

크랭크샤프트 강건 설계

이 승 우¹⁾ · 양 철 호^{*2)}

안동대학교 대학원 기계공학과 · 안동대학교 기계자동차공학과

Robust Design of Crankshaft

Seungwoo Lee¹⁾ · 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 7 July 2015 / Revised 3 February 2016 / Accepted 15 February 2016)

Abstract : Finite element analysis along with DOE scheme has been performed to obtain robust design of crankshaft assembly. This study focused on obtaining optimized fillet radius of crankshaft mainly by statistical approach. 27 design cases using 3 factors with 3 levels are constructed by design of experiment. Changes of design factors and noise factor may influence the durability of crankshaft system. General two stages of robust design may enhance the durability of crankshaft model. Increasing crank arm thickness was adopted as a shrink step and change of fillet radius was used as a shift step. By combining these two steps, the stress concentration at the fillet area is reduced and adequate fillet radius is determined for the robust design of crankshaft.

Key words : Crankshaft(크랭크샤프트), Finite element analysis(유한요소해석), Bending stress(굽힘응력), Torsion stress(비틀림응력), Computational design of experiment(실험계획법), Robust design(강건설계)

1. 서 론

크랭크샤프트는 크랭크저널, 크랭크암, 크랭크핀 등으로 구성되어 있으며, 커넥팅로드에 연결되어 엔진 폭발 하중에 의한 주기적인 하중을 받는 엔진 주요 구성품의 하나이다. 엔진 구동 중에 지속적으로 발생하는 반복적인 굽힘 응력(bending stress)과 비틀림 응력(torsion stress)은 크랭크샤프트에 복합적으로 작용한다. 취약부에 누적된 응력집중은 크랙의 발생과 전파를 야기할 수 있으며, 그 결과로 엔진에 치명적인 손상을 유발할 수 있다.^{1,2)} 최근 엔진의 고출력화와 연비향상을 위한 경량화의 경향에 따라서 엔진구성품중 고하중을 받는 크랭크샤프트

의 피로 파손의 가능성은 높아지고 있다. 이러한 피로에 의한 파손을 방지하기 위해서는 크랭크샤프트의 설계인자의 최적화나 재료의 피로 성능개선을 통한 설계 방안을 생각할 수 있다.^{1,3)}

본 연구는 이전 연구³⁾에서 제시한 강건설계 방안을 크랭크샤프트에 적용하여 응력 집중부위인 핀과 저널의 필렛(fillet) 부 유한요소해석의 결과를 기반으로 통계적인 방법인 CDOE(Computational Design Of Experiment)를 사용하여 설계인자인 필렛 부 환경 변화에 따른 응력값의 민감도를 분석하였다. 또한, 어떠한 인자가 크랭크샤프트의 내구성에 영향을 미치는가를 분석하고, 강건설계 방안을 제시, 적용하여 기존 모델에 비해 응력 집중이 감소된 크랭크샤프트의 모델을 제안 하고자 한다.⁴⁾ 크랭크샤프트

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

트는 주로 고주기 피로(high cycle fatigue)에 의하여 파손되며 피로 모델은 응력을 기반으로 하기 때문에 응력값을 강건설계의 반응값으로 사용하였다. 모델링은 전처리 소프트웨어인 Hypermesh를 사용하였고 상용 유한요소 코드인 ABAQUS⁵⁾를 사용하여 응력해석을 하였다. 실험계획법은 상용통계소프트웨어인 Minitab R14⁶⁾를 사용하였다.

2. 본 론

CAE와 강건설계방안을 연계한 본 연구는 크랭크샤프트의 취약 지점인 크랭크핀의 필렛부와 저널의 필렛부의 FEA 해석 결과를 기반으로 설계인자와 혼란요소(noise factor)를 설정하고, 인자의 변화에 따른 시스템에 대한 영향을 분석한다. 설계인자의 최적화와 동시에 제어가 불가능한 혼란요소에 대한 강건설계 방안을 제시한다.

