'2000 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

원자력 발전소용 오스테나이트계 스테인리스강의 물성에 미치는 탄소 및 질소의 영향

Effects of carbon and nitrogen on the properties of austenitic stainless steel for nuclear power plants

김영식[1], 김수한[2], 박용수[2], 류우석[3]

1. 안동대학교, 경상북도 안동시 송천동 388번지(yikim@andong.ac.kr)
2. 연세대학교, 서울시 서대문구 신촌동 134번지(corrus@bubble.yonsei.ac.kr)
3. 한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지(wsryu@kaeri.re.kr)

요 약

Na는 지구상에 가장 많이 존재하는 공기 및 물과 격렬하게 반응하며 부식성이 매우 강하다. 액체금속로는 수백ton의 액체 Na을 물 속에 잠겨있는 파이프를 통하여 펌핑하고 있다. 이러한 파이프의 두께는 4mm 정도로서 매우 두껍게 설계하고 있다. 이와 같이 액체 금속로에서 증기발생기 재료의 건전성은 매우 중요하며 그 물성에 대한 평가가 체계적으로 이루어져야 할 것이다. 차세대 액체금속로 증기발생기 재료 선정은 해당 국가의 경험과 시스템의 설계 및 가동 인자의 조합이 매우 중요하다는 것을 알 수 있으며, 액체금속로용 주요 재료의 데이터의 생산 및 분석 연구는 장기적인 계획 하에서 이루어져야할 필수적인 과제이다. 따라서 본 연구에서는 액체금속로에서 발생할 수 있는 합금 원소의 선택적 제거 현상을 모사하기 위하여 탄소 및 질소 함량을 조절한 스테인리스강을 실험 합금으로 하여 미세 조직, 기계적 성질 및 부식 특성에 대하여 평가하고 분석하였다.

Abstract

LMFBR uses Na as a cooling material not water. Na has a property to react with water and air promptly and its corrosivity is very high. Then the thickness of steam generator tubing should be designed more than 4 mm. Like these, the properties of steam generator tubing are very important for the safety of LMFBR. Therefore, the systematic and long-term research about the materials for LMFBR should be proceeded. To simulate the selective removal of alloying elements in LMFBR, we made some stainless steels varying carbon and nitrogen contents and did evaluate the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance.

1. 서론

액체금속로는 전기 뿐만이 아니라 플루토늄도 생산하는 로로써, 고속 중성자를 사용하게 되면 로에서 소비하는 플류토늄보다 더 많은 양을 생산하는 것이다. 특히, 우라늄 연료를 사용하는 전통적인 원자로에서는 냉각을 위하여 물을 사용하는데 비하여, 플루토늄 연료를 사용하는 고속 증식로는 Na으로 냉각하여야만 한다. 일본의 고속 증식로인 Monju의 경우, 1차 및 2차 냉각 계통이 반응로의 총 1,700 ton의 Na 중에서 220 ton을 이동하도록 설계되어 있다.

Na는 지구상에 가장 많이 존재하는 공기 및 물과 격렬하게 반응하며 부식성이 매우 강하다. 액체금속로는 수백ton의 액체 Na을 물 속에 잠겨있는 파이프를 통하여 펌핑하고 있다. 이러한 파이프의 두께는 4mm 정도로서 매우 두껍게 설계하고 있다.

우라늄을 연료로 하는 원자로에서 사고가 발생하면 핵연료 코어가 melt-down되지만 플루토늄을 연료로 하는 고속로에서는 폭발할 위험성이 있는 것이다. 전세계적으로는 1995년 12월 8일에 발생한 Monju의 Na-leak 사고를 비롯하여 프랑스, 러시아, 영국 등지에서 10여번의 액체금속로 사고가 있었다. 이렇게 Na-leak 사고는 방사능 오염을 비롯한 각종의 문제점을 발생시킬 수 있기 때문에 액체금속로의 안전성은 1차 및 2차 Na-loop의 건전성과 밀접히 관련되어 있다. 특히 이러한 계통에 사용된 전열관의 특성이 안전성에 결정적인 역할을 하기 때문에 전열관 특성 연구는 매우 중요하며, 1965년 경부터 건설되고 가동되고 있는 외국의 경우와 비교하여 볼 때 국내 연구가 거의 전무하기 때문에 향후 계속된 연구가 진행되어야 할 것이다.

물-수증기 열교환기와는 달리, Na-Na 또는 Na-수증기 열교환기에서의 운전 경험 자료는 제한되어 있다. 그럼에도 불구하고 시험로와 중간 크기의 Prototype LMFBR의 IHX 및 증기발생기의 운전 경험 자료들이 점점 확대되고 있다. Na/물 경계에서의 건전성이 LMFBR 열전달 시스템의 주요 관심사이다. 증기발생기 설계, 재료 및 제작 계획은 높은 건전성을 보장해야할 뿐만 아니라 Na-물 반응으로부터 시스템을 안전하게 하여야 한다.

EBR-II 증기발생기에는 Na-물 반응의 가능성을 최소화하기 위하여 과열기와 기화기에 2중의 튜브와 두 개의 분리된 관판을 사용하였다(1). 이러한 증기발생기 시스템은 지난 15년동안 신뢰성있게 가동되고 있다. 2.25Cr-1Mo강을 575-711K에서 9,000시간 가동한 뒤에 상온 항복강도 및 인장 강도가 각각 23.3과 4.5%씩 감소하였으며, 탄화물의 석출 때문에 인성이 증가하였으나 천이온도의 변화는 거의 없었다. 이 재질은 CRBRP 시범 사업으로 미국에 의해 선정된 것이다(2).

