

## René 80 초내열 합금의 크리프 거동에 관한 연구 - 크리프 파단특성에 미치는 가스 분위기의 영향 -

한성호 · 이기룡 · 조창용 · 김학민\* · 김인배

부산대학교 금속공학과  
\*한국기계연구원 내열재료실

### A study on the Creep Behavior of René 80 Superalloy - Effect of gaseous environment on creep rupture properties -

Seong-Ho Han, Kee-Ryong Lee, Chang-Yong Jo, Hak-Min Kim\* and In-Bae Kim

Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University

\*High Temperature Materials Lab., KIMM

초 록 구조용 Ni기 초내열 합금인 René 80의 고온 크리프파단시 균열의 생성과 전파에 대한 분위기의 영향을 조사하기 위해 760°C, 657MPa 및 982°C, 157MPa의 크리프시험 조건에서 산화성 분위기인 공기중과 불활성 분위기인 아르곤 가스 분위기에서 크리프 파단시험을 했다. 760°C, 657MPa 조건의 크리프 파단시험에서는 분위기에 따라 크리프 파단 양상의 큰 차이가 없었고 파단수명과 파단연신값도 비슷하였다. 반면 982°C, 157MPa의 시험에서는 표면산화의 영향으로 공기중의 경우 표면균열 생성과 입계를 통한 균열전파에 의하여 크리프 파단이 진행되었으나, 아르곤 분위기에서는 내부입계에서 균열이 생성되어 표면에서 발생된 균열과 합체됨으로서 파단이 진행되었다. 파단수명은 공기중의 경우가 치밀한 표면산화물의 형성에 따라 아르곤 하에서 보다 길었으며 파단연신은 아르곤 분위기의 경우가 네킹 발생에 따라 크게 나타났다.

**ABSTRACT** The effects of atmosphere on the creep rupture properties of Ni-base superalloy René 80 were investigated. Creep rupture tests were performed at 760°C, 657MPa and 982°C, 157MPa under Ar gas atmospheres. Creep rupture mode and rupture properties (rupture life and elongation) were similar in two different atmospheres under the condition of 760°C, 657MPa. However, the results at 982°C, 157MPa showed different creep rupture mode and life between air and Ar gas atmospheres. In air, it was shown that creep cracks were initiated at surface-exposed grain boundaries and propagated along grain boundaries. In Ar gas atmosphere, the cracks were initiated at inner grain boundaries and coalesced to surface cracks which cause cup-and-cone type fracture. Due to protective oxide layer formation, air test showed longer rupture life than Ar test.

### 1. 서 론

항공기용 제트엔진의 가스터빈은 고온에서 작동되는 기관으로 고온에서 필요로 하는 성능을 발휘하기 위해서는 그 사용 부품의 소재가 사용조건에 적합한 성질을 가져야 한다. 현재까지 알려진 소재중 이와 같은 용도에 가장 적합한 것은 Ni기 초내열 합금이며, 가스터빈의 각 부품의 요구특성에 맞는 적절한 합금을 개발하여 사용하고 있다. 가스터빈 부품

중에서 온도와 응력 및 부식성(산화성) 분위기가 가장 가혹한 조건에서 사용되는 것은 터빈 블레이드이다<sup>1~2)</sup>. 터빈 블레이드의 사용조건 중 온도, 응력 및 부식성 조건에 대한 연구는 소재에 따라 많은 연구가 진행되었으나 소재의 고온 산화와 기계적 성질에 관계된 연구는 많지 않다.

René 80은 터빈 블레이드용으로 개발된 구조용 Ni기 초내열 합금으로 약 47%의  $\gamma'$ 상의 체적분율을 가지며 고온 크리프 파단시험

시 고온 산화성 분위기와 응력의 조합에 따라 표면 산화층과 표면 균열이 생성되고 이 균열이 내부로 전파되어 재료의 파단이 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>3~4)</sup>. 그러나 표면 산화층의 생성에 의한 미세조직의 변화와 파단거동에 대한 명확한 기구가 제시된 바 없으며, 특히 비산화성 분위기 즉, 표면산화의 영향이 배제된 상태에서의 파단거동에 대한 연구보고는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 Shahinian 등<sup>5)</sup>이 연구한 산화에 의한 강화와 표면에너지의 감소에 의한 열화기구를 기초로 René 80합금의 분위기에 따른 크리프 파단거동과 미세조직 특히, 산화물의 양상, 내부침투정도 등과의 연관성을 검토하여 산화성 분위기인 공기중 및 비산화성 분위기인 아르곤가스 분위기하에서 크리프 파단거동의 차이점을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 시험편제작

본 연구에서 사용한 시험편은 Ni기 초내열 합금 René 80으로 미국 Howmet사에서 제조

한 모합금을  $5 \times 10^{-3}$ Torr의 진공상태에서 유도용해하고 정밀주조하였다. 본 연구에서 사용한 소재의 화학조성과 크리프시험의 형상은 각각 표 1, 그림 1과 같다.