2.1 유한요소모델

유한요소해석모델은 해석 시간을 단축하기 위하여 기하학적 대칭성과 실린더 간의 동일 압력 하중을 가정하여 Fig. 1의 사각박스 안과 같이 크랭크 핀을 중심으로 좌우 저널 절반 형상을 사용하였다.

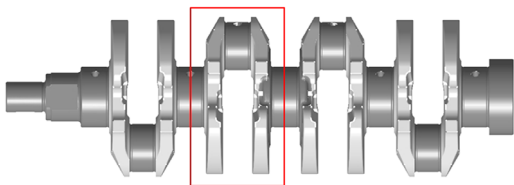


Fig. 1 Geometry of crankshaft

유한요소해석에 사용된 크랭크샤프트 3D모델은 Hypermesh를 사용하여 사면체요소를 생성하였다. 특히 핀과 저널의 필렛 부분은 응력 집중이 예상되므로 실제공정에서는 냉간압연(cold rolling)을 하여 피로 한도를 증가시킨다. 사용된 유한요소모델은 Fig. 2와 같으며 전체절점은 430,000여개가 사용되었다. 조밀하게 생성한 필렛부의 요소망은 응력 집중에 적합한 메시밀도(mesh density)를 결정하기 위하여 메시변화에 따른 응력수렴해석을 통하여 Fig. 2와 같은 요소크기를 결정하였다.

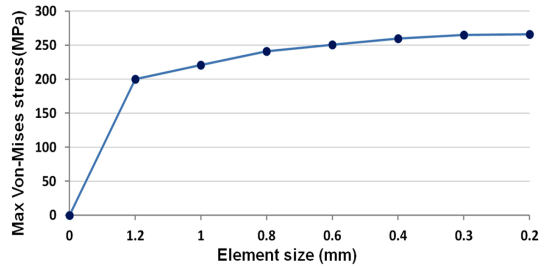
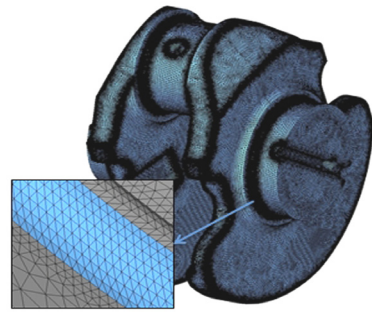


Fig. 2 Fine mesh in fillet areas and convergence test for mesh size

2.2 경계 조건 및 하중

크랭크샤프트의 좌우 원통면의 절점을 kinematic coupling⁵⁾을 사용하여 가상절점(dummy node)과 강제 연결하여 원통면의 절점의 운동을 제어하였다. Fig. 3과 같은 굽힘(bending), 비틀림(torsion) 하중에 대한 각각의 경계조건을 가상절점에 적용하였다. 적용하중은 크랭크 회전각에 대해서 계산된 하중⁷⁾을 굽힘력(bending force)의 경우 크랭크 핀 중심에 토크의 경우 우측 저널 중심의 가상절점에 하중을 가하였다.

2.3 FEA해석 결과

크랭크샤프트의 굽힘하중과 비틀림하중에 따른 각각의 FEA결과를 도출하였다. 굽힘하중이나 비틀림하중 모두 핀과 저널 부분의 필렛 부분에서 응력 집중이 발생하였으며, 크랭크샤프트의 변형 형상은 Fig. 4에 나타냈다. 굽힘 하중의 경우 우측 저널 필렛부의 최대응력이 279.2 MPa이었고, 비틀림하중의 경우 핀부분의 필렛부와 저널 부분의 필렛부 모두 비슷한 수준의 응력 값을 나타내었다. Table 1에는 각각의 최대응력을 표시하였다.

