

휠로더 엔진 밸브 커버 볼트의 파손 원인 규명 및 개선

A study on the fatigue fracture of engine valve cover bolt for a wheel loader

이군희*·주원호*·김동해*·배종국*

Kun-Hee Lee, Won-Ho Joo, Dong-Hae Kim and Jong-Gug Bae

Key Words : wheel loader, bolt failure, fatigue fracture, resonance, engine valve cover

ABSTRACT

The bolts fixing the valve cover to the engine were often reported to be failed in a wheel loader model. Recently this failures were continually repeated in the specified equipment. In order to identify the fatigue fractures of the bolts, various vibration tests were carried out. From these tests, it was found out that the failure was due to the resonance between the excitation force of engine and the transverse mode of engine valve cover.

So, the several modifications for the bolts were considered to avoid the resonance. Finally, the bolt failure problem was clearly resolved.

1. 서 론

중형 휠로더의 한 모델에서 엔진 밸브 커버를 고정하는 볼트가 파손되는 사고가 수차례 발생하였고 특정한 장비에서는 볼트를 교체한 후에도 파손이 반복적으로 발생하였다. 초기에는 반복적 파손이 엔진의 문제에서 기인한 것이라 보고 엔진을 교체하였지만 엔진 교체 후에도 볼트 파손이 지속적으로 발생하였다.

Figure 1과 Figure 2에는 반복적인 볼트 파손 문제가 발생하는 장비(이하 파손장비)와 그 엔진의 사진을 각각 실었으며 Figure 3에는 파손된 볼트의 사진을 수록하였다.

볼트 파손의 원인을 파악하기 위하여 파손된 볼트의 단면을 조사한 결과 피로 파손이 시작된 점이 발견되고 crack이 성장한 흔적이 있는 것으로 보아 이 파손은 피로에 의해 발생한 것을 알 수 있었다. Figure 4에는 파손된 볼트의 단면을 나타내었는데 화살표는 피로 파손이 시작된 점을 나타낸다.

이러한 문제를 해결하기 위해 볼트의 결합부를 변경하거

나 볼트의 재질과 형상 개선 등과 같은 구조적인 측면에서의 해결책이 검토되었으며 이를 위해 먼저 엔진에 대한 진동 계측을 수행하였다. 계측결과 엔진 상부의 횡진동이 다른 기종에 비해 높아서 엔진의 과도한 진동이 피로 파손의 원인이 될 수 있고 이를 저감한다면 피로 파손문제를 해결할 수 있을 것으로 판단하였다.

본 논문에서는 볼트의 파손 문제의 원인이 과도한 진동에 의한 것으로 보고 이를 해결하기 위하여 엔진에 진동 측정과 진동 시험을 통해 진동의 원인을 파악하고 최적의 개선안을 도출하였다.

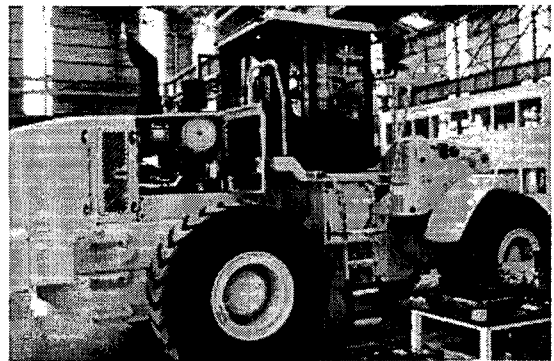


Figure 1. 대상 휠로더

* 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : LKHO@hhi.co.kr
Tel : (052)230-5551, Fax: (052)230-5495

