

초소성 성형기술의 현황

권용남, 이영선, 이정환 | 한국기계연구원

1. 서론

재료의 초소성 변형(Superplastic Deformation)은 특정 변형조건(온도, 변형률속도)에서 변형 안정성이 높아져 수백 % 이상의 연신율을 나타내는 현상이다.(그림 1) 또한, 초소성 변형시 재료는 수 MPa 정도의 낮은 유동응력을 나타낸다. 초소성 변형을 공업적으로 이용할 경우 복잡한 부품도 낮은 가공력으로 용이하게 제조할 수 있기 때문에 부품 설계의 자유도가 크게 높아진다. 또한, 일부 초소성 재료들은 $0.5T_m$ (T_m :용점, Kelvin) 이상의 고온에서는 확산접합(Diffusion Bonding)이 가능하여 부품의 일체화 성형이 용이하다. 즉, 기존 다수의 부품으로 구성된 복잡한 모듈들도 최근 초소성 성형/확산접합 공정을 이용하여 한번의 공정으로 제조할 수 있게 되었다.

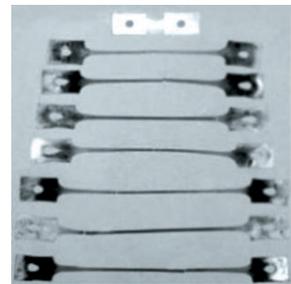


그림 1.
Al-Zn-Mg합금의 초소성 변형,
450~500℃, 최대연신율 1500%^[1]

초소성 현상은 1912년 Bengough가 $\alpha+\beta$ brass를 700℃에서 인장하여 163%의 연신율을 얻은 결과를 처음 보고함으로써 주목을 끌기 시작하였다.^[2] 본격적인 초소성 및 관련 성형연구는 1964년 Backofen이 Zn-Al합금의 연구를 통해 공업적 잠재력을 확인한 후 활발해지기 시작하였다. 현재까지 보고된 연구 결과에 따르면 Al-Cu 합금에서 얻은 8000%가 최고 연신율로 기록되고 있다.^[3] 1990년대 들어 소성가공이 불가능한 것으로 여겨져 온 세라믹 재료를 비롯해 금속간화합물, 복합재료들의 초소성 연구가 시작됨에 따라 초소성 현상의 공업적인 응용은 난가공성 소재의 소성가공기술로 확실하게 자리잡게 되었다. 더욱이 21세기에 접어들면서 나노재료가 크게 각광을 받고 있어 결정립크기를 비롯한 금속학적 인자의 나노 크기에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 구조재료의 나노화 방법중에서 SPD(Severe Plastic Deformation)법에 대한 연구가 많이 진행되어 있으며 대표적인 공정으로는 ECAP(Equal Channel Angular Pressing) 및 ARB(Accumulative Rolling Bonding)이 있다.^[4] 이상의 공정으로 제조된 소재들은 수백 nm 이하의 결정립 크기를 가지기 때문에 뛰어난 초소성 특성을 나타낼 뿐만 아니라 사용 조건에서도 뛰어난 물성을 나타낸다.

초소성 성형 공정은 기존 공정에 비해 공정비용 및 장비가 상대적으로 낮아지는 장점뿐만 아니라 부품의

일체화 설계를 통해 부품 경량화, 보수 유지의 간략화를 달성할 수 있다. 이상의 장점은 높은 비강성과 경량화가 동시에 필요한 항공산업용 부품 및 모듈의 제조에 최적 공정으로 자리매김되고 있다. 초소성 성형 기술은 1970년 군사용 항공기 부품에 적용되기 시작해 현재는 민수용 항공기, 자동차, 의료, 전자 산업 등으로 적용범위가 넓어져 왔다. 그림 2는 항공기 및 유도무기에 사용되는 초소성 성형품을 나타내는 사례이다. 현재까지 초소성 관련 연구는 미국, 러시아, 유럽 등과 같이 항공 산업의 두터운 기반을 가진 국가들을 중심으로 발전해 오고 있다. 일본의 경우 자동차 산업과 같은 민수용도를 목표로 새로운 초소성 재료에 대한 연구가 국가적인 지원하에 이루어지고 있다. 초소성 소재 및 관련기술은 대부분 기술 이전이 미사일 기술 통제체제(Missile Technology Control Regime, MTCR)하에 국가적으로 금지되어 있는 첨단 기술로 우리나라도 전투기 도입시 보상교역 사업(trade-off program)으로 기술도입이 시도되었으나 모두 좌절되었다. 최근, 초등훈련기(KT-1), 고등훈련기(T-50) 및 한국형다목적헬기(KMH)사업 등과 같은 항공기 제조 국책사업이 진행됨에 따라 초소성 기술의 수요는 크게 높아지고 있다. 이에 따라 본 고에서는 초소성 변형, 초소성 재료, 초소성 성형 공정에 대해 현재까지 진행된 연구 결과를 간략하게 소개하고자 한다.

