

<연구논문>

Alloy 690 증기발생기 전열관 재료의 크리프 거동 평가

김종민[†]·김우곤^{*}·김민철^{*}

Evaluation of Creep Behaviors of Alloy 690 Steam Generator Tubing Material

Jong Min Kim[†], Woo Gon Kim^{*}, and Min Chul Kim^{*}

(Received 27 November 2019, Revised 11 December 2019, Accepted 11 December 2019)

ABSTRACT

In recent years, attention has been paid to the integrity of steam generator (SG) tubes due to severe accident and beyond design basis accident conditions. In these transient conditions, steam generator tubes may be damaged by high temperature and pressure, which might result in a risk of fission products being released to the environment due to the failure. Alloy 690 which has increased the Cr content has been replaced for the SG tube due to its high corrosion resistance against stress corrosion cracking (SCC). However, there is lack of research on the high temperature creep rupture and life prediction model of Alloy 690. In this study, creep test was performed to estimate the high temperature creep rupture life of Alloy 690 using tube specimens. Based on manufacturer's creep data and creep test results performed in this study, creep life prediction was carried out using the Larson-Miller (LM) Parameter, Orr-Sherby-Dorn (OSD) parameter, Manson-Haford (MH) parameter, and Wilshire's approach. And a hyperbolic sine (sinh) function to determine master curves in LM, OSD and MH parameter methods was used for improving the creep life estimation of Alloy 690 material.

Key Words : Steam generator tube(증기발생기 전열관), Alloy 690(690 합금), Beyond design basis accident(설계기준 초과사고), Creep life estimation(크리프 수명예측), Master curve(마스터 커브)

기호설명

T = temperature (°C)

σ = stress (MPa)

σ_{TS} = ultimate tensile strength (MPa)

t_r = time to rupture(h)

ϵ_s = steady state creep rate (s⁻¹)

K = Monkman-grant parameter

C = Larson-miller constant

R = universal gas constant (Jmol⁻¹K⁻¹)

Q = activation energy (kJ/mol)

Q* = material constant in Wilshire approach (kJ/mol)

1. 서론

후쿠시마 사고 이후로, 중대사고와 설계기준초과 사고에 대한 관심이 높아졌다. 특히, SBO (Station Black Out)시 손상된 원자로 노심에서의 고온의 가스로 인하여 증기발생기 전열관은 급격한 온도 증가를 경험하게 되며, 파손시 연쇄 파단으로 인하여 내부의 방사성 물질이 격납구조물을 통과 (Containment Bypass)하여 외부로 방출될 위험이 있다. 이와 관련하여 NUREG-1570¹, NUREG-2195²에서는 중대사고

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원 안전재료기술개발부
E-mail : jmkim@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-4495 FAX: (042)868-8549

* 한국원자력연구원 안전재료기술개발부

시 증기발생기 전열관의 파손 위험도 평가를 수행한 바 있다.

최근의 증기발생기 전열관 재료는 Alloy 600 소재에서 Alloy 690 소재로 대체되고 있다. Alloy 690 소재는 Alloy 600의 응력부식균열 (SCC, Stress Corrosion Cracking) 문제를 해결하기 위해 크롬 (Cr)의 함량을 높여 부식저항성을 향상시킨 소재이다. 그러나 기존의 증기발생기 전열관 소재의 연구는 응력부식균열을 중점으로 수행되어 Alloy 690 소재에 대한 고온 크리프 특성 데이터 산출과 크리프 거동 예측에 관한 연구는 미미한 실정이다.

