

고온고압 반응기 결함의 안전성 평가에 관한 연구

윤기봉*, 심상훈**, 권정락***, 김상섭***

중앙대학교 기계공학부*, 중앙대학교 대학원**, 한국가스안전공사 연구센터***

1. 서론

중화학 및 정유산업은 1960년대 우리 나라의 초기 경제개발 당시 핵심산업 중의 하나였으며, 최근 국내의 유류소비 상승과 석유화학분야 고부가가치 생산기술의 확보 등으로 설비의 중요성이 증대되고 있다. 이와 같은 이유로 관련업계에서는 중단 없는 설비운전이 요구되는 경우가 많아지고 있으며, 현재 많은 경우에 과부하 상태에서 운전되고 있다. 그러나, 국내의 관련 설비들은 거의 70년대에 제작되어 설비 노후화가 상당히 진행되어 있으며, 따라서 연속가동에 의한 설비의 대형 파손사고의 위험성도 높아지고 있다. 화학 플랜트의 파손 사고는 인명, 고가설비 손실, 생산중단 등에 의한 많은 경제적 손실을 동반하며, 또한 심각한 환경오염을 유발할 수 있다. 따라서, 대부분의 관련 국내 기업에서는 설비의 증설 및 교체 등을 추진 중이거나 계획하고 있다. 그러나, 앞으로도 기존 노후 설비는 계속 운전될 것이므로, 이러한 노후 설비에 대한 검사, 정밀진단, 수명평가 등의 필요성이 중요하게 제기되고 있다.

본 논문에서는 반응기에 거시 결함이 존재하는 경우에 사용안전성을 평가하는 방법을 연구 제시하였다.

2. 파괴인성값의 예측에 의한 안전성 평가 절차

2-1 인성 열화의 예측

인성열화를 평가하기 위한 파라미터로서 J 및 \bar{X} 등의 파라미터가 사용된다. 2.25Cr-1Mo강의 경우에는 J -factor $(=(Si+Mn)(P+Sn) \times 10^4)$, 1.25Cr-0.5Mo강의 경우에는 $\bar{X}=(10P+5Sb+4Sn+As) \times 10^{-2}$ 의 파라미터가 텀퍼취화로 발생하는 재료 열화의 예측에 제안, 사용되고 있다. 그림 1은 J -factor 값이 다른 여러 가지 2.25Cr-1Mo강의 노출 시간에 따른 FATT의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림은 장기간 등은 실험한 결과로부터 얻어진 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 J -factor가 큰 재료일 수록 텀퍼취화에 민감하고 FATT는 온도가 큰 쪽으로 옮겨간다. 또한 텀퍼취화의 진행 정도는 사용 시간과 더불어 커지고 있다. 텀퍼취화는 그림 1에서 보인 바와 같이 50,000시간 부근에서 포화된다. 즉, 2.25Cr-1Mo강의 인성열화가 사용시간 약 50,000시간 이전에 거의 최대값까지 발생한다는 것이다.

텀퍼취화의 최대 정도를 알아보기 위해 그림 1을 FATT 대 J -factor 관계로 다시 그린 것이 그림 2이다. 이 곡선들로부터 가동 중인 2.25Cr-1Mo강의 열화의 최대 상한선을 예측할 수 있다.

1.25Cr-0.5Mo강도 유사한 방법으로 인성열화도를 평가할 수 있다.

그림 1~그림 4까지의 데이터들로부터 장기간 사용한 2.25Cr-1Mo강, 1.25Cr-0.5Mo강의 인성열화도 및 K_{IC} 값의 변화를 J-factor와 \bar{X} 의 파라미터로부터 예측할 수 있다.

2-2 K_{IC} 천이 곡선의 추정

실제 반응기의 안전성 평가를 위해서는 장기간 사용한 재료의 파괴인성 K_{IC} 값을 온도의 함수로 추정할 필요가 있다. 그 추정 방법으로는 열화된 재료의 샤르피 충격시험 결과로부터 파괴인성의 천이 곡선을 추정할 수 있는 마스터 곡선법이 Iwadata 등에 의해 제안되어 사용되고 있다.

