

선박 엔진 실린더 커버 스테드 볼트의 체결력 부족에 따른 취약부 응력 변화와 피로 수명에 관한 연구

Study on Stress Changes and Fatigue Life Due to Insufficient Pretension of Stud Bolts in Marine Engine Cylinder Covers

최혜진* · 박상균** †

Hyejin Choi* and Sang-Kyun Park** †

(Received 24 March 2025, Revision received 18 June 2025, Accepted 18 June 2025)

초록 : 본 연구는 스테드 볼트의 체결력 감소가 응력 집중과 피로 수명에 미치는 영향을 분석하기 위해, 체결력을 각각 100%, 98%, 그리고 95%로 설정한 후, 연소실의 최대 폭발 압력을 스테드 볼트에 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과, 체결력 100%에서는 최대 응력 592.71 MPa, 안전율 1.49가 확인되었으며, 피로 수명도 가장 높았다. 체결력이 98%로 감소하면 최대 응력은 599.5 MPa로 증가하고, 응력 집중 위치는 하단 체결부로 이동하며, 피로 수명은 감소하였다. 체결력이 95%일 경우 최대 응력은 608.55 MPa로 증가하였으나, 98% 체결 시보다 피로 수명이 약 1.5배 늘었다. 이는 응력 집중이 국부적으로 분산된 결과로 판단된다. 그러나 100% 체결 시보다는 피로 수명이 감소하였기 때문에, 결과적으로 체결력이 충분히 확보되지 않으면 최대 응력은 증가하고, 안전율은 감소하며, 응력 집중 계수는 커지는 것으로 나타났다. 이를 통해 적절한 체결력의 유지가 응력 상승과 집중에 기인한 스테드 볼트의 파단을 예방하고, 대형 엔진 운전의 안정성 확보에 필수적임을 다시 한번 확인하였다.

키워드 : 실린더 커버, 스테드 볼트, 체결력, 유한요소해석, 응력 집중

Abstract : This study examines the impact of reduced pretension on stress concentration and fatigue life in stud bolts. Finite element analysis was performed with pretension levels of 100%, 98%, and 95%, applying maximum combustion explosion pressure. At 100% pretension, the maximum stress was 592.71 MPa, the safety factor was 1.49, and fatigue life was the highest. At 98% pretension, the maximum stress increased to 599.5 MPa, stress concentration shifted to the lower thread section, and fatigue life decreased. At 95% preload, the maximum stress further increased to 608.55 MPa; however, fatigue life was about 1.5 times higher than that under 98% preload, attributed to localized stress dispersion. Nevertheless, it was still lower than that under 100% preload. These results confirm that insufficient preload leads to increased stress, reduced safety factor, and higher stress concentration. Therefore, maintaining appropriate preload is essential to prevent stud bolt failure and ensure the safe operation of large marine engines.

Key Words : Cylinder Cover, Stud Bolt, Pretension, FEA, Stress Concentration

** † 박상균(<https://orcid.org/0000-0002-1869-3015>) : 교수,
국립한국해양대학교 해사인공지능·보안학부

E-mail : skpark@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4579

*최혜진(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>) : 박사과정,
국립한국해양대학교 해사IT공학과

** † Sang-Kyun Park(<https://orcid.org/0000-0002-1869-3015>) :
Professor, Division of Maritime AI & Cyber Security, National
Korea Maritime & Ocean University.

E-mail : skpark@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4579

*Hyejin Choi(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>) : Ph.D.
Candidate, Department of Marine Information Technology,
National Korea Maritime & Ocean University.

1. 서 론

선박엔진의 실린더 커버 스테드 볼트는 고온, 고압 환경에서 실린더헤드와 가스켓, 블록을 밀착시켜 연소실을 형성하는 중요한 부품이며 가스누출을 방지한다.

이러한 응력 변동으로 인한 파손을 방지하기 위해 일반적으로 스테드 볼트에는 예하중(Pretension) 또는 체결력이 가해진다. 이는 응력 변동의 크기를 줄여 피로 수명을 연장하는 효과가 있다. 체결력이 높을수록 나사산과 결합면이 더 강하게 밀착되어 응력 집중이 완화되지만, 반대로 체결력이 낮으면 특정 부위에 응력이 집중될 가능성이 커져 스테드 볼트에 피로 균열이 발생하기 쉬워진다.¹⁾

특히 엔진이 대형화 될수록 볼트에 작용하는 하중이 증가하기 때문에, 연소실에서 반복적으로 발생하는 최대 폭발 압력으로 인해 스테드 볼트가 파손되지 않도록 적절한 체결력의 적용은 필수적이다.

