

# 고온등압압축처리에 의한 IN738LC의 결함제거 연구

## Study of densification process for Ni-based superalloy by H.I.P

김두수\*, 최 철, 이영찬, 박영규, 김재철

한전 전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

### 1. 서 론

가스터빈용 블레이드 제품은 고온에서의 기계적 특성을 높이기 위해 특히 크리프 성질을 높이기 위해 여러 합금원소를 첨가하므로 단조 가공이 어려워 단조용 재료에서 주조용 재료로 사용되고 있다. 블레이드는 주로 Ni기 초합금을 재료로 하여 진공정밀주조방법에 의해 제작되며 이들 제품은 제작공정에서 가공과 공극 등 상당량의 주조결함을 내포하고 있다. 이들 블레이드는 X-ray 검사를 거쳐 사용 여부를 판정하게 되는데 100 $\mu$ m 이하의 결함은 검출이 불가능하기 때문에 사용 가능품으로 판정된 제품이라 할지라도 미세한 결함들이 재료 내부에 상당량 존재하게 되며, 1000 $^{\circ}$ C 이상의 고온화염에서 장시간 노출될 경우 급속하게 성장하여 재료의 기계적 특성을 크게 저하시키고 파단의 원인으로 작용하게 된다. 따라서 제품의 형상을 변화시키지 않고 이러한 결함들을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로는 고온등압압축처리(hot isostatic pressing)가 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으나 HIP처리에 의해 제거할 수 있는 결함의 크기를 정량적으로 규명한 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 발전용 가스터빈 블레이드 재료로 가장 많이 사용되고 있는 Ni기 석출경화형 초합금인 IN738LC 주조품에 대해 HIP처리를 수행하고 광학현미경과 전자현미경, EDX 등을 이용하여 미세조직을 관찰하여 내부결함의 제거한계를 정량적으로 조사하고 결함의 형상과 위치에 따른 소멸경향을 분석하여 가스터빈 블레이드 등 고온부품의 제조과정에서 생성된 주조결함이나, 고온에서 장시간 사용에 따라 재료내부에 형성 및 성장한 결함을 HIP처리에 의하여 효과적으로 제거할 수 있는 기준을 마련하고자 하였다.

### 2. 본 론

#### 실험 방법

본 실험에는 ABB사 QIH-32의 HIP장비를 사용하였으며, 실험에 적용된 HIP처리 조건은 유해상의 석출을 최소화하기 위해 최고 가열온도를 1200 $^{\circ}$ C로 고정한 후 압력은 100MPa과 180MPa, 유지시간은 4시간과 6시간으로 각각 달리하여 결함소멸에 미치는 영향을 조사하였다. 실험에 사용된 재료는 산업용 가스터빈 블레이드에 가장 많이 사용되고 있는 IN738LC 초합금을 사용하였다. 시편 제작은 진공상태에서 20 $\phi$  봉상 잉곳으로 정밀주조한 후 10mm 두께로 쿠펜형 시편을 절단하고 실험 목적에 따라 그림 1과 같이 방전가공에 의해 다양한 결함을 시편 내부에 생성시켰다. 또한 가공과정에서 생성될 수 있는 이물질의 혼입을 방지하기 위해 결함내부를 산세정하고 건조시킨 후 결함입구를 IN625 용접봉을 사용하여 TIG 용접법에 의해 밀봉시켰다.

#### HIP처리 시간에 따른 결함 소멸한계

진공정밀주조방법에 의해 제작된 가스터빈 블레이드 등 주물품의 내부에 존재하는 결함을 HIP처리에 의해 제거할 수 있는 한계를 조사하기 위해 표 1과 같이 여러 종류의 결함을 시편 내부에 형성시킨 후 1200 $^{\circ}$ C, 100MPa의 압력하에서 4시간, 6시간 HIP처리하였다. 실험결과 직경 0.3~0.6mm, 길이(깊이) 7mm 이하의 원통형 결함은 제거되었으나 더 큰 결함은 HIP처리 시간에 관계없이 제거되지 않았다.

