

변동 응력을 이용한 커넥팅 로드 강건 설계

이 승 우¹⁾ · 김 한 규²⁾ · 이 태 현²⁾ · 양 철 호^{*2)}

안동대학교 대학원 기계공학과 · 안동대학교 기계자동차공학과

Robust Design of Connecting Rod Using Variable Stress

Seungwoo Lee¹⁾ · Hangyu Kim²⁾ · Taehyun Lee²⁾ · Chulho Yang^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School at Andong National University, Gyeongbuk 36729, Korea

²⁾Department of Automotive & Mechanical Engineering, Andong National University, Gyeongbuk 36729, Korea

(Received 4 December 2015 / Revised 31 August 2016 / Accepted 7 October 2016)

Abstract : A connecting rod is a crucial part for transmitting an explosive force to the crankshaft in the engine. Stress concentration in connecting rod due to the accumulation of the repeated load may initiate micro crack and result in a crucial break down of the component. Two approaches are adopted to obtain a robust design of connecting rod. Inner and outer array matrix based on combinations of control factors and noise factors are constructed for using Taguchi method. Calculated stress results for each element of matrix are plotted in the Goodman diagram. Robust design approach by Taguchi method reduces stress concentration occurred in small end fillet area of the default model. Variable stress approach using Goodman diagram also confirms a robust design by Taguchi method.

Key words : Connecting rod(커넥팅 로드), Finite element analysis(유한요소해석), Variable stress(변동응력), Taguchi method(다구찌 기법), Repeated stress(반복응력), Robust design(강건 설계)

1. 서론

커넥팅 로드(connecting rod)는 엔진 연소실 내부에서 발생하는 폭발하중을 피스톤을 통해 전달받아 크랭크축으로 전달하는 중요한 부품이다. 크랭크축과 결합되는 대단부(big end), 피스톤과 연결되는 소단부(small end) 그리고 대단부와 소단부를 연결하는 연결부(shank)는 커넥팅 로드의 주요 구성부이다.^{1,2)}

연소실 안의 개스압력에 의해서 발생하는 하중은 소단부로부터 대단부를 통하여 반복적인 인장하중과 압축하중의 형태로 전달되며, 이로 인한 하중의 누적은 커넥팅 로드의 취약부에 응력집중을 야기하여 미세 균열이 발생하고 전파되어 가장 바람직하지 못한 파손까지 이를 수 있다. 이러한 커넥팅 로드의

파손 가능성을 방지하기 위하여 엔진자체의 강성을 높일 뿐만 아니라 커넥팅 로드 자체의 강성을 향상시킬 수 있는 방안을 고려해야 한다. 그러나 강성을 높이는 방안만을 고려한 커넥팅 로드의 설계는 중량만을 증가시키고 엔진의 효율적인 측면에서 저하가 됨은 물론이고 연비증가의 원인이 된다.³⁻⁵⁾ 이러한 문제에 대한 설계 방안으로서 본 논문에서는 폭발하중으로 인해 발생하는 인장하중 및 압축하중의 반복에 의한 커넥팅 로드의 응력해석과 주요 제어인자(control factor)와 잡음인자(noise factor)의 설계영향 분석을 통한 강건 설계를 시도 하였다. 다구찌법을 사용한 실험계획은 적은 실험 횟수로도 각 인자의 영향을 파악할 수 있고 최적의 인자값과 그 조합을 정량적으로 얻을 수 있다.^{6,7)} 커넥팅 로드의 강건 설계를 위해 응력해석을 하였고 응력해석결과에서 응력이 집중되는 부위 3지역을 선정하여 다구찌

*Corresponding author, E-mail: cyang@andong.ac.kr

기법을 적용한 설계해석 절차를 적용하였고 강건설계 결과를 Goodman 선도에 변동응력으로 나타내어 그 효용성을 확인하였다. 다구찌 기법은 제어인자 4가지를 3수준으로 정하였고 잠음인자 3가지를 2수준으로 정하여 $L_9(2^3)$ 직교배열표를 구성하여 사용하였다. 그리고 전처리기는 Hypermesh, 해석 상용 프로그램은 ABAQUS⁸⁾, 통계 상용프로그램은 MINI-TAB⁹⁾을 사용하였다.

