

구형압입시험에 의한 1Cr-1Mo-0.25V강의 기계적 물성 평가

Spherical Indentation Testing to Evaluate Mechanical Properties in 1Cr-1Mo-0.25V Steel

이종민*, 남영현**,[†], 이승석**, 이억섭***

Jong Min Lee*, Young Hyun Nam**,[†], Seung Seok Lee** and Ouk Sub Lee***

초 록 발전소의 터빈 로터강의 수명을 평가하기 위하여 630℃에서 등온 열처리된 7가지의 서로 다른 시편을 준비하였다. 탄소강, 스테인레스강 등의 금속재료의 유동특성을 평가하기 위하여 개발된 구형압입 시험을 통하여 서로 다르게 열화된 1Cr-1Mo-0.25V 강 기계적 물성을 측정하고 이를 인장시험에서의 결과와 비교하였다. 유동특성을 결정짓는 요소로 재료항복기울기와 구속인자지수를 사용하였다. 이는 가공경화지수의 변화가 매우 작고 불규칙적으로 나타났기 때문이다. 또한 재료항복기울기의 영향을 고려하였을 때 구속인자지수의 영향은 적은 것으로 나타났다.

주요용어: 압입, 사이클릭 하중, 유동물성, 항복강도, 브리넬 경도, 변형률 속도

Abstract For the experimental study of rotor steel, seven kind of specimens with different degradation levels were prepared by isothermal heat treatment at 630℃. Spherical indentation technique was developed to evaluate the flow properties of metallic materials in carbon steel, stainless steel, and alloys, etc. Through the spherical indentation test, differently degraded 1Cr-1Mo-0.25V steel's mechanical properties were observed and compared with conventional standard test data. The flow properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel's were estimated by analyzing the indentation load-depth curve. To characterize the flow property, we used material yield slope and constraint factor index rather than strain-hardening exponent because the variation of strain-hardening exponent was very little and the data showed irregularly. And the constraint factor's effect was small when the material yield slope was taken into account.

Keywords: indentation, cyclic loading, flow properties, yield strength, Brinell hardness, strain rate

1. 서 론

1Cr-1Mo-0.25V강은 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되고 있는 재료로서 사용 시간 및 환경 등의 영향으로 열화현상을 겪게 되므로 플랜트의 안정성 또는 수명평가를 위하여 운용중인 설비재료의 강도, 인성에 대한 평가가 요구되고 있다. 보편적으로 사용되고 있는 재료의 기

계적 물성 평가 방법은 인장시험으로 재료의 탄성 및 소성에 관한 정보를 제공해 주므로 설비의 안정성을 평가하기 위해 기본적으로 수행되고 있다. 그러나 시편 채취의 제약 또는 국부적인 물성평가가 요구되는 경우 경도 시험법을 이용한 재료의 기계적 물성 평가가 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 시험법은 일반적으로 강도의 상대적 변화량을 비교하는데 그치고 있어 역학적 계산에 기

(접수일: 2002. 3. 9, 심사완료일: 2002. 8. 10) * 인하대학교 대학원 기계공학과, **,† 교신저자: 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹(Nondestructive Measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340) namyh@kriss.re.kr, *** 인하대학교 기계공학과

초한 인장시험 결과의 적용에는 한계가 있다. 따라서 이를 보완한 다중 압입시험법이 개발되었으며[1] 압입하중에 따른 연속적인 압입깊이의 변화를 측정하여 다양한 기계적 물성을 평가할 수 있게 되었다. 특히, 고온고압하에서 장시간 사용되는 내열강은 재료의 열화를 수반하게 되는데 이를 평가하는 방법으로 금속조직학[2], 경도법[3], 전기저항법[4] 등이 소개되고 있으나 인장시험에 준하는 다양한 기계적 물성을 얻기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 로터 재료로 많이 사용하고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강의 기계적 물성 평가를 현장적용이 가능한 비파괴적 방법인 다중압입시험법을 통하여 조사하였다.

