20주년 기념 특집 : 용접기술의 응용

항공우주산업에서 용접 · 접합기술의 적용

김 대 업

Application of Welding and Joining Technology for Aircraft and Aerospace Industry

Dae-Up Kim

1. 서 론

항공우주산업은 신소재, 생명공학기술 등과 더불어 2000년대를 이끌 첨단기술산업으로서, 우리나라는 1987년부터 본격적인 항공우주산업 발전을 위한 체제를 갖추기 시작하였으며, 국가기술 경쟁력을 대표하는 산업으로서의 항공우주산업 기술의 육성 및 그 응용을 통하여 전 산업에 경제적, 기술적 파급효과를 극대화할 필요성이 대두되었다. 미국, 프랑스, 일본 등 선진국들은 기술의 선도적 역할로서 항공우주산업을 육성하고 있으며, 최신기술을 바탕으로 특수목적의 항공기 개발을 추진하고 있고, 민간주도형 생산체제와 대규모 국립연구소가 병립하고 있다. 개발도상국은 산업전반의 기술능력 제고와 국방차원의 전략적 가치에 중점을 두어 1970년대 이후부터 집중 육성하고 있다[1,2].

우리나라의 항공산업은 선진공업국의 모델을 제한적으로 기술도입하여 조립생산하는 수준에 머물러 있으며, 고부가가치의 설계 및 엔지니어링 기술은 외국기술에 의존하고 있다. 우주산업은 1990년대 중반부터 통신방송위성 시대에의 진입을 추진하고 있으며, 이제 막 도약을 시작하는 단계에 있다고 할 수 있다. 현재는 한국항공우주연구원을 중심으로 국내참여기업이 공동으로 21세기 항공우주 선진국 진입을 기본목표로 하여, 항공기, 위성, 로켓관련 종합시스템 및 핵심기술 개발과 고부가가치성 첨단기술 개발 및 이들의 실용화를 추진하고 있다.

본 소개에서는 국내의 항공우주산업 발달사를 포함하여, 항공우주기기에 적용되고 있는 재료 및 용접 · 접합기술에 대하여 기술코자 한다.

2. 국내 항공우주산업의 발달사

2.1 발전역사 개요

국내 항공우주산업의 수급실적을 Table 1에 나타내었다. 우리나라의 항공우주산업 생산규모는 연평균 10%정도로 증가하고 있다. 1999년 기준으로 국내 항공우주산업의 생산은 F-16 군용기 사업 등으로 1조 2,150억원을 기록하였으며, 수출은 3억 3,600백만 달러로 국내생산의 약 33%를 차지하고 있다. 1990년 들어 25억 달러를 상회하던 수입규모가 외환위기를 맞아 운항사들의 여객기 도입이 감소하여 1999년은 전년대비 14.6% 감소하였다. 국내 항공우주산업의 1998년말 기준 세계시장 점유율은 약 0.5%이며, 매출액 규모로 세계 15위이다.

Table 1 Results of supply and demand for domestic aircraft and aerospace industry

년 도		1985	1990	1995	1997	1998	1999
공급	생산	86	218	855	1,269	1,110	1,110
	수입	369	1,215	2,631	2,055	1,175	1,080
계		455	1,433	4,486	3,324	2,285	2,089
수요	내수	425	1,297	3,306	3,112	1,972	1,831
	수출	30	136	180	212	313	258

2.2 항공산업 발달과정

우리나라의 항공산업은 1950년대 군용기 L-19 정찰기 정비로부터 시작하여 1960년대 F-86 제트 전투기 정비, 1970년대 들어 F-4, F-5 전투기의 정비능력을 갖추는 등 1970년대 중반까지 군용기 창정비 위주로 발전하였다. 1970년대 후반들어 국내최초로 500MD 군용헬기 및 엔진의 면허생산에 착수하여 200여대를 조립생산함으로서, 항공기 제조산업에 참여하게 되었다.