그림 5는 2.25Cr-1Mo강의 마스터 곡선을 보여 주는데 횡축은 초과 온도(excess temperature : 사용온도-FATT)를 나타내고, 종축은 무차원화시킨 K_{IC} 값으로서, K_{IC} 값을 Rolfe-Barsom의 경험식을 사용하여 얻은 upper shelf 온도에서의 파괴인성 K_{IC-US} 로 나눈 값인 K_{IC}/K_{IC-US} 를 나타내고 있다. Rolfe-Barsom의 경험식은 식(1)에 나타내었다.

$$\left[\frac{K_{IC-US}}{\sigma_{0.2}} \right]^2 = 0.6474 \left[\frac{CVN-US}{\sigma_{0.2}} - 0.0098 \right] \quad (1)$$

그림 5에 99%, 95%, 50% 신뢰성 한계 마스터 곡선을 보여주었는데, 이 마스터 곡선과, 식(1)에서 구한 K_{IC-US} , 그리고 그림 1~그림 4에서 측정한 FATT를 이용하여 장기간 사용한 반응기용 재료의 K_{IC} 천이 곡선을 예측할 수 있다. 그림 6은 1.25Cr-0.5Mo강, 1Cr강, 0.5Mo강의 경우에 사용되는 마스터 곡선이다.

3. 잔여수명 평가절차

그림 7은 반응기의 잔여수명 결정과정을 도식화한 것이다. 반응기의 총 수명은 균열 발생기 수명과 균열 성장기 수명의 합이다. 즉, 반응기의 잔여 수명은 검출된 결함이 진전, 성장하여 재료가 취성 파괴를 일으키는 한계균열크기 a_{cr} 에 도달할 때까지의 시간 또는 외표면에 도달하여 누수(leak)가 발생할 때까지의 시간으로 규정되어진다. 그 과정에서 재료 열화에 따른 한계균열크기의 감소나 균열의 진전, 확대는 앞절에 설명한 방법으로 예측할 수 있다.

균열성장 수명평가에는 화학 조성, 샤르피 충격 에너지 값, 항복 강도, 결함의 크기, 결함의 형상, 가동 시간, 작용 응력값 등의 데이터가 필요하다

4. 파괴인성 측정실험

앞에 설명한 열화된 재료의 파괴인성 평가절차의 신뢰성 확인을 위해 다음의 파괴인성 측정실험을 수행하였다.

4-1 실험재료

실험용 재료는 1Cr-0.5Mo강으로, 1965년에 제작되어 약 180,000시간 동안 국내 고온고압 설비에 사용된 재료이다. 이 설비의 내압, 운전 조건, 사용 시간에 대한

이력은 표 1에 나타내었다. Table 2에는 시험재의 화학성분을 나타내었다.

4-2 실험 방법

제II장에서 설명한 K_{IC} 평가에 필요한 데이터를 측정하기 위해서 실험은 인장 시험, 충격 시험(샤르피 충격 시험) 및 파괴인성 시험을 실행했다. 각각의 시험은 ASTM의 관련 규격에 따라 실시하였다.

1) 인장 및 충격시험

인장 시험은 상온(24℃) 및 고온(538℃)에서 실시하였으며 열화재와 회복재에 대해 각각 3개씩의 시험편을 제작·실험하였다. 충격시험용 시험편은 ASTM 규격에 명시된 기준시험편(full size standard V-notch test specimen)을 사용하였으며, upper-shelf 온도 영역에서 실험하였다. 열화재와 회복재에 대해 각각 100℃, 80℃에서 시험하였다.

2) 파괴인성 시험

파괴인성 시험편은 ASTM 규격의 시험편으로 제작하였다. 실험결과로부터 K_{IC} 값을 측정하였는데 K_{IC} 규격의 조건을 만족하지 못하는 경우 K_Q 값과 K_{max} 값을 결정하였다. K_{IC} 값은 K_Q 값과 K_{max} 값 사이에 존재한다. 시험편의 예비 노치의 길이비는 $a/W = 0.5$, 노치(notch) 선단 각도는 $30^\circ \sim 60^\circ$ 로 가공했으며, 열화재와 회복재에 대해 각각 4개씩의 시험편을 제작하여 상온(24℃) 및 고온(538℃)에서 실험하였다.