일반적으로 HIP에 의한 재료의 치밀화는 3단계에 걸쳐 이루어진다. 제 1단계에서는 소성변형이 우선적으로 발생하여 결함이 순간적으로 함몰되어 표면접촉이 발생하고 계속적으로 크리프변형과 확산반응에 의해 치밀화가 진행되는데, 0.6 $\phi$ x7mm 크기 이상의 원통형 결함의 경우 결함소멸을 방해하는 힘으로 작용하는 결함내부에 존재하고 있는 공기의 압력과 재료의 항복강도 등을 고려할 때 100MPa

정도의 HIP처리 압력으로는 소성변형에 의한 순간적인 결합함몰이 발생되지 못하기 때문에 HIP처리 시간을 아무리 길게 유지하여도 결합은 소멸되지 않는 것으로 판단된다. 한편 시편 내부에 결합을 가공하고 용접, 밀봉하는 작업이 대기중에서 행해졌기 때문에 결합내부에는 공기가 충전되어 있어 공기중에 존재하는 원자크기가 작은 원소는 Sievert 법칙에 의해 재료내부로 확산 침투되지만 다른 기체는 결합이 수축되는 것을 방해하는 힘으로 작용하기 때문에 결합 내부에 어떤 종류의 가스가 존재하느냐에 따라서도 제거되는 결합의 크기에 차이가 있을 것으로 생각된다. 일반적으로 진공정밀주조품의 경우에는 결합내부가 진공상태이거나 수소가스 등 원자크기가 작은 기체들로 주로 채워져 있기 때문에 Sievert의 법칙에 따라 외부압력의 1/2승에 비례하여 이들 가스들이 재료내부에 쉽게 용해될 것으로 판단되기 때문에 동일한 HIP조건에서도 주조결합의 경우는  $0.3\sim 0.6\phi \times 7\text{mm}$  이상의 결합도 제거가 가능할 것으로 판단된다.

### 미세조직 분석

그림 2(a),(b)는  $0.5\phi \times 7\text{mm}$  크기의 원통형 결합을 갖는 시편을 100MPa, 1200℃, 4시간 동안 HIP처리 후 완전하게 소멸된 모습을 각각 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 관찰한 사진으로 원래의 결합 자리에는 물질이동에 의해 모재가 완전히 충전되었으며 사진에서 검은 색으로 나타난 "A" 부위는 결합내에 존재하고 있던 산소와 모재의 구성원소와 반응하여 생성된 산화물이다. 그림 2(c),(d)는 "B"와 "C" 부위를 각각 확대하여 관찰한 것으로  $\gamma'$ 의 크기와 형상 등을 통하여 결합이 소멸되는 과정을 유추할 수 있다. 일반적으로  $\gamma'$ 은 응력에 수직한 방향으로 성장하게 되며 가해진 외력이 클수록 성장속도가 빨라지는데 그림 2(c),(d)에서 보여주듯이  $\gamma'$ 이 소용돌이 형상으로 성장한 것으로 부터 HIP처리 과정에서 항복응력 이상의 응력이 결합부위에 국부적으로 발생되면 순간적으로 심한 뒤틀림 변형이 일어나 돌기가 형성되며, 이들 표면은 결합 내부에 존재하고 있던 산소와 반응하여 산화물 피막을 형성하면서 계속적으로 소성변형이 소용돌이치면서 발생하여  $\gamma'$ 이 불규칙하게 성장한 것으로 보여진다. 그림 2(d)에서 검은색으로 나타난 부위를 주사전자현미경을 통해 관찰한 결과 산화물과  $\gamma'$ 사이의 결합상태가 매우 양호한 것을 관찰할 수 있었는데 이는 결합이 소성변형에 의해 함몰된 후에 크리프 변형과 확산반응을 통해 산화물과 기지 조직간에는 치밀한 결합이 발생되었기 때문으로 판단된다. 그림 2(d)에서 검은색으로 나타난 부분을 EDX로 분석한 결과는 결합내부에 존재하는 산소와 모재 구성원소인 산화속도가 빠른 알루미늄이 반응하여 생성된 알루미늄산화물로 분석되었다.

### 3. 결 론

산업용 가스터빈 블레이드 재료로 사용되고 있는 IN738LC 초합금 주조재의 내부에 존재하는 결합의 소멸경향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인위적으로 시편내부에 다양한 크기와 형상을 갖는 결합을 대기중에서 가공한 시편을 제작하고 1200℃, 100~180MPa, 4~6시간 동안 HIP처리한 결과  $(0.3\sim 0.6\phi) \times 7\text{mm}$  정도 크기의 원통형 결합까지 제거가 가능하였으며, 결합 내부가 진공이거나 수소가스와 같이 원자반경이 작은 기체가 존재할 경우에는 이 보다 더 큰 결합도 제거될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 결합의 형상에 따른 소멸경향을 조사한 결과 단면형상 보다는 결합의 직경과 길이의 비율 (aspect-ratio)에 더 큰 영향을 받았으며 가늘고 길쭉한 형상의 결합이 보다 잘 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. H.V. Atkinson, B.A. Rickinson: Hot Isostatic Pressing, J. Wood(Ed.), Adam Hilger, New York,(1991) 21
2. S.King, A.J. Fletcher et al: Hot Isostatic Pressing '93, L. Delaey et al(Ed.), Elsevier Science B.V, New York(1993) 145
3. R.A Stevens, P.E.J. Flewitt: Metal Science, 3(1980) 81
4. J.F. Radavich, P.D. Desai: MIAC Report 4, (1994) 29