1980년대 들어 500MD 후속사업으로 F-5전투기 및 엔진 면허 생산사업과 F-16 기체부품의 생산사업에 착수하면서 본격적인 생산단계에 진입하게 되었다. 1980년대 후반 들어서는 Boeing, MD사 등 민간여객기 제

조업체의 부품하청생산에 착수하여 비록 소량이지만, 항공기 수출시장을 개척하였다. 1990년대 들어 KFP 사업의 착수와 더불어 UH 헬리콥터, KTX 훈련기 등 군현대화 사업이 결정되어 업계에 많은 활기를 불어넣어 주기도 하였으며, MD-11 스포일러 독자설계, PW4000 엔진 및 Do328 커뮤터기의 공동생산 참여와 같은 국제협력 사업이 추진되었다. 1997년 3월에는 첨단의 복합재료를 적용, 순수 국내기술로 설계/개발된 쌍발 복합재료 항공기의 시범비행을 성공적으로 마친 바 있다.

2.3 우주산업 발달과정

1991년부터 본격적인 인공위성 발사계획을 추진하여 1992년에는 실험용 소형과학위성인 우리별을, 1995년에는 방송통신위성인 무궁화 등을 발사함으로서 국가연구개발사업을 위주로 우주개발에 착수하였다. 1994년부터는 지구 저궤도용 다목적 실용위성의 국산화 개발 및 발사운용을 목표로 시스템의 설계단계에서부터 외국과 우리 기술진이 공동수행하고 제작단계에서 국내업체가 참여하는 본격적인 우주개발사업이 이루어졌다. 1999년 12월에는 다목적 실용위성인 아리랑 1호의 발사로 인하여 우주개발의 신기원을 마련하게 되었다.

발사체 분야의 연구개발은 1970년대 후반 국방과학연구소의 군용로켓 발사성공 등과 같이 위성분야에 비해 비교적 오랜 역사를 가지고 있으나, 이후 지속적인 연구개발 및 민간차원의 우주분야 개발로 전환되지 못하였다. 따라서, 우리별 1, 2호는 Arian(EU) 로켓으로, 무궁화 위성은 Delta로켓(미)으로 발사하는 등 전적으로 외국사에 의존하였다. 현재에도 국제기구의 견제와 감시가 심하여 외국으로부터의 기술전수가 극히 제한되어 있으나, 국가간 기술장벽에도 불구하고 1997년부터 중형과학로켓을 발사한 바 있다(Fig.1). Fig. 2에는 우리나라의 위성체 및 발사체 개발계획을 도식화하여 나타내었다. 우주개발 중장기계획에 의하여 3단형 가학로켓, 저궤도위성 발사용 로켓 등을 순차적으로 개발하여 2005년에는 인공위성을 독자적으로 발사할 수 있는 능력을 확보할 계획이다.

Fig. 1 KSR(Korea Sounding Rocket)-II lift off

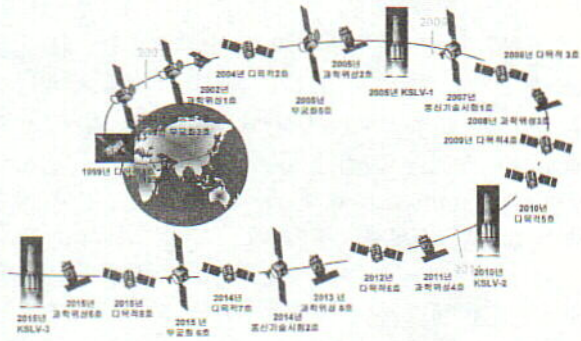

Fig. 2 Development schedule of artificial satellite and launching vehicle

3. 항공기의 용접 · 접합기술

항공기는 많은 기술분야로 이루어진 시스템이고, 경량, 고성능을 요구하는 상당히 가혹한 조건에서 설계되어 제작되기 때문에 신뢰성 향상을 위하여 적용되는 재료 및 가공법도 광범위하다. 금속재료로는 비중이 낮은 Mg합금, Al합금, Ti합금 및 내열성이 요구되는 부위에는 합금강, 내열강, 초내열합금이 사용되고 있으며, 플라스틱, 하니컴, 아크릴 유리등의 비금속이 주로 사용되고 있다. Fig. 3에는 항공기에 현재 적용되고 있는 재료 및 향후 신재료로서 적용이 예상되는 구조재료를 나타내었다[3]. 최근에는 경량화 및 고성능을 꾀하기 위하여 각종 섬유강화 복합재료의 사용이 증가되고 있다. 기존재료 및 신재료에 적용되는 용접법으로는 스폿용접, 브레이징, 전자빔용접, 확산접합등이 있다.

