

## 항공우주 산업에서 전자빔 용접

- 이종재료 용접을 중심으로 -

김 숙 환 · 권 영 각 · 김 대 업

### Electron Beam Welding in the Aerospace Industry

- EBW of Dissimilar Materials -

Sook-Hwan Kim, Young-Gak Kweon and Dae-Up Kim

## 2. 이종재료 전자빔 적용특성과 용접부 설계

### 1. 서 언

항공우주산업은 수많은 기술분야로 이루어지는 시스템으로 재료 가공법만 해도 수많은 기술들이 복합적으로 적용되고 있으며 경량 고성능이 요구되는 매우 엄격한 조건에서 설계 제작된다는 점에서 용접부의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 특히 소재분야에서는 비강도가 크고 인성이 우수한 소재와 강도가 높고 내열성등이 우수한 소재를 단독으로 사용하기 보다는 복합화시키는 방법으로 가혹한 분위기에서도 탁월한 성능을 발휘하도록 설계 제작되고 있는 실정이다. 용접과 관계되는 소재들로서 Ti 합금이나 합금강, 내열강 및 내열 초합금등이 주요소재로 사용되고 있지만 소재의 경량화를 위하여 섬유강화 복합재료 등 특수소재의 사용량도 증가하고 있다<sup>1)</sup>.

그리고 항공우주산업에 적용되고 있는 용접부의 특징은 복잡한 형상의 얇은 rib를 가진 구조와 고정밀도 및 고품질을 요구하고 있다. 특히 용접성이 다른 여러 종류의 재료(조성, 형상, 단, 구조품등)와 용융 용접성이 나쁜 (Al+Ti) 함유량이 높은 니켈기 합금부품의 적용증가와 산화 및 질화하기 쉬운 티탄 합금등의 용접량이 증가하고 있다. 이러한 소재의 용접품질 향상을 위하여 전자빔 용접, 브레이징, 확산접합, 레이저 용접 및 용사를 적용하는 부품이 증가하고 있다. 따라서 본 해설에서는 이종재료 용접시 전자빔 적용특성과 용접부 설계 그리고 연소기용 소재로 사용되고 있는 박판의 이종재료 전자빔 용접에 관하여 실험한 결과를 소개하고자 한다.

### 2.1 전자빔 적용 특성

이종금속 또는 합금의 용융 용접 가능성은 물리적인 인자(용융점, 열전도도등)와 야금학적 요인(고용체 형성, 금속간 화합물 형성등)에 의하여 좌우된다. 즉, 금속의 용융점 혹은 열전도도가 큰 금속을 동시에 용접할 경우 일반 용접법과 같이 열전도에 의한 것이라면 용융 용접하는 것은 불가능하지만 전자빔 용접의 경우에는 가능하다. 왜냐하면 집중된 전자빔의 에너지 밀도가 충분히 클 뿐만아니라 전자빔이 금속의 표면에 고속으로 충돌하면서 발생하는 운동에너지가 열에너지로 변환되기 때문에 용융점 혹은 열전도도 차이가 있더라도 금속을 가열 용융시킬 수 있기 때문이다. 또한, 두 금속의 물리적인 특성차이가 아주 큰 경우는 물리적 성질의 차이를 극복하기 위하여 전자빔을 열전도가 큰 금속이나 용점이 높은 금속쪽으로 약간 치우쳐 전자빔을 처리할 수도 있어 일반 용접에서는 불가능한 금속의 용접도 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 두 종류의 이종금속을 용접할 수 있는가 없는가를 결정하는 것이 야금학적 인자이다. 왜냐하면 용접에 의한 제작이 가능하더라도 기계적 특성이 하중이 걸리는 부분에 사용할 수 없을 만큼 취약해서는 안되기 때문이다. 두 종류의 합금 및 금속의 조합에 있어서 취약한 금속간 화합물의 형성 여부 뿐만아니라 기계적 특성에 대한 정확한 이해가 필요하고 이러한 상들의 형성 역제를 위하여 세심한 주의를 기울이지 않으면 안된다. 그리고 여러가지 합금의 조합에 있어서 평형상태도의 이론적인 연구만으로 동종 및 이종의 용접 가능성에 대한 결론을 내리기는 힘들기 때문에 종합적인 연구가

