




# 17-4PH 합금 주조품 개발

	<b>이 종 훈</b>
	<b>한국기계연구원</b>


- 표면연구부 책임연구원(부장)
- 관심분야 : 항공기 부품 개발
- E-mail : ljh1343@kmail.kimm.re.kr

<b>임 영 목</b>	
<b>한국기계연구원</b>	


- 표면연구부 선임연구원
- 관심분야 : 내열, 내마모 주조품 개발
- E-mail: rhyim@kmail.kimm.re.kr

	<b>유 위 도</b>
	<b>한국기계연구원</b>

- 표면연구부 주임기술기원
- 관심분야 : 원심주조 주조품 개발
- E-mail: ywd6136@kimm.re.kr

<b>주 호 슬</b>	
<b>천지산업(주)</b>	

- 천지산업(주) 부장
- 관심분야 : 정밀주조품 개발
- E-mail: chunji@cholian.net

	<b>장 병 문</b>
	<b>로스트왁스(주) 이사</b>

- 로스트왁스(주) 이사
- 관심분야 : 정밀주조품 개발
- E-mail : bmchang@lostwax.co.kr

## 1. 머리말

항공우주산업의 발달로 항공우주용 소재부품의 수요가 증가하고 있으나 제품의 고난이도 특성 및 안정성 면에서 국내 개발이 미진한 실정이다. 소량의 복잡한 형상 부품은 제작 기간 및 비용을 고려할 때, 핵심부품에 정밀 주조품의 적용이 증가하고 있으나, 국내 주조 소재 제작업체의 영세성 및 기술력의 한계로 인해 발전하고 있는 항공용 가공 및 조립 산업의 요구에 부응하지 못하고 있다. 이에 항공 산업에 소요되는 고강도 합금 주물품을 개발함으로써 수입 대체를 통한 외화의 절약 및 국내 기술의 확보를 통한 기술 자립을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

현재, 항공기 엔진, 가스터빈 등 항공용 동력 장치의 구조용 부품 소재 중 내열성이 크게 요구되지 않는 경우 석출경화형 스테인리스 주조품이 가장 보편적으로 사용되고 있으나, 대형 정밀 주조품의 치수 관리, 안정적인 기계적 성질의 확보, 결함의 제어 및 불량품의 제거 등 기술적인 문제로 인해 대부분 수입에 의존하고 있다. 따라서 이들 주조품에 대한 국산화 개발이 절실하게 요구되고 있으나, 현재까지 이들 주조품의 국산화에 있어서, 관련 연구 개발과 기술 개발이 충분히 이루어지지 못한 관계로, 확고한 기술력을 확보하고 있지 못한 실정이다.

개발 대상인 Flight Control Unit는 현재 민간 항공기(유럽의 Air Bus)에 사용되고 있는 부품으로 개발 완료시 전량 수출예정이며, Diffuser

Case와 Impeller는 항공용 엔진에 소요되는 터보 압축기 부품으로 고도의 안정성과 엄밀한 치수 정밀도를 요구하는 3차원 곡면 형상을 가지며, 이들을 기계 가공 시에 많은 가공시간과 그에 따른 높은 비용이 소요되므로 전형적으로 정밀주조공법을 통해 제작되어야 하는 부품이다. 현재, 항공기 엔진을 생산하는 S사에서 사용하기 위해 개발 중인 부품으로 외국의 기술 보호 정책에 따라 기술이전이 용이하지 않고, 고도의 기술력을 가진 소수의 기술 독점 주조업체를 사용하여 구매하여야 하므로 부품 개발에 있어서 주도권을 가지지 못하는 문제점이 예상된다. 따라서 조속한 기간 내에 국내 기술의 확보를 통해 개발이 이루어져야 하며, 개발 후 바로 상용화시킬 수 있는 부품이다.

## 2. 기술개발의 내용

### 2.1 금형의 설계 및 제작

Flight Control Unit의 주어진 도면은 기계 가공이 끝난 후의 상태로서 주조품을 제작하기 위해서는 가공전 주조품에 대한 주조도가 필수적으로 만들어져야 함에 따라 초기 기계 가공된 후의 도면을 검토한 뒤 다음과 같이 두 가지로 분류하여 필요한 일부 도면 설계 작업을 진행하였다. 첫째는 주조 상태로 계속 남아 있는 부분, 둘째는 주조 후 기계 가공이 필요한 부분으로 분류하였다. 개발 대상 품목의 가공도를 활용하여 소재도를 작성하고, 다시 수축과 팽창율을 제품의 형상에 맞게 각각 적용하여 금형도를 작성하여 금형을 가공 제작하였다.(그림. 1)



그림 1. FORK END FLANGED외12종

Diffuser Case의 금형 제작에 있어서 고려할 기술적인 사항은 왁스 패턴 사출시 얇고 날카로운 axial vane의 성형을 확보하여야 한다는 점이다. 즉, vane의 inlet tip round 0.36mm, outlet tip round 0.35mm는 통상적인 금형의 제작 방법으로는 왁스 사출시 공기의 압축 저항으로 인해 성형에 실패할 가능성이 있으므로 이를 해결하기 위한 고려가 필요하다. 미세 air vent의 부여, air vent의 역할을 하는 parting line의 설정 및 tip에서의 parting line 설정 등의 방법이 있으나, 이는 금형 제작상의 가공 난이도, 제품 형상의 안정성 및 제작 비용 등을 고려하여 수차례의 시험 작업을 통해 설정하였다. Diffuser Case는 원주형 contour를 갖는 29개의 radial vane 및 48개의 axial vane이 원판에 부착된 형상을 가지고 있다. 특히, axial vane은 inlet tip round가 0.36mm이고 outlet tip round가 0.35mm이면서, 각 vane이 원통형 body에 일정한 간격으로 위치해 있다. 이로 인해, diffuser case의 왁스 모형을 일체형 금형에서 제작하기 위해서는 다수의 금형 코어가 필요하므로, 본 연구에서는 diffuser case의 왁스모형을 분리 제작하기 위한 방안으로, 그림 2(a),(b)(c)와 같이

