

## 위성용 소켓헤드 캡 스크류 개발 및 검증

이춘우\*, 조영준\*\*, 이창호\*\*\*, 황도순\*\*\*\*

### Development and Verification of Socket Head Cap Screw for Satellite Application

Choon-Woo Lee\*, Young-Jun Cho\*\*, Chang-Ho Lee\*\*\*, Do-Soon Hwang\*\*\*\*

#### Abstract

The purpose of this document is to introduce the localized development procedure for socket head cap screw used for satellite application. For localized development and verification of socket head cap screws, manufacturing process was composed of head forming, heat treatment, rolling process and surface treatment to meet aerospace hardware requirements based on MIL-B-7838, ECSS-Q-70-46A and KS W 8168 aerospace specification. In order to verify the quality and performance of localized screw, several kinds of qualification tests are successfully completed. By comparing the quality and performance for the localized screws and the same size oversea-procured screws, we can sure that localized socket head cap screws have good quality performance enough to use for aerospace application.

#### 초 록

본 논문은 위성용으로 주로 사용되는 소켓헤드 캡 스크류에 대한 국산화 개발 절차를 소개하는 내용이다. 국산화 개발을 위한 소켓헤드 캡 스크류의 제조공정은 MIL-B-7838, ECSS-Q-70-46A, KS W 8168과 같은 항공우주 관련 규격 요구조건을 만족하기 위해서 헤드 포밍 공정, 열처리공정, 전조 공정 및 후처리 공정으로 구성하였다. 그리고 국산화 스크류에 대한 품질 검증을 위하여 여러 가지 종류의 품질검증시험을 성공적으로 완료하였다. 또한, 비국산화 해외 도입 스크류와의 비교 품질시험을 통하여, 국산화 소켓 헤드 캡 스크류 품질이 항공우주용으로 적용 가능한 우수한 품질 성능을 확인 하였다.

키워드 : 소켓헤드 캡 스크류(Socket Head Cap Screw), 위성용 패스너(Satellite Fastener), 헤드 포밍 및 전조 다이(Head Forming and Rolling Die), 품질검증시험(Qualification Test)

#### 1. 서 론

현재 국내에서 개발되고 있는 항공우주관련 프로그램의 주요 핵심부품 및 생산/조립/시험

---

접수일(2010년 1월 15일), 수정일(1차 : 2010년 4월 7일, 2차 : 2010년 6월 21일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

\* 위성구조팀/lcw@kari.re.kr

\*\* 위성구조팀 /yjcho@kari.re.kr

\*\*\* 위성구조팀/chlee@kari.re.kr

\*\*\*\* 위성구조팀/dshwang@kari.re.kr

기술에 대한 국산화 개발은 국내 대기업을 중심으로 활발하게 추진되고 있다.

그러나, 기계요소 구성부품의 최소 단위라고 할 수 있는 체결용 패스너류의 경우, 항공우주용 국내 소요가 미미하고 품질인증 요구조건 및 절차 등이 까다로워 산업용 패스너를 제작하는 국내 중소기업들이 국산화 개발을 적극 추진하지 않고 있는 실정이다.

따라서, 현재까지도 항공우주용 패스너류에 대한 국내 개발 실적이 거의 전무하여 NAS, MS, AN, DIN 및 LN 등과 같은 해외 항공우주 패스너 규격 부품을 전량 의존하여 사용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 다목적실용위성의 구조용 및 조립 체결용으로 주로 사용하고 있는 A286(Heat Resistance Steel) 소재의 소켓 헤드 캡 스크류에 대한 국산화 개발 과정과 품질 검증시험 결과를 간략하게 소개하고자 한다.

본 연구를 통하여 항공우주용 패스너 규격품에 대한 국산화 개발의 시발점으로 삼아 체결용 패스너류에 대한 국산화 개발을 지속적으로 추진한다면, 항공우주용 패스너 부품에 대한 해외 의존에서 탈피하여 해외구매로 인한 소요시간을 단축할 뿐 만 아니라 외화 절감을 기대할 수 있을 것으로 본다.

