

초음속 지상추진시험설비의 공기 혼합시스템 설계 및 제작

이양지*, 강상훈**, 양수석***

Design and Manufacture of the air mixing system for supersonic ground test facility

Yagn-Ji Lee*, Sang-Hun Kang**, Soo-Seok Yang***

Abstract

Air mixing system which is composed of air pressure control system, hot pipe system and air mixer, is the facility for mixing hot air(1000°C, 10kg/s) from storage air heater (SAH) and decompressed air(20°C, 15kg/s) from high pressure air supply system. Air pressure control system reduce the pressure of the air, from 32MPa to 3.5 MPa and supply the decompressed air to air mixer. The hot pipe system supply hot air from SAH to air mixer which mix hot with the decompressed air from air pressure control system. Fully mixed air flow rate is 25kg/s and mixed temperature is up to 400°C. So, we can expand the operating envelop of the supersonic ground test facility to low Mach number and low altitude region.

초 록

공기 혼합시스템은 초음속 지상추진시험설비의 축열식 가열기로부터 공급되는 1000°C, 3.5MPa의 공기와 고압공기 공급원으로부터 공급되는 상온, 동일 압력의 공기를 혼합시켜서 시험부로 공급하기 위한 설비로 32MPa로 압축되어 있는 고압공기 공급원을 3.5MPa로 감압하는 고압/저온 유동제어부, 축열식 가열기의 고온배관에서부터 공기 혼합기로 고온의 공기를 공급하기 위한 고온 배관, 축열식 가열기로부터 공급되는 고온 유동과 고압공기 공급원으로부터 공급되는 상온 유동을 혼합하기 위한 공기 혼합기로 구성된다. 공기 혼합 시스템을 통하여 완전히 혼합된 공기의 유량은 25kg/s, 온도는 약 400°C로 이를 통하여 초음속 지상추진시험설비의 구동 영역을 저 마하수, 저 고도 영역까지 확장할 수 있다.

키워드 : 초음속 지상추진시험설비(supersonic ground test facility), 공기 혼합시스템 (air mixing system), 고압/저온 유동제어부(high pressure air control system), 고온 배관(hot pipe system), 혼합기(mixer), 고압공기 공급원(high pressure air supply system), 축열식 가열기(storage air heater)

접수일(2007년 12월 7일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 첨단추진기관팀/mars336@kari.re.kr

** 첨단추진기관팀/acroksh@kari.re.kr

*** 첨단추진기관팀/ssyang@kari.re.kr

1. 서 론

공기 혼합시스템은 초음속 지상추진시험설비의 작동영역을 확장시키기 위하여 구축된 설비로 축열식 가열시스템으로부터 공급되는 1,000℃, 3.5MPa의 공기와 고압공기 공급원으로부터 공급되는 상온, 동일 압력의 공기를 혼합시켜서 시험부로 공급한다. 그림 1에 본 연구원에서 고속추진기관의 성능시험을 위하여 구축하고 있는 초음속 지상추진시험설비의 구성도를 나타내었다.

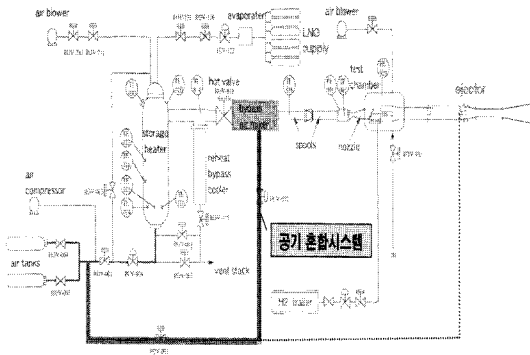


그림 1. 초음속 지상추진시험설비 구성

공기 혼합시스템은 고압/저온 유동제어부와 고온 배관, 공기 혼합기로 구성되며, 고압/저온 유동제어부는 32MPa로 압축되어 있는 고압공기 공급원을 3.5MPa로 감압하는 역할을 수행하며, 고온 배관은 축열식 가열기의 출구인 고온밸브에서부터 공기 혼합기로 고온의 공기를 공급하는 역할을 수행한다. 마지막으로 공기 혼합기는 축열식 가열기로부터 공급되는 고온 유동과 고압/저온 유동제어부를 통과한 상온 유동의 혼합이 이뤄지는 부분이다. 공기 혼합기를 통하여 혼합된 공기의 유량은 25kg/s, 온도는 약 400℃정도 일 것으로 예상된다. 본 논문에서는 공기 혼합시스템의 설계 및 제작 과정을 기술하였다.

