

특별강연 (Ⅱ)

초내열합금의 용접과 접합

(Welding and Bonding of Superalloys)

大阪大學 工學部

中尾 嘉邦

목 차

1. 서 언	39
2. 용접 및 접합법	39
2.1 용접법	39
(1) 전자 Beam 용접법	39
(2) Laser beam 용접법	40
(3) 용접균열	40
2.2 고상접합법	41
(1) 확산접합법	41
(2) 액상확산접합법	42
3. 결 언	42
참 고 문 헌	43
그 림	45

초내열합금의 용접과 접합

大阪大學 工學部 中尾嘉邦
(Osaka Univ. Nakao Yoshikuni)

1. 서언

최근, 항공우주산업, 원자력산업, 석유화학산업 등의 산업분야에 있어서는 각종 기기의 사용환경이 더욱 가혹하게 되고, 내열기능성이나 내식기능성이 특히 우수한 내열합금의 개발이 강하게 요구되고 있다. 이와같은 요청에 대응하기 위해서 결정제어합금이나 입자분산강화합금, 섬유분산강화합금 등이 개발되고 있다.

내열합금을 사용하여 각종의 기기를 제조하는 경우에는 고성능, 고정도의 용접, 접합기술이 필요불가결하게 된다.

본 보고에서는 내열합금 중에서도 초내열합금에 초점을 두어 그 용접, 접합법으로서 주로 용접법과 확산접합법에 대한 최근의 연구동향에 대해서 기술한다.

2. 용접 및 접합법

내열합금의 용접, 접합법으로서, 종래로부터 TIG 용접법(GTAW)이나 저항용접법이 널리 사용되고 있지만, 최근, 고정도화, 고기능화의 요청이나 신뢰성, 생산성의 향상에 대한 요구에 대응하기 위하여, 전자 Beam 용접법(EBW), Laser Beam 용접법(LBW) 확산접합법 등의 용접 및 접합법의 활용이 현저하게 이루어지고 있다.

그림1)은 그것의 하나의 예로서, Jet Engine의 용접, 접합기술의 추이를 모식적으로 표시한 그림이지만, Engine의 고온고압화, 경량화, 생산성 및 내구성의 향상을 도모하기 위해서 전술한 바와 같은 새로운 용접, 접합법이 적극적으로 활용되고 있다.

2.1 용접법(融接法)

(1) 전자 Beam 용접법

EBW는 진공중에서 가속되는 전자를 렌즈에 의해 가늘게 조여진 전자 Beam을 열원으로 하여 이용한 용접법이고, 고에너지 밀도(1000Kw/cm² 혹은 그이상)때문에 Beam 폭이 좁고, 깊은 용입의 bead를 얻을 수가 있다. 그외에, beam 제어가 쉽고, 진공용기 내에서 용접을 행하는 것 등 때문에 GTAW에 비해 고성능 고정도의 용접이 가능하다. 이 때문에, EBW는 Ni, Co, Fe기 등의 모든 초내열합금에 대해서 널리 적용되고 있다.

EBW를 초내열합금의 용접법으로 사용하는 경우의 문제점으로서 각종의 용접결함을 들 수 있다. 그중에서도 주요한 문제점은 용접근열의 문제이다. 용접근열 이외의 문제점으로서 beam의 Root 선단부에서 형성되는 R porosity나 bead 단면중앙부에서 형성되는 A porosity 등의 기공, cold shut, root부의 spike등이 열거된다.

초내열합금에 대한 EBW의 계통적인 적용연구는 Hastelloy X, Inconel 617, Inconel 800, Inconel 807을 사용하여 이루어져 있다²⁾. 즉, 용접 beam 특성에 대한 용접 parameter 영향의 검토, 용접근열에 대한 야금학적 검토, 용접근열 방지책에 대한 검토, 용접이음부의 기계적 성질 및 사용성능에 대한 검토가 이루어져 있다.

그림2)는 그 결과의 하나의 예이고, Inconel 625에 EBW를 적용한 경우에 R porosity가 발생하는 영역을 표시한 것이다. 그림중의 경사부의 면적이 좁을수록 R porosity의 발생이 어려운 합금으로 생각된다.

EBW에서는 용접 bead의 Nail head의 neck부에서 고온근열이 발생하기 쉽지만, 유한요소법에 의한 용접열영향부(HAZ)주변의 온도, 응력분포의 계산 결과로부터, Neck부의 HAZ에서는 1000°C 이상의 온도에서 인장응력이 작용하여, 고온근열이 발생하는 것을 명확히 하고 있다. Hastelloy X, Inconel 617은 M₆C의 또한, Inconel 817에서는 NbC의 극부용융 현상이 고온근열의 원인으로 생각되고 있다²⁾.

초내열합금의 전자 beam용접법에 대한 검토에 대해서는 많은 검토가 되어있다.³⁾⁻¹⁹⁾ 용접근열감소성은 기본적으로는, γ' 상 석출원소인 Al이나 Ti함유량이 증가하면 증대하지만²⁰⁾, EBW용접 parameter의 제어¹⁴⁾, 결정립의 미세화²¹⁾, 예열¹⁷⁾에 의해 용접근열을 어느정도 방지하는 것이 가능하다고 되어있다. 또한, Inconel 713C측 HAZ에 발생한 고온근열을 HIP에 의해 소멸시키는 시도가 이루어져 왔다.⁷⁾

기계적 성질에 대해서는 Hastelloy X, Inconel 625, Inconel 800에 대해서 상온 및 고

은 인장 시험시의 연신을 및 단면수축율이 GTAW보다 EBW쪽이 우수하다는 것이 증명되고 있다. 또한, 고온저Cycle 피로특성에 대해서는 EBW의 쪽이 GTAW보다 양호하다. ²⁾Hastelloy XR의 전자Beam 용접이음부는 900° C까지 거의 모재와 대등한 값을 얻을 수 있다. ²²⁾ 또한, Inconel 718의 전자 beam 용접이음부의 피로특성에 대해서도 검토가 이루어져 있다. ²³⁾

소결합금 EBX에 대해서는 기공을 방지하기 위해 Gas 성분을 1 ppm 이하로 할 필요가 있다. ¹⁶⁾ EBW는 Jet Engine의 compressor spool이나 Turbine vane 등의 용접이나 Rocket Engine의 용접 ²⁴⁾ 등에도 사용되고 있다.

