

# 대형 스테드 볼트의 나사부 품질에 미치는 전조 공정 변수의 영향

권일근<sup>1</sup>, 윤영철<sup>2</sup>

## The effect of thread rolling process parameters on the quality of large stud bolts

I. K. Kwon, Y. C. Yoon

### Abstract

Finite element analysis and verification experiments were performed in order to find cause of defects such as folding and improper radius around the root area of the thread rolled stud bolts. Thread rolling experiments under several conditions were also carried out to understand the effect of process parameters, such as the rotation speed of the dies and the hardness of the work pieces, on the product quality. Folding defects at the top of thread are attributed to the higher hardness of the work piece and higher rotation speed of the rolling die. It was also found that the radius of screw mainly determined by the radius of the die.

**Key Words** : stud bolt, thread rolling, process parameter, folding defect, finite element method, test

### 1. 서론

기계 구조물의 체결용 스테드 볼트는 절삭 가공과 전조 가공에 의해 제작된다. 전조에 의해서 제작되는 볼트류는 나사부가 가공 경화되고 연속적인 메탈플로우(metal flow)가 형성되므로 절삭 볼트에 비해서 피로 강도가 높다.

대형 엔진용 스테드 볼트의 경우 작동 중 폭발 압력에 노출되므로 피로 강도 특성이 우수한 전조 볼트를 사용한다. 엔진용 스테드 볼트의 파손은 피로에 의한 파손이 주를 이루며 응력 집중이 발생하는 나사의 골 부위에서 균열이 시작되는 것으로 알려져 있다[1]. 전조 공정 조건이 적절하지 못할 경우 다양한 형태의 결함이 발생할 수 있으며 이중에 스테드 볼트의 골 부위 곡률 부족 및 소재 겹침 결함(folding defect)은 부품의 수명을 단축시키는 직접적인 요인이 된다.

본 연구에서는 전조 스테드 볼트의 나사 골 부위 소재 겹침 결함과 곡률 부족의 원인을

유한 요소 해석을 통하여 분석하고 그 대책을 제시하고자 한다. 또한, 다양한 전조 공정 조건 하에 시험 전조를 실시하여 다이스 회전속도 및 성형하중, 소재 경도, 윤활제 등의 전조 공정 인자가 소재 겹침 결함 및 제품 표면 부 burr 의 발생 등에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

### 2. 전조 가공 결함 원인 분석

실제 운행 중 파손이 발생한 스테드 볼트 부품의 형상을 분석한 결과 Figure 1과 같이 나사의 골 부위 곡률 반경이 설계 기준보다 작으며 골 부위에 전조 가공시 발생한 소재의 겹침 결함이 발견되었다[1].

