

원자력압력용기용강재 개발을 위한 합금원소의 영향

최진일 a, 유형종 a, 김봉구 b

a 충남 천안시 안서동 산 29, 단국대학교 신소재공학과

b 대전광역시 유성구 덕진동 150, 한국원자력연구소 HANARO

1. 서론

발전용 및 열공급용 원자로의 대부분을 차지하는 경수로는 대형 고품질의 강재를 필요로 하는데 이중 원자력압력용기강재로는 원자로압력용기용, 증기발생기용, 가압기용, 펌프, 밸브 및 재순환계 배관용등 다양한 용도로 이용되고 있다.¹⁾ 그런데 원자로에서 사용되는 재료는 원자로 운전 시작후 잔류방사능 때문에 기계적 하중조건과 화학적 부식조건 같은 설비의 설계기준을 엄격하게 적용하고 있는데 원자로 재료 설계 특성은 일반적으로 2) 1)우수한 균질등방성과 질량효과가 없을 것 2)높은 파괴인성을 가질 것 3)내부결함이 없고 용접성이 우수한 것 4)중성자 조사에 의한 열화가 적을 것 등이다. 또 사용되는 부품재료는 제조시 주조용과 단조등의 조성가공품으로 대별되는데 주조품의 경우 기공등의 주요결함을 가질 소지가 많으므로 용해주조설계를 통해 결함을 최소화해야 하며 단조용의 경우 진공용해, PAR, ESR 등의 기술을 이용하여 균일한 잉고트제조후 가공 및 열처리를 행하는데 열처리 는 주로 연화처리, 용체화처리, γ 상석출을 통한 기계적강도를 위한 시효경화열처리와 용접 및 접합등을 위한 응력이완 열처리 등을 행하며³⁾ 기계적특성에 맞는 합금설계요구조건은 Fig.1 과 같은 열간소성변형과정의 해석공정을 통해 합금특성을 얻을 수 있다.⁴⁾

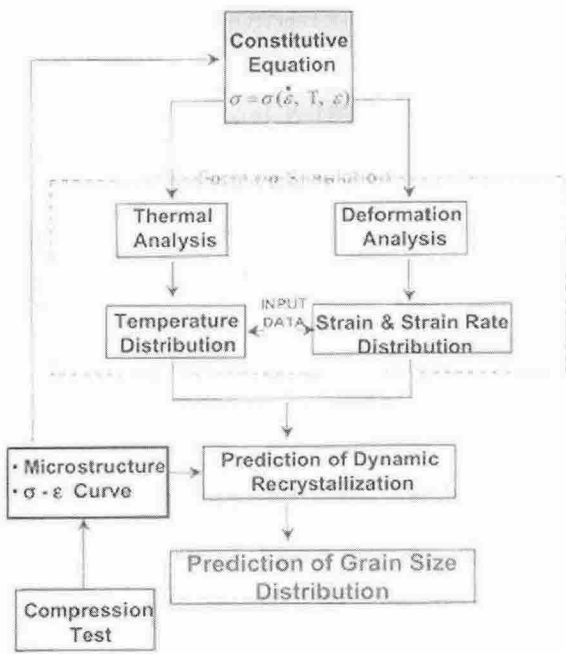


Fig. 1 Simulation of microstructure evolutions during superalloy forming

따라서 본 연구에서는 용해열처리, 열간 및 냉간압연을 거쳐 제작한 AISI 304 강과 저합금강을 기초로 하여 합금원소가 오스테나이트 안정도에 미치는 영향과 기계적특성 및 내식성

을 조사하였고 원자로재료 개발의 시급성이 될 원자로재료 설계기준 특성에 맞는 합금설계 기술을 조사하고자 한다.

2. 실험방법 및 결과

본 실험에서 사용된 Table 1 의 조성을 갖는 시편은 진공아크로에서 용해후 강괴로 주조하고 304 계열은 용체화 처리후 열간압연후 70%냉간압연하여 3mm 의 냉연강판으로 제조하였으며 Table 2 는 미국, 일본, 독일에서 개발한 원자력압력용강의 조성 및 기계적성질을 비교하여 나타낸 것이다.

