

다크로 방식 처리된 볼트의 특성 평가

양치훈, 고정, 김대용

대우중합기계(주) 신뢰성평가센터

Characterization of Dacrotized Bolts

ChiHoon Yang, Jeong Ko, DaeYong Kim

Center for Product Reliability, Daewoo Heavy Industries & Machinery LTD.

Abstract

To enhance the corrosion resistance of a bolt by surface treatment, dacrotization was considered as a substitute for phosphate coating which is widely used for general applications. In this study, comparisons were made among 5 different kinds of surface treatments including dacrotization and phosphate coating with respect to corrosion resistance, adhesion property with painting, and preload when tightened. The result shows that the dacrotized and surface-stabilized bolt is much superior in every aspects studied herein to others. An excellent corrosion resistance and a fairly good adhesion property with painting were achieved in the dacrotized and surface-stabilized bolt. When tightened at the same torque, the amount of preload and its deviation of dacrotized and surface-stabilized bolt were comparable with those of phosphate coated bolt.

1. 서론

당사 제품을 비롯한 거의 모든 기계류는 체결을 위한 요소 부품으로 볼트를 사용하며, 특정 용도를 제외한 대부분의 경우에 강재 볼트를 사용하고 있다. 강재 볼트는 강도가 우수하며 가격이 저렴한 반면, 외기에 노출된 부위에서는 부식이 발생한다. 부식 피로, 수소 취성 등을 포함한 부식 현상이 발생할 경우 볼트의 강도 및 수명 저하로 인하여 체결력의 감소나

상실, 파단 등이 발생할 수 있어 전체 구조물의 안전에 지대한 영향을 미친다. 또한 외부에 노출된 부위의 경우 볼트의 발청으로 인하여 심미적인 측면의 제품 가치 하락을 초래할 수 있다. 따라서 외부에 노출된 부위에 사용되는 볼트는 방식 처리가 불가피하다. 특히 볼트에 있어서는 우수한 내식성 외에, 추가적으로 체결시의 마찰로 인한 피막층의 손상을 최소화시킬 수 있는 우수한 피막강도, 치수 변화로 인한 체결 특성의 저하를 방지할 수 있는 얇은 피막층 두께 등을 고려하여야 한다. 또한 경제적 측면에서는 소형, 다량의 볼트를 동시에 균일하게 처리할 수 있는 공정이어야 한다.

이러한 측면에서 인산염 피막 처리가 볼트(특히 대형 볼트)의 방식 처리법으로 널리 사용된다. 인산염 피막 처리는 액상의 인산-비철금속(아연 또는 망간) 또는 철계 피막제를 침적, 스프레이 등 방법으로 소재 표면에 도포하고 적당한 처리 온도를 유지하여 유리인산과 소재를 반응시켜 전기 부도체인 방청 피막을 생성시키는 방법으로, 내식성이 양호하며 전기 도금에 비하여 가공법이 간단하며 복잡한 형상도 균일하게 다량 처리할 수 있다. 또한 피막 두께가 얇아(공정 조건에 따라 다르나 수~십 수 μm) 처리 전후의 치수 변화가 거의 없고 내마모성도 양호하여 볼트의 방청용으로 우수한 특성을 보인다. 그러나 외력에 의하여 피막이 손상되기 쉬우며 장기적인 방청성이 충분하지 않다. 실제 굴삭기 등 당사 제품 외부에 체결된 인산염 처리 볼트의 경우 특히 해안가 등 부식성 분위기에서 사용시간의 증대에 따라 심하게 발청됨이 확인되었다. 따라서 보다 개선된 방청성을 지닌 볼트의 적용 필요성이 제기되었으며, 이에 다크로 처리 볼트를 검토하게 되었다.

다크로 처리는 크롬산 수용액에 미세한 아연분말을 현탁시킨 액상 재료를 금속표면에 도포, 정밀한 박막(6~10 μm)을 형성시킨 후 열처리(300 $^{\circ}\text{C}$)하여 방청 피막을 생성시키는 도금 기술로, 3가 크롬 중합체 내에 아연 입자가 적층된 피막 구조에 의하여 피막 전체의 아연이 희생되는 속도를 크롬으로 억제, 조절함으로써 전기 아연 도금에 비하여 10배 정도로 우수한 방청 능력을 나타내며 아연도금과는 달리 공정 산을 사용하지 않아 수소 발생이 일어나지 않기 때문에 탈수소 열처리를 하지 않은 경우에도 소재의 수소 취성을 막을 수 있다. 또한 통상 피막 형성을 위하여 330 $^{\circ}\text{C}$ 에서 40분간 가열하는 등의 처리를 거치기 때문에 볼트, 너트의 템퍼링 온도가 350 $^{\circ}\text{C}$ 이상인 경우에는 강도를 저하시키지 않는다. 또한 피막 내부까지 크롬이 존재하여 피막 손상시에도 아연의 자기 희생 작용을 억제, 조절하여 우수한 방청성을 유지하며 침지에 의한 코팅으로 복잡한 형상의 틈새나 파이프 내면 등에도 균일한 피막을 얻을 수 있다. 이렇게 우수한 특성을 갖는 반면 가격이 상대적으로 고가이기 때문에 사용 범위에 제한이 될 수 있으며 또한 표면 상태의 변화로 인하여 기존 조임 토오크 등 공정 조건을 그대로 적용할 경우 체결력 등 특성이 변화할 수 있다.

