

# 차세대 원전 대형 압력용기용 고강도 SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo계 저합금강 개발

김민철<sup>†</sup> · 박상규<sup>\*</sup> · 이기형<sup>\*\*</sup> · 이봉상<sup>\*</sup>

## High Strength SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo Low Alloy Steels for Larger Pressure Vessels of the Advanced Nuclear Power Plant

Min-Chul Kim<sup>†</sup>, Sang-Gyu Park<sup>\*</sup>, Ki-Hyoung Lee<sup>\*\*</sup> and Bong-Sang Lee<sup>\*</sup>

(Received 11 June 2014, Revised 11 July 2014, Accepted 11 July 2014)

### ABSTRACT

There is a growing need to introduce advanced pressure vessel steels with higher strength and toughness for the optimization of the design and construction of longer life and larger capacity nuclear power plants. SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo low alloy steels have superior strength and fracture toughness, compared to SA508 Gr.3 Mn-Mo-Ni low alloy steel. Therefore, the application of SA508 Gr.4N low alloy steel could be considered to satisfy the strength and toughness required in advanced nuclear power plants. The purpose of this study is to characterize the microstructure and mechanical properties of SA508 Gr.4N low alloy steels. 1 ton ingot of SA508 Gr.4N model alloy was fabricated by vacuum induction melting followed by forging, quenching, and tempering. The predominant microstructure of the SA508 Gr.4N model alloy is tempered martensite having small packet and fine Cr-rich carbides. The yield strength at room temperature was 540MPa, and it was decreased with an increase of test temperature while DSA phenomenon occurred at around 288°C. Overall transition property of SA508 Gr.4N model alloy was much better than SA508 Gr.3 low alloy steel. The index temperature,  $T_{41J}$ , of SA508 Gr.4N model alloy was  $-132^{\circ}\text{C}$  in Charpy impact tests, and reference nil-ductility transition temperature,  $RT_{NDT}$  of  $-105^{\circ}\text{C}$  was obtained from drop weight tests. From the fracture toughness tests performed in accordance with the ASTM standard E1921 Master curve method, the reference temperature,  $T_0$  was  $-147^{\circ}\text{C}$ , which was improved more than  $60^{\circ}\text{C}$  compared to SA508 Gr.3 low alloy steels.

**Key Words** : SA508 Gr.4N steel(SA508 Gr.4N강), Pressure vessel steel(압력용기강), High strength(고강도)

### 1. 서론

원자로압력용기는 원자력발전소의 사용 수명을 결정짓는 핵심부품으로, 내부의 높은 압력에 견딜 수 있도록 충분한 강도와 인성이 요구된다. 현재 상용 원자로압력용기용 소재로는 SA508 Gr.3 Cl.1 Mn-Mo-Ni계 저합금강이 가장 널리 사용되고 있

나 원전의 대형화 및 장수명화를 위해서는 현재보다 훨씬 높은 강도와 인성, 내방사선 특성을 갖는 소재의 적용이 필요하다. 최근에는 SA508 Gr.3 Cl.1 재질보다 강도가 높은 Cl.2 소재가 증기발생기에 적용되고 있는 추세이다. 그러나 Gr.3 Cl.2 소재의 경우에는 Cl.1 소재에 비해 인성측면에서는 불리하여 원자로 압력용기에 적용하기에는 제한이 따른다. ASME code의 원자로 압력용기강 규격 SA508에는 Gr.3강과 함께 SA508 Gr.4N강이 등재되어 있다<sup>1)</sup>. SA508 Gr.4N강은 Ni-Cr-Mo계 저합금강으로서 SA508 Gr.3 Mn-Mo-Ni계 저합금강에 비해 Ni과 Cr함량이 증가

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail: mckim@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-2761 FAX: (042)868-8549

<sup>\*</sup> 한국원자력연구원

<sup>\*\*</sup> 한국원자력안전기술원

되고 기계적 특성도 크게 향상된 소재이다. ASME 규격에서 제시된 SA508 Gr.4N강의 항복강도 요구치는 485~690MPa로 강도면에서 Gr.3 Cl.2의 450MPa보다 우수하고 동시에 인성도 향상되어 강도와 인성을 동시에 확보할 수 있어, 증기발생기는 물론 원자로 압력용기에도 적용할 수 있다. SA508 Gr.4N 강 of 원전 적용을 위한 연구가 일부 진행되었으나<sup>2-4)</sup>, 실제 원자력환경에서 사용된 사례가 없어, 강도, 전이특성, 파괴인성, 증성자 조사취화특성 등 원전 적용을 위한 다양한 특성 database가 부족한 실정이다.