2. 커넥팅 로드 구조해석

2.1 유한요소 모델

유한요소 해석에 사용된 모델은 커넥팅 로드, 커넥팅 로드 캡, 피스톤 핀, 크랭크 핀, 볼트를 사용하였으며, 전처리기인 Hypermesh를 사용하여 사면체와 육면체 요소를 생성하였다. 전체모델에서 약 84,000여개의 절점과 61,000여개의 요소가 사용되었고, ABAQUS에서 제공하는 사면체 요소(C3D10M)와 육면체 요소(C3D8I)를 이용하여 Fig. 1과 같이 모델링을 하였다. Table 1에는 사용된 파트별 요소의 종류를 나타내었다. 부품간의 접촉되는 부분은 3D 요소망 생성 시 절점들이 맞닿도록 하였다. 원활한 소규모 미끄러짐 접촉조건(small sliding contact)의 수렴을 위하여 요소망 생성 시 베어링과 핀은 육면체 요소(C3D8I)를 사용했으며, 커넥팅 로드 유한요소 모델은 CAD모델의 곡선부의 형상을 유지하기 위하여 사면체 요소(C3D10M)를 사용하였다.

2.2 경계조건 및 하중

커넥팅 로드에서 작용하는 하중은 폭발하중으로 인해 발생된 인장 및 압축 변동하중과 피스톤 핀, 크랭크 핀의 끼워맞춤(interference fit)에 의한 하중, 볼트 체결 하중으로 총 3가지로 구성된다. 그리고 부품간

Table 1 The types of element of the parts

Part	Element	No. of elements
Conrod	C3D10M	34,124
Cap	C3D10M	9,512
Bolt	C3D10M/C3D15	1,516
Crank pin	C3D8I	3,300
Piston pin	C3D8I	13,300
Bearing	C3D8I	550

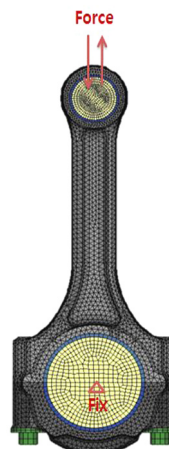


Fig. 1 Description of meshed model with BC and loading

Table 2 Material properties of the parts

Part	Material	Modulus of elasticity (E)	Poisson's ratio (ν)
Conrod	CS706	207.0 (GPa)	0.270
Cap			
Bolt	SCM435	206.8 (GPa)	0.290
Crank pin			
Piston pin	Babbit metal	41.0 (GPa)	0.270
Bearing			

의 접촉면에는 소규모 미끄러짐 접촉조건을 적용하였고, 베어링과 부싱에는 끼워맞춤 접촉조건을 적용하였다.

커넥팅 로드 유한요소 모델 해석에 사용된 하중은 크랭크 핀, 피스톤 핀 끼워맞춤, 베어링 셸(bearing shell) 압착, 볼트 체결 하중, 인장 하중 작용, 압축 하중 작용 순으로 변형상태를 유지하며 해석을 하였고 유한요소모델에 사용된 재료는 Table 2에 나타내었다.

2.3 응력 해석 결과

기본 모델의 해석 결과로 부터 응력이 집중되는 부위는 대단부와 소단부 필렛과 대단부 부근의 생크부로 나타났다. Fig. 2는 압축하중 작용시 응력 분포이며, 높은 응력이 나타나는 3지역을 A, B, C로 나누었다. 최대응력(256 MPa)은 소단부 필렛부인 C지점에서 나타났다. Fig. 3은 인장하중 작용시 응력 분포이며, 압축 하중 작용시와 같은 소단부 필렛에서 48 MPa의 응력값이 나타났다.

