[논문] 한국소성가공학회지, 제 19 권 제 7 호, 2010
Transactions of Materials Processing, Vol.19, No.7, 2010
DOI : 10.5228/KSTP.2010.19.7.435

박판 크리프 수명평가에 마찰계수의 영향

정지용[1] · 임지우[2] · 금영탁[#]

Effects of Friction Coefficient on Creep Life Assessment of Sheet

J. Y. Jeong, J. W. Im, Y. T. Keum

(Received Received August 16, 2010 / Revised September 17, 2010 / Accepted September 28, 2010)

Abstract

The creep life of 9Cr1MoVNb steel, in terms of Larson-Miller parameter(LMP), was evaluated by small punch(SP) creep simulation and verified by uniaxial creep test. By employing the elastoplastic FEM(finite element method), the small punch creep behaviors associated with various friction coefficients were simulated to identify a real friction phenomena. The friction coefficient, μ=0.7, determined by comparing deflection history was used in the small punch creep simulation to find the equivalent stresses with which the relationship between punch load and uniaxial creep stress was found. The creep life was then predicted by the LMP, which was the relationship among the rupture time, temperature, and stress. Finally, the LMP calculated by SP-creep simulation was compared with that had computed by the uniaxial creep test and fairly matched LMPs were found.

Key Words : Creep, Small Punch Creep Test, Uniaxial Creep Test, Larson-Miller Parameter(LMP), Friction Coefficient, 9Cr1MoVNb

1. 서 론

고온, 고압의 환경 하에서 장시간 사용되는 재료의 크리프 수명평가는 그 부재의 안전성 및 신뢰성 평가, 잔여 수명평가를 위해 중요하다. 일축 크리프 시험법(uniaxial creep test)과는 달리 실기에서 채취가 용이한 소형펀치 시험법(small punch creep test)은 국내외의 연구결과를 통해 그 유용성과 우수성이 입증되고 있다.

소형 펀치 시험법은 많은 장점에도 불구하고 일축 크리프 시험법과의 비교를 위한 응력-변형률 환산이 어렵다는 문제가 있어 이를 해결하기 위한 방향으로 연구가 진행되고 있다. Manahan 등은[1] 소형펀치 시험에서 얻어지는 하중-변위 거동을 조사하여 그 결과를 유한요소법(finite element method)으로 해석하여 소형펀치 시험결과로부터 인장시험 결과를 예측하는 방법을 검토하였다. Tettamanti 등은[2] P12강에 대하여 일축 크리프 시험과 소형펀치 크리프 시험을 수행하여 동일한 파단시간에서 소형펀치 크리프시험 하중과 일축 크리프시험 응력과의 관계에 대해 제안하였다. Park 등은[3] 9Cr강의 일축 크리프 시험에서 얻어진 크리프 특성값을 소형펀치 크리프 유한요소 모델에 입력하여 그 거동을 해석하고 크리프 상수의 평가절차와 소형펀치 크리프 시험에 적용된 하중과 일축 크리프 시험의 응력에 대한 관계에 대하여 언급하였다.

또한, Ma 등은[4] 압력관의 등방성 유한요소해석을 수행하여 소형펀치 크리프 시험으로부터 일축 크리프 상수를 결정하는 변환식을 유도하였고,

1. 한양대학교 일반대학원 자동차공학과
2. 성균관대학교 기계설계학과
교신저자: 한양대학교 기계공학부, E-mail: ytkeum@hanyang.ac.kr

Lee 등은[5] 유한요소해석 결과를 이용하여 소형 펀치 크리프 시험에서 얻어진 크리프 특성값들의 응력의존성에 대해 연구하였다. Dymacek 등은[6] 소형펀치 크리프 유한요소 해석에서 마찰계수와 크리프 모델에 따른 크리프 거동의 차이를 비교하였다. 기존 소형펀치 크리프 유한요소 해석을 이용한 연구에서는 마찰의 영향을 고려하지 않고 등가응력만을 구하여 수명예측 했으나 마찰의 영향에 따라 등가응력이 변하므로 이를 고려하여 수명예측 할 필요가 있다.

