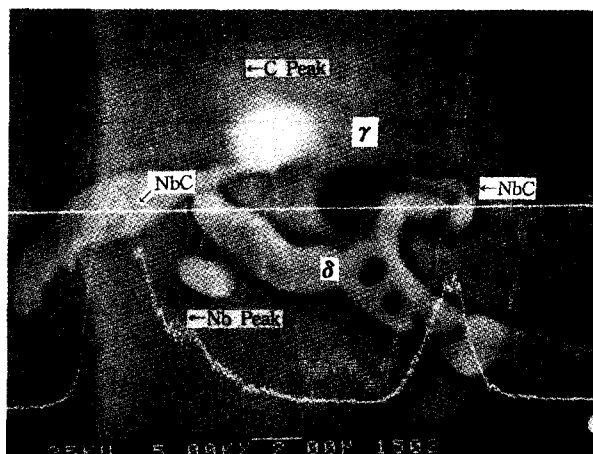
Table 3. Results of wavelength dispersive spectroscopy analysis

Specimen	main chemical Phase	Composition(wt. percentage)					
		Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn
Specimen "C", As Received	bulk*	64.40	18.55	11.03	2.21	1.37	1.26
	ferrite	59.58	24.14	5.15	7.85	2.21	1.07
	austenite	63.37	18.50	10.13	4.48	2.21	1.32
After 250 hrs, 400°C	ferrite	57.18	23.77	5.07	9.54	3.38	1.07
	austenite	61.61	18.43	10.34	5.30	3.01	1.31
After 1000 hrs, 400°C	ferrite	60.13	24.80	4.89	7.12	1.94	1.12
	austenite	63.24	18.76	9.98	4.47	2.22	1.32
After 2000 hrs, 400°C	ferrite	55.13	23.93	5.43	10.96	3.41	1.14
	austenite	61.81	18.48	10.49	5.02	2.86	1.34

* : wt% of chemical composition obtained from CMTR



(A) fragment of ferrite & NbC precipitate



(B) NbC precipitate in ferrite

Fig. 10. Precipitation of niobium carbides in specimen "C" after aging at 400°C for 250 h.

세가지 사실을 알 수 있다. 즉 Nb을 0.4% 함유한 시편 C의 충격에너지 감소가 다른 두 시편에 비해 매우 크다는 점, 충격에너지 감소가 세 시편 모두에서 시효 초기에 두드러진다는 점, 그리고 시편 A, B의 경우 시효에 의한 충격특성의 변화가 300°C 보다 높은 온도에

서 일어난다는 점을 들 수 있다.

가장 급격한 충격에너지의 감소를 나타내는 시편 C의 경우, 모든 시효온도 조건에서 약 500시간의 시효 기간 동안에 초기 충격에너지 값으로부터 약 60~70% 까지 급격히 감소된 이후 완만한 감소가 진행되어 2,000시간 시효시 최대 약 85%의 충격에너지 감소를 보였다. 이와 같은 실험 결과는 Meyzaud 등¹⁴⁾에 의한 비슷한 양의 페라이트를 함유한 CF-8M 재료들에 있어 Nb을 함유한 재료가 그렇지 않은 재료보다 더 빨리 취화된다는 보고와 일치하고 있다. 한편 시편 A, B의 경우도 시효온도 350, 400°C 조건에서 이와 유사하게 시효초기의 충격에너지 감소가 두드러지게 나타나나, 300°C 조건에서는 큰 변화를 보이지 않으므로써 이보다 높은 온도조건에서 시효에 의한 열취화가 발생할 수 있는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 얻어진 이러한 충격특성의 변화는 δ 페라이트 상의 취화효과와 Nb 첨가로 생성되는 석출상의 영향으로 해석할 수 있다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이, 세 시편의 δ 페라이트양에 큰 차이가 없고, 특히 경도 측정결과(그림 4 참조)에서 보여준 각 시편의 δ 페라이트 상 취화정도가 충격특성변화를 지배할 만큼 큰 차이를 갖는 것이 아니라는 점을 감안할 때, 본 연구결과의 충격에너지 감소에 미치는 δ 페라이트 상의 취화효과는 그다지 큰 것으로 볼 수 없다. 이러한 점은 주로 스테인리스강을 350~400°C 조건에서 3,000시간까지 열시효시켰을 때 충격에너지의 감소가 페라이트양 뿐만 아니라 조직특성과 재료의 등급에 의존하게 되나 페라이트를 10% 이상 함유하고 있는 경우에는 δ 페라이트 취화에 의한 충격에너지 감소가 뚜렷해진다

는 결과를 제시한 Chopra 등¹⁵⁾의 해석에 의해서도 뒷받침된다. 따라서 δ 페라이트의 취화기여도가 적은 Nb함유 주로 스테인리스강에서의 취화기구는 Nb 석출상의 존재와 관계지어 해석될 수 있다고 본다.

