

항공기용 정밀 단조 부품 개발

	이 정 환
	한국기계연구원

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

	이 영 선
	한국기계연구원

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

	권 용 남
	한국기계연구원

- 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 금속재료 미세조직 제어
- E-mail : kyn1740@kmail.kimm.re.kr

	최 영 순
	현대기공(주)

- 현대기공(주) 부사장
- 관심분야 : 자동차 부품 단조
- E-mail : hmf@hdforging.co.kr

1. 서 론

국내 항공산업은 국방예산이 세계 10위권이며 공군력의 척도인 군 항공기 및 헬기의 보유규모가 세계 8위에 해당하는 특수한 상황이 항공 발전의 기반이 되고 있다. 초기 항공기 수리를 시작으로 80년대 면허기 조립생산 및 90년대 초 등훈련기 개발의 과정을 거쳐 꾸준히 발전하여 오고 있으며 특히, 지난해 초음속 훈련기인 T-50 개발은 항공산업이 국가의 기간산업으로 도약하는 큰 전기로 기록되고 있다. 또한, 국내외 항공운송 수요의 지속적인 증가는 군용 항공기 뿐만 아니라 민간 항공기 시장의 확대를 가져와 경제성 측면에서 취약점을 가지고 있는 항공산업의 투자 안정성을 더욱더 높이는 결과를 가져왔다. 이러한 항공산업의 성장은 국내 항공산업 발전에 가장 큰 걸림돌로 작용하여온 안정적인 시장의 확보 차원에서 큰 의미를 가지며 향후 자동차, 반도체, 조선 산업에 버금가는 국가 기간 산업으로의 성장이 가능한 잠재력이 높은 분야로 지속적이고 전폭적인 투자와 연구개발이 필요한 분야이다.

이와 같이 항공산업이 발전할 수 있는 긍정적인 산업환경은 90년대 F-16 면허기 생산, KT-1 초등 훈련기 개발 및 양산, 그리고 초음속 T-50 기의 개발로 이어져 항공산업의 기반 구축과 독자 모델의 보유라는 가시적인 성과를 이룩하는 바탕으로 작용하였음에도 불구하고 항공 관련 부품산업의 기반이 절대적으로 취약하다는 구조

적인 취약성을 가지고 있다. 부품소재 산업은 이미 자동차, 반도체 산업의 육성시에서도 경험한 바와 같이 최종 산업의 성패를 좌우할 수 있는 기저 산업으로 그 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 항공기 부품은 설계에서 생산에 이르는 전 과정이 여타 산업에서와는 달리 높은 기술과 엄격한 관리가 요구되어 최근까지도 국내에 관련 업체가 쉽게 성장하지 못하고 있는 상황에 놓여 있었다. 또한, KT-1 및 T-50의 개발전까지는 국내에서 이루어진 완제품의 생산은 면허 생산이라서 독자적인 부품 개발 및 생산은 전혀 가능하지 않았다. 이로 인해 항공산업에 부품을 공급해 본 경험을 축적할 수 없었으며 이로 인해 국내 부품소재 기업의 성장은 매우 어려운 상황이었다. 하지만, 초등 및 고등 훈련기의 개발로 인해 독자적인 국산 항공 부품 개발의 필요성이 높아지는 환경이 지난 10여년 전부터 조성되어 왔다.

90년대초 중형항공기 개발 사업이 추진되면서 항공사 및 일부 소재부품업체에서 항공기 부품 개발 프로그램을 시작하였다. 하지만, 중형항공기 사업이 중단됨에 따라 해당분야의 연구개발 양상에는 변화가 있었다. 본고는 산업자원부 중기거점 기술개발사업으로 수행된 “항공우주용 소재 부품 개발”의 세부과제인 “고강도 정밀 단조 부품 개발”의 연구 결과로써 한국 공군의 초등훈련기인 KT-1에 적용을 목표로 개발된 단조 부품의 개발, 제조기술 및 개발품 특성에 관한 연구 결과를 소개하고자 한다. 본 연구에서 개발한 부품은 항공기용 고강도 알루미늄 합금 단조품으로 국내 단조업계서는 최근까지도 거의 개발이 이루어지지 않는 알루미늄 단조 분야의 기초가 되는 연구로 판단된다. 또한, 과제를 주관하는 업체의 경우 항공부품의 독특한 개발절차의 습득을 통해 향후 항공부품의 개발 및 양산의 절차에 적극적으로 대체할 수 있게 되었다.

2. 개발 단조 부품

特 輯

본 과제를 통하여 개발한 단조 부품들은 Pintle Bracket 4가지 모델과 Landing Gear의 핵심부품인 Torque Link 및 Lower Drag Stay 등이다.