Table. 1 Chemical composition of RPV steels [wt.%]

Materials	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Co	
15Cr2MnPA	Bal.	0.18 -0.18	0.17 -0.87	0.8 -0.8	0.020	0.020	<0.4	-	2.5 -8.0	0.8 -0.8	-	V <0.25
15Cr2MnPA	Bal.	0.18 -0.18	0.17 -0.87	0.8 -0.8	0.010	0.012	<1.0	-	0.8 -2.8	0.5 -0.7	-	V <0.1
304	Bal.	0.06	0.87	1.52	0.08	0.02	7.76	0.44	17.88	0.21	0.16	-
304+2Ni+0.2N	Bal.	0.05	0.85	1.24	0.08	0.02	9.64	0.43	17.74	0.21	0.18	-

Table. 2 Nuclear pressure vessels of steels

	재료규격	화합조성											
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	
일본	강판	SQV2A	≤0.2 5	0.15/ 0.30	1.15/ 1.50	≤0.03 5	≤0.04 0	0.4/0. 7	-	0.45/0. .60	-	-	-
		SQV2B	≤0.2 5	0.15/ 0.30	1.15/ 1.50	≤0.03 5	≤0.04 0	0.4/0. 7	-	0.45/0. .60	-	-	-
	단조강	SFVV1	≤0.3 5	0.15/ 0.35	0.40/ 0.90	≤0.02 5	≤0.02 5	-	-	-	≤0.0 5	-	-
		SFVV2	≤0.2 7	0.15/ 0.35	0.50/ 1.00	≤0.02 5	≤0.02 5	0.5/0. 9	0.25/ 0.45	0.55/0. .70	≤0.0 5	-	-
		SFVV3	0.15/ 0.25	0.15/ 0.35	1.20/ 1.50	≤0.02 5	≤0.02 5	0.4/0. 8	-	0.45/0. .60	-	-	-
	미국	강판	SA533B C1 1	≤0.2 5	0.15/ 0.30	1.15/ 1.50	≤0.03 5	≤0.04 0	0.4/0. 7	-	0.45/0. .60	-	-
SA533B C1 2			≤0.2 5	0.15/ 0.30	1.15/ 1.50	≤0.03 5	≤0.04 0	0.4/0. 7	-	0.45/0. .60	≤0.0 5	-	-
단조강		SA508.C11	≤0.3 5	0.15/ 0.40	0.40/ 1.05	≤0.02 5	≤0.02 5	≤0.4 5	≤0.2 5	≤0.10 .60	≤0.0 5	-	-
		SA508.C12	≤0.2 7	0.15/ 0.40	0.50/ 1.00	≤0.02 5	≤0.02 5	0.5/1. 0	0.25/ 0.45	0.55/0. .70	≤0.0 5	-	-
		SA508.C13	≤0.2 5	0.15/ 0.40	1.20/ 1.50	≤0.02 5	≤0.02 5	0.4/1. 0	≤0.2 5	0.45/0. .60	≤0.0 5	-	-
독일		강판	22NiMoCr37 (W.Nr.1.6751)	0.17/ 0.25	0.15/ 0.35	0.50/ 1.00	≤0.02 0	≤0.02 0	0.6/1. 2	0.30/ 0.50	0.50/0. .80	≤0.0 3	-
	20MnMoNi55 (W.Nr.1.6310)		0.17/ 0.23	0.15/ 0.30	1.00/ 1.50	≤0.02 0	≤0.02 0	0.4/0. 8	≤0.3 0	0.45/0. .60	≤0.1 3	≤0.01 8	-
		기계적성질											
		일본			미국			독일					
		내력 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	연신율 (%)	내력 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	연신율 (%)	내력 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	연신율 (%)			
일본	강판	SQV2A	35	56/70	18	-	-	-	-	-			
		SQV2B	49	63/81	16	-	-	-	-	-			
	단조강	SFVV1	25	48	20	-	-	-	-	-			
		SFVV2	35	56	18	-	-	-	-	-			
		SFVV3	35	56	18	-	-	-	-	-			
	미국	강판	SA533B C1 1	35.2	56.2/70.3	18	29.1	53.7	-	-	-		
SA533B C1 2			49.2	63.3/80.8	16	40.8	60.5	-	-	-			
단조강		SA508.C11	24.6	49.2/66.8	20	-	-	-	-	-			
		SA508.C12	35.2	56.2/73.8	18	29.1	-	-	-	-			
		SA508.C13	35.2	56.2/73.8	18	29.1	-	-	-	-			
독일		강판	22NiMoCr37 (W.Nr.1.6751)	40	57	18	35	50	14	-	-		
	20MnMoNi55 (W.Nr.1.6310)		40	57	19	32	50	14	-	-			

