

# 항공기용 AL합금의 정밀단조 기술



**이 정 환**

(재료공정연구부 소재성형그룹)

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

**정 형 식**

(재료공정연구부)



- '70 서울대학교 금속공학과 졸업(학사)
- '77 미국 Drexel대학교 금속공학과 졸업(박사)
- '78-'80 미국 Pfizer Inc. 선임연구원
- '80-'85 미국 United Technologies 선임연구원
- '85-현재 한국기계연구원 책임연구원



**이 영 선**

(재료공정연구부 소재성형그룹)

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

**이 상 용**

(재료공정연구부 소재성형그룹)



- '81 고려대학교 금속공학과 졸업(학사)
- '81-'82 현대중공업 사원
- '82-'84 고려대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사)
- '85-'86 독일 Aachen공대 용접연구소 연구원
- '87-'93 독일 Aachen공대 금속공학 및 금속물리연구소 연구원(박사)
- '94-현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

알루미늄 합금은 경량으로 비강도가 높고, 내식성이 양호한 특성을 배경으로 단조 재료로 많이 쓰이며, 그것의 단조법이 비약적으로 발전하게 된 것은 근대항공기 산업의 발전과 깊은 관계를 갖고 있다. 주로 복잡한 형상을 갖고 있는 기체부품이나 엔진부품, 보기부품 등의 강도 부재로 사용됨에 따라 그 기술 혁신도 강도와 신뢰성을 바탕으로 항공기의 요구사항에 호응하면서 발전되어 왔다. 최근의 재료 개발에서는 고강도, 고인성, 내용력, 내부식성을 갖춘 합금개발이 이루어 지고 단조 기술면에서는 항공기부품의 대형 일체화 경향에 대처하기 위해 대형 프레스가 도입되어지고 건전한 대형의 주괴를 만들기 위한 기술의 진보, 그것을 단련하는 기술의 진보가 이루어져서 대형단조품의 제조 능력은 비약적으로 높아졌다. 또 경량화와 기계 가공비의 절감을 목적으로 한 정밀단조가 개발되어 항공기를 중심으로 사용화율이 급격히 증가해 가고 있다. 그러나 알루미늄합금의 정밀단조 기술은 아직도 발전의 초기단계이고 장래가 크게 기대되는 분야로 본격적인 성장기를 눈앞에 두고 있어 각종 연구개발이 활발히 전개되고 있다.

## 2. 정밀단조의 개요

단조방법을 크게 나누면 자유단조법과 형단조법이 있지만 항공기용 부품의 성형에는 자유단조품 자체가 그대로 사용되는 일은 거의 없기 때문에 형단조법에 대한 검토를 수행하고 특히 항공기용 부품의 제조에 많이 사용되는 정밀단조에 대해서 중점을 두었다.

그림 1에 단조방법의 분류를 나타내었다.

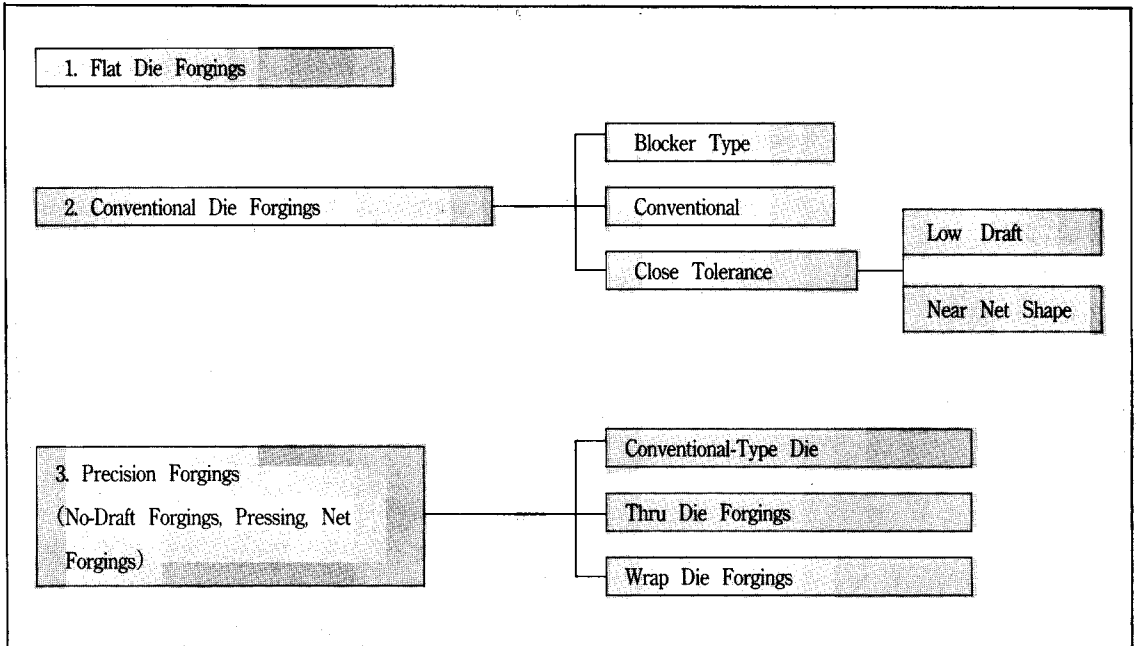


그림 1. 단조방법의 분류

형단조법은 금형을 이용하여 특정 형상으로 단조하는 방법으로 최종 제품형상에 대한 여유(餘肉)의 정도, 형상의 충실도에 따라 거친형단조(Blocker Type 단조), 보통급 단조(Conventional Type 단조), 정밀단조(Precision 단조)로 분류한다.

거친형 단조는 필렛 R과 코너 R를 크게하고 웨브(Web) 및 리브(Rib)를 두껍게 하면서 제품의 Draft Angle이 5~10°로 크다. 따라서 최종 부품형상으로 하기엔 거의 전면에 걸쳐 기계가공이 수반되지만 금형비가 싸고 단조도 용이하다. 단조압력은 1.5~3 Ton/cm<sup>2</sup> 정도이다. 보통급 단조는 형단조법 중에서도 가장 일반적인 방법으로 거친형 단조법에 비해, 최종부품 형상에 가까운 형태로 단조하고 마무리 금형외에 예비 성형하기 위해 거친 금형이 필요하며 단조 횟수도 많아져 통상 2~3개의 금형이 필요하다. 웨브나 보스(Boss) 등은 단조면 그대로 사용됨에 따른 단조품의 요구치수 정도로 결정되어진다. 그러나 형 분할면에 수직인 방향에는 3~10°의 Draft Angle을 필요로 하고 리브 벽은 기계가공이 요구된다. 치수공차, Trimming여유도 Blocker Type보다 적게 되어 기계가공비는 적게 되지만 금형비는 증가

하며 단조 압력은 2.5~4 Ton/cm<sup>2</sup>이며, Flash도 얇아진다. 최근에는 금속기지복합재료(MMC)나 분말단조(P/F)등의 성형하중 절감과 결합방지를 위해 채용되는 경우도 있다.

