

■■■■■■■■■■  
**論 文**  
 ■■■■■■■■■■

## HIP 처리에 의한 가스터빈 블레이드용 IN738LC 초합금의 내부결함 소멸 효과

박영규\* · 김수형 · 김재철 · 이영찬 · 김두수 · 최철 · 김길무\*

### Effect of Hot Isostatic Pressing on Elimination of Internal Defects in IN738LC Superalloy for Gas Turbine Blade

Young-Kyu Park\*, Soo-Hyung Kim, Jae-Cheol Kim, Young-Chan Lee, Doo-Soo Kim, Cheol Choi and Gil-Moo Kim\*

#### Abstract

Most investment castings contain some porosities and microcavities. In this study, we investigated the elimination trends of various internal defects in IN738LC investment castings for industrial gas turbine blade by hot isostatic pressing. The results showed that cylindrical defects which are under  $0.6 \text{ mm}\phi \times 7 \text{ mm}$  size are mostly eliminated and aspect ratio of defects is more sensitive factor than their cross section shape in removing these defects. Increasing hot isostatic pressure and holding time doesn't affect the elimination trend of cylindrical defects over  $0.6 \text{ mm}\phi \times 7 \text{ mm}$  size because first step(plastic deformation) of HIP densification doesn't occur under these HIPping conditions. (Received September 30, 1999)

#### 1. 서 론

가스터빈 블레이드는 주로 Ni기 초합금을 재료로 하여 진공정밀주조방법에 의해 제작되며 이들 제품은 제작과정에서부터 원천적으로 기공과 공극 등 상당량의 주조결함을 내포하고 있다. 이들 블레이드는 X-ray 검사를 거쳐 사용 여부를 판정하게 되는데  $100 \mu\text{m}$  이하의 결함은 검출이 불가능하기 때문에 사용 가능품으로 판정된 제품이라 할지라도 미세한 결함들이 재료 내부에 상당량 존재하게 되며,  $1000^\circ\text{C}$  이상의 고온화염에서 장시간 노출될 경우 급속하게 성장하여 재료의 기계적 특성을 크게 저하시키고 파단의 원인으로 작용하게 된다. 이러한 내부결함을 제품의 형상변화 없이 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로는 HIP처리(hot isostatic pressing)가 가장 효과적인 방법으로 보고되고 있다[1,2,3]. 그러나 대부분의 연구는 재료별 최적 HIP 처리공정의 도출과 기계적 특성 평가분야를 주로 연구

하고 있으며, HIP처리에 의한 주조결함의 제거한계를 정량화하고 미세조직 및 석출상의 변태거동을 체계적으로 분석한 연구는 미미한 실정이다[4,5].

따라서 본 연구에서는 발전용 가스터빈 블레이드 재료로 가장 많이 사용되는 IN738LC 주조시편 내부에 다양한 크기의 결함을 형성시키고 HIP처리한 후 이들 결함의 소멸경향을 분석하였다. 또한 결함의 소멸과정에서 석출상의 변태와 산화물의 생성 등을 광학현미경, 주사전자현미경, EDX를 이용하여 분석함으로써 가스터빈 블레이드등 고온부품의 제조과정에서 형성되었거나 장시간 사용으로 인해 성장한 결함을 HIP처리에 의해 효과적으로 제거할 수 있는 기준을 제시하였다.

#### 2. 실험방법

본 실험에서는 최대 작업공간  $290 \text{ mm}\phi \times 890 \text{ mm}$ , 최고 사용조건  $2000^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa}$ , 균일급속 냉각기능을

한전 전력연구원 발전연구실(Power Generation Laboratory, KEPRI)

\*충남대학교 재료공학과 (\*Dept. of Materials Engineering, Chungnam National University)

Table 1. Chemical composition of alloy IN738LC

composition	Ni	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Cb	C	B	Ta	Zr
wt%	bal.	16	8.5	2.6	1.7	3.4	3.4	0.9	0.11	0.01	1.7	0.05

