

소형 액체 추력기 Brazing Failure 사례 분석

김정훈* · 장기원* · 이재원* · 이해현*

Analysis for Brazing Failure of Liquid Thruster

JungHun Kim* · KiWon Jang* · JaeWon Lee* · HaeHeon Lee*

ABSTRACT

Brazing Failure has been occurred in the process of thrust chamber assembly. The possible factors have been analyzed by sample tests. The actual causes of "Overflow" phenomenon have been investigated from Brazing Material and fabrication of Piece Parts. The rejection rate of process has been improved by applying this results to a real brazing process.

초 록

본 연구에서는 소형 액체 추력기 제작 공정 중 하나인 브레이징 부품 접합에서 발생한 Failure 사례에 대한 분석을 위해 가능 원인을 도출하고 이에 대한 검증을 위한 Sample Test를 수행하였다. Brazing Material, 부품 가공성 등에서 도출된 요인들이 Overflow 현상에 미치는 영향을 분석하여 실제 발생 원인을 파악하였으며, 이를 통해 원활한 공정 진행을 도모할 수 있었다.

Key Words : Monopropellant Thrust(단일추진제 추력기), Vacuum Furnace Brazing(진공로 브레이징), Filler Metal(용가재)

1. 서 론

인공위성의 자세제어(attitude control), 궤도수정, 위치 유지(station Keeping) 및 발사체의 요, 피치, 롤 제어에 사용되는 소형 액체추진기관인 추력기는 비행체의 주추진이 목적이 아닌 제어 용도로 사용된다. 이러한 추력기는 추진제의 종류에 따라 단일추진제 추력기와 이원추진제 추력기로 구분된다.

Figure 1은 당사에서 국산화에 성공하여 다목적

실용위성(KOMPSAT)에 적용하고 있는 액체 단일추진제 시스템을 응용한 1Lbf급 추력기를 보여준다. 이와 같은 단일추진제 추력기(monopropellant thruster)는 산화제의 개입 없이 추진제와 촉매의 화학적 반응에 의하여 고온/고압의 가스를 발생시켜 노즐을 통하여 추력을 얻는 방식으로 가혹한 열적환경에서 작동해야 하는 특성 상 고도의 내열성, 고강도 및 경량화를 요구한다. 따라서 이러한 요구조건을 만족시키기 위한 추력기 구성부품 간의 접합기술로서 진공로 브레이징(Vacuum Furnace Brazing)과 전자빔 용접(electron beam welding)을 적용하고 있다.^[1]

본 논문에서는 추력기 제작 과정에 있어 브레

* (주)한 화
연락처, E-mail: kjh75@hanwha.co.kr

이징을 적용하는 HEA(Head End Assembly)공정에서 발생한 Failure 사례 분석을 통하여 발생 원인을 규명하고 이에 대한 대책을 마련함으로써 원활한 공정진행을 도모하고자 하였다.

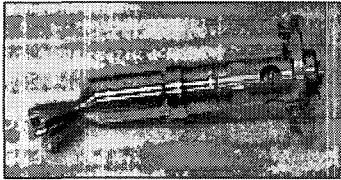


Fig. 1 Monopropellant Thruster(1Lbf)

2. Brazing Fail 원인 분석

2.1 진공로 브레이징 (Vacuum Furnace Brazing)

브레이징의 접합 원리는 용융된 용가재가 모재 위에 퍼지는 젖음현상, 접합부 틈새로 용융된 용가재가 빨려 들어가는 모세관현상, 용융된 용가재와 모재 사이의 금속 원자가 서로 섞이는 확산현상이라고 할 수 있다. 브레이징은 접합 모재의 특성에 기인하여 가열방법, 냉각방법, 가열시 산소접촉 회피방법 등을 고려하여 다양한 방법이 적용된다.

