

# 중형 디젤 엔진 크랭크축 및 오일 홀에 대한 강도평가

안성찬<sup>†</sup>·손정호<sup>\*</sup>·김병주<sup>\*</sup>·김종석<sup>\*\*</sup>

## Strength Evaluation for Crankshaft and its Oil Hole of Medium Speed Diesel Engine

Sung Chan An, Jung Ho Son, Byung-Joo Kim and Jong Suk Kim

**Key Words:** Diesel Engine(디젤엔진), Crankshaft(크랭크축), Oil Hole(오일 홀), Fatigue Strength(피로강도), Pin Fillet(핀 필렛), Surface Roughness(표면조도)

### Abstract

Strength evaluation was carried out for the fillet and oil hole of crankshaft of medium speed diesel HiMSEN engine to verify initial concept design. Alternating torque obtained from torsional vibration analysis and radial force due to firing pressure were applied. It was assumed that the maximum alternating torque and radial force occur simultaneously. Weak points in view of fatigue are journal fillet and crank pin fillet area and the minimum normalized fatigue safety factor is 1.17 at crank pin fillet. The fatigue strength of the oil hole was evaluated to verify the effect of the surface roughness of the oil hole. As results, the specific level of the inner surface roughness and the polishing depth of the oil hole for sufficient fatigue strength was suggested. The maximum stress value and stress distribution at the inner surface of the oil hole can be easily estimated at initial design stage by the newly developed method.

### 기호설명

$\sigma_f$  : 피로한도

$m_e, m_d, m_s$  : 피로한도 수정계수

$R_a$  : 중심선 평균조도 [ $\mu\text{m}$ ]

### 1. 서 론

현대중공업 엔진기계사업분부는 국내 최초로 자체 설계한 중속 디젤엔진인 힘센(HiMSEN) 엔진(Fig. 1 참조)을 개발하였다[1]. 800~2,700 kW

출력을 갖춘 힘센엔진은 H25/33과 H21/32 2개 모델(이후 각각 model 1, model 2로 표기)이며 선박의 발전 및 육상발전용, 중·소형 선박의 추진용으로 육·해상에서 모두 사용할 수 있다. 힘센엔진은 고성능·고출력이면서 연료소모량, 진동, 소음, 유해배기가스 배출량 등 여러 면에서 동종의 타 엔진보다 우수하며, 부품수를 획기적으로 줄이고 모듈화함으로써 유지 및 보수 측면에서 유리한 환경친화형 엔진이다.

크랭크축은 엔진의 동력을 전달하는 피스톤, 커넥팅 로드 등과 함께 엔진 구동부를 이루는 매우 중요한 부품으로서 연소에 의한 폭발력 및 회전력에 의한 관성력과 비틀림 하중을 반복적으로 받게 된다. 따라서 크랭크축의 안전성을 확보하기 위한 강도는 정적 강도뿐만 아니라 반복하중에 의한 피로강도도 충분히 가지고 있어야 한다. 크랭크축의 저널 필렛과 크랭크 핀 필렛은 응력

<sup>†</sup> 현대중공업 선박해양연구소 구조연구실

E-mail : scan@hhi.co.kr

TEL : (052)230-4720 FAX : (052)250-9580

<sup>\*</sup> 현대중공업 선박해양연구소 구조연구실

<sup>\*\*</sup> 현대중공업 엔진기계사업본부 엔진기술개발부

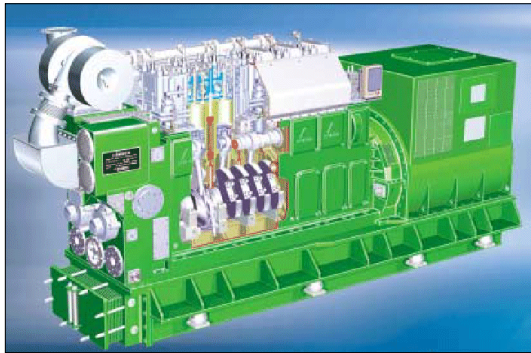


Fig. 1 HHI's HiMSEN diesel engine

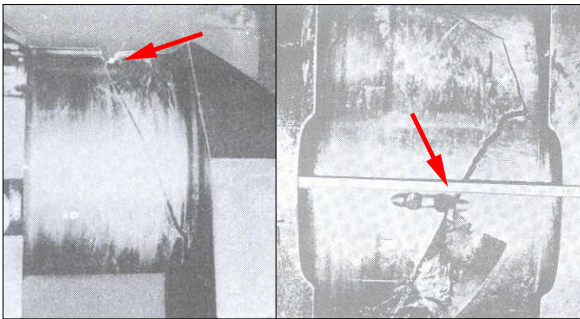


Fig. 2 Examples of fractured crankshaft[2]