2. 공기 혼합시스템 설계

2.1 개념

현재 본 연구원에서 보유하고 있는 추진기관 성능시험용 고압공기 공급원은 터보펌프 성능시험, 가스터빈 엔진 고공성능시험 등에 범용으로 사용되는 설비이며, 최고가압압력이 32 MPa으로 공기 혼합시스템에서 필요로 하는 3.5 MPa에 비하여 높은 압력을 보유하고 있다. 따라서 고압/저온 유동제어부는 고압공기 공급원의 압력을 공기 혼합시스템이 요구하는 사양을 만족할 수 있도록 압력 조절기와 음속 벤츄리로 구성하도록 하였다.[1]

본 시스템 구성에서 1000℃, 3.5MPa의 유동이 흐르는 파트는 축열식 가열기의 출구, 고온 밸브와 연결되는 고온 배관으로 압력과 온도를 견딜 수 있도록 설계하는 것이 관건이다.[6,7] 따라서 압력을 견디는 부분은 고온 배관의 자켓으로 고강도 탄소강재로 제작하도록 하였으며, 배관 내부는 온도를 견딜 수 있도록 인코넬 라이너를 설치하였다. 인코넬 라이너는 유지보수가 필요한 경우도 대비하여, 교체가 가능하도록 제작하는 것을 원칙으로 하였다. 배관 자켓과 라이너의 대략적인 구성은 그림 2와 같다.[1]

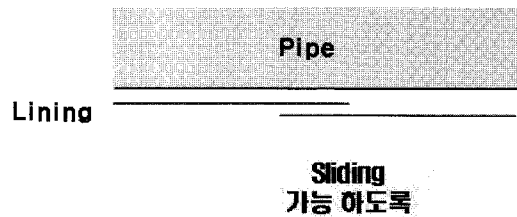


그림 2. 고온 배관 개념도

배관 자켓의 설계기준은 180℃, 4MPa이며, 인코넬 라이너와 배관 자켓과의 간격은 인코넬 재질의 Spacer로 유지하되, 별도의 단열재 없이 공기가 단열재 기능을 수행하게 된다. 라이너의 재질을 세라믹으로 사용하는 것도 고려하였으나 특성상 세라믹 라이너는 분진이 발생하여 시험실 노즐을 손상시킬 수 있으므로 사용하지 않았다.[1]

인코넬 라이너는 분리함으로써, 열 팽창시

sliding할 수 있도록 하였다. 인코넬 라이너는 고온가스가 외부 배관으로 직접 대류 및 복사 열전달하는 것을 방지하는 기능을 하며 가스는 sliding하는 인코넬 라이너의 연결부를 통하여 압력이 외부 배관으로 전달되므로 압력에 의한 힘이 라이너에 미치지 않게 하였다.[1]

정리하면, 고온 배관의 설계 개념은 온도는 라이너가 압력은 배관 자켓이 견디는 방식이다. 그리고 시험시간이 60초이기 때문에 외부 배관의 온도가 평형 상태까지 도달하지 않고 온도 상승 중에 시험이 끝날 것으로 예상하기 때문에 외부 자켓의 내부 표면온도가 설계 한계 이상 온도가 올라가지 않을 것으로 판단한다.

그림 3에 앞서 설명한 개념을 적용한 고온 배관의 구성을 나타내었다. 그림에서 ①과 ②는 인코넬 라이너이며 sliding할 수 있도록 설계하였으며, ③은 외부 배관 자켓이다.

ITEM	QTY	NAME	MATERIAL	VENDOR	NOTE
4	2	Flange(16")	ANSI A105 #300LR WN		
3	1	Pipe(Jacket)(16)	A106 Gr B Sch 40		
2	1	Downstream Flow Liner	INCONEL 601 121		
1	1	Upstream Backup Liner	INCONEL 601 121		

