

# 발전소 고온부의 수명 평가를 위한 소형 시편용 크리프 시험기의 개발

김효진\* · 정용근\*\* · 박종진\*\*  
(2000년 3월 16일 접수)

## Development of Small-Specimen Creep Tester for Life Assessment of High Temperature Components of Power Plant

Hyo-Jin Kim, Yong-Keun Chung and Jong-Jin Park

**Key Words :** Sampling Device(시편 채취기), Small-Specimen Creep Tester(소형 시편용 크리프 시험기), Electron Beam Welding(전자빔 용접), Creep Rupture Time(크리프 파단시간)

### Abstract

The most effective means of evaluating remaining life is through the creep testing of samples removed from the component. But sampling of large specimen from in-service component is actually impossible. So, sampling device and small-specimen creep tester have been applied. Sampling device has been devised to extract mechanically small samples by hemispherical, diamond-coated cutter from the surface of turbine rotor bores and thick-walled pipes without subsequent weld repairs requiring post weld heat treatment. A method of manufacturing small creep specimen, 2mm gage diameter and 10mm gage length, using electron beam welding to attach grip section, has been proven. Small-specimen creep tester has been designed to control atmosphere to prevent stress increment by oxidation during experiment. To determine whether the small specimens successfully reproduce the behavior of large specimens, creep rupture tests for small and large specimens have been performed at identical conditions. Creep rupture times based on small specimens have closely agreed within 5% error compared with that of large specimen. The errors in rupture time have decreased at longer test period. This comparison validates the procedure for fabricating and testing on small specimen. This technique offers potential as an efficient method for remaining life assessment by direct sampling from in-service high temperature components.

### 1. 서 론

국내에서는 1990년대 초반부터 화력발전 설비의 건전성과 설계수명을 확보하기 위한 목적으로 한전 발전소를 대상으로 한 정밀진단 및 수명평가가 수행되어오고 있다. 수명평가의 절차는 미국 전력연구소(EPRI)에서 제시한 가이드라인(guideline)이 표준이 되고 있으며, 절차는 크게 3 단계로 나눌 수 있다.<sup>(1)</sup> 1 단계는 설계코드를 역으로 적용하여 수명을 계산하는 단계이며, 2 단계는 설계데이터가 아닌 온도, 압력 등의 실제 측정 데이터를 이용하여 수명을 계산하는 단계이다. 3 단계에서는 실기 부재(component)의 미세조직 관찰 또는 소형

의 시료를 채취하여 수명을 평가한다. 현재 국내에서 수행되는 3 단계 수명평가는 표면복제(replication)로부터 얻은 미세조직을 이용하여 고온설비의 크리프 손상을 주로 평가하고 있지만 보다 정확한 수명예측이 요구될 경우에는 소형시료의 채취에 의한 파괴적인 평가가 적용되어야 한다. 그러나 종래의 파괴 시험편을 실기부재에서 채취하는 것은 보수용접과 후열처리가 필수적으로 수반되어야 하고 재료의 강도에 큰 영향을 주기 때문에 시편채취상의 제한이 따른다.

한편, 크리프 잔여수명을 평가하기 위해서는 실기 부재의 사용응력에서 시험온도를 사용온도보다 높게 하여 크리프 파단시험을 수행하고 이 결과로부터 실제 온도까지 외삽하여 잔여수명을 평가하는 등응력(iso-stress) 가속온도 시험법이 적용되고 있다.<sup>(2,3)</sup> 이 평가법을 적용할 경우, 고온튜브

\* 회원, 항공기능대학

E-mail : hyojin@hanjung.co.kr

TEL : (055)278-3692 FAX : (055)278-8532

\*\* 한국중공업(주) 기술연구위

와 같은 박판의 재료에서는 길이방향보다 응력이 높은 원주방향의 응력을 실제 사용응력으로 하여 시험을 해야 하고 시편도 원주방향에서 채취되어야 정확한 수명이 얻어질 수 있다. 이 때문에 표준 시편 보다는 소형화된 시편에 의한 크리프 파단 시험이 요구되어지고 있다. 그러나 박판의 튜브재료에서 시편의 제작이 한계가 있고 소형 시편을 시험할 수 있는 전용장비가 없기 때문에 국내에서는 소형시편을 이용한 크리프 시험의 적용 예가 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사용중인 부재에서 재료의 강도에 영향을 미치지 않고 보수용접이 필요 없을 정도의 소형의 시료를 직접 채취할 수 있는 시편 채취기의 적용과 소형시편의 제작방법을 검토하고 표준시편과 소형시편의 크리프 시험결과를 비교함으로써 제작한 소형 시편용 크리프 시험기를 검증하여 향후 고온 후속부 및 고온 튜브와 같은 박판재료에 대한 수명평가 적용가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 시편 채취기의 적용