2. 이론

2.1. 압입시험

압입시험법을 통해 얻어질 수 있는 기계적 물성은 탄성계수, 항복강도, Lüders strain, 변형경화지수, 진응력-진소성변형률($\sigma_t - \epsilon_p$) 곡선, 브리넬 경도, 잔류응력 등이 있으며 이를 통하여 파괴인성을 예측할 수 있다[5].

Fig. 1은 사이클 하중의 증가에 따른 하중과 구형압입자의 변위관계를 나타낸 곡선으로, 소성변위가 증가할수록 이에 따른 하중은 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편, 재료의 일반적 탄소성 거동에 있어 전체변위는 소성변위와 탄성변위의 합으로 나타나는 것을 보여주고 있다. P , h_c , h_p , h_e 는 하중, 총압입깊이, 소성압입깊이 및 탄성압입깊이를 나타낸다.

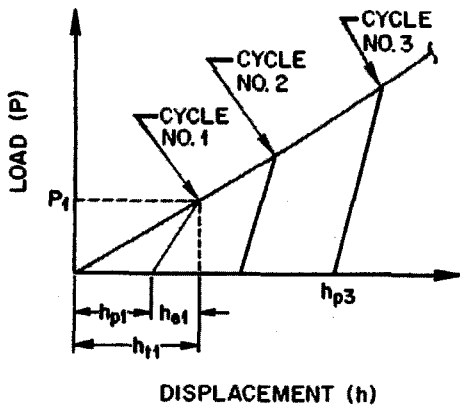


Fig. 1 The relationship between load and displacement by increased cyclic loading

Fig. 2는 압입에 의한 시편의 단면형상 변화를 나타낸 것으로 하중시 직경 d_t 와 하중제거시 재료의 탄성변형에 의한 직경 d_p 의 차이가 발생하는 것을 나타내고 있다.

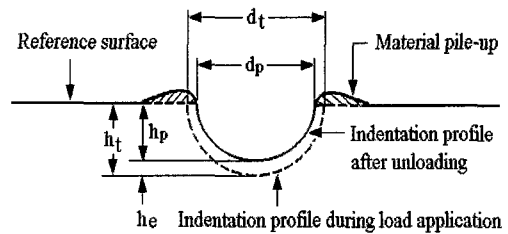


Fig. 2 Indentation geometries before and after loading application

2.2. 응력-진소성변형률 곡선

진응력-진소성변형률 곡선은 구형 압입자의 압입에 의해 생기는 압흔의 압입깊이와 힘을 측정하여 하중-변위 곡선을 그리게 되며, 이를 응력과 변형률의 관계로 변환하여 다음과 같은 Tabor[6] 관계식을 통하여 식 (1)과 같은 진변형률 값을 얻게 된다. 이때 D 는 압입자의 직경, d_p 는 하중 제거시 압입직경이다.

$$\epsilon_p = 0.2 d_p / D \quad \dots\dots\dots (1)$$

구형 압입자를 이용한 시험에서 압입하중 P 에 따라 시험재료는 탄성영역, 탄소성영역, 소성영역으로 구분되며, 이에 따른 소성변형에 대한 저항 정도를 구속인자 (Constraint Factor) ψ 로 정의하여 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\psi = P_m / \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

탄성단계에서 구속인자는 선형적으로 증가하여 소성변형이 일어나는 시점에서 약 1.12가 되며, 탄소성 단계에서는 일정 값까지 증가하게 된다. 또한, 완전 소성단계에서는 일정한 값을 유지하며 이는 구속인자지수 (Constraint Factor Index) a_m 에 의하여 결정된다. 구속인자(Constraint Factor)는 탄-소성모델에서는 1~3, 완전 소성모델에서는 2.8~3.1의 범위에 속하는 것으로 알려져 있다[7]. 이를 통한 진응력은 다음 식 (3)으로 표시된다.

$$\sigma_t = 4P / \pi d_p^2 \psi \quad \dots\dots\dots (3)$$

균일 소성변형의 특징을 나타내는 진응력-진변형률 곡선은 주로 식 (4)와 같은 멱경화법칙(Power law of hardening)을 이용하여 나타내며, 이 식을 통해 강도계수 K 와 변형경화지수 n 을 얻게 된다.

