

# 고온설비의 FFS평가를 위한 308 스테인리스강의 크리프 균열성장 재료물성에 대한 연구

이경용 · 백운봉\* · 윤기봉†\*\*

중앙대학교 대학원 · \*한국표준과학연구원 · \*\*중앙대학교 기계공학부  
(2002. 5. 9. 접수 / 2002. 11. 12. 채택)

## A Study on Creep Crack Growth Properties of 308 SS for FFS Evaluation of High Temperature Components

Kyung Yong Lee · Un Bong Baek\* · Kee Bong Yoon†\*\*

Graduate School of Chung-Ang University · \*KRISS

\*\*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received May 9, 2002 / Accepted November 12, 2002)

**Abstract** : For fitness-for-service evaluation of high temperature plant components with defects, crack growth life must be assessed properly as indicated in the recent draft of API 579 code. Type 308 stainless steel has been widely used as a field weld material in the petrochemical industry.

In this study, creep crack growth data of type 308 stainless steel are collected and re-analyzed using  $C_I$  as a characterizing fracture parameter. A unique  $da/dt$  versus  $C_I$  relationship was obtained despite of difference of creep deformation constant of the reviewed materials and specimen geometry of the tested specimens. The obtained results can be employed for crack growth life assessment and fitness-for-service evaluation for the cracks in high temperature components. It is also argued that since the effect of creep properties and other material variability on the creep crack growth behavior would be minor the obtained model may be applied for most of the 308 stainless steels.

**Key words** : creep crack growth, FFS, 308SS, crack

### 1. 서 론

중화학 플랜트 고온설비 요소의 진단 및 검사를 수행하기 위한 국내 기준은 미국 석유협회(API, American Petroleum Institute)의 기준을 국내 법규 및 산업계 실정에 맞게 수정하여 1997년 이후부터 국내 기술기준 및 지침으로 제정되고 있다<sup>1-6)</sup>. 그러나, 지금까지 제정된 기준은 주로 진단 절차에 대한 기준이며 이에 따라 진단을 수행하여 결함이 발견된 경우 결함의 처리 방안을 결정하기 위해서는 독립된 평가 절차인 FFS(Fitness For Service)용 기준을 사용하여 해석을 수행하게 된다. FFS절차로서 널리 사용중인 기준 중에서 API 579기준의 고온설비의

결함 평가절차에는 크리프 균열성장 평가에 의한 잔여수명 평가 절차가 사용되고 있다<sup>7)</sup>.

중화학 플랜트 고온설비의 현장용접에는 다른 강에 비해 용접성이 좋은 308 스테인리스강을 사용하여 용접되는 것이 많다. 또한, 이 재료를 사용하여 용접된 경우 사용 중 균열 발생이 많이 보고되고 있으므로, 308 스테인리스강의 모재 및 용접재의 균열에 대한 고온에서의 크리프 균열성장에 따른 수명 평가를 API 579절차 등에 따라 수행할 필요성이 높다. 그러나 308 스테인리스강의 경우 크리프 균열성장에 관한 데이터는 매우 제한적이므로 균열성장 수명의 평가에 어려움이 많았다.

본 논문에서는 현재까지 연구되어 발표된 308 스테인리스강의 크리프 균열성장(CCG, creep crack growth) 실험 데이터를 다수 수집하여 연구하였으며, 데이터를 상호 비교할 때에 비교의 일관성을 유

† To whom correspondence should be addressed.  
kbyoon@cau.ac.kr

Table 1. Chemical composition of 308 stainless steels reviewed in this study(weight %)

No.	Materials	Data Source	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	O	N	Bi	Nb	$\delta$ -ferrite
1	308 weld (FCAW')	Konosu, Hashimoto et.al (1998) [9]	0.06	0.26	1.33	0.025	0.009	9.44	18.69	0.061	0.034	0.045	<0.001	0.013	3.5
2	308 weld (SMAW')	"	0.059	0.25	1.83	0.013	0.005	9.74	19.6	0.028	0.068	0.03	<0.001	0.015	4.7
3	308 weld (FCAW), aged <sup>2</sup>	Konosu, Mashiba et.al (2001) [10]	0.06	0.26	1.33	0.025	0.009	9.44	18.69	0.061	0.034	0.045	<0.001	0.013	1.5
4	308 weld (SMAW), aged	"	0.059	0.25	1.83	0.013	0.005	9.74	19.6	0.028	0.068	0.03	<0.001	0.015	1.4
5	308 weld (micro plasma weld)	Kamaraj, Radhakrishnam(1989,1990) [11],[12]	0.035	0.49	2.40	-	-	13.18	22.5	-	-	-	-	0.7	4.0
6	308 base	Radhakrishnam, Kamaraj (1991) [13],[14]	0.035	0.49	2.40	-	-	13.18	22.5	-	-	-	-	0.7	4.0