Parts List

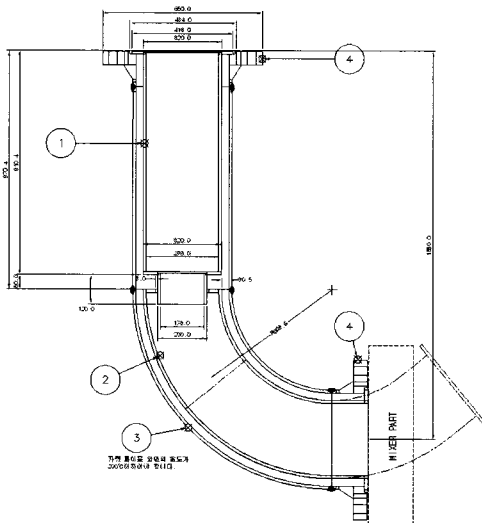


그림 3. 고온 배관 구성

공기 혼합기는 축열식 가열기로부터 공급되는 1,000°C, 10kg/s의 고온 유동과 고압공기 공급원

으로부터 공급되는 25°C, 15kg/s의 상온 유동이 만나는 섹션으로 고온 유동과 상온 유동이 적절히 혼합되도록 설계하는 것이 관건이다. 그림 4의 중앙 배관으로 1,000°C의 고온 유동이 지나가며 배관의 반경 방향으로 연결되어있는 지관을 따라서 상온 유동이 유입되어 혼합이 이뤄진다. 혼합기도 고온 배관과 마찬가지로 외부 자켓과 내부 라이너로 구성하였다.

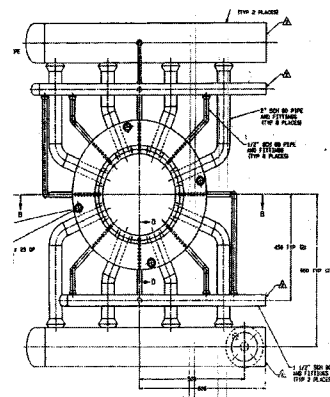


그림 4. 공기 혼합기 예시

3. 공기 혼합시스템 제작

3.1 고압/저온 유동제어부

고압/저온 유동제어부의 구성은 이미 설치된 축열식 가열시스템의 고압/고온 유동제어부와 동일하게 2단 압력 조절부와 음속 벤츄리로 구성하였다.[1]

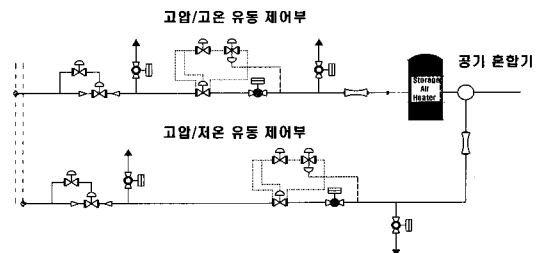


그림 5. 공기 혼합시스템 구성

고압/저온 유동제어부의 구성을 그림 5에 나타내었으며, 그림 6에는 압력 3.86MPa, 온도 15℃일 때 최대 유량 15kg/s가 흘러가는 벤츄리의 설계도를 나타내었다.

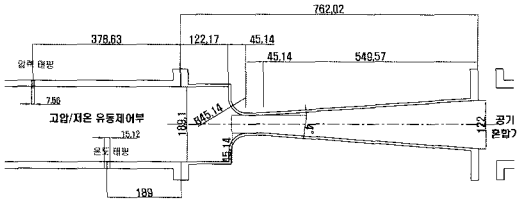


그림 6. 공기 혼합시스템 소닉 벤츄리 설계도

혼합기로 공급되는 유량은 벤츄리 전단의 압력 즉 2차 압력 조절기를 조정하여 조절할 수 있으며 이 때 유량 계산식은 아래의 식(1)과 같다.

$$q_m = \frac{A \cdot C C^* p_o}{[(R/M) T_o]^{1/2}} \quad (1)$$

$$= 0.658 \times 10^{-4} \frac{P_o}{T_o^{1/2}}$$

식(1)에서 P_o 와 T_o 는 벤츄리 전단의 압력과 온도이다.[2]

3.2 고온 배관

고온 배관은 앞서 설명한 것과 같이 배관 자켓과 내부 라이너로 구성되며, 970mm 길이의 단관과 엘보 그리고 플랜지로 구성된다.