Pintle Bracket은 랜딩기어와 날개구조물을 연결해 주는 부품으로 총 4가지 모델을 개발하였으며 그 중 대표적인 외관 형상은 그림 1(a)에 나타내었다. 개발 대상 부품의 대표적인 요구 특성으로는 인장강도 490MPa이상, 10,000 비행시간의 피로수명 및 내충격, 내피로성, 내응력 부식 특성 등이 있다. 또한, 단조후 리브-웹브부의 무가공이 요구되며 기계가공을 최소화시킬수 있는 단조공정 설계가 요구된다.

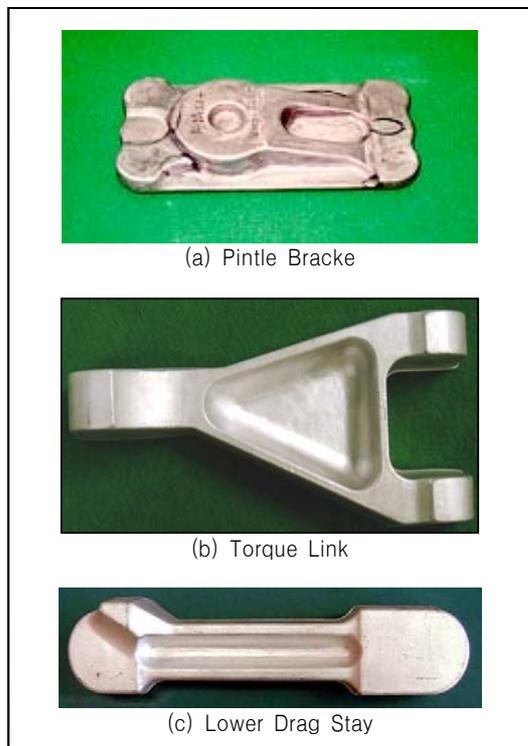


그림 1. 개발 단조부품의 외관

Landing Gear용 단조품인 Torque Link와 Lower Drag Stay는 인장강도 450MPa이상의 원소재를 이용하여 제조되는 부품으로, 항공기 이착륙시 직접적으로 충격을 흡수하는 보안장치인 Landing Gear의 부품으로 기체 중량을 지지해야 하므로 고강도, 고인성, 고평로강도가 요구

되며 수납시 사용 공간의 최소화가 필요하다. 그림 1 (b)와 (c)는 Torque Link와 Lower Drag Stay 단조품 외관을 나타내고 있다.

이상의 단조부품들의 개발과정은 그림 2에 도식적으로 나타낸 바와 같이 우선 최종 가공 부품의 도면에 의거하여 최적 단조품을 설계하기 위하여 CATIA™를 통해 모델링하였다.

이를 바탕으로 단조금형의 설계 및 단조공정 설계를 CATIA™ 및 유한요소해석 프로그램인 DEFORM™을 이용하여 실시하였다. 설계된 금형과 공정에 따라 실제 작업후 해석결과와 실험결과를 보정하는 방법으로 최종 가공 제품을 위한 최적 단조품을 개발할 수 있었다. 또한, 이상의 단조공정 설계와 병행하여 사용한 Al 7050, 2014 및 7075 원소재의 고온 변형 특성을 조사함으로써 최적 성형을 얻기 위한 기초 데이터베이스로 활용하였다.

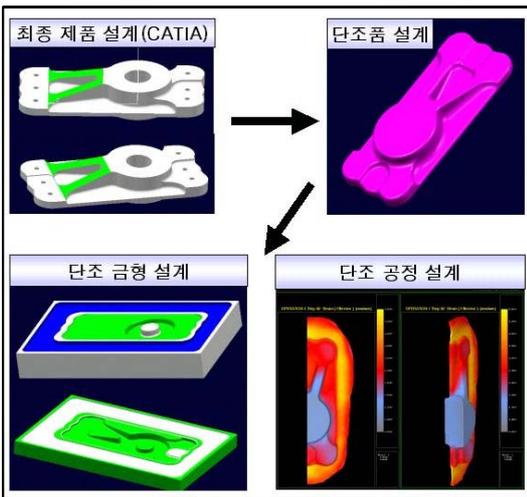


그림 2. 단조 부품 개발 순서

3. 유한요소해석을 통한 단조품 제조 공정 설계

본 연구에서는 3차원 해석을 위해 CATIA™를 이용하여 소재와 금형의 형상을 모델링 하였으며 유한요소해석은 3차원 해석이 가능한 DEFORM™-3D 프로그램을 이용하였다.

최종 단조품의 물성을 결정하는 요인중 단조 공정시 건전한 metal flow를 얻음과 동시에 재료 이용율을 높힐 수 있는 단조 소재의 형상 및 크기를 결정하기 위하여 유한 요소 해석을 실시하였다.