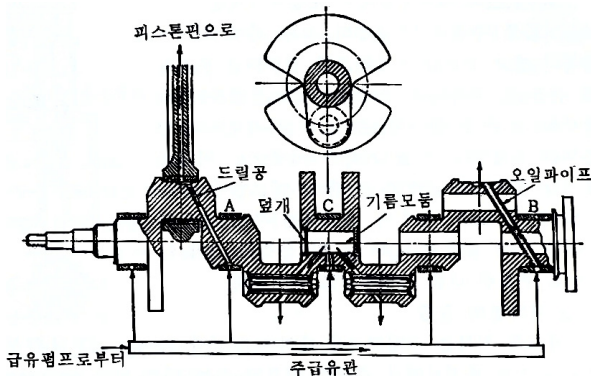


Fig. 3 Typical oil supplying system[3]

집중이 발생하는 곳으로 강도 측면에서 가장 취약하며, 크랭크 핀 및 저널에 가공된 오일 홀에서도 피로에 의한 파손이 일어날 수 있기 때문에 이에 대한 강도평가도 중요하다.

Fig. 2는 크랭크축의 오일 홀에서 발생한 피로 파손 자료이다.

크랭크축의 오일 홀은 각 구동 부품의 베어링의 윤활에 필요한 오일을 공급하기 위한 통로이다. Fig. 3에서 보듯이 급유펌프로부터 공급된 윤활유는 크랭크축의 오일 홀을 지나 커넥팅 로드

로 전달되고 피스톤의 크라운까지 전달되게 된다. 현대중공업의 HiMSEN 엔진은 Fig. 3의 A 형식을 채택하고 있다.

크랭크축의 초기 설계는 일반적으로 IACS의 규정[4]을 바탕으로 크랭크축의 치수와 강도평가가 수행되고 있다.

오일 홀에서의 피로손상을 방지하기 위해서 홀 입구에 라운드 처리와 함께 오일 홀의 깊이방향으로 일정 깊이까지 조도를 향상시키기 위한 표면 연마 작업을 실시하는데 이러한 가공조건은 외국 엔진 메이커에 따라 서로 다르게 규정하고 있다. 피로강도 측면에서 오일 홀의 표면 연마 깊이를 깊게 하고 표면조도를 높이는 것이 바람직하지만 이러한 가공조건은 생산원가의 상승을 가져오게 된다. 그러므로 강도를 유지하면서도 원가를 줄일 수 있는 가공 깊이와 표면조도를 결정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 크랭크축의 필렛부에 대한 강도평가 뿐만 아니라 크랭크 핀과 저널에 가공되는 오일 홀에 대한 강도평가로부터 적절한 표면조도와 가공 깊이를 결정하는 방법을 제시해 보았다. 또한 신속한 설계검증을 위해서 오일 홀의 응력집중계수를 활용한 응력추정방법도 개발하였다.

## 2. 크랭크축 강도 평가

### 2.1 구조해석

크랭크축의 구조해석을 위한 전·후처리로 Pro/ENGINEER를 사용하였고, 강도 평가를 위한 구조해석은 요소의 차수를 증가시켜 해를 수렴시키는 GEM(geometric element method)의 한 종류인 Pro/MECHANICA를 사용하였다.

크랭크축은 축계의 관성력과 실린더의 폭발 압력에 의한 주기적 기진 토크를 받아서 비틀림 강제진동을 하게 된다. 따라서 크랭크축의 피로강도를 평가하기 위해서는 비틀림 진동과 폭발력, 관성력으로 발생하는 하중들을 정확하게 예측하여야 한다. 크랭크축계가 받는 하중은 당사에서 자체 개발한 동특성 해석 프로그램으로부터 계산된 토크 및 반경 방향력을 사용하였다. 운전 중인 크랭크축에 작용하는 변동하중은 위상차를 가지지만, 구조해석에서는 비틀림 토크와 반경 방

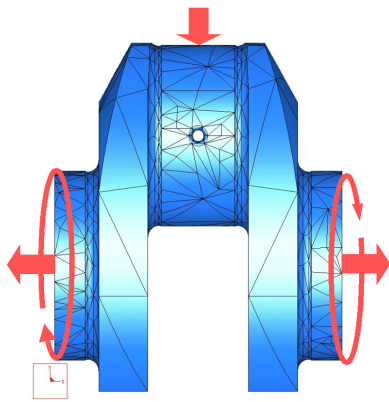


Fig. 4 Applied loads

향력의 최대가 동시에 발생한다고 가정하였다.

