

1987. 10. 15

< 論 文 >

터어빈 로우터용 강에 대한 기계적 성질로부터 파괴인성치 (K_{Ic}) 예측에 관한 연구

이 학 문* · 정 순 호* · 장 윤 석* · 이 치 우**

(1987년 3월 3일 접수)

Prediction of Fracture Toughness for Turbine Rotor Steels from Their Mechanical Test Results

Hak-Moon Lee, Soon-Ho Chung, Yun-Souk Chang and Chi-Woo Lee

Key Words: Prediction of Fracture Foughness(파괴인성예측), Turbine Rotor(터어빈 로우터),
Mechanical Properties(기계적 성질), FATT Curve(파괴양상 친이곡선)

Abstract

Mechanical properties tests and fracture toughness tests of turbine rotors were performed in the wide range of temperatures, $-150^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$, and fracture toughness values from above tests were compared with the estimated values from mechanical properties at lower and upper shelf temperatures and FATT. The relations between mechanical properties and K_{Ic} properties proposed by Rolfe and Begley were reviewed and confirmed through these experimental results.

On the fracture surfaces of some specimens which were satisfied with the Ikeda's K_{Ic} criterion micro dimple zone was detected at the rear of fatigue crack zone and it was confirmed that these specimens were not satisfied with the thickness requirement of ASTM E 399.

한 것으로 보고 되고 있다⁽⁵⁾.

한편, 발전용 터어빈 로우터용 강에 대한 실험적 연구는 많지 않지만 Begley-Logsdon⁽²⁾은 하계온도(lower shelf temperature)에서 항복강도와 파괴인성치와의 관계를, 그리고 Rolfe-Novak⁽⁶⁾은 상계온도(upper shelf temperature) 충격값과 항복강도로서 파괴인성치와의 관계를 구하였다. 이들이 실시한 시험방법을 요약하면 다음과 같다.

(1) 충격시험을 실시하여 시험 온도에 대한 충격흡수에너지곡선과 파괴양상친이곡선(FATT Curve)을 구한다.

1. 서 론

기계적 시험 매이저인 충격값과 항복강도 등으로 부터 파괴인성치 (K_{Ic})를 예측하는 방법에 대하여 많은 연구가 진행되었으며⁽¹⁻⁴⁾ 이들의 대부분이 압력용기용 $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 강에 대한 것으로서 그 결과가 아주 유용

* 정의원, 한국중공업(주) 기술연구소

** 정의원, 경남대학교 공과대학 기계설계학과

(2) 0%, 50%, 100% 전단면율(shear area percent)을 구한다. 여기서 0% 전단면율이 나타나는 온도를 하계온도로, 100% 전단면율이 나타나는 온도를 상계온도로 한다.

(3) 하계온도 및 상계온도에서 인장시험을 실시하여 각각의 항복강도를 구한다.

(4) 다음의 식을 사용하여 파괴인성치를 산출한다. 상계온도에서

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 5\left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05\right) \quad (1)$$

하계온도에서

$$K_{Ic} = 0.45\sigma_{ys} \sqrt{\bar{in}} \quad (2)$$

으로 한다. 여기서, σ_{ys} 는 항복강도(ksi), CVN은 충격흡수에너지(ft-lb), K_{Ic} 는 파괴인성치(ksi $\sqrt{\bar{in}}$)이다.

(5) 50% 천이온도(FATT)에서의 파괴인성치는 상계온도에서의 K_{Ic} 값과 하계온도에서의 K_{Ic} 값의 산술 평균으로 구한다.

(6) 위 (3), (4), (5)에서 산출된 K_{Ic} 점들을 점선으로 연결하여 K_{Ic} 값의 예측곡선을 구한다.

본 연구에서는 한국중공업에서 실제로 제작한 터빈 로우터를 시험편으로 하여 -150°C 에서 $+150^{\circ}\text{C}$ 에 걸쳐 인장시험, 충격시험 및 파괴인성시험을 실시하여 각 온도에서 기계적 성질과 파괴인성치를 시험적으로 구하고 Begley-Logsdon의 방법에 따라 파괴인성치를 예측하여 예측방법의 유용성 여부를 조사하고 또한 파단면의 양상을 함께 검토하였다.