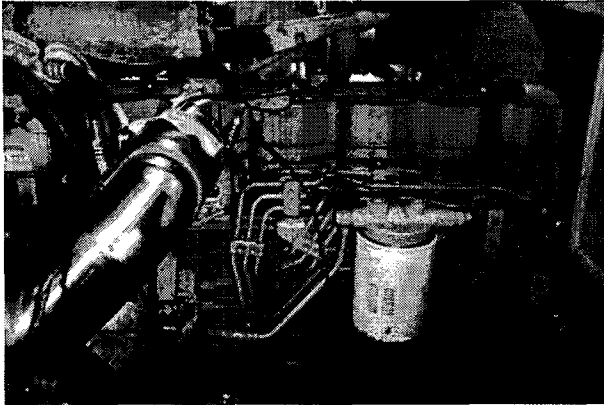


Figure 2 파손 장비의 엔진

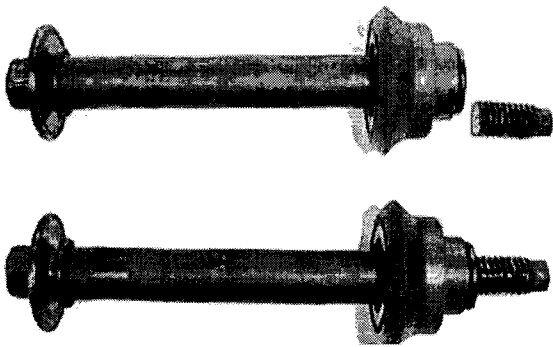


Figure 3 파손된 볼트

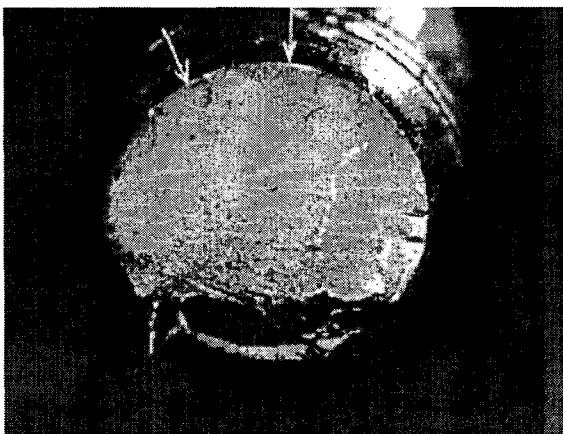


Figure 4 파손된 볼트의 단면

2. 파손 장비의 진동 특성 파악

2.1 파손 장비의 진동 특성

파손 장비의 진동 특성을 파악하기 위하여 엔진 가동 상태에서 진동 계측을 수행하였다. 진동 측정점은 밸브 커버 상단, 고정용 볼트, 엔진 블록이며 장비가 가동되는 여러 가지 조건(low idle, high idle, sweep, TC stall, hydraulic relief, bucket shock)에서 진동을 측정하였다. 그리고 파손의 원인을 파악하기 위하여 관심 부위의 진동 수준뿐만 아니라 ODS(Operational Deflection Shape) 분석도 수행하였다. 또한 가능성은 낮으나 볼트 재질 변경에 의해 진동 특성 변경이 있는지 알아보기 위하여 볼트의 재질을 변경한 후 진동 특성을 측정하였다.

진동 측정 결과 성분별로는 3차 성분이 지배적이었으며 밸브 커버 상단의 횡진동이 가장 심하였다. 그리고 조건에 따라 진동의 편차가 높았으며 엔진에 큰 부하가 걸리는 hydraulic relief 조건에서의 진동이 가장 높았다. Figure 5 에는 계측 위치별 진동값을 900 RPM에서 2300 RPM까지 엔진의 회전수를 변화시키면서 측정하여 비교하였으며 Figure 6에는 hydraulic relief 조건에서 엔진 밸브 커버 후미부의 진동을 나타내었다. 진동 형상을 보면 엔진 밸브 커버 후미부의 진동이 상대적으로 크며 이는 후미부의 볼트가 주로 파손되는 현상과 일치한다.