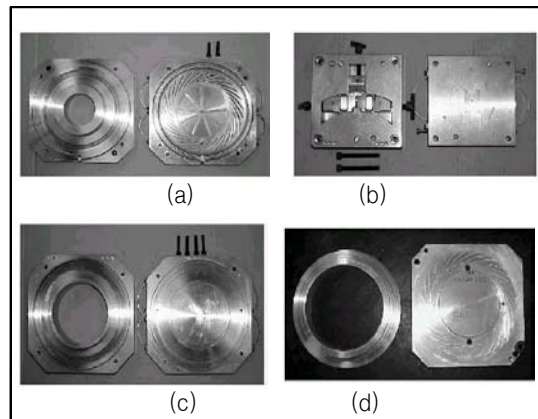


그림 2. Diffuser Case의 금형

- (a) Radial Vane Wax Die
- (b) Axial Vane Wax Die
- (c) Internal Rib Wax Die
- (d) Wax Jig of Diffuser Case

duralumin계 알루미늄 합금으로 총 3개의 금형을 제작하였다.

APU Impeller의 금형 제작 방법에 있어서, 고려할 사항은 vane 성형에 필요한 금형 core의 radial 방향으로의 이형여부인데, 이는 3차원 modelling data의 분석 및 시험 가공 성형을 통해 확인하였다. 금형의 제작에 있어서, 26 vane 용 금형 core의 치수 안정도와 직결되는 guide의 사용 및 fixturing 방법이 개발되었다. 또한, vane의 tip부의 round가 부품의 기능에 결정적인 역할을 하는 주요 부위인데 radial 방향으로 발위해야 하는 core에서 under cut 현상이 발생하여 분리해야 하는 기술적인 문제를 해결할 방안에 대해 고안하였다.

왁스 패턴의 사출 후에 필연적으로 발생하는 왁스의 수축 및 변형을 방지하기 위한 왁스 지그의 사용 또는 냉각 조건의 제어에 대한 필요성이 대두되었고, 주형 제작 및 주조 후 작업에서 발생할 수 있는 변형을 방지하기 위한 대책을 고려하여 연구를 수행하였고 금형 제작에 대한 방안을 확정하였다.



그림 3. Wax Die of APU Impeller

## 2.2 Flight Control Unit 시제품제작

### (1) Wax Pattern의 사출 및 조립

보통 Wax의 용해는 100℃ 부근에서 이루어지며 각각의 실린더에 담아 보온조에서 일정 시간을 유지해 두었다가 작업을 진행하였다. Wax Pattern에는 Non Filler Wax( 26 - 46 wax)를

사용하여 수동 및 반자동 사출기를 사용하였으며, Dewaxing시 Ceramic Shell의 Crack을 제어하기 위하여 Runner와 Sprue는 Melting Point가 낮은 IK Wax를 사용하였다. 또한, Wax Pattern의 변형을 방지하기 위하여 사출실은 향온, 향습 분위기로 유지하였다. 개발 모델들 중에 Fork가 있는 제품이 많아 Pattern 상태에서 약간의 뒤틀림이나 변형이 있으면 그대로 제품에 영향을 미치기 때문에 사출된 Wax Pattern에 Wax Jig를 사용하여 교정시킬 필요가 있었다. 별도로 제작한 Sprue, Runner, Gate를 붙여 Wax Tree를 제작하였다.

### (2) Ceramic Shell 제작

Wax Pattern과 Runner의 조립부위에 기공이나 흠이 없는지 세밀하게 검사한 후 주형제작 단계로 넘겼다. 주형제작을 하기 전 먼저 Wax Tree의 표면에 묻어있는 이형제를 제거하고 1차 코팅이 잘되도록 세척했다. Coating의 기본은 내화 Slurry에 조립된 Tree를 Dipping한 후 내화 Sand를 입히는 과정으로 당사의 Sample에 대해서는 전체적으로 8차로 Coating 하였으며, 마지막으로 Back-Up Slurry에 Dipping만 하여 주형제작을 완료하였다. Slurry에는 Colloidal Silica, 계면활성제, 소포제, 내화물 flour를 혼합하여 일정시간 교반을 행한 후 사용했다. 주형층의 내측 부분에는 60~120 mesh 정도의 미세한 Sand가 사용되며, 외측으로 갈수록 20~40 mesh 정도의 거친 Sand를 사용했다. 본 개발제품의 경우는 제품에 깊은 Hole과 Fork 등이 있으므로 주형표면의 정밀도를 높이도록 하였고, Wax Pattern은 전체적으로 8차 Coating을 하여 주형의 두께는 8~10 mm 정도로 균일하게 제작되었다. 주형제작의 작업은 Slurry의 밀착성을 좋게 하고, Coating 층에 Crack이 발생하는 것을 방지하기 위하여 향온, 향습의 실내에서 행했다. 각 층의 Coating 시간은 건조가 충분하도록 시간을 주어 수행하였고, Coating이 다된 Shell

은 12시간 이상 건조를 하고, 탈 왁스 하였다. 탈 왁스 방법은 주형의 Crack 감소와 Wax 회수율 증가, 작업성 양화와 공해 문제가 없다는 등의 장점을 가지고 있는 Autoclave를 사용하고 있다. 이 방법은 Mold를 가열시키는 탈 왁스법으로 Mold내에 있는 왁스의 팽창을 무시하게 되면 주형에 Crack이 발생하게 된다. 따라서 Mold 전체가 가열되어 팽창하기 전에 Wax가 Mold 밖으로 급속히 용융 유출하도록 고온·고압의 증기로 가열시켜 탈왁스시켜 원하는 형상의 Shell을 제작하였다.

(3) 소성(Burn-out) 및 주조(Casting)

소성은 Dewaxing 후 주형에 잔류하고 있는 Wax를 제거하고 Shell의 통기성을 향상시키며, 주형의 강도를 향상시키는 것을 목적으로 한다. 소성 온도와 시간에 따라 위의 특징들은 변화되며, 주형의 열전달이 나빠기 때문에 가열속도를 단계적으로 조절하지 않으면 각 부분의 팽창차이가 크게 되어 균열이 발생되므로, 당사에서는 Mold를 1000℃ ± 50℃에서 2시간 이상 유지하여 Mold의 강도와 통기성을 부여하였다.

