

1%CrMoV 로터강의 파괴인성치에 미치는 개재물의 영향

정 순 역*
(2000년 1월 21일 접수)

Effect of Inclusions on Fracture Toughness for 1%CrMoV Rotor Steel

Soon Uk Jeong

Key Words: Fracture Toughness(파괴인성), FATT(파괴양상 천이온도), Lower Shelf Temperature (하계온도), Upper Shelf Temperature(상계온도)

Abstract

This thesis studied that seven kinds of residual elements(inclusions) had influenced on fracture toughness(K_{IC}) obtained by Begley-Logsdon and Rolfe-Novak model equation using tensile and impact test data of 1%CrMoV HP(high pressure) rotor steel. K_{IC} design curve of ASME and fracture surface by SEM were also considered, obtained results are summarized as follows; K_{IC} was linearly increased with increase of temperature, effect of the inclusions was significantly over FATT. K_{IC} at lower shelf temperature was quantitatively related to yield strength and was agreed well with Begley's equation. It was difficult to determine K_{IC} because of specimen size and tester capacity at upper shelf temperature, but for this view point Rolfe-Novak's equation was useful. The degree of brittle fracture was dependent on FATT fundamentally, adding S, Sb to matrix decreased impact energy and adding Cu, As increased yield(tensile) strength, and the influence of the others minority inclusion was comparatively insignificant.

1. 서론

선박, 항공기, 자동차, 발전설비 등의 모든 기계구조물은 정적, 동적 또는 복합적인 하중을 받고 이로 인하여 파손되는 경우가 많다. 특히, 터빈 로터는 기동, 정지와 같은 비정상운전을 수반하므로 로터의 내외면에 온도차로 인하여 열응력이 발생하며, 중심 또는 중심공 근처에서는 인장응력과 로터의 회전으로 인한 원심응력이 중첩되어 큰 응력이 작용하므로, 여기에 균열(crack) 또는 균열성 결함이 존재하는 경우 비정상 열응력의 작용에 의해 균열은 성장 전파되어 결국 취성과

파괴에 이르게 된다.^(1,2) 이와 같이 비정상상태에서 파괴인성(K_{IC})은 중요한 설계 파라미터(design parameter)이며,⁽³⁾ 또한 HP(high pressure) 및 IP(intermediate pressure) 로터에 있어서의 K_{IC} 는 전체 발전 플랜트의 효율 및 신뢰성에 지대한 영향을 준다. McMahon과 Viswanathan 등⁽⁴⁻⁶⁾은 K_{IC} 와 충격치를 저해하는 인자는 S, Si 등이라고 보고한 바

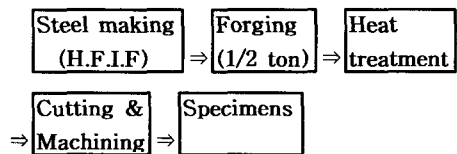


Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing process

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소

E-mail : sujeong@gshp.gsnu.ac.kr

TEL : (0557)640-3126 FAX : (0557)640-3128

있으며, 1974년 파손된 Gallutin No. 2 터빈의 파괴원인은 강괴의 "A" 편석에 존재한 유화물(MnS)에 기인한 것으로 알려졌다.⁽⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 발전용 터빈 로터강(1%CrMoV)에 있어서 잔류원소 Si, P, S, Cu, Sn, Sb, As 등의 각종 비금속 개재물이 터빈 로터강의 파괴인성치에 미치는 영향을 고찰하고, 또 이것을 1%CrMoV강 설계곡선(design curve)에 적용하여 설계기준 만족여부를 검토하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 제작

본 실험에 사용된 시험편의 화학적 성분은 Table 1과 같고 용해는 고주파 유도로를 사용하여 150N 강괴를 주조하였다. O₁은 생산라인 로터재의 중앙부에서 길이방향으로 채취한 시험편이고, M₁~M₇은 개재물의 영향을 분석하기 위해 화학성분을 변경하여 용해제조한 시험재로서 첨가성분에 *로 표시하였다. 단조작업은 에어해머(1/2ton)를 사용하여 O₁과 동일한 단조비(4.3)로 단조하였으며, 자세한 시험편 제조공정은 Fig. 1에