2. 시험

2.1 시험편 제작

시험에 사용한 시험편은 Fig. 1의 공정에 따라 제조된 터빈 로우터에서 채취하였으며 시험편의 크기는 K_{Ic} 시험편은 1~3CT, J_{Ic} 시험편은 0.5~1CT로 가공하였고 시험편의 화학성분은 Table 1에 표시하였다.

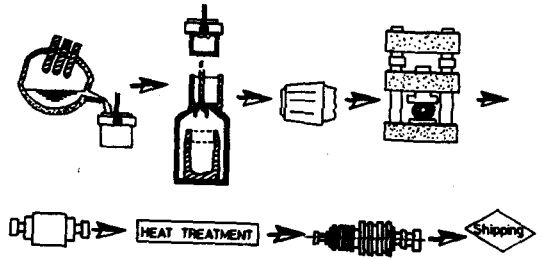


Fig. 1 Manufacturing sequence of turbine rotor shaft

또한 Fig. 2에 각 터빈 로우터의 열처리 조건을 표시하였다.

2.2 시험 방법

(1) 인장시험

인장시험은 재료시험기(Instron 1336-100T)에 저온조 및 고온조를 개발 장착하여 시험온도를 자동조절한 후 시험을 실시하였으며 시험편은 ASTM A370에 준하였다.

(2) 충격시험

충격시험은 샤르피충격시험기(Tinius-Dlsen 제)를 사용하였으며 -100°C 부터 $+100^{\circ}\text{C}$ 까지 시험을 실시하고 충격흡수에너지곡선 및 파괴양상천이곡선을 구하였다.

(3) 파괴인성시험

K_{Ic} 시험편에서는 $K_I \leq 0.6K_0$, J_{Ic} 시험편에서는 $0.4P_L$ 이하의 하중조건하에서 피로시험기를 이용하여 피로균열을 만들었으며 하계온도에서 상계온도까지 5~9개의 온도구간을 설정하여 K_{Ic} 및 J_{Ic} 시험을 실시하였다. K_{Ic} 시험에서 평면변형조건(plane-strain condition)을 만족하기 위한 ASTM E399⁽⁷⁾ 규격은 다음과 같다.

$$\frac{P_{max}}{P_0} < 1.1 \quad (3)$$

Table 1 Chemical composition of rotor shafts

(weight %)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Rotor A-NiCrMoV	0.24	0.06	0.40	0.006	0.006	2.21	1.42	0.51	0.06
Rotor B-NiCrMoV	0.22	0.06	0.31	0.006	0.007	3.46	1.55	0.39	0.13
Rotor C-CrMov	0.31	0.05	0.62	0.006	0.002	0.58	1.28	1.06	0.29
Rotor D-CrMoV	0.30	0.05	0.70	0.006	0.005	0.60	1.30	1.10	0.30