본 연구진에서는 SA508 Gr.4N 저합금강의 원자력 분야 적용을 위해 50kg급의 소형모델합금을 이용하여 SA508 Gr.4N 저합금강에 대한 주요 합금원소의 첨가효과, 고온 장기가동에 대비한 열적 상안정성 및 조사취화 저항성에 관한 연구를 진행하여 왔다<sup>5-12)</sup>. 이러한 연구결과를 바탕으로 최근 ASME SA508 Gr.4N 조성범위를 만족하는 1톤 규모의 대형 모델합금을 제작하고, 특성평가를 수행하였다. 특성평가에는 원자로 압력용기의 baseline test에 준하는 인장, 충격전이특성, 낙중시험 뿐만 아니라 ASTM E1921 마스터커브 시험법<sup>13)</sup>에 의한 파괴인성시험을 수행하여 SA508 Gr.4N 저합금강의 미세조직과 기계적 특성을 체계적으로 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료

ASME 규격내 SA508 Gr.4N강의 성분범위를 바탕으로 1ton 규모의 대형모델합금을 진공 유도용해하여 제작하였다. 제작된 모델합금의 화학성분 분석결과는 Table 1에 ASME SA508 Gr.3 및 Gr.4N 규격 조성범위와 함께 제시하였다. 진공유도용해된 소재는 표면 연마후 열간단조와 노멀라이징 및 템퍼링 열처리를 수행하였다. 제작된 대형모델합금의 최종규격은

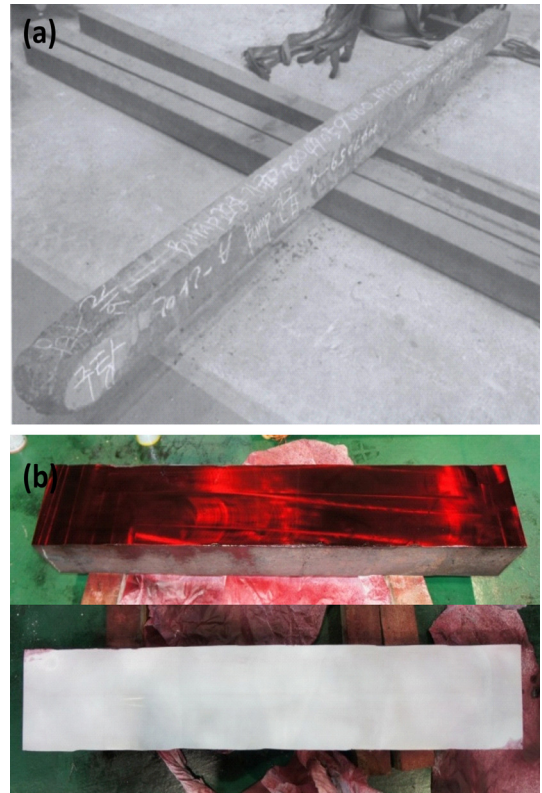


Fig. 1 Image of model alloy after forging process(a) and penetration test result(b)

두께 150mm, 너비 170mm, 길이 3900mm이었다. 기계적 특성평가를 위해서, 제작된 모델합금을 35mm 두께로 절단하여 880°C에서 2시간동안 오스테나이트화 열처리를 수행한 후, 660°C에서 10시간 동안 템퍼링을 수행하였다. 오스테나이트화 열처리후 냉각은 두꺼운 실제 압력용기의 수냉시 내부 1/4T 지점에서의 냉각속도와 유사한 조건인 공냉조건으로 수행하였다<sup>14)</sup>. 단조가공 시 발생할 수 있는 내부의 결함을 확인하기 위해 단조가공 이후 초음파 탐상시험(ultrasonic test)을 수행하였으며, 또한 표면연마 후

Table 1 Chemical requirement of SA508 Gr.3 and G4.4N steels<sup>1)</sup> and composition of SA508 Gr.4N model alloy, KM4 (wt%)

