

디젤기관용 커넥팅로드 대단부의 피로강도에 관한 연구

김 종 호*

A Study on the Fatigue Strength of Connecting Rods for Diesel Engines

Kim Jong-Ho

〈 목 차 〉

- | | |
|-------------------------|------------------|
| I. 서 론 | IV. 피로시험 결과 및 고찰 |
| II. 커넥팅 로드 대단부의 반복응력 계산 | V. 결 론 |
| III. 피로시험 | * 참고문헌 |

Abstract

The estimation of fatigue strength at the design stage is very important in order to arrive at feasible and cost effective solutions considering the total lifetime of the structure and machinery components.

In this study the stress calculations and the fatigue tests of the connecting rods for diesel engines were conducted to determine the fatigue strength under stress ratio $R=0$. And the effect of stress ratio are discussed.

The main result obtained in this study is that the fatigue strength of the connecting rod to which the built up welding process has been applied is equivalent to that of SF61 class forged steel or greater thereto.

Key words

Connecting rod(연접봉), Serration(세레이션), Fatigue life(피로수명), Stress concentration factor(응력집중계수), Submerged arc welding(서브머지드아크용접), Stress ratio(응력비), Stress range(응력범위)

* 한국해양대학교 기관시스템공학부 조교수

I. 서 론

디젤기관의 커넥팅 로드에는 연소가스의 폭발력으로 인한 압축응력, 인장응력, 굽힘응력 및 비틀림 응력이 계속적으로 반복하여 작용하기 때문에 변형이나 피로균열이 발생하는 경우가 많다. 특히 커넥팅 로드와 대단부를 경사지게 분할한 구조의 경우 세레이션으로 불리는 대단부의 나사면에 발생하는 균열에 의해서 대단부와 크랭크 핀 볼트가 절손되어 실린더나 크랭크실의 대형손상을 초래하는 사고가 빈번하게 발생하고 있다.^{1)~2)}

상기 변형이나 균열에 의하여 손상되어진 커넥팅로드를 재생하는 종래의 방법으로는 손상된 커넥팅로드를 폐기처리하고 신제품으로 교체하는 방법과 변형된 대단부를 열간 또는 냉간가공에 의하여 교정한 후 원래의 치수대로 가공하는 방법과 균열을 제거하고 수동 피복 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법이 알려져 있다.

손상된 커넥팅로드를 폐기처리하고 신제품으로 교체하는 방법은 가장 손쉽고 안정성을 높일 수는 있으나, 수리기간 내에 또는 단시간에 기존의 커넥팅로드와 동일한 신제품을 구입하는 것이 현실적으로 쉽지 않고 또 신제품의 구입에 적지 않은 비용이 소요되는 문제점이 있다.

변형된 대단부를 열간가공이나 냉간가공에 의하여 교정한 후 원래의 치수대로 가공하는 방법은 작업자의 시행착오나 경험에 상당한 부분을 의존하므로 작업의 성공을 또한 불투명한 문제점이 있다.

또 대단부에 발생한 균열을 제거하고 수동 피복 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법은 전용의 용접기나 용접용 재료가 제공된다면 현실적으로 적용가능성이 가장 높은 방법이지만, 커넥팅로드의 재료인 단조강은 탄소함유량과 탄소당량이 높기 때문에 육성용접과정에서 용접균열 및 용접입열에 의한 변형 등이 발생하는 문제점이 있다.

이상의 관점에서 저자는 변형이나 균열에 의하여 손상되어진 커넥팅로드를 재생하는 종래의 방법에 대한 문제점을 개선하기 위한 일련의 연구를 수행하였다.³⁾ 그 중에서 본 연구에서는 커넥팅 로드와 대단부에 발생한 균열을 제거하고 서브머지드 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 커넥팅 로드와 육성용접을 적용하지 않은 모재의 피로한도에 대하여 다루고자 한다. 이를 위하여 커넥팅 로드 대단부에 부가되는 반복응력에 대한 계산과 상기 육성용접을 적용한 커넥팅 로드를 사용한 피로시험을 수행하고 그 결과를 고찰하였다.