저합금강은 1000℃에서 소입후 680℃에서 소둔처리 하였다. 미세조직은 SiC 연마표를 표면을 연삭하고 0.05 μm 알루미늄으로 연마후 10%피크리크산(C₆H₃N₃O₇)으로 상온에서 20 시간 에칭 후 관찰하였으며 상변화는 X 선회절을 이용하였고 마르텐사

이트베타량 측정은 시편의 자기 투자율을 측정하여 α 마르텐 사이양을 측정하도록 고안된 상용 Ferriscope 로 측정하였다. 파면관찰은 충격시험후 전자현미경으로 관찰하였다

Table. 3 Precipitation phases formed in superalloys

Phase	r	n	δ	MC	M5C	MN	μ	ϵ
Crystal structure	fcc	hcp	orthorhomb	cubic	fcc	cubic	rhombohedral	tetragonal
Formula	NiAl Ni ₃ Ti	Ni ₃ Ti	Ni ₃ Nb	TiC,TaC,NbC HfC,TiC,ZrC	Fe ₃ Mo ₃ C Fe ₃ Nb ₃ C Ta ₃ Co ₃ C	TiN,NbN (Ti,Nb,Zr)N	Co ₃ W ₃ (Fe,Co)(Mo,W) ₃	FeCr FeCrMo CrCo

Table 3 은 Kelly 등이 발표한 합금설계시 각종합금원소에 따라 존재 할수 있는 다양한 석출상의 존재를 나타낸 것으로 이들의 증감에 의해 강화조건을 알수있다. 즉 합금의 종류에 따라 결정립계에 여러석출상이 존재하여 결정성장억제되며 동적 재결정에 의해 결정립크기를 조절 할 수 있는데 결정립크기 가 작을수록 인장강도, 피로강도 및 고온성형성 등은 향상되 나 고온 저응력에서의 크립파단 강도는 저하되므로 ⁵⁾ 고온재료 에서 결정립미세화는 주요한 기구라는 것을 알수있다. Fig. 2 는 열역학을 이용하여 합금원소에 따른 안정상의 변화를 보 여주는 것인데 Nb 증가에 따라 γ 상이 감소하며 δ 또는 γ 와 함께 ϵ 상이 존재 할 가능성이 커지며 Cr or Mo 의 경우 일정함량이상에서 α , δ , μ 상을 형성할 가능성이 커짐을 알 수 있다.

