

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.3.251

ISSN 1226-4873

Mod. 9Cr-1Mo강의 크리프 균열 성장 법칙의 파라미터 B와 q의 통계적 성질에 관한 연구[§]

김선진^{*†} · 박재영^{*} · 김우곤^{**}

* 부경대학교 기계자동차공학과, ** 한국원자력연구원

On the Statistical Properties of the Parameters B and q in Creep Crack Growth Law, $da/dt=B(C^*)^q$, in the Case of Mod. 9Cr-1Mo Steel

Seon Jin Kim^{*†}, Jae Young Park^{*} and Woo Gon Kim^{**}

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 13, 2010 ; Revised January 4, 2011 ; Accepted January 5, 2011)

Key Words: Creep Crack Growth(크리프 균열 성장), Creep Crack Growth Rate Law(크리프 균열 성장률 법칙), Probability Distribution Function(확률분포함수), Mod. 9Cr-1Mo Steel(수정 9Cr-1Mo 강)

초록: 본 연구는 차세대 원자로의 후보 재료인 수정 9Cr-1Mo 강에 대한 크리프 균열 성장률 법칙, $da/dt=B(C^*)^q$ 의 파라미터 B와 q에 대한 통계적 성질에 대하여 취급하였다. 본 해석에 이용된 크리프 균열 성장 데이터는 600°C의 일정 온도에서 5000N의 동일 하중하의 1/2 CT 시험편에 대하여 크리프 균열 성장 실험을 수행하였다. 크리프 균열 성장 거동은 크리프 균열 성장률 da/dt 와 파괴역학 파라미터 C^* 와의 실험적 관계식으로부터 통계적으로 해석하였다. 각각의 시험편에 대한 파라미터 B와 q는 최소사승법에 의하여 결정하였다. B와 q에 대한 확률분포함수를 정규분포, 대수정규분포 그리고 와이블분포에 대하여 조사하였다. 본 연구에 의하면, B와 q의 확률분포함수는 대수정규분포와 와이블분포에 비교적 잘 따름을 알았다. 또한 이들 사이에는 강한 양의 선형적인 상관성이 있음을 알았다.

Abstract: This paper deals with the statistical properties of parameters B and q in the creep crack growth rate (CCGR) law, $da/dt=B(C^*)^q$, in Mod. 9Cr-1Mo (ASME Gr.91) steel which is considered a candidate materials for fabricating next generation nuclear reactors. The CCGR data were obtained by creep crack growth (CCG) tests performed on 1/2-inch compact tension (CT) specimens under an applied load of 5000N at a temperature of 600°C. The CCG behavior was analyzed statistically using the empirical equation between CCGR, da/dt and the creep fracture mechanics parameter, C^* . The B and q values were determined for each specimen by the least-squares fitting method. The probability distribution functions for B and q were investigated using normal, log-normal, and Weibull distributions. As far as this study is considered, it can be appeared that B and q followed the log-normal and Weibull distributions. Moreover, a strong positive linear correlation was found between B and q.

1. 서론

Mod. 9Cr-1Mo(ASME Gr.91) 강은 오스테나이트 스테인리스강에 비교될 만큼 높은 크리프 강도와 내식성을 지니고 있으며, 낮은 열팽창, 열응력과 그리고 높은 열전도성, 피로강도를 가지고 있기 때문에 차세대 미래형 원자로인 소듐 냉각 고속

로나 초고온가스로의 압력용기, 증기발생기, 핵연료 피복관 등의 주요 부품의 후보 재료로 거론되고 있으며,^(1,2) 또한 국내 최초의 초초임계(Ultra-SuperCritical : USC) 화력발전소인 500MW급 당진 5,6호기는 물론 후속 USC 플랜트에도 채택되고 있다.⁽³⁾

소듐 냉각 고속로(Sodium-cooled Fast Reactor : SFR) 및 미래형 원자로 등의 발전소 구조물들은 550°C 이상의 고온에서 20~30년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 장시간에서의 고온 크리프 특성의 파악이 중요하다. 따라서 고

§ 이 논문은 2010년도 신재생에너지 분야 연구개발사업(2010-5.27.-28., 전남대) 발표 논문임.