II. 커넥팅 로드 대단부의 반복응력 계산

커넥팅 로드는 내연기관의 부품 중 부가되는 하중이 크고, 또한 하중의 변화를 가장 심하게 받는 것 중의 하나이며 열이나 진동에 의한 영향도 크므로 설계 시 정적 강도를 충분히 고려함은 물론이고 반복적인 하중과 변형에 대하여서도 고려하여야 한다. 커넥팅 로드 대단부에 작용하는 하중은 가스의 폭발압력, 왕복질량에 의한 관성력, 커넥팅 로드 볼트의 조임력, 피스톤 링, 피스톤 및 상하 베

어링부의 마찰에 의한 힘, 커넥팅 로드와 좌우요동에 의한 굽힘의 힘 등을 들 수가 있다. 이 중에서 커넥팅 로드 대단부에 대한 설계단계에서 실제적으로 고려하여야 하는 하중은 가스의 폭발압력에 의한 하중, 피스톤, 피스톤핀, 및 커넥팅 로드 등의 왕복질량에 의한 관성력, 이들이 조합된 반복하중 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 현재 실용화된 3,000마력급 이하의 여러 디젤기관에 대하여 상기의 하중을 기준으로 전산화된 계산을 수행하고 그 중에서 반복하중이 가장 가혹한 디젤기관을 계산모델로 채택하였다. Table 1은 반복응력의 계산에 사용된 디젤기관의 제원을 나타내고 있다.

Table 1 A diesel engine used for calculating cyclic stresses

Engine Model	Niigata 6L 16xc, 600 PS x 1500 R.P.M
Pmax : 110 kg ^f /cm ² Pi : 14.92 kg ^f /cm ² Cylinder bore : 160 mm Stroke : 200 mm Connecting rod length : 375 mm Angle of big end to the direction of the center line of cylinder : 45° Weight of piston, piston pin and connecting rod : 20 kg ^f	

1. 가스의 폭발압력에 의한 하중

가스의 폭발압력은 대단부를 압축하는 힘으로 작용하고 이를 식으로 표현하면 식(1)과 같이 된다.

$$F_g = \frac{\pi D^2 p_{max}}{400} \cos \alpha K_t \text{ (Kgf)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, p_{max} : 최고 폭발압력(Kgf/cm²), D: 실린더 직경(mm), α : 커넥팅 로드 대단부가 실린더 중심선과 이루는 경사 각도, K_t : 응력집중계수

2. 피스톤·피스톤핀 및 커넥팅 로드 등의 왕복질량에 의한 관성력

4행정 디젤기관에서 왕복질량에 의한 관성력은 식(2)와 표현할 수 있고, 이 관성력은 커넥팅 로드 대단부에 인장하중으로 작용하게 된다. 또 이것이 최대가 되는 시기는 피스톤이 배기행정 종말의 상사점 즉 $\theta=0$ 에 있을 때가 된다.

$$F_a = (m_p + m_s) \omega^2 r (\cos \theta + \cos 2\theta/\lambda) \cos \alpha K_t \dots\dots\dots (2)$$

여기서 m_p , m_s : 피스톤과 커넥팅 로드의 전왕복 질량

r : 크랭크의 반경

λ : 커넥팅 로드의 길이/크랭크의 반경

α : 커넥팅 로드 대단부가 길이방향과 이루는 경사 각도

K_t : 응력집중계수

3. 반복응력

상기 압축하중과 인장하중을 대단부의 단면적으로 나누어 커넥팅 로드의 대단부에 작용하는 반복 응력을 정리하면 다음과 같이 되고 이를 그림으로 표현하면 Fig. 1와 같이 된다. 또 현재 실용화된 여러 디젤기관에 대하여 상기의 하중을 기준으로 전산화된 계산을 수행한 본 연구의 결과에 의하면 현재 실용화되어 있는 디젤기관의 커넥팅 로드는 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R < 0$ 인 상태로 운전되고 있다는 것을 알 수 있었다.

$$\sigma_{max} = 22.3MPa, \quad \sigma_{min} = -77.4MPa, \quad \sigma_{mean} = -27.55MPa,$$

$$\sigma_R = 99.7MPa, \quad \sigma_a = 49.85MPa, \quad \text{Stress ratio, } R = -3.5$$