Pintle Bracket의 단조공정해석은 금형과 소재의 온도 변화를 고려하기 위해 금형 온도는 200℃, 소재 온도는 450℃로 설정하였다. 소재의 특성은 실제 Pintle Bracket 제조에 사용되는 Al 7050의 고온 소성변형 데이터를 사용하였다. 단조품의 미세한 부분까지 분석을 Mesh수는 표면 요소가 15,000개로 설정하였다. 단조의 진행에 따른 부위별 변형 양상과 변형을 분포를 관찰한 결과 결함 발생 없는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3(a)은 Trimming 전 단조품의 형상 및 전체 단조 과정중 소요되는 하중을 나타낸 그림으로 최대 약 2,000톤이 필요함을 알 수 있었다. 또한 단조품의 온도는 국부적으로 510℃ 까지 상승됨을 관찰할 수 있는데 사용 소재인 Al 7050합금에서 국부적인 용융이 발생할 수 있는 가능성을 예상하였으며, 실제 단조공정시 소재온도 및 단조시 수온을 용융점 아래로 제어하는 기준을 설정하였다. 1차 해석을 통해 실제 작업시 단조온도를 약 30℃ 이상 낮춰야 함을 알 수 있었다. 이상과 같이 해석에 사용되는 작업변수의 변화를 통해 Pintle Bracket 및 Landing Gear부품인 Torque Link, Lower Drag Stay의 최적 작업 조건을 계산할 수 있었으며 이상의 결과들을 실제 단조 작업 진행시 작업 기준으로 사용하였다.

4. 단조품 제조 공정

열간 단조 금형 설계에서 중요한 사항은 제품의 결함이 발생되지 않도록 하는 공정 설계와 더불어 유동 속도의 차이를 고려한 Flash Land 부와 Gutter부 설계 및 상하형의 위치 선정 등이 있다. 본 연구에서는 정밀단조의 기준으로

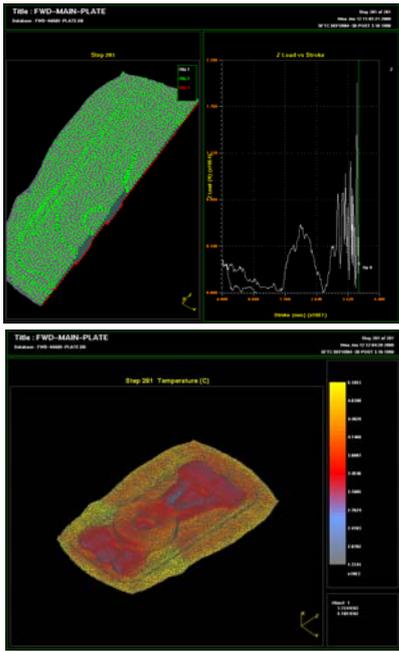


그림 3. 단조 소요 하중 및 단조품의 부위별 온도 분포

Flash Land와 Gutter부를 설계하였다. 그림 4는 개발 단조품의 하나인 FWD Main Pintle를 CATIA™를 이용하여 금형을 설계한 과정을 나타내고 있다. 그림 5는 동일한 FWD Main Pintle의 Master전극, 열간단조 금형 및 Trimming 금형들을 보여주고 있다.

Torque Link의 경우 Preform의 설계가 부적절할 경우 미성형이 발생함을 유한요소 해석에

서 관찰할 수 있었으며 이를 방지하기 위하여 Blocker를 이용하여 미성형을 방지할 수 있는 금형을 설계, 제작하였다. Lower Drag Stay는 제품의 형상이 상하 대칭에 가까운 부품으로 비교적 금형제작이 용이한 특징을 가진다.

Pintle Bracket 단조품은 Al 7075소재의 내응력 부식 특성을 개선하고자 개발된 Al 7050을 사용하였으며 단조 후 T7452조건을 통하여 열처리를 수행하였다. T7452는 470~480℃에서 용체화 처리를 한 후 1~5%의 압축 가공 후 2단 시효처리(115~125℃에서 5시간 유지 후, 170~180℃에서 27시간 유지 후 공냉)를 수행하는 열처리 조건으로 T7451의 인장 가공 대신에 압축가공을 하는 것이 특징이다. 단조 후 공정은 단조품 표면처리 및 도장을 거친 후 상대제품과의 조립을 위해 기계가공을 통해 정밀한 치수를 부여하며 최종적으로 부품 번호를 표기한다. 개발 대상품 중 Pintle Bracket류는 기존에 압연 관재를 이용하여 전면 기계가공으로 제조되는 것으로 본 연구에서는 단조 공정의 설계에 따라 변화되는 제품도를 CATIA™를 이용하여 설계한 후 항공사로부터 조립상의 문제점 유무를 확인하므로써 최종 제품도를 확정하였다.

본 연구를 통하여 재료이용율을 기존 기계가공품에 비해 10% 향상시킴과 동시에 전반적인 기계적 물성 향상을 얻을 수 있었다.

