# 군용 궤도차량 디젤엔진의 커넥팅 로드 볼트 파손 검토를 통한 고장원인분석

오대산<sup>\*</sup>, 김지훈, 서석호 국방기술품질원

# Failure Analysis by Fracture Study of Connecting Rod Bolts in Diesel Engine for Military Tracked Vehicles

Dae San Oh\*, Ji Hoon Kim, Suk Ho Seo Defense Agency for Technology and Quality

요 약 군용 궤도차량은 일반 차량보다 더 가혹한 주행조건과 기후환경에서 운용되며, 이러한 환경에서 사용되기 위하여 적용되는 부품들은 고도의 신뢰성과 내구성이 요구된다. 특히 디젤엔진은 군용 궤도차량의 주 동력발생장치로써, 차량 주행 간 고장이 발생할 시에 대형사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서 엔진의 고장 및 파손원인을 분석하는 것은 추후 발생할 수 있는 유사한 사례를 사전에 예방할 수 있는 중요한 과정이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 군용 궤도차량 주행 간 발생된 고장 엔진에 대하여 분해검사와 경도 측정, 파단면 분석 등의 파손원인검토를 통하여 엔진 파손 메커니즘을 규명하였다. 파손 엔진에 대한 분해검사를 통하여 4번 커넥팅 로드에서 볼트가 분리되어 이탈된 것이 확인되었다. 또한 4번 커넥팅 로드 볼트의 경도 측정 결과는 규격에 적합하였으며, 파손된 볼트의 파단면 분석을 통하여 볼트는 연성 파괴 되었다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 분석 결과를 바탕으로 이번에 발생된 군용 궤도차량 디젤엔진의 파손은 최초 4번 커넥팅 로드 볼트의 풀림으로 인한 이탈과 파손이 연쇄적인 손상으로 이어져 발생되었던 것으로 판단되었다. 본 연구에서 수행한 엔진 고장원인분석 결과는 향후 타 장비의 유사한 엔진 고장 및 파손원인분석 연구에 참고사례 및 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract Tracked military vehicles are operated under harsher conditions and climates than ordinary vehicles, and the components require high degrees of reliability and durability. A diesel engine is the main power generator, and when the vehicle breaks down, there is a high possibility of causing a large-scale accident. Therefore, analyzing the cause of engine failure can be important for preventing similar cases that may occur. In this study, we clarified the mechanism of engine failure according to an overhaul test, hardness measurement, and an analysis of the fracture surface. The overhaul test confirmed that a bolt was separated from the connecting rod (number 4). In addition, the hardness measurement results of the connecting rod bolt conformed to the standard, and it was found that the bolt fracture was ductile fracture through an analysis of the fracture surface. Based on the results, it was concluded that damage to a diesel engine of a tracked military vehicle was caused by separating and damage caused by loosening of the connecting rod bolts, resulting in cascading damage. The results of the study could be used as reference examples and could be useful for another study on engine failure analysis.

Keywords: Diesel Engine, Damage, Fracture, Failure Analysis, Connecting Rod, Bolt

\*Corresponding Author: Dae San Oh(Defense Agency for Technology and Quality)

email: daesan@dtaq.re.kr Received March 26, 2020

Received March 26, 2020 Revised April 17, 2020 Accepted July 3, 2020 Published July 31, 2020

#### 1. 서론

디젤엔진은 전차, 장갑차, 자주포 등 군용 궤도차량에 탑재되어 매우 중요한 역할을 하는 동력발생장치라고 할 수 있다. 군용 궤도차량은 일반 차량보다 더 가혹한 주행 조건과 기후환경에서 운용 되므로 보다 높은 엔진의 내 구성과 강도가 요구된다[1-4]. 군용 궤도차량에서의 엔진 고장은 장비의 기동성능을 상실시켜 운용에 지장을 초래하는 중대한 품질문제로써 대형사고로 이어질 수 있다. 유사한 사례로는 군용 궤도차량의 변속기 제조공정에서 내구도 시험 간 조립 볼트의 파손으로 발생된 오일 압력 저하현상에 대한 고장원인분석 연구를 찾아볼 수 있다[5]. 이와 같이 엔진 고장 및 파손원인을 분석하는 과정 또한 향후 유사한 사례를 예방할 수 있는 중요한 연구가될 수 있다.