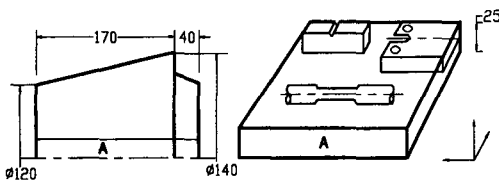


Fig. 2 Ingot(M₁~M₇) profile and sampling method

나타냈다. 시험을 위한 강괴(ingot)의 형상과 시험편 채취부 및 방향은 Fig. 2에 나타났다. 단조 후 O₁과 동일한 열처리를 하였으며, 강괴의 중앙부에서 횡방향으로 두께 25mm의 디스크(disk)를 절단한 후 ASTM E21 및 ASTM A370 규정에 따라 인장 및 충격 시험편을 가공하였다.

2.2 실험방법

인장강도(tensile strength, T.S)는 50 ton 인장시험기(Instron Model 1128)를 사용하여, ASTM 규정으로 가공된 시험편을 하중작용 속도 2 mm/min으로 상온에서 시험을 하였다. 그리고, 상온 경도시험은 로크웰(Rockwell) 경도계를 사용하여 "C" 스케일에서 3번씩 측정하였다.

한편, 충격시험은 샬피(Charpy) 시험기를 사용하였으며, Fig. 2와 같이 V-노치를 가공한 후 각 시험편에 대한 하계온도(lower shelf temperature), 상계온도(upper shelf temperature) 및 파괴양상 천이온도(fracture appearance transition temperature, FATT)를 구하였다. 그리고, 하계온도, 상계온도 및 FATT에서의 K_{IC}를 구하기 위해서 각 온도에서 항복강도(yield strength, Y.S)를 구하기 위한 시험도 하였다.

상온 충격시험편에 대한 전자주사현미경(SEM) 관찰은 V-노치 시험편 두께 1/2위치의 선단 전방 2mm위치에서 하였다. 그리고, 벽개(cleavage)파면과 연성(ductile) 파면의 비를 측정하기 위해 영상분석기(Image analyzer)를 병행하여 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of production rotor and laboratory heats

Heats	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	As	Sn	Sb	Al	Gas(ppm)		
															N ₂	H ₂	O ₂
O ₁	0.31	0.05	0.61	0.006	0.002	0.58	1.28	1.06	0.29	0.06	0.011	0.004	0.0009	0.008	60	1.10	46
M ₁	0.30	0.21*	0.58	0.008	0.007	0.58	1.21	1.09	0.26	0.05	0.015	0.005	0.0002	0.020	88	0.85	88
M ₂	0.32	0.25	0.61	0.028*	0.007	0.59	1.32	1.10	0.31	0.06	0.014	0.005	0.0011	0.020	99	0.82	80
M ₃	0.32	0.25	0.61	0.007	0.020*	0.58	1.29	1.07	0.31	0.06	0.014	0.005	0.0015	0.025	77	0.76	76
M ₄	0.30	0.26	0.60	0.007	0.006	0.59	1.28	1.11	0.31	0.20*	0.015	0.006	0.0014	0.021	104	1.05	92
M ₅	0.29	0.24	0.58	0.007	0.006	0.62	1.27	1.11	0.30	0.06	0.017*	0.006	0.0013	0.027	89	0.95	68
M ₆	0.30	0.24	0.62	0.008	0.006	0.60	1.33	1.10	0.32	0.06	0.013	0.028*	0.0015	0.024	77	0.90	85
M ₇	0.32	0.26	0.60	0.007	0.006	0.60	1.32	1.13	0.30	0.06	0.012	0.004	0.048*	0.024	88	0.95	82

O₁: Original production rotor, M₁~M₇: Modified rotor(* marks additional composition)

Table 2 Mechanical properties of production rotor and laboratory heats

Heats	Hardness (H _{RC})	T.S (MPa)	Y.S (MPa)
O ₁	13.0/13.5/14.0	722.26	571.34
M ₁	18.5/18.0/18.0	726.50	539.98
M ₂	18.5/18.5/18.0	737.94	563.50
M ₃	18.0/19.0/18.5	747.74	578.20
M ₄	20.5/19.0/20.0	757.54	597.80
M ₅	17.0/15.0/15.5	740.88	595.84
M ₆	16.0/15.0/15.0	712.46	570.36
M ₇	16.0/16.0/16.0	719.32	567.42