크랭크축의 강도평가를 위한 구조해석은 Fig. 4와 같이 1개의 크랭크 스로우(Crank Throw)를 대상으로 하였으며, 비틀림 토크, 반경 방향력 및 축력을 그림과 같이 작용시켰다. 응력집중부인 저널 필렛, 크랭크 핀 필렛 및 오일 홀은 세밀하게 요소를 분할하였다.

### 2.2 정적 강도 평가

Table 1은 하중 조건에 대하여 정적 강도 평가로부터 계산된 안전율을 현대중공업 내부 안전율 기준으로 정규화 시킨 값을 나타내고 있다. 실린더 직경이 다른 두개 모델의 엔진의 크랭크축에 대한 해석 결과를 비교하였다.

모델 1과 모델 2에서 최대 응력은 응력집중부인 필렛에서 나타났으며, 최대 응력이 발생하는 필렛 부위는 서로 달랐다. Table 1에서 알 수 있듯이 모델 1은 크랭크 저널 필렛에서 1.28의 최소 정규 안전율을 보여주는 반면, 모델 2는 핀 필렛에서 1.34의 최소 정규 안전율을 나타내고 있어 두 모델 모두 적절한 정적강도를 가지도록 설계되었음을 알 수 있다.

### 2.3 피로 강도 평가

크랭크축의 피로강도 평가는 설계단계에서는 IACS에서 규정한 방법을 따르고 있는데 굽힘응력 성분과 비틀림 응력 성분에 대한 조합응력으로부터 평가하고 있다.

본 연구에서는 설계된 크랭크축을 해석적으로

Table 1 Normalized static safety factor

	평가 위치	
	핀 필렛	저널 필렛
모델 1	1.45	1.28
모델 2	1.34	1.45

검토하기 위하여 다축 피로 평가 방법 중의 하나인 Sines의 방법[5]을 사용하였다. 또한 평균응력의 효과를 고려하기 위해 Goodman 선도를 이용하였다. 피로 안전율은 평균응력이 고려된 등가양진응력(equivalent completely reversed stress)과 피로한도를 비교하여 정규 안전율로 계산되었다.

크랭크축의 피로한도( $\sigma_f$ )는 식(1)과 같은 피로한도 수정계수(fatigue limit modifying factor)를 고려하여 수정된 피로한도를 사용하였다.

$$\sigma_f = m_e \times m_d \times m_s \times \sigma_u \tag{1}$$

$\sigma_u$ 는 재료의 인장강도를 나타내며,  $m_e$ 는 굽힘 피로 효과 계수를 나타낸다.  $m_d$ 는 실제 구조물의 크기효과를 나타내고,  $m_s$ 는 표면 조도를 고려한 표면계수를 나타낸다. Fig. 5는 변동하중에 대한 크랭크축의 등가응력분포를 나타내고 있다.

크랭크축에 대한 피로 강도 평가를 통해 얻어진 정규 피로 안전율을 Table 2에 나타내었다. Table 2로부터 크랭크축의 피로강도 역시 적절하게 설계되었음을 알 수 있다.

### 2.4 오일 홀 피로 강도 평가

오일 홀이 포함된 구조해석에서 얻어진 홀 내부면의 응력값 및 응력분포로부터 오일 홀 내부

Table 2 Normalized fatigue safety factor

	평가 위치	
	핀 필렛	저널 필렛
모델 1	1.17	1.35
모델 2	1.18	1.21

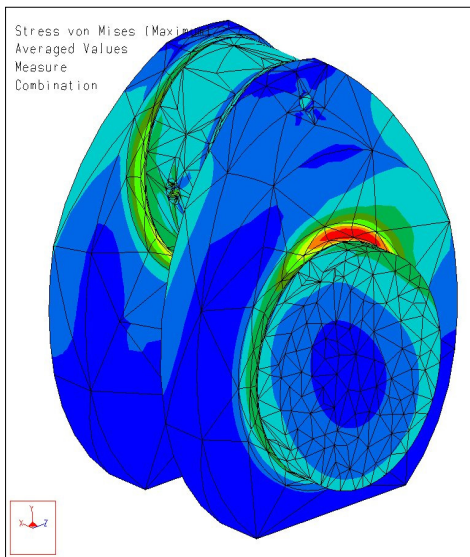


Fig. 5 Alternating stress distribution

면의 조도 변화에 따른 피로강도를 평가하여 오일 홀의 내부 면에 적용할 조도와 적절한 표면 연마 깊이를 결정해 보았다.