-Nb 석출상 분석-

Nb을 함유한 CF-8M 재료의 취화기구를 규명하기 위해 400°C에서 250 시간 열처리한 시편 C를 엿칭한

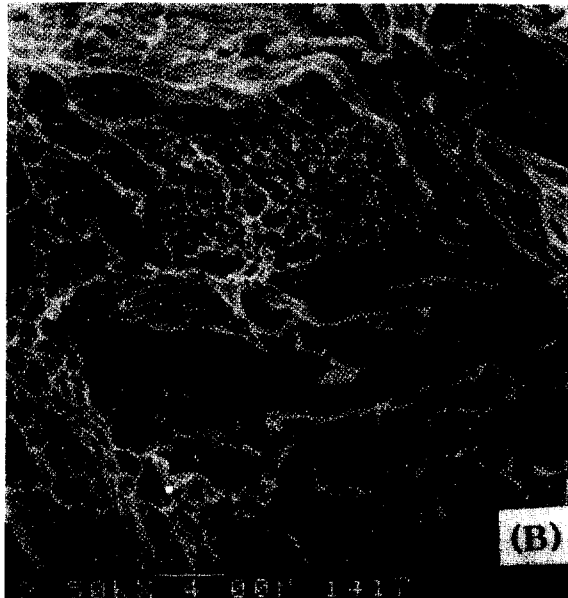
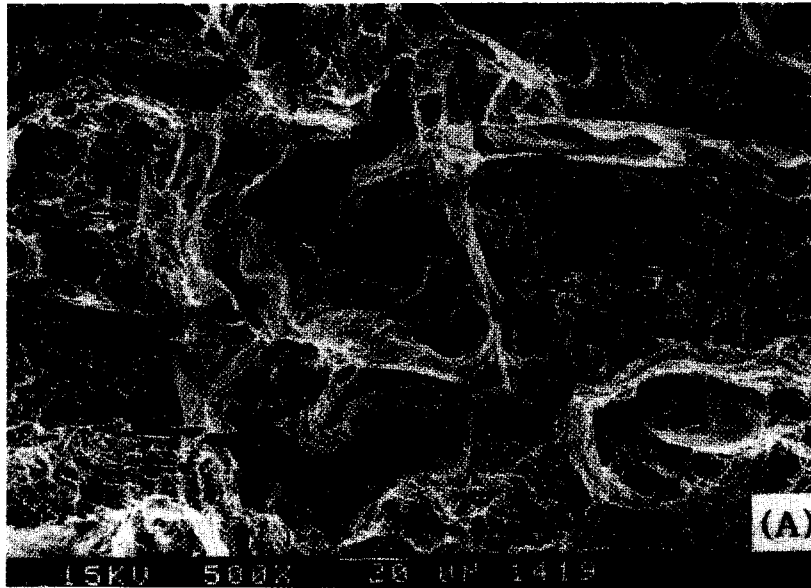


Fig. 11. SEM fractographs of cast CF-8M stainless steel(specimen "C") after aging at 400°C, 2,000 h and charpy impact failure at 25°C. (A) overall fracture surface; (B) and (C) higher magnifications of (A), showing ductile and brittle-cleavage morphology

후 석출물에 대해 정성분석을 실시하였다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 Nb peak와 C peak를 나타내는 NbC 석출물이 관찰되었으며, 이들 NbC는 (A)에서와 같이 페라이트(상경계가 취약하여 시편준비과정에서 떨어져 나간 것으로 추정됨) 가장자리에 연결된 형태로 또는 (B)에서와 같이 페라이트 내부에 존재하고 있다. 그리고 Nb와 C 각각의 peak를 정성적으로 분석한 결과 C이 Nb 보다 2배 이상 존재하는 석출상임을 알 수 있었다. 한편 그림 10의 (A)와 유사한 몇몇 석출상 형태에 대한 탄소 image mapping 분석으로부터 페라이트 가장자리에 NbC가 아닌 다른 탄화물이 가느다란 띠 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 다른 형태의 탄화물의 종류를 알아보기 위해

Cr에 대해 분석을 하였으나 주변과 기지와 Cr 농도차가 그리 크지 않고 또 기하학적으로 요철이 있어 분석이 불가능하였다.