본 연구에서는 탄소성 유한요소법에 의한 크리프 해석에서 마찰현상을 규명하기 위하여 다양한 마찰조건에서의 소형펀치 크리프 공정을 전산모사하고, 크리프 거동들을 비교하였다. 그리고 펀치 하중에 따른 등가응력의 관계를 구하여 내열강 9Cr1MoVNb의 수명을 Larson-Miller Parameter (LMP)로 예측하였다.

2. 소형펀치 크리프 시뮬레이션

2.1 모델링 및 해석조건

다양한 하중과 마찰계수에 따라 시편에 분포되는 등가응력을 계산하기 위해 크리프 공정을 유한요소해석하였다. Fig. 1는 소형펀치 크리프 금형 배치도이다. 시편과 볼은 2차원 4각형 8절점 요소를 사용하여 축대칭으로 모델링하였고 시편은 탄소성 및 크리프 거동을, 볼은 탄성거동을 한다고 가정하였고 상하 다이는 강체로 모델링하였다. 시편의 요소 수는 1000개, 볼의 요소 수는 410개 이다. 시편과 상하 다이의 표면의 접촉면에서 클램핑 하중은 부가되지 않는 것으로 가정하고, 상하 다이는 고정된 상태에서 볼에 일정한 하중이 가해져 해석이 진행된다. Fig. 2는 소형펀치 크리프 시뮬레이션에 사용된 유한요소모델을 나타낸다. 하중은 350N~550N이 적용되었다. 시편과 볼, 시편과 상하 다이의 마찰계수는 600℃에서 마찰계수를 찾기 위해 μ=0.1~0.7를 적용하였다.

2.2 물성

본 연구에 사용된 재료는 초초임계압 화력 발전소의 배관 및 증기발생기의 부품용으로 사용되는 내열강 9Cr1MoVNb이다. 9Cr1MoVNb은 9Cr1Mo에 V와 Nb을 첨가하여 고온에서의 강도, 용접성과 성형성 등을 향상시킨 개량형이다. Table1은 600℃에서 9Cr1MoVNb의 기계적 물성을 나타낸다[6]. 600℃에서 9Cr1MoVNb의 크리프 거동을 나타내기 위한 Norton크리프모델은 다음 식과 같다[7].

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = 1.917 \times 10^{-33} \sigma^{12.059} \quad (1)$$

여기서 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ 은 최저 크리프 속도[/hr], σ은 일축 크리프 시험 응력[MPa]을 나타낸다.

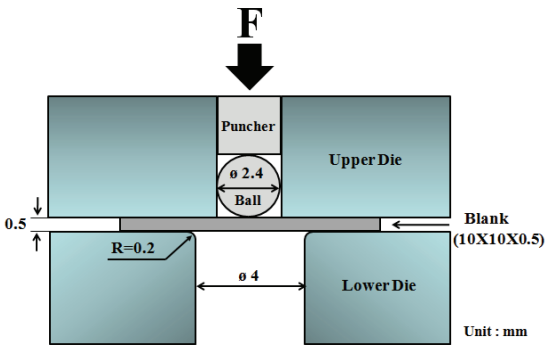

Fig. 1 Schematic of tooling for small punch creep test

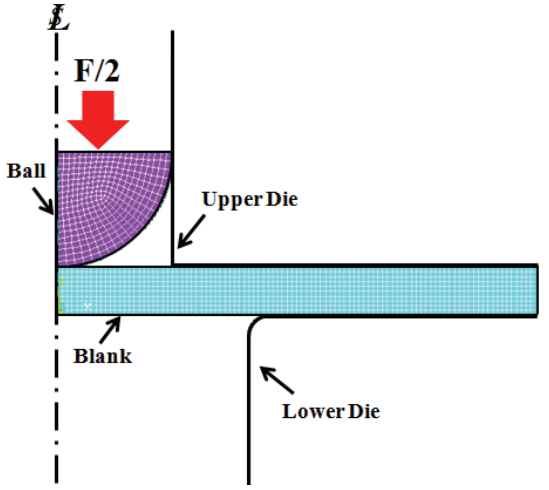

Fig. 2 Finite element, axisymmeritric model for small punch creep simulation

Table 1 Mechanical properties of 9Cr1MoVNb steel sheet at 600℃[6]