소성 후 Mold를 세척, 보수, 검사를 행한 뒤, 원활한 용탕의 보급과 Misrun의 방지를 위해 Mold를 보온재를 이용하여 Insulation을 하고, 전기 예열로를 사용하여 Mold를 1050℃ ± 50℃에서 예열을 행하고, 17-4PH 합금을 사용하여 1600℃ ± 30℃ 정도에서 Roll-Over Furnace를 사용하여 용해 및 주입을 실시하였다. 17-4PH 합금은 재질 특성상 산소와 반응이 활발한 원소가 다량 함유되어 있어서 Ingot을 용해시 용탕 표면위로 Ar Gas를 분출시켜 대기와 차단 후 용해 및 주입을 실시하였다.

2.3 Diffuser Case, APU impeller시제품 제작

(1) Diffuser Case 왁스 사출 및 조립  
Filler wax를 이용하여 각 금형으로부터 사출된 왁스모형을 그림 4와 같이 조립하여 diffuser case의 왁스 모형을 제작하였다. 그 후, 제작된 왁스모형을 그림 5의 diffuser case의 wax 조립 방안에 따라 직탕식으로 runner와 탕구를 부착하여 쉘 주형을 제작하기 위한 wax tree를 제작하였다.



그림 4. Wax Pattern

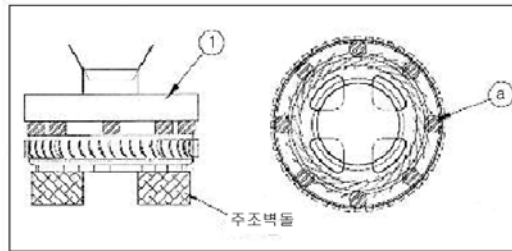


그림 5. Wax Assembling Method

(2) Coating, Dewaxing 및 소성

충분한 shell 강도를 부여하기 위해, 총 11차 coating후 finishing 작업을 수행하였으며, axial vane부의 shell cracking을 방지하기 위해 해당 부위를 steel wire로 보강하였다. 본 연구에서의 shell mold 제작 조건은 표 1과 같다.

Coating된 shell mold에서 왁스를 제거하기 위해, autoclave에서 150℃의 수증기를 이용하여 제거한 후, shell mold의 강도 부여 및 잔류 왁스의 완전 연소 제거를 위하여 1000℃에서 2시간동안 소성하였다.

표 1. Condition of Shell Mold Fabrication

건조 시간 및 온도	최소 8시간, 25℃
Binder	Colloidal Silica
Flour	Zircon Flour, Fused Silica
Sand	Zircon Sand, Chamotte Sand

(3) APU impeller Wax 사출 및 조립

Filler wax를 이용하여 금형으로부터 왁스모형을 사출 제작한 후, 주형 제작 방안에 따라 wax를 조립하였다. 그림 6은 주형을 제작하기 위해 조립된 wax tree를 나타낸 것이다.



그림 6. Wax Tree

(4) Coating, Dewaxing 및 소성

제작 조건으로 총 9차 coating 후 finishing 작업을 수행하였다. Coating된 shell mold에서 왁스를 제거하기 위해, autoclave에서 150℃의 수증기를 이용하여 제거한 후, shell mold의 강도 부여 및 잔류 왁스의 완전 연소 제거를 위하여 고온에서 2시간 동안 소성하였다. APU Impeller의 경우, 사용 왁스의 양의 다소 많음에 따라, 소성을 1100℃에서 실시하였다.

(5) 용해 및 주조

17-4PH는 Ni 함량이 4% 정도로써 고 Cr량에 비하여 Ni량이 다소 적은 관계로 고온 산화

성이 대단히 높은 편이며, 주입 후 제품에 Cr-pitting이라는 주조결함의 발생요인이 높다. 따라서, 신속한 용해속도와 낮은 용탕 온도로 주형과 용탕이 고온에서 오랜 시간 유지되지 않도록 하여야 한다. 그러기 위해서는 용해 시간을 최소화하면서 유동성이 좋은 용탕을 만들어야 한다. 또한 용해 시간이 길어지면 고온 산화성 분위기의 17-4PH 재질의 고체내의 내화물을 많이 침식시키고, 오랜 시간의 유지로 용탕의 산화에 의한 유동성이 나빠진다. 연구개발에서는 이러한 점을 고려하여, 용해시간의 최대한 단축 실시하였으며, 대기 용해 중에 발생할 수 있는 결함 중 산화 slag의 혼입 방지를 위해 최근 선진국에서 일부 사용되고 있는 Ar blanketing을 시행하였다. 이는 용해로의 상부에 Swirl cone을 설치한 후, 용해 중에 Ar gas를 blowing하여 용탕이 대기와의 접촉을 방지하는 방법이다. 또한, 고강도의 시제품을 제조하기 위해서, 용해 원재료로는, 미국 Cannon Muskegon사의 vacuum degassed grade의 master ingot를 사용하였고, remelting 후 노중



그림 7. Diffuser Case (As cast)



그림 8. APU Impeller (As cast)

분석을 실시한 결과 AMS 5355 규격의 성분 규격 내에 적합함을 확인하였다.

Diffuser case는 각 vane부의 misrun 방지를 위해서 용탕의 주입온도를 노중 1730℃ (실제 주입온도 1700℃ 추정)로, 주형 온도를 1000℃로 수행하였다. APU Impeller는 misrun 결함의 발생요인이 적음에 따라, 주입온도를 노중 1650℃(실제 주입온도 1600℃ 추정)로, 주형 온도를 1000℃로 수행하였다. 그림 7과 8은 각각 주조상태의 diffuser case와 APU Impeller를 나타낸 것이다.