일반적으로 엔진 파손의 원인은 크게 마모와 손상, 기술적인 제품결함, 그리고 작동오류로 분류할 수 있다. 기술적인 제품결함은 설계, 소재, 제조상의 결함을 의미하며, 작동오류는 과부하(Overload), 사용 환경의 변화, 사용 미흡 등으로 구분할 수 있다. 또한, 파손의 유형은 기계적 하중, 과부하, 피로(Fatigue), 온도의 의한 손상(Damage), 수분에 의한 부식(Corrosion) 및 마찰(Tribology) 등으로 분류할 수 있다[6-8].

본 연구대상인 디젤엔진은 국내 엔진 제조업체에서 생산되어 군용 궤도차량에 조립 후 성능확인과 주행시험을 실시하여 납품되었으며, 운용 초기에는 엔진의 결함 및 손상 없이 정상적으로 작동되었으나, 수개월이 지난 시점 에서 차량 주행 중에 엔진 파손 현상이 발생되었다.

먼저 현장조사를 실시한 결과, Fig. 1의 (a)와 (b)에 나타낸 바와 같이 엔진 실린더 블록의 좌, 우측이 내부 부품의 이탈과 충돌로 인하여 심하게 파손되었으며, 파손된부위 외부에서는 시동 모터의 손상이 관찰되었다. 내부에서는 커넥팅 로드의 손상과 파손 및 내부 부품의 파편과조각들이 다량으로 검출되었다. 현장조사에서 파손 원인에 대한 검토는 제한적이므로 별도의 정밀 검사를 수행하기 위하여 파손 엔진을 실험실로 이송하였다.

이송된 파손 엔진에 대한 분해검사를 통하여 각 계통 별로 각 부품의 파손 유형을 검토하였고, 이를 통하여 최 초 손상 발생으로 추정된 4번 커넥팅 로드 볼트의 경도 측정, 파단면 분석, 조립부 검토 등을 통하여 해당 엔진의 파손 메커니즘을 규명하였다.

본 연구에서 수행한 군용 궤도차량에서 발생한 파손된 디젤엔진에 대한 고장분석 결과는 향후 타 장비의 유사 한 엔진 고장 및 파손 원인 분석 연구에 참고사례 및 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

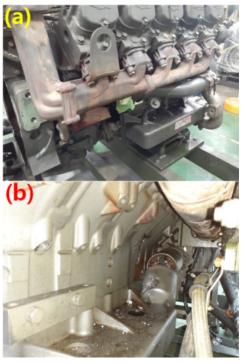


Fig. 1. Pictures of total failure of diesel engine for military tracked vehicle: On-site inspection

## 2. 엔진 분해검사 및 손상부품 분석

군에서 운영되고 있는 엔진 등의 장비 및 제품에서 고 장이 발생하면 원인규명을 위한 기술조사와 기술검토를 수행하여야 한다. 기술조사는 고장현상 및 제품 확인을 통하여 실시할 수 있고, 원인분석을 위하여 규격 및 기술 자료와 제품의 일치여부, 규격서상의 품질요구조건 이행 여부, 공정 및 가공기술, 취급 및 저장관리 상태와 같은 사용자 운용미흡사항 등의 기술검토를 실시한다[9].

또한, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 엔진 파손의 원인을 정확하게 규명하기 위해서는 현장조사, 손상부품과 파손 유형의 확인을 위한 검사 및 검토, 발생순서 및 파손 과정 판단 등의 과정을 수행하여야 한다[10].

먼저 각 부품의 손상 및 파손 유형를 확인하기 위하여 파손 엔진에 대한 분해검사를 수행하였다. 일반적으로 최초 1개 부품에서 파손이 발생하면 연속적으로 여러 다른 부품들의 손상까지 이어져 결국 전체 엔진의 파손으로

이어진다. 최초 파손 부품과 정확한 원인 파악을 위해서 손상부품들의 파손상태를 확인하고 파손순서를 결정하는 과정은 필수적이며, 엔진 고장분석을 위한 첫 단계라고 말할 수 있다.

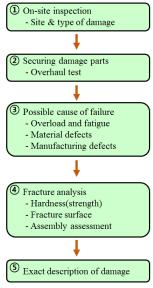


Fig. 2. Schematic flow of engine failure analysis process

먼저, 분해검사 및 분석 결과를 효과적으로 정리하기 위하여 엔진 실린더 및 각 실린더에 조립 및 해당되는 부품 번호를 DIN 73021 Designation of the rotational direction, the cylinders and the ignition circuits of motorcar engines 에 따라 할당하였다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 실린더는 연속적으로 번호가 매겨지며 출력축 반대편에서 관찰자에 가장 가까운 왼쪽 실린더에 숫자 1이 할당되고 연속적인 숫자가 다음 실린더에 지정된다. 1번 실린더는 숫자 1로 식별된다[11].