Note: 1 FCAW ; Flux Cored Arc Welding, 2 SMAW ; Shielded Metal Arc Welding, 3 Aged ; aging for 3000hrs at 650°C

지하고, 정상조건 외의 천이조건에서도 적용하기 위해, 수집된 데이터를 특성화 매개변수  $C_i$  로 재해석하였다. 본 연구 결과 제시된 CCG 모델을 사용하여 주로 천이조건에서 운전되는 요소의 균열성장률에 따른 잔여수명을 평가할 수 있다.

### 2. 이론적 배경

플랜트의 실제 기기 요소의 경우 균열크기에 비해 비균열부의 크기가 상대적으로 큰 경우가 많기 때문에 소규모 크리프(small scale creep)와 천이 크리프(transition creep) 조건이 부재의 균열성장수명의 상당 부분 시간을 차지한다. 반면에 스테인리스강의 경우 실험실에서의 균열성장률 측정시험 중에 발생하는 크리프 조건은 소규모 크리프나 천이 크리프 조건을 만족하기도 하지만 많은 경우 높은 시험하중 조건 때문에 천이조건보다 정상 조건을 만족하는 상태에서 균열성장률을 측정하게 된다. 따라서, 비균열부의 응력분포가 정상조건에 도달한 경우와 이전의 천이조건에서 공통적으로 통용되는 파괴 매개변수인  $C_i$ -매개변수를 사용하는 것이 정상조건에서만 통용되는  $C^*$ -적분을 사용하는 것보다 타당하다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 소규모 크리프에서의  $C_i$ 값과 정상상태  $C_i$ 값인  $C^*$ 값을 더하여 전 영역조건에서의  $C_i$ 값을 나타내는  $C_i$  측정값 계산식[8]인 식(1)을 사용하여 데이터를 재해석하였다.

$$C_i = \frac{P\dot{V}_c}{BW} \frac{F'}{F} - C^* \left( \frac{F'}{F} \frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 하중,  $B$ 는 시편두께,  $W$ 는 시편의 폭이며,  $F'$ 는  $K$ -보정 함수( $K$ -calibration factor),  $F'$ 은  $dF/d(a/W)$ ,  $\eta$ 는 균열길이와 크리프 지수에 의존하는 무차원함수<sup>8)</sup>로서 식(2)와 같이 표현된다.

$$\eta \left( \frac{a}{W}, n \right) = \frac{1}{(1 - a/W)} \frac{n}{n+1} \left( \gamma - \frac{\delta}{n} \right) \quad (2)$$

$C^*$ 는  $J$ 의 완전소성부분을 계산하는 식으로부터 해석적인 방법으로 얻어진  $C^*$ 값이다. CT 시편인 경우  $C^*$ 식은 식(3)과 같으며, CCT(Center Cracked Tension) 시편인 경우  $C^*$ 식은 식(4)와 같이 표현된다.

$$C^* = \frac{A}{(W-a)^n} h_1 \left( \frac{a}{W}, n \right) \times \left( \frac{P}{1.455\zeta B} \right)^{n+1} \quad (3)$$

$$C^* = \frac{Aa}{(1-a/W)^n} h_1 \left( \frac{a}{W}, n \right) \times \left( \frac{P}{2BW} \right)^{n+1} \quad (4)$$

이 식에서,  $A$ ,  $n$ 은 크리프 상수,  $a$ 는 균열크기이며,  $\zeta$ 는 무차원 함수이다.  $h_1$ 함수는 균열크기에 따라 변하는 함수로서  $n$ 이 12이고 평면응력 상태인 경우 EPRI handbook 데이터로부터 식(5)로 결정된다.

$$h_1 \left( \frac{a}{W}, 12 \right) = 6.749 - 21.735 \left( \frac{a}{W} \right) + 27.178 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 11.591 \left( \frac{a}{W} \right)^3 \quad (5)$$