## 2. 위성용 스크류 국산화 개발

### 2.1. 국산화 개발 대상

다목적실용위성 프로그램에서 주로 사용되는 체결용 패스너는 A286(Heat Resistance Steel) 재질로서 직경 4~8mm의 소켓 헤드 캡 스크류를 사용하고 있으며 현재까지는 NAS1351[1] 및 NAS1352[2] 해외규격품을 선정 사용하고 있다.

따라서, 국내개발 진행 중인 위성 프로그램에

적용 가능하도록 국산화 대상 품목을 그림1과 같은 소켓 헤드 캡 스크류로 선정하고, 표1과 같이 인치 및 미터 계열 각 3종에 대한 국산화 공정 개발 및 품질 검증 시험을 추진하였다.

### Socket Head Cap Screws

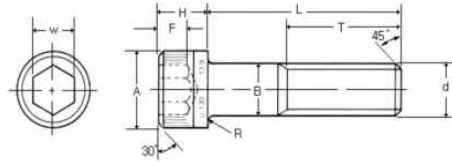


그림1. 소켓헤드 캡 스크류 형상

표 1. 소켓헤드 캡 스크류 국산화 개발 대상

구분	순번	직경	Thread Type	참고 규격
인치 계열	1	0.1640 inch	0.1640-32 UNRC-3A	NAS13 52
	2	3/16 inch	0.1900-32 UNRF-3A	NAS13 51
	3	1/4 inch	0.2500-28 UNRF-3A	
미터 계열	4	M4	Pitch 0.7mm	KS B 1003 [7]
	5	M5	Pitch 0.8mm	
	6	M6	Pitch 1.0mm	

### 2.2. 국산화 치구 및 공정 개발

위성용 스크류 국산화 개발 기준 규격으로 다음과 같이 선진우주기관(ESA 및 NASA) 관련 절차서, 미국방성 MIL 규격 및 국내 산업표준 KS 규격 등을 총 망라하여 참조하였으며, 해당 규격별 제조 공정 요구조건 및 품질검증 시험 기

준 등을 종합적으로 만족할 수 있도록 하였다.

- NAS 1351[1] "Screw, Cap, Socket-Head"
- NAS 1352[2] "Screw, Cap, Socket-Head"
- MIL-B-7838[3] "Bolt, Internal Wrenching, 160KSI FTU"
- FF-S-86E[4] "Screw, Cap, Socket-Head"
- ECSS-Q-70-46A[5] "Requirements for Manufacturing and Procurement of Threaded Fastener"
- NASA RP1228[6] "Fastener Design Manual"
- KS B 1003[7] 및 KS W 8168[8]

일반적으로 적용되는 소켓헤드 캡 스크류 제조공정 흐름을 그림 2에 나타내었다. 즉 스크류 원소재 선정 후 소재 용체화 열처리 상태에서 열간 또는 냉간 단조 공정을 거쳐 스크류 헤드 부위를 단조 성형하게 되고, 필요시 스크류 헤드 부위상에 핀 홀 및 소켓렌치 부위 정밀가공을 위한 부분적인 기계가공을 수행하게 된다.

이후에 열처리 및 열처리 스케일 제거 작업 공정을 거쳐 재료의 기계적 강도 특성을 증대시키며, 필요시 스크류 헤드와 생크 부위의 필렛 단조를 추가하게 된다.

항공우주 분야 패스너 부품으로 스크류 나사산 가공은 특별한 경우를 제외하고 기계가공방법으로 제작된 것은 사용할 수 없으며, 반드시 전조 가공(Rolling Process)을 통하여 나사산을 단조 성형하여 제작되어야 한다.

이후에 스크류 식별 표식 및 후처리 표면처리를 거쳐 최종 제품 가공을 완료하게 되며, 생산 Lot별 샘플 표본을 검출하여 완성품에 대한 품질 수락시험 및 인증 시험을 통하여 최종 완료하게 된다.



