

## 한국형 발사체 적용 대형 박관 배관 시편 제작 및 성능 평가

이한주\*, 이정호\*\*, 오승협\*\*\*

### Manufacturing and Performance Evaluation on Specimen pipes with Large Size Diameter and Thin Thickness for KSLV-II

Hanju Lee\*, Jung Ho Lee\*\*, Seung Hyub Oh\*\*\*

#### Abstract

This article deals with the manufacturing and performance evaluation on the specimen pipes which have large size diameter and thin thickness. This specimen is for LOX main pipe of KSLV-II propulsion feeding system. The material of specimen is alloy 21-6-9. Alloy 21-6-9 has higher strength and better weldability rather than STS-300 class pipes. We found that the specimen using alloy 21-6-9 satisfied the requirement by pressurization tests.

#### 초 록

본 연구에서는 다양한 발사체 추진기관 공급계 배관 자재 중 STS 300 계열의 금속보다 강도가 높고 용접성이 우수할 것이라고 판단되는 21-6-9 합금소재를 이용하여 산화제 주배관의 시편을 제작 하였다. 제작된 시편은 내압 시험을 수행하여 요구되는 내압 강도를 유지할 수 있는지를 확인하였다.

키워드 : 한국형발사체 (KSLV-II), 산화제 주배관 (LOX main pipe), 강도 (Strength), 용접성 (Weldability), 21-6-9 합금 (Alloy 21-6-9)

#### 1. 서 론

발사체 추진기관의 공급계 중에서 산화제 주배관은 일반적으로 대형의 내경을 갖는다. 이는 대량으로 생산되는 심리스 규격 튜브를 적용할 수 없다는 의미이다. 물론 특수 주문을 통한 대형의 심리스 튜브의 생산 자재는 기술적인 측면에서 가능하기는 하나, 튜브의 사이즈 당 톤 단

위의 대량 주문을 해야 하고 직관만 생산이 가능하기 때문에 곡관을 만들기 위해서는 별도의 특수한 공정이 투입되어야 하며, 뿐만 아니라 비용적인 측면에서 볼 때 규격 튜브의 가격과 비교할 수 없을 만큼의 고비용을 지출해야 한다.

해외의 발사체에 적용되는 추진기관 산화제 주배관 또한 상기에서 설명한 이유로, 설정된 내경 및 기타 자재의 기계적 물성치, 작동 환경을 고려하여 두께에 적합한 판재를 이용하여 성형

접수일(2013년 4월 8일), 수정일(1차 : 2013년 6월 12일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

\* 발사체추진기관팀/leehj@kari.re.kr \*\* 발사체추진기관팀/leejh28@kari.re.kr \*\*\* 발사체추진기관팀/shoh@kari.re.kr

및 용접하는 방식으로 생산하고 있다.

발사체 추진기관 공급계 배관 중 산화제 배관의 제작에 적용되는 자재로는 STS 304L, STS 316L, Inconel 718 & 625, Al 6061 & 2219, Ti-6Al-4V, Armco 21-6-9 등 여러 종류가 용도에 따라 다양하게 사용된다. 물론, Ti이 함유된 Ti-6Al-4V 자재는 충격에 의해 산화 폭발을 야기시킬 수 있기 때문에, 산화제 공급계 주배관에는 적용하지 않는다. [1] ARIANE 발사체의 경우 산화제 주배관, 플랜지, 벨로우즈 모두 STS 316L을 적용하고 있는 것으로 파악되었다. STS 316L 자재의 경우, 가격 및 가공 방법, 용접 성능 등이 발사체 추진기관 산화제 주배관에 적합한 것으로 판단되나, 기계적 물성치 측면에서 볼 때 강도가 상대적으로 낮은 단점이 있으며, 이로 인해서 추진기관 산화제 주배관의 두께가 두꺼워지며 결국 시스템 구성 시 전체적인 중량이 상승되는 결과를 갖는다.

