

계장화 압입시험법을 이용한 보일러 설비의 고온 기계적 물성 측정과 수명 평가

노동성[†] · 홍정화 · 김광호 · 이정준^{*}

(주) 프론틱스 · *서울대학교 재료공학부
(2008. 7. 22. 접수 / 2009. 6. 8. 채택)

High-temperature Mechanical Properties Measurement and Life Assessment of Boiler Equipment by Instrumented Indentation Technique

Dongseong Ro[†] · Jeongwha Hong · Kwangho Kim · Jung-Jun Lee^{*}

Frontics

*School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

(Received July 22, 2008 / Accepted June 8, 2009)

Abstract : Recently power plants and oil refineries are focusing on capacity enlargement for better efficiency through higher temperature and higher pressure. Thickness of boiler tubes becomes lessened due to oxidation and erosion caused by high temperature burns gas flowing over tubes outside. Accordingly, mechanical stress of tubes is increasing and that is a critical factor to make a crack and fracture. To prevent those sorts of accidents, aging assessment for proper periodic repair and replacement should be conducted reliably and reasonably. We performed IIT test on Cr-Mo steel, one of the most heat-resistant materials for facilities in power plants, and we report the test result and the considerable effectiveness of IIT test.

Key Words : instrumented indentation technique, IIT(instrumented indentation technique), degradation, Cr-Mo steel

1. 서론

석유화학 플랜트나 화력발전소의 증기 파이프 등의 설비는 고온, 고압에서 장시간에 걸쳐 가동할 수 있도록 설계된다. 이들은 가동 환경의 특성상 부식 등에 의한 두께 감소나, 용접 및 후열처리 공정에 의해 발생하는 균열, 설비 운용 중의 크리프, 피로와 같은 미세 손상의 축적에 따라 균열의 발생 및 전파, 재질의 열화와 같은 손상을 입게 된다. 두께 감소나 균열은 육안검사나 초음파 시험 등을 통하여 정량적으로 확인할 수 있다. 하지만, 현장에서 소재의 항복 및 인장강도 등의 기계적 특성을 비파괴적으로 측정하는 것은 기존의 시험방법으로는 불가능한 실정이다. 이러한 한계로 인하여 레프리카, 전기저항 시험, 전기 화학적 분석 시험과 데이터베이스를 통하여 물성 변화를 추정하고 있다. 그러나 이러한 방법은 경험적인 평가에 의존한다

는 단점이 있으며, 결과 값의 추정으로 인한 오차가 크게 발생하고 있다. 따라서 비파괴적으로 기계적 물성을 측정하고 이로부터 열화를 정량화 하는 기법의 개발이 시급하다. 이러한 요구에 따라 현장에서 평가할 수 있는 방법으로 최근 압입 하중-깊이 곡선을 이용하여 재료 물성 및 잔류응력, 파괴인성을 얻을 수 있는 계장화 압입 시험법(Instrumented indentation test)이 부각되고 있다.

계장화 압입 시험법은 현장에서 직접적인 평가가 가능하게 되어, 발생 결함의 사용 적합성 평가에 필요한 평가 시점의 현장 물성을 제시할 수 있게 되었다. 또한, 역학적 안정성 해석에 기초 자료를 제공할 수 있게 되어 규격과 직접적인 비교를 통해 만족 여부를 현장에서 판단할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 계장화 압입 시험을 이용하여 보일러 설비에 사용되고 있는 소재의 인장물성을 바탕으로 고온 구조 재료의 잔여수명을 예측할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
dsro@frontics.com

2. 적용기술

2.1. 계장화 압입 시험법

계장화 압입시험은 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입 깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 얻고, 이를 분석하여 대상 재료의 기계적 특성을 평가하는 기법이다. 기존의 경도시험과 유사하지만 직접 압흔의 크기를 측정하지 않는다는 차이점과 기존의 경도값 외에 탄성계수, 유동특성¹⁾, 파괴인성²⁾ 그리고 잔류응력⁴⁾ 등 다양한 재료 고유의 물성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 최대 수백 마이크로미터 이내의 미세 영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화 양상을 평가할 수 있고, 시험 위치에는 미세한 흔적만 남기기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 시험을 위한 표준 시편 채취가 필요 없어 운용중이거나 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

2.2. 이론

계장화 압입시험은 구형압입자를 이용하여 진행하게 되며 이 때 재료는 압입하중이 증가함에 따라 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며, 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다.