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Yield Strength
150 GPa	0.3	268 MPa

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰계수에 따른 처짐속도

유한요소 해석모델에는 실제 시험과는 달리 균열발생 등의 파괴현상이 파단으로 포함되어 있지 않기 때문에 시험결과보다 길게 정상상태 크리프 변형이 지속된다. 그러므로 파단시간으로는 시험결과와 비교가 어렵기 때문에 처짐선도를 비교하였다. 처짐선도는 볼의 거동을 나타낸 것으로 초기에 볼과 시편이 가장 먼저 닿는 부분, 즉 볼의 중심부의 한 점에서 시간에 따른 처짐을 구하였다. Fig. 3는 마찰계수 별 처짐곡선을 나타낸다. 일축 크리프 시험의 경우와 유사하게 시간이 경과함에 따라 초기 크리프 단계, 선형구간인 정상 크리프 단계와 파단시의 비선형구간인 가속 크리프 단계의 세 단계의 크리프 거동이 나타났다. 마찰계수가 증가함에 따라 수명의 대부분을 차지하는 두 번째 단계인 선형구간의 기울기, 즉 처짐속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 처짐속도를 비교하면 마찰계수 μ=0.7이 실제 시험결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 이 마찰계수 값은 유사강종의 고온 마찰 시험결과와 유사하다[8,9,10]. 또한 이 마찰계수는 일반적으로 열간 단조에서의 건마찰 조건과도 동일하다[11].

3.2 마찰계수에 따른 등가응력

소형펀치 크리프 시험에서의 하중을 일축 크리프 시험에서의 응력으로 환산하기 위하여 각 하중에서의 등가응력을 구하였다. Fig. 4은 최대 등가응력을 나타내는 지점을 나타낸다. 모든 하중에서 거의 같은 지점에서 최대 등가응력이 발생하였다.

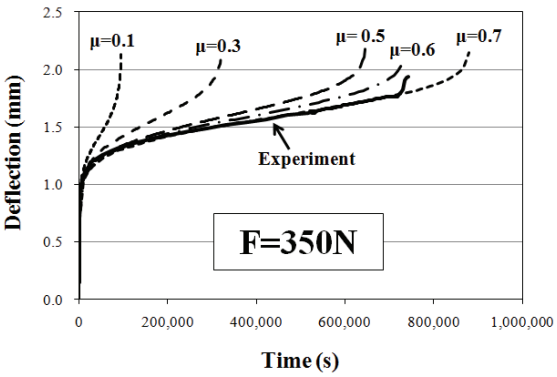

Fig. 3 Deflection histories associated with friction coefficients

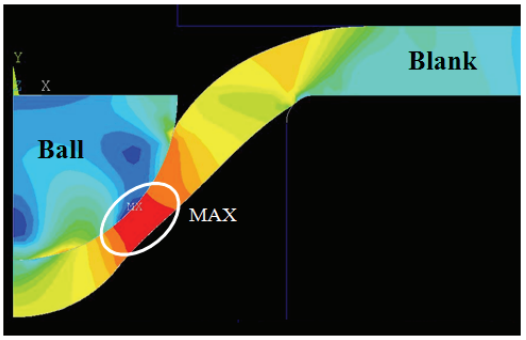

Fig. 4 Location where the maximum stress occurs

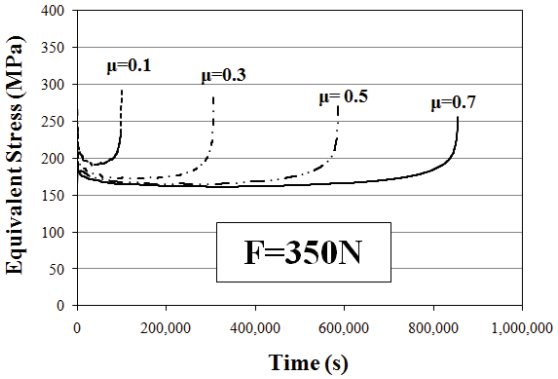

Fig. 5 Equivalent stress histories associated with friction coefficients

Fig. 5는 최대 등가응력이 발생하는 지점의 마찰계수 별 등가응력 선도를 나타낸다. 수명의 대부분을 차지하는 두 번째 영역에서 등가응력은 마찰계수가 증가함에 따라 낮아짐을 알 수 있다.

