# Cr-Mo강 용접열영향부에서의 고온 균열성장거동 연구

# (HAZ Crack Growth Behavior of Cr-Mo Steel at Elevated Temperature)

윤기봉(중앙대), 신규인(충북대대학원),
정용근(한국중공업 기술연구원), 이해무(KRISS, 방재기술연구센터)

## A B S T R A C T

Fracture behavior of ex-serviced 1Cr-0.5Mo steel was measured at room(24℃) and elevated(538 ℃) temperature and compared with that measured with virgin 1Cr-0.5Mo steel. Compact C(T) specimens were machined from the base and welded test materials. In case of the C(T) specimens of the weld, fatigue precrack was introduced along the fusion line so that a crack growth should occur along the region of heat affected zone.

It was observed that the J-R curve of the serviced material was significantly lower than that of the virgin material at room temperature. Brittle fracture was observed in the serviced material. On the other hand at elevated temperature no noticeable difference was found between the J-R curves of the virgin and the serviced material. The measured J-R curves were also compared with those of the 1.25Cr-0.5Mo steel from other literatures. Optical microscopy and SEM examination of the serviced material reveal the carbide in/along the grain boundary which shows material degradation due to long-term usage.

## 1. 서 론

고온에서 사용되는 두꺼운 구조물들은 처음부터 존재하는 결함이나 사용 중에 생기는 결함들의 성장으로 파괴된다. 이러한 균열성장에 의한 파괴는 특히 용접으로 제작되어 있는 요소들에서 발생된다. 용접 요소의 균열은 모재부보다는 모재부와 용접부 사이의 열영향부(HAZ)를 따라서 균열이 발생 성장하는 경향이 있다. 따라서, 용접 열영향부 균열에 대한 균열성장 수명평가는 실제 고온 구조물의 수명진단에 매우 중요하다. 본 논문에서는 약 30년 사용 후 최근 폐기된 국내 화력발전소의 과열기 출구헤더 재료인 1Cr-0.5Mo 강의 파괴거동에 대해 연구하였다. 헤더에서 채취한 열화재와 열화재를 열처리하여 탈취화시킨 신재에 대해서 상온 (24℃)에서는 모재부에, 고온 (538℃)에서는 모재부와 용접부에 균열이 있는 경우의 파괴거동을 비교 연구하였다. 본 연구 결과 측정된 파괴 인성값 및 재료특성을 사용하여 실제 헤더부에서 균열에 대해 불안정 균열성장의 가능성 여부를 평가함으로써 본 결과의 응용방법을 보여 주었다. 본 연구로 측정된 재료의 파괴인성 거동은 실제 고온설비에서 수명 예측을 실시할 때에 유용하게 사용될 수 있는 자료가 될 것으로 본다.

## 2. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 국내 화력발전소에서 1965년부터 사용되다가 최근 폐기된 보일러 과열기 출구헤더(superheater outlet header)부의 재료로서 538℃에서 약 180,000 시간 사용된 1Cr-0.5Mo강이다. 실험재료로부터 NNN 및 SNS로 표시하여 구별되는 2가지 형태의 용접부 실험 재료를 준비하였다. 즉 고온에서 장기간 사용되어 재질 특성이 열화된 재료를 사용재(serviced material)라 하여 S로 표기하였고, 사용재의 열화된 재료물성을 회복하기 위해 이를 탈취화 열처리를 실시하여 원래의 재료특성을 회복한 재료를 신재(new material)라 하여 N으로 표기하였다. 이 두가지 재료로부터 사용재와 사용재 사이를 동종 용접재를 사용하여 용접한 재료를 SNS재료, 신재와 신재 사이에 동종 용접재를 사용하여 용접한 재료를 NNN재료로 표기하였다. SNS재료는 고온에서 장기간 사용된 설비에서 결함이 발견되어 보수 용접을 실시한 상태와 같은 조건이 되도록 모사한 것이며, NNN재료는 설비 초기제작 당시의 용접부 상태를 모사한 것이다.

NNN 재료와 SNS 재료의 용접은 GTAW(gas tungsten arc welding)와 SMAW(shield metal arc welding)의 다중 용접으로, 예열 온도는 121 ℃/min, 최대 패스간 온도는 315 ℃/min, 그리고 용접후열처리는 680±20 ℃로 하였다. 고온설비 용접부의 균열은 대부분 모재부와 용접부 사이인 열영향부에서 발생 및 성장하게 되므로 NNN 재료와 SNS 재료는 용접을 실시할 때에 융선(fusion line)의 한 쪽이 외부표면과 직각 방향이 되도록 용접하여 C(T)시편 제작시 직각 방향의 융선을 따라 노치가공을 하면 균열 성장이 열영향부를 따라서 성장하도록 하였다.