구형압입자는 압입깊이에 따라 재료의 변형이 증가하게 되는데 이를 통하여 압입 하중-변위 곡선으로부터 일축인장시험에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 구형압입자를 이용한 시험에서는 탄성, 탄/소성, 완전소성의 세 단계에서 평균접촉압력과 유동응력 사이의 관계를 소성구속인자 Ψ 를 통하여 식 (1)과 같이 결정할 수 있다.

$$\sigma = \frac{1}{\Psi} P_m = \frac{1}{\Psi} \frac{L_{max}}{\pi a_c^2} \quad (1)$$

여기서, L_{max} 는 압입하중, a_c 는 압입자와 재료간의 실제접촉반경을 의미한다.

이를 통하여 압입변형률은 기하학적 관계로 구해진 압입깊이 방향의 변위를 미분하여 평가한 변형률 개념으로부터 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{a}{\sqrt{1-(a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R} = \alpha \tan \gamma \quad (2)$$

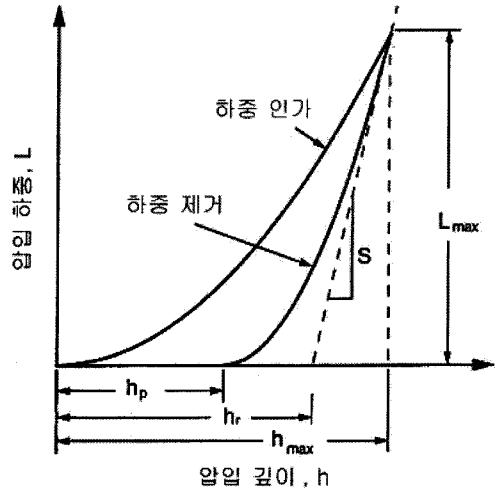


Fig. 1. Indentation load–depth curve.

계장화 압입시험시 접촉깊이 및 접촉반경은 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것이며, 이에 추가적으로 압입자 주위에 발생 가능한 탄성급힘 및 pile-up현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉깊이가 결정된다.

Fig. 1은 계장화 압입시험을 통하여 얻어지는 곡선을 묘사한 것이다. 실제 접촉깊이를 결정하기 위해서는 우선 하중제거 곡선을 멱함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 강성(stiffness)인 S 를 평가한다.

$$S = \left(\frac{dL}{dh} \right) = Bm(h_{max} - hf)^{m-1} \quad (3)$$

여기서 B 와 m 은 재료 상수이다.

또한, stiffness S 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Er\sqrt{A} \quad (4)$$

여기서 Er 은 환산탄성계수이며, A 는 최대하중에서의 압입자와 재료의 접촉면적이다. 접촉면적은 최대하중에서의 압입깊이를 압입자의 기하학적인 관계를 사용하여 구하게 된다.

탄성 급힘을 반영한 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 식 (5)를 통해 보정할 수 있다.

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{L_{max}}{S} \quad (5)$$

여기서 h_{max} 는 시험 계획상 압입깊이, ω 는 압입자의 기하학적 형상이 주는 영향을 보정한 상수이며, 구형압입자의 경우 ω 는 0.75가 된다.

Fig. 2는 실제 계장화 압입시험이 진행될 경우, 압입자 주변에 나타나는 기하학적 형상을 묘사한 것이다. 식 (5)에서 평가된 접촉깊이와 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a^* 를 평가할 수 있다. 그러나 압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화 및 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 재료가 pile-up 또는 sink-in 현상이 발생한다. 이러한 현상은 식 (6)을 통해 보정할 수 있다¹⁾.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_c^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (6)$$

여기서, n 은 가공경화지수, a 는 실제 접촉반경, a^* 는 하중제거 곡선의 분석을 통해 구해진 h_c^* 로부터 평가된 접촉반경, R 은 압입자 반경을 의미한다. 이러한 과정을 Fig. 2에 묘사하였다.