$$\sigma_t = K\varepsilon_p^n \dots\dots\dots (4)$$

2.3. 항복 강도

압입자의 직경 D , 하중시 압입직경이 d_t 인 경우 식 (5)와 같은 관계로부터 소성 압입직경을 구한다.

$$d_t = 2\sqrt{h_t D - h_t^2} \dots\dots\dots (5)$$

한편, Mayer 법칙[8]으로부터 식 (6)을 얻는다.

$$P/D_i^2 = A(d_t/D)^{m-2} \dots\dots\dots (6)$$

이때 m 은 Mayer지수이며, $d_t/D=1$ 에 해당하는 P/d_i^2 의 값을 항복인자 A 로 정의하고, 이를 식 (7)에 대입하여 항복강도 σ_{ys} 를 구하게 된다.

$$\sigma_{ys} = \beta_m A \dots\dots\dots (7)$$

여기서 β_m 은 재료상수로 일반 강재의 경우 약 0.229 정도, 스테인레스강의 경우 약 0.191 정도의 값으로 알려져 있다.

2.4. Brinell 경도

구형 압입시험에 의한 브리넬 경도는 압입 최대하중 P_{max} , 하중 제거시 압입직경 d_f , 압입자 직경 D 를 사용하여 다음과 같은 ASTM 규정에 따른 식 (8)에 의해서 결정된다.

$$H_B = 2P_{max} / [\pi \times D(D - (D^2 - d_f^2)^{0.5})] \dots\dots\dots (8)$$

3. 시험방법

3.1. 재료 및 시편

실험에 사용된 재료는 1Cr-1Mo-0.25V 탄소강으로 실험 재료 열화된 재료의 미세 조직과 유사한 미세 조직을 갖

는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도(538°C)보다 높고 재결정 온도(750°C)보다 낮은 630°C에서 가속 열화처리 된 시편을 사용하였다. 이때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기확산 (self diffusion) 이론에 근거하였으며[9, 10] 실제 사용온도와 비교한 열처리 시간은 Table 1에, 기계적 물성은 Table 2에 나타내고 있다.

Table 1 Determination of aging at 630°C for equivalent microstructure serviced at 538°C

Aging time at 630°C, hr	Time served at 538°C, hr
0	0
453	25,000
933	50,000
1,322	75,000
1,822	100,000
3,640	200,000
5,460	300,000

Table 2 Mechanical properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel

Specimen (virgin)	Room Temp. 24°C	High Temp. 538°C
Yield Strength	665.2	533.5
Tensile Strength	823.1	580.6
Elongation	18.8	22.7
Reduction of area	59.4	55.5

3.2. 시험장치 및 방법

시험장치는 미국의 ATC에서 개발한 stress-strain microprobe system (SSM) 압입시험기를 사용하였으며, Fig. 3에 시험장치의 형상을 나타내고 있다. 시험은 동일 위치에 대한 다중 압입 사이클에 기초하며 각 사이클마다 압입-하중 제거-재하중의 과정을 통해 이루어지며 이러한 절차를 통해 하중-변위 곡선을 실시간으로 얻게 된다.

직경 1.574mm 구형 압입자를 이용하여 0.005mm/s의 압입속도로 7회의 다중압입시험을 행하였다. 로드셀의 최대 하중은 약 4,440N이며, 압입하중 증가에 따른 압입깊이의 변화는 LVDT(linear variable displacement transducer)를 이용하여 측정하였으며, 각 사이클에 대한 하중 제거는 부가된 하중의 40%로 하여 완전 하중 제거 시 나타나는 비선형적 특성을 제거하였다.