그리고 디젤엔진의 주요 구성부품을 기구 및 장치별로 분류하였고 이를 Fig. 3에 나타내었다. 디젤엔진은 크게 기관본체, 크랭크기구, 밸브기구, 혼합기형성기구, 보조 장치 등으로 구성되어 있으며[10,12], 이와 같이 분류한 항목별로 엔진 분해검사 결과를 기록하고 분석을 수행하였다. 엔진 분해검사는 대부분 육안검사로 이루어지며, 검사 중에 특이점이 발견되거나 필요시에는 별도의 시험 등과 같은 세부적인 분석을 추가적으로 실시하였다.

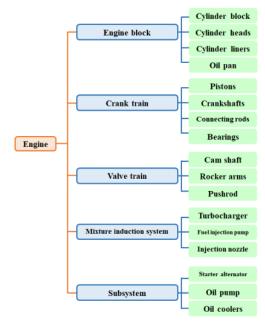


Fig. 3. Basic structure of diesel engine

#### 2.1 기관본체

먼저 기관본체는 실린더 블록, 실린더 헤드, 실린더 라이너, 오일 팬으로 분류하였고, 손상유형과 파손형태를 분석하였다.

Fig. 4는 실린더 블록의 손상 모습을 보여준다. 크랭크케이스 측의 4번과 9번 실린더 부위가 심하게 파손됨이 관찰되었다. 이것은 현장조사 시 확인된 피스톤과 커넥팅 로드 등 내부부품의 이탈로 인한 충격으로 발생된 2차 손상으로 판단되며, 그 외 부분에서는 손상의 흔적은 관찰되지 않았다.



Fig. 4. Picture of broken cylinder block

실린더 블록의 파손된 위치에 조립된 4번과 9번 실린 더 헤드 조립체의 탈거된 모습을 Fig. 5에 나타내었다. 실린더 헤드뿐만 아니라, 흡·배기 밸브 및 스프링에서는 변형과 손상 및 특이점이 발견되지 않았고, 나머지 실린 더 헤드도 그와 동일하였다.



Fig. 5. Pictures of cylinder heads(number 4, 9)

Fig. 6은 실린더 블록에 조립된 실린더 라이너의 외관상태를 보여준다. 4번과 9번 실린더 라이너를 제외한 1~3번, 5~8, 10번 실린더 라이너에는 피스톤과의 소착흔적은 없었다. 특히 피스톤 링과 접촉되는 내부 표면에서도 긁힘, 부식, 마모 등의 특이점은 관찰되지 않았으며 공동현상(Cavitation) 및 미세균열(Micro crack)도 확인되지 않았다. 이것은 엔진 작동간 정상적인 윤활과 마찰운동이 이루어졌으며, 냉각과정에도 문제가 없었음을 의미한다[13].

하지만 4번과 9번 실린더 라이너에서는 심한 하부 깨 짐과 손상이 있었고, 9번 실린더 라이너에는 파괴된 피스 톤 헤드부가 소착되어 있었다. 하부 깨짐은 커넥팅 로드에 의한 2차 손상으로 추정이 되지만 소착이 발생한 원인을 파악하기 위하여 피스톤의 손상범위와 파손형태 확인이 필요하였다. 그에 대한 결과는 2.2에서 기술하였다.



Fig. 6. Pictures of cylinder liners: Broken(number 4, 9), Unbroken(number 1~3, 5~8, 10)

Fig. 7은 오일 팬의 분해모습이며 오일펌프 등 손상된 내부 부품들의 조각과 파편들이 혼재되어 있었다. 오일 팬의 파손된 부위는 4번 실린더 측이며 내부 부품의 이탈로 인한 2차 손상으로 판단된다.



Fig. 7. Picture of broken oil pan

## 2.2 크랭크기구

크랭크기구는 피스톤, 크랭크축, 커넥팅 로드, 메인베 어링 및 커넥팅 로드 베어링으로 분류하였고 손상범위와 파손형태를 분석하였다.

Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 1~3번, 5~8, 10번 피스 톤의 헤드, 랜드, 스커트 등 각 부위에서 긁힘, 소착, 균열 등과 같은 손상은 관찰되지 않았다. 4번 피스톤은 스커트 부가 심하게 파손되었으며, 9번 피스톤은 실린더 라이너 에 소착된 헤드부를 제외하고 모두 파손되었다. 4번과 9번 피스톤은 전형적인 소착으로 인한 파손모습을 보여주고 있다.