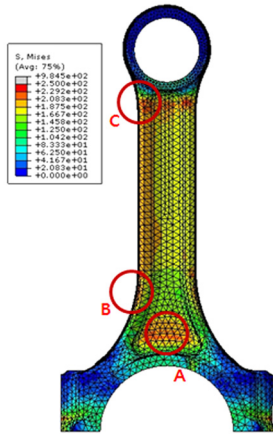


Fig. 2 Contour plot of von-Mises stress for compression

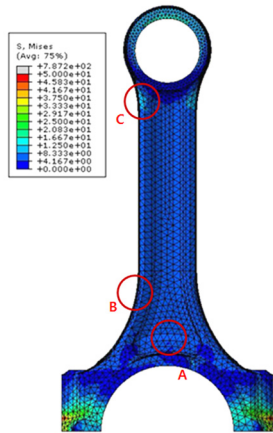


Fig. 3 Contour plot of von-Mises stress for tension

3. 다구찌 기법

3.1 인자 선택

실질적으로 제어가 가능한 볼트의 크기, 커넥팅 로드의 두께, 커넥팅 로드의 대단부와 소단부 필렛의 반경을 선택하여 총 4가지의 제어인자를 구성하였고, 정확한 예측이 어려운 폭발하중으로 인한 인장하중 및 압축하중의 크기, 피스톤 핀, 크랭크 핀의 끼워맞춤에 의한 하중, 볼트 체결 하중으로 3종류의 잡음 인자를 선택하였다.

3.2 다구찌 기법 직교배열표

직교배열표를 이용하면 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 보다 많은 인자를 넣어서 실험할 수 있다. 내측배열의 경우 설계변동이 가능한 제어

인자를 선택하여 직교배열표를 생성하였고, 외측배열은 정확한 제어가 힘든 잡음인자를 사용하여 구성하였다.

3.2.1 내측배열

내측배열에 대하여 선택한 4종류의 제어인자와 수준은 2수준을 기준값으로 선정하였고 설계제한 범위 내에서 1수준과 3수준을 정하였다(Table 3, Fig. 4). 사용된 제어인자를 사용한 직교배열표는 Table 4와 같다.

Table 3 Selected control factors and levels

Factor	Level			
	1	2 (default)	3	
Bolt size	A	M7	M8	M9
Thickness	B	10 mm	11 mm	12 mm
Big end fillet radius	C	41 mm	40 mm	39 mm
Small end fillet radius	D	30.5 mm	30 mm	29.5 mm

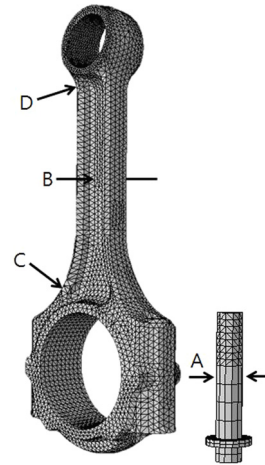


Fig. 4 Description of control factors for analysis

Table 4 Orthogonal array table for analysis

	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3.2.2 외측배열

외측배열의 경우 제어가 어려운 인자들로 구성하며, 폭발하중으로 인한 인장 및 압축 변동하중과 피스톤 핀, 크랭크 핀의 끼워맞춤에 의한 하중, 볼트 체결 하중으로 총 3가지의 잡음인자를 2수준으로 정하여 완전요인실험을 하였다(Table 5 ~ 7). 완전요인실험은 인자의 모든 실험 수준의 가능한 조합에 대해 무작위로 실험하는 것으로 모든 수준의 조합에 대해서 실험하며 주효과와 교호작용 효과를 모두 포함한다. 볼트 체결 하중 같은 경우 볼트헤드의 직경에 따라 체결하중이 다르기 때문에 볼트 체결 하중을 다르게 설정하였고 2수준으로 설정하였다(평균값의 ±10%의 값).