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

온 구조 재료의 설계 및 잔여수명 예측을 위해서는 크리프, 크리프 균열 발생 및 크리프 균열 성장 거동에 대한 평가가 기초적으로 요구된다. 특히 사용 중 재료 내에 내재된 결함이나 미소 균열들의 성장에 의해 발생하는 크리프 균열 성장이 수명의 대부분을 차지하는 경우에는 크리프 균열 성장 거동의 파악이 중요하다. 이러한 관점에서 최근 9Cr-1Mo 강에 대한 크리프 균열 성장 거동에 관한 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 그러나 국내의 경우 9Cr-1Mo 강에 대한 크리프 균열 성장 거동에 관한 연구가 일부 보고되고 있지만,^(11,12) 현재 실험적 데이터는 아주 부족한 상태이다. 또한 크리프 균열 성장 데이터는 상당한 변동성을 나타내는 것으로 알려져 있으며⁽¹³⁾ 잔여수명의 정확한 예측을 위해서는 확률 통계적 취급이 필요하다.

이러한 관점에서 국제적으로는 크리프 균열 성장에 대한 확률통계론적인 연구결과가 다수 보고되고 있지만,^(5,6,13,14) 동일 온도 동일 응력(하중)에서의 크리프 균열 성장률 법칙에 대한 파라미터의 확률통계적 성질에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

일반적으로 크리프 연성재료에 대한 크리프 균열 성장을 법칙은 다음 식으로 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{da}{dt} = B(C^*)^q \quad (1)$$

여기서, da/dt 는 크리프 균열 성장률(creep crack growth rate)이며, C^* 는 크리프에 대한 파괴역학 파라미터(creep fracture mechanics parameter)이다. 또한 B 는 크리프 균열 성장 계수이며, q 는 크리프 균열 성장 지수이다.

식 (1)의 크리프 균열 성장률 da/dt 를 평가함에 있어서 재료의 확률적 본성(nature of material), 시편의 가공방법, 실험자와 실험실 환경의 변동성 등 복합적인 요인으로 인해 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차의 영향을 줄이고 크리프 균열 성장률을 정확하고 합리적으로 평가하기 위해서는 재료 내·외부의 변수들을 고려한 확률 통계적인 방법이 요구된다.⁽¹⁶⁾

따라서 크리프 균열 성장률의 확률적 특성을 파악하기 위해서는 식 (1)의 크리프 균열 성장률 법칙에 대한 파라미터 B 와 q 의 확률 특성과 확률 변수화의 고찰이 무엇보다도 중요하다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 9Cr-1Mo 강의 600°C에서의 동일 하중조건하에서의 과거의 실험 데이터⁽¹¹⁾에 2개의 시편에 대한 실험을 추가하여 총 5개의 CT시편에 대한 고온 크리프 균열 성장 실험 데이터에 대한 시간 변화에 따른 크리프 균열 성장 데이터를 해석하였다. 그리고 크리프 균열 성장 계수 B 와 크리프 균열 성장 지수 q 의 통계적 성질과 확률분포 거동을 정규 분포, 대수정규 분포 그리고 와이블 분포에 대하여 적합하여 그 확률분포의 적합성을 고찰하였으며, 파라미터의 확률변수화 방법을 고찰하여 B 와 q 의 상관성을 검토하였다.

2. 재료 및 크리프 균열 성장 실험

본 연구에 사용된 Mod. 9Cr-1Mo 강은 열간 압연 후 노말라이징 및 템프링 처리된 것으로서 그 화학적 성분을 Table 1에 나타내었으며, 또한 600°C에서의 고온 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 크리프 균열 성장 실험은 ASTM E1457⁽¹⁵⁾에 준하여 수행하였으며, 본 실험에 사용한 시편은 Fig. 1과 같은 1/2" CT(compact tension) 시편을 사용하였다.