2.4.1 오일 홀의 응력 분포 특성

오일 홀에 발생하는 응력은 토크에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 실린더 내의 폭발력에 의해 발생하는 반경 방향력에 의한 굽힘응력의 중립축이 오일 홀의 위치와 일치하기 때문에 반경 방향력으로 인한 응력수준은 낮다. 또한 크랭크 핀에 비해서 저널의 직경이 더 크기 때문에 오일 홀의 응력수준도 크랭크 핀에 위치한 오일 홀에서 더 높게 나타났다. 이것은 토크에 의해 유발되는 전단응력은 동일 토크에 대해 직경의 세제곱에 반 비례하기 때문이다.

Figs. 6~7은 오일 홀 주위와 내부의 등가응력분포를 보여준다. Fig. 8은 모델 1 크랭크 핀의 표면에서부터 홀의 깊이방향으로의 등가응력 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 최대응력은 크랭크 핀의 표면이 아닌 홀의 깊이 방향 약간 안쪽에서 발생하였다.

2.4.2 라운드 크기 변화에 따른 응력 분포 특성

하중조건과 크랭크축의 기하학적 형상이 동일하다면 오일 홀의 응력분포에 영향을 미치는 인자는 오일 홀의 직경과 홀 입구 라운드의 크기라

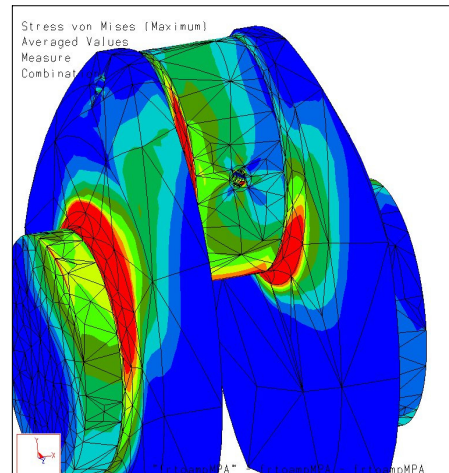


Fig. 6 Stress distribution around oil hole

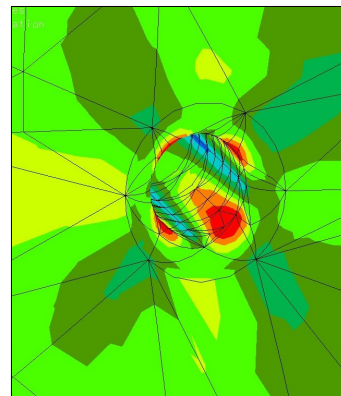


Fig. 7 Details of stress distribution around oil hole

고 추정할 수 있다.

본 연구에서는 지름의 변화는 고려하지 않고 라운드의 크기만을 변화시키면서 오일 홀의 응력

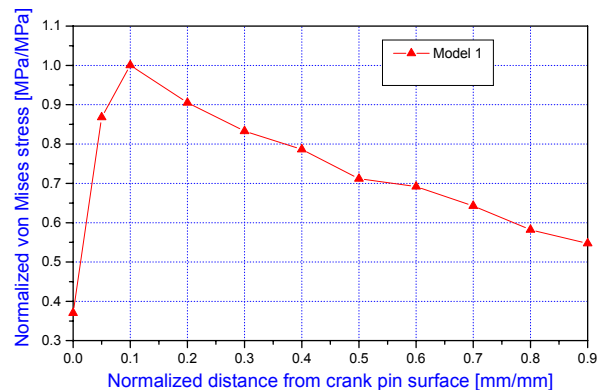


Fig. 8 Stress distribution through oil hole depth

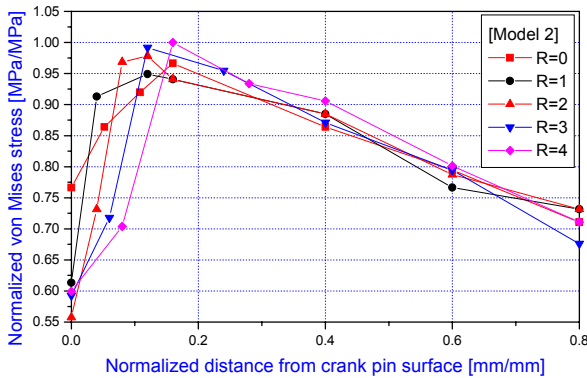


Fig. 9 Effect of fillet size

분포 특성을 알아보았다. Fig. 9에 라운드 크기 변화에 따른 오일 홀의 깊이방향으로 등가응력의 분포를 나타내었다. Fig. 9에 보이는 바와 같이 라운드의 크기는 응력분포에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 적절한 피로강도를 가지는 오일 홀의 설계조건은 표면조도로 조정할 수 있음을 알 수 있다.