식 (4), (5), (6)을 통하여 얻어진 실제 접촉반경을 식 (1), (2)에 적용하여 진변형률, 진응력 값을 얻을 수 있다. 이 값은 재료의 변형 속성을 나타내는 식 (7)과 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 재료의 전체 변형속성 및 유동물성을 측정할 수 있다.

$$\sigma = Ke^n \quad (7)$$

여기서 K 는 응력계수, n 은 가공경화지수이다.

3. 실험 방법

3.1. 열화 실험 방법

본 연구에서는 보일러 튜브 재료로 사용되는

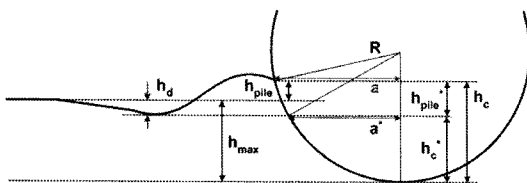


Fig. 2. Indentation morphology by spherical indenter at maximum load.

Table 1. Chemical compositions of X20CrMoV12.1 and SA213 T23

Steel Grade	X20CrMoV12.1	SA213 T23
C	0.2	0.06
Si	0.3	0.2
Mn	0.3	0.45
Cr	11.2	2.25
Mo	1.0	0.1
Ni	0.5	-
V	0.3	0.25
Nb	-	0.05
W	-	1.6

X20CrMoV12.1과 SA213 T23이며, 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 인장 시험과 계장화 압입시험의 비교를 위한 열화를 위한 온도조건은 650℃에서 900℃까지, 열화 시간은 1~1,000시간까지 단계별로 열화실험을 수행하였다.

계장화 압입시험을 이용한 소재의 수명평가를 위해 튜브재료의 실제 사용온도와 오스테나이트상 변태가 일어나지 않는 온도조건을 고려하여 600, 650℃에서 1시간에서 2,000시간까지 6단계로 구분하여 열화실험을 수행하였다. 열화정도를 나타내기 위해 Larson-Miller parameter를 사용하였고^{6,9)}, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$LMP = (T + 273)(\log t + C) \quad (8)$$

여기서, T 는 실험온도(℃), t 는 열화시간(hour), C 는 재료에 따른 상수값으로 Cr-Mo강의 경우 20~25 정도의 값이 일반적으로 사용되며, 본 연구에서는 20을 사용하였다¹³⁾.

3.2. 인장 실험 방법

소재의 물성평가를 위해 상용인장 시험기인 Instron 5584를 사용하여 인장실험을 수행하였다. KS B0802, ASTM A370 규격에 따라 시편 제작 및 시험을 실시하였다.

현장 적용 평가를 위해 상용인장 시험기와 함께 계장화 압입시험기를 통한 시험을 함께 진행하였다. 시험 장비는 Frontics사의 AIS3000을 이용하였으며, KS B0950의 규격에 의거하여 압입인장물성을 측정하였다. 시험은 반경 0.25mm 구형압입자를 이용하여 15회 다중 압입실험을 하였으며, 최대압입깊이는 150μm, 하중제거율 50%, 압입속도 0.3mm/min로 실시하였다.