프랑스의 Phenix 반응로의 증기발생기에 2.25Cr-1Mo튜브, 2.25Cr-1Mo-1Nb튜브(기화기), 321형 스테인리스강 튜브(과열기)를 사용하여 3년 동안 가동한 뒤에도 누설되지 않은 것으로 보고하고 있다(3). 그러나 이 로를 상업화(>1,000MWe)하기에는 적합치 않아서 완전히 새로운 설계/재료 조합을 Super Phenix에 사용하였으며 증기발생기 전열관 재료로 합금 800을 사용하였다. 러시아

의 BN-350 LMFBR(2.25Cr-1Mo)과 영국의 PFR(2.25Cr-1Mo/ 316 스테인리스강)의 증기발생기의 운전 실적은 좋지 못하였다. 러시아에서는 광범위한 튜브 누설이 발생하였고 영국의 경우는 기화기와 과열기에서 작은 누설이 발생하였다. 그 원인은 Na와의 반응에 의해서 오스테나이트 관판의 가성 응력 부식 균열이 생겨 증기가 누설되었다(4). 영국의 전문가들은 사용한 재료가 누설 뒤에 가성 균열의 문제에 민감한 것으로 판단하고 대체 재료로서 합금 800과 페라이트강 중에서 페라이트강을 선정하였다. 비교적 저온 설계 시스템에는 페라이트강이 만족스러우나 고온 설계 시스템에는 합금 800이 채택되고 있다. 차세대 액체금속로 증기발생기 재료 선정은 해당 국가의 경험과 시스템의 설계 및 가동 인자의 조합이 매우 중요한다는 것을 알 수 있으며, 액체금속로용 주요 재료의 데이터의 생산 및 분석 연구는 장기적인 계획 하에서 이루어져야할 필수적인 과제이다.

따라서 본 연구에서는 액체 금속로의 증기 발생기 전열관의 데이터베이스 축적 연구의 일환으로서 고온의 Na와 전열관이 접할 때 발생되는 문제점, 즉 합금 원소의 제거 현상을 모사하여 합금 설계를 행하였다. 연구 합금으로는 내식성이 매우 우수한 것으로 알려진 초내식성 오스테나이트계 스테인리스강인 S32050을 대상 합금으로 하여 탄소 및 질소의 함량을 낮게 변화시키므로써 해당 재료가 액체 금속로 분위기에 노출될 경우 발생되는 원소의 제거 현상을 합금 설계시 모사하였다. 이들 합금에 대하여 미세 조직 관찰, 기계적 성질 측정, 부식 특성 평가를 행하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 합금의 제작

초내식성 스테인리스강인 S32050은 탄소 함량을 변화시킨 강종 2종과 질소를 변화시킨 강종 3종을 고주파 진공 유도 용해로에서 용해하였다. 잉고트 표면을 가공한 뒤 1250°C에서 2시간 동안 soaking하고 열간 압연을 행하여 4 mm의 두께의 판으로 가공하였다. 열간 압연 중에 표면에 생성된 산화 피막을 산세를 통하여 제거한 뒤 2.5 mm까지 냉간 압연을 행하였다. 이렇게 제작된 시편에 대하여 성분 분석 및 다음의 실험을 행하는데 사용하였다.

2.2 실험 합금의 열처리

냉간 압연된 판재에 대하여 1150°C에서 5분간 소둔열처리를 행하고 소둔재에 대한 특성 평가를 행하였다. TT(Thermal Treatment) 처리를 행한 재료에 대한 특성 평가를 행하기 위하여 550°C에서 15시간, 75시간, 150시간, 300시간, 500시간 동안 Ar분위기에서 관상로를 이용하여 열처리를 행한후 수냉하였다.

2.3 광학 현미경에 의한 미세 조직 관찰

조직 관찰용 시편은 각 시편을 Alumina 분말로 0.05㎛까지 폴리싱 하고, 알코올로 초음파 세척을 한후, 10ml HNO_3 + 90ml H_2O용액에서 5V로 약 30초간 전해에칭 후 광학현미경으로 관찰하고 선절단법에 의해 결정립의 크기를 구하였다.

Table 1. Chemical composition of the experimental alloys(wt%)

Alloys	S32050L	S32050H	S32050(std)	SRN1	SRN2	SRN3	Modified 9Cr-1Mo
C	0.01	0.08	0.02	0.027	0.026	0.027	0.096
Mn	0.84	0.76	0.92	0.87	0.84	0.82	0.44
Si	0.53	0.51	0.20	0.50	0.44	0.49	0.06
Fe	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.
P	0.006	0.006	0.020	0.030	0.031	0.028	<0.02
S	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	<0.01
Cr	23.2	23.3	22.2	20.7	20.8	21.4	8.95
Mo	6.2	6.26	6.1	6.1	6.1	6.0	0.48
N	0.31	0.38	0.26	0.01	0.18	0.35	0.045
Ni	21.2	21.2	21.6	23.3	22.8	23.0	0.19

2.4 경도 시험 및 인장 시험

열처리한 시편에 대하여 일정 크기로 절단한 후 SiC 연마지로 600번까지 폴리싱하고 각 시편에 대하여 경도값을 측정하였다. 총 7번을 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 5개 값의 평균을 구하였다. 실험에 사용한 경도기로는 Mitutoyo사 ARK-600 Rockwell경도계로써, 100kgf의 하중하에서 B-Scale로 측정하였다. 한편 인장 시험은 상온 및 고온(520°C)에서 행하였다. Cross head speed는 5 mm/min이었으며, 고온 인장 시험의 경우 520°C에서 30분간 유지시킨 뒤 시험을 행하였다.

