

연속압입 시험기법을 이용한 석유화학설비 경년손상의 새로운 평가변수 고찰

장재일* · 최 열* · 손동일* · 이윤희** · 권동일** · 김정태***
(2001년 8월 21일 접수, 2002년 2월 26일 심사완료)

Determination of New Parameter for Materials Degradation Using Continuous Indentation Testing Technique

Jae-il Jang, Yeol Choi, Dongil Son, Yun-Hee Lee, Dongil Kwon
and Jeoung Taë Kim

Key Words: Continuous Indentation Test(연속압입시험), Nondestructive Evaluation(비파괴적 평가), Time-Dependent Degradation(경년열화), Work Hardening Exponent(가공경화지수), Yield Ratio(항복비), Cr-Ni Steel(Cr-Ni 강), Cr-Mo Steel(Cr-Mo 강)

Abstract

Newly developed continuous indentation technique has made nondestructive assessment of tensile properties possible. The present study was undertaken to determine new parameters for indicating time-dependent material degradation of petro-chemical plant. Continuous indentation tests were performed for Cr-Ni steel and Cr-Mo steel which are widely used as facilities of petro-chemical plant. From the results, it was found that yield strength and tensile strength cannot be used as general degradation parameters because the changes in the strengths with aging time didn't show any tendency. On the other hand, work hardening exponent and yield ratio showed consistent tendency with increasing aging time. Therefore, main attention of this work was paid on them as new degradation parameters, and the in-field applicability of the parameters was evaluated and discussed.

1. 서론

우리나라의 주요 기간산업중 하나인 석유화학 산업은 72년 울산 석유화학단지를 필두로, 79년의 여천 제 2 석유화학단지 건설, 91년 하반기 대산 제 3석유화학단지가 가동됨에 따라 그 규모면에서 세계수준으로 성장하였다. 이후 10년이 지난

현시점에서 플랜트 설비의 상당부분이 표준적인 설계허용시간인 10만 시간을 넘어섬으로써 노화 설비에 대한 폐기, 보수 또는 교체를 결정할 시기에 도달하였다. 국내를 포함해 세계 각국의 많은 고온 플랜트의 운용자들은 자신들의 설비에 대하여 경제적 관점에서 설계수명을 넘어선 장시간 운전을 희망하고 있는데, 이 경우 가능한 한 정량적인 열화도 평가와 이를 바탕으로 한 수명예측을 통하여 보수 및 교체 시기를 결정하여야 한다.

플랜트 설비가 고온 고압에서 장시간 운용되는 과정에서 발생할 수 있는 손상형태는 크게 두께감소(감육), 균열형 손상과 재질 열화의 세가지로 구분할 수 있다. 두께감소는 부식과 마모에 의해 발생하며, 균열형 손상은 용접부의 저온균열, 후열치리에 의한 SR균열 등 설비 제작시에 발생하는 균열과 크리프, 피로 등 미세손상의 축적에

† 책임저자, 회원, (주)프론틱스 부설연구소
E-mail : jijang@frontics.com
TEL : (02)884-8025 FAX : (02)875-8018

* (주)프론틱스 부설연구소

** 회원, 서울대학교 재료공학부

*** 두산중공업 기술연구원

기인하여 운용중 발생하는 균열을 포함한 전반적인 균열 현상을 의미한다. 마지막으로 재질 열화는 고온 환경하에서 원자들의 확산이 쉽게 이루어지는데 기인한 미세조직의 변화에 따라 발생하는데, (1) 석출물 및 전위조직의 변화에 따른 연화 또는 경화, (2) 입계 편석 및 취성 상의 석출 등에 의한 취화(뜨임 취화, 열시효 취화, 탄화물 유기 취화 등), (3) 고온 산화 및 부식, (4) 크리프 손상, (5) 피로균열 발생 등의 결과로 나타나게 된다. 이 재질열화는 사용설비의 수명을 단축시킬 뿐 아니라 균열 거동에도 심각한 영향을 미쳐 안전성 평가기준을 모호하게 만드는데 그 영향에 관한 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

