

고강도 볼트 카드늄 취성파괴 사례연구

윤용인[†] · 박찬욱* · 손경숙**

The Case Study of High Strength Bolt Cadmium Embrittlement Failure

Young In Yoon, Chan Wook Park, Kyung Suk Sohn

Key Words: Cadmium Embrittlement(카드늄 취성), Embritter(취성인자) Intergranular Cracking (입계균열), Secondary Cracking(2차 발생 균열)

Abstract

It happened a failure on special bolt which supported main landing gear actuator up-lock rod of 00 aircraft. Fracture was occurred at end of center drilled hole and thread machined on bolt. Metallographic, fractographic, and other characteristics of embrittlement analysis and experiments carried out on the failed bolt to find out the reason. Bolt surface was cadmium electroplated(EP) to give lubrication and provide excellent corrosion resistance. Resultly, Bolt was failed due to cadmium embrittlement occurred during baking treatment as well as center drilled hole. for the failure that are relevant to failure analysis and prevention. For their successful functional application, cadmium EP bolts require proper and adequate baking treatment after electroplating, and is complete with no center drilled hole

1. 서 론

^[1]고체금속취성은 모재와 취성을 일으키는 금속사이에 상호 용해도가 극히 낮거나 없으며 중간화합물을 형성하지 않을 때 발생한다.

† 책임저자, 회원, 공군사관학교 항공우주공학과
E-mail : yyoon10@gmail.com
TEL :

* 공군 항공기술연구소 시험분석실

** 공군 항공기술연구소 시험분석실

일반적으로 저용융점 금속이 인장응력 상태에서 모재와 접촉하고 있을 때 또는 모재의 내부에 개재물 형태의 미량원소가 존재하고 있을 때, 비정상적으로 낮은 응력에서 균열이 생성되어 취성을 발생시킨다. 취성의 발생은 온도와 밀접한 관계가 있으며 취성원소가 용융점 이하의 고체에서 발생하는 경우를 의미한다. 고체금속취성의 발생 기구^[2]는 크게 4가지로 구분되며, 첫째로 모재와 취성원소가 완전한 밀착상태로 있어야 하며, 둘째로 인장응력이 작용해야하며, 셋째로 취성원소가 밀착된 상태에서 입계면과 같은 곳을 통하여 균열이 형성되어야 하며, 마지막으로

성장하는 균열의 선단에 취성원소가 존재해야 한다. 아울러 고체금속취성은 모재 내에 취성원소가 존재하는 경우에도 발생되는데, Cd 도금시 침투한 수소를 제거하기 일정시간 열을 가하는 과정에서 Cd 확산에 의해 재료내부에 Cd이 침투될 때 존재하는 것으로 D6ac 강의 노치 인장시험결과 121°C에서 Cd확산에 의한 취성이 발생하는 것으로 보고되었다^[3]. 이는 취성인자인 Cd의 용융점이 321°C라는 점에서 용융점 이하에서도 고체금속취성이 발생될 수 있음을 보여주고 있다. 취성이 발생된 Bolt 표면에 대한 Cd 도금시 발생된 수소를 제거하기 위해 Baking 온도 및 시간은 190°C -210°C에서 24시간 이상이 적용되었다.

따라서 본문에서는 수소취성을 제거하기 위해 Baking 공정중 발생될 수 있는 Cd 취성인자의 재료내부 침투확산으로 균열을 생성 및 진행시켜 입계균열을 초래^[4,5]한 현상을 제시하고, 아울러 Baking 공정 중 수소 잔류로 인하여 발생될 수 있는 수소취성 파단가능성에 대한 시험이 동일재료 및 공정을 통해 수행되었다.

2. 본 론

파단결함이 발생된 볼트는 카드뮴 도금된 Ni-Si-Cr-Mo-V 계열BSI(British Standards Institution)S 155 합금이 사용되었으며, 인장강도는 1900Mpa이상으로 고강도 특수볼트에 속한다. Table 1과 같이 일반적인 고강도 강과 비교시 규소(Si)가 상대적으로 많이 함유됨에 따라 강도는 우수하나 상대적으로 취성에 민감할 수 있다. 특히 고강도강 내부에 취성인자가 침투되었을 때 결정립계면에서 결합력감소 및 응력강도를 가속화 시킬 수 있다. 결함이 발생된 볼트는 Main Landing을 Up-Down 하기위해 작용하는 Actuator Up-lock rod를 지지해 주는 역할을 하며 장착 위치는 Fig 1 과 같다. 볼트는 아래 우측에서와 같이 좌우 각 한 개의 Nut에 의해 고정되며 결함은 Fig 2와 같이 우측부 Nut가 장착되는 나사산 끝단부위에서 발생되었다. 볼트에 가해지는 하중은 Actuator 작동시 나사산 부위에 전단력과 Nut 체결을 위해 75-85lb·in의 Torque가 가해진다. 볼트의 장착은 항공기가 도입된 이

후 평균 10년이 경과하였으며, 운영시간은 평균 1000 flight hours 이다.