	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	P	S	V
SA508 Gr.3	0.25 max	1.20 -1.50	0.40 -1.00	0.25 max	0.45 -0.60	0.15 -0.40	0.025 max	0.025 max	0.05 max
SA508 Gr.4N	0.23 max	0.20 -0.40	2.80 -3.90	1.50 -2.00	0.40 -0.60	0.15 -0.40	0.020 max	0.020 max	0.03 max
KM4	0.18	0.33	3.44	1.80	0.49	0.21	0.003	0.002	0.003

PT(penetration test)검사도 추가적으로 수행하였다. 이를 통해, 제작된 대형모델합금의 내부 및 표면에 결함이 없는 건전한 상태인 것으로 확인되었다. Fig. 1(a)는 단조가공후 대형모델합금의 사진이며, Fig. 1(b)는 1m 길이로 절단후 PT 검사를 수행한 결과이다.

## 2.2 특성평가

제작된 대형모델합금 내부의 미세조직을 평가하기 위해 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 관찰하였다. OM과 SEM 관찰용 시편은 3% nital 용액을 에칭액으로 사용하였다. 석출물의 형상과 분포를 관찰하기 위해 탄소추출복제(carbon extraction replica)법을 이용하였다. 이를 위해, 미세연마된 시편을 3% nital을 이용하여 부식 후 탄소를 증착하고, 10% HCl과 90% methanol 혼합액을 이용하여 탄소막을 분리하여 시험편을 준비하였다.

인장시험은 gage length 25mm, 직경 6.25mm의 봉상시편을 이용하여 상온에서부터 371°C까지의 온도 범위에서 MTS 810 유압식 시험기를 이용하여  $1.1 \times 10^{-4}$ /s의 변형률 속도로 수행하였다. 인장곡선으로부터 0.2% offset법에 따라 항복강도(yield strength)를 결정하였고, 인장강도(tensile strength)는 최대하중점으로 결정하였다.

충격인성시험에는  $10 \times 10 \times 55$ mm 표준 크기의 Charpy 시험편을 사용하였다. SATEC SI-1D3 시험기를 이용하여 -196°C에서 100°C까지의 온도 범위에서 ASTM E23-07a의 절차에 따라 수행하였다<sup>15)</sup>. 충격흡수에너지 값의 정량적인 평가를 위해 hyperbolic tangent (TANH) fitting을 사용하였다. 또한 대형모델합금의 기준 무연성 천이온도를 결정하기 위하여 ASTM E208 규정에 따라 낙중시험을 수행하였다<sup>16)</sup>.

천이온도영역에서 파괴인성의 평가는 확률·통계적 방법을 이용하여 특성온도를 결정하는 ASIME1921-09c 마스터커브 시험법에 따라 수행하였다<sup>13)</sup>. 파괴인성 평가에는 표준 Charpy 충격시험 크기의 시험편에 기계가공을 통하여 노치를 가공하고, 반복적인 피로하중을 인가하여 시편폭의 약 50%까지 예비피로균열을 생성한 PCVN(Precracked Charpy V-Notch specimen,  $10 \times 10 \times 55$ mm) 시험편을 사용하였다. 시험온도는 저온 챔버에 액체질소를 순환시켜  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내로 조절하여 0.15mm/min의 하중선 변위속도로 시험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

SA508 Gr.4N 대형모델합금에 대하여 오스테나이트화 열처리와 템퍼링을 수행한 후, 표면부 및 중심부의 미세조직을 광학현미경과 SEM으로 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 일반적으로 SA508 Gr.3 Mn-Mo-Ni 계 저합금강은 상부 베이나이트 조직을 갖는 것으로 알려졌다. 상부 베이나이트 조직은 구-오스테나이트 결정립 내부에 래스(lath)들이 모여 형성된 패킷(packet) 조직을 나타낸다. 냉각과정에서 래스와 래스 사이에 막대형태의 조대한 세멘타이트( $\text{Fe}_3\text{C}$ )가 형성되고, 이후 템퍼링 과정에 내부에 등근 형태의 세멘타이트와 미세한 침상의  $\text{Mo}_2\text{C}$  탄화물이 형성된다. 이에 반해 SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo 계 저합금강은 Ni과 Cr의 첨가량이 증가하여 경화능이 향상되고, 이로 인해 상대적으로 느린 냉각속도에서도 마르텐사이트 변태가 발생한다. 따라서 퀴칭후 미세조직은

