

## 초소성 성형 기술의 현황과 전망



**이정환**

(KIMM 재료공정연구부)

- '80 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(학사)
- '82 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)
- '95 홍익대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



**이영선**

(KIMM 재료공정연구부)

- '91 충남대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '93 충남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)
- '93-현재 한국기계연구원 연구원



**이상용**

(KIMM 재료공정연구부)

- '81 고려대학교 금속공학과 졸업(학사)
- '84 고려대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사)
- '85-'86 독일 Aachen공대 용접연구소 연구원
- '93 독일 Aachen공대 금속공학과 졸업(박사)
- '94-현재 한국기계연구원 선임연구원

### 1. 서론

초소성이란 인장시험시 재료가 파괴되기 전까지 수백~천 퍼센트 이상의 연신율을 나타내는 현상을 말하며 고온에서의 유리의 변형거동과 같은 현상이 금속에서도 나타나는 것이다. 이러한 초소성 현상은 재료의 특정한 미세결정립 구조(일반적으로  $10\mu\text{m}$  이하), 성형온도(약  $0.5T_m$  이상) 변형률 속도( $10^{-3}\sim 10^{-5}/\text{sec.}$ )의 조건하에서 나타난다. 초소성 성형(Superplastic Forming, SPF)은 초소성 재료가 가지는 낮은 유동응력에서의 높은 연신율 특성을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 일체로 성형하는 기술이다.

금속재료에서 초소성 현상이 최초로 발견된 것은 20세기 초이지만 과학적인 연구대상이 된 것은 2차 세계대전 전후의 러시아 과학자들에 의해서 이루어졌으며 1962년 이후부터 선진국을 중심으로 연구가 본격화 되고 1970년대 부터 공업적으로 응용하려는 시도가 이루어져 초소성 재료 및 성형기술 개발이 활발해졌다. 그러나 초소성 재료는 미세결정립 구조를 가져야 되기 때문에 제조공정이 까다롭고 따라서 소재가격이 높아지게 되며 또한 고온에서의 성형시간도 길기 때문에 제조비용이 높다. 따라서, 초소성의 공업화는 용도측면에서는 부가가치가 높은 항공기 구조용 부품에, 재료측면에서는 Al 합금과 Ti 합금을 주류로 발전되어 왔다. 알루미늄의 경우는 주로 Al 7xxx계열의 합금이 Door Pan, Sine Wave Beam, Copilot's Floor, Waffle Pan 등의 부품제조에 적용되고 있으며[1], 티타늄계 초소성 합금을 이용

한 초소성/확산접합(SPF/DB) 공정기술은 완속단계에 이르러 그 활용분야가 급속히 확장되어 여객기 및 전투기 등의 Hot Air Nozzle, AFT Fan Duct, Lifting Fan Blade, Gas Turbine Stator Vane 등의 부품제조에 적용되고 있는 실정이다 [2]. 그림 1은 항공기 부품을 초소성으로 적용한 예로서 48개의 부품이 5개의 부품으로 성형이 가능하여 약 1/10로 부품수를 절감시킬 수 있는 효과가 있다. 따라서, 요구강도를 만족하는 조건하에 초소성 성형에 적합하도록 부품의 형상설계를 변경한다면 커다란 경제적 이득을 얻을 수 있다.

본 고에서는 초소성의 특징과 초소성 성형 기술, 최근 연구개발동향, 개발 예, 시장현황 및 경제성 등을 소개함으로써 국내 항공우주산업의 성장에 많은 영향을 미칠수 있는 초소성 공정기술의 이해와 장래의 시장잠재력에 대한 소개를 하고자 한다.

## 2. 초소성 성형의 특징과 문제점

초소성 성형은 소재의 형태에 따라 판재성형과 벌크(Bulk)성형으로 구분할 수 있는데 본 고에서는 주로 판재성형에 대하여 기술한다. 초소성 판재성형의 대표적인 공정은 그림 2에서와 같이 판재를 가열된 금형내에서 가스가 누설되지 않도록 경계면에서 클램핑(Clamping)한 다음 가스를 이용하여 금형형상으로 변형시키므로써 제품을 성형하는 것이다. 성형의 종류로는 펀치의 이동이 없는 블로우성형(Blow Forming)과 펀치가 이동하는 신장성형(Stretch Forming)등이 있으며 성형결합의 방지에 효과적인 횡경막 성형(Diaphragm Forming) 등이 있고 블로우 성형에는 금형의 유각 형태에 따라 분류되기도 한다. 또한, 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 초소성 성형과 확산접합 기술을 동시에 이용하는 초소성/확산접합 기술이 있는데, 이는 복잡한 구조물을 일체형으로 성형하는데 매우 유리한 공정기술로서 항공기 부품과 같

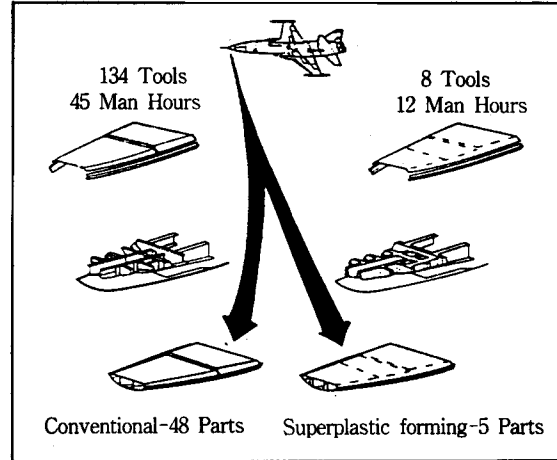


Fig. 1 종래법과 초소성 성형품의 비교 (F-5E Avionics Deck)

이 수많은 리벳에 의해 조립되는 구조용 부품제조에 특성상으로도 경제적으로 모두 우수한 공정이다. 따라서, 초소성/확산접합 기술은 Ti합금을 중심으로 이미 항공기부품 제조에 많이 이용되어 오고 있다.

이러한 초소성 판재성형 공정은 기존의 박판 금속부품을 성형하는 방법에 비해 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 최종 형상에 가깝게 성형이 가능하므로 기계가공비용이 절감되고 둘째, 재료의 소모가 적어 재료의 절감뿐 아니라 경량화가 매우 중요한 항공우주 부품에 적합하며, 셋째, 결정립이 매우 미세하고 균일하므로 강도, 연성 및 피로 저항성이 크며 넷째, 한쌍의 금형 대신 한쪽 면만의 금형이 소요되므로 금형 및 공구가격이 저렴하고 다섯째, 유동용력이 작기 때문에 보다 용량이 적은 저렴한 성형장치를 사용할 수 있으므로 생산설비비의 절감을 꾀할 수 있으며 여섯째, 기존의 다단계 공정 대신 단 한 번의 초소성 성형으로 복잡한 형상의 부품 제작이 가능하다는 점 등이 있다. 그림 4는 종래의 제조방법과 비교한 초소성 성형품의 형상을 나타내주고 있는데 부품수 또한 상당히 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 초소성 성질은 소재와 성형공정이 특정 조건내에서 발현되므로 다음과 같은 단점들도 존