중대사고시 증기발생기 전열관의 파손거동을 예측하기 위해서는 고온에서의 크리프 데이터, 재료에 적합한 크리프 수명예측 모델, 크리프-파손 모델 등이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 증기발생기 전열관 Alloy 690 소재에 대한 크리프 시험을 수행하고, 다양한 크리프 예측 모델을 기반으로 크리프 수명예측을 수행하였다. 다수의 크리프 시험을 수행하고 장기간(Long Term)의 적절한 크리프 수명예측을 위하여 “sinh” 함수를 이용한 크리프 응력-파손 시간 마스터커브 (Master Curve)를 적용하였다. 또한, Larson-Miller (LM)³ 파라미터, Orr-Sherby-Dorn (OSD)⁴ 파라미터, Manson-Hafner (MH)⁴ 파라미터와 같은 시간-온도 파라미터(TTP, Time-Temperature Parameter)와 Wilshire 방법⁵⁻⁷을 사용하여 Alloy 690 소재의 크리프 수명예측을 수행하였다.

2. 크리프 시험

2.1 재료 및 시편

Fig. 1은 인장시험과 크리프 시험에 사용된 시편의 형상을 나타낸 것이다. 전열관의 제조과정에서 생성될 수 있는 잔류응력이나 기타 영향들을 실제 제조 후 환경과 동일한 조건에서 시험하기 위하여 별도의 펼침가공을 하지 않았으며, 길이방향으로 절단된 시편을 제작하여 사용하였다. 축방향 인장 시험에서 평행부의 길이는 18mm, 너비는 4mm이다.

Table 1은 Alloy 690 증기발생기 전열관의 CMTR 상에 수록되어 있는 상온에서의 화학성분을 나타낸 것이다. 인장시험에 사용된 strain rate는 상온부터 약 900°C까지 4.6×10^{-4} /s이었다. Table 2는 인장시험 결과를 나타낸 것이다.

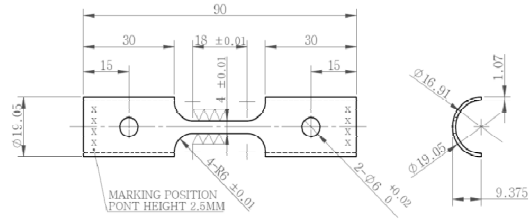


Fig. 1 Geometry of tensile and creep specimen

Table 1 Chemical composition of Alloy 690 SG tube (wt%)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo
0.020	0.493	0.265	0.0006	0.005	59.16	29.27	0.028
Cu	Co	Al	Ti	Nb	N ₂	B	Fe
0.012	<0.010	0.165	0.245	<0.010	0.020	<0.0005	10.3

Table 2 Tensile test results of Alloy 690 SG tube

Temp. (°C)	Temp. (°K)	YS (MPa)	TS (MPa)	Uni. EL. (%)	Tot. EL. (%)
25	298	356	794	45	53
200	473	294	689	42	47
300	573	283	671	43	49
400	673	280	664	45	48
500	773	269	635	41	47
600	873	247	574	35	44
700	973	236	436	17	45
800	1073	217	239	8	59
900	1173	117	132	10	56

2.2 크리프 시험 장치

Fig. 2는 크리프 시험장치를 나타낸 것이다. 다양한 응력과 온도에서의 크리프 시험들이 수행되었다. 크리프 변형률, 파손 시간 등이 자동으로 기록되도록 하였으며, 크리프 데이터를 통해 정상상태 크리프 변형률 (SSCR, Steady-State Creep Rate)을 결정하였다.



Fig. 2 Creep test machine and installed specimen

2.3 크리프 시험 결과

Table 3은 본 연구에서 수행한 크리프 시험 결과를 나타낸 것으로 크리프 파손 시간(t_r), 크리프 변형률, 시험 조건(온도(T)와 응력(σ))을 정리하였다. Fig. 3은 제조사의 데이터(45개)⁸와 본 연구에서 수행한 크리프 시험 데이터(18개)를 함께 도시한 것이다.