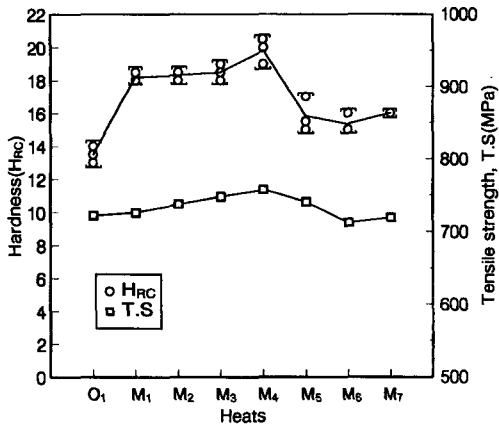


Fig. 3 Hardness and tensile strength of the heats

3. 결과 및 고찰

3.1 개재물이 상온 경도 및 인장강도에 미치는 영향

각 시험편에 대한 상온에서 경도 및 인장강도 시험을 한 결과를 요약하면 Table 2와 같다. Fig. 3에서 Heat별로 조사된 경도 및 인장강도 값을 비교하면 경도값과 인장강도는 상당히 정량적인 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 생산로터인 O₁의 경우 경도는 가장 낮게 나타났으나 인장강도는 평균경도의 값을 보였다. 비금속 개재물 중 Si(M₁), P(M₂), S(M₃), Cu(M₄) 등은 경도와 인장강도를 향상시키며, As(M₅), Sn(M₆), Sb(M₇)는 경도를

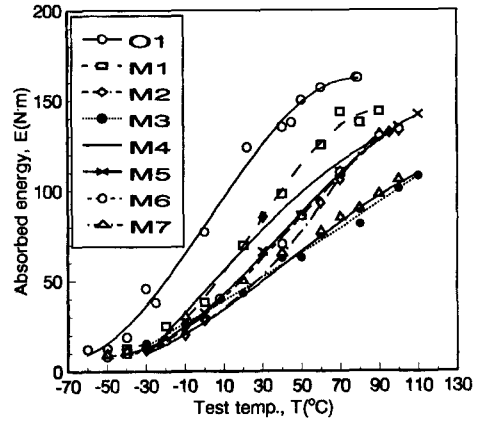


Fig. 4 Charpy impact value at various temperature

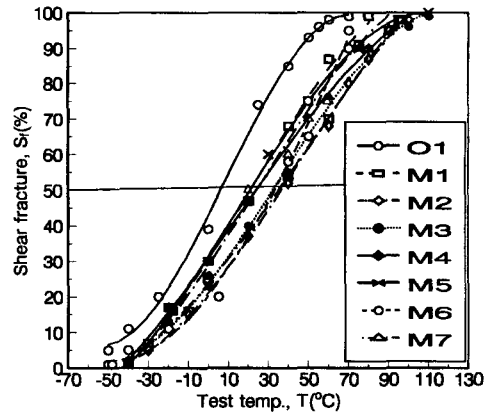


Fig. 5 Relation between shear fracture and test temperature

향상시키는 경향이 뚜렷하지 않았으며, Sn(M₆), Sb(M₇)의 첨가는 O₁보다 인장강도를 낮추었다. 특히, Cu를 0.20% 함유한 경우(M₄)는 O₁보다 인장강도가 최대 4.88% 높게 나타나서 경도와 인장강도 측면에서는 Cu의 첨가가 유효하며, 이는 Cu를 함유한 강의 열간이나 냉간가공은 경도와 인장강도를 향상시킨다는 연구보고⁽⁸⁾와 일치하였다.