파괴인성 시험방법은 ASTM E399 실험 조건에 따랐으며 예비균열(a_f)은 2mm 정도를 내어 초기 균열길이($a_o = a_m + a_f$)는 14mm, 시편 길이에 대한 비는 0.6이 되도록 하였다.

초기 파괴균열을 낸 후에 균열 터널링(tunneling) 현상을 방지하기 위해 측면홈(side groove)을 가공한 다음 시험을 행하였다.

파괴인성 시험에 사용된 시험기는 서보유압식시험기(MTS)로서 3채널 가열 방식의 전기로(electricfurnace)를 갖추고 있어 실험 시 실험온도 $538^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 이내의 범위에서 4~5시간 정도 온도를 충분히 유지시킨 후, 부하속도 0.5mm/min로 실험을 실시하였다. 하중-하중선 변위의 기록을 위해 직류 전위차법(DCPD : Direct Current Potential Drop method)을 채택했다. 시편의 입·출력선으로는 스텐레스 선을 사용하였으며 시편에 용접으로 연결하였다. 입출력 단자의 위치는 ASTM 규격에 따랐다. 실험 시 10 Amp의 입력 전류를 시험편에 일정하게 흐르게 하였으며 출력선을 전압 측정기에 연결하고 이를 다시 SCR 기록계에 연결하여 하중-전압차의 관계를 얻었다. 이와 동시에 시험기로부터 x-y 기록계로 하중-변위 곡선을 그렸다

파괴인성 시험에서의 하중-변위 곡선을 부하된 하중과 클립 게이지의 변위 관계로 표시하고 각각에 대하여 초기 단계에서의 선형구역의 기울기보다 5% 낮은 기울기의 직선과 하중-변위 선도의 교점에서 하중치 P_Q 를 구한다. 응력확대 계수 K_Q 의 계산은 P_Q 로부터 구하였다.

이상에서 결정한 P_Q 와 시편의 최고 하중 P_{max} 와의 비가 식(6)을 만족하는 경우에는 식(2)의 계산에 P_Q 를 이용하여 계산한 K_Q 가 유효한 K_{IC} 값이 된다.

$$\frac{P_{\max}}{P_Q} < 1.1 \quad (2)$$

(2)식을 만족하지 않는 경우에는 유효한 K_{IC} 값을 얻을 수 없으므로, P_{\max} 로부터 K_{\max} 를 결정하였다.

4-3 실험 결과

1) 인장 및 충격시험 결과

인장 시험의 하중-변위 기록으로부터 공칭응력-공칭변형률 관계를 구한 후 다시 이로부터 진응력-진변형률의 관계를 구하였다. 표 3에 인장시험 결과를 나타내었다.

충격 시험 결과는 다음과 같다.

열화재 : 100℃에서 충격흡수에너지 = 22~22.3 J

회복재 : 80℃에서 충격흡수에너지 = 24.3 J

2) 파괴인성 시험 결과

파괴인성 시험 결과는 표 3에 나타내었다. 실험은 회복재와 열화재에 대해서 각각 상온(24℃)에서 2개 및 고온(538℃)에서 2개의 시편에 대해서 실시하여 그 결과들을 비교하였는데, 이 8개의 시편 전부에 대해서 K_Q 값을 통한 K_{IC} 의 추정이 성립하기 위한 관계가 만족하지 못했다. 따라서 표 3의 K_Q 값은 성립 조건을 만족하지 못했지만 P_Q 값을 통하여 계산해낸 값이고, K_{\max} 값은 P_{\max} 값을 이용하여 구해낸 값이다. 표 3은 이들 결과값들을 나타내고 있다.

4-4 파괴 인성 평가값과 측정값의 비교

제II장에 기술한 절차를 따라 실험 재료의 파괴인성값을 평가해 보았다.

회복재 24℃의 경우 계산에 의한 파괴인성값(50%, 즉 중간값)은 59.8이며 실측한 K_Q 값은 54.36~62.78이고, 열화재 24℃의 경우 계산값은 48.68, 실측한 K_Q 값은 42.11로 계산값의 예측도가 매우 좋았다.