이 손상들을 파악하기 위한 비파괴 시험법으로서, 우선 두께감소는 육안검사를 통해 쉽게 발생 여부를 판별할 수 있을 뿐 아니라 초음파 시험에 의해 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 또, 균열형 손상의 경우는 육안검사, 초음파 시험, 방사선 시험, 자분 탐상 시험, 와전류 시험, 음향방출 시험 등을 통해서 발생 유무 및 정량적인 균열 크기를 평가할 수 있고, 최근에 응용범위를 확대하고 있는 TOFD (time of flight diffraction) 시험법⁽¹⁾을 비롯해 다양한 초음파 시험법의 기술혁신이 이루어지고 있어 균열형 손상에 대한 비파괴 검사의 정밀도는 현장요구를 충족시킬 수 있을 것으로 예상된다. 반면, 재질열화의 경우는 소재의 인장강도, 파괴인성, 크리프 강도, 피로 특성 등 다양한 기계적 물성의 변화를 안전성 평가 및 수명예측에 반영함을 목표로 하고 있으나 이러한 물성들을 비파괴적으로 현장에서 평가하기에는 많은 어려움이 있으므로 현재까지는 (1) 레플리카 분석, 전기저항 시험, 초음파 시험, 전기화학적 분석 시험 등 미세조직 변화를 관찰함으로써 기존 D/B와 비교, 물성치 변화를 추정하여 수명을 예측하는 방법과 (2) 경도 시험을 통해 현장에서 경험적인 물성치를 평가하는 방법을 사용해 왔다. 하지만 미세조직 변화를 통한 재질열화도 평가의 경우, 지나치게 경험에 의존함으로써 기존 D/B의 구축을 반드시 필요로 하고 경도 시험은 실험 오차범위가 매우 크게 나타날 수 있다는 단점이 있어 두 경우 모두 결과의 부정확성이 가장 큰 문제로 지적되고 있다.

이러한 한계를 극복하고 재질 열화를 현장에서 평가할 수 있는 방법으로서 최근에는 압입 하중-깊이 곡선을 분석함으로써 진응력-진변형률 유동

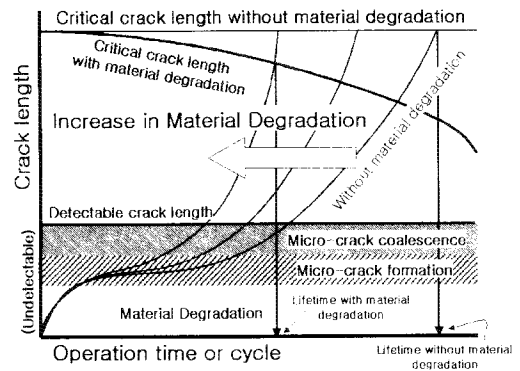


Fig. 1 Schematic illustration of the influence of material degradation on safety performance

곡선을 비롯, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수 등의 인장물성을 얻는 연속 압입 시험법 (continuous indentation test)^(2~5)이 부각되고 있다. 연속압입 시험법이 개발됨에 따라 현장에서 강도 물성의 직접적인 평가가 가능하게 되어, 발생 결함의 사용적합성 평가에 필요한 평가시점의 현장 물성을 제시할 수 있게 되었을 뿐 아니라 각종 역학적 안전성 해석에 기초 자료를 제공할 수 있게 되었고, 재료 규격과의 비교를 통해 물성 요구치의 만족 여부 판단이 현장에서 가능하게 되었다. 하지만 아직까지도 정량적인 경년열화 평가 및 수명예측에 대하여 연속압입 시험을 적용하는 방법에 대해서는 구체적인 방안이 정립되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 연속압입시험을 활용하여 현장에서 측정할 수 있는 다양한 인장 물성을 바탕으로 재료의 경년열화를 대변할 수 있는 새로운 변수를 도출하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 연속압입시험을 이용한 강도 물성 평가

구형 압입자를 이용하고, 압입하중 인가 및 제거를 반복하는 다중 압입 방식을 사용하는 연속 압입시험시에는 압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하는데, 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역의 세 단계로 전이됨이 보고되었다.⁽⁶⁾ 따라서 연속압

입시험으로부터 일축인장시의 유동특성을 평가하기 위해서는 압입시험 결과분석을 통한 유동응력과 압입 변형률의 유도가 필요하다. 구형 압입시에는 탄성, 탄/소성, 완전소성의 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력 사이의 관계를 소성구속인자 ψ 를 통하여 식 (1)과 같이 결정할 수 있다. 따라서 유동응력은 압입시험을 통하여 얻어진 평균 접촉 압력과 소성구속인자 ψ 를 이용하여 식 (1)과 같이 평가하고, 압입변형률은 기하학적 관계로 구해진 압입깊이 방향의 변위를 미분하여 평가한 변형률 개념으로부터 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2)$$

ψ 는 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자이고 R은 압입자 반경, a는 접촉반경, α 는 상수이다.

연속 압입시험 시, 구형 압입자/시편 간의 접촉깊이 및 접촉반경은 Fig. 2에 나타나 있는 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것이며, 이에 추가적으로 압입자 주위에 발생가능한 탄성굽힘 및 재료 축적(pile-up) 현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉깊이가 결정된다. 우선 하중제거 곡선을 멱함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 강성(stiffness)인 S를 평가한다.