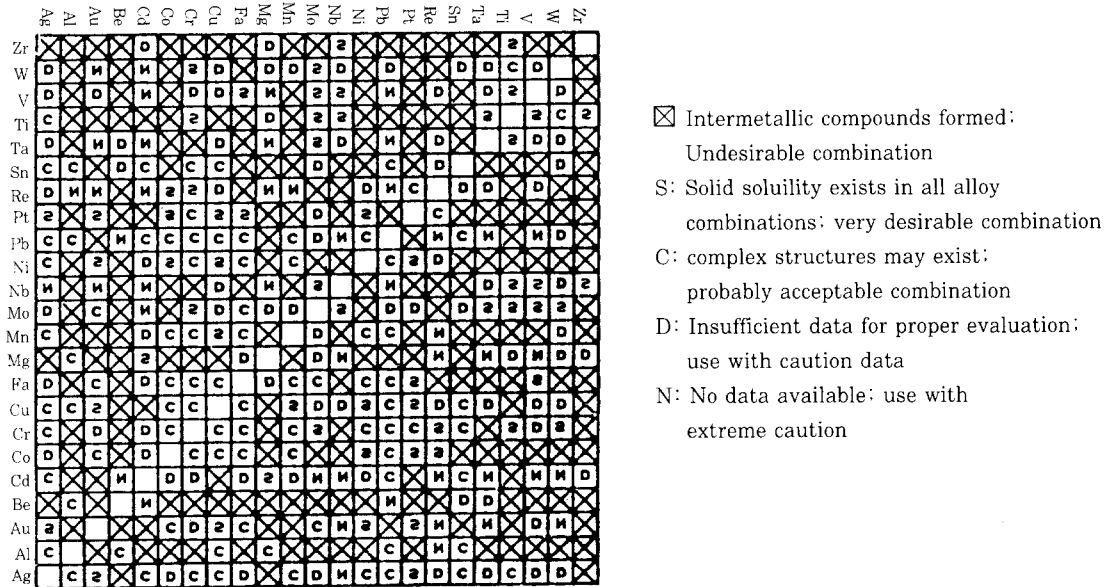


Fig. 1 Metal combinations for welding dissimilar metals

필요하지만 일반적으로 Fig. 1에 나타난 것을 참고로 하고 있다<sup>2)</sup>.

Fig. 1에서 바람직하지 않은 금속간 화합물이 존재하는 조합의 영역은 X로 표시하여 용접이 불가능을 나타내었고, 이것과 대조적으로 합금 조합의 모든 범위에 걸쳐서 고용체가 존재하는 영역은 S로 표시하여 용접성이 우수한 조합임을 나타내었다. 기타는 용접성이 나빠 주의가 필요하거나 자료가 불충분한 영역이다.

이종금속의 용접에서 취약한 금속간 화합물이 형성되는 조합에 전자빔 용접을 사용하면 용접부가 좁기 때문에 금속간 화합물의 양도 작게 되는 등의 여러 가지 잇점이 있어 일반 용접법에서 불가능한 조합도 용접할 수 있는 경우가 있다. 특히 전자빔을 여러 가지 방향으로 이동하여 용접할 수 있기 때문에 이종금속의 용융비를 조절하여 용접금속의 합금성분을 어느 정도 제어할 수 있어 용접성을 개선시킬 수 있다. 그러나 전자빔 용접부에 있어서 빔을 고속으로 회전시키거나 진동을 주어 용융금속을 교반시켜도 이종금속간에 물리화학적으로 균일한 용융영역을 만들어 내는 것은 간단하지 않다. 또한, 용접부에서 빔의 위치가 작게 변화하더라도 이종금속간 구성성분의 상대적인 비율에 상당한 영향을 미칠 뿐만 아니라 빔의 위치에 따라서 용접성도 크게 영향을 받기 때문에 주의가 필요하다. 그리고 이종금속의 전자빔 용접시 용접성을 향상시키기 위하여 두 금속 사이에 삽입금속을 넣는 경우가 있다. 이러한 경우 삽입금속의 두께는 용접성에 상당한 영향을 미치기 때문에 생성되는 합금의 성분에 따라 결정하는 것이 바람직하다. 특히, 용접이 불가능한 이종재료도

삽입금속의 적용으로 용접이 가능하기 때문에 특수분야에서 활발히 연구개발 되고 있다. 그리고 이종재료 용접시 문제점으로 대두되는 특성중의 하나가 열팽창계수의 차이에 의한 용접부 인장 잔류응력이다. 이러한 응력이 일정한 한계치를 넘으면 용접중이나 용접후 균열을 발생하여 용접이 불가능하게 되기 때문이다.

한 예로 Cu와 Co 합금의 용접부에서 측정된 잔류응력은 600°C, 2시간의 용접 후열처리에도 최고 14Ton/in<sup>2</sup>의 응력을 나타내었다. 또한, 동심원의 원주용접에서도 외측(인칭동)의 팽창이 내측(주철) 보다 상당히 클 때 두 부재사이에 gap이 발생하기 때문에 용입 과잉이나 언더 컷과 같은 용접결함의 원인이 될 뿐만 아니라 용접이 진행됨에 따라 gap은 크게 되기 때문에 빔이 두 재료 사이를 통과하게 되어 용접자체가 불가능하게 된다. 이러한 현상을 완화시키기 위해서는 용접전에 한쪽을 다른쪽에 대해서 수축시키거나 본 용접전에 용접부 gap이 발생하지 않도록 소입열의 전자빔으로 가접하는 것도 좋은 방법이다. 그리고 Inconel 600(Ni-Cr-Fe)과 고탄소강은 전자빔 용접시 큰 문제는 없지만 균열발생을 억제하기 위하여 용접후 진공실내에서 냉각속도를 느리게 하는 것이 좋다.