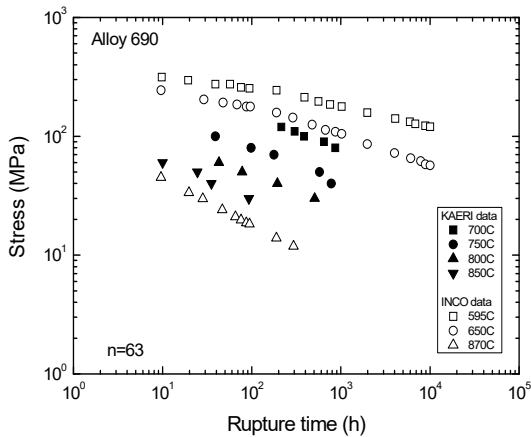


Fig. 3 Stress-Rupture time at various temperatures (tests) with data of manufacturer

Table 3 Experimental conditions and results of creep tests

T(°C)	σ (MPa)	t_r (h)	SSCR(1/h)
700	120	214.6	1.130.E-03
700	110	303.0	7.272.E-04
700	100	386.0	5.580.E-04
700	90	644.1	2.707.E-04
700	80	865.6	1.717.E-04
750	100	39.1	3.550.E-03
750	80	98.1	1.730.E-03
750	70	177.6	9.252.E-04
750	50	575.6	1.462.E-04
750	40	779.1	7.468.E-05
800	60	43.0	3.610.E-03
800	50	78.1	1.790.E-03
800	40	194.6	5.436.E-04
800	30	507.7	1.974.E-04
850	60	10.0	2.010.E-02
850	50	24.6	8.590.E-03
850	40	35.3	4.080.E-03
850	30	93.0	1.400.E-03

3. 크리프 수명예측

3.1 크리프 수명예측 모델

크리프 수명예측을 위해서 LM, MH, OSD 방법 등 다수의 방법들이 개발되었으며, 이중 LM 방법이 여러 고온 내열강 및 슈퍼합금 등의 다양한 재료에 폭넓게 사용되고 있다. 최근에는 재료의 기계적 물성과의 연관관계를 기반으로 한 Wilshire 방법도 개발되었다. 본 연구에서는 크리프 시험 데이터를 바탕으로 이러한 크리프 수명예측 모델의 파라미터를 도출하고 타당성을 살펴보았다.

3.1.1 Monkman-Grant 방법

MG 방법은 파손 시간을 예측하는데 변형률을 주요변수로 사용하여 다음과 같은 멱함수의 상관관계를 나타내었다.

$$\log t_r + m \log \dot{\epsilon}_s = K \quad (1)$$

여기서 t_r 은 크리프 파손 시간이며, K는 MG 상수이며, m은 파손 시간 지수상수이다. 이 식은 크리프 변형메커니즘이 크리프 파손시까지 유효하다는 큰 가정에 따른 것이다. MG 방법을 사용하면 단기간의 시험에서 MG 상수가 정해질 경우 온도에 무관하게 장시간의 수명을 예측할 수 있다.

3.1.2 Larson-Miller 방법

Larson-Miller 방법은 크리프 수명예측에 가장 널리 사용되는 방법으로 LM 상수 C는 다음과 같이 표시된다.

$$LMP = T(\log t_r + C) \quad (2)$$

다수의 연구를 통해 금속재료에서 상수 C가 약 20이며 냉간가공 (Cold-working), 가공열처리공정 (Thermo-Mechanical Processing), 상전이 (Phase Transition) 등에 따라 그 값이 크게 달라질 수 있음을 확인하였다. Alloy 600 재료의 경우 C는 약 15로 알려져 있다.

3.1.3 Manson-Haferd 방법

Manson과 Haferd는 장시간 데이터에서 온도에 따른 단일 선형성을 보완하기 위해 단일 응력에서 시험온도에 대한 변화를 대수변화로 고려하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\text{MHP} = (\log t_r - \log t_a) / (T - T_a) \quad (3)$$

여기서 점(T_a , $\log(t_a)$)는 다양한 동일 응력선(Iso-stress Line)에 대응하는 교차지점이다.