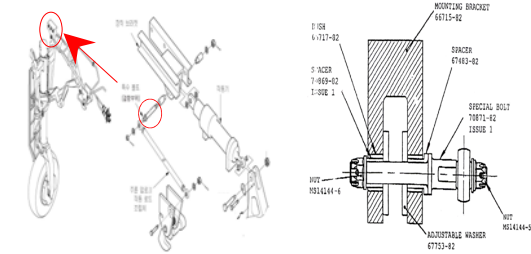


Fig. 1 Bolt installation position and IPB(Illustrated Parts Breakdown)



Fig. 2 Bolt failure comparison

1. 분석

1.1. 재질분석 및 기계적 특성(Table 1 참조)

특수 볼트에 대한 성분 분석 결과 고강도 (HighStrength Steel)강의 Ni-Si-Cr-Mo-V 계열 BSI S 155 합금의 영국표준규격 Steel로써 동등한 기계적 특성 및 Cd 도금 상태가 관찰 되었다.

* BSI : British Standards Institution

Table 1 Mechanical property and chemical component

품명	기계적 특성		방식처리
	인장강도	경도	
특수 Bolt	275~305 ksi	52~55 HRc	Cd 도금

구분	화 학 성 분 (%)					
	C	Si	Mn	S	P	Ni
SPEC (S 155)	0.39 ~ 0.44	1.50 ~ 1.80	0.60 ~ 0.90	0.015 ~ 이하	0.015 ~ 이하	1.65 ~ 2.00
	Cr	Mo	Cu	V	Fe-	
	0.70 ~ 0.95	0.30 ~ 0.45	-	0.05 ~ 0.10	나머지	
특수 Bolt	C	Si	Mn	S	P	Ni
	0.42 ~ 0.68	1.37 ~ 0.37	0.69 ~ 0.15	- ~ 0.06	0.008 ~ 0.06	1.78 ~ 나머지
	Cr	Mo	Cu	V	Fe	

1.2 미세조직

취성 인자(Embrittler)이외에 고체금속취성에 영향을 미칠 수 있는 금속학적 요인중의 하나인 결정립계의 크기 및 석출 및 고용경화를 분석하기 위해 원소재 및 Cd도금된 결함발생 볼트에 대한 미세조직을 비교분석한 결과 Fig 3과 같이 동일한 미세조직 상태가 관찰되었다.

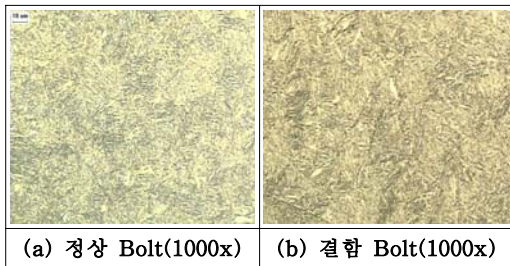


Fig. 3 Microstructure, (a) Non-failure bolt, (b) failure bolt

1.3 파단면 관찰

1.3.1 거시적 관찰

볼트 파단은 Fig 4와 같이 중앙홀 가공부위 끝단에서 발생되었으며, 파단된 3개의 볼트파단면에 대한 육안관찰결과 2개의 볼트는 볼트홀 주변부에서, 나머지 1개는 나사산 주변에서 산화부위가 발견됨에 따라 균열은 산화부위가 관찰된 위치에서 시작되어 파단된 것으로 판단되었다.



Fig. 4 Shape of rupture surface(16x, Optical microscope)

1.3.2 미시적 관찰

Hitachi Fe-SEM 주사전자현미경을 사용하여 Fracture mode를 관찰하였으며, 전 파단면에서 입자경계면을 따라 파단된 취성파괴의 전형적인 유형인 Intergranular cracking(입계균열)이 Fig 5과 같이 확인되었다.