그러나 1~10번 모든 피스톤의 연소실에서는 과열 연소로 인한 녹음 흔적과 불완전 연소에 의한 과도한 탄소퇴적은 관찰되지 않았다. 이것은 4번과 9번 피스톤의 소착현상은 엔진작동 간 발생할 수 있는 실린더 내부의 비정상적인 연소 및 피스톤 자체의 냉각불량 때문은 아니었다는 것을 보여준다[14].



Fig. 8. Pictures of broken pistons(number 4, 9) and unbroken bowl of pistons(number 1~3, 5~8, 10)

엔진 실린더 블록의 크랭크 케이스에서 탈거된 크랭크 축의 손상상태를 관찰한 모습을 Fig. 9에 나타내었다. 크랭크축의 핀과 저널 부에서 전반적으로 긁힘과 마모 흔적이 확인되었으며 특히 4번과 9번 커넥팅 로드가 조립되는 크랭크 핀 부위에서는 심한 소착과 열화 흔적이 존재하였다. 이것은 크랭크축 각 부위에 마찰되는 Fig. 10에 나타낸 메인 베어링과 Fig. 11에서 나타낸 커넥팅 로

드 베어링 표면에서도 동일한 현상이 나타났다.



Fig. 9. Picture of damaged crankshaft



Fig. 10. Pictures of severe seized main bearings

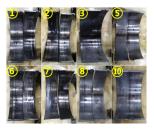


Fig. 11. Pictures of damaged connecting rod bearings

1~3번, 5~8, 10번 커넥팅 로드를 베어링 캡과 볼트와 분리하여 관찰한 모습을 Fig. 12에 나타내었으며 해당 커넥팅 로드에 조립되는 피스톤과 마찬가지로 모든 부위 에서 변형과 손상의 흔적 등 특이점은 확인되지 않았다.

하지만 Fig. 13에서 나타낸 바와 같이 4번 커넥팅 로드는 엔진 파손과정에서 베어링 캡 및 2개의 조립 볼트와 이미 분리되어 크랭크축으로 부터 이탈된 상태였으며, 베어링 캡과 커넥팅 로드의 소단부(Small end) 및 대단부(Big end)에서 2차 충돌에 의한 손상과 로드부(Rod)의 심한 변형이 확인되었다. 또한, 9번 커넥팅 로드는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 베어링 소착에 의한 크랭크축과의 눌어붙음과 볼트의 손상으로 분해 및 분리가 불가능하였으며, 로드부의 매우 심한 휨이 관찰되었다.

이와 같은 4번 커넥팅 로드의 분리 및 이탈과 9번 커넥팅 로드의 극심한 변형이 결국 Fig. 4의 실린더 블록과 Fig. 7의 오일 팬의 파손을 야기했다고 판단된다.



Fig. 12. Pictures of undamaged connecting rods(number 1~3, 5~8, 10)

Fig. 13에서는 4번 커넥팅 로드에서 이탈된 2개의 조립 볼트를 (a)와 (b)로 구분하여 나타내었다 (a)와 (b)볼 트의 머리부와 플랜지부에서는 충돌에 의한 손상이 동일하게 관찰되었으나, 체결부의 손상상태는 서로 상이함이확인되었다. (a)볼트는 나사부에서 파단되어 파손되었고, (b)볼트는 휘어지는 변형과 나사산의 마모가 확인되었지만, 파단은 관찰되지 않았다.

이를 통하여 2가지 파손 메커니즘을 가정할 수 있었다. 첫 번째는 소재 및 제조상의 결함으로 인한 미세균열 전파로 (a)볼트의 파단이 먼저 발생되어 이탈하였고, 남아있던 (b)볼트가 응력집중에 의한 변형과 함께 분리 및이탈이 발생을 했다는 추정이다.

두 번째는 (b)볼트가 먼저 분리되어 이탈되고 조립된 (a)볼트에 인장강도를 초과하는 하중 등의 과부하가 걸려서 파괴로 이어졌다는 추정을 할 수 있다. 이런 2가지로 가정된 메커니즘에 대한 정확한 판단 및 더 나아가 엔진의 고장원인을 결정하기 위해서는 2가지 가정에 대한 구체적인 분석 및 검토가 필요하였다.

그리하여 볼트와 커넥팅 로드의 소재 및 제조상 결함을 판단하기 위하여 기계적 특성(경도)을 측정하였고, 규격 값과 비교하였다. 그리고 (a)볼트의 파단면 분석과 (b) 볼트의 조립부 검토를 수행하여 그 결과를 3장에서 기술하였다.