(2) Laser beam 용접법

Laser는 고에너지 밀도 특성, 지향성, 단색성 등 우수한 성능을 갖고 있으므로, 용접 열원으로서 널리 사용되고 있다. Laser 발생장치는 여러가지 있으나, 대출력의 연속 Laser가 얻을 수 있는 이점으로 부터 탄산Gas 용접이 주요한 용접 Laser 발생장치로서 사용되고 있다. Laser beam은 전자 beam과 같이, 통상의 Arc와 비교하여, Energy 밀도가 높고(100Kw/cm² 혹은 그이상), beam폭이 좁고 비교적 용입깊이가 깊은 용접이 가능하다. 또한, beam의 제어성도 극히 양호하다. 이 때문에 생산성이 높아, 비교적 박판의 분야에서는 EBW에 차지하고 있는 부분에 대해서 대신할 수 있을 것으로 예상된다. ²⁵⁾

LBW가 초내열합금에 적용된 예는 다음과 같다. 즉, Hastelloy X에 대해서는 용접 parameter가 bead 단면형태에 미치는 영향에 관해서 조사되어 있다. ²⁶⁾ 그림3)은 그결과와 일부분이고, 초점위치와 bead 단면형태와의 대응관계를 나타내고 있다. 또, 그림4²⁶⁾는 bead 앞 뒷면의 bead 폭과 용접속도의 관계이다. 그이외에 Hastelloy X에 대해서는 Laser beam에 의한 Spot 용접이 연구되어져 있다. ²⁷⁾

MA956에 대해서도 YAG Laser 에 의한 pulse 용접이 시도되고 있고, Y₂O₃ 입자는 약간 조대한 것이 slag로서 제거되어 있는 것이 확인되고 있다. ²⁸⁾

pulse 용접법을 이용한 초내열합금의 Laser 용접성의 시험법이 제안되어, 그 실험결과에 의하면 Hastelloy B₂ < Hastelloy S < Hastelloy C₄ < Inconel 625 < Inconel 718 < Hastelloy X 의 순으로 용접근열 감수성이 높은 것을 나타내고 있고 있다. ²⁹⁾

LBW를 NC로 제어하는 것에 의해 생산성이 높고 정밀용접이 가능한 LBW는 Gas Turbine 등의 용접법에 널리 활용될 전망이다. ¹⁾ ³¹⁾ 그이외에 Laser beam은 Turbine blade 등의 정밀육성 열원으로서도 기대되고 있다. ³⁰⁾

(3) 용접근열

Ni기, Co기, Fe기, 어떤 초내열 합금을 대상으로 용접법을 적용한 경우의 문제점은 용접근열이 문제점으로 대두된다. 그림5는 Ni기 초내열합금의 용접근열 감수성에 대해서 정성적으로 조사한 결과이다. (Al+0.8Ti)X의 증가와 더불어 용접근열이 발생하기 쉽다.

초내열합금의 용접근열으로는 용접시공 시에 발생하는 응고근열, 액화근열과 용접후열처리(PWHT)시 재열근열로 분류된다.

그림6³¹⁾은 응고근열을 모식적으로 표시한 그림이고, 주상점의 성장과 더불어 잔류응력 등의 용접원소의 농화가 진행하여 응고의 최종단계에서 수축응력이 주상점에 형성된 저응점의 액막에 작용하기 때문에 응고근열이 발생하는 것으로 생각되어 지고 있다.

근열 감수성이 높은 C-276에서는 dendrite의 경계에 P 및 μ상이 또는 C-22에서는 σ, P, μ상이 형성되어 있고, 이들의 TCP상과 근열감수성이 거론되고 있다³²⁾. 또, TCP상의 생성을 PHACOMP법으로서 예측하고 있다. ³³⁾ Alloy 800에서 P함유량을 7ppm이하로 하면 응고근열을 방지할 수 있다. ³⁴⁾ Ni기 초내열합금의 응고근열 감수성이 검토되어, 합금원소와 응고근열 감수성과의 관계를 표시하는 다음식이 제안되고 있다. ³⁵⁾

$$P_{ec} = 69.2Ti + 27.3Nb + 9.70Mo + 300Si - 55.3 \quad (1)$$

그림7³⁶⁾은 액화근열의 기구를 표시하는 모식도이다. 액화근열은 HAZ의 결정입계에서 발생하지만, 석출물이나 개재물의 극부용해와 더불어 입계액화 혹은 불순물의 원소의 입계편석에 의한 입계액화에 기인한 근열이라고 생각되고 있다. 응고근열은 적절한 용가재료를 선정하는 것에 의해 근열방지를 도모할 수 있으므로, HAZ의 액화근열의 쪽이 보다 중요하다.

액화근열의 기구에 대해서는 Inconel 718을 주로 대상 재료로서 다수 연구되어 있다. 그림8은 Inconel 718의 액화근열의 발생기구를 표시하는 모식도이고, NbC의 극부용융과 더불어 입계가 액화하여 액화입계에 수축 Strain이 작용하여 액화근열이 발생하는 것으로

생각되어지고 있다. 그리고, 입경이 크게되면 그림9³⁷⁾ 표시하는 것처럼 액화근열 감수성은 증대하지만, 그것은 단위체적당의 입계면적이 감소하는 결과, 액막이 크게 찢어지는 입계면적이 증가하는 것과 입계3중점의 응력집중도가 증가하는 것에 의한 것으로 생각되어지고 있다. 그이외에 입계의 B의 편석이나 불순물의 편석³⁸⁾ 액화근열의 원인으로 되고 있다.