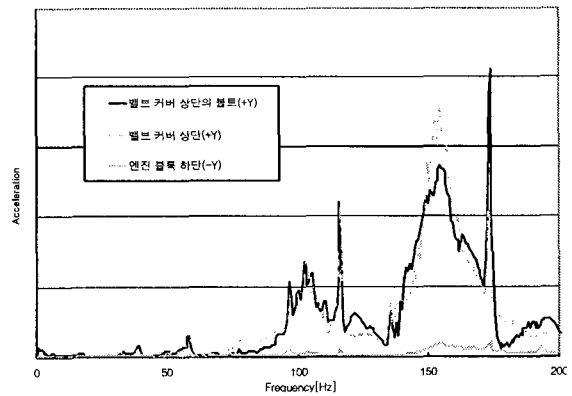


Figure 5 계측 위치에 따른 횡진동 비교

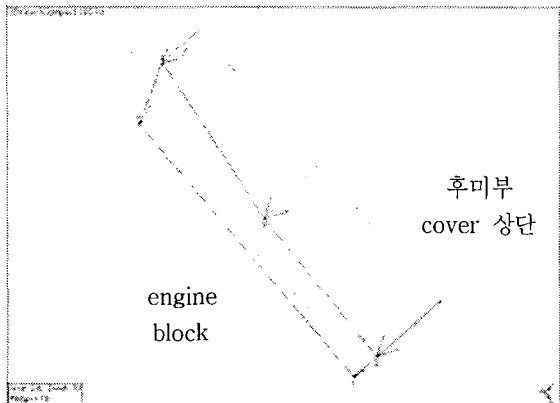


Figure 6 파손 장비 엔진의 진동 형상(ODS)

2.2 파손장비와 양산장비의 진동 특성 비교

반복적 파손이 특정한 장비에서만 자주 발생하므로 파손 장비의 진동 특성이 양산 장비와 다를 수 있으므로 양산 장비에 대한 진동 계측을 수행하였으며, 양산 장비와 파손 장비의 다른 부분인 break pump의 rear bracket을 착탈한 경우의 진동도 비교하였다. 그 결과 양산 장비의 진동은 파손 장비에 비해 약간 양호한 것으로 보이지만 전체적으로는 큰 차이가 없는 것으로 보이며 bracket의 착탈 여부는 진동 특성에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

Table 1에 장비의 상태에 따른 hydraulic relief 운전 조건에서의 엔진 밸브 커버 후미부 볼트의 횡진동 수준을 나타내었다. 진동 수준은 장비의 상태에 따라 차이는 있으나 hydraulic relief 조건에서 최대 19 g(RMS)의 진동이 발생하므로 장기간 사용시 진동으로 인한 파손이 발생할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 1 장비의 조건에 따른 엔진 밸브 커버 후미부 볼트의 진동(hydraulic relief, unit: g, RMS)

장비종류	계측 조건	Overall	3차 성분
파손 장비	기존 볼트	7.41	5.48
	SCM 볼트	17.8	16.0
	SUS 볼트	12.5	4.2
	Bracket 장착	11.0	9.72
	Bracket 제거	19.0	15.9
양산 장비	Bracket 장착	11.9	9.7
	Bracket 제거	11.8	9.6

2.3 과도한 진동 원인 추론

측정 결과를 보면 일견 볼트의 변화나 bracket의 착탈 여부에 따라 진동 수준이 바뀌는 것처럼 보이는데 기존 볼트를 장착한 파손장비와 bracket을 제거한 파손 장비는 동일한 조건에서의 계측임에도 불구하고 진동 수준이 두 배 이상 차이가 나고 있다. 또한 동일한 장비 상태에서 진동 측정을 여러 차례 반복해 본 결과 계측 때마다 진동 수준의 차이가 크게 나타났다. 이러한 일관되지 못한 진동 양상은 공진점이 hydraulic relief의 운전 영역인 2000 RPM ~ 2200 RPM에 있고 측정시마다 엔진의 회전수가 약간 달라져서 발생한 현상이라고 추측되었다.

이러한 가정을 확인하기 위하여 Figure 7에 hydraulic relief 조건에서 볼트나 bracket을 변경하면서 파손장비와 양산장비를 계측한 결과의 주파수 분석을 동시에 나타내었다. 주파수의 변화에 따라 진동 값이 변화하고 108 Hz 근방에서 최대값을 보이는 전형적인 공진에 의해 진동 특성임을 알 수 있었다.