저합금강(0.2%C-0.6%Ni-0.5%Cr-0.2%Mo)과 Hastelloy X(Ni-Cr-Mo)합금은 전자빔 용접시 충분한 용입이 얻어지도록 조건을 설정하면 심한 언더 컷과 현저한 용락이 발생하여 많은 균열이 발생하고 용접부에 큰 기공이 형성되기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 이러한 용락의 문제점을 해결하고 건전한 용접부를 형성시키기 위해서는 hastelloy X의 backing

재를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 균열과 기공의 문제는 backing재나 빔의 초점위치를 제어하는 것만으로는 개선할 수 없기 때문에 삼입금속을 사용하는 것이 좋다. 즉, 오스테나이트 강(0.8mm)의 삼입금속을 강과 hastelloy X 사이에 끼워 사용하면 균열이 없는 양호한 용접부를 얻을 수 있지만 최적의 조건을 얻기 위해서는 용접 시작시  $5 \times 10^{-5}$  torr의 고진공도에서 용접하는 것이 이상적이다. 왜냐하면 용접시 hastelloy X의 방출가스 때문에 진공도가 용접중에  $1 \times 10^{-4}$  torr까지 상승하기 때문이다.

특히 Cu와 강의 이종재료 용접은 용점이  $310^{\circ}\text{C}$  이상의 차이가 있을 뿐만 아니라 열전도율과 조성에 큰 차이가 있지만 두께와 관계없이 상당히 양호한 전자빔 용접이 가능하다.

## 2.2 용접 설계 및 cleaning

사각의 단면을 가진 재료의 맞대기 용접은 전자빔 용접의 가장 기본적인 설계이고 상당히 실용적이면서도 유효한 형상이라고 말할 수 있다. 그러나 특수한 목적을 가진 경우에는 변형된 형태를 적용하기도 하지만 용접부는 다음과 같이 관리하는 것이 바람직하다.

- 1) 용접면의 조도는 다듬질 기호( $\nabla\nabla$ ) 이상으로 처리하는 것이 좋다.
- 2) 용접부의 허용 gap은 0.13mm 이하이지만 없는 것이 좋고 특히 박판의 경우 gap이 발생하지 않도록 주의해야 한다.
- 3) 다소간의 misalignment는 그다지 문제가 되지 않지만 어느 두께까지 용접되어야 실용상 문제가 없느냐가 제일 중요하다.

그리고 맞대기 용접의 대표적인 사례와 용접설계상의 특성을 살펴보면 Fig. 2의 (A)와 같은 맞대기 용접인 경우 가장 효과적인 용접방법으로 적용시 재질상의 문제는 없다. Fig. 2의 (B)형상은 용접 하부 검사가 필요없거나 기체가공할 수 없는 경우 또는 재질적으로 용접하부에 기공이 형성되기 쉬운 합금에서 기공발생 문제를 해결하기 위해 주로 적용된다. 특히 이러한 설계는 원통상 부품의 경우 중심을 맞추기 편리하기 때문에 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 용접부의 언더컷을 방지할 수 있다는 장점도 있다.

Fig. 2의 (C)는 균열을 일으키기 쉬운 재료에 유효하지만 시편가공비가 고가이기 때문에 항공, 우주관계의 고급용접에 주로 적용되고 균열의 전파를 방지할 수 있다는 장점이 있다. 이에 반해 Fig. 2의 (D)는 전자빔이 충돌하는 용접면이 기계 가공되어 있지 않다던

가 언더 컷이 발생하기 쉬운 경우에 사용할 수 있으며 용접선을 맞추기 편리하도록 표시선을 넣어주는 것이 좋으며 Ti에 이러한 방법이 널리 적용되고 있다. 또한 Mg의 원통 삼입형상의 경우에 이용되기도 한다.

Fig. 2의 (E)는 backing재를 대는 것이 불가능할 뿐만 아니라 피용접물의 두께가 다르고 두꺼운 쪽의 재료에 전자빔에 의한 손상을 주어서도 안되는 경우에 주로 사용되며 특히 주의해야 할 사항은 다음과 같다.

- 1) 용접면에서 빔이 벗어나지 않도록 빔을 약간 크게 한다.
- 2) 빔의 경사각도는 용접범위에서 빔이 벗어나지 않는 각도로 하는 것이 중요하다. 그리고 두꺼운 쪽의 재료가 손상 받을 염려가 있는 경우 필요이상 각도를 크게 하여 상부는 용접이 되어 있지만 하부가 용접선에서 빔이 벗어나 미용용부가 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다.