균열의 터널링 현상을 방지하기 위하여 시편의 두께의 20%로 측면 홈을 가공하였다. 예비 균열은 EDM(electro discharge machining)으로 형성시켰다. 시편의 온도 측정을 위한 열전대는 시편 균열면의 아래방향으로 2~5 mm 떨어진 비균열부에 부착하였다. 시편에서의 하중선 변위는 시편의 상하 치구에 각각 봉을 연결하고, 이를 가열로 외부로 빼내어 LVDT(linear variable differential

Table 1 Chemical composition of the 9Cr-1Mo steel

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
0.115	0.415	0.012	0.0014	0.230	0.038	0.220
Cr	Mo	Al	Nb	V	Ti	N
8.9	0.869	0.020	0.073	0.194	0.003	0.0513

Table 2 Mechanical properties of the 9Cr-1Mo steel

Temp. (°C)	E (GPa)	σ_y (MPa)	$\epsilon_p = D(\sigma/\sigma_y)^m$		$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n$	
			D	m	A	n
600	164	247.5	0.0017	6.4	1.28	9.98
					E-27	

Table 3 Creep crack growth testing matrix

Sp. ID.	a (mm)	a_0 (mm)	a_{pf} (mm)	a_{mf} (mm)	B_N (mm)	B (mm)	W (mm)	error(%)
G91-A	10.22	11.669	13.086	13.283	10.119	12.654	25.299	-1.486
G91-B	10.102	11.456	13.624	13.694	10.161	12.688	25.40	-0.511
G91-C	10.077	11.378	13.691	13.726	10.168	12.655	25.345	-0.257
G91-D	10.086	11.614	14.355	14.224	10.179	12.680	25.696	0.924
G91-E	10.075	11.605	13.283	13.436	10.172	12.670	25.346	-1.136

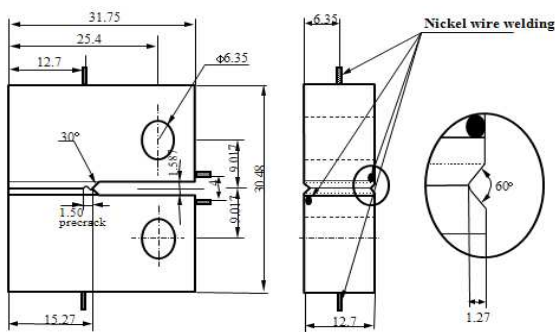


Fig. 1 Geometry of 1/2" CT specimen (unit : mm)

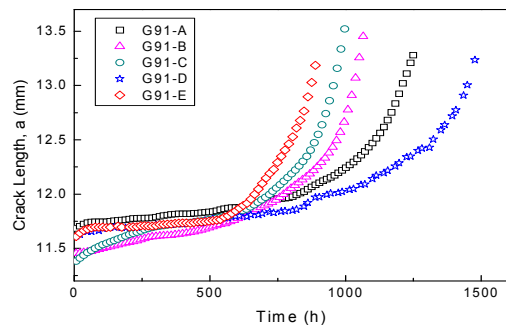


Fig. 2 Creep crack growth curves for 5 specimens

transformer) 변위계이지를 통하여 측정하였다. 시험 중의 균열 길이는 직류전위차법(direct current potential drop, DCPD)을 이용하여 측정하였다.

실험 조건은 600°C의 동일 온도에서 하중을 5000N으로 동일하게 하여 5개의 시험편에 대하여 주의 깊게 실험을 수행하여 크리프 균열 성장 데이터를 획득하였다. 실험 조건 및 균열 길이의 측정 결과의 오차(error, %)를 Table 3에 나타내었으며, 예측 균열길이(a_{pf})와 측정 균열길이(a_{mf})의 오차는 $\pm 5\%$ 이내로 ASTM E1457⁽¹⁵⁾의 요구조건에 만족하고 있음을 알 수 있다.

한편 고온 파괴역학 크리프 파라미터 C^* 의 계산은 Table 2의 정상상태 크리프 속도 법칙과 소성 변형률 법칙의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 구체적인 것은 참고문헌^(11,15)을 참조 바란다.

3. 결과 및 고찰

3.1 크리프 균열 성장 곡선의 불확정성

Fig. 2는 5개의 시험편에 대한 동일 온도, 동일 하중하에서의 시간과 균열길이와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 하나의 시험편에 대한 크리프 균열 성장 곡선의 관계는 전형적인