발사체 전체 중량을 저감시키기 위해서는 고강도의 자재를 선정해야 하며, STS 316L 보다 강도가 높은 자재로서 주로 항공기용 배관에 사용되는 21-6-9 합금을 검토하였다. 21-6-9 합금은 주성분이 철로서, 철 성분이 최대 67%, 최소 58% 함유되어 있는 STS 계열 자재이다. 이러한 철 성분의 함량은 STS 304L, 316L과 유사하며 STS 계열 소재로 제작되는 벨로우즈, 플랜지, 필터 등 산화제 주배관 조립체의 구성품들과 용접이 용이할 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 탄소 함량이 많게 되면 가공성과 용접성이 나빠지는 것으로 알려져 있는데, 21-6-9 합금은 탄소 함량이 STS 300 계열 대비 적기 때문에 용접성이 우수할 것으로 기대된다. 또한 합금의 명칭에서 알 수 있듯이 망간(Mn)의 함유량이 높은 것과 질소(N)가 포함되어 있는 것이 STS 300 계열과 비교되는 큰 특징으로 강도를 높여준다. 표 1에는 21-6-9 합금과 STS 304의 최대 함량 기준의 성분을 나타내었으며, 각 소재의 강도를 표 2에 도시하였다.

본 연구에서는 STS 300 계열의 금속보다 강도가 더 높은 21-6-9 합금 자재를 이용하여 산화제 주배관의 시편을 성형 공정 및 용접 공정을 통하

여 제작하고, 내압 시험을 수행하여 요구되는 내압 강도를 유지할 수 있는지를 확인하였다. 또한 경량화 소재로 생각할 수 있는 Al 2219 박판 소재에 대한 용접성 및 적용 가능성을 파악하였다.

표 1. Alloy 21-6-9와 STS 304 성분 비교 [2, 3]

Element	Alloy 21-6-9		STS 304	
	min	max	min	max
C	-	0.04	-	0.08
Mn	8.00	10.00	-	2.00
Si	-	1.00	-	1.00
P	-	0.06	-	0.04
S	-	0.03	-	0.03
Cr	19.00	21.50	18.00	20.00
Ni	5.50	7.50	8.00	10.50
N	0.15	0.40	-	-
Mo	-	0.75	-	0.75
Cu	-	0.75	-	0.75

표 2. Alloy 21-6-9와 STS 304 강도 비교 [2, 3]

	Tensile Ultimate Strength, MPa	Yield Strength, MPa
Alloy 21-6-9	689	414
STS 304	517	207

## 2. 본 론

### 2.1 21-6-9 합금 소재 특성 평가

21-6-9 합금의 판재는 해당 제작사에서 제공하는 물성 데이터가 있으나 실제 자재가 지정된 규격을 만족하는지를 사전에 파악할 필요가 있다. 또한 본 소재에 대한 용접성과 용접 조건에 대하여 파악할 필요가 있으므로 소재 일부를 채취, 인장 시편을 제작하여 분석하였다. 소재의 특성 비교를 위해 STS 304L과 21-6-9 합금을 동일하게 진행하였으며, 인장강도와 연신율을 통해 롤링 및 스탬핑 등의 가공 방법에 대한 적절성 여부를 파악하고자 하였다. 용접 방법은 박판 용접에 적합한 가스 텀스텐 아크 용접 (GTAW, Gas

Tungsten Arc Welding)과 맞대기 용접 (I자형 용접)을 선택하였으며, 용접 강도를 파악하기 위한 인장 시험편을 제작하여 시험함으로써 이후에 진행할 내압 시험을 위한 내압 성능을 미리 파악할 수 있었다.

용접 조건을 설정하기 위해서 Ar 퍼지 가스의 양과 용접 전류를 표 3과 같이 변화시켰고, 이송 속도는 수동 용접으로 인하여 정밀하게 제어되지 못하므로 일정하게 유지하였다. 용접부 외관 검사 결과, 10 l/min의 Ar 가스 투입과 90A에서 비드 형상이 가장 양호한 것으로 확인되었다.

표 3. 용접 조건 설정을 위한 변수

구분	1	2	3	4	5	6
Ar Purge (L/min)	5	5	10	10	15	15
Current (A)	70	90	90	60	60	90

그림 1은 상술한 용접 조건에서의 단면 확대 사진이다. 기공 및 균열 등의 결함이 발생되지 않았으며 양호한 프론트비드와 백비드 형상을 보여주고 있다. 용접부는 외력 작용 시 비드와 모재가 만나는 부분이 노치로 작용하며, 용접 시 발생하는 열로 인해 조직이 조대해지므로 강도가 낮아지게 되어 파단이 될 가능성이 가장 높은 부분이다. 그러므로 모재와 용착부가 접하는 부분은 그림 1과 같이 완만하게 이어지는 형태가 바람직하다.