Fig. 13. Connecting rod(number 4), separated and damaged bearing cap: (a)Separated fractured bolt, (b)Separated deformed bolt

#### 2.3 밸브기구, 혼합기형성기구, 보조장치

밸브기구는 캠축, 로커암, 푸쉬로드로 분류하였고, 파손정도와 형태를 분석하였다. 캠축과 푸쉬로드의 경우 4번과 9번 실린더에 해당된 부위의 손상 및 변형이 관찰되었으며 커넥팅 로드에 의한 2차 손상으로 판단된다. 로커암의 외관 및 회전상태는 양호하였으며 특이점은 확인되지 않았다.

두 번째로 혼압기형성기구는 터보차저, 연료분사펌프, 분사노즐로 분류하였고, 그 파손정도와 형태를 분석하였다. 3가지 부품 모두 외관상 누유 발생 흔적 및 손상은 관찰되지 않았다.

마지막으로 그 외 보조 장치를 시동 모터, 오일펌프, 오일쿨러로 분류하였고, 엔진에서 탈거하여 파손정도와 형태를 분석하였다. 그 결과, 커넥팅 로드 파손과 돌출로 인한 2차 손상으로 판단된다.

# 3. 엔진 파손원인분석

먼저, 효과적인 분석을 위하여 품질문제의 원인분석 및 해결방법으로 사용되는 5Why 분석기법을 적용하여 Fig. 14에 나타내었고 이와 같은 과정을 바탕으로 엔진 파손에 대한 원인분석을 수행하였다.

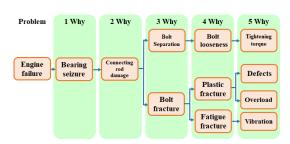


Fig. 14. Schematic flow of failure cause analysis according to 5Why methods

#### 3.1 커넥팅 로드 볼트의 경도 측정

2장에서 기술한 바와 같이 엔진의 파손은 Fig. 13에 나타낸 4번 커넥팅 로드 볼트에서 비롯된 것으로 추정할 수 있었다. 따라서 (a), (b)볼트와 커넥팅 로드의 경도 측정을 수행하여 규격과의 적합성을 확인하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Results of hardness measurement of connecting rod(number 4) and bolts

Section	Criteria	Value
Fig. 13 (a) Bolt	HRC 32 ~ 38	HRC 36
Fig. 13 (b) Bolt	HRC 32 ~ 38	HRC 35.2
Connecting Rod	HB 269 ~ 302	HB 281

Table 1에서 나타내듯이 파손된 (a)볼트, 변형된 (b) 볼트 및 커넥팅 로드의 경도가 규격에 적합함을 확인할수 있다. 이것은 (a)볼트의 파손과 (b)볼트의 변형은 제조 및 소재의 결함 때문이 아니라는 것을 보여준다. 따라서 다른 외부적인 요인에 의하여 커넥팅 로드 볼트의 파손이 야기된 것으로 판단되었다. 또한, 정확한 파손의 원인을 규명하기 위하여 (a)볼트의 파단면 분석이 필요하였다.

#### 3.2 커넥팅 로드 볼트의 파단면 분석

Fig. 13의 (a)에서 나타내었던 파손된 커넥팅 로드 볼 트의 파단면 분석을 수행하였다. 볼트 파손 부위를 Fig. 15의 (a)로 나타내었고, 볼트 파손 부위의 파단면을 육안으로 Fig. 15의 (b)와 같이 관찰하였다. 우선 Fig. 15의 (b)에서 나타낸 바와 같이 차량 및 엔진의 진동에 의하여 발생하였을 것으로 예상되는 해안선 자국(Beach mark), 즉 피로파괴 양상은 관찰되지 않았다.

일반적으로 피로파괴 면에서 관찰할 수 있는 해안선 자국은 장비 가동 시 부하의 변화, 진동수의 변화 또는 부품의 단속적 사용으로 인하여 균열정지 기간 동안에 생긴 파단면의 산화 및 부식정도의 차이에 의하여 발생 하는 것으로써 육안으로 구별할 수 있는 피로파손의 중 요한 특징이라고 할 수 있다[15].

또한, 취성파괴의 전형적인 형상으로 벽개파괴 (Cleavage fracture) 형태인 물결무늬(River pattern) 도 확인되지 않았다.

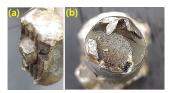


Fig. 15. Magnified view of (a)fragment and (b)fracture surface of connecting rod(number 4) bolt

하지만 피로파괴뿐만 아니라 연성파괴와 취성파괴를 구체적으로 판단하기 위하여 Fig. 16과 같이 주사전자현 미경(SEM, Scanning electron microscope)으로 관찰함으로써 파단면의 딤플(Dimple) 형성 여부와 피로 줄무늬(Fatigue striation) 발생 여부를 확인하였다.