3) 이상의 문제는 9.5mm 이하의 재료에서는 그다지 중요하지 않지만 13mm 이상으로 두꺼워지게 되면 용접결합을 형성하기 쉽기 때문에 충분히 고려하여 용접부를 설계 하지 않으면 안된다.

Fig. 2의 (F)는 원통상의 맞대기 용접에서 가장 대표적으로 적용되는 형상으로 축의 중심이 서로 어긋나지 않도록 조합시 세심한 주의가 필요하고 지그가 상당히 중요하다. 축이 어긋나는 것을 방지하기 위하여 먼저 작은 출력으로 가접후 완전 용입조건으로 용접하는 것이 바람직하다.

Fig. 2의 (G)와 같은 경우 항상 축이 문제가 되고 중심까지 용입시키면 중심에서는 용접속도가 zero로 되어 기공이 발생할 가능성이 높기 때문에 보통 중심 이상의 용입 깊이로 용접하지 않으면 안 된다.

Fig. 2의 (H)와 같이 한쪽 부품의 중앙에 구멍이 있고 다른 부품과의 용접시 구멍이 막혀버리는 경우 개스의 탈출구가 없어 기공발생의 원인이 되기 때문에 외부와 통할 수 있도록 용접부를 설계하는 것이 바람직하다.

Fig. 2의 (I) a와 같은 T형 용접은 전자빔이 용접선에 접근할 수 없는 경우에 적용할 수 있는데 빔의 크기, 용입깊이 및 용접횟수등의 설계는 용접강도의 요구조건에 따라 결정하는 것이 좋다. Fig. 2의 (I) b와 같이 용접부에 빔을 직접 가할 수 있는 경우에는 b의 방법이 가장 이상적이고 관통용접에 의해 강도를 향상시킬 수 있지만 용접단면이 큰 경우에는 c와 같이 양측에서 용접하는 것이 바람직하다.

Fig. 2의 (J)와 같은 용접은 hematic seal이 필요한 부품에 주로 적용되고 있으며 이러한 형상의 용접

에는 작은 궤위로 약간 defocusing 시켜 용접하든가 빔을 편향해서 용접하면 양호한 용접부를 얻을 수 있다.

Fig. 2의 (K)와 같은 lap 용접은 아주 일반적으로 사용되는 방법으로 두께가 0.1mm이하 판재의 경우 맞대기 용접에 비해 오히려 고정방법이 간단하여 가장 널리 사용되는 방법중의 하나이다. 그리고 빔을 작게 하여 defocusing 하기도 하고 용접 진행방향에 교차되도록 정현파로 편향하면 단위 길이당 접촉면적을 크게 할 수 있다. Fig. 2의 (L)과 같은 펠렛 용접은 일반적으로 두께 1.6mm 이하의 용접에 defocused beam이 적용되지만 경우에 따라서는 filler 와이어가 사용되기도 한다.

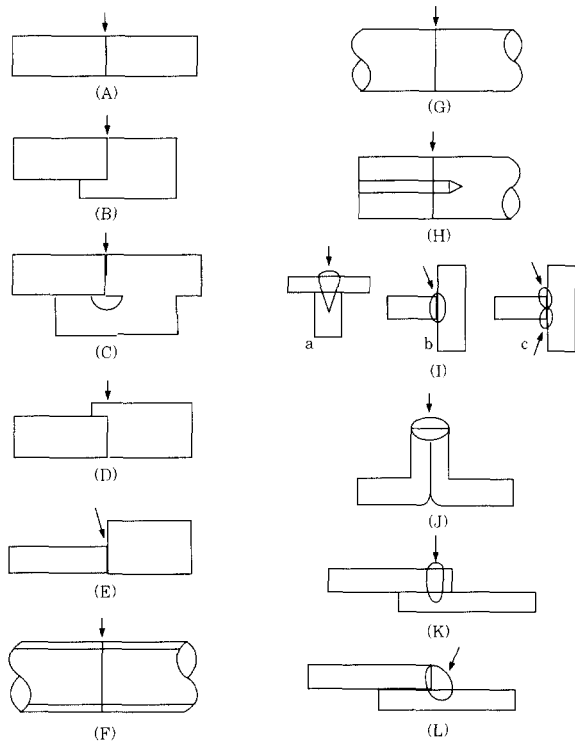


Fig. 2 Typical joint designs for electron beam welds

또한, 이종금속 용접중 특이하게 나타나는 현상중의 하나는 자기에 의한 빔 편향이다. 이것은 13mm 이상의 후물에서 잘 발생되는데<sup>3)</sup> 이는 열접점과 냉접점 사이에 전류가 흘러 이 전류에 의한 자계의 분력 때문에 전자빔이 편향되는 것이다. 이러한 현상은 구멍뚫린 자기 차단판을 설치하여 표류자계를 차단함으로써 방지할 수 있다. 용접시 피용접물의 cleaning은 용접부 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이를 소홀히 할 경우 기공이나 균열등이 발생하는 원인이 된다.