고온에서는, 회복재의 경우 계산에 의한 파괴인성값은 60.98이며 실측한 K_Q 값은 34.4~44.0, 실측한 K_{\max} 값은 64.3~64.7이고, 열화재의 경우 계산에 의한 파괴인성값은 49.6, 실측한 K_Q 값은 26.0~36.4, K_{\max} 값은 50.1~52.8이었다. 즉, 계산된 값이 K_Q 값과 K_{\max} 값 사이에 존재하였으며, K_Q 값보다는 K_{\max} 값에 더 가까웠다. 유효한 K_{IC} 값은 K_Q 와 K_{\max} 사이에 존재하므로, 제II장에서 제안한 절차에 따라 K_{IC} 값을 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 석유화학 반응기 진단 및 수명평가 프로그램

제III장의 잔여수명 절차를 토대로 석유화학 반응기 안전성 진단 및 수명평가 프로그램을 개발하였다. 운영체제로는 MS Windows 95 및 MS Windows NT 3.5 이상에서 실행되도록 하였으며, 윈도우형 프로그램으로 구현하였다.

6. 결론

본 논문에서는 고온 고압 반응기에 거시 결함이 존재하는 경우에 사용안전성 및 잔여수명을 평가하는 방법을 연구하였다. 반응기 결함의 안전성 평가에는 재

료의 파괴인성값의 측정 또는 예측이 필수적인데, 파괴인성값은 반응기 사용 중에 템퍼취화 등으로 인해 크게 감소하게 되므로 이러한 파괴인성값의 감소에 대한 정확한 평가 절차를 제시하였다. 이 절차에 따라 예측한 파괴인성값의 정확도를 평가하기 위하여 고온에서 실제로 약 30년 사용된 Cr-Mo강을 대상으로 실측한 파괴인성값과 비교하여, 제시된 절차가 신뢰성이 있음을 보였다.

또한 제시된 잔여수명 계산절차 연구내용을 바탕으로, 현장에서 거시결함이 발견되었을 경우 그 결함의 성장유무를 판단하고 잔여수명까지 예측할 수 있는, 검사결과 해석용 PC 프로그램을 개발하였다.

본 연구내용을 국내 석유 화학 플랜트 현장 검사 시에 응용한다면, 화학 플랜트의 파손 사고로 인한 인명, 고가설비 손실, 생산중단 등에 의한 많은 경제적 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 이로 인한 환경오염도 방지할 수 있을 것이다.

표 1. 시험재의 사용이력

재질	1Cr-0.5Mo
설계압력 (MPa)	10.4
운전압력 (MPa)	10.4
설계온도 (°C)	530
운전온도 (°C)	510
운전시간 (hr)	180,000
설계응력 (MPa)	62

표 2. 시험재(1Cr-0.5Mo 강)의 화학조성 (wt %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
wt %	0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008	bal.

표 3. 시험재(1Cr-0.5Mo 강)의 25°C 와 538°C에서의 인장시험 결과

Material	Temp.(°C)	Young's modulus(GPa)	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	D	m
회복재	25	210	412.5	541.0	5.89E-18	5.86
열화재			282.0	494.5	2.54E-13	4.68
회복재	538	147	338.0	445.0	6.46E-25	8.62
열화재			258.8	308.0	4.95E-34	12.75

표 4. 25°C 와 538°C에서의 파괴인성 시험결과

Material	Specimen ID	Temp.(°C)	P _Q (kN)	P _{max} (kN)	P _{max} /P _Q	K _Q (MPa√m)	K _{max} (MPa√m)
회복재	BS4	24	7.10	9.80	1.38	54.36	75.02
	XBS5		8.20	10.30	1.26	62.78	78.86
열화재	BY3	24	5.50	8.65	1.57	42.11	66.22
	BY4		5.50	7.15	1.30	42.11	54.74
회복재	BS2	538	5.75	8.45	1.47	44.02	64.69
	BS3		4.50	8.40	1.87	34.45	64.31
열화재	BY1	538	4.75	6.90	1.45	36.37	52.83
	BY2		3.40	6.55	1.93	26.03	50.15

표 5. 평가한 파괴인성값, K_{IC} [MPa√m]

	회 복 재		열 화 재	
	24°C	538°C	24°C	538°C
99%	31.10	60.98	25.32	49.64
95%	36.68		29.86	
50%	59.80		48.68	