파단면 상에 형성되는 소성변형의 형태는 소재에 내재된 산화물, 탄화물, 질화물 등 1 때이하 크기 입자에 의하여 유발되는 것으로 알려져 있다. 입자는 기지만큼 쉽게 변형될 수 없기 때문에 입자주위에 심한 소성변형이 발생되면 기지와의 정합을 잃게 된다. 이로 인하여 작은 공동이 생기고 이것이 슬립(Slip)에 의하여 성장한다. 이와같은 미소 공동의 발생, 성장 합체에 의하여 연성파괴가발생되기 때문에 파단면에는 딤플이라는 독특한 요철부가 형성된다[16-17].

또한 피로파괴를 확인할 수 있는 수 때이하 간격의 피로 줄무늬는 부품 또는 장비에 가해지는 사용 중의 반복하중 중에서 일회의 응력 주기(인장-인장, 인장-압축, 압축-압축, 굽힘-굽힘 등)에 의하여 만들어지는 것으로써, 균열 면에 가해지는 최대 인장응력 등에 의해 균열 면에 전선의 전진과 닫힘이 반복됨으로써 형성된다[18].

Fig. 17의 (a)와 (b)는 Fig. 16의 (a), (b) 위치에서 얻어진 주사전자현미경의 파단면 확대 사진이다. 대부분의 파단면에서 상당한 소성변형 진행에 의하여 형성된 딤플이 대다수 관찰되었고 피로 줄무늬는 확인되지 않았다.

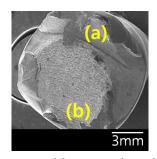


Fig. 16. SEM image of fracture surface of connecting rod(number 4) bolt

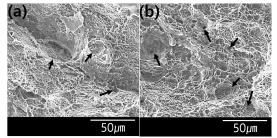


Fig. 17. SEM images of dimple in fracture area of connecting rod bolt: Fig 14. (a), (b) site.

이렇게 파손된 커넥팅 로드 볼트의 파단면을 분석한 결과 연성파괴의 양상이 존재하고 피로를 포함한 취성파괴의 흔적이 없는 것으로 볼 때 흔히 진동 또는 지속적인 외부 압력 등에 의해 발생하는 피로균열의 가능성은 적다고 할 수 있다. 또한 3.1에서 측정하였던 경도는 규격에 적합하였고, 볼트 표면 부에서도 비정상적인 특이점이 발견되지 않았으므로 커넥팅 로드 볼트의 외부에서 작용된 과부하, 즉 연성파괴에 의하여 볼트가 파손되었다고 판단된다.

#### 3.3 커넥팅 로드 볼트 조립부 및 종합 검토

Fig. 18은 커넥팅 로드에서 분리되어 이탈된 볼트의 수나사 부위와 볼트가 조립되어 있었던 커넥팅 로드의 암나사 부위를 절단 후 비교하여 관찰한 모습이다. 수나 사의 손상된 나사산 수와 암나사 수는 약 9개로 서로 일 치하였고 암나사 측 일부 구간에서는 수나사와 반복하여 충돌한 흔적이 확인되었다.



Fig. 18. Magnified view of the thread galling of connecting rod(number 4) bolt

본문 3.1과 3.2에서 기술하였듯이 다른 커넥팅 로드 볼트의 파손원인은 볼트 자체의 결함보다는 과부하로 판 단되었다. 그러므로 분리된 커넥팅 로드볼트가 엔진작동 중에 먼저 풀림이 발생되었다고 볼 수 있다.

따라서 볼트가 풀림에 따라 수나시와 암나사의 반복적 인 충돌에 의하여 나사산이 마모 및 손상되었으며 잔존 하던 나사산이 엔진의 팽창력과 관성력을 견디지 못하는 시점에서 나사산 모두를 변형시키며 볼트가 이탈되었다 고 판단된다. 1개의 볼트가 이탈됨에 따라 다른 커넥팅 로드 볼트에는 인장강도를 초과하는 하중이 작용되었고, 결국 파손이 발생이 되었다고 할 수 있다.

이러한 커넥팅 로드 볼트의 풀림이 발생한 원인은 조 립공정간 조임토크의 부적합 및 누락 또는 이물질유입으 로 인한 조임토크 손실로 추정할 수 있다.