시험편의 열처리는 아르곤가스 분위기하에서 René 80 소재의 표준 열처리공정<sup>6)</sup>을 적용하였으며, 각 열처리 단계 및 목적은 다음과 같다.

1. 용체화 처리 :  $1204 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 2시간 유지하여 편석과  $\gamma$ - $\gamma'$  공정상 등을 가능한 한 고용시켜 균일한 조직이 되도록 한다.
2. 1차시효 :  $1093 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 4시간 유지하여 블록(blocky)형태의 조대한  $\gamma'$ 입자가 석출되게 한다.
3. 코팅공정 :  $1052 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 4시간 유지하며 실제 부품의 알루미늄나 코팅공정에 해당한다. 이는 고온 부식성 환경에서 내식성을 갖도록 하기 위한 것으로 시험편의 경우 코팅공정과 동일한 온도 및 시간으로 유지하였으나 알루미늄나 코팅은 하지 않았다.
4. 2차시효 :  $843 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 16시간 유지하여 미세한 구형의  $\gamma'$ 입자가 석출되게 한다.

Table 1. Chemical composition of René 80

	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	B	Zr	Si	Mn	Ni
Master ingot	0.16	14.10	9.40	4.00	3.94	3.10	4.92	0.016	0.02	0.04	0.01	Bal.
specimen	0.153	13.80	9.30	4.00	4.00	2.96	4.93	0.015	0.02	0.02	0.05	Bal.

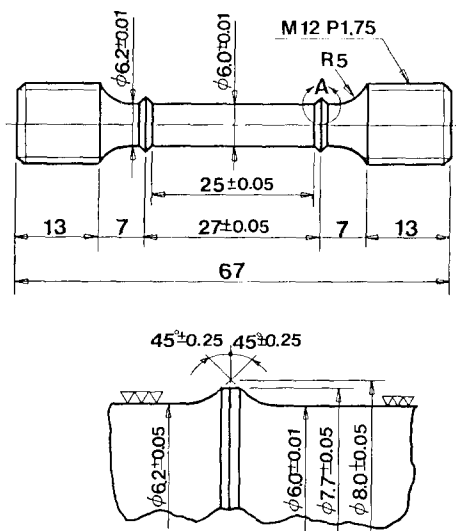


Fig. 1. Shape and dimension of creep specimen.

### 크리프 파단시험

일정응력방식의 크리프시험기(Toshin 50ton)를 사용하였으며, 시험조건은  $760^\circ\text{C}$ ,  $657\text{MPa}$  및  $982^\circ\text{C}$ ,  $157\text{MPa}$ 로 온도와 응력조건을 선택하였다. 크리프 파단시험 분위기는 산화성 분위기의 경우 공기중에서 시험하였으며 비산화성 분위기는 아르곤가스를 주입하여 시험편 주위를 불활성 분위기로 만든 상태에서 크리프 파단시험을 했다.

### 미세조직관찰 및 미소경도 측정

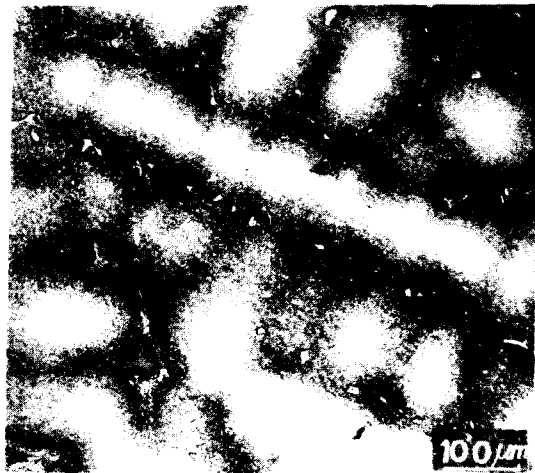
미세조직관찰은 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 Kalling용액(HCl 50ml,  $\text{CH}_3\text{OH}$  50ml,  $\text{CuCl}_2$  2.5g)을 이용한 부식과 크롬산(Chromic acid :  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  10g,  $\text{H}_2\text{O}$  100ml)을 이용한 전해부식(8-10V, 10sec)으로 조직을 관찰하였으며, 크리프파단 시험후 표면과 내부의 미소경도 측정은 미소경도계를 사용하였으며,

측정방법은 10g의 하중으로 10~15회 측정하여 최대, 최소값은 버리고 평균값을 취하였다. 또한 크리프 파단 시험 후 응력방향과 평행하게 시험편을 절단하여 표면단위길이당 균열의 수를 광학현미경을 이용하여 조사하였다.