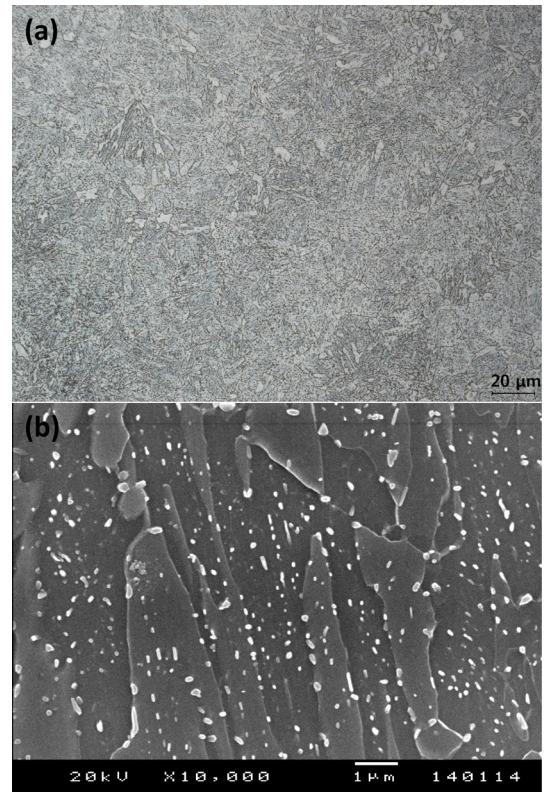


Fig. 2 Microstructure of SA508 Gr.4N model alloy; (a) Optical, and (b) SEM

마르텐사이트와 하부 베이나이트의 복합조직을 나타낸다. 따라서 Gr.3강에 비해 미세조직이 매우 복잡해지고 패킷의 크기 또한 미세해진다. Fig. 2(b)에서와 같이 SEM을 이용한 관찰에서 석출물도 Gr.3강에 비해 미세해지고 Gr.3강에서 나타나는 막대형태의 조대한 석출물은 관찰되지 않는 것을 확인하였다. 전반적으로 입계 및 입내에 약 수십nm 크기의 석출물이 균일하게 분포하고 있으며, 그 크기와 분포는 위치에 관계없이 거의 동일한 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 탄소추출복제법을 이용하여 SA508 Gr.4N 모델합금내의 석출물의 형태와 종류를 관찰한 결과이다. 내부에 존재하는 석출물에 대한 회절 패턴 분석결과, 둥근 모양의 석출물은 fcc 구조를 갖는 Cr계 탄화물인  $Cr_{23}C_6$ 이며, 정방형의 모양을 갖는 탄화물은 hexagonal 결정구조를 갖는 Cr계 탄화물인  $Cr_7C_3$ 로 분석되었다. SA508 Gr.4N 저합금강의 경우 상용 소재에 비해 Cr 함량이 높기 때문에, 열역학적으로 Fe계 탄화물인 세멘타이트는 Gr.4N 합금조성에서는 안정상이 아니며,  $Cr_{23}C_6$ 와  $Cr_7C_3$ 탄화물이 안정상으로 나타난다<sup>9)</sup>. 그러나 실제 분석결과에서는 일부 영역에서 미세한 세멘타이트가 관찰되기도 하나 이는 열역학적으로 불안정한 상이며, 대부분의 영역에서 Cr계 탄화물이 위치에 관계없이 균일하게 석출하는 것을 확인하였다.