지금까지 분석한 결과를 바탕으로 주행 중 발생한 군 용 궤도차량 엔진의 파손 메커니즘을 Fig. 19에 나타내 어 제시하였다. 엔진 파손 과정을 다음과 같이 추정할 수 있다. ①먼저 엔진 작동간 4번 커넥팅 로드에 조립된 1개 의 볼트에서 미세 풀림이 발생하였다. ②미세 풀림에 의 하여 볼트의 수나사와 커넥팅 로드의 암나사 간에 반복 적인 접촉과 마찰에 의한 ③마모로 풀림은 지속되었다. ④볼트가 풀리는 과정에서 주변 부품과의 충돌로 휨 같 은 변형이 발생되었고 ⑤1개의 볼트가 완전히 풀려서 분 리됨에 따라 조립되어 있던 다른 1개의 볼트가 엔진의 팽창력과 관성력을 지탱하게 된다. ⑥결국 다른 1개의 볼 트는 엔진의 팽창력과 관성력을 견디지 못하고 연성파괴 로 파손되었다. ⑦풀림과 파손으로 이탈된 2개의 볼트 뿐 만 아니라 분리된 커넥팅 로드와 베어링 캡은 내부의 주 변 부품과 충돌하여 연쇄적인 파손을 발생시켰고, ⑧파손 된 파편 및 이물질에 의한 베어링 소착 등의 심각한 2차 손상을 발생시켰다. 결론적으로 엔진의 주요 고장원인은 최초 4번 커넥팅 로드 볼트의 풀림에 의하여 시작이 되 었다고 판단할 수 있다.

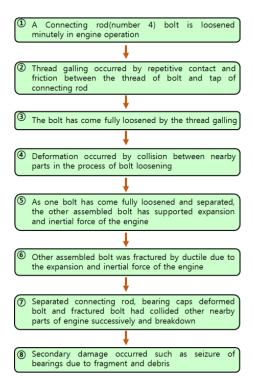


Fig. 19. Schematic flow of engine failure mechanism

#### 4. 결론

본 연구에서는 군용 궤도차량 주행 간에 발생한 디젤 엔진의 파손에 대한 원인분석을 수행하였으며, 다음과 같 은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1. 파손 엔진의 분해검사를 수행한 결과 4번 커넥팅 로드 볼트에서 최초 손상이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 다른 부품들의 파손은 4번 커넥팅 로드 볼 트의 파손과 이탈로 야기된 2차 손상이라는 것을 확인할 수 있었다.
- 2. 커넥팅 로드와 2개의 볼트에 대한 경도 측정결과, 소재 및 제조의 결함은 없었던 것으로 판단된다. 또한 SEM을 통한 파손된 볼트의 파단면 분석을 통 해 인장강도 이상의 하중에 의하여 연성파괴가 된 것을 확인할 수 있었고, 변형된 볼트의 조립부에서 마모된 나사산을 확인하여 볼트의 풀림이 최초 발 생하였다는 것을 추정할 수 있었다.
- 3. 결국, 4번 커넥팅 로드에 조립된 1개의 볼트 풀림 으로 나머지 1개의 볼트가 엔진의 팽창력과 관성력 을 버티지 못하고 파괴되어 주변 부품들의 연쇄적 인 손상을 야기해 결국 엔진 파손으로 이어졌다고 판단된다.
- 4. 커넥팅 로드 볼트의 풀림은 엔진 조립 공정 간 조임 토크가 부적합 및 누락되어 적용되었거나, 이물질 유입으로 인한 조임토크 손실로 추정된다.

#### References

- [1] G. H. Jung, S. G. Sin, C. H. Park, and D. S. Oh, "Military Engine Process Improvement for Visualization and Increasing Discrimination of Oil Leak", *Proceeding of 2019 Spring Season Korean Society Of Automotive Engineers*, The Korean Society Of Automotive Engineers, Jeju, Korea, pp. 1349, May 2019
- [2] J. H. Yun, I. G. Jeong, C. S. Yi, J. S. Suh, and T. E. Lee, "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics of Cooling Fan in the Generator a Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle", *Proceeding of 2011 Spring Season Korean Society Of Automotive Engineers*, The Korean Society Of Automotive Engineers, Jeju, Korea, pp. 304-308, May 2011.
- [3] D. S. Oh, G. H. Jung, S. H. Seo, and C. H. Park, "Military Engine Quality Securing Plan between Engine Performance Test according to Applying Fluorescent Dye", *Proceeding of 2019 Fall Season*