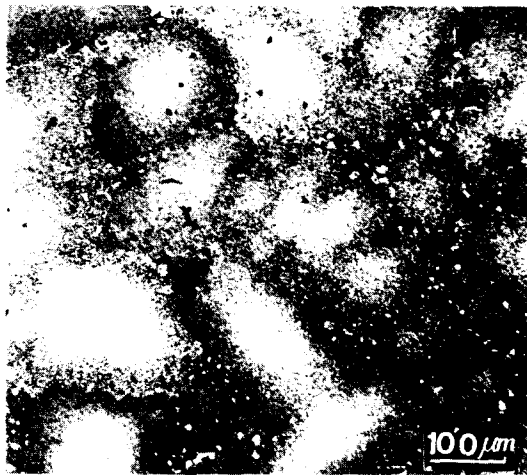
### 3. 결과 및 고찰

#### 열처리 전후의 미세조직

그림 2는 주조상태(열처리 전) 및 열처리 후 René 80의 광학현미경 조직으로서, 주조상태의 경우 수지상의 중심에 해당하는 부분(dendrite core)과 수지상간 영역(inter-dendritic region)



(a)

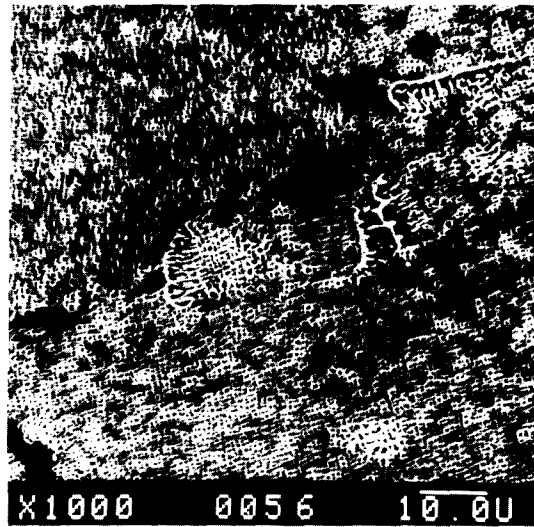


(b)

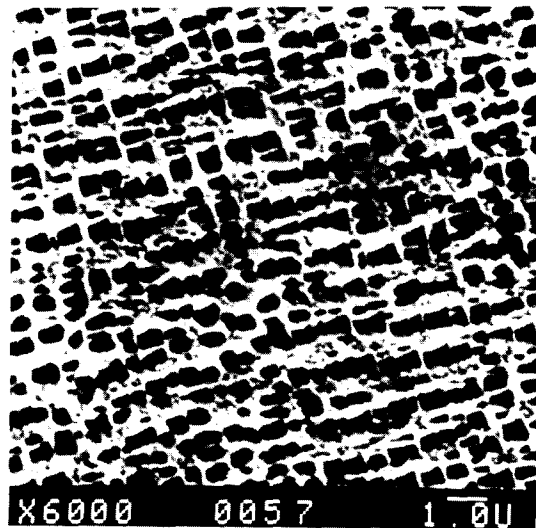
Fig. 2. Optical micrographs of as cast specimen of René 80.

a) before and b) after heat treatment

사이에 조직상 차이를 보인다. 즉, 주조상태의 경우에는 응고과정 중에 먼저 응고된 수지상 중심부와 마지막으로 응고된 수지상간 영역 사이에 성분의 편석이 뚜렷하게 나타났으나, 열처리한 경우는 그 정도가 많이 감소된 것을 볼 수 있다. 그림 3은 열처리한 시편의 수지상간(a) 및 수지상 중심부(b)의 주사전자현미경 조직으로서 수지상간 조직은 응고과정의 후반에 주로 응고되는 탄화물(주로 MC계 탄



(a)



(b)

Fig. 3. SEM micrographs of heat treated specimen, a) interdendritic and b) dendritic core region.

화물)들과 비평형 응고조직인  $\gamma$ - $\gamma'$  공정조직이 관찰되고 수지상 중심부에는 Ni기 초내열 합금의 주 강화상인 입방체형상<sup>5)</sup>의  $\gamma'$ (Ni<sub>3</sub>Al)상이 미세하게 석출 분포되어 있다는 것을 알 수 있다.

#### 크리프파단 성질에 미치는 분위기의 영향

동축정을 갖는 René 80은 고온 크리프 파단에서 균열이 표면에서 생성되어 내부로 전파되는 것<sup>3)</sup>으로 알려져 있으며, 이러한 표면 균열은 고온 대기중에 노출된 입계를 따라 형성된  $\gamma'$ 이 대기중의 산소나 질소와 반응하여 소재의 인장취화현상(tensile embrittlement)을 일으킴으로서 표면균열이 형성된다고 하였다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는 분위기가 크리프 파단성질에 미치는 영향을 조사하기 위해 공기중 및 불활성 분위기인 아르곤가스 분위기 하에서 760°C, 657MPa 및 982°C, 157MPa의 조건으로 크리프 파단시험을 하였다. 표 2는 각 조건에서 수행한 크리프 파단시험의 결과로서, 고온저응력 조건의 크리프 파단시험의 경우(982°C, 157MPa : 이하 982°C시험으로 표기) 산화성 분위기인 공기중 시험이 불활성 분위기인 아르곤가스 분위기보다 약 30%정도 파단수명이 길었으며 연신율은 오히려 아르곤 분위기 경우가 약간 높았다. 반면 상대적으로 낮은 온도에서 높은 응력(760°C 657MPa : 이하 760°C시험으로 표기)의 경우 파단수명은 아르곤 분위기에서 시험한 것이 공기중에서 시험한 것에 비해 약간 길었으나 연신율은 거의 유사했다.