실린더커버 스테드 볼트와 관련하여 지속적인 학술활동으로 대형엔진 실린더 커버 스테드 볼트의 강도평가²⁾와 하중의 특성을 고려한 피로파괴 안정성에 관한 연구³⁾ 및 진동⁴⁾ 해석에 관한 연구 등이 진행되었다.

하지만 볼트의 나사산 주변에 불연속부가 존재하여 해당 부위에 높은 응력집중이 발생하며, 실제 스테드 볼트 파손의 대부분이 이 위치에서 발생하는 것으로 보고되고 있다.^{1,3)} 그러나 기존 연구들은 체결력 부족과 스테드 볼트의 응력 집중의 상관관계를 구체적으로 다루지는 않았다.

이에 따라 본 연구에서는 스테드 볼트가 체결력의 100%, 98%, 그리고 95%로 체결된 상태에서 실린더 폭발 하중에 노출될 때, 어느 부위에서 응력 집중이 가장 크게 발생하는지를 유한요소해석 프로그램(3D 모델링)을 통해 분석하였다. 또한 해당 부위의 응력 변화와 피로 수명을 평가하며, 이를 통해 적절한 체결력 적용이 스테드 볼트의 건전성 확보에 중요한 요소임을 다시 한번 강조하고자 한다.

2. 연구내용

2.1 연구방법

본 연구에서는 6500 TEU급 대형 컨테이너선에 탑재된 2행정 내연기관의 실린더 커버 스테드 볼트를 연구 대상으로 선정하였다. 해당 스테드 볼트는 하나의 실린더에 8개가 배치되며, 유압 조임장치를 이용해 체결된다. 재료는 고장력 합금강인 SNCM439 (FIS G 4103, KS D 3709)을 사용하였다.^{3,4)}

연구방법은 Fig. 1과 같다. 스테드 볼트에 작용하는 정하중과 동하중을 이론식으로 계산하고, 도면을 바탕으로 3D 모델을 완성하였다. 이후 유한요소해석을 통해 체결력 100% 조건에서 이론값과의 비교로 모델의 신뢰성을 검증하였고, 체결력 부족 상태를 설정한 뒤 최대 폭발 압력을 가해 응력 취약부 및 피로수명 변화를 분석하였다.

실제 선박에서 정비 시 체결 토크의 편차 등으로 인해 일부 스테드 볼트의 체결력이 저하되는 사례가 보고됨에 따라,¹⁾ 본 연구에서는 실린더커버에 체결되는 스테드 볼트 8개 중 1개가 풀린 상태를 가정하였으며, 연소실의 폭발 압력이 스테드 볼트에 균등하게 전달된다고 가정하였다.

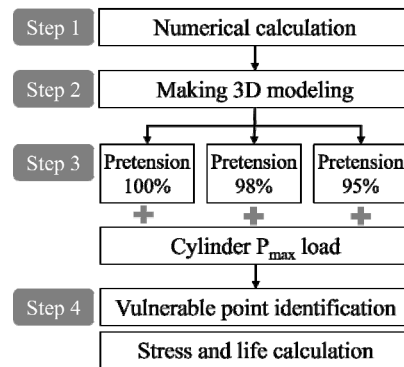


Fig. 1 Methodology

2.2 응력 계산

본 절에서는 스테드 볼트 하나에 작용하는 초기 체결력과 최대 폭발 압력, 그리고 이에 따른 변동 응력의 이론식을 서술한다.