이에 본 센터에서는 인산염 처리된 볼트와 다크로 처리된 볼트를 대상으로 내식성 및 체결 특성을 비교하여 다크로 처리 볼트의 적용 타당성을 검토하고, 다크로 처리 볼트에 적용할 적절한 체결 조건을 제시하고자 시험 평가를 수행하였다.

2. 실험방법

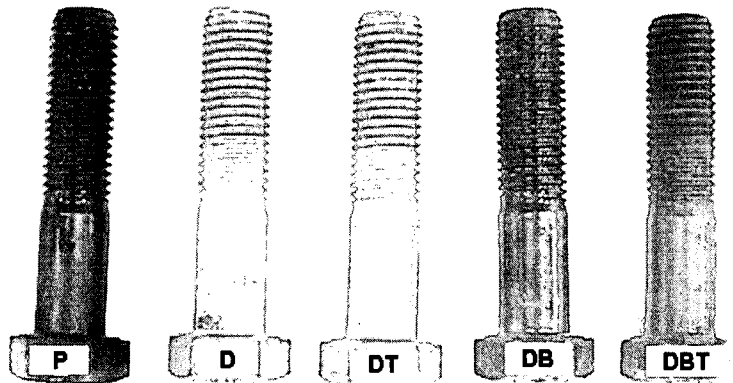
본 시험에서는 다음의 5가지 표면 처리된 M16 볼트를 대상으로 기본 물성, 피막 특성 및 내식성, 체결 특성을 평가하였다.

- ① 인산염 피막 처리 (이하 **P**로 표기)
- ② 다크로 처리 (이하 **D**로 표기)
- ③ 다크로 + 토오크 안정화 처리 (이하 **DT**로 표기)
- ④ 다크로 + 흑색 피막 처리 (이하 **DB**로 표기)
- ⑤ 다크로 + 흑색 피막 처리 + 토오크 안정화 처리 (이하 **DBT**로 표기)

표 1은 시험 대상인 M16 볼트(S220LC-V기종 굴삭기 Sprocket 취부용 볼트)의 치수 및 기본적 강도 자료를, 그림 1은 표면 처리별 볼트 외관을 나타내었다. 이중 토오크 안정화 처리는 다크로 처리 볼트에서 증가된다고 알려져 있는 축력 산포를 억제하기 위하여 왁스(Wax)가 주성분인 약품을 표면에 도포하여 마찰계수 변동폭을 줄이는 처리이며, 흑색 피막 처리는 내식성을 추가 향상시키는 동시에 외관상의 고려로 밝은 회색인 다크로 피막의 색상을 기존 인산염 처리 볼트와 유사한 회흑색으로 만들기 위하여 적용한 처리이다. 이상 5가지 표면 처리된 볼트에 대하여 다음과 같은 평가를 수행하였다.

<표 1> 평가 대상 볼트의 치수 및 강도 자료

호칭 지름	피치 (mm)	길이 (mm)	조임 토오크 (현적용값) (kgf·m)	설계기준 축력 (kgf)	최소항복축력 (VDI 2230) (kgf)	보증하중 (KS B0233) (kgf)	최소인장하중 (KS B0233) (kgf)
M16 (보통나사)	2.0	70	30	11,500	15,102	13,265	16,633



<그림 1> 시험 대상 볼트의 외관

A. 기초 물성 및 치수 측정

- ① 조직, 경도 측정
- ② 표면 거칠기, 형상 변화 측정
 - 나사산, 골간거리, 나사산 각도 등 체결 특성에 영향을 주는 주요 치수를 측정함.

B. 도막 부착력 및 내식성 평가

- ① 도막 부착력 평가
 - 볼트에 굴삭기용 도장을 행하여 초기 부착력 및 내구 부착력을 평가함.

② 내식성 평가

- 염수 분무 시험을 총 1,000시간 실시(240시간 간격 부식 정도 평가)한 후 최종 부착력을 평가함.

C. 체결 특성 평가

총 5가지로 표면 처리된 볼트에 대하여 선일기계(주)가 보유한 볼트 시험 전용기(대경 Tech. & Tester Co. Ltd 제작)로 토오크를 가하여 축력-토오크 관계를 구하고 이때의 토오크 계수를 측정·비교하였다. 표 1에 보인 바와 같이 다크로 처리 볼트로 교체를 고려하는 부위의 M16 볼트 조임 토오크는 30 kgf·m이며, 본 시험의 경우 이보다 10% 높은 33 kgf·m까지 일정 회전 속도로 토오크를 증가시켜 토오크-축력 및 회전각-축력을 측정하였다. 각 표면 처리별 시험 개수는 최소 5개 이상이다.

볼트 체결시 조임 토오크(T)와 볼트에 발생하는 축력(F)은 다음의 관계를 따른다.

$$T = KFd, \quad K: \text{토오크 계수}, d: \text{볼트 호칭 지름} \quad (1)$$

즉, 탄성역 범위 내에서는 토오크 계수가 상수로, 따라서 축력과 조임 토오크는 선형적 비례 관계를 갖는다.

