

# 경도측정을 이용한 고온 사용설비의 잔여수명 예측



●1949년생.  
●크립 및 피로파괴를 전공하였으며, 고온 사용재료의 수명 예측 및 파괴원인 규명에 관심을 가지고 있다.

김 재 철

한국전력기술연구원 발전연구실



●1957년생.  
●응력부식을 전공하였으며, 고온 사용설비의 경년열화 및 수명예측과 재료의 극저온 특성에 관심을 가지고 있다.

이 해 무

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

## 1. 머리말

화력발전 설비나 화학 플랜트 설비를 구성하는 재료들은 사용시 고온에 장시간 노출되며 노출 시간에 따른 재료의 미세조직의 변화에 의하여 강도나 연성이 저하된다. 특히 고온에서 하중을 받는 경우에는 조직 변화의 가속화에 의하여 강도나 연성의 저하는 더욱 심해진다. 이런 현상을 경년열화라고 부르는데 이에 의한 재료의 손상을 검출하여 설비의 잔여수명을 평가하는 것은 설비의 안전성 확보나 경제적인 운용을 위해서 매우 중요하다.

잔여수명 평가법은 크게 ① 파괴적 방법, ② 비파괴적 방법, ③ 해석적 방법으로 분류된다. 구조물의 사용 재료와 사용 환경을 충분히 반영하여 평가하려면 실기(實機)로부터 소형 시험편(miniature specimen)을 직접 채취하여 크립파단시험 등을 하여 잔여수명을 구하는 것이 최선이지만 모든 부품이나 부위에 적용한다는 것은 불가능하고 또한 극히 제한된 부위에서만 시험편을 채취할 수 있다는 제약이 뒤따른다. 비파괴적 방법은 실기를 크게 훼손시키지 않고 손상 상태를 직접적으로 파악할 수 있다는 장점이 있으나 손상량의 정량화와 추정 손상량의 정확도 향상이 문제점으로 남아 있

다. 해석적 방법은 실기로부터 시험편을 채취할 수 없거나 비파괴적 방법으로도 곤란한 경우 간접적으로 손상을 평가하는 방법으로서 미 사용재에 대한 실험 데이터가 있다면 추정 정확도가 상당히 좋으며 운전 조건이 변하는 경우에도 이를 고려하여 평가할 수 있다는 장점이 있다. 파괴적 방법이나 해석적 방법은 평가하는 데에 많은 시간을 필요로 하나 비파괴적 방법은 비교적 손쉽게 단시간 내에 많은 위치를 진단할 수 있고 정기적인 진단도 가능하기 때문에 많은 관심이 집중되고 있다.

종래의 정기점검에 주로 사용된 육안검사, 침투탐상검사, 자분탐상검사, 초음파탐상검사 등과 같은 비파괴 결함 검사는 거시적인 균열이나 결함만을 검출할 수 있으며 균열이 발생될 때까지의 평가 즉 수명 소비와 손상 정도를 검출하는 것은 불가능하였다. 따라서 재료가 열화됨에 따라 물리적 성질 및 미세조직이 변화되는 것에 착안하여 그들의 변화량과 손상도 또는 열화도와의 관계를 정량적으로 파악함으로써 잔여수명을 진단하는 즉 균열 발생 이전의 손상을 포함한 조기 손상을 검출하는 비파괴 손상 검출 기술이 여러 방면으로 연구되고 있다.

비파괴적 손상 검출 방법에는 금속조직관찰법,<sup>(1,2)</sup> 경도법,<sup>(3-7)</sup> 전기저항법,<sup>(8)</sup> 적기분극법,

(9,10) 등이 보고되고 있다. 이 중에서 경도법은 시험이 간편하고 실용화 가능성이 가장 높은 방법의 하나로 알려져 있으며, 앞으로 현장에서 많이 응용되리라 기대되므로 경도 측정에 의한 고온 설비의 잔여 수명 평가법에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 경도시험법

경도를 알면 재료의 다른 성질, 예를 들면 강도, 내마모성, 변형저항 등을 알 수 있기 때문에 경도값 자체를 알기 위해서 뿐만 아니라 그 밖의 다른 성질을 추측하기 위해서 경도시험을 한다. 따라서 경도시험을 실시하여 다른 성질을 추측하고자 할 때에는 알고자 하는 성질에 민감한 경도시험법을 선택하는 것이 가장 중요하다. 또한 경도와 다른 성질과의 상관 관계는 이론적인 것이 아니고 경험적인 것이며, 경도값은 측정 조건에 따라 상당히 변하기 때문에 시험 조건을 일정하게 해주어야 한다.