#### 2.1 나사 골밀 부위 소재 겹침

골 부위의 소재 겹침 결함의 원인을 분석하기 위하여 2차원 평면변형 유한 요소 해석 모델을

1. 현대중공업 산업기술연구소

2. 현대중공업 산업기술연구소

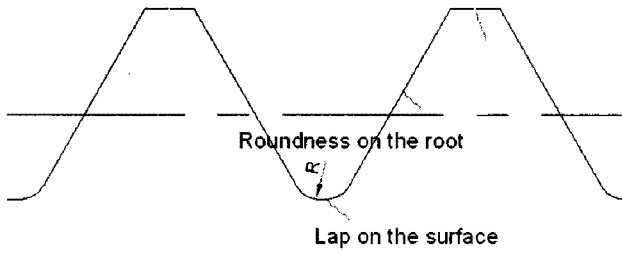


Fig. 1 Defects on the surface of stud bolts

이용하여 성형 해석을 수행하였다. 전조 가공 중 골 부위에 소재 겹침이 발생하는 과정을 해석적으로 구현하기 위하여 Figure 2(a)와 같이 첫 번째 패스에서 1.5mm의 깊이로 압입된 소재에 두 번째 패스에서 다이스를 수평 방향으로 0.5mm 움직여 압입하는 공정을 해석하였다. 압입 깊이가 1.5mm를 초과하는 시점에 Figure 2(b)와 같이 나사의 골 부위에 소재 겹침 현상이 발생하며 이는 성형 완료시점에 표면 결함의 형태로 존재하는 것으로 나타났다. Figure 2(a)와 같이 다이스가 움직이는 원인은 다수의 패스로 이루어지는 롤링 과정에 있어서 가공재를 다이스에 잘못 물리는 경우(장입 불량, mis-feeding)와 롤링 다이스 셋팅시 정렬이 불량한 경우(mis-alignment)를 들 수 있다. 장입 불량에 의한 소재 겹침의 발생은 가공재에 나사산의 윤곽이 뚜렷하지 않은 초반부 패스에서 주로 발생한다. 다이스 정렬 불량에 의한 소재 겹침은 Figure 3과 같이 좌우 다이스에 의해서 생성되는 나사산 간의 간섭에 의해 발생한다. 장입 불량인 경우 가공재의 피딩 자동화를 통하여 저감시킬 수 있으며 다이스 정렬 불량은 반복 테스트 및 확대경을 이용한 셋팅 방법을 이용하여 방지할 수 있다.

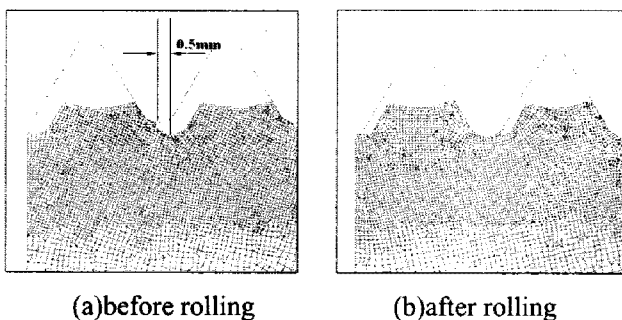


Fig. 2 Formation of folding defect on the surface(2<sup>nd</sup> Pass)

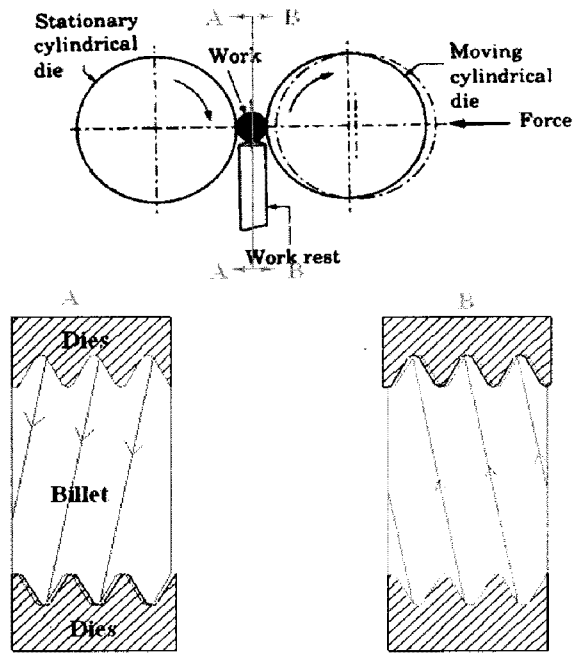


Fig. 3 Misalignment of the rolling dies

## 2.2 나사 골 부위 곡률 반경

2차원 평면 변형 모델에 대한 해석 결과 압입 과정에서 다이스의 나사산 부위와 소재의 골밑 부위가 완전히 밀착되는 것으로 나타났다. 이는 소재의 골밑 부위 형상은 다이스의 나사산 형상과 동일하게 성형됨을 의미한다. 그러나 실제 전조 공정에서는 가공재의 나사산이 회전하는 다이스 사이에서 압입 작용에 의해 형성되므로 실제 전조 가공과 좀 더 유사한 3차원 모델에 대한 유한요소해석이 필요하다. Figure 4는 전조 공정을 단순한 해석 모델로써 가공재를 평판으로 가정하고 그 위에 원형 다이스를 가압 회전하는 과정에 대하여 성형 해석을 수행한 결과를 나타낸다.