### 3. 결과 및 토의

308 스테인리스강의 크리프 균열성장 거동은 Konosu 등과 Radhakrishnam 등에 의해 연구되었다<sup>9-14)</sup>. 최근에 발표된 Konosu 등<sup>9-10)</sup>의 CCG 연구결과는 ASTM 규격 시험에 준하는 실험과정에 의해 측정된 것이며, 직류전위차법을 사용하여 실험 중 연속적으로 균열길이가 측정되었다. 한편, Radhakrishnam 등<sup>11-14)</sup>의 연구에서는 비규격 시편인 CCT시편을 사용하였으며 균열길이의 모니터도 육안으로 수행되었다. 또한 시편두께도 0.5~1mm로 평면응력 조건에 가깝다. 그러나 기존 데이터의 회귀성 때문

Table 2. Tensile and creep properties of 308 stainless steel reviewed in this study

No.	Materials	Test Temp.(C)	Secondary Creep Constants <sup>1</sup>		Tensile Property(Room Temp.)	
			A(MPa <sup>n</sup> hr <sup>-1</sup> )	n	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{ts}$ (MPa)
1	308 weld (FCAW)	650	$8.17 \times 10^{-38}$	15.38	267	691
2	308 weld (SMAW)	650	$4.32 \times 10^{-35}$	13.26	307	583
3	308 weld (FCAW), aged	650	$1.91 \times 10^{-27}$	10.01	-	-
4	308 weld (SMAW), aged	650	$4.06 \times 10^{-25}$	9.79	-	-
5	308 weld (micro plasma weld)	600,700,800	-	-	-	-
6	308 base	600,700,800	-	-	-	-

Note: <sup>1</sup>Secondary Creep Model;  $\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma^n$

에 이들 연구결과로부터 얻은 모든 데이터를 일관 해석하여  $da/dt$  vs.  $C$  관계를 유도하였다. 다음에 해석된 자료의 재료 화학성분 및 기계적 물성의 차이를 정리하였으며, 크리프 균열성장 데이터를 비교 분석하였다.

### 3.1. 재료 성분 및 물성

데이터의 해석은 308 스테인리스강의 용접재 및 모재에 대해 수행하였다. 이들 재료의 조성은 Table 1에 정리하여 나타내었으며, 고온 인장 및 크리프 물성은 Table 2에 나타내었다. 인장물성은 항복응력 및 인장강도를 포함하고 있으며, 크리프 물성은 재료가 Norton의 식,  $\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma^n$  을 만족한다고 가정하여 결정된 상수 및 지수이다. 이 값들은 문헌에서 측정된 것을 인용한 것이며, 각각의 재료에 대해 Table 2에 열거한 모든 기계물성 값이 보고되지 않았으므로 일부 알려지지 않은 물성은 표시하지 않았다. 예를 들어, 문헌[13,14]의 자료는 크리프 균열성장 데이터를 포함하고 있으나 인장물성 및 크리프 물성을 포함하지 않고 있다.

Konosu, Hashimoto 등<sup>9)</sup>은 650°C에서 308 스테인리스강의 용접방법에 따른 크리프 균열성장 데이터를 포함하고 있으며, 용접 종류는 FACW(Flux Cored Arc Welding) 및 SMAW(Shielded Metal Arc Welding)이다. 크리프 시험을 위해 용접부(Weld Metal)에서 지름 6mm의 봉 형태의 시편을 가공을 하였으며, 크리프 균열성장 시험은 두께 8.5mm의 CT시편으로 평면변형률 조건에서 수행하였다. 이 결과는 weld (FCAW)-650°C와 weld(SMAW)-650°C로 표기하였다. Konosu, Mashiba 등<sup>10)</sup>은 FACW 및 SMAW 용접 후에 재료를 고온에서 열화 시켜, 열화 시키지 않은 재료와 크리프 균열성장 거동을 비교하였다. 이 경우에도 크리프 시험은 지름 6mm의 봉 형상으로 가공하여 수행했으며, 크리프 균열성장은 두께 8.5mm의

CT시편으로 수행하였다. 이 재료는 본 논문 그래프에서 각각 weld aged(FACW)- 650°C와 weld aged(SMAW)-650°C로 표기하였다.