앞서 언급한 바와 같이 추력기 제작 공정에는 진공로 브레이징 접합기술을 적용하고 있으며, 고진공환경인 고고도에서 작동하는 추력기의 특성상 청정도 유지 등을 고려할 때, 본 방법의 적합성 및 장점을 요약하면 다음과 같다.^[2]

- ① 산화나 탈탄 같은 표면 반응을 억제하여 깨끗한 표면상태 유지
- ② 산화 피막이나 기계가공 작업 뒤에 남은 윤활유나 금속으로부터 분해된 오염물질을 증발시켜 제거
- ③ 모든 부분이 동시에 균일하게 가열되므로 열변형 감소
- ④ 정밀한 온도제어가 용이하여 품질의 균일성 향상
- ⑤ 기공이 적은 접합면을 얻을 수 있어 브레이징 부의 고강도화

이러한 진공로 브레이징의 장점에도 불구하고 작업환경에 따라 다양한 문제점이 발생하며, 본 논문에서는 추력기 제작 중 발생한 Failure 사례에 한정하여 설명하고자 한다.

2.2 Failure 발생 개요

Figure 2는 용융된 용가재(Filler Metal)가 접합 틈새로 빨려 들어가지 못하고, Stop-off를 넘어 Overflow^[3]된 브레이징 Failure 사례를 보여준다.

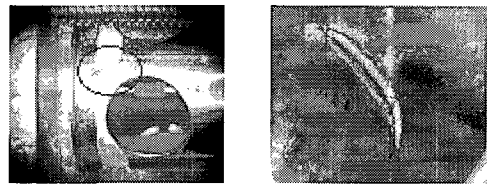


Fig. 2 Filler Metal Overflow

일반적으로 Stop-off는 Fig. 3과 같이 도포되어 Table 1의 2단 가열 Process에 의해 용가재가 용융점에 도달하여 액화되면서 용융액이 모재 표면을 따라 흘러내리는 것을 차단하는 역할을 하게 되는데, 상기의 Overflow 현상은 Stop-off가 용융된 용가재의 흐름을 차단하지 못하고 브레이징 된 것이다.

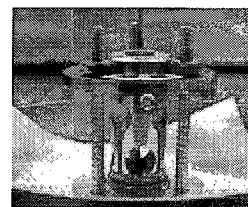


Fig. 3 Filler Metal Overflow

Table 1 Process of Vacuum Furnace Brazing

Operation	Temperature	Vacuum
Temp. Increase	17°C/min	~ 1.0×10 ⁻⁴ torr
1 st stage	6min at 1052°C	
2 nd stage	6min at 1177°C	
Cooling	~ 93°C	

2.3 가능원인 도출

성공적인 브레이징을 수행하는데 있어 중요한 변수 중 하나로 모재에 적합한 가열조건 및 진공도 등 설정된 작업조건에 만족하는 Process의 운용에 있다. 본 추력기 제작에 적용된 작업조건은 Fig. 4에 나타난 바와 같으며, 상기 언급한 Failure 사례에 있어서 이러한 Process는 정상적으로 운용되었음을 감안하여 가능원인에서 배제하였다. 따라서 Brazing Material 적용성, 부품가공성, 작업성 등으로 구분하여 상기의 Overflow 발생에 영향을 미칠 요인들을 도출한 후 이의 검증을 위해 Sample Test를 수행하여 그 원인을 파악하고자 하였다. Table 2는 Sample Test를 위한 가능원인을 나열한 것이다.

Table 2 Possible Factors of Overflow Failure

Case	Factor(Possible)	Sample No
1	Cement 650의 점도*에 따른 영향 검토	Compare I with II
2	Paste Quantity에 따른 영향 검토	Compare I with II
3	접합부품 안쪽 Chamfer** 여부에 따른 영향 검토	Compare III with IV
4	접합부 틈새 간격에 따른 영향 검토	Compare I, II with III, IV
5	불완전 세척으로 인한 모재의 오염물질 잔여 검토	Process Review
6	공정 중 이물질 삼입 가능성 검토	Process Review

* 규격(Viscosity) : 275~350 cps, **설계치수 : Max. 0.005"×45'