1) 초기 체결력과 응력

유압잭에 의한 초기 체결력 F_i 는 유압잭 외경과 내경을 각각 d_2 과 d_1 이라 하고 유압잭의 압력을 P 라 할 때 식 (1)과 같이 계산되며, 제작사 정보를 활용하여 체결력 F_i 은 3.768×10^6 N으로 확인되었다.

$$F_i = P \times \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \quad (1)$$

이때 스테드 볼트에 발생하는 인장응력 σ_{pre} 은 스테드 볼트의 직경을 d 라 할 때 다음 식 (2)와 같이 계산되며, 그 값은 333.33 MPa 이었다.

$$\sigma_{pre} = \frac{F_i}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (2)$$

2) 연소실 최대폭발압력(Pmax)과 응력

스테드 볼트가 노출되는 변동 응력의 최댓값은 연소실의 최대 폭발 압력이 주요 원인이다. 그러나 이 압력에 의해 발생하는 모든 힘이 스테드 볼트로 직접 전달되는 것은 아니다. 연소실 압력은 실린더 커버를 통해 실린더 블록으로 힘을 전달하는 매개체 역할을 하며, 스테드 볼트는 실린더 커버가 밀려 올라가는 것을 방지하는 역할을 한다. 실린더 블록 또한 스테드 볼트와 함께 폭발 하중을 지탱하고 있기 때문에, 두 부품의 스프링 강성 k_1 과 k_2 가 동일하다고 가정하면, 강성 이론에 따라 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 정리할 수 있으며, 폭발 하중의 절반이 스테드에 전달된다.

$$1/k_c = 1/k_1 + 1/k_2 = 2/k_1 \quad (3)$$

$$k_c = k_1/2 \quad (4)$$

실린더 직경 980 mm와 식 (5)를 이용하여 연소실의 최대 폭발압력을 힘으로 환산한 결과, F_{cyl} 는 10.35×10^6 N으로 계산되었다. 스테드 볼트 하나

에 작용하는 최종 힘 F_{stud} 은 식 (6)에 따라 6.46×10^5 N이었으며, 스테드 볼트 직경 120 mm와 식 (7)을 고려하여 최종적으로 스테드 볼트에 발생하는 응력 σ_{stud} 는 57.22 MPa로 산출되었다.

$$F_{cyl} = P_{max} \times A_{cyl} \quad (5)$$

$$F_{stud} = \frac{F_{cyl}}{2 \times N_{stud}} \quad (6)$$

$$\sigma_{stud} = \frac{F_{stud}}{A_{stud}} \quad (7)$$

3) 스테드 볼트의 변동응력

스테드 볼트는 기본적으로 체결력에 의한 최소 응력과 연소실 폭발에 의해 추가로 발생하는 응력이 합쳐져, Fig. 2와 같은 변동응력 특성을 갖는다.

이에 따라, 앞서 계산한 값을 바탕으로 스테드 볼트 하나가 노출되는 변동응력의 최소 변동 응력은 333.33 MPa, 최대 변동응력은 추가응력 57.22 MPa이 더해진 390.55 MPa이며, 평균응력, 교번응력, 응력비 등은 Table 1과 같다.

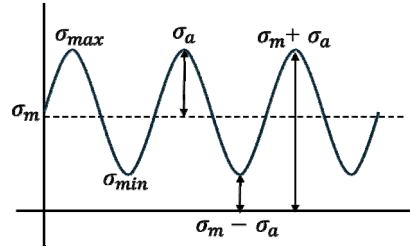


Fig. 2 Stress characteristic on stud bolt

Table 1 Values of stress

σ_{min}	333.33	MPa
σ_{max}	390.55	MPa
σ_{mean}	361.94	MPa
$\sigma_{alternating}$	28.61	MPa
R	0.85	-

4) 피로수명 평가방법

재료에 항복강도 이하의 응력이 반복적으로 작용하여 발생하는 현상을 피로(fatigue)라 하며, 이로 인한 파단을 피로파괴(fatigue failure)라고 한다. 피로파괴가 발생하기까지 견딘 반복 하중의 횟수(N)를 피로수명(fatigue life)이라 하며, 이는 식 (8)과 같이 계산된다. 여기서 a 와 b 는 재료 시편의 피로 시험을 통해 도출된 실험적 상수이다. 또한 평균응력이 0이 아닌 경우를 고려하여, Goodman 선도를 적용하였고, 이에 따라 피로한도(S_e)와 인장강도(S_u)가 식 (9)에 반영되었다.⁵⁾

본 연구에서는 Fig. 2에 제시된 변동 하중의 한 사이클을 반복 하중으로 간주하여 피로 수명을 예측하였다. 비록 시간 이력을 포함한 동적 하중 조건은 아니지만, 선박 엔진 운전 중 반복적으로 발생하는 최대 폭발압력과 최소 응력을 주기 하중으로 설정하고, 이에 따른 누적 손상과 수명을 계산함으로써 재료가 견딜 수 있는 반복 하중 횟수를 예측하였다.

