

엔진 실린더 내 물 유입이 커넥팅로드 조인트반력에 미치는 영향

김형현*, 윤희석**, 서권희***, 문영득*

An Influence of Water Ingestion into Engine Cylinder on the Joint Reaction Force of the Connecting Rod

Hyeong-Hyeon Kim*, Hi-Seak Yoon**, Kwon-Hee Seo***, Young-Deuk Moon*

ABSTRACT

This paper focus on investigating the influence of the amount of water ingestion and the engine speed on the joint reaction force of the connecting rod in engine. The connecting rod was modelled by MSC/PATRAN, the modal informations of it were obtained by the DMAP module in the MSC/ NASTRAN, and the dynamic force history was computed through the flexible multibody dynamic simulation in DADS.

To analyze the joint reaction force acting on the connecting rod, the 48 cases were investigated. The engine speed varies with 200, 700, 1600, 2400rpm and the volumetric ratio of water to the combustion chamber varies with 0, 10, 20, ... , 90, 95 and 97.5%. As the engine speed decreases and the amount of water ingestion increases, the joint reaction force increases. Especially when the amount of water ingestion exceeds the 70% of the volume of the combustion chamber, the joint reaction force acting on the connecting rod is over the design strength.

Key Words : Connecting Rod(커넥팅로드), Joint Reaction Force(조인트반력), Water Ingestion(물 유입)
Flexible Multibody Dynamics(유연다물체 동역학)

기호설명

- k : spring constant
- n : polytropic coefficient
- v_i : volume
- p_i : pressure
- A : section area of cylinder
- K : bulk modulus of elasticity

1. 서론

엔진은 실린더 내에서 연료와 공기의 혼합기를 폭발적으로 연소시키는 과정에서 동력을 발생시키는 장치로, 동력발생을 위해서는 연료와 공기를 필요로 한다. 그러나, 때로는 엔진 실린더 내에 유입되어서는 안 될 오일이나 물과 같은 이물질(비압축성 유체)이 유입됨으로써, 커넥팅로드가 휘거나 절손되어 엔진이 파손되는 경우가 있다. 지금까지

* 전남대학교 대학원
** 전남대학교 기계공학과
*** 아시아자동차공업(주)

엔진 실린더 내부부품 즉, 피스톤, 커넥팅로드, 크랭크축에 관한 연구내용을 살펴보면, 변창수¹⁾는 크랭크축 설계의 기초자료로 활용키 위한 기초연구로서 디젤엔진을 대상으로 연소실내 연소압력을 측정하여 토크하모닉계수 계산에 이용토록 하였고, 안상호²⁾는 유한요소법을 이용하여 크랭크 웨브의 형상을 최적화하여 크랭크축의 무게를 감소시켰다. 박찬희³⁾는 커넥팅로드의 응력 허용한계를 만족시키면서 중량을 최소화하는 커넥팅로드의 최적화방법을 개발하고자 하였으며, 최장섭⁴⁾은 가솔린 엔진의 커넥팅로드에 작용하는 관성력과 폭발력에 기인한 응력과 이러한 반복하중에 기인한 피로를 분석하였다.

이러한 연구들은 정상상태의 엔진을 대상으로 크랭크축 또는 커넥팅로드의 응력을 해석하거나 형상을 최적화하는데 연구목적은 두고 실시되었으며, 엔진에 물이 유입된 경우와 같은 비정상적인 경우에 대해서는, 그것이 엔진 파손 여부와 직결되어 있음에도 불구하고, 그에 대한 연구는 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 엔진 실린더 내에 물이 유입된 비정상적인 경우를 대상으로, 유입된 물의 양 및 엔진회전수가 커넥팅로드의 조인트반력에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 실린더 내 물 유입 경로