Kamaraj, Radhakrishnam 등<sup>11-12)</sup>은 308 스테인리스강의 용접재 크리프 균열성장 거동을 연구하기 위해 프라즈마용접을 수행한 후, CCT시편으로 가공하여 시험을 수행하였다. CCT 시편은 두께 1mm, 노치깊이 2mm인 판상 형태이며, 평면응력에 가까운 조건에서 시험을 수행하였다. 또한 크리프 균열성장 거동의 온도 의존성을 확인하기 위해 600°C, 700°C, 800°C의 온도구간에서 시험을 수행하였다. 이 결과는 weld-600°C, weld-700°C 및 weld-800°C 등으로 표기하였다. Radhakrishnam, Kamaraj 등<sup>13-14)</sup>은 308 스테인리스강 모재의 크리프 균열성장 거동 데이터를 포함하고 있다. 시편은 두께 0.5mm, 노치깊이 3mm인 판상 형태의 CCT시편이며 평면응력 조건에 가깝다고 볼 수 있다. 시험온도는 600°C, 700°C, 800°C 이었다. 이 데이터는 base-600°C, base-700°C 및 base-800°C로 표기하였다.

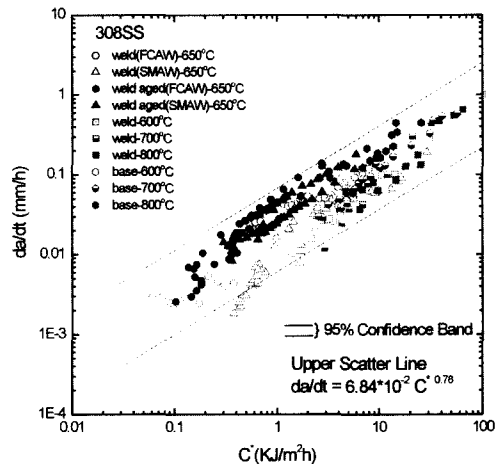


Fig. 1.  $da/dt$  vs.  $C$  relations of type 308 stainless steel

### 3.2. 크리프 균열성장 데이터의 분석

재료의 조성, 용접방법, 시편 형상, 시험온도 등이 각각 다른 조건에서 측정된 데이터를 비교하기 위해, 각 문헌상의 결과 그래프를 디지털화하여 데이터 파일화 하였으며, 이를 재해석함으로써 파괴 매개변수  $C_i$ 로 특성화하여 비교하였다.

$$C^* = \frac{P \dot{V}_c}{BW} \gamma \left( \frac{a}{W} \right) \quad (6)$$

Konosu<sup>9,10)</sup> 등은 식(6)을 사용하여  $C^*$  값을 결정하여 크리프 균열성장률을 특성화하였다. 이 결과의 재해석을 위해 우선 이 문헌의  $da/dt$  vs.  $C^*$  선도를 디지털화하여 데이터 파일화하였다. 또한, 동일한 문헌<sup>9,10)</sup>에 보고된 시간에 따른 균열크기, 시간에 따른 하중선변위 선도를 디지털화하여 데이터 파일화하였으며, 이들 데이터를 근거로 하여  $\dot{V}_c$ 를 결정하였다.  $\dot{V}_c$ 를 식(1)에 대입하여 식(3)으로 계산된 값과 함께  $C_i$  값을 계산하였다.

Radhakrishnam<sup>11-14)</sup> 등은 식(7)을 사용하여  $C^*$  값을 구해 크리프 균열성장률과의 관계를 나타내었다.

$$C^* = \frac{n}{n+1} \frac{P}{B(W-a)} \dot{V}_c \quad (7)$$

이 경우도 앞과 동일한 방법으로  $da/dt$  vs.  $C^*$  선도를 디지털화하여 데이터 파일화 하였다. 그러나 문헌에 시간에 따른 균열크기 및 하중선변위를 제시하지 않고 있으므로, 다음 절차에 따라  $C^*$ 를  $C_i$ 로 변환하였다. 즉 전체 데이터의 대표적인 균열비를  $a/W=0.3 \sim 0.5$ 로 가정하고  $n$ 값 및  $A$ 값을 알려진 평균