3.3 하중과 등가응력의 관계

마찰계수가 μ=0.7일 때 크리프 하중 350N~550N에서 하중 크기에 따른 최대 등가응력을 구해 작용하중과 등가응력의 상관관계를 구한다. Fig. 6는 최대 등가응력을 갖는 지점에서의 등가응력 선도를 나타낸다. 하중에 상관 없이 수명의 대부분을 차지하는 두 번째 영역에서 일정함을 알 수 있다. 이 영역에서의 등가응력은 일축 크리프 시험에서의 응력으로 볼 수 있다[12]. Fig. 7는 하중별 두 번째 영역에서의 등가응력을 나타낸다. 하중과 등가응력의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = 1.9\sigma_{eq} + 49.8 \quad (2)$$

여기서 F는 하중[N], σ_{eq}은 등가응력[MPa]이다. 식(2)를 사용하여 동일파단시간에 소형 펀치 크리프 시험의 하중과 일축 크리프 시험의 응력을 선형적으로 나타낼 수 있다. 또한 이 식을 통하여 임의의 소형펀치 크리프 시험의 하중에서 일축 크리프 시험의 응력으로 환산이 가능하다.

3.4 LMP에 의한 수명예측

실제 요구되는 온도보다 더 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller Parameter (LMP) [13]에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \tag{3}$$

여기서 T는 온도[K], t_r은 소형펀치 크리프 시험에서의 파단시간[hr], C_1은 재료상수로 32.8이 사용된다[7]. 일축 크리프 시험에서의 응력과 소형 펀치 크리프 시뮬레이션의 등가응력이 같다고 하면, 그 등가응력에 상응하는 하중을 적용시킨 시험에서의 파단시간, 온도의 값으로부터 LMP를 구할 수 있다. 또한, LMP는 등가응력의 1차 함수로 나타낼 수 있다.

$$LMP = K_1\sigma_{eq} + K_2 \tag{4}$$

여기서 σ_{eq}은 등가응력[MPa]이고, K_1과 K_2는 파단시간, 실험온도, 그리고 C_1으로부터 구해지는 재료상수이다. Fig. 8은 소형펀치 크리프 시뮬레이션에서 구한 등가응력에 상응하는 LMP와 등가응력의 추세선을 나타낸다. 이 추세선으로부터 K_1과 K_2를 구하면 LMP식은 다음과 같이 식(3)과 식(4)로부터 요약된다.

$$LMP = T(\log t_r + 32.8) = -15.4\sigma_{eq} + 33055 \tag{5}$$

따라서 식(5)로부터 온도(T)와 등가응력(σ_{eq})이 주어지면 내열강 9Cr1MoVNb의 수명(t_r)을 예측할 수 있다.

3.5 마찰계수에 따른 LMP

일반적으로 9Cr1MoVNb의 소형펀치 크리프 시뮬레이션에서 일축 크리프 시험에서의 응력으로 환산하기 위하여 사용되었던 마찰계수 μ=0.3[5]을