### 2.1 정밀단조의 정의

일반적으로 보통급 단조품은 단조 후 절삭, 연삭, 방전가공 및 마찰용접, 확산접합 등의 마무리 가공을 행하고 있다. 그러나 모든 분야에서도 기술 혁신이 진행되고 있는 실정에 맞추어 단조기술에서도 자원의 절약, Energy절감, 고효율화, 경량화 등의 요구에 따라 마무리 가공을 수반하지 않고 완성품 그대로 단조하는 정밀단조가 개발되었다. 정밀단조의 개념은 완전히 새로운 개념으로는 볼 수 없다. 2차 세계대전중에 오늘날 정밀 단조로 분류될 수 있는 부품을 제조하기 시작하였으며 그 이후로 “No Draft 단조”, “Pressings”, “Net 단조” 등의 여러 가지 이름으로 불리워져 오던 것을 미국 FIA (Forging Industry Association)에서 용어의 표준화를 위해서 정밀단조의 정의를 내렸다. FIA정의에 따르면 “정밀단조는 공차, Draft Angle,

Web와 Rib의 비, 기타 제품 요구 조건 등이 보통급 단조에 적용되는 설계기준을 넘어서는 단조라고 정의하였다. 정밀의 의미는 일차적으로 가공품의 치수정도를 말하지만 제품의 용도에 따라 필요한 정도는 다르기 때문에 절대적 개념이 아니라 목적과 시대에 따라 변화하는 상대적 개념으로 보는 것이 타당하다. 일반적으로 정밀단조는 복잡한 형상의 제품을 단조하여 마무리 가공 없이 사용 가능하도록 하는 고정도의 단조라고 이해하면 무리가 없다.

단조 압력은 일반적으로 4~8 Ton/cm<sup>2</sup> 정도이다.

## 2.2 정밀 단조품의 특징

정밀 단조품의 제조 공정은 보통급 단조품과 같은 공정이지만 우수한 정밀 단조품을 생산하기 위해서는 그림2와 같이 관련기술의 종합적인 기술 진보와 조화 있는 기술개발이 되어야만 한다.

정밀 단조는 단조품의 일체화 및 복잡형상화를

피하여 절삭 및 연삭 가공을 줄일 수 있으며, 경량으로 고강도를 얻기 위해서 Metal Flow가 기계가공에 의해 재료 표면에서 끊어지는 보통급 단조품에 비해 형분할선을 잘 설계함으로써 Metal Flow를 형상을 따라 만들어 주면 제품의 기계적 성질, 피로강도, 내용력부식균열을 개선할 수 있다. 또한 마무리 가공을 하지 않고 단조품 그대로 사용하기 때문에 표면의 상태가 양호하여야 하며 자동화를 위해서 작업조건을 일정하게 함으로써 고정도를 유지할 수 있다. 그림3은 대표적인 정밀 단조품과 보통급 단조품의 형상 비교를 나타내고 그림4는 정밀단조 제조공정을 보여 주고 있다. 이와 같이 정밀단조는 기계가공비 부담의 절감, 제조공정의 생략, 제조일정의 단축, 작업인원의 삭감, Flash 및 가공 Scrap의 최소화에 기인한 재료비의 절감 등과 같은 장점이 있으며, 이러한 장점을 살리기 위해서는 정밀단조 설계시에 금형 제작비, 제조수량, 최종 사용 상태에서의 형상, 요구 공차의 검토 등이 충분히 이루어져야 한다.