그림2. 소켓헤드 캡 스크류 제조 공정

먼저, 위성용 소켓헤드 캡 스크류의 국산화 개발 연구를 추진하기 위하여 국내 패스너 제작 관련 중소기업들의 생산 설비 능력을 실사 검증 한 후, 경기도 안산에 소재한 태진정공(주)을 국산화 개발업체로 선정하여 위성용 소켓헤드 캡 스크류 개발 과제를 2009년도에 수행하였다.

패스너 국산화 개발에 가장 중요한 요소는 A286 원소재의 특성을 고려하여 고품질의 헤드 포밍 및 전조 다이의 설계 및 제작 능력에 달려 있다. 그림3은 위성용 소켓헤드 캡 스크류 국산화 개발에 사용된 헤드 포밍 및 전조 다이 6종 세트(인치 계열 3종, 미터 계열 3종)를 보여주고 있다.

- Head Forming



- Rolling Die



그림3. 헤드포밍 및 전조 다이 국산화 개발

국산화 개발에 적용된 위성용 소켓헤드 캡 스크류의 단계별 주요 제조 공정을 소개하면 다음과 같다.

- 1) 원소재 선정 : 국산화 개발에 선정된 원소재는 AMS 5731[9]규격의 A286(Heat Resistance Steel) 와이어 소재로서 인장강도 110 ksi의 용체화 열처리(Solution Heat Treated) 상태로 해외 구매하여 사용하였다.
- 2) 헤드포밍 공정 : 선정된 와이어 원소재를 스크류 길이 요구조건에 따라 약 30.0mm 이내로 소재 절단한 후, 헤드 포밍 다이를 사용하여 다음 그림 4와 같이 3단계에 걸쳐 순차적으로 냉간 단조 공정을 수행하여 소켓헤드 스크류 머리부위를 가공 완료하였다.

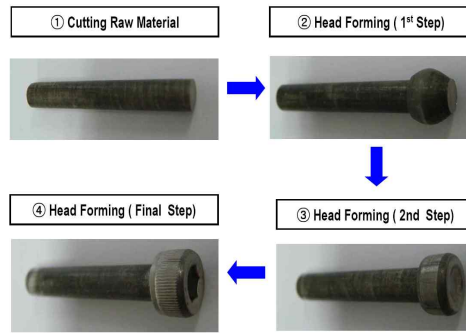


그림4. 헤드포밍 단조 성형 공정

또한, 스크류 헤드 포밍 공정시, 개발품의 고유 식별 표기를 위하여 그림 5와 같이 제조업체 및 항우연 표기를 양각 표시하였다.

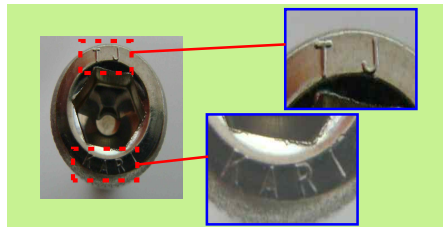


그림5. 국산화 스크류 헤드부위 식별 표기

- 3) 열처리 공정 : 스크류 헤드부위 냉간 단조 완료 후 소재의 경도 및 인장강도 등 기계적 강도 특성 요구조건(인장강도 최소 160 ksi 이상)을 만족시키기 위하여 진공로(Vacuum Furnace)에서 720℃ 16시간 동안 석출경화 열처리를 수행하였으며 이후 열처리 스케일(Scale)을 제거하기 위하여 화학연마 공정을 약 90초간 90~100℃를 조건으로 그림 6과 같이 수행하였다. 열처리 온도 및 시간은 최종완성품의 기계적 강도 요구조건 및 열처리 노의 종류에 따라 달라지는 것으로, 최적화된 열처리 조건을 반복적인 시편검증을 통하여 확인 하였다.