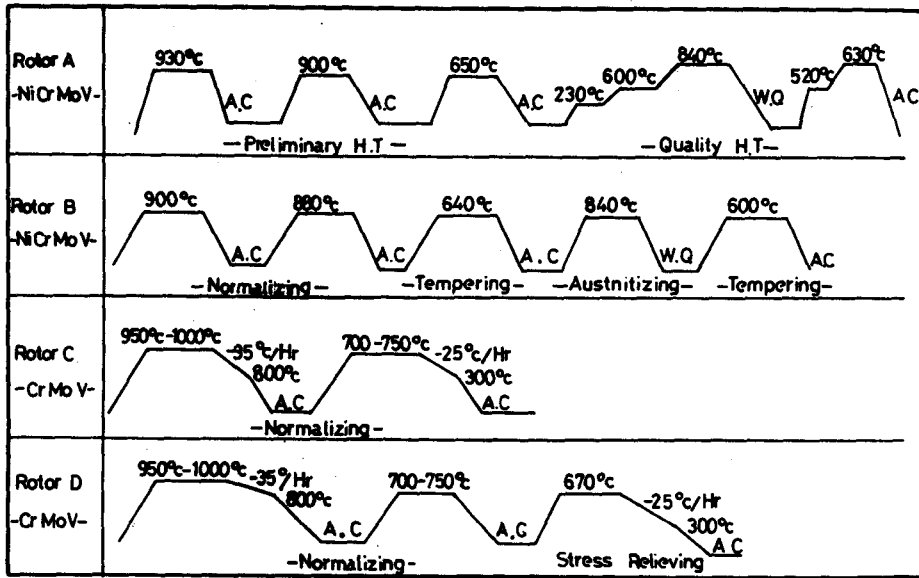


Fig. 2 Heat cycles of rotor shafts

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{P_0}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4)$$

그러나, Ikeda⁽⁶⁾ 등은 식 (4)를 만족하지 않을 경우라도 터어빈 로우터용 강의 파괴인성 시험에서는 다음의 식 (5)를 만족하는 경우에는 그 시험 결과를 K_{1c} 값으로 사용이 가능하다고 연구보고 하였으며 이를 Fig. 3 및 Fig. 4에 표시하였다.

$$P_{max} = P_0 \quad (5)$$

터어빈 로우터용 강재의 중강도-고인성의 특성을 감안하여 본 연구에서는 시험결과 K_{1c} 값을 취함에 있어 상기의 시험조건(Ikeda's Validity Criterion for K_{1c})을 적용하기로 하였다.

또한 상계온도 근처에서는 ASTM E813⁽⁶⁾에 따라 단일 하중제거 컴플라이언스 방법(method of compliance)으로 시험하고 Saxena-Hudak의 균열중분 Δa의 계산식⁽¹⁰⁾을 사용하여 파괴인성치를 구하여 보았다.

$$\frac{a}{W} = 1.0002 - 4.0632U_x + 11.242U_x^2 - 106.04U_x^3 + 464.33U_x^4 - 658.68U_x^5 \quad (6)$$

단,

$$U_x = \frac{1}{\left(\frac{B \cdot E \cdot \Delta \delta}{(1-\nu)^2 \cdot \Delta P} \right)^{\frac{1}{2}} + 1}$$

이고 여기서 $\left(\frac{\Delta \delta}{\Delta P} \right)$ 는

제하 컴플라이언스이며 또한 K_{1c}로의 환산식은 다음과 같다.