볼트 체결시 동일 조임 토오크를 가한 경우에도 볼트에 발생하는 축력은 토오크 계수에 의하여 달라지며, 토오크 계수는 자리면 및 나사면의 마찰계수에 의하여 결정된다. 따라서 표면 처리가 상이한 본 시험 대상의 경우 기타 조건을 동일하게 적용, 비교하기 위하여 자리면 와셔 및 압나사부의 재질, 조도 및 경도를 동일하게 유지하였다. 와셔 및 압나사의 재질은 SM45C로, 와셔는 시험기 지그에 맞춰 34x34 mm²의 정사각형 단면 형태로 열처리를 통하여 경도를 볼트 경도보다 다소 높은 HRC 36~40 수준으로 제작하였으며 다수를 제작하여 시험마다 교체(압나사부: 진수 교체) 또는 연마(와셔: 교체 및 연마)를 통하여 표면 조도 등 조건을 동일하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기초 물성 및 치수 측정 결과

표 2에 표면 처리별 볼트의 경도, 피막 두께 및 표면 거칠기를 나타내었다. 측정 결과, 표면 및 내부 경도는 표면 처리별로 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 다만 체결 특성에 영향을 미칠 수 있는 나사면 상의 피막 두께는 특히 흑색 피막 처리 볼트(DB, DBT)에서 다른 볼트에 비하여 약 2~3 μm 가량 두껍게 나타났다. 표면 거칠기의 경우는 반대로 흑색 피막 처리 제품이 다른 제품의 1/2~2/3 수준으로 낮게 나타났다.

표 3에는 표면 처리별 볼트 나사산의 형상 변화를 비교하였다(M24-가는나사 볼트의 경우). 평가 결과 흑색 피막 처리 볼트(DB, DBT)의 경우 일부에서 처리액이 나사골에 다량 잔존하여 나사산의 각도가 기준에 비하여 부족한 것으로 나타났다. 이러한 나사골에 잔존한 처리액의 흔적은 M16 보통나사 볼트에서도 육안으로 확인 가능하며, 조립성 및 체결 특성에

영향을 미칠 정도인 것으로 추정되었다. 한편 흑색 피막 처리 볼트의 경우 나사산과 나사골간 거리도 다른 볼트에 비하여 다소 차이를 보이는데, 이는 흑색 피막 처리 볼트에서의 상대적으로 두꺼운 피막 두께(표 2) 및 나사골부의 처리액 잔존 등에 따른 결과로 판단된다.

<표 2> 표면 처리별 기초 물성 평가 결과

표면처리		P	D	DT	DB	DBT
측정항목						
표면 경도(HRC)		35.8	36.6	35.3	36.5	35.8
내부 경도(HRC)		35.0	36.0	36.3	35.6	35.2
피막두께 (μm)	머리부	11.4	4.9	7.9	9.3	7.5
	나사부	6.5	5.6	5.4	8.3	8.2
표면거칠기 R_{max} (μm)	원통부	11.8	11.3	10.8	5.3	7.2
	자리면	13.9	10.6	11.3	7.2	5.8

<표 3> 볼트 주요 형상 측정 결과 (M24 가는 나사 볼트)

표면처리		기준	P	D	DT	DB	DBT
측정항목							
나사산 각도		60°	59° 02'	59° 30'	59° 09'	56° 26'	58° 58'
나사산간 거리 (mm)		2.000	2.003	2.002	2.003	1.989	2.002
나사골간 거리 (mm)		2.000	2.003	2.003	2.003	1.996	1.996

3.2 도막 부착력 및 내식성 평가 결과

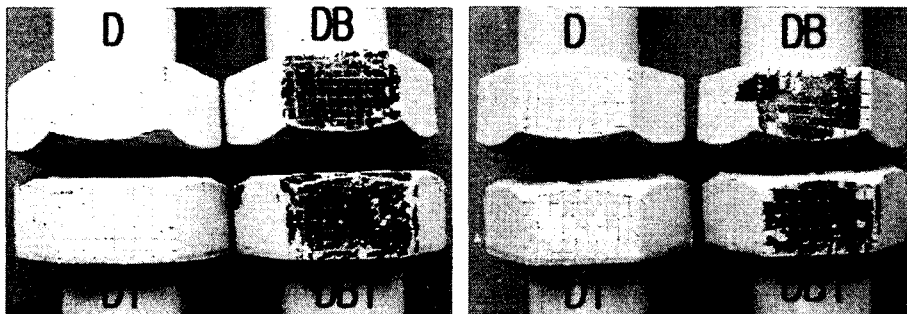
다크로 처리 볼트로 교체하고자 하는 부위는 주로 외부로 노출되어 부식 분위기와 접하고 있다. 이러한 부위는 볼트 외에도 굴삭기 외면 등 제품 자체의 부식 방지를 위하여 도장을 행하며, 따라서 볼트에도 도장이 이루어지는 경우가 많다. 만약 시간 경과에 따라 볼트에 부착된 도막이 이탈될 경우 볼트 주변 소재의 부식을 초래할 뿐만 아니라 미관상으로도 커다란 악영향을 미친다. 따라서 도막과의 부착력, 부착 내구성도 볼트 선정에 주요한 변수이다. 본 시험에서는 양산 공정과 유사하게 세척액으로 볼트를 세척한 후 하도와 상도 도장을 행하고 이를 240시간 동안 염수 분무 시험하였으며 평가 결과는 표 4에, 최종 형상은 그림 2에 나타내었다. 평가 결과 다크로 처리 볼트(D)가 가장 우수한 특성을 보였으며, 다크로에 토오크 안정화 처리를 추가한 경우(DT) 상도 내구 부착력이 다소 저하하였다. 이는 토오크 안정화제의 주성분인 왁스의 영향으로 판단된다. 한편 기존의 인산염 피막 처리(P) 제품은 초기에 상도가 일부 박리되었으며, 이는 표면에 도포되었던 Oil의 영향으로 판단된다. 참고로, 인산염 피막 처리 볼트(P)는 장시간 방치할 경우 발청이 될 수 있어 제조 직후 방청유 도포 상태에서 공급된다. 한편 흑색 피막 처리 볼트(DB, DBT)의 경우 도막의 초기 부착 상태는 양호하나, 시험시간의 경과에 따라 상, 하도 모두 도막이 분리되어 부착 내구성이 크게 부족한 것으로 나타났다.