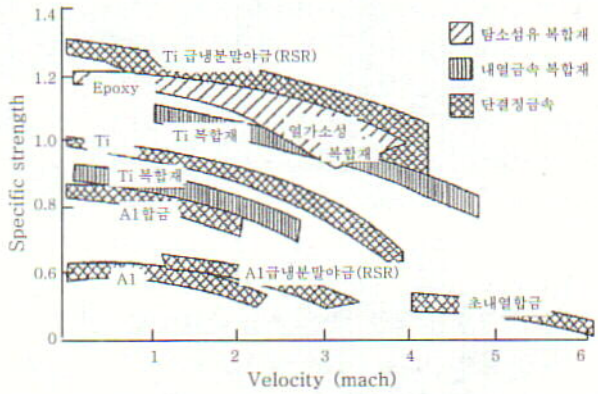

Fig. 3 Development history of materials for aircraft body

3.1 기체

구형 항공기에는 강관의 기체가 사용되어 용접을 이용한 조립공정이 많았으나, 이후에는 고강도 Al합금에 의한 semi mono cock구조가 광범위하게 기체에 사용되었다. 합금의 종별로는 Al-Zn-Cu-Mg계의 Al 7075가 주요구조재료로 사용되어 왔으며, 현재는 분말야금합금, Al-Li합금 및 Al 2024, Al 7075를 개량한 합금이 주력재료로 대체되어 가고 있다[4]. 이들 재료들은 상온성형성은 양호하나 용접이 곤란하기 때문에 일반적으로 용접하지 않고 판금성형, 기계가공 및 리벳조립으로 제작되고 있다. 그러나, door나 cover류를 중심으로 판두께가 1mm정도로 얇은 판재에는 스폿용접이 행해지고 있으며, 성형성, 가공성이 우수한 Al 6061, Al 5052가 사용되는 duct나 각종 연료탱크에는 용융용접이 적용되고 있다.

항공기의 하니컴 구조, 헬리콥터의 블레이드 등에는 접착제로서 필름을 주로 사용한 금속접착 및 autoclave에 의한 가열·가압이 주로 사용되고 있다. 또한, 스폿용접시의 낮은 피로강도를 개선하고 금속접착시 치구조립 비용의 절감을 꾀하기 위하여 스폿용접과 금속접착을 병용한 weldbond의 적용도 고려되고 있다.

현재 항공기 기체는 기존의 Al합금을 대체하여 탄소나 아라미드 등의 강화섬유를 사용한 복합재료가 적용범위를 확대해 가고 있으며, 항공기의 내장품뿐만 아니라 1차 구조물에의 적용이 실용화되고 있다. 복합재료의 제조는 프리프레그를 부품형상 및 응력상황에 맞게 절단, 적층하여 autoclave에 넣어 경화시키는 방법을 사용하고 있다. 복합재료의 끝단을 Ti합금제로 하는 이종재 접합부가 실용화되고 있으나, 대다수는 복합재의 열경화 과정의 일부로서 접합도 동시에 달성되는 코큐어 방식을 채용하고 있다. 복합재료가 사용되는 부품에는 일반적으로 용접은 고려되고 있지 않다.

한편, Ti-6Al-4V합금을 중심으로 비강도가 큰 Ti합금의 적용도 점차적으로 증가하고 있으며, 최근에는 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn이나 Ti-10V-2Fe-3Al등의 metastable β합금도 일부 영역에서 사용되고 있다. Ti합금은 Al열처리합금과 달라서 용접열에 의한 재질열화의 문제가 적기 때문에 용접구조에 사용된다. Ti합금에는 전자빔용접 및 확산접합이 유력하고, TIG용접, 스폿용접도 일부 적용되고 있다. 박판의 판금구조에서도 초소성 성형과 확산접합을 조합한 일체화 가공법이 실용화되고 있다[5]. Fig. 4는 중공구조를 갖는 Ti합금에 전자빔용접과 확산접합을 행한 예를 나타내었다.

그 외 철강재료 및 저합금강에는 TIG용접, 전자빔용접 등의 용융용접이 행해지고 있고, 각종 스테인리스강, Al, Mg주물의 보수에도 용접이 사용되고 있다.