그림6 진공열처리 및 화학연마 공정

4) 전조가공 : 전조 가공 설비를 이용하여 전산(Full Thread) 형상의 위성용 소켓헤드 캡 스크류를 그림 7과 같이 제작하여 외형 가공을 완성하였다. 이때 스크류 나사산의 규격 및 등급 요구조건을 만족시키기 위하여 전조 다이에 의한 압착 깊이 등을 조절하여 가공하며, 생산된 나사산의 외형 검사를 Class 1 Go/No-Go 나사산 게이지를 사용하여 전수 검사를 수행하였다.



그림7 스크류 나사산 전조가공 공정

5) 표면처리 공정 및 최종품 완성 : 최종 공정으로 소켓 헤드 캡 스크류의 내부식성을 증가시키기 위하여 QQ-P-35[10] 및 KS W 1115[11] 규격요구조건에 따라 부동태 피막 처리를 완료하고 그림 8과 같은 형상의 소켓헤드 캡 스크류 최종 완성품을 국산화 제작 완료하였다.

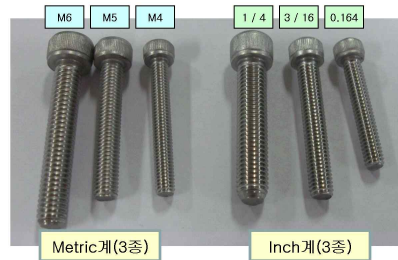


그림8. 국산화 개발 소켓 헤드 캡 스크류 6종

### 3. 국산화 개발 품질검증 시험

#### 3.1. 품질 검증 요구조건

국산화 제작된 소켓헤드 캡 스크류에 적용된 품질검증 요구조건은 비국산화 부품 NAS 1351 [1] 및 NAS1352[2] 소켓 헤드 캡 스크류와 동일하게 FF-S-86 [4]규격을 기준으로 하였으며, 일부 시험항목에 대해서는 MIL-B-7838 [3], ECSS-Q-70-46 [5] 및 KS W 8168 [8] 규격 내용을 선택적으로 추가하여 다음 표 2와 같이 정의하고 해당 품질 검증시험을 수행하였다.

표2. 소켓 헤드 캡 스크류 품질검증시험

시험항목		기준 규격
Dimensional	Visual Inspection	FF-S-86E para 3.7
	Thread	FF-S-86E para 3.5.4
	Dimension	FF-S-86E para 3.5.4
Mechanical	Surface Roughness	FF-S-86E para 3.4 or MLI-B-7838C para 3.5
	Tensile Test (or Wedge Tensile)	FF-S-86E para 4.3.1
	Shear Test	ECSS-Q-ST-70-46 para 6.4
	Hardness Test	FF-S-86E para 4.3.1.1
	Overtorque 파괴시험	토오크 전단 파손 시험
장탈착 Cycling 시험(50cycle)	50cycle 장탈착후, 나사산 마모를 검사	

	축력시험	규격토오크시 마찰계수 및 축력 확인 시험
	피로시험	65,000 Cycle
Metallurgical	Head Structure /Grain Flow (단면절단시험)	MIL-B-7838C para 4.5.7.2
NDI	RT	ECSS-Q-ST-70-46 para 4.2.4

또한, 국산화 제작된 소켓헤드 캡 스크류의 기계적 특성 및 품질을 비교 검증하기 위하여 위성용 부품으로 실제 사용되는 NAS1351[1] 및 NAS1352[2] 패스너를 동일 조건에서 비교시험을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

### 3.2. 품질 검증 시험 결과

#### 3.2.1 치수검사

가공 완료된 부품에 대한 외관검사 및 치수검사를 100% 전수 검사 수행하였으며 특히 나사산 가공부위에 대해서는 Class 1 등급 요구조건에 따라 Go/No-Go 나사산 게이지를 사용하여 나사산 가공 등급을 검증 확인하였다.

#### 3.2.2 인장강도 시험

다음 표3 및 그림 9는 국산화 품목 및 비국산화 품목에 대한 인장시험 비교시험 결과를 종합한 것이다.