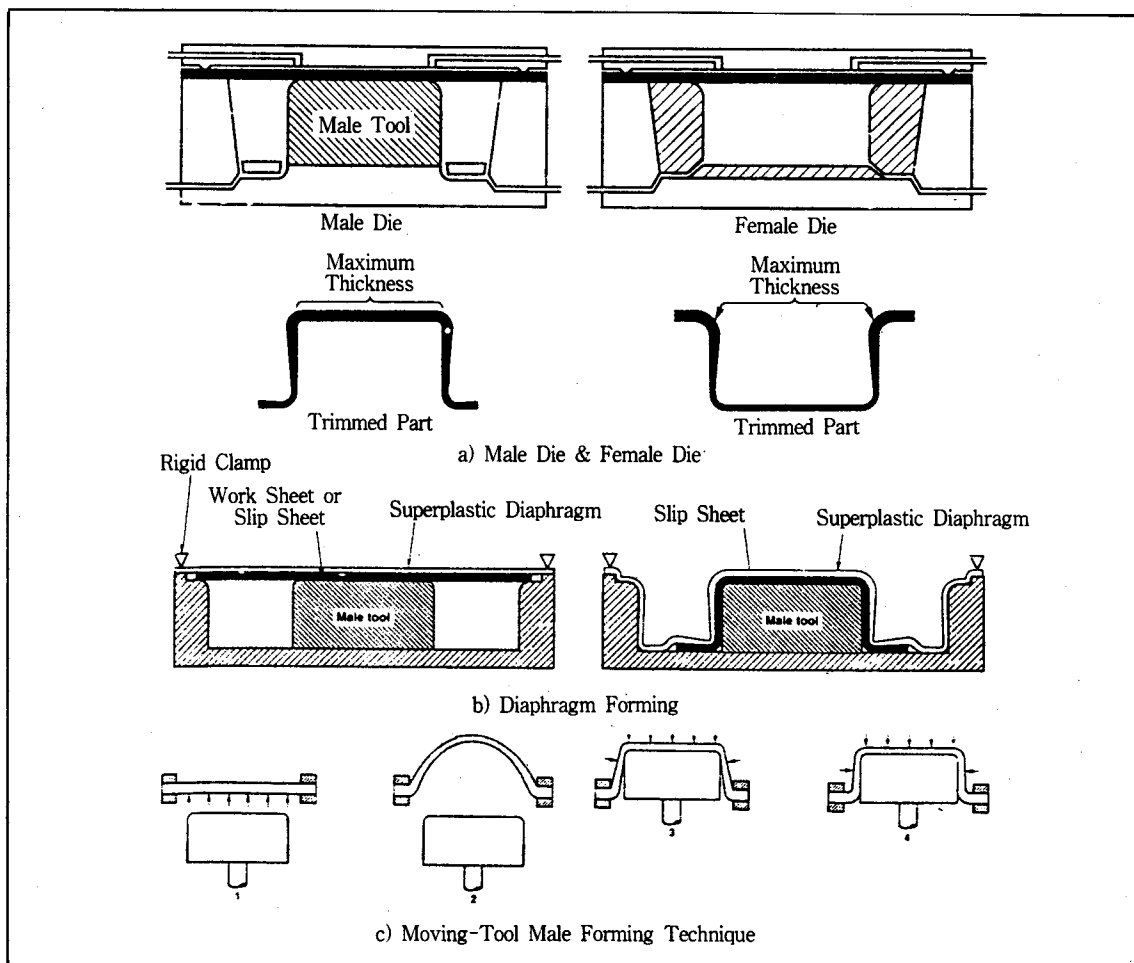


Fig. 2 초소성 성형공정의 종류

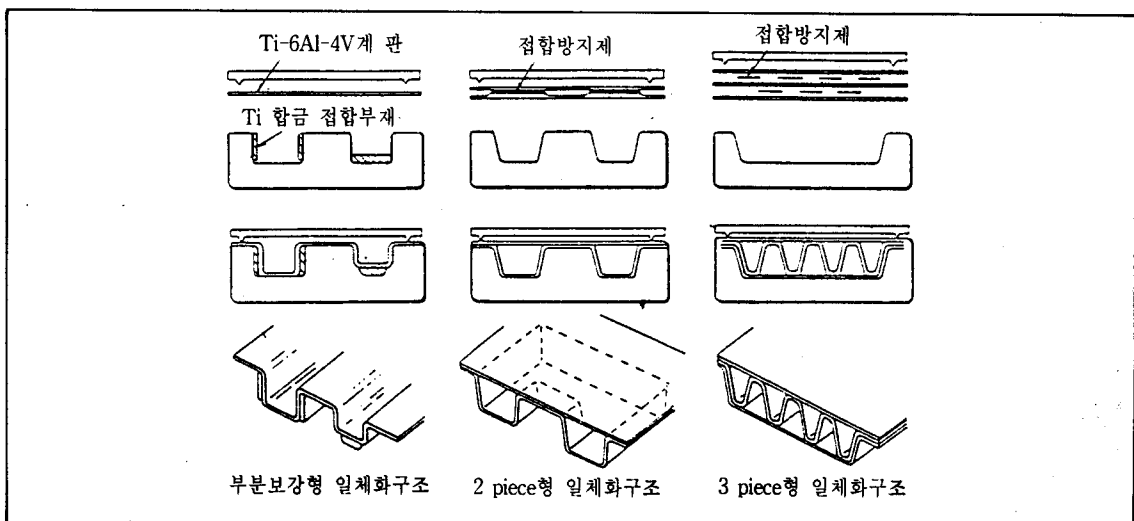


Fig. 3 일체구조물의 기본 가공 방식

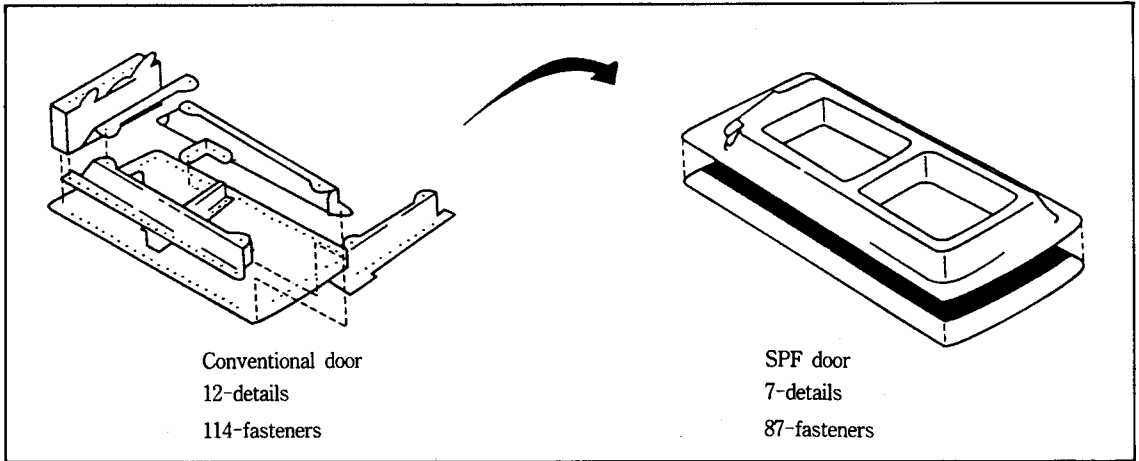


Fig. 4 종래법과 초소성 성형품의 비교(Tornado L/H Module Door)

제한다. 첫째, 미세구조를 만드는데 어려움이 있으며 둘째, 결정립 미세화로 크립에 대한 저항성이 떨어질 수 있으며 셋째, 성형속도가 느리므로 저가 부품의 대량생산에는 부적합한 면이 있다.

### 3. 최근 연구 개발 동향

최근, 초소성 성형기술은 학문적 관심분야로만 그치지 않고 유용한 공업적 생산기술의 하나로 발전되고 있다. 그 이유는 첫째, 이미 많은 연구가 진행되어 항공우주산업에 적용되기 시작한 Al 합금, Ti합금이외에 세라믹, 금속간 화합물, 복합

재료 등의 난가공성 재료의 소성가공 기술에 적용되기 시작한 점과 비초소성 재료와 열가소성 수지재료 등의 일반 공업재료의 새로운 성형기술(Diaphragm Forming 등)에도 응용되기 시작한 점, 둘째, 초소성 성형이 공업적으로 이용되기 어려웠던 점 중의 하나인 낮은 가공속도를 극복하는 기술개발을 통해 일반적인 공업생산속도에서 초소성 성형을 할 수 있게 되고 있다는 것이다.

표 1은 최근에 조사된 초소성 재료를 금속재료, 금속기지 복합재료, 금속간 화합물, 세라믹과 세라믹기지 복합재료로 분류한 것으로 비금속 재료의 초소성 성형기술의 개발이 가속화되고 있음을 알

표1. 최근 주목 받고 있는 초소성재료

금속 재료		금속기지복합재료		금속간 화합물	세라믹·세라믹기지복합재료	
Al-Ca-Si	MA-IN905XL	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Zn-Al	SiC <sub>w</sub> /6061	Fe <sub>3</sub> Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	α, β Sialon
Al-Ca-Zn	MA-IN9052	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /2014	SiC <sub>w</sub> /7075	Fe <sub>3</sub> (Si,Al)	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> N <sub>4</sub> /SiC
Supral 100	Al-Ti	SiC <sub>p</sub> /2024	SiC <sub>w</sub> /7475	Nb <sub>3</sub> Al	MgO doped Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub> (nano crystalline)
Al-Li	Mg-Al-Zr	SiC <sub>p</sub> /2618	SiC <sub>w</sub> /Zn-Al	Ni <sub>3</sub> Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WC/Co
Al8090	Mg-Li	SiC <sub>p</sub> /IN9021	α Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /2124	Ni <sub>3</sub> Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5Pt	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-y</sub>
Al-Mg-Cr	IN718	SiC <sub>p</sub> /Al-Li	α Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /7064	Ni <sub>3</sub> (Si,Ti)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 30TiC	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-y</sub> -Ag
Al-Mg-Mn	MA6000	SiC <sub>w</sub> /2024	β Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /2124	Ti <sub>3</sub> Al	BaTiO <sub>3</sub>	Y-TZP
Al-Ni	SP700	SiC <sub>w</sub> /2124	β Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /6061	TiAl	BaO <sub>2</sub> -Ceramics	Y-TZP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al-Ni-Mn Ti합금(nano crystalline)		SiC <sub>w</sub> /2324		TiAl-Ti <sub>3</sub> Al	Fe <sub>3</sub> C/20vol%Fe	CuO doped TZP
MA-IN9021					hydroxyapatite	glass dope TZP
MA-IN90211					PbTiO <sub>3</sub>	ZnS

수 있다. 이와 같은 소재들의 초소성 성형기술의 응용은 난가공성 소재들의 소성가공능을 향상시켜 항공산업 이외의 산업에서 그 응용분야를 개척하는데 많은 역할을 할 것으로 기대된다.