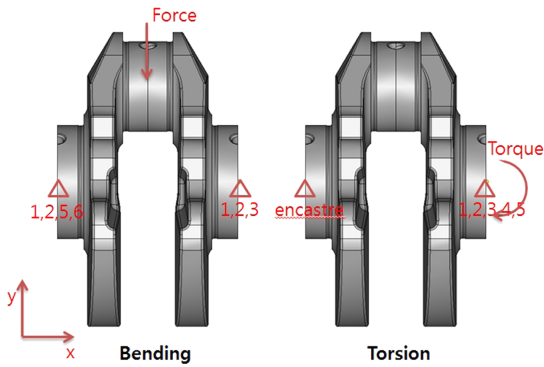


Fig. 3 Applied B, C for each loading case

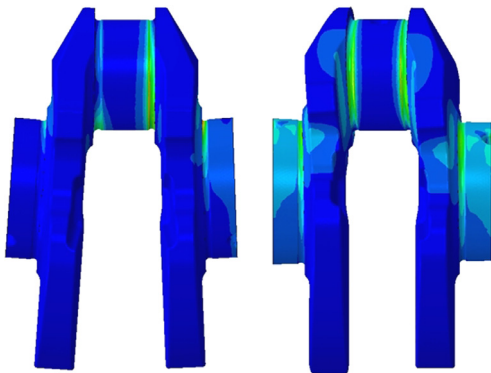


Fig. 4 Deformed Shapes of the crankshaft (left: bending, right: torsion)

Table 1 Von-Mises stress results at pin & journal

	Pin (MPa)	Journal (MPa)
Max bending	203.0	279.2
Min bending	81.2	112.0
Max torsion	262.0	264.2
Min torsion	236.3	238.2

3. 실험계획법

크랭크샤프트의 FEA 응력해석 결과 크랭크 핀과 저널의 필렛부에서 응력집중이 발생하였다. 필렛부 응력 집중 감소 방안을 제시하기 위하여 선정된 설계인자와 혼란인자를 사용하여 실험계획법을 구성하였다. 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 통계적 분석으로 어떤 인자가 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고, 인자들 간에 상호작용을 도출하였다.

3.1 인자선택 및 실험방법

크랭크암 두께와 같은 크랭크샤프트의 응력에 영향을 주는 설계인자들 중에서 실제 가공공정에서 변경이 용이한 핀과 저널부의 필렛 반경을 설계인자로 설정하고 크랭크샤프트에 작용하는 하중을 혼란요소로 설정한다. 핀과 저널부의 필렛반경인 설계인자들과(A:pin fillet radius, B:journal fillet radius), 설계 변경이 불가능한 혼란요소(noise)인 하중(C:force)을 Table 2와 같이 설정하였다. 3수준 3인자 요인실험방법을 선택했으며, 상용통계소프트웨어인 Minitab R14를 사용하여 CDOE(Computational Design Of Experiment)를 구성하였다. 필렛부 크기와 하중이 다른 27case FEA 모델을 대상으로 하였다. 하지만 C요인의 경우 max bending, min bending, max torsion, min torsion 4가지로 분류되므로, 총 실험 횟수는 108회이지만 실험데이터 중 가장 큰 응력을 보이는 max torsion 하중의 경우를 실험계획법에 사용하였다.

Table 2 Factors and levels used in the analysis (A:Pin fillet radius, B:Journal fillet radius, C:Force(max bending, min bending, max torsion, min torsion))

Factors		Level		
		-1	0	1
Design factors	A(mm)	1.1	1.4	1.7
	B(mm)	1.1	1.4	1.7
Noise factor C	Max.B	24000(N)	30000(N)	36000(N)
	Min.B	9600(N)	12000(N)	14400(N)
	Max.T	681(N.m)	851(N.m)	1021(N.m)
	Min.T	613(N.m)	766(N.m)	919(N.m)

3.2 CDOE 결과

설계인자와 혼란요소에 따른 시스템의 반응은 크게 주 효과(main effect)와 교차효과(interaction effect)를 통하여 설명되며, 주 효과는 수준의 변화에 대한 반응값의 구배 비교를 통하여 반응값인 응력에 대하여 어떤 인자가 영향을 크게 미치는지를 알 수 있으며, 교차효과와 경우 인자들간의 서로의 영향을 그래프의 구배를 통하여 비교할 수 있다. Fig. 5에는 저널 필렛부에 대한 인자들에 대한 반응값으로서 Von-Mises 응력을 사용하여 주 효과를 나타내었다.