3.1.4 Orr-Sherby-Dorn 방법

Orr-Sherby-Dorn 방법은 LM 방법에서 사용되는 상수 C를 응력의 함수로 고려하여 다음과 같은 수식을 제시하였다.

$$\text{OSD} = \log t_r - Q/2.3RT \quad (4)$$

OSD 수명예측방법의 기반은 활성화 에너지 Q가 전체 크리프 거동에서 같다고 가정된 것이다. 여기서 R은 기체상수로 $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ 이다.

3.1.5 Wilshire 방법

Wilshire가 제안한 크리프 특성 예측 방법은 최소 크리프와 파손 시간을 각기 다른 온도에서 기록하여 다양한 크리프 온도에서 측정된 인장강도를 통한 하나의 정규화된 마스터커브로 나타낼 수 있도록 하였다. 인장강도를 변수로 사용함으로써 각 크리프 온도에서 가해질 수 있는 최대응력 범위에서 전체 데이터들이 잘 표현된다.

$$\ln(\sigma/\sigma_{TS}) = -k[t_r \exp(-Q^*/RT)]^u \quad (5)$$

여기서 u는 기울기이며 양변에 자연로그를 취하여 얻어지는 $\ln(k)$ 는 y축과의 교차점을 나타내며, Q^* 는 일정 응력에서 파손 시간과 온도의 기울기를 이용하여 얻어진다.

3.2 Alloy 690 크리프 수명예측

Alloy 690 튜브의 크리프 시험결과와 상기 기술한 크리프 특성 예측모델들을 이용하여 각 크리프 모델의 파라미터를 도출하였다. Fig. 4는 본 연구에서 수행한 크리프 데이터만을 사용하여 MG 방법에 의한 파손 시간과 정상상태 크리프 변형률을 도시한 것이다. 시험 온도가 변하더라도 파손 시간과 크리프 변형률이 선형 대수관계가 있음을 보여주어 크리프 시험의 타당성을 확보할 수 있었다.

LM 방법에 따라 상수 C를 도출하였다. 식 (2)와 곡선 적합을 통해 도출된 상수 C는 약 13이었다. Fig. 5는 상수 C값에 따른 LM 변수를 각 데이터에 따라 도시한 것이다. 보통 Alloy 600 재료의 경우 상수

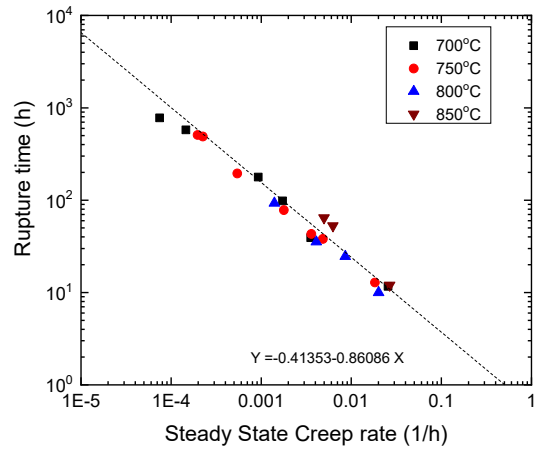


Fig. 4 MG Relationship for Alloy 690

C는 15를 사용하는 것으로 보고되어 있으므로, Alloy 690 튜브의 경우 LM 방법에 따른 상수 C를 새롭게 결정함으로써 크리프 수명예측이 보다 정확해 질 것으로 판단된다.

다음으로, 식 (3)의 MH 방법을 사용하여 재료상수들을 결정하였다. $\log t_a$ 와 T를 적합하여 결정된 상수는 Fig. 6과 같이 $T_a=646.159 \text{ K}$, $\log(t_a)=6.989$ 였다. OSD 방법에서 Q값은 $\log t_r$ 과 $1/T$ 의 관계로부터 얻어지며 Fig. 7과 같이 평균 $Q/2.3R$ 은 15739.96으로 도출되었다.