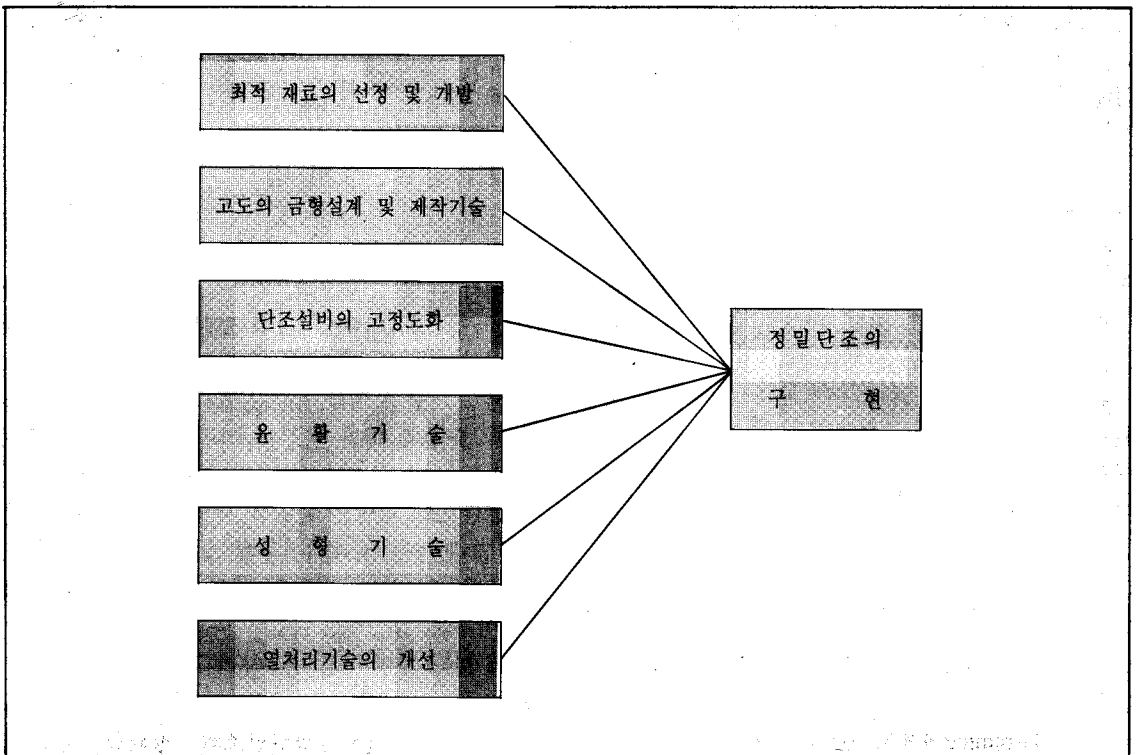


그림 2. 정밀단조 관련기술

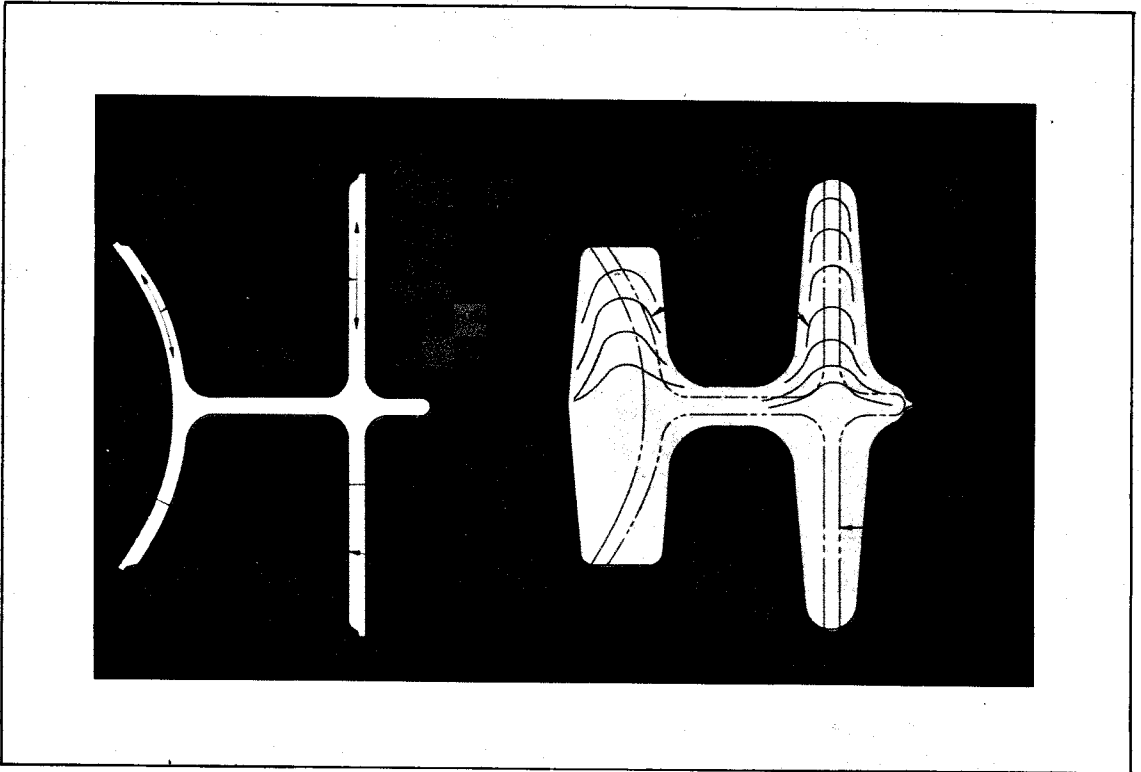


그림 3. 정밀단조와 보통급 단조의 단면도

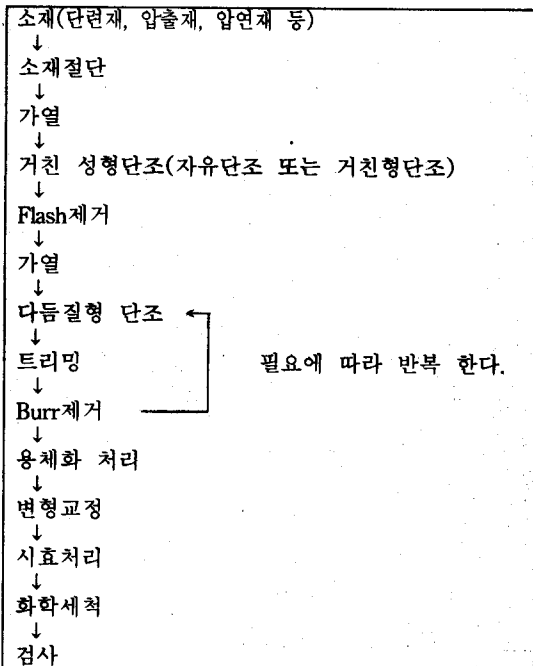


그림 4. 정밀단조품의 제조공정

### 2.3 정밀 단조품의 형상 및 치수공차

정밀 단조품의 주요 형상요소의 특징은 표1과 같다.

정밀 단조품의 치수는 그림5와 같이 제조설비, 제품의 종류 및 형상에 의해 영향을 받고, 정밀도는 단조설비의 기본적인 특성, 금형의 제작오차, 단조 작업 상황에 의해 변화할 수 있다. 치수 공차를 엄격히 하는 것은 제품가격의 상승과 직결되는 것으로 경제적으로 고려할 경우 허용되는 부분에 대해서는 공차를 완화 시키고, 반면에 기계 가공이 곤란한 것은 가능한한 공차를 엄격히 하여준다. 정밀 단조품의 설계 및 제조시에는 제품의 최종 사용 상태에서 기능, 형상(기계가공을 필요로 하는 경우는 가공 후의 형상)을 충분히 파악하여 단조 금형의 설계, 단조 방법, 치수정도의 설정을 효과적으로 하는 것이 중요하다. 표2에서는 AI합금의 단조품의 일반적인 치수공차를 표시하였다.

표1. 알루미늄 정밀단조의 공차

형상요소	특	징
Draft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외면 0°</li> <li>• 내면 1°(단조 작업시 온도 저하에 의해 수축이 됨에 따라 금형으로 부터 취출이 가능하기 위함)</li> <li>• 금형과 단조품의 온도차가 없을수록 Draft는 작게함</li> </ul>	
Rib	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rib높이와 폭의 비는 보통급 단조에서는 6:1정도이며 정밀단조에서는 약 20:1 정도도 가능</li> <li>• Rib높이는 Corner, Fillet형상 영향을 많이 받음</li> </ul>	
Web	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Web의 두께가 얇을수록 단조 압력이 커지며 단조 회수도 많아짐.</li> <li>• Web을 얇게하기 위해서는 윤활이 양호하고 단조온도 관리가 철저해야 함.</li> <li>• Web이 너무 얇으면 단조시에 냉각되어 단조가 곤란하며 변형을 발생시켜 치수 정도의 유지가 곤란함.</li> </ul>	
Corner 반경, Fillet반경	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 반경이 너무 작으면 금형에 응력 집중이 발생하여 금형 마모의 위험이 크게 됨.</li> <li>• 금형내에 소재가 흐르지 않아 단조 결함 발생</li> </ul>	

표2. 알루미늄합금 정밀단조의 치수공차

측정 부위	치수 공차
Wall Thickness	+ 0.60
(This includes match tolerance)	- 0.30
Match Tolerance	0.40
Draft Tolerance	
0° surfaces	+ 0° 30'
	- 0° 0'
1° surfaces	+ 0° 30'
	- 1° 0'
Fillet Radii	± 1.6
Corner Radii	± 0.8
Straightness up to 229 mm	± 0.5
each 229 mm	Increases at Rate of ± 0.5
Contour Tolerance	± 0.4
Flash Extension	0.8
Vent and Knockout	0.8 Raised
	0.3 Depressed
Surface Finish	125 RMS