Hastelloy X에 대해서는 M_6C ⁴⁰⁾, Inconel 625에서는 NbC⁴⁰⁾⁴¹⁾, Waspaloy에서는 TiC의 극부용해에 의해 액화근열이 발생하는 것으로 생각되어지고 있다. Alloy 800에서도 TiC의 극부용용⁴²⁾이나 Si의 입계편석⁴³⁾에 의한 액화근열의 기구가 제안되어 있다. 액화근열의 감수성과 합금원소와의 관계에 대해서 다음과 같은 식으로 표시되고 있다.³⁵⁾

$$P_L = 48.0C + 2.83Mo + 19.7Ti + 8.93Nb + 27.2 \quad (2)$$

재열근열에 대해서는 Rene 41을 중심으로 하여 다수의 연구³⁶⁾되어 있고 다음의 사항이 명확히 되어 있다. (1). 용접잔류응력, 열응력, γ' 상의 석출에 의한 수축응력을 완화하는 과정에서 발생하는 소성변형률보다도 합금의 소성변형률이 작은 경우에 재열근열은 발생한다. (2). 합금의 소성변형률은 석출물이나 개재물의 극부용용과 더불어 입계액화, 결정립의 조대화, γ' 상에 의한 입내강화 더우기 S 등의 불순물 원소의 입계편석이나 산소에 의한 입계취화 등에 의해 저하한다.⁴⁴⁾⁴⁵⁾ (3). 화학성분적으로는 Ti 등의 γ' 상석출촉진원소나 입계취화화를 주원인으로하는 S량이 많을수록 재열근열 발생이 쉽다.⁴⁴⁾ (4) 재열근열방지하는 데에는 γ' 상석출영역을 급열하는 것, 결정립의 미세화를 도모하는 것, 최적량의 Ca이나 Mg를 첨가하는 것⁴⁴⁾⁴⁵⁾, 용접분위기나 PWHT중의 분위기 산소의 혼입을 억제하는 것⁴⁵⁾, 잔류응력을 저하시키는 것 등이 중요하다.

2.2 고상 접합법

결정제어합금, 입자 및 섬유분산강화합금 등에서는 용융용접을 적용하면 모재의 강도가 소실된다. 또한, 초내열합금을 용융용접하는 경우, 고강도의 합금 등 용접근열이 발생하기 쉽다. 이와같은 배경과 더불어 최근에는 모재를 용융시키지 않고 접합하는 방법이 많이 시도되어 왔다.

그림10⁴⁶⁾은 확산접합법, 액상확산접합법 및 Brazing법의 모식도이다. 그림에 표시하는 것처럼 확산접합법에는 모재를 직접접합하는 법과 적절한 I.M을 삽입하여 접합하는 방법이 있다. 액상확산접합법은 후술하는 것처럼 접합온도에서 접합계면에 액상이 일시적으로 액막이 형성되어, 용접저하원소(B,P등)가 액막으로부터 모재속으로 확산하는 것과 더불어 등은응고가 진행하여 접합이 이루어지는 방법이다. 이 경우에는 Brazing법에서 보이는 취약한 금속간화합물의 형성을 방지할 수 있으므로 높은 접합이음효율을 기대할 수가 있다.

(1) 확산 접합법

확산접합은 Hastelloy X⁴⁷⁾, Inconel 718⁴⁸⁾, Udimet 700¹⁶⁾ Ni기 합금과 Hayness Alloy NO.188⁴⁹⁾ Co기 합금, A-286⁴⁷⁾ Fe기 합금에서, 또한, 이종합금에서는 Hastelloy X+Mo⁵⁰⁾, MA6000+Udimet 700⁵¹⁾, Stellite+Ti⁴⁹⁾, Stellite+13Cr강⁴⁹⁾, Stellite+연강⁴⁹⁾ 등에 대해서 검토되어 있다. Hastelloy X에 대해서는 직접접합 및 Insert Metal로서 Ni를 사용한 어떤 경우에도 1100° C에서 접합하면 거의 모재와 같은 강도를 얻을 수 있지만 815° C의 Creep Rupture 시험결과에서는 그림11에 표시하는 것처럼 모재보다 약간 낮다.⁴⁷⁾

Hastelloy X와 Mo의 이종접합의 경우, 1200° C×1 min+950° C×30 min의 접합조건에서 Ni를 Insert Metal로 사용하는 것에 의해 비교적 양호한 인장강도를 얻을 수 있다⁵⁰⁾. MA6000+Udimet700의 이종접합의 경우 그림12⁵¹⁾ 표시하는 것처럼 양호한 Creep Rupture 특성을 얻을 수가 없었다.

최근, HIP에 의한 확산접합기술이 각광을 받고 있다. 그림13⁵²⁾은 HIP에 의한 소형의 Turbine의 제조과정을 모식적으로 표시된 그림이지만 일방향 응고 혹은 단결정 blade(a)을 Ring(b)에 장착하여 Brazing으로서 Shield한다.(c) 그후 Ring 내면을 절삭하여 다시 Brazing에 의해 Shield한다. 그후 HIP처리(g)를 행하여 고성능 Turbine을 제작하려고 하고 있다. 예를 들면, Turbine Blade재로서 MarM-246, Turbine Disk재로서 PA101이 사용되어, Turbine이 제조되고 있다.⁵²⁾ SNCH630+Inconel 718의 이종접합도 HIP으로 시도되고 있다. 1000Kg/cm²의 압력으로 1200° C×2hr의 확산접합처리에 의해 Inconel718과 동등의 접합강도가 얻어지고 있다⁵³⁾. 그림14⁵⁴⁾는 확산접합기구를 모식적으로 표시한 그림이다. 그림에서 나타난 것처럼 (1) 항복 및 Creep변형에 의해 접합부에서 밀착면적이 증가하는 단계 (2) 입계 및 표면확산이 주체가 되어 공동의 축소 및 접합경계의 이동이 시작되

는 단계 (3) 체확산이 주체가 되어 공동이 소멸하는 단계의 3단계를 걸쳐서 접합이 이루어지는 것으로 생각되고 있다. 그림15⁵⁵⁾는 공동의 소멸기구의 모식도이다. 즉, (4)공동의 표면상의 Source로부터 곡률반경이 작은 Neck부로의 표면 및 체확산에 의해 공동이 축소하는 기구(a) (5) 접합계면 상의 Source로부터 Neck부로의 계면 및 체확산에 의해 공동이 수축하는 기구(b), (6) 항복 Creep에 의한 ridge의 변형에 의해 축소하는 기구이다.