### 3.1 금속재료의 초소성과 그 응용

금속재료의 초소성은 Al, Ti, Fe, Zn, Cu, Mg 합금 등에서 관찰할 수 있으며 Al과 Ti합금 등과 같은 경량 고강도 합금의 경우는 내식성, 표면처리성 등이 뛰어나 오래전 부터 항공산업을 위주로 실용화 되었으며 최근에는 여러 산업분야에 응용되어 오고 있다. 그 배경에는 초소성 가공의 고속화, 저온도화, 확산접합 기술을 이용한 일체성형 등과 같은 신기술 개발이 더욱 진전되고 있기 때문이다.

#### 3.1.1 Al계 합금의 초소성 성형

Al계 초소성 합금으로는 Al-Zn-Mg-Cu(7475, 70 75), Al-Mg(Supral 5000, 5083 등)등과 같이 정적 재결정(RI-ITMT법 등)에 의해 제조되는 소재와 Al-Cu(Supral 100), Al-Li(2090, 8090)과 같이 동적재결정에 의해 제조되는 소재가 대표적이

며, 그 외에도 많은 종류의 합금이 개발되어 있다. 표 2는 공업적 규모로 생산되고 있는 초소성 Al 합금의 종류와 화학조성을 나타내고 있다. 여기서 7xxx계 합금의 경우는 여러 가지 가공열처리법이 개발되어 있고 항공기 부품으로 가장 많은 응용이 이루어지고 있다. 현재 알려져 있는 가공열처리법으로는 ISML-ITMT(Intermediate Thermo-Mechanical Treatment), FA-ITMT, RI-ITMT[3] 등이 있으며 이러한 소재들은 Door Pan, Sine Wave Beam, Copilot's Floor, Waffle Pan 등의 항공기 부품에 적용되고 있다. 그림 5는 F-5E Avionics Deck Waffle Pan의 초소성 성형품의 외

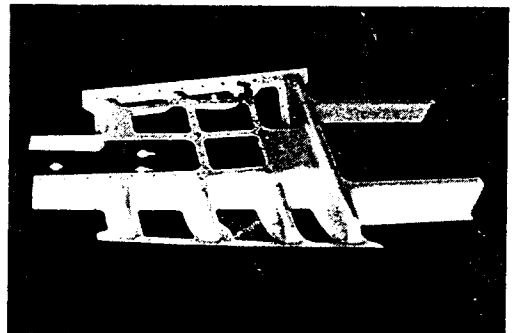


Fig. 5 Al 초소성 성형품 예(Avionics Deck "Waffle Pan" After Trimming)

표2. 대표적 초소성 알루미늄 합금

합금명 (화학조성/mass%)	열처리	상온강도/MPa			
		$\epsilon = 0\%$		$\epsilon = 150\%$	
		$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_B$
ALNOBI-1 (5083 type: Al-4.7Mg-0.65Mn-0.13Cr)	AF	160	300		
GK 45 (5083 type)	AF	145	290		
Formal 545 (5083 type)	AF	140	292	130	280
Supral 5000 (Al-2.1Mg-0.15Cu-0.4Zr)	AF	135	220		
Supral 100 (Al-6.0Cu-0.25Mg-0.2Zr)	T6	310	455	310	420
Supral 220 (Al-5.9Cu-0.35Mg-0.4Zr)	T6	350	430	395	455
8090 (Al-0.25Li-1.2Cu-0.7Mg-0.1Zr)	T6	390	470	370	430
2090 (Al-2.3Li-2.7Cu-0.12Zr)	T6	315	375		
7475 (Al-5.7Zn-1.5Cu-2.3Mg 0.2Cr)	T6	510	545	510	545
KS 7475 (7475 type)	T6	468	536		
D 75 S (7475 type)	T6	460	525		

관을 나타내는 사진으로 48개의 부품으로 조립되던 것을 5개 부품으로 부품수를 감소시키는 효과를 가져왔다. 최근에는 그 응용이 확대되어 Al 5083 초소성 합금이 건축자재로 이용되고 있으며 래저용 보트, 이륜차 연료탱크, 자동차 부품 등에도 적용되고 있다. 이 가운데 이륜차용 연료탱크의 연구개발 사례를 살펴 보면 다음과 같다. 이륜차용 연료탱크는 이륜차의 외관을 좌우하므로 자동차의 연료탱크와는 달리 소비자의 시각적인 느낌을 고려해야 하며 탱크 바로 하단에 연소기관이 위치하기 때문에 누수 현상과 같은 작은 결함 또한 허락하지 않는, 안전성이 요구되는 부품이다. 기존의 연료탱크는 그림 6과 같이 철계나 Al소재를 박판성형에 의해 상부와 하부로 나누어 제조한 후 TIG용접을 거쳐 탱크를 제조한 후 시각적인 효과를 위해 용접부위를 사상하게 되는데 소비자의 시각적욕구를 만족시키기 위해서는 이와같은 작업이 매우 정밀하게 수행되어야 하며 형상이 3차원이기 때문에 마무리 가공에 많은 시간과 어려움이 따른다[4]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 개발된 초소성 성형품(Al 5083 소재)은 1차 예비성형을 거친 후 그림 7과 같이 초소성 성형(Blow Forming)을 이용하므로써 일체형으로 제조가 가능하다. 이와 같이 초소성 성형을 이용하여 제조하면 종래의 제조법에 비해 제품 당 약 20%의 비용절감을 기대할 수 있다. 이때의 핵심기술은 초소성 성형 후 발생하는 재료내부의 공동(Cavitation, Void)발생의 제어에 있다. 공동현상은 Al계 합금의 초소성 성형시 가장 문제점이 되고 있는 것으로서 공동이 발생한 제품은 구조용 부품으로 사용이 곤란하기 때문이다. 공동은 초소성 변형이 진행되면서 급격히 발생되며 Ti합금의 경우에는 비교적 잘 나타나지 않는 결함이다. Ti합금에 비해 Al합금이 항공우주 부품에 적용이 어려웠던 이유도 Al합금에 발생하는 공동현상 때문이며 Al계 합금의 초소성성형 기술개발의 핵심이라고 할 수 있다. 공동현상은 고온에서 미세한 조직을 유지하기 위해 존재하는 제2상 입자가 그 원인으로 추측되고 있으나 아직 정확하게 규명이

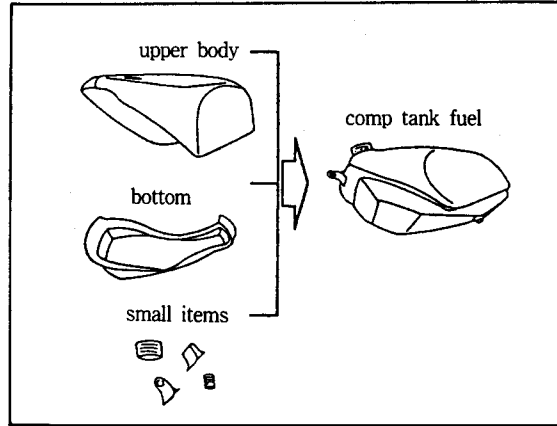


Fig. 6 이륜차용 연료 탱크의 구성부품

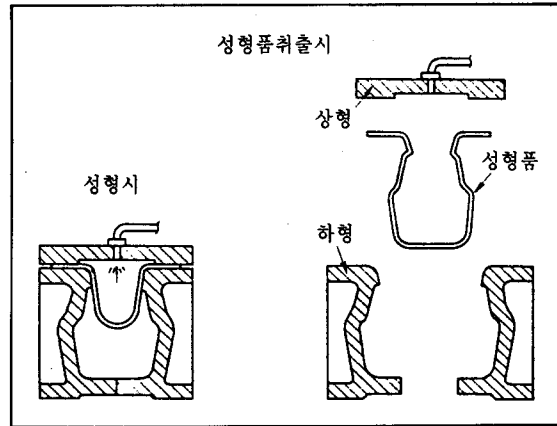


Fig. 7 이륜차용 연료 탱크 일체성형의 금형구조

되지 않은 상태이다. 공동의 핵 생성자리는 입계 석출물 근처나 기지(Matrix)내의 석출물 주위 그리고 결정립이 만나는 삼중점으로 알려져 있다. 공동의 특징은 첫째, 변형률이 큰 부위에서 더욱 크고 많이 발생되며, 둘째, 입계에 존재하는 미소 공동들과의 합체에 의해 그 부분에 존재하는 재료들의 하중 지탱 능력이 갑자기 떨어지고 응력이 재료 전체에 걸쳐 재분배될 때 까지 국부적인 공동성장의 가속화가 발생되며, 셋째, 성장이외에 합체도 일어난다. 이러한 현상에 영향을 미치는 재료측면의 요인으로는 결정입도, 금속간 화합물, 내부기공(Porosity) 등을 들 수 있다. 결정입도는 미세할수록 발생이 적으며 금속간 화합물은 Al-Cu-Fe, Al-Fe-Si 등의 다상포정계 정출물이