3.2 개재물이 충격치에 미치는 영향

각 시험편에 대한 충격시험 후 하계온도, 상계온도 및 FATT를 구한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였으며, 이 결과를 요약하면 Table 3과 같다. FATT 및 상계온도는 개재물이 함유된 경우

Table 3 Impact test results of production rotor and laboratory heats

Heats	FATT (°C)	Impact			
		Lower shelf		Upper shelf	
		Temp. (°C)	Energy (N·m)	Temp. (°C)	Energy (N·m)
O ₁	8	-50	12.74	60	153.86
M ₁	22	-40	12.74	80	135.24
M ₂	36	-35	13.72	100	129.36
M ₃	34	-40	11.76	110	105.84
M ₄	26	-40	12.74	100	125.44
M ₅	21	-40	9.8	110	139.16
M ₆	30	-50	9.8	90	134.26
M ₇	24	-50	8.82	100	101.92

모재보다 상승하며, 특히 P(M₂), S(M₃), Sn(M₆)가 함유된 경우에 FATT가 30°C 이상으로 나타났다. 그 이유는 P와 S는 MnS나 Fe₃P 등의 비금속 개재물의 형성을 촉진하기 때문으로 사료된다.⁽⁷⁾ 샤프 V-노치(Charpy V-notch, CVN)의 충격 흡수에너지는 O₁의 경우가 하계, FATT 및 상계온도에서 가장 높게 나타났으며, 하계온도 부근에서는 9~13N·m 정도로서 흡수에너지의 차이가 크지 않으나 상계온도에서는 개재물에 의한 흡수에너지의 차이가 심하게 나타났다. 이 결과는 탄소량이 동일한 여러종류의 합금강에 대한 충격실험결과 하계온도에서 균집된다는 연구결과⁽⁹⁾와 일치하였다. 그리고, 하계온도에서는 충격 흡수에너지가 대체로 균집되고 상계온도에서는 데이터의 분포폭이 넓어진다는 것은 향후 3.3절에서 언급될 K_{IC}의 분포폭에도 밀접한 영향을 미칠것으로 사료된다. 여기서, S(M₃)와 Sb(M₇)가 함유된 경우에 충격에너지 값이 가장 낮게 나타났다. Raghupathy 등⁽¹⁰⁾의 보고에 의하면 Sb의 잔류원소는 prior austenite 입간계면의 취성을 증대시키고, S는 파괴인성을 저하시킨다고 보고하였으며 이 결과와 일치하였다.

3.3 K_{IC} 산정 및 개재물의 영향

재료의 기계적 실험 데이터인 CVN과 Y.S로부터 K_{IC}를 산정하는 방법에 대한 연구가 많이 진행

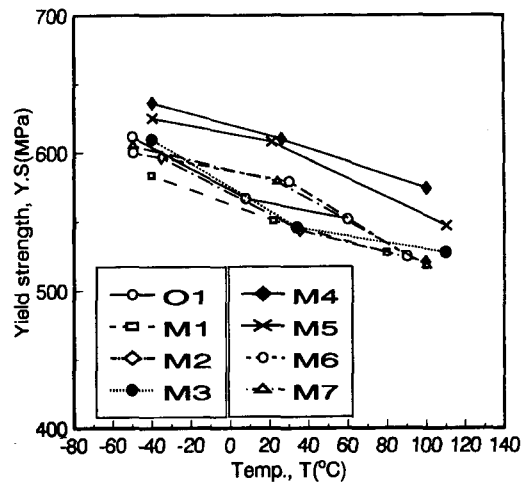


Fig. 6 Yield strength at various temperatures

되어 왔다.^(11,12) 특히, 로터강종의 하계온도에서 K_{IC}의 예측은 Begley와 Logsdon 등⁽¹¹⁾에 의해 제안된 바 있고, 상계온도에서는 Rolfe와 Novak에 의해 연구⁽¹²⁾된 바 있다. 이상을 종합하면

1) lower shelf 온도에서 K_{IC} 산정식

$$K_{IC} = 0.5(Y.S) \quad (1)$$

여기서, K_{IC}의 단위는 $MPa\sqrt{m}$, Y.S의 단위는 MPa이다.

2) FATT에서 K_{IC} 산정식

$$K_{IC} = \frac{1}{2}(\text{Rolfe-Novak에 의한 } K_{IC} + 0.5Y.S) \quad (2)$$

3) upper shelf 온도에서 K_{IC} 산정식

$$\left(\frac{K_{IC}}{Y.S}\right)^2 = 0.6478\left(\frac{CVN}{Y.S} - 0.0098\right) \quad (3)$$

여기서, CVN의 단위는 J이다.