따라서 이 모델에서 발생한 볼트의 파손은 엔진의 3차 기진력과 엔진 밸브 커버의 고유 모드간의 공진에 의한 과도한 진동에 의해 발생한 것으로 보인다. 그리고 특정한 장비에서 발생한 반복적인 파손은 공진이 발생하는 영역에서 빈번하게 운행하는 장비 운행의 습관에 의해 발생한 것으로 판단된다.

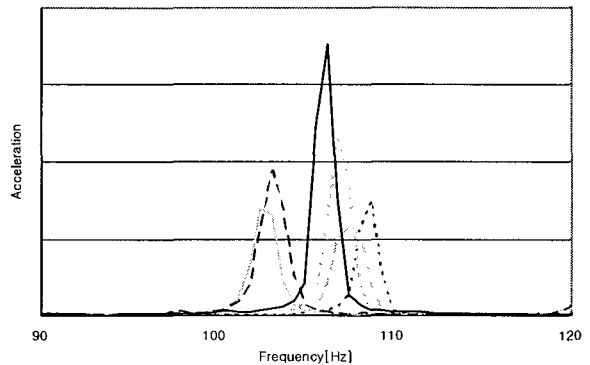


그림 7 여러 조건에서의 계측 결과 비교 (hydraulic relief, 엔진 밸브 커버 횡방향 진동)

3. 엔진 밸브 커버의 공진 회피 설계

3.1 충격 시험을 통한 진동특성 파악

파손 장비에 대한 충격시험을 통해 고유진동수를 파악하고 밸브 커버의 고유진동수에 영향을 주는 볼트의 체결 방법에 따른 진동 특성을 계측하여 기존의 경우와 비교하였다. Figure 8과 Figure 9에는 볼트 변화에 따른 주파수응답함

수와 파손 장비에서 발생 한 고유모드를 각각 나타내었다.

파손 장비의 충격 시험 결과를 보면 밸브 커버 상단이 횡방향으로 움직이는 고유 모드가 108 Hz에 있으며 이는 주파수응답함수와 진동시험에서 도출된 결과도 일치한다. 그리고 볼트의 슬리브 길이를 축소하면 엔진 밸브 커버의 결합력이 강화되어 고유진동수가 증가하며 볼트를 풀면 결합력이 약화되어 다시 고유진동수가 감소하는 경향을 확인하였다. 따라서 볼트 체결력 변화만으로, 즉 볼트에 의해 엔진 밸브 커버의 경계조건을 변화시킴으로서 밸브 커버의 고유진동수를 쉽게 변경할 수 있고 이를 통해 진동 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있다.

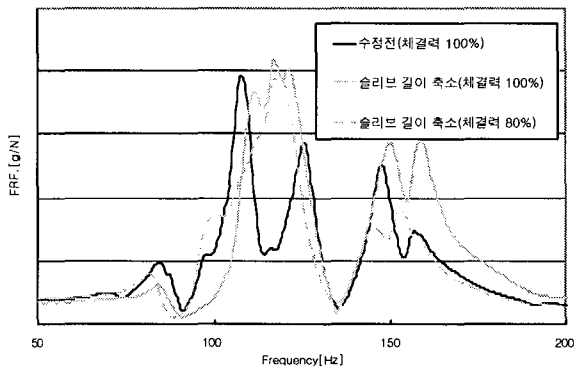


Figure 8 볼트 변화에 따른 주파수 응답 함수

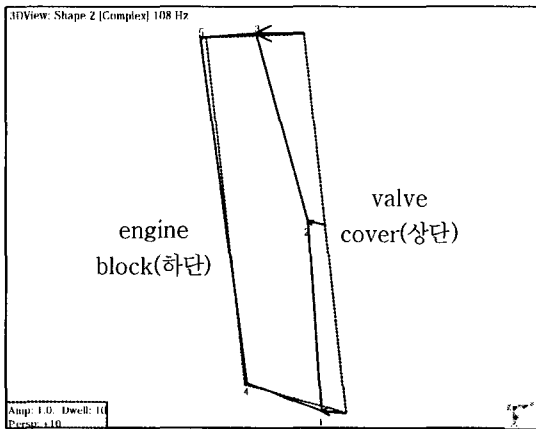


Figure 9 파손 장비 엔진의 고유 모드

3.2 개선안 도출

밸브 커버와 엔진의 결합력을 증가시키면 고유진동수가 증가하여 공진 회피를 할 수 있다. 이를 위해 볼트의 단면을 증가시키고 볼트의 길이를 축소하여 체결 깊이를 증가시켜야 한다. Figure 10에는 이러한 개선안이 적용된 볼트의

사진을 기존의 볼트와 대비하여 수록하였다.