공동의 발생점이 된다. 또한 내부기공도 공동의 발생점이 되므로 가능한 한 내부기공이 없는 것이 좋다. 이러한 공동의 발생을 억제하기 위해 초소성 성형으로 이륜차용 연료탱크를 제조할 때는 성형온도를 높이고 성형압력을 증가시키므로써 공동 발생량을 강도상 임계치 보다 작게 하였는데 성형온도와 압력이외에 발생량을 억제하는 방법으로는 배압(Back Pressure)을 작용시켜 정수압 변형이 이루어 지도록 하는 방법과 장시간 예비 가열을 하는 방법, 예비 변형량을 주는 방법등이 있다. Al합금의 경우에 초소성/확산접합 기술의 핵심은 매우 안정한 표면 산화피막의 영향을 감소시키고 높은 접합강도를 재현성있게 얻는데 있다. 실험실적 연구에 의하면 적절한 표면처리를 통하면 8090합금과 7475합금의 경우에 접합강도가 모재강도와 동등이상의 값을 나타내고 있다. 표 3은 Al합금의 확산접합법과 접합강도를 나타내고 있으며 더욱 많은 실용화를 위해서는 실용적인 표면처리법, 접합시간의 단축, 접합강도 평가법의 표준화가 이루어져야 한다.

3.1.2 Ti계 합금의 초소성 성형

Ti계 초소성 합금은 Ti-Al-V(-6Al-4V, -3Al-2.5V, -5Al-2.5V), Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, CORONA5 등이 있으며 가장 대표적인  $\alpha+\beta$ 형 합금인 Ti-6Al-4V과 강도가 더 높은 Ti-6Al-6V-2Sn이 초소성 성형부품의 실용화

에 가장 많이 이용되고 있다. 초소성 성형을 통하여 항공기 부품에 적용된 부품들은 Nacelle Structure, ECS Door, Center Beam Webs, APU Door등이 있으며[5], Ti합금은 높은 비강도를 갖는 소재이기 때문에 초소성 성형을 통하여 일체형으로 제조하여 부품 수를 줄임으로써 많은 경제적 이득을 얻고 있다. Nacelle Frame의 경우 55%의 원가절감과 33%의 중량감소 효과가 나타났다.

현재 사용중인 Ti합금은 그 종류에 따라 다소 다르지만 낮은 변형율력, 공동의 생성방지 및 결정립 조대화 방지 등의 관점에서 성형온도는 850~930°C, 변형속도는  $10^{-3}/\text{sec}$  이하의 조건으로 생산되고 있다. Ti합금의 경우, 초소성 성형품의 강도는 원소재의 강도와 거의 유사한 정도로 우수한 성질을 유지한다. 그림 8의 인장시험 결과에

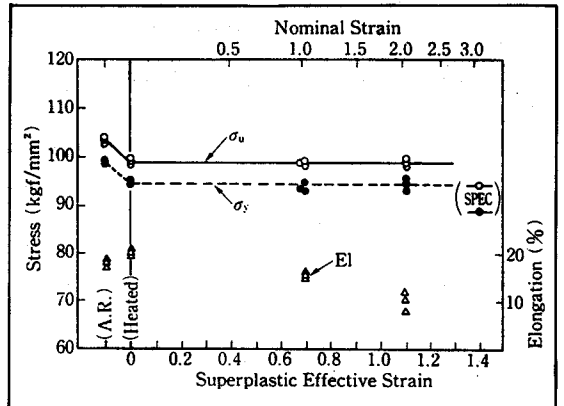


Fig. 8 기계적 성질에 미치는 초소성 성형의 영향

표3. 각종 알루미늄합금의 확산 접합방법과 접합강도

합 금 (판두께 t/mm)	접 합 방 법			접 합 강 도 전단응력/MPa
	표면 마무리	접 합 조 건		
		온도/K	응력/MPa	
8090 (t=4)	다이아몬드 입자연마			181~202 모재:239
	Cu			상동
8090+20vol% SiC입자	Cu	833	0.75~1.5	> 170
7475 (t=2.5)	전해연마+ 화학적처리	773~793	5.4~9	모재파단
7475	Ar분위기 중 기계연마	773~783		320~410

따르면 강도저하는 원소재에 비해 약 5% 정도로 미소한데 조직관찰 결과, 가열된 소재의 조직과 동일한 양상을 보이고 있어 초소성 성형시에 강도저하의 원인은 없는 것으로 생각된다. 실제로 Ti합금의 초소성 성형품은 종래 제조법으로 제작된 부품에 비해 강도나 안전성이 더 우수한 것으로 알려져 있다.

Ti합금의 초소성 성형품은 Door, Frame, Fitting류, 인공 위성용 연료탱크 등과 같은 항공우주 부품에 많은 적용사례가 있으며 최근에는 기타 산업분야에서도 적용사례가 많이 알려지고 있다. 그림 9는 항공기용 Fitting류로서 종래에는 Block에서 절삭가공을 통하여 제조되었으나 Ti합금의 경우 재료비와 가공비가 매우 고가이기 때문에 초소성 판재성형으로 공정이 전환되어 약 50%의 원가절감을 달성시켰다. 또한, 그림 10은 제트엔진의 Frame으로서 3개의 열간성형품을 용접하여 제조하므로써 용접부의 과대한 변형으로 추가적인 교정공정이 필요하였으나 초소성성형으로 일체성형하므로써 제조공정이 대폭 절감되었다. 우주용 부품으로는 그림 11과 그림12에 나타나 있는 바와 같이 과학위성용 연료탱크와 우주왕복선용 방열판등이 있는데 연료탱크의 경우는 원소재(판재)의 두께를 부위별로 변화시켜 성형품의 두께가 균일하도록 하므로써 약 20%의 중량감소 효과를 얻을 수 있었다. 인공위성의 경우 중량은 위성의 수명과 직접적인 관련이 있는 것이므로 매우 큰 효과를 볼 수 있는 경우이다.

초소성 성형과 함께 Ti합금을 항공우주 분야에 적극적으로 이용하도록 한 기술은 초소성/확산접합기술로서 AFT Fan Duct, Fan Blade, Hot Air Nozzle, Door Panel 등의 적용사례를 예로 들 수 있다. 초소성 기술과 확산접합 기술을 조합하여 제조되는 부품들은 주로 수많은 리벳 등에 의해 조립되던 것을 확산접합 기술을 이용하므로써 일체형으로 제조하여 제조원가의 절감과 함께 강도 면에서 안전성에 대한 재현성을 증가시키므로 강도부재에 많은 이용이 이루어지고 있다. Door

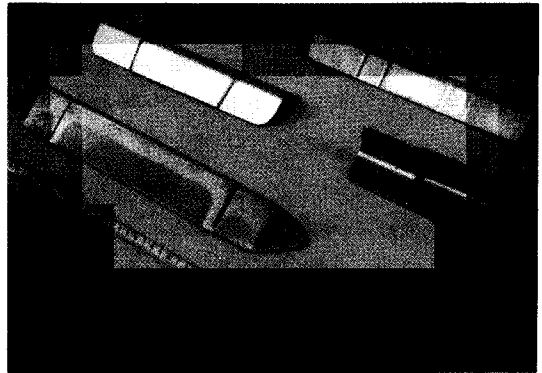


Fig. 9 Ti 합금의 초소성 성형의 예  
(항공기용 Fitting류, Ti-6Al-4V-2Sn)

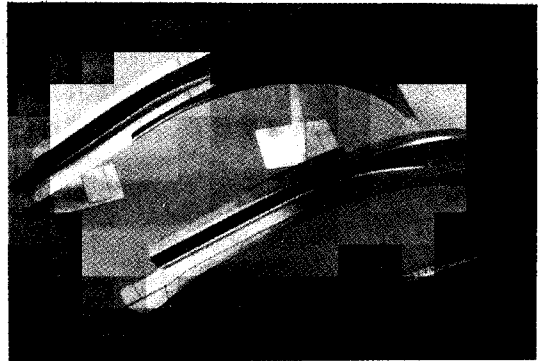


Fig. 10 Ti 합금의 초소성 성형의 예  
(제트 엔진용 프레임, Ti-6Al-4V-2Sn)