<표 4> 도막 부착력 평가 결과

○: 박리 없음, △: 일부 박리, ×: 전면 박리

표면 처리	초기 부착력		내구 부착력	
	하도	상도	하도	상도
P	-	△	-	△
D	○	○	○	○
DT	○	○	○	△
DB	○	△	×	×
DBT	○	△	×	×

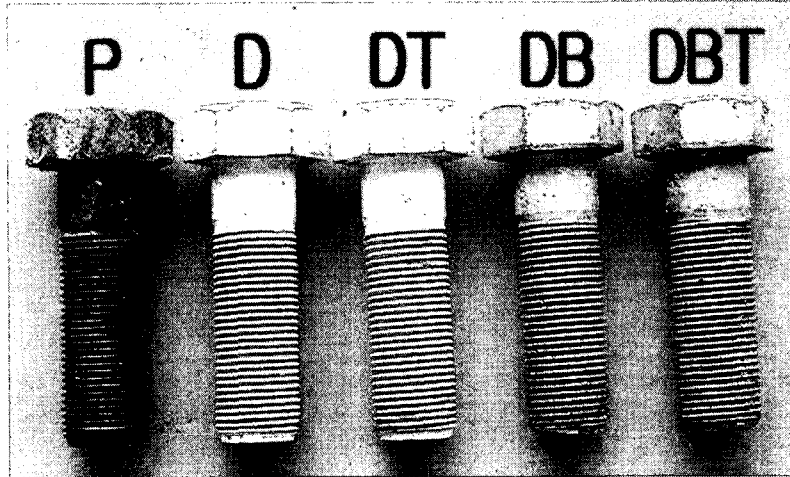
다음으로, 내식성 평가를 위하여 총 1,000시간 염수 분무 시험한 결과를 그림 3에 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이, 인산염 피막 처리한 볼트는 240시간 경과시 적청이 확인되었으며 1,000시간 후에는 전면적으로 부식이 진행되어 있었다. 반면 다크로 처리 볼트(D 및 DT)의 경우는 나사부에 일부 부식이 진행된 것을 제외하고는 부식이 진행되지 않았다. 일반적으로 모서리부는 염수 분무 평가에서 제외하므로 다크로 처리 볼트(D 및 DT)의 내식성은 양호한 것으로 판정할 수 있다. 그러나 다크로 처리에 흑색 피막 처리를 더한 볼트(DB 및 DBT)는 240시간 경과시 이미 탈색이 시작되어 1,000시간 경과 후에는 전면적으로 탈색이 진행, 흑색 피막 내부의 다크로 피막 색상이 노출되었다. 흑색 피막 처리 볼트의 경우 다크로 피막의 부식은 발생되지 않아 볼트 소재 자체의 부식은 발생하지 않은 상태이나 탈색에 따른 외관 저하가 심하게 발생하였다.



(a) 하도 도장 후

(b) 상도 도장 후

<그림 2> 표면 처리별 도막 부착력 평가 결과 (염수 분무 240시간 후)

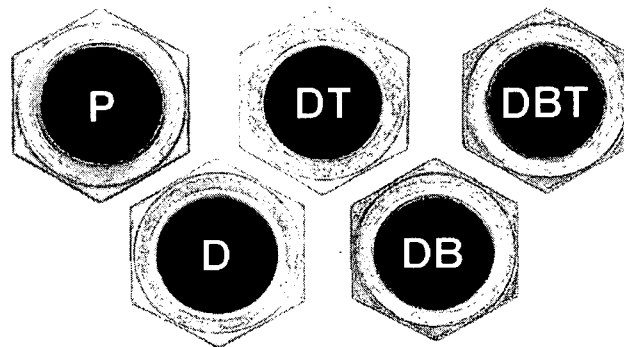


<그림 3> 염수 분무 시험 후 외관(1,000시간 종료 후)

3.3 체결 특성 평가 결과

그림 4는 체결 특성 평가 후의 볼트 머리 자리면 상태를 비교한 것이다. 대부분의 볼트가 전반적으로 균일한 접촉 및 마모흔이 나타나고 있으나 흑색 피막 처리한 볼트(DB, DBT)의 경우에는 국부적인 심한 자리면 손상이 발견되었다. 이러한 국부적인 손상은 나사면에서도 유사하게 나타나 최종 축력 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 5에 조임 토크 30 kgf·m에서의 표면 처리별 평균 축력 및 표준 편차, 토크 계수 평균값 및 표준 편차를 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이, 평균 축력은 인산염 처리 볼트(P)에서 가장 높으며 다크로 처리 + 토크 안정화 처리 볼트(DT), 다크로 처리 볼트(D) 순으로 나타났으며, 흑색 피막 처리된 볼트(DB, DBT)는 다른 볼트의 1/2~2/3 수준으로 현저히 낮은 평균 축력을 나타냈다. 한편, 토크 계수의 경우는 앞서 식 (1)에 나타낸 바와 같이 동일 토크 조건에서 축력에 반비례 관계를 가지며, 따라서 흑색 피막 처리된 볼트(DB, DBT)의 토크 계수가 가장 높게 나타났다.