이와 같은 결과는 그림 4의 파단된 시편의 외관으로 나타난 결과와 잘 부합된다. 즉, 760°C시험한 경우 공기중이나 아르곤 분위기나 크리프 파단양상이 유사하고 외관상의 표면균열도 두 조건 모두 거의 볼 수 없었다. 그러나 982°C시험의 경우 파단된 시편의 양상이 크게 다르고, 공기중에서 시험한 경우 파단부위에 네킹(necking)이 국부적으로 발생하였으나 아르곤 분위기에서 파단된 것은 응력과 수직인 방향으로 파단면 전체를 통하여 균일하게 수축된 네킹이 관찰된다. 또한 시편의 단위길이당 표면균열의 수도 아르곤 분위기의 경우가 적었다. 그림 5는 표면균열의 수를 정량적으로 조사한 결과를 나타낸 것으로

서 760°C시험의 경우 표면균열의 수는 각 조건에서 큰 차이를 보이지 않으나 982°C시험의 경우 공기중에서 파단된 시편이 아르곤 분위기에 비해 표면균열의 수가 2배가량 많은 것을 알 수 있다. 이와 같은 표면균열과 파단양상의 차이는 각 조건에서 크리프 파단양상이 다름을 의미한다.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Creep ruptured specimens showing different creep rupture modes.

a) 760°C, air b) 760°C, Ar gas c) 982°C, air d) 982°C, Ar gas

Table 2. Creep rupture test results of René 80.

	atmosphere	rupture life (hrs)	rupture elongation (%)
760°C	Air	25.7	13.0
	Ar gas	27.7	13.2
982°C	Air	125.4	13.5
	Ar gas	97.8	15.0

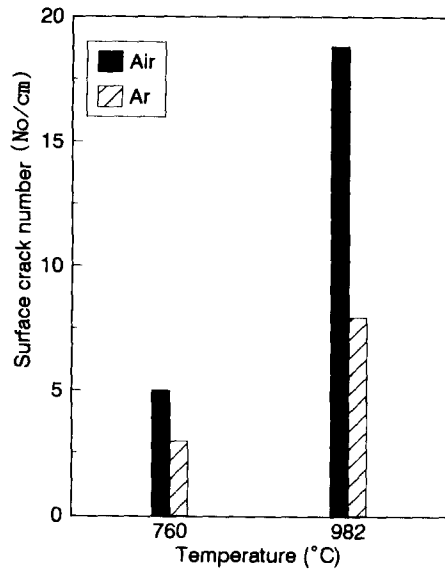


Fig. 5. Comparison of surface crack number at 760 °C, 657MPa and 982°C, 157MPa

각 조건에서 파단양상을 좀더 자세히 관찰하기 위해 크리프 파단된 시편의 파면부근 종단면에서 공동(cavity) 양상을 그림 6에 나타냈다. 760°C시편의 경우 공기중이나 아르곤 분위기에서 파단된 것이 거의 비슷한 내부 공동이 존재하고 있다. 상대적으로 저온인 760°C시편에서는 입내취약에 의해<sup>8)</sup> 표면입계에서의 균열은 거의 발생되지 않았고 그림 7에서 보이는 바와 같이 비교적 취약한 부분인  $r-r'$  공정상 또는 탄화물의 계면에서 균열이 생성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 760°C시편에서는 입내 파괴형태로 파단이 진행된 것을 추측할 수 있다.

982°C시편의 경우 공기중에서 시험한 것은 내부에 공동이 그다지 많지 않으나, 아르곤 가스하의 불활성 분위기에서 시험한 것은 내부에 공동이 많이 분산되어 있다. 이러한 결과는 종단면에서 표면 부분을 관찰한 그림 8의 결과와 비교해 보면 내부 공동의 분포양상