- Korea Society for Quality Management, The Korea Society for Quility Management, Incheon, Korea, pp. 2018, September, 2019.
- [4] S. H. Seo, J. H. Kim, and D. S. Oh, "Process Improvement of Land System Engine for Visualization and Increasing Identification of Engine Oil Leakage", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 321–327, Mar. 2020. DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS2020.21.3.321
- [5] H. M. Beak, H. M. Kim, T. W. Kang, Y. H. Heo, K. I. Son, and K. R. Kim, "Failure Analysis of the First Article Endurance Tests of 1,500 HP Transmission", *Journal of Defense Quality Society*, Vol. 1, No. 2, pp. 68-85, Jun. 2019.
- [6] F. S. Silva, "Fatigue on Engine Pistons A Compendium of Case Studies", Engineering Failure Analysis, Vol. 13, No. 23, pp. 480-492, March, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.023
- [7] A. Vencl, A. Rac, "Diesel Engine Crankshaft Journal Bearings Failures: Case Study", Engineering Failure Analysis, Vol. 22, No. 5, pp. 217-228, May, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.014
- [8] N. D. S. A. Santos, V. R. Roso, and M. T. C. Faria, "Review of Engine Journal Bearing Tribology in Start-stop Applications", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 108, No. 104344, pp. 1-16, November, 2019. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104344">https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104344</a>
- [9] Defense Acquisition Program Administration,
   "Defense Acquisition Quality Control Provision", pp. 22-24, Defense Acquisition Program Administration, 2019.
- [10] E. Greuter and S. Zima, "Engine Failure Analysis: Internal Combustion Engine Failures and Their Causes", p. 1-185, SAE International, 2012.
- [11] Deutsches Institute for Normung e. V., DIN 73021, "Designation of the Rotational Direction, the Cylinders and the Ignition Circuits of Motorcar Engines", June, 1953.
- [12] J. L. A. Ferreira, A. B. S. Oliveira, A. B. Souza, V. G. Carloni, and D. A. Leite, "Structural Integrity Analysis of the Main Bearing Cap Screws of the Turbo-diesel Engine Crank Shaft", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No. 3, pp. 273-286, November, 2004. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.03.011">https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.03.011</a>
- [13] G. A. Zade and D. D. Gadekar, "Accelerated Simulation of Engine Wet Cylinder Liner Cavitation Test Procedure", Symposium on International Automotive Technology, The Automotive Research Association of India, Pune, India, pp. 313-319. May, 2007.
- [14] O. P. Singh, Y. Umbarkar, T. Sreenivasulu, E. Vetrivendan, M. Kannan, and Y. R. Babu, "Piston Seizure Investigation: Experiments, Modeling and Future Challenges", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 28, No. 5, pp. 302-310, November, 2012.
  DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.11.005

[15] O. Asi, "Fatigue Failure of a Helical Gear in a Gearbox", Engineering Failure Analysis, Vol. 13, No. 7, pp. 1116-1125, September, 2005.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.020

- [16] H. Somekawa, K. Nakajima, A. Singh, and T. Mukai, "Ductile Fracture Mechanism in Fine-grained Magnesium Alloy", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 90, No. 11, pp. 831-839, February, 2010. DOI: https://doi.org/10.1080/09500839.2010.508444
- [17] K. Srinivasan, O. Kolednik, and T. Siegmund, "A Micromechanics-based Model for Micro-toughness Estimation from Dimple Geometry Measurements", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, No. 7, pp. 1323-1343. September, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.07.004
- [18] J. B. Marcomini, C. A. R. P. Baptista, J. P. Pascon, R. L. Teixeira, and F. P. Reis, "Investigation of a Fatigue Failure in a Stainless Steel Femoral Plate", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 38, No. 11, pp. 52–58, July, 2014.
  DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.06.011

#### 오 대 산(Dae San Oh)

### [정회원]



- 2013년 8월 : 연세대학교 기계공 학 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 서울과학기 술대학교 자동차공학과 (박사과정)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 선임연구원

〈관심분야〉 디젤엔진 흡기 유동, 연료분사 제어, 트라이볼로지

#### 김 지 훈(Ji Hoon Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 숭실대학교 유기신 소재·파이버 공학과(공학학사)
- 2015년 2월 : 숭실대학교 유기신 소재·파이버 공학과(공학석사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 연구원

〈관심분야〉 국방품질경영, 신소재공학, 재료공학

# 서 석 호(Suk Ho Seo)

### [정회원]



- 2015년 2월 : 충남대학교 재료공 학과(공학학사)
- 2017년 2월 : 충남대학교 신소재 공학과(공학석사)
- 2017년 12월 ~ 현재 : 국방기술품

질원 연구원

〈관심분야〉 국방품질경영, 신소재공학, 금속재료공학