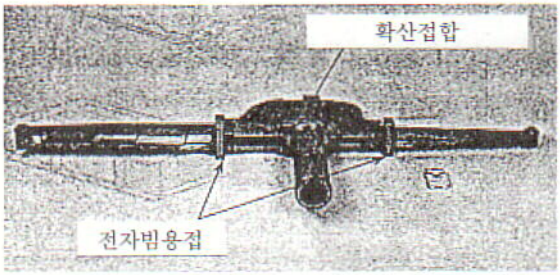

Fig. 4 Appearance of part applied diffusion bonding and electron beam welding

3.2 엔진

항공기 엔진에 사용되는 재료는 비강도, 피로강도, 크리프강도, 내식성 등과 같이 엔진의 각 부위의 요구특성에 부합하는 다양한 종류의 재료가 사용되고 있고, 대부분은 Ti합금과 Ni합금이다. 최근에는 엔진의 추력, 연료 소비율, 신뢰성 및 내구성의 향상과 같은 다양한 요구에 대응하기 위하여 일방향 및 단결정 초내열합금, 산화물 분산강화(ODS)합금, 초소성 분말재료, 섬유강화 플라스틱(FRP)등의 신재료가 개발되어 적용 증가추세에 있으며, 고온에서의 내식성 향상을 위한 thermal barrier coating등의 공정개발도 이루어지고 있다.

엔진부품은 복잡한 형상을 가지는 박육구조로서 고정밀도와 고품질이 요구되고, 용접성이 나쁜 Ni기 합금이나 산화·질화가 쉬운 Ti합금이 많고, 이종재료가 사용되는 부분이 많기 때문에 다양한 용접법이 적용되고 있다. TIG용접은 가장 많은 비중을 차지하는 용접법이나, 보다 고품질의 정밀한 용접이 가능한 전자빔용접, 브레이징, 확산접합, 레이저용접 및 용사를 적용하는 부품이 증가하고 있다.

TIG용접은 판두께가 1mm전후인 케이싱, 배관 등의 박판부품의 용접에 적용되어 비교적 양호한 성질이 얻어진다. 전자빔용접은 용융용접법으로는 TIG용접 다음으로 많이 적용되고 있고, 고가부품의 보수에도 폭넓게 사용되고 있다. Fig. 5는 사용조건이 가혹한 회전체인 Ti합금제 compressor rotor를 전자빔용접한 예를 나타낸다. 플라즈마 용접은 TIG용접보다 용입이 깊고 변형이 작고 전자빔용접에 비해 설비비 및 생산성에 이점이 있기 때문에 판 두께가 2~6mm정도의 case나 frame에 사용되고 있으며, 향후 적용분야가 확대될 것으로 예상된다.

레이저용접은 전자빔용접과 유사한 장점을 가지고 있으나, 비진공 분위기중에서도 연소작업이 가능하기 때문에 생산성이 높다. Ni기 초내열합금이나 Ti합금의 case 혹은 turbine blade의 shroud notch의 내마모

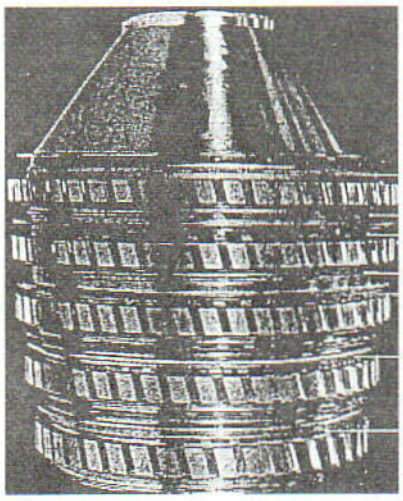

Fig. 5 Appearance of electron beam welded compressor rotor

경화 육성용접에 적용되고 있다. 또한, 마찰용접법은 재료의 열화가 적고 이종재의 접합도 가능하기 때문에 엔진의 compressor disk나 turbine disk등의 회전체의 원주용접에 적용된다.