$$(K_{1c})^2 = \frac{J_{1c} \cdot E}{1-\nu^2} \quad (7)$$

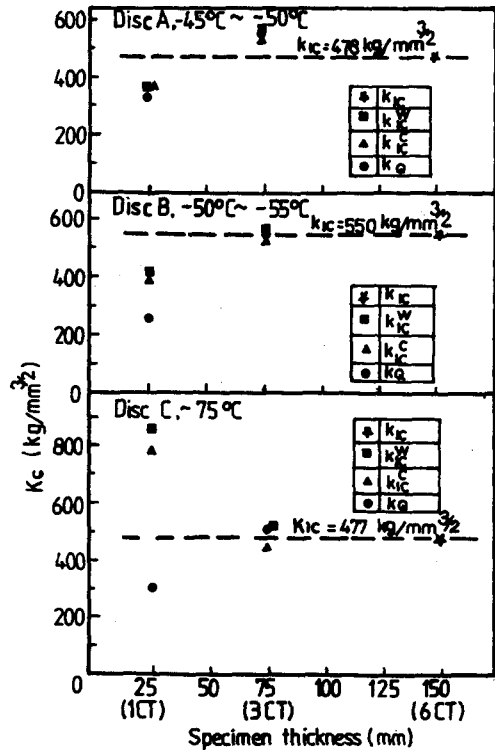


Fig. 3 Effect of specimen size on fracture value⁽⁷⁾

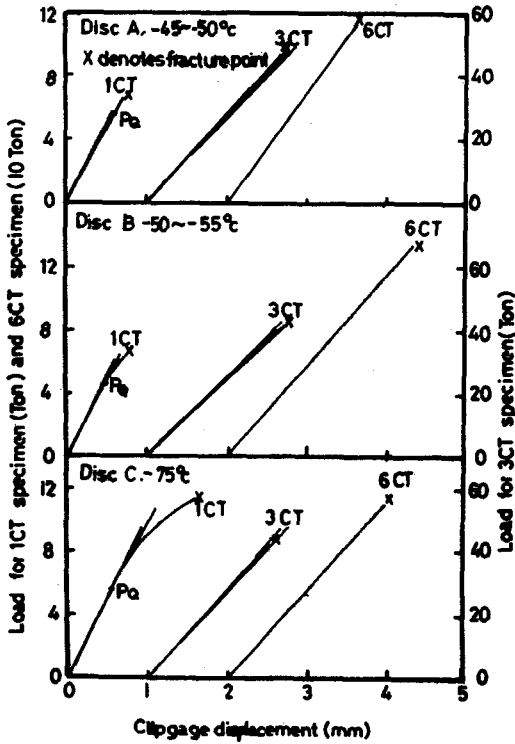


Fig. 4 Load-displacement records of CT tests⁽⁷⁾

여기서, E 는 탄성계수, ν 는 프와송비이다.

3. 시험결과

3.1 기계적 특성

시험온도에 따른 항복강도, 인장강도 및 연신율등을 Table 2에 표시하였다.

또 충격시험 결과를 Fig. 5에 나타내었으며 50% FATT는 각 터빈 로우터에 따라 -25°C , 5°C , 55°C , 8°C 이며 이는 각 터빈 로우터의 화학성분과 열처리 특성에 따른 차이로 고려된다.

3.2 파괴인성 시험결과

시험 온도별 파괴인성시험결과를 Table 3에 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 파괴인성치는 증가하여 Begley-Logsdon의 시험결과와 매우 유사함을 Figs. 6, 7, 8, 9에서 알 수 있다.

본 시험의 K_{Ic} 데이터는 식 (3), (4) 또는 식 (5)를 만족하고 있으므로 유효한 K_{Ic} 값으로 사용하였으며 여기서 식 (5)에 의한 K_{Ic} 값을 Table 3에 *로 표시하였다.

또 상계온도구역에서의 파괴인성치를 알기 위한 J_{Ic}

Table 2 Tensile data of rotor steels

Material	Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Rotor A	150	72.4	80.6	18.8	64.8
	100	71.3	82.2	17.6	67.0
	50	75.2	84.8	18.0	62.3
	20	77.1	87.6	20.0	65.3
	0	78.8	90.2	20.0	66.9
	-25	80.9	92.5	18.4	64.5
	-85	84.0	98.0	20.0	64.6
	-150	90.2	101.1	20.0	63.1
Rotor B	100	78.6	87.4	20.0	65.0
	50	79.5	88.7	16.0	63.8
	25	81.5	92.7	18.8	61.6
	0	83.2	92.7	17.6	66.2
	-30	85.5	96.9	20.0	58.2
	-60	89.6	98.9	18.3	63.2
	-73	90.7	101.7	20.4	60.9
	-150	—	—	—	—

Rotor C	150	57.1	68.3	20.6	59.1
	110	63.1	74.5	18.0	58.6
	55	65.7	77.4	20.0	56.1
	25	67.9	81.2	19.7	53.2
	-10	67.4	81.4	20.6	55.7
	-50	70.7	85.7	20.3	53.3
	-100	77.2	89.4	20.6	50.8
	-150	77.3	88.4	21.7	56.4
Rotor D	150	52.7	65.4	19.4	63.5
	100	54.2	67.7	16.6	41.4
	60	55.2	69.4	21.4	60.3
	8	56.7	72.7	12.0	65.0
	0	57.7	73.9	21.1	60.6
	-30	58.8	76.2	23.4	62.1
	-50	64.2	78.9	20.0	52.7
	-80	64.4	81.4	21.4	51.4
	-100	66.5	83.7	26.6	50.2
	-150	77.8	90.6	20.3	50.0