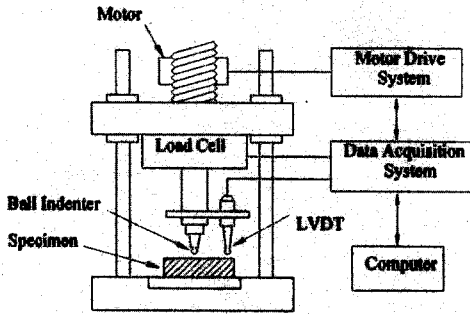


Fig. 3 Apparatus of the indentation system and schematic diagram

4. 시험결과 및 고찰

4.1. 재료항복기울기(Material Yield Slope)

항복강도는 $\sigma_{ys} = \beta_m A$ 에 의하여 결정되므로 재료상수 β_m 는 항복강도 결정에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 이를 구하기 위한 예비시험을 하였으며 시험 조건으로는 일반강에 대하여 적용되는 $\alpha_m=1$, $\beta_m=0.229$ 을 사용하였다. 압입시험 및 인장시험을 통해 얻은 항복응력과 약 8% 정도의 오차가 있으며, 이를 보정하기 위하여 수정된 β_m 을 구하였다.

Fig. 4는 시편 0hr 시편에 대한 시험 평균값을 통한 $d_i/D - P/d_i^2$ 의 관계를 나타내었으며, 이때 직선의 기울기를 재료항복기울기라고 하였다. 따라서 이 직선과 식(6)에 의한 항복인자 정의로부터 A 를 구하고, 새로운 β_m 값으로 0.25을 얻었다.

한편, 재료상수 β_m 은 재료의 가공법 또는 조사(irradiation) 등에 관계없이 적용 가능한 상수로 알려져 있으므로 본 시험에서는 모든 시편에 대해서도 동일한 값을 적용하였다.

4.2. 구속인자지수(Constraint Factor Index)

시편에 부과되는 변형률 속도는 응력-변형률 곡선의 모양에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 변형률 속도에 따른 유동응력의 변화를 알아보기 위하여 0.001, 0.002, 0.01, 0.017, 0.025mm/s의 변형률 속도에 대한 유동응력의 변화를 Fig. 5에 나타내었으며, 변형률 속도(1/초)의 증가에 따라 유동응력이 증가함을 보여주고 있다.

구속인자지수 α_m 은 변형률 속도에 비례하므로 인장시험에서의 0.017mm/s 변형률 속도와 압입시험에서의 0.002mm/s 변형률 속도의 차이를 보정하였다. Fig. 5에 의하면 압입시험에서 구한 유동응력은 인장시험에서 구한 유동응력보다 약 3%정도 크게 나타나므로, α_m 을 1.03으로 보정하였다.

4.3. 기계적 물성

Fig. 6은 0, 50000, 300000 hr 동안 가속 열처리된 3종류 시편에 대한 구형압입시험의 하중-변위 그래프를 나타낸 것으로 하중에 따른 깊이의 변화를 통하여 각 사이클마다의 하중, 총압입깊이, 소성압입깊이 등을 구하게 된다. 시편의 종류에 따라 동일 하중에 대한 압입깊이는 서로 다르게 나타나며 이를 통하여 시편의 기계적 물성을 평가하게 된다. Table 3은 각각의 시편에 대한 시험 평균값을 나타낸 것이다.