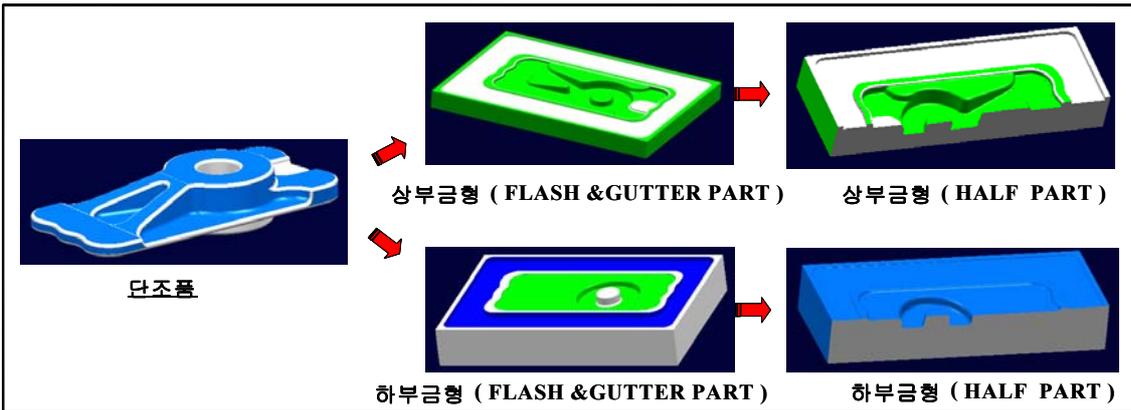


그림 4. FWD Main Pintle 금형 설계

KT-1에 사용되는 Torque Link 및 Lower Drag Stay는 영국 FHL사로부터 수입한 단조품을 가공한 제품으로 KT-1의 도면도 FHL사 도면을 기준으로 작성되었다. 따라서, 본 연구에서 사용한 도면 및 제조 방법도 기존 FHL사 및 KT-1 부품을 기준으로 설계 및 작성되었다.

FHL사에서 규정한 Torque Link의 단조공정은 BS 2L 77 Class 1 B, C, A에서 제시한 조건에 가장 부합하는 Al 2014 합금으로 본 연구에서는 압출봉 형태로 생산된 소재를 사용하였다. 단조공정 후 495~505℃에서 2시간 동안 유지 한 후 40~70℃의 물에서 용체화 처리를 한 후, 185℃ 에서 6시간 유지하여 인공시효 처리를 하였다. Lower Drag Stay부품의 단조공정은 DEF STAN 00-970 요구사항에 따른 Class 1 단조로써 Al 7075 압출봉을 이용하였으며 단조 후 460~470℃에서 2시간 유지 후 60~80℃의 물에 급냉후 110℃ 에서 24시간, 177℃에서 9시간을 시효하여 기계적 물성을 부여하였다.

5. 단조 알루미늄 합금의 고온 변형 특성 및 단조품 물성 예측

Al 합금의 단조 가공은 비교적 빠른 변형속도로 이루어지기 때문에 냉간가공을 할 때와는 달리 재료의 조직변화가 크고 불균일 할 수 있으며, 특히 동적 재결정 (Dynamic Recrystallization), 결정립 및 입자 성장, 입계 용융 등의 국부적인 조직변화는 강도, 연성, 부식성 등의 재료 물성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 단조 공정은 사용자와 환경 등의 여러 변수에 의해 결정되므로 공정에 의해서 변화하는 미세조직을 예측하기란 매우 어려운 일로서, 열간변형시 균질한 재질을 유지할 수 있는 미세조직 예측 및 제어 기술은 단조 부품의 기계적 성질을 향상시키는데 필수적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는 단조시 발생하는 결정립도의 변화를 조사하며 표면 결정립 조대화



그림 5. FWD Main Pintle 성형용 금형

원인을 소재에 가해지는 열적, 기계적 에너지의 이력을 고려하여 분석하였다.

Al 7050의 고온변형특성을 파악하기 위하여 고온압축시험을 수행하였다. 고온압축시험의 결과는 다양한 가공조건에서의 변형에 필요한 필요압하량의 예측시스템 개발과 압축시험의 동적 재결정에 의한 결정립 분포예측을 위한 유한요소해석 데이터의 획득을 목적으로 하여 온도범위 350~430℃, 변형속도 0.01~50/s에서 이루어졌다. 그림 6은 각각의 온도와 변형속도에서 얻은 고온유동곡선을 나타내고 있다.