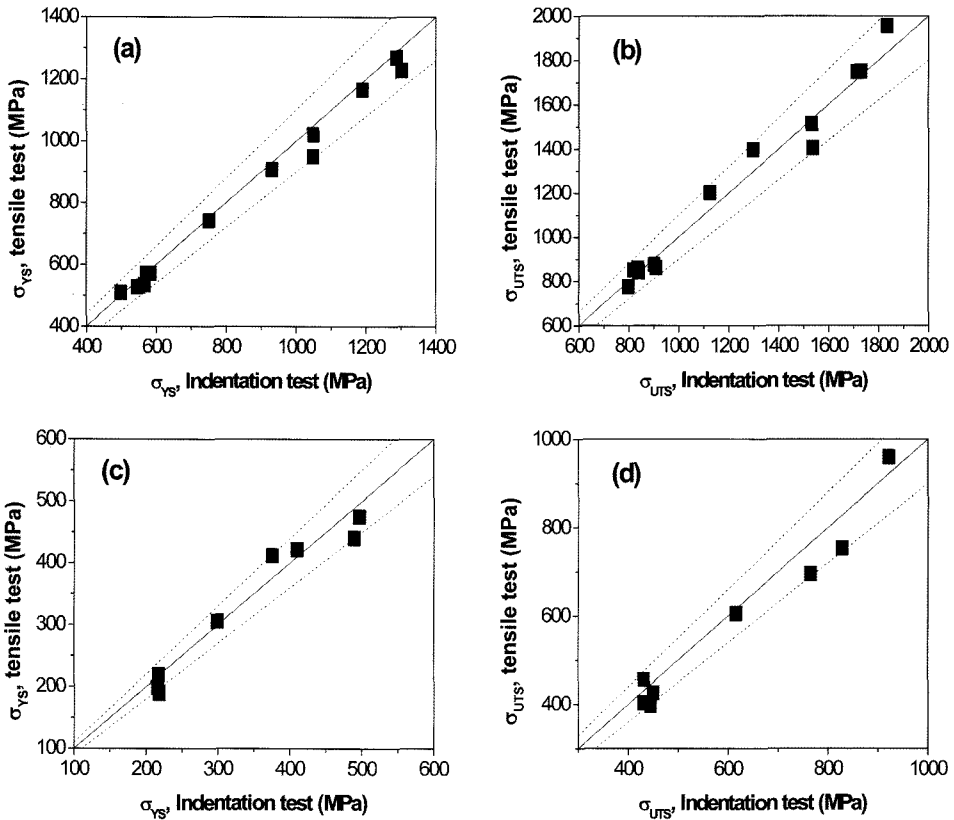


Fig. 3. Comparisons of tensile test and indentation test (a) yield strength of X20CrMoV12.1, (b) tensile strength of X20CrMoV12.1, (c) yield strength of SA213 T23, (d) tensile strength of SA213 T23.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 일축인장 및 계장화 압입시험 결과

Fig. 3은 일축인장 및 계장화 압입시험으로부터 평가한 항복강도와 인장강도를 비교한 것이다. X20CrMoV12.1과 SA213 T23 소재 모두 오차범위 10% 이내에서 두 기계적 물성이 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 일축인장시험을 통해 얻어진 인장물성과 계장화 압입시험을 통해 평가된 압입 인장물성이 매우 높은 일치성을 보인다는 선행연구와 잘 부합되는 결과로서¹⁰⁾, 고온 구조 재료의 잔여수명을 평가하는데 압입인장물성이 일축인장물성과 함께 사용될 수 있음을 의미한다.

이는 계장화 압입시험법이 일축 인장시험법을 대체한다는 의미가 아니라, 파괴시험이 불가능한 크기나 가동 중인 설비에서 일축인장 시험 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있다는 점을 의미한다. 즉, 기존에 수행하지 못하였던 현장에서 물성 평가가 가능하다는 점을 확인한 것으로 이러한 특성을 이용

하여 시험 대상물에 대한 잔여수명 평가를 수행한 것은 다음과 같다.

4.2. 열화 항복 강도를 이용한 잔여수명평가

Fig. 4에서는 X20CrMoV12.1과 SA213 T23 소재의 열화 항복강도 감소양상을 표현한 수명곡선을 나타내었다. 650°C의 결과를 살펴보면, 두 소재 모두 항복강도 값이 초기단계에서는 일정한 값을 유지하다가 Larson-Miller parameter 값이 21000 이상으로 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 보일러 설비의 수명은 고온에서 장시간 노출에 따른 재료의 물성저하 현상으로 인해 단축되며, 원래 설계 시에 안전하던 응력 수준에서도 열화가 발생한 경우에는 항복강도의 저하현상 때문에 소성변형이 일어날 위험성이 있다. 일반적으로 구조물에 재료의 항복강도 이상의 응력이 작용하면 안정성에 문제가 있다고 간주하며, 이는 곧 구조물의 소성변형 및 붕괴로 이어진다¹¹⁾. 이러한 소성 붕괴에 대한 저항(Lr, load ratio)은 다음의 식과 같이 정의하여 나타낼 수 있다¹²⁾.