2.4.3 오일 홀 표면조도 가공조건

앞 절에서 라운드의 크기 변화에 따라 오일 홀의 깊이방향 응력이 거의 같음을 확인하였기 때문에 오일 홀의 피로강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 표면조도를 설정하였다. 표면조도에 따른 피로강도 평가는 피로한도를 추정할 때 사용한 피로한도 수정계수  $m_s$ 를 사용하여 수행하였다. 피로한도 수정계수  $m_s$ 는 표면조도의 함수로서 표면 조도가 나빠지면 피로강도도 저하된다.

본 연구에서 표면조도의 상태는 중심선 평균조

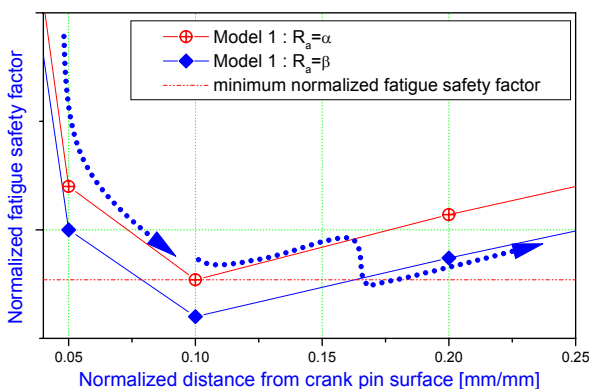


Fig. 10 Decision curve of surface roughness

도  $R_a$  [ $\mu m$ ]로 나타내는  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 선정( $\beta/\alpha=7.9$ )하였다. 표면조도  $\beta$ 는 오일 홀을 드릴로 가공한 직후의 조도이고 조도  $\alpha$ 가 홀 가공 후 일정 깊이까지 오일 홀 내부면의 표면연마를 통해 얻어지는 조도이다. 오일 홀 입구로부터 깊이방향으로 동일한 조도로 가공한다고 가정하고 표면조도가  $\alpha$ 에서  $\beta$ 로 변하면 피로한도 수정계수  $m_s$ 는 약 14% 정도 감소한다. Fig. 10은 위와 같은 방법으로부터 얻어진 정규 피로 안전율을 나타낸 것이다.

오일 홀의 모든 내부표면을 조도  $\beta$ 로 가공하여도 최소 정규 피로 안전율은 크랭크축의 저널 및 크랭크 핀 필렛의 정규 피로 안전율보다 높다. 하지만 미 고려 인자를 감안하여 현재 조도 가공조건으로 오일 홀 내부의 정규 피로 안전율을 조도  $\alpha$ 에서의 최소 정규 피로 안전율이상으로 유지하고자 한다면 깊이 방향으로 약 0.16까지는  $\alpha$ 의 조도유지가 필요하고 이 지점 이후의 조도는  $\beta$ 로 가공하여도 오일 홀의 피로강도에는 문제가 없음을 알 수 있다. 이러한 표면 조도가 가공조건은 Fig. 10에 점선으로 표시하였다.

2.5 오일 홀 응력 추정법

설계 초기 단계에서 오일 홀에 대한 구조해석을 통한 피로강도 평가는 상당한 시간을 필요로 할 수 있다. 이에 설계 초기 단계에서 강도평가를 쉽게 수행하기 위해 구조해석 결과와 응력집중계수 자료 등을 통한 응력 추정 방안을 도출하였다.