경도시험법은 시험하는 방법에 따라 크게 압입경도시험, 동적경도시험, 굽기경도시험으로 대별된다. 압입경도시험은 압자(indentor)로 시험편을 누를 때 나타나는 변형 저항의 크기를 경도로 나타내는 것으로서 브리넬, 로크웰, 비커스경도시험 등이 대표적이다. 동적경도시험은 압자로 시험편을 충격적으로 압입할 때 나타나는 변형 저항의 크기 또는 압자의 반발 정도를 경도로 나타내는 것으로서 쇼아, 에코팁경도시험 등이 있다. 현장에서 경도시험을 하기 위해서는 시험기를 휴대할 수 있어야 하기 때문에 전자식 쇼아 경도시험기나 에코팁 경도시험기가 많이 사용되고 있는 반면에 수명 평가를 하는 데에는 비커스경도값이 사용되고 있기 때문에 이들 경도간에 환산이 필요하다. 현재 재료의 종류별로 여러 환산표가 사용되고 있는데 이들 사이에는 커다란 차이점을 발견할 수 있다. 이것은 측정 조건이나 시험편의 상태에 따라 환산 관계가 현저히 변화하기 때문이다. 따라서 경도 환산은 되도록 피하여야 하

나, 여러 가지 문제로 규정된 시험을 할 수 없는 현장에서는 신뢰도는 떨어지지만, 다른 경도시험을 하여 환산 경도값을 사용하고 있는 실정이다.

## 3. 경도 측정을 이용한 잔여수명 예측

경도를 측정하여 잔여수명을 예측하는 경우, 경도값 자체를 이용하거나 경년열화에 따른 경도의 감소량 혹은 경도비를 이용한다. 이들 방법은 주로 일본에서 개발되어 사용되어 왔으며 현재는 손상도의 추정 정확도를 높이기 위한 연구가 진행 중에 있다. 이들 방법을 사용하기 위해서는 잔여수명 예측 대상 부위인 고온·고응력 부의 경도값(손상재의 경도)을 알아야 할 뿐만 아니라 대상 부위와 온도는 같으나 응력이 걸리지 않는 부위 또는 저응력부의 경도값

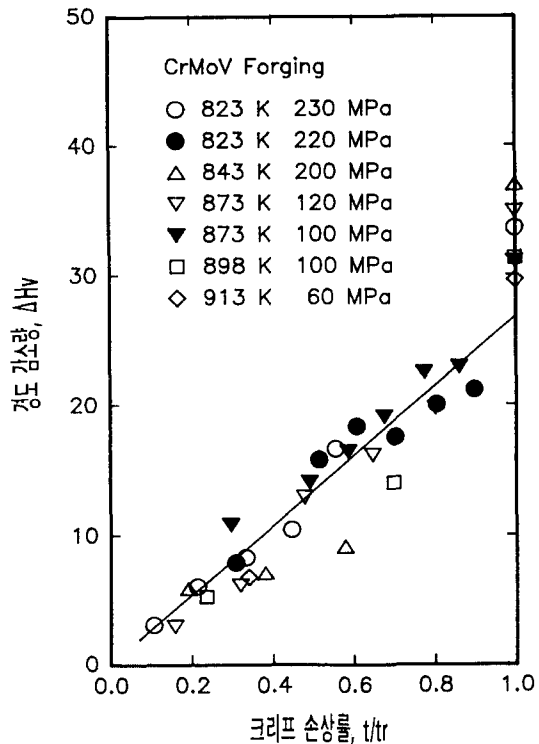


그림 1 경도감소량,  $\Delta Hv$ 와 크립손상률,  $t/tr$ 과의 관계(I)

(무부하 가열재의 경도)이나 경년열화가 일어나지 않은 원사용재의 경도값( $H_{v0}$ : 원재의 경도)을 알아야 하는 경우도 있다. 경도법은 크립이나 피로손상을 평가하는데 사용되고 있는데 피로손상 평가법은 크립손상 평가법과 기본적으로는 거의 같으므로 이 글에서는 경도 측정법을 이용한 고온 사용 설비의 크립 수명 예측법에 대해서만 살펴보기로 한다.