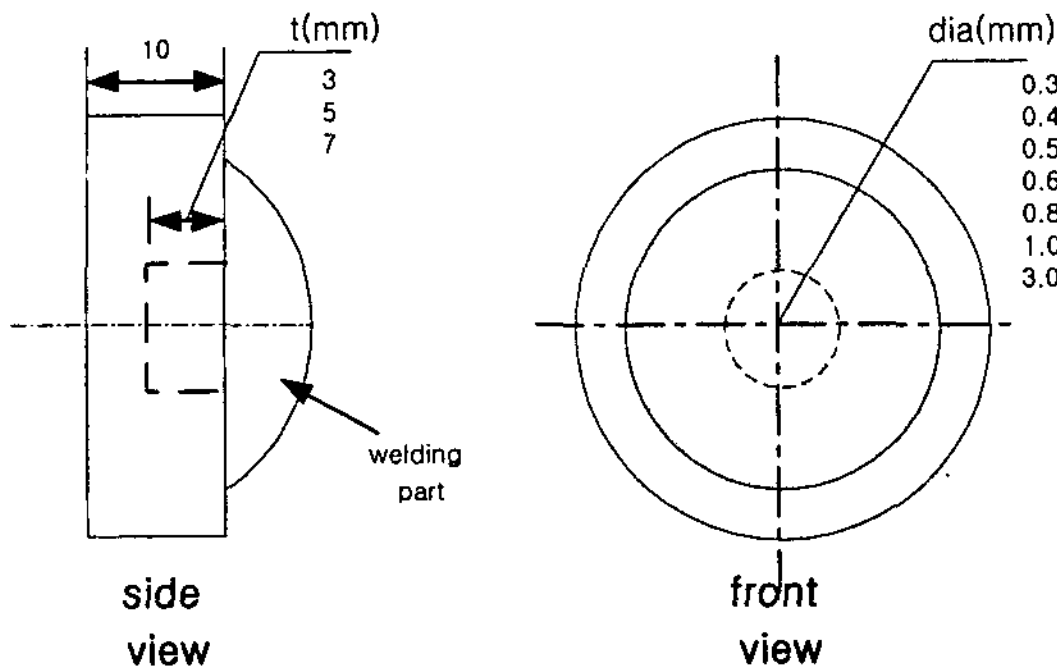


Fig. 1. Shape and dimension of specimen with internal defects

가진 ABB QIH-32 모델의 HIP장비를 사용하였으며, 실험에 적용된 HIP처리 조건은 유해상의 석출을 최소화하기 위해 최고 가열온도를 1200°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 사용하였으며 표 1에 화학조성을 나타내었다.

또한 시편의 제작은 진공상태에서 20 mmΦ 봉상 잉곳으로 정밀주조한 후 10 mm 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[6].

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 결함 소멸경향

##### 3.1.1 HIP처리 시간에 따른 결함 소멸한계

진공정밀주조방법에 의해 제작된 가스터빈 블레이드 등 주조품의 내부에 존재하는 결함을 HIP처리에 의해 제거할 수 있는 한계를 조사하기 위해 표 2와 같이 여러 종류의 결함을 시편 내부에 형성시킨 후 1200°C, 100MPa의 압력하에서 4시간, 6시간 HIP처리하였다 [7,8]. 실험결과 직경 0.3~0.6 mm, 길이(깊이) 7 mm 이하의 원통형 결함은 대부분 제거되었으나 더 큰 결함은 HIP처리 시간을 증가시켜도 제거되지 않았다.

일반적으로 HIP에 의한 재료의 치밀화는 소성변형, power-creep, 원자확산의 3단계에 걸쳐 이루어지는 것으로 알려져 있다[1]. 제 1단계인 소성변형은 시간 비 의존적인 단계(time-independent step)로 재료에 항복응력 이상의 힘이 가해질 경우 순간적으로 결함이 함몰되어 표면접촉이 발생하게 된다. 이렇게 거시적인 결함의 함몰에 따라 표면접촉이 발생하면 이 부위로부터 크리프변형과 원자확산이 계속적으로 발생하여 재료는 더욱 치밀하게 된다. IN738 초합금 주조재의 항복강도는 870°C에서 대략 550 MPa 정도이기 때문에 실험조건인 1200°C에서 100 MPa의 압력으로 HIP처리할 경우 결함내부에 충전된 공기의 저항압력(결함의 소멸을 방해하는 역할)과 재료의 항복강도를 고려할 때 결함 부위에는 탄성변형만이 발생할 것으로 생각된다[5]. 따라서 0.6mm Φ×7mm 보다 큰 결함에서는 탄성변형량이 결함내부 표면간의 접촉을 초래할 정도로 크지 않기 때문에 HIP처리 시간을 증가시켜도 치밀화의 2,3 단계인 power-creep 변형과 원자확산 과정이 계속적으로 진행하지 못해 결함의 소멸경향에 차이를 나타내지 않는 것으로 판단된다. 한편 시편은 대기중에서 가공하였기 때문에 결함내부에 존재하는 다량의 산소가 HIP

Table 2. Elimination data of internal defects with various sizes after HIP

specimens	0.3Φ×7 (mm)		0.4Φ×3 (mm)		0.5Φ×7 (mm)		0.6Φ×5 (mm)		1.0Φ×7 (mm)		3.0Φ×7 (mm)	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
HIP condition												
4hr-100MPa-1200°C	O	△	X	X	O	O	O	O	X	X	X	X
6hr-100MPa-1200°C	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X

\* fully-eliminated(O), partially-eliminated(△), not-eliminated(X)

