

## 엔진 커넥팅로드의 좌굴평가에 대한 연구

이문규\*(서강대 대학원), 문희욱(서강대 대학원), 이형일(서강대 학교), 이태수(서강대 학교),  
신성원(현대자동차), 장훈(현대자동차)

### Study of Buckling Evaluation for the connecting rod of the engine

M. K. Lee(Mech. Eng. Dept. SGU), H. W. Moon(Mech. Eng. Dept. SGU), H. I. Lee(Mech. Eng. Dept. SGU), T.  
S. Lee(Mecha Eng. Dept. SGU), S. W. Shin(HMC), H. Chang(HMC)

#### ABSTRACT

This study investigates the buckling evaluation of connecting rods used in the diesel engine through finite element analysis. The Rankine formula, which is modified from classical Euler's formula, has been widely accepted in automotive industry to evaluate the buckling of connecting rods. Apparently, this formula is most suitable for the straight and idealized rod shape, and over-simplifies the geometric complexity associated with connecting rods. The subspace iteration method in FEA is used to predict the critical buckling stress of a connecting rod with certain slenderness ratio. To create models with various slenderness ratios for shank portion in the rod, the automatic meshing preprocessor was implemented. Results from FEA were verified by the experiments, in which the embedded strain gages measured for the connecting rod running at 4000rpm. The result indicates that the buckling prediction curve through FEA and experiment is effectively different from the curve of classical Rankine formula.

**Key Words** : 좌굴예측(buckling prediction), 유한요소해석(finite element analysis), 커넥팅로드(connecting rod), 부분공간반복법(subspace iteration method)

#### 1. 서론

커넥팅로드는 실린더에서의 폭발에 의한 피스톤의 왕복운동을 크랭크축의 회전으로 전달, 전환 시켜주는 운동계 부품으로 이에 대한 경량화나 형상의 개선은 연비 향상 및 시스템의 효율향상 등의 주요한 요소로 작용한다. 비록 커넥팅로드의 좌굴 해석에 대한 연구는 많지 않고 그 필요성도 크게 인식되고 있지 않지만 엔진부품에 대한 경량화의 필요성으로 커넥팅로드의 형상설계는 주요한 변수로 작용하고 있고 이에 따른 정확한 좌굴평가식을 정립할 필요가 있다.

좌굴에 대한 고전적인 연구는 주로 건축 또는 토목공학에서 빔, 빔-기둥 그리고 판구조등을 대상으로 한 elastic instability 에 대한 연구로써 약 250년 전에 L. Euler가 압축하중에 의한 측면좌굴의 연구로 시작되었다. 그 후 S.P. Timoshenko 에 의해 다

양한 형상과 조건들에 따른 많은 이론적인 공식과 실험적인 자료를 산출하였다[1]. 그 후 수정된 여러 좌굴 평가식이 제안되었으며 그 중 elasto-plastic frame 에 대한 Rankine 평가식의 연구가 한 줄기로 진행되어 왔다[2]. 그러나 커넥팅로드는 기존의 좌굴 평가식에서 가정된 균일 단면 형상이 아닌 형상구배가 크므로 평가식에 사용된 변수를 그대로 적용하는 것은 실제 환경에 대한 많은 오차를 포함하게 된다.

유한요소해석기법이 도입된 후에는 이러한 좌굴 해석을 위해 고유치문제를 해석하는 방법이 시도되었다. 그 중에는 기본적인 좌굴모드로 인한 특정 굽힘에너지의 균일성을 목적함수의 주요변수로 정하여 최적화 기법을 통해 수치해를 얻는 방법이 있고 그 밖에 고유치문제를 효율적으로 해석하는 K. Bathe 등에 의한 부분공간반복법(subspace iteration method)과 1950년 C. Lanczos 에 의해 처음 제안된

Lanczos 방법이 있다[3,4,5].

기존의 커넥팅로드에 대한 좌굴 평가식은 고전적인 Rankine formula 를 따른 것으로 본 연구의 목적은 이에 대한 한계성을 분석하고 유한요소법의 부분공간반복법을 이용하여 커넥팅로드의 형상에 적합한 고유치해석방법을 제안함에 있다.