3.1 경도 감소량을 이용하는 경우<sup>(3,4)</sup>

손상재와 무부하가열재와의 경도차,  $\Delta H_v$ 를 구하여 그림 1 또는 2와 같은 경도 저하량과 크립 손상과의 관계로부터 크립 손상량을 추정하는 방법이다. 그림 2에서와 같이 경도차,  $\Delta H_v$ 는 일정한 폭을 갖고, 크립 손상도의 증가에 따라 직선적으로 증가하는, 좋은 상관관계를 나타내고 있다.

3.2 경도값을 이용하는 경우<sup>(4-6)</sup>

크립파단시험 결과와 경도간에는 그림 3과 같은 상관관계가 있으며 이는 식 (1)로 근사시킬 수 있다.

$$T(20 + \log t_r) = C(\sigma) H_v + D(\sigma) \quad (1)$$

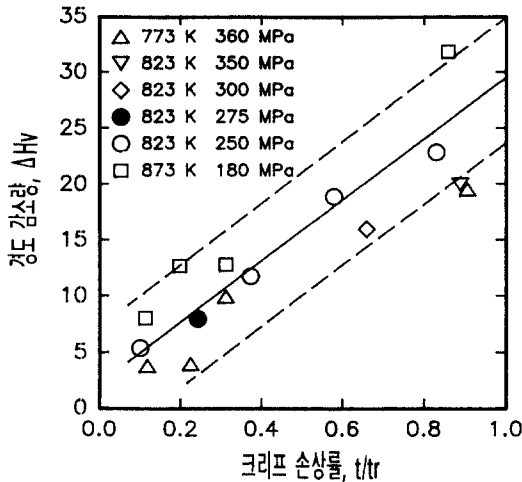


그림 2 경도감소량,  $\Delta H_v$ 와 크립손상률,  $t/tr$ 과의 관계(II)

여기서,  $T$ 는 절대온도이고,  $t_r$ 은 크립파단시간이다.  $C(\sigma)$ 와  $D(\sigma)$ 는 응력,  $\sigma$ 만의 함수이며  $C(\sigma)$ 와  $D(\sigma)$ 를 응력에 대하여 도식한 그

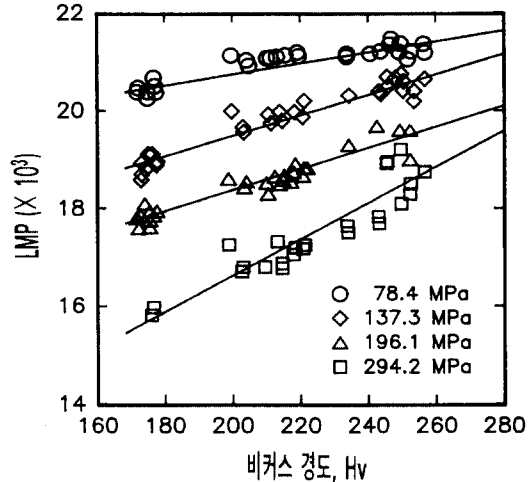


그림 3 Larson-Miller 변수(LMP)와 비커스 경도값,  $H_v$ 와의 관계(Cr-Mo-V강)

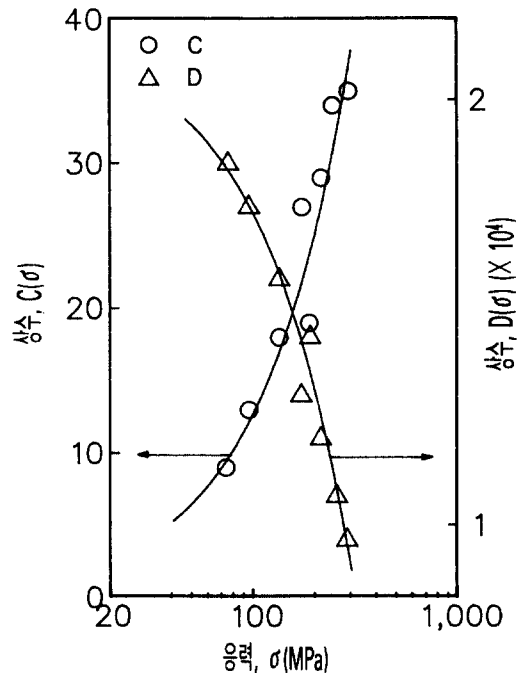


그림 4 LMP와  $H_v$ 와의 관계에 있어서의  $C(\sigma)$ 와  $D(\sigma)$ 의 응력 의존성(Cr-Mo-V강)

림 4로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$C(\sigma) = C_1 + C_2 \log \sigma + C_3 (\log \sigma)^2 \quad (2)$$

$$D(\sigma) = D_1 + D_2 \log \sigma + D_3 (\log \sigma)^2 \quad (3)$$

여기서,  $C_i$ 와  $D_i$  ( $i=1, 2, 3$ )는 재료상수이다. 따라서 실기의 경도를 측정하면 경년열화 후의 크립파단시간을 알 수 있어 잔여수명을 예측할 수 있다.