마지막으로 Wilshire 방법에 의한 크리프 수명예측을 수행하였다. Wilshire 방법을 사용하기 위해서는 Q^* 를 결정해야 한다. 양변에 자연로그를 취하여 얻어지는 $\ln[t_r \exp(-Q^*/RT)]$ 와 $\ln[-\ln(\sigma/\sigma_{TS})]$ 값을 곡선적합하여 결정된 Q^* 는 Fig. 8과 같이 230 kJ/mol 이었다.

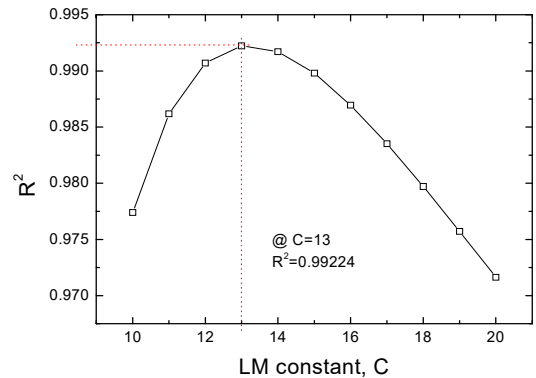


Fig. 5 Determination of optimum constant "C" for LM method

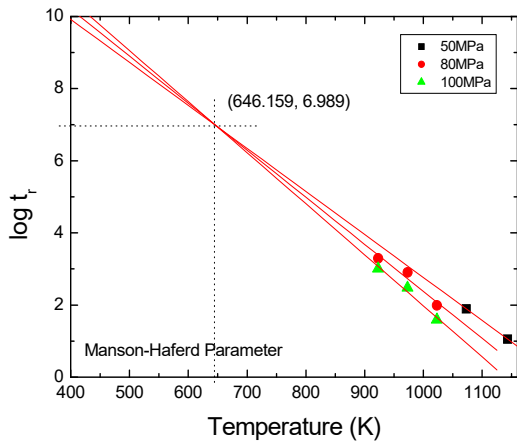


Fig. 6 Determination of optimum point (T_a , $\log(t_a)$) for MH method

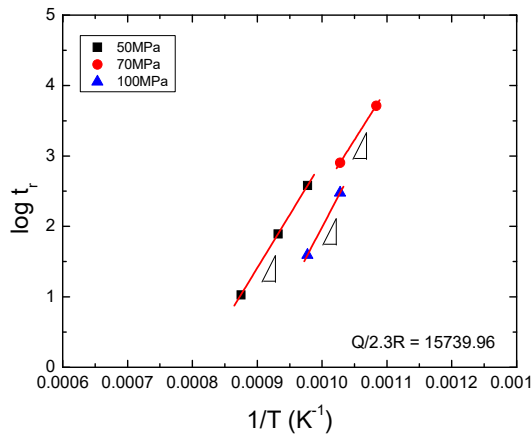


Fig. 7 Determination of optimum constant “ $Q/2.3R$ ” for OSD method

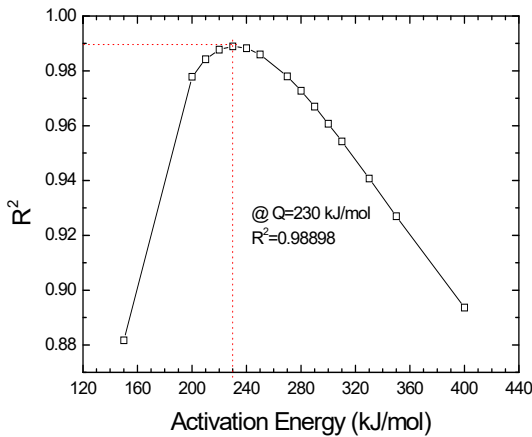
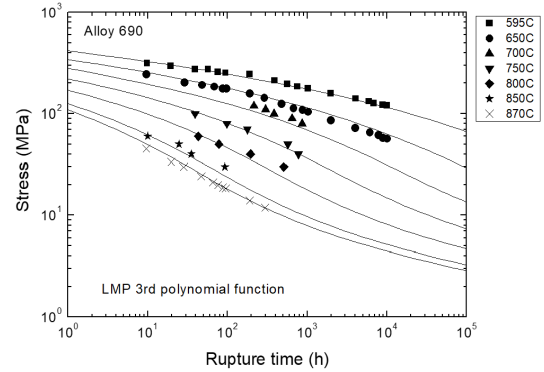