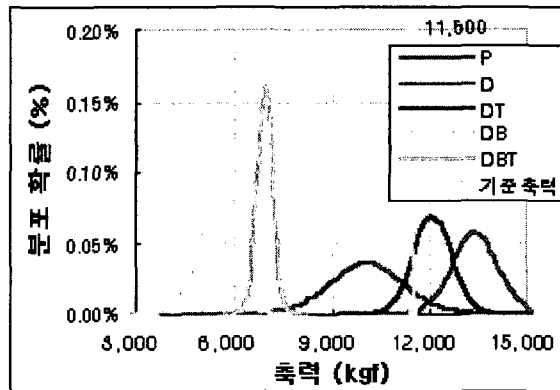
<그림 4> 체결 시험 후의 볼트 머리 자리면 상태

<표 5> 표면 처리별 평균 축력 및 토오크 계수
(평균 축력: 조임 토오크 30 kgf·m 기준)

표면처리	평균축력(kgf)		토오크계수	
	평균값	표준편차	평균값	표준편차
P	13,418	706	0.140	0.008
D	10,073	1,122	0.188	0.019
DT	12,095	577	0.155	0.007
DB	5,378	545	0.352	0.035
DBT	6,971	249	0.269	0.010

다음으로, 축력 또는 토오크 계수의 산포 정도와 관계 있는 표준 편차의 경우 기존 인산염 볼트에 비하여 다크로 처리한 볼트(D)에서 큰 값을 보였으며, 기타 볼트의 표준 편차는 인산염 볼트에 비해서는 낮은 편이었다. 특히 다크로 안정화 처리한 볼트(DT, DBT)는 흑색 처리 여부에 관계 없이 토오크 안정화 처리를 하지 않은 볼트(D, DB)에 비하여 1/2 수준으로 표준 편차가 감소, 축력의 산포 정도를 크게 감소시켰다.

볼트의 축력 분포가 정규 분포를 따른다고 가정하여 표면 처리별 축력 분포를 비교한 결과가 그림 5이다. 점선으로 표시된 설계 기준 축력보다 평균 축력(분포 확률이 가장 높은 지점의 축력)이 높은 볼트는 인산염(P) 및 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT)이며, 기타 볼트는 축력 분포 구간의 대부분이 설계 기준 축력 미만이었다. 특히 흑색 피막 처리한 볼트(DB, DBT)의 축력 수준이 크게 부족하였으며, 다크로 처리 볼트 총 4종 중에 토오크 안정화 처리를 하지 않은 2종 (D, DB)의 축력 분포 범위가 상당히 넓게 나타났다. 축력 분포 양상을 볼 때, 기존 조임 토오크를 적용할 경우 인산염 볼트(P) 및 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT)를 제외한 볼트는 전수 또는 대부분의 볼트가 기준 축력에 미달하며, 따라서 체결력 부족으로 인한 제반 문제를 야기할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.



<그림 5> 표면 처리별 볼트 축력 분포

이상 살펴본 볼트의 축력 산포는 시험시 토오크를 전용 기기로 제어하였기 때문에 조임 토오크 자체는 동일한 상태에서 주로 개별 볼트의 표면 상태 및 치수의 편차 등에 의하여 발생하는 산포이다. 그러나 실제 작업 환경에서는 공구 및 작업자 등에 따라 조임 토오크 자체에도 편차가 있다. 간단하며 경제적이어서 가장 널리 쓰이는 토오크법의 경우는 토오크 렌치 자체의 오차와 함께 작업자별 작업 중지 시점의 차이에 따라서도 토오크의 편차가 크게 발생한다. KS B 3027에 따르면 일반 토오크 렌치에서는 $\pm 3\%$, 정밀 토오크 렌치에서도 $\pm 1\%$ 의 분산을 고려하여야 한다. 여기에 작업자별 편차를 고려하면 실제 토오크 법에서는 $\pm 20\%$ 정도의 편차가 발생할 수 있다. 따라서 시험 대상 볼트 중 특히 D, DB 등 토오크 안정화 처리를 하지 않은 볼트의 경우 실제 제품에서의 축력 산포는 그림 5보다 훨씬 증가할 것으로 추정된다. 특별한 정량적 기준이 제시되지 않은 상태에서 기존 인산염 처리 볼트의 대체 사용을 위해서는 축력 산포도가 최소 기존 인산염 처리 볼트의 수준과 동등 또는 그 이하인 것이 바람직하다. 그러나 시험 대상 볼트 중에는 기존 조임 토오크 적용시 축력이 기준 축력에 현저히 미달하는 경우가 많으며, 이 경우 원하는 체결력을 얻기 위하여 조임 토오크를 상향 조정할 경우 편차가 증가할 수 있다.