2.5 응력 부식 균열 시험

실험 합금의 응력 부식 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 일정 연신율 시험(CERT, Constant Extension Rate Test)을 행하였다. 시험에 사용한 Cross Head Spead는 4.41×10^{-6}cm/sec 이었다. 부식 환경은 비등 상태의 40% NaOH, -900mV(SCE)의 전위를 가하면서 응력 부식 균열 시험을 행하였다. 표점 거리가 35mm인 인장 시편으로 가공하여 시험하였다.

2.6 비등 질산 중에서의 침지 시험

소둔재 및 TT재에 대하여 비등 질산 중에서의 부식 속도를 구하였다. 이 실험의 목적은 예민화된 강의 입계 부식 속도를 구하기 위한 것이지만 본 연구에 사용된 연구 합금의 탄소 함량이 매우 낮기 때문에 소둔재 및 TT재(550°C)에서는 예민화 현상이 관찰되지 않으므로 이 실험에서 얻어진 부식 속도는 비등 질산 중에서의 부식 속도로 정하였다. 시험 조건은 비등 상태의 25% HNO_3 용액(탄소 조절 합금) 및 65% HNO_3 용액(질소 조절 합금) 중에서 24시간 동안 침지하여 부식 속도를 구하였다.

2.7 양극 분극 시험

시편의 준비는 1㎠보다 약간 큰 크기로 절단한 시편의 뒷면에 구리선을 납땜하여 연결하고 상업용 호마이카로 고정시켰다. 각 시편을 SiC 연마지로 600번까지 연마한 후 1㎠의 면적만을 노출시키고, 용액을 반응조에 넣고 시편을 Potentiostat(Model 173, EG&G사)에 연결하였다. 그 뒤 시편 표면의 산화물의 영향을 제거하기 위하여 부식전위 아래에서 10분동안 강제 환원을 하였으며, 10분동안 개방회로 전위상태로 유지한 뒤 부식전위를 측정하고 부식전위보다 150mV 낮은 전위로 부터 1 mV/sec의 주사 속도로 양극 분극 시험을 행하였다. 사용한 부식 용액은 50°C의 0.5N HCl + 1N NaCl, 50°C의 1.5N HCl, 비등 상태의 40% NaOH이며, 40% NaOH용액에서의 분극 시험은 응력 부식 균열 시험 장치를 이용하여 행하였다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1 탄소량의 변화 및 열처리에 따른 특성 연구

상온 및 고온 인장 특성 : 탄소는 철강 재료의 기계적 물성을 좌우하는 대표적인 원소로서 그 함량에 따라서 기계적 특성이 크게 변화된다. 특히, 액체 금속로의 경우, 고온의 Na에 의하여 탄소가 합금으로부터 선택적으로 제거되면 사용된 재료의 기계적 물성이 크게 약화되어 이에 따른 손상이 우려된다. 따라서 본 연구에서는 탄소량을 미리 제어한 2개의 강종과 9Cr-1Mo강에 대하여 상온 및 고온 인장 시험을 행하였다. 표 2는 그 결과를 요약한 것이다. 현재 액체금속로의 열교환기 관 후보재인 9Cr-1Mo강에 비하여 탄소 조절된 초내식성 스테인리스강의 인장 강도가 훨씬 더 큰 값을 보이고 있다. 두 합금류 간의 상온 인장 강도의 차이가 고온 인장 강도보다 더 크게 나타났다. 그러나 항복 강도의 측면에서는 9Cr-1Mo강이 초내식성 스테인리스강보다 더 큰 값을 나타냈으며, 특히 고온 항복 강도의 경우에 훨씬 큰 차이를 보이고 있다. 한편 연신율의 측면에서는 9Cr-1Mo강에 비하여 2-3배 정도 더 큰 연신율을 초내식성 스테인리스강이 보여주고 있다. 요약하면, 인장 강도 및 연신율의 측면에서 보면 상온 또는 고온의 시험 온도에 관련없이 탄소 함량이 변화하더라도 초내식성 오스테나이트계 스테인리스강의 것이 9Cr-1Mo강보다 우수한 값을 보이고 있으나, 항복 강도의 측면에서 보면 특히 고온 시험에서 탄소 함량에 관계없이 초내식성 오스테나이트계 스테인리스강보다 9Cr-1Mo강의 항복 강도가 더 우수함을 알 수 있다.

Table 2-1. Tensile strength(MPa) of the experimental alloys at room temp. and 520℃.

