

개량형 9Cr-1Mo 강의 열화도 평가를 위한 기계적 성질 및 초음파 특성 분석

현양기[†] · 원순호 · 이상훈 · 손영호 · 이재훈 · 김인배*
한국기계연구원부설 재료연구소 산업기술지원본부
^{*}부산대학교 재료공학부

Analysis of Mechanical and Ultrasonic Properties for the Evaluation of Material Degradation in Modified 9Cr-1Mo Steel

Y. K. Hyun[†], S. H. Won, S. H. Lee, Y. H. Son, J. H. Lee, I. B. Kim*
Industrial Technology Support Division, Korea Institute of Materials Science,
Changwon 641-831, Koera

^{*}School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-732, Korea

Abstract Modified 9Cr-1Mo steels possess excellent high-temperature mechanical properties and are widely used in energy conversion industries. However, in-service materials degradation, such as softening, carbide-induced embrittlement, temper embrittlement, etc., can take place during long-term operation. Evolution of microstructure due to service exposure to high temperature has a strong effect on the performance of heat resistant steels. In case of modified 9Cr-1Mo steels, precipitation of Fe₂Mo-type laves phases and coarsening of M₂₃C₆-type carbides are the primary cause of degradation of mechanical properties such as toughness, hardness, tensile strength and creep resistance. This study was aimed at finding reliable parameter for assessing the integrity of modified 9Cr-1Mo steels. Characteristic parameters were attained between mechanical and ultrasonic properties. (Received June 15, 2010; Revised June 22, 2010; Accepted June 29, 2010)

Key words: Modified 9Cr-1Mo steel, Materials characterization, Nondestructive testing, Material degradation, Nanoindentation, Ultrasonic properties, Elastic modulus

1. 서 론

개량형 9Cr-1Mo 강은 열전도도가 좋고, 열팽창계수가 작은 페라이트 강으로 에너지 효율 향상을 위한 고온고압화의 증기조건이 요구됨에 따라 개발된 증기발생기용 구조재료이다[1]. 개량형 9Cr-1Mo 강은 9%의 Cr과 1%의 Mo이 첨가된 페라이트계 강에 N 함량 제어하에서 Nb과 V이 미량 첨가된 것으로 약 600°C의 운전 온도에서 장시간 사용되어지는 파이프(P91)와 튜브(T91) 등으로 전열관, 과열기관, 재열기관, 기타 설비 등의 용도로 발전설비 산업 분야에 아주 폭 넓게 이용되고 있으며, 석유화학산업 분야의 증류기, 수소화분해설비, 수소첨가설비 등 고온설비에서도 널리 쓰이고 있다[2].

그러나 이러한 설비의 재료들은 장시간 사용에 따

라 연화, 탄화물유기취화, 뜨임취화 등의 재료열화가 가동중에 지속적으로 일어난다. Cr-Mo 합금강은 석출물의 석출과 탄화물의 조대화가 주된 열화 요인으로 알려져있다[3-6]. 고용강화에 의해 강도를 증가시키는 Mo 함량의 석출에 의한 감소는 연화와 크리프 강도의 저하를 가져오며 설비의 사용 중 2차상과 탄화물의 석출은 인장강도, 경도, 크리프강도, 피로강도와 같은 기계적 성질을 저하시킨다[3-6]. 그 때문에 재료의 상태 평가를 통해 부품의 잔존수명을 예측할 수 있는 비파괴 평가 절차의 개발과 확립은 대단히 중요하다. 이러한 관점에서 개량형 9Cr-1Mo 강에 대하여 비파괴 평가의 한 방법인 초음파의 주요변수에 대한 연관성을 조사함으로써 재료의 열화정도를 평가하고자 하였다. 음속은 탄성을 및 밀도와 직접적으로 관련되어 있고 재료의 특성 평가에 매우

[†]E-mail : ykhyun@kims.re.kr

유용한 변수이다. 반면에 음속의 측정은 측정방법에 따라 측정오차가 매우 크기 때문에 소재에 대한 정확한 지식과 측정방법을 이해하고 있는 경우에만 측정의 신뢰성을 보장할 수 있다. 음속을 측정하는 주요 방법 중 우리가 적용한 연속파형의 중첩에 의한 시간차 (Δt)를 구하는 pulse-echo-overlap 방법이 수동적이지만 가장 정확한 방법으로 평가받고 있다[7].