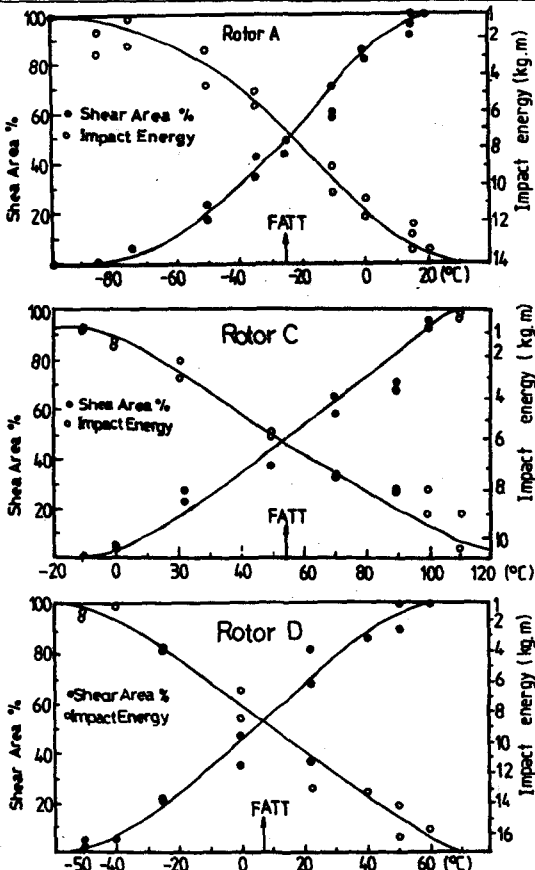


Fig. 5 Shear area % and impact energy of rotor shafts

시험에서는 균열증분 Δa 의 크기가 0.1~0.4mm 인 지점에서 취성파괴가 됨에 따라 이에 따른 J 값은 Table 3에 J_0 로 표시하고 식 (7)에 의해 K_{Ic} 로 환산한 후 ()로 나타내어 파괴인성치의 경향을 참고로 하였다.

4. 고찰

4.1 하계온도에서의 파괴인성치

Begley-Logsdon 이 하계온도에서의 광복강도와 파괴인성치와의 관계를 식 (2)로 표시함을 앞서 보코한 바 있고 실제 본 시험의 결과치와의 비교를 위해 Fig. 6, 7, 8, 9에 이를 도시하였다.

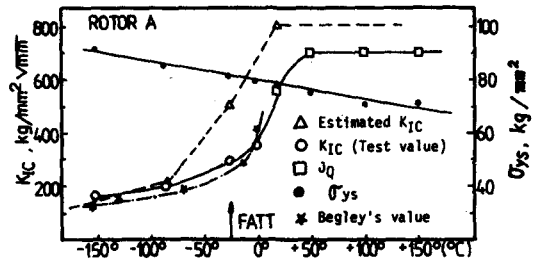


Fig. 6 Temperature dependence of the fracture toughness

Table 3 Results of K_{Ic} and J_{Ic} test for rotor steels

Material	Test	Specimen	Test temp. (°C)	J_0 (kg/mm)	K_{Ic} (kg/mm ^{3/2})	
Rotor A	J_{Ic}	0.5CT	150	20.0	(695)	
			100	20.0	(695)	
		1CT	50	19.8	(690)	
			20	12.1	(542)	
	K_{Ic}	1CT	0	—	*356	
-25			—	*280		
-85			—	199		
-150			—	160		
—			—	—		
Rotor B	J_{Ic}	1CT	100	17.8	(650)	
			25	15.2	(600)	
			0	17.7	(647)	
			-30	6.7	400	
	K_{Ic}	1CT	-60	—	250	
-73			—	200		
-150			—	150		
—			—	—		
Rotor C	J_{Ic}	0.5CT	150	13.0	(536)	
			110	13.6	(550)	
	K_{Ic}	2CT	55	—	274, *393	
			25	—	273, 274	
			-10	—	206	
-50			—	178		
-100	—	165				
Rotor D	J_{Ic}	0.5CT	150	20.9	(700)	
			1CT	100	18.9	(666)
				60	14.2	(577)
	K_{Ic}	2CT	0	—	*403	
			-30	—	*373, *330	
-50			—	260		
-80			—	230		
-100	—	210, 190				