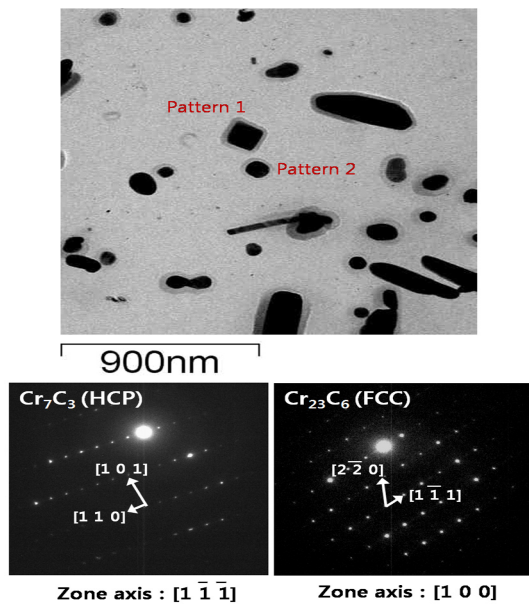


Fig. 3 TEM image and diffraction pattern of precipitations

### 3.2 인장특성

SA508 Gr.4N 대형모델합금의 상온 및 고온 인장특성을 Fig 4에 나타내었다. 고온 인장시험의 경우 149°C, 288°C, 343°C, 371°C의 4개의 온도에서 실험을 수행하였다. 상온에서의 항복강도는 540 MPa로 450MPa 전후의 항복강도를 갖는 상용 Gr.3강에 비해 월등히 향상된 값을 나타내었다. 이러한 결과는 ASME 규격에 제시된 SA508 Gr.4N Cl.1소재의 요구 항복강도인 585MPa보다는 다소 낮으나 Gr.4N Cl.3소재의 485MPa보다는 높은 값이다. SA508 Gr.4N 강에서의 강도특성 향상은 주로 Ni첨가에 의한 고용강화 효과<sup>17,18)</sup>와 경화능 향상에 따른 미세조직의 미세화에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 본 연구에 사용된 대형모델합금의 경우, 상용 Gr.3강에 비해, 탄소의 함량이 다소 낮게 제작되었다. 따라서 대표적인 강화원소인 탄소와 함께 나머지 성분들의 조절이나 제조공정의 개선을 통하여 항복강도를 추가적으로 향상시킬 수 있다.

371°C에서의 항복강도는 440MPa, 인장강도는 560MPa로 다소 감소하기는 하였으나, 고온에서도 상당히 우수한 인장특성을 나타내었다. 전체적으로 온도가 증가함에 따라 강도와 연신율이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 288°C와 343°C에서 강도의 감소가 다소 둔화되는 현상이 나타났다. 이 구간에서는 시험온도가 55°C의 차이가 있음에도 불구하고 강도와 연신율이 거의 동일한 값을 나타내었다. 두 온도의 인장곡선을 비교해 본 결과, 다른 구간에서 나타나지 않는 serration 현상이 발생한 것이 확인되었다. 이러한 serration은 합금 내의 용질원자가 일정한 온도와

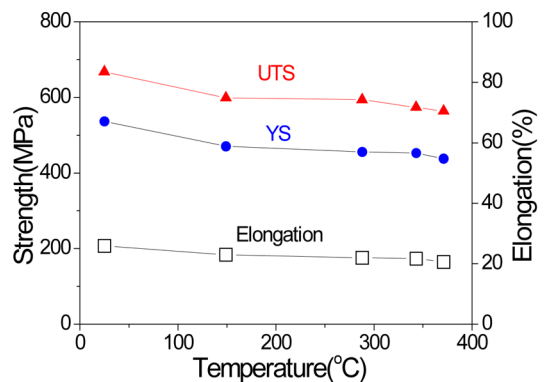
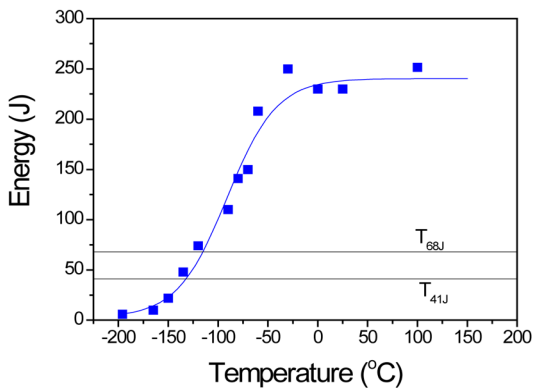


Fig. 4 Tensile properties of model alloy depending on test temperature

변형속도에서 전위를 단속적으로 가두는 DSA(Dynamic Strain Aging) 현상에 의한 것으로 판단된다. 본 시험에서는 다른 온도에서 보다 343°C에서 DSA 현상의 영향이 더 크게 나타나, 온도가 상승함에도 불구하고 288°C와 유사한 강도특성을 나타내는 것으로 판단된다.