배관 자켓은 ASME 코드에 준하여 A516-70으로 제작하였으며, 내부 라이너는 내열강으로 고온 특성이 우수한 인코넬 601 계열을 채택하였다. 표 1에 인코넬 601의 성분을 나타내었다. 인코넬 라이너의 두께는 일본 JAXA의 RJTF 기술 자료를 검토하여 9mm 이상의 판재를 사용하기로 결정하였다. 엘보의 경우 인코넬 601 판재를 구부러서 제작하기 때문에 두께를 확보하기 위해서는 최소 12mm의 판재를 가공해야 9mm의 두께를 가질 수 있을 것으로 예상하였다. 따라서 ID 296mm, 두께 12mm의 인코넬 라이너를 제작하고 이를

구부러 단관부의 인코넬 라이너 배관두께와 같은 두께를 갖도록 제작의 방향을 세웠다.

표 1. 인코넬 601 성분

합금명	주 성분 (%)							비중 (Mg/m ³)	열전도	
	Ni	Cu	Cr	Fe	Si	Mo	Co		70°F (20°C)	1500°F (815°C)
INCONEL 601	60.5		23	14				7.14 (8.11)	78 (11.2)	171 (24.7)

3.2.1 제작공정 및 주안점 해결

3.2.1.1 인코넬 판재의 가공

인코넬 판재의 크기는 1220mm×3048mm×12.7mm로 수압절단을 시행하여 파이프용 판재와 혼합기용 라이너 및 플랜지등으로 제작되어, 파이프용 판재는 ID 296mm로 롤링, 냉간 가공하여 원통으로 만들고 라이너 및 플랜지류는 선반과 밀링머신을 통해 소요되는 부품으로 가공되었다. 그림 7에 인코넬 판재의 수압 절단도, 그림 8에서 11에 인코넬 라이너 제작 사진을 나타내었다.

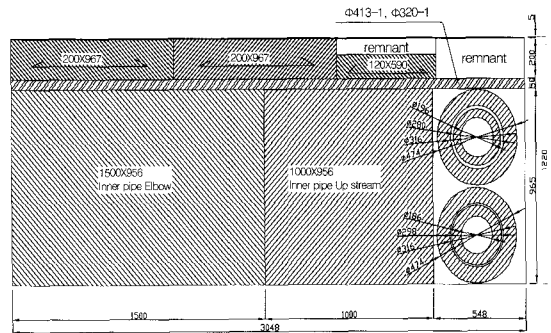


그림 7. 인코넬 판재 수압 절단도

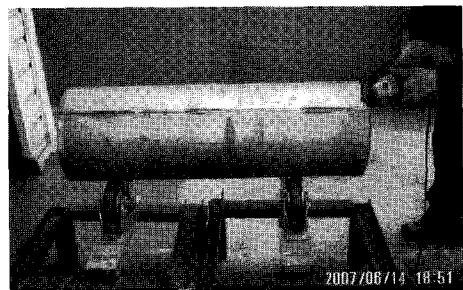


그림 8. 인코넬 라이너 제작 (판재 가공)

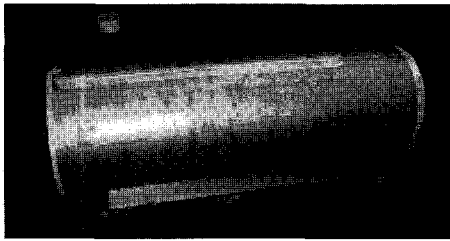


그림 9. 인코넬 라이너 제작(퍼지 용접)

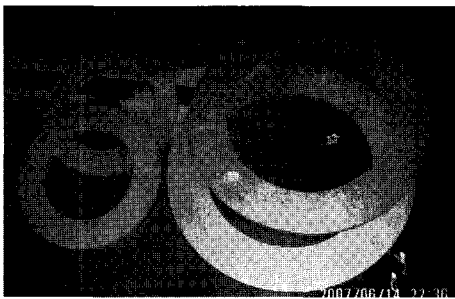


그림 10. 플랜지용 부재(수압절단)

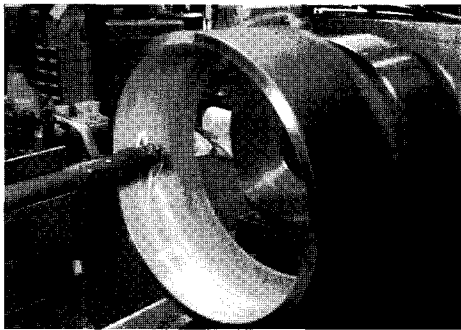


그림 11. 인코넬 라이너 가공

열로서 피 가열물을 가열하는 것을 유도 가열이라 한다. 유도 전류는 물체 표면 주위에서는 강하게 흐르고, 물체의 내부로는 약하게 흐르려는 특징이 있다. 따라서 이 원리로 피 가열물의 필요한 부분에 에너지를 집중시켜 효율적인 가열이 가능하기 때문에 인코넬 601의 Bending에도 적합할 것으로 예상하였다.