Test temp. \ Alloys	SR50AL-A	SR50AL-TT	SR50AH-A	SR50AH-TT	9Cr-1Mo
Room temp.	745.2	769.1	799.4	826.4	549.0
High temp.(520℃)	563.4	559.1	623.3	613.8	421.9

Table 2-2. Yield strength(MPa) of the experimental alloys at room temp. and 520℃.

Test temp. \ Alloys	SR50AL-A	SR50AL-TT	SR50AH-A	SR50AH-TT	9Cr-1Mo
Room temp.	356.5	378.6	391.5	421.9	403.9
High temp.(520℃)	228.8	219.7	249.0	236.2	321.9

Table 2-3. Elongation(%) of the experimental alloys at room temp. and 520℃.

Test temp. \ Alloys	SR50AL-A	SR50AL-TT	SR50AH-A	SR50AH-TT	9Cr-1Mo
Room temp.	48.3	55.9	44.5	55.6	21.0
High temp.(520℃)	61.2	62.2	58.2	59.8	26.3

Table 2-4. Area breakdown(J) of the experimental alloys at room temp. and 520℃.

Test temp. \ Alloys	SR50AL-A	SR50AL-TT	SR50AH-A	SR50AH-TT	9Cr-1Mo
Room temp.	102.2	142.2	123.6	162.3	45.1
High temp.(520℃)	102.3	105.1	124.1	116.2	39.3

부식 특성 : 표 3은 비등 상태의 25% 질산 용액 중에서 시험 시편을 24시간 동안 침지한 뒤에 측정한 부식 속도이다. 입계 부식의 정도를 측정하는 표준 시험 조건은 65% 질산 용액이지만 이 용액의 부식 강도가 너무 크기 때문에 원자력 발전소 증기 발생기 전열관 재료인 합금 600 또는 690의 입계 부식 속도를 구하기 위하여 그 농도를 줄여서 시험하는 Modified Huey Test 결과이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이, 초내식성 스테인리스강의 부식 속도는 무시할 정도로 매우 작은 값을 보이고 있는 반면, 9Cr-1Mo강의 부식 속도는 매우 큰 값을 보이고 있어 내식성 차이를 극명하게 드러내고 있다.

Table 3. Corrosion rate of the C-controlled super stainless steels by modified Huey test(boiling 25% HNO_3, 24 hrs immersion)

Corrosion Rate / Alloys	mpy	mdd
SR50AL(A)	0.84	4.67
SR50AL(TT)	0.50	2.77
SR50AH(A)	0.42	2.31
SR50AH(TT)	0.26	1.47
9Cr-1Mo steel	1586.3	8592.6

표 4는 비등 상태의 40% NaOH 용액 중에서 -900mV(SCE)의 전위를 가하면서 일정연신율시험기를 이용하여 구한 응력 부식 균열 저항성을 정리한 것이다. 9Cr-1Mo강에 비하여 여러 조건의 시험 시편의 저항성이 훨씬 우수함을 알 수 있다.

Table 4. SCC results obtained from CERT in boiling 40% NaOH

Alloys	9Cr-1Mo	SR50AL (annealed)	SR50AL (TT)	SR50AH (annealed)	SR50AH (TT)
Elongation, %	16.1	26.2	38.4	34.9	40.2

3.2 질소량의 변화 및 열처리에 따른 특성 연구

결정립 크기의 변화 및 기계적 성질의 변화에 미치는 질소 함량의 효과 : 그림 1은 질소량 변화에 따른 결정립 크기를 나타낸 것이다. 질소 함량이 증가할수록 결정립이 미세화되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결정립 미세화는 기계적 성질의 강화를 예측할 수 있으며 이는 침입형 원소인 질소에 의한 것으로 생각된다.

그림 2는 소둔 시편의 경도 변화에 미치는 질소의 영향을 보여주고 있다. 질소량이 감소할수록 경도값이 감소하고 있어 합금의 연화가 진행되고 있음을 알 수 있다.