Fig. 8 Determination of optimum constant “ Q^* ” for Wilshire Approach

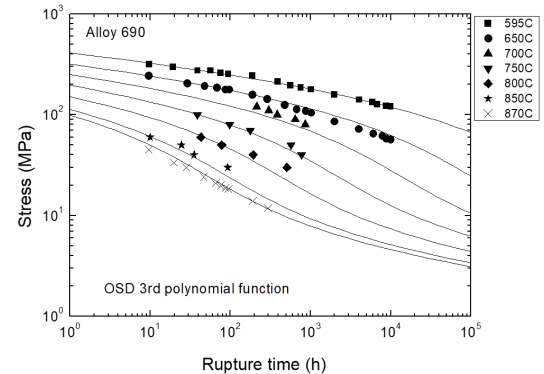
LM, OSD, MH 방법에 의해 크리프 수명예측을 수행할 때 사용되는 마스터 커브는 주로 다음과 같은 m차다항식 형태를 가지게 된다.

$$P(\sigma) = A_0 + A_1(\log\sigma) + A_2\log\sigma^2 + \dots + A_m\log\sigma^m \quad (6)$$

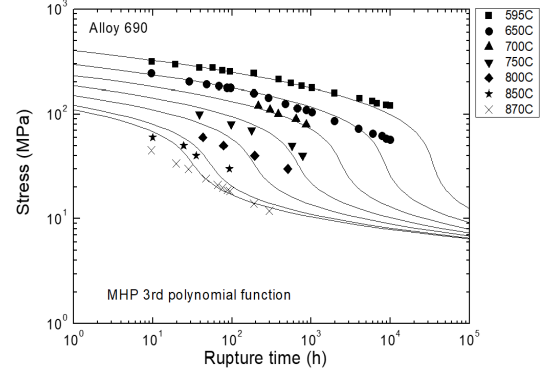
이러한 3차 다항식을 마스터 커브로 사용할 경우 크리프 데이터는 Fig. 9와 같이 곡선적합된다.



(a) LM



(b) OSD



(c) MH

Fig. 9 Results of creep life prediction using a master curve of polynomial equation