파괴인성 시험을 위해서 NNN 재료와 SNS 재료에 대해 Fig. 1에서와 같이 모재부 및 용접

부 두 가지 종류의 C(T)시편을 준비하였다. 용접부 C(T)시편의 경우 노치끝 선단이 모재부와 용접부 사이인 융선(fusion line)을 따라 위치하도록 기계가공을 한 후에 균열이 열영향부를 따라서 성장하도록 예비균열을 형성시켰다. 인장시험은 사용재 및 신재의 모재부에 대해 ASTM E8의 인장시험 규격에 근거하여 25℃ 및 538℃에서 실시하였다. 파괴인성 측정시험은 ASTM E813의 $J_{IC}$ 측정 규격 및 ASTM E1152의 J-R 곡선 측정 규격에 제시된 방법을 기준으로 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

**인장시험** : 인장 시험의 하중-변위 기록으로부터 진응력-진변형률 관계를 구한 후, 소성 변형률($\varepsilon_{pl}$)과 응력($\sigma$) 사이의 지수 법칙(power law, $\varepsilon_{pl} = D\sigma^m$)을 이용하여 최소 자승법에 의해 재료의 소성상수 D와 m을 결정하였다. 시험 결과는 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 사용재의 강도는 신재의 강도보다 저하되어 있음을 알 수 있다.

**파괴인성 시험** : 상온(24℃)에서 실험한 신재와 사용재의 모재부 J-$\Delta$a 측정 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 상온 실험결과 사용재에서는 갑작스런 균열 성장에 의한 불안정 파괴(unstable fracture)가 발생하였다. 신재의 경우에는 불안정 파괴가 발생하지 않았고 J-R곡선은 사용재에 비해 균열성장 저항이 높게 나타났다. 고온(538℃)의 모재부 실험에서 신재와 사용재의 J-$\Delta$a 측정 결과는 Fig. 3에서 보듯이 고온에서는 신재와 사용재의 균열 저항 곡선이 서로 유사하게 나타났다. 고온(538℃) 용접부의 실험에서 NNN시편과 SNS시편의 J-$\Delta$a 측정 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 신재 열영향부의 WS6 시편의 J-R 곡선이 크게 증가하는 것으로 나타났지만 그 외에는 NNN시편과 SNS시편의 균열성장 거동이 비슷한 경향을 보였다. 고온 열영향부의 J-$\Delta$a 측정 결과와 모재부의 J-$\Delta$a 측정 결과를 모두 Fig. 5에 나타내었다. WS6의 시편의 경우 J-R시험중 균열성장 방향이 초기균열의 방향과 서로달라 Mode I의 균열성장으로 보기 어려운 경우이었다. 따라서, WS6 시편의 실험 결과를 제외하면 고온에서는 용접부의 J-R 곡선과 모재부의 J-R 곡선이 서로 유사하다. 그러므로 1Cr-0.5Mo 강의 용접부 균열에 대한 고온에서의 파괴거동은 모재부의 파괴거동과 유사함을 알 수 있어 열영향부에 균열이 존재하는 경우 이 유사부위의 곡선을 대표적인 단일 J-R 곡선으로 사용할 수 있을 것이다.

Fig. 6은 Liaw 등에 의해 보고된 1.25Cr-0.5Mo 강의 모재부와 용접부의 J-R 곡선과 본 실험 1Cr-0.5Mo 강의 모재부와 열영향부와의 J-R 곡선을 비교한 것이다. Liaw의 용접부 실험에 대해서는 열영향부가 아닌 용접부 중앙에 균열 성장이 발생하도록 시편을 가공한 것이기 때문에 용접부의 실험결과는 낮은 균열성장 저항성을 가진 J-R 곡선을 나타낸다. 그러나, 모재부의 실험결과는 본 실험결과인 1Cr-0.5Mo 강의 모재부와 용접부의 J-R 곡선과 유사한 것을 알 수 있다.