Al, Ti등의 활성금속원소를 많이 포함한 Ni기초내열합금에서는 접합계면에 $Al_2O_3, TiO_2, Ti(C,N), NiTiO_3$ 등이 형성되기 때문에, 접합계면의 이동이 저지되어, 확산접합성이 저해된다. 이와같은 경우에는 금속막이나 도금막등이 Insert Metal로서 활용된다. 이 이외에도 Ion Sputtering등에 의한 청정화, 접합분위기의 고진공화도 접합이음부의 효율의 향상에 기여하는 것으로 생각된다.

(2) 액상확산접합법

액상확산접합법은 Brazing과 거의 같은 방법으로 접합이 가능함에도 불구하고, 통상의 확산접합법과 비교하여 피접합면의 고정밀인 연삭가공을 필요로하지 않고, 거의 모재에 필적하는 기계적 성질 및 내식성이 기대되는 것으로부터 최근, 정밀한 면접합이 가능한 접합법으로서 각광을 받고 있다.

액상확산접합 과정에 있어서는 (1)용융한 Insert Metal과 모재가 반응하는 과정 (2) 일정 온도에서 유지중에 등은 응고가 진행되는 과정 (3)상호확산에 의해 접합부와 모재 사이에 성분의 균일화가 진행되는 과정의 3과정이 중요한 과정이다. (1)과정에 관해서는 Ni기초내열주조합금인 MM 007을 사용하여 검토되어 있고, 액상 Insert Metal과 모재와의 반응은 그림16⁷⁾에 표시하는 것처럼 Nernst-Brunner 식(3)에 따르는 것은 명확히 되어 있다.

$$n = n_0 [1 - \exp(-K(A/V)t)] \quad (3)$$

그림16의 용융 Parameter P는 (3)식에 의해 (4)식과 같이 주어진다.

$$Kt = h[\ln\{X_s(X+ph)/ph(X_s-X)\}] = P \quad (4)$$

여기서 2h:액상의 초기폭, X_s :모재의 평형용융폭, X:t초 후의 모재의 용융폭,

$\rho: \rho_1/\rho_s$, ρ_1 :액상의 밀도, ρ_s :고상의 밀도이다.

(2)의 과정에 대해서도 이론적인 검토가 이루어져 있고⁵⁷⁾, 응점저하원소가 모재측으로부터 확산과정이 등은응고의 연속단계로 된다는 것을 확인하고 있다.⁵⁸⁾⁵⁹⁾ 또한, 등은 응고과정단계에 있어서 고액계면으로부터 고상의 성장에 대해서도 검토되어, 모재측으로부터 Epitaxial로 고상이 성장하는 것이 나타났다. 균일화 과정에 대해서도 이론적인 검토가 되어 있다.⁵⁸⁾⁵⁹⁾

각종 초내열합금의 액상확산접합의 적용예를 다음에 표시한다. 즉, Hastelloy X⁶⁰⁾, Inconel X-750⁶⁰⁾, Udimet500⁶⁰⁾, Inconel713C⁶¹⁾⁶²⁾, IN738LC⁶³⁾, TM-49⁶⁴⁾, Mar-M247⁶⁴⁾, IN-100⁶⁵⁾, MM007⁶⁴⁾, MA754⁶⁶⁾등의 합금으로 액상확산접합이 시도되어져 비교적 양호한 고온인장 성질이나 Creep Rupture특성이 얻어지고 있다.그 일예를 그림17에 나타낸다. 접합과정으로부터 생각하면 Insert Metal의 역할은 아주 중요하다.Insert Metal의 형태로서는 (1) 분말 (2) 분말 sheet (3)막대 (4) Amorphous⁵⁷⁾ (5)피접합면의 Insert Metal과⁶³⁾(봉화처리, Ion증착등)등이 있다. 본접합법은 이미 JT8D나 JT9D의 Jet Engine의 정익, 극산시작 Engine인 FJR의 정익, F-100 Engine의 동익 등에 적용되고 있다. 사진1은 FJR Engine의 정익의 실용예이다.

3. 결론

초내열합금의 용접, 접합기술의 고성능화, 고정도화, 고생산화과는 시대의 요청이 있고, 금후도 개발이 예의 주시되고 있다고 생각된다. 특히, 확산접합, 액상확산접합기술의 확립 및 그 활용은 극히 중요하다. 이들의 기술개발을 도모하기 위하여는 그 기초가 되는 접합기구의 상세한 해명이나 접합표면 및 계면의 제어이론의 확립, Insert Metal의 최적 설계수법의 확립등을 향해서 일층 노력이 요구되고 있는 실정이다.