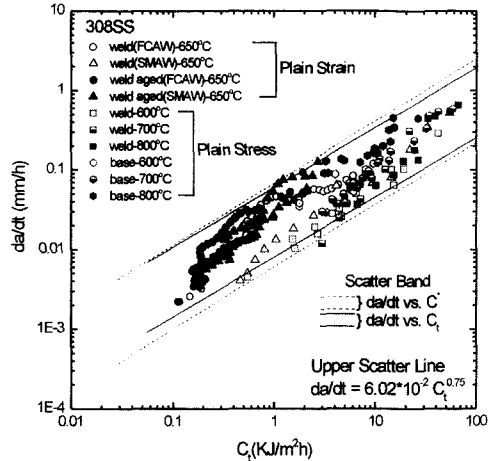


Fig. 2.  $da/dt$  vs.  $C_i$  relations of type 308 stainless steel

값 12 및  $5.86 \times 10^{-30}$ 으로 가정하여 식(6)과 식(1)을 비교하여 그때의 변화값을 적용하였다. 이때  $C^*$ 는 CCT의 평면응력 조건에서의  $C^*$  식인 식(4)를 사용하여 계산하였다.

Fig. 1에는 문헌<sup>9,14)</sup>의  $da/dt$  vs.  $C^*$  선도를 모아 중첩해서 표시하였으며, Fig. 2에는 문헌들의 데이터를 다시 해석하여  $da/dt$  vs.  $C_i$  선도로 도시하였다. Fig. 2에는  $C^*$  값에 의한 CCG 결과와  $C_i$  값에 의한 결과를 비교하기 위해, 각각의 분포밴드를 함께 나타내었다. 전체 데이터를 사용한 회귀선의 식은 Fig. 2에 표시하였으나, 각 경우의 CCG 거동은  $da/dt = p(C_i)^q$  식을 만족한다고 가정하고  $p, q$  값을 결정하여 Table 3에 나타내었다. 여기에서 결정한 상수 및 지수를 통해 각 경우 재료들의 크리프 균열성장률과  $C_i$ 의 관계를 구할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2를 비교해 보면  $C_i$ 로 평가한 분포밴드가  $C^*$ 를

Table 3. Creep crack growth properties of 308 stainless steels reviewed in this study

No.	Materials	Test Temp.(°C)	Creep Crack Growth Properties I		Specimen Thickness(mm)	Specimen Geometry
			$p$	$q$		
1	308 weld (FCAW)	650	$2.46 \times 10^{-2}$	0.96	8.5	Compact Tension
2	308 weld (SMAW)	650	$1.08 \times 10^{-2}$	0.94	8.5	Compact Tension
3	308 weld (FCAW), aged	650	$6.73 \times 10^{-2}$	1.43	8.5	Compact Tension
4	308 weld (SMAW), aged	650	$3.41 \times 10^{-2}$	1.15	8.5	Compact Tension
5	308 weld (micro plasma weld)	600	$7.68 \times 10^{-3}$	0.92	1.0	Center Cracked Tension
		700	$3.43 \times 10^{-3}$	1.41	1.0	
		800	$5.14 \times 10^{-3}$	1.13	1.0	
6	308 base	600	$2.47 \times 10^{-2}$	0.61	0.5	Center Cracked Tension
		700	$9.27 \times 10^{-3}$	1.05	0.5	
		800	$3.85 \times 10^{-2}$	0.73	0.5	

Note : <sup>1</sup>Creep Crack Growth Model:  $da/dt = p(C_i)^q$ ,  $C_i$  in  $KJ/m^2$ ,  $da/dt$  in  $mm/h$

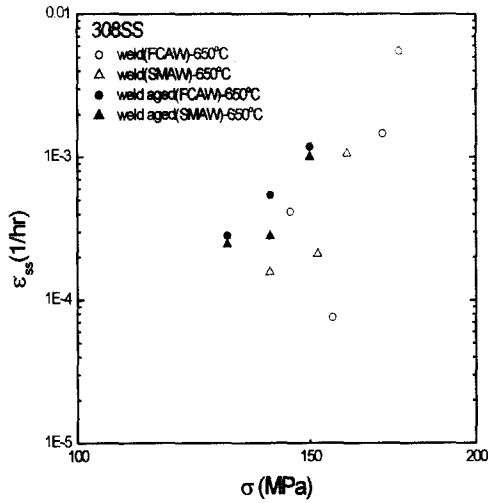


Fig. 4. Creep data collected for Type 308 stainless steel.