Table 3 CDOE matrix of 27 runs for max torsion

	A	B	C	Max stress (MPa)	
				Pin fillet	Journal fillet
1	0	1	1	322.4	306.3
2	-1	1	-1	225.1	203.6
3	1	-1	-1	198.1	231.0
4	1	0	0	252.0	265.8
5	0	-1	1	315.5	348.3
6	-1	-1	0	281.9	292.7
7	-1	0	-1	226.0	214.3
8	-1	0	0	282.5	267.9
9	1	1	0	247.5	252.8
10	1	-1	1	297.2	346.6
11	-1	1	1	337.6	305.4
12	0	-1	0	263.0	290.3
13	-1	0	1	339.0	321.5
14	1	1	1	297.0	303.4
15	0	-1	-1	210.4	232.2
16	1	1	-1	198.0	202.3
17	-1	-1	1	338.2	351.2
18	0	1	-1	215.0	204.2
19	0	0	0	262.0	265.2
20	0	0	1	314.3	318.3
21	0	1	0	268.7	255.2
22	-1	1	0	281.3	254.5
23	0	0	-1	209.6	212.2
24	1	0	-1	201.7	212.7
25	1	0	1	302.4	319.0
26	-1	-1	-1	225.5	234.1
27	1	-1	0	247.7	288.8

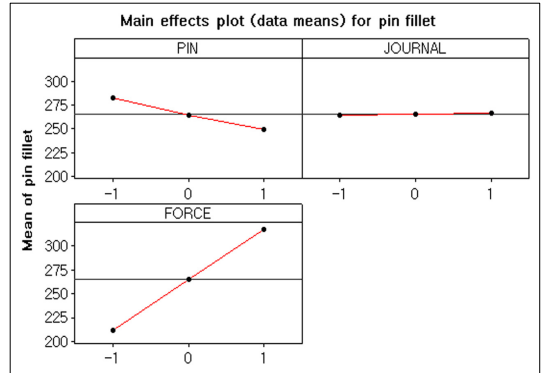


Fig. 6 Main effect plot of max. Von-Mises stress in the model for each design variable (Pin fillet)

낮아지는 것을 알 수 있다. 핀의 반경의 수준의 증가는 저널 필렛부의 반응에 영향을 미치지 못함을 나타낸다.

다음으로 Fig. 6은 핀 필렛부의 주 효과의 결과이다. 저널 필렛부의 주 효과 그래프와 유사하며, 작용하중에 대해 가장 큰 주 효과를 나타내며, 핀필렛의 반경이 커질수록 핀 부분의 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 크랭크샤프트의 필렛부의 최대응력을 감소시키기 위한 요인들의 조합은 필렛부의 설계인자인 핀과 저널의 반경은 가장 큰 요인수준(factor level)인 1이며, 혼란요소인 작용하중의 요인수준은 -1이다. 이와 같은 조건의 FEA 결과 값은 Table 3의 16번째이며, 최대응력 값은 핀 필렛부의 198.0 MPa, 저널 필렛부의 202.3 MPa이었다. 기존 모델(default model)의 최대응력값은 핀 필렛부에서 262.0 MPa, 저널 필렛부에서 265.2 MPa이었다. 기존 모델과 16번 케이스 모델을 비교시 핀 필렛부에서는 24.4 %, 저널 필렛부에서는 23.7 % 응력 감소를 예측할 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각 인자간의 교차효과를 나타낸다. 저널 필렛부의 경우 핀과 저널 서로간의 미미한 영향을 나타내지만 시스템의 반응에는 거의 영향이 미치지 않고, 핀 필렛부의 경우도 저널 필렛부의 결과와 같은 경향을 보인다.