$$\log(N) = a - b \times \log(\sigma) \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (9)$$

2.3 모델링과 해석조건

1) 스테드 볼트 사양

스테드 볼트는 고장력 합금강인 SNCM439 재료를 사용하였으며 구체적인 재료의 특성은 Table 2와 같다. 스테드 볼트의 도면을 바탕으로 완성한 3D 모델링은 Fig. 3과 같으며, 나사의 직경은 120 mm, 피치는 6 mm로 볼트 하단의 나사산 영역이 상단보다 컸다.

Table 2 Specification of material

Specification	Value	Unit
Length	2,165	mm
Diameter	120	mm
Young's modulus	210	GPa
Yield strength	min. 885	MPa
Tensile strength	800 ~ 850	MPa
Poisson's ratio	0.30	-

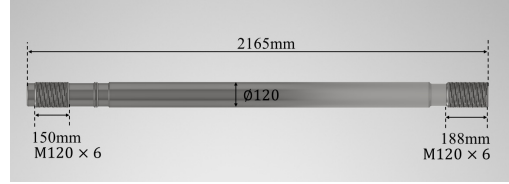


Fig. 3 Stud bolt specification and 3D modeling

2) 유한요소 해석조건

불충분한 체결력에 따른 스테드 볼트의 응력 취약부를 식별하기 위해, 구조해석에 널리 사용되는 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 스테드 볼트의 3D 모델링을 적용하였다.

유한요소 해석을 위한 경계조건으로 스테드 하단의 나사산 표면을 변위가 발생하지 않도록 고정하고, 상단 나사산은 외부 하중에 의해 나사산 표면을 따라 변위가 발생할 수 있도록 설정하였다. 스테드에 가해지는 하중조건은 전술한 Fig. 1의 Step 3과 같다. 먼저 제조사에서 제공한 유압 체결력을 100% 적용한 후, 주기판 운전 시 연소실의 최고 폭발압력(Pmax)을 가하여 해석을 수행하였다. 이후, 스테드 볼트 체결이 제시된 값대로 제대로 체결되지 못한 채로 주기판 운전에 노출되는 조건을 시뮬레이션하기 위해 동일한 조건에서 체결력만 98% 및 95%로 낮추어 해석을 진행하였다.

유한요소해석의 전체 노드(node)와 요소(element) 수는 각각 25,2556개와 17,6716개이며, 응력집중이 예상되는 나사산과 그 주변의 메쉬를 조밀하게 적용하였다.

해석조건을 정리하면 다음과 같다.

- 해석조건 1: 체결력 100% + Pmax
- 해석조건 2: 체결력 98% + Pmax
- 해석조건 3: 체결력 95% + Pmax

3. 연구결과

3.1 해석조건 1: 체결력 100%+Pmax 응력변화

Fig. 4는 유압잭을 이용한 스테드 볼트 체결 시 발생하는 응력 분포를 나타낸다. 스테드 볼트 중앙부에서 확인된 332.23 MPa과 333.38 MPa의 응력 값은 2.2절에서 이론적으로 산출한 초기 체결

공칭응력 333.33 MPa과 99.7% 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 체결력과 함께 연소실 최대 폭발압력을 하중으로 적용한 결과 중에서 최대 응력이 발생한 부분을 나타낸다. 최대 응력은 592.71 MPa로 상당 체결부위에서 처음 단면적 변화가 생기는