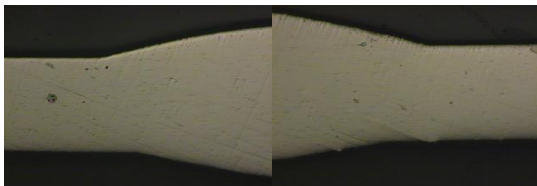


그림 1. 용접부 확대 사진 (x50)

인장 시험편에 대한 기계적 물성치 시험 결과는 표 4에 나타내었다. STS 304L은 모재에서 파단되었으며, 21-6-9 합금은 용접부에서 파단된 것을

그림 2에서 확인할 수 있다. 시험 결과, 배관 두께 설계 기준이 되는 21-6-9 합금의 항복 강도가 STS 304L 대비 약 50% 수준 높은 것으로 확인되었다.

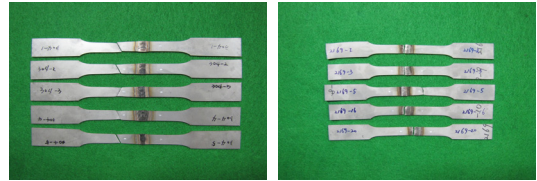


그림 2. 용접 소재 파단 사진 (좌:STS 304L, 우: Alloy 21-6-9)

표 4. 기계적 물성치 시험 결과

Material		Tensile Ultimate (MPa)	Yield (MPa)	Elongation (%)
STS 304L	Mill Sheet	691.5	291.4	66.1
	GTAW	721.5	311.5	42.0
Alloy 21-6-9	Mill Sheet	790.6	502.3	53.1
	GTAW	784.7	479.8	34.1
Al 2219-T81	Mill Sheet	425	315	6
	GTAW	303	158	5

## 2.2 Al 2219-T81 소재 특성 평가

Al 2219-T81은 한국형 발사체의 추진제 탱크에 적용되는 소재와 유사한 재료로 산화제 배관의 작동 압력 대비하여 산화제 배관의 중량을 가장 효율적으로 가져갈 수 있다. 산화제 주배관 조합체를 동체 구조물과 지지하는 알루미늄 합금 소재의 지지 브라켓을 장착하는 경우, 산화제 주배관의 작동 환경 상 열수축량을 동일하게 가져갈 수 있는 등의 여러 장점이 있다.

MEOP (Maximum Expected Operation Pressure) 15 bar인 경우, 1mm의 시트 소재를 이용한 Al 2219-T81의 배관 제작 시 1mm의 21-6-9 합금 판재 대비 배관 자체의 중량을 65% 가량 절감시킬 수 있다. 물론 산화제 주배관 조

합체의 구성품인 벨로우즈, 필터 등이 STS 계열이기 때문에 체결부의 플랜지 조립에 따른 중량 추가를 고려해야 한다.

강도 시험용 시편의 용접부를 절단해서 확인한 결과, 모든 시편에서 내부 기공이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그림 3과 4에는 10 l/min Ar 가스 퍼지 및 용접 전류 45 A 조건에서의 용접부 단면을 확대한 사진으로 내부 기공 및 균열을 보여준다. 이러한 내부 기공은 용접부의 빠른 냉각 속도에 의해 용착부에서 수소가 빠져나오지 못할 경우 발생하는 것으로 강도 저하의 원인이 될 수 있으며 표 4의 인장 강도 시험 결과 확인되었다.

Al 2219-T81은 강도 대비 낮은 연신율로 인해 변형에 대한 저항성이 매우 크다고 할 수 있다. Al 2219-T81을 성형하기에 앞서 소재에 비해 강도가 낮고 연신율이 높아 상대적으로 성형성이 좋은 Al 6606-T6 소재를 사용하여 성형 조건 설정 및 Al 2219-T81의 성형 가능성을 확인하고자 하였다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 계획된 일정한 형상으로 성형할 수 없고 불규칙적으로 일그러지는 형상이 확인되었다. 이를 통해 Al 2219-T81은 Al 6606-T6 대비 강도가 더 높고 연신율이 더 낮기 때문에 성형에 더욱 불리함을 예측할 수 있다.

