

선박 추진용 대형 디젤엔진 기어컬럼의 구조해석

이종환[†] · 남대호* · 손정호* · 배종국*

Structural Analysis for Gear Column of Large Bore Diesel Engine

Jong Hwan Lee, Dae-Ho Nam, Jung Ho Son and Jong Gug Bae

Key Words : 2-Stroke Marine Diesel Engine(선박 추진용 대형엔진), Fatigue Analysis(피로해석), Gear Column(기어컬럼), IIW

Abstract

2-stroke marine diesel engine has generally one exhaust valve and three fuel injection nozzle which are key component for engine's performance and combustion. Fuel injection and exhaust valve driving system are driven by rotating of camshaft. Rotation of crank shaft drives the cam shaft through gear train that is composed of 3~4 gear wheels. Gear column supporting the gear wheel has to bear against the dynamics forces by engine running as well as gearing forces. In this paper, structural analysis for engine structure and fatigue strength assessment of welded joint is shown. Repeatedly full cyclic simulation during one cycle is performed to investigate the structural behavior of engine. Fatigue analysis is carried out based on IIW using sub-modeling technique to obtain more detailed stress distribution.

1. 서론

선박 추진에 사용되는 대형엔진은 연료분사와 배기시기를 조절하는 시스템의 구동방법에 따라서 전자제어 엔진과 기계식 엔진으로 구분할 수 있다. 전자제어 엔진은 연소 성능과 유지보수 측면에서 장점이 있어 최근 그 수요가 증가하고 있지만, 오랜 제작과 운전경험을 통해 전자제어 엔진보다 신뢰성이 높은 기계식 엔진의 요구 또한 여전히 존재한다.

기계식 엔진은 크랭크축 기어, 아이들 기어 및 캠축 기어로 구성된 기어트레인을 통해 캠축을 회전시켜 연료분사와 배기시기를 조절한다. 이때 아이들 기어는 기어컬럼(gear column)에 의해서 지지되므로 기어컬럼의 변형과 강도 저하는

흡기와 배기 시기를 부정확하게 하여 엔진 성능 저하를 초래한다.

기어컬럼은 엔진 운전 중에 발생하는 폭발력과 관성력에 추가적으로 기어 회전으로 하중이 더해져서 복잡한 하중상태에 놓여진다. 따라서 본 연구에서는 엔진 운전 시에 기어컬럼의 거동을 정확히 묘사하기 위해서 2 행정 대형 디젤엔진이 한 사이클 동안에 받는 하중을 36 개 하중상태로 구분하여 순차적으로 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과로부터 기어컬럼의 취약부로 예상되는 용접부에 대해서는 정확한 응력분포를 알아보기 위해 서브 모델링(sub modeling) 기법을 사용하였고 IIW(International Institute of Welding) 안내서를 참고하여 용접부의 피로강도 평가하였다.

2. 기어컬럼의 구조해석

2.1 유한요소 모델

구조해석 대상모델은 컨테이너선에 추진용으로 사용되는 대형 디젤엔진으로 Fig. 1 과 같다. 엔

[†] 회원, 현대중공업(주), 선박해양연구소
E-mail : hwan73@hhi.co.kr
TEL : (052)202-4579 FAX : (052)202-5495

* 현대중공업(주), 선박해양연구소

진의 실린더당 출력은 4520 kW 이고, 기통 수에 따라 21,720~54,240 kW 의 출력을 발생한다.

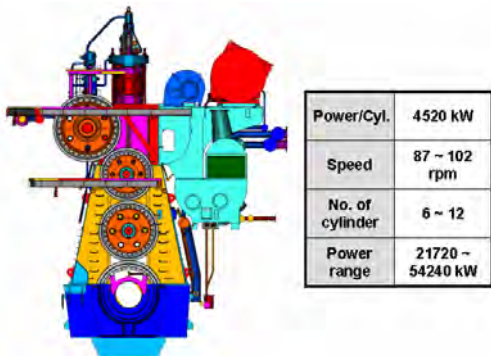


Fig. 1 2-stroke marine diesel engine

대형엔진 기어컬럼을 구성하는 주요부품은 Fig. 2 와 같이 실린더 자켓(cylinder jacket), 컬럼(column), 베어링 거더(bearing girder), 베드 플레이트(bed plate), 메인 베어링 캡(main bearing cap) 등이 있으며, 조립과정에서 실린더 자켓, 컬럼, 베어링 거더는 스테이 볼트(stay bolt)로 고정되고, 메인 베어링 캡(main bearing cap)은 메인 베어링 캡 볼트에 의해서 체결된다.