비국산화 품목과 비교할 때, 인장강도가 상대적으로 약 5~10% 정도 낮은 결과값을 나타내고 있으나 FF-S-86[4] 규격에서 요구하는 최소인장강도 요구조건을 만족하고 있다. 또한 항복점이 후 파단까지 도달하는 연신 변위량이 비국산화품에 비하여 상대적으로 크게 나타나는 결과를 얻었다. 이는 소켓헤드 캡 스크류 단조 성형 후, 수행되는 진공로의 석출경화 열처리 조건을 변경하여 조절 가능한 편차로서 추후 열처리 온도 및 시간을 최적화하여 비국산화 품목의 인장강도 이상으로 조정 가능할 것으로 판단된다.

표3 인장시험 결과(국산화/비국산화품)

구분	직경	규격 요구조건 (KN)	인장시험결과(KN)	
			국산화품	비국산화품
인치 계열	0.1640"	Min 9.96	10.64	11.37
	3/16"	Min 14.22	14.77	15.93
	1/4"	Min 25.87	28.21	32.59
미터 계열	M 4	Min 8.56	10.01	12.29
	M 5	Min 15.23	16.21	18.40
	M 6	Min 22.68	23.58	24.40

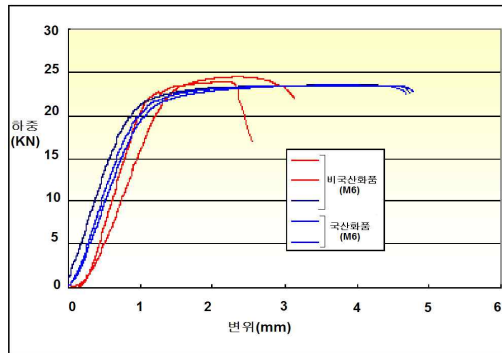


그림9. M6 인장시험결과(국산화/비국산화품)

#### 3.2.3 전단강도 시험

전단 강도시험은 FF-S-86[4]규격 시험 조건으로 정의 되어 있지 않으나, 비국산화 규격품과의 비교를 위하여 추가적으로 수행하였다. 그러나, 국산화 개발된 소켓헤드 캡 스크류의 경우, 전나사산형(Full Thread Type)이며, 비교시험 비국산화품은 생크를 가지는 반나사산형(Half Thread Type)으로 전단강도 결과값의 단순비교는 의미가 없으며 개략적인 참고결과로 비교하였다. 다음 표4는 이중전단 파손시험 결과를 종합한 것으로 생크부위를 가지는 비국산화품이 전단 면적이 상대적으로 크게 됨에 따라 전단시험 결과가 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

표 4 전단강도 시험 결과 비교

구분	직경	전단강도(kN)/Double Shear	
		국산화품	비국산화품
인치 계열	0.1640 inch	11.67	15.22
	3/16 inch	15.42	18.44
	1/4 inch	31.04	36.33
미터 계열	M4	10.23	16.03
	M5	18.14	23.93
	M6	26.00	35.06

### 3.2.4 경도시험

경도시험 결과 값은 소재의 열처리 조건에 따라 결정되는 것으로 스크류 나사산의 내마모성 여부를 판단할 수 있는 시험이다. 국산화품에 대한 시험결과 FF-S-86[4] 규격 요구 조건을 만족하는 범위에 있음을 확인하였으며, 내마모성 측면에서도 비국산화품에 비하여 상대적으로 균일한 품질 결과를 나타내었다.