3.3 강건설계

작용하중과 같은 외부혼란요소의 변동에 대하여 강건한 크랭크샤프트를 설계하기 위하여 강건설계

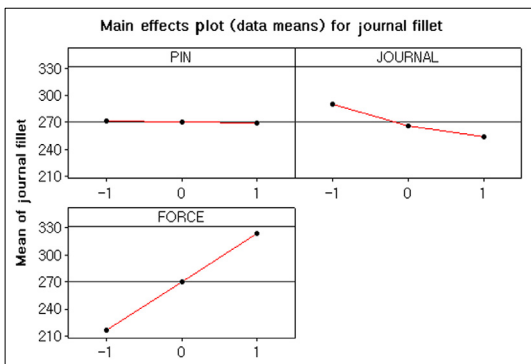


Fig. 5 Main effect plot of max. Von-Mises stress in the model for each design variable (Journal fillet)

C인자인 작용하중에 대해 가장 큰 주 효과를 나타내며, 저널 반경의 수준이 커질수록 최대 응력이

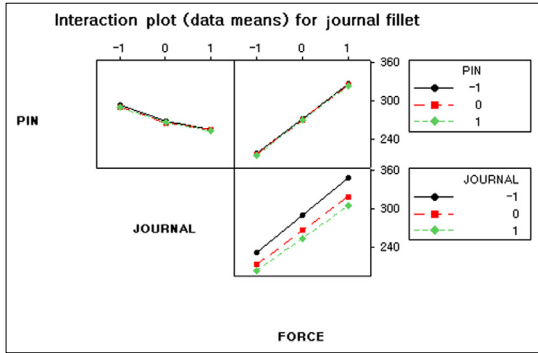


Fig. 7 Interaction effect plot of max. Von-Mises stress in the model for each design variable (Journal fillet)

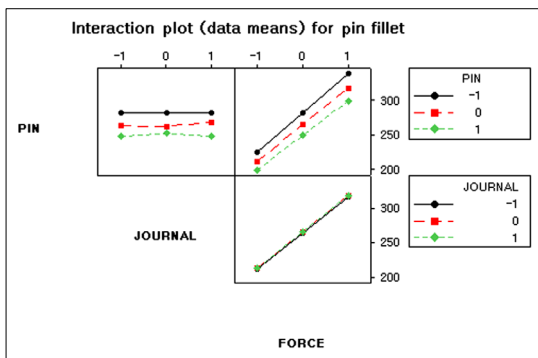


Fig. 8 Interaction effect plot of max. Von-Mises stress in the model for each design variable (Pin fillet)

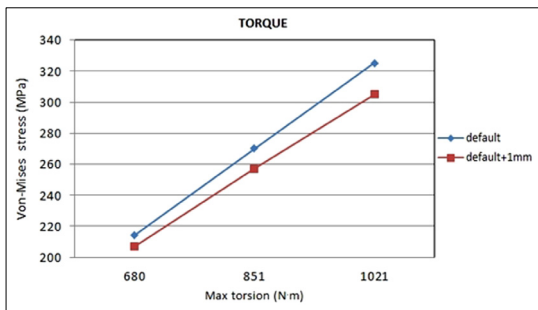


Fig. 9 Comparison of sensitivity of Von-Mises stress by increasing crank arm thickness

방안을 적용하였다.⁸⁾ 첫단계인 수축단계(shrink)는 반응값인 필렛부의 최대응력의 편차를 줄이는 과정이다. 크랭크샤프트의 필렛 부의 경우에는 기존 디자인의 크랭크암의 두께를 증가시켜 외부하중에 대한 최대응력의 편차를 감소시켰다. 크랭크암의 두께증감에 의한 크랭크샤프트의 최적중량과 최대응

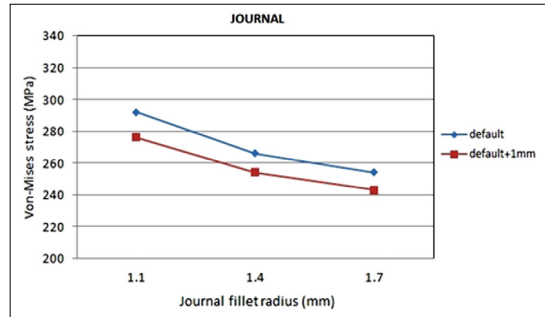