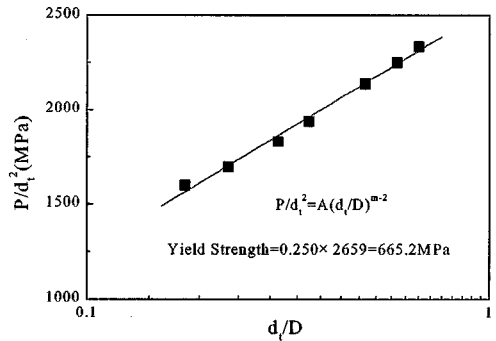


Fig. 4 Relationship between P/d_i^2 and d_i/D from load-depth curve

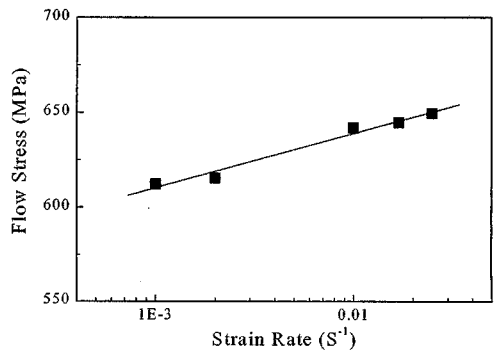


Fig. 5 Relationship between flow stress and strain rate

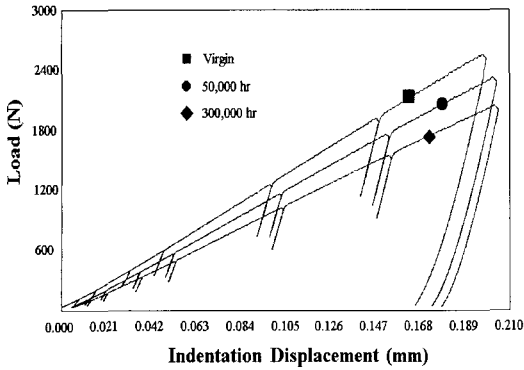


Fig. 6 Comparison between load-depth curves for test conducted on 1Cr-1Mo-0.25V steel

4.4. 열화에 따른 기계적 물성변화

Fig. 7은 구형압입시험의 이론해석에 의한 0hr, 50,000hr, 300,000hr의 3종류 시편에 대한 진응력-진소성변형률 곡선을 나타낸 것으로, 0hr 시편에 대하여 열처리 시간이 증가할수록 열화시편의 진응력값은 점차 감소하고 있다.

Fig. 8은 시편에 따른 기계적 물성치의 변화를 나타낸 것으로, 0hr 시편의 물성치를 1로 하여 상대적인 변화를 나타내었다. 가공경화지수 n 을 제외한 5개의 물성치는 거의 동일한 경향으로 변화하고 있다. 초기에 물성치의 변화폭은 크게 나타나고 있으나 점차 그 변화율이 감소하고 있는데, 이러한 결과는 기존의 인장, 경도[3] 및 전기저항 시험[4] 등에서 얻어진 열화도 변화와 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나, 가공경화지수 n 은 다른 기계적

물성치에 비하여 열화에 따른 변화량이 매우 적게 나타나고 불규칙적이므로, 열화 특성과의 인자로는 적절하지 못하였다.

일반 금속의 경우, 가공경화지수는 0.1~0.5 사이의 값으로 알려져 있다. 항복응력이 가공경화지수 n 에 의존한다는 이론[11~13]으로부터 계산된 본 시험 재료들의 항복응력은 최대값과 최소값이 약 7% 정도의 차이를 보였으며, 열화도에 따른 물성변화의 경향은 불규칙적으로 나타났다. 따라서 본 시험에서는 이상적인 구형 압입자의 직경을 근거로 한 압입이론을 적용하였으며, 특히 시편이 가공경화지수 n 에 대한 의존성이 낮은 경우에 대하여 재료 물성인자로 재료항복기율기 β_m 을 고려하였다. 이는 β_m 을 알게 된다면 보다 간단한 이론식을 전개함으로써 재료의 물성을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

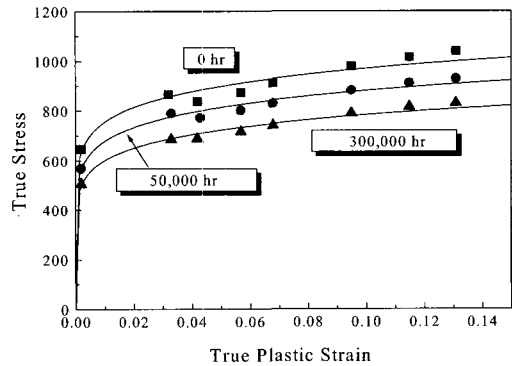


Fig. 7 True stress versus True-plastic strain for spherical indentation test

Table 3 Summary of spherical Indentation test results from 1Cr-1Mo-0.25V steel

Specimen	True Stress/ True-Plastic Strain	Yield Strength, MPa	Brinell Hardness, HB	Ultimate Tensile Strength, MPa
A	$\sigma_t (MPa) = 1246 \epsilon_p^{0.109}$	646.9	256	877.5
B	$\sigma_t (MPa) = 1223 \epsilon_p^{0.115}$	602.8	243	849.7
C	$\sigma_t (MPa) = 1145 \epsilon_p^{0.114}$	568.3	229	797.2
D	$\sigma_t (MPa) = 1078 \epsilon_p^{0.113}$	545.8	219	752.6
E	$\sigma_t (MPa) = 1082 \epsilon_p^{0.111}$	555.7	222	757.9
F	$\sigma_t (MPa) = 1050 \epsilon_p^{0.113}$	535.9	215	733.1
G	$\sigma_t (MPa) = 1020 \epsilon_p^{0.114}$	507.9	206	709.2