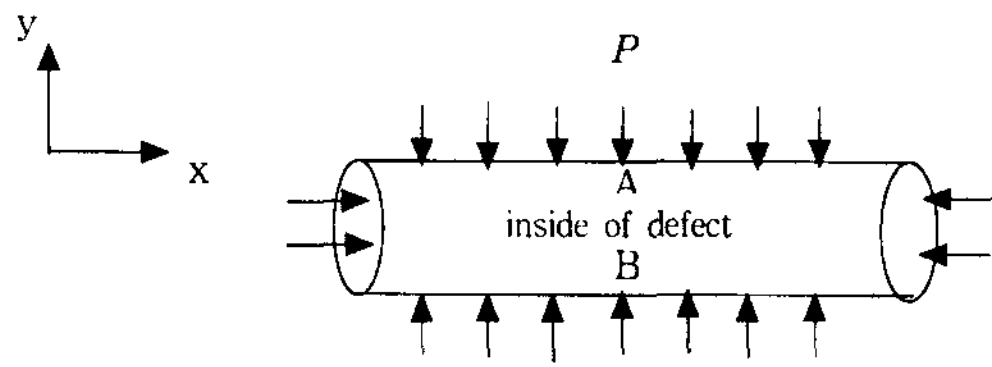


Fig. 2. Stress distribution model of a defect with high aspect ratio

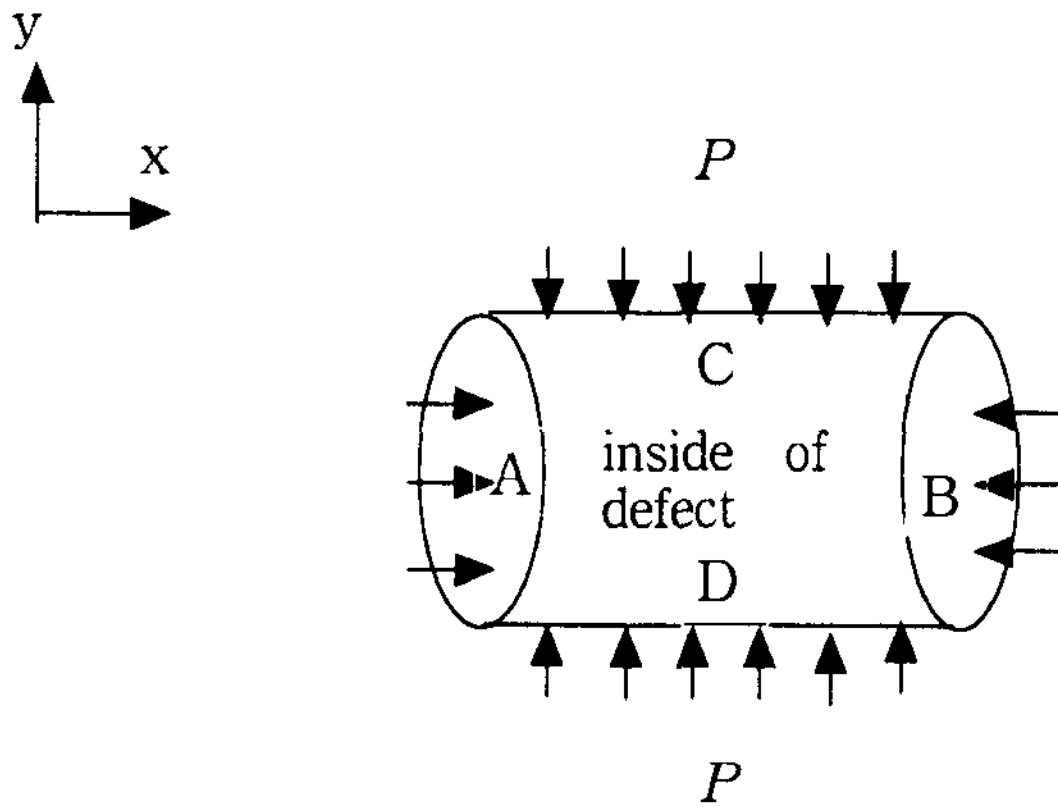


Fig. 3. Stress distribution model of a defect with low aspect ratio

처리중에 모재와 반응하여 산화물 피막을 형성하게 된다. 이들 피막은 결함내에 잔류하는 기체가 재료 내부로 확산되는 것을 억제하기 때문에 결함이 소멸되는 것을 방해하게 된다. 그러나 진공정밀주조재의 경우 결함내부가 진공상태이거나 수소가스 등 원자크기가 작은 기체들로 주로 채워져 있어 Sievert의 법칙에 따라 외부압력의 1/2승에 비례하여 가스들이 재료내부에 용해되기 때문에 동일한 HIP조건에서도 주조결함의 경우는 0.3~0.6 mmΦ×7 mm 이상의 결함도 제거가 가능할 것으로 판단된다[1].