볼트 개선 이외에 조임 토크나 와서의 변경으로도 밸브 커버의 결합 조건이 변경될 수 있다. 따라서 적정한 조임 토크와 와서를 선정해야 효과적인 진동 저감이 가능하므로 조임 토크와 와서를 변경시키면서 충격시험과 진동측정을 수행하여 진동저감에 효과가 우수한 최적의 개선안을 도출하였다.

충격 시험 결과를 보면 볼트를 교체하고 조임 토크를 높이면 주운전 영역에서 엔진의 3차 기진력의 기진 주파수와 공진이 우려되는 100 Hz~110 Hz 부분에서 고유 진동수가 멀어지고 그 영역에서의 응답 수준은 떨어지므로 진동 저감에 크게 기여할 것으로 보인다. 진동 측정 결과를 보면 조임 토크를 12 Nm로 하거나 고무 와서를 사용할 경우 기존 볼트에 비해 진동 수준의 변화가 크지 않고 24 Nm로 높여야 진동 수준이 낮아진다. 최종적으로 구리 와서를 사용하고 조임 토크가 24 Nm로 하는 것이 진동 저감에 효과적인 개선안으로 선정되었다.

Table 2. 볼트 결합 조건에 따른 진동 수준 변화

계측조건	3차 진동 [g, RMS]
기존볼트	12.9
수정된 볼트(토크: 12 Nm)	10.1
수정된 볼트(토크: 24 Nm)	3.6
수정된 볼트(토크: 24 Nm, 구리와서)	4.0
수정된 볼트(토크: 24 Nm, 고무와서)	11.1
최종안(sleeve 삽입, 24 Nm, 구리와서)	5.2

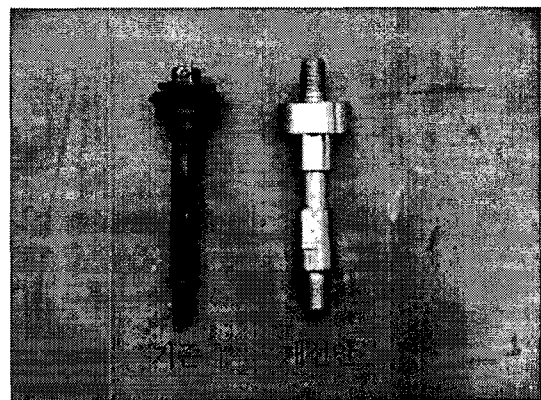


Figure 10 개선된 볼트

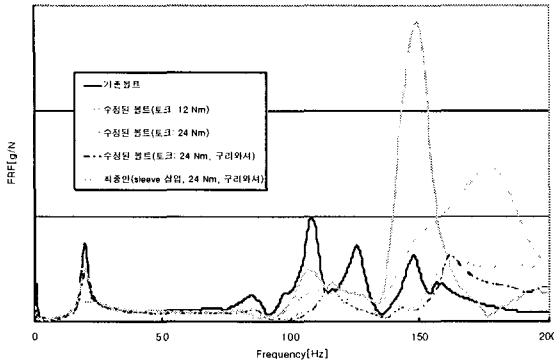


Figure 11 조임 토크와 와셔의 변경에 의한 주파수 응답 함수의 변화(수평 가진, 수평 응답)