## 2. 커넥팅로드에 대한 좌굴 평가식

### 2.1 고전적 평가식

대표적인 하중전달부품인 커넥팅로드에는 강성 및 내 피로성 그리고 좌굴에 대한 안정성을 요구하고 있다. 이에 기존에 사용되는 최대 압축하중 시의 좌굴에 대한 평가식은 Rankine formula 를 따르고 있다(식 1).

$$\sigma_{crit} = \left( \frac{1}{\pi^2 E} \left( \frac{KL_0}{r} \right)^2 + \frac{1}{f_c} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{I/A}$$

이는 탄성 좌굴식으로 쓰이는 Euler formula 를 항복강도와 조화평균시킴으로써 보완한 식으로  $E$  는 재료의 탄성계수이고  $f_c$  는 항복강도이다. 좌굴 평가식은 형상의 세장비 ( $L_0/r$ ) 의 함수로 결정되고 여기서  $I$  와  $A$  는 각각 면적관성모멘트와 단면적을 나타낸다. 그리고  $L_0$  는 대단부 축의 중심과 소단부 축의 중심간 거리로 본 연구에서 기준길이를 사용하였다.  $K$  는 경계조건에 따른 상수 값으로 양단이 핀 결합 조건이면 1 을 나타내고 고정단일 경우에는 0.5 를 나타낸다.

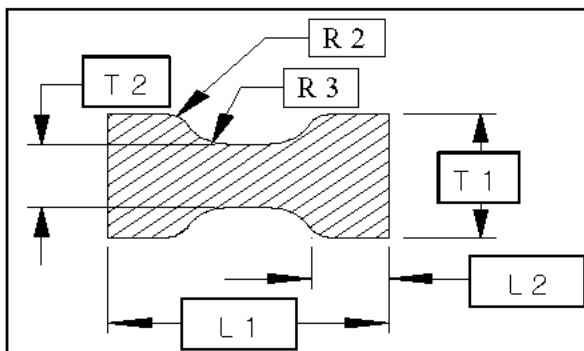


Fig. 1 Design variables of shank part

### 2.2 유한요소법을 이용한 좌굴 예측

커넥팅로드 모델은 디젤엔진에 쓰이는 모델을 대상으로 하였고 이에 대한 형상과 재료의 특성을 사용하였다. 일반적인 좌굴평가식은 세장비에 따라 나타내게 되므로 본 시편에 대한 좌굴평가식을 생성하기 위해서는 다양한 세장비에 대한 커넥팅로드 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 shank 부의 단면형상에 대한 설계변수를 설정한 후 각 변수에 따라 다양한 세장비를 갖는 전모델을 생성하는 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다(Fig. 1).

경계조건과 하중조건은 실제운동과 동일하게 모사하기 위해 대단부와 소단부에 축을 생성하여 핀 접촉으로 구성하였고 축 중심간의 방향으로 압축하중과 인장하중을 가하였다. 그 크기는 실제 엔진에서 4000rpm 시에 걸리는 하중 값을 설정하였다.

좌굴해석에는 편심하중의 영향에 대한 비중이 크게 작용하므로 실제 엔진 실험을 통해 동적 하중에 대한 편심거리의 영향을 분석하였다. 즉, 커넥팅로드에 스트레인게이지를 부착시킨 다음 엔진에 결합하여 4000rpm 까지 가동시켜 실시간 변형률 값을 얻을 수 있다(Fig. 2). 여기서 커넥팅로드의 양쪽면에 대한 변형률의 차이로 굽힘모멘트와 편심거리를 분석한 결과 그 영향을 무시할 수 있다는 결과를 얻었다. 따라서 순수압축하중(64749N)과 인장하중(9559N)을 가하였다.

좌굴해석은 subspace 방법을 사용하여 고유치해석을 수행하였다. 수행하여 얻은 고유치로 탄성임계좌굴응력을 얻을 수 있고 이는 Rankine formula 에 삽입하여 즉, 항복강도와의 조화평균을 통해 탄소성임계좌굴응력을 구하게 된다. 최종적으로 세장비를 변화시키면서 얻은 임계좌굴응력들은 좌굴평가식을 구성하게 된다.