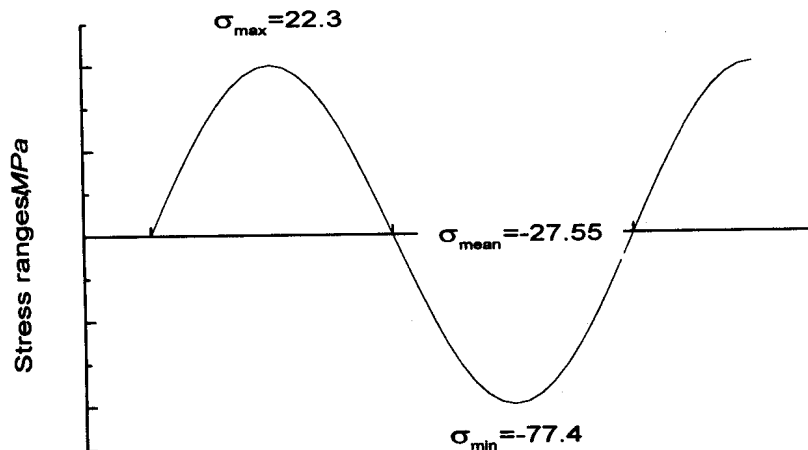


Fig. 1 Stress pattern in connecting rod of calculation model under full load

Ⅲ. 피로시험

1. 피로시험편의 제작

Fig.2와 같은 형상의 실제 커넥팅 로드 대단부를 2mm 절삭한 다음 서브머지드 아크용접을 실시한 후 대단부의 내면을 가공하였다. 대단부 내면에는 사다리꼴 나사(trapezoidal screw thread) TW95 호칭의 나사를 가공하여 실제 커넥팅 로드의 세레이션부를 재현하였다. Table 2와 3은 시험편을 제작하기 위하여 적용한 서브머지드 아크용접의 용접조건과 용접 와이어의 화학성분을 각각 보이고 있다. 용접 와이어는 한국공업규격 KS D 7103에 분류된 직경 1.2mm의 Si-Mn계열 와이어, 플럭스는 한국공업규격 KS D 7102에 분류된 본드 플럭스형을 각각 사용하였다.

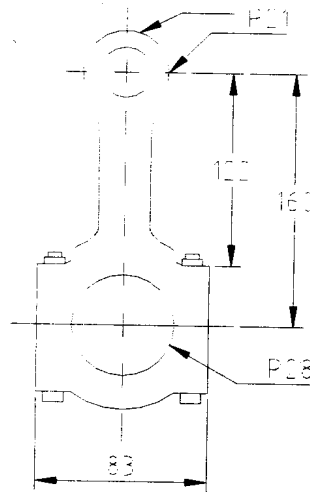


Fig. 2 Dimension of fatigue test specimen

Table 2 Welding condition of fatigue test specimen

Welding process	Voltage(V)	Speed(cm/min)	Heat input(KJ/cm)
Submerged arc welding	29	117	3.263

Table 3 Chemical composition of welding material

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	V
Results	0.16	0.44	1.30	0.016	0.023	0.04	0.05	0.014	0.012

Table 4와 5는 본 연구에서 사용한 실체 커넥팅 로드의 재료인 단조강 SF61에 대한 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내고 있다.

Table 4 Chemical compositions of SF61(wt. %)

	C	Si	Mn	S	P
Specified	Max. 0.6	0.15 ~ 0.45	0.30 ~ 1.5	Max. 0.035	Max. 0.03
Results	0.32	0.25	0.71	0.01	0.008

Table 5 Mechanical properties of SF61

	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elongation(%)	Reduction of area(%)	Hardness	
					HB	Hs
Specified	≥300	≥600	≥18	40	175 ≤, ≥215	27 ≤, ≥32
Results	345	640	24	50	181	28