따라서 탄성 굽힘을 반영한 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다.⁽⁷⁾

그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 ω 라는 압입자 형태상수로 보정한 식 (3)이 제시되었다.⁽⁸⁾

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{L}{S} \quad (3)$$

구형압입자의 경우 ω 는 0.75가 된다.

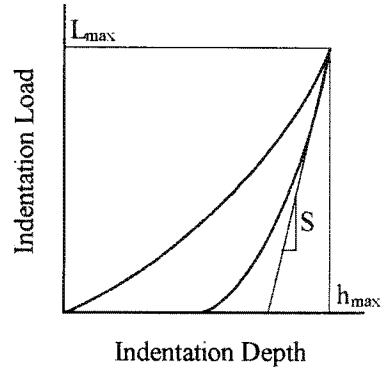


Fig. 2 Schematic illustration showing the parameters for analyzing indentation load-depth curve

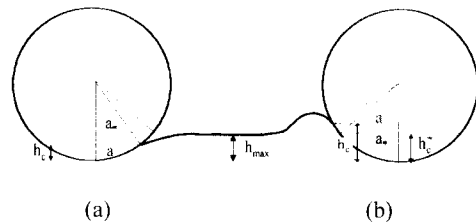


Fig. 3 The schematic diagram of indentation (a) sink-in and (b) pile-up phenomena

따라서 평가된 접촉깊이와 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a^* 를 평가할 수 있다.

그러나, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변의 탄성, 소성 변형양상에 의해서 측정된 압입깊이와 달라지게 되므로 이를 고려하여야 한다. 즉, 압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화 및 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 Fig. 3과 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 재료 축적(pile-up) 또는 압입자 하부로 밀려들어가는 함몰(sink-in) 현상이 발생한다.⁽⁹⁾

따라서, 이를 고려할 때, 수정된 접촉반경을 아래의 식 (4)와 같이 구해야 더욱 정확한 시험결과치를 얻을 수 있다.

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

이 때, n은 가공경화지수, a는 실제 접촉반경, a^* 는 하중제거 곡선의 분석을 통하여 구해진 h_c^* 로

Table 1 Chemical compositions of the materials used in lab-scale tests (Bal.: Balance of the composition)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
Cr-Ni steel	0.39	1.68	1.24	0.012	0.011	24.6	-	19.81	-	Bal.
Cr-Mo steel	0.14	0.22	0.49	0.007	0.003	2.24	0.98	-	0.02	Bal.

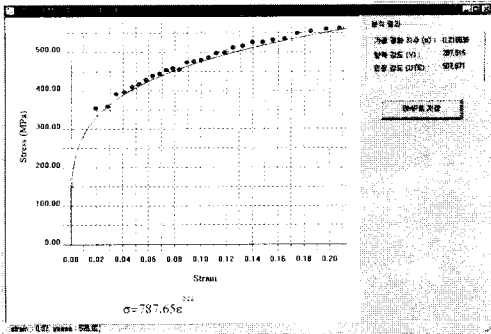


Fig. 4 An example of flow curve derivation from indentation load-depth curve

부터 평가된 접촉반경을 의미한다. 최종적으로 평가된 실제 접촉반경을 식 (1), (2)에 대입하여 각각의 하중제거 곡선에서의 유동응력 및 압입 변형률을 유도할 수 있다. 그리고 이를 식 (5)와 같은 Hollomon 식에 따라 적합화(fitting)하여 유동 곡선을 유도하고, 연속체 이론을 사용하여 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 최종적으로 구할 수 있게 된다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (5)$$

여기서 σ 와 ϵ 는 응력 및 변형률이며, n 과 K 는 재료상수인 가공경화지수와 응력계수이다.

2.2 시험편 준비 및 실험 조건

실험은 두 단계로 나누어 수행하였다. 먼저 고온에서 장시간 사용시 서로 다른 강도변화 양상을 나타낸다고 알려진 유화설비용 내열강 두 가지에 대하여 실험실적으로 연속압입시험을 수행하여 인장물성의 변화양상을 관찰한 후, 재질 열화를 대표할 수 있는 새로운 변수를 결정하였다. 다음 단계로 운용중인 현장설비에 연속압입시험 시스템을 직접 부착하여 다양한 열화제에 대하여 현장 물성을 평가함으로써 선결정된 변수가 재질 열화를 잘 반영하는 지를 검증하였다.