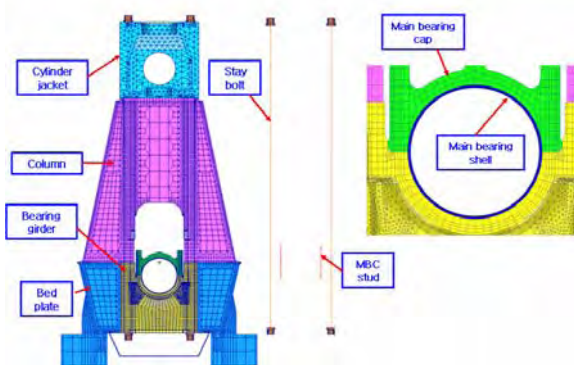


Fig. 2 Structural parts

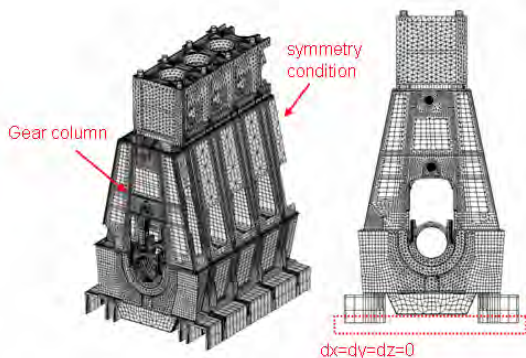


Fig. 3 Structural analysis model and boundary condition

구조해석 모델의 범위는 인접실린더의 효과와 경계조건의 영향을 최소화하기 위해서 구동측(driving end) 끝에 위치한 기어컬럼을 포함한 3 개의 실린더와 1 개 실린더 절반(1/2)까지로 설정하였다. 구조해석은 ABAQUS/Standard 프로그램을 사용하였으며, 해석모델 범위와 적용된 경계조건은 Fig. 3 에 나타내었다.

2.2 하중 조건

기어컬럼에 작용하는 하중은 각 부품을 조립하는 체결력, 엔진운전 중에 폭발력과 관성력으로 인해 발생하는 동적 하중, 기어 휠의 비틀림 진동에 기인한 기어 휠 베어링 하중 및 프로펠러로부터 전달되는 쓰러스트(thrust) 베어링 하중으로 구분할 수 있다. 본 해석에서는 기어컬럼에 작용하는 4 가지 하중을 Fig. 4 와 같이 순차적으로 적용하여 그 영향을 분석하였으며, 정확한 기어컬럼의 강도를 평가하기 위해서 동적하중과 기어 휠 베어링 하중을 엔진 운전영역 전체를 고려하여 부여하였다.

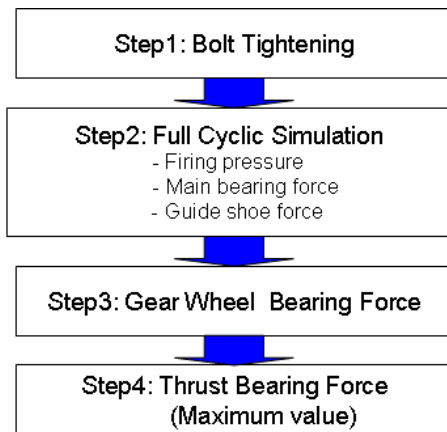


Fig. 4 Analysis procedure

엔진운전조건에 해당하는 동적 하중은 메인 베어링 하중, 가이드 슈(guide shoe) 하중 및 실린더 폭발하중으로 세분할 수 있으며, 본 연구에서는 실제 엔진 운전 상태를 정확히 구현하기 위해서 대형엔진 1 사이클 (360 도) 동안의 하중을 크랭크 각도를 기준으로 36 개로 구분하여 Fig. 5 와 같이 적용하였다. 실린더 압력은 볼트 체결부위와 라이너(liner) 접촉 부위에 내외력비를 고려하여 하중으로 작용시키고, 가이드 슈 하중은 컬럼과 가이드 슈가 접촉하는 영역을 계산하여 균일압력으로 주었다.