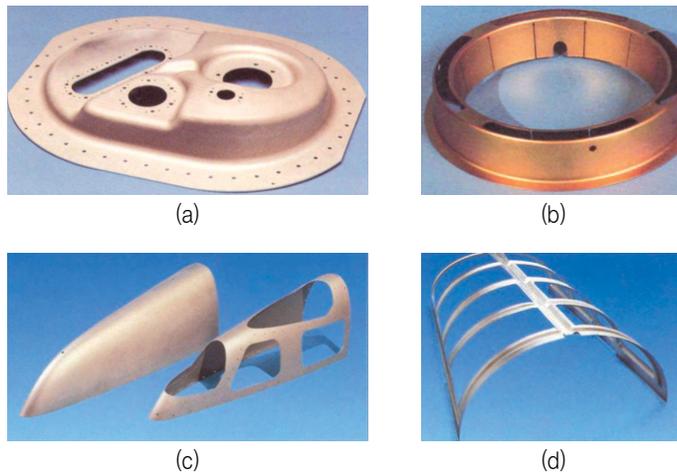


그림 2. 항공기, 유도무기에 사용된 초소성 부품의 예
 (a) Sump plate(Tiger 헬기), (b) 토마호크 미사일 부품,
 (c) Wing tip(Boeing 777), (d) Engine Cowling Stiffner(SAAB 2000)

2. 초소성 변형 특성

재료의 고온 변형 특성은 일반적으로 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 과 같은 현상학적인 power law식으로 기술할 수 있으며 초소성 재료는 변형율속도 민감지수(strain rate sensitivity), m 값이 크다는 특징을 가진다. 변형율속도 민감지수가 $m=1$ 의 값을 가질 경우 재료는 이상적인 뉴턴 점성 거동(ideal Newtonian viscous behavior)을 나타내며 네킹(necking) 외에 파단의 요인이 없다면 이론상 무한대의 연신율을 얻을 수 있다. 고온 변형시 일반적인 금속 재료는 대략 $m < 0.2$ 정도의 값을 나타내며 초소성 재료는 $m > 0.5$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. (그림 3)

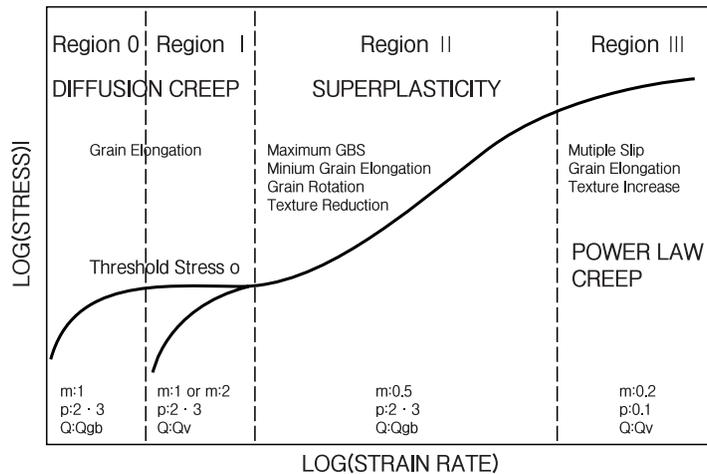


그림 3. 초소성 재료의 변형특성^[5]

초소성 변형은 식 1과 같이 크립(creep)에서와 같이 유동응력과 소성 변형률속도 &의 관계로 표현되는 현상학적인 구성방정식을 이용하여 기술되어진다.^[6-8]

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{D}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^q \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n$$

식(1)

식 (1)에서 D는 확산계수, k는 Boltzman상수, T는 절대온도, b는 Burger's 벡터, d는 결정립 크기, G는 전단 강성율(shear modulus)를 의미한다. 식 (1)에서 변수 n은 일반적으로 초소성 지수로 알려진 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity)의 역수이다(n=1/m). 또한, 결정립 크기는 초소성 변형에 영향을 미치는 중요한 미세조직 요소로 변수 q는 초소성 변형률속도에 미치는 결정립 크기의 영향을 표현해 준다. 식 (1)의 중요한 다른 특징은 초소성 변형을 정상상태 변형(steady state deformation)으로 기술한다는 점이다. 현재까지 연구자들에 따라 다양한 초소성 모델이 제안되고 있으며 구체적인 초소성 변형 기구와 이에 따른 변수 n 및 q의 값을 표 1에 정리하였다.

초소성 재료의 결정립들은 낮은 변형률속도에서 변형시 응력 방향으로 늘어나는 경향을 보일 때도 있지만 일반적으로는 변형 후에도 등축정(equi-axed)의 모양을 유지하는 것으로 알려져 있다. 초소성 변형시 결정립들의 기하학적인 재배열에 관한 모델은 초소성 변형의 특징을 기술하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 초소성 변형의 기하학적 모델을 통해서 결정립계 미끄러짐이 발생하는 구체적인 과정 및 동시에 발생하는 도움 기구의 역할을 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 결정립계 미끄러짐의 기하학적 모델(geometrical model of grain boundary sliding)은 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding)과 도움 기구(accommodation mechanism)의 조합으로 구성된다. 초소성 변형시 전체 변형 중 결정립계 미끄러짐이 차지하는 비율은 약 70 ~ 80 % 정도로 알려져 있다. 또한, 도움 기구에는 전위 운동(dislocation motion), 결정립계 이동(grain boundary migration), 확산 유동(diffusional flow), 도움 결정립계 미끄러짐(accommodational GBS) 등이 제안되어 있으며 실제로는 여러 가지 기구가 동시에 작동할 것으로 생각된다. 현재까지 다양한 초소성 변형의 기하학적 모델들이 제안되어 있지만 결정립계 미끄러짐에 관여하는

결정립 수에 따라 두개의 그룹으로 나눌 수 있다. 즉, 개별적인 결정립에서 발생하는 미끄러짐 (grain boundary sliding of individual grains) 과 여러 개의 결정립이 그룹을 이루어 협동적인 미끄러짐 (cooperative grain boundary sliding, CGBS) 이 발생하는 경우이다.