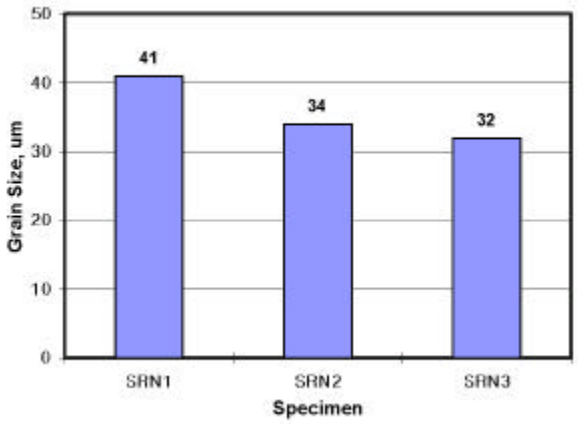

Fig. 1. Effect of N on the grain size of annealed super stainless steels

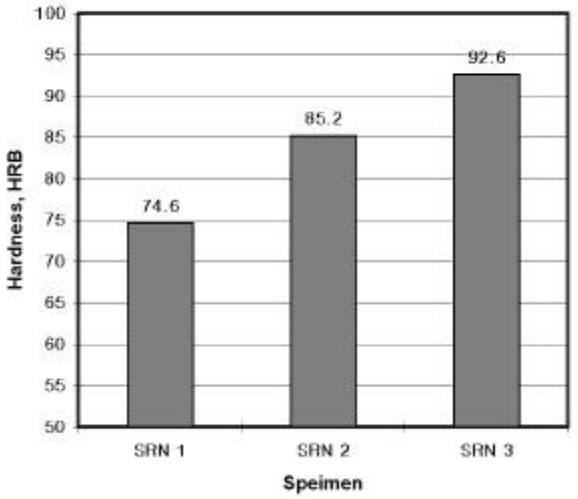

Fig. 2. Effect of N on the hardness of annealed super stainless steels

그림 3은 상온 인장 시험에서 소둔 시편에 대하여 얻은 데이터를 질소량에 대하여 나타낸 것이다. 질소량이 증가할수록 인장 강도 및 항복 강도가 크게 증가하지만 연신율은 약간 감소함을 알 수 있다. 그림 4는 이러한 성질을 지닌 소둔재에 대하여 550°C에서 500시간 동안 열처리(TT)한 시편에 대하여 행한 상온 인장 시험 결과이다. 소둔재와 같이 인장 강도 및 항복 강도는 질소의 증가에 따라서 크게 향상되고 있으며 더구나 연신율도 약간 증가하는 경향을 보이고 있어서 TT처리에 따라서 연신율의 질소 의존 경향이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 질소가 가장 적게 첨가된 합금(0.01%N)의 기계적 성질에 미치는 TT처리의 효과를 보여주고 있다. TT처리에 의해서 인장 강도와 항복 강도가 다소 증가하지만 연신율은 약간 감소하고 있다. 그림 6은 질소를 0.18% 함유한 SRN2의 기계적 성질에 미치는 TT처리의 영향을 보여주고 있다. 이 경우도 마찬가지로 TT처리에 의해서 인장 강도 및 항복 강도는 증가하고 있다. 그런데 연신율은

무질소 합금의 경우는 TT처리에 의해서 감소하고 있지만 질소 첨가 합금은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 그림 7은 질소를 0.35% 함유한 SRN3의 기계적 성질에 미치는 TT처리의 영향을 나타낸 것이다. 질소가 다량 첨가된 합금의 경우도 TT처리에 의해서 인장 강도 및 항복 강도가 증가하며 연신율도 다른 저질소 합금보다 더 크게 증가하고 있다.

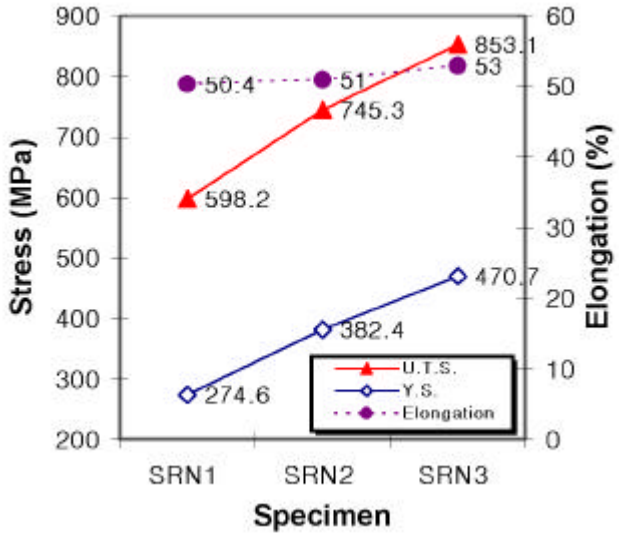

Fig. 3. Effect of N on the tensile properties(room temp.) of annealed super stainless steels

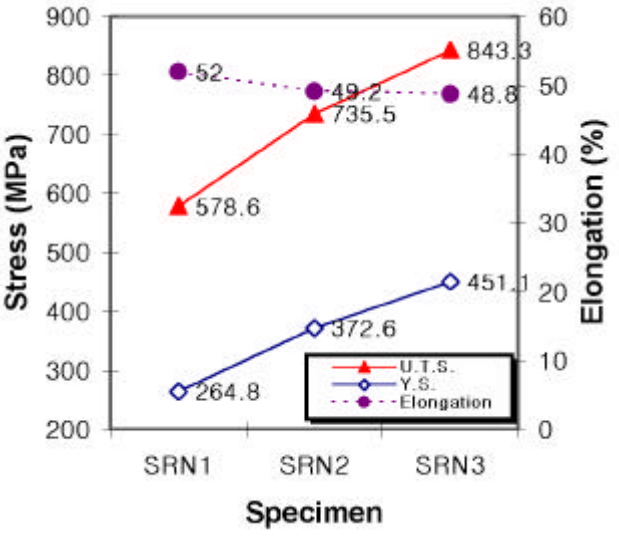

Fig. 4. Effect of N on the tensile properties(room temp.) of thermally treated super stainless steels