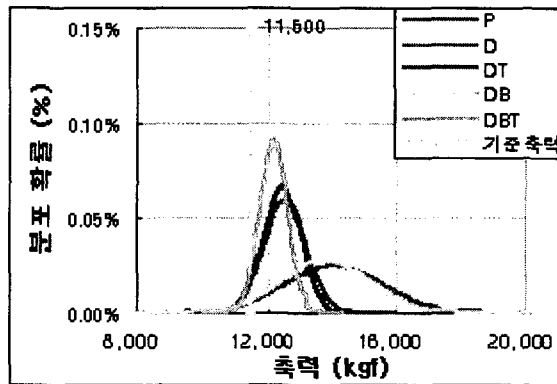
3.4 설계 기준 하중 만족을 위한 조임 토오크의 변경 타당성 검토

초기 제시된 설계 기준 축력을 만족시키기 위하여, 식 (1)의 관계를 이용, 표면 처리별 적정 조임 토오크를 계산하여 보았다. 계산 구간에서 식 (1)의 조임 토오크-축력 간의 선형성이 계속 유지되며 토오크 계수는 동일한 상수라고 가정하고, 또한 표준 편차/평균 축력 간의 비가 조임 토오크의 증대에도 일정한 값을 유지한다고 가정하여 전체 볼트 중 95% 이상이 설계 기준 축력을 만족시키는 경우를 계산한 결과를 표 6에, 이때의 축력 분포를 그림 6에 나타내었다. 그림 6과 같이 전체 볼트의 95% 이상이 설계 기준 축력 이상의 축력을 갖게 하기 위해서는 표 6에서와 같은 토오크의 조정이 필요하다. 계산 결과, 현 조임 토오크에서의 평균 축력이 인산염보다 크게 낮았던 볼트(DB, DBT 등)의 경우, 목표 조건을 만족시키기 위해서는 비현실적으로 큰 조임 토오크의 증가가 필요한 것으로 나타났다. 한편, 축력 산포가 심한 볼트(D, DB)에서는 조임 토오크 증가시 그림 6과 같이 상당수의 볼트가 항복 하중(VDI 2230의 최소 항복 하중)을 초과하는 축력을 나타내는 것으로 계산되었다.

표 7은 현 조임 토오크 및 계산된 적정 토오크에서의 축력비(평균 축력/항복 하중), 설계 기준 하중 대비 미달 비율 및 항복 축력 초과 비율을 각 표면 처리별로 비교한 것이다. 앞서 그림 5에서 확인한 바와 같이, 현 조임 토오크 상태에서 흑색 피막 처리한 2종의 볼트(DB, DBT)는 전수가 설계 기준 하중에 미달하는 것으로 나타났으며 다크로 처리한 볼트(D)의 경우도 근 90%가 설계 기준 하중을 미달한다. 이와 같이 대부분의 볼트에서 현 조임 토오크가 설계 기준 하중에 못 미치기 때문에, 인산염 처리 볼트의 극히 일부(0.85%)를 제외하고는 항복 하중을 초과하는 경우는 없었다. 반면, 설계 기준 하중을 95% 이상 충족시키는 조건으로 새로운 조임 토오크를 계산한 결과 기존 인산염은 조임 토오크가 다소 감소하였으며, 그 결과 설계 기준 하중에 미달하는 비율은 설정한 바와 같이 5%로 증가하는 반면 항복 축력을 초과하는 비율은 반대로 감소(0.01%) 하였다. 다른 표면 처리 볼트의 경우에도 설계 기준 하중 미달 비율은 5%로 동일하나 산포도가 심한 토오크 안정화 미처리 볼트의 경우 축력이 항복 하중을 초과하는 비율이 17.5%(DB)~25.7%(D)로 매우 높은 것으로 나타났다.

<표 6> 설계 기준 하중 충족을 위한 적정 조임 토크
(토크 증감량: 기존 조임 토크 30 kgf·m 기준)

표면처리	적정 토크(kgf·m)		평균축력(kgf)	
	계산값	증감량	평균값	표준편차
P	28.2	-1.8 (-6.0%)	12,589	662
D	42.3	12.3 (41.0%)	14,079	1,568
DT	31.0	1.0 (3.4%)	12,479	595
DB	77.6	47.6 (158.7%)	13,798	1,397
DBT	52.6	22.6 (75.5%)	12,219	437



<그림 6> 토크 조정 후의 볼트 축력 분포

<표 7> 표면 처리별 적정 조임 토크 (표 6) 적용시의 축력 분포

표면 처리	기존 조임 토크 적용시				적정 토크 (표 6, 계산값) 적용시			
	설계 하중 대비		항복 하중 ¹ 대비		설계 하중 대비		항복 하중 ¹ 대비	
	축력비 ²	미달확률	축력비 ³	초과확률	축력비 ²	미달확률	축력비 ³	초과확률
P	117%	0.33%	89%	0.85%	109%	5.0%	83%	0.01%
D	88%	89.8%	67%	0.00%	122%	5.0%	93%	25.71%
DT	105%	15.1%	80%	0.00%	109%	5.0%	83%	0.00%
DB	47%	100%	36%	0.00%	120%	5.0%	91%	17.54%
DBT	61%	100%	46%	0.00%	106%	5.0%	81%	0.00%