2.4 열처리공정 및 시제품평가

(1) Flight Control Unit

- 열처리

17-4PH 합금은 석출경화형 합금으로서, 원하는 기계적 성질을 얻기 위해서는 주조 후 제품에 대해 균질화, 고용화, 시효열처리를 실시해야 한다. 따라서 당사는 주조 실시한 시제품에 대해 진공열처리를 실시하였다. 이때 열처리 조건은 AMS 5343 SPEC에 의거하여 균질화 열처리의 경우 1150℃에서 2.5시간 유지시킨 후 21℃ 이하의 온도로 냉각시켰으며, 고용화 열처리의 경우 1040℃에서 2.5시간 유지시킨 후 21℃ 이하의 온도로 냉각시켰다. 마지막으로 시효 열처리의 경우 537℃에서 2시간동안 유지시킨 후 상온까지 냉각하였다

- 기계적 성질시험

시제품에 대한 내구성, 내강도성 등을 살펴보기 위해 기계적 성질 시험을 할 필요가 있다. 시험편은 봉상(∅22×200) 형태로 별주시편을 주조하여 시제품 열처리시에 함께 장입하여 진공 열처리를 수행하였으며, 시편을 ASTM E8에 의거하여 가공 후 기계적 성질에 대한 시험을 실

시한 결과 기계적 성질 시험 결과와 Spec.에서 요구되는 기계적 성질과의 비교를 표 2에 나타내었다.

표 2. 기계적 성질 시험 결과

항목		Spec. (AMS5343)	KLW (승인용)	비고
상온 인장 시험	최대인장강도 (MPa)	1034MPa 이상	1218MPa	In Spec.
	항복강도 (MPa)	896MPa 이상	1024MPa	
	연신율(%)	8% 이상	9.14%	
경도 시험	경도(HRC)	34 ~ 42 HRC	36 ~ 39 HRC	

- Cutting & Grinding

주조가 끝난 시제품을 Hand Hammer와 Vibrator를 이용하여 Shell을 주조품으로부터 분리시키고, Sprue와 Runner를 절단기를 이용하여 절단한 후 Gate 부분을 Sand Belt를 이용하여 연마했다.

- 3차원 치수 측정

개발 대상품 각각의 도면에 의거하여 개발품의 치수를 3차원 정밀 측정기로 측정(54point/1Item)을 하여 3D Workstation을 활용하여 정밀 분석을 실시하였다.

그 결과 Flange 바로 위쪽 부위에 수축이 발생하여 치수가 작게 나왔다. 이를 보정하기 위하여 수축이 발생하는 부위의 금형에 수축방지 코어를 사용하여 Wax Pattern 및 주조품의 수축을 제어하였다. 또한 Fork 부위에 변형(벌어짐 현상)이 발생하여, 이는 30~40kgf/cm<sup>2</sup>의 Press 가압으로 교정을 실시하여 변형을 제어하였다.

- 형광 침투탐상 검사

육안 검사가 통과된 제품은 FPI 검사를 실시하였다. 형광침투액 ZL-27A에 일정 시간을 담근 후, 유화제 ZR-10B를 사용하여 중화시켜

2-3회 세척, ZP-4B 현상제를 사용하여 자외선 아래서 MIL-STD 1907에 의거하여 결함유무를 검사하였다. 검사 결과는 Fork 부위에서 Inclusion과 Shrinkage가 발견되었다. 이를 개선하기 위하여 Fork부위의 단열방법을 개선하여 주위와 응고속도를 맞출 수 있도록 하였으며, Ceramic Shell Coating시와 소성 후 세척시 이물질의 혼입을 제어하였다.

**- X-RAY 검사**

FPI가 끝나면 다시 내부의 결함 여부를 확인하기 위하여 X-ray 검사를 실시하였다. 이때의 검사규정은 도면상의 Spec.인 QAS 202에 의거하여 실시하였다. 검사장비는 당사에서 보유하고 있는 PHILIPS社의 MG-325 모델을 사용하였다.

검사 결과는 FPI 검사에서 Shrinkage가 발견된 같은 장소에서 같은 결함이 검출되었고, 다른 결함은 나타나지 않았다.

Shrinkage FPI 에서와 같은 방법으로 단열방안을 개선하여 이를 제어할 수 있도록 하였다.

(2) Diffuser case, APU impeller

**- 열처리**

Diffuser case의 열처리 조건의 AMS 5355에 따른 H900 Condition이며, APU impeller는 AMS 5355에 따른 H1025 Condition이다.

17-4PH의 균질화 처리 및 용체화 처리는 고온에서의 산화 방지를 위해 일반적으로 진공로에서 수행한다. 본 연구에서도 대상 시제품의 균질화 및 용체화 처리에 진공로를 사용하였으며, 석출처리 위한 열처리로는, 대기로(air furnace)를 사용하였다.

시제품인 Diffuser Case와 APU Impeller를 열처리하기 이전에, 해당 열처리 규격에서 규제하고 있는 열처리 온도로 대상 시제품을 정밀하게 열처리하기 위하여 적용 로내의 온도 균일성

을 검사하기 위한 온도 균일성조사(Temperature Uniformity Survey, TUS)와 해당 로로부터의 정밀한 온도 측정을 위해 로에 설치된 각 기기의 온도 정밀도를 측정하기위한 기기 시스템 점검(Instrumentation System Check, ISC)을 실시하였다. TUS와 ISC의 실시 방법은 항공 부품의 열처리시 범용적으로 사용되는 방법에 의거하여 실시하였다. 실시 결과, 사용 로와 기기들의 해당 규격의 허용 온도 공차를 모두 만족함을 알 수 있었다.

**- 기계적 특성 평가**

일반적으로 정밀주조품의 기계적 특성 평가를 위한 시편의 제작은 주물품과 시편을 별도로 제작한 주형에 동일 heat의 용탕을 주입하여 제작하거나, 직접 주물품에서 시편을 제작하는 방법이 사용된다. 본 연구에서는 diffuser case 및 APU impeller 모두 별도의 시편 주형을 제작하여 해당 시제품의 기계적 특성 평가를 실시한 결과 표 3은 별도로 시편을 제작하여 해당 시제품과 동일한 조건으로 열처리하여 기계적 특성 평가를 수행한 결과를 나타낸 것이다.