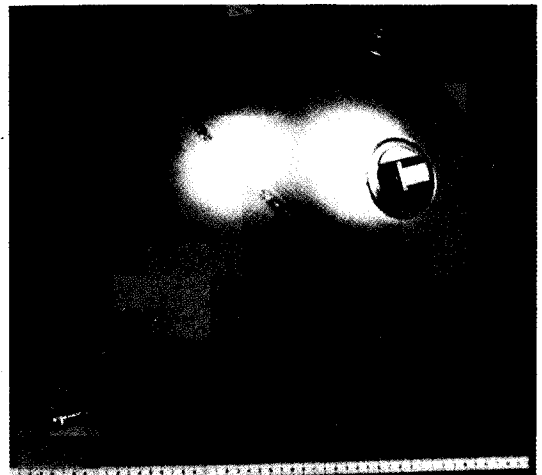


Fig. 11 과학 위성 자세제어용 연료탱크(Ti-6Al-4V)



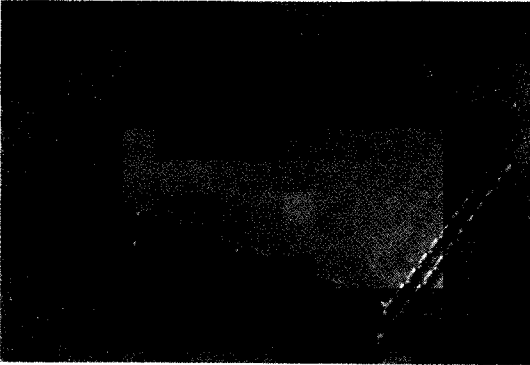


Fig. 12 우주 왕복선용 열방지재  
(Ti-6Al-2Sn-4Zn-2Mo)

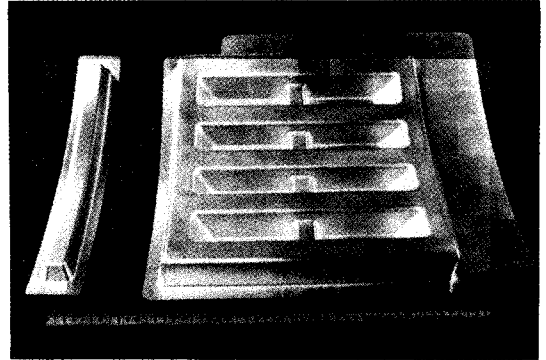


Fig. 13 Al 7475 합금의 초소성 성형의 예  
(Door Panel)

Panel은 그림 13에 나타나 있는 부품으로 16개 부품 500개의 리벳으로 제조되어 오던 것을 2개의 판으로 제조가 가능하게 되었다.

최근에는 이와같은 항공우주분야 이외의 산업에도 초소성 성형기술을 응용하고자 하는 노력을 통해 아이젤과 같은 스포츠용품, 시계와 같은 생활 필수품과 의치(義齒)와 같은 의료기기 등에도 적용사례가 나타나고 있다. Ti합금은 경량, 고강도이면서 인체와 친화성이 좋은 소재이며 초소성 성형은 금형과 거의 동일한 형상 및 치수를 얻을 수 있고 잔류응력에 의한 탄성회복이 거의 없기 때문에 Ti-6Al-4V 소재를 이용한 의치는 개개인의 치아구조에 꼭 맞는 치아를 제조할 수 있는 강점이 있다. 또한, Ti합금은 내식성, 내마모성과 함께 인체와의 친화성이 좋아 인체와 알레르기 반응이 나타나지 않으므로 각광을 받고 있으며 생산성을 향상시키기 위해 일본에서는 변속 초소성 단조법을 이용하여 생산성을 향상시키고 있다. 변속 초소성 단조법이란 가공의 초기에는 통상의 열간단조 속도로 성형을 한 후 가공력이 증가되는 시점부터 가공속도를 감소시켜 초소성 성형을 행하는 단조법으로 대량생산에 적용이 유리한 신기술이다.

### 3.1.3 기타 금속재료의 초소성 성형

Al과 Ti합금 이외에 초소성 합금으로는 철계합금(고탄소강, 2상 스테인레스강, 저탄소합금강, 오

스테나이트 스테인레스강 등), 아연 합금(Zn-22Al 공석합금), 마그네슘 합금(Mg-8.5Li, Mg-9Li, Mg-8Li-1Zn)등이 있으며 이들은 소재가격이 저렴하기 때문에 초소성 성형의 응용이 불필요할 것으로 생각되어 지고 있으나 내식성이 좋은 2상 스테인레스강 등과 같은 소재들의 소량 부품제조 등에 적절한 적용을 위해 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

## 3.2 신소재(세라믹, 금속간화합물, 복합재료)의 초소성 성형과 그 응용

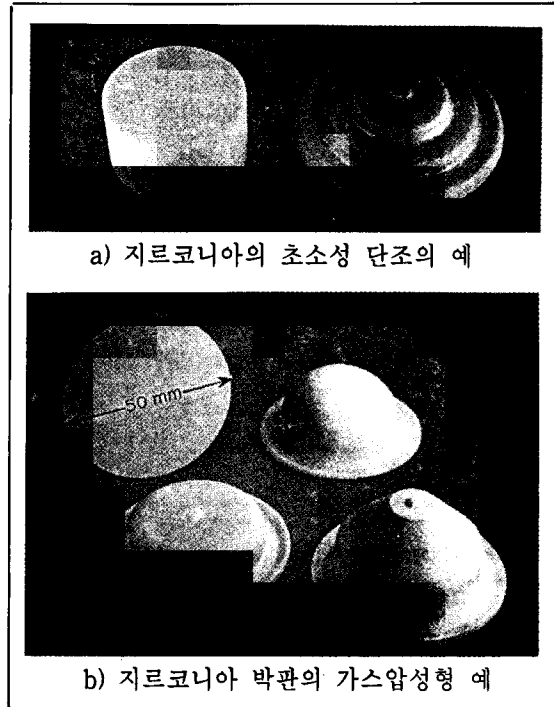
고온에서 뛰어난 기계적특성을 가지는 세라믹과 금속간 화합물을 고온 구조재료로서 이용하는 데 가장 중요한 문제점은 취성을 극복하는 것이며 또한, 고비강도의 특징을 지니는 금속기지 복합재료는 강화섬유가 취성적이라는 것이 문제이다. 따라서, 이들 신소재는 일반적으로 소성가공이 매우 곤란하다. 그러나, 1980년대에 접어들면서 입자분산강화 금속기지 복합재료의 고속 초소성과 세라믹의 초소성이 실현된 이래 많은 초소성 성형기술이 개발되고 있다[6]

### 3.2.1 세라믹의 초소성 성형

초소성 성질이 발현되는 세라믹계 재료에는 지르코니아, 세라믹기지 복합재료, 질화규소등이 있다. 세라믹의 초소성 특성 발현의 외부인자는 온

도, 응력, 변형속도 등이 있는데 연구의 목표는 가능한 한 온도와 응력을 낮춘 상태에서 보다 높은 변형속도를 얻고자 하는 것이므로 이를 위해 결정립 미세화와 입계제어등이 소재개발의 궁극적인 목표가 되고 있다. 세라믹 초소성 재료의 입자 크기(Grain Size)는  $1\mu\text{m}$ 이하이며 입계제어의 인자는 미량 불순물의 조성과 양에 있다. 고온도 세라믹에서는 용질의 입계편석, 석출입자와 분산입자가 변형속도에 영향을 미치므로 이를 제어하는 것이 중요한 기술이다. 강도와 인성이 우수하며 고온에서 사용되는 고강도, 내마모 소재인 지르코니아의 일종인 TZP는  $1400^\circ\text{C}$  이상의 온도에서 초소성 성질을 얻는데 용이하다. 그림 14는 지르코니아 소재를 초소성 단조한 예와 초소성 판재성형(Blow Forming)한 예를 나타내고 있는 사진이다. 또한 의도적으로 비정질상을 첨가하면 저온에서 초소성 성형이 가능하게 되어  $1200^\circ\text{C}$ 에서 변형속도를 2배 이상 증가시킬 수 있게 된다. 세라믹기지 복합재료는 세라믹의 인성향상을 위해 세라믹을 모상으로하는 입자분산 복합재료인 휘스커(Whisker) 분산 복합재료가 개발되고 있다. 일반적으로 제2상 입자를 분산하면 모상의 입도성장을 억제하여 미세립 재료를 얻을 수 있어 복합재료화는 초소성 발현에 유효한 수단이다. 강도와 인성의 적절한 고온 내마모 소재인 질화규소의 초소성은 탄화규소와의 복합화에 의한 결정립 미세화에 의해서 최초로 실현되었으며 최근에는 질화규소 단상재료 또한 초소성을 발현하는 것으로 보고되고 있다. 또한, 결정립 미세화에 의해서 굴곡강도가  $1.6\sim 2\text{ GPa}$ 라는 경이적인 고강도 질화규소가 개발되었으며 초소성 성질을 나타낸다는 보고도 있다.