¹: 최소 항복 하중 (VDI 2230) ²: 평균 축력/설계 기준 하중 ³: 평균 축력/항복 하중

체결력의 과·부족시 가장 먼저 발생할 수 있는 이상은 볼트의 풀림 또는 항복, 파손 및 피로 파손 등이며, 일반적으로 토오크법에서는 목표 축력비(축력/항복 하중)을 70~80% 선으로 관리한다. 축력비의 관점에서 각 표면 처리 볼트를 기존 및 계산 조임 토오크에서 비교하면 기존 조임 토오크에서는 인산염 처리 볼트(P) 및 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT)가, 계산된 변경 조임 토오크에서는 여기에 더하여 다크로 처리 + 흑색 피막 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DBT)가 적절한 수준으로 나타났다. 특히 인산염 처리 볼트(P)와 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT)는 계산 조임 토오크와 현 조임 토오크에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(P: -6%, DT: 3.4%). 따라서 축력 산포, 평균 축력, 축력비 등 모든 측면에서 현 인산염 처리 볼트(P)와 다크로 처리 후 토오크 안정화 처리한 볼트(DT)가 가장 우수한 체결 특성을 갖으며, 조임 토오크도 현 조임 토오크가 적절한 수준인 것으로 확인되었다. 한편 흑색 피막 처리한 볼트(DB, DBT)는 조임 토오크의 조정이 비현실적일 정도로 축력이 과도하게 낮아 체결 특성이 매우 좋지 않은 것으로 나타났다. 동일한 조임 토오크에서 흑색 피막 처리 볼트의 축력이 과도하게 낮은 것은 그림 4에서 확인한 심한 자리면 손상과 관계있는 것으로 판단된다. 흑색 피막 처리 볼트의 경우는 나사면에서도 체결 후 피막의 손상 정도가 심한 것으로 확인되었으며, 나사산의 각도도 나사골에 잔존한 처리액의 영향으로 타 볼트류에 비하여 감소되어 있는 상태이다. 이런 경우에 단순히 축력의 증대를 위하여 조임 토오크를 증가시키는 것은 볼트 및 피체결물, 암나사부의 심한 손상을 초래할 수 있다.

볼트 체결시 조임 토오크로 가해지는 에너지는 볼트 및 피체결체의 탄성(때로는 소성 포함) 변형 에너지와 기타 마찰, 마모로 인한 열 및 소성 변형 에너지 등의 손실로 전환된다. 그림 4의 DB, DBT와 같이 자리면 또는 나사면에서의 마찰이 심한 경우에는 볼트 및 피체결체에 축력으로 저장되는 탄성 변형 에너지 외에 많은 부분이 마찰면의 손상 및 열 발생으로 소비된다. 따라서 동일 조임 토오크에서는 볼트에 작용하는 축력이 감소되며, 이는 토오크 계수(표 5)의 감소로 확인할 수 있다. 토오크 계수는 볼트의 형상적 인자와 나사면 및 자리면 마찰 계수의 함수로, 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$K = \frac{1}{2d} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_p \sec \alpha' + \mu_w D_w \right) \tag{2}$$

여기서 d는 볼트의 호칭 지름, P는 피치, d_p는 유효지름, μ_s 및 μ_w는 각각 나사면 및 자리면 마찰계수이며 D_w는 볼트의 바깥 지름 D_o와 안지름 D_i로부터 다음과 같이 계산된다.

$$D_w = \frac{2}{3} \frac{D_o^2 + D_o D_i + D_i^2}{D_o + D_i} \tag{3}$$

일반적으로 나사면 마찰 계수와 자리면 마찰 계수는 독립적으로 구하기가 쉽지 않아 동일한 값으로 가정하여 구할 때가 많다. 이 경우 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$K = 0.16 \frac{P}{d} + \frac{\mu}{d} (0.58 d_p + 0.5 D_w) \tag{4}$$

M16 보통 나사에 대하여 해당 값을 대입하고 표 5의 토오크 계수를 대입하여 구한 마찰 계

수 μ 를 표 8에 나타내었다. 표에 보면 기존 인산염 처리 볼트의 마찰 계수는 0.10이며, 다크로 처리 볼트는 0.14, 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트는 0.12로 계산된다. 반면 흑색 피막 처리 볼트는 0.28 (DB) 또는 0.21 (DBT)로 다른 볼트에 비하여 2배 가량 높은 수치이다. 이는 이들 볼트에서 마찰이 보다 심하게 발생함을 의미하며, 따라서 동일 조임 토오크에서 축력은 감소하였다. 일반적으로 강제 볼트-암나사의 경우 윤활 상태, 자리면 조도 등에 따라 차이가 있으나 μ 를 0.12~0.15로 하여 계산하는 경우가 많으며, 현 설계 기준 축력인 11,500 kgf는 마찰 계수가 0.12인 경우에 해당한다. 마찰 계수가 낮을수록 체결 시 축력으로 전환되는 효율이 높아 동일 토오크에서 높은 축력을 얻을 수 있으며, 이런 측면에서 볼 때 흑색 피막 처리는 볼트의 체결 효율을 크게 저하시키는 것으로 나타났다.