실험실적으로 재질 열화 변수를 결정하기 위해 사용된 재료는 석유화학 플랜트에 사용되는 대표적인 내열강인 Cr-Ni 강과 Cr-Mo 강으로서, 실험실적 연구결과를 도출하기보다는 석유화학플랜트 현장에서 적용할 수 있는 열화도 평가 변수를 결정하고자 현장 중심적 관점에서 수행한 본 연구의 취지를 최대한 반영하기 위해 5만에서 7만 시간까지 실제 운용온도에서 장시간 시효된 시험편을 이용하여 실험을 수행하였다. 석유화학 플랜트의 리포머 튜브로 사용되는 Cr-Ni 강 (HK-40 강)은 실제 운용조건인 1173K에서 장시간 사용된 현장설비에서 직접 채취한 시험편을 사용하였고, 수소화 반응기 장치에 사용되는 Cr-Mo 강 (2.25Cr-1Mo강)의 경우는 사용온도 범위인 643K에서 723K 중 가장 높은 온도로서 가혹한 설계 조건인 723K에서 실험실적으로 전기로내에서 장시간 등온시효한 시험편을 사용하였다.

비록 실제 사용 부재에서 채취한 Cr-Ni 강의 경우 저응력이 가해진 응력시효 시험편인데 반해 실험실적으로 장시간 열처리한 Cr-Mo 강의 경우는 응력이 가해지지 않은 단순시효 시험편이라는 시효조건 차이가 있지만, 응력의 존재에 따른 공동(cavity)의 발생과 성장, 또는 아결정립(subgrain)의 생성 등은 강도변화 및 취화의 관점에서 볼 때, 전위 및 탄화물 효과에 따른 기본적인 열화를 일정 시간 이상의 범위에서 가속화하는 역할을 할 뿐이라고 보고되고 있고,^(10,11) Cr-Mo 강의 경우 Cr-Ni 강과는 달리 공동의 발생이 용이하지 않은 재료이므로 응력부하시에도 얻어지는 인장물성의 차이는 크지 않을 것이라 판단하였다. 실제로 본 실험에 앞서 미세조직적 관찰을 수행한 결과, Cr-Ni 강의 7만 시간 사용제는 재료내부에 발생한 공동(cavity) 분율이 1.0%에 달해 사용이 불가능해진 재료인데 반하여, Cr-Mo 강의 경우는 동 재료의 뜨임구간에 해당하는 723K에서 5만 시간까지 장시간 등온 열처리하였음에도 극심한 미세조직적 열화는 관찰되지 않았다. 사용된 두 강

의 화학조성은 Table 1과 같다.

준비된 시험편에 대하여는 예비실험으로서 1kg 하중으로 마이크로 비커스 시험을 실시하여 경도 변화 경향을 판단하였고, 본 실험으로서 상온에서 연속압입 시험을 수행하여 인장물성 변화를 평가하였다. 실험에 사용된 연속압입시스템은 본 저자중 일부가 소속된 Frontics 사의 AIS (Advanced Indentation System) 2000 모델로, 앞 절에서 소개한 압입자 주변의 소재 축적 및 함몰 (pile-up/sink-in) 거동이 고려된 시스템이다. 시험의 결과로는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 진응력-진변형률 유통곡선, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수 등을 별도의 물성자료 입력없이 시험 즉시 얻을 수 있다.⁽⁵⁾ 이때 얻어지는 항복강도와 인장강도는 공작응력이 아닌 진응력에 기준한 값이다. 시험은 최대변위 150 μm 까지 압입하게 되는 변위제어로 진행하였고, 압입속도는 0.3 mm/min, 15회 다중압입을 수행하도록 설정하였다. 현장실험의 경우에도 동일한 시험조건으로 상온에서 연속압입 시험을 수행하였다. 고온이 아닌 상온에서만 평가를 수행한 이유는 본 연구결과의 현장 적용을 가정할 때, 실제 현장에서 고온인장물성을 평가하기에는 현장조건상 어려움이 있으므로 실용화 측면에서 한계를 가지기 때문이다.