그림 5는 경도를 변수로 하여 크립파단강도와 TTP(time-temperature-parameter)의 관계를 실험실적으로 구한 것이다. 이를 이용하여 실측 경도 및 사용 응력으로부터 이에 상응하는 Pr을 구하여 식 (3)으로부터 사용 온도 ( $T$ )에서의 잔여수명,  $L_R$ 를 구할 수도 있다.

$$L_R = 10^{Pr/T-C} \quad (4)$$

그러나 이들 방법들은 사용 응력을 알고 있어야만 잔여수명을 예측할 수 있다는 단점이 있다.

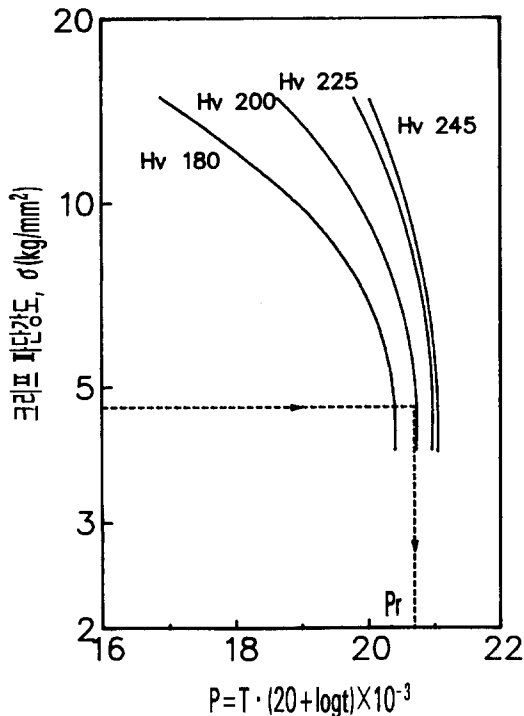


그림 5 크립에 의한 경도값의 변화(Cr-Mo-V강)

### 3.3 경도비를 이용하는 경우<sup>(4,7)</sup>

Goto 등<sup>(7)</sup>은 경년열화에 의한 경도 저하는 단순 가열에 의한 영향과 응력에 의한 영향으

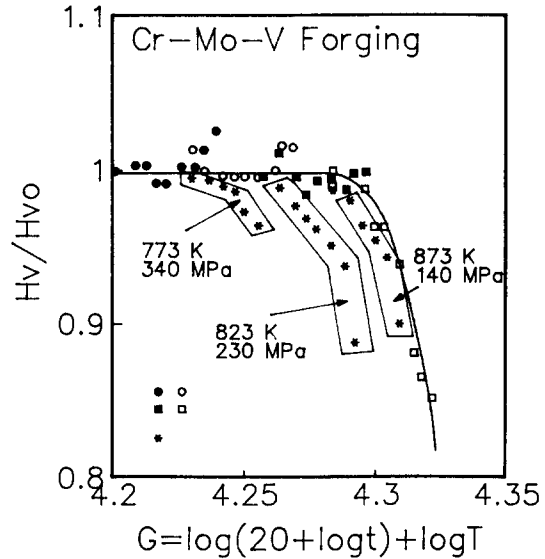


그림 6 무부하 장시간 가열재와 크립 시험재의 G변수에 대한 경도비의 변화(Cr-Mo-V강)