부가적으로 secondary cracking도 관찰되었는데 이는 볼트 파단시 작용된 하중의 영향으로 발생하는 일반적인 현상이나, 본 결함은 파단특성상 취성파단과 관련하여 발생된 것으로 판단된다.

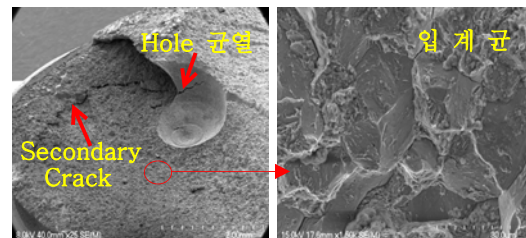


Fig. 5 Rupture surface(Intergranular cracking)

입계균열발생을 유발시킨 원인을 규명하기 위해 파단면에 존재하는 취성원소인 카드뮴(Cd)분포 여부를 분석하기 위해 FE-SEM과 EDX(Energy dispersive X-ray : 에너지 분광분석) 장비를 사용하여 Fig 4의 균열이 시작된 볼트내부 산화된 부위에 대한 관찰결과 Cd Film층과 개재물이 다량으로 존재하였으며, Film층 존재부위인 "B"에 대한 성분분석결과 Fig 6과 같이 Cd(카드뮴)성분이 검출되었으나, 산화되지 않은 다른 부위인"B"에서는 Cd이 검출되지 않거나 소량만이 검출되었다.

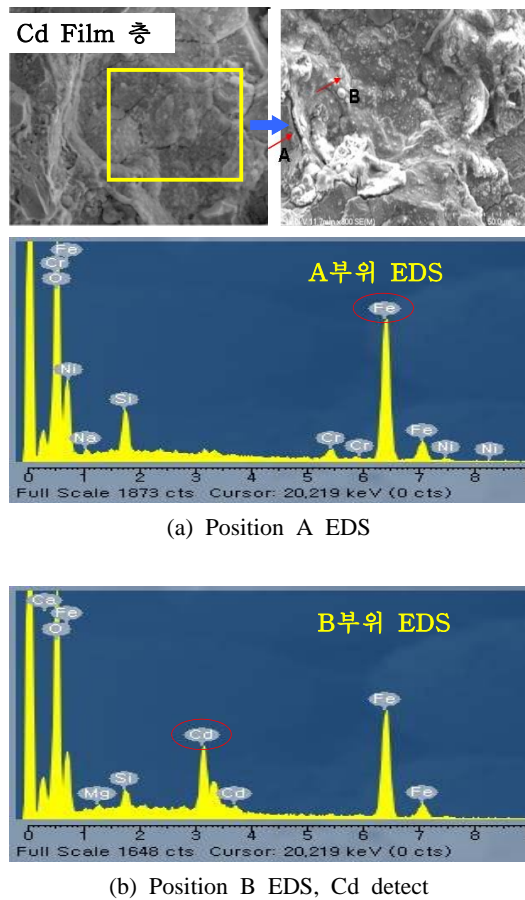
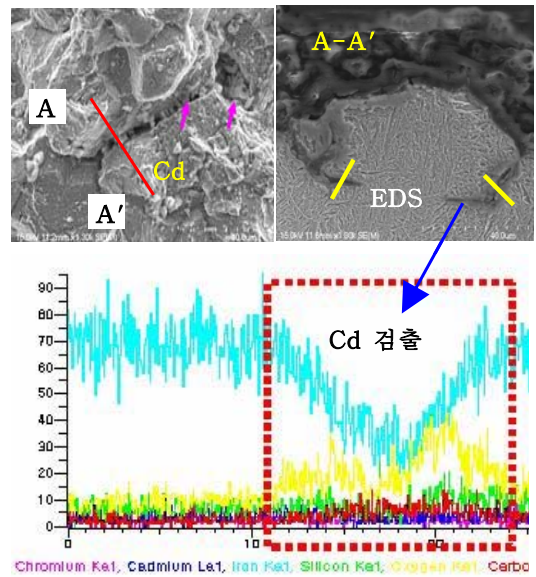
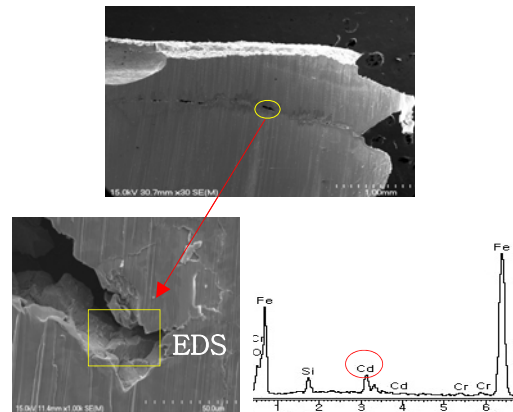


Fig. 6 Rupture surface EDS analysis

파단면의 2차 균열(secondary crack)내부에서도 Cd성분이 Fig 7(a)과 같이 검출되었는데 이는 2차 균열발생도 취성원자인 Cd에 의해 발생한 것으로 판단되었다.