표 5 경도 시험 결과 비교

구분	직경	Spec'	국산화품	비국산화품
인치 계열	0.1640 inch	HrC 33~42	HrC 41.5	HrC 41.8
	3/16 inch		HrC 42.0	HrC 39.4
	1/4 inch		HrC 40.9	HrC 43.5
미터 계열	M4		HrC 40.2	HrC 42.9
	M5		HrC 41.7	HrC 42.1
	M6		HrC 41.8	HrC 41.2

### 3.2.5 피로시험

피로시험 항목은 NAS1351[1] 및 NAS1352[2] 적용 규격인 FF-S-86[4]에서 요구하는 품질시험 요구조건에 해당되지 않으나 국산화 개발품에 대한 내구성 검증을 위하여 비국산화품과 비교 시험을 수행하였다. 피로시험 조건은 65,000 cycles(30~60Hz)를 목표 사이클 횟수로 정의하고 각 3개의 시편에 대하여 그림8과 같이 수행하였다. 표6은 피로시험 결과를 나타낸 것으로, 국산화 및 비국산화품 모두 약 40,000 cycles에서 피로 파괴

가 일부 발생하였으나, 내구성 측면에서 국산화 개발 스크류의 품질이 비국산화 품목에 상응하는 수준임을 확인할 수 있었다.



그림 8. 국산화 스크류 피로시험

표6 피로시험 수행 결과(국산화/비국산화품)

구분	직경	Fatigue (lb)		국산화품 Cycle 수	비국산화품 Cycle 수
		High	Low		
인치 계열	0.1640 "	993	93	65,000	45,306 (fail-2EA)
		1,453	145	58,064 (fail-2EA)	43,910 (fail-3EA)
	1/4"	2,710	271	40,272 (fail-2EA)	65,000
		미터 계열	M4	997	99
M5	1,634		163	48,500 (fail-3EA)	65,000
M6	2,303		230	65,000	65,000

주) 피로시험 요구조건 : 65,000Cycles 30~60Hz

### 3.2.6 기타시험 항목

이외에도, 국산화 개발된 소켓헤드 캡 스크류의 품질검증 시험항목으로 다음과 같은 시험을 수행하였으며, 그 결과 해외 비국산품에 동등한 품질성능을 확인하였다

- 1) 축력시험 : 축력시험기를 사용하여 규격 토

오크값에서 발생하는 축하중량 및 나사산 마찰계수를 비교하는 시험을 다음 그림9와 같이 수행하였으며 비국산화품과 유사한 결과를 확인하였다.

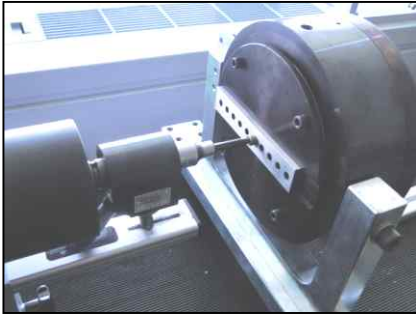


그림 9. 축력시험

- 2) 오버토크 파손시험 : 오버 토크(Over torque)에 의한 비틀림 파단강도를 확인하기 위하여 그림10과 같이 토크에 의한 비틀림 파손시험을 수행하였다. 비틀림 파손 토크값은 규정 토크의 약 2.5배로 국산화 및 비국산화품 모두 유사한 결과를 확인할 수 있었다.



그림 10. 오버토크 파손시험

- 3) 단면절단시험 : 스크류 헤드 부위 및 나사산 가공부위의 단조 및 전조 성형의 적합성을 검증하기 위하여 단면 절단검사를 그림 11과 같이 수행하고 단류선을 확인하는 비교 시험을 수행하였으며 내부 결함이 없음을 확인하였다.

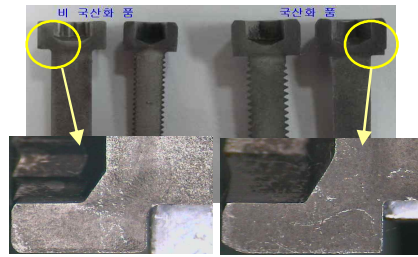


그림 11. 단면 절단 검사

- 4) 장탈착 사이클링 시험(50회) : 스크류와 자체 잠금식(Self-Locking Type) 너트와의 빈번한 장탈착을 수행하는 경우, 기계적인 접촉에 의하여 나사산 부위에 마모가 발생하게 된다. 국산화품과 비국산화품과의 나사산부위 내마모성을 검증하기 위하여 자체잠금식 너트와 장탈착 사이클링을 50회 반복 수행하였다. 장탈착 사이클링 시험 후, 국산화 부품과 해외규격품과의 나사산의 마모정도를 그림12와 같이 비교한 결과 국산화 부품이 더 우수한 내마모성을 보임을 확인할 수 있었다.