본 연구에서는 개량형 9Cr-1Mo 강의 인공시효 열처리재를 대상으로 경도와 인장강도와의 상관관계를 통한 재료강도의 평가 가능성을 조사하였으며, 크리프 중단 시험재를 대상으로 재료열화에 미치는 응력의 영향을 경도측정을 통하여 확인함과 동시에 나노인덴터로부터 측정된 탄성계수와 초음파로부터 얻은 횡파속도와 탄성계수가 크리프 수명 평가의 지표로서 물리적 의미를 가지는 것인지 평가하여 보았다.

2. 실험방법

대상강종은 개량형 9Cr-1Mo 강(ASTM A335 P91)으로 미사용재와 인공시효 열처리재 및 수명소비율에 따른 크리프 중단 시험재를 실험에 사용하였다. 개량형 9Cr-1Mo강의 화학성분분석 결과는 Table 1에 나타내었으며, 각 시험편의 열처리조건은 Table 2와 Table 3에 나타내었다. Table 2의 시험편은 700°C에서의 인공시효처리한 것으로 열화의 정도를 평가하기 위하여 열처리 후 인장시험편과 경도

측정용 시험편을 각각 제작하였다. 그리고 Table 3은 온도 650°C, 하중 95 MPa 크리프 조건에서 수명소비율에 따라 제작한 크리프 중단 시험재의 조건을 정리한 것으로 크리프 중단 시험편의 그립부(나사부)와 게이지부는 각각 비하중부와 하중부로 그립부의 경우 열에 의한 시효의 영향을, 게이지부의 경우 열시효와 함께 하중에 의한 응력의 영향을 동시에 받은 부분으로 구분하여 열시효와 함께 재료열화에 미치는 응력의 영향을 마이크로비커스 경도와 나노인덴터 경도로 확인하였다. 이와 함께 나노인덴터로부터 측정된 탄성계수와 초음파로부터 얻은 횡파속도와 탄성계수의 상호 관련성을 조사하여 열화도의 평가 가능성을 고찰하여 보았다.

기계적 특성시험은 ASTM A370, E8 및 E21, ISO 14577 등의 규격을 준용하여 수행하였다. 인장시험은 Instron사의 인장시험기로 시험하였고, 마이크로비커스 경도는 일본 Mitutoyo사의 경도계로 1.0 kgf 하중으로 10회이상을 측정하여 평균하였으며, 나노인덴터 경도와 탄성계수는 미국 MTS사의 장비로 65.03°의 각을 가지는 삼각뿔 형태의 Berkovich 압입자로 최대하중 50 gr를 부가하여 25회 이상 측정하여 평균하였다. 또한 비파괴적 방법과 기계적 성질과의 상관관계를 통한 열화도 평가의 가능성을 확인하기 위하여 비파괴적인 방법으로 초음파 속도 측정 및 초음파를 이용한 탄성계수를 영국 Gould사의 DataSYS720 오실로스코프로 측정하였다.

Table 1. Chemical composition of Modified 9Cr-1Mo steels [wt.%]

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	W
Spec.	0.07-0.14	0.2-0.5	0.3-0.6	0.020	0.010	8.0-9.5	0.85-1.05	0.18-0.25	0.06-1.0	
Specimen	0.11	0.29	0.48	0.014	0.001	8.49	0.93	0.21	0.069	0.060

Table 2. Conditions of modified 9Cr-1Mo steels by artificial aging. (700°C)

Material No.	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Aging Time (hrs)	0	200	400	500	750	1000	1200	1500

Table 3. Conditions of modified 9Cr-1Mo steels by interrupted creep test. (650°C, 95MPa)

Material No.	Gauge/loaded	B0	B'1	B'2	B'3	B'4	B'5	B'6	B'7	B'8	B'9	B'10	B'11	B'12	B'13	B'14	B'15
	Grip/unloaded	-	B'1u	B'2u	B'3u	B'4u	B'5u	B'6u	B'7u	B'8u	B'9u	B'10u	B'11u	B'12u	B'13u	B'14u	B'15u
Seizing Time (hrs)		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	240	270	300	330	400
Life Fraction (t/tr, %)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	67.5	75	82.5	100