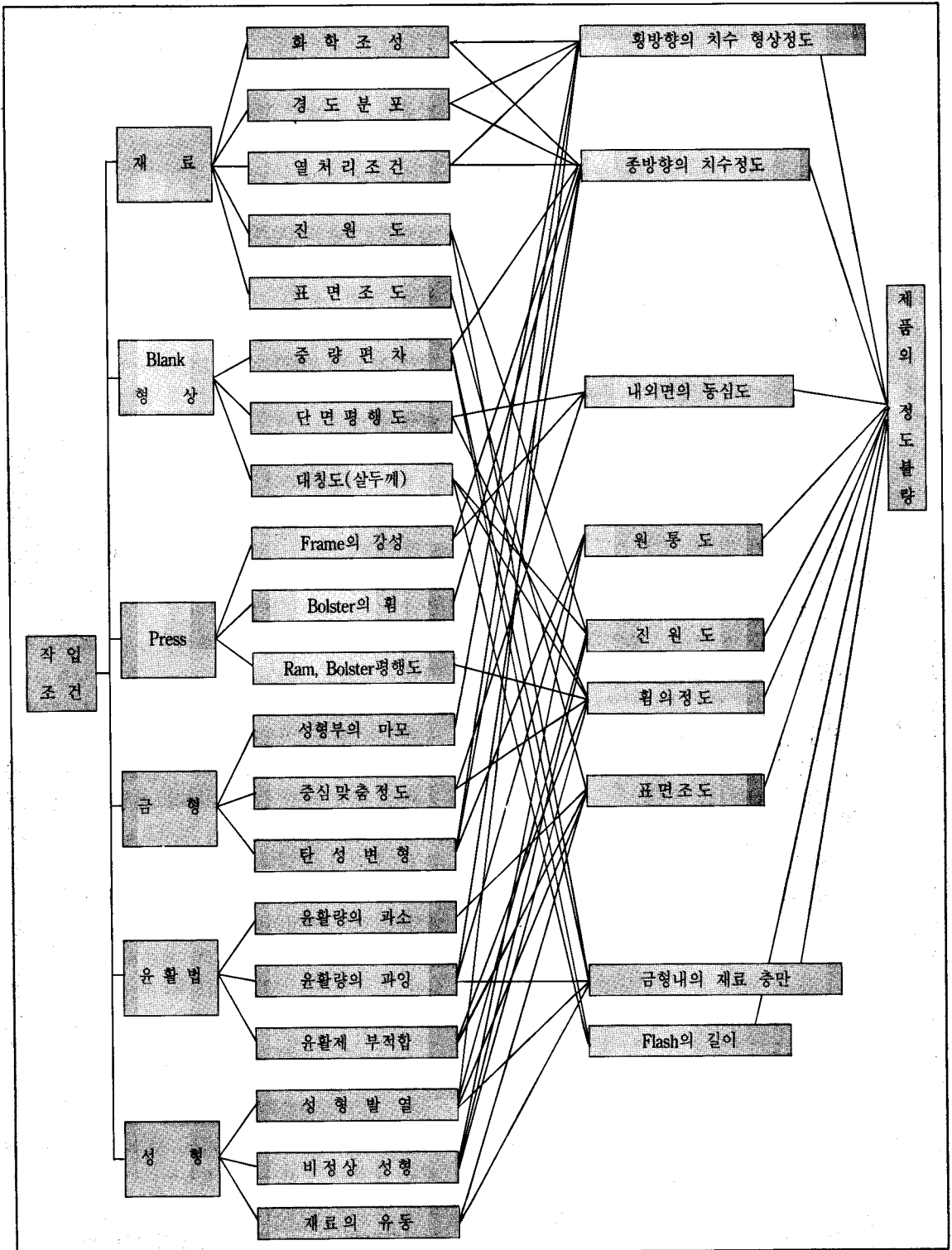


그림 5. 알루미늄 단조의 치수공차에 영향을 미치는 요소

### 3. 단조 공정

#### 3.1 단조 재료

항공기용 알루미늄 단조재료 중에서는 2000계 (Al-Cu-Mg)와 7000계(Al-Zn-Mg)가 가장 널리 이용되고 있다.

2000계 합금은 인장 강도가 400~500 MPa정도로 정적강도는 7000계 합금에 떨어지지만 내열성과 피로특성, 특히 내피로균열진전성에 우수하다. 2000계의 대표적 재료는 2014, 2017합금이고 신합금으로 Fe, Si등의 불순물 원소량의 규제와 주철가 원소의 량을 조정하여 인성 및 파괴 인성치와 피로 강도를 향상시킨 2219, 2618, 2124, 2224, 2048 합금 등이 있다. 7000계 합금 중에서 강도가 가장 높고 항공기용으로 많이 이용되는 것은 7075합금인데 내응력부식균열성을 개량하기 위해 종래의 T6재보다 과시효시킨 T73처리가 개발되었다. 신합금으로는 T73과시효처리를 하면 T6재에 비해 강도가 10~15% 저하하므로 더욱 고강도를 가진 합금개발을 위해 Cu 및 Cr함유량을 감소시키고 Zn 및 Mg양을 높인 합금으로 7049, 7050, 7150등이 있다. 표3에는 대표적인 항공기용 알루미늄 합금의 특성을 나타내었다.

#### 3.2 소재의 준비 및 절단

항공기용 알루미늄 합금은 전신재료 압출재가 많이 사용되고 있지만 연주재도 치수 및 원가의 면에서 사용되는 경우가 많아졌다. 압출재는 일반적으로 고가이며 압출비에 따라 표면에 입자성장(Grain Growth)에 의한 굽힘이나 인발(Drawing)공정에서 균열(Crack)을 발생시키는 경우가 있으므로, 압출재의 방향성과 단조시 금속유동(Metal Flow)과의 관계를 신중히 검토해야 한다. 단조재는 내외부 결함과 조대한 금속간 화합물의 영향을 제거하기 위해 장시간의 균질화 처리와 적절한 단련 성형비가 요구된다. 소재의 절단은 알루미늄 합금이 강에 비해서 연하므로 톱(Saw), 작은 경우에는 원형톱(Circular Saw)이 적절해 절단면이 양호하면서 절단손실이 작은 것이 좋다.

Band Saw는 절단 손실이 적고, 신속한 절단이 가능하며 자동화에 유리하지만 절단자국이 발생하는 단점이 있으므로 가능한 한 톱날속도를 빨리하고 톱날 날수를 적게 하며 절삭율을 낮추면서 윤활성능이 좋은 절삭유를 사용하도록 한다.

Circular Saw는  $\phi 60\text{mm}$ 이하의 것을 절단하는 것에 주로 사용하며 절단 속도도 빠르고 절단면도 양호하고, 자동화도 가능하여 소품종 대량생산에 적합하지만 절단 손실이 크므로 날 두께를 얇게 하는 것이 원가 절감에 많은 영향을 미친다. Shear절단은 정밀 단조소재 절단에는 거의 적용하지 않는다. 어떠한 절단방법을 선택하든지 절단시 부착되는 이물질이나 절삭유는 필히 제거해야 한다.

#### 3.3 가열

단조온도가 높을 수록 변형저항은 현저하게 감소되고 변형능은 향상된다. 표4에 나타난 바와 같이 단조 허용 온도 범위가 좁아서 가열로의 온도제어는  $\pm 5^\circ\text{C}$ 정도가 좋다. 알루미늄 합금은 가열중에 수소 가스를 흡수하기 쉬운 성질이 있으므로 표면에 블리스터(Blister)가 생길 수 있으며 내부에는 잔류 기공(또는 Pore)이 남는 경우도 있으므로 Muffle형 가스로나 저습도 전기로를 사용하는 것이 바람직하다. 전기 저항로는 온도제어가 쉽지만 온도 회복력이 약하므로 가스 연소식 열풍순환로가 유리하고, 열전달은 복사보다 대류 쪽이 열효율이 좋으므로 로내 공기의 유속을 높게 하는 것이 유리하다. 가열시간은 1개당 15~20분이 적당하며 로내에서의 체류시간은 합금에 따라 1~2시간을 넘지 않도록 하는 것이 고온 취성을 발생시킬 우려가 없다.

#### 3.4 윤활

알루미늄 합금의 단조시는 고온과 고압력 하에서 변형시 응착 또는 소착부가 발생되기가 쉬운데 이것은 금형의 보호, 단조품의 표면 상태에 밀접한 영향을 미치므로 윤활의 역할이 매우 중요하다. 윤활의 양부에 따라 단조하중, 금형내의

표3. 대표적인 단조용 알루미늄합금의 특성과 용도에

분류	합금계	합금명	단조성	강도	절삭성	내식성	특 성	용 도 예
고 력 (高力) 합금	Al-Zn-Mg	7075	약간 곤란	A	A	C	7075 : 일반단조합금 중에서 가장 강도가 높고 고응력의 부품에 사용되고 있다. 단, 내응력의 부식균열성에 민감하기 때문에 T73 처리를 실시하여 강도를 약간 희생시켜 내응력 부식의 균열을 개선하여 사용하는 경우가 많다.	항공기용 증량부품  고응력 부품
		7079					7079 : 7075에 비해 강도는 약간 떨어지나 그레인플로에 대해 직각방향으로 신장하는율이 높다. 또한 담금질의 감수성이 둔하여 대형 단조품에 대해 유리하다. 그리고 내응력 부식의 균열에 대해서는 매우 민감하다.	
		7049					7049 : 일반적으로 T73 처리를 실시하는데 7075-T6 및 7079-T6의 강도와 동일한 수준이어서 파괴전성이 우수하다. 그리고 내응력 부식의 균열은 7075-T73과 동일한 수준으로 우수하다.	
		7175						
		7050						
Al-Cu	2014	양호	A	A	C	2014 : 성형성이 비교적 양호하고 강도도 Al-Zn-Mg계에 대해 높으며 또한 평범위한 분야에 가장 널리 적용되고 있다. 내식성은 별로 좋지 않다.	항공기부품 차량·자동차부품· 항공기부품  프로펠러	
	2017		B			2025 : 강도는 2017-T4의 수준이지만 열처리의 변형 및 경년변화가 적다.		
	2025		B					
내 식 합금	Al-Mg	5083	약간 곤란	C	B	A	5083 : 비열처리 합금으로 단조합금 중에서도 단조성이 가장 나쁘다. 그러나 내식성 및 용접성이 매우 우수하다.	선박 LNG용 플랜지
	Al-Mg-Si	6061	양호	C	A	A	6061 : 단조성, 절삭성, 내식성 및 용접성이 우수하고 복잡한 부품에 대해 널리 사용된다.	건축, 차량, 선박· 일반기계부품, 배관용 플랜지
내 열 합금	Al-Si	4032	양호	B	A	B	4032 : 약 200℃의 중간 온도에서 강도가 높고 열팽창 계수가 작아 내마모성이 우수하다.	피스톤 VTR 실린더
	Al-Cu-Mg-Ni	2219 2618	양호	B	A	B	2219 : 바나듐을 첨가하였으며 약 200℃ 이상의 고온에서 강도 및 내크리프성이 우수하고 용접성 및 절삭성이 양호하다.  2618 : 고온에서의 강도가 높고 절삭성이 우수하다.	항공기용 엔진· 실린더헤드·유압기 부품 타이어몰드