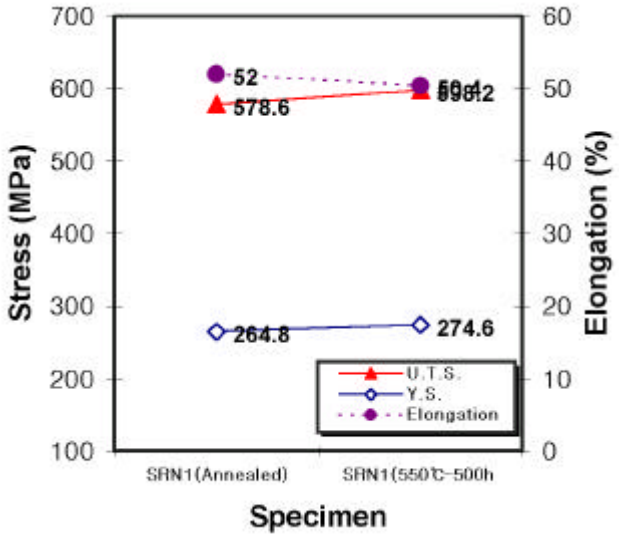

Fig. 5. Effect of thermal treatment on the tensile properties(room temp.) of N-free stainless steel - SRN1

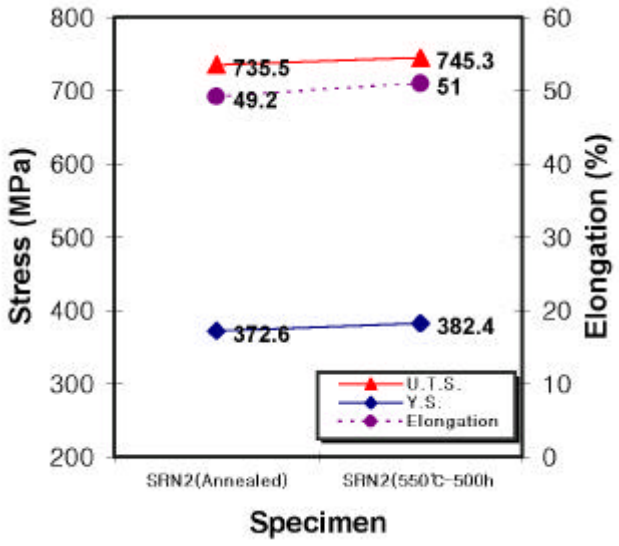

Fig. 6. Effect of thermal treatment on the tensile properties(room temp.) of N-bearing stainless steel - SRN2

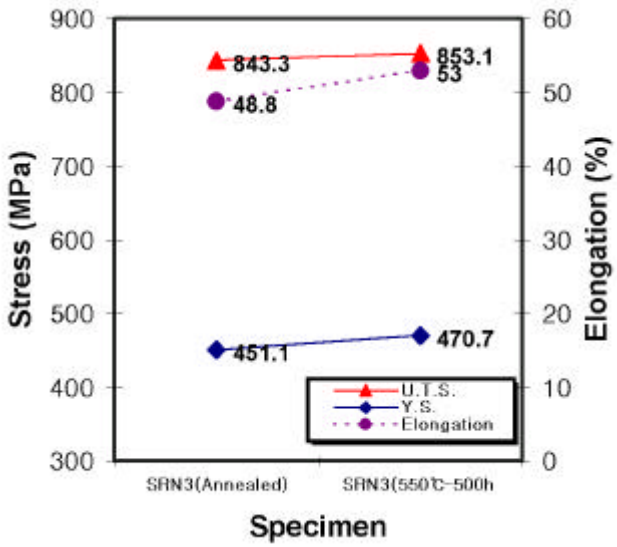

Fig. 7. Effect of thermal treatment on the tensile properties(room temp.) of high N-bearing stainless steel - SRN3

부식 특성 : 그림 8은 탈기된 50°C, 0.5N HCl + 1N NaCl 용액 중에서 1mV/sec의 속도로 양극 분극하여 얻은 양극 분극 곡선이다. 질소량의 증가에 따라서 부식 전위의 변화는 크게 나타나지 않았고 임계 전류 밀도가 약간 감소하고 있다. 부동태 전류 밀도는 질소량에 관계없이 작고 안정한 거동을 보이고 있는데 이는 이 합금계에 다량 첨가된 Cr과 Mo에 기인된 것으로 판단된다. 그런데 전위의 상승에 따라서 부동태 전류 밀도의 차이가 점차 크게 나타나고 있는데 이는 합금 중의 질소량 변화에 의한 것으로 보인다.

그림 9는 탈기된 50°C, 1.5N HCl 용액 중에서 1mV/sec의 속도로 양극 분극하여 얻은 양극 분극 곡선이다. 질소량의 증가에 따라서 부식 전위의 변화는 크게 나타나지 않았고 임계 전류 밀도가 약간 감소하고 있다. 낮은 전위에서의 부동태 전류 밀도는 질소량에 관계없이 작고 안정한 거동을 보이고 있는데 이는 이 합금계에 다량 첨가된 Cr과 Mo에 기인된 것으로 판단된다. 그런데 전위의 상승에 따라서 부동태 전류 밀도의 차이가 크게 나타나고 있는데 이는 합금 중의 질소량 변화에 의한 것으로 보이며 낮은 전위에서보다 높은 전위에서 질소 함량의 효과가 강하게 나타나는 것으로 보아 이 거동은 질소의 내식성 향상 원인과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

그림 10은 비등 상태의 40% NaOH 용액 중에서 1mV/sec의 속도로 양극 분극하여 얻은 양극 분극 곡선이다. 질소량의 증가에 따라서 부식 전위의 변화는 크게 나타나지 않았고 임계 전류 밀도가 약간 감소하고 있다. 그러나 부동태 거동은 앞의 산성 용액에서와는 달리 질소가 거의 첨가되지 않은 합금 SRN1의 부동태 전류 밀도는 넓은 전위 구간에서 매우 크게 나타났으나 질소가 첨가됨에 의해서 낮은 전류 밀도를 보이고 있다. 이는 가성 용액에서 질소의 효과가 매우 크게 나타나는 것으로 보이며, 산성 용액에서 안정된 거동을 보이던 합금 SRN1의 부동태 거동이 가성 용액에서 질소 첨가 합금과 매우 현격한 차이를 보이고 있는 현상에 대한 원인은 계속된 연구가 필요하다.