변형속도가 빨라질수록 곡선의 Fluctuation과 유동응력의 감소정도가 심해지는데 이는 빠른 변형속도일수록 변형중에 소재가 겪는 미세조직의 변화가 불균일한 상태를 나타내며, 변형속도가 빨라질수록 마찰의 증가로 인해 소재의 온도가

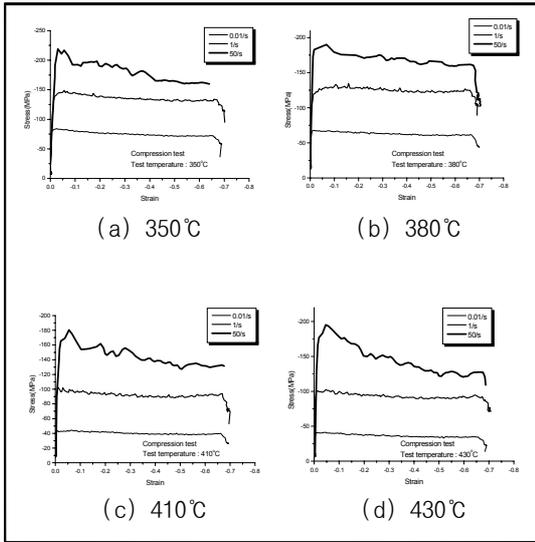


그림 6. Al 7050의 고온 유동곡선

크게 증가하기 때문이며 변형속도가 50/s인 경우는 다른 두 경우에 비하여 시편의 온도 증가 폭이 매우 큼을 알 수 있다. 따라서 곡선상에서 유동응력의 감소폭이 가장 큰 50/s인 변형속도에서 동적재결정이 가장 활발히 일어났다고 볼 수는 없다. 하지만 전반적인 곡선들의 양상은 점차적으로 유동응력이 감소하는 동적재결정의 양상을 보여주고 있다.

변형초기에는 조직이 하중방향으로 길게 연신되는 양상을 보이지만 변형량이 증가하여 변형량이 0.3에 도달하게 되면 길게 연신된 결정립의 입계를 따라서 미세한 등방형의 결정립들이 생겨나기 시작하는 것이 보인다. 보다 변형량이 많아져서 0.7에 이르게 되면 그림에서 나타나는 바와 같이 등방형의 결정립들로 완전히 대체되는 양상을 보인다. 이러한 결정립들은 변형도중에 생성된 조직으로서 정적 재결정에 의한 조직이라기 보다는 동적재결정에 의해 생성된 것으로 생각할 수 있다.(그림 7) Al 7050 합금의 단조시 변형량에 따른 미세조직의 변화는 동적 재결정에 의해 주도되며 소재가 받게되는 변형량상과 국부적인 온도분포에 따라 불균일한 거

特 輯

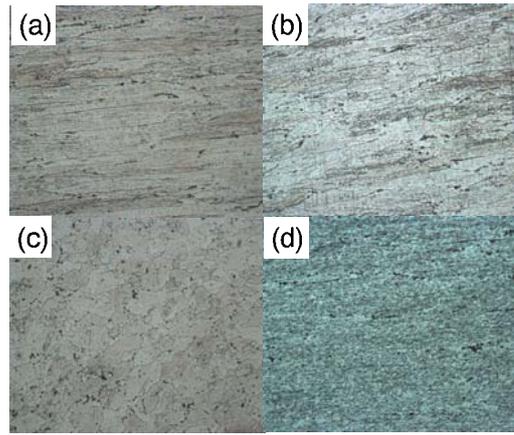


그림 7. 50/s 압축실험후 용체화처리한 시편의 변형량에 따른 미세조직 변화
(a) strain=0.1 (b) strain=0.3
(c) strain=0.7 (d) 압축시험전 미세조직

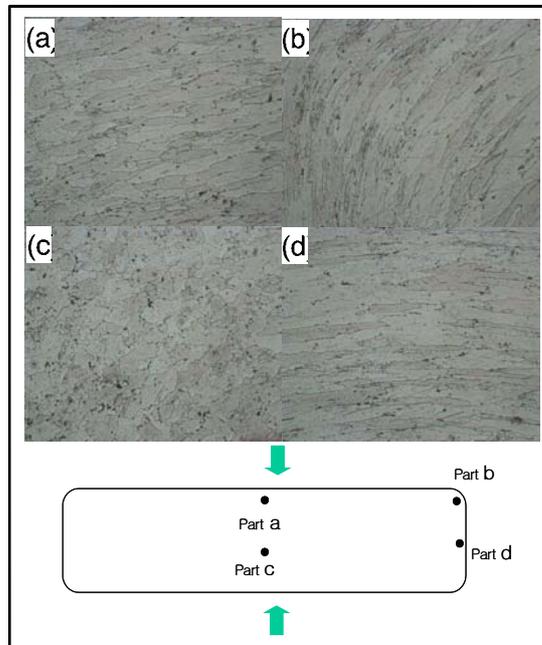


그림 8. 410°C, 50/s 압축실험(strain=0.7) 후 용체화처리한 시편부위별 미세조직의 변화

동을 보인다. 그림 8은 하나의 압축실험 시편에서 부위별로 조직의 불균일성을 잘 나타내주는 그림이다. 소재의 모서리부와 외곽부에는 재결정이 거의 일어나지 않았음을 알 수 있으나 가장 변형량이 많은 중앙부에는 재결정이 일어났음을

보여준다. 동적 재결정은 임계변형량 이상의 변형이 결정립에 가해지면 새롭게 생성된 결정립이라도 내부에 반복적인 재결정을 일으킨다.