参 考 文 献

- 1) 岡義宜, 石川島播磨重工業株, 私信
- 2) 清水茂樹, 原子炉用耐熱合金の電子ビーム溶接に関する基礎的研究, 大阪大学学位請求論文, (1977)
- 3) S. Shimizu et al.; Nuclear Technology, 66 (1984), 44
- 4) 長渡甲太郎他; 川崎重工技報, 91 (1986) P 32
- 5) 清水茂樹他; 材料, 32 (1983)
- 6) 喜多久直他; 溶接学会全国大会講演概要, 27 (1980) P 302
- 7) 須清修造他; 同上, 25 (1978) P 240
- 8) 籾戸口英善他; 溶接学会誌, 51 (1982) P 21
- 9) 荒田吉明他; 溶接学会全国大会講演概要, 30 (1982) P 18
- 10) A. C. Nunes, Microfissuring during Electron Beam Welding of Inconel 718, Report NASA-TM-82531, (1983)
- 11) J. Fukakura et al. ; J. of Testing and Evaluation, 14 (1986) P 7
- 12) W. B. Busch et al. ; Investigations on Laser and Electron Beam Welded Joints of Nickel-Base Alloys, 3rd International Colloquium on Welding and Melting by Electrons and Laser Beam, 5-9 Sept, Lyon France, (1983)
- 13) B. Jahnke ; Weld. J, 61 (1982) P 343 s
- 14) C. Tauschitz et al.; Z. Metallkd, 73 (1982) P 717
- 15) E. K. Tschegg et al. ; Metall. Trans A, 13 (1982) P 1483
- 16) R. Adam et al. ; Welding of PM-Superallloys, Proceedings on High Temperatures for Gas Turbines, Liege, Belgium, 4-6 Oct., (1982)
- 17) R. Thamburaj et al. ; Electron Beam Welding of Powder Metallurgy Nickel-base Superalloys, Proceedings on Powder Metallurgy Superalloys-Aerospace Materials for the 1980's, 18-20, Nov., Zurich Switzerland, (1980)
- 18) 長渡甲太郎他; 川崎重工工業技報, 87 (1985) P 27
- 19) " " " " 87 (1985) P 47
- 20) M. H. Haafkens et al.; Weld. Jo, 61 (1982) P 25
- 21) P. Adam; Welding High-Strength Gas Turbine Alloys, Proceedings of a conference on High Temperature Alloys for Gas Turbines, Liege, Belgium, 25-27 Sept., (1978)
- 22) 長渡甲太郎他; 川崎重工工業技報, 91 (1986) P 32
- 23) J. Fukakura et al. ; J. of Testing and Evaluation, 14 (1986) P 7
- 24) G. Holmqvist; Investigation of Electron Beam Welding in Haynes 25 for Combustion Chambers for Rockets, Proceedings on the Effects of Residual Impurity and Micro-Alloying Elements on Weldability and Weld Properties, 15-17 Nov., London, (1983)
- 25) A. Davin et al. ; Making Defect Free Welds in High Temperature Materials, Proceedings of Conference on High Temperature Alloys for Gas Turbines, Liege, Belgium, 25-27 Sept., (1978)
- 26) J. Com-Nouque et al.; Nickel Alloy Welding with a 5Kw Co: Laser : Influence of the Processing Parameters on the Weld Properties , 3rd International Colloquium on Welding and Melting by Electrons and Laser Beam, 5-9 Sept., Lyon, France (1983)
- 27) M. Bazan et al. ; Weld. J, 64 (1985) P 27
- 28) T. J. Kelly ; Pulsed YAG Laser Welding of ODS Alloys, Proceedings on Applications of Lasers in Materials Processing, 18-20 Apr., Washinton DC, U.S.A. (1979)
- 29) L. A. Weeter et al. ; Weld. J., 65 (1986) P 51 s

- 30) R. M. Macintyre ; Laser Hardfacing of Gas Turbine Blade Shroud Interlocks, Proceedings on Lasers in Manufacturing, 1-3 Nov., Brighton, UK, (1983)
- 31) T. Atsuta et al. ; The Application of Laser and Electron Beam to the Manufacturing of Gas Turbine and Steam Turbine Engine Components, Proceedings of Laser Advanced Materials Processing, May., Osaka, Japan, (1987)
- 32) M. J. Cieslak et al. ; Metall. Trans. A, 17 A (1986) P 2035
- 33) M. J. Cieslak et al. ; Metall. Trans. A, 17 A (1986) P 2107
- 34) 青木正弘他 ; Incoloy 800合金の溶接高温割れに関する検討, 日本溶接協会耐熱材料溶接小委資料, SWR-59-14, (1984)
- 35) 中尾嘉邦他 ; Ni基超耐熱合金の高温割れに関する研究, 日本溶接協会耐熱材料溶接小委資料, SWR-60-3, (1985)
- 36) R. Thamburaj et al. ; Inter. Metals Reviews, 28 (1983) P 1
- 37) R. G. Thompson et al. ; Weld. J., 64 (1985) P 91 s
- 38) R. Vincent ; Acta Metall., 33 (1985) P 1205
- 39) R. G. Thompson et al. ; Weld. J., 65 (1986) P 299 s
- 40) 中尾嘉邦他 ; 溶接学会全国大会講演概要, 39 (1986),
- 41) R. A. Patterson et al. ; Weld. J., 66 (1987) P 19 s
- 42) J. C. Lippold ; Weld. J., 62 (1983) P 1 s
- 43) J. C. Lippold ; Weld. J., 63 (1984) P 91 s
- 44) 井川博, 中尾嘉邦 ; 学振123委研究報告, 19 (1978) P 59
- 45) 中尾嘉邦 ; 溶接学会論文集, 3 (1985) P 808
- 46) '接合技術動向調査', (財)次世代金属・複合材料研究開発協会, (1984) P 319
- 47) 田村博他 ; 溶接学会誌, 47 (1978) P 230
- 48) W. T. Chandler et al. ; Superplastic Forming and Diffusion Bonding of Inconel 718, AIAA/SAE/ASME, 18th Joint Propulsion Conference, AIAA-82-1249, June 21-23, Cleveland, Ohio, U.S.A., (1982)
- 49) 'Application of Diffusion Joining in Industries in Japan', The Interface Joining Research Committee, Japan Welding Society, IIW Doc. IA-337-86-OE, (1986)
- 50) 圓城敏男他 ; 溶接学会誌, 46 (1977) P 660
- 51) T. J. Moore et al. ; Weld. J., 64 (1985) P 219 s
- 52) R. Thamburaj et al. ; Joining Techniques for P/M Superalloys, Powder Metallurgy of Superalloys, pub. Sevenoaks kent TN158 PH, UK, (1984) P 295
- 53) 渋谷純市他 ; HIPによる拡散接合, 第5回界面接合研究委員会資料, (1986)
- 54) W. A. Owczarski et al. ; 60 (1981) P 22
- 55) B. Derby et al. ; Metal Science, 61 (1982) P 49
- 56) J. W. Dini ; Weld. J., 61 (1982) P 33
- 57) Y. Nakao et al. ; Transient Liquid Insert Metal Diffusion Bonding of Ni-Base Cast Superalloy, MM007, IIW Doc. IA-334-86-OE, (1986)
- 58) H. Ikawa, Y. Nakao et al. ; Trans. Japan Welding Society, 10 (1979) P 24
- 59) 鈴木暁男他 ; 溶接学会全国大会講演概要, 35 (1984) P 4
- 60) 鈴木暁男他 ; 溶接学会誌, 49 (1980) P 462
- 61) 鈴木暁男 ; 液相拡散接合性及びぼインサート金属のアモルファス化の効果, 溶接冶金研究委員会資料 WM-945-83, (1983)
- 62) 坂本昭他 ; 溶接学会全国大会講演概要, 26 (1980) P 178
- 63) 舟本孝雄 ; Ni基超合金の拡散接合, 特殊材料溶接研究委員会資料, SWR-59-18, (1984)
- 64) 大橋修 ; 溶接学会誌, 51 (1982) P 69
- 65) P. Sellers et al. ; New Approaches to Turbine Airfoil Cooling and Manufacturing, AIAA/SAE 13th Propulsion Conference, July 11-13, Orlando, Florida, U.S.A., (1977)
- 66) 森本庄吾他 ; 学振123委研究報告, 27 (1986) P 255