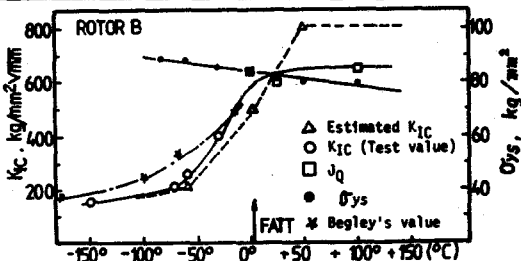


Fig. 7 Temperature dependence of the fracture toughness

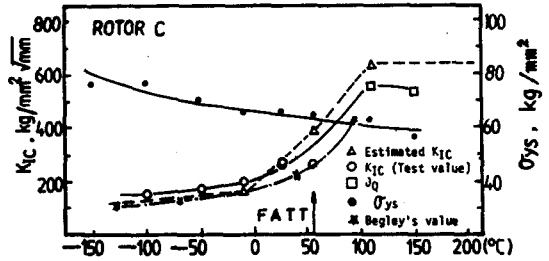


Fig. 8 Temperature dependence of the fracture toughness

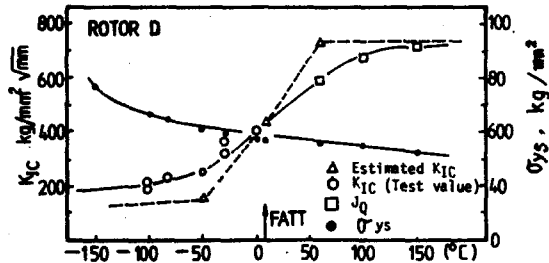


Fig. 9 Temperature dependence of the fracture toughness

여기서 본 시험의 결과치가 하계온도에서 식 (2)에 의한 예측치에 매우 근접함을 알 수 있으며 식 (2)는 터빈 로우터용 강의 하계온도에서 매우 유용한 것으로 사료된다. 또한 Begley-Logsdon에 따르면 -190°C 에서 하계온도에 이르는 파괴인성치는 NiCrMoV 강에서는 $124\text{kg/mm}^{3/2}$, CrMoV 강에서는 $88\text{kg/mm}^{3/2}$ 이상으로 보고 한 바 있으며 본 시험의 결과 로우터 A, B (NiCrMoV)의 경우 -150°C 에서 $160\text{kg/mm}^{3/2}$ 및 $150\text{kg/mm}^{3/2}$ 이며 로우터 C, D (CrMoV 강)의 경우 -100°C 에서 $165\text{kg/mm}^{3/2}$ 및 $190\text{kg/mm}^{3/2}$ 이므로 Begley-Logsdon의 예측경향과 매우 근사함을 알 수 있었다.

4.2 상계온도에서의 파괴인성치

Rolfe-Novak은 상계온도에서 증강도-고인성강에 대해 식 (1)의 적용성을 보고 하였다. Begley-Toolin⁽¹¹⁾은 NiCrMo V 강 제철에서 식 (1)의 적용성을 검토하였으나 시험데이터의 수가 충분치 못하며 실제 사용한 시험편은 8CT K_{Ic} 시험편으로 상계온도에서의 터빈 로우터용 강의 K_{Ic} 시험의 어려움을 잘 보여 주고 있다.

본 터빈 로우터용 강의 경우 J_{Ic} 시험에서 0.4mm

이하의 $1a$ 지점에서 시험편이 파단되므로 둔화곡선과 R 곡선의 교점 J_0 를 ASTM E813⁽⁹⁾에 준하여 결정하기에는 어려운 재질 이었다. 따라서 만족스러운 파괴인성치는 구할수 없었으나 본 연구의 목적상 시험데이터를 K_0 로 환산하여 경향적인 파괴인성치로 참고하였다.