표4. 알루미늄 합금의 단조온도

합 금	단 조 온 도 (°C)
2014	420~460
2219	430~470
2618	410~450
4032	415~460
5083	405~460
6061	435~480
7075	385~435
7079	405~450

소재 충전정도, Metal Flow가 영향을 받으며, 윤활제의 냉각을 통하여 적절한 금형온도의 유지까지도 가능하다. 주로 많이 사용되는 윤활제는 유성 또는 수성 Graphite계로 값이 저렴하고 고온에서의 윤활성 유지가 가능하지만 단조품에서 조기에 제거하지 않으면 윤활제에 포함된 탄소에 의해 접촉부식이 발생한다. 탄소는 전도성이 강한 흡착력이 있으므로 대기중의 수분을 흡착하여 부식이 급격히 진행될 수 있기 때문에 최근에는 단조 작업 환경 개선을 위해 Water Glass, Carboni Natrium, 운모 등의 수용성 백색 비흑연계 윤활제가 개발되었다. 윤활 방법은 금형에는 Spray 방법이 주로 사용되며, 가열 전에 Billet에 예비 윤활을 하는 경우도 있지만 어느 경우에도 적절한 윤활이 되도록 하여야 한다. 과도한 윤활은 단조품 표면이 거칠게 되거나 부식의 원인이 되기도 하고 재료의 파잉 유동에 의한 Lap이 생길 수 있고 금형의 Corner부에 쌓여 결육(缺肉)이 발생되거나 금형 수명 단축의 원인이 되기도 한다.

### 3.5 단조 프레스

정밀단조에는 유압 Press와 Mechanical Press가 많이 사용되는데, 정도가 우수하고 금형 가열에 의한 열영향이 작으며 편심하중이 고려되어야 한다. 유압 Press는 가압 속도, 가압시간의 조절이 가능하므로 얇은 Rib-Web의 성형이 요구되는 정밀 단조품에는 가압 속도와 시간을 조절하여 압력을 필요로 하는 대형품의 경우 가압시간을 길게 함

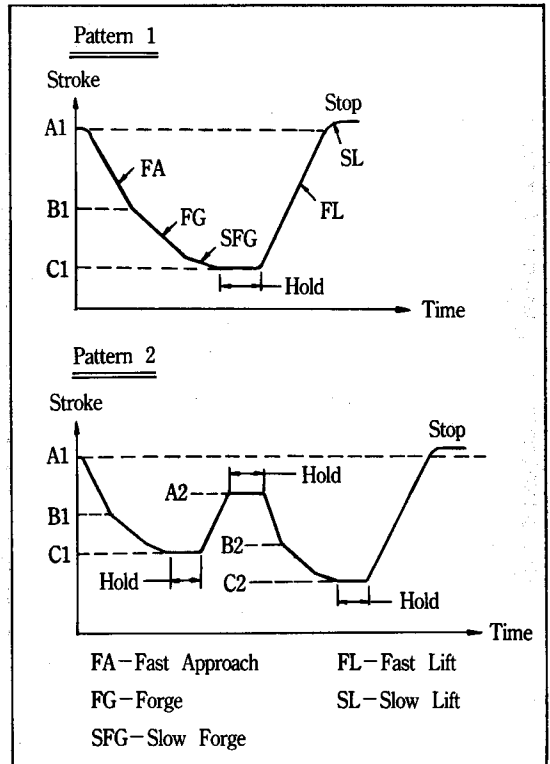


그림 6. 정밀단조프레스의 작동형태

으로써 재료의 변형을 유도하여 가압력의 부족을 보완할 수 있으나, 단점으로는 가압속도가 느린 것이 큰 결점이다. 제품의 정도와 관련된 Press의 특성으로는 Press의 강성(鋼性)이 있는데 강성이 높고, 부하시의 Press의 탄성변형이 적으며 재료 체적, 단조온도의 변형에 따라 단조품의 두께 변화가 적게 된다.

그림 6은 대표적 정밀단조 Press 작동형태에 대한 예를 보여 주고 있다.

### 3.6 단조금형

#### 3.6.1 금형재료

정밀단조형 금형재료는 고온에서 가혹한 반복 응력을 받더라도 변형, 마모, 파손 되지 않는 재료를 사용해야 하며, 내소착성 및 기계 가공성이 양호해야 한다. 이러한 것들이 제품 정도와 금형 수명에 많은 영향을 미치지만 경제적인 금형 재료를 선정하기 위해서는 제조수량도 고려할 필

요가 있다. 일반적인 금형재료로서는 SKT4, SKD61, SKD62 등이 많이 사용되고 있는데 열처리시 정확한 온도 제어와 소입시의 급냉에 의한 인성 저하방지를 위해 배이나이트(Bainite)조직이 없도록 하고 경도를 약간 낮추어 충격치를 높게 하는 것이 바람직하다.

### 3.6.2 금형설계 및 제작

금형설계는 제품형상, 설비능력, 제조공정 등에 의해 결정되지만 정밀단조품으로서 특징을 얻기 위해서는 금형과 제품의 열팽창계수의 차이에 기인하는 치수변화, 금형가공 정도 등 일반적 요구사항 외에 작업성이 좋고 No Draft 단조품을 얻기 위한 방안 및 내용력 부식 균열성, 피로강도 등의 개선을 위한 Metal Flow의 제어 등이 특히 중요하다. 정밀 단조품에서는 작은 Corner 반경, Fillet의 제어와 금형의 분할선의 적절한 위치 선정이 필요하다. 정밀단조품의 Metal Flow는 제품의 사용 상태에 적합하도록 형성되어 있어야 하는데 예를 들면 제품사용시 큰 부하가 작용하는 부분에는 Metal Flow가 단속되지 않아야 한다. 알루미늄합금의 정밀단조에서는 형표면이 제품 표면을 결정하게 되고 소착부 발생의 원인이 되므로 충분히 연마한다. 최근에는 전산기를 활용하는 CAD/CAM으로 단조금형의 설계제작을 하는 기술에 대해 관심이 높아지고 있고, Battelle Columbus 연구소의 연구결과를 활용하는 기업들도 증가하고 있다. 그러나 현재까지는 비교적 단순한 형상의 제품에 대해서 한정되어 있어 정밀단조형 금형의 설계제작은 기술자의 축적된 경험에 많이 의존하고 있다.

그림7에는 금형구조의 일례를 나타내었는데, 금형구조는 제품형상, 단조기계에 의하여 다르지만 공통적인 점은 다음과 같다.