실린더 내에 물이 유입되는 경로는

- 1) 실린더 블럭의 균열 발생시, 냉각수가 균열을 통해 실린더 내로 물이 유입되는 경우
 - 2) 연료속의 수분이 연료계통을 통해 실린더 내로 유입되는 경우
 - 3) 흡기계통을 통해 공기속의 수분이 실린더 내로 유입되는 경우
- 등이 있으며, 1)의 경우는 실린더블럭이 균열된 상태이므로 엔진을 사용할 수 없으며, 2), 3)의 경우는 실린더 내로 유입된 물의 양이 아주 미소하여 수증기로 기화되어 배기행정중에 대기로 배출되므로 엔진에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있다. 그러나, 차량 시동이 걸린 상태에서 세차를 하거나 스노클릿트를 장착하지 않은 상태에서 도섭시 엔진이 침수된 경우에 흡기계통을 통해 비정상적으로 실린더 내에 물이 유입될 수 있으며, 유입된 물의

양에 따라 엔진에 상이한 영향을 미치게 된다.

2.2 실린더 내 물 유입이 미치는 영향

공기청정기를 통과하여 흡기관에 도달한 물은 흡입행정 상태에 있는 실린더로 급격히 유입하게 되며, 유입된 물의 양에 따라 엔진에 다른 영향을 미치게 된다.

소량의 물이 유입되면 유입된 물은 실린더 내의 고온에 의해 수증기 상태로 기화되면서, 급격히 실린더 내의 부피팽창 및 압력상승을 일으키며 실린더 내의 공기흡입능력 및 온도강하로 엔진성능(효율)이 저하한다.

그러나, 다량의 물이 유입되면 일부 물은 수증기로 기화하지 않고 액상으로 존재하여 비압축성 거동을 함으로써, 압축행정중에는 연소실체적을 감소시키는 효과를 나타낸다. 이때, 수증기로 기화된 물의 양 및 흡입된 혼합기량을 무시할 때, 유입된 물의 양이 연소실체적 이상이 되면, 이론적으로 실린더 내에는 무한대의 압축비가 발생하게 된다. 피스톤이 상사점에 접근할수록 실린더 내의 압력은 급격히 상승하게 되며, 물에 의해 피스톤은 더 이상 상사점을 향하여 운동하지 못하고 정지하게 되고, 커넥팅로드는 크랭크축을 통해 전달되는 힘을 순간적으로 받게 되어 결국은 엔진이 정지하거나 파손되게 된다.

2.3 실린더 내 혼합기 모델링

차량용 주요 엔진인 가솔린엔진과 디젤엔진은 흡입·압축·폭발·배기의 반복적인 사이클 행정을 통하여 동력을 발생시키게 된다. 실린더 내에 물이 유입되면 가장 큰 영향을 받는 행정은 압축행정이며, 이론적으로 단열압축을 하게 된다.

혼합기가 단열압축될 때 체적탄성계수 K 및 압력 p 는 각각 다음 식으로 표시된다.

$$K = np \text{ ----- (1)}$$

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = \left(\frac{p_2}{p_1}\right) \text{ ----- (2)}$$

$$\therefore p_2 = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n \cdot p_1$$

여기서 소첨자 1,2는 실린더 내의 두 지점을 나타내며, n 은 비열비로서 실제 엔진에서는 폴리트로픽 변화를 하며, 지수는 1.3⁵⁾이다.

실린더 내의 단면적이 일정하다고 가정하면 식 (1)과 (2)로부터 스프링상수 k 는 다음과 같이 표시된다.

$$k = \frac{n}{l} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n p_1 A \quad (3)$$

[l : 행정, A : 실린더 단면적]

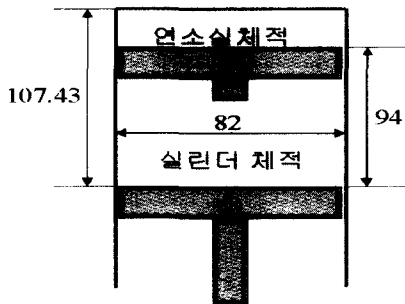


Fig. 1 Dimensions of the engine cylinder

Table 1 Mechanical properties of the connecting rod

재 질	탄성계수 (GPa)	프와송 비	밀 도 (kg/m ³)	항복응력 (MPa)	허용응력 (MPa)
SM55C	206	0.3	7.820	588	98 ⁶⁾

3. 커넥팅로드 조인트반력 해석

3.1 해석조건

차량용 가솔린엔진을 대상으로,

1) 실린더 내에 유입된 물은 액상으로 존재하며, 물은 완전한 비압축성 유체(강체)이다.