2.4 Sample Test 및 상태 확인

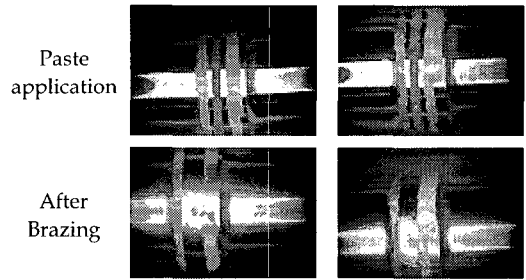
(1) Brazing Material의 영향 검토

본 실험에서는 Table 2의 Case 1, 2에 대한 결과를 검증하고자 하였다. 첫째, 추력기의 브레이징에 사용하고 있는 Cement 650은 분말 형태의 용가재(Filler Metal)와 혼합하여 모재와의 접착을 가능케 해주는 점도성 액체로써 시간이 경과함에 따라 점도가 감소하는 경향을 보이며, 제조업체에서는 최소 3개월의 시효를 두어 이 기간

Table 3 Applied Conditions for Brazing Material

Sample No	Cement* (cps)	Filler Metal	Stopyt Stop-off
I	43	Normal	Normal
II	300	Partially Much	Partially Thin

* 규격(Viscosity) : 275~350 cps, Filler Metal & Stopyt Stop-off & 가열 Process : 동일 조건 적용



(a) Sample I (b) Sample II

Fig. 4 Paste Application & Brazing Results

동안의 사용을 권장하고 있다. 따라서 규격기준보다 낮은 점도의 Cement를 적용하면 용가재의 응집력이 약화되어 모재의 표면에서 이탈될 것이라는 가정 하에 이에 대한 검증을 하고자 하였으며, 둘째, Brazing Material로 Paste에 적용하는 용가재의 과다 도포나 Stop-off(용융된 용가재의 흐름 차단제)의 부분적 얇은 도포 역시 Overflow의 원인이 될 수 있을 것이라는 가정 하에 Sample Test를 수행하였다.

이에 대한 실험조건과 조건별 Sample 형상 및 결과를 각각 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 브레이징 상태를 확인한 결과, Fig. 4에서 나타난 바와 같이 외관적으로 어떠한 차이점이나 우려했던 Failure는 발생하지 않았다. 즉 Brazing Material에서 고려되었던 요인들이 Overflow 발생의 직접적인 원인이 아닌 것으로 판단된다. 하지만 부적절한 Paste 적용이나 Material 선정은 브레이징 Failure의 또 다른 요인으로 작용할 수 있음을 간과해서는 안 될 것이다.

(2) 부품 가공성의 영향 검토

본 실험에서는 Table 2의 Case 3, 4에 대한 결과를 검증하고자 하였다. 먼저 결합부품 중 하나인 Barrier Tube의 Chamfer 가공치수가 Max.

Table 4 Applied Conditions for Chamfering of Barrier Tube

Sample No	Brazing Material	Chamfering*
III	Normal	○ (Round Edge)
IV	Normal	× (Sharp Edge)

*설계치수 : Max. 0.005"×45

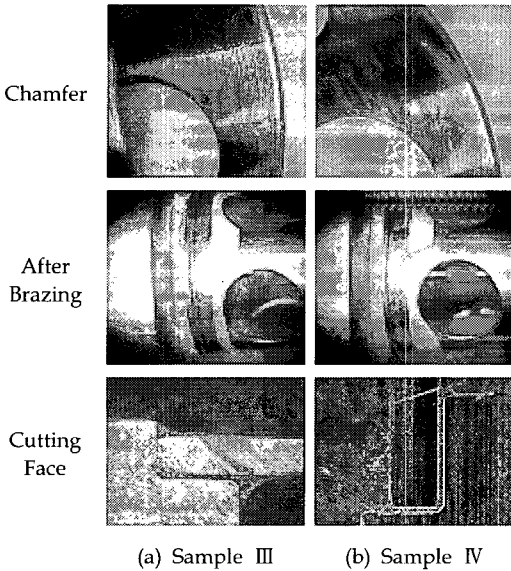


Fig. 5 Chamfering & Brazing Results

0.005"×45° 최대치로 규정하고 있어 Chamfering이 반드시 이루어져야 한다는 관점에서 의문의 여지가 있다. 따라서 Non-Chamfering이 Failure의 원인이 되는지에 대한 Case By Case 비교/검증이 필요할 것이라 판단하였다.