2. 피로시험 방법

피로시험은 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=0$ 의 조건으로 실온의 대기 중에서 수행하였으며 시험편의 수, 시험응력범위 등은 일본기계학회가 규정한 통계적피로시험방법에 따라 결정하였다.⁴⁾ 먼저 S-N선도의 경사부에 대한 시험응력을 결정하기 위하여 예비시험을 수행하고 $N_f=5 \times 10^4$ 에 해당하는 응력범위는 280 MPa, $N_f=1 \times 10^6$ 에 해당하는 응력범위는 220 MPa 정도될 것을 예상하고 첫 번째 피로 시험은 응력범위 280 MPa에서 시작하였다. 이후부터는 응력단계를 20 MPa로 낮추면서 응력범위 220 MPa까지 시험값 4개를 구한 후, 200 MPa에서 10^7 회에서 파단되지 않는 최초의 미파단 시험값을 얻었다. 다시 응력범위를 220 Pa로부터 응력단계를 20 MPa씩 올리면서 280 MPa까지 시험 값 4개를 구함으로써 S-N선도의 경사부에 해당되는 8개의 시험값을 구하였다.

S-N선도의 수평부에 대한 피로시험은 상기 통계적피로시험방법에 규정된 Stair case법을 사용하여 $S(i)=200 \pm 20$ MPa에서 시험을 계속하여 총 3개의 시험값을 구하였다.

피로시험에 사용한 시험장비는 정적하중 250 kN, 동적하중 ± 125 kN의 용량을 가진 유압-서보제어 식 피로시험기였고 부하속도는 25 Hz로 하였다.

IV. 피로시험 결과 및 고찰

Fig.3은 서브머지드 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 실체 커넥팅 로드 에 대한 피로시험결과를 응력범위와 파단수명의 관계로 나타낸 것이다. 그럼에

서 화살표를 부기한 실험점은 10^7 사이클에서 파단되지 않은 피로시험편을 의미한다.

피로시험의 결과만을 놓고 보면 실체 커넥팅 로드 의 피로한도는 200 MPa정도에 상당하며 이 값은 전술한 계산모델에서 커넥팅 로드 대단부에 발생하는 응력인 99.7 MPa과 비교하면 2배 정도의 안전율을 가지고 있다고 할 수 있다.

또 피로시험 시의 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=0$ 는 계산 모델로 채택한 커넥팅 로드 의 실제 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=-3.5$ 에 비해서 높은 값을 가지고 있으므로 응력비 수정⁵⁾에 의한 피로강도 향상분까지 고려하면 2배 이상의 안전율을 확보하고 있다고 할 수 있다.