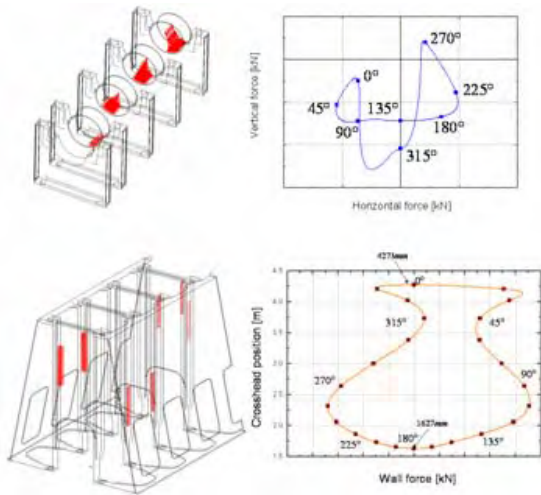


Fig. 5 Operational dynamic loads

기어 휠을 포함한 크랭크축계 비틀림 진동해석으로부터 계산된 기어 휠 베어링 하중은 크랭크 각도를 기준으로 계산된 동적 하중이 작용하는 시점과 정확히 일치하여 발생하지 않으므로, 대형엔진 한 사이클 동안의 기어 휠 베어링 하중을 Fig. 6 과 같이 계산하고 그 중 좌우 방향으로 하중이 가장 큰 지점에 대해서만 구조해석을 수행하였다.

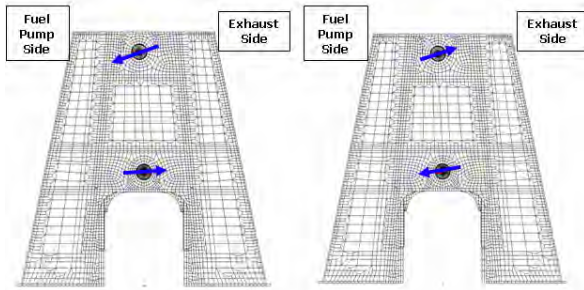


Fig. 6 Applied gear bearing force

3. 구조해석 결과

3.1 동적하중 해석 결과

구조해석 결과로부터 기어컬럼 용접부의 응력은 크랭크 축과 커넥팅로드의 회전에 의해 컬럼을 따라 상하로 움직이는 가이드 슈가 컬럼을 최대로 옆으로 미는 시점에서 가장 크게 발생하였다.

스테이 볼트 체결 후 최대 가이드 슈 힘이 작용하면 기어컬럼 하단 용접부에서 상대적으로 큰 응력이 발생하는데, 이 지점은 과거 대형엔진 계측 과정에서 취약부위로 예측된 계측점과 유사하였다. 따라서, 본 연구에서는 구조해석 결과와 기존 계

측 지점을 참고하여 Fig. 7 과 같이 상대적으로 높은 응력이 발생한 2 개 주요지점을 선정하고 엔진 운전 시 응력의 변화를 조사하였다.

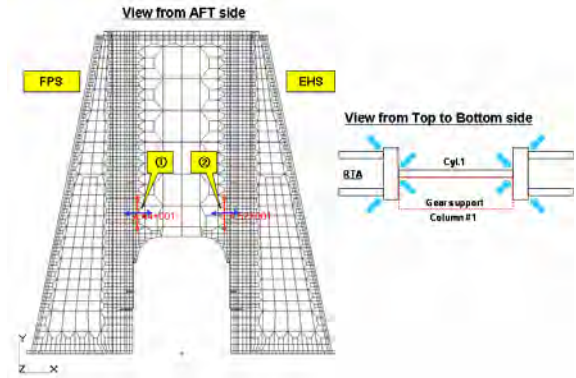


Fig. 7 Evaluation points of gear column

Fig. 8 은 기어컬럼 주요부위 1 번 위치에서의 응력 변화를 보여준다. 기어컬럼의 용접부 응력은 용접부에서 mid-plate 두께(=40 mm)만큼 떨어진 곳에서 응력을 조사하였으며, 용접부에서 수직한 방향 응력(Sxx)은 가이드 슈 힘이 좌우로 가장 큰 시점에서 최대 응력을 발생하였고, 실린더 폭발력이 가장 큰 시점에서 최소값을 나타내었다.