결정립계 수준에서 초소성은 격자 전위 (lattice dislocation) 와 결정립계 전위 (grain boundary dislocation) 들의 운동과 밀접한 관계를 가진다. 즉, 초소성 변형을 구성하는 변형 기구인 결정립계 미끄러짐과 전위 운동은 격자 전위와 결정립계와의 반응을 통해서도 관계를 가지게 된다. 최근에 이르러 고온 변형중의 결정립계 구조에 관한 많은 새로운 정보들이 보고됨에 따라 초소성 변형시 결정립계의 역할에 대한 보다 체계적인 설명이 가능하게 되었다.

결정립계가 격자 전위의 주 생성원 (dislocation generation source) 으로 작용함은 여러 연구에서 이미 증명된 바 있으며 결정립계 미끄러짐은 격자 전위 발생에 중요한 역할을 한다. 즉, 미세한 결정립을 가지는 재료의 결정립계는 격자 전위 발생의 가장 중요한 생성원으로 작용하며 투과 전자 현미경을 통한 초소성 변형시 결정립내 변형의 관찰을 통해 증명된 바가 있으며 초소성 Zn-22%Al 합금의 변형 표면 관찰을 통해서도 확인할 수 있었다. 한편, 결정립계는 고온 변형시 격자 전위의 소멸처 (lattice dislocation sink) 로도 작용할 수 있다. 이론적인 분석 및 실험적인 증명에 의하면 결정립계로 전위의 흡수 (absorption of lattice dislocation) 는 몇 단계를 걸쳐 진행된다. 즉, 격자 전위가 결정립계에 도달하면 새로운 버거스 벡터 (Burger's vector) 를 가지는 결정립계 전위 (grain boundary dislocation) 로 분해된 후 소멸하거나 결정립계를 따라 재배열된다. 격자 전위가 결정립계에 도달하여 분해되면 결정립계의 구조는 비평형 상태 (non-equilibrium state) 로 바뀌며 확산, 결정립계 미끄러짐, 결정립계 이동 (grain boundary migration) 과 같은 변형 기구들이 보다 빠른 속도로 진행될 가능성이 높아진다.

Valiev 등은 Zn bicrystal 을 이용한 기초적인 변형 연구를 통해 결정립내 변형과 결정립계 미끄러짐 사이의 중요한 관계를 찾아낼 수 있었다.^[14] Zn bicrystal 을 0.4T_m 에서 변형할 경우 두 가지 형태의 결정립계 미끄러짐을 관찰할 수 있었는데 하나는 결정립내 변형을 동반하지 않은 순수한 결정립계 미끄러짐 (pure grain boundary sliding) 이며 다른 하나는 결정립내 변형과 동시에 발생하는 결정립계 미끄러짐 (grain boundary sliding with intragranular deformation) 이다. 동일한 응력 조건일 경우 결정립내 변형을 동반한 결정립계 미끄러짐이 훨씬 빠른 속도로 변형이 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결정립계 미끄러짐의 특징은 결정립계의 구조와 결정립의 슬립 시스템과 밀접한 관계를 가진다. 결국 동일한 시편내에서도 결정립계의 특징과 응력상태에 따라 두 가지 종류의 결정립계 미끄러짐이 동시에 발생할 수 있으며 전체적인 변형의 속도는 결정립내 변형을 수반한 결정립계 미끄러짐에 의해 주도된다.

표 1. 초소성 변형의 Stress exponent(n), inverse grain size exponent(p), and activation energy

제안 초소성 모델	n	p	Q
<i>Diffusion Accommodation</i>			
Nabarro-Herring creep ^[9]	1	2	Q _v
Ashby-Verrall model ^[10]	1	2	Q _{eff}
Coble Creep ^[11]	1	3	Q _{gb}
Intragranular flow ^[12]	1	1	Q _{gb}
<i>Slip Accommodation</i>			
Arieri-Mukherjee ^[6]	2	2	Q _{gb}
Gifkins ^[7]	2	2	Q _{gb}
Ball-Hutchinson ^[8]	2	2	Q _{gb}
Langdon ^[13]	2	2	Q _{gb}

초소성 변형이 일어나기 위한 가장 기본적인 조건으로는 미세한 결정립, $0.5T_m$ 이상의 온도, 특정 변형율 속도 등의 세가지를 들 수 있다. 초소성 변형 연구의 현실적인 목적은 초소성 성형 공정을 보다 빠른 가공 속도 및 낮은 가공 온도에서 진행하여 공정의 효율성을 높이는데 있다. 이에 따라 많은 초소성 연구는 각종 인자들이 초소성 변형에 미치는 영향을 체계적으로 기술하는데 집중되고 있다. 최근에 이르러 보다 빠른 변형율속도와 낮은 온도에서 초소성을 나타내는 재료를 개발하기 위해 많은 시도가 이루어지고 있다. 일반적으로 초소성 재료는 고경각입계로 이루어진 미세한 결정립을 가진 재료이다. 하지만 낮은 적층 결함에너지(stacking fault energy)를 가지는 일부 초소성 합금은 가공열처리시 아경각입계(sub grain boundary)를 가지는 회복조직(recovery structure)을 형성하며 재결정에 필요한 활성화 에너지가 높은 값을 가져 열적인 방법으로는 재결정이 진행되지 않는다. 이러한 재료의 대표적인 예는 Al-Li합금이 있으며 특정한 온도 및 변형율속도 조건에서 변형을 가하면 동적재결정이 발생하고 이를 통해 고경각입계(high angle boundary)를 가지는 미세한 결정립을 얻을 수 있다.