O₁ 시험편의 경우는 상기의 식이 잘 적용됨이 보고⁽¹³⁾된 바 있다. 본 실험의 경우 각 시험편의 온도변화(-50~110°C)에 따른 Y.S 값을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 비금속개재물은 시험온도에서 Y.S에 영향을 미치고, 온도가 상승할수록 Y.S가 낮아지는 것으로 나타났으며, 특히 Cu(M₄)와 As(M₅)를 함유한 경우 Y.S가 높게 나타났다. Cu, As 이외의 원소는 O₁보다 조금 높거나 낮아서 대체로 비슷한 경향을 보였으며, 충격값은 3.2절에서 언급한 바와 같이 상계온도에서는 영향이 뚜렷하였으나 Y.S는 하계온도와 상계온도에서 비슷한 경향을 보였다. 이것은 후술(3.5절 참조)하는

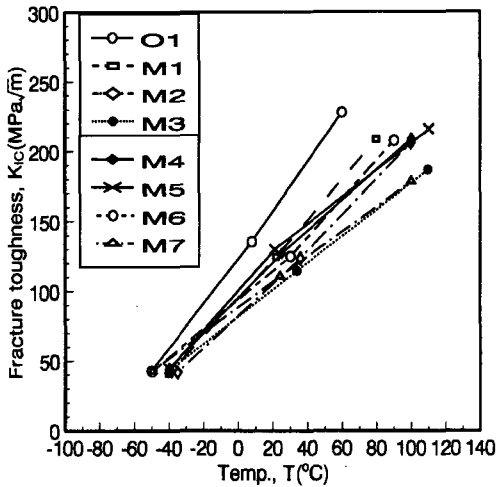


Fig. 7 Fracture toughness data at various temperatures

K_{IC} 와 밀접한 상관성이 있으리라 사료된다.

상계온도, FATT 및 상계온도에서의 Y.S와 CVN 값으로부터 상기식을 사용하여 산정된 K_{IC} 값은 Fig. 7에 나타냈다. 여기서, 온도변화에 따른 K_{IC} 값은 상계온도 근처에서 많은 변화를 보이며, 따라서, 균열은 상계온도 부근에서 하중에 대단히 민감해짐을 알 수 있다. 그 이유는 충격치에 미치는 개재물의 영향이 3.2절에서 언급한 것처럼 상계온도 부근에서 상대적으로 크기 때문으로서, 식 (3)의 CVN의 값을 증감시키기 때문이다.

또한, O₁의 경우 FATT 이상에서는 K_{IC} 값이 가장 높으나 FATT 이하에서는 여타재료보다 K_{IC} 감소비가 큰 것을 알 수 있으며, 향후 온도변화에 따른 재질변화 및 조직학적 특성 등에 대한 보다 심도 있는 연구가 요구된다.

3.4 K_{IC} 설계곡선과의 비교

Fig. 8에 O₁에 대한 K_{IC} 설계기준을 도시하였는데, 상한계(upper limit) 곡선과 하한계(lower limit) 곡선은 지금까지 생산된 HP 터빈 로터재(CrMoV, NiMoV, NiCrMoV강)의 데이터 밴드(band)를 의미한다. 횡축을 FATT를 고려한 시험온도, 즉 과도온도(excess temperature)로 나타내면 비금속 개재물이 함유된 경우(M₁~M₇)의 K_{IC} 값은 밴드내에서 O₁ 보다는 아래로 분포하고 있으나, K_{IC} 의 설계요구 수준은 만족하고 있음을 알 수 있으며, 본 로터재의 ASME 설계곡선(design curve)보다

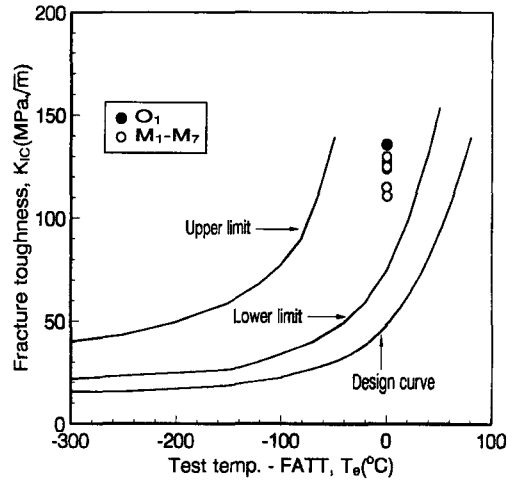


Fig. 8 Fracture toughness data compared with design curve at FATT

상회하는 K_{IC} 값을 보였다.