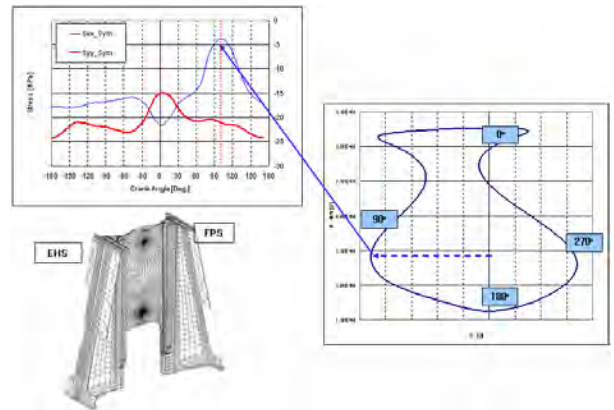


Fig. 8 Stress variation at position 1

3.2 기어 휠 베어링 하중의 영향

Fig. 9 는 기어 휠 베어링이 배기밸브 방향으로 최대 하중이 작용하는 시점과 연료펌프 방향으로 최대 하중이 작용하는 시점의 변형과 응력분포를 보여준다. 용접부에 수직 방향 응력을 계산한 결과, 기어컬럼 앞뒤 쪽 총 8 곳 용접부에서 응력이 높게 조사되었으며, 최대 변동응력은 E 지점에서 발생하였다.

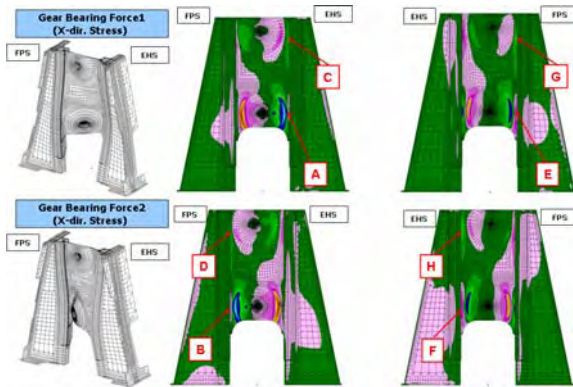


Fig. 9 Results for gear wheel bearing force

3.3 서브 모델링 해석

용접부에서 발생한 응력을 좀 더 정확하게 파악하기 위하여 앞서 계산된 "1"지점(Fig. 7)에 대해서 서브 모델링 기법을 적용하였다. 용접부 "1" 지점의 서브모델링 해석은 엔진 운전 중에 응력이 가장 크게 발생하는 시점과 그때에 기어 휠 베어링 최대 하중이 동시에 작용 한다는 가정 하에서 구조해석을 수행하였으며 Fig. 10 은 각 하중조건에 대한 용접부 수직방향의 응력을 나타낸다.

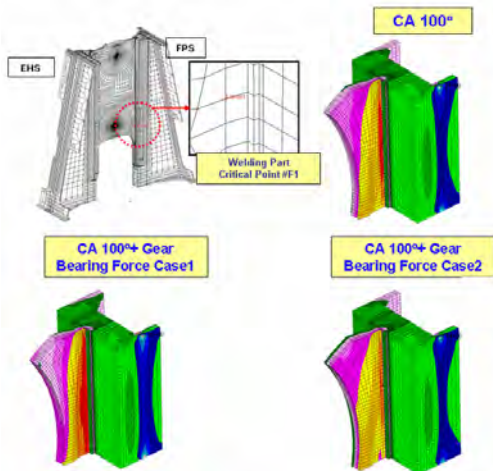


Fig. 10 Sub-modeling analysis

서브 모델링 해석 결과로부터 최대응력이 발생한 위치에서 용접부 수직한 방향의 응력을 그래프로 Fig. 11 과 같이 그려보았다. 용접부에서 발생하는 응력은 용접부에서 0.5t (t: mid plate 두께)만큼 떨어진 곳의 응력과 1.5t 만큼 떨어진 곳의 응력을 외삽하여 구한 응력으로 가정하고, 외삽된 응력과 t 만큼 떨어진 곳의 응력 비로 응력집중계수를 산정하였다.