Table 5 Selected noise factors and levels

Factor		Level	
		1	2
Bolt load	A	18900 (N)	23100 (N)
		21600 (N)	26400 (N)
		24300 (N)	29700 (N)
Interference	B	0.0135 (mm)	0.0165 (mm)
		0.00512 (mm)	0.00633 (mm)
Compression & Tension load	C	18960 (N)	23170 (N)
		3465 (N)	4235 (N)

* Mean bolt load : M7-21000 (N), M8-24000 (N), M9-27000 (N)
 Mean interference : 0.015 (mm), 0.00575 (mm)
 Mean compression load : 21067 (N)
 Mean tension load : 3850 (N)

Table 6 Condition array table used in compression

	Bolt load (M7)	Bolt load (M8)	Bolt load (M9)	Interference	Compression
Condition1	18900	21600	24300	0.0135	18960
				0.00512	
Condition2	23100	26400	29700	0.0135	18960
				0.00512	
Condition3	18900	21600	24300	0.0165	18960
				0.00633	
Condition4	23100	26400	29700	0.0165	18960
				0.00633	
Condition5	18900	21600	24300	0.0135	23170
				0.00512	
Condition6	23100	26400	29700	0.0135	23170
				0.00512	
Condition7	18900	21600	24300	0.0165	23170
				0.00633	
Condition8	23100	26400	29700	0.0165	23170
				0.00633	

Table 7 Condition array table used in tension

	Bolt load (M7)	Bolt load (M8)	Bolt load (M9)	Interference	Tension
Condition1	18900 N	21600 N	24300 N	0.0135	3465 N
				0.00512	
Condition2	23100 N	26400 N	29700 N	0.0135	3465 N
				0.00512	
Condition3	18900 N	21600 N	24300 N	0.0165	3465 N
				0.00633	
Condition4	23100 N	26400 N	29700 N	0.0165	3465 N
				0.00633	
Condition5	18900 N	21600 N	24300 N	0.0135	4235 N
				0.00512	
Condition6	23100 N	26400 N	29700 N	0.0135	4235 N
				0.00512	
Condition7	18900 N	21600 N	24300 N	0.0165	4235 N
				0.00633	
Condition8	23100 N	26400 N	29700 N	0.0165	4235 N
				0.00633	

3.3 다구찌 기법 해석결과

다구찌 기법을 사용한 강건 커넥팅 로드 설계 방법은 응력집중부위에 발생하는 응력을 감소시킬 뿐만 아니라 응력 산포의 축소를 목표로 한다. 응력 집중부위 3지역 중 소단부 필렛 부분은 압축하중 시 가장 높은 응력값을 나타내었고 기본모델에서 파손 가능성이 가장 높은 부분으로 파악되어 반응값을 측정하는 위치로 선정 하였다. Table 8과 Table 9에 내측배열과 외측배열 각각에 대한 응력 결과값을 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6에는 응력 평균 및 S/N비에 대한 각 인자들의 주효과도를 나타내었다.

응력 평균의 경우 낮을수록 응력이 감소되었다는 것을 나타내고 S/N비 같은 경우 응력 평균과는 반대로 높으면 높을수록 응력이 감소되었다는 것을 의미 한다.

망소특성의 계량치로 계산된 응력 평균을 보았을 때 B인자(커넥팅 로드 두께)가 반응값에 대해서 가장 큰 유의성을 보인다.