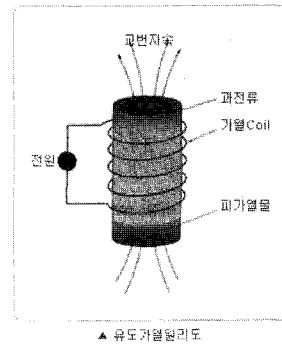


그림 12. 고주파 Bending의 원리

엘보 제작을 위한 고주파 가열은 인코넬 파이프에 와전류를 발생시켜 약 8~10초 내에 900℃까지 가온시켰다 가온 부위는 30mm를 넘지 않도록 하였으며, 유압 벤더를 이용하여 0.5~1° 정도의 Bending을 진행하였다. 그러나 그림 13, 14에서 보는 바와 같이 인코넬 라이너에서 경화성 균열이 발생하였으며, 제작에 적합하지 않은 방법으로 판단, 고주파 Bending을 이용한 엘보 제작을 중단하였다.[8]

3.2.1.2 엘보 제작 및 고주파 벤딩

인코넬 파이프를 엘보 형태로 제작한 경험을 보유한 회사는 조사 결과 국내에서 전무한 것으로 파악되었으나 관련 업체를 수소문하여 고주파 bending을 이용하여 엘보를 제작을 시도하였다. 고주파 Bending은 그림 12와 같이 전자기 유도 작용을 이용해 코일에 교류 전류를 흘려 교번자속이 발생하게 함으로써 피 가열물에 유도 전류가 흐르도록 하는 것이다. 이 유도 전류는 와전류에 의해 줄 열을 발생시키며, 이렇게 발생된

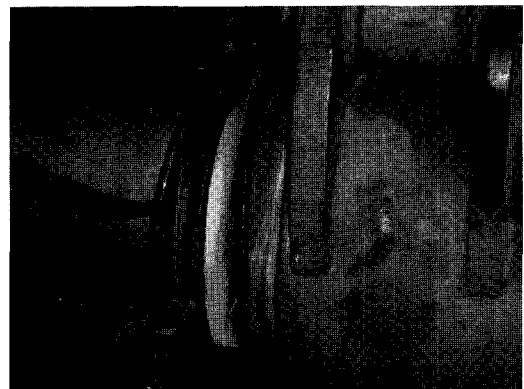


그림 13. 고주파 가열



그림 14. 가열부 균열

3.2.1.3 마이터(Miter) 배관에 의한 엘보 제작

고주파 bending 기법을 적용한 인코넬 라이너의 엘보 제작에 실패한 후, 그림 15와 같이 엘보 파트를 5개의 피스로 구분하고 용접하여 제작하였다.

용접은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)을 택하고 분위기 가스로 Ar(99.9%)과 L-N2 (99.999%)를 사용하였으며, 용접용 필러는 일본 니치아 사의 NIN-82R(JIS Z334 YNiCr-3) 3.2mm를 사용하고, 용접전류는 210A, 예열온도는 200℃로 작업하였다. 예열온도의 체크는 Tempilstik 200℃(Temperature indicator 390°F)을 사용하였다.[8]

ITEM NO.	NAME	MATERIAL	VENDOR	NOTE
1	Flange(18")	INCO 617 (N0617)		
2	Flange(18")	INCO 617 (N0617)		
3	Flange(18")	INCO 617 (N0617)		
4	Flange(18")	INCO 617 (N0617)		
5	Flange(18")	INCO 617 (N0617)		

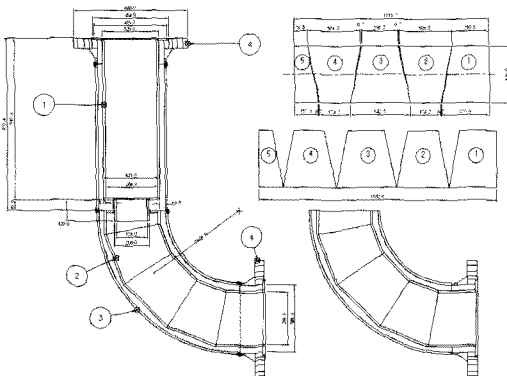


그림 15. 고온 배관 제작(Miter type)