3.1.2 결함의 장단축비(aspect ratio)에 따른 경향

원통형 결함의 장단축비(aspect ratio; 그림 2의 원통형결함에서 x방향의 결함길이와 y방향의 단면직경비)

에 따른 소멸경향을 분석하기 위해 0.3 mmΦ×7 mm, 0.4 mmΦ×3 mm, 0.4 mmΦ×5 mm, 0.5 mmΦ×7 mm, 0.6 mmΦ×3 mm, 0.6 mmΦ×5 mm 크기의 결함을 갖는 시편을 각각 2개씩 제작하여 1200°C, 100MPa, 4시간 동안 HIP처리하였다. 실험결과 표 3에 나타낸 바와 같이 aspect ratio가 큰 비교적 길쭉한 원통형 결함(예, 0.3 mmΦ×7 mm)이 aspect ratio가 작은 결함(예, 0.6 mmΦ×3 mm)에 비해 상대적으로 용이하게 제거되는 것으로 조사되었다. 이는 결함의 x 방향 길이 즉, 원통의 길이가 길 경우 동일한 압력하에서도 중간부위(그림 2의 "A"와 "B" 부분)에 응력이 크게 작용하게 되기 때문에 상대적으로 큰 변형이 발생하여 금속간의 접촉이 일어나게 되고 이들 접촉면을 통해 계속적으로 크리프 변형 및 원자확산이 발생하면서 결함이 소멸되는 것으로 생각된다. 그러나 aspect ratio가 작은 경우는 X축 방향의 길이(깊이)가 짧기 때문에 외부응력에 의해 중간부위(그림 3의 "C", "D" 부위)에 작용하는 응력이 상대적으로 크지 않아 변형량이 표면접촉이 발생하지 않을 정도로 작기 때문에 결함이 소멸되지 않는 것으로 생각된다.

3.1.3 HIP처리 압력변화에 따른 경향

HIP처리 온도와 유지시간은 1200°C, 4시간으로 일정하게 유지하고 압력을 100 MPa과 180 MPa로 변화시킨 결과 0.6 mmΦ×7 mm 이상의 큰 결함에서는 형상이나 크기, 위치에 관계없이 소멸경향에 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 HIP처리 압력을 100 MPa에서 180 MPa로 증가시켜도 IN738LC의 항복강도 보다 작기 때문에 0.6 mmΦ×7 mm 크기보다 큰 결함의 경우에는 탄성변형만이 발생하여 결함이 소멸되지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 결함의 직경이 작거나 aspect-ratio가 큰 경우에는 가해진 응력 조건에서 결함의 중심부(그림 2의 "A", "B")에서 탄성 변형량이 상대적으로 크기 때문에 이 부분에서 표면접촉이 발생하여 계속적으로 크리프 변형과 확산반응이 진행되면서 결함이 소멸되는 것으로 추측된다. 일단 결

Table 3. Elimination data of internal defects with various aspect ratios after HIP

fully-eliminated		●		●		●	
not-eliminated		◆◆		◆			
A.R	0	5	10	15	20	25	30

\* A.R(aspect ratio) = Length(x axis direction)/Diameter(y axis direction)