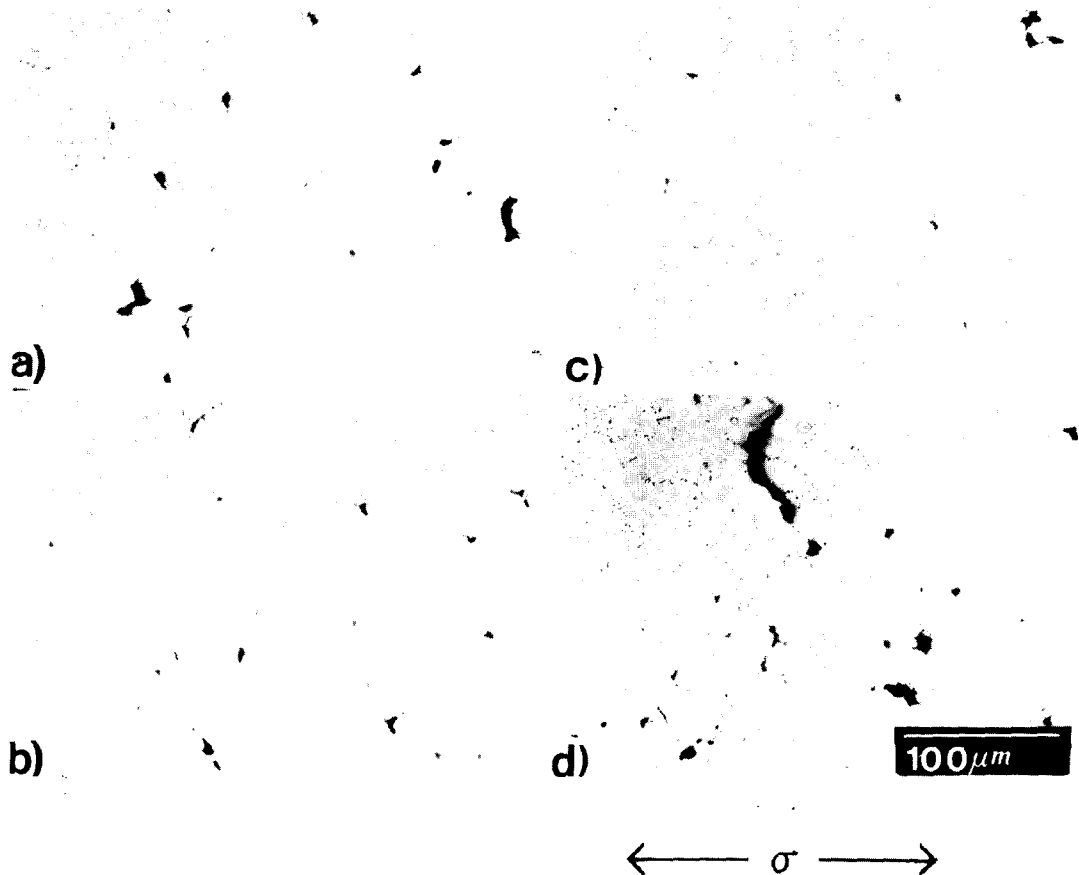
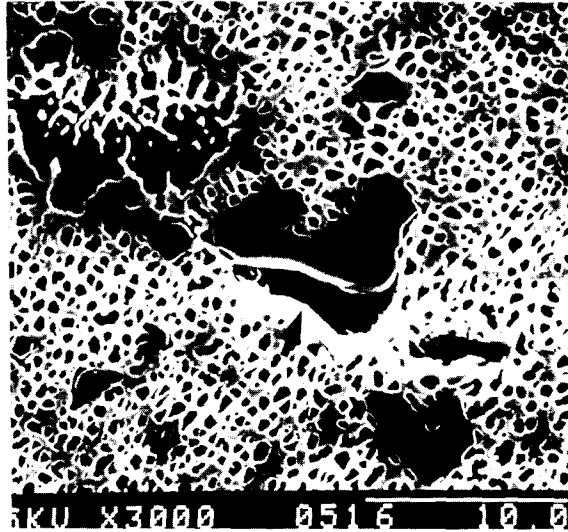


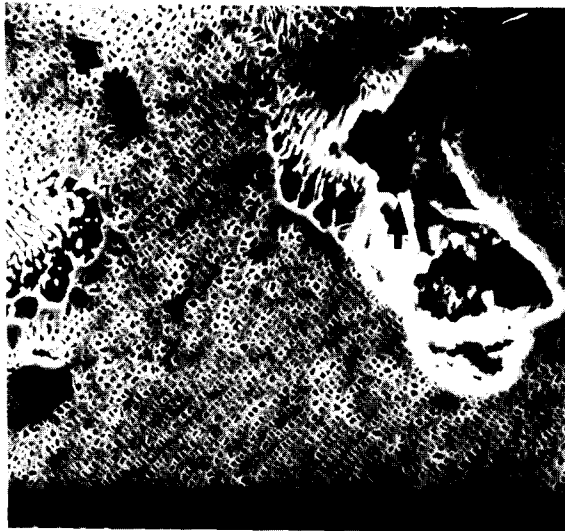
Fig. 6. Cavity distribution of creep ruptured specimen (as polished, parallel to applied stress).

a) 760°C, air b) 760°C, Ar gas c) 982°C, air d) 982°C, Ar gas

을 더 잘 이해할 수 있다. 즉, 공기중에서 파단된 경우 아르곤에서 파단된 것에 비해 표면 균열이 매우 활발히 발달되었으며 그 크기가 최고  $550\mu\text{m}$ 까지 성장한 것도 관찰되었다. 고온 공기중 시험의 경우 고온에 따른 입계취약<sup>6)</sup> 및 표면산화에 의해 입계균열의 생성이 조정됨에 의해 표면균열이 많이 생성되었으며, 이 균열들이 내부로 전파되어 재료의 파단을 지



(a)



(b)

Fig. 7. SEM micrographs of creep ruptured at  $760^{\circ}\text{C}$ ,  $657\text{MPa}$ (air) which show creep cracks initiated at carbides and eutectic phases.

배함으로써 내부공동의 생성에 의한 것보다 우선적으로 진행된 것이라 생각된다.  $982^{\circ}\text{C}$  공기중 시험에서는 이와 같은 이유들로 인해 입계파괴형태를 예상할 수 있겠다.