D인자(소단부 반경)는 반응값에 대하여 B인자 다음으로 반응값에 대한 유의성을 나타내었다. 두 인자 모두 3수준일 때 가장 낮은 응력값을 보이며 A인자(볼트 크기)의 수준 변화는 B인자(커넥팅 로드 두께)와 D인자(소단부 반경)에 비해 반응값에 거의 영향을 주지 못하였다(Fig. 5). Table 10에 응력평균

Table 8 System response results by using Taguchi method for compression

Control factors				
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Noise factors (MPa)							
1	2	3	4	5	6	7	8
291.261	291.262	291.293	291.399	357.567	357.656	357.592	357.682
203.687	203.796	203.704	203.816	249.706	249.832	249.724	249.853
165.082	165.187	165.115	165.224	202.527	202.656	202.572	202.703
221.974	222.129	222.035	222.202	272.705	272.878	272.783	272.968
205.674	205.757	205.602	205.741	252.215	252.404	252.214	252.411
177.762	177.843	177.8	177.886	217.854	217.958	217.904	218.014
237.49	237.72	237.484	237.712	291.422	291.693	291.422	291.694
195.417	195.651	195.415	195.648	239.429	239.711	239.427	239.709
199.554	199.839	199.55	199.835	244.229	244.597	244.226	244.593

Table 9 System response results by using Taguchi method for tension

Control factors				
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Noise factors (MPa)							
1	2	3	4	5	6	7	8
55.108	55.110	55.098	55.101	68.098	68.100	68.086	68.087
41.160	41.177	41.169	41.190	52.488	52.504	52.492	52.512
36.351	36.363	36.354	36.369	46.525	46.542	46.532	46.552
43.697	43.707	43.706	43.719	55.611	55.623	55.617	55.631
43.610	43.643	44.950	43.648	54.614	54.650	54.617	54.655
38.103	38.125	38.105	38.128	48.622	48.647	48.624	48.650
47.285	47.311	47.287	47.313	58.906	58.937	58.908	58.939
38.266	38.296	38.270	38.300	49.090	49.123	49.093	49.127
42.752	43.835	43.790	43.839	52.961	53.006	52.963	53.012

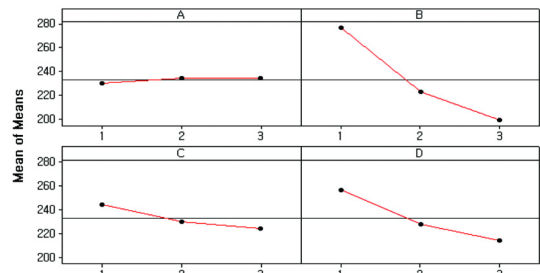


Fig. 5 Main effect plots for von-Mises stress means

Table 10 Response table for Von-mises stress means

Factor	A	B	C	D	Total	
Stress means	Level 1	235.0	278.8	246.6	258.5	1,018.9
	Level 2	234.8	224.4	232.1	229.7	921
	Level 3	234.7	201.3	225.8	216.3	878.1
Delta	0.3	77.5	20.8	42.2	-	
SS	0.2	9511.6	683.7	2789.7	12,985.2	
Contribution rate	0.01 %	73.19 %	5.3 %	21.5 %	100 %	
Rank	4	1	3	2	-	

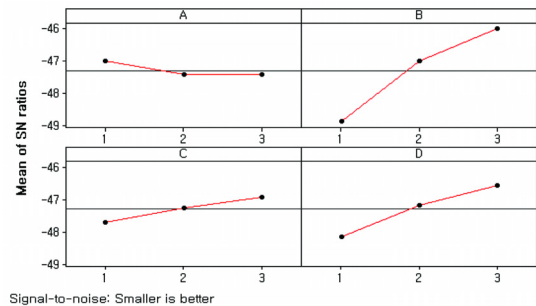


Fig. 6 Main effect plots for S/N ratios

Table 11 Response table for signal to noise ratios

Factor	A	B	C	D	Total	
SN ratio	Lv1	-47.21	-48.92	-47.73	-48.19	-192.05
	Lv2	-47.42	-47.06	-47.33	-47.22	-189.03
	Lv3	-47.42	-46.07	-46.99	-46.64	-187.12
Delta	0.21	2.84	0.74	1.56	-	
SS	0.091	12.502	0.8308	3.7177	17.1415	
Contribution rate	0.01 %	73.29 %	5.3 %	21.4 %	100 %	
Rank	4	1	3	2	-	