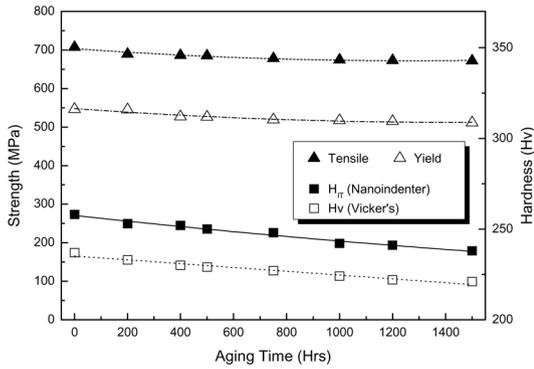


Fig. 1. Change of mechanical properties with aging time.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 인공시효에 따른 기계적 성질 변화를 나타낸 것으로 시효시간의 증가에 따라 인장강도, 항복강도, 마이크로버커스 경도(Hv), 나노인덴터 경도(H_{IT}) 모두가 감소함을 알 수 있다. 여기서, 나노압입 시험[8]의 경도 측정 결과는 Berkovich 압자, 50 gf 경도하중으로 측정된 값을 1.0kgf 경도하중으로 측정된 마이크로버커스 경도 값과 비교하기 위하여 다음의 식 (1)로 환산하였다[9].

$$Hv[kgf/mm^2] = \frac{\text{Geometric Number}(= 0.9065) \times 10^3}{9.80665} \times H_{IT}[GPa] \quad (1)$$

$$H_{IT}[GPa] = 92.44 \times H_{IT}[GPa]$$

나노인덴터 측정값의 환산 결과, 마이크로버커스 경도값의 약 10% 이내의 오차범위로 시효시간의 증가에 따라 경도값이 감소하는 경향성은 서로 일치함을 알 수 있다. 이러한 경향성은 템퍼드 마르텐사이트 조직을 갖는 개량형 9Cr-1Mo 강이 고온에서 인공시효를 함에 따라 라스 폭의 확대와 구 오스테나이트 입계에서 석출물 양의 증가, 입내의 미세한 탄화물 수 감소와 고용강화 원소 Mo의 감소에 의해 기계적 성질이 저하 되기 때문인 것으로 알려져 있다[3-6].

Fig. 2는 Fig. 1의 마이크로버커스와 나노 압입 시험의 측정 결과의 감소경향에 대한 상관성을 명확히 하기 위하여 미사용재와의 경도비 ($H_{\text{Aging Time}}/H_{\text{New}}$)로 나타낸 것으로 그 경도비가 서로 잘 일치하

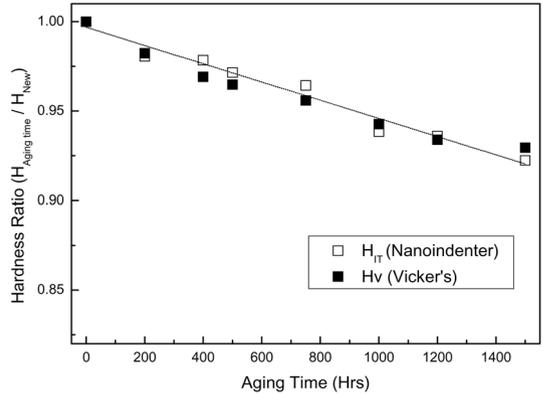


Fig. 2. Change of hardness ratio with aging time.

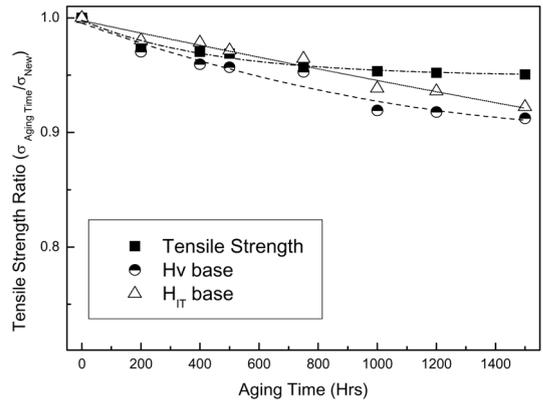


Fig. 3. Change of tensile strength ratio with aging time.