### 2.1 시편채취 원리

재료 표면의 미소 샘플을 채취하기 위한 채취 방법으로 현장 적용성 및 범용성 면에서 우수한 기계가공 방식을 채택하였다.<sup>(4)</sup>

시편의 채취로 인하여 재료의 표면은 응력 집중부에 의한 재료의 구조적 강성(stiffness)을 변질시키지 않아야 하므로 절삭면이 반타원의 형상(geometry)을 갖도록 반구형(hemispherical)의 커터를 이용하였다. 반구형 커터의 선단부에는 다이아몬드 입자를 코팅처리 하였다. 커터는 구동용 모터의 축을 중심으로 회전하며, 절삭이 가능케 하기 위해 주축에 유니버설 조인트로 연결한 이축(trunnion) 베어링에 모터를 이용하여 단계적으로 이송량을 조절하도록 하였다. 따라서 커터의 이송으로 채취된 샘플은 부재의 표면의 굴곡과 커팅 휠의 반경에 의해 결정되는 반타원형으로 두께 약 5 mm, 직경 30 mm 정도이다.

시편 채취기의 고정(fixture)은 원통형 파이프의 외측에서 작업할 경우 밴드형의 띠를 사용하거나 자석(magnet)을 이용하여 고정하는 반면, 내측의 경우 장비에 연결된 공기 실린더(air cylinder)의 압력으로 압력발(pressure foot)에 의해 고정하는 방식을 택함으로써 작업위치에 관계없이 샘플의 채취가 가능하도록 하였다.

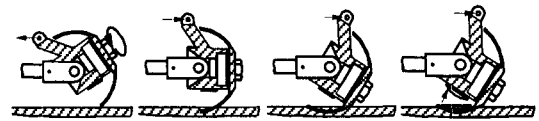


Fig. 1 Sampling procedure

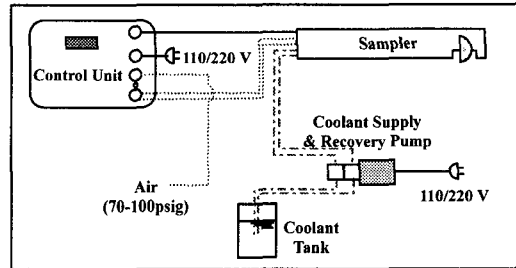


Fig. 2 Schematic diagram of sampling device

절삭면에 미세조직상의 융합상태를 만들지 않도록 하기 위해 가공 중에는 절삭유가 공급되고 사용된 절삭유는 회수용 펌프(recovery pump)에 의해 재사용된다. Fig. 1 에서 절삭과정을 보여주고 있으며, Fig. 2 에는 장비의 구성도를 나타내었다.

### 2.2 시편제작

재료 표면에서 채취될 미소 샘플의 크기는 부재의 허용 치수범위를 기준으로 하고 응력 증가를 동반하지 않도록 충분한 해석을 통하여 최대 크기가 결정된다. 통상적으로 고온헤더의 제작조건에 따라 길이 20 mm, 깊이 10 mm 의 길이방향의 얇은 프리즘 형상의 샘플 채취가 허용된다고 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 따라서 중공 실린더에서 깊이 5mm, 직경 30 mm 의 반타원형 샘플의 채취는 가능하다. 이 샘플은 채취될 부분을 최소화하였기 때문에 소형 크리프 시편의 표점거리부에만 이용될 수 있으며, 시편나사부(grip)를 연결하는 방법을 고려할 필요가 있다. 레이저, 방전, 마찰 및 전자빔 용접 등 종래의 방법들 중에서 전자빔 용접이 가장 만족할 만한 결과를 보인다고 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 소형 크리프 시편의 제작 과정은 우선, 채취된 샘플로부터 와이어 방전가공기(wire cut electrical discharge machine)에 의해 3 mm x 3 mm x 15 mm 의 직육면체 형상으로 절단하여 표점거리부를 준비한다. 시편나사부는 Fig. 3 의 시편제작 과정에 보이는 바와 같이 시편과 유사한 강(steel)으로 3 mm 의 폭을 가공하여 여기에 표점거리부 시편을 삽입하고 시편의 양쪽에도 시편크기와 동일한 재료를 같이 삽입한 다음 전자빔 용접(electron beam welding; EBW)을 하였다. 용접은 표점거리부와 시편나사부가 밀