반응의 결과를 나타냈었다. 분산분석으로 각 인자의 제곱합(SS)을 구하고, 제곱합을 이용하여 인자에 따른 기여율(contribution rate)을 계산하였다. 응력평균값에 미치는 기여율은 B인자 73.2%, D인자 21.4%,

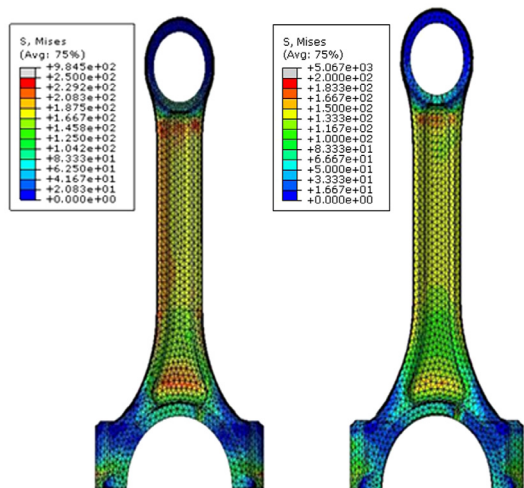


Fig. 7 Contour plot of von-Mises stress of connecting rod (Left : Default model, Right : Taguchi robust model)

C인자 5.3 %, A인자 0.01 %로 나타난다. 또한 S/N비에서도 같은 경향을 나타낸다(Fig. 6, Table 11).

주효과도와 반응값의 결과로부터 최소 응력값을 나타내는 경우의 조합은 A인자 1수준, B, C, D인자 3수준(A1B3C3D3)이었다. Fig. 7에는 기본모델과 최소응력 모델인 A1B3C3D3를 나타내었다. 커넥팅로드 전체에 대하여 응력 집중부의 범위 및 응력이 현저하게 감소한 것을 볼 수 있다. 소단부 필렛의 응력은 256 MPa에서 165.1 MPa로 35.5 %의 응력감소를 보였으며, 강건설계에 의한 커넥팅로드는 기본 모델과 달리 균일한 응력 분포를 나타내어 구조물의 강건함을 보여주었다.

4. 커넥팅 로드 강건 설계

4.1 변동응력

기계나 구조물 부품에 완전 역전 응력이 가해지는 경우는 극히 드물다. 그보다는 정적 응력에 완전 역전 응력이 추가되는, 즉 변동응력이 작용되는 경우가 많다. 커넥팅 로드는 실린더의 폭발하중에 의해 변동응력이 발생한다. 이 변동응력은 평균응력과 교변응력으로 나타내고 평균응력(σ_m)과 교변응력(σ_a)은 커넥팅 로드의 압축하중이 작용할 때의 최대응력(σ_{max} = Compression)과 커넥팅 로드의 인장하중이 작용할 때의 최소응력(σ_{min} = Tension)을 사용한다.¹⁰⁾

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

본 연구에 사용된 커넥팅 로드 재료의 인장강도는 910 MPa, 피로강도는 400 MPa이다.

4.2 변동응력 결과

계산된 반응값인 커넥팅 로드의 응력값들을 Goodman 선도에 도시하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 다구찌 기법을 시행하여 해석한 72개의 모든 모델의 결과값이 Goodman 선도의 피로파손 기준선 아래에 표시된 것을 알 수 있다. 강건 설계 방향을 설정하고자 2가지 방법으로 응력의 경향을 나타내었다. 첫 번째 방법은 외측배열에 배치한 8종류의 잡음인자 모델을 고정하고 각 모델별로 내측배열에 배치한 9종류의 제어인자 모델에 대하여 변화한 결과를 피로선도 상에 나타내었고, 두 번째 방법은 내측배열에 배치한 9종류의 제어인자를 고정하고 각각의 제어인자 배열에 대해 외측배열에 표시한 8종류의 잡음인자 모델의 반응을 나타내었다.