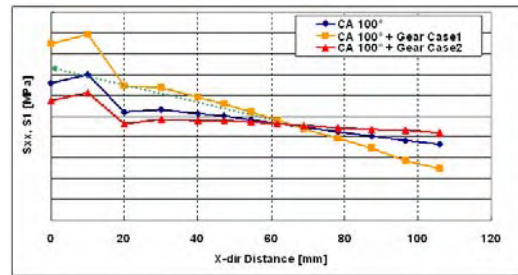


Fig. 11 Stress distribution of welding part

4. 피로강도 평가

4.1 용접부의 피로한도

기어컬럼의 용접부의 피로강도 평가는 독일 기계공학 연구위원회(FKM) 안내서와 IIW 안내서를 참고하여 수행하였으며, FKM 에서 규정하는 용접부의 피로한도는 식(1)과 같다.

$$\sigma_{AK} = K_{AK,\sigma} \cdot K_{E,\sigma} \cdot \frac{FAT}{225} \cdot \sigma_{w,w} \quad (1)$$

여기서, $K_{AK,\sigma}$ 는 평균응력을, $K_{E,\sigma}$ 는 잔류응력 효과를 고려하는 계수이고, FAT 는 용접부 형상에 따라 IIW 에서 정해 놓은 FAT Class 이다. $\sigma_{w,w}$ 는 용접부의 피로한도로써 92 MPa 를 적용한다.

구조적으로 취약할 것으로 예상되는 기어컬럼의 용접부 형상은 Fig. 12 와 같으며, 그 때의 FAT Class 는 71 이었다. 평균응력계수($K_{AK,\sigma}$)와 잔류응력계수($K_{E,\sigma}$)는 1.0 으로 설정하여 평균응력 효과를 고려하지 않고, 잔류응력계수는 가장 높은 값을 사용하여 보수적으로 피로한도를 계산하면, 취약부에서 피로한도는 약 29 MPa 로 계산되었다.

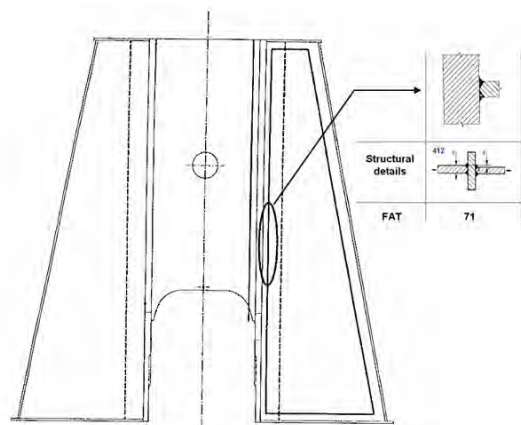


Fig. 12 Welding conditions of gear column

기어컬럼의 용접부에서 발생한 최종 변동응력은 엔진운전 중에 발생하는 동적 하중 조건(step2)에서 계산된 최대 변동응력과 기어 휠 베어링 하중 조건(step3)에서 계산된 최대 변동응력을 각 위치별로 합산하고, 서브모델링 해석으로부터 계산된 응력집중계수를 곱하여 계산하였다. IIW 을 참고하여 계산된 피로한도를 적용하여 기어컬럼 용접부 피로강도를 평가한 결과, 기어컬럼의 강도 저하로 인한 엔진의 성능 저하는 없을 것으로 판단되었다.

5. 결 론

선박 추진용 대형 디젤엔진의 기어컬럼에 대해서 구조해석을 수행하였다. 기어컬럼 용접부의 강도를 정확하게 검토하기 위하여 엔진 1 사이클 동안의 동적하중을 전 영역에 걸쳐 적용하고, 캠축 및 기어 휠을 포함한 크랭크축계 비틀림 진동해석으로부터 기어 휠 베어링 하중을 계산하였다.

피로강도는 서브 모델링 기법을 활용하고, FKM 과 IIW 안내서를 기반으로 평가하였으며 기어컬럼의 피로강도는 안전 측에 있다고 판단되었다.

향후 계측을 통하여 본 연구 결과의 타당성을 검증할 예정이다.

참고문헌

- (1) A Hobbacher, 1996, *Fatigue design of welded joints and components*, The International Institute of Welding.
- (2) ABAQUS Inc., 2007, *Abaqus 6.7 User's Manual*.