- ① 변형 방식은 기본적인 압출단조로써, 상부 Punch로 Web을 압축하고 Rib을 압출 성형한다.
- ② 제품의 외벽은 Draft Angle이 30°이하로 형분할면이 되고 횡형이다. 이것은 Die Cavity를 형성함과 동시에 Punch Guide 역할을 한다.
- ③ Die Insert는 반드시 일체는 아니고, 복수로 분할된 Split형으로 Holder에 삽입하는 구조

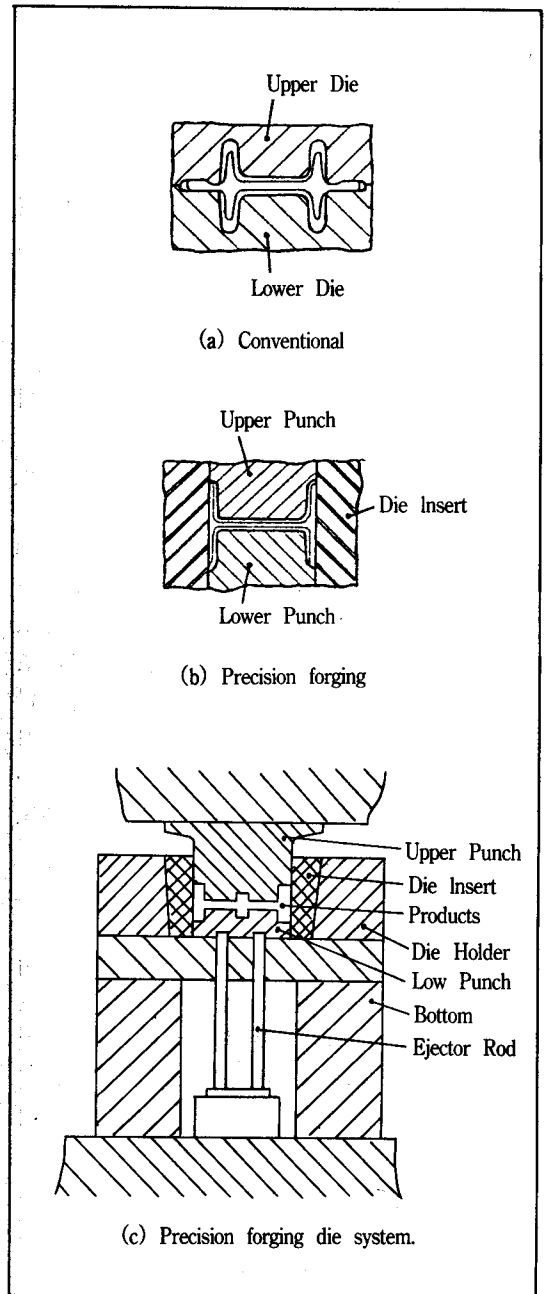


그림 7. 정밀단조의 기본적인 다이구조

도 있다.

- ④ 하부 Punch는 Ejector를 겸하고, 통상제품을 하부 Punch측에 남겨놓고 상부 Punch를 빼내는 구조로 한다.

금형구조는 형분할면의 설정에 따라 크게 변화되는데, 기본적으로 Rib 또는 Web의 선단을 잇는 면을 형분할면으로 선택한다. 형분할면은 금형이 가능한 간단한 구조가 되도록 설정하며, 소재를 넣고 제품을 빼내는 것이 용이하고 윤활이 균일하게 될 수 있는 곳 등의 단조작업상의 배려도 필요하다. 정밀 단조에는 (Rib의 높이)/(살두께) 비가 일반의 단조보다 큰것까지 성형할 수 있다. 보통급 단조는 성형한계가 8:1이지만 정밀단조의 경우 통상 15:1에서 특수한 경우 23:1까지도 가능하다. 또 Web두께는 단조 면적에 비례하여 얇게 형성할 수도 있는데 단조면적이 600cm<sup>2</sup>에서는 2.5~4mm, 600cm<sup>2</sup> 이하에서는 2~3mm가 한계이다. 단조 압력은 최종 성형 과정에서의 변형비에 의해서 달라지며 통상은 재료의 변형저항( $\sigma$ )의 4~10배로서 7075에서는 32~100kg/mm<sup>2</sup> 정도이다. 반면에 보통급 단조에서는 변형저항의 2.5~5배로 20~50kgf/mm<sup>2</sup> 정도이므로 단조 압력은 정밀단조가 상당히 높다. 압력이 높게되면 금형의 탄성변형이나 국부적인 소성변형을 발생시키고 치수정도가 나빠게 되므로 형설계(型設計)에서 낮은 압력에서 성형할 수 있도록 배려가 되어야 한다.

### 3.7 단조가공

알루미늄 합금의 단조온도는 합금의 종류에 따라 다르지만 350~470°C의 범위이다. 높은 온도 범위에서 단조는 재료의 변형 저항은 적지만 결정립의 조대화, 공정성용용, 고온 입계균열의 발생이 우려되고 저온에서의 가공은 재료의 소성유동이 불충분하게 된다. 정밀단조에서는 보통급 단조의 경우보다 가압시간을 길게하는 것이 많고 금형이 냉각되기 쉬우며 제품자체가 얇은 살두께 때문에 금형온도의 영향을 받기 쉬우므로 금형온도의 유지에 주의하여야 한다. 금형온도와 재료온도와의 차이가 적을 수록 단조품의 정도는 좋지만 통상 금형 온도는 단조온도보다 약 30°C 정도 낮게 선정하고, 특히 얇은 리브가 요구되는 경우에는 금형온도와 재료온도를 같게 유지해서 느린 가공속도로 등은 단조를 하고 가공중에 국부 과열이 발생하지 않도록 한다.

### 4. 생산에 및 경제성

그림8은 항공기용 정밀 단조품의 제품 예를 나타내고 그림9는 항공기 부품 정밀단조화의 대표적 예로서 항공기용 창틀을 보여 주고 있는데 Draft가 없는 얇은 살 두께의 리브를 갖는 정밀 단조품으로 표면은 기계가공을 하지 않고 사용한다. 베이스 기본 두께는 약 6mm이고 리브부는 약 4mm이며 리브의 외주부 드래프트는 0.5° 내면은 1.5°이고 곡면을 갖는 제품이다. 또 이 부품의 경우 단순한 프레임일 뿐 아니라 몸체의 구조 부재로서 설계되어 있기 때문에 굽힘응력에 대한 강도를 갖도록 원주 방향으로 Metal Flow가 형성되어야 한다.

정밀 단조품의 경제성 측면을 살펴 보면 기계가공이 거의 필요 없고, 공정의 단축, 재료 절약 등의 이점 때문에 보통급 단조품 보다 원가 절감이 된다. 그림10은 항공기용 창틀의 제조공정 및 특징을 나타내었고 그림11은 Wide Body Jet단조시의 단가 비교를 예로 보여 주고 있다. 제조 개수가 적을 때에는 보통급 단조의 경우가 유리하지만 제조 개수가 32개를 넘을 경우는 단조비가 고가임에도 불구하고 기계가공비의 절감에 따라 제품 단가는 정밀 단조품의 경우가 훨씬 유리하다.