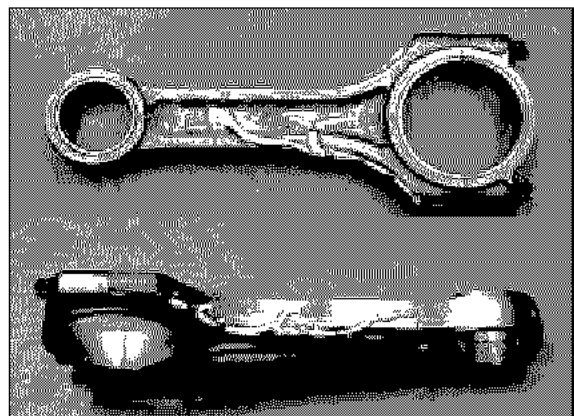


Fig. 2 The specimen of connecting rod bonding strain gages

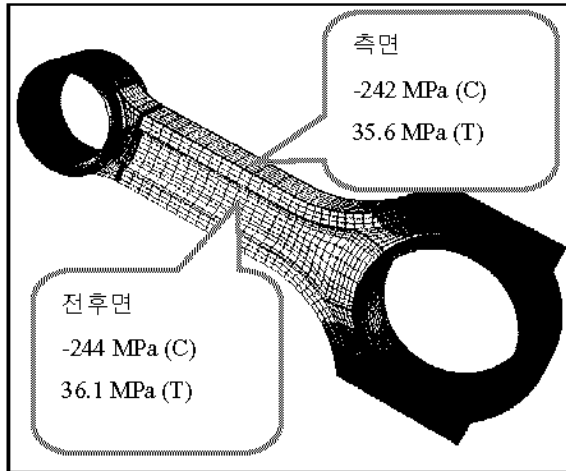


Fig. 3 Stress distribution of the connecting rod for tension (9559N) and compression (64749N) loading condition.

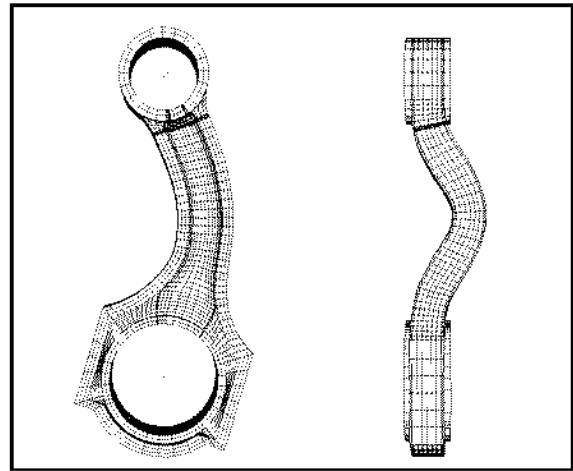


Fig. 4 Buckling analysis of the connecting rod by FEM; 1<sup>st</sup> mode(side buckling, left), 2<sup>nd</sup> mode (front-rear buckling, right).

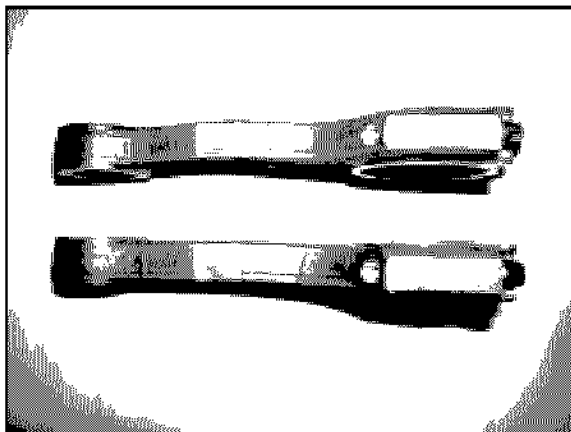


Fig. 5 Specimens buckled in 2<sup>nd</sup> mode(front-rear buckling).

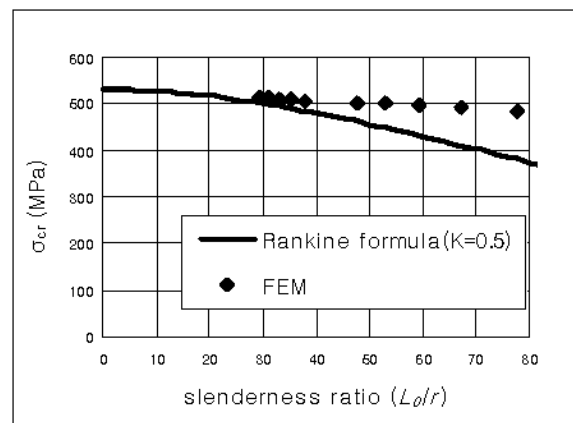


Fig. 6 Comparison of critical stress of the connecting rod(FEM) and Rankine formula curve as the slenderness ratio for the front-rear buckling