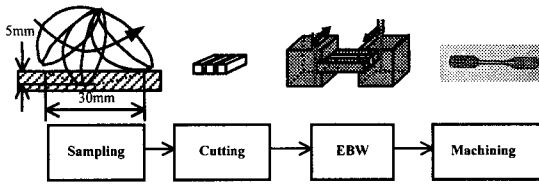


Fig. 3 Manufacturing procedure of specimen

착된 상태에서 경계면에 수행되었다. 용접한 후 시편은 최종 시편 크기인 직경 2 mm, 표점거리 10 mm 로 가공되었다.

### 3. 소형 시편용 크리프 시험기

#### 제작 및 실험

##### 3.1 시험기 제작

소형시편을 이용한 크리프 파단시험을 위해 제작된 소형 시편용 크리프 시험기를 도식적으로 Fig. 4 에 나타내었다. 하중방식은 직접하중 방식을 채택하였으며, 시편은 고정판(fixed plate)에 설치된 지지대의 너트(nut)에 의해 고정되고 풀로드(pull rod)를 통하여 하중이 가해진다. 또한 시험중의 온도 조절은 3-Zone 가열로를 사용하여 컨트롤러에서 조절토록 하였으며 온도조절을 위한 열전대는 챔버 내부의 시편에 가깝게 설치하였다. 작은 단면적의 시편을 이용하여 크리프 실험을 수행할 경우, 산화(oxidation)에 의한 단면적 감소로 야기되는 응력증가를 피하도록 하기 위하여 시편설치가 완료되면 분위기 처리를 위한 챔버를 체결하고 고정판에 위치한 입구 및 출구를 통해 불활성 가스(Ar)가 통과되고 진공을 유지할 수 있도록 하였다. 진공출구는 시험온도까지 승온시키는 과정에서 발생하는 윤활제의 산화가스의 배출을 위해 사용되고 불활성 가스 입구는 시험중 시편의 산화방지 목적으로 사용된다. 시험중 챔버 내의 불활성 가스 압력은  $0.05 \text{ kgf/cm}^2$  (0.049 bar)로 유지시켰다. 부과된 하중에 의해 풀 로드(rod)의 이동이 가능하고 동시에 챔버내의 밀폐가 이루어지도록 하기 위해 금속 벨로우즈(metal bellows)가 부착되어 있다. 시험중에 발생하는 고열의 전도로 인한 금속 벨로우즈의 손상을 막기 위해 챔버 내부에는 열차폐 판(radiant plate)을 설치하였으며, 고정판(fixed plate)에는 냉각수가 순환되도록 하였다. 또한 선형게이지(linear gauge)를 이용하여 시험중 발생하는 크리프 변형을 측정할 수 있도록 하였다.

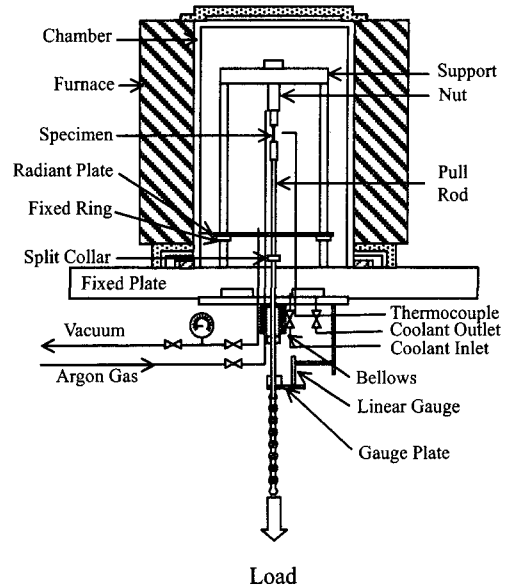


Fig. 4 Schematic diagram of small-specimen creep tester

Table 1 The condition of aging heat treatment

ID	Temperature(°C)	Time(hr)
TA60-4	600	4214.3
TA65-6	650	8000.0

Table 2 Chemical composition(wt%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Specimen	0.2	0.28	0.69	0.012	0.001	11.32	0.83	0.42	0.27
DIN 17175	0.17 ~ 0.23	≤0.5	≤1.0	Max. 0.03	Max. 0.03	10.0 ~ 12.5	0.8 ~ 1.2	0.3 ~ 0.8	0.25 ~ 0.35