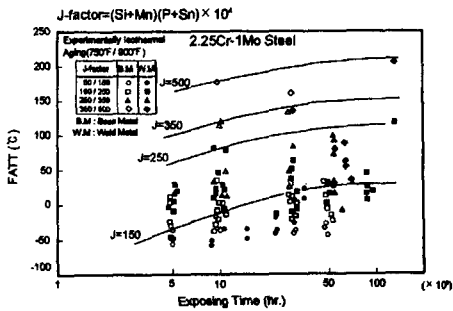


그림 1. 2.25Cr-1Mo 강의 FATT와 노출시간과의 관계

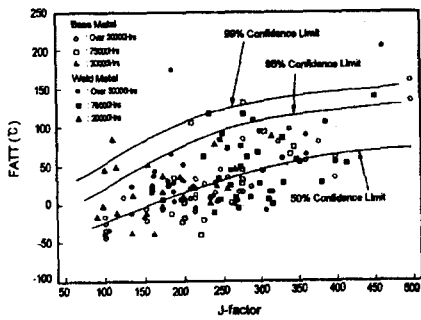


그림 2. 2.25Cr-1Mo 강의 FATT와 J-factor와의 관계

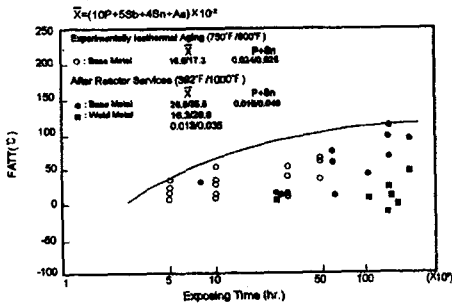


그림 3. 1.25Cr-0.5Mo 강의 FATT와 노출시간과의 관계

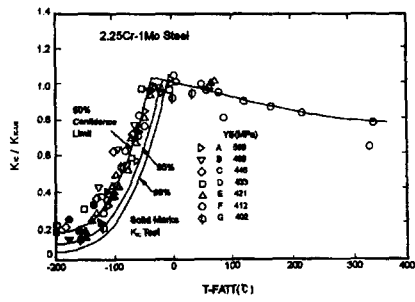
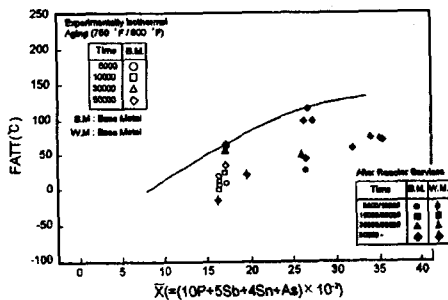


그림 5. 2.25Cr-1Mo 강의 K_{Ic}전이곡선을 예측하기 위한 마스터곡선

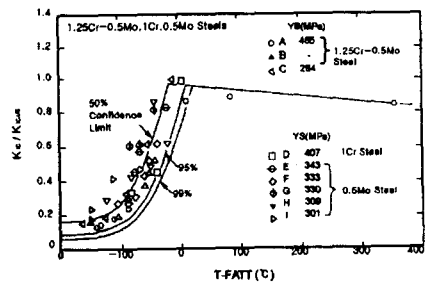


그림 6. 1.25Cr-0.5Mo 강의 K_{Ic}전이곡선을 예측하기 위한 마스터곡선

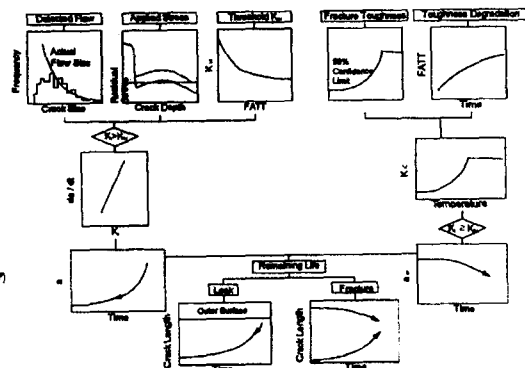


그림 7. 반응기의 잔여수명 예측절차

그림 4. 1.25Cr-0.5Mo 강의 FATT와 \bar{X} 와의 관계