사용한 경우의 분포밴드보다 산포도가 작다. 하지만, 그 차이가 크지 않으므로  $C^*$ 나  $C_t$  두 변수 모두 균열성장 수명평가에 사용할 수 있는 듯이 보인다. 하지만 이것은 실험실에서의 CCG실험 조건이 대부분 정상상태를 만족하는 조건이기 때문이며, 천이상태 조건에서 균열이 성장하게 되는 실제 기기 조건에서는  $C^*$ 는 확장 적용될 수 없고  $C_t$ 가 확장 적용될 수 있으므로<sup>8)</sup> 균열성장에 따른 FFS 평가 절차에는 Fig. 2에 표시한 데이터가 필요하다<sup>15,16)</sup>.  $C^*$ 를 천이상태에 적용하기 위해 연구되고 있는 “공학적 방법”<sup>17)</sup>을 사용하려 할 때에는 Fig. 1의 데이터를 활용할 수 있다.

$C_t$ 를 사용하는 경우 보수적인 평가를 위해 Fig. 2의 상부 한계분포선을 사용하여 수명평가를 수행하거나, 통계적인 접근법<sup>18,19)</sup>을 사용하여야 한다. 상부한계 분포선인 식(8)에 크리프 균열성장 상수 및 지수를 결정하여 이 관계식을 나타내었으며, 이를 사용하여 고온에서 308 스테인리스강 용접부의 크리프 균열성장거동을 평가 할 수 있다.

$$da/dt = 6.02 \times 10^{-2} C_t^{0.75} \quad (8)$$

Fig. 2에서 보면 평면 변형률조건하의 크리프 균열성장률<sup>9,10)</sup>이 평면응력 조건하의 균열성장률<sup>12,14)</sup>보다 상대적으로 높음을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 수명평가가 필요할 때에는 실제 기기 요소 두께의 차이에 따른 응력조건 차이 즉 균열선단

구속효과의 차이를 고려하여 CCG데이터를 선정함이 바람직하다.

크리프 균열성장률의 온도 의존성을 보면, 600°C, 650°C, 700°C, 800°C인 다양한 온도구간에서 시험을 수행하였으나 CCG 데이터들이 일정한 분포밴드에 잘 들어오는 것을 확인할 수 있다. 이는  $C_t$ 값을 평가할 때에  $C_t$ 값 평가식 내에 크리프 상수  $A$ ,  $n$  등이 포함되므로 온도에 따른 크리프 물성의 차이는 이미  $C_t$ 값에 반영되었기 때문이라고 볼 수 있다. Fig. 3은 Table 2에 표시된  $A$ ,  $n$  값들을 결정하는데 사용된 크리프 변형 데이터( $\dot{\epsilon}_{ss}$  및  $\sigma$ )값을 한 그래프에 표시한 것이다. 용접재, 모재, 온도 등에 따라 변형률 속도와 응력의 관계의 산포가 큼을 볼 수 있다. 그러나 이처럼 크리프 변형 물성의 산포가 크더라도 CCG물성의 산포는 크지 않은은 이 물성의 차이가  $C_t$ 에 반영되어 있기 때문으로 보여진다. 이와 유사한 경향은 저합금강의 CCG 데이터를 해석한 결과에서도 나타난다<sup>20)</sup>. 따라서 본 논문에서 정리된 308 스테인레스 강 of CCG 모델은 대부분의 동일 강종에 일반적으로 사용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온결합의 FFS평가 시 사용될 신뢰성 있는 균열성장 데이터를 얻기 위하여 기존에 연구 발표된 308 스테인리스강의 크리프 균열성장 거동 데이터를 수집 및 재해석하였다. 데이터 비교 시 일관성을 유지하기 위하여 파괴매개변수  $C_t$ 를 기준으로 일반화하였다. 주요 연구 내용 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 문헌에 보고된 균열성장 데이터를  $C_t$ -매개변수로 변환하여 비교하는 방법을 제시하였다.
- (2) 온도, 재료조성, 용접방법 등에 따라 크리프 변형 거동은 다양하게 나타났지만, 크리프 균열성장률을  $C_t$ 로 특성화한 경우, CCG 거동은 비교적 작은 산포도를 보이며 일정한 경향을 나타내었으므로 이를 308 스테인리스강의 고온 균열성장에 의한 수명평가 및 FFS평가에 사용할 수 있다.
- (3)  $C_t$ 값의 평가식에 크리프 상수가 포함되어 있으므로 재료별 크리프 변형거동의 차이가  $C_t$ 에 일차적으로 반영되므로 CCG거동의 산포도가 작게 나타난다.