분말아금법에 의해 제조된 세라믹 성형체는 소결단계에서 수축되어 치수정밀도가 매우 좋지 않으며 따라서 연삭·연마가공이 필요하지만 초소성성형에 의해 제조하면 우수한 치수 정밀도와 표면조도를 얻을 수 있으므로 후가공을 제거할 수 있다. 또한, 최근에 주목할 만한 기술은 세라믹과 금속을 초소성/접합기술에 의해 서로 접합을



a) 지르코니아의 초소성 단조의 예

b) 지르코니아 박판의 가스압성형 예

Fig. 14 지르코니아의 초소성 성형의 예

할 수 있다는 것이다.

### 3.2.2 금속간 화합물의 초소성 성형

금속간 화합물은 타 합금에 비해 가공이 매우 어려운 소재이며 냉간이나 열간 모두 세심한 주의가 필요한 소재인데 최근 TiAl합금에서 초소성 변형시 입계 미끄러짐을 촉진시키는 제2상을 변형후 열처리로 제거하는 기술이 개발되어 금속간 화합물에서도 초소성 성형의 개발 및 응용이 활발히 추진되고 있다. Nobuki는 결정입경이  $10\mu\text{m}$ 이하의 V첨가  $\gamma/\alpha_2/\beta$  3상 TiAl합금을 성형온도  $1047\sim 1147^\circ\text{C}$ , 변형속도  $10^{-3}/\text{sec}$ .이하에서 600%의 연신률을 얻을 수 있었으며 Ameyama는 MA-HIP처리된 초미세립 Ti-48mol%Al 소재를 이용하여 초소성 특성을 발현시켰다. 이외에도  $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{FCC}$ 고용체,  $\text{Ni}_3\text{Si}/\text{FCC}$ 고용체,  $\text{NiAl}/\text{Ni}_3\text{Al}$ 등에서도 초미세립 초소성이 확인되었다. 또한 최근에는 Ti을 첨가한  $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Fe}-28\text{mol}\%\text{Al}-2\text{mol}\%\text{Ti})$ 에서도 585%까지 초소성 신장이 보고되었는데 조직관

찰 결과에 의하면 결정립의 미세화에 동적재결정이 중요한 역할을 하고 있음을 확인하였다. 따라서, 초기조직의 크기를 미세하게 제어하면 금속간 화합물에서도 초소성 성형이 가능한 것을 알 수 있다.

### 3.2.3 금속기지 복합재료의 초소성 성형

금속기지 복합재료는 강화재의 형태(연속섬유, 단섬유, 입자)에 의해서 소성가공이 가능하며 기지금속의 유동성이 뛰어나고 섬유에 과대한 인장이나 압축응력을 가하지 않으면 섬유단상의 가공한계까지는 소성가공이 가능하게 된다. 소성가공의 사례로는 압출, 디프 드로잉(Deep Drawing), 신장성형(Stretching), 형단조, 판굽힘등이 있으며 섬유에 손상이 생기지 않거나 전단변형에 의해서 박리가 생기지 않도록 하면서 유동응력을 저하시키는 것이 핵심기술이다. 압출가공의 예로는 SPZ(초소성 아합금)분말에 SiC 휘스커를 혼합한 후 복합압출장치를 이용하여 복잡형상 부품을 한번의 가공으로 제조하였다. 제품은 외면에 나사산이 존재하는 내경 18mm, 유효반경 1mm의 중공 원통용기로서 휘스커와 분말을 혼합하는 과정 및 압출가공중에 휘스커가 파손되지 않도록 주의해야 한다. 디프 드로잉의 예로는 SiC입자를 10~30% 함유한 SPA(초소성 알루미늄 합금)분말을 핫프레스(Hot Press)로 원통용기를 성형하므로써 표면경도 향상과 이방성 제거 등의 이점을 얻었으며, SiC함유량이 증가할수록 한계 드로잉비가 감소되었다. 신장성형의 경우는 SiC가 입자강화된 SPZ 분말로 제조된 판재를 이용하여 배압을 가하면서 성형을 하므로써 인장력을 가하는데 발생하는 균열결함을 감소시켰으며, 공동 또한 2%까지 감소시킬 수 있었다. 형단조의 개발 예로는 SPA에 SiC입자를 혼합한 입자강화 복합재료를 이용하여 단조한 결과 매우 날카로운 부분까지 정밀하게 제조가 가능하며, 강도 또한 향상되는 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그림 15는 형단조에 의해 제조된 금속기지 복합재료의 외관을 나타내고 있다.

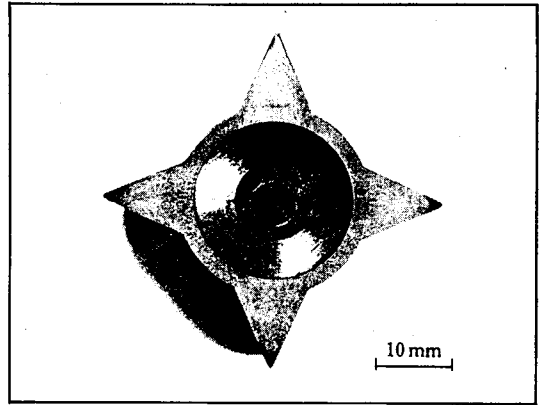


Fig. 15 금속기지 복합재료의 형단조

### 3.3 고속 초소성 성형기술과 그 응용

고속 초소성은 변형속도가  $10^2/\text{sec}$ . 이상일 때 초소성 특성이 발현되는 것을 말하며 초소성 성형의 낮은 생산성에 따른 저해요인을 극복할 수 있는 첨단기술이다. 따라서, 초소성 성형의 응용범위를 증대시키기 위해 활발한 연구가 진행되어 MA(Mechanical Alloy)법에 의해 제조된 Al-Mg-Cu계 IN9021 합금은  $10\sim 300/\text{sec}$ .의 변형속도에서 1000%에 이르는 초소성 성질을 발현시키는데 성공하였다. 최근에는 MA재와 비정질재 또는 나노(Nano)결정의 분말을 적절한 가공열처리와 압출성형을 이용하여 500% 이상의 초소성 성질을  $1\sim 4000/\text{sec}$ .의 변형속도에서 얻을 수 있게 되었다. 초소성 상태에서 변형속도는 입자크기의 역수에 비례하므로 입자를 미세화하면 할수록 변형속도를 증가시킬 수 있는 것이다. 그림 16은 Al합금의 결정립 크기와 초소성 변형속도의 관계를 나타내고 있다.

현재, 보고된 Al계 고속 초소성 재료의 특성 및 결정립 크기를 정리하면 표 4와 같다. 공업적으로 일반적인 주조법을 이용하여 제조된 일부 동적재결정 합금을 제외하고는 대부분의 고속 초소성 재료는 분말야금을 이용하여 제조되고 있다. 고속 초소성 재료를 제조하는 공정을 특징별로 분류하면 다음과 같다. 첫째, 급냉응고법으로 제조된 분

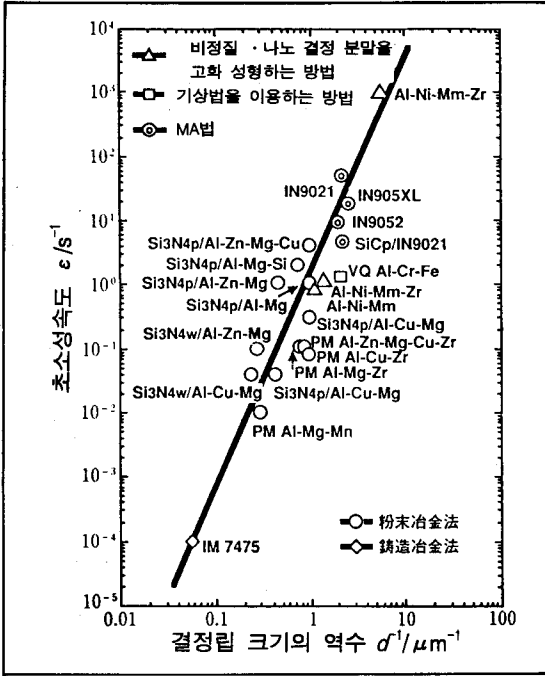


Fig. 16 알루미늄계 재료의 결정립 크기의 역수와 초소성 속도와의 관계

말을 열간압출 등을 포함한 적절한 가공열처리를 이용하여 제조하는 방법. 둘째, 분말야금과 MA법을 조합하여 제조하는 방법. 셋째, 초급냉응고법에 의해 제조된 비정질분말 또는 나노결정분말을 적절한 가공열처리와 압출을 이용하여 제조하는 방법. 넷째, 기상(氣相)법과 열간성형을 조합하여 제조하는 방법 등이 대표적인 방법이다. MA와 기상법을 이용한 Al합금과 복합재료에서는 500nm 정도의 미세한 결정립을 얻을 수 있으며 비정질분말 또는 나노결정분말을 이용해서 제조한 결정질 Al합금에서는 평균 결정립의 크기가 100nm 정도의 초미세조직을 얻을 수 있다. 그림 17에서 나타난 것처럼 새로운 제조공정의 개발로 결정립크기의 미세화가 달성되어 각종 고속 초소성 재료가 개발되었다. 특히, 결정립크기가 1 $\mu$ m이하의 재료에서는 변형속도가 정지수(Positive Exponent Superplasticity)를 가질 정도로 빠른 초소성을 나타내고 있다. 현재, 고속 초소성 재료의 결정립크기의 목표치는 판재의 경우 3 $\mu$ m이하, 벌크(Bulk)재의 경