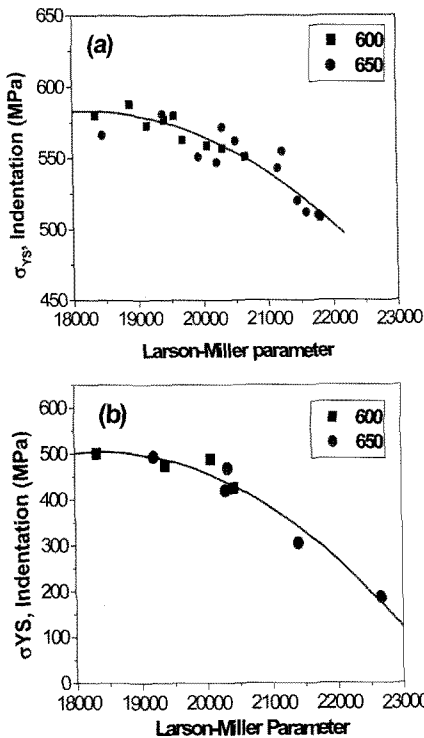


Fig. 4. Master curve to predict the degradation of yield strength for (a) X20CrMoV12.1, (b) SA213 T23.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \quad (9)$$

여기서, σ_{ref} 는 작용응력, σ_Y 는 항복강도이며, 구조물에 작용하는 응력이 커지면 L_r 값이 증가하고, 작용응력이 σ_Y 에 이르게 되면 구조물에 소성붕괴가 일어난다. 이러한 항복강도는 소성 변형에 대한 저항성을 나타내는 물성이기에 고온 구조재료의 잔여 수명을 평가하는데 이를 적용하였다.

본 연구에서는 손상기준(failure criterion)을 적용하여 가상의 손상이 일어나는 시점을 정의하였다. 손상기준은 두 소재가 생산될 때 적용되는 10만 시간 이상의 크리프 강도를 만족하는 국제표준의 인장요구 규격으로서 Table 2에 나타내었다^{13,14)}. 이 표준 인장 요구 규격의 실제 손상 기준으로서의 적

Table 2. Requirements for tensile strength in previous standard code

Grade	Standard	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ (%)
X20CrMoV12.1	DIN: 17175-79	490	690	23
SA213 T23	ASME B&PV Code: SA-213	400	510	20

용적합성을 평가하기 위해 손상 평가의 기준으로 사용되는, 소성붕괴가 일어나는 한계점인 $L_{r,max}$ 를 도입하였다.

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_{flow}}{\sigma_Y} = \frac{(\sigma_Y + \sigma_U)/2}{\sigma_Y} \quad (10)$$

여기서, σ_Y 는 항복강도, σ_U 는 인장강도이다. 위 식에 두 소재를 대입하여 X20CrMoV12.1의 $L_{r,max}$ 은 1.2040, SA213 T23의 $L_{r,max}$ 은 1.1375의 값을 얻었다. X20CrMoV12.1이 SA213 T23보다 더 높고, 기준값과의 차이가 매우 작게 나타나 X20CrMoV12.1의 경우, 손상기준으로 표준 인장 요구 규격을 그대로 적용하기 위험하기에 SA213 T23과 동일 수준으로 변화시켜 주기 위해 항복강도 값을 변화시켜 표준 인장규격의 1.1배의 항복강도값을 구할 수 있었고, 이때 $L_{r,max}$ 값은 1.14000으로 SA213 T23의 1.1375와 동일 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 두 소재의 잔여수명을 평가하기 위해 X20CrMoV12.1은 1.1배, SA213 T23은 1.0배의 표준 인장요구 규격의 항복강도값을 손상기준으로 사용할 수 있다.