한편, 엔진부품의 브레이싱에 대해서 보면, 용융용접법에 비해 균일 가열냉각방식이기 때문에 복잡한 부품에서도 변형이 적은 접합이 가능하며, 진공로에 의한 로내 브레이징을 주로 행하고 있다. Filler metal은 모재 및 용도에 따라 다양하게 사용되고 있으며, Ag, Au, Ni, Co, Cu, Al기가 있다. 특히, Au-Ni계 filler metal은 고가이나 내산화성, 내식성, 연성 등이 우수하기 때문에 Ni 브레이징에서 문제가 되는 부분에 사용된다. 대표적인 적용부품으로서는 압축기 날개, 연소기 라이너, turbine blade 하니컴 에어 실, 배관 등이다. Fig. 6은 브레이징에 의해 조립된 항공기 압축기 날개를 나타낸 것이다. 또한, (Al+Ti)함유량이 높은 turbine blade용 일방향 및 단결정 Ni합금이나 ODS 합금 등의 신재료는 용융용접이 곤란하기 때문에 브레이징이 적용된다. 그러나, 용접부 및 브레이징부의 강도는 모재강도에 비해 떨어지기 때문에 모재와 동일 정도의 강도를 얻을 수 있는 확산접합이 적용된다. Ti합금의 확산접합은 경량화를 목적으로 중공팬 날개 및 팬 디스크에 적용되며, Ni기 초내열합금은 확산접합이 곤란하기 때문에 성분이 모재에 가까운 저융점 인서트금속을 이용한 액상확산접합법이 turbine blade등에 적용되고 있다.

Fig. 6 Appearance of brazed compressor blade using Au filler metal

또한, 용사는 표면개질 기술의 하나로서 fan blade, turbine blade등과 같은 고가의 항공기 엔진부품이 마모 손상되었을 때 보수기술로서 필수적인 기술이다. 용사재료로서는 500℃까지의 중·저온부에는 WC-Co계가, 고온부에는 CrC 및 스텔라이트계가 사용된다.

4. 우주로켓의 용접·접합기술

우주기기는 로켓, 인공위성, 우주 station, 궤도간 수송기, 우주왕복기 등으로 광범위하게 전개되고 있으며, 로켓은 우주개발의 시작이라 할 수 있다. 로켓의 대부분을 점하는 연료탱크, 산화제탱크는 용접구조로 되어 있는 일종의 압력용기이고, 엔진, 배관에도 광범위하게 용접이 적용되어 전반적으로 용접·접합기술은 로켓제작의 핵심기술이다. 경량화, 고강도, 극저온, 초고온 등의 극단적인 기술요구에 대응하기 위하여 마르에이징강, 고강도 Al합금, Ti합금, 복합재료 등의 신재료가 사용되고 있다. 용접·접합방법으로서는 TIG용접이 가장 많이 적용되고 있고, 그 외 MIG용접, 전자빔용접, 브레이징, 확산접합등의 접합법이 최적화된 각종 요소에 적용되고 있으며, 신용접법도 개발되어 적용이 검토중이다.

4.1 기체

로켓의 기체구조에서 최대의 구조물은 연료 및 산화제 탱크이다. 로켓탱크용 재료로서는 경량, 고강도가 중요하기 때문에 항공기에서와 같이 Al2024, Al7075와 같은 고력 Al합금이 광범위하게 사용되고 있다. 그러나, 용접성 측면에서 부적당하여 우주개발 초기에는 Al2014가 채용되었으나, 응력부식이나 보수용접등 제조공정 안정성이 문제가 되어 용접부까지 극저온에서 파괴인성이 우수한 Al2219가 사용되어 오고 있다.

용접방법으로서는 초기에는 탱크의 길이나 원주방향에 대해서 MIG용접이 사용되었으나, TIG용접이 아크의 안정성, 적용가능범위가 넓기 때문에 신뢰성을 중시하는 이 분야에서는 광범위하게 적용되어 고품질 용접을 실현하고 있다. 로켓 탱크의 용접장치를 Fig. 7에

Fig. 7 Appearance of welding apparatus for rocket tank

나타내었다[6]. 로켓에 적용되는 추진제 탱크 용접부의 판 두께는 대략 10~15mm이다. 추진제 탱크는 프레스성형과 chemical milling에 의해 만들어진 반구 돔과 굽힘 성형한 원통실린더를 원주방향 용접으로 결합해서 조립된다. 그 외, 일부 이음부에는 직류역극성(DCRP) MIG용접, 전자빔용접이나 플라즈마용접이 채용되기도 한다. 최근 Detla로켓(미)에는 마찰교반용접 (FSW : Friction Stir Welding)을 적용하고 있다. Space Shuttle의 연료탱크에는 TIG용접 및 극성가변식 플라즈마 아크 (VPPA)용접을 로봇화해서 실시하고 있다[7].