3.5 파면관찰

상온 충격시험에서 얻어진 파면을 시험편 중앙부위의 노치선단 2mm 위치에서 전자주사현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 충격시험된 시험편의 파면은 피로시험편과는 달리 요철이 매우 심하여 연성(ductile)과 벽개(cleavage)의 정도를 파악하기 위한 고배율 사용에 제한이 따르므로 본 연구에서는 700X를 사용하였으며, 파면을 분석에 영상분석기(image analyzer)를 병행하여 사용하였다. 기본소재인 O₁에서는 91% 정도의 연성딤플과 9%의 벽개파면이 혼재된 복합적인 파괴양상을 보였다. Si(M₁), Cu(M₄), As(M₅), Sn(M₆) 등이 함유된 경우에는 벽개파면의 양상이 약 27%로서 조금 뚜렷해짐을 알 수 있으며, 이것은 3.2절에서 언급한 충격에너지에 영향을 미친 것으로 사료된다. 한편, P(M₂)가 함유된 경우에는 벽개파면이 약 34% 정도로 나타났으며, S(M₃), Sb(M₇)가 함유된 경우에는 벽개파면의 양상이 약 53% 정도로 가장 뚜렷하였으며, 따라서, 충격에너지가 가장 낮게 나타나고 파괴인성치도 저하된 것으로 판단된다. 본 결과는 합금성분의 잔류원소 중 P, S, Sb, As, Sn 등은 입간계면의 취성과 파괴인성을 감소시키는 경향

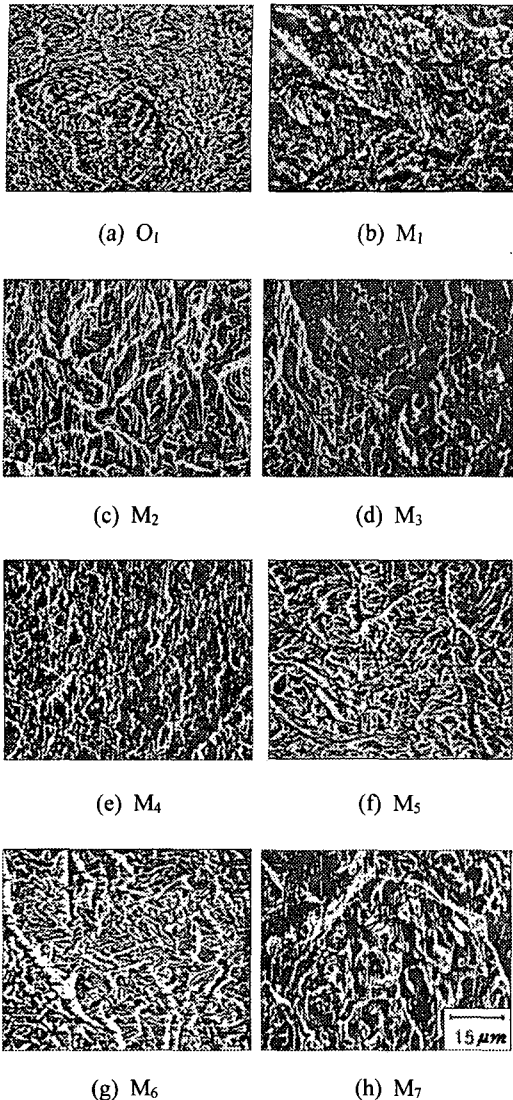


Fig. 9 Electron micrographs of fracture surface by impact test at room temperature

이 있다고 보고한 Coulon, Lenel 등^(14,15)의 연구와 일치하였다. 향후 TEM 등에 의한 파괴의 미시적 양상(micro aspect)에 대한 보다 심도 있는 연구가 요망된다.

이상을 종합하여 정리하면 본 재료의 충격치를 저하시키는 원소는 S와 Sb, 그 다음에 P로 나타났으며, 상계온도로 온도가 상승할수록 그 경향은 심하여졌다. 그리고, 상온에서 Y.S 및 T.S를

가장 상승시키는 원소는 Cu, As로 나타났고, 여타 원소는 O₁과 비슷한 양상을 보였다. 그리고, 하계온도에서 상계온도까지 온도변화에 관계없이 대체로 비슷한 경향을 보였다. 따라서, FATT 이상에서 본 로터재의 K_{IC}와 밀접한 상관관계가 있는 인자는 Y.S가 아니라 CVN임을 알 수 있다.