배관의 용접은 루트 각 70°, 루트 갭 4mm를 두어 백 비드를 내면과 동일곡면이 되게 하였으며 용접속도는 0.38~0.45mm/sec로 11~13 Phase를 진행하였다. 완료한 후 후열처리를 위해 산소토치를 사용하여 250℃까지 가온하고 석면포를 덮어서서히 냉각하였다. 배관 자켓은 GTAW 1 Phase로 백비드를 형성하고 SMAW (Shielded Metal Arc Welding), CO2용접 3 Phase로 마무리하였다.[8]

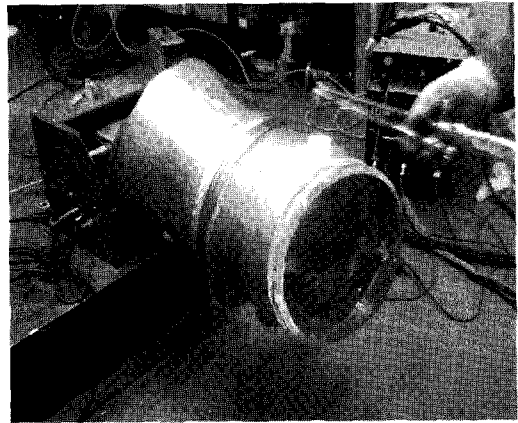


그림 16. 인코넬 라이너 후열처리

그림 16과 17에 엘보 제작 과정을 나타내었으며, 그림 18에 제작 완료된 내부 라이너를 19에 고온 배관 외부 자켓과 내부 라이너의 체결을 나타내었다.



그림 17. 석면포 보온

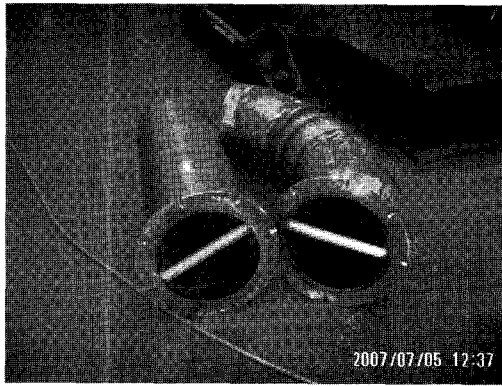


그림 18. 내부 라이너 완성

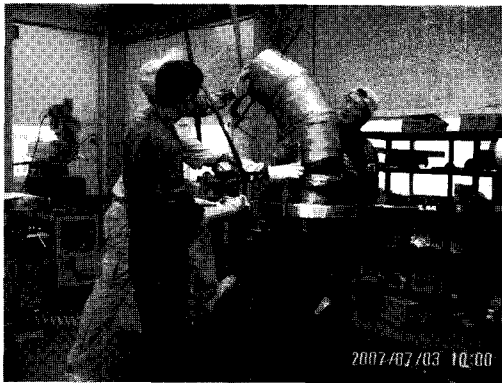


그림 19. 외부 자켓과 내부 라이너의 조립

3.3 혼합기

본 연구원의 초음속 지상추진시험설비와 유사설비인 일본 JAXA, RJTF의 혼합시스템은 10MPa, 45.9kg/s의 기류를 혼합하는 시스템으로 인코넬 601 및 하스텔로이 소재를 사용하여 일체로 가공, 제작 정밀도를 높였다.[3,4,5] 따라서 이를 실현할 수 있도록 판재를 가공하고, 조립시 용접을 통해 일체형 혼합기를 제작하기로 방향을 잡았다.

3.3.1 혼합기 제작

그림 20과 21에 혼합기의 제작 도면을 나타내었다. 고압/저온 유동제어부로부터 공급되는 유동은 8개의 지관을 통하여 혼합기로 유입되도록 하였다.