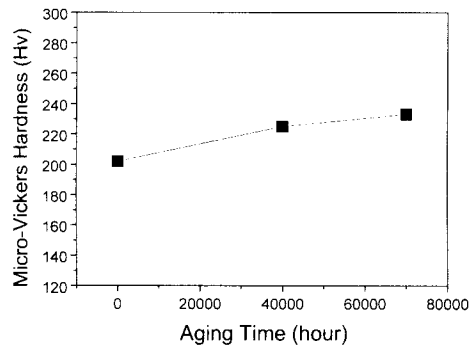
3. 결과 및 고찰

3.1 실험실적 평가를 통한 강도물성변화 관찰

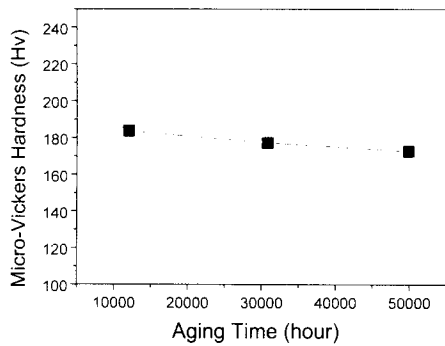
Cr-Ni 강과 Cr-Mo 강의 고온시효시간 증가에 따른 마이크로 비커스 경도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 시험결과는 기존의 연구결과들⁽¹¹⁻¹⁴⁾과 잘 일치하는 경향을 나타내고 있는데, 일반적으로 Cr-Ni 강의 경우 시효시간이 증가함에 따라 경도가 증가하는 양상을 나타낸다고 알려져 있고,⁽¹²⁾ 반대로 Cr-Mo 강의 경우는 감소하는 것으로 보고되어있다.⁽¹¹⁾ Cr-Ni 강의 경도 증가는 기지 내에 미세하게 석출하는 2차 탄화물 및 Fe-Cr-Ni 계열 합금의 안정상중 하나로서 고경도를 가진 금속간 화합물인 σ 상의 석출에 따른 것이고,⁽¹⁵⁾ Cr-Mo 강의 경우 본 실험조건과 같이 뜨임 구간의 장시간 시효시에는 전위조직의 재배열 및 소

멸과 탄화물의 석출 및 조대화에 의해 경도가 감소한다고 널리 알려져 있다.⁽¹¹⁾ 하지만 미세조직적으로 열화가 크게 진행된 Cr-Ni 강의 경우에도 경도의 변화폭은 크지 않아 경도시험법이 열화 정도를 민감하게 반영하는데 부적절한 시험법이라는 점을 알 수 있는데, 이는 경도시험법이 열화도평가를 위하여 기존에 가장 널리 사용되어온 비파괴적 물성평가법중 하나라는 사실을 고려하면 무척 흥미로운 결과이다.

두 강에 대해 연속압입 시험을 이용하여 측정 한 항복강도 및 인장강도의 변화를 Fig. 6에 나타내었는데, 경도시험법에 비해 훨씬 더 변화의 폭이 커서 재질열화를 보다 민감하게 반영하고 있음을 알 수 있다.

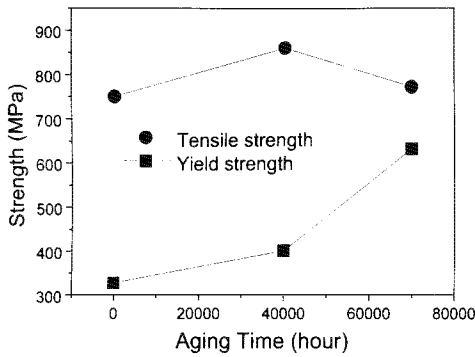


(a)

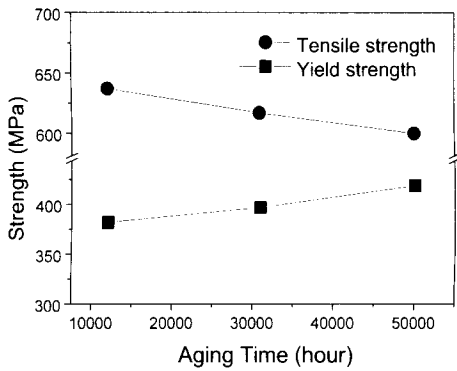


(b)

Fig. 5 Change in micro-Vickers hardness with aging time at room temperature; (a) Cr-Ni steel and (b) Cr-Mo steel



(a)

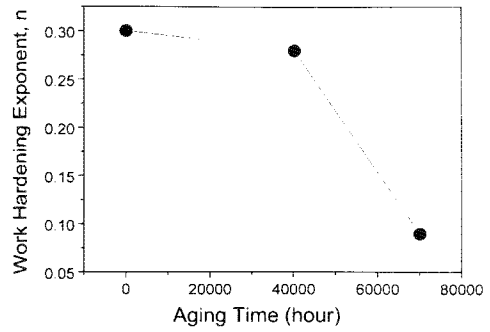


(b)

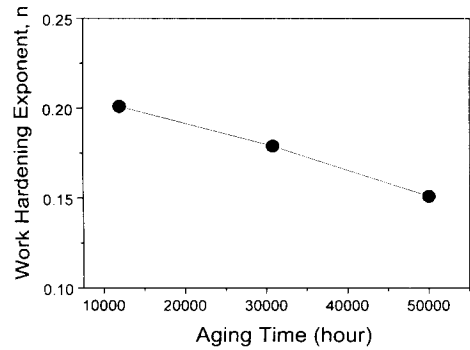
Fig. 6 Change in tensile and yield strength with aging time at room temperature; (a) Cr-Ni steel and (b) Cr-Mo steel