2) 실린더 내 혼합기가 형성하는 압력은 비선형 스프링요소로 나타낼 수 있다.

는 기본 가정을 설정, 유입된 물의 양 및 엔진회전수가 커넥팅로드 소단부 조인트반력에 미치는 영향을 해석하였다. 이때 스프링상수 해석에는 FORTRAN을, 유한요소 모델링에는 상용 전/후처리기인 MSC/PATRAN을, 조인트반력 해석에는 상용 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN 및 동력학 해석 프로그램인 DADS를 이용하였고, H/W로는

PC 및 SGI OCTANE을 각각 사용하였다.

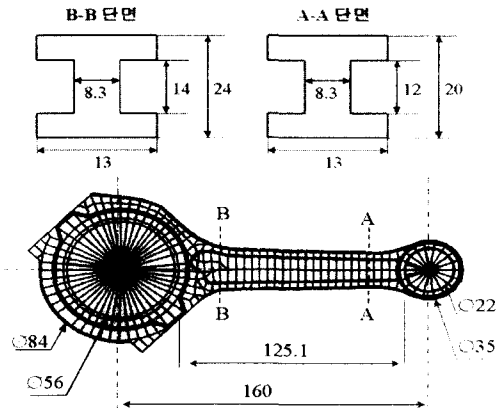


Fig. 2 Geometry of the connecting rod

Table 2 Analysis conditions of the joint reaction force

구 분	해석조건
물의 양(%) (물 유입량/연소실체적)	0, 10, 20, ... , 80, 90, 95, 97.5
엔진회전수(rpm)	200, 700, 1600, 2400

Fig. 1, Fig. 2는 엔진 실린더, 커넥팅로드의 치수를, Table 1에는 커넥팅로드의 기계적 성질을 각각 나타낸 것으로, 연소실체적은 70.9cc, 행정 체적은 496.25cc, 커넥팅로드 생크부 최소단면적은 203mm(Fig. 2의 단면 A-A부)이다. Table 2는 조인트반력 해석 조건을 나타낸 것으로, 물의 양은 연소실체적을 기준으로 12개 조건에서, 엔진회전수는 4개 조건에서 각각 해석을 실시하였고, 실린더 내 혼합기가 형성하는 압력은 식(3)에 따라 피스톤 상부 및 연소실에 부착된 비선형 스프링요소로 모델링하였다

3.2 유한요소 모델링

커넥팅로드의 대단부, 소단부, 그리고 생크부는 MSC/PATRAN을 이용하여 사각형 8절점요소와 삼각형 6절점요소로, 대단부와 소단부의 조인트부는 MPC요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 3은 커넥팅로드의 유한요소모델을 나타낸 것으로 모델

링의 간략화를 위해 표면가공에 의한 미세한 노치 효과와 작은 곡률반경은 무시하였고 Rod와 Cap을 일체로 가정하였다. 모델의 절점 수는 2,922개, 요소 수는 1,684개이며, MPC요소 수는 2개이다.

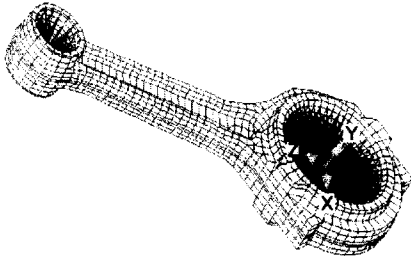


Fig. 3 FE model of the connecting rod

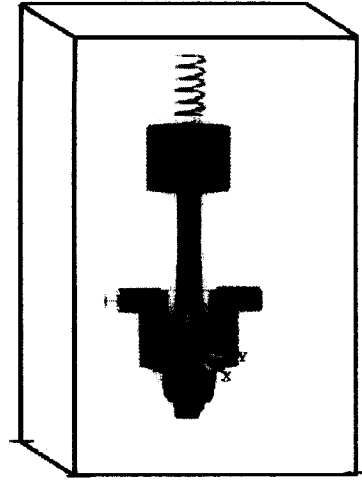


Fig. 4 Flexible multibody dynamic model

3.3 유연다물체 모델링

유연다물체 모델은 크게 실린더블럭, 프레임, 커넥팅로드, 크랭크축, 피스톤의 5개 요소로 모델링하였으며, 주 해석대상인 커넥팅로드에 대해서는 유한요소 모델링을 실시하고, 나머지 4개 요소는 강체로 모델링하였다.