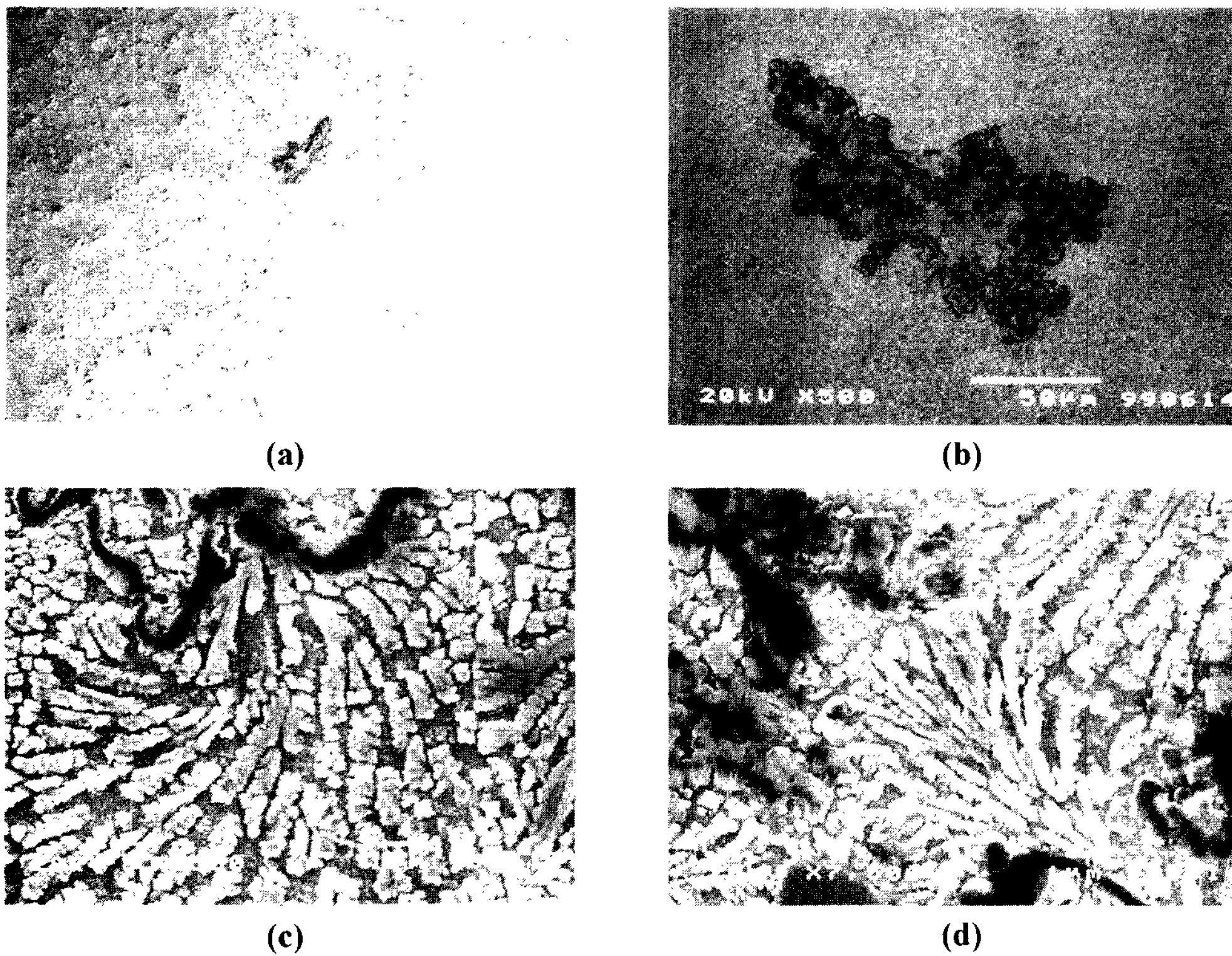


Fig. 4. Microstructures of defects eliminated by HIP

함입이 거시적으로 함몰되고난 후에는 HIP처리 압력과 유지시간을 증가시킬 경우 시간 의존적 단계(time-dependent step)인 크리프 변형 및 원자확산에 의해 더욱 치밀한 조직을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 미세조직 분석

앞에서는 HIP처리시 결함의 형상 크기 위치에 따른 거시적인 소멸 현상만을 고찰하였다. 그렇다면 실제 결함이 소멸되는 동안에 재료 내부의 미세조직은 어떻게 변화되고 결함 내부에 존재하는 다량의 공기는 어떻게 제거되며 반응할 것인가를 규명하기 위해 광학현미경, 주사전자현미경과 EDX를 이용하여 미세조직을 분석하였다.

그림 4(a),(b)는 0.5 mmΦ×7 mm 크기의 원통형 결함을 갖는 시편을 100 MPa, 1200°C, 4시간 동안 HIP 처리 후 완전하게 소멸된 모습을 각각 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 관찰한 사진으로 원래의 결함 자리에는 물질이동에 의해 모재가 완전히 충전되었으며 사진에서 검은 색으로 나타난 "A" 부위는 결함내에

존재하고 있던 산소와 모재의 구성원소와 반응하여 생성된 산화물이다. 그림 4(c),(d)는 "B"와 "C" 부위를 각각 확대하여 관찰한 것으로 gamma prime의 크기와 형상 등을 통하여 결함이 소멸되는 과정을 유추할 수 있다. 일반적으로 gamma prime은 응력에 수직인 방향으로 성장하게 되며 가해진 외력이 클수록 성장속도가 빨라지는데 그림 4(c),(d)에서 보여주듯이 gamma prime이 소용돌이 형상으로 성장한 것으로 부터 HIP처리 과정에서 항복응력 이상의 응력이 결함부위에 국부적으로 발생되면 순간적으로 심한 뒤틀림 변형이 일어나 돌기가 형성되며, 이들 표면은 결함 내부에 존재하고 있던 산소와 반응하여 산화물 피막을 형성하면서 계속적으로 소성변형이 소용돌이 치면서 발생하여 gamma prime이 불규칙하게 성장한 것으로 보여진다. 그림 4(d)에서 검은색으로 나타난 부위를 주사전자현미경을 통해 관찰한 결과 산화물과 gamma prime사이의 결합상태가 매우 양호한 것을 관찰할 수 있었는데 이는 결함이 소성변형에 의해 함몰된 후에 크리프 변형과 확산반응을 통해 산화물과 기지 조직간에는 치밀