3. 초소성 재료

공업적으로 가장 많이 사용되는 초소성 재료는 Ti과 Al계 합금으로 항공·우주용 부품의 경량화와 일체화 성형을 동시에 만족할 수 있는 대표적인 합금이다. 금속계 초소성 재료는 일반적으로 $10\mu m$ 이하의 결정립 크기가 고온변형중 안정적으로 유지될 수 있으면 상대적으로 쉽게 초소성 특성을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. Ti과 Al계 합금외에 미세한 결정립을 가지는 Mg, Cu, Zn-Al, 이상조직강(Dual Phase Steel) 등이 초소성 특성을 쉽게 나타내는 것으로 알려져 있다. 전형적인 난성형 재료인 세라믹은 결정립크기를 미세하게 조절할 경우 초소성 변형을 얻을 수 있으며 이를 이용해 소성가공, 확산접합, 열간정수압성형(Hot Isostatic Pressing) 등의 공정을 개발해 낼 수 있었다. 초기에 Zirconia를 위주로 세라믹 초소성 연구가 이루어졌지만 최근에는 Si_3N_4 및 SiC 등에서도 초소성 특성을 얻을 수 있게 되었다. 금속간화합물과 복합재료는 세라믹과 함께 소성가공이 어려운 재료들로 초소성 현상을 성형에 이용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 최근 비정질 소재의 초소성 현상이 발견되어 이를 이용한 성형이 주목을 받고 있다.

● Ti계 초소성 합금

대표적인 Ti계 초소성 합금은 $\alpha+\beta$ 형 합금인 Ti-6Al-4V합금과 Ti-6Al-6V-2Sn이 있다. 이상의 초소성 Ti합금의 최적 성형 조건은 $850\sim 930^\circ C$, $10^{-3}/s$ 이하이다. 대표적인 Ti 초소성 부품으로는 항공기용 Nacelle Structure, ECS Door, Center Beam Webs, APU Door 등이 있다. 이상의 Ti 초소성 부품들은 경량화와 제조원가 절감을 동시에 달성할 수 있는데 평균적으로 제조원가 35%, 경량화 30%를 달성할 수 있다. 초소성 성형 후 일부 합금계에서는 원소재 상태에 비해 물성이 떨어지는 단점이 보고되고 있다. 하지만, 초소성 Ti합금의 경우성형품의 강도는 원소재와 거의 유사한 정도로 Ti 고유의 우수한 성질을 유지하고 있다. 실제로 인공위성용 연료탱크 등과 같은 부품은 Ti 초소성 성형품이 종래 스피닝과 용접에 의해 제조된 부품에 비해 강도나 안전성이 훨씬 우수하여 보다 고압조건에서 사용할 수 있음이 확인되었다.

초소성 Ti합금은 초소성 변형조건에서 매우 우수한 확산접합 특성을 나타낸다. 확산접합은 이중재의 첨가없이 고체 상태의 소재를 고온에서 가압하여 접합하는 기술로 초소성 Ti합금으로 제작할 수 있는 부품의 범위를 크게 증가시키는 기술이다. 초소성/확산접합기술로서 제작된 대표적인 항공우주부품으로 AFT Fan Duct, Fan Blade, Hot Air Nozzle, Door Panel 등이 있다. 초소성기술과 확산접합기술을 조합하여 제조되는 부품들은 주로 수많은 리벳 등에 의해 조립되던 것을 확산접합기술을 이용함으로써 일체형으로 제조하여 제조원가의 절감과 함께 강도면에서 안전성에 대한 재현성을 확산할 수 있으므로 강도부재에 많은 이용이 이루어지고 있다. 그림 4는 초소성 성형과 확산접합의 복합공정으로 제조된 팬 브레이드로서 내부에 샌드위치 패널을 가지고 있어 높은 경량화율을 얻을 수 있다.

항공우주분야 이외의 산업에도 초소성성형기술을 응용하고자 하는 노력을 통해 스포츠용품, 시계와 같은 생활필수품과 의치(義齒)와 같은 의료기기 등에도 적용사례가 나타나고 있다. Ti합금은 경량, 고강도이면서 인체와 친화성이 좋은 소재이며 초소성성형은 금형과 거의 동일한 형상 및 치수를 얻을 수 있고 잔류응력에 의한 탄성회복이 거의 없기 때문에 Ti-6Al-4V소재를 이용한 의치는 개개인의 치아구조에 꼭 맞는 치아를 제조할 수 있는 이점이 있다.(그림 5) 또한, Ti합금은 내식성, 내마모성과 함께 인체와의 친화성이 좋으므로 인체와 알레르기 반응이 나타나지 않으므로 각광을 받고 있다.