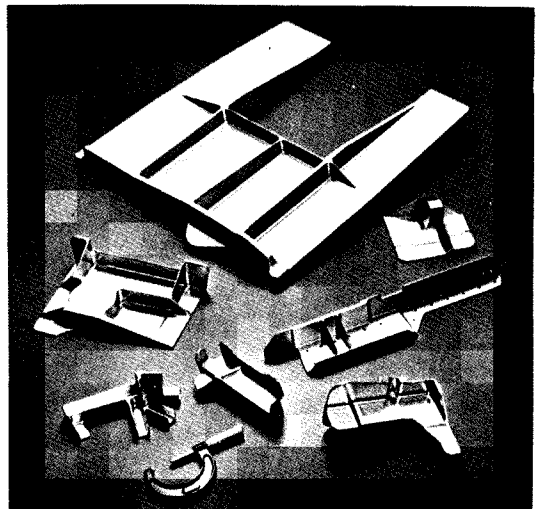


그림 8. 항공기용 정밀 단조품의 제품 예

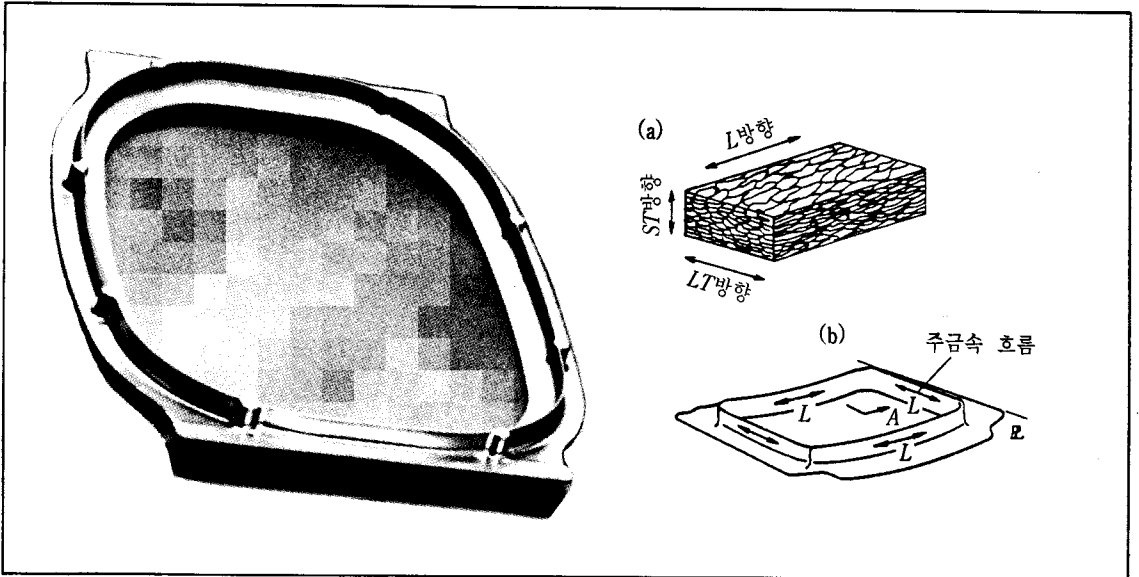


그림 9. 단조품의 방향성 모식도(a)와 창틀에 요구되는 금속흐름(b)