또한 Overflow 현상은 용융된 용가재가 접합 틈새로 스며들지 못하는데 기인할 수 있다. 이는 모세관 현상이 일어날 수 있는 조건이 형성되지 않았음을 의미한다. 즉 모세관 현상이 잘 일어나기 위해서는 틈새 간격이 중요하며, 보통 0.05~0.2mm가 적당하다^[2]. 따라서 본 실험결과를 통해 이러한 요인들이 브레이징에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였으며, 이에 대한 실험조건과 결과를 각각 Table 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Chamfer 가공된 Sample III의 경우에는 정상적인 브레이징이 이루어진 반면, Non-Chamfering

된 Sample IV는 Overflow 현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 절단면에서도 나타난 바와 같이 Sample III은 내/외부 Fillet이 균일하게 형성된 것을 볼 수 있으나, Sample IV는 용융된 용가재가 내부로 스며들지 못하고 흘러내려 내/외부 Fillet이 제대로 형성되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 불균일 Fillet은 접합강도를 약화시켜 제품의 기능성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 되는 것이다. 이를 통해 Chamfer 가공여부가 Overflow 발생에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

브레이징 Failure 발생의 또 다른 요인으로 접합 틈새 간격이 어떠한 영향을 주고 있는지 Fig. 6의 Sample I과 III의 절단면을 통해 확인할 수 있었다. Sample III은 추력기 브레이징 공정에 투입되는 부품으로 모세관 현상에 적합한 틈새 간격과 Chamfering으로 균일한 Fillet을 형성하고 있다. 반면 Sample I의 경우는 용융된 용가재가 빨리 들어가지 못하고 모재 표면에 퍼져 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 틈새 간격이 요구조건에서 미달하고 있으며, Non-Chamfering되어 용융된 용가재가 스며들기 위한 용입유로 조건이 형성되지 않았기 때문이라고 판단된다.

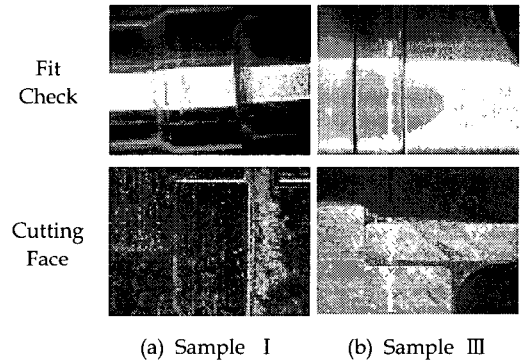


Fig. 6 Brazing Results for Joint Gap

3. 결 론

추력기 제작 공정 중 발생한 브레이징 Failure 사례 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 브레이징에 적용되는 Material의 영향은 Overflow의 직접적인 원인은 아닌 것으로 사료된다.

둘째, 브레이징 결합 부품의 Chamfering 및 접합 틈새 간격은 모세관 현상을 촉진시켜 주기 위한 유로를 확보하여 균일한 Fillet 형성 및 용입성을 향상시켜주는 역할을 하며, Overflow를 발생시키는 주요 원인으로 작용한다.

다목적실용위성용 추력기 개발은 1호 및 2호 사업을 통하여 100% 국산화하였으며, 현재 3호기 사업을 추진 중에 있다. 하지만 보다 향상된 기술 개발을 위해 본 논문과 같은 다양한 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기반기술을 바탕으로 유사 추진시스템 개발에 참여하기 위한 지속

적인 기술력 향상을 도모할 것이다.

참 고 문 헌

1. “다목적실용위성 2호 추진계 개발사업” 과제 연차보고서
2. 유택인, 정재필, 신영식 공저 “브레이징 접합 개론”, 2005, (주)기술정보
3. MIL-B-7883, "Brazing of Steels, Copper, Alloys, Nickel Alloys, Aluminum and Aluminum Alloys"
4. AWS 3.6, "Specification for Furnace Brazing"