표 3은 400°C에서 열시효된 시편 C를 시효시간별로 페라이트와 오스테나이트에 대해 주요 성분들을 정량분석한 결과들이다. Cr이 페라이트상에 우선적으로 분배되었다는 증거는 없으며 반면에 Ni도 역시 오스테나이트상에 선택적으로 분배되어 있지 않았다. 다만 Si와 Mo가 페라이트로 다소 분배되는 경향을 보였다. 위의 Nb를 함유한 열시효된 시편의 미세조직에 대한 정성분석 및 정량분석 결과들로 미루어 볼 때 페라이트 상에서의 스피노달 분해에 의한 Cr-rich 상의 생성에 대한 증거는 본 실험의 분석결과로는 찾

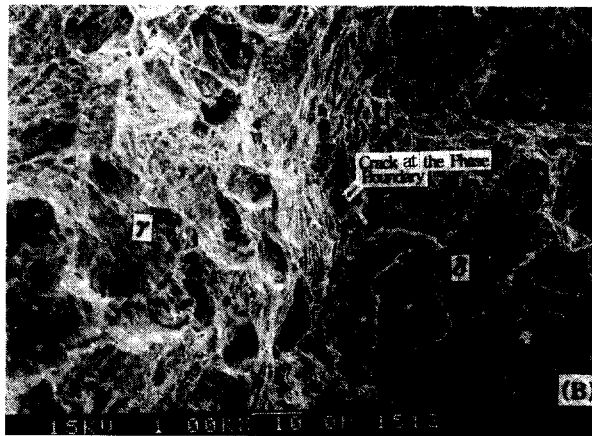
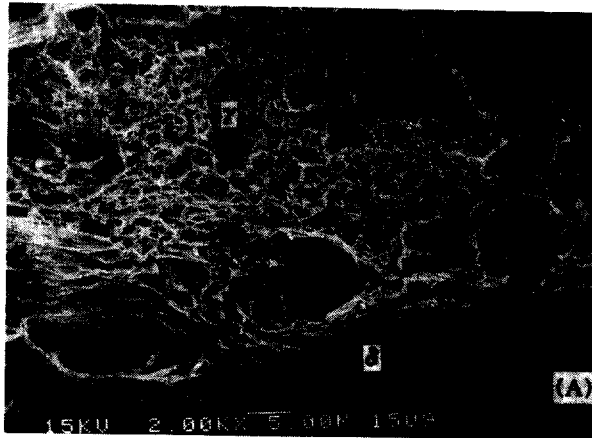


Fig. 12. SEM fractographs of unaged CF-8M cast stainless steel and one aged at 400°C, 2,000 h(specimen "C") after charpy impact failure at 25°C, showing (A) ductile morphology and unbrITTLE ferrite phase; (B) ductile morphology and brittle ferrite phase.

아보기 어려웠으나 수 nm의 크기로 Cr이 농축된다는 보고⁶⁾에 따라 페라이트도 어느 정도 취화되었을 것으로 추정된다. 그러나 본 실험에 사용된 시편들에서 측정된 δ 페라이트의 양이 매우 작아 열시효에 의한 페라이트의 취화가 재료 전체의 기계적 성질 저하 특히 취화에 미치는 영향은 상대적으로 적었을 것이라는 사실과 함께 분석된 시편의 페라이트상 주위 또는 페라이트 기지내 곳곳에서 NbC 석출물들을 확인할 수 있었던 것으로 미루어 Nb를 함유한 CF-8M 재료의 열시효 취화현상은 NbC에 의한 취화기구가 우세한 것으로 생각된다.