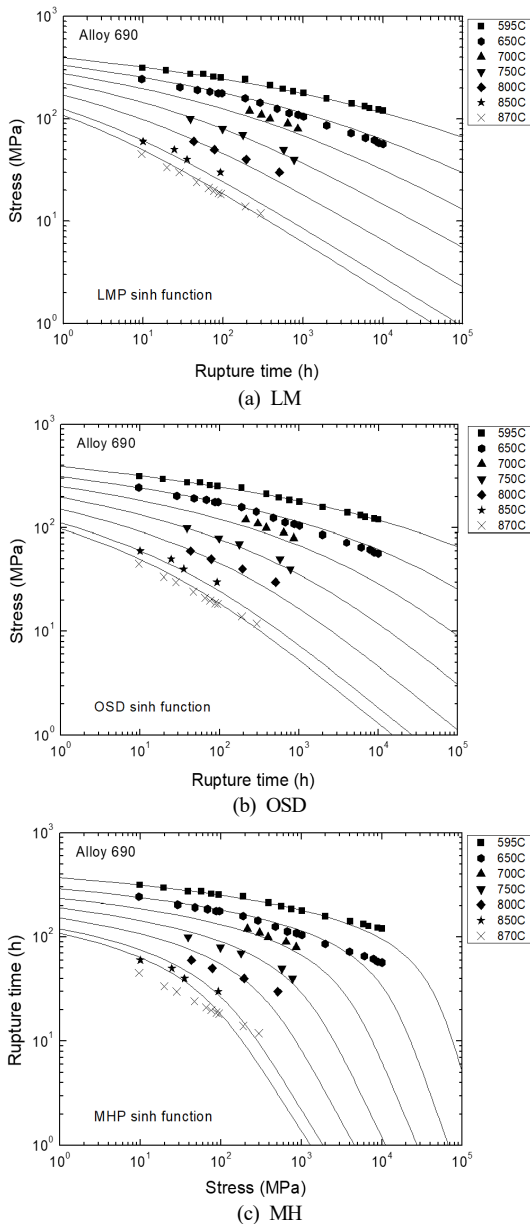


Fig. 10 Results of creep life prediction using a master curve of sinh equation

그러나 3차 다항식으로 적합된 마스터 커브는 모든 수명예측모델에서 낮은 응력, 높은 온도의 경우 실험결과와 차이를 보였다. 그럼에도 불구하고 LM과 OSD방법은 MH방법보다 더 좋은 예측 결과를 나타내었다. 따라서, 그동안의 3차 다항식을 이용한 마스터 커브 적합방법은 일부 영역에서 부적절하였음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 3차 다항식 대

신 다음과 같은 “sinh” 함수를 도입하였다⁹.

$$P(\sigma) = P_1 + P_2 \sinh(P_3 \log \sigma) + P_4 \log \sigma \quad (7)$$

여기서 P_1, P_2, P_3, P_4 는 상수이며, 실험결과와 곡선 적합을 수행하여 얻어진다.

Fig. 10은 “sinh” 마스터 커브를 이용한 각 수명예측모델의 해석결과를 나타낸 것이다. “sinh” 마스터 커브를 적용하였을 경우, Fig. 9와 같이 고온과 높은 응력에서 3차 다항식 마스터커브를 이용한 것보다 실험결과와 더 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 고온과 저응력에서도 3차 다항식 마스터커브에서 나타났던 변곡점이 사라지며 크리프 수명을 적절히 예측하는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고, MH 방법은 LM와 OSD 방법에 비해 일부 결과에서 부적절한 예측을 하는 것으로 나타났다. Alloy 690 증기발생기 전열관의 크리프 특성 예측에는 MH 방법은 적합하지 않았다.

Fig. 11은 Wilshire 방법에 의한 크리프 수명예측 결과를 나타낸 것이다. 실험결과와 예측 모델간의 차이가 다른 방법들에 비해 작았으며, 3차 다항식 마스터커브에서 나타나는 변곡점도 역시 보이지 않았다. 따라서, Wilshire 방법이 LM, MH, OSD 방법 등 TTP 방법보다 크리프 수명예측에 물리적/수식적 타당성을 확보하는 동시에 시험 결과를 가장 잘 대변하는 것으로 판단할 수 있다.