그림 4. Ti Hollow Fan Blade(PW4000 6th stage 113-inch)



그림 5. 초소성 Ti 치아용 Implant

● Al계 초소성 합금

Al계 초소성합금은 2XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX계에서 다양하게 존재하고 있다. 일반적으로 7XXX계 Al-Zn-Mg-Cu합금(7475, 7075 등) 및 5XXX계 Al-Mg(Supral 5000, 5083 등) 합금은 과시효후 압연 등의 소성가공한 소재를 재결정하는 방식으로 초소성 특성에 필요한 결정립 미세화를 얻는 반면 Al-Cu(Supral 100), Al-Li(2090, 8090) 등은 초소성 변형중 동적재결정에 의해 미세한 결정립을 얻는다. 이외에도 급속응고법, 분말야금법 등의 공정을 통해 제조된 미세 결정립 Al 합금들이 초소성 특성을 나타낸다. 초소성 Al 합금들도 초소성 Ti합금과 마찬가지로 항공우주용 구조부품에 가장 많이 적용되고 있다. 대표적인 부품들은 Door Panel, Sine Wave Beam, Copilot's Floor, Waffle Pan 등과 같으며 고강도 7XXX, 2XXX합금들이 많이 적용되고 있다. 약 250Mpa급의 중강도 Al 5083합금의 경우 예술적 미려함을 갖춘 건축 외장재 및 기차 내장재 및 좌석, 레이저용 보트, 2륜차 연료탱크, 자동차 부품 등에 광범위하게 적용되고 있다. 초소성 Al 합금도 최적 초소성 변형조건에서 확산접합이 가능하나 Al 합금 표면에 존재하는 매우 안정한 알루미늄이나 산화물로 인해 초소성 Ti합금과 같은 우수한 확산접합 성능을 얻을 수는 없다. 일반적으로 Ti합금은 확산접합후 물성이 원소재 대비 100%수준을 유지하지만 Al 합금의 경우 60~80%정도이며 이로 인해 초소성 Al합금의 경우 초소성 성형과 확산접합의 복합공정을 이용한 부품 제조는 매우 어렵다.

Al 초소성 기술중 가장 중요한 점은 성형시 발생하는 공동(Cavitation)의 제어이다. 공동의 발생은 구조 용 부품의 강도 및 신뢰성을 크게 해치기 때문에 엄격하게 제어되고 검사되어야 한다. 초소성 변형중 공동의 발생은 Ti합금에서는 나타나지 않으나 기지에 비해 높은 경도를 가지는 제 2상입자를 포함하는 초소성 Al합금의 경우 변형중 제 2상입자 주위에 응력집중으로 인해 불가피하게 발생하는 결함이다. 초소성 Al 합금의 공동발생 억제는 크게 초소성 Al 합금과 초소성 성형 공정 제어를 통해 달성할 수 있다. 일반적으로 결정립크기가 작아질수록 제 2상입자 주위에 발생하는 응력의 크기가 작아지므로 공동 발생이 현저하게 감소한다. 즉, 결정립크기의 미세화를 공동의 핵생성에 필요한 임계응력 이하로 제어할 경우 공동발생을 방지할 수 있다. 하지만, 소재의 결정립 미세화를 위해서는 소재 제조 공정 비용을 증가시키기 때문에 쉽게 적용하기가 어렵다. 이에 반해 초소성 성형 공정시 성형 압력이 작용하는 반대 방향에서 가압하면 공동의 발생을 제어할 수 있다. 즉, 배압(Back Pressure)을 작용시키면 소재는 정수압 변형 상태에 들어가 공동을 발생시키는 전단변형의 역할을 억제할 수 있다.

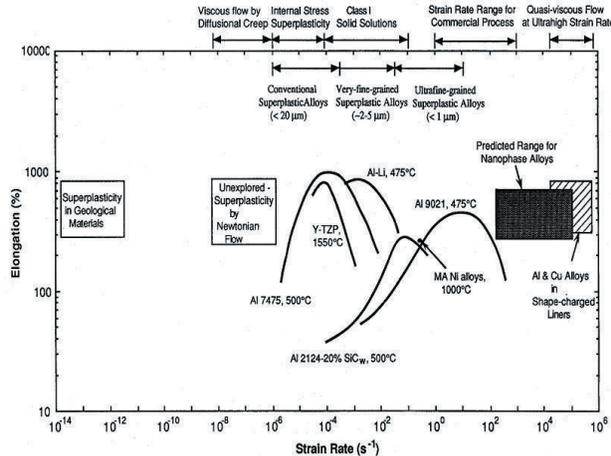


그림 6. 초소성 알루미늄 합금의 최적 변형율속도 및 연신율⁽³⁾

● 세라믹의 초소성 성형

초소성 성질이 발현되는 세라믹계 재료에는 지르코니아, 세라믹기복합재료, 질화규소 등이 있다. 세라믹의 초소성 발현의 외부인자는 온도, 응력, 변형속도 등이 있는데 연구의 목표는 가능한 한 온도와 응력을 낮은 상태에서 보다 높은 변형속도를 얻고자 하는 것이므로 이를 위해 결정립미세화와 입계제어 등이 소재개발의 궁극적인 목표가 되고 있다. 세라믹 초소성재료의 입자크기(Grain Size)는 1 μ m이하이며 입계제어의 인자는 미량불순물의 조성과 량에 있다. 고온도 세라믹에서는 용질의 입계편석, 석출입자와 분산입자가 변형속도에 영향을 미치므로 이를 제어하는 것이 중요한 기술이다. 강도와 인성이 우수하며 고온에서 사용되는 고강도, 내마모소재인 지르코니아의 일종인 TZP는 1400 $^{\circ}$ C 이상의 온도에서 초소성성질을 얻는데 용이하다. 의도적으로 비정질상을 첨가하면 저온에서 초소성성형이 가능하게 되어 1200 $^{\circ}$ C에서 변형속도를 2배 이상 증가시킬 수 있게 된다. 세라믹기복합재료는 세라믹의 인성향상을 위해 세라믹을 모상으로는 입자분산복합재료인 휘스커(Whisker) 분산복합재료가 개발되고 있다. 일반적으로 제2상입자를 분산하면

모상의 입도성장을 억제할 수 있으므로 미세립재료를 얻을 수 있어 복합재료화는 초소성화에 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, 결정립미세화에 의해서 굴곡강도가 1.6~2GPa 라는 경이적인 고강도질화규소가 개발되었으며 초소성 성질을 나타낸다는 보고도 있다.