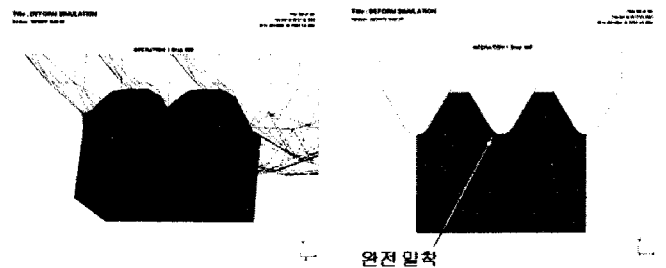


Fig. 4 Result of F.E analysis(simplified model)

해석 결과에서 가공이 완료된 시점의 소재 형상을 살펴보면, 4번째 패스에서의 소재의 나사 골

부위는 Figure 4 에 나타난 것과 같이 다이스의 나사산 부위와 완전 밀착되어 있으며 소재의 나사산 부위 형상은 다이스의 나사산 형상과 동일함을 알 수 있다. 따라서, 골밀 곡률 반경의 부족은 다이스의 나사산 형상의 불량에 의한 것임을 알 수 있다. 실제 전조 가공에서 얻어진 시편과 다이스의 형상을 투영식 형상 측정 장치를 이용하여 측정한 결과 거의 유사한 것으로 나타났다. 전조 다이스의 형상 불량을 방지하기 위해서는 다이스 제작 시의 가공뿐만 아니라 다이스 소재 특성 및 작동 중 윤활 방안에 대한 지속적인 관리가 이루어져야 할 것이다.

### 3. 전조 실험

#### 3.1 전조 실험 조건

스터드 볼트의 전조 공정에 있어서 주축 회전 속도(다이스 회전 속도), 가공재의 경도, 윤활 방안 등 다양한 공정 변수가 존재한다. 이들 공정 변수 중 주축 회전 속도 및 가공재의 경도가 전조 품질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 1 의 전조 조건에 대하여 시험 전조를 실시하였다.

시험에 사용한 소재는 SNCM439 재질로써 템퍼링 온도를 달리하여 경도값에 차이를 부여하였다.

Table 1 Thread rolling conditions in the experiment

시편 번호 전조 조건	K1	K2	S1	S2	C1	C2
소재 직경	106 mm		106mm		106mm	
경도(HB)	319	271	336	270	325	273
주축 회전 속도	15 rpm		25 rpm		40 rpm	
전조하중	64 ton	50 ton	64 ton	56 ton	50 ton	40 ton
윤활유	CUTMAX 6540AN (비수용성 절삭유)		Dahpine Fluid H68 (유압기계용)		Shell Garia Oil H (비수용성 절삭유)	

Figure 5 는 시험 전조 장면을 나타낸다. 시험을 위하여 Figure 5 의 (a)와 같이 스테드 볼트의 규격에 맞는 롤 형상의 전조 다이스를 좌·우 주축에 장착하고 나사산의 리드각 만큼 주축에 경사를 가하여 다이스를 셋팅한다. 회전하는 다이스 사이에 원통형 소재를 Figure 14(b)와 같이 물리고 소재가 회전하면서 표면에 나사산이 형성된다. 이때 다이스 상부 표면에 윤활제를 투여하여 다이스와 소재 사이에 윤활제가 도포 되도록 한다. 시험 후 전조 볼트에 링 게이지를 체결하여 합격 불합격을

판정한다. 또한 전조 볼트의 표면에 burr 의 발생 유무를 육안으로 확인한다.