Table 1. Elimination trend of internal defects with various size by HIPping

시편종류 HIP조건	0.3 $\Phi$ x7 (mm)		0.4 $\Phi$ x3 (mm)		0.5 $\Phi$ x7 (mm)		0.6 $\Phi$ x5 (mm)		1.0 $\Phi$ x7 (mm)		3.0 $\Phi$ x7 (mm)	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
4hr-100MPa-1200 $^{\circ}$ C	O	$\Delta$	X	X	O	O	O	O	X	X	X	X
6hr-100MPa-1200 $^{\circ}$ C	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X

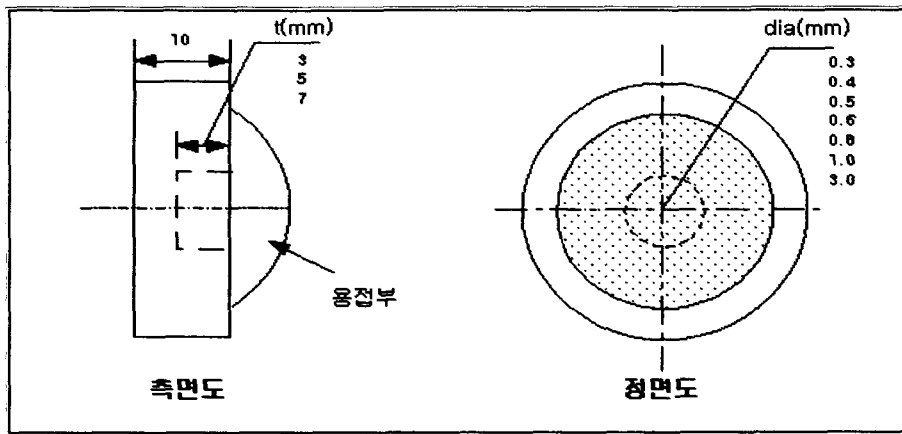


Fig. 1. Shape and dimension of specimen with internal defects

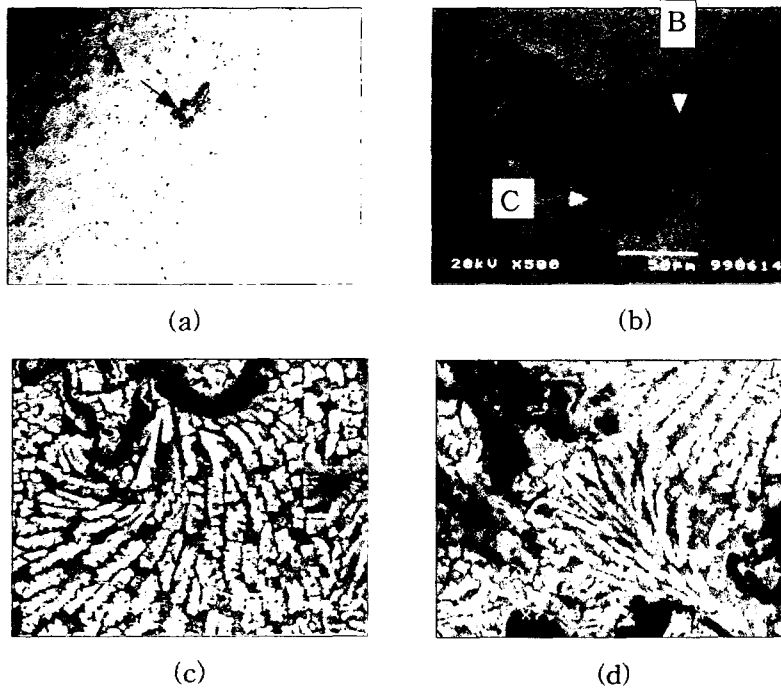


Fig. 2. Microstructures of defects eliminated by HIP  
 (a),(b) Microstructures by OM and SEM, respectively  
 (c) Microstructure of  $\gamma'$  in B  
 (d) Microstructure of  $\gamma'$  in C