Cleaning에는 화학적인 것과 기계적인 것이 있지만 일반적으로 Trichloroethylene 세정이라든가 MEK(메틸에틸케톤)으로 충분하다. 기계적으로는 sand blast라든가 아주 미세한 emery 천이나 깨끗한 와이어 브러쉬로 처리하는 등의 방법이 있다. 주요 소

재에 대한 cleaning 방법을 간략히 정리하면 다음과 같다.

1) Fe기 합금

강: Trichloroethylene 탈지후 알콜 혹은 MEK로 처리  
주물: sand blast

내열합금: 질산과 불화수소 수용액에 침적후 수세  
석출 경화강: 질산과 불화수소 수용액에 침적후 수세  
단조강: 연삭이나 벨트 sand grinder등으로 산화막 제거.

2) Ni, Co기 합금: 내열강에 준하여 처리

3) Cu 합금: 질산 수용액에 침적후 수세

4) Al 합금: 상당히 강한 산화막이 형성되기 때문에 이를 충분히 제거하지 않으면 안된다. 이러한 산화막이 있는 상태로 용접하면 기공발생의 원인이 되기 때문에 탈지후 질산으로 처리한 다음 emery 천으로 닦아내야 한다.

5) Mg 합금: 대체로 기계적인 cleaning 만으로 충분하다.

6) Ti 합금: 화학적인 cleaning에서는 수소취성을 일으키지 않도록 주의 해야하며 통상 질산과 불화수소에 의한 처리방법이 널리 사용되고 있지만 탈지후 기계적인 cleaning으로 충분한 경우도 있다.

### 3. 이종재료 전자빔 용접부 비드 및 조직특성

#### 3.1 전자빔 용접부 비드

항공우주산업에 사용되는 소재중 연소기에 적용되는 대표적인 강종은 오스테나이트계 스테인레스와 Cu-Cr합금 그리고 duplex 스테인레스등이며 이들이 완전히 이종재료의 조합으로 전자빔 용접되고 있으며 두께도 1~1.5mm 정도로 상당히 얇아 열팽창등을 고려하여 용접열을 흡수하도록 특별제작된 정밀한 지그를 사용하여 고정하지 않으면 안된다. 이들의 화학조성은 Table 1과 같다. 또한 이들 소재는 연소기용 외피로 적용되고 있는 재료로서 고온에서 높은 압력이 걸리기 때문에 표면의 비드가 노치 효과를 나타내지 않도록 reinforcement 등의 형상을 엄격히 규제하고 있다.

따라서 reinforcement 높이도 1mm 이내가 되도록 제한하고 용접비드 폭도 3mm 이내로 규제하고 있기 때문에 표면 상태가 상당히 중요하다. Fig. 3은 이러한 적용 가능성을 검토하기 위하여 시험한 duplex 스테인레스와 Cu-Cr합금, 스테인레스 316과duplex 스테인레스의 전자빔 용접부를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 상당히 미려한 표면비드와 이면 비드를 나타내었을 뿐만아니라 reinforcement 높

Table 1 Chemical compositions of materials used

Steel	Chemical composition (wt.%)												Creq	Nieq	Remarks
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	V	N			
A	0.037	0.587	1.06	0.021	0.002	16.63	2.04	10.68	0.216	0.030	0.078	0.03	20.40	12.48	STS316
B	0.028	0.403	1.49	0.022	tr.	21.88	2.84	6.02	0.244	0.005	0.051	0.18	26.39	9.9	329J3L
C	-	0.009	-	-	-	0.97	-	-	Bal.	-	-	-	Fe 0.036	Pb 0.003	C18200

\*Creq = %Cr + 1.37x%Mo + 1.5x%Si + 2x%Nb + 3x%Ti, Nieq = %Ni + 0.31x%Mn + 22x%C + 14.2x%N + %Cu

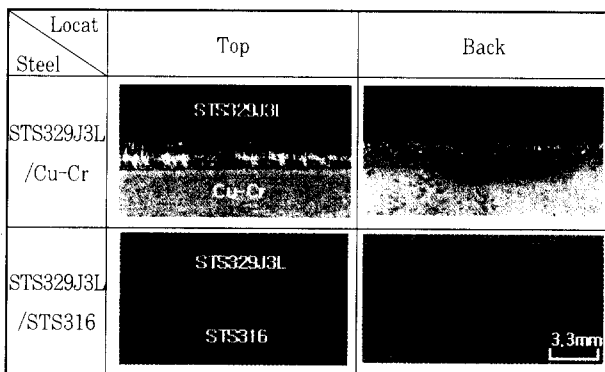


Fig. 3 Bead appearances for welding dissimilar metals

이도 1mm 이하로 연소기에서 요구하는 조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 Fig. 4에서 확인할 수 있었다.