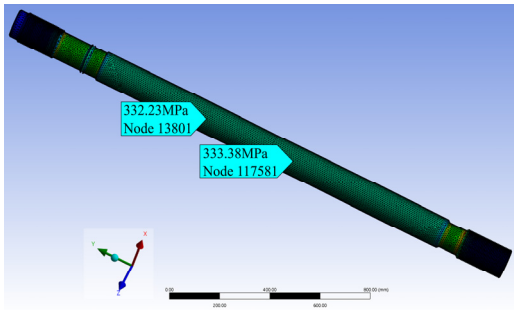


Fig. 4 Result of adequate pretension application

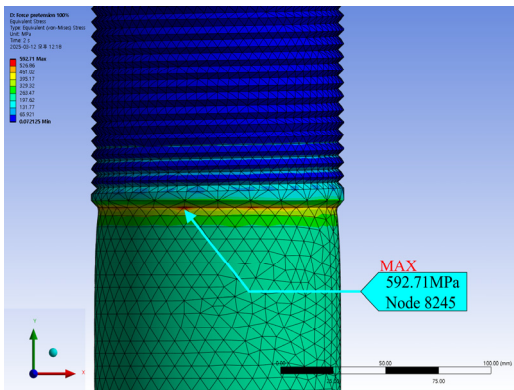


Fig. 5 Result of stress analysis - Condition 1

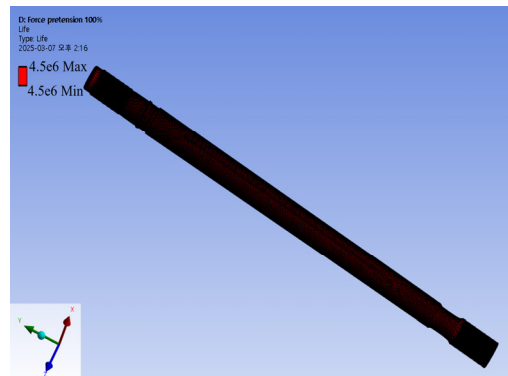


Fig. 6 Result of Life - Condition 1

부분의 Node 8245에서 발생하였다. 하지만 해당 값은 재료의 항복강도 885 MPa 대비 75.5% 수준으로 허용 범위 내에 있으며, 응력 취약부의 안전율은 1.49로 산출되어 공학적 설계 기준을 충족한다.

체결력과 최대 폭발 압력에 의해 스테드 볼트가 변동 응력에 노출될 때, 피로 파단을 예측하기 위해 피로 수명을 계산하였다. 피로 수명 계산의 기준이 되는 재료의 피로-수명 선도는 응력 집중 계수 2.8과 파손 확률 50%를 고려한 수정된 피로-수명 선도를 사용하였다.

일반적으로 제공되는 재료의 피로-수명 선도는 응력 집중 계수 1과 표준 파손 확률 50%를 기준으로 단순 형상 시편을 대상으로 한 실험된 데이터에 기반하지만, 실제 구조물은 시편과 달리 다양한 형상과 운전 환경에 따른 표면 부식 및 오염 상태로 인해 실험 데이터와 다르게 응력 집중이 발생할 수 있다. 따라서 보다 정확한 피로 수명 예측을 위해 응력 집중 효과를 반영한 수정된 피로-수명 선도를 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구는 대형 스테드 볼트의 피로 취약 부위를 식별하는 것을 목표로 하며, 선행 연구에서 나사산 주변에서 발생한 볼트 파단 사례를 고려하여 수정된 피로-수명 선도를 적용하였다. 이에 따른 피로 수명 해석 결과는 보수적인 기준을 적용하더라도 Fig. 6과 같이 전체적으로 4.5×10^6 cycles의 충분한 피로 수명을 갖는 것으로 확인되었다.

3.2 해석조건 2:체결력 98%+Pmax 응력해석

해석조건 2는 스테드 볼트 체결력을 제작사에서 제공한 체결력의 98%에 해당하는 힘 3.69×10^6 N을 적용한 뒤 엔진의 정상 운전애 노출되는 경우이다.

응력 최댓값이 나타난 부위는 해석조건 1과 다르게 Fig. 7과 같이 스테드 볼트 하단의 첫 번째 단면적이 변화하는 부위에서 발생하였다. 해당 값은 해석조건 1에서의 최대 응력값보다 약 6.79 MPa 더 높았으며, Fig. 8과 같이 동일한 위치에서 피로수명이 1.98×10^6 cycles까지 감소하는 것으로 확인되었다.