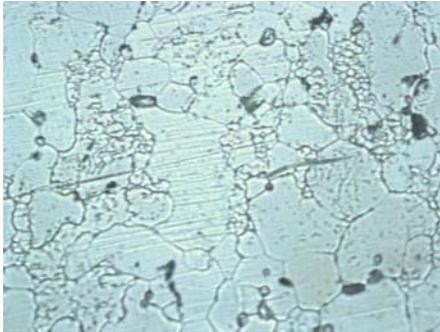


그림 9. Al 7050 합금의 2차 재결정

그림 9는 한번 재결정된 시편의 내부에서 다시 임계변형량이 축적되어 새로운 2차 재결정이 시작되는 양상을 보여주는 그림이다. 이와 더불어 온도에 따라서 새롭게 생성된 결정립들의 성장 속도가 다르므로 재결정된 결정립의 크기를 예측하기 위해서는 변형량과 온도뿐만 아니라 변형속도까지 함께 고려되어야 하며 반복적인 재결정을 고려하기 위하여 Power-law Type의 개선된 모델이 필요할 것으로 판단된다.

6. 단조품의 이상 결정성장 제어 기술

알루미늄 합금 단조품의 표면에서 조대한 결정립층이 자주 관찰이 되며 이는 단조품 물성을

떨어뜨리는 원인으로 작용한다고 알려져 왔다. 이러한 표면 조대 결정립층을 제어하기 위하여 단조시 소재에 가해지는 변형량을 균일하게 분포시키면 불균일한 결정립 성장을 억제할 수 있다는 예상을 할 수 있다. 표면 결정립 성장을 제거하기 위한 이상의 개념을 단조 소재의 Preform에 일정한 형상을 부여하여 단조시 변형을 제어할 얻는 방법으로 구체화하였다. 그림 10은 단조소재의 Preform이 원통형일 경우와 일정한 형상을 가지고 있을 때 부위별 변형을 및 온도 분포를 DEFORM™-3D를 이용하여 해석한 결과이다. Preform을 이용하여 최종 단조품을 제조하는 경우 최대온도와 최소온도 사이의 간격이 봉상 형태의 원소재를 사용할 때에 비해 감소할 뿐만 아니라, 표면부에서 발생하는 최대 온도도 낮아짐을 해석결과에서 확인하였다. 최종 단조품에서 두꺼운 단면을 가지는 부위를 고려하여 설계한 Preform을 사용하는 경우 이 부위에 집중되는 에너지가 감소되며 이로 인해 결정립 성장의 억제 효과를 얻을 수 있다.

실제 단조 작업을 통하여 표면 조대화 결정립 성장을 방지한 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)에서는 압출 봉재를 가공 없이 사용할 경우는 마찰과 변형유기 결정립 성장 현상에 의해 결정립이 조대화를 관찰한 반면 그림 11(b)의 Preform을 사용한 경우 단조시 표면 마찰력을 감소시켜 결정립 성장을 억제할 수 있