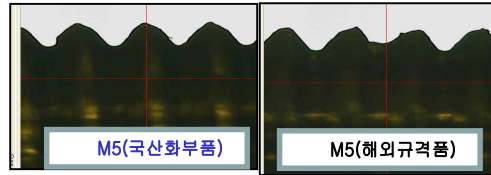


그림 12. 장탈착 사이클링 시험후 마모도 검사

- 5) NDI 검사 : 국산화 개발 소켓 헤드 캡 스크류의 내부 결함을 검사하는 방법으로 X-Ray 비파괴검사를 그림13과 같이 수행하고 내외부 Crack 손상 결함이 없음을 확인하였다.

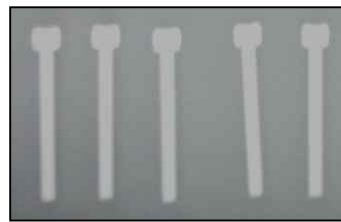


그림 13. X-Ray 검사



#### 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 항공우주용 패스너로 사용 가능한 A286 소재의 소켓헤드 캡 스크류에 대한 국산화 개발 내용과 품질보증시험 결과를 간략하게 소개하였다.

지금까지 국내 항공우주용 패스너류(볼트, 너트, 스크류 등)에 대한 국산화 개발 실적이 전무하여 국내 항공우주 소요 부품 대부분을 NAS, MS, AN, DIN 및 LN등과 같은 해외 규격 부품에 전량 의존하고 있는 실정이었다. 본 연구를 통하여 위성용 소켓헤드 캡 스크류의 국내 생산 기술능력을 검증하였으며 제작에 필요한 각종 다이를 개발함으로써 해외 규격품 NAS 1351[1] 및 NAS1352[2]에 상응하는 소켓 헤드 스크류의 국내 생산 가능성을 확인하였다.

그러나, 국산화 개발된 소켓헤드 캡 스크류의 경우 사용된 원소재(A286)의 종류, 열처리 조건에 따른 기계적 성질 변화 등이 최적화 되지 않아, 관련 FF-S-86[4] 규격요구조건을 만족하였으나 비국산화 해외 규격품에 비하여 기계적 강도 특성이 약 5~10% 낮게 나오는 것으로 확인되었다.

따라서, 위성용 소켓헤드 캡 스크류 국산화 개발 연구 결과를 수정 보완하고 생산공정을 개선하여 해외 규격품과 동등 이상 수준의 고품질 소켓헤드 캡 스크류 국산화 개발을 지속 추진할 예정이다.

-ufacturing and Procurement of Threaded Fastener ”

6. NASA RP1228 "Fastener Design Manual"
7. KS B 1003 "6각 구멍붙이 볼트"
8. KS W 8168 "항공우주-강도등급이 1100 MPa인 MJ 나사산, 내식 내열 합금강 볼트"
9. AMS 5731 "Steel, Corrosion and Heat Resistance Bars, Wire, Forgings, Tubing, and Rings"
10. QQ-P-35 "Passivation Treatment for Corrosion Resistance Steel"
11. KS W 1115 "항공 우주용 스테인리스강의 부동태화 처리"

#### 참 고 문 헌

1. NAS 1351 "Screw, Cap, Socket-Head"
2. NAS 1352 "Screw, Cap, Socket-Head"
3. MIL-B-7838 "Bolt, Internal Wrenching,160 KSI FTU"
4. FF-S-86E "Screw, Cap, Socket-Head"
5. ECSS-Q-70-46A "Requirements for Man