(a) Secondary cracking EDS(Cd detect)



(b) Subsurface crack EDS(Cd detect)

Fig. 7 Rupture surface secondary cracking and subsurface crack EDS analysis

파단면에서 Cd 분포정도를 분석하기 위해 BSE(Back Scattered Electron) 및 X-ray Mapping법을 사용하여 Cd 분포상태를 확인한 결과 1~2 μm 크기의 Cd 산화물이 Fig 8과 같이 파단면 입계 주변에 산재되어 있음이 확인되었다.

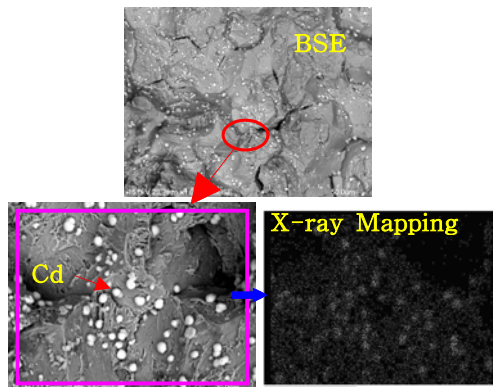


Fig. 8 Distribution of cd on rupture surface(BSE and X-ray Mapping image)

결정립계 파단은 취성파괴시 관찰되는 형태로 운용환경 및 제작공정에서 발생 가능한 Failure mode는 응력부식, 수소취성, Cd 모재확산에 의한 금속유기취성을 고려할 수 있으나, 균열시작점 및 표면 오염부위에서 부식인자가 검출되지 않았으며, 파단면 부근 종단면 관찰결과 Fig 9와 같이 균열발생 주변에 일반적으로 잔가지(Blanching)를 형성하며 진행되는 응력부식균열 양상은 관찰되지 않아 발생가능요인에서 제외되었다. 다만 수소 취성시 발생하는 균열양상과 유사한 형태가 볼트 균열주변에서 관찰됨에 따라 수소취성에 의한 파단 유발가능성이 추가로 검토되었다.

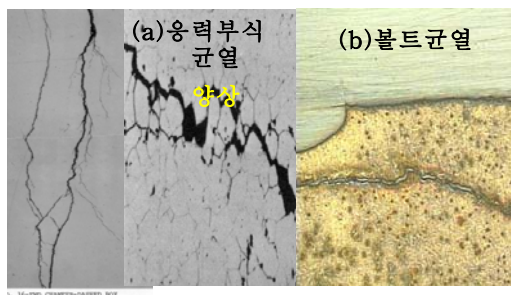


Fig. 9 Crack growth pattern comparison, (a) SCC(Stress Corrosion Cracking), (b) Bolt crack

1.4 수소취성 파괴 유발요인 분석

수소취성은 주로 제조공정(Cd 도금, 열처리 공정)중 모재에 혼입된 수소에 의해 재료의 연성이 감소하면서 시간이 경과함에 따라 팽창하여 취성파괴를 일으키는 것으로 이를 방지하기 위해 Cd 도금후 적절한 Baking 공정을 통하여 모재에 혼입된 수소를 제거해야한다. 수소취성에 의한 영향 판단은 일반적으로 모재의 잔류수소 함량으로 판단하며, 동일한 공정을 적용한 시편을 제작하여 잔류 수소함량에 대한 수소취성 발생여부에 대한 시험을 수행하였다. Table 2는 ASTM-F-519에 따라 노치를 부과한 시편에 대한 인장시험결과로 Sustain Load를 200시간 가한 결과 파단이 발생되지 않았으며, Table 3은 시험시편에 대한 수소 잔류함량을 측정할 수치로 파단볼트에서 측정된 수소잔류함량이 0.4ppm으로 수소취성을 발생시키기에 는 극히 미량으로 볼트 파단을 일으킨 근본적인 원인은 아닌 것으로 확인되었다.