므로 나노 압입 시험과 마이크로버커스 경도의 측정 결과로서 서로 예측이 가능함을 알 수 있다. 이와 함께 재료의 응력값과 경도값은 $H/\sigma = \text{constant}$ 로 일정한 비를 가진다고 일반적으로 잘 알려져 있는데 Fig. 3은 실제 측정된 인장강도의 비와 측정된 경도값을 ASTM A370 기준[10]으로 환산한 인장강도비를 나타낸 것으로 시효에 따른 실제 측정값과 환산값의 감소 경향이 뚜렷함을 알 수 있다. 특히, Fig. 4는 인장시험 결과와 마이크로버커스 경도로부터 환산된 인장강도값을 비교한 것으로 두 값이 동일한 경우인 1에 오차 범위 5% 내에서 잘 일치하고 있어 마이크로버커스경도 시험의 측정 결과가 인장강도를 판단하는 지표가 될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2의 나노압입시험과 마이크로버커스 경도의 상관성과 Fig. 4의 마이크로버커스 경도와 인장

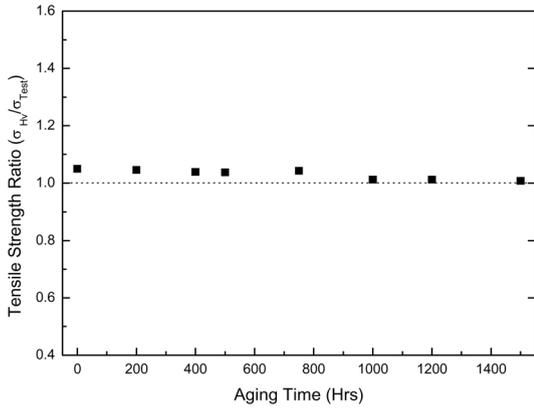


Fig. 4. Tensile strength ratio between the calculated by Hv and real tensile test.

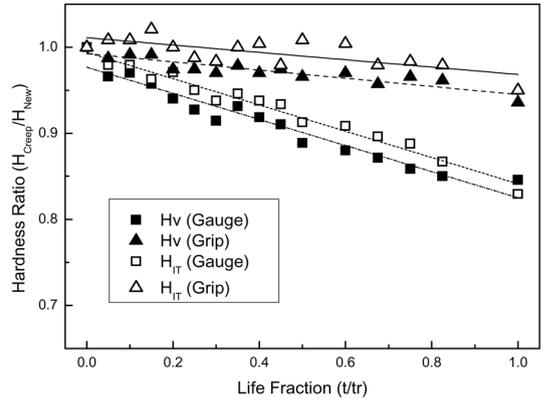


Fig. 5. Change of hardness ratio with life fraction.

강도의 상관성에 의해 각 시험의 측정값은 나머지 다른 시험의 결과를 예측 가능하게 함을 알 수 있다.

개량형 9Cr-1Mo 강에서 시효에 따라 미세조직 내에 보이는 MC탄화물, 아결정입계에 보이는 $M_{23}C_6$ 형 탄화물은 비교적 장시간에 이르기까지 크게 변화하지 않고 경도도 크게 저하되지 않으나 크리프 변형 중에는 현저한 전위의 회복이 일어나기 때문에 크리프 파단 시험편에서는 아결정립의 조대화와 구 오스테나이트 입계에서 $M_{23}C_6$ 형 탄화물과 Fe_3Mo 형의 Laves상 양이 증가함과 함께 입내의 MC형 미세 탄화물의 수가 감소하는 것이 관찰되고 경도 또한 크리프 손상에 의해 열화과정에서 축진되어 점차 저하되는 것으로 알려져 있다[3-6, 11]. 이러한 열화를 촉진시키는 응력의 효과를 알아보기 위해 크리프 중단 시험편으로 마이크로비커스와 나노압입시험을 하였으며, 측정 결과를 Table 4에 정리하고 미사용