표 3. Result of Mechanical Property Test

Part (H Condition)	Class.	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Diffuser Case (H900)	Spec.	1241	1103	6
	Actual	1317	1187	9.67
APU Impeller (H1025)	Spec.	1034	896	10
	Actual	1082	962	13.3

각 시편의 시험 결과 해당 규격의 요구사항을 모두 만족하였으며, 당해년도 개발 목표도 모두 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

- 비파괴 검사

대상 시제품의 비파괴 검사 요건은 Diffuser Case의 경우, vane부가 Grade D이상이어야 하며, APU Impeller의 경우, vane부와 가공면이 Grade B 이상, hub가 Grade C이상이어야 한다. 주물품의 경우, 일반적으로 Grade C이상은 고품질(high quality)을 나타낸다. 따라서, 동적 부품인 APU Impeller의 경우는 고품위 주물품이 요구된다 할 수 있다. 1차 시제품에 대하여 방사선투과검사 및 침투탐상검사를 병행 실시한 결과, 각 시제품에 대하여, 표 4와 표 5에서 보는바와 같이 같은 주조결함이 발생하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 Diffuser Case의 경우, 주탕온도를 1730℃로 변경하였으며, APU Impeller의 경우, 주탕온도를 1680℃로 변경하였고, 기타 Blanketing 등의 주조방안 변경을 통하여 이를 현저히 개선할 수 있었다. 그러나, 이들 시제품에 대한 양산을 위해서는 보수가 허용되는 결함에 대한 보수 용접에 대한 고려도 선행되어야 하기 때문에 본 연구에서는 이들 시제품에 대한 보수 용접에 대한 연구도 병행 실시하였다.

표 4. Diffuser Case의 결함유형 및 발생위치

	결함유형	발생위치
	Misrun	A
	Porosity	B
	Metal Fin	바닥면

표 5. Diffuser Case의 결함유형 및 발생위치

	결함유형	발생위치
	Misrun	A
	Cold shut	B
	Shrinkage Cavi.	바닥면

- 치수 검사

제작된 주물도면에 따라, 시제품에 대해 CMM을 이용하여 치수를 평가하였다.

Diffuser Case의 중요 치수 부위는 원형 몸체

의 평면도 0.3mm 및 그 직경  $\Phi 286 \pm 0.5$ 이며, APU Impeller의 경우는 각 blade의 진위치도 0.8mm 및 blade와 hub의 윤곽도 0.5mm이다.

치수 측정결과, 초기 제작된 시제품에 있어서, APU Impeller는 요구치수를 만족하였으나, Diffuser Case는 원형 몸체의 평면도 및 그 직경이 공차 범위를 초과하였다. 이에 Diffuser Case의 왁스사출금형을 수정 보완함으로써 이를 개선하였다.

2.5 표준열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질의 변화

표 6에 각종 표준 열처리 규격 및 그에 따른 기계적 성질 규격을 정리하였다. 표에서 A는 용체화 처리를 나타내며 H후의 숫자는 시효처리를 행하는 기준 화씨온도(°F)를 나타낸다. 또한 판재가 아닌 주조품의 기계적 성질치는 괄호안에 나타내었다.

표 6. 열처리 조건에 따른 기계적 성질

Condition	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	경도 (HRC C)	사피 충격치 (ft-lb)
A (1038±14℃/ 15~30min.+A.C.)	1034.3 (951.2)	758.5 (717.8)	10 (13.5)	-	-
H900 (482±8℃/ 1hr.+A.C.)	1379.0 (1218.9)	1275.5 (1074.7)	14 (8)	44	15
H925 (496±8℃/ 4hrs.+A.C.)	1310.1	1206.6	14	42	15
H1025(552±8℃/ 4hrs.+A.C.)	1172.2 (1170.8)	1137.7 (1012.0)	15 (13)	38	35
H1075(579±8℃/ 4hrs.+A.C.)	1137.7	1034.3	16	36	40
H1150(621±8℃/ 4hrs.+A.C.)	998.8 (889.4)	861.9 (640.3)	19 (15)	33	50
H1150-M(760±8℃/2hrs.+A.C.)	861.9	586.1	22	27	100

본 연구에서는 미국 및 서방국가에서 실시하고 있는 열처리 조건 및 러시아에서 시행되고



있는 열처리조건들을 고려하여 열처리를 실시하고 기계적 성질 및 미세조직 변화를 고찰하였다. 표 7에 나타난 각 열처리 조건중 R은 러시아에서 실시되고 있는 열처리 조건이며 H1은 미국 등에서 행해지고 있는 최적의 기계적 성질을 나타내는 열처리조건이다. 특히 R조건인 경우, 피삭성(machinability)을 향상시키기 위하여 균질화처리후 650°C에서 30분간 취화처리(embrittlement treatment)를 하였다.

그림 9는 표 7에 나타난 열처리조건에 따른 미세조직의 변화를 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 주조상태의 A시편에서는 열전달에 의한 응고방향을 따라 δ-페라이트가 길게 형성되는 것이 관찰되었으며 균질화처리(N조건)후 δ-페라이트상이 단절되어 길이가 감소하고 구형화 되어가고 있음이 관찰되었다. 균질화처리후 용체화처리 및 시효처리를 행한 시편들의 경우 δ-페라이트상의 길이가 약간 더 감소하고 구형화가 보다 더 진행된 것이 관찰되나 그 변화폭이 주조 이후 최초의 균질화처리에 의한 변화보다는 작았다. 그러나 그림 9의 사진들은 전체적인 경향을 반영하는 대표적인 부위를 관찰한 것이고 부위별로 응고속도가 상이한 주조품의 특성상, 열처리 후에도 국부적으로는 δ-페라이트의 형상이 조대한 부위가 관찰되기도 하였다.