시효시간이 증가함에 두 경우 모두 항복강도는 탄화물 증가의 영향으로 증가하였다. 인장강도는 Cr-Ni 강의 경우는 증가후 다소 감소하였고 Cr-Mo 강의 경우는 지속적으로 감소하여서, 초기 물성치 대비 증가는 또는 감소 경향을 비교할 때 정도의 변화경향과 유사한 경향성을 나타내었다. 열화진행 정도가 Cr-Ni 강이 Cr-Mo 강보다 더욱 큼에 따라 전자의 강도 변화 경향이 뚜렷한 반면, 후자의 강도 변화 폭은 완만하였다. 이상에서 강도변화의 특성은 사용재료에 따라 경향성이 다를 수 있으므로 재질 열화의 일반적인 변수로 사용하기에는 어려움이 있음을 알 수 있다.

Fig. 7에는 시효시간 증가에 따른 가공경화지수의 변화결과를 나타내었다. 재료에 따라 강도가



(a)



(b)

Fig. 7 Change in work hardening exponent with aging time at room temperature; (a) Cr-Ni steel and (b) Cr-Mo steel

서로 다른 변화경향을 나타낸 것과 달리, 가공경화지수는 사용시간의 증가에 따라 내열강의 종류와 무관하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 다만 감소경향은 재질 열화정도가 큰 Cr-Ni 강이 더욱 뚜렷하였다. 두 강 모두 항복강도가 증가하였음에도 인장강도가 감소 또는 증가후 감소 경향을 나타낸 것은 이와 같이 가공경화지수가 감소하였기 때문이다. 특히 열화 진행도가 매우 큰 Cr-Ni 강의 경우는 인장강도가 증가하다가 감소하는 시점과 가공경화지수가 급감하는 시점이 일치하는데, 이는 동일 재료에 대해 인장시험을 수행했던 기존의 연구⁽¹⁴⁾에서도 관찰된 결과이다. 위의 사실을 종합할 때, 재료에 따라 변화경향성의 차이를 나타낼 수 있는 강도 및 경도보다는 가공경화지수가 현장설비의 재질 열화를 평가하는 일반적인 변수로 더욱 적합하다고 판단되었다.

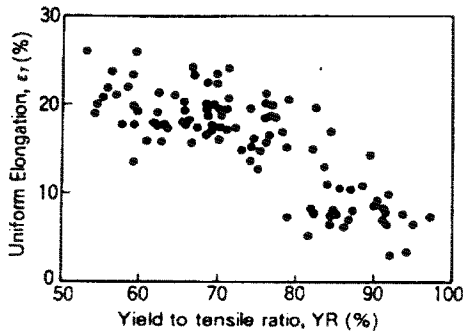
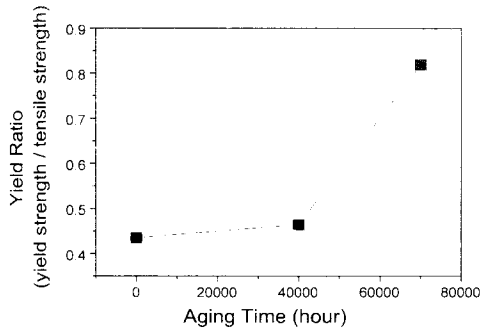
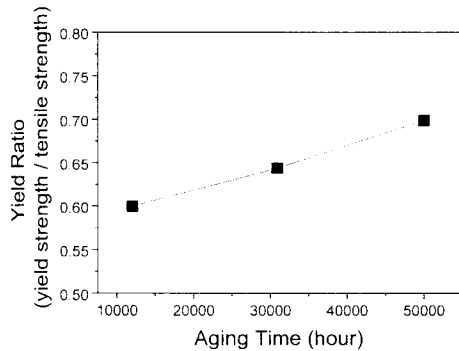


Fig. 8 Example of relationship between uniform elongation and yield ratio⁽¹⁵⁾



(a)



(b)

Fig. 9 Change in yield ratio with aging time at room temperature; (a) Cr-Ni steel and (b) Cr-Mo steel