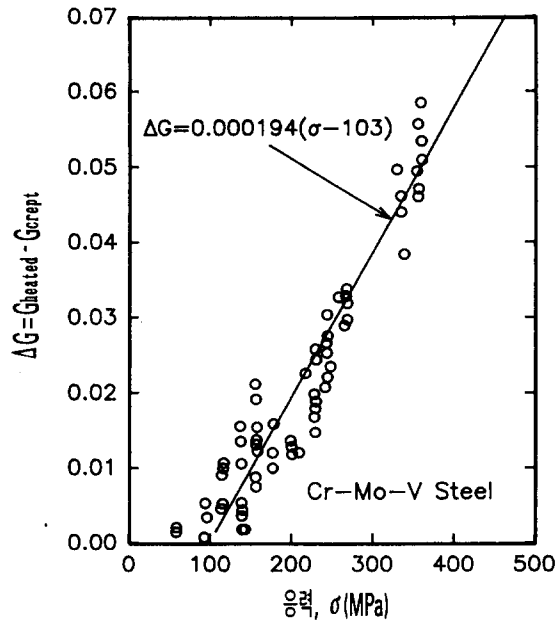


그림 7 크립 응력과 ΔG와의 관계(Cr-Mo-V강)

로 구분할 수 있다고 생각하여 TTP를 이용한 새로운 변수,  $G$ 를 식 (4)와 같이 정의하고, 응력이 부가되는 경우에는 그에 의한 영향으로  $\Delta G$ 만큼의 변화가 일어난다고 생각하였다.

$$G = \log T + \log (20 + \log t) \quad (5)$$

여기서,  $T$ 는 절대온도,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

무부하 장시간 가열재와 여러 응력하에서 크립시험한 시험재의 경도( $H_v$ )를 원재의 경도( $H_{v0}$ )로 표준화하여  $G$ 에 대하여 도시하면 그림 6의 결과를 얻는다.

이로부터 동일한  $H_v/H_{v0}$ 에서 가열재의  $G$ 값과 크립 시험재의  $G$ 값과의 차이( $\Delta G$ )를 구하여 시험 응력에 대하여 도시하면 그림 7과 같이 양자간에는 식 (5)의 직선 관계가 성립한다.

$$\Delta G = 0.000194(\sigma - 103) \quad (6)$$

( $\sigma$ 의 단위는 MPa임)

결국 경도변화(연화)는 식 (6)을 이용하여 그림 8과 같이 온도·응력·시간 변수,  $G'$ 로 정리할 수 있다.

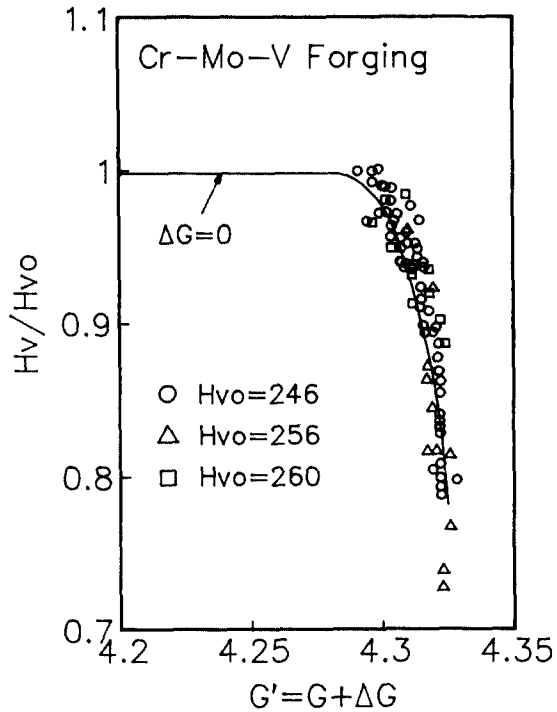


그림 8 크립 시험재의  $G'$  변수에 대한 경도비의 변화 (Cr-Mo-V강)