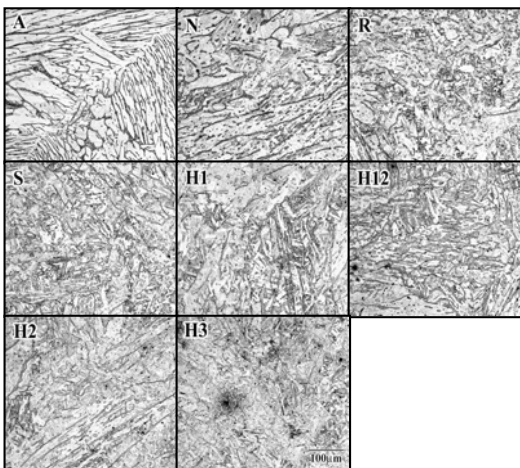


그림 9. 열처리에 따른 미세조직의 광학현미경 관찰사진

표 7. 열처리 조건

Denotation	Description	Heat treatment detail
A	As-casted	-
N	Normalizing	1100°C, 1 hr., Air cooling
R	Normalizing+tempering (Russia)	1100°C, 1hr., A.C. + 650°C, 0.5hr., A.C. + 950±10°C, 1hr., A.C. + 450°C, 1hr., A.C.
S	Sub-zero treatment	1100°C, 1hr., A.C. + 650°C, 0.5hr., A.C. + 950±10°C, 1hr., A.C. + 450°C, 1hr., A.C. + -70°C, 2hr.
H1	Normalizing+tempering	1149°C, 1hr., A.C. + 1038°C, 1hr., A.C. + 480°C, 1hr., A.C.
H12	Normalizing+tempering (without solid solution treatment)	1038°C, 1hr., A.C. + 480°C, 1hr., A.C.
H2	Normalizing+tempering	1149°C, 1hr., A.C. + 1038°C, 1hr., A.C. + 550°C, 1hr., A.C.
H3	Normalizing+tempering	1149°C, 1hr., A.C. + 1038°C, 1hr., A.C. + 620°C, 1hr., A.C.

열처리에 따른 인장강도, 항복강도 및 연신율의 변화를 그림 10에 나타내었다. 균질화처리에 따라 인장강도가 증가하였으며 연신율도 주조조직에 비해서 상대적으로 높은 값을 나타내었으나 항복강도는 약간 감소하였다. 이는 균질화처리에 의해 δ-페라이트의 상 분율이 낮아지고 조직이 균일해짐에 따라 불 균질한 주조조직에 의한 응력집중이 완화되어 소성변형 초기의 항복강도는 약간 감소하나 파단이 발생할 때까지의 전체적인 변형량은 증가하므로 인장강도가 증가하고 연신율도 대폭 증가하는 것으로 판단된다.

기계적성질에 미치는 Sub-zero처리의 영향(S와 R조건)은 미미하였으나 인장강도는 약간 감소하는 반면 연신율이 상대적으로 증가하였다. 러시아측의 열처리조건(R)과 서방국가에서 실시하는 열처리조건(H1)의 경우, 거의 비슷한 경향을 나타내었으나 R조건인 연신율이 약간 더 높

은 수치를 보였다. 1149℃에서의 균질화처리를 실시하지 않은 H12시편은 H1시편에 비해 항복강도와 연신율이 약간 증가하는 반면 항복강도는 오히려 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 시효처리 온도를 480℃에서 620℃까지 증가시킨 경우(H1, H2, H3) 항복강도와 인장강도가 감소하였고 연신율은 증가하였다. 특히 620℃의 고온에서 시효시킨 H3시편의 경우 항복강도가 급속하게 감소하는 경향을 나타내었다.

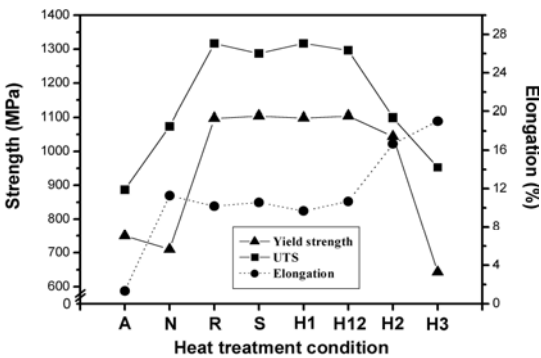


그림 10. 열처리에 따른 강도 및 연신율의 변화

강도 및 연신율 외에도 열처리에 따른 경도 및 사피 충격치를 측정하였으며, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 사각형으로 표시한 경도는 록크웰 C 스케일 값으로 균질화처리에 따라 약간 감소하다가 시효처리에 따라 다시 증가하였으며 이는 항복강도의 변화경향과 유사하였다. 그러나 시효처리온도가 증가하면서(H1, H2 및 H3조건) 경도값이 감소하는 경향을 나타내었다. 사피충격

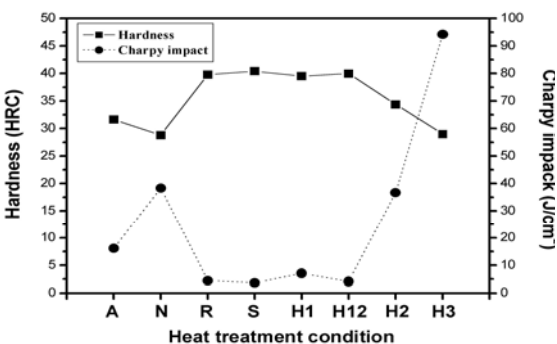


그림 11. 열처리에 따른 경도 및 사피충격치의 변화

치의 경우, 경도와 거의 반대되는 경향을 보였으며 시효처리온도가 증가함에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같은 기계적 물성치들은 기준 물성에 비해 우수한 것으로 기준열처리인 H900과 동일한 H1조건인 경우, 인장강도가 1317MPa, 항복강도가 1098MPa, 연신율이 9.67% 등으로 기준물성치보다 각각 99MPa, 24MPa, 1.7%정도 우수한 것으로 나타났다.

그림 12는 H1 시편의 미세조직을 TEM으로 관찰한 사진으로 (a)에 나타난 바와 같이 주로 래스 마르텐사이트로 이루어져있음을 알 수 있었으며 내부에 전위밀도가 높아 어두운 콘트라스트를 보였다.