결론적으로 로우터 재질에 따른 상계온도에서의 파괴인성치를 구하려면 Begley-Toolin⁽¹¹⁾의 경우처럼 아주 큰 시험편을 사용하거나 또는 상계온도 이상에서는 파괴인성치의 변화가 크지않은 특성을 고려하여 파괴인성치를 구하는 것이 효과적인 것으로 사료된다. 그러나 대형시험편의 준비와 대용량의 시험기 및 고온용 시험기계의 구비등 이에 따른 많은 제약이 문제점으로 제기된다.

따라서, 터어빈 로우터용 강의 상계온도에서의 파괴인성시험에 관한 연구가 계속되어 많은 K_{Ic} 데이터가 나와야 정확한 예측도 가능할 것이다.

4.3 파면양상에 따른 관찰

파괴인성시험후 전자현미경으로 로우터 A와 로우터 C의 파면을 관찰하여 Fig. 10 및 Fig. 11에 파면관측상태를 나타내었다. 상계온도 또는 그 이상에서의 파면은 100% 연성파단면(dimple zone)으로 나타났으며 하계온도 또는 그 이하에서의 파면은 100% 취성파단면(cleavage zone)으로 나타났다.

50% FATT에서의 파면은 로우터 A의 경우 0~15 μm , 로우터 C의 경우 10~40 μm 정도의 연성파괴구역(DZ)이 피로균열구역(FZ)과 취성파괴구역(CZ) 사이에 나타났다. 이와같이 50% FATT 온도 근처에서 연성파괴구역이 관찰되는 현상과 식 (4)의 조건 즉 시험편 두께조건을 살펴본결과 연성파괴구역이 조금이라도 나타난 시험편은 식 (4)를 만족하지 못하고 있음을 알수 있다.

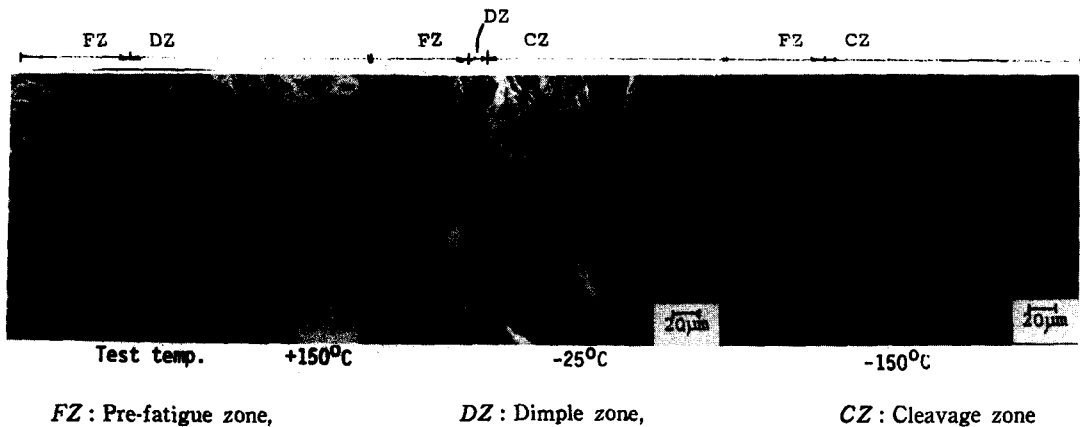


Fig. 10 Fractographies of rotor shaft A.