**3.3 충격전이특성**

Fig. 5는 SA508 Gr.4N 대형모델합금의 온도에 따른 샤피충격시험 결과를 나타내었다. 대형모델합금은 그림에서와 같이 천이온도  $T_{68J}$ 는 -115°C,  $T_{41J}$ 는 -132°C, 상부흡수에너지는 240J의 우수한 충격특성을 나타내었다. 상부흡수에너지는 상용 Gr.3강과 유사한 값을 나타내었으나, 향상된 인성으로 인하여 천이구간이 상당히 저온쪽으로 이동하여 상용 Gr.3강에 비해 천이온도  $T_{41J}$  이 약 70°C 이상 낮아진 것으로 나타났다. 일반적으로 Ni의 첨가는 강의 인성을 향상시키는 것으로 알려져 있으며<sup>18)</sup>, 본 연구진이 첨가량을 변화시켜 천이특성을 평가한 이전 연구에서도 첨가량이 증가할수록 인성이 향상되는 결과를 나타내었다<sup>5,8)</sup>. 또한 템퍼드 마르텐사이트 조직이 미세조직의 미세화에 의해 인성향상에 유리한 것으로 확인되었다<sup>5,8,19)</sup>.

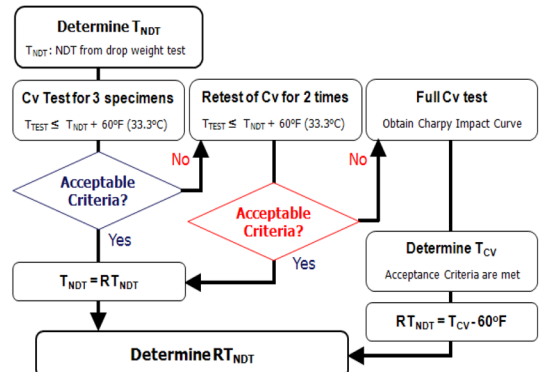


**Fig. 5** Charpy impact energy transition curve of model alloy

**3.4 기준무연성천이온도**

기준 무연성천이온도(Reference Nil-Ductility Transition Temperature:  $RT_{NDT}$ )은 Fig. 6과 같이 ASME code Sec. III, div. 1 NB-2300에 따라 결정하였다. 이를 위해 ASTM E 208 규정에 따라 낙중시험을 수행하였

으며, 시험 결과와 시험전·후의 낙중시험편을 모습은 Fig. 7에 나타내었다. 무연성천이온도(Nil-Ductility Transition Temperature:  $T_{NDT}$ )는 낙중시험 후 시편에서 break가 관찰되는 최고 온도로 정의되며, 여기서 10°F를 더한 온도에서 2회 이상의 no-break가 관찰되어야 한다. 낙중시험을 통하여 SA508 Gr.4N 대형모델합금의 무연성천이온도는 -105°C로 평가되었다. 기준무연성천이온도( $RT_{NDT}$ )는 낙중시험으로 결정된 무연성천이온도에서 30°C를 더해 -75°C에서 수행한 샤피충격시험 결과를 비교하여 결정하였다. -75°C에서 3회 수행한 샤피충격시험 결과가 모두 요구치(Cv energy 68J, Lateral expansion 0.875mm)를 만족하였기 때문에, 기준 무연성천이온도는 낙중시험에서 결정된 무연성 천이온도와 동일하게 -105°C로 결정되었다. 표준원전에 적용된 상용 Gr.3강의 기준무연성천이온도가 대략 -40°C 이상의 온도를 보이는 것과 비교하면, SA508 Gr.4N 대형모델합금이 약 70°C 정도 우수한 결과를 나타내었다.