첫 번째 결과(Fig. 9)는 다구찌 외측 배열에 사용했던 1번 모델이며 1번 모델에 대한 9종류의 제어인자 조합의 응력변동 경향을 표시하였다. 고정된 잡음인자에 대하여 제어인자의 조합을 변화시킴에 따라서 일정한 간격을 가지고 응력점들이 표시되었다. 응력선에 위치한 응력점들은 커넥팅 로드의 두께와 소단부 필렛 반경이 커질수록 응력선도의 원점으로 접근하였다. 가장 멀리 떨어져 있는 모델은

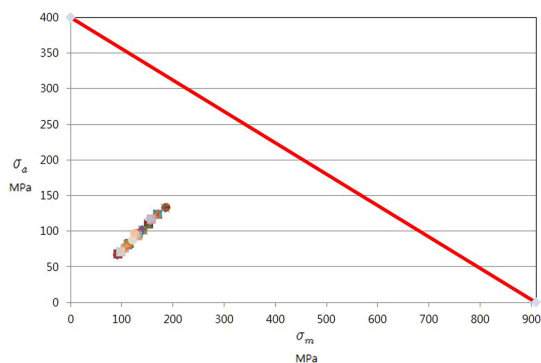


Fig. 8 Goodman diagram used for connecting rod design

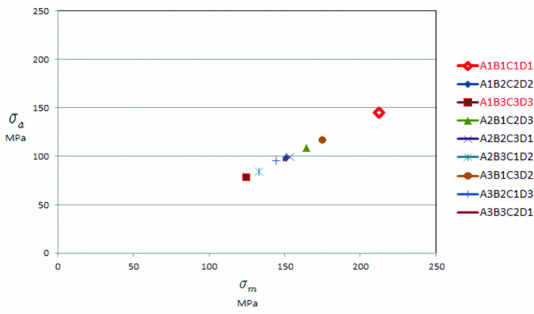


Fig. 9 Mean stress vs alternating stress plot by varying 9 inner arrays with fixed outer array element

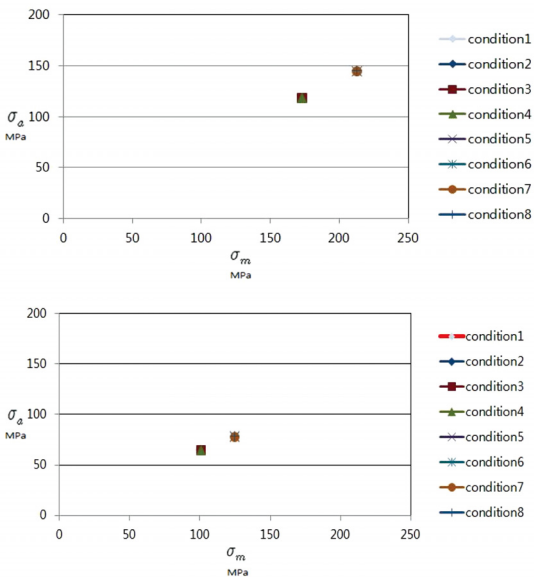


Fig. 10 Mean stress vs alternating stress plot by varying 8 outer arrays with fixed inner array element (Top: A1B1C1D1, Bottom : A1B3C3D3)

커넥팅 로드와 소단부 필렛 반경이 가장 작은 모델(A1B1C1D1)임을 알 수 있다.