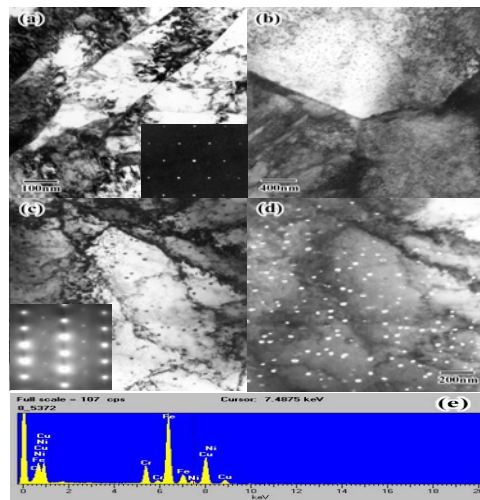


그림 12. H1열처리시편의 TEM 관찰사진

- (a) 래스 마르텐 사이트
- (b) 마르텐사이트와  $\delta$ -페라이트의 입계
- (c)  $\delta$ -페라이트내에서 관찰되는 Cu-함유 석출물
- (d) 석출물의 암시아상
- (e) 석출물의 EDS분석결과

그림 13은 620℃에서 시효처리된 H3열처리 시편의 TEM 관찰사진으로 역변태 오스테나이트가 존재함을 보여주고 있다. (a)는 래스 마르텐사이트 부위의 명시야상이며, (b)는 이 부위의 제한시야회절 도형인데 마르텐사이트및오스테나

이트가  $[10\bar{1}]_{\gamma} \parallel [11\bar{1}]_{\alpha}$  및  $(111)_{\gamma} \parallel (011)_{\alpha}$ 의 방위관계, 즉 kurdjumov-Sachs 방위관계를 가짐을 보여주고 있다. 또한 (c)는 (a)의 명시야상과 짝을 이루는 래스형태의 역변태 오스테나이트의 암시야상이며 (d)는 다른 부위에서 관찰된 입상 역변태 오스테나이트의 명시야상이다.

이상과 같은 미세조직 관찰결과로 미루어 시효처리온도가 증가함에 따라 Cu-rich 석출물이 조대화되고 역변태 오스테나이트가 생성되기 때문에 강도 및 경도가 감소하고 연신율 및 내충격성이 증가하는 것으로 판단된다.

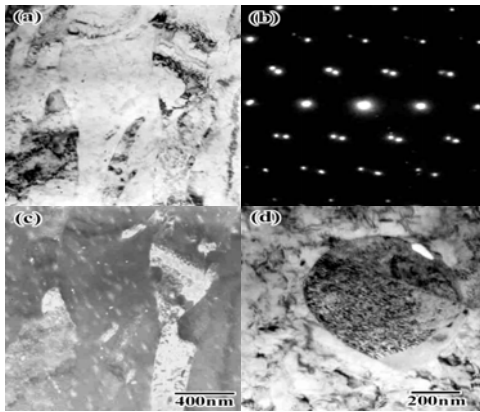


그림 13. H3열처리 시편의 TEM관찰사진  
(a) 명시야상 (b) 회절도형  
(c) 래스 역변태 오스테나이트의 암시야상  
(d) 입상 형태의 역변태 오스테나이트

또한 열처리 분위기의 영향, 용체화 열처리의 영향취화(Embrittlement) 처리시간에 따른 미세조직 및 기계적 특성, 변화균질화 처리시간에 따른 미세조직 및 기계적특성 변화, 응고속도에 따른 δ- 페라이트 변화연구, 제품의 기공률 및 비중측정연구, 보수용접연구, 400℃ 노출에 따른 특성 변화 연구 등을 실시하여, 본 고강도합금(17-4PH)에 필요한 database 구축을 하였다.

## 2.6 시제품 특성평가

시제품의 열처리를 실시하여 미세조직 및 경도측정을 실시하였다. 제품의 마크로조직 및 열처리전후의 미세조직을 관찰한 결과 그림 14에서 보는바와 같이 δ-페라이트의 계면이 완만하게 되면서 기지내부에 일부 고용되는 것을 알 수 있다.

또한 Flight Control Unit, Diffuser Case, Impeller 제품도 거의 유사한 마크로 및 미세조직이 관찰되고 있는 것을 볼 수 있다.

경도시험은 HRC로 측정된 결과 열처리후 시제품의 종류에 관계없이 약 38-41HRC정도의 경도값을 가지고 있는 것을 알 수 있었으며, 시제품이 모든 규격에 만족하는 것을 알 수 있다.

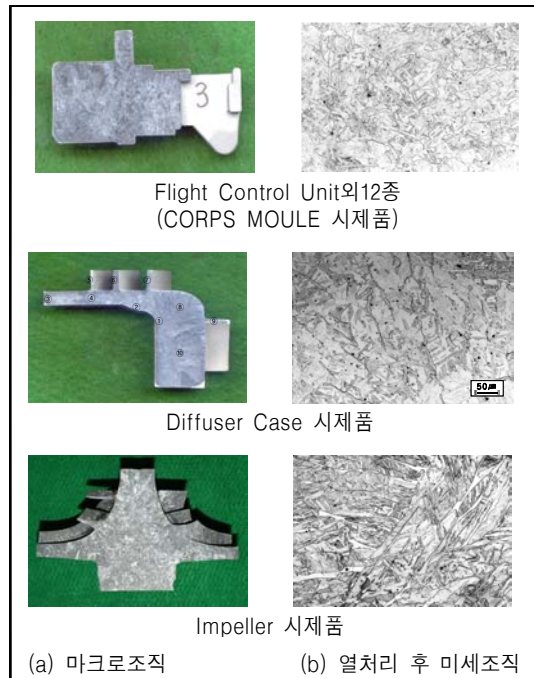


그림 14. 마크로 및 미세조직

## 3. 기술개발 결과

### ■ FLIGHT CONTROL UNIT

- 공정 승인 획득

Flight Control Unit의 가공 조립업체로부터

공정관리 및 품질관리에 대한 System Survey를 받았으며, 비파괴검사 공정으로 FPI 공정과 X-Ray 공정을 승인 받았으며, 외주공정으로 열처리 공정과 전해연마 공정에 대한 승인을 획득하였다. 표 8 과 9에 FPI 및 X-ray 공정 승인을 위한 Technique Sheet를 나타내었다.