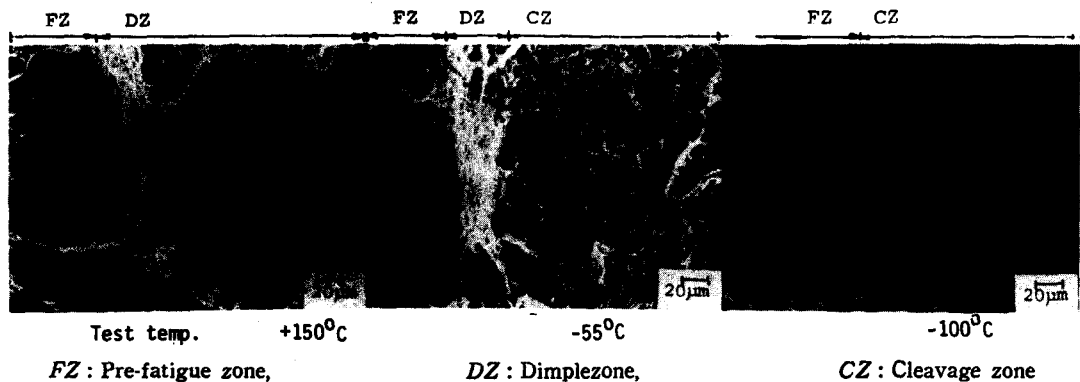


Fig. 11 Fractographies of rotor shaft C.

5. 결 론

터어빈 로우터용 강에 대한 기계적 성질로부터 파괴인성치를 예측하고 시험치와 비교 검토한 결과 다음과 같다.

(1) 터어빈 로우터용 강의 하계온도에서 항복강도로부터 파괴인성치를 예측하는 관계식 $K_{Ic} = 0.45\sigma_y \sqrt{in}$ 는 매우 유용한 것이며 이 식에 의한 예측치와 시험치는 매우 근사치를 이루고 있다.

(2) 중강도-고인성의 터어빈 로우터용 강의 상계온도에서의 파괴인성치의 예측법은 시험기기, 시험편의 크기등의 제약으로 인한 시험데이터의 부족으로 그 유용성은 계속적으로 검토되어야 한다.

(3) 50% FATT 근처에서의 파괴인성 시험후 파단면의 관찰결과 연성파괴구역이 피로균열구역과 취성파괴구역 사이의 경계부에 나타나던 ASTM E399의 시험편 두께 조건을 만족하지 않는다.

참 고 문 헌

- (1) Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., 1970, "Correlations Between K_{Ic} and Charpy V-Notch Test Results in the Transition-Temperature Range", Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, pp. 281~302.
- (2) Corten, H.T. and Sailors, P.H., 1972, "Relationship Between Materials Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and Transition Temperature Tests", ASTM STP 514, Fracture Toughness.
- (3) Begley, J.A. and Logsdon, W.A., 1971, "Correlation of Fracture Toughness and Charpy Properties for Rotor Steels", Scientific Paper 71-1E7-MSLR F-P1 Westinghouse Research Laboratories.
- (4) Wullaert, R.A., Ireland D. R. and Tetelman, A.S., 1972, "The use of the Precracked Charpy Specimen in Fracture Toughness Testing", Presented at the Fracture Prevention and Control Symp WESTEC 72 Meeting, Los Angeles, Calif, ASM.
- (5) Watanabe, J., Shindo, Y., Murakami, Y., Adachi T., 1974, "Temper Embrittlement of $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ Pressure Vessel Steel", Presented at the ASTM 29th Petroleum Mechanical Eng Conf. Dallas, Texas, ASME.
- (6) S.T. Rolfe and S.R. Novak, 1970, "Slow-Bend K_{Ic} Testing of Medium Strength High-Toughness Steels", Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing ASTM STP 463, pp. 124~159.
- (7) ASTM Standard E399, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials".
- (8) K. Ikeda et al., 1977, "Fracture Toughness of Turbine Rotor Shaft and Validity Criterion for K_{Ic} ", Fracture, Vol. 3 ICF 4. Waterloo Canada, pp. 19~24.
- (9) ASTM Standard E813, "Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness".
- (10) Saxena, A and Hudak, S.J. Jr., 1978, "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimen", Int., Journ. of Fracture, Vol. 14, pp. 453~468.
- (11) Begley, J.A. and Toolin, P.R., 1970, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Properties of a Ni Cr Mo V Steel Sensitive to Temper Embrittlement", Presented at the 4th National Symp. on Fracture Mech. Carnegie Mellon Univ. Pitts. Penns.