Ti-6Al-4V ELI 재료가 사용되는 극저온의 헬륨탱크 등의 용접에는 전자빔용접을 행하고 있고, 용접시 헬륨탱크 내부를 청정하게 하고 sputter발생을 방지할 수 있는 defocus 전자빔용접이 적용되고 있다.

또한, 로켓의 대형화나 이음부 형상의 다양화, 제조비용의 절감 등을 위하여 CNC 전자동제어 용접의 적용이 검토되고 있고[8], 용접전처리 및 청정도 관리를 위하여 DCSP-TIG용접에 극히 단시간 DCRP-TIG용접을 행하여 개선 청정효과를 얻는 등 다양한 용접기술의 고도화도 시험되고 있다.

4.2 엔진

로켓엔진에는 TIG용접, 전자빔용접 및 브레이징이 주요접합기술로서 적용되고 있으며, 일부 부분에 확산접합이나 레이저용접도 실시하고 있다[6].

전자빔용접은 가열이 매우 국부적이고 제어성이 좋기 때문에 인젝터와 같이 엔진의 특성에 중요한 영향을 미치고 공차가 엄격하거나 얇은 부품에 적용하고 있다. 진공중에서 불순물이나 오염을 방지할 수 있고, 고밀도 용접으로 용입깊이도 0.1mm이내의 정밀도로 관리할 수 있다. 또한, 재생냉각구조를 가지는 노즐 내벽에 사용되는 Cu합금과 외벽에 사용되는 Ni기 초내열합금과의 이종재 용접 등에도 적용되고 있다[9,10]. 그 외 Ti합금의 헬륨탱크, Al합금제의 분사기, 터보 펌프의 shaft 등에도 전자빔용접이 행해지고 있다.

브레이징은 재생냉각구조로 된 노즐 스커트나 혼합기의 조립시 적용하고 있다. 일반적으로 수소나 진공분위기에서 로중 브레이징이 적용되나, 브레이징 분위기의 청정도를 높이고 Ag, Cu, Mn등 증기압이 높은 원소의 증발을 억제하기 위하여 진공중에서 고순도의 아르곤 가스를 불어넣어 유량 및 로내압을 제어하는 방식을 택하기도 한다. 사용되는 삽입금속으로는 과거에는 Au, Pd계 삽입금속이 사용되어 왔으나, 근래에는 제작비용 절감 및 젖음성 향상을 위하여 Ag-(Cu)-Pd 삽입금속이 많이 사용된다. Fig. 8에는 현재 국내에서 개발되고 있는 KSR-Ⅲ 액체로켓의 엔진의 외관을 나타내었다. 여기서는 주로 TIG용접 및 브레이징에 의해 조립되었다. 브레이징은 Fig. 9에 보이는 바와 같이, AMS4764 삽입금속을 브레이징부에 스폿용접하여 setting시킨 후

Fig. 8 KSR-Ⅲ liquid rocket engine (13on)

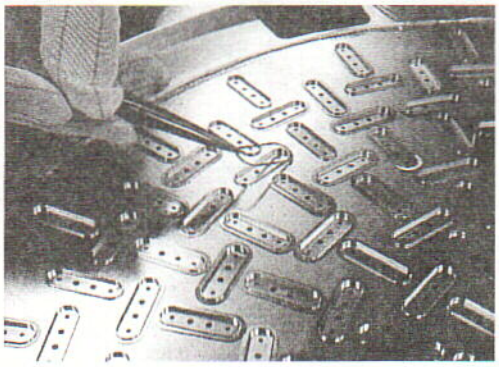

Fig. 9 Appearance of filler metal setting by spot welding before brazing

진공중에서 행해진다.

그 외 대부분의 일반 부위에 대해서는 TIG용접이 광범위하게 적용되고 있다. Ti합금이 주로 사용되는 임펠라 및 turbo pump의 일부 부품에서는 확산접합을 적용해서 제작되고 있다.