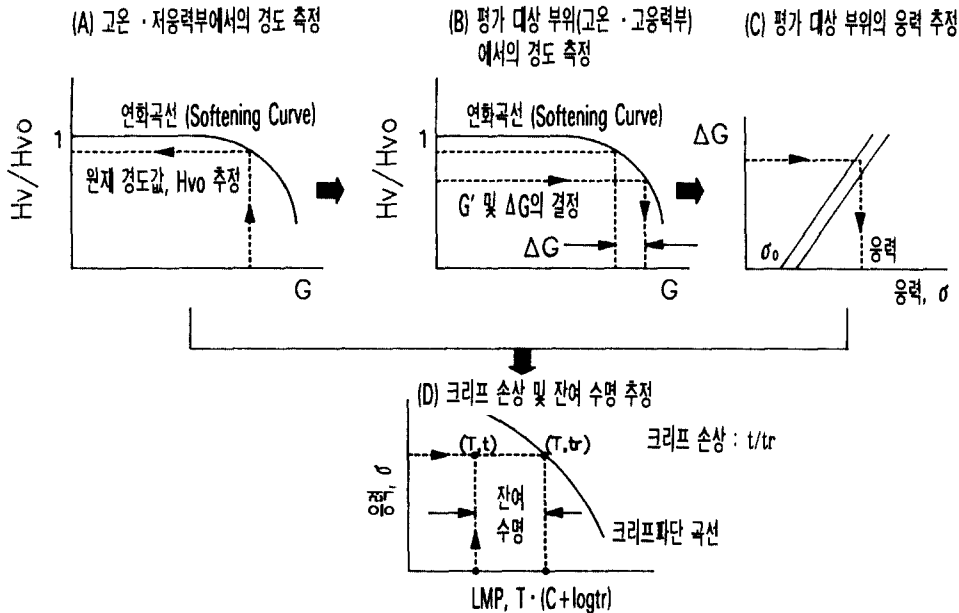


그림 9 경도 측정을 이용한 크립손상과 잔여수명 예측법

$$G' = G + 0.000194(\sigma - 103) \quad (\sigma \geq 103\text{MPa}) \quad (7)$$

$$G' = G \quad (\sigma < 103\text{MPa}) \quad (8)$$

사용온도와 사용시간을 알고 있는 경우,  $G$  변수를 이용하여 잔여수명을 예측하는 방법을 그림 9를 이용하여 개략적으로 설명하고자 한다.

먼저 손상 검출 위치(고온·고응력부)와 등온·저응력부( $\sigma < 103\text{MPa}$ )를 선정하여 경도를 측정한다. 그림 9A와 같이 저응력부의 경도 측정 결과로부터 연화곡선을 이용하여 원래의 경도,  $H_{v0}$ 를 결정한 뒤 평가 대상 부위의 경도비,  $H_v/H_{v0}$ 로부터 그림 9B와 같이  $G'$ 을 구하여  $\Delta G$ 를 계산하고 그림 9C에 나타낸  $\Delta G = C_1(\sigma - C_2)$ 의 관계로부터  $\sigma$ 를 추정한다. 그림 9D에 나타낸 바와 같이  $\sigma$ 와  $T(20 + \log t_r)$ 의 관계(일본 금속재료기술연구소의 NRIM creep data sheet과 같은 기존의 시험 결과 이용)로부터 수명( $t_r$ )을 구할 수 있으므로  $t_r$ 과 사용시간( $t_c$ )으로부터 수명소비율,  $\phi_c$ (즉  $t_c/t_r$ )를 결정하면 잔여수명( $L_R$ )은 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$L_R = t_c \left( \frac{1}{\phi_c} - 1 \right) \quad (9)$$

이와 같이 사용 온도와 사용 시간을 알고 있는 경우에는 원래의 경도와 사용 응력을 추정할 수 있고 원래의 경도값과 사용 시간을 알고 있는 경우에는 사용 온도와 사용 응력을 추정할 수 있다는 장점이 있다.

#### 4. 손상 평가법의 검증<sup>(3)</sup>

여러 기관에서 제안하여 사용하고 있는 상기의 방법들의 정확도 및 신뢰성을 검증하기 위하여 일본의 전력중앙연구소에서 인공적으로 크립 손상재를 만들어 라운드 로빈테스트(round robin test)를 실시하였다. 즉 로터 재질로 시험편을 만들어 586°C의 온도에서 150MPa의 하중으로 크립파단시험을 실시하여 파단시간을 구한 뒤, 별도로 두 종류의 크립시험 중단재를

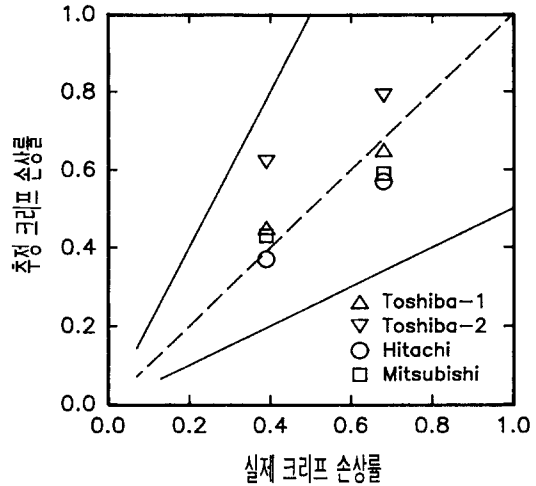


그림 10 추정 크립손상과 실제 크립손상과의 비교

만들어 이들에 대한 비파괴 손상검사를 각 기관에 의뢰하여 손상도를 추정하도록 하였으며 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 실제손상도는 크립파단시간에 대한 크립시험 중단시까지의 시간을 나타내며 실선은 추정치가 실제 손상의 1/2 및 2배가 되는 선을 표시한다. 평가 결과에 다소의 흐트러짐은 있으나 추정치가 실험치의 1/2~2배의 범위내에 존재하는 비교적 양호한 추정 결과를 얻었다.

#### 5. 맺음말

고온 사용 설비의 잔여수명을 진단하는 비파괴적인 여러 가지 방법 중에서 현장에서 간단히 측정을 함으로써 경년열화 정도를 비교적 쉽게 알아낼 수 있는 경도법에 대하여 살펴보았다. 이 방법은 크립손상 평가뿐만 아니라 피로 손상 평가에도 사용되고 있으며 외국의 경우 현장에서 많이 사용되고 있는, 가장 보편화된 방법 중의 하나이다. 국내의 경우에도 노후화된 고온 사용 설비가 상당수되기 때문에 설비의 안전성이나 경제적인 운용을 위해서 이들의 손상 정도를 정기적으로 진단할 필요성이 매우 크나 이에 대한 연구 성과는 외국에 비하

여 미미한 편이기 때문에 앞으로 이에 대한 많은 노력이 이루어져야 한다고 생각된다. 특히 현장에서는 휴대용 시험기를 사용하여야 하나 수명평가에는 비커스 경도값을 사용하고 있기 때문에 이들의 경도 환산에 대한 D/B 확충이 시급한 실정이다. 또한 기존 기술의 습득 및 손상 평가의 정확도 향상, 새로운 방법들의 개발 그리고 이들의 현장 적용 등을 위해서는 실기 사용재의 입수, 정보교환, 전문가시스템(expert system) 개발을 위한 D/B 구축 등 산·학·연의 협동이 절실히 요구된다.

### 참고문헌

- (1) 増山不二光, 西村宣彦, 1988, “金屬組織學的クリープ壽命評價法(MLAS)の開発,” 金屬學會會報, Vol. 27, No. 4, pp. 287~289.
- (2) Neubauer, B. and Wedel, U., 1983, “Residual Life Estimation of Creeping Components by Means of Replicas,” ASME Int. Conf. on Advances in Life Prediction Methods, Albany, N.Y., pp. 307~313.
- (3) CRIEPI, 1989, “Results of the Non-Destructive Evaluation Round Robin Test (II),” The Third CRIEPI-EPRI Workshop on Fossil Power Plants, Tokyo, Japan, pp. 1~19.
- (4) 村田肇 外, 1989, “タービン設備の余壽命診断と耐力向上對策,” 火力原子力發電, Vol. 40, No. 397, pp. 1170~1217.
- (5) Kimura, K., Fujiyama, K. and Muramatsu, M., 1988, “Creep and Fatigue Life Prediction Based on the Non-Destructive Assessment of Material Degradation for Steam Turbine Rotors,” High Temperature Creep Fatigue, Elsevier Applied Science Publishers, Barking, U.K., pp. 247~270.
- (6) Kimura, K., Fujiyama, K., Ishii, F. and Muramatsu, M., 1986, “Effect of Material Degradation of Creep Properties and Life Estimation, Int. Conf. on Creep, Tokyo, Japan, pp. 343~348.
- (7) 後藤徹, 1983, “Cr-Mo-V 鍛鋼部材のクリープ損傷の非破壊検出,” 材料, Vol. 32, No. 356, pp. 563~568.
- (8) 祐川正之, 1988, “高温材料の非破壊手法によるクリープ損傷評價,” 壓力技術, Vol. 26, No. 6, pp. 361~367.
- (9) 齋藤喜久, 壓子哲雄, 波邊農, 1991, “電氣化學的手法によるステンレス鋼の材質劣化現位置評價技術の開発,” 日本機械學會論文集(A編), Vol. 57, No. 538, pp. 1442~1448.
- (10) Watanabe, Y. and Shoji, T., 1991, “The Evaluation of In-Service Materials Degradation of Low-Alloy Steels by the Electro-Chemical Method,” Metallurgical Transactions, Vol. 22A, No. 9, pp. 2097~2106. 