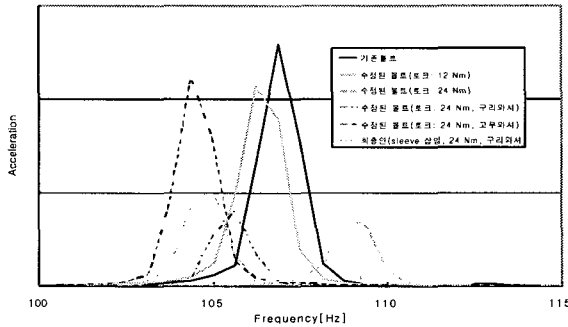


Figure 12 조임 토크와 와셔변경에 의한 진동 변화 (hydraulic relief, 엔진 밸브 커버 횡방향 진동)

볼트 개선으로 진동은 저감시켰으나 과도한 결합력으로 엔진 밸브 커버와 엔진 블록 사이의 개스킷이 짓눌려져서 윤활유가 새는 현상이 발생하였다. 적정 조임 토크를 찾아서 조일 수도 있으나 정비성을 좋게 하기 위하여 슬리브를 삽입하여 결합력이 일정 이상 발생할 경우 이 힘을 슬리브가 받아주도록 하여 개스킷이 짓눌리는 현상을 방지하였다.

그러나 결합력이 약해지면 진동 저감 효과도 약해질 수 있으므로 슬리브를 장착한 상태에서 충격시험과 진동시험을 수행하여 진동 저감 효과를 확인하였다. Figure 11의 충격 시험 결과를 보면 구리 와셔를 사용한 경우에 비해 고유진동수가 약간 낮아지고 주파수응답함수가 약간 커지지만 큰 변화는 없고 Figure 12의 진동응답을 보아도 응답수준이 1g 정도 커지는 문제점이 있으나 볼트의 파손을 유발할 정도의 진동 수준 증가는 아니므로 진동 저감안으로 적절한 것으로 판단된다. Figure 13에 슬리브가 설치된 볼트의 사진을 수록하였다.

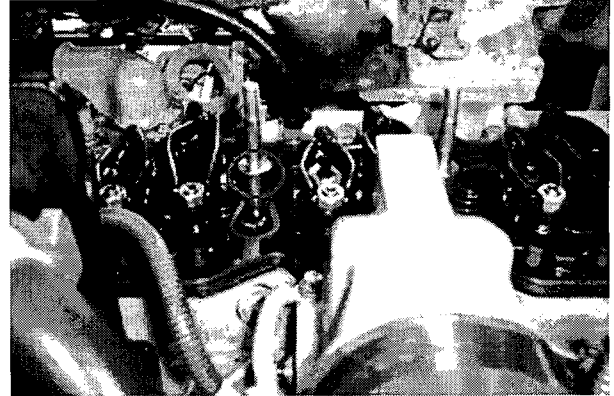


Figure 13. 슬리브가 장착된 볼트(붉은 원 안이 슬리브)

4. 결론

중형 휠로더 엔진 밸브 커버 볼트가 반복적으로 파손되는 원인을 규명하고 대책을 강구하고자 다양한 진동계측을 수행하였다. 측정 결과, 부하가 과도하게 가해지는 hydraulic relief 조건에서 작업을 빈번하게 할 경우 엔진 밸브 커버의 횡방향 고유진동수와 엔진 기진력과의 공진에 의한 과도한 진동으로 엔진 밸브 커버 양단의 지지 볼트가 피로 파괴에 의해 파손 될 수 있었다.

공진을 회피하여 진동을 저감하기 위해 밸브 커버를 엔진에 고정하는 볼트의 형상을 변경하여 결합력을 높임으로써 고유진동수를 증가시키고 응답 수준을 낮출 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 그리고 와셔나 결합력에 의한 진동 특성 변화를 진동 시험을 통해 확인하고 최적의 개선안을 도출하였다.

그러나 과도한 결합력에 의해 엔진 오일의 누유 현상이 발생하는 것을 방지하기 위해 볼트에 슬리브를 장착하여 적절한 결합력을 유지하도록 하여 최종적으로 최적의 개선안을 도출하였다.

참 고 문 헌

- (1) ME'scope VES 4.0, 2003, Vibrant Technology
- (2) HMRI report 주원호, 이근희, 2006, "HL 760-7 휠로더 볼트 파손 문제 해결", 현대중공업 선박해양연구소