표준 인장요구 규격의 항복강도값을 손상기준으로 적용하여 X20CrMoV12.1은 360,604, SA213 T23은 372,156시간의 잔여수명을 평가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 계장화 압입시험법을 통하여 보일러 설비에 사용되는 X20CrMoV12.1과 SA213 T23 소재의 고온 기계적 물성과 Larson-Miller parameter를 이용하여 그 수명 평가를 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) X20CrMoV12.1, SA213 T23 소재 모두 일축인장 및 계장화 압입시험으로부터 평가한 항복강도와 인장강도가 오차범위 10% 이내에서 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이는 고온 구조 재료의 잔여수명을 평가하는데 압입인장물성이 일축인장물성과 함께 사용될 수 있음을 확인하였다.
- 2) X20CrMoV12.1, SA213 T23 소재 모두 Larson-Miller parameter값이 증가함에 따라 항복강도와 인장강도값이 감소하는 양상을 보였다.
- 3) 열화 항복강도의 감소양상을 표현한 수명곡선에 국제표준의 인장 요구 규격을 적용하여 두 소재의 잔여수명을 평가하였다. 그 결과, X20CrMoV

12.1은 390,604, SA213 T23소재는 372,156시간의 잔여수명을 평가할 수 있었다.

4) 1)과 2), 3)의 결론을 토대로 기존의 일축 인장 시험을 통한 파괴적인 평가에서 계장화 압입 시험법의 도입으로 가동 중인 현장 설비에 비파괴적인 방법으로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007- M-CC23-P-05-1-000).

참고문헌

- 1) J.-H. Ahn and D. Kwon, “Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentation: Examination of Strain Definition and Pileup Effect”, *Journal of Materials Research* Vol. 16 pp. 3170~3178, 2001.
- 2) Jung-Suk Lee, Jae-il Jang, Baik-Woo Lee, Yeol Choi, Seung Gun Lee and Dongil Kwon, “An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics”, *Acta Materialia* Vol. 54, pp. 1101~1109, February, 2006.
- 3) 백운봉, 이해무, 박종서, 윤기봉, “고온용 압력용기의 크리프 균열성장 잔여수명평가 사례 연구”, *산업안전학회지*, 제16권, 제3호, pp. 26~30, 2001.
- 4) Suresh, S. and Giannakopoulos, A.E., “A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation”, *Acta Materialia*, Vol. 46, Issue 16, pp. 5755~5767, 9 October, 1998.
- 5) 권양미, 마영화, 조성욱, 윤기봉, “고온배관 T-부의 응력해석 및 잔여수명평가”, *산업안전학회지*, 제20권, 제3호, pp. 34~41, 2005.
- 6) F.R. Larson and J. Miller, *Trans. ASME*, 74, 765, 1952.
- 7) Y. Zhou, B. Devarajan, K.L. Murty, “Short-term rupture studies of Zircaloy-4 and Nb-modified Zircaloy-4 tubing using closed-end internal pressurization”, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 228, Issues 1-3, pp. 3~13, March 2004.
- 8) P. Chellapandi, R. Srinivasan, S.C. Chetal, B. Raj, “Experimental creep life assessment of tubular structures with geometrical imperfections in welds with reference to fast reactor plant life”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 83, Issue 7, pp. 556~564, July 2006.
- 9) R. Viswanathan, *Damage Mechanism and Life Assessment of High Temperature Components*, ASM International, Metals Park, Ohio, 1989.
- 10) 안정훈, 최열, 권동일, “압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가”, *대한금속재료학회지*, 제38권, 제12호, pp. 1606~1611, 2000.
- 11) G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy: SI Metric Edition*, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
- 12) T.L. Anderson, *Fracture Mechanics: Second Edition*, CRC Press, Florida, 1995.
- 13) DIN 17175-79, *Seamless Steel Tubes for Elevated Temperatures*, 1979.
- 14) ASME B&PV Part A, *Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater and Heat-Exchanger Tubes*, 2004.