<표 8> 계산된 마찰 계수

표면처리	마찰 계수, μ
P	0.10
D	0.14
DT	0.12
DB	0.28
DBT	0.21

3.5 최적 표면 처리 및 체결 조임 토오크

이상 표면 처리별로 기존 인산염 처리 볼트를 포함한 5종의 볼트에 대하여 기초 물성 및 치수, 도막 부착력 및 내식성, 체결 특성 등을 평가하여 보았다. 평가 결과, 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT) 볼트가 가장 뛰어난 내식성과 도막 부착력을 나타내었다. 상도 도막의 내구 부착력의 경우는 다크로 처리만 행한 볼트에 비해서는 다소 낮은 편이나 기존 인산염 처리 볼트와 동등한 수준으로, 대체 사용에 무리가 없는 수준이었다. 또한 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트는 체결 특성도 기존의 인산염 처리 볼트와 유사한 수준이며, 특히 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트는 현행 조임 토오크 (30 kgf·m)에서도 평균 축력 수준 및 축력비 등이 양호하여 조임 토오크의 변경 없이 사용이 가능하다. 가격을 감안할 때 새로이 채택된 다크로 처리 볼트는 특히 내식성이 요구되는 부위에 선택적으로 적용하는 등 기존 인산염 볼트와의 혼용이 불가피하며, 이런 경우 볼트 종류에 따라 조임 토오크가 상이하다면 관리에 애로가 있다. 이런 점에서 내식성, 도막 부착력 등과 함께 체결 특성 등 모든 면에서 우수하며 기존 조임 토오크를 그대로 적용할 수 있는 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트는 기존의 인산염 처리 볼트의 대체물로서 가장 바람직한 특성을 갖고 있다.

4. 결론

기존 인산염 처리 볼트보다 우수한 내식성을 갖는 다크로 처리 볼트의 채용을 위하여 다크로 처리된 볼트 등 총 5종의 볼트에 대하여 기초 물성 및 치수, 도막 부착력 및 내식성과

체결 특성 등을 종합 평가한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 기본 물성 및 치수 검토 결과 5종의 볼트 모두 별다른 차이를 보이지 않아 표면 처리에 따른 기본 물성 및 치수의 변화는 크지 않았다. 그러나 흑색 피막 처리된 볼트(DB, DBT)의 경우 처리액이 나사골에 잔존하여 나사산 각도가 다른 볼트에 비하여 감소한 것으로 확인되었다.
2. 미관상 저해를 초래할 수 있는 도장층의 박리, 탈락 여부를 확인하기 위하여 상도 및 하도 도막의 초기 및 내구 부착력을 비교 평가하였다. 평가 결과 다크로 처리 볼트(D)가 모든 항목에서 가장 우수하였으며, 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 볼트(DT)는 상도 내구 부착력만 기존 인산염 볼트와 동등한 수준으로 다소 낮을 뿐, 다른 모든 항목에서 우수한 것으로 나타났다. 반면 흑색 피막 처리된 볼트(DB, DBT)는 장시간 시험 시 상도 및 하도 모두 도막이 완전 박리되어 내구 부착력이 매우 부족하였다.
3. 다크로 처리의 주된 목적인 내식성 향상 여부를 확인하기 위하여 염수 분무 시험을 실시하였다. 내식성 평가 결과 다크로 처리에 의하여 특히 장시간에 걸친 내식성은 기존 인산염 처리(P)에 비하여 크게 향상이 되었다. 그러나 추가적인 흑색 피막 처리를 행한 경우 흑색 피막층의 탈색이 심하여 외관상 큰 저해를 초래하였다.
4. 현 조임 토오크 조건에서 각 볼트의 체결 축력을 비교, 평가하였다. 평가 결과 볼트 축력이 설계 기준 하중을 만족시키는 측면에서 기존 인산염 처리 볼트 및 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 (DT) 볼트가 가장 우수한 편이며, 흑색 피막 처리한 볼트 2종 (DB, DBT)는 축력이 설계 기준 하중에 크게 미치지 못하여 가장 열악한 체결 특성을 나타내었다.
5. 축력 산포의 측면에서는 기존 인산염 처리와 함께, 토오크 안정화 처리를 추가한 볼트 (DT, DBT)가 우수한 것으로 확인되었으며 토오크 안정화 처리를 행하지 않은 경우(D, DB)는 축력의 산포 정도가 심하게 증가하였다.
6. 설계 기준 하중을 충족시킬 수 있는 적정 조임 토오크를 계산하여 보았다. 계산 결과 축력이 심하게 부족했던 흑색 피막 처리 볼트(DB, DBT)는 현실적으로 조정이 불가할 정도로 높은 조임 토오크가 필요한 것으로 나타났으며, 토오크 안정화 처리를 행하지 않은 볼트(D, DB)의 경우는 조임 토오크 증가시 상당 비율의 볼트 축력이 항복 하중을 초과하는 것으로 나타났다.
7. 상기한 시험 결과를 종합한 결과, 다크로 처리 + 토오크 안정화 처리 (DT) 볼트가 내식성, 도막 부착력 및 체결 축력의 크기, 산포 정도 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 조임 토오크도 기존 인산염 처리 볼트에 대한 현행 기준을 그대로 적용할 수 있는 것으로 확인되었다.

참고문헌

- [1] 박영서 등(1997), 표면처리 기술, 대우종합기계 전문기술교육 교재.
- [2] Seymour K. Coburn(1984), *Corrosion Source Book*, ASM, NACE, Houston, Texas.
- [3] 김대용, 김호중(1997), 내부식성 향상을 위한 다크로처리 기술 적용 연구, 대우기보, 44권.
- [4] 김대용(1996), 내부식성 향상을 위한 다크로 처리품 품질평가, 신뢰성평가센터 기술보고

서, TE96CF-307, .

[5] 손승요, 심근하, 김영조(1995), 나사기술 총람, 문운당

[6] 김호중(2000), 굴삭기용 볼트 다크로 처리 품질 평가 결과, 신뢰성평가센터 기술보고서 TE00CX-301.

[7] 양치훈(2000), 다크로 처리 볼트 축력 평가, 신뢰성평가센터 기술보고서, TE00PX-322 .