### 3. 결과

#### 3.1 유한요소모델 검증

앞에서도 언급한 실제 엔진의 커넥팅로드에 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 얻은 실험의 결과 값으로 유한요소모델을 검증하였다. 유한요소모델의 인장과 압축하중을 가한 정적해석을 수행한 결과 shank 부의 전후면과 측면에 걸리는 압축 및 인장 응력이 실험의 결과 값과 매우 유사한 값을 갖음을 알 수 있다(Fig. 3). 따라서 요소망자동생성 프로그램을 이용하여 사용자가 원하는 설계변수에 대한 커넥팅로드의 적합한 모델을 효율적으로 생성

할 수 있고 이는 차 후에 커넥팅로드의 최적설계에 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

#### 3.2 유한요소법을 이용한 좌굴 평가

유한요소법을 이용한 커넥팅로드의 좌굴해석을 수행한 결과 첫번째 모드로는 측면좌굴이 일어나고 두번째 모드는 전후면좌굴이 일어남을 알 수 있다(Fig. 4). 하지만 그 고유치의 값이 각각 41.242 와 41.833 으로 거의 차이가 없었다. 이는 비록 수치해석에서는 측면좌굴이 전후면좌굴보다는 발생할 가능성이 크다는 것을 의미하지만 그 차이가 거의 없기 때문에 실제 현상에서는 그 상황에 따라 두 모

드름에서 어떤 좌굴도 발생할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 모델이 된 실제 커넥팅로드에 동일한 경계조건에서 하중을 가하여 좌굴시킨 결과 6개의 모든 시편이 전후면 좌굴로 변형되었다(Fig. 5). 이를 바탕으로 본 연구에서는 우선적으로 전후면 좌굴에 대한 평가식만을 분석하였다.

전후면 좌굴의 경우 양단의 회전 자유도가 허용되지 않으므로 고정단의 경계조건을 사용하였고 따라서  $K$ 는 0.5의 값을 갖는다. 유한요소해석을 통해 얻은 좌굴 예측 값은 총 10가지의 다른 세장비를 갖는 모델에 대해서 얻은 것이며 이에 대한 평가선도가 Rankine formula와 유사한 일정한 선도를 나타냄을 알 수 있다(Fig. 6).

두 선도에 대한 결과 값을 비교해 보면 유한요소해석을 통해 얻은 평가선도가 기존의 고전식보다 전체적으로 더 큰 값을 갖음을 알 수 있고 그 값의 차이는 세장비가 커짐에 따라 비례한다. 따라서 실제 커넥팅로드에 대한 임계좌굴값은 측정하는데 있어 축방향으로 형상이 균일한 막대에만 적용되는 Rankine formula를 사용하는 것은 한계가 있으며 유한요소해석을 이용한 좌굴예측이 더 정확한 결과값을 얻는 방법이라 사료된다. 이는 차 후에 좌굴실험을 통해 검증할 계획이다.

#### 4. 결론

유한요소해석을 통해 좌굴모드에 따른 여러 형상의 좌굴임계응력을 구할 수 있었고 주요한 좌굴모드는 측면 좌굴과 전후면 좌굴이었으며 두 모드와의 차이는 미소하였다. 이는 차 후에 단면형상을 설계할 때에는 설계변수에 대해 두 방향의 좌굴을 함께 고려해야 함을 의미한다.

유한요소해석에 의한 좌굴평가식은 기존의 Rankine 평가식과 유효한 차이를 갖게 되고 그 차이는 세장비가 커질수록 더 커짐을 알 수 있다. 이는 커넥팅로드의 경량화 설계에 대한 충분한 여지를 부여하고 있다. 따라서 본 연구결과는 커넥팅로드의 경량 설계에 중요한 기초자료로 사용될 수 있으리라 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Timoshenko, P., Gere, M., "Theory of elastic stability," McGRAW-Hill, New York, 1861.

2. Jaspert, P., "Extending of the Merchant-Rankine formula for the assessment of the ultimate load of frames with semi-rigid joints," J. Construct. Steel Research, 11, 283-312, 1988.

3. Szyszkowski, W., Watson, G., "Optimization of the buckling load of columns and frames," Eng. Struct., Vol. 10, 249-256, 1988.

4. Bathe, J., Wilson, L., "Large eigenvalue problems in dynamic analysis," J. Engrg. Mech. ASCE, Vol. 98, 1471-1485, 1972.

5. Lanczos, C., "An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators," J. Res. Natl. Bur. Stand., Vol. 45, No. 4, 255-282, 1950.