분말야금법에 의해 제조된 세라믹성형체는 소결단계에서 수축되어 치수정밀도가 매우 좋지 않으며 따라서 연삭·연마가공이 필요하지만 초소성성형에 의해 제조하면 우수한 치수정밀도와 표면조도를 얻을 수 있으므로 후가공을 제거할 수 있다. 또한, 최근에 주목할 만한 기술은 세라믹과 금속을 초소성/접합기술에 의해 서로 접합을 할 수 있다는 것이다.

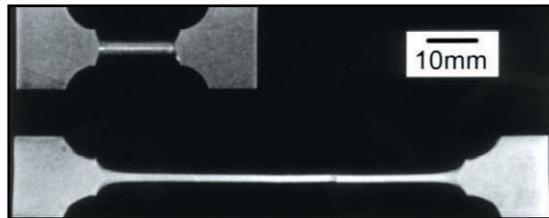


그림 7. Si₃N₄세라믹 초소성^[15]

● 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 제 2상을 변형 후 열처리로 제거하는 기술이 개발되어 금속간 화합물에서도 초소성 성형의 개발 및 응용이 활발히 추진되고 있다. Nobuki는 결정입경이 10 μ m이하의 V첨가 $\gamma/\alpha/\beta$ 3상 TiAl합금을 성형온도 1047~1147 $^{\circ}$ C, 변형속도 10⁻³/sec.이하에서 600%의 연신률을 얻을 수 있었으며 Ameyama는 MA-HIP처리된 초미세립 Ti-48mol%Al 소재를 이용하여 초소성 발현을 실현하였다. 이외에도 Ni₃Al/fcc고용체, Ni₃Si/fcc고용체, NiAl/Ni₃Al 등에서도 초미세립 초소성이 확인되었다. 또한 Ti를 첨가한 Fe₃Al(Fe-28mol%Al-2mol%Ti)에서도 585%까지 초소성 신장이 보고되었는데 조직 관찰결과에 의하면 결정립의 미세화에 동적재결정이 중요한 역할을 하고 있음을 확인하였다. 따라서, 초기조직의 크기를 미세하게 제어하면 금속간화합물에서도 초소성 성형을 이용할 수 있음을 알 수 있다.

● 기타 재료의 초소성 성형

Al과 Ti합금 이외에 초소성합금으로는 철계합금(고탄소강, 2상 스테인레스강, 저탄소합금강, 오스테나이트 스테인레스강 등), 아연합금(Zn-22Al공석합금), 마그네슘합금(Mg-8.5Li, Mg-9Li, Mg-8Li-1Zn) 등이 있으며 이들은 소재가격이 저렴하기 때문에 초소성 성형의 응용이 불필요할 것으로 생각되어지고 있으나 내식성이 좋은 2상 스테인레스강 등과 같은 소재들의 소량부품제조 등에 적절한 적용을 위해 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