표 4. 대표적인 알루미늄계 고속초소성재료의 초소성 특성과 결정립 크기

재 료	온도 /K	변형속도 /s <sup>-1</sup>	응력 /MPa	m값	최 대 연신율 /%	결정립 /nm
통상의 분말야금법에 의해 제조된 소재						
Al-4.3Cu-0.8Zr	773	10 <sup>-2</sup>	8	0.3	600	1630
Al-5Mg-1.4Cr	848	10 <sup>-2</sup>	3	0.5	510	3370
Al-5Mg-0.8Zr	773	10 <sup>-1</sup>	21	0.3	570	1120
Al-6Zn-2Mg-2Cu-0.8Zr	788	7X10 <sup>-2</sup>	8	0.3	1060	1200
Al-4Cu-1.5Mg(2124)/20%SiC <sub>w</sub>	798	3X10 <sup>-1</sup>	10	0.3	300	
Al-4Cu-1.5Mg(2124)/20%Si <sub>3</sub> N <sub>4p</sub> (P=1 $\mu$ m)	788	4X10 <sup>-2</sup>	2	0.3~0.5	840	2000
Al-2.5Mg(5052)/20%Si <sub>3</sub> N <sub>4p</sub> (P=0.2 $\mu$ m)	818	1	6	0.3~0.5	700	1000
Al-1Mg-1Si(6061)/20%Si <sub>3</sub> N <sub>4p</sub> (P=0.2 $\mu$ m)	833	2	5	0.3~0.5	620	1300
기계적 합금화법을 이용하여 제조한 소재						
Al-4Cu-1.5Mg(IN 9021)	823	50	18	0.5	1250	500
Al-4Mg(IN 9052)	863	10	15	0.6	330	5000
Al-4Mg-1.5Li(IN 905 XL)	848	20	12	0.6	190	4000
Al-4Cu-1.5Mg(IN 9021)/15%SiC <sub>p</sub> (P=2 $\mu$ m)	823	5	5	0.5	610	500
비정질 분말을 이용하여 제조한 소재						
Al-14Ni-14Mn	885	1	15	0.5	650	1200
Al-14Ni-7Mn-1Zr	873	1	14	0.5	650	800
	773	1000	20	--	550	100
기상법을 이용하여 제조된 소재						
VQAl-7Cr-1Fe	898	1	20	0.5	505	500

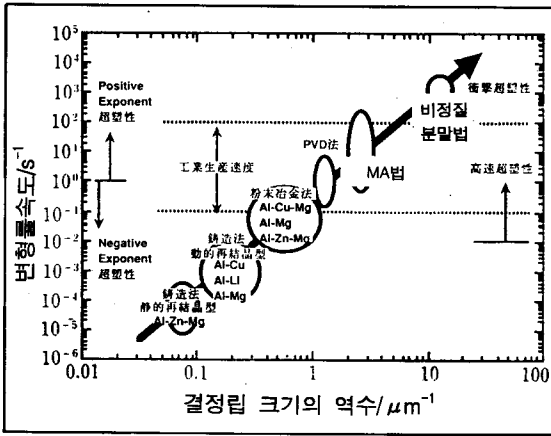


Fig. 17 다양한 가공열처리 공정으로 제조된 알루미늄 합금의 결정립크기와 초소성속도와의 관계

우  $1\mu\text{m}$  이하이다. 이들 소재는 각각  $10^2/\text{sec.}$ ,  $10^{-1}/\text{sec.}$ 의 변형속도에서 초소성이 발현되는 수준이다. 고속 초소성의 변형기구는 종래 초소성 재료의 기구와 기본적으로 동일하므로 주 변형기구인 입계 미끄럼과 부가조정기구가 초소성 유동을 진행시키는 역할을 한다. 그러나, 부가조정 기구로서 종래의 확산유동과 전위운동 이외에 액상 등의 새로운 부가조정 기구 보조가 관련되고 있다는 주장이 있다. 부가조정 기구 보조의 적절한 양 및 최적의 분포상태를 실현하는 방법이 중요한 연구 과제이다. 고속 초소성 재료를 이용하여 성형한 예는 Al-Ni-Mn-Zr 합금을 이용해서 커빅테로드 형상의 단조품을 성형한 경우로서 이때 특이한 것은 통상의 초소성 단조와는 달리 항온단조

를 이용하지 않고도 성형이 가능하다는 것이다[7] 따라서, 고속 초소성으로 단조를 할 때는 소재만 가열하여 성형을 할 수 있으며 표면이나 내부에 결함이 전혀 발생되지 않는 이점이 있고, 생산속도면에서도 많은 경제적 이익을 가져올 수 있으나 재료내부에 공동이 발생하는 것은 해결해야 할 문제점으로 남아 있다. 그러나, 공동의 길이가  $1\mu\text{m}$  이하로 매우 작게 나타나므로 성형후 정적가열에 의해 공동의 길이를 축소시킬 수 있는 특징이 있다.

#### 4. 초소성 성형품의 시장현황

현재로서는 초소성 성형품의 시장은 급속히 확대되지는 않고 있는 것이 현실이다. 그러나, 점차적으로 선진국의 소재와 가공회사를 중심으로 상업적인 시장개척을 통하여 항공우주 산업이외의 분야에서도 그 적용이 증가되고 있다.

표 5는 초소성 성형에 사용되고 있는 재료를 사용비율과 함께 정리한 것으로 이 소재들의 특징은 수요 신장이 매우 크다기 보다는 재료의 신뢰성을 확인할 수 있는 재료의 물성치들이 확립되어 있다는 것이며 이 가운데, Ti 합금은 다양한 재료특성이 확립되어 있어 초소성 성형품으로 사용실적이 가장 많은 실정이다. 따라서, 보다 많은 초소성 재료가 성형품으로 적용이 가능하도록 하기 위해서는 적절한 가격의 소재 제조와 신뢰성을 입증할 수 있는 수준의 특성 데이터를 확립하

표5. 주요 초소성 재료의 사용 비율(일본 NM사, 미국 Superform사)

재료 종류	대표적인 성분치/ 중량 %	사용 현황
5083 SPF	Al-4.5Mg-0.1Cr	Superform: 45%, NM: 약 Al 합금의 100%
2004	Al-6Cu-0.4Zr	Superform: 50~70%
7475 SPF	Al-5.7Zr-2.3Mg-1.5Cu-0.2Cr	Superform: 2% 이하
Ti 64	Ti-6Al-4V	NM: 50%에서 증가경향
Ti 6242	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	NM: 10%에서 증가경향
SP 700	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe	NM: 증감없음
NAS SD 65(SUS 329 JI)	Fe-23.5Cr-5.7Ni-1.4Mo-N	NM: 증감없음
NAS SD 65(SUS 329 J 4 L)	Fe-25Cr-6.5Ni-8Mo-N	NM: 감소경향

는 것이 가장 중요하다.

그림 18은 일본의 경우에 초소성 성형품의 산업별 수주비율을 나타내고 있으며 그림 19는 미국 Superform사의 산업별 적용 비율을 나타내고 있는데 항공우주산업을 포함한 운송산업이 절반 이상을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 비율을 나타내는 것에 가장 큰 이유는 경제성(제조원가)의 유무이며 지속적인 시장개척을 위해서는 재료비, 생산속도, 금형비 등을 적절한 수준까지 현실화시키는 노력이 필요하다. AI합금의 초소성 성형의 경우는 재료비와 생산속도가, Ti합금과

2상 스테인레스강의 경우는 금형재료가 내열강이어야 하므로 금형비가 많은 비중을 차지하고 있다.