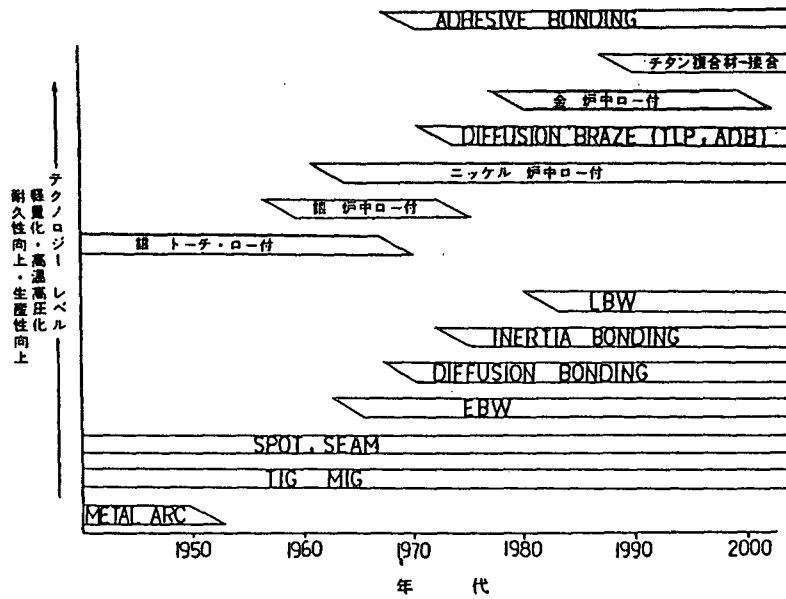


그림 1 Jet Engine의 용접, 접합기술의 추이

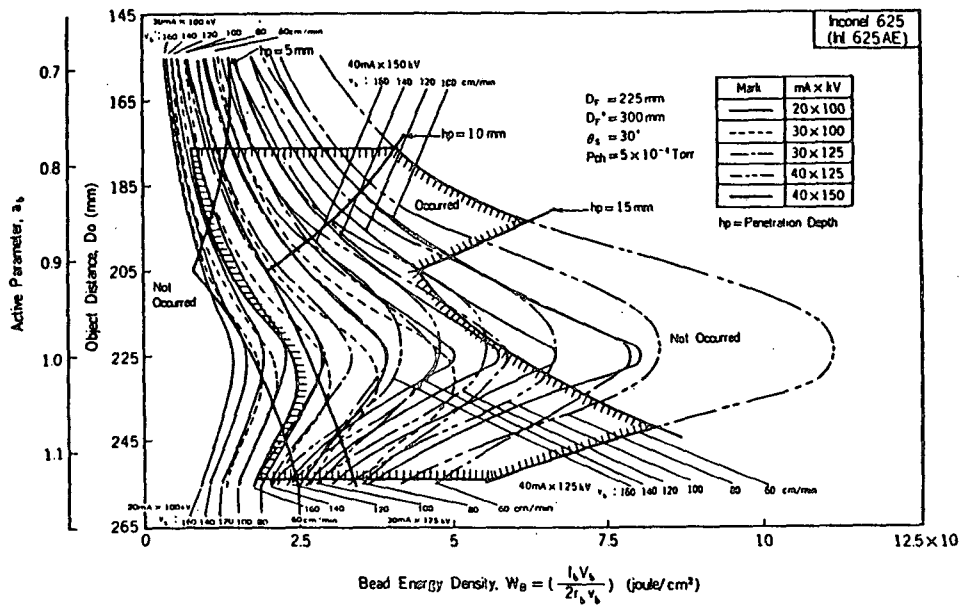


그림 2. Inconel 625의 R Porosity의 발생에 미치는 전자 beam energy 밀도 및 bead 완성 Parameter의 영향

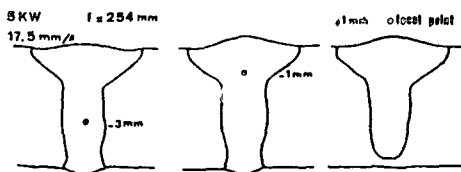


그림 3 Hastelloy X의 bead 형태에 미치는 Laser beam의 초점위치의 영향

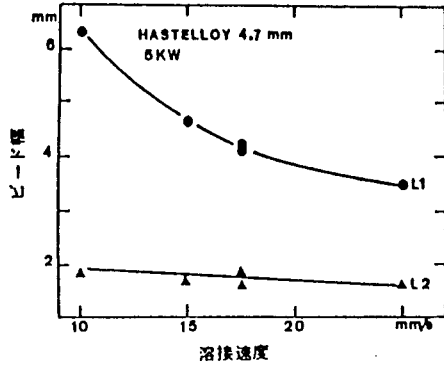


그림 4 Hastelloy X의 내외 bead 폭에 미치는 Laser 용접속도의 영향
L1: 외측폭 L2: 내측폭

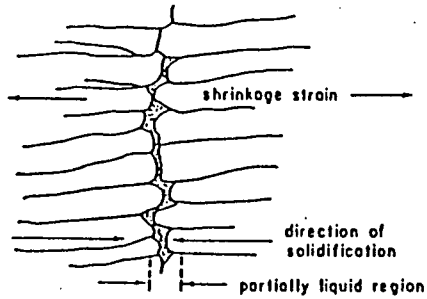


그림 6 용고근열의 모식도

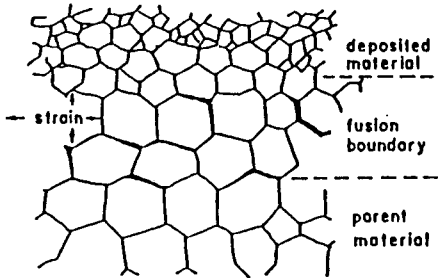