4. 초소성 성형

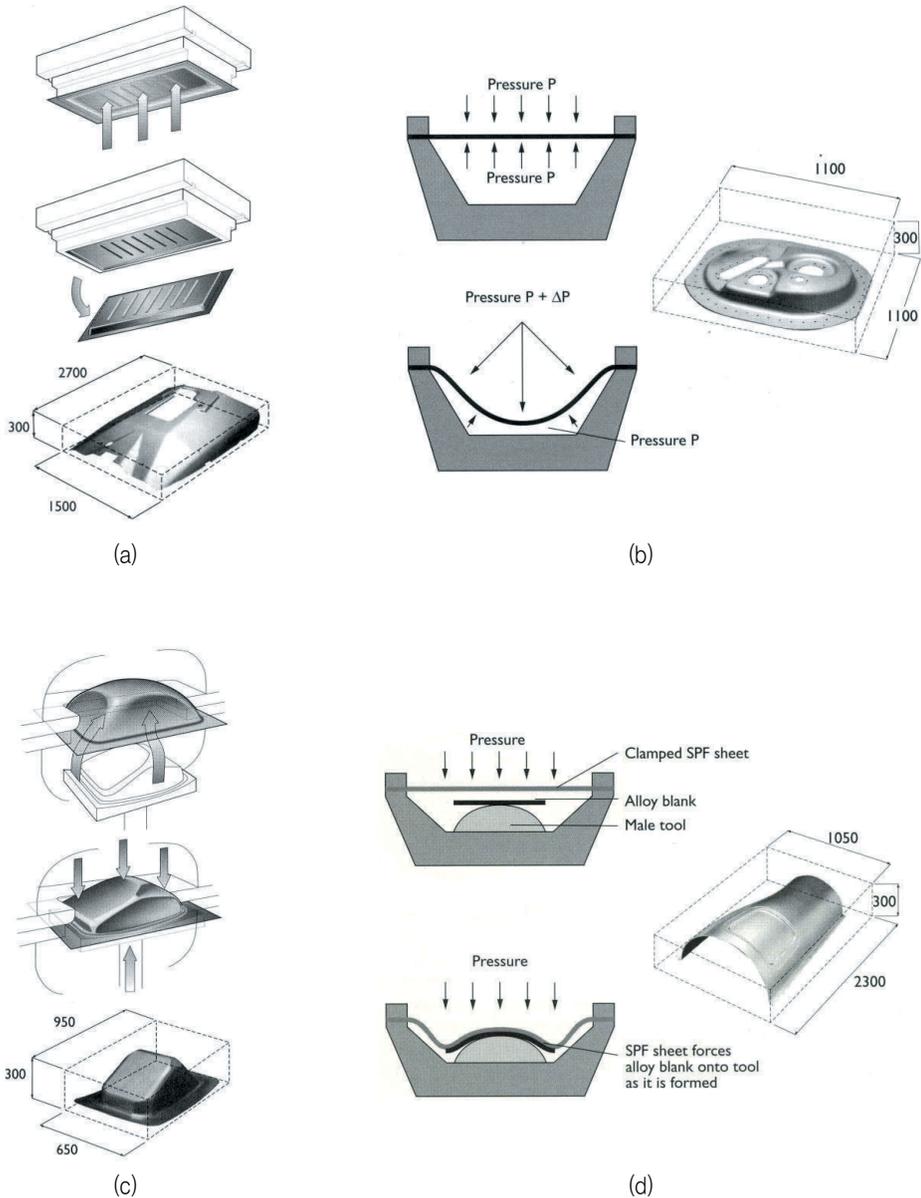


그림 8. 초소성 성형

(a) Female Forming, (b) Female Forming with Back Pressure, (c) Male Forming, (d) Diaphragm Forming

초소성 성형법(superplastic forming process, SPF)은 항공산업에서는 이미 보편화된 기술로써 초소성 변형시 얻을 수 있는 높은 성형성을 이용하여 복잡한 판재 구조물을 생산하는데 널리 사용되고 있다. 또한,

초소성 성형법과 확산접합(diffusion bonding, DB)을 조합하여 사용할 경우 더욱 복잡한 형상의 부품의 생산이 가능하게 되며 항공산업에서 요구되는 부품의 높은 설계 자유도를 보장하여 줄 수 있다. 이와 같이 초소성 성형법은 복잡한 모양의 부품을 단일 공정으로 제조할 수 있는 무한한 가능성을 가진 소성가공법이나, 다른 한편으로는 고온 환경, 낮은 변형율속도 및 적용할 수 있는 재료의 제한 등의 단점을 가지고 있기도 하다.

초소성 성형은 소재의 형태에 따라 판재성형과 벌크(Bulk)성형으로 구분할 수 있으며 본 고에서는 주로 판재성형에 대하여 기술한다. 초소성 판재성형의 대표적인 공정은 그림 8에서와 같이 판재를 가열된 금형 내에서 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 Diaphragm Forming 등이 있고 Blow Forming에는 금형의 음각 형태에 따라 분류되기도 한다. 또한, 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 초소성성형과 확산접합기술을 동시에 이용하는 초소성/확산접합 기술이 있는데, 이는 복잡한 구조물을 일체형으로 성형하는데 매우 유리한 공정기술로서 항공기 부품과 같이 수 많은 리벳에 의해 조립되는 구조용 부품제조에 특성상로나 경제적으로 모두 우수한 공정이다. 따라서, 초소성/확산접합 기술은 Ti합금을 중심으로 이미 항공기부품 제조에 많이 이용되어 오고 있다.

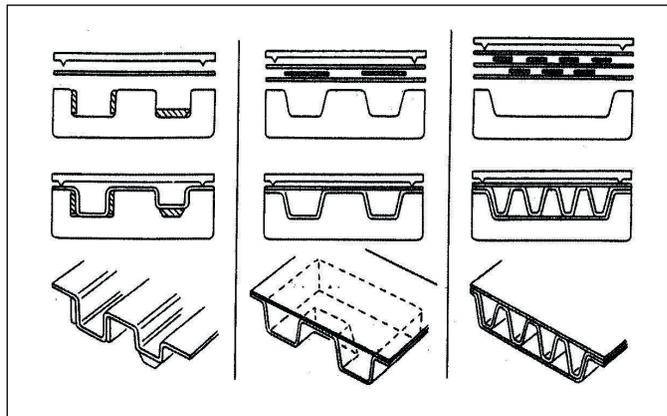


그림 9. 확산접합 개념도



그림 10. Mass production of 8 SPF/DB sandwich panels

이러한 초소성 판재성형 공정은 기존의 박판 금속부품을 성형하는 방법에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

- a. 높은 가공성(formability)
- b. 높은 설계 자유도(design flexibility)
- c. 높은 가공 정밀도(shaping accuracy)
- d. 스프링백 효과가 없음(no springback effect)
- e. 성형후 부품에 잔류응력이 남지 않음(no residual stress)
- f. 성형 다이(forming die) 비용의 감소
- g. 조립과정(assembly process) 생략으로 인한 생산비 절감
- h. 구조부품에서 볼트(bolt), 구멍(hole) 및 sealing의 수가 감소함에 따른 유지비의 절감

이러한 장점으로 인해 초소성 성형법으로 제작된 부품을 사용한 전투기의 경우 해당 부품의 생산비 및 유지보수비를 약 30 ~ 50 % 정도 낮출 수 있다. 하지만, 여러 가지 초소성 성형법의 단점들에 의해 초소성 성형법의 적용 범위는 항공 산업으로 제한되고 있다. 초소성 성형법의 광범위한 사용을 제한하는 몇가지 요인은 아래와 같다.