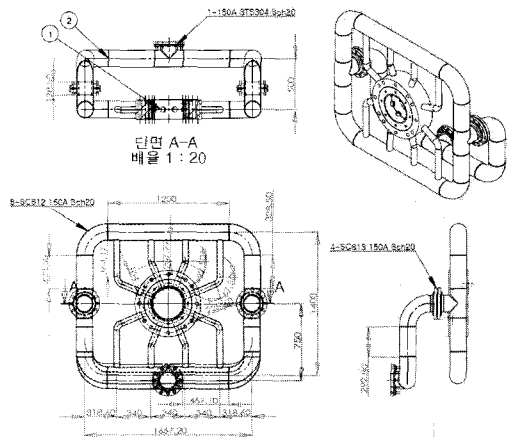
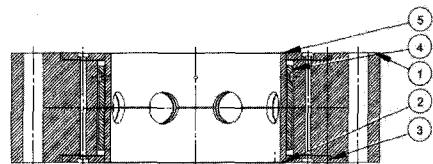


그림 20. 혼합기 제작도



단면 A-A

NO.	DESCRIPTION	MATC
1	Mixer Housing	SF440A
2	Inconel Mixer	INCONEL 601 12t
3	Inconel Mixer Flange	INCONEL 601 12t
4	Pipe(jacket)	INCONEL 601 12t
5	Inconel Mixer_1	INCONEL 601 12t

그림 21. 혼합기 단면도

그림 22에서 24까지 혼합기의 3차원 도면을 도시하였다. 그림 22는 혼합기의 종단면으로 혼합기로 유입되는 지관을 확인할 수 있다.

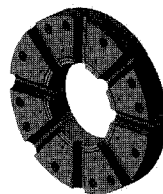


그림 22. 종단면

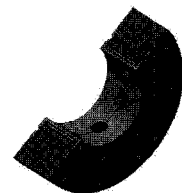


그림 23. 횡단면

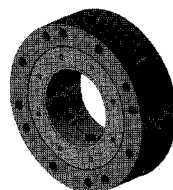


그림 24. 혼합기 완성품

혼합기 외피는 SF440A의 탄소 강재로 주물제작 후 가공하였다. 그림 21에서 ③번 파트 2개, ⑤와 ②번 파트로 용접하여 병합하였다. 이 때 용접 응력에 의한 변화가 없도록 하였다.

그러나 인코넬 재질을 사용한 파트의 경우, 고온 배관 인코넬 라이너 엘보의 고주파 벤딩에서와 마찬가지로 고온 경화 및 균열이 제작 과정에서 발생하였다. 이러한 현상을 그림 25와 26에서 확인할 수 있다.[8]

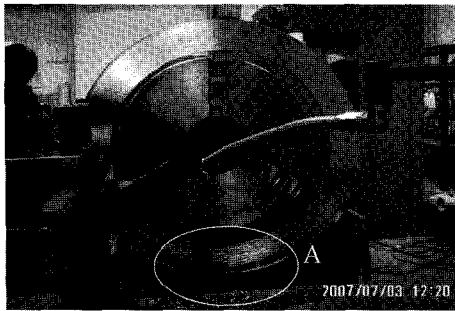


그림 25. 혼합기 인코넬 플랜지 가공

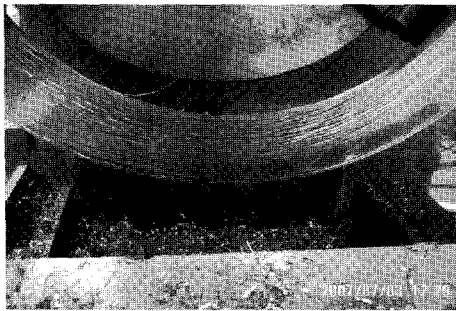


그림 26. 그림 19의 "A" 부분

플랜지 제작에 있어서 용접응력 발생을 최소화하기 위하여 플랜지 내측에 써포트를 가접하고 전, 후 열처리를 충분히 하여 변형을 제한하였다. 제작 후 공차는 플랜지 부분 10mm, 슬리브 부분 9.6mm로 설비 구동에 있어 적절할 것으로 생각한다.

3.3 공기 혼합시스템 지지대

고온 배관이 장착되는 고온밸브의 무게는 1톤이며, 고온 배관과 혼합기의 총 중량이 1.3톤임을 고려할 때 2.3톤 이상의 하중 그리고 고온 배관의 수직 방향 예상 신축량 20mm를 흡수할 수 있도록 지

지대를 설치하였다. 대개의 경우 횡 방향의 팽창으로부터 배관을 보호하기 위하여 슬라이딩 지지대나 행거를 설치하지만 본 시스템은 구조 상 수직 방향으로의 선펙창을 지지할 수 있어야 한다. 또한 이 선펙창은 450A의 Sch 40 배관(고온 배관 자켓)의 선펙창으로 수치는 20mm이나, 설치되는 위치와 향후 설치되는 후단 배관의 길이가 짧기 때문에 대단히 큰 하중으로 작용할 수 있음을 예측할 수 있다. 따라서 범용으로 쉽게 구할 수 있는 방진 스프링 마운트를 사용하였으며 사양은 표 2와 같다.[8]