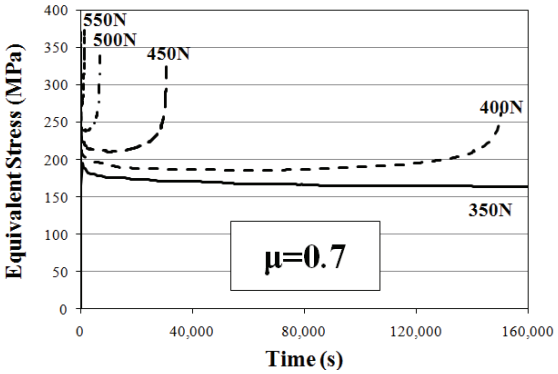

Fig. 6 Equivalent stress histories associated with various loads

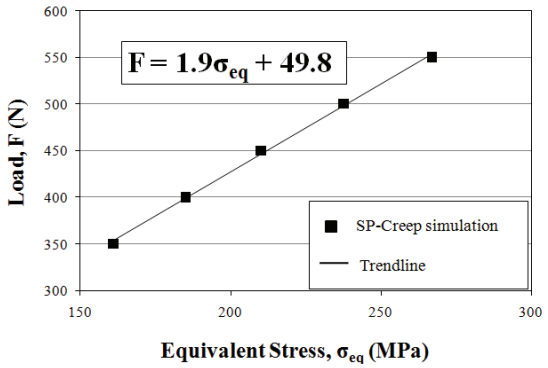

Fig. 7 Relationship between equivalent stress and applied load

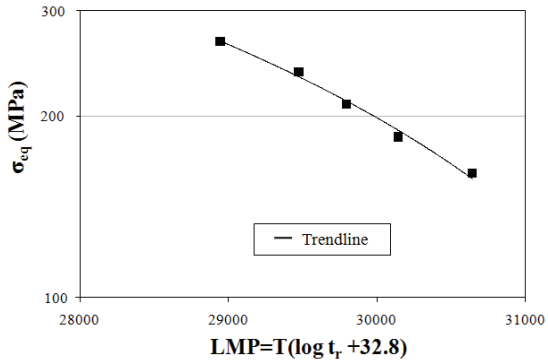

Fig. 8 Relationship between equivalent stress and LMP

적용시킨 모델과 μ=0.7을 적용시킨 모델을 LMP를 사용하여 비교하였다. Fig. 9는 마찰계수 μ=0.3을 적용시켜 구한 LMP와 마찰계수 μ=0.7을 적용시켜

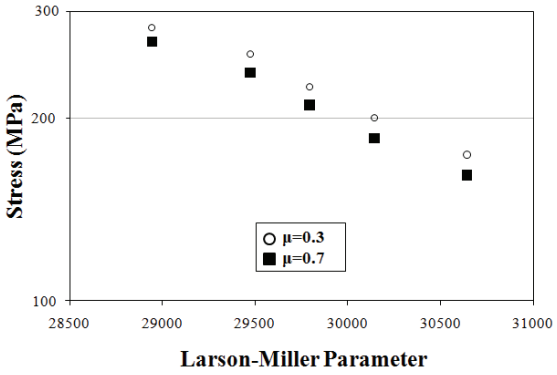

Fig. 9 Comparison of LMPs associated with uniaxial creep test stresses between μ=0.3 and μ=0.7

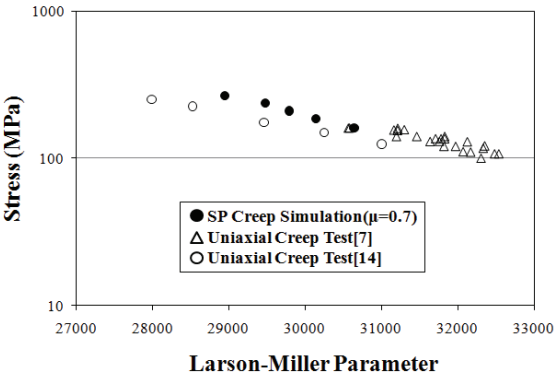

Fig.10 Comparison of LMPs associated with uniaxial creep test stresses between SP-creep simulation and uniaxial creep test

구한 LMP를 구한 것을 비교한 것이다. μ=0.7을 적용시킨 경우가 동일 하중, 파단시간과 온도에서 낮은 응력으로 환산되는 것을 볼 수 있다. 낮은 마찰계수를 적용시킴으로 응력이 과대평가되어 수명이 과대평가됨을 알 수 있다.

3.6 SP크리프 시뮬레이션과 일축 크리프 시험의 상관성

마찰계수 μ=0.7를 적용한 소형펀치 크리프 시뮬레이션 결과와 일축 크리프 시험결과를 대표적인 크리프 특성 파라미터인 LMP로 비교하였다. 일축 크리프 시험의 LMP[7]와 일본 NRIM의 600℃에서의 일축 크리프 응력으로 계산한 LMP[14]를 본 연구에서 구한 소형펀치 크리프의 LMP와 비교하였다. Fig. 10은 소형펀치 크리프 시뮬레이션과 일축 크리프 시험결과를 LMP를 통하여 비교한 것이다. 동일 응력에서 상당히 일치함을 알 수 있다. 소형 펀치 크리프 시뮬레이션과 시험을 통해 일축 크리프 시험을 대체할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형펀치 크리프 유한요소 해석을 통해 600℃에서 마찰계수를 찾아 등가응력을 구한 후, 내열강 9Cr1MoVNb의 크리프 수명을 예측하였다. 이러한 일련의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 처짐선도를 기초로 금형과 9Cr1MoVNb 사이의 마찰계수 μ=0.7을 구하였다.