그림 11은 비등 상태의 65% 질산 용액 중에서 24시간 동안 침지 시험을 행한 뒤에 얻은 부식

속도이다. 앞에서 언급한 탄소량 변화 합금의 경우에는 25% 질산 중에서 실험을 행하였으나 그 때 평가된 부식 속도가 너무 작아서 합금 간의 내식성 차이를 구별하기 어려웠기 때문에 질소 변화 합금에 대해서는 용액의 농도를 65%로 증가시켜서 평가하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 소둔 상태에서도 10 mpy 정도의 큰 값을 보이고 있어 이 속도가 입계 부식에 의한 것이 아니고 비등 질산에서의 균일 부식 속도라 판단된다. TT처리에 의해서 약간 부식 속도가 감소하다가 처리 시간의 증가에 따라서 부식 속도가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 그런데 질소 함량이 작을수록 짧은 TT시간에서 최저 속도를 보이며, 질소 함량이 가장 큰 합금은 더 긴 TT시간에서 최저 속도를 보인 뒤 다시 부식 속도가 증가하고 있다. 이러한 결과는 합금 중의 질소 함량과 밀접한 관련이 있는 것으로 예측되나 계속된 연구가 있어야 할 것으로 보인다.

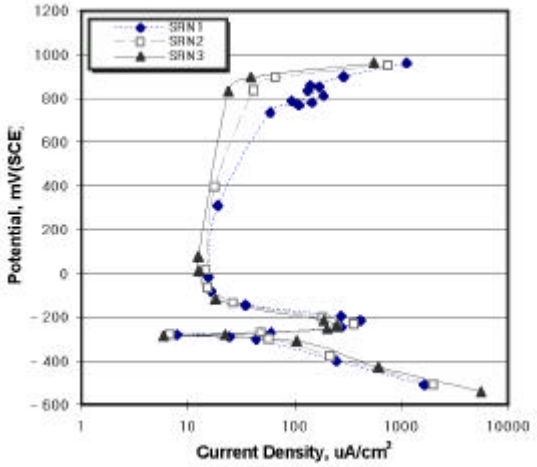

Fig. 8. Effect of N on the anodic polarization behavior of annealed specimen in deaerated 50°C 0.5N HCl + 1N NaCl at 1mV/sec

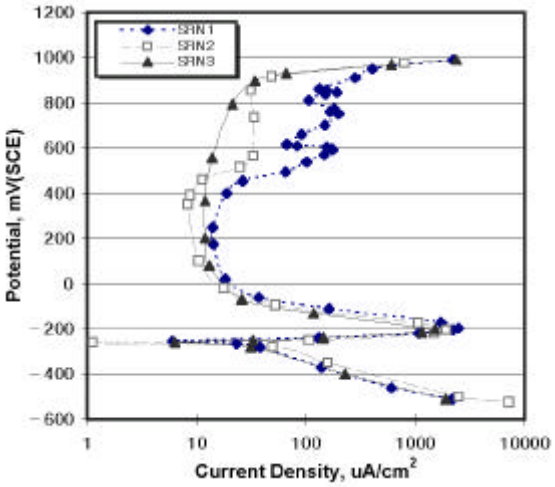

Fig. 9. Effect of N on the anodic polarization behavior of annealed specimen in deaerated 50°C 1.5N HCl at 1mV/sec

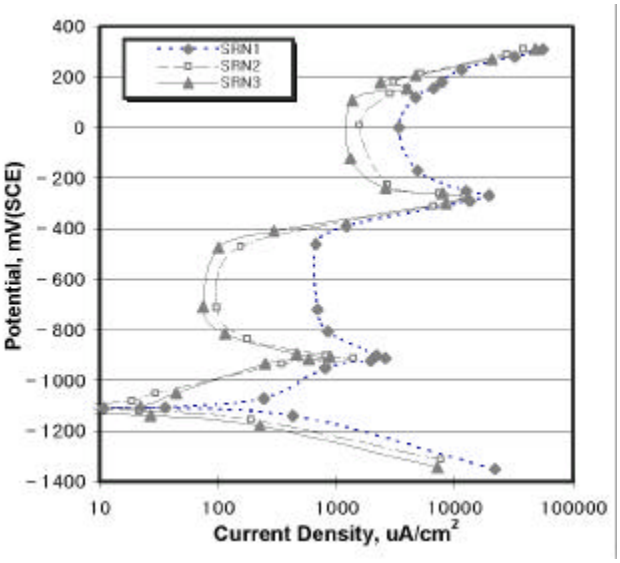

Fig. 10. Effect of N on the anodic polarization behavior of annealed specimen in boiling 40% NaOH at 1 mV/ sec