결론적으로 표면 비드 조건은 적정조건인 전자빔 용접으로 처리시 연소기 제작에 문제가 없을 것으로 판단되었다.

### 3.2 용접부 조직특성

앞절에서 언급하였듯이 표면비드 상태에는 문제가 없지만 조직상의 결함이나 불균일성에 기인한 문제점을 검토하기 위하여 이종재료 전자빔 용접부 조직특성을 조사하고자 하였다. 이종재료간 전자빔 용접에서 특이하게 나타나는 현상은 용융지가 작고 키홀이 형성되어 용접이 되기 때문에 용융지 내부에서 물리적인 특성 차이에 따른 불균일 조성이 생기기 쉬운 문제가 있다. Fig. 4는 이러한 특성을 나타내는 duplex 스테인레스와 Cu-Cr합금의 전자빔 용접부의 전형적인 예를 나타낸 그림이다. 즉, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 결함이 없는 양호한 용접부를 형성하고 있다. 그러나 Fig. 4의 A에서 알 수 있는 바와 같이 duplex 스테인레스의 fusion line을 따라 100μ 폭으로 결정이 조대화하고 입계에 오스테나이트가 석출한 양상을 잘 나타내 주고 있다. 또한 duplex 스테인레스 층의 용착금속에서 Cu-Cr합금의 용착금속으로

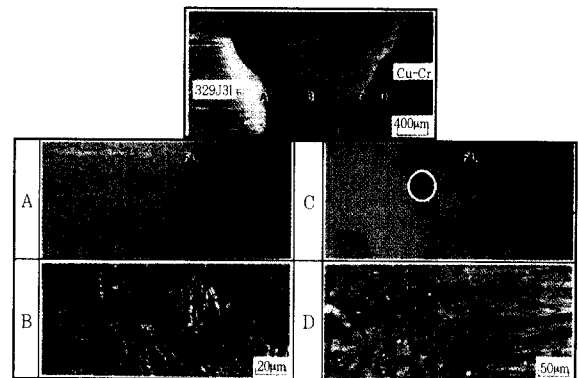


Fig. 4 Microstructures of EB welded dissimilar metals

이동함에 따라 스테인레스와 Cu-Cr 합금이 조성상 완전히 섞이지 않아 etching 조직이 잘 나타나지 않은 형태로 존재하였다. Cu-Cr합금의 fusion line 근처에서는 band상의 응고조직이 형성되고 열영향부내의 석출물들은 그대로 잔류해 있음을 확인할 수 있어 석출물의 용해에 의한 강도저하는 거의 없을 것으로 판단되었다.

특히 Fig. 4의 C 흰색 원형 부분을 확대하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이 Cu-Cr 합금층의 용착금속내에서는 물방울 모양의 입자들이 불규칙하게 흩어져 있으며 각 위치에서 분석결과 조성은 Table 2와 같이 나타났다<sup>4)</sup>.

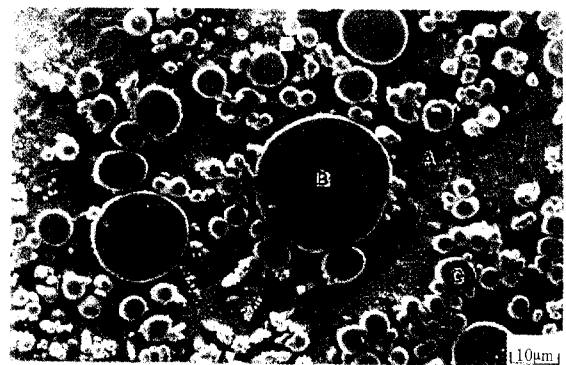


Fig. 5 Microstructure of EB welded dissimilar metals (Duplex STS/Cu-Cr)

Table 2 Particle analysis of weld metal

Comp.	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
Location					
A	22.16	0.57	60.91	3.38	12.99
B	23.07	-	62.44	3.66	10.83
C	22.32	-	63.33	4.37	9.98

즉, 기지조직(A)은 Cu가 다소 rich된 형태이지만 B, C와 같이 물방울 모양의 입자들에서는 Cr과 Fe, Ni등이 Cu에 비하여 rich된 상임을 확인할 수 있었다. 이는 전자빔 용접시 온도가 충분히 높지 않은 Cu 측 영역에서 순간적으로 용융, 응고되면서 Cu-Cr 합금과 스테인레스 용융금속이 완전히 wetting되어 섞이지 못하고 물리적인 특성 차이에 의하여 형성된 결과로 생각되었다.