형태인 곡선형태를 보여주지만, 동일 온도, 동일 하중의 실험 조건하에서도 크리프 균열 성장 곡선의 기울기가 시험편마다 다르게 나타나고 있다. 이는 크리프 균열 성장에 대한 재료의 고온 균열 전파 저항의 국부적 평균치가 시험편간에서 변동한다고 할 수 있으며, 또한 이들 곡선이 서로 겹치고 있으므로 동일 시험편내에서도 재료의 고온 균열 전파 저항에 변동성(variability)이 있음을 알 수 있다. 즉 크리프 균열 성장률(Creep Crack Growth Rate : CCGR)은 결정론적 과정(deterministic process)이 아닌 하나의 확률론적 과정(probabilistic process)임을 분명히 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 크리프 균열 성장 거동에는 불확정성(uncertainty)이 존재하므로 이를 평가하기 위해서는 평균이나 분산만이 아니라 확률 분포의 개념을 고려한 신뢰성공학적 해석이 필요함을 알 수 있다. 이의 정확한 평가를 위해서는 Fig. 2의 크리프 균열 성장 곡선을 동일 균열길이에서 성장하는 것으로 정규화하여 고찰하는 것이 변동성을 해석하는데 더 합리적이라 할 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2에서 균열길이가 11.7 mm에서 성장하는 것으로 정규화하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 정규화한 크리프 균열 성장 곡선에

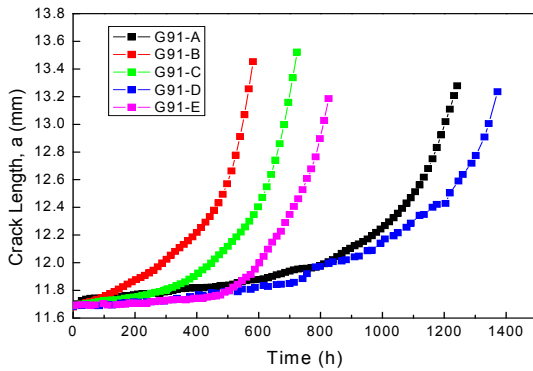


Fig. 3 Normalized creep crack growth curves

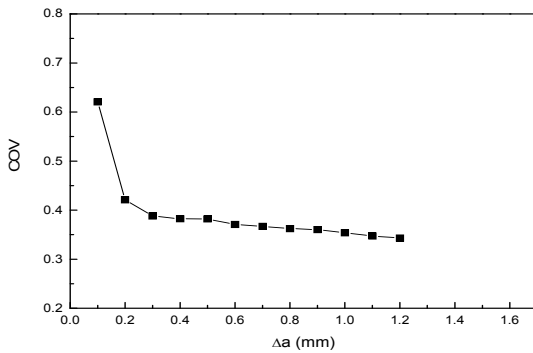


Fig. 4 Coefficients of variation of crack growth life against crack length increment, Δa

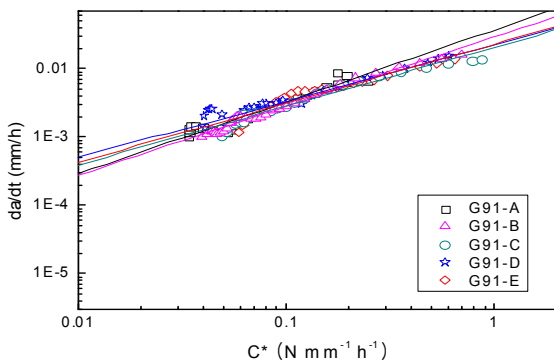


Fig. 5 Creep crack growth data for 5 specimens

서도 분명히 불확정성이 존재함을 알 수 있다.

크리프 균열 성장 곡선의 변동성을 정량화하기 위하여 본 실험에 대한 크리프 균열 성장 수명의 변동계수(COV)를 균열길이의 증분 Δa 대하여 Fig. 4와 같이 고찰하였다. 균열길이의 증분 Δa 가 0.4 mm까지는 크게 변동하다가 그 이후부터는 비교적 동일한 변동계수의 값을 나타내고 있다. 이러한 변동계수에 미치는 인자로는 재질, 하

Table 4 Result values for the parameter B and q

Sp. ID	B ($\times 0.01$)	q
G91-A	3.38	1.03
G91-B	2.98	1.02
G91-C	1.86	0.77
G91-D	2.51	0.88
G91-E	2.04	0.76
Mean	2.55	0.89
STD	0.635	0.13
COV	0.249	0.146
All data	2.50	0.91