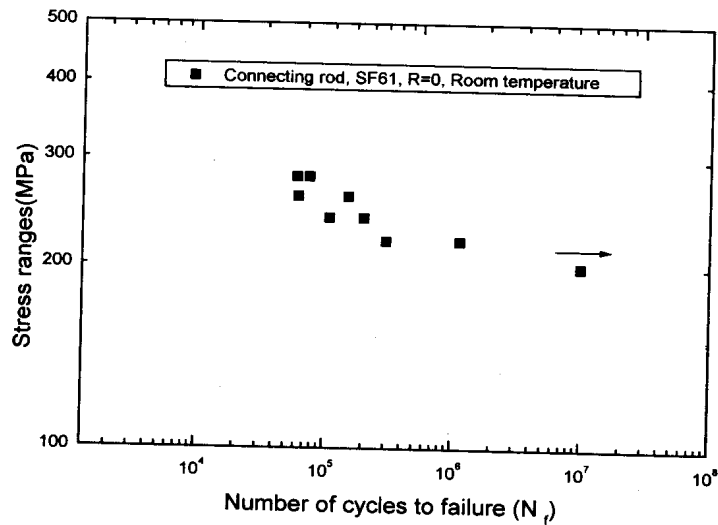


Fig. 3 Stress and number of cycles curve of connecting rod

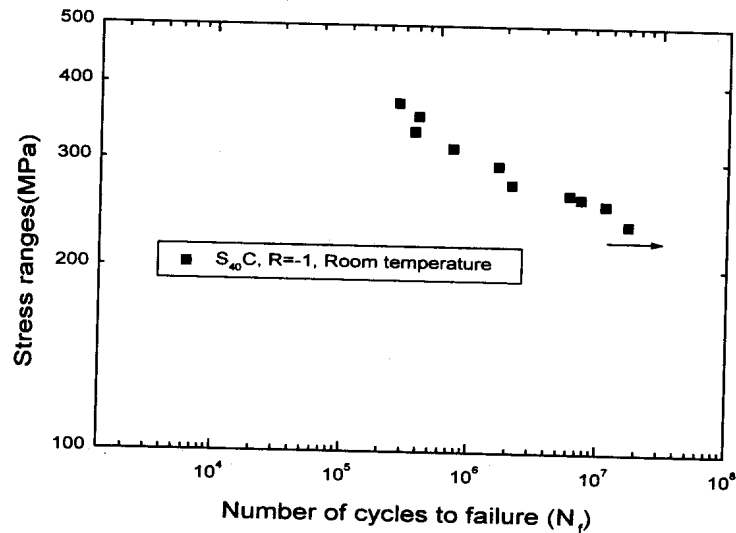


Fig. 4 Stress and number of cycles curve of S40C

Fig.4는 일본재료학회가 기계구조용 탄소강 S₄₀C에 대한 응력비 R=-1조건으로 피로시험을 수행하고 그 결과를 보고한 것이다.⁶⁾ S₄₀C의 인장강도와 항복강도는 본 연구에서 사용한 실체 커넥팅 로드 의 재료인 SF61와 그것과 거의 동등한 기계적 성질을 가지고 있으므로 서브머지드 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 실체 커넥팅 로드의 피로한도와 비교하기 위하여 제시하였다.

그림에서 보면 응력비 R=-1에서 S₄₀C의 피로한도는 230 MPa정도로서 실체 커넥팅 로드의 피로한도보다 높은 것을 알 수 있다. 그러나 응력비 R=0인 조건으로 시험하여 얻어진 실체 커넥팅 로드의 피로한도 200 MPa를 수정 Goodman식^{7)~8)} 사용하여 응력비 R=-1인 조건으로 수정하게 되면 그 대 의 피로한도는 239 MPa이 된다. 따라서 서브머지드 아크용접에 의하여 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 실체 커넥팅 로드의 피로한도는 SF61 또는 S₄₀C 모재의 피로강도 보다 우수한 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 커넥팅 로드의 대단부에 발생한 균열을 제거하고 서브머지드 아크용접에 의하여 대 단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 커넥팅 로드 대단부의 피로균열 발생수명 을 평가하기 위하여 커넥팅 로드 대단부에 부가되는 반복응력에 대한 계산과 소형 커넥팅 로드를 사 용한 피로시험을 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 현재 국내에서 실용화되어 있는 3,000마력급 이하의 디젤기관은 운전 중 커넥팅 로드 에 작용하 는 반복응력의 응력비 R<0인 상태로 설계되고 있음을 알 수 있다. 따라서 상기 디젤기관의 커 넥팅 로드 에 대한 피로균열발생수명을 평가하는 경우 응력비 R에 의한 영향을 충분히 고려하 여야 한다.
2. 커넥팅 로드의 대단부를 육성하여 원래의 치수대로 가공하는 방법을 적용한 커넥팅 로드 대 단 부에 대한 실체 피로시험을 통하여 확인된 피로한도는 200 MPa 정도로서 이것은 단조강 SF61 또는 S₄₀C급 모재의 피로강도와 동등하거나 우수하였다.

참고문헌

1. 이스턴みつじんく柱式會社, “主機 Cylinder block Crack發生”, 事故速報 そのI(機關部關係), E48-12, 1973
2. 이스턴みつじんく柱式會社, “主機 No.4 Cylinder block의Crack”, 事故速報 そのI(機關部關係), E49-20, 1974

3. 김 종호 외 2인, 디젤기관용 커넥팅 로드 의 재생공법 실용화를 위한 연구, 한국해양대학교 지역곤
소음 연구보고서-1998, pp. 9~10, 1998
4. 日本機械學會, 統計的疲勞強度試驗方法, JSME S-002, 日本機械學會, pp. 7~12, 1981
5. David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, pp.10
2~104, 1986
6. The society of material science, Data book on fatigue strength of metallic materials, Volume 3,
pp.186~189, 1996
7. 김종호 외 2인, “응력비의 영향을 고려한 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파 특성 예측 모델”
대한용접학회지, 제 12권 제3호, pp. 80~88, 1994
8. P.Tenge, “Fracture Mechanics in the Design of Large Spherical Tanks for Ship Transport of
LNG”, Norwegian Maritime Research, Vol.1, No.2, pp.45~48, 1973