그림 7 액화근열의 모식도

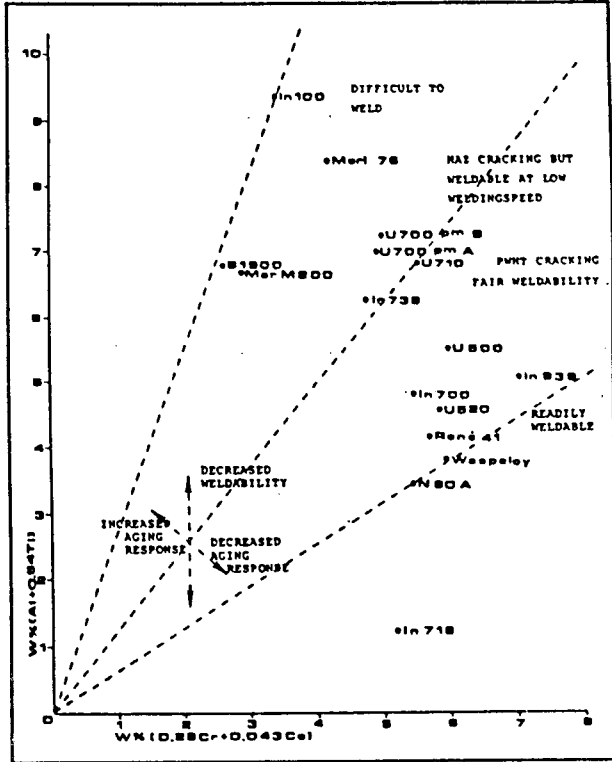


그림 5 Ni기 초내열합금의 용접성

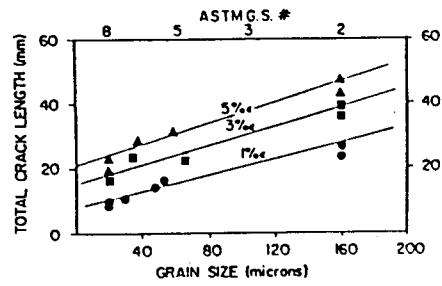


그림 9 Inconel 718의 액화근열의 감수성에 미치는 결정입경의 영향

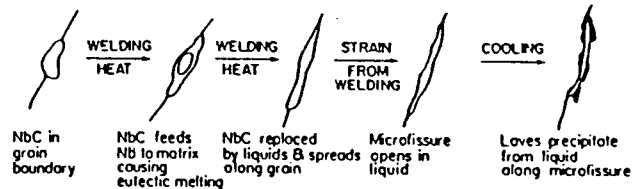


그림 8 Inconel 718의 액화근열의 발생기구를 나타내는 모식도

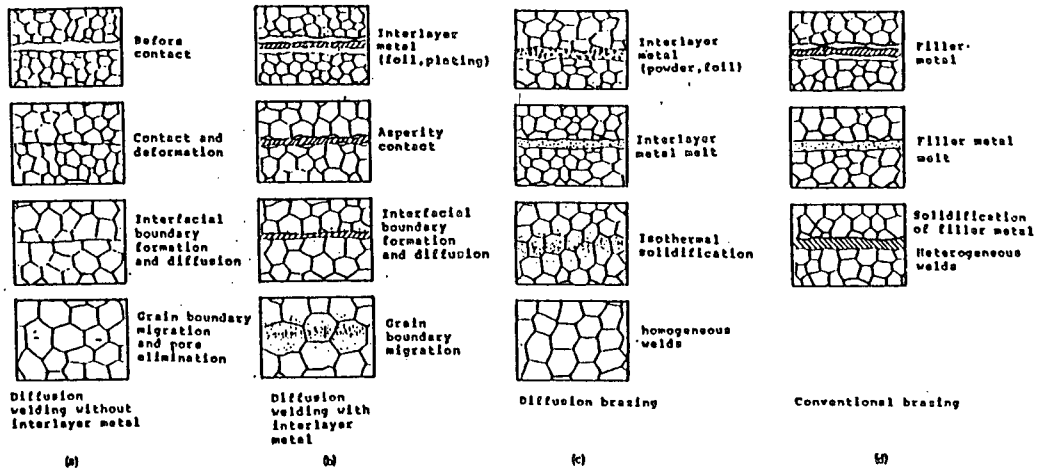


그림 10 확산접합, 액상확산접합, Brazing의 접합과정을 나타내는 모식도

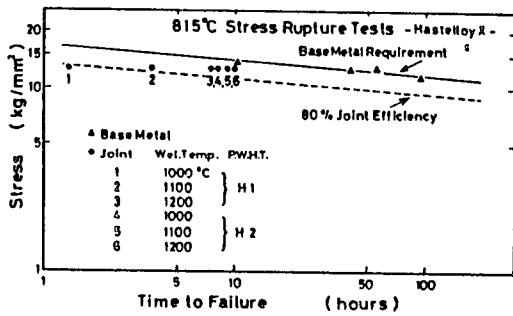


그림 11 Hastelloy X 확산접합 이음부의 815°C에서 Creep Rupture의 특성

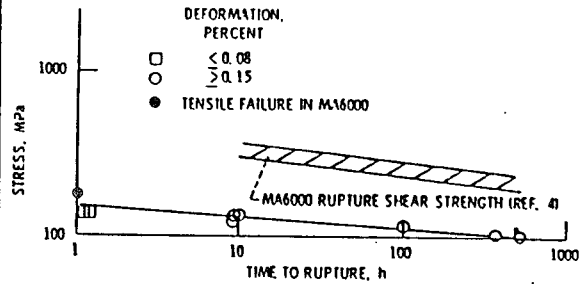