Fig. 4는 DADS를 이용한 유연다물체 동력학 모델을 나타낸 것으로, 모든 운동은 xz평면에서만 일어난다. 엔진은 4점지지방식으로서 프레임에 부싱(bushing)요소로 마운팅시켰고, 크랭크축의 한 저널부는 실린더블럭에 부싱요소로 마운팅되어 있으며, 다른 하나는 회전조인트(revolute joint)로 구속되어 있다. 커넥팅로드의 대단부는 크랭크핀에 구면조인트(spherical joint)로, 소단부는 피스톤에 유니버설조인트(universal joint)로 연결되어 있다. 피스톤 상단은 실린더 방향으로만 운동이 가능하도록 병진조인트(translational joint)로 구속되어 있으며, 실린더 내부의 혼합기 특성은 TSDA(Translational Spring Damper Actuator) 힘 요소를 이용하여 비선형 스프링 특성을 갖도록 모델링하였다.

본 모델에서는 강체의 수가 5개, 유연체 모드좌표 2개, 병진조인트 1개, 회전조인트 1개, 구면조인트 1개, 유니버설조인트 1개, 회전속도 조건 1개로서, 총 자유도는 8이다.

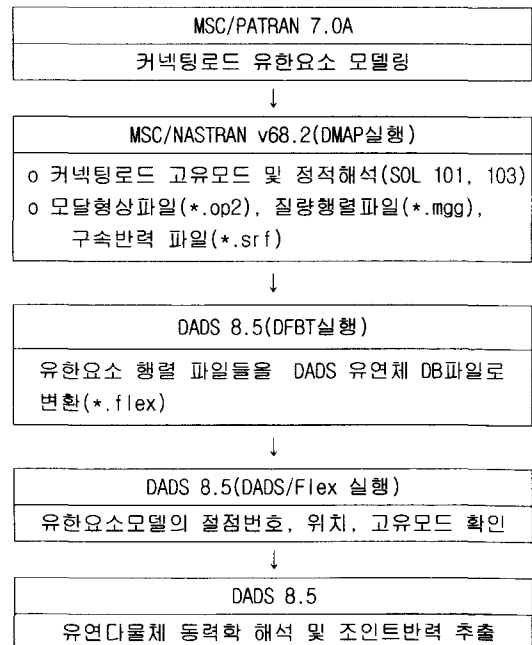


Fig. 5 Diagram of analysis process

3.4 조인트반력 해석

Fig. 5는 전체적인 조인트반력 해석전차를 나타낸 것이다. 먼저 MSC/PATRAN을 이용하여 커넥팅로드에 대한 유한요소모델을 생성하고, MSC/NASTRAN의 DMAP모듈을 이용하여 커넥팅로드의 모드형상 및 절점의 위치, 질량정보, 구속반력 등이 포함된 모달형상 파일(*.op2) 및 질량행렬 파일(*.mzg), 구속반력 파일(*.srf)을 얻어낸다. 이 파일들을 DADS에 입력하여 유연다물체 모델을 구성한 후 동적해석을 수행하면 커넥팅로드 소단부에서의 조인트반력이 계산된다.

4. 결과 및 고찰

압축행정시 엔진 실린더 내로 유입된 물이 커넥팅로드의 조인트반력에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 물 유입량은 연소실체적을 기준으로 12개 조건에서, 엔진회전수는 200, 700, 1600, 2400rpm등 4개조건에서 하사점에서의 크랭크 회전각을 0°로 하여 720°까지 각각 해석을 실시하였다.