최근에는 기존 소재와 성형공정의 양적 팽창뿐만아니라 특수한 소재와 성형기술을 이용한 질적성장을 도모하고 있는데 그 예로는 펄프몰드(Pulp Mold)용 JNP금형, Ti합금을 이용한 후라이팬, 특수 표면 형상품 등이 있다. 펄프몰드용 JNP금형은 환경보존문제가 대두되면서 부각된 제품으로 계란이나 사과와 같은 식료품의 포장용기로 사용되는 펄프몰드의 제조에 사용되는 특수금형을 초소성 성형품으로 제조하게 되었다. 그림 20

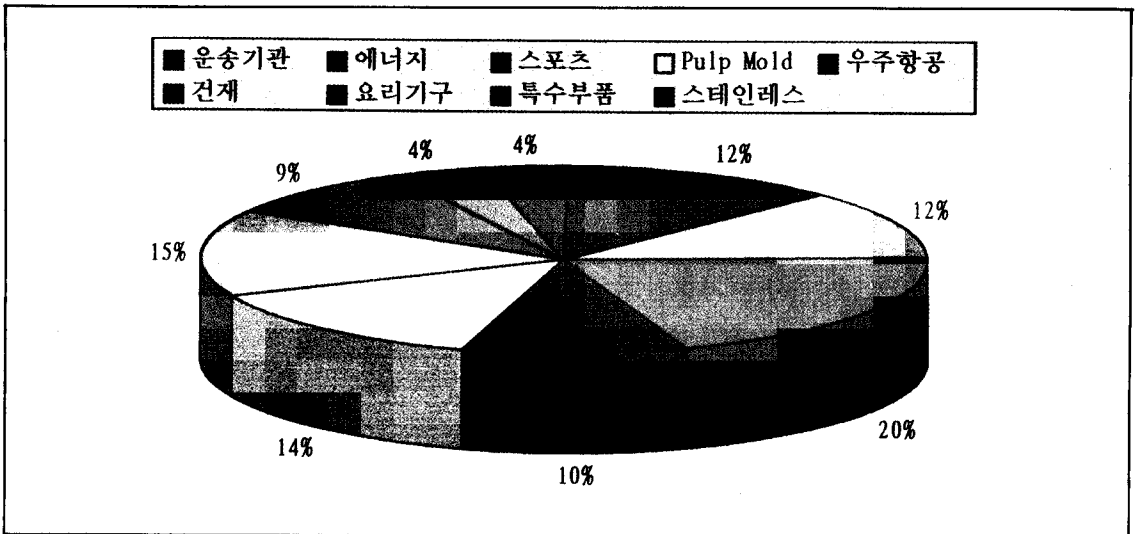


Fig. 18 산업별 수주비율

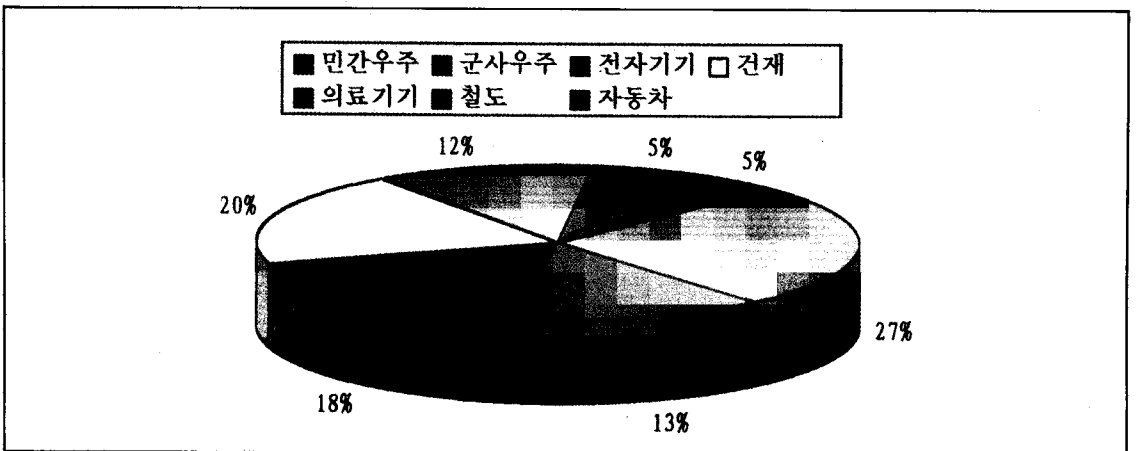


Fig. 19 Superform사의 산업별 생산비율(1993년)

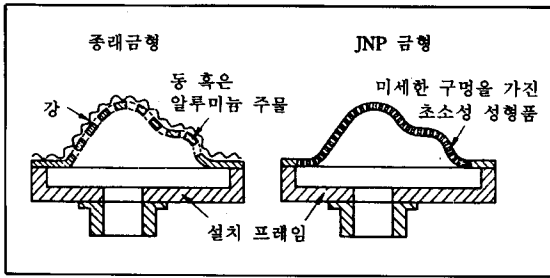


Fig. 20 펄프몰드금형에서의 종래금형과 JNP금형의 비교

은 종래의 펄프몰드와 초소성 성형품을 비교한 것으로 종래에는 몰드에 3mm 정도의 구멍을 형성시키기 위해 60메쉬(mesh) 정도의 동합금과 스테인레스강을 이용하여 제조하였으나 초소성 성형을 이용하여 0.3mm 정도의 구멍이 무수히 존재하도록 일체형으로 제조하므로써 품질향상과 원가 절감의 효과를 달성하였다. 또한, Ti합금을 이용한 후라이팬은 열전도도가 매우 우수하기 때문에 요리의 질을 높일 수 있는 장점이 있다.

이와같이 최근에는 다양한 산업분야에서 초소성 성형기술의 적용이 시도되고 있으며 고부가가치 제품들의 산업화가 가속화될 전망이다.

## 5. 결 론

초소성 성형 기술은 초소성의 우수한 성형성과 함께 확산접합 기술을 조합하여 초소성/확산접합을 응용하는 일체성형 기술에 의해 Ti합금을 중심으로 발전되어 Al합금, 세라믹, 금속간 화합물, 금속기지 복합재료 등의 신소재 초소성 성형기술로의 확대가 이루어지고 있고 또한 최근 나노 구조의 초소성 발현 분말 제조 기술과 분체 성형 기술에 대한 국내의 연구가 활발해 짐에 따라 응용 분야가 점차 넓어지고 있다. 현재, Superform Metals(영국, 미국)사는 연간 265,000개의 초소성 성형품을 제조하고 있는 실정이다. 초소성의 공업적 이용은 항공우주 산업에서 고부가가치 부품을 제조하는 공정으로 이용되어 왔으나 최근에는 전자, CD 등과 같은 전자기기부품 및 자동차와 같

은 운송기기 등에 에너지 절약을 위해 경량화의 목적으로 내식성이 뛰어난 Al-Mg계 합금의 공업적 응용이 기대되고 있다. 이러한 기대에 부응하여 많은 산업화가 이루어지기 위해서는 초소성 특징의 발현정도를 증가시키는 것 보다는 생산성 있는 성형조건의 확립과 평가방법의 표준화에 따른 재료의 신뢰성 확립이 더욱 더 중요하다. 또한, 초소성 현상의 발생원인 및 유동역학에 대한 이론적 확립은 초소성 재료와 성형품에 대한 신뢰도와 산업화의 증가를 가속화시킬 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.M. Story, "Part Selection Criteria and Design Considerations for the Use of Superplastically Formed Aluminum for Aerospace Structure", Superplasticity in Aerospace II, Proceedings of symposium sponsored by the Shaping and Forming Committee, Anaheim, California, pp151, 1990.
- [2] Edward D.Weisert, "The Realization of SPF/DB as a Commercial Fabrication Process", Superplastic Forming Conference Proceedings, Proceedings of symposium sponsored by Los Angeles Chapter of the ASM, Los Angeles, California, 1984.
- [3] 吉田英雄, 田中宏樹, 土田 信, "航空機用 알루미늄의 最近 研究 2", 住友輕金屬株式會社 技術資料, No. R-334
- [4] 高橋明男, 都隆之, "航空宇宙器機における超塑性 成形品の適用, 輕金屬, 1989, pp224
- [5] C. Bampton, F. McQuilkin, G. Stacher, "Superplastic Forming Applications to Bomber Aircraft", Superplastic Forming Conference.
- [6] 若井史傳, 花田修治, 西村 尚, "新素材の超塑性", 塑性と加工, Vol.37, pp27, 1996
- [7] 東 健司, 馬 守, 岩崎 源, "高速超塑性の將來", 塑性と加工, Vol.37, pp9, 1996