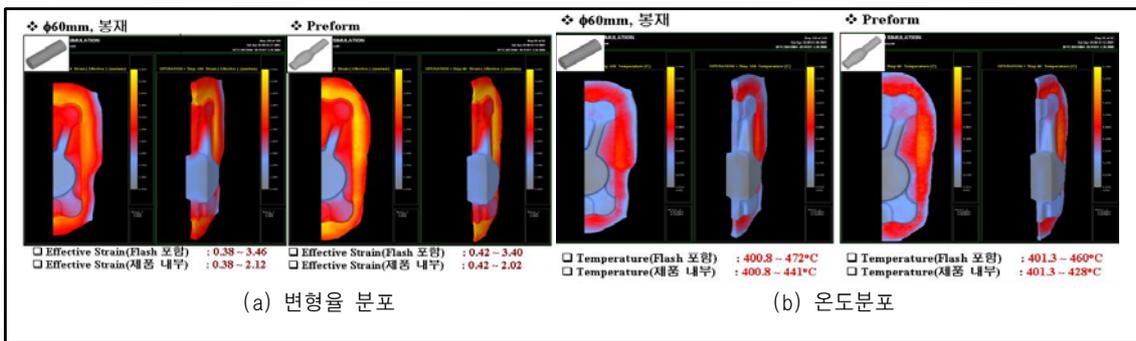


그림 10. 3차원 유한요소해를 이용한 단조품의 변형율/온도 분포

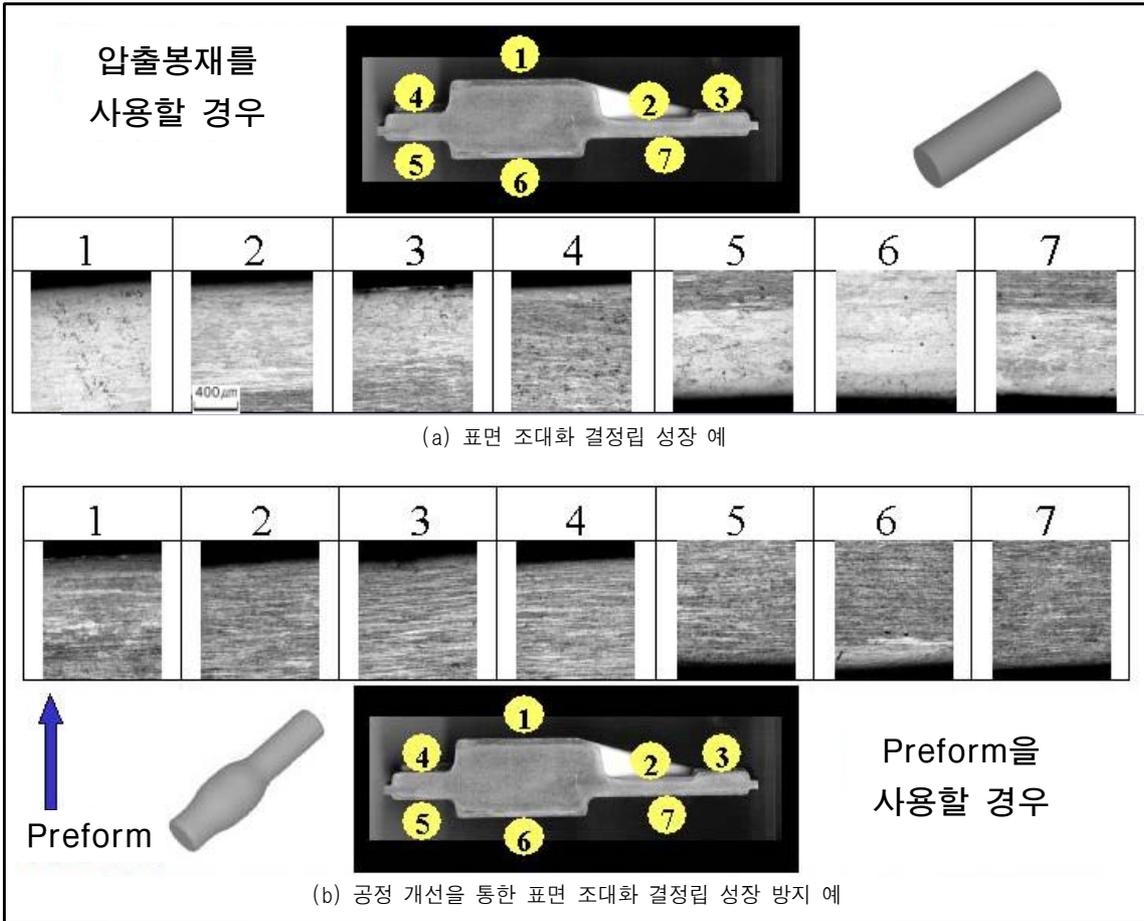


그림 11. Pintle Bracket 단조 시제품의 조직 사진

었다. 이상의 결과는 다른 Pintle Bracket 3종 및 Landing Gear부품에서도 동일하게 적용됨을 확인하였다.

7. 단조품 특성

개발 단조품의 특성을 평가하기 위하여 Metal Flow, 액체침투탐상 검사를 통한 표면결함조사, 미세조직관찰, 경도, 인장특성, 피로강도, 파괴인성, 응력부식시험 등을 실시하였다. 본고에서는 지면관계상 항공기 단조품에서 요구되는 가장 중요한 물성인 인장시험 결과와 피로시험 결과를 통해 본 개발 단조품이 요구하는 물성을 만족하

는 우수한 기계적 특성을 나타내고 있음을 나타내었다.

각 개발 단조품의 부위별로 인장시편을 채취하여 시험을 실시함으로써 부위별 기계적 특성의 변화를 조사하였다. 그림 12에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 개발한 단조품 모두 해당 규격을 상회하는 인장 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 Pintle Bracket 단조품의 피로특성을 나타낸 그림으로 검은 심볼로 표시한 데이터는 본 연구에서 사용한 미국 국방규격을 나타낸다. 본 연구에서 개발한 단조품의 피로강도는 시험 전 구역에서 요구되는 규격을 상회하는 것을 확인할