Al 2219-T81에 대한 용접성 및 성형성을 검토한 결과, 산화제 주배관의 재질로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

### 2.3 21-6-9 합금 적용 배관 시편 제작



그림 3. Al 2219 절단부 (X100)



그림 4. Al 2219 절단부 (X500)

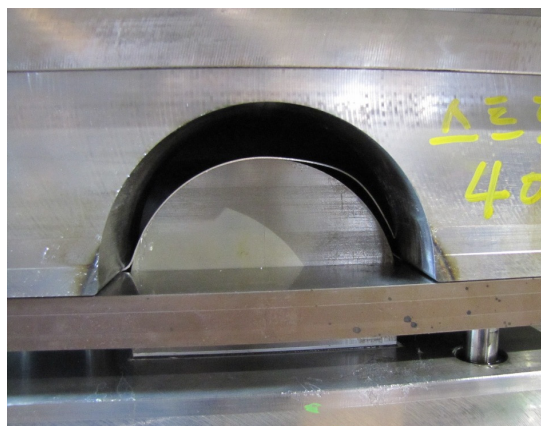


그림 5. Al 6606-T6 성형 시 소재 일그러짐

추진기관 공급계의 산화제 주배관 조합체는 발사체 적용에 있어서 직관의 형태뿐만 아니라, 다른 구조물들과의 간섭을 피하기 위하여 커브 라우팅을 가질 수 있다. 이러한 라우팅 중 가공성에 있어서 가장 나쁜 조건인 90도 곡관을 포함시켜 21-6-9 합금에 대한 제작성을 파악하였다. 제작 시편에 대한 도면 및 제작 공정 흐름도를 그림 6과 그림 7에 각각 도시하였다. 각 배관 시편의 내경은 165mm이며, 두께는 1mm이다. 수압 시험 장치와 배관 시편과의 체결을 위한 플랜지는 STS 316L로 제작하였으며, 배관 시편과 용접하였다. 이 과정에서 21-6-9 합금과 STS 316L 재질 간 용접이 가능함을 확인할 수 있었다.

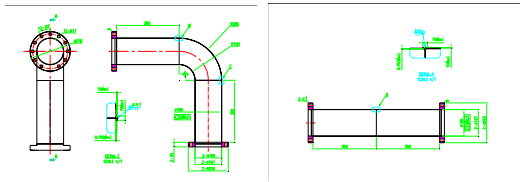


그림 6. 곡관 (A형) 및 직관 (B형) 도면

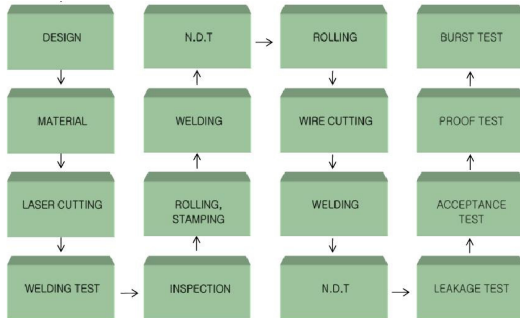


그림 7. 배관 시편 제작 흐름도

그림 8은 곡관 (이하 A형) 및 직관 (이하 B형) 시편의 형상이며, 그림 9에는 시편 제작 공정을 나타내었다. 제작이 완료된 시편은 방사선 투과검사를 수행하여 결함이 없는 것을 확인하였다.



그림 8. 제작 완료된 배관 시편 (좌: 곡관, A형, 우: 직관, B형)

## 2.4 내압 시험 결과

제작된 A형과 B형은 내압시험을 수행하여 요구되는 내압 강도 수준을 만족하는지 확인하였으며, 시험 조건은 표 5에 나타내었다. 예비 압력 상승 단계에서는 10bar와 12bar의 수압을 가하여 안정화시킨 후 매 테스트 구간 10분간 대기하여 압력 및 변형률 값을 체크하였다. 인증 압력 이후에는 파단이 발생될 때까지 지속적으로 압력 상승과 대기를 반복하였다. 그림 10에는 각 배관

시편별 시간에 따른 변형률 변화 결과를 나타내었다.

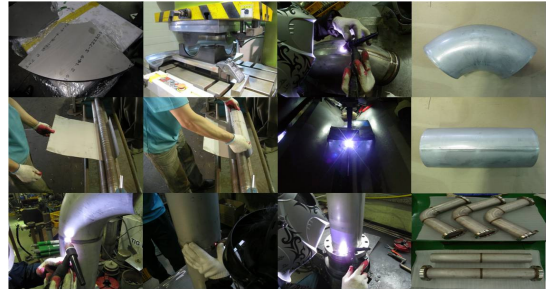


그림 9. 배관 시편 제작 공정

표 5. 내압 시험 조건

	Pressure (bar)		Holding Time (min)
	Pre-step	-	10
Pre-step	-	12	2
Leakage	MEOP	15	10
Acceptance	MEOP x 1.2	18	10
Proof	MEOP x 1.5	22.5	10
Burst	MEOP x 2.5	Burst	-