추정 방법은 참고문헌[6]에 나오는 값들을 이

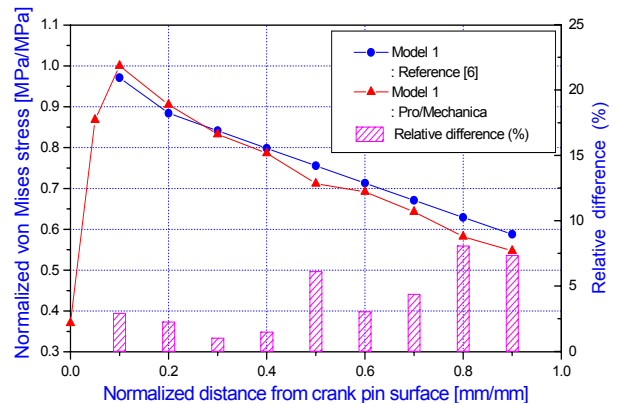


Fig. 11 Stress distribution prediction (model 1)

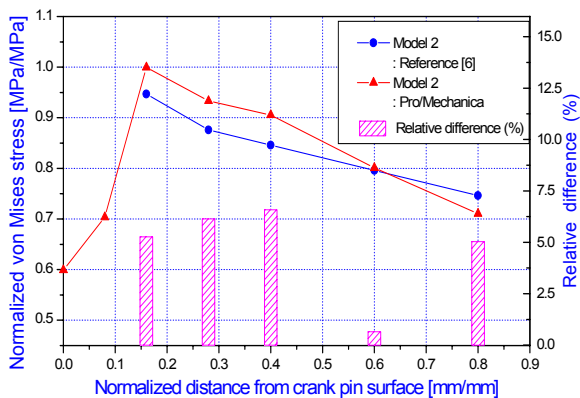


Fig. 12 Stress distribution prediction (model 2)

용하여 오일 홀의 최대 응력을 추정해 보았고 이를 구조해석 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

참고문헌[6]과 구조해석 결과에 의하면 중실 실린더에 홀(transverse hole)이 있는 경우 비틀림에 의한 최대응력은 홀 주위가 아닌 홀의 일정 깊이 안쪽 표면에서 발생한다. 이러한 특성은 Fig. 8과 같이 오일 홀의 응력분포에서도 확인할 수 있다.

모델 1과 모델 2에 대하여 참고문헌[6]에서 제시한 응력집중계수를 이용하여 계산한 등가응력값, 구조해석을 통해 얻어진 등가응력값, 상대 오차를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

구조해석으로부터 계산된 등가응력은 반경 방향력도 포함되었기 때문에 참고문헌[6]으로부터 토크만을 고려하여 계산된 등가응력이 약간 작게 계산되었지만, 상대 오차는 5% 내외 정도로 그 차이는 미미한 수준에 있다고 판단된다.

위와 같은 결과를 바탕으로, 구조해석을 수행하지 않고 응력집중계수를 이용한다면 충분히 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 기존에 IACS[4]에서 제시된 크랭크축 필렛부의 피로강도 평가법과 본 연구에서 제시된 응력 추정법을 함께 사용한다면 크랭크축의 초기 설계단계에서도 정확한 피로강도평가가 가능할 것이다.

### 3. 결론

당사가 자체 개발한 중속 디젤 엔진인 힘센엔진의 크랭크축에 대한 강도평가로부터 구조 취약부 위치와 크랭크축의 정규 피로 안전율을 확인할 수 있었다. 또한 오일 홀의 강도 평가로부터

오일 홀 내부의 표면조도에 따른 정규 피로 안전율을 변화와 오일 홀 내부의 응력분포 특성을 파악할 수 있었다. 이러한 오일 홀에 대한 결과로부터 적절한 표면 조도와 표면 연마 깊이를 결정하는 방법을 제시해 보았다. 응력집중계수를 이용한 오일 홀 응력분포와 구조해석으로 얻어진 응력분포의 비교 결과, 그 유사성을 확인하였고 응력집중계수를 사용하여 응력추정이 가능함을 알았다. 이는 크랭크축의 초기 설계 단계에서 신속한 설계 검증 작업이 가능하게 하리라 판단된다.

### 참고문헌

- (1) Kim J.T., Park S.I., Yoo S.N., Kim T.D., 2001, "Development of a New Practical Medium Speed Diesel Engine - HYUNDAI H21/32," CIMAC, Vol. 1, p. 47.
- (2) 日本機械學會, 1995, "疲勞強度設計資料," pp. 11.
- (3) 全孝重, 1996, "內燃機關講義," 曉星出版社, p. 379.
- (4) IACS, 1986, "Requirements Concerning Machinery Installation : Calculation of Crank-shaft for I.C. Engines", M53.
- (5) Dowling, N.E., 1999, "Mechanical Behavior of Materials : Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue," Prentice Hall International Inc., p. 397.
- (6) Peterson. R.E., 1974, "Stress Concentration Factors," John Wiley & Sons, p. 108.