중조건, 온도, 초기균열길이 등에 의한 것이라 생각되나 본 실험 조건에 대한 변동계수는 약 35~40% 정도임을 나타내었다. 이는 구조용강의 피로 균열전파수명의 변동계수⁽¹⁷⁾와 비교해서 크리프 균열 성장 수명의 변동계수가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 크리프 균열 성장을 법칙의 정식화

고온 파괴역학에 기초한 크리프 연성재료에 대한 크리프 균열 성장 거동은 보통 양대수 그래프에서 크리프 균열 성장률 da/dt 와 크리프 파괴역학 파라미터 C^* 와의 관계식 식 (1)이 널리 사용되고 있다. Fig. 5는 5개의 시험편에 대한 da/dt 와 C^* 와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서도 알 수 있듯이 크리프 균열 성장률에는 불확정성이 존재함을 알 수 있다. 따라서 정확한 잔여수명 예측을 위해서는 확률론적 수명 예측법이 필요하다고 사료된다. 식 (1)에 대한 각 시험편에 대하여 최소자승법을 이용하여 결정한 파라미터 B 와 q 의 결과치를 Table 4에 나타낸다. 참고로 전 시험편에 대하여 최소자승법에 의한 선형 회귀식으로 구한 크리프 균열 성장 법칙은 아래와 같다.

$$\frac{da}{dt} = 2.50 \times 10^{-2} (C^*)^{0.91} \quad (2)$$

또한 각 시험편에 대하여 구한 파라미터 B 와 q 값을 합산하여 평균법으로 구한 크리프 균열 성장 식은 아래와 같다.

$$\frac{da}{dt} = 2.55 \times 10^{-2} (C^*)^{0.89} \quad (3)$$

본 실험 재료에 대한 크리프 균열 성장률 법칙에 대하여 평균법에 의해 구한 파라미터 B 와 q 는 각각 0.0255와 0.89로, Yamamoto⁽⁸⁾에 의해 구한 $B=0.0407$, $q=0.705$ 와 비교하면 B 값은 0.0152 작고 q 값은 0.185 큰 값을 나타냈다. 이는 동일 재료이지만 화학성분의 차이로 인한 불균질한 재질의 영향이라 사료된다.

3.3 성장률 법칙의 파라미터 B 와 q 의 확률분포

크리프 균열 성장 거동의 변동 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 크리프 성장 법칙의 파라미터 B 와 q 의 분포 성질을 고찰하였다. 본 연구에서는 B 와 q 의 실험결과가 어느 분포에 적합한지를 고찰하기 위하여 실험 데이터의 수와 공학적 활용성을 고려하여 3가지 확률분포에 대해서만 수행하였다. Fig. 6, Fig. 7 그리고 Fig. 8은 B 와 q 의 확률분포를 메디안 랭크법(median rank)에 의하여 정규분포, 대수정규분포 그리고 와이블분포에 적합한 것을 나타낸다. 또한 그림 중에는 각 분포함수에 대하여 적합한 각 파라미터의 값을 표시하였다. B 와 q 에 대한 분포의 적합성을 보면, B 의 경우는 3가지 확률분포에 모두 적합한 것을 알 수 있고, q 의 경우는 대수정규분포 혹은 와이블분포에 잘 따름을 알 수 있다.

3.4 파라미터의 확률변수화 고찰 및 상관성

식 (1)의 파라미터의 확률변수화 방법에는 크게 시험편간 변동 레벨과 시험편내에서의 변동 레벨의 2가지를 고려할 수 있다. 전자는 파라미터 값이 시험편에 의해서 다르다는 것이고, 후자는 하나의 시험편내에서도 파라미터 값이 공간적으로 변동한다고 하는 것이다.

본 연구에서는 해석의 편의를 위해서 하나의 시험편 내에서는 파라미터 값이 공간적으로 동일하다고 가정하고 시험편간에서의 파라미터의 확률변수화에 대하여 고찰한다. 본 실험 결과에 의하면, 두 가지의 확률변수화 방법을 고려할 수 있다. 첫째로 B 와 q 모두 하나의 확률변수(random variable)로 취급하고, 이들 양자 사이에는 상관성이 있는 것과, 둘째는 B 와 q 모두 하나의 확률변수로 취급하고, 이들 양자 사이에는 상관성이 없는 것으로 요약할 수 있다. Fig. 9는 이러한 관점에서 B 와 q 의 상관관계를 조사한 것이다. 여기서 알 수 있듯이 B 와 q 와의 사이에는 선형적인

상관관계가 존재함을 확인할 수 있다.