**파괴해석 상용코드를 이용한 해석 예** : 본 연구로 측정한 $J_{IC}$ 및 T 값을 사용하여 실제 보일러 헤더의 균열에 대한 파괴역학해석을 실시하였다. 파괴해석용 상용 컴퓨터 코드를 이용하여, 실제 헤더 내의 균열 전파 조건과 최종 파단 형태에 대해 살펴보았다. 해석된 헤더는 외부 직경 310 mm, 내부 직경 250 mm, 두께 30mm로 본 연구에 이용된 1Cr-0.5Mo 강의 헤더와 같은 형상에 Fig. ??과 같이 반 타원형(semi-elliptical)의 내부 균열이 존재한다고 가정하였다. 이 가정은 실제 헤더에 연결된 파이프와 파이프 사이에서 외부로 향하는 내부 균열과 매우 유사하다. 사용 온도는 538℃, 내압은 62 MPa, 그리고 초기 균열 a1은 2 mm, a2는 20 mm, a3는 20mm에서 균열이 증가한다고 보았다. 균열은 두 개의 튜브 사이(Fig. 7에 점선으로 표시)에서 바깥 방향으로 진행하므로 a2, a3는 고정하고 a1만 증가한다고 가정하고 해석하였다. 이 해석을 수행하기 위한 항복 강도, 탄성 계수, 포아송 비 그리고 소성 상수 D, m 값은 본 연구에서 측정한 데이터를 사용하였다.

균열 길이 a1 의 증가에 따른 J-적분 값의 계산 결과를 보면, 본 연구에서 측정된 $J_{IC}$ 평균값이 0.364 KN/mm 이므로 균열 깊이가 3.29 mm 이상인 경우 균열은 사용 중에 성장하게 됨을 알 수 있다. 균열 진전력과 재료의 균열 성장에 대한 저항의 관계를 나타내는 tearing instability를 이용한 균열의 불안정 성장을 해석한 결과 헤더는 균열이 두께에 해당하는 30 mm 까지 성장하는 경우에도 불안정 파괴는 발생하지는 않았다. 따라서 헤더의 균열이 크게 성장하여도 갑작스런 파괴로 연결되지 않는 파단전 누설(leak before break)조건을 만족함을 알 수 있다.

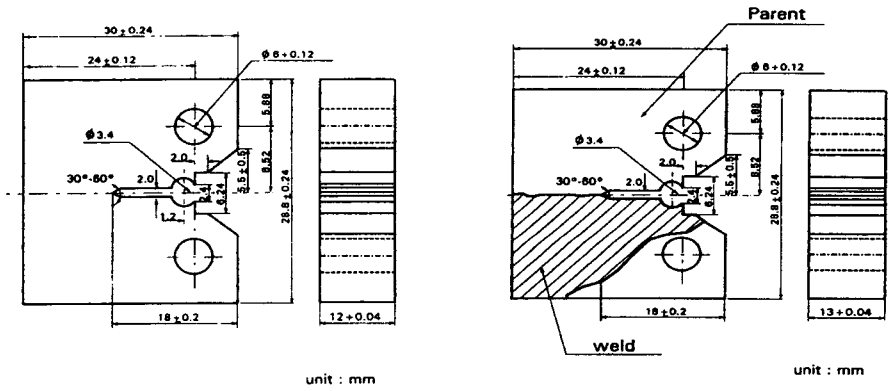
## 4. 결 론

(1) 모재부의 상온 파괴인성 실험(24℃)에서는 사용재의 모재부에서만 갑작스런 균열 증가로 인한 불안정한 파괴가 일어났으며 신재는 사용재보다 균열 저항성이 높았다. (2) 모재부의 고

온 파괴인성 실험(538℃)에서는 사용재와 신재의 균열 성장 거동은 큰 차이가 없었다. (3) 용접부의 고온 실험(538℃)에서도 사용재와 신재의 균열 성장 거동에 큰 차이가 없었으며, 이는 모재부의 거동과 유사하였다. (4) 문헌상에 보고된 1.25Cr-0.5Mo 강의 모재부와 본 연구에서 측정한 모재 및 용접부의 J-R곡선을 비교해 보면 서로 유사한 경향을 가짐을 알수 있었다. (5) 상용 파괴해석 컴퓨터 코드를 이용하여 1Cr-0.5Mo 강 헤더에 균열이 존재하는 경우 파괴거동을 예측함으로써 본 연구결과의 적용 예를 보여주었다.