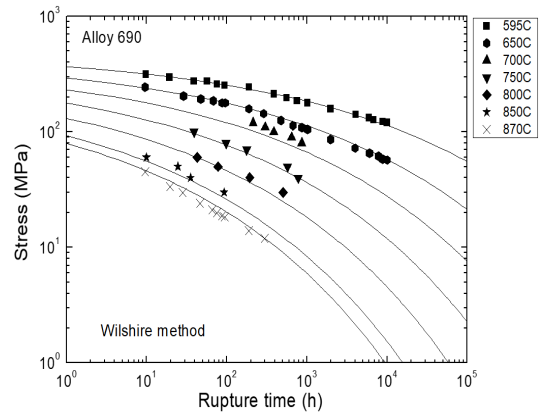


Fig. 11 Results of creep life prediction using Wilshire's approach

4. 결 론

본 연구에서는 Alloy 690 소재의 증기발생기 전열관 시편을 이용하여 크리프 시험을 수행하고 고온 크

리프 특성을 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험을 통해 얻은 데이터와 제조사의 크리프 데이터를 이용하여 LM, OSD, MH 등 TTP 크리프 수명예측 모델의 파라미터들을 도출하였다.
- 2) 마스터 커브로 다항식을 이용하였을 경우, MH 방법을 제외한 LM과 OSD 방법이 실험결과와 잘 일치하였으나 고온 저응력 조건에서 다항식 마스터커브에 기인한 변곡점이 존재하며 비보수적인 예측 결과를 보였다.
- 3) “sinh” 함수를 마스터커브로 적용하였을 경우, 고온 저응력에서의 변곡점과 비보수성은 나타나지 않았으나 MH 방법의 경우 고온에서 실험결과와 차이를 보였다.
- 4) Wilshire 방법의 경우 실험결과와 예측 모델간의 차이가 다른 방법들에 비해 가장 작았으며, 3차 다항식 마스터커브에서 나타나는 변곡점 역시 보이지 않았다.
- 5) 따라서, Wilshire 방법과 sinh마스터 커브를 적용한 LM 및 OSD 방법이 Alloy 690 재료의 크리프 수명예측 모델로 타당한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 얻어진 Alloy 690 튜브의 크리프 특성은 누적손상에 따른 크리프-파손 모델 개발에 사용될 수 있으며, 중대사고 및 설계기준 초과사고 시 Alloy 690전열관의 크리프-파손 확률 평가에 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 원자력연구개발사업의 “압력경계 재료 열화 파괴역학적 대응기술 개발” 과제의 일환으로 수행된 연구입니다.

참고문헌

- (1) USNRC, 1998, “Risk Assessment of Severe Accident-Induced Steam Generator Tube Rupture,” U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, *NUREG-1570*.
- (2) Sancaktar, S., Salay, M., Lyengar, R., Azarm, A. and Majumdar, S., 2016, “Consequential SGTR Analysis for Westinghouse and Combustion Engineering Plants with Thermally Treated Alloy 600 and 690 Steam Generator Tubes,” U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, *NUREG-2195*.
- (3) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, “A Time-Temperature Dependence Relationship for Rupture and Creep Stresses,” *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 765-771.
- (4) Penny, R. K. and Marriott, D. L, 1995, *Design for Creep*, London, Chapman & Hall Company, pp. 200-213.
- (5) Wilshire, B. and Scharning, P. J., 2008, “A New Methodology for Analysis of Creep and Creep Fracture Data for 9-12% Chromium Steels,” *Int. Mater. Rev.*, Vol. 53, pp. 91-104. doi:<https://doi.org/10.1179/174328008X254349>.
- (6) Wilshire, B. and Scharning, P. J., 2008, “Prediction of Long Term Creep Data for Forging 1Cr-1Mo-0.25V Steel,” *Mater. Sci. Tech-lond.*, Vol. 243, pp. 1-9. doi:<https://doi.org/10.1179/174328407X245779>.
- (7) Wilshire, B. and Bache, M. R., 2009, “Cost Effective Prediction of Creep Design Data for Power Plant Steels,” *2nd ECCC Creep Conference*, Zurich, Switzerland, pp.44-55.
- (8) www.specialmetals.com, 2009, Publication Number SMC-079.
- (9) Kim, W. G., Park, J. Y., Kim, E. S. and Jang, J. S., 2018, “Improvement of Long-term Creep Life Extrapolation Using a New Master Curve for Grade 91 Steel,” *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 32, No. 9, pp. 4165-4172. doi:<https://doi.org/10.1007/S12206-018-0814-4>