(2) 소형펀치 크리프 시험 하중과 일축 크리프 시험 응력의 관계, 그리고 LMP를 사용한 크리프 수명예측식은 다음과 같다.

$$LMP = T(\log t_r + 32.8) = -15.4\sigma_{eq} + 33055$$

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2009T100200054) 주관으로 수행된 과제입니다. 연구에 도움을 주신 성균관대학교 임병수 교수님, 김문기 교수님, 김범준 박사님께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. P. Manahan, A. S. Argon, O. K. Harling, 1981, The development of a miniaturizeddisk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties, J. Nucl. Mater., Vol.104, pp. 1545~1550.

[2] S.Tettamanti, R. Crudeli, 1998, Small Punch Creep Test: A promising methodology for high temperature plant components life evaluation, BALTICA VI Plant Maintenance for Managing Life & Performance, Vol.2, pp. 501~516.

[3] T. K. Park, Y. W. Ma, K. B. Yoon, I. S. Jeong, 2001, Assessment of material properties using finite element analysis for small punch creep testing, KSME Conf. Proc. A, pp. 511~516.

[4] Y. W. Ma, T. G. Park, S. H. Shim, I. S. Jeong, K. B. Yoon, 2002, A Study on applicability of SP creep testing for measurement of creep properties of pressure tube alloy, KSME Conf. Proc. A, pp. 511~

516.

[5] S. I. Lee, S. S. Baek, I. H. K, H. S. Yu, 2002, A study on stress analysis of small punch-creep test and Its Experimental Correlations with uniaxial-creep Test, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A , Vol. 26, No.12, pp. 2265~2573.

[6] P. Dymacek, K. Milicka, 2009, Creep small-punch testing and its numerical simulations, Mater. Sci. Eng. A, 510–511, pp. 444~449.

[7] F. Dobes, K. Milicka, 2009, Application of creep Small punch testing in assessment of creep lifetime, Mater. Sci. Eng. A, 510-511, pp. 440~443.

[8] M. L. Saucedo-Munoz, S. Komazaki, T. Takahashi, T. Hashida, T. Shoji, 2002, Creep property measurement of service-exposed SUS316 austenitic stainless steel by the small-punch creep-testing technique, J. Mater. Research, No.8, pp. 1945~1953.

[9] M. Fujita, T. Nakazawa, H. Komatsu, H, Kaguchi, H. Kaneko, H. Ueda, 1996, Effect of Microstructure on Creep Fatigue Properties for Type 316 Austenitic Stainless Steels, Tetsu to Hagane, Vol. 82, No. 6, pp. 538~543.

[10] John A. Schey, 1984, Tribology in Metalworking; Friction, Lubrication, and Wear, ASM, Metals Park, Ohio, p. 491.

[11] B. C. Hwang, W. H. Lee, B. Bae, C. Kim, 2008, Process Planning and Die Design for the Super Hot Forging Product, the Piston Crown Used in Marine Engine, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 600~606.

[12] P. C. Zhai, T. Hashida, S. Komazaki, Q. J. Zhang, 2004, Numerical analysis for small punch creep tests by finite-element method, J. Test. Eval., Vol. 32, No. 4, pp. 298~303.

[13] F. R. Larson, J. J. Miller, 1952, A time temperature relationship for rupture and creep stresses, Trans ASME, Vol.174, pp. 765~781.

[14] NRIM, 1997, Data sheets on the elevated temperature properties of 9Cr1MoVNb steel tubes for boiler and heat exchangers and 9Cr1MoVNb steel plate for boiler and pressure vessels, Creep Data Sheet No. 43, pp. 11~14.