표 2. 공기 혼합시스템 지지대 사양

제한 변위	50mm
사용 하중	2.4톤
스프링 상수	48kgf/mm
수 량	2개
모델 및 제조사	YST-B(유통방진산업)

구축이 완료된 공기 혼합시스템의 형상을 그림 26과 27에 나타내었다.[8]



그림 27. 공기 혼합시스템 I

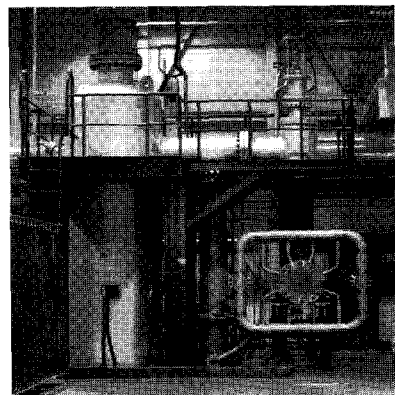


그림 28. 공기 혼합시스템 II

4. 결 론

그림 28에 시험부 크기가 200mm×200mm일 때의 초음속 시험설비의 작동범위를 나타내었다.[9] 그림에서 타원형 실선으로 표시된 영역은 축열식 가열기만을 이용하여 성능시험을 수행하였을 때의 시험설비 작동영역을 대략적으로 나타낸 것이며, 평행사변형 점선으로 표시한 부분은 공기 혼합시스템을 구축한 후의 작동 영역이 확장된 것을 나타내었다. 이를 통하여 초음속 지상추진 시험설비의 작동 영역이 공기 혼합시스템의 구축으로 인하여 저 마하수, 저 고도 영역으로 확장된다는 것을 예상할 수 있다.

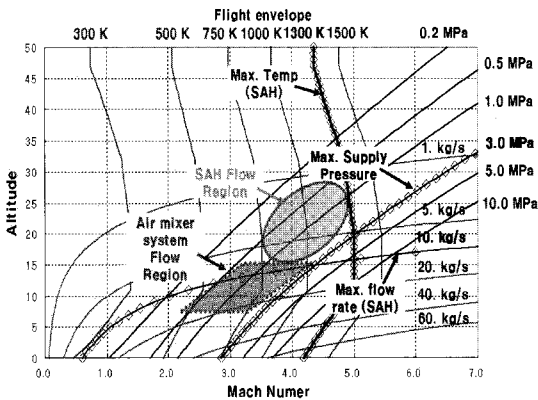


그림 29. 초음속 시험설비의 작동범위
 [축열식 가열기 최대 유량 : 10 kg/s,
 공기 혼합시스템 최대 유량 : 25 kg/s]

2008년 7월 초음속 지상추진 시험설비의 배기 시스템이 구축되면, 시험부(Test Cell)를 제외한 초음속 지상추진시험설비의 가동 시험을 수행할 수 있다. 가동 시험의 결과를 통하여 시험설비의 성능을 파악하는 것은 물론, 공기 혼합시스템의 성능을 파악하고, 시스템 보완 또는 개선을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 황인희 외, "비행체 핵심시험장비 구축사업 (VII)", 산업자원부 중간보고서, 2006.
2. "Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles", ISO 9300:1990(E).
3. Tohru Mitani 외, "Ramjet Engine Test Facility", NAL TR-1347, 1998.
4. Tohru Mitani 외, "Subscale Wind Tunnels and Supplemental Studies of SCRAMJET Engine Tests", NAL TR-1458, 2003.
5. Tohru Mitani, "Lectures on Ramjet System and Evaluation", NAL, 2002.
6. 이양지 외, "Design and Manufacture of the Storage Air Heater for Supersonic Ground test facility", The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, 2007.
7. 이양지 외, "축열식 가열기의 설계 및 제작", 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2006, pp.43-46.
8. 황인희 외, "비행체 핵심시험장비 구축사업 (VII)", 산업자원부 중간보고서, 2006.
9. 이양지 외, "초음속 지상추진시험설비의 기본 설계기법 연구", 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp. 53-62.