제외의 경도비 (H_{Creep}/H_{New})에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 마이크로비커스와 나노압입시험 측정결과 모두 각 크리프 중단 시험편 중 열화의 영향이 대부분 온도에 의존적인 그립부의 경도는 완만한 감소를 보이는 반면, 온도와 응력의 영향을 함께 받은 게이지부의 경도는 수명소비율의 증가에 따라 현저한 경도 감소를 보이는데 이러한 결과로서 게이지부의 열화가 축진되었음을 알 수 있다. 그리고 나노압입시험 측정값을 마이크로비커스 경도값과 비교하기 위하여 환산한 결과는 1.0 kgf에서 측정된 마이크로비커스 경도 값의 7% 이내의 오차범위로 수명소비율의 증가에 따른 경도 감소 경향성이 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같이 마이크로비커스와 나노압입시험을 통한 경도 측정 결과는 수명소비율을 예측하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

그리고 본 연구에서는 개량형 9Cr-1Mo 강에 대해

Table 4. Hardness of grip and gauge with life fraction

Life Fraction (t/tr, %)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	67.5	75	82.5	100
Gauge/loaded	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
Hv	233	225	226	223	219	216	213	217	214	212	207	205	203	200	198	197
H_{Tr} [GPa]	2.596	2.542	2.542	2.499	2.521	2.466	2.434	2.456	2.434	2.423	2.369	2.358	2.326	2.304	2.25	2.153
H_{Tr} [Hv]	240	235	235	231	233	228	225	227	225	224	219	218	215	213	208	199
Grip/unloaded	B0	B1u	B2u	B3u	B4u	B5u	B6u	B7u	B8u	B9u	B10u	B11u	B12u	B13u	B14u	B15u
Hv	233	230	231	231	227	227	226	228	226	227	225	226	223	225	224	218
H_{Tr} [GPa]	2.596	2.618	2.618	2.65	2.596	2.564	2.553	2.596	2.607	2.542	2.618	2.607	2.542	2.553	2.542	2.466
H_{Tr} [Hv]	240	242	242	245	240	237	236	240	241	235	242	241	235	236	235	228

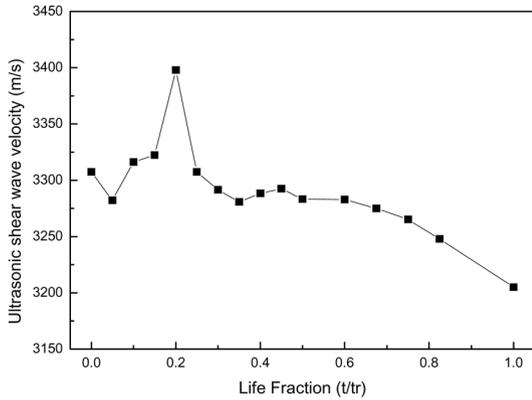


Fig. 6. Change of ultrasonic shear wave velocity with life fraction.

여 비파괴 평가의 한 방법인 초음파의 주요변수에 대한 연관성을 조사함으로써 재료의 열화정도를 평가하고자 하였다. 초음파 속도의 측정은 재료의 미세구조의 변화에 따른 밀도나 탄성률과 같은 물리량의 변화에 기초해 있다. 크리프와 같은 조건에 있는 재료의 경우 이러한 속도변화는 재료의 열화정도, 파(wave)의 모드에 의존하게 되는데 특히나 파의 전파 방향과 편광, 응력과의 상호 연관성에 의존하게 된다. 일반적으로 파의 속도는 기공이나 열화의 증가에 따라 점차 감소한다[12]. 재료의 열화 초기단계에서는 열화에 기인한 변화와 소재 자체가 가지고 있는 비균질성에 기인한 변화 사이의 차이를 거의 구분하기 힘든 것이 현실이다. 그러나 Fig. 6은 수명소비율에 따른 초음파의 횡파속도를 측정한 결과로 인위적으로 열화된 개량형 9Cr-1Mo 강의 수명소비율에 따른 속도감소 경향은 실험결과로부터 분명하고, 특히 횡파의 속도변화로부터 본 연구와 같은 크리프 손상의 검출을 위한 초음파 속도측정의 적용이 유용한 도구가 될 수 있음을 보여준다. 실제 적용단계 측정오차를 고려하면 다소 정성적 방법으로 평가할 수 있지만, 실험실적 측정에서는 매우 정확한 측정방법으로 분류할 수 있다. 그리고 Fig. 6에서 수명초기로부터 수명소비율 0.2까지 횡파속도가 증가하는 것은 개량형 9Cr-1Mo 강은 열화초기 단계에서 현저한 전위의 회복이 일어나는 것으로 잘 알려져 있으며 [3-6, 11], 이와 같이 전위의 밀도를 감소시키는 회복과 재결정 등의 미세조직 변화는 격자구조의 왜곡을 감소시켜 초음파 속도를 증가시킨다고 여러 연구에서