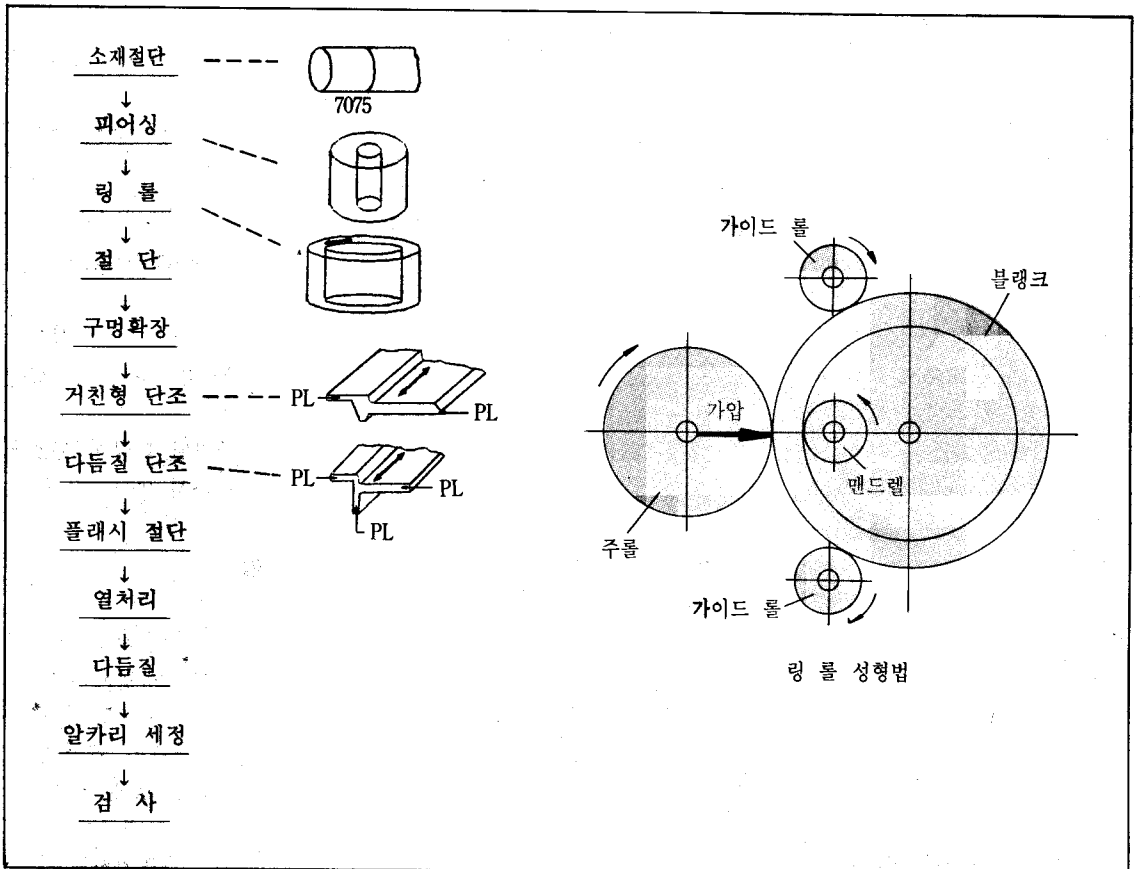


그림 10. 항공기용 창틀의 제조공정 및 특징

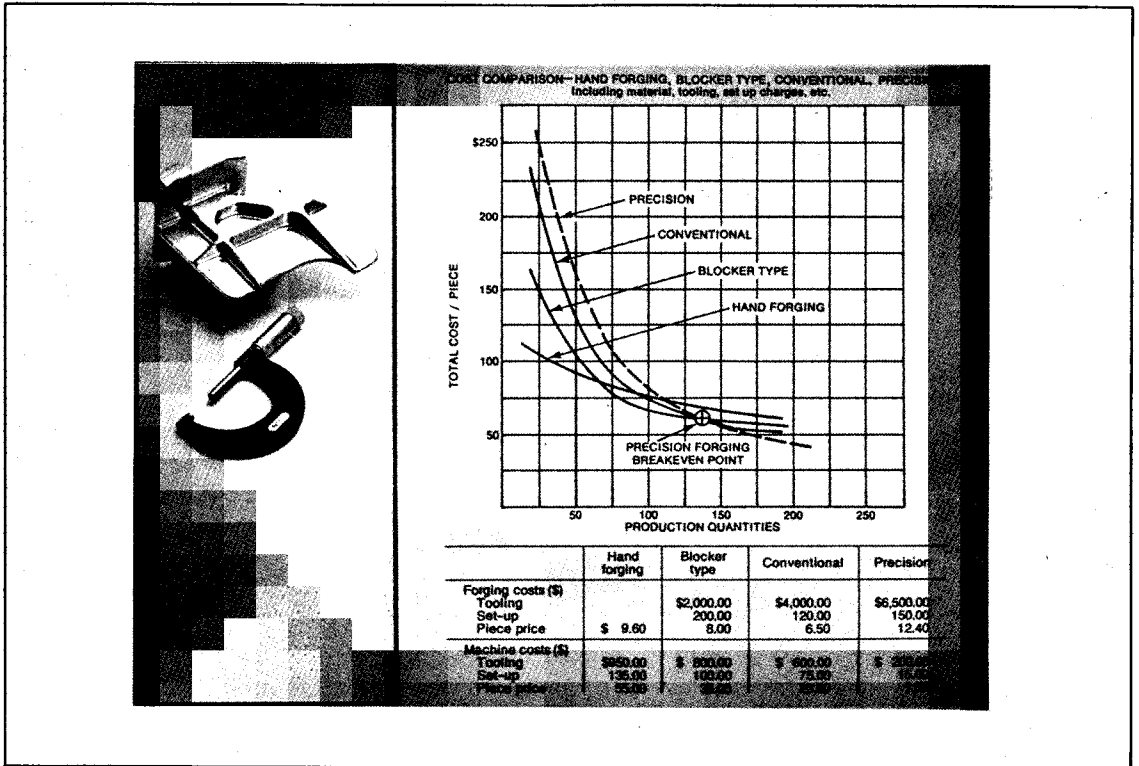


그림 11. 정밀단조품과 보통급 단조품·항공기 창들의 가격비교

### 5. 기술 및 시장동향

알루미늄 합금의 정밀단조품의 수요 확대를 위해서는 적절한 합금 재료의 선정, 가공조건의 정확한 설계, 근대화 설비의 사용이 필수조건으로 원가, 경량, 신뢰성, 상품성 등의 균형을 갖춘 개발이 강력히 요망되고 있다. 항공기용 알루미늄 단조품의 시장은 새로운 항공기 개발 PROJECT가 시작되면 비약적으로 발전되는 특징을 갖고 있는데 우리나라의 경우도 이 분야의 수요가 비약적으로 확대될 가능성이 기대된다.

#### 5.1 재료동향

정밀단조의 기초가 되는 알루미늄 소재는 성능, 원가면에서 중요하기 때문에 싼 가격으로 가공하기 쉽고 성능이 우수한 합금 개발은 수요증대에 직접적으로 연결된다. 최근의 정밀단조용 알루미늄 합금의 경향은 다음과 같다.

- (1) 수요자의 요구사항이 점점 까다로워져서 합금의 성분 및 그 범위가 세분화 되고 있다.
- (2) 단조품에 파괴인성, 피로균열전파저항, 내응력 부식 균열성의 향상이 요구되어 합금 성분중 V, Zr...등의 희유(稀有)원소를 첨가하여 미세화를 꾀한 합금이 나오고 있다.
- (3) 종래에 이미 성질이 판명된 합금이 새로운 주조법 또는 가공기술에 의해 다시 생산되고 있다.

#### 5.2 단조기술의 동향

단조품의 수요증가에 의해 단조기술도 이제까지의 관행적인 것에서 합리적인 방향으로 전환되고 있다. 앞으로 기술개발이 요망되는 분야는 복합재료(FRM)단조품, 초정밀 단조품, 폐색경 단조품, 분말 단조품 등을 들수 있고 현재 진행중인 단조의 기술적 동향은 재료개발, 결함의 감소, 단조품의 특성향상, 정도향상의 고품질화, 공정생략, 재료절약 등에 의한 원가 절감이 주류이고

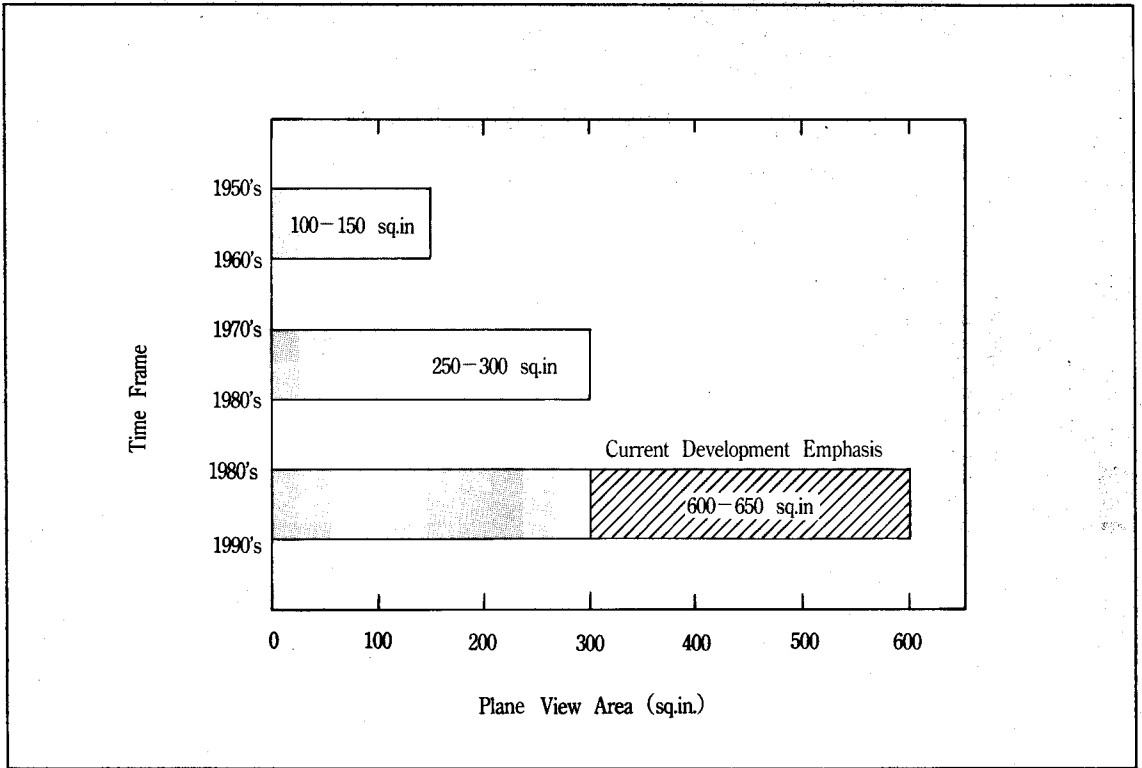


그림 12. 알루미늄 정밀단조품의 대형화 추세

이것을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제품의 대형화(프레스의 대형화와 대응하여 새로운 상품을 개척한다)
- (2) Metal Flow의 제어에 의한 정밀화(소성 유동을 조절하여 고품질, 제품치수의 정밀화에 대응)
- (3) 단조기술의 시스템화
- (4) 신 알루미늄 소재의 단조(신 합금, 분말 합금, Al-Li합금)
- (5) 윤활의 개량(물 유리계 윤활제, 유기계 윤활제, 윤활처리 장치를 단조기에 부착시키는 것 등의 검토가 이루어지고 있다.)

그림12는 연도별 알루미늄 정밀단조품의 대형화

추세를 나타내 주고 있다.

## 6. 결 론

알루미늄합금의 정밀 단조품은 항공기 분야에서 에너지절약, 경량화 등의 관점에서 많은 주목을 받고 있으며 경합재료에 비해서 원가도 낮고 성능 및 신뢰성이 우수한 단조품의 개발이 요구되는 시점에 와 있다. 이를 위해서 앞으로 대형화, 정밀화, 복잡화 등을 적극적으로 연구개발하여 경제적으로 단조품을 수요처에 제공할 수 있도록 하여야 할 것이다. 또한 단조기술 뿐만 아니라 동시에 주변기술의 발달도 수반되어야 할 것이다.