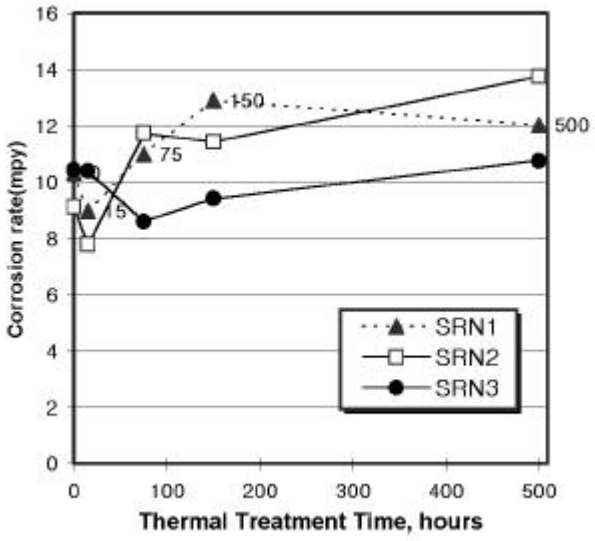

Fig. 11. Effect of thermal treatment(550°C) on corrosion rate in boiling 65% HNO_3

3. 결 론

3.1 탄소량의 변화 및 열처리에 따른 특성 연구

(1) 인장 강도 및 연신율의 측면에서 보면 상온 또는 고온의 시험 온도에 관련없이 탄소 함량이 변화하더라도 초내식성 오스테나이트계 스테인리스강의 것이 9Cr-1Mo강보다 우수한 값을 보이고 있으나, 항복 강도의 측면에서 보면 특히 고온 시험에서 탄소 함량에 관계없이 초내식성 오스테나이트계 스테인리스강보다 9Cr-1Mo강의 항복 강도가 더 우수하게 평가되었다.

(2) 상온 인장 시험 결과, 탄소량이 증가할수록 항복 강도 및 인장 강도는 증가하며 연신율도 대체로 증가하는 경향을 보였다. 한편 TT처리에 의해서 항복 강도, 인장 강도 및 연신율이 모두 증가하였다.

(3) 고온 인장 시험 결과, 탄소 함량이 증가할수록 항복 강도 및 인장 강도는 증가하였으나 연신율은 감소하였다. 한편 TT처리에 의해서 세 가지 인자가 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

(4) Modified Huey Test 결과, 9Cr-1Mo강의 부식 속도는 비교할 수 없을 정도로 S32050보다 크게 나타났으나, S32050의 시험 조건 별로는 너무 값이 작아서 비교하기 어려웠다.

(5) 비등 상태의 40% NaOH 중에서 행한 일정 연신율 시험 결과, 9Cr-1Mo강과 S32050의 저항성은 매우 큰 차이를 보이고 있으며 후자의 저항성이 크게 평가되었다. 한편 TT처리를 할수록 그리고 합금 중의 탄소 함량이 높을수록 응력 부식 균열에 대한 저항성이 크게 나타났다.

3.2 질소량의 변화 및 열처리에 따른 특성 연구

(1) 질소 함량이 증가할수록 소둔재의 결정립이 미세화되었으며, 경도값이 증가하였다. 소둔재와 TT재에 관계없이 질소량이 증가하면 인장 강도 및 항복 강도는 상승하지만 연신율은 질소량 증가에 따라서 소둔재는 감소하며 TT재는 증가한다.

(2) 질소 함량에 관계없이 TT처리에 의해서 인장 강도 및 항복 강도는 증가하지만, 연신율은 TT처리에 의해서 무질소 합금은 감소하고 반면 질소량이 증가할수록 더 크게 상승하였다.

(3) 산성의 염화물 용액 중에서 평가된 양극 분극 특성은 질소량 증가에 따라서 부식 전위의 변화는 크지 않았으며 임계 전류 밀도는 약간 감소하였다. 부동태 전류 밀도는 고전위에서 질소의 효과가 뚜렷하게 나타나 질소가 증가할수록 감소하였다. 그러나 가성 환경에서는 부식 전위와 임계 전류 밀도 거동은 산성 용액과 거의 유사하지만, 부동태 전류 밀도는 질소 유무에 따라서 큰 차이를 보이고 있었다.

(4) 비등 상태의 65% 질산 용액 중에서 평가된 부식 속도는 질소 함량이 작을수록 짧은 TT시

간에서 최저 속도를 보이며, 질소 함량이 가장 큰 합금은 더 긴 TT시간에서 최저 속도를 보인 뒤 다시 부식 속도가 증가하고 있다. 이러한 결과는 합금 중의 질소 함량과 밀접한 관련이 있는 것으로 예측되나 계속된 연구가 있어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 원자력 중장기과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. J.A. Shields, Jr. and K.L. Longua, "The effect of ten years experimental breeder reactor II service on 2.25Cr-1Mo steel", Nuclear Technology, 28, 471-481(1976)
2. J.C. Whipple and C.N. Spalaris, "Design of the Clinch River Breeder Reactor Plant steam generators", Nuclear Technology, 28, 305-314(1976)
3. M.G. Robin, "French steam generator experience-Phenix and beyond", Nuclear Technology, Nuclera Technology, 28, 482-489(1976)
4. D. Taylor, "Operation of prototype fast reactor steam generators led directly to commercial size design", Nucl. Eng. Int., 49-53(May 1977)