Fig. 6은 duplex 스테인레스와 오스테나이트계 스테인레스의 전자빔 용접부를 나타낸 것이다. 용접금속은 모두 초정 페라이트 응고이고 그 내부에 오스테나이트가 입계에서 입내로 잘 발달한 조직을 나타내고 있는데 이는 오스테나이트계 스테인레스중에서 STS316이 Creq(20.4)과 Nieq(12.48)의 당량과 당량비(1.64)가 높기 때문에 오스테나이트가 다량으로 석출된 것으로 생각된다. 즉 오스테나이트 안정화 원소인 Ni 함량이 높아 오스테나이트가 많이 형성된 것으로 설명할 수 있다.

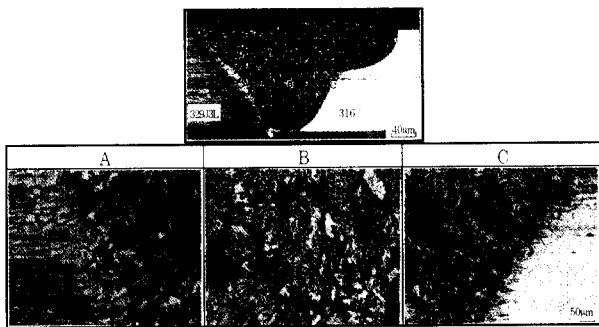


Fig. 6 Microstructures of EB welded dissimilar metals (Duplex STS/STS316)

Fig. 7은 다른 조성의 duplex 스테인레스와 오스테나이트계 스테인레스의 전자빔 용접부 조직을 나타낸 것이다. 용착금속은 전형적인 초정 페라이트 응고조직을 나타내고 있으며 용착금속의 내부에는 괴상의 페라이트(A)와 skeletal 페라이트(B), lathy 페라이트(C)등이 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 특히, fusion line 부근에서는 조대한 페라이트의 입계에서 오스테나이트가 석출하고 냉각속도가 늦은 용착금속 쪽으로 갈수록 석출 오스테나이트는 증가하는 경향을 나타내었다.

Duplex 스테인레스 강의 모재부 페라이트 영역에서는 Ni 4.46%, Cr 24.15%이지만 오스테나이트 영역에서는 Ni 6.48%, Cr 19.41%로서 오스테나이트 안정화 원소인 Ni 이 증가하고 페라이트 안정화 원소인 Cr이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 fusion line 부근의 결정립 조대화 영역의 경우 페라이트에서 Ni 3.84%, Cr 21.97%를 나타낸 반면 입계에 석출한 오스테나이트에서는 Ni 4.38%, Cr 22.45%로 오스테나이트 안정화 원소인 Ni 이 다소 증가하는 양상을 나타내었다. 이러한 현상은 페라이트에서 단시간에 오스테나이트가 석출하기 시작하여 나타난 현상으로 생각되며 모재처럼 안정된 상태로 오스테나이트가 석출이 완료되면 Ni 함량의 증가와 Cr 함량의 감소는 뚜렷해질 것으로 생각된다.

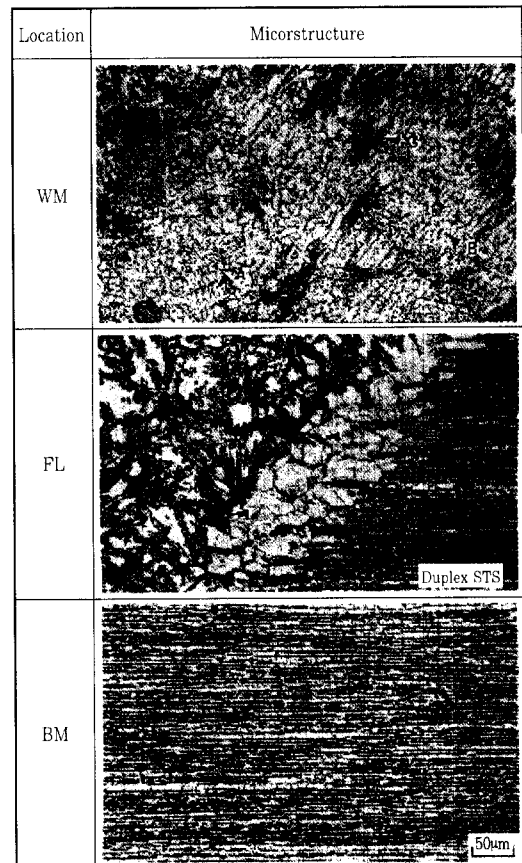


Fig. 7 Microstructures of EB welded dissimilar metals (Duplex STS/STS316)

Fig. 8은 duplex 스테인레스와 Cu-Cr합금의 전자빔 용접부를 500°C에서 인장시험후 파단 상태를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 용착금속은 스테인레스와 Cu-Cr 합금이 완전히 균일하게 섞이지 않은 형태로 용접시 용융지의 흐름에 따라 부분적인 불균일 혼합부가 형성되는 것으로 판단되지만 파단위치는 완전히 결정립 조대화 영역에서 입계를 따라 모

재촉으로 파단이 발생하여 용착금속의 불균일에 기인한 강도상 문제는 없는 것으로 확인되었다. 또한 Cu-Cr 합금의 경우 전자빔 용접시 입열량이 1.265kJ/cm로 작고, 열영향부내에 Cr 석출물들이 존재하더라도 fusion line을 따라 약 200 $\mu$ m의 폭으로 결정립 조대화 영역이 존재하여 용접부 강도 설계시 고려해야 할 것으로 생각되었다.