아르곤 분위기하에서는 산화에 의한 입계균열의 생성촉진현상이 어느 정도 방지됨으로 인해 표면균열의 수가 크게 감소하였으며 약간의 산화에 의해(아르곤가스 분위기이지만 완전한 불활성 분위기를 만들지 못하였으므로 약간의 산화가 일어남) 발생한 표면균열이 내부공동과 합체되고 이들이 서로 연결되어 재료의 파단이 발생된다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 파단양상도 공기중의 경우와는 차이를 나타낸 것으로 생각된다.

#### 산화물의 양상과 파단특성과의 관계

$760^{\circ}\text{C}$  시험의 경우 파단양상이 내부 입내의 공정조직이나 탄화물에서 발생한 균열이 파단의 주된 원인으로 판단되었으며, 표면산화가 크게 진행되지 못하여 산화에 의한 표면균열의 생성촉진효과가 극히 미약하기 때문에 아르곤 분위기와 공기중 시험이 파단양상에 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 생각된다.  $982^{\circ}\text{C}$  시험에서는 이미 언급한 바와 같이 재료의 파단을 지배하는 균열의 생성과 전파가 큰 차이가 있어 그 파단양상이 크게 다른 것으로 생각할 수 있다. 즉, 고온에서 재료의 산화가 심하게 진행되어 공기중 시험의 경우 표면산화층이 많이 형성되고 아르곤 분위기에서는 그 정도가 약하다. 표면산화층은 산화에 의한 원자들의 확산에 따라 표면부근의 합금조성이 변화하게 되고 그림 9와 같은 층들로 구분되어 나타난다. 산화층은 표면의 산화물층(oxide layer : 그림 9의 A부분), 침상석출물층(needlelike precipitate layer : 그림 9의 B부분)과 부식층(denuded zone : 그림 9의 C부분)으로 구분된다. 표 3에 90시간동안 크리프 시험후 각 표면산화층의 깊이를 나타냈으며 공기중 시험한 것이 아르곤 분위기에서보다 산화물층은 3배, 침상석출물층과 부식층은 2배정도 두꺼웠다. 이와 같이 공기중에서 형성된 균일한 산화피막은 재료의 기계적 성질을 향상시키는 것으로 알려져 있다<sup>7)</sup>.

일반적으로 Ni기지 금속에서 내산화성은 Cr과 같은 산소와 친화력이 크고 확산속도가 기지보다 빠른 원소를 첨가시킴에 의해 표면

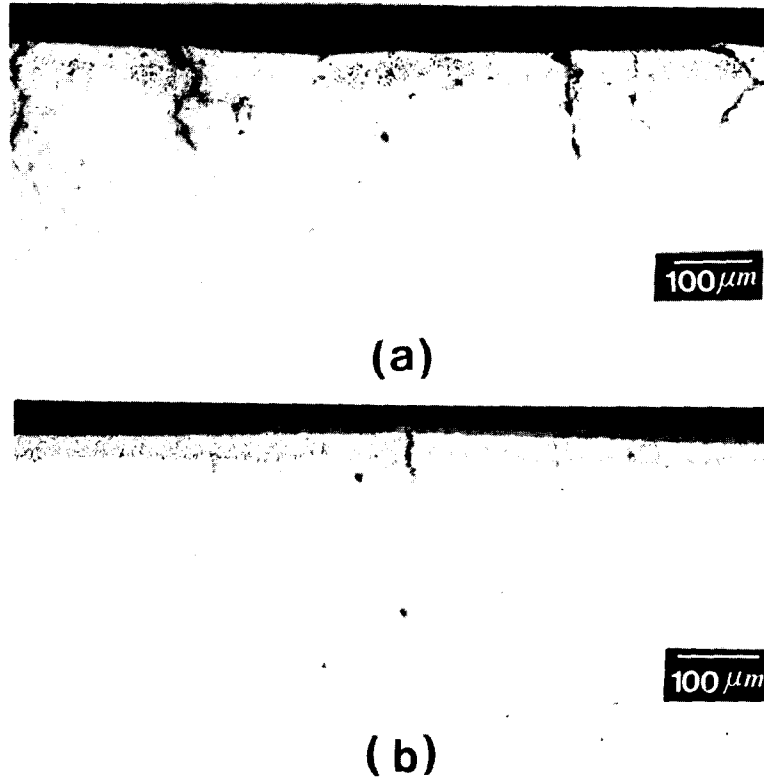


Fig. 8. Comparison of surface cracks between air(a) and Ar gas atmosphere(b) which were creep ruptured at 982°C, 157MPa

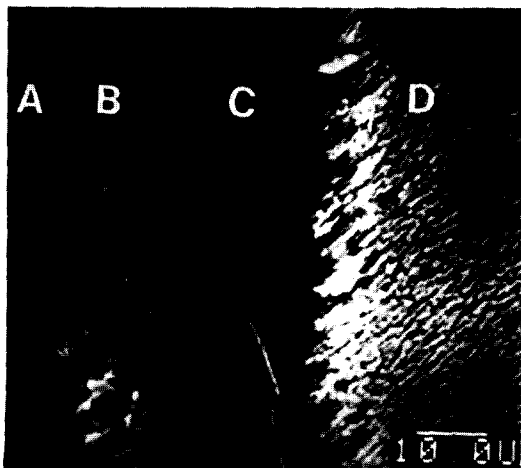


Fig. 9. Microstructure of the specimen exposed air at 982°C, 157MPa showing surface oxidized layer.