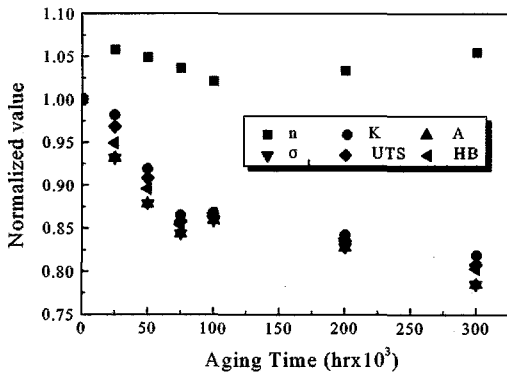


Fig. 8 Normalized mechanical properties' tendency at a various simulated degradation specimen

브리넬 경도에 있어서 예비시험과 재료상수들의 보정이 이루어진 시험의 경우 이들간의 최대오차가 약 1.4%로 나타났다. 이는 식 (8)과 구속인자 ψ 의 정의를 고려할 때, 구속인자지수 α_m 이 재료의 기계적 특성에 미치는 영향이 적음을 나타내고 있다.

대부분의 금속재료에서는 H_B 와 인장강도사이에는 다음과 같은 관계식[14]을 갖는다

$$\text{Ultimate Tensile Strength (MPa)} \approx 3.45 \times H_B \dots\dots (9)$$

본 시험에서의 브리넬 경도를 식 (9)에 적용한 결과는 압입시험을 통하여 얻어진 인장강도와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 이는 재료의 인장특성을 비파괴적으로 평가하는데 있어 다중압입시험의 적용이 타당한 방법이라 판단된다.

Table 4는 각각의 시편에 대한 비커스 경도 및 예비시험에서 얻어진 브리넬 경도를 나타낸 것으로 열처리시간이 증가할수록 경도는 점차 감소하고 있다.

Table 4 Vickers hardness and Tensile strength

Specimen	Vickers hardness(Hv)	Brinell Hardness (pre-test)
A	278	257
B	270	242
C	254	229
D	246	220
E	249	224
F	233	212
G	230	207

Fig. 9는 비커스 경도와 다중압입시험에 의한 브리넬 경도와와의 상관관계를 보이고 있다.

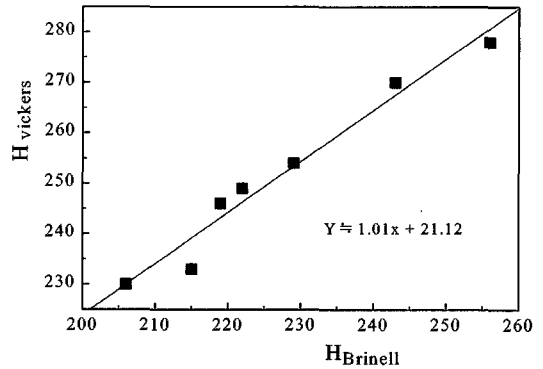


Fig. 9 The relationship between Vickers hardness and Brinell hardness

Fig. 10은 항복강도와 다중압입시험에 의한 브리넬 경도의 상관관계가 선형적으로 비례하고 있음을 나타낸 것으로, 이는 식 (9)의 브리넬 경도를 통한 인장강도의 평가와 더불어 항복강도를 구할 수 있는 중요한 인자가 될 수 있음을 보여주고 있다.