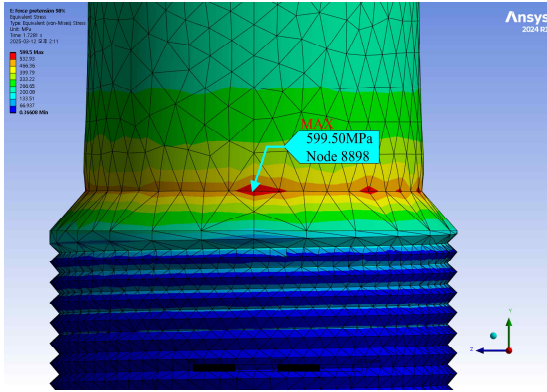


Fig. 7 Result of stress analysis - Condition 2

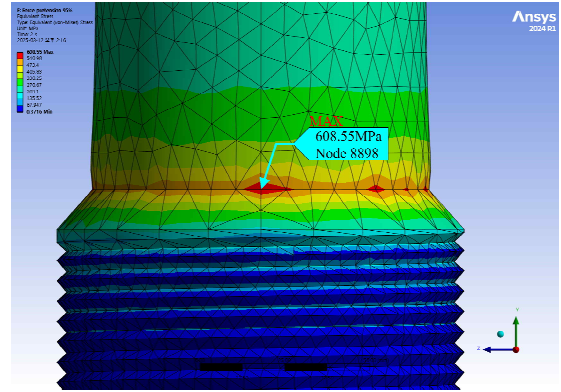


Fig. 9 Result of stress analysis - Condition 3

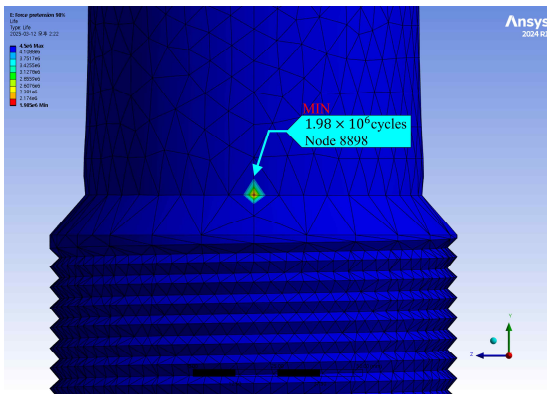


Fig. 8 Result of Life - Condition 2

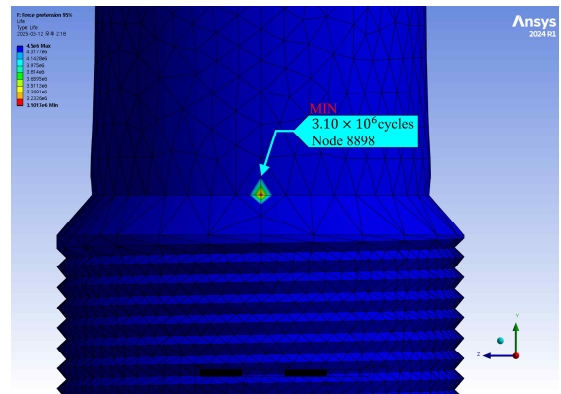


Fig. 10 Result of life - Condition 3

3.3 해석조건 3: 체결력 95% + Pmax 응력해석

체결력 95%는 3.58×10^6 N에 해당하는 값으로 충분한 체결력을 갖지 못한 채 연소실 최대 폭발력에 노출될 경우, 해석조건 2에서와 동일한 부위에서 Fig. 9와 같이 최대 응력 608.55 MPa가 발생하는 것으로 확인되었다.

다만 취약부의 피로수명의 경우, 해석조건 1의 충분한 체결력이 적용되었을 때보다 피로수명이 감소했지만, Fig. 10에서처럼 해석조건 2의 경우보다 1.5배 상승한 것으로 확인되었다. 그 원인은 체결력이 낮아지면서 응력 집중 부위가 주변으로 퍼지면서 국부적인 피로 손상이 감소된 것으로 사료된다. 체결력 저하로 전체 응력은 증가하지만, 응력 집중 부위의 피로수명은 증가할 수 있는 것으로 파악된다.

해석조건 1부터 3까지의 결과를 바탕으로, 체결력 감소에 따른 취약부 응력 변화를 Table 3과 Fig. 11에 정리하였다. 체결력이 감소할수록 스택드 볼트 하단의 단면적 변화부위에서 응력이 증가하는 것이 확인되었으며, 안전율은 1.7에서 1.45로 감소하는 경향을 보였다. 또한 응력집중계수도 1.57에서 1.83까지 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 체결력 저하가 스택드 볼트의 구조적 건전성에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

Table 3 Summary of analysis condition

	Condition 1	Condition 2	Condition 3
$\sigma_{\max}$	522.06 MPa	599.5 MPa	608.55 MPa
S.F	1.70	1.47	1.45
K_f	1.57	1.80	1.83