**Fig. 6** Flow chart for the determination of  $RT_{NDT}$

Material	Test Temperature (°C)				$T_{NDT}$ (°C)
	-110	-105	-100	-70	
KM4	●	●●	○ ○	○ ○	-105°C

● : Break, ○ : No-Break



**Fig. 7** Drop weight test results and images of test samples

### 3.5 천이영역 파괴인성 특성온도

ASTM E1921-09c 마스터커브 시험법에 따라 PCVN 시험편을 이용하여 얻어진 SA508 Gr.4N 대형 모델합금의 천이영역 파괴인성시험 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 실선은 재료의 50% 파괴확률을 나타내는 파괴인성 중간 값을 나타내며, 점선은 5%, 95% 확률적 상·하한선을 나타내며, 측정된 모든 파괴인성 값은 1T-CT 시험편에 해당하는 값으로 보정하였다. 100MPa√m의  $K_{Jc,1T}$  값에 해당하는 온도로 파괴인성 천이특성을 특징짓는 특성온도(reference temperature),  $T_0$ 는 -147°C 가량으로 상용 Gr.3강과 비교할 때 60°C 이상 낮은 우수한 천이특성을 나타냈다. 이는 충격 시험에서 나타난 천이특성과 일치하는 경향이다.

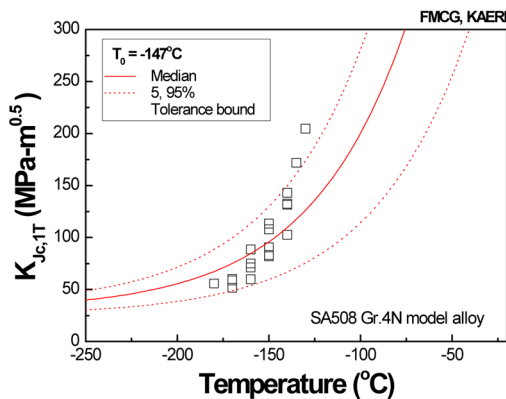


Fig. 8 Fracture toughness of model alloy in the transition region

## 4. 결론

우수한 강도와 인성을 갖는 SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo 계 저합금강에 대하여 1 ton 규모의 대형모델합금을 제작하고, 미세조직 및 기계적 특성평가를 수행하였다. 미세조직 관찰을 통하여 상용 SA508 Gr.3 저합금강 대비 SA508 Gr.4N 모델합금의 미세조직의 변화를 고찰하였으며, 기계적 특성평가에는 고온인장, 충격천이특성, 파괴인성시험 그리고 낙중시험 등 실제 원자로 압력용기강의 baseline 평가에 준하는 다양한 기계적 특성을 평가하였다.

1. SA508 Gr.4N강은 증가된 Ni과 Cr 함량으로 인해, 퀸칭후 구-오스테나이트 결정립 내에 마르텐사이트와 하부 베이나이트 조직이 형성되며 매우 복잡하고 미세한 조직을 나타낸다. 또한 Cr 함량의 증가

와 변태과정의 차이로 상부 베이나이트 조직을 갖는 Gr.3강에서 나타나는 조대한 막대형태의 세멘타이트 대신 미세한 Cr계 탄화물이 형성되었다.

2. 상온에서 540MPa의 높은 항복강도를 나타내며 전 온도구간에서 상용 Gr.3강에 비해 우수한 강도특성을 보였다. 온도가 증가함에 따라 강도와 연신율이 감소하는 경향을 나타내며, 288°C부근에서부터 DSA 현상이 나타나는 것을 확인하였다.

3. SA508 Gr.4N 모델합금의 천이온도는  $T_{68I}$ 을 기준으로 -132°C로 상용 Gr.3강보다 월등히 우수한 천이특성을 나타내었다. 또한 낙중시험을 통하여 얻어진 기준무연성천이온도( $RT_{NDT}$ )도 -105°C로 상용 Gr.3강보다 훨씬 우수하였다. ASTM E1921 마스터커브 시험법으로 평가된 파괴인성 천이영역 특성온도(reference temperature),  $T_0$ 도 -147°C로 상용 Gr.3강 대비 60°C 이상 낮은 우수한 파괴인성을 나타냈다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. ASME, 2007, "Specification for Quenched and Tempered Vacuum-treated Carbon and Alloy Steel Forgings for Pressure Vessels", ASME boiler & pressure vessel code Section II Part A SA508
2. Stofanek, R. J., Li, Y. Y., Burke, M. G., Matuszyk, M., Martin, L., 2002, "Irradiation Embrittlement Behavior of High Strength Low Alloy Steels Containing About 3.3% Nickel", 10th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors, eds. R.E. Gold and E.P. Simonen, The Minerals, Metals, and Materials Society, Warrendale, PA, pp. 757
3. Burke, M. G., Stofanek, R. J., Hyde, J. M., English, C. A., Server, W. L., 2002, "Characterization of Irradiation Damage in A508 Gr 2 and Gr 4N Forging Steels", 10th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors, NACE International
4. Burke, M. G., Stofanek, R. J., Hyde, J. M., English, C. A., Server, 2004, "Microstructural Aspects of Irradiation Damage in A508 Gr 4N Forging