에 치밀한 보호성 산화층( $Cr_2O_3$ )을 형성시킴<sup>10)</sup>으로 개선할 수 있다. 그러나 Cr만을 첨가시켰을 경우 내부로부터 표면으로 확산하여 표면의 안정한 Cr산화물을 형성하기 위한 농

Table 3. Oxidized thickness of the specimen exposed under creep condition(at 982°C, 157MPa) for 90hrs.

		(unit : $\mu m$ )	
layer	atmos.	Air	Ar gas
	oxide zone		15~18
needlelike precipitate		25~30	15~17
denuded zone		22~27	10~12
total oxidized thickness		52~75	29~36

도는 20wt% 이상이어야 하고 10~20wt%의 경우라도 치밀한 보호성 피막이 한번 파괴되면(크리프 등의 응력으로) 내부로부터 확산에 의해 충분한 Cr이 공급될 수 없으므로 재료의 파괴속도가 빨라지게 된다. 한편 15wt% 이하의 경우에는 기지가 우선 산화되어 산화에 의한 기계적 성질의 열화를 일으키게 된다. 즉 1000°C 정도의 고온에서 Cr의 양이 적은 경우 상호확산속도가 기지보다 늦게 되어 Cr을 계속적으로 공급할 수 있는 시간적 여

유를 갖지 못하므로 Cr산화층을 형성하지 못하게 된다. 그러나 Cr양이 15wt% 이하인 경우에도 Al, Ti 등을 첨가하게 되면 산소와의 친화력이 크고 비교적 빠른 확산에 의해 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/대기 계면과 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/기지 계면의 양쪽에 존재하여 보호성 피막을 형성하게 되므로 기계적 성질을 개선할 수 있게 된다<sup>12)</sup>. 특히, Al은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 산화물을 생성하여 표면산화의 진행을 방해하는 효과가 있으며, Al과 Ti를 첨가시켜 보호성 산화피막을 형성시키기에 필요한 Cr의 양은 약 12.3~18.1wt%라고 Wright<sup>13)</sup> 등은 제시하였다. 본 연구에서 사용한 René 80은 Cr함량이 약 14wt%로 Al, Ti 등과 함께 보호성 산화피막을 형성시킴으로서 기계적 성질이 개선될 수 있으며, 이와 같은 근거에 의해 산화피막이 많이 형성된 공기중 982°C 시험이 아르곤 분위기하에서 보다 크리프 파단수명이 길어진 것으로 생각된다.

그림 10은 각 층의 경도 분포를 조사한 것으로서 산화물이 크리프 파단에 미치는 영향을 간접적으로 확인할 수 있다. 즉, 기지부분에 비해 무석출 영역과 침상석출물층은 경도치가 낮았으며 외부의 산화물층은 경도치가

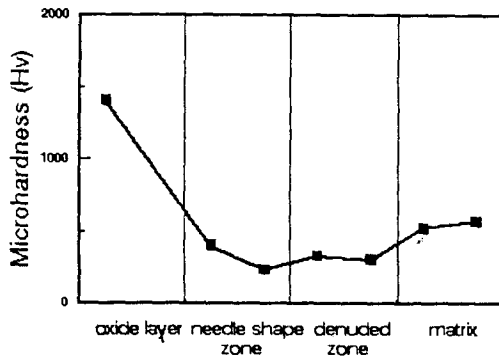


Fig. 10. Microhardness variation of surface layer.

높았다. 이와 같은 현상은 고온에서 Al, Ti, Cr 등의 산소와 친화력이 큰 원소들이 표면으로 확산되어 나감에 의해 형성된 무석출 영역은 경도가 저하되고 침상석출물층은 조직이 치밀하지 못함에 따라 경도가 저하된 것으로 볼 수 있으며, 표면에 형성된 치밀한 산화층으로 인하여 어느 정도 강화효과가 나타나 크리프 파단수명이 길어진 것으로 생각할 수 있다.

그림 11은 982°C 공기중에서 90시간 시험



(a)



(b)

Fig. 11. SEM micrographs of the specimen exposed air at 982°C 157MPa which show creep cracks initiated at denuded zone(a) and needlelike precipitates(b).