두 번째 결과는 내측배열에 배치한 제어인자의 조합(Table 4)들을 고정하고 각각의 조합에 대하여 8종류의 잡음인자 조합에 대한 응력변동 경향을 표시하였다. 고정된 제어인자에 대한 잡음인자 조합들의 경우에 대한 응력점들의 경향은 강건 설계의 방향의 설정을 가능하게 한다. 피로선도에 위치한 응력점들의 위치가 밀집될수록 외부잡음에 대한 모델의 강건함을 나타내며 피로선도 원점에 근접할수록 최적화된 모델임을 알 수 있다. Fig. 10에 9종류

Table 12 Mass property of default model and robust model

	Default model	Robust model
Mass (gram)	349.3	373.9

의 제어인자모델 중 응력점의 분포가 가장 좋은 모델과 가장 좋지 않은 모델을 비교 하였다. 전자의 모델(A1B3C3D3)은 후자의 모델(A1B1C1D1)보다 응력점들이 밀집되어 있으며 피로선도 원점에 근접함을 보여준다.

기본 모델과 비교하였을 때 강건 설계 모델인 A1B3C3D3 모델은 약 7%의 질량 증가가 있었지만 소단부 응력 집중부에서 약 35.5%의 응력감소를 나타내었다(Table 12).

5. 결론

압축, 인장의 반복적인 변동하중을 받는 커넥팅 로드와 유한요소 해석의 결과를 사용하여 응력집중 부위를 설정하였다. 제어 가능한 인자와 불가능한 인자를 고려한 다구찌 기법을 활용한 강건 설계 결과와 변동응력을 사용한 결과를 연계하여 제안한 변동응력방법의 효용성을 보여주었고 최적화된 강건 모델을 구현하였다. 본 연구의 결과로 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- 1) Goodman 선도에 도시한 변동응력 방법은 다구찌 기법을 사용한 강건설계 결과의 효용성을 확인하여 주었다.
- 2) 응력감소에 가장 많은 영향을 끼치는 것은 커넥팅 로드 두께, 소단부 반경, 대단부 반경, 볼트크기 순이고 볼트크기는 응력감소에 크게 영향을 주지 않는다.
- 3) 볼트크기가 1수준이고 대단부 반경, 소단부 반경, 커넥팅 로드 두께가 3수준인 모델이 가장 응력이 감소된 모델이다.
- 4) 소단부 필렛을 강건 설계한 모델과 기본모델의 응력감소를 비교하였을 때 질량은 약 7% 증가함을 보였지만 약 35.5%의 응력감소를 나타내었다.

후 기

이 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) M. Han and C. Yang, "Robust Design of Connecting Rod," Transactions of KSAE, Vol.22, No.1, pp.142-147, 2014.
- 2) H. Kim, I. Park, C. Kim and T. Kim, "A Study on Fatigue Characteristics of Connecting Rod Materials for Automobile," Transactions of KSHT, Vol.19, No.3, pp.163-169, 2006.
- 3) C. Kim, J. Lee and J. Kim, "Reliability Analysis in Fatigue Strength of Connecting Rod," Transactions of KSME, Vol.25, No.10, pp.1651-1658, 2001.
- 4) D. Min, B. Jeon and N. Kim, "Failure Analysis of Connecting Rod at Small End," Transactions of KSME, Vol.19, No.2, pp.382-390, 1995.
- 5) Y. Lee, M. Lee, H. Moon, S. Shin, H. Jang, H. Lee and T. Lee, "Buckling Sensitivity Analysis for Lightweight Design of Shank Part in an Engine Connecting Rod," KSME Spring Conference Proceedings, pp.139-144, 2006.
- 6) S. Kim, Y. Park, J. Kang, J. Park and D. Kang, "Optimization of Processing Ship Connecting Rod Using Taguchi Method," KSMPE Spring Conference Proceedings, pp.113-117, 2007.
- 7) IreTech Minitab Team, New Minitab Workbook, Iretech, Gyeonggi, Korea, 2009.
- 8) ABAQUS Users Manual, Ver.6.4, HKS, 2003.
- 9) Minitab Users Manual, R14, Minitab Inc., State College, PA, 2010.
- 10) R. Juvinall and K. Marshek, Fundamentals of Machine Component Design, 3rd Edn., John Wiley & Son, New York, 2002.