이상과 같은 고찰로부터 식 (1)을 이용하여 시험편간 확률론적 크리프 균열 성장 수명의 예측을 위해서는 파라미터 B 와 q 는 모두 확률변수로 취급하고, 이들 사이에는 양의 상관성이 존재하는 확률모델을 고려할 필요가 있다고 제안한다.

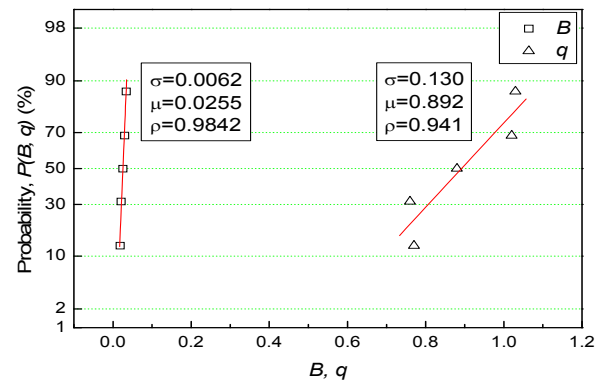


Fig. 6 Normal distribution of the B , q data

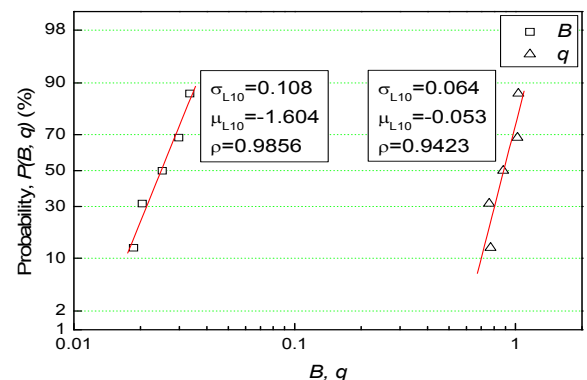


Fig. 7 Log-normal distribution plots for B and q

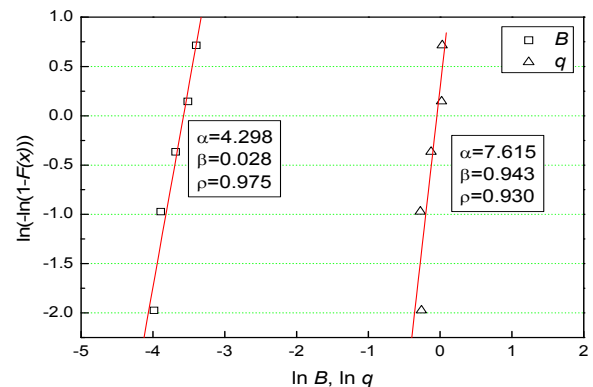


Fig. 8 Weibull distribution plots for B and q

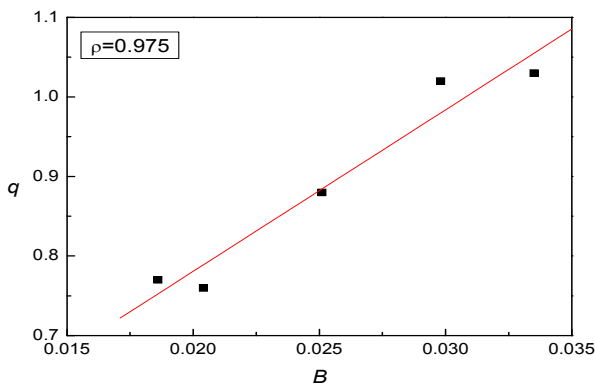


Fig. 9 Relationship between B and q

4. 결론

본 연구에서는 크리프 균열 성장 거동의 변동성에 대한 예측과 크리프 균열 성장률 법칙의 파라미터의 확률특성 및 확률변수화 방법을 명확하게 고찰하기 위하여 동일 온도, 동일 하중에 의한 크리프 균열 성장 실험을 수행하여 크리프 균열 성장 곡선의 불확정성과 균열 성장률 법칙의 파라미터의 확률특성에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크리프 균열 성장 곡선에는 분명히 변동성이 존재함을 알았다.