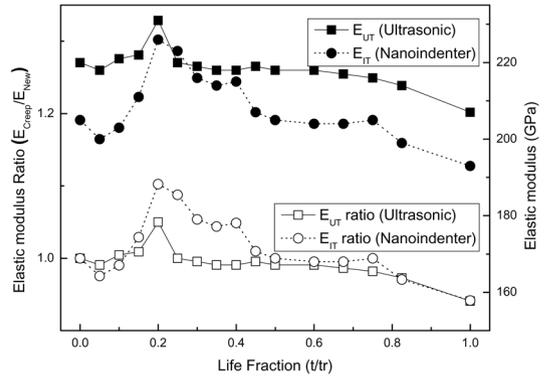


Fig. 7. Elastic modulus & ratio with life fraction.

보고된 바 있다[13-15]. 횡파의 속도 증가 후 수명 초기의 횡파속도 정도로 감소되는 수명소비율 0.2에서 0.8까지의 구간은 전위의 회복, 고용강화 원소인 Mo의 고갈 및 분산강화와 관련한 MC형 탄화물 감소에 의한 구 오스테나이트 입계에서의 $M_{23}C_6$ 형 탄화물과 Fe_2Mo 형의 Laves상의 증가 및 성장 등 초음파 속도의 증감에 영향을 미치는 여러 가지 요인이 복합적으로 반영된 결과이다[16, 17]. 마지막으로 수명소비율 0.8에서 파단까지의 구간은 미소균열, 기공 등과 같은 크리프 손상에 의해 초음파의 속도가 현저히 감소한다는 기존의 연구[12, 18, 19]와 일치하였다.

Fig. 7은 초음파의 속도측정으로부터 구한 탄성계수값[20]과 나노인덴터로부터 측정한 탄성계수값[8]을 측정값과 함께 미사용재에 대한 비로 나타낸 것으로 초음파 속도측정으로부터 식 (2)의 푸와송비(Poisson's ratio)를 구한 후 식 (3)으로 탄성계수를 구하였으며, 나노인덴터로부터 측정한 탄성계수값은 Sneddon stiffness equation[21]으로부터 압자형상 보정상수 β 가 고려된 식 (4)와 식 (5)에 의해 장비의 자동연산으로 환산되어 측정값을 얻을 수 있었다.

$$v = \frac{1 - 2(v_T/v_L)^2}{2 - 2(v_T/v_L)^2} \tag{2}$$

$$E = v_L^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \tag{3}$$

$$E_T = \frac{1 \cdot \sqrt{\pi}}{\beta} \frac{S}{2 \sqrt{A}} \tag{4}$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (5)$$

식 (2)에서 v_T 횡파의 속도, v_L 은 종파의 속도, 식 (3)에서 ρ 는 소재의 밀도, 식 (4)에서 E_r 은 환산 탄성계수, S 는 강성(stiffness), A 는 접촉투영면적, 식 (5)에서 E_s 는 시편의 탄성계수, E_i 는 압입자의 탄성계수, ν_s 와 ν_i 는 각각 시편과 압자의 푸와송비이다. 나노인덴터의 삼각 뿔 형태의 Berkovich 다이아몬드 압자의 경우 $E_i = 1141 \text{ GPa}$, $\nu_i = 0.07$, $\beta = 1.034$ 로 S 와 A 는 장비의 측정에 의해 E_r 을 구한후 최종적으로 시편의 탄성계수 E_s 를 구한다. 이러한 측정과 계산과정을 거친 결과인 탄성계수, 특히 초음파의 속도측정으로부터 구한 탄성계수는 식 (3)에서 알 수 있듯이 초음파 속도의 제곱에 비례하는 상관성을 가지고 있으므로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 Fig. 6의 초음파 횡파의 측정 결과와 경향이 거의 일치함을 볼 수 있다. 그리고 나노인덴터로부터 측정된 탄성계수 또한 초음파의 속도측정으로부터 구한 탄성계수와 서로 잘 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 개량형 9Cr-1Mo 강의 열화도를 비파괴적으로 평가하기 위한 우리의 시도가 의미있는 결과를 줄 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 개량형 9Cr-1Mo 강(A335 P91)의 미사용재와 인공시효 열처리재 및 수명소비율에 따른 크리프 중단 시험재 등을 대상으로 비파괴적으로 열화도를 평가하기 위한 몇가지 실험을 통하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 마이크로비커스와 나노압입시험의 측정 결과 약 10%이내의 오차범위로 시효시간의 증가에 따른 경도 및 경도비의 감소 경향성이 서로 잘 일치하고 있으며, 인장시험 결과와 환산한 인장강도의 비교 결과에서도 오차 범위 5%내에서 잘 일치하고 있어 마이크로비커스 경도와 나노압입시험의 측정 결과 및 인장강도는 각각의 시험 측정값이 나머지 다른 시험의 결과를 예측할 수 있는 지표가 될 수 있음을 알았다.