3.2 새로운 열화평가 변수의 공학적 유용성

가공경화지수를 재질 열화도 평가의 새로운 변수로 활용할 경우, 가장 큰 장점은 재료의 강도 특성과 파괴 특성에 대한 정보를 동시에 제공한

다는 점이다. 일반적으로 열화가 진행될수록 재료는 강도 특성(연화, 또는 경화)과 파괴특성(취화, 피로 등)의 변화를 동시에 수반하게 된다. 재료의 강도적 변화만을 나타낼 수 있는 변수인 항복강도, 인장강도 및 경도 등과 달리 가공경화지수는 재료의 변형능력(deformability)과 관련한 인자로서 취화, 즉 파괴특성을 나타내는 변수로도 해석가능하다. 이는 소성변형거동이 Hollomon 식을 따르는 재료의 경우 가공경화지수, n 이 인장시험시 최대하중에서의 진변형률 값인 균일 연신율(uniform elongation)과 동일한 값을 나타내기 때문이다. 또, 재료가 소성변형을 일으킬 때, n 이 감소할 경우에는 변형의 국부적 집중도가 높아지고 구조물의 변형흡수능력이 저하되므로 모멘트 재분배에 의한 구조적 안정성을 확보하기 어렵게 되므로 가공경화지수는 그 절대치로도 구조물 건전성 평가의 의미를 가진다.

하지만 가공경화지수는 신재의 규격으로 규정되지 않은 경우가 대부분이어서 오래된 설비의 열화 정도를 신재와 비교하여 판단하기 어렵다는 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 재료의 변형능력을 나타내는 또 다른 지수인 항복비(Yield-to-tensile Ratio, YR)에 대하여 열화평가 변수로 사용가능 여부를 검토하였다. Fig. 8⁽¹⁵⁾에서 나타내었듯이 일반적으로 항복비가 증가할수록 균일연신율, 즉 가공경화지수는 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 9에 본 연구에 사용된 두 강의 항복비 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 항복비의 변화 경향은 가공경화지수와 정반대의 경향성을 나타내고 있으며, 그 증가폭 또한 가공경화지수의 감소폭과 일치하여 열화진행 정도를 민감하게 나타내고 있다. 따라서 열화에 따른 항복비의 증가 역시 가공경화지수의 감소와 마찬가지로 열화 평가변수로 활용할 수 있다고 판단할 수 있었다.

주의해야할 사항은 현재의 발달된 제강기술 수준으로는 가공경화지수와 항복비를 독립적으로 조절할 수 있다는 점이다. 일반적으로 가공경화지수가 작은 강의 경우는 항복비와 가공경화지수 사이의 관계가 Fig. 8에서와 같이 상호 의존적이지만 가공경화지수가 큰 경우에는 둘 사이의 관계가 독립적인 경우가 많다. 이와 같이 독립적인 변수이고 작용응력이 일정한 경우에는, 항복비후 파괴까지 도달하는 데 필요한 에너지를 응력-변

형률 곡선의 하부면적으로부터 고려할 때 항복비의 증가보다 가공경화지수의 감소가 더욱 크게 취화경향성을 나타내므로 후자를 기준으로 열화 정도를 평가해야 할 것이다.

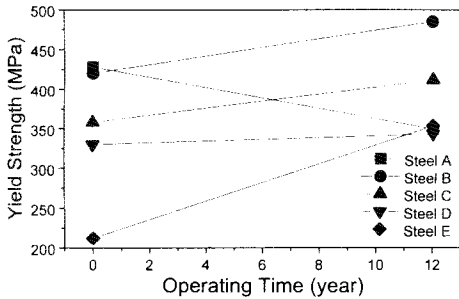


Fig. 10 Comparison of yield strength between fresh materials and degraded materials

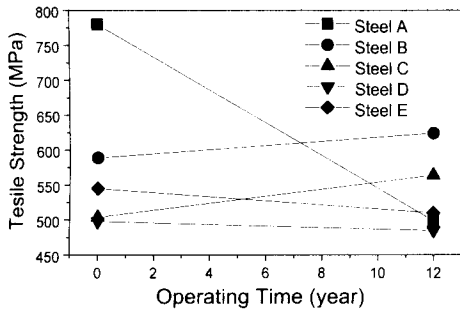


Fig. 11 Comparison of tensile strength between fresh materials and degraded materials