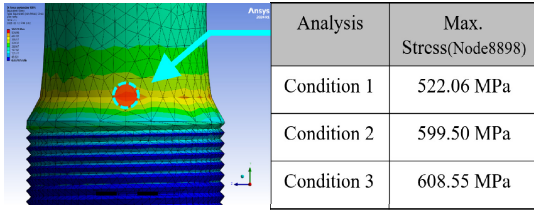


Fig. 11 Stress change according to condition

4. 결 론

본 연구에서는 스터드 볼트가 불충분한 체결력으로 변동응력에 노출될 경우 발생하는 응력 집중 부위와 피로 수명을 분석하였다.

체결력을 각각 100%, 98% 및 95%로 설정하고, 연소실 최대 폭발 압력(Pmax)을 적용한 유한요소 해석을 수행한 결과, 체결력이 낮아질수록 스터드 볼트의 단면적 변화 부위에서 응력 집중이 발생하며, 최대 응력이 증가하는 경향을 보였다.

체결력 100%의 해석조건 1에서는 응력 최댓값이 592.71 MPa로, 스터드 볼트의 상단 체결부의 단면 변화 부위에서 발생하였으며, 안전율은 1.49로 확인되었다. 그러나 체결력을 98%로 낮춘 경우, 응력 최댓값이 599.5 MPa로 증가하였고, 응력 집중 위치가 스터드 볼트 하단의 첫 번째 단면 변화 부위로 이동하였다. 또한, 피로 수명도 감소하는 경향을 보였다.

체결력이 95%로 더 낮아졌을 때, 최대 응력은 608.55 MPa까지 증가하였으나, 예상과 달리 피로 수명이 해석조건 2보다 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 체결력이 감소함에 따라 응력 집중이 국부적으로 집중되지 않고 주변으로 분산되면서 피로 손상이 완화된 것으로 판단된다.

전반적으로 체결력이 감소할수록 응력 최댓값이 증가하고, 안전율은 1.7에서 1.45로 감소하며, 응력 집중 계수도 1.57에서 1.83까지 증가하는 것으로 확인되었다.

본 연구는 스터드 볼트 단독 모델에 예하중과 변동 하중을 적용하여 너트 및 실린더와의 직접적인 접촉은 고려하지 않았으나, 정밀한 경계조건 설정을 통해 실질적인 구속 효과를 모사하였다.

이를 통해 계산 효율을 높이면서도 체결력 변화에 따른 볼트의 응력 분포 및 피로 수명 경향을 효과적으로 분석할 수 있었다. 그 결과, 적절한 체결력 유지가 스터드 볼트의 건전성 확보에 중요한 요소임을 확인하였다.

향후에는 실제 운전 중 인장력 계측을 통해 시뮬레이션의 정확성을 검증하고, 실운전 조건에서의 피로 손상 예측 및 사고 예방에 기여하고자 한다.

Author contributions

H. J. Choi; Conceptualization, Investigation, Methodology, Visualization, Validation, Writing-original draft. S. K. Park; Funding acquisition, Investigation, Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. M. Fonte, L. Reis, V. Infante and M. Freitas, 2019, "Failure analysis of cylinder head studs of a four stroke marine diesel engine", Engineering Failure Analysis, 101, 298-308.
2. B. J. Kim, J. O. Lee, J. S. Park and S. L. Kim, 2007, "Strength Evaluation of the Cylinder Cover Stud for Low-Speed Marine Diesel Engine", The Korean Society of Mechanical Engineers.
3. T. H. Kim, 2007, "A Study on the Safety of Fatigue Fracture of Stud Bolt for Marine Diesel Engine", MS thesis, National Korea Maritime & Ocean University, Korea.
4. D. G. Oh, 2010, "A Study on the Analysis of Fatigue and Vibration of Cylinder Cover Stud for Marine Diesel Engine", MS thesis, National Korea Maritime & Ocean University, Korea.
5. H. J. Choi, K. H. Seo, Y. M. Kim, J. W. Lee and J. U. Lee, 2023, "Torsional Stress and Fatigue Life Analysis on The Propulsion Shaft During Crash Astern", Journal of Power System Engineering, 27(3), 20-27.
(<http://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.3.020>)