2. 크리프 중단 시험재의 그림부와 게이지부의 마이크로비커스 경도와 나노압입시험 측정 결과를 통해

여 수명소비율의 증가에 따라 열화가 촉진됨을 알 수 있었으며, 마이크로비커스 경도 값의 7% 이내의 오차범위로 경도 감소 경향이 매우 잘 일치하고 있어 마이크로비커스 경도와 나노압입시험 측정 결과로 수명소비율을 판단하는 자료로 사용 가능함을 알 수 있었다.

3. 초음파 속도측정에 의한 개량형 9Cr-1Mo강의 평가는 횡파 속도의 변화와 탄성계수 측정으로부터 연관성을 볼 수 있었다. 또한 나노인덴터로부터 측정된 탄성계수와 경향성이 일치하므로 초음파 속도측정에 의한 열화도의 비파괴적 평가가 의미 있음을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. C. R. Brinkman, B. and Gieseke, P. J. Maziasz : TMS, (1993) 107.
2. R. L. Klueh and A. T. Nelson : J. Nucl. Mater., **371** (2007) 37.
3. K. Hamada, K. Tokuno, Y. Tomita, H. Mabuchi, and K. Okamoto : ISIJ Int., **35** (1995) 86.
4. K. Sawada, M. Takeda, K. Maruyama, R. Komine, and Y. Nagae : ISIJ Int., **84** (1999) 581.
5. H. Kushima, K. Kimura, and F. Abe : ISIJ Int., **85** (1999) 841.
6. H. Okamura, et al. : Nucl. Eng. Des., **193** (1999) 243.
7. E. P. Papadakis : Rev. Sci. Instrum., **47** (1976) 806.
8. W. C. Oliver and G. M. Pharr. : J. Mater. Res., **7** (1992) 1564.
9. ISO 14577-2, Instrumented indentation test for hardness and materials parameters (2002).
10. ASTM A370-09aE1, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM, Philadelphia, PA., (2009).
11. Y. K. Hyun, J. D. Lee, and I. B. Kim : Key Eng. Mat., **270** (2004) 1206.
12. G. Sposito, et al. : NDT&E Int., (2010), doi:10.1016/j.ndteint.2010.05.012.
13. J. E. Lee, Y. C. Kim, J. P. Ahn, and H. S. Kim : Acta Mater. **53** (2005) 129.
14. M. Vasudevan, et al. : Scr. Metall. Mater. **30** (1994)

- 1479.
15. P. Palanichamy, et al. : NDT&E Int. **33** (2000) 253.
16. M. Hattestrand, M. Schwind, and H.O. Andren : Mater. Sci. Eng. A **250** (1998) 27.
17. S. Saroja, et al. : Acta Metall. Mater. **43** (1995) 2985.
18. T. Morishita, and M. Hirao : Int. Solid Struct. **34** (1997) 1169.
19. H. Jeong, and D. H. Kim : Mater. Sci. Eng. A **337** (2002) 82.
20. R. Truell, C. Elbaum and B. B. Chick : Ultrasonic Methods in Solid State Physics, Academic Press, Inc. (1969).
21. I. N. Sneddon : Int. J. Eng. Sci., **3** (1965) 47.