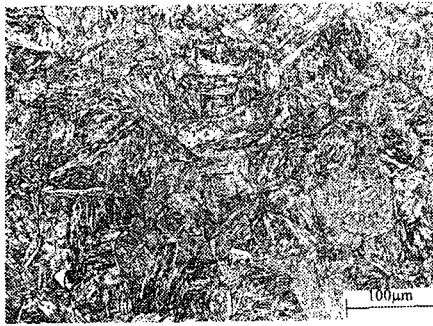
##### 3.2 크리프 파단시험

###### 3.2.1 시편

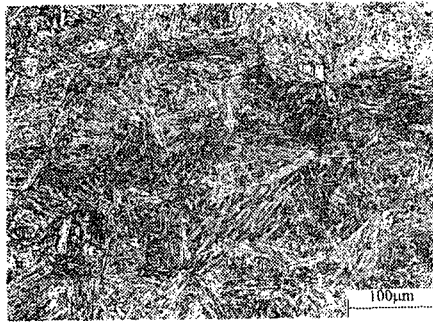
시편은 500 MW 한국 표준형 보일러의 고온 후속부에 사용되는 DIN 규격의 X20CrMoV12 1 강(12% Cr)으로서 템퍼드 마르텐사이트 단조강이며, Table 1 과 같이 시효열화처리(aging heat treatment)된 두개의 열화재를 준비하였다. 화학조성을 Table 2 에서 보여주고 있으며, 각 열처리 조건에서의 미세조직을 Fig. 5 에 보여주고 있다. 결정입도는 ASTM 4~4.5 로서 결정입자 크기는 대략 50 ~ 100 μm 이다. 시편은 표준 크리프 시편과 소형 크리프 시편에서 공히 단면적 대 표점거리의 비를 1:4 이상으로 하여 제작하였으며, 표준시편의 경우 변위 측정을 위해 에지를 가공하였다. Fig. 6 에 시편의 형상을 나타내었다.

###### 3.2.2 실험방법

Single Lever Arm 하중방식의 표준 크리프 시험

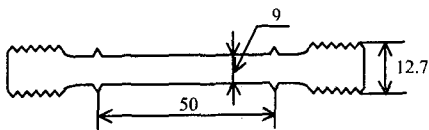


(a) TA60-4

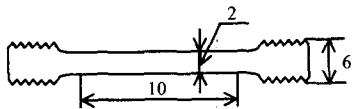


(b) TA65-6

Fig. 5 Microstructures at each aging heat treatment



(a) Conventional creep specimen



(b) Small creep specimen

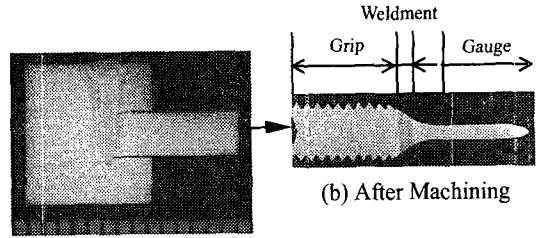
unit : mm

Fig. 6 Geometry of creep specimen

기와 직접하중 방식의 소형시편 크리프 시험기를 이용하여 각 열화재의 크리프 파단시험을 수행함으로써 재료의 크리프 파단시간( $t_r$ )을 계측하였다. 시험중 시편온도는  $\pm 2^\circ\text{C}$  이내에서 유지시켰다.

### 3.2.3 실험결과 및 고찰

소형시편을 사용할 경우 결정입자 크기 및 개재물 크기 등의 미세조직적인 인자들이 시험결과에 영향을 주어서는 안된다. 문헌에 의하면, 결정



(a) After EBW

(b) After Machining

Fig. 7 Cross section of electron beam welded specimen

입자의 크기가  $50\ \mu\text{m}$  인 Normalized & Tempered 페라이트강(ferritic steel)에서는 직경 2 mm의 소형시편은 그 이상의 직경을 갖는 시편과 직경 차이에 의한 상호작용의 영향은 없는 것으로 보고되고 있다.<sup>(6,7)</sup> 마르텐사이트 조직을 나타내는 X20CrMoV 12 1 강에서는  $50 \sim 100\ \mu\text{m}$ 의 직경을 보여주고 있으며, 페라이트강에 비하여 크리프 강도가 높고 크리프 기공(creep cavity)의 발생/합체/성장의 과정이 결정입계 뿐만 아니라 결정입내에서도 동시에 발생<sup>(8)</sup>하기 때문에 결정입자 크기의 영향은 없을 것으로 판단된다. 또한 미세조직상에 개재물이나  $\delta$ -페라이트는 관찰되지 않아 직경 2 mm의 소형의 단면이라도 본 강의 크리프 거동을 동일하게 나타내고 조직을 대표할 수 있다고 할 수 있다.