Table 1. Tensile properties of the test material (1Cr-0.5Mo steels) at 25 and 538℃

| Material | Temp. (℃) | Young's modulus (GPa) | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | D | m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| New | 25 | 210 | 412.5 | 541.0 | 5.89E-18 | 5.86 |
| Serviced | | | 282.0 | 494.5 | 2.54E-13 | 4.68 |
| New | 538 | 147 | 338.0 | 445.0 | 6.46E-25 | 8.62 |
| Serviced | | | 258.8 | 308.0 | 4.95E-34 | 12.75 |




(a) C(T) specimen (Base) (b) C(T)specimen (Weld)

Fig.1 C(T) specimen geometry for base and weld metal

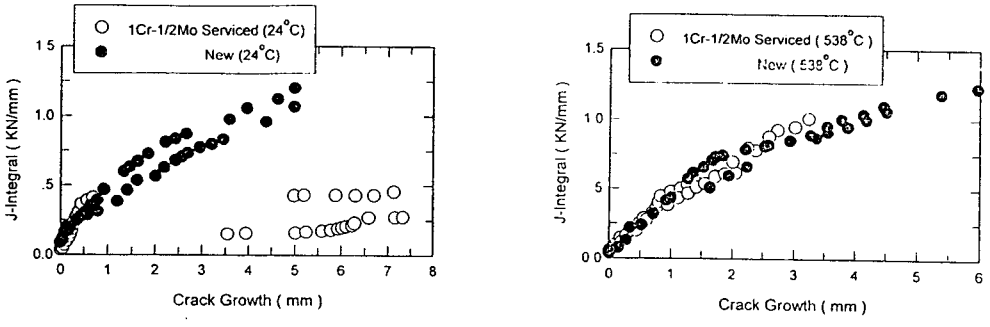
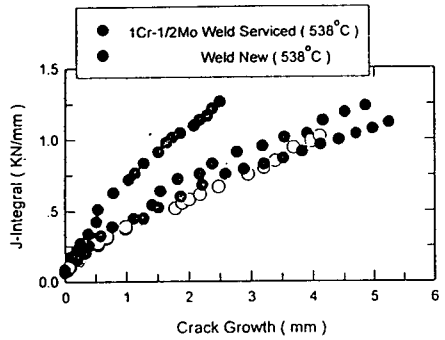
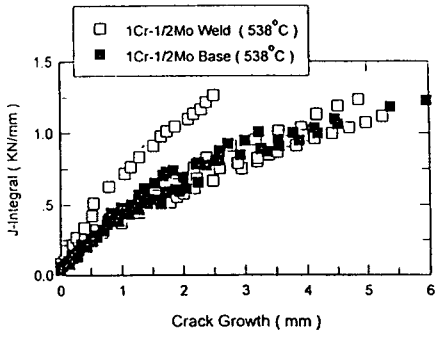



Fig. 2 J-⊿a data of new and serviced base metal of 1Cr-0.5Mo steel at 24℃

Fig. 3 J-⊿a data of new and serviced base metal of 1Cr-0.5Mo steel at 538℃



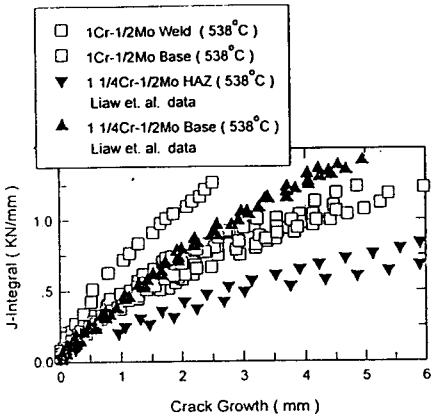




Fig. 4 J-⊿a data of new and serviced weld metal of 1Cr-0.5Mo steel at 538℃
Fig. 5 J-⊿a data of all the tested specimen of 1Cr-0.5Mo steel at 538℃
Fig. 6 Comparison of J-⊿a data obtained in this study with the published data

material : 1Cr-0.5Mo steel
temperature : 538℃
pressure : 62 MPa
outside diameter : 310 mm
inside diameter : 250 mm
thickness : 30 mm
initial crack length :
a1 = 2 mm
a2 = 20 mm
a3 = 20 mm

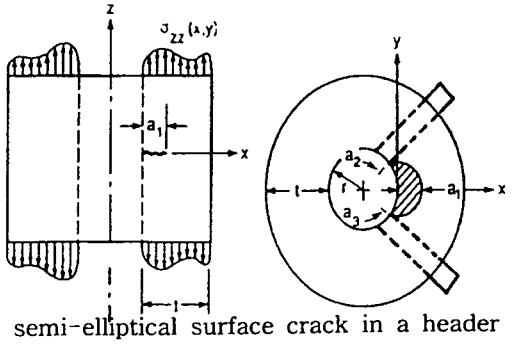



Fig. 7 Schematic diagram of a semi-elliptical surface crack in a header