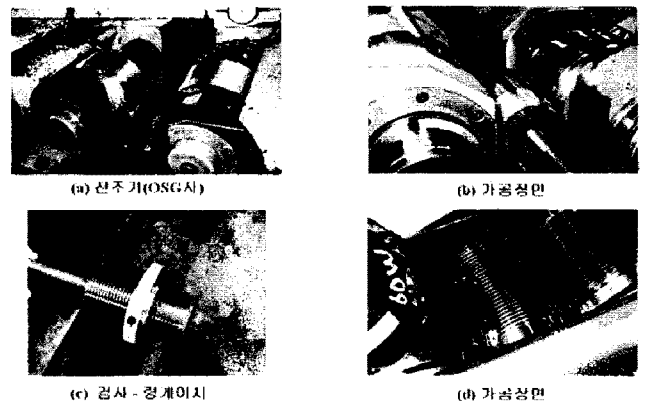


Fig. 5 Thread rolling test

#### 3.2 전조 실험 결과

Table 2 는 전조 실험을 실시한 결과를 나타낸다. 표면 경도가 높은 K1, S1, C1 시편의 경우 64~50ton 의 전조 하중이 소요되었으며 나사산이 완전히 형성되는데 총 7~9 회의 롤링 작업이 소요되었다. 경도 값이 상대적으로 낮은 K2, S2, C2 시편은 40~50ton 전조 하중 하에 총 4~7 회의 롤링 작업이 소요되었다. 또한, 표면 경도가 동일한 K2, S2 와 C2 시편의 시험 결과를 비교해보면 주축 회전수가 증가할수록 전조 회수가 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 동일한 조건 하에서 가공재의 경도가 높을수록 전조 소요 하중이 높으며 전조 회수도 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Results of thread rolling experiment

시편 번호 전조 조건	K1	K2	S1	S2	C1	C2
전조 하중	64 ton	50 ton	64 ton	56 ton	50 ton	40 ton
전조 횟수	7회	4회	7회	4회	9회	7회
링 게이지 테스트	합격	합격	불합격	합격	합격	합격
버 발생 유무	유	무	유	무	유	무

나사 표면부의 burr 의 발생은 경도가 상대적으로 높은 K1, S1, C1 시편에서만 발생하였다. 또한, 주축 회전 속도가 높을수록 burr 의 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 롤링 과정에 있어서 소재의 표면 경도가 높거나 주축 회전 속도가 높을수록 다이스가 소재 표면에 제대로 압입되지 못하고 미끄러지는(sliding) 현상이 발생한다. 롤링 시

소재가 미끄러지면 표면 부에 국부적인 변형이 발생하여 burr 가 생성된다. 따라서, burr 의 발생을 방지하기 위해서는 전조 장비의 용량을 높이거나 가공재의 강도를 낮추어서 롤링 시 다이스의 압입이 원활하게 이루어지도록 해야 할 것이다.

가공재의 장입 불량에 대한 영향을 파악하기 위하여 S1 시편에 대하여 세 번째 롤링시 이전에 형성된 나사산으로부터 약 5mm 정도 읍셋하여 새로운 나사산이 형성되도록 롤링 작업을 실시하였다. 이렇게 얻어진 S1 시편은 링 게이지 테스트에서 불합격으로 나타났다. 이 결과로부터 가공재의 장입 불량은 나사산 치수 불량으로 직결됨을 알 수 있다.

시험에 사용된 윤활재의 종류에 따른 전조 품질에는 큰 차이를 보이지 않았다. 점도와 내하중성이 높은 윤활제를 사용한 K1, S1 시편의 경우 C1 시편에 비해 burr 발생량이 다소 적은 것으로 나타났다.

### 3.3 소재 겹침 결함

Figure 6 과 같이 전조 시험으로부터 얻어진 일부 시편의 나사산 중앙 부위에 크랙이 관찰되었다. 지금까지의 연구에 의하면 나사산정의 소재 겹침이 발생하는 원인은 소재의 가공경화지수, 나사산 형상 등으로 알려져 있다[2]. 나사산의 소재 겹침이 발생한 C1, C2 시편은 상대적으로 높은 주축 회전 속도(40rpm)로 가공한 경우이며 소재 겹침의 깊이가 가장 깊은 C1 시편은 경도가 높은 소재를 사용한 경우이다. 앞 절에서 언급한 소재의 경도와 주축 회전 속도가 높을수록 가공재와 다이스간의 미끄러짐이 많아진다는 사실을 상기하면 나사산정의 소재 겹침도 가공재의 미끄러짐에 의한 국부 변형에 기인한 것이라고 추정할 수 있다.