또한 표점거리부와 시편나사부의 전자빔 용접에 의해 시편이 제작되었기 때문에 용접부가 표점거리부의 크리프 시험결과에 영향이 없어야 한다. 용접된 시편의 단면과 경도측정 결과를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 보여주고 있다. 용접부 단면을 표점거리부 보다 크게 함으로써 용접부에 충분한 강도가 유지될 수 있을 것으로 사료된다. 용접면에서 용접결합은 관찰되지 않았고 용접 열영향부는 약 1 mm의 범위내에 형성되어 표점거리부에 열영향을 주지 않는 양호한 상태를 보여주었다. 크리프 파단시험 결과, 모든 시편은 용접부가 아닌 표점거리 내에서 파단되었다. Fig. 8의 경도측정 결과로도 열영향부의 범위를 확인할 수 있었으며, 용착금속 영역은 후열처리가 수행되지 않기 때문에 대략 550 Hv의 높은 경도를 보여주었다. 또한 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 용접 열영향부의 연화영역(softened region)의 미세조직에서 크리프 기공이 발견되지 않았으며, 결정입자의 변형도 관찰되지 않아 용접부로 인하여 표점거리부의 크리프 거동에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 전자빔 용접이 소형시편의 제작에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

소형 시편에 의한 크리프 시험결과를 검증하기

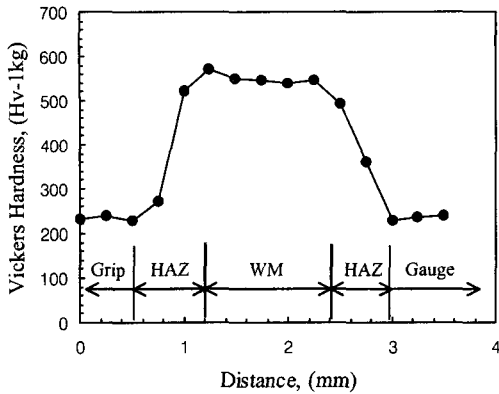


Fig. 8 Hardness of electron beam weldment

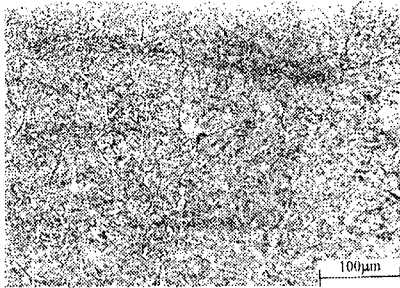


Fig. 9 Microstructure of softened region of electron beam weldment in crept specimen

Table 3 Test condition and results of creep rupture test

Mat'l	Stress (MPa)	Temp. (°C)	Rupture Time(hr)		
			Small	Standard	error(%)
TA60-4	70	650	1919.3	1836.1	4.33
	150	600	562.3	482.8	-16.46
	150	600	455.1	482.8	5.74
	200	575	231.5	202.3	-14.42
TA65-6	70	650	1380.4	1452.3	4.95
	150	600	138.3	172.0	19.62

위하여 두 열처리 조건의 재료를 표준 크리프 시험기와 소형시편 크리프 시험기에서 수행하였다. 시험조건 및 결과를 Table 3 에서 보여주고 있다.

TA60-4 재를 이용하여 600 °C, 150 MPa 의 조건에서 수행한 결과를 Fig. 10 에 보여준다. 소형 시편에서의 크리프 곡선은 표준시편과 동일하게 1 차, 2 차, 3 차 크리프 거동이 분명하게 나타나고 있으며, 파단시간에서도 455.1 시간과 562.3 시간으로 평균값이 9 mm 직경의 표준시편의 482.8 시간에 비해 약 5 %의 오차를 갖는 양호한 결과를 보여주었다. Fig. 11 에 각 응력에서의 파단시간을 나타