파단면 관찰

그림 11의 (A)는 400°C, 2,000시간 열시효후 충격시험된 시편 C의 파면을 보여주고 있다. 오스테나이트에서의 dimple과 페라이트에서의 벽개파면을 관찰할 수 있고 (B)에서와 같이 페라이트 지역이 취화되어 laminated 형태를 띠고 있음도 관찰할 수 있었다. 한편 (C)는 페라이트내에 생성된 석출물을 보여준다. 본 실험에서 사용된 시편들에서 나타난 충격에너지의 감소는 시편들에서 측정된 δ 페라이트의 양이 매우 작았음을 고려할 때 주로 시편에 인위적으로 첨가된 NbC 석출물들에 의한 취화의 영향이라고 제안한 바 있다. 따라서 이를 규명하기 위해 시효되지 않은 시편 C와 400°C에서 2,000시간 열시효시킨 시편 C를 상온에서 샤르피충격후 각각의 파단면을 관찰하였다. 그림 12의 (A)는 열시효되지 않은 시편 C로서 페라이트 상의 기지 또는 페라이트/오스테나이트 경계구역에서의 균열발생이 다른 열시효된 시편들에 비해 비교적 적음을 확인하였다. 그러나 (B)에서와 같이 열시효된 시편 C의 경우에는 페라이트 상 자체의 균열발생 뿐만 아니라 페라이트/오스테나이트 상경계 지역에서의 균열도 관찰할 수 있었는데 그

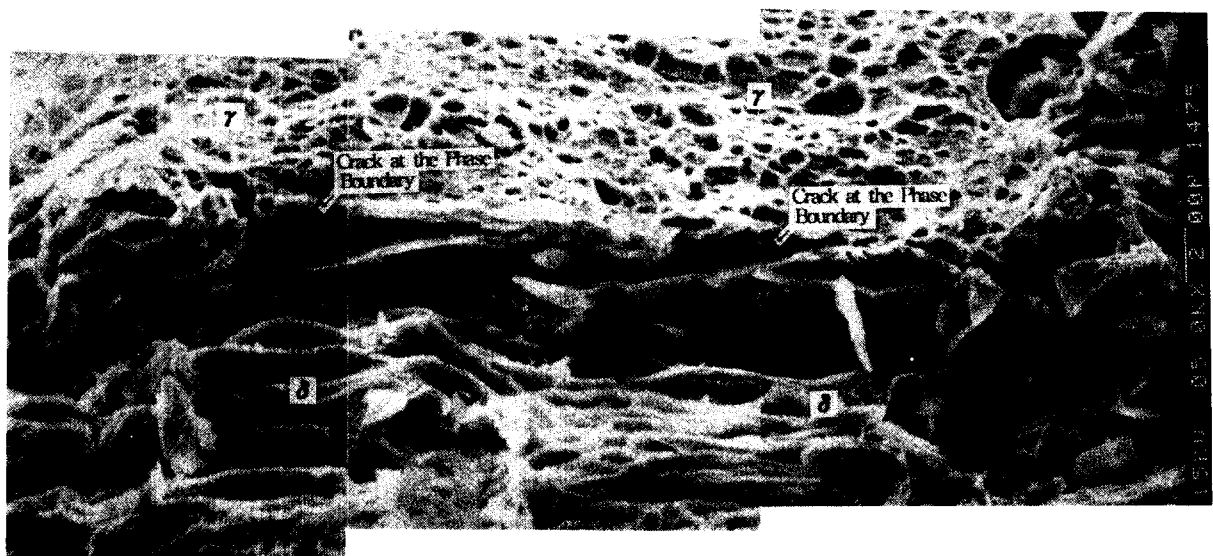


Fig. 13. SEM fractographs of crack morphology at the phase boundary of austenite/ferrite of CF-8M cast stainless steel(specimen "C") after charpy failure aged at 400°C for 2,000 h.

림 13은 그림 12의 페라이트/오스테나이트 경계구역에서 생성된 상경계 균열을 확대하여 보여준다. 미세조직에 대한 전자현미경사진에서나 석출물의 위치에 따른 성분분석결과로 미루어 볼 때 페라이트 기지내의 석출물에 비해서는 페라이트와 오스테나이트 상경계에서의 석출물이 재료 전체의 취화에 크게 기여한 것으로 생각된다.