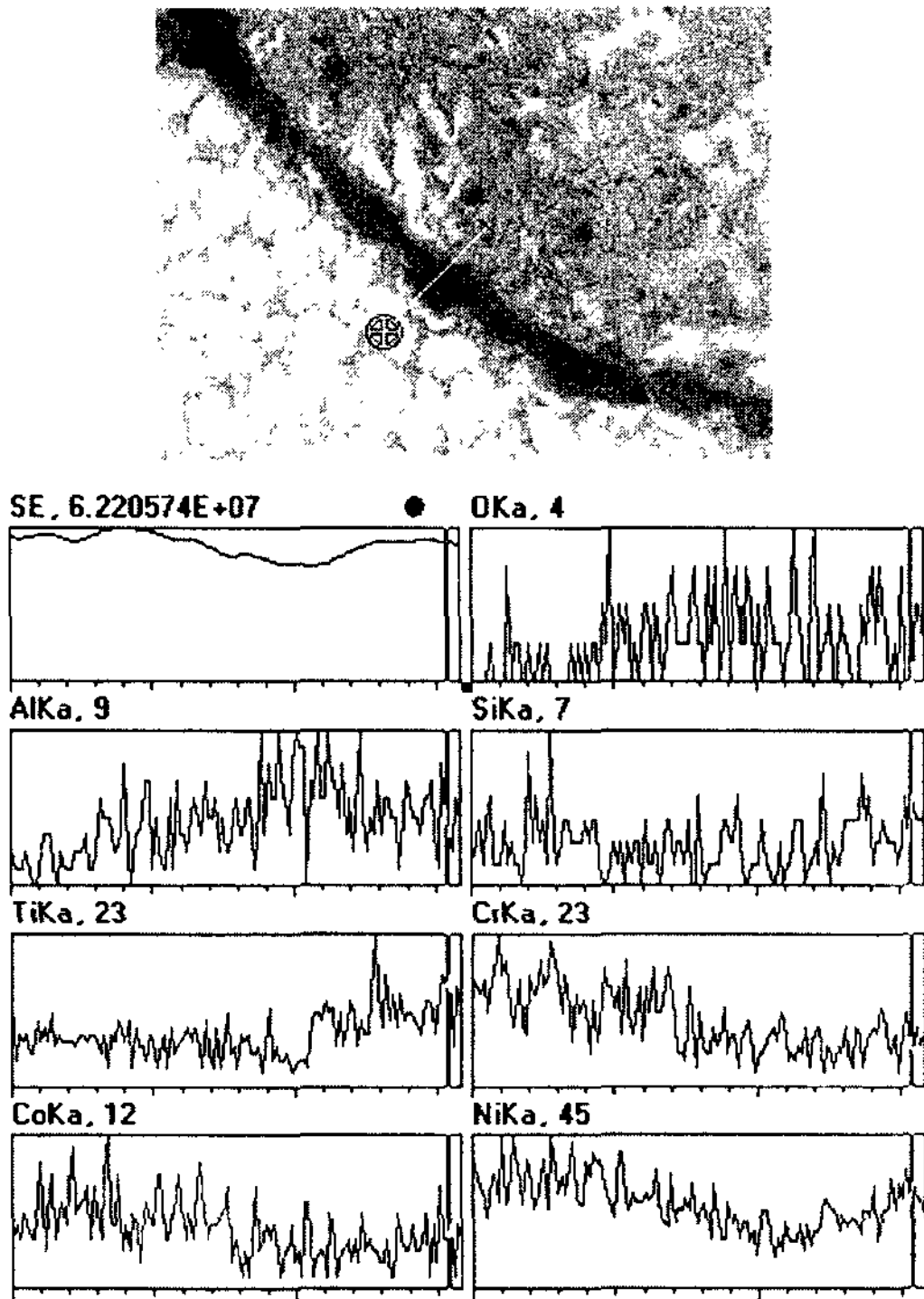


Fig. 5. EDX analysis of defects eliminated by HIP

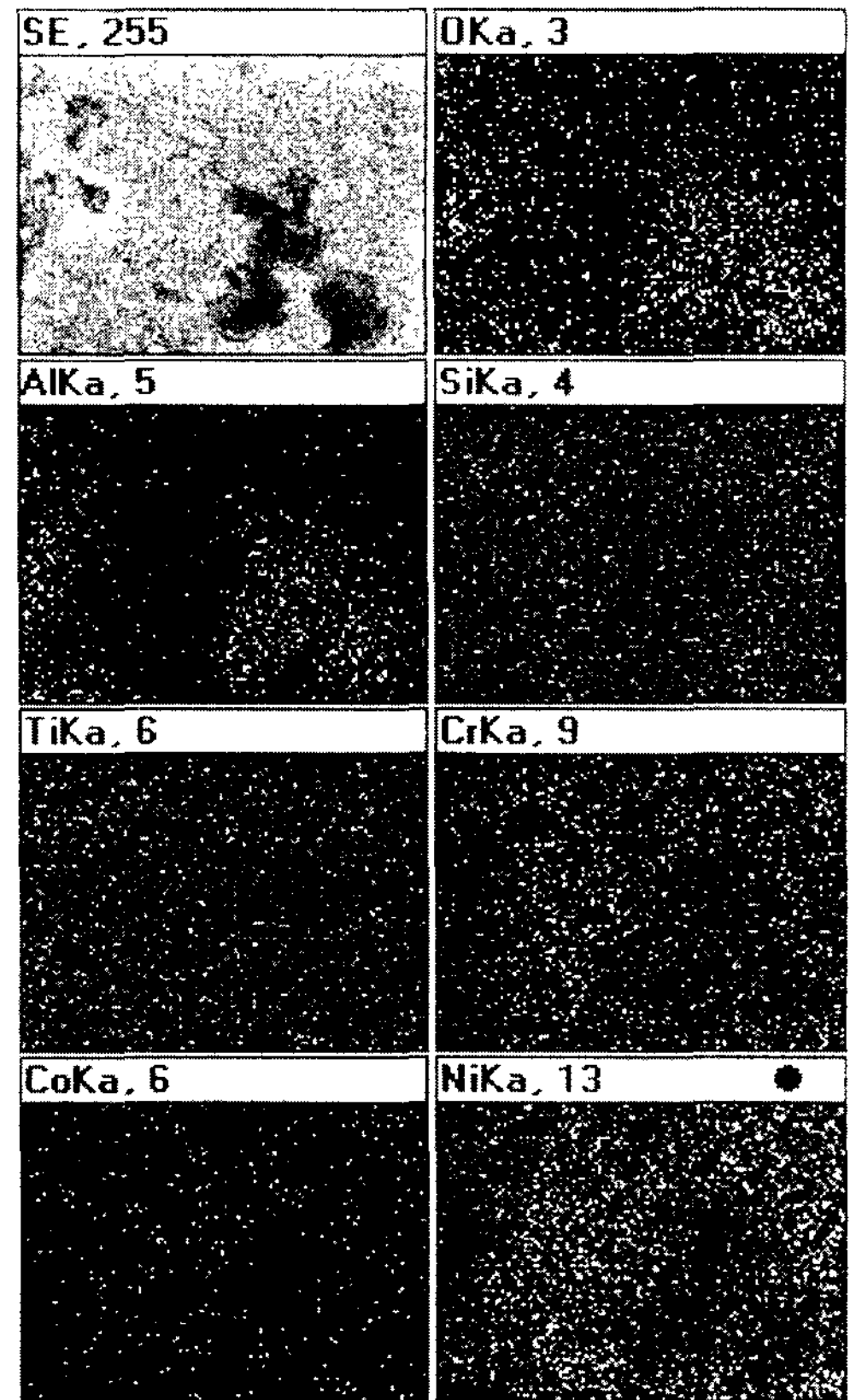


Fig. 7. EDX element mapping of defects eliminated by HIP

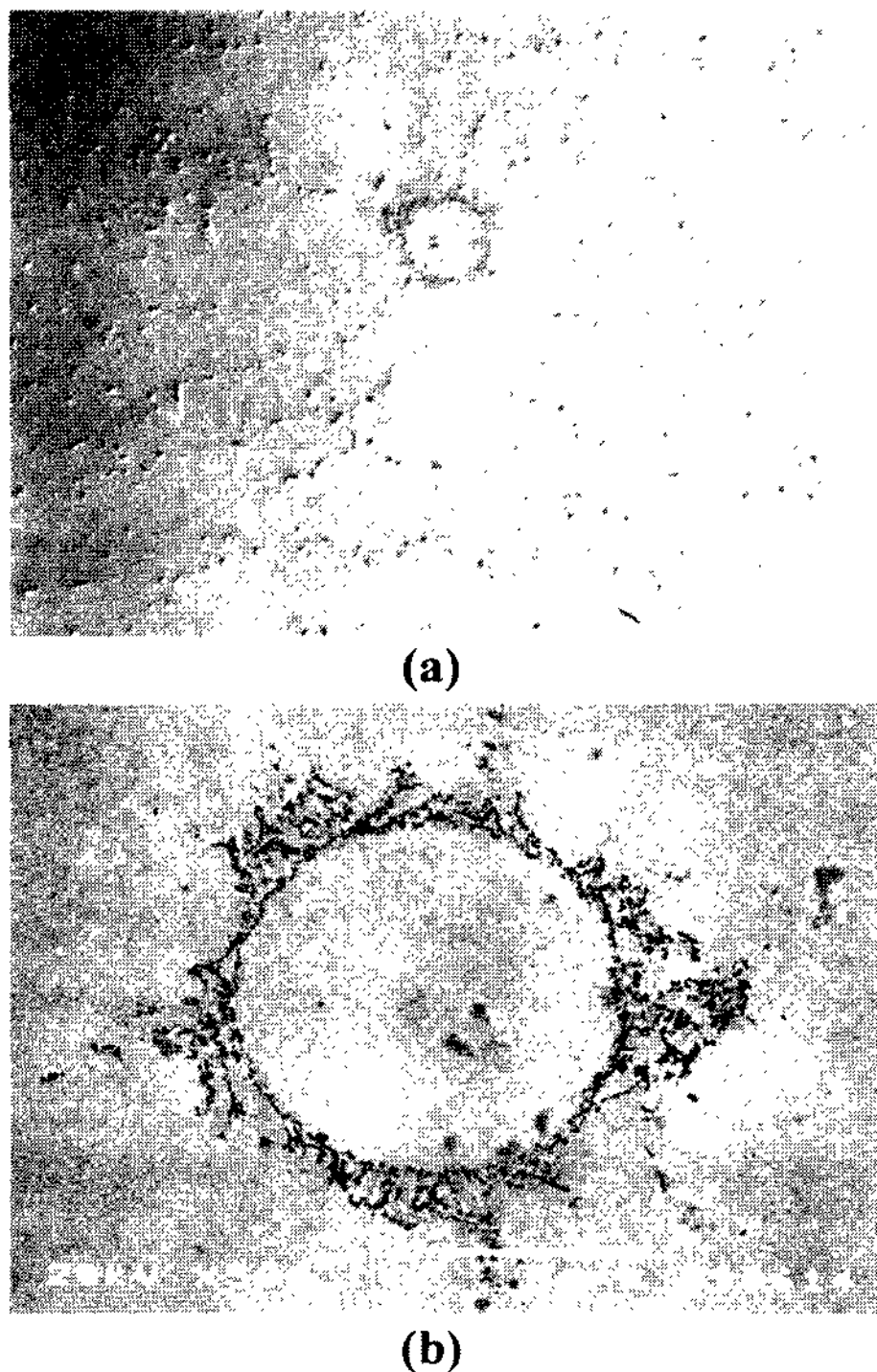


Fig. 6. Microstructures of defects with low aspect ratio after HIP

한 결합이 발생되었기 때문으로 판단된다. 그림 5는 그림 4(d)에서 검은색으로 나타난 부분을 EDX로 분석한 것으로 결합내부에 존재하는 산소와 모재 구성원소인 산화속도가 빠른 알루미늄이 반응하여 생성된 알루미늄산화물로 분석되었다. 그림 6(a),(b)는 aspect ratio가 작은 원통형 결함(0.6 mm $\Phi$  × 5 mm)이 소멸된 부위를 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 사진이다. aspect ratio가 작은 결함은 X축 방향의 길이(깊이)가 짧기 때문에 외부응력에 의해 중간부위(그림 3의 "C", "D" 부위)에 작용하는 응력이 상대적으로 크지 않기 때문에 이 부분에서의 변형과 Y축 방향의 "A", "B"부위에서의 변형정도가 균형을 이루면서 이들면이 상호간에 접촉이 발생하면서 그림 6(b)와 같은 원형의 계면이 형성된 것으로 생각되며 계면에 검게 나타난 부위를 EDX로 분석한 결과 그림 7에 나타낸 바와 같이 알루미늄 산화물로 분석되었다.