Table 2 Hydrogen embrittlement test results(ASTM-F-519), Notch specimen

구분	수량	시험 시간	결과
파단발생 볼트	4개	200 Hr.	No fracture
			No fracture
			No fracture
			No fracture
정상볼트	4개		No fracture
			No fracture
			No fracture
			No fracture
시험하중조건		F = 4,524 kgf = 44.34KN	

(출처 : (주) WIA 재료시험실)

Table 3 Hydrogen content analysis

시험수행기관	수량	분석 결과 (단위 : ppm)		
		총수소	잔류수소	
WIA 시험결과 (총수소 함량 분석)	파단	1	7.06	-
	볼트	1	4.75	-
	정상	1	10.05	-
	볼트	1	9.95	-
	원소재 상태	1	1.05	-
FHL 시험결과 (잔류수소 함량 분석)	파단 볼트	1		0.4

(출처 : (주)WIA, 원제작사 (FHL))

2. 분석 종합

파단된 볼트 전 파단면에서 관찰된 Failure Mode는 입계파괴(Intergranular fracture) 형상으로 응력부식균열, 수소취성, 금속유기취성(액체금속취성, 고체금속취성)발생시 전형적으로 나타나는 파단양상이며, 볼트파단을 일으킨 근본적인 원인은 Cd(카드뮴)공정 또는 공정후 재료내부에 침투된 수소를 제거하는 Baking 과정에서 Cd이 재료내부로 침투하여 재료내부에 취성을 증가시켜 발생한 금속유기취성에 의한 결합이다. In-service중 발생할 수 있는 응력부식 결합가능성은 부식인자가 미관찰 되었으며 특히 균열발생주변에서 관찰된 파단양상이 응력부식시 sustain load에 의해 입계면을 따라 균열이 성장할 때 발생하는 가지모양 파단양상이 관찰되지 않음에 따라 직접적인 관계는 없으며, 수소취성의 영향시험 평가를 위해 수행된 파단볼트 및 정상볼트에서 시편 가공된 8개의 Notch 인장시험 결과 파단이 발생되지 않았으며, 수소취성을 유발시킬 수 있는 총 수소 확산량 및 수소 잔류함량이 공정중에서 미량만 발생됨에 따라 볼트파단을 일으킬 수 있는 직접적인 원인으로 작용하지 않았다.

따라서 볼트 파단으로 판단되는 금속유기취성 중 고체금속취성을 유발시키는 요건으로 Cd도금으로 모재와 취성원소가 밀착되어 있으며, 재질 인장특성에 비해 작지만 볼트에 체결시 torque가

가해져 지속적인 인장하중이 작용된 상태이며, 균열은 입계면을 따라 형성되었고, 성장하는 균열선단에서 취성원소가 관찰됨에 따라 볼트파단은 고체금속취성이 직접적인 요인으로 작용한 것으로 보인다.

3. 결론 및 고찰

KT-1 주륜 장착 특수 볼트는 Cd에 의한 고체금속취성으로 파단되었다. 파단된 볼트 전반에서 형상기계가공을 용이하게 하기위해 볼트 길이방향 단면 중앙에 가공된 홀 끝단에서 시작되었으며, 파면전반에 걸쳐 취성과파괴시 관찰되는 입계파괴(Intergranular fracture) 양상이 관찰되었다. 입계파괴의 원인은 볼트 표면 Cd도금 및 도금 후 수소취성을 방지하기 위한 Baking 공정중에 Cd이 확산되어 재료내부로 침투하여 취성인자로 작용하여 입계간의 인장응력을 감소시킴으로써 취성과파괴를 유발시킨 것으로 Cd 확산은 Hole 끝단 가공시 거친 기계가공선에서 심화됨에 따라 볼트 제작시 중앙 홀가공 공정삭제 및 카드뮴도금 공정개선을 제시되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김영섭, “금속재료의 고체금속유기취성에 관한 고찰”, RIST 연구논문, 제17권, 제 1호, pp.112, 2003.
- [2] M.H. Kamdar, "ASM HANDBOOK", Vol.13 Corrosion, pp. 171-189, 1996.
- [3] D.N.Fager and W.F.Spurr, "Corrosion", Vol.27(1971)
- [4] S.P.Lynch, "Acta Metall", V.29, pp.2639, 1981
- [5] S.P.Lynch, "Grain Boundary Chemistry and Integranular Fracture", S.Bruegger and G.Was eds., 1990