- Steel: Composition and Flux Effects”, J. ASTM International, Vol. 1, pp. 194~207
5. Park, S. G., Kim, M. C., Lee, B. S., Wee, D. M., 2010, “Correlation of the Thermodynamic Calculation and the Experimental Observation of Ni-Mo-Cr Low Alloy Steel Changing Ni, Mo, and Cr Contents”, J Nucl. Mater.; Vol. 407, pp. 126~135
  6. Park, S. G., Kim, M. C., Lee, B. S., Wee, D. M., 2008, “Thermodynamic Calculation and Observation of Microstructural Change in Ni-Mo-Cr High Strength Low Alloy RPV Steels with Alloying Elements” Kor. J Met. Mater., Vol. 46, pp. 771~779
  7. Lee, Y. S., Kim, M. C., Lee, B. S., Lee, C. H., 2009, “Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties on Post-Weld Heat Treatment in the Heat Affected Zone of SA508 Gr.4N Ni-Mo-Cr Low Alloy Steel for Reactor Pressure Vessel”, Kor. J Met. Mater., Vol. 47, pp. 139~146
  8. Lee, K. H., Park, S. G., Kim, M. C., Lee, B. S., Wee, D. M., 2009, “Effects of Ni and Cr Contents on the Fracture Toughness of Ni-Mo-Cr Low Alloy Steels in the Transition Temperature Region”, Kor. J Met. Mater., Vol. 47, pp. 533~541
  9. Kim, M. C., Park, S. G., Lee, B. S., 2010, “Comparison of Microstructure & Mechanical Properties between Mn-Mo-Ni and Ni-Mo-Cr Low Alloy Steels for Reactor Pressure Vessels”, Kor. J Met. Mater., Vol. 48, pp. 194~202
  10. Lee, K. H., Kim, M. C., Lee, B. S., Wee, D. M., 2010, “Master Curve Characterization of the Fracture Toughness Behavior in SA508 Gr.4N Low Alloy Steels”, J. Nucl. Mater., Vol. 403, pp. 68~74.
  11. Lee, K. H., Park, S. G., Kim, M. C., Lee, B. S., Wee, D. M., 2011, “Characterization of Transition Behavior in SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo Low Alloy Steels with Microstructural Alteration by Ni and Cr Contents”, Mater. Sci. Eng., Vol. A529, pp. 156~163.
  12. Lee, K. H., Park, S. G., Kim, M. C., Lee, B. S., 2012, “Cleavage Fracture Toughness of Tempered Martensitic Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel with Different Martensite Fraction”, Mater. Sci. Eng., Vol. A534, pp. 75~82.
  13. ASTM Int., 2009, “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range”, ASTM E1921
  14. Ahn, Y. S., Oh, Y. J., Kim, H. D., Kim, G. M., Hong, J. H., 2000, “Effect of Intercritical Heat Treatment and Tempering Conditions on Toughness and Strength in Mn-Mo-Ni Low Alloy Steel”, Kor. J. Met. Mater., Vol. 38, pp. 466~473
  15. ASTM Int., 2007, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, ASTM E23
  16. ASTM int., 2006, “Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels”, ASTM E208
  17. Im, Y. R., 2001, “Effects of Microstructures on the Mechanical Properties of Low Carbon Mn-Ni-Mo Bainitic Steels, Ph.D thesis, Seoul National University
  18. William F. Smith, 2003, “Metals and Materials”, Interscience, Inc.
  19. Park, S. G., Lee, K. H., Min, K. D., Kim, M. C., Lee, B. S., 2013, “Characterization of Phase Fractions and Misorientations on Tempered Bainitic/Martensitic Ni-Cr-Mo Low Alloy RPV Steel with Various Ni Content”, Met. Mater. Int., Vol. 19, No. 1, pp. 49~54