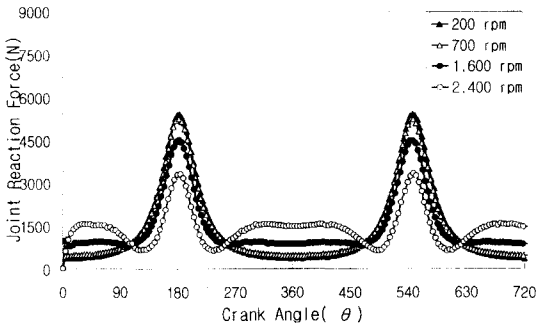


Fig. 6 The amount of water ingestion(0%)

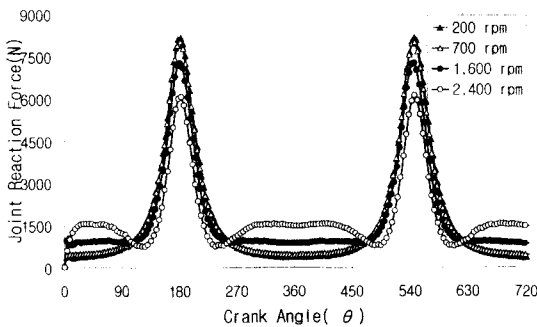


Fig. 7 The amount of water ingestion(30%)

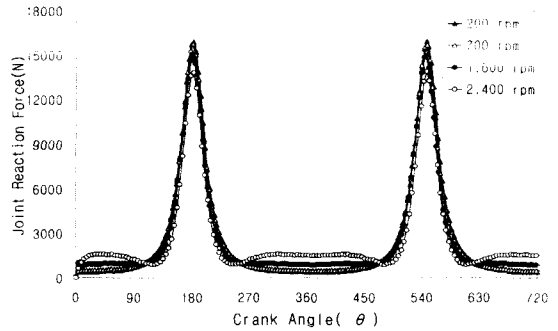


Fig. 8 The amount of water ingestion(60%)

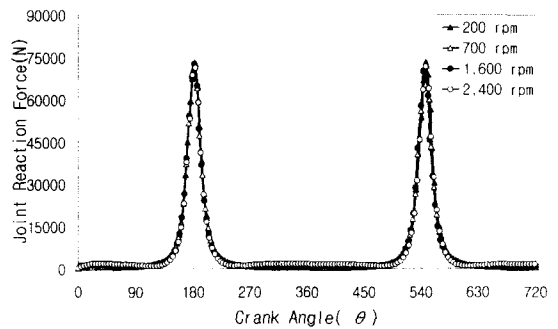


Fig. 9 The amount of water ingestion(90%)

Fig. 6 ~ Fig. 9는 유입된 물의 양이 동일한 경우, 엔진회전수 변화에 따른 커넥팅로드 소단부에서의 조인트반력을 나타낸 것으로, 최대 조인트반력은 모두 200 > 700 > 1600 > 2400rpm의 크기순서를 나타내며, 이는 유입된 물의 양이 증가할수록 최대 조인트반력은 증가하나, 관성력의 크기는 특정회전수에서 일정한 값을 가짐으로써, 유입된 물이 관성력에 비하여 상대적으로 조인트반력에 큰 영향을 미치지 때문이다.

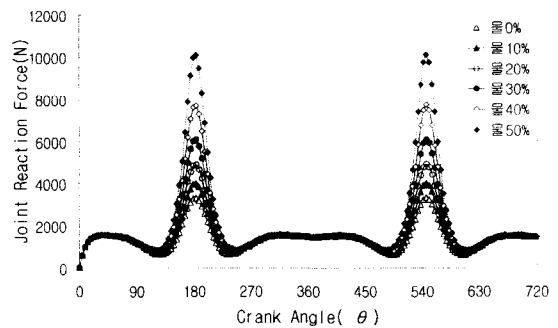


Fig. 10(a) Engine speed(2400rpm)

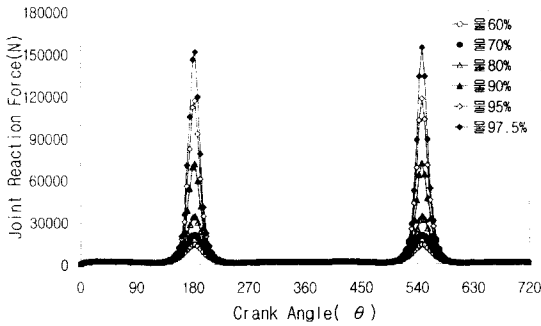


Fig. 10(b) Engine speed(2400rpm)

Fig. 10은 엔진회전수 2400rpm에서의 물 유입량 변화에 따른 조인트반력을 나타낸 것으로, 물 유입량이 증가할수록 최대 조인트반력은 증가하며, 200, 700, 1600rpm에서도 동일한 결과를 나타낸다.