한 경우의 균열발생에 관한 SEM사진으로서 a)는 균열이 무석출 영역에 형성된 것을 나타낸 것이고 b)는 균열이 침상석출물층을 따라 임계로 전파되는 것을 보여준다. 이와 같은 결과들로부터 초기균열은 무석출 영역이나 침상석출물층에서 생성되며 균열의 진행에 따라 산화층이 파괴되면 균열주위의 산화에 의해 그림 12와 같이 균열선단에 초기 표면과



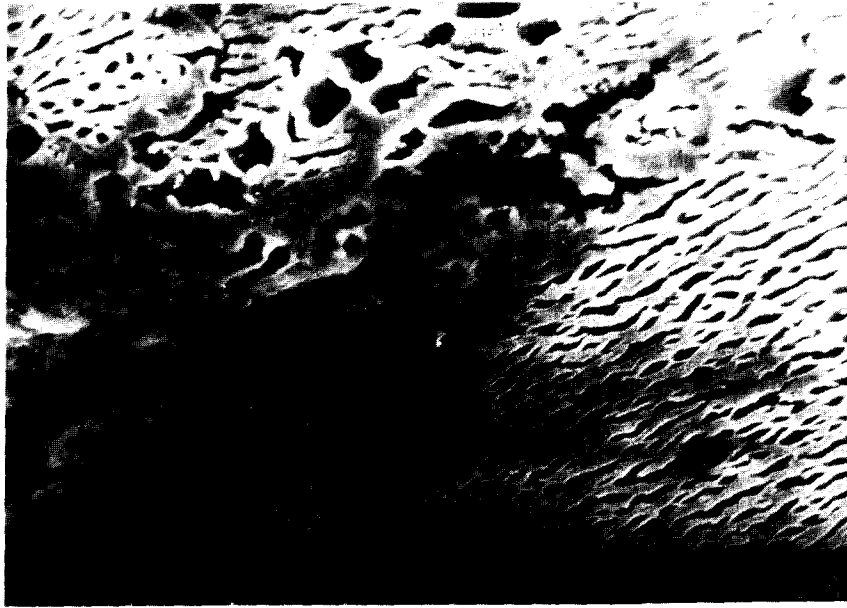


Fig. 12. SEM micrograph of surface crack tip area(exposed at 982°C, 157MPa, air).

같은 산화물이 형성되어 균열의 전진을 억제하는 효과가 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

주조용 Ni기 초내열 합금 René 80의 크리프 파단거동에 미치는 분위기의 영향을 고찰하기 위해 982°C, 157MPa 및 760°C, 657MPa 조건으로 산화성 분위기인 공기중과 불활성 분위기인 아르곤 분위기에서 크리프 파단시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 760°C, 657MPa의 경우 표면산화의 영향이 크리프 균열생성과 전파에 큰 영향을 미치지 못하였으며 내부의 공정조직이나 탄화물 등에서 균열이 생성, 전파되고 입내 파괴 형태를 나타냈다.

2. 982°C, 157MPa의 경우 공기중에서 시험한 것이 아르곤에서 시험한 것에 비해 크리프 파단수명은 길었으나 파단연선은 작았다.

3. 982°C, 157MPa 시험의 아르곤 분위기에서는 내부의 입계부근에서 균열이 생성되고 일부 표면에서 생성된 균열과 합체되어 파단이 진행된 것으로 생각된다. 따라서 내부균열생성이 파단에 중요한 영향을 미치게 되고, 이에 따라 파단형태가 컵 및 원뿔모양으로 나타났다.

4. 982°C, 157MPa 시험의 공기중에서는 표면산화층, 침상석출물, 무석출 영역의 생성으로 표면층의 변화가 발생된다. 균열은 경도가 상대적으로 낮은 침상석출물이나 무석출 영역에서 생성, 성장되어 약한 결정입계를 따라 전파된 것으로 생각된다.

5. 표면에 형성된 치밀한 산화층은 크리프 저항성을 증가시킨 것으로 생각할 수 있으며 982°C, 157MPa의 공기중 크리프 파단은 표면입계에서 내부입계로 균열이 전파되는 입계 파괴 형태를 나타냈다.

#### 후 기

이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 지방대학 육성과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 日本航空宇宙工業會：特殊鋼, 31, 69 (1982).
2. W. J. Molly : Advanced Materials and Processes, 138, 23 (1990).
3. 조창용, 박용조, 김승언, 김학민, 이상래 : 대한금속학회지, 29, 1139 (1991).

4. S. B. Kang : KAIST Ph. D. Thesis (1986).
5. P. Shahinian and M. R. Acheter : Proc. of Joint International Conf. on creep (1963).
6. G. E. Spec., C50TF28.
7. W. H. Chang : Superalloys Processing, MCUO-72-10, Sec. V.
8. R.W. Fawley : The Superalloys, Chap. 1, C. T. Sims and W. C. Hagel(eds), John and sons (1972).
9. E. W. Ross : Metal Progress, Mar., 93 (1973).
10. C. Wagner : J. Electrochem. Soc., 99, **369** (1952).
11. 日本腐蝕防蝕協會 : 金屬材料の 高温酸化 と 高温腐蝕, 95.
12. R. Hales : Oxid. Met., 10, **29** (1976).
13. I. G. Wright : Oxidation of Fe-, Ni-, Co-base alloys, MCIC 72-07, Metals and Ceramics Information Centre (1972).