5. 결 론

항공우주산업은 21세기 정보산업, 신소재산업 등 각 분야의 첨단사업을 주도해 나갈 미래 유망산업이다. 항공우주산업에서 특정분야의 기술개발은 연관산업의 기술개발에 미치는 파급효과가 매우 크며, 역으로 연관산업분야의 기술발전은 항공우주산업의 발전에 크게 기여하게 된다. 이는 복합시스템 산업으로서 항공우주산업만이 가질 수 있는 특징이라 할 수 있다. 이와 같은 견지에서 우리나라 항공우주산업의 육성은 국내산업의 기술수준을 한 단계 고도화시킬 수 있는 기회를 제공하게 되며, 이를 통해서 초정밀 가공기술, 정밀전자, 신소재기술, 용접·접합기술등 각종 첨단기술의 확산을 도모할 수 있게 될 것이다.

미래기술인 항공 및 우주개발의 전개는 재료기술이나 접합기술의 발전없이는 말할 수 없으며, 보다 혁신적인 로켓기술개발을 실현시키기 위해서는 재료개발 및 용접·접합기술의 개발이 필연적이다. 21세기에 계획되고 있는 차세대 항공기 및 로켓의 개발은 지금까지의 레벨을 대폭 상회하는 열환경과 경량화 특성이 고려된 전혀 새로운 재료의 개발이 강력하게 요구되고 있다. 이를 달성하기 위해서는 사용환경특성이나 조건 등을 고려한 최적재료의 개발/선택, 설계와의 조합, 기능의 복합화/경사화 및 제작기술의 개발 등이 필요하다. 현재 미국, 일본 등의 기술선진국에서는 항공기나 로켓의 성능향상 요청에 따라 고력용접용 Al-Li합금의 개발이나, 용접법으로서 VPPAW(극성교환 플라즈마 용접법)등의 개발이 추진되고 있으며[6], 내열성이 좋고 비강도가 높은 경량합금 및 고강도 복합재료, 내열세라믹, 금속간화합물 등의 적용도 검토하고 있다[11,12].

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

향후 대형화, 고성능화, 고속화, 항공우주 복합화 등을 목표로 항공분야에서는 초대형 상용여객기, 초음속 여객기, 수직이착륙 상용기 개발을 목표로 하고 있으며, 우주분야에서는 미래의 대형위성, 우주기지, 달 표면기지, 화성유인탐사 및 수송시스템으로서의 대형로켓이나 우주왕복선 등이 개발될 것으로 예상된다. 이에 따라 경량이면서 고온 혹은 극저온에 대한 내구성, 가공성, 성형성을 겸비한 새로운 재료의 개발 및 신용접·접합기술의 개발 등 적용기술의 혁신이 기대되고 있다.

참 고 문 헌

1. Daeup Kim et al. : Materials and Joining Technology for Liquid Propellant Rocket, J. of Kor. Weld. Soc, 18-6 (2000), 675-681 (in Korean)
2. Y.Morino : Materials and Joining in Space Plane Technologes, J. of Jpn. Weld. Soc, 62-8 (1993), 617-622 (in Japanese)
3. 日本鐵鋼協會 : 航空機の進歩とその將來, 白石記念講座, 15 (1988), 3-15 (in Japanese)
4. T.Omasa : J. of Jpn. Weld. Soc, 5-1 (1987), 178-183 (in Japanese)
5. J.A.Hoore and J.J.O'Conner : Inertia and Electron Beam Welded Turbine Engine Power Shaft, Weld. J., 59-5 (1980), 17-23
6. S.Kiyoto : Materials and Joining Technologies for Rocket Structures, J. of Jpn. Weld. Soc, 62-8 (1993), 630-636 (in Japanese)
7. D.Gutow and M.Smith : Sensors guide shuttle welding, Weld. Des. Fabr., 63-5 (1990), 27
8. V.J. Jusionis : Utilizing Cyber Based Processes, Tech. Pap. Soc. Manuf. Eng., MF-85-397, (1985)
9. G. Holmqvist : Investigation of Electron Beam Welding in Haynes 25 for Combustion Chambers for Rockets, Weld. Prop., (1984), 308
10. A. Szabo : Electron Beam Welding of Launch Vehicles, Proc. Conf. Laser Electron Beam Weld. Cutt. Surf. Treat. State Art, (1991), 88
11. W.A.Owczarski and D.F.Paulonis : Allpication of Doffusion Welding in the USA, Weld. J., 60-2 (1981), 22
12. Y.Oka and K.Souno : Japan's Aerospace Industry in the Future, J. of Jpn. Weld. Soc, 59-1 (1990), 47 (in Japanese)