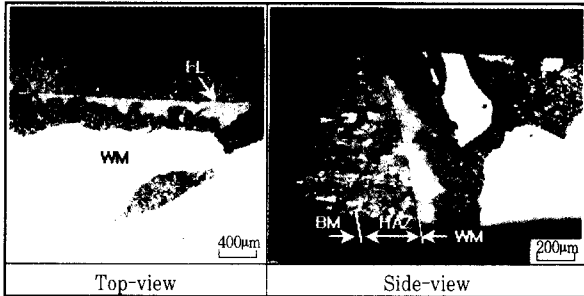


Fig. 8 Bead appearances for welding dissimilar metals

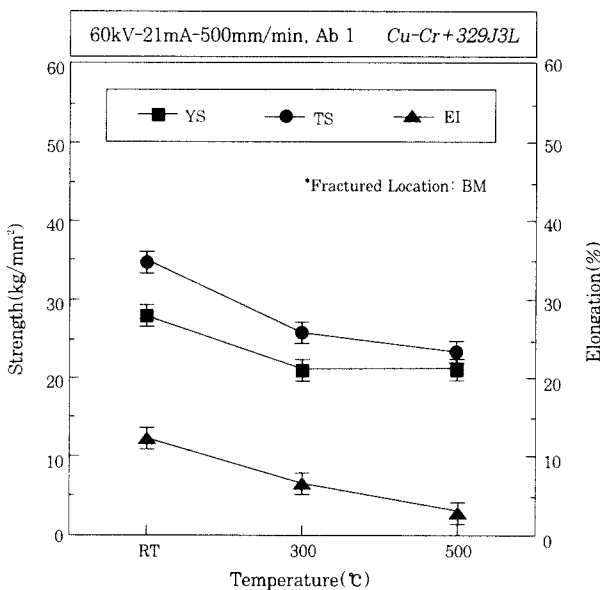


Fig. 9 Tensile properties of EB welded dissimilar metals

Fig. 9는 Cu-Cr 합금과 duplex 스테인레스의 전자빔 용접부 강도특성 평가 결과를 나타낸 것이다. 상온에서 고온에 이르기까지 모재에서 파단이 발생되어 용접부 강도상의 문제는 없는 것으로 판단되었으며 인장강도는 시험온도의 증가에 따라 35kg/mm<sup>2</sup>에서 약 20kg/mm<sup>2</sup>로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 연신율의 저하가 두드러져 10%에서 5%이하로 급격히 감소하여 고온에서 적용시 이러한 특성을 고려하지 않으면 안될 것으로 생각되었다.

#### 4. 맺음말

기술선진국에서는 항공우주산업에 있어서 전자빔 용접에 관한 연구가 많이 행해져 왔지만 특수분야의 적용이 대부분이기 때문에 공개된 기술은 그리 많지 않은 실정이다. 또한, 국내의 항공우주 산업에서 전자빔 용접기술 및 적용사례는 거의 전무한 상태로 향후 기술 선진국으로 발전하기 위해서는 고부가가치 소재에 대한 신기술 관련 연구가 시급히 요구되고 있다. 본 해설에서 언급한 바와같이 이종재료의 용접에서는 여러 가지 조성상의 문제에서 파생되는 기계적 특성 뿐만 아니라 용융금속의 물리적 특성에 기인한 불균일한 용융금속 형성등이 나타나고 있기 때문에 이에 대한 종합적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 坂本 昭: 宇宙開發と材料, 日本 金屬 學會 會報 第27卷 第 11 (1988), p.860
2. A. H. Meleka: Electron Beam Welding -Principles and Practice-(1971), McGraw-Hill, p.170
3. 特許 昭 45-29960
4. 김숙환, 이종섭, 김기철: 연소기용 대체재료의 전자빔 용접공정 개발에 관한 연구, 포항산업과학연구원 연구보고서(1999)



- 김숙환(金瀟煥)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 고밀도 에너지 빔 용접공정, 고상접합, 용접야금
- e-mail : weldksh@rist.re.kr



- 권영각(權寧珏)
- 1952년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 금속의 부식 및 방식, 용사, 용접부 피로
- e-mail : ygkweon@rist.re.kr



- 김대업(金大業)
- 1965년생
- 현대MOBIS(주) 기술연구소
- 철강 및 비철재료 확산접합, 용접야금
- e-mail : aeupkim@mobis.co.kr