- a. 초소성 재료의 제한 : 초소성 재료는 일반적으로 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 결정립을 가져야 하며 또한 고온에서 높은 열적 안정성을 가져야 한다. 이러한 특성을 가지는 재료를 제조하기 위해서는 일반적인 제조 공정 외에 특수한 가공열처리 공정을 추가해야 하는데 이로 인해 재료의 제조비용이 높아지고 전체적으로 초소성 성형 공정의 경제성을 낮추는 결과를 가져온다.
- b. 공정의 제한 요소 : 초소성 변형은 특정 변형율속도 및 온도에서만 발생하는 특징을 가지고 있는데 일반적으로 Al합금의 경우 $450 \sim 530^\circ\text{C}$, Ti합금의 경우 $900 \sim 950^\circ\text{C}$ 의 고온환경이 요구되며 가공 속도도 고전적인 초소성 합금의 경우 $10^{-2} \sim 10^{-5}/\text{sec}$ 정도로 기존판재 성형법에 비교할 경우 생산성은 상당히 낮아지게 된다. 성형온도를 낮추기 위해 재료의 독특한 변형 특성이 이용되는데 한 예로 Ti-6Al-4V합금의 성형시 수소 분위기를 사용하면 약 100°C 정도로 낮은 온도에서 성형이 가능하다. 또한 최대한 성형속도를 높이기 위하여 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용한 최적 공정 설계가 이루어지고 있다. 기존에는 일정한 변형율 속도하에서 성형을 진행하였으나 가공속도를 높이기 위한 다양한 공정 설계가 제안되고 있다.
- c. 성형 부품의 성능 : 초소성 성형법으로 제조된 부품은 공공(cavitation), 거친 표면(surface roughness), 산화(oxidation) 등과 같은 결함을 가질 수 있다. 초소성 성형법이 주로 적용되는 항공 우주 산업에서 부품의 질은 높은 수준에서 관리되고 있으며 이러한 문제의 해결은 초소성 성형공정의 적용범위를 넓히는데 매우 중요한 문제가 된다.

이상의 이유들로 인해 초소성 성형 부품의 적용은 항공우주산업분야에 국한되는 경향이 있다. 하지만, 최근에는 기존 초소성 판재를 이용한 항공우주용 부품 뿐만 아니라 다양한 산업분야로 적용범위가 확대되어 가고 있으며 특히 난가공성 소재들의 정형가공법으로 주목을 받고 있다.

5. 결 론

재료의 초소성 현상은 복잡한 형상의 일체화성형을 달성하는데 적합한 변형특성으로 확산접합기술과 더불어 공업적으로 항공, 우주용 부품 제조에 폭넓게 적용되어 오고 있다. 최근에 이르러 세라믹, 금속간화합물과 같은 난가공성 소재들의 유일한 소성가공법으로 인식되어 초소성 소재 개발은 난가공성 소재의 가공성 향상 측면으로 연구의 초점이 이동하고 있다. 또한, 초소성 소재들이 가지는 미세한 결정립 크기는 사용환경에서 부품의 강도 및 인성을 높이는 결과를 가져온다. 최근 주목을 받고 있는 나노소재들의 일부는 기존 소재의 초소성 특성을 높이려는 과정에서 개발된 것으로 초소성 변형은 첨단소재개발과 밀접한 연관을 가진다.

초소성 성형은 세계적으로 약 5개국, 50개 기업정도만이 기술을 보유하고 있으며 성형품의 부가가치는 소성가공산업에서 가장 높은 수준이다. 아직 국내에는 초소성 성형 전문 기업이 설립되지 않은 실정이나 최근 정부의 항공산업 육성에 따라 전문기업의 출현이 예상된다. 초소성 성형 산업의 발전은 항공우주산업 뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 큰 파급효과를 발휘할 것으로 기대한다.

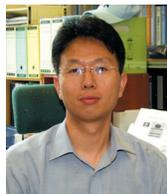
참고문헌

- [1] J. C. Huang and T. H. Chuang, Materials Chemistry and Physics, 57(1999), 195-206
- [2] G. D. Bengough: J. Inst. Metals, 7 (1912) 123.
- [3] O. D. Sherby and J. Wadsworth: Prog. Mater. Sci., 33 (1989) 169.
- [4] R. Z. Valiev etc.: Prog in Mater. Sci. 45(2000), 103
- [5] N. Chandra etc: Mater. Sci. Eng., A231(1997) 134.
- [6] A. Arieli and A. K. Mukherjee: Mater. Sci. Eng., 45 (1980) 61.
- [7] R. C. Gifkins: Mater. Trans. 7A (1976) 1225.
- [8] A. Ball and M. M. Hutchison: Met. Sci. J. 3 (1969) 1.
- [9] C. Herring: J. Appl. Phys., 21 (1950) 437.
- [10] M. F. Ashby and R. A. Verrall: Acta Metall., 21 (1973) 149.
- [11] R. L. Coble: J. Appl. Phys., 34 (1963) 1679.
- [12] F. W. Crossman and M. F. Ashby: Acta metall., 23 (1975) 425.
- [13] T. G. Langdon: Phil. Mag. 22 (1970) 689.
- [14] R. Z. Valiev and O. A. Kaibyshev: Acta metall., 31 (1983) 2121.
- [15] F. Wakai, Current opinion in solid state and materials science, 4(1999) 461.



권 용 남

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 금속재료의 소성변형
- E-mail : kyn1740@kmail.kimm.re.kr



이 영 선

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 단조품 정밀도 향상, 판재 성형 기술, 소성가공 전산모사
- E-mail : lys1668@kmail.kimm.re.kr



이 정 환

- 한국기계연구원 공정연구부 책임연구원
- 관심분야 : 정밀단조, 분말단조, 반응고성형, 초소성
- E-mail : ljh1239@kmail.kimm.re.kr