4. 결 론

HIP처리에 의해 가스터빈 블레이드 재료로 가장 널리 사용하는 IN738LC 초합금 주조재의 내부에 존재하는 결함의 소멸경향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인위적으로 시편내부에 다양한 크기와 형상을 갖는 결함을 대기중에서 가공한 시편을 제작하고 1200°C, 100 ~ 180 MPa, 4 ~ 6시간 동안 HIP처리한 결과 (0.3 ~ 0.6 mm $\Phi$ ) $\times$  7 mm 정도 크기의 원통형 결함까지 제거가 가능하였으며, 결함 내부가 진공이거나 수소가스와 같이 원자반경이 작은 기체가 존재할 경우에는 이보다 더 큰 결함도 제거될 수 있을 것으로 판단된다.

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

3) 1200°C에서 HIP처리시 0.6 mm $\phi$  $\times$ 7 mm이상의 큰 결함의 경우에 HIP처리 압력과 시간을 100 MPa에서 180 MPa로 상승시키고 4시간에서 6시간으로 증가시켜도 결함 소멸 한계에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 이는 결함내부가 공기로 충전된 경우 1200°C에서 100 ~ 180 MPa 압력으로는 시간 비의존적 과정(time independent step)인 소성변형이 발생하지 않기 때문에 아무리 HIP처리 시간을 오랫동안 유지하여도 더 큰

결함의 제거는 불가능할 것으로 판단된다. 그러나 소멸한계보다 작은 결함의 경우는 어느 압력이상에서는 순간적으로 결함이 함몰되기 때문에 HIP처리 압력과 시간을 증가시키게 되면 크리프 변형과 원자확산에 의한 재료의 치밀화가 촉진될 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- [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] 김상섭, 장세경, 백성기:요업재료의 과학과기술, 6(1991), 232
- [5] A. K. Koul, J-P. Immarrigeon, R. Castillo, P. Lowden and J. Liburdi : in "Superalloys 1988", Proceedings of Conference, S. Reichman et al (Ed.), Champion, Pennsylvania, (1988) 755
- [6] Aerospace structural metals handbook, metals and ceramics information center, Ohio (1987)
- [7] A. Baldan : J. Mat. Sci., 26 (1991) 3409
- [8] R. Castillo, A. K. Koul, J. P. Immarrigeon and P. Lowden : Advances in High Temperature Structural Materials and Protective Coatings, A. K. Koul et al (Ed.), National Research Council of Canada, Ottawa (1994) 147
- [9] J. F. Radavich, P. D. Desai: MIAC Report 4, (1994) 29