그림 12 MA 6000과 Udimet 700 이재확산접합 이음부의 760°C에서 Creep Rupture의 특성

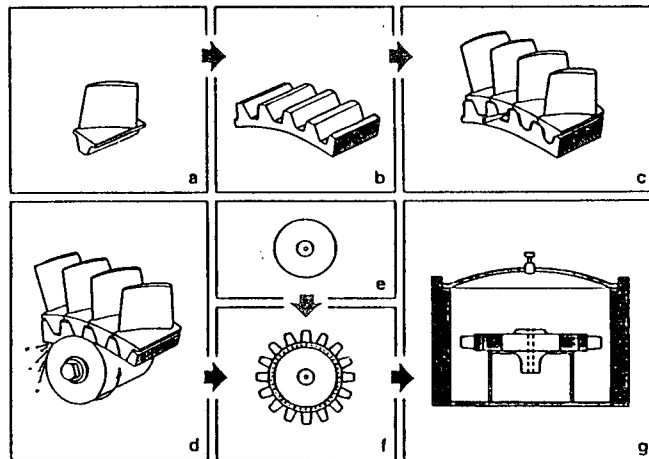


그림 13 Gas Turbine의 제조공정을 나타내는 모식도

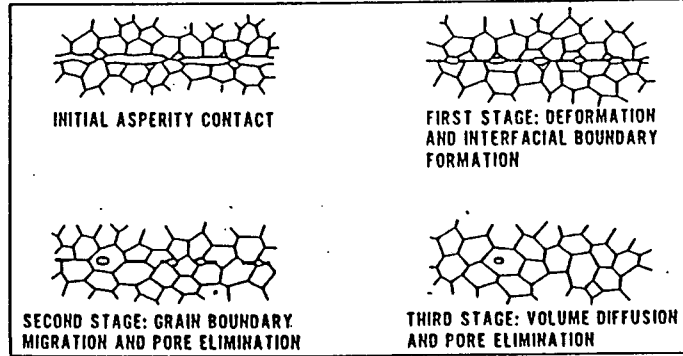


그림 14 확산접합기구의 모식도

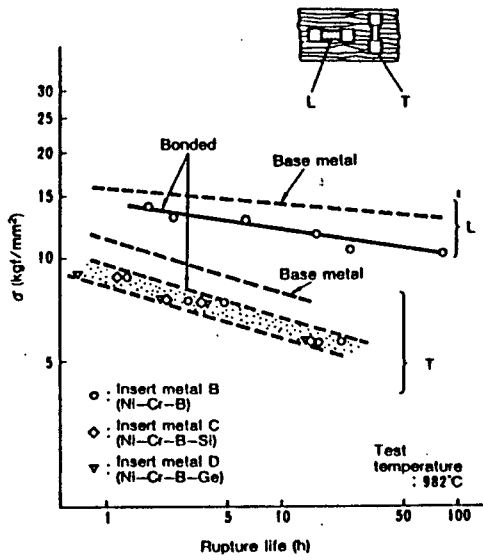


그림 17 MA 754의 역상확산접합 이음부의 Creep Rupture 특성

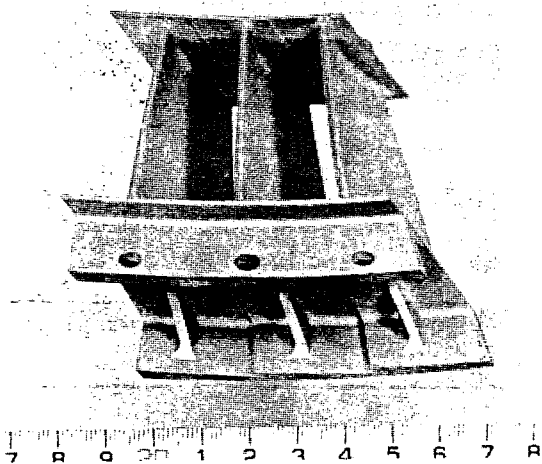


사진 1 역상확산접합법의 FJR Jet Engine 그림 16 MM 007의 용융 Parameter와 시간의 영향 정의(Alloy 713C)에의 용융에

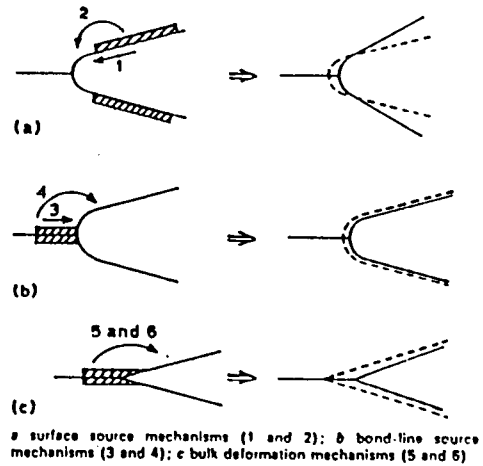


그림 15 공동의 소멸기구의 모식도