4. 결론

터빈 로터강의 개재물이 파괴인성치(K_{IC})에 미치는 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 로터강의 K_{IC}값은 온도가 높아짐에 따라 거의 선형적으로 증가하며, FATT 이상에서 개재물의 영향이 크게 나타났다.

(2) 로터강의 하계온도에서 K_{IC}값은 항복강도와 정량적인 상관성이 존재하며, Begley 등의 제안식과 일치하였다.

(3) 상계온도에서의 K_{IC}값 결정을 위한 시험은 시험편의 크기, 시험기 용량 등의 제약이 따르나 Rolfe-Novak의 K_{IC} 산정식에 의해 쉽게 구할 수 있었다.

(4) 충격시험편의 파면양상을 관찰한 결과 취성 파괴 정도는 재료의 FATT에 근본적으로 의존하며, 미소 개재물의 영향은 파면양상으로 비교적 뚜렷하였다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) 송삼홍, 강명수, 1997, "터빈용 Cr-Mo-V강의 고온 환경변화에 따른 피로거동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 21, No. 1, pp. 173~179.
- (2) 홍성호, 조현춘, 1994, "3.5Ni-Cr-Mo-V강의 크리프 수명예측에 재질열화 및 오스테나이트 결정립 조대화가 미치는 영향," 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 11, pp. 2837~2845.
- (3) 정남용, 김문영, 김종우, 1999, "발전용 가스터빈 고온 부재의 탄소성 J적분 파괴인성 평가," 대한기계학회논문집, Vol. 23, No. 10, pp. 1837

- ~1844.
- (4) McMahon, C. J., Gentner, D. H., 1977, *Problems of Alloy Design in Pressure Vessel Steels in Fundamental Aspects of Structural Alloy Design*, McGraw-Hill, New York, pp. 295~322.
- (5) McMahon, C. J. et. al., 1980, "The Effect of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in 21/4Cr-1Mo Steels," *ASME J. Engg. Mater. Tech.*, Vol. 102.
- (6) Viswanathan, R. and Jaffee, R. I., 1982, "2¹/₄Cr-1Mo Steels for Coal Conversion Pressure Vessels," *ASME J. Engg. Mater. Tech.*, Vol. 104, July, pp. 220~226.
- (7) Viswanathan, R. and Jaffee, R. I., 1985, "Metallurgical Factors Affecting the Reliability of Fossil Steam Turbine Rotors," *ASME J. Engg. Gas Turbines and Power*, Vol. 107, July, pp. 642~651.
- (8) ASM, 1979, "Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Pure Metals," *Metals Handbook*, Ninth Edition, pp. 239~241.
- (9) George, E. D., 1984, "Mechanical Metallurgy," *International Student Edition*, pp. 497~502.
- (10) Raghupathy, V. P., 1982, "The Effect of Sulphide Inclusions of Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth in 12wt% Cr Steel," Chapman and Hall Ltd., pp. 2112~2126.
- (11) Begley, J. A. and Logsdon, W. A., 1971, "Correlation of Fracture Toughness and Charpy Properties of Rotor Steels," Scientific Paper 71-1E7-MSLRP, Westing-house Research Laboratories.
- (12) Rolfe, S. T. and Novak, S. R., 1970, "Slow Bend KIC Testing Medium Strength, High Toughness Steels," STP 463, ASTM, Philadelphia, p. 124.
- (13) Iwadate, T., Watanabe, J. and Tanaka, Y., 1985, "Prediction of the Remaining Life of High Temperature/Pressure Reactors Made of Cr-Mo Steels," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Tech.*, Vol. 107, pp. 230~238.
- (14) Coulon, A., 1988, "The Role of Trace Elements in a Martensitic Steel," *Recent Developments in Rotor Forging Steels, Iron and Steel Society, Inc.*, AIME, pp. 119~130.
- (15) Lenel, U. R. and Kuott, B. R., 1987, "Microstructure Composition Relationships and Ms Temperatures in Fe-Cr-Mn-N Alloys," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 18A, pp. 767~775.