4. 결 론

1) 주조 2상 스테인리스강은 시효온도와 시효시간이 증가함에 따라 경도치가 증가하였으며 Nb의 함유량이 클 수록 더 높은 경도치를 나타내었다. 0.4% Nb을 함유한 시편은 400°C, 2,000시간 열시효후 부분적으로 최고 421의 경도치를 가졌다.

2) 항복강도의 경우 시효온도와 시효시간에 따른 영향이 거의 없었으며 Nb을 함유한 재료들이 낮은 항복강도 값을 보였다. 한편 인장강도는 Nb 함량의 증가에 따라 낮아지는 경향을 보였으며 시효온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보였으나 시효시간에 따른 인장강도의 현저한 변화는 관찰할 수 없었다.

3) 시효시간 및 시효온도의 증가에 따라 충격흡수에너지 값은 모든 재료에서 저하되었다. 0.4% Nb을 함유하는 경우 Nb을 0.1% 함유하거나 함유치 않은 재료들에 비해 시효시간에 따라 급격한 감소 경향을 보였는데 400°C, 2,000시간 열시효후 충격흡수에너지 값은 85% 정도 감소되었다.

4) 0.4% Nb을 함유한 재료에서 관찰된 충격흡수에너지의 급격한 감소경향은 250시간의 열시효 부근에서 나타났으며 금속조직에 대한 분석결과 페라이트의 취화보다는 Nb탄화물에 의한 상경계의 취화가 취성에 지배적인 역할을 했을 것으로 생각된다.

5) 각 시편의 파단면 관찰결과 시효온도와 시효시간이 증가할수록 페라이트의 취성을 나타내는 벽개파괴 양상이 비교적 많아졌으나 페라이트의 양이 상대적으로 작아 페라이트 기지 또는 페라이트/오스테나이트 상경계에서 석출된 특히 NbC를 비롯한 탄화물들이 파괴의 주원인으로 재료의 취성저하에 크게 기여했다고 판단된다.

참 고 문 헌

- V.N. Shah and P.E. Macdonald, Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Component, Elsevier, **145 & 343** (1993)
- H.M. Chung and O.K. Chopra, Aging Degradation of Cast Stainless Steels: Effects on Mechanical Properties, in Environmental Degradation of Materials, in Nuclear Power Systems-Water Reactor, Monterey, CA, **737** (1988)
- O.K. Chopra and H.M. Chung, *Initial Assessment of the Process and Significance of Thermal Aging in Cast Duplex Stainless Steel*, in Proc. 16th Water Reactor Safety Information Meeting, Gaithersburg, MD (1988)
- C. Jansson, Proc. Fontervraud II Int'l Symp., Fontervraud, France, **62** (1990)
- H.M. Chung and T.R. Leax, Mat. Sci. and Tech., **6**, 249 (1990)
- S. Bonnet, J. Bourgoin, J. Charpredonde, D. Guttman and M. Guttman, Mat. Sci. and Tech., **6**, 221 (1990)
- P.H. Pumphrey and K.N. Akhurst, Mat. Sci. and Tech., **6**, 211 (1990)
- J.M. Vitek, S.A. David, D.J. Alexander, J.R. Keiser and R.K. Nanstad, Acta Metall., **39**(4), 503 (1991)
- T.R. Leax, S.S. Brenner and J.A. Spitznagel, Met. Trans. A, **2725** (1992)
- K.D. Bogie, D. Alexander and R. Kirk, *Int'l Symp. on Aging of Material and Lifetime Assessment*, Capetown, South Africa (1991)
- 송명호, 장재규, 김동규, 안희성, 고완영, 장순식, 국내 원전 주조 스테인리스강 부품의 열취성에 관한 연구, KINS/AR-250, pp67 (1994)
- K.J. Irvine, JISI, **207**, 1017 (1969)
- O.K. Chopra, ASME PVP, **228**, 79 (1992)
- Y. Meyzaud, P. Ould, P. Balldon, M. Bethmont and P. Soulat, Proc. Int'l Conf. on Thermal Reactor Safety, Avignon, France, (1988)
- O.K. Chopra and H.M. Chung, *Aging of Cast Duplex Stainless Steels in LWR Systems*, NUREG/CP-0058, **4**, pp231 (1985)

1. V.N. Shah and P.E. Macdonald, Aging and Life Ex-