한편, 낮은 주축 회전 속도 하에서도 소재 겹침이 발생한 S1 시편은 인위적으로 장입 불량을 발생시킨 경우이다. 이 사실로부터, 장입 불량과 다이스의 셋팅 불량이나 나사산의 소재 겹침을 유발하는 주요인임을 알 수 있다.

앞의 시험 결과를 종합해 볼 때, 나사산의 소재 겹침의 발생을 방지하기 위해서는 전조 다이스의 압입이 원활하게 이루어 질 수 있도록 충분한 용량의 전조기를 사용하거나 주축 회전수 및 소재 경도를 적절히 유지해야 하며 전조기의 셋팅 및 소재 장입에 주의를 기울여야 한다.

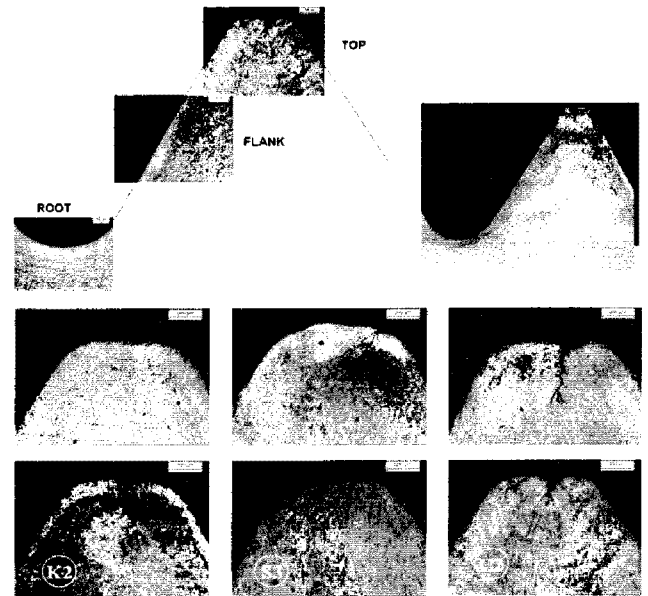


Fig. 6 The folding defects found at the top of the screw

## 4. 결론

대형 스테드 볼트의 전조 결함 원인 분석 및 전조 공정 인자의 영향을 파악하기 위하여 성형 해석 및 전조 시험을 실시한 후 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 나사 골 부위의 소재 겹침 결함은 장입 불량과 다이스 셋팅 불량에 기인하며 이를 방지하기 위해서는 피딩 자동화 및 확대경을 이용한 정밀 셋팅 방법을 이용해야 한다.
2. 시험 전조에서 얻어진 시편의 나사 골부위 곡률반경은 다이스의 나사산 형상과 동일하게 얻어지므로 골부위 곡률 반경 미달을 방지하기 위해서는 다이스의 나사산 형상 관리에 주의를 기울여야 한다.
3. 표면부 burr 와 나사산의 소재 겹침은 주축 회전 속도와 가공재의 경도가 높을 때 다이스가 소재를 정상적으로 압입하지 못하기 때문에 발생하므로 이들 전조 조건을 적절히 선정하거나 충분한 용량의 전조기를 사용해야 한다.

## 참고 문헌

- [1] Broken Cylinder Cover Stud - 7K98MC, MAN B&W Materials Research & Laboratory, 22 August, 2001.
- [2] Experimental Investigation of External Thread Rolling, Jarvis L. Dotson, Charles R. Henrey, Wire Journal International, Vol. 35, No. 11, 2002, p.64-68.