A형과 B형 모두 한국형 발사체 추진기관 산화제 주배관의 MEOP인 15 bar의 1.5배까지 파손이 발생하지 않았다. 그림 11과 같이 A형은 곡관의 안쪽 반경 부위의 용접선을 따라 직관과의 연결을 위한 용접부까지 파단이 발생하였고, 파단 시 압력은 약 50bar이다. 그림 10 (a)로부터 이 부위의 변형률 값이 가장 높게 측정됨을 알 수 있다. B형 시편의 경우, 그림 12에서 볼 수 있는 것처럼 A형 시편과 같이 용접선에서 파단이 발생하지 않고 직관 간 용접부에서 미세한 홀 파단이 발생한 것을 침투탐상검사를 통해 확인하였

다. B형 시편의 파단 시 압력은 약 60bar이다.

### 3. 결 론

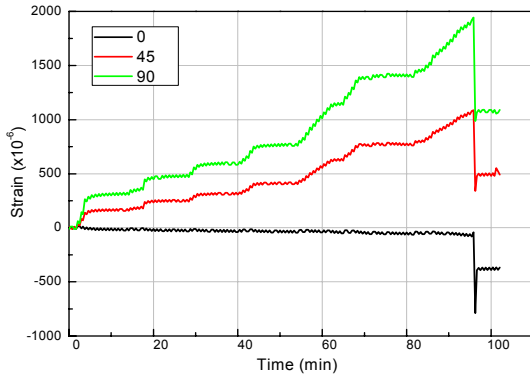
본 논문에서는 21-6-9 합금 박판 소재를 이용하여 산화제 주배관의 주 형상 (내경 165mm, 두께 1mm)에 대한 제작이 가능한지 확인하였다. 특히, 직관뿐만 아니라 곡관의 형태까지 성형 가공 및 용접 접합이 가능한지 여부를 확인하고, MEOP를 기준으로 하여 설정된 최고 압력 수준까지 파손이 없는지를 확인하였다.

그 결과 롤링 및 스탬핑 가공을 통한 직관과 곡관의 성형과 용접 접합이 가능한 것을 확인하였다. 또한, 용접 후 NDI 검사를 통하여 용착부 내 기공 결함이 없으며 STS 316L과의 용접 접합이 가능한 것을 확인하였다. 제작된 배관 시편들에 대한 내압 시험 결과 수락 및 인증 압력 내에서의 파손이 없었으며, 50bar 이상에서 파단이 발생함을 확인하였다.

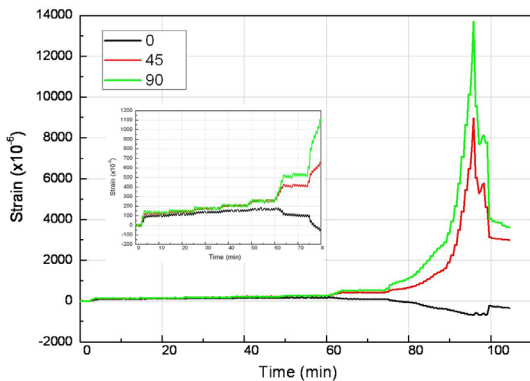
21-6-9 합금 박판 소재에 대한 상온 기계적 성질 및 내압 특성은 본 연구를 통해 확인되었으나 극저온 배관에 적용하기 위해선 추후 저온 취성 문제를 확인해야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. NASA SP-8123, Liquid rocket lines, bellows, flexible hoses, and filters.
2. AMS 5595 G
3. AMS 5513 Rev.J



(a) A형



(b) B형

그림 10. 변형률 계측 결과

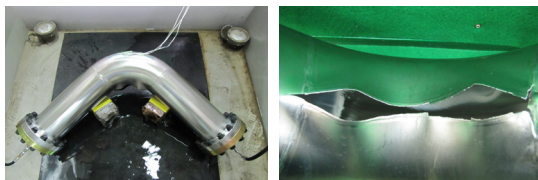


그림 11. A형 배관 시편 파단 시험 결과

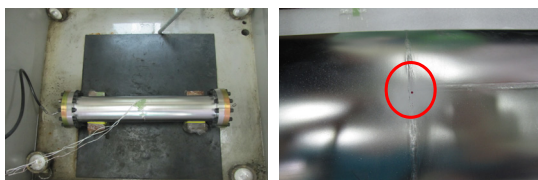


그림 12. B형 배관 시편 파단 시험 결과