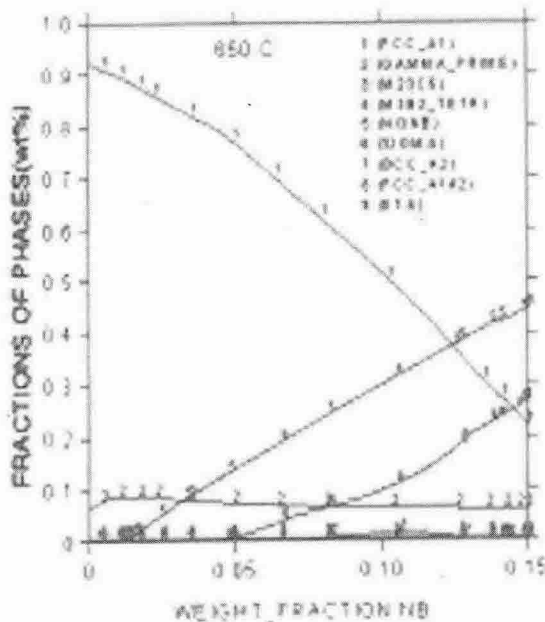


Fig. 2 Effects of alloy composition on the formation of high temperature phase in Alloy 718

Photo.1 은 충격시험후 -196℃에서의 파면의 전자현미경조직을 나타낸것인데 Ni 과 N 첨가 한 것은 입자가 미세화 된 것으로 보이는데 이것은 Ni 이 N 첨가에 의한 인성감소를 완화해 우수한 충격치를 주는것으로 고려된다. 그런데 원자로 강재의 성질은 열간가공후의 소둔 또는 소준후의 소입단계가 중요한데 이것은 결정립 미세화와 균질화 및 수소 취성방지를 위해 두께에 따른 열전도를 고려하여 냉각속도, 화학조성 및 결정입도의 함수로 기계적성질을 결정해야 한다.

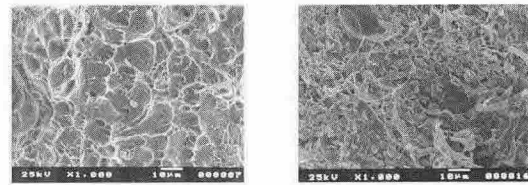


Photo. 1 SEM photo of specimens after impact test at -196°C

Table 4 는 304, 304+2Ni+0.2N, 15Cr2MFA 및 15Cr2NFA 강의 인장강도, 항복강도, 경도 및 충격치값을 나타낸것인데 Ni 과 N 첨가한 강이 저합금강보다 인장강도 및 충격치가 높은 것은 Ni 첨가에 의한 연성-취성 전이온도의 감소와 N 첨가에 의한 고용강화 및 오스테나이트 안정도의 증가에 기인한 것으로 보인다.

Table. 4 Yield strength, Tensile strength, Rockwell hardness, and Charpy value of alloys at 25°C

Temp	25°C				
	Type	304	304+ 2Ni+ 0.2N	Ch2MFA	Cr2NFA
Yield strength (MPa)		262	334	232	248
Tensile strength (MPa)		875	825	497	594
Rockwell hardness (B)		84	84	86	80
Charpy impact (J/cm ²)		167	156	132	132

3. 결 론

원자력압력용기강재에 적용시키기 위해 304 계강과 저합금강을 용해, 압연 및 열처리를 통해 제조 후 기계적특성 및 미세조직의 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. N 을 첨가한 강의 항복강도, 인장강도 및 경도는 증가 하였으며 충격흡수에너지는 강도와 반비례하였다.
2. Ni, N 첨가는 입자미세화 현상이 나타났으며 N 첨가는 결정립을 침상으로 변태시켜 충격치를 감소시켰다.
3. 결정입자가 미세할수록 인장강도, 피로강도 및 고온성형성이 개선되며 Cr, Mo 의 경우 일정함량 이상에서는 α 및 ϵ 상이 형성되었다.

4. 참 고 문 헌

[1] 일본제강소 : Nuclear Vessel materials and components (1980)
 [2] 宮園昭二郎 : IAEA 공동연구중간보고서(1980) 일본원자력연구소
 [3] N.Sounders : High temperature structural materials, Chapman& Hall(1996)125
 [4] E.A. Holm and C.C. Battaile, JOM(Sept. 2001)20
 [5] N.K. Park etal : Mater. Proc. Techn. 111(2001)98