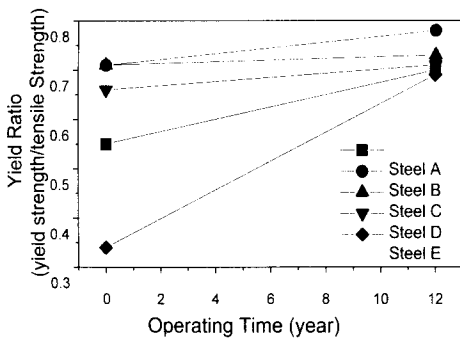


Fig. 12 Comparison of yield ratio between fresh materials and degraded materials

3.3 현장실험을 통한 새 변수의 적용성 검토

앞에서 실험실적으로 결정된 열화 변수의 현장 적용 가능성을 평가하기 위해 12년간 운전한 석유화학 플랜트 설비의 5가지 강종에 대해 현장에서 연속압입시험을 수행하였다. 연속압입시험이 신기술인 만큼 축적된 기존 시험결과가 없는 관계로 건설시의 신재 물성과 현재 물성과의 비교를 통해 인장물성의 변화를 평가하였고, 신재의 가공경화지수에 대한 자료 역시 부재한 까닭에 이를 대신하여 취화 변수인 항복비 값을 신재의 항복비와 비교하였다. Fig. 10에서 12까지 현장에서 측정한 항복강도, 인장강도와 이를 바탕으로 한 항복비를 신재와 비교한 결과를 나타내었다. 그림에서 신재의 강도값은 건설시 인장시험으로부터 확보한 물성치이고, 현재의 강도값은 현장 부착한 연속압입시험기를 통해 구한 물성치이다. 운용조건상 전혀 다른 경년손상 메카니즘이 작용할 수 있는 이들 재료에 대해서 실험을 수행한 결과, 예상대로 재료의 강도값은 증가 혹은 감소하는 다양한 경향을 나타내었지만, 항복비의 경우 정도의 차이는 있지만 항상 증가하는 경향을 나타내었다. 이때 항복비 증가 정도의 차이는 운용조건과 재료조건의 차이를 반영한 결과라 판단된다. 이상과 같은 현장실험 결과를 종합할 때 본 논문에서 제안한 열화평가 변수중 하나인 항복비가 현장에서 활용가능함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연속압입시험을 통해 석유화학 플랜트 설비의 재질열화를 평가할 수 있는 새로운 기준 변수를 검토하였다. 그 결과, 항복강도와 인장강도와 같은 강도 중심의 인자들보다 가공경화지수와 항복비와 같이 변형능력을 나타내는 인자들이 일반적인 열화변수로 활용할 수 있음을 알 수 있었고, 현장실험을 통해서도 유용함을 재확인하였다.

참고문헌

- (1) British Standards 7706, 1993, "Calibration and Setting-Up of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique for the Detection,

- Location and Sizing of Flaws," British Standards Institution.
- (2) Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., 1990, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials," *ASTM STP 1092*, pp. 188~208.
- (3) 변택상, 김진원, 홍준화, 1997, "압입시험을 이용한 원자로압력용기강의 파괴인성 예측 모델," 제 11회 재료강도 심포지엄 논문집, 한국과학기술회관, 서울, pp. 467~473.
- (4) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가," 대한금속재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606~1611
- (5) 장재일, 최열, 권동일, 박주승, 2001, "비파괴적 인장물성 평가를 위한 Advanced Indentation System의 응용 연구," 2001년도 대한 기계학회 제1차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, 한국기계연구원, 대전, pp. 58~66.
- (6) Francis, H.A., 1976, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, Vol. 98, pp. 272~286.
- (7) Doerner, M.F. and Nix, W.D., 1986, "A Method for Interpreting the Data from Depth-sensing Indentation Instruments," *J. Mater. Res.*, Vol. 1, No. 4, pp. 601~607.
- (8) Oliver, W.C. and Pharr, G.M., 1992, "An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *J. Mater. Res.*, Vol. 7, No. 6, pp. 1564~1583.
- (9) Norbury, A.L. and Samuel, T., 1928, "The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests," *J. Iron Steel Inst.*, Vol. 117, pp. 673~687.
- (10) Kimura, K., Matsuo, T., Kikuchi, M. and Tanaka, R., 1986, "The Effect of Stress on Degradation of 1Cr-1Mo-1/4V Steel at Elevated Temperature," *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 72, pp. 474~481.
- (11) Shoji, T. (ed.), 1994, *Time-dependent Degradation and Life-time Prediction*, Realize Inc, Japan, pp. 37~48.
- (12) Shoji, T. (ed.), 1994, *Time-dependent Degradation and Life-time Prediction*, Realize Inc., Japan, pp. 118~124.
- (13) Kondo, Y., Sakurai, Y., Namekata, J., Tanaka, M., and Hangai, F., 1990, "Effect of High Temperature Aging on Eutectic Carbide Morphology of Centrifugally Cast HK40 and HP Steel," *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 76, No. 7, pp. 1195~1201.
- (14) Yamasaki, D, Hirata, I, Morimoto, T, and Ono, K, 1979, "The Characteristics of Sigma Phase Predicted in HK40-Alloy," *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 65, No. 7, pp. 969~974.
- (15) Toyoda, M., 1989, "Significance of Tensile Deformation Properties of Steels for Framed Structures," *J. Jpn. Weld. Soc.*, Vol. 58, No. 7, pp. 485~490.