Fig. 11은 Fig. 6 ~ Fig. 10의 결과를 종합한 것으로, 상이한 엔진회전수에서 유입된 물의 양에 따라 커넥팅로드 소단부에 발생하는 최대 조인트반력을 나타낸 것이다. 최대 조인트반력은 물의 양에 비례하여 선형적으로 증가하며, 물의 양이 연소실체적의 60% 이상이 되면 점차 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. Table 1 및 Fig. 2로부터 커넥팅로드 생크부의 설계강도는 대략 20,000N이며, 따라서, Fig. 11로부터 연소실체적의 70% 이상의 물이 엔진 실린더 내로 유입되면 커넥팅로드에는 설계강도 이상의 조인트반력이 작용하게 됨을 알 수 있다.

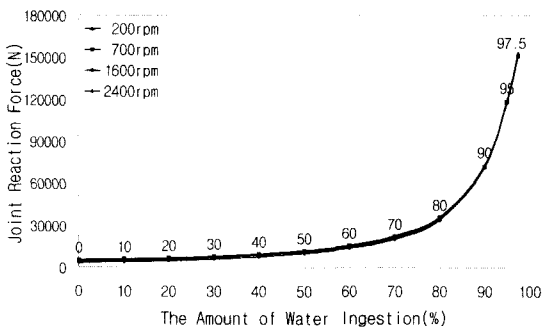


Fig. 11 Comparison of the max. joint reaction force

5. 결론

가솔린엔진 실린더 내에 물이 유입된 비정상 적인 경우를 대상으로, 유입된 물의 양 및 엔진회전수가 커넥팅로드의 소단부 조인트반력에 미치는 영

향을 규명하기 위하여 유연다물체 동역학 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유입된 물의 양이 증가할수록 커넥팅로드에 발생하는 조인트반력은 비선형적으로 증가하며, 특히 물 유입량이 70%를 초과하면, 커넥팅로드에 발생하는 조인트반력은 설계강도를 초과한다.

2) 유입된 물의 양이 동일한 경우, 커넥팅로드에 발생하는 조인트반력은 엔진회전수가 낮을수록 크며, 이는 유입된 물의 양이 증가할수록 최대 조인트반력은 증가하나, 관성력의 크기는 특정회전수에서 일정한 값을 가짐으로써, 유입된 물이 관성력에 비하여 상대적으로 조인트반력에 큰 영향을 미치기 때문이다.

참고문헌

1. 변창수 외, "디젤엔진의 연소압력측정 및 비틀림진동 기진력 해석," 亞細亞技報, Vol.19, pp. 35-44, 1994.
2. 안상호, "有限要素法에 의한 Connecting Rod 設計評價에 관한 研究," 亞細亞技報, Vol. 22, No. 2, 1995.
3. 박찬희 외, "이중 최적화기법을 이용한 커넥팅로드의 형상 최적 설계," 대한기계학회논문집, 제17권, 4호, pp. 776-785, 1993.
4. 최장섭, "Connecting Rod의 응력해석과 피로분석," 起亞技報, pp. 44-50, 1990.
5. 김덕윤, "내연기관," 대광서림, pp. 21-23, 1994.
6. 小田柿浩, "自動車の設計", 山海堂, pp. 74-75, 1978.
7. Mark P. Miller, "USER'S GUIDE, Getting started with MSC/NASTRAN," The Macneal-Schwendler Corporation, 1993.
8. DADS/Flex Manual, Rev8.5, CADSI, Oakdale, IowaCity, 1995.