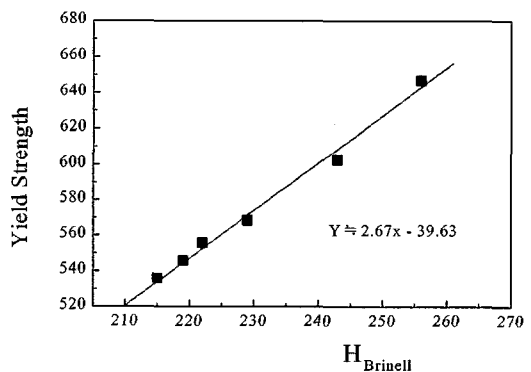


Fig. 10 The relationship between Yield Strength and Brinell Hardness

5. 결 론

본 연구에서는 다중압입시험을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V 강의 압입하중-변위곡선을 측정하여, 재료의 기계적 물성을 비파괴적으로 평가하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압입시 하중-변위곡선의 기울기가 증가할수록 재료의 브리넬 강도는 증가하였다. 이를 통하여 시편의 기계적 물성을 비파괴적으로 평가할 수 있었으며 시편의 열화도에 평가에 있어 유용한 방법으로 판단되었다.
- (2) 열처리 시간에 따른 가공경화지수 n 의 변화량은 매우 적고 불규칙적으로 나타났으며, 이에 따른 이론적 항복강도의 최대값과 최소값사이에는 약 7%정도의 차이를 보였다. 따라서, 가공경화지수 n 은 기계적 물성 변화를 평가할 수 있는 특성인자로서 적절하지 못하였다.
- (3) 시편이 가공경화지수 n 에 대한 의존성이 낮은 경우에 재료물성 인자로 재료항복기울기 β_m 와 구속인자지수 α_m 를 고려하였다. 이에 따른 시험결과, 열처리 시간의 증가에 따라 기계적 물성은 점차 감소하였으며, 기준의 물성평가 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 구속인자지수 α_m 은 재료항복기울기 β_m 에 비하여 기계적 물성에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] F. M. Haggag, J. A. Wang, M. A. Sokolov and K. L. Murty, "Use of Portable/In Situ Stress-Strain Microprobe System to Measure Stress-Strain Behavior and Damage in Materials and Stress," Nontraditional Methods of Sensing Strain, and Damage in Materials and Structures, ASTM STP 1318, pp. 85-98, (1997)
- [2] B. W. Jones, C. R. Hills and D. H. Polins, Metallurgical Trans. A. Vol. 22A, pp. 1049-1508, (1991)
- [3] B. J. Cane, P. F. Aplin and J. M. Brear, J. Press. Vessel Tech., Vol. 107, No. 6, pp. 295-300, (1985)
- [4] 남승훈, 김엽기, 유광민, 전기저항법을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화의 비파괴 평가, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제5호, pp. 814-820, (1998)
- [5] F. M. Haggag, R. K. Nanstad, J. T. Hutton, K. L. Thomas and R. L. Swain, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials," Application of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing, ASTM STP 1092, pp. 188-208, (1990)
- [6] D. Tabor, The Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, pp. 30-65, (1951)
- [7] H. A. Fransis, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation," Transactions of the ASME, pp. 272-281, (1976)
- [8] E. Mayer, Z. Ver. Dtsch. Ing., Vol. 52, pp. 645, 740 and 835, (1908)
- [9] A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett, D. Siedy and D. M. R. Taplin, "Effect of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel, Fifth Canadian Conference on Fracture," pp. 1620-1631, (1981)
- [10] 윤기봉, 윤석호, 김승태, 서창민, 남승훈, 시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온에서의 JIC 및 Tmat의 평가, 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 2860-2870, (1994)
- [11] 이진행, 이형일, 송원근, 구형 압입이론에 관한 고찰, 대한기계학회 논문집 A권, 제25권 제4호, pp. 714-724, (2001)
- [12] Matthews, J. R, Indentation Hardness and Hot Pressing, ACTA Metallurgical, Vol. 28, pp.311~318, (1980)
- [13] Y. Tirupataiah, "On the Constraint Factor Associated with the Indentation of Work-hardening Materials with a Spherical Ball," Metallurgical Transactions A., 22A, pp.2376-2384, (1991)
- [14] 김정규, 최낙삼, 기계재료학, pp. 103, (1996)