(2) 크리프 균열 성장률 법칙의 파라미터 B 와 q 는 비교적 대수정규분포 혹은 와이블분포에 잘 따름을 알았다.

(3) 크리프 균열 성장률 법칙의 확률변수화시 파라미터 B 와 q 는 모두 확률변수로 취급하고, 이들 사이에는 양의 상관성이 존재하는 확률모델을 고려할 필요가 있음을 알았다.

후 기

본 연구는 2009학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구(PK-2009-41) 결과의 일부로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Orr, J. and Burton, D., 1994, "Improving the Elevated Temperature Strength of Steel 91(9%CrMoNbVN)," *Materials for Advanced Power Engineering*, Vol. 1, pp. 263~280.

- (2) Cadek, J., Sustek, V. and Pahutova, M., 1997, "An Analysis of Set of Creep Data for a 9Cr-1Mo-0.2V (P91 type) Steel," *Material Science and Engineering: A*, Vol. 225, pp. 22~28.
- (3) Lee, H. Y. and Lee, J. H., 2010, "Development of Assessment Methodology on Creep-Fatigue Crack Behavior for a Grade 91 Steel Structure," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 1, pp. 103~110.
- (4) Hamata, N., Mat L. and Shibli IA, 2001, "Creep Crack Growth of Seam Welded P22/P91 Pipes with Artificial Defects. Part II. Data Analysis," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 827~835.
- (5) Nikbin, K. M., Yatomi, M., Wasmer, K. and Webster G. A., 2003, "Probabilistic Analysis of Creep Crack initiation and Growth in Pipe Components," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, pp. 585~595.
- (6) Deschanel, H., Escaravage, C., Thiry, J. M., Hamata, N. and Colantoni, D., 2006, "Assessment of Industrial Components in High Temperature Plant Using the ALIAS-HIDA- A Case Study," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, pp. 767~779.
- (7) Dogan, B. and Ptrovski, B., 2001, "Creep Crack Growth of High Temperature Weldment," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 795~805.
- (8) Yamamoto, M., Miura, N. and Ogata, T., 2010, "Applicability of C* Parameter in Assessing Type IV Creep Cracking in Mod. 9Cr-1Mo steel Welded Joint," *Engineering Fracture Mechanics*, (In Press)
- (9) Hyde, T. H., Saber, M. and Sun, W., 2010, "Testing and Modelling of Creep Crack Growth in Compact tension Specimens from a P91 Weld at 650°C," *Engineering Fracture Mechanics*, (In Press)
- (10) Maleki, S., Zhang, Y. and Nikbin, K., 2010, "Prediction of Creep Crack Growth Properties of P91 Parent and Welded Steel Using Remaining Failure Strain Criteria," *Engineering Fracture Mechanics*, (In Press)

- (11) Jung, I. H., Kim, W. G., Yin, S. N., Ryu, W. S. and Kim, S. J., 2009, "Statistical Analysis for Creep Crack Growth Behavior of Mod. 9Cr-1Mo Steel," *J. Kor. Inst. Met & Mater.*, Vol. 47, No. 5, pp. 283~289.
- (12) Jung, I. H., 2009, "Statistical Analysis of Creep Crack Growth Behavior by Monte-Carlo Simulation for Grade 9Cr-1Mo Steel," Master Thesis, Pukyong National University
- (13) Cliniak, J. T., Harlow, D. G. and Delph, T. J., "A Probabilistic Model for the Growth of Creep Crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 57, No. 1, pp. 25~39.
- (14) Ozmat, B., Argon, A. S. and Parks, D. M., 1991, "Growth Modes of Cracks in Creeping Type 304 Stainless Steel," *Mech. Mater.*, Vol. 11, pp. 1~17.
- (15) ASTM E1457-07, 2007, "Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Rates in Metals", ASTM
- (16) Yatomi, M., 2003, "Factors Affecting the Failure Cracked Components at Elevated Temperature," *Imperial College London*, pp. 43~59.
- (17) Jeong, H. C. and Kim, S. J., 2003, "Probabilistic Fatigue Crack Growth Behavior under Constant Amplitude Loads," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 6, pp. 923~929.