표 8. FPI Technique Sheet

침투제 및 적용시간	고감도 ZL 27A, 20분
전 세척(Pre-Wash)	한 면에서 2분 이하
유화제 및 적용시간	ZR 10B, 90초
후 세척(Post-Wash)	한 면에서 2분 이하
건조시간	10분
현상제 및 적용시간	ZP 4B, 10분
과잉 현상제 제거	최대 5psi의 여과된 압축공기
검사	시력 적응 시간 3분

표 9. X-ray Technique Sheet

EXPOSURE IDENTIFICATION	VIEW A,B,C	VIEW D,E,F	VIEW G,H
FOCAL SPOT SIZE(mm)	1.2×1.2	4.0×4.0	4.0 ×4.0
KILOVOLTAGE (UNDER ROAD)	170	220	220
MILLIAMPERAGE (UNDER ROAD)	5	10	5.3
TIME(SECONDS)	95	75	80
SENSITIVITY	2-2T	2-2T	2-2T
TARGET TO FILM DISTANCE	58"	58"	58"
ANGLE HEAD/ ROD OR PIECE	60°	60°	60°
MAX. PIECED AT A TIME	21	21	21
NO. OF EXPOSURES	1	1	1
FILM TOTAL	1	1	1

또한, 이러한 공정 승인을 통해 각 제품에 대한 공정별 세부 작업방법 및 내용, 사용재료 및 공구 등을 나타낸 제조 작업 지침서(MJS)와 필요한 공정 검사 및 치수측정, 비파괴 검사 등의 방법 및 결함판정 기준을 나타낸 제조 검사 지침서(MQS)를 작성하였으며, 이의 승인도 획득하였다.

었다. 승인된 MJS와 MQS에 따라서 최종 승인용 제품을 만들고 비파괴 검사 성적서, 3차원 치수 성적서, 기계적 성질 시험 성적서를 첨부하여 최종고객승인(First Article Inspection)을 획득하였다.

■ APU Impeller, Diffuser Case

본 연구를 통하여, 항공 산업에 소요되는 고강도 합금 주물품을 개발하였으며, 이에 대한 기초 생산 기술 확보를 통해 유사 품목에 대한 소요에 대처할 수 있는 공정을 구축하였다. 본 기술 개발에 대한 세부 결과는 다음과 같다.

- 3D 곡면 형상을 갖는 고정밀도 금형 제작 기술을 확립하였다.
- 인장강도 1300MPa이상, 항복강도 1180MPa 이상, 연신율 9%이상의 고강도 주물품 제작 기술의 확보를 통하여 개발대상품인 Diffuser Case와 APU Impeller를 제작 완료하였다.
- 로내 온도 제어 및 로 기기의 정밀도 제어를 통하여, 17-4PH 내식강에 대한 고정밀도 열처리 제어기술을 확립하였다.
- 주물품에 대한 결함보수 연구를 통해, 보수 공정에 따른 기계적 특성 및 피로 특성에 대한 data를 확보함으로써, 양산시의 비용 절감 및 적기 납기 대응의 공정 체계를 구축하였다.
- 양산 체계 구축을 통하여 개발 시제품에 대한 사업화를 실현하였다.

4. 기대효과

■ FLIGHT CONTROL UNIT

- 본 과제를 통하여 개발 완료하여 가공 조립 업체의 승인을 받은 Flight Control Unit은

현재 민간 항공기(유럽의 Air Bus)에 사용되고 있는 부품으로 전량 수출이 기대됨 (\$ 1,000,000/ 년)

- 본 개발품이 Air Bus에 장착됨에 따라 관련 부품 제조와 관련된 국제적인 신뢰도 향상.
- 17-4PH 합금의 정밀주조기술 향상 효과 및 수출증대 효과.

#### ■ APU Impeller, Diffuser Case

본 연구를 수행함으로써, 항공기 부품의 국산화를 위한 고강도 17-4PH 스테인레스 합금의 Diffuser case 및 APU Impeller의 개발을 통해 고난이도 제품의 설계, 정밀주조용 금형의 제작 및 불활성 기체의 차폐를 포함하는 주물품의 제작 공정의 개선을 통해, 고강도 주물품 제작을 위한 기술과 공정을 확보 및 구축하였다. 본 개발 대상품인 Diffuser case 및 APU Impeller 부품은 항공기 엔진 부품의 압축기용 핵심 부품으로 재질의 특성 및 형상의 난이도를 고려할 때, 지대한 기술적인 성과를 얻었다고 자부할 수 있다.

#### ■ 17-4PH Database 구축

FLIGHT CONTROL, Impeller, Diffuser Case의 기술개발을 통해 축적된 17-4PH Database 및 기술을 활용한다면, 국내 항공 부품의 국산화에 크게 기여할 수 있으며, 유사 품목에 대한 소요 제기시, 적극 대응할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 최근 국내에서 정부주도로 실시되고 있는 국내 항공산업의 발전에 크게 이바지할 것이며, 항공기 부품의 수입 대체 효과가 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] U. K. Viswanathan, P. K. K. Nayar and R. Krishnan, Materials Science and Technology, Vol. 5, April, (1989), pp.346-349
- [2] U. K. Viswanathan, S. Banerjee and R. Krishnan, Materials Science and Engineering, A104, (1988), pp.181-189
- [3] M. Murayama, Y. Katayama and K. Hono, Metallurgical and Materials Transactions, 30A (1999), pp.345-353
- [4] C. A. Smith, Steel Times, April (1980) pp. 274-282
- [5] C. N. HSiao, C.S. Chiou, J.R.Yang, Materials Chemistry and Physics 74 (2002), P.134-142
- [6] 이정섭, 이호중, 대한금속학회지, 25권, 11호, (1987), pp. 798-807
- [7] O. J. Pereira and J. Beech, Solidification Technology in the Foundry and Casthouse, The Metals Society, (1982) p.315
- [8] 김선구, 김종완, 이용득, 대한금속학회지, 36권, 8호, (1998), pp.1270-1277