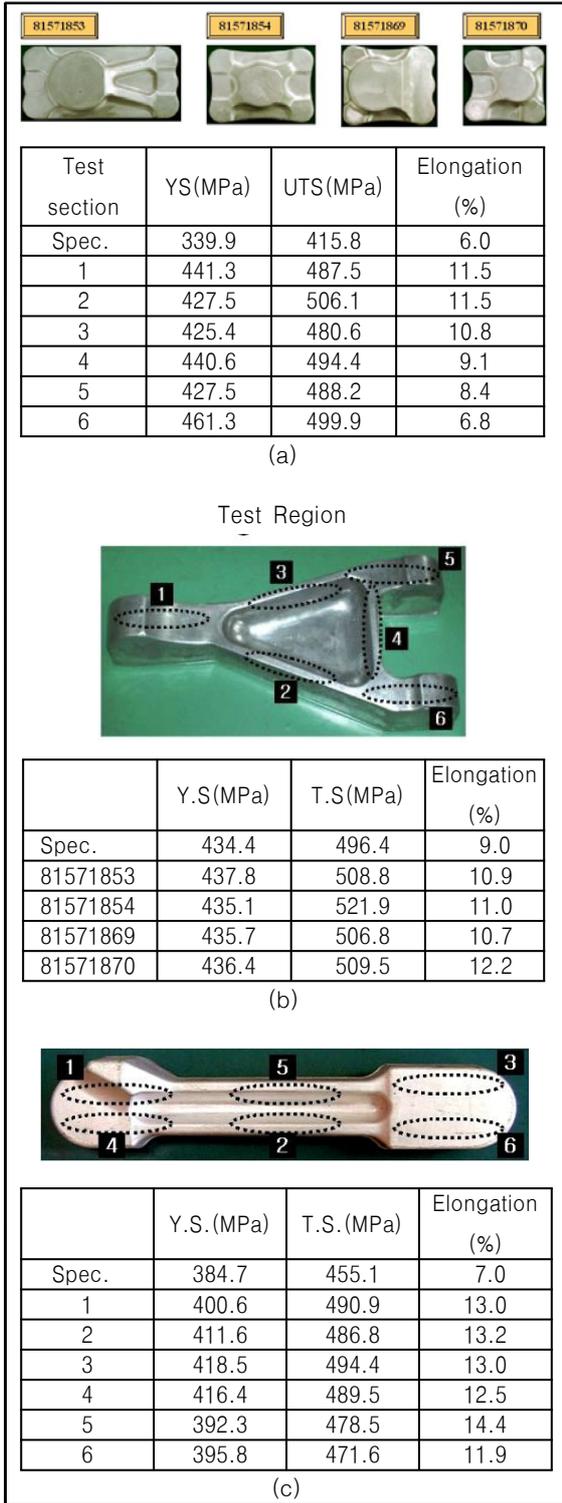


그림 12. 개발 단조품의 인장 특성

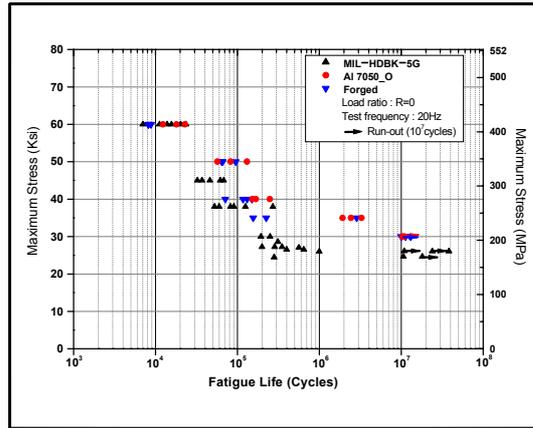


그림 13. Al 7050 단조품의 피로 특성

수 있다. 이상의 결과뿐만 아니라 상기 언급한 모든 시험에서 개발 단조품의 물성은 규격을 모두 만족하는 우수한 물성을 가진 것으로 판명되었다.

8. 결 론

국내 항공산업은 T-50 초음속 고등훈련기의 성공적인 개발로 획기적인 발전의 전기를 마련하였으나 그 기반을 이루는 항공부품산업의 취약성은 향후 발전에 걸림돌로 작용할 가능성이 높다. 항공부품은 여타 산업에서 요구되는 것보다 높은 생산기술이 필요한 분야로 본 연구에서 개발한 항공기용 단조부품은 국내 항공산업을 도약기에서 중흥기로의 발전을 앞당기는 전기가 될 수 있다.

특히 본 연구에서는 KT-1에 장착될 수 있는 Pintle Bracket류 4종, Landing Gear 부품 2종을 소재 선정, 단조공정 및 후처리 설계 및 물성 평가 방법에 이르기까지 항공기용 단조부품의 개발 전과정을 항공기 부품 제조 관련 규정에 의거하여 수행함으로써 국내 항공기용 단조품 개발의 역량을 축적할 수 있었다. 또한, 기술적으로 보다 우수한 기계적 물성을 가지는 단조품을 개발하기 위하여 표면 조대 결정립층을 억제할 수 있는 Preform을 이용한 단조법을 새롭게 제안하였다.

이상과 같이 우수한 물성을 가지는 것으로 확인된 단조품들은 영국 FHL사에 수출을 통해 국내 개발 항공 단조품의 산업화를 달성하는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 기술 개발의 축적된 역량과 개발 제품의 수출은 국내 항공기용 단조품 개발 수준이 크게 향상되었음을 나타내는 증거로 본 연구진은 최근 한국공군으로부터 다수의 단조품 개발을 의뢰받은 상태이다.