감사의 글 : 본 논문은 과학기술부 인위재해 방재기술개발 사업중 “산업 및 에너지시설의 예방안전관리 시스템개발” 과제의 위탁 연구인 “국내 고온 산업용 설비의 검사평가기준에 대한 연구”의 결과이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

- 1) 가스기술기준(KGS PV001-1998), “압력용기 사용중 검사기준,” 1998.
- 2) 가스기술기준(KGS PV002-1999), “압력용기 검사 실무지침,” 1999.
- 3) 가스기술기준(KGS P001-1999), “석유화학 배관계 검사기준,” 1999.
- 4) 가스기술기준(KGS P002-1999), “석유화학 배관계 검사 실무 지침,” 1999.
- 5) 가스기술기준(KGS PV009-2000), “석유화학용 가열로 튜브두께 계산 기준,” 2000.
- 6) 가스기술기준(KGS PV010-2000), “직화식 가열로 및 보일러검사 실무지침,” 2000.
- 7) Section 10 Assessment of Components Operating in the Creep Regime, API 579 Fitness for Service Procedures, (Draft) January 2000.
- 8) A. Saxena, “Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers,” CRC Press, 1998.
- 9) S. Konosu, A. Hashimoto, H. Mashiba, M. Takeshima and T. Ohtsuka, “Creep crack growth properties of type 308 austenitic stainless steel weld metals,” *Welding Journal*, Vol. 77, No. 8, pp. 322~327, 1998.
- 10) S. Konosu, H. Mashiba, M. Takeshima, and T. Ohtsuka, “Effects of pretest ageing on creep crack growth properties of type 308 austenitic stainless steel weld metals,” *Engineering Failure Analysis*, Vol. 8, No. 1, pp. 75~85, 2001.
- 11) M. Kamaraj and V. M. Radhakrishnan, “Creep cracking in austenitic weld metal,” *ICF 7. Advances in Fracture Research*, Vol. 2, Houston, Texas, USA, 20~24 Mar, 1989.
- 12) V. M. Radhakrishnan and M. Kamaraj, “Relation between rupture time and steady state rate integral,” *Materials Science & Engineering A*, Vol. A127, No. 1, pp.15~18, 1990.
- 13) V. M. Radhakrishnan, M. Kamaraj and V. V. Balasubramaniam, “Life estimation of cracked stainless steel components under creep conditions,” *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 113, No. 3, pp.303~316, 1991.
- 14) V. M. Radhakrishnan and M. Kamaraj, “An analysis of high-temperature crack growth in type 308 Cb stainless steel and its weldment,” *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 113, No. 4, pp. 538~541, 1991.
- 15) K. B. Yoon and A. Saxena, “Creep crack growth and creep-fatigue crack growth data collection for low alloy steel,” Georgia Institute of Technology, Report submitted to The Materials Properties Council Inc., February 13, 2002.
- 16) K. B. Yoon and A. Saxena, “Assessment of defects in high temperature components” : Part II Creep crack growth analysis of surface cracks in a pressurized cylinder, Georgia Institute of Technology, Report submitted to The Materials Properties Council, 2002.
- 17) G. A. Webster and R. A. Ainsworth, *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall, 1994.
- 18) D. O. Harris, C. H. Wells, H. J. Grunloh, R. H. Ryder, J. M. Bloom, C. C. Schultz and R. Viswanathan, BLESS: Boiler Life Evaluation and Simulation System, A Computer Code for Reliability Analysis of Headers and Piping , Reliability and Risk in Pressure Vessels and Piping, ASME PVP Vol. 251, pp. 17-26, 1993.
- 19) D. O. Harris, “Probabilistic Fracture Mechanics with Applications to Inspection Planning and Design Reliability Technology,” ASME AD Vol. 28 pp. 57-76, 1992.
- 20) A. Saxena, J. Han and K. Banerji, “Creep Crack Growth Behavior in Power Plant Boiler and Steam Pipe Steels,” *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 137~146, 1998.