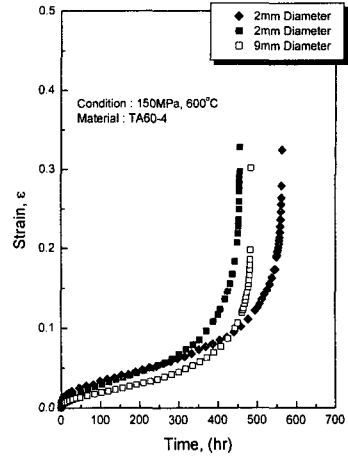


Fig. 10 Creep curves at 600°C, 150MPa(TA60-4)

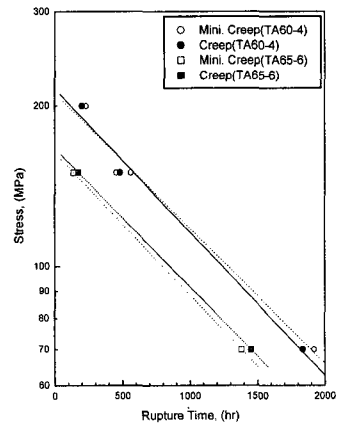


Fig. 11 The results of creep rupture test

내었다. 70 MPa 이상의 응력범위의 시험 결과로부터 파단시간은 응력이 증가함에 따라 직선적으로 감소함을 보였다. TA60-4 재와 TA65-6 재 모두 단시간측에서의 파단시간은 표준시편과 소형시편 사이에 오차가 최대 19 %까지 보여주었으나, 장시간측에서는 오차가 5 % 이내를 보여주었다. 또한 시효이력이 큰 TA65-6 재가 TA60-4 에 비하여 단시간 측으로 파단이 되었고 유사한 기울기를 보여주고 있어 소형시편에서도 표준시편과 같은 재질특성을 양호하게 나타낼 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 장시간에서 매우 적은 오차를 보여주고 있는 소형시편을 이용한 크리프 시험기가 향후 고온 튜브 및 고온 후속부에 대한 잔여수명 평가시 장시간 수명예측에 적용되는 등응력 가속응도 시험법의 적용에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

사용중인 고온재료의 크리프 잔여수명 평가를 위해 시편 채취기 및 소형 시편용 크리프 시험기를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 반구형의 다이아몬드 커터를 이용한 기계가공방식의 시편 채취기를 적용하여 부재의 표면에서 보수용접 및 후열처리가 필요 없을 정도의 두께 5 mm, 직경 30 mm 의 소형 샘플의 채취가 가능하였다.

(2) 채취된 소형의 샘플에 시편나사부를 전자빔 용접으로 부착한 소형 크리프 시편의 크리프 파단 시험으로부터 전자빔 용접이 표점거리부의 크리프 시험결과에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

(3) 소형 시편용 크리프 시험기를 적용하여 표준 시편의 크리프 파단시간과 비교한 결과, 단시간 파단에서는 약 19 %의 오차를 보였으나, 저응력 장시간 시험에서는 5 % 이내의 오차를 갖는 매우 양호한 결과를 보여주었다. 따라서 시편채취기와 소형시편용 크리프 시험기는 가동중 고온부재의 잔여수명 평가를 위한 등응력 가속온도 시험법의 적용에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

(1) Dooley, R. B., 1990, "Condition Assessment

Guidelines for Fossil Fuel Power Plant Component," *EPRI GS-6724*, pp. 2~14.

(2) Melton, K. N., 1983, "The Isostress Extrapolation of Creep Rupture Data," *Material Science and Engineering*, Vol. 59, pp. 143~149.

(3) Wickens, A., John, H. M., 1977, "Some Long Term Evidence Supporting the Constant Stress, Accelerated Temperature Method of Extrapolating Creep-rupture Data," *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 48, No. 11, pp. 591~593.

(4) U.S Patent No. 4845896, "Surface Sampling Device"

(5) Viswanathan, R., 1988, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts Volume 2: Miniature Specimen Creep Testing," *EPRI CS-5588*, pp. 31~32.

(6) Richards, E. G., 1968, "Influence of Specimen Size and Grain Size on the Creep Rupture Strength of Some Nickel-Base Superalloys," *J. Inst. Metals*, Vol. 96, p. 365.

(7) Oxx, G. D., 1973, "High Temperature Materials Selection and Acceptance," *Conference on Creep and Fracture in Elevated Temperature Applications*, Sheffield, pp. 50~58.

(8) 박종진, 정용근, 주철홍, 1999, "X20CrMoV12 1 강 용접 열영향부의 크리프 손상 및 재질특성 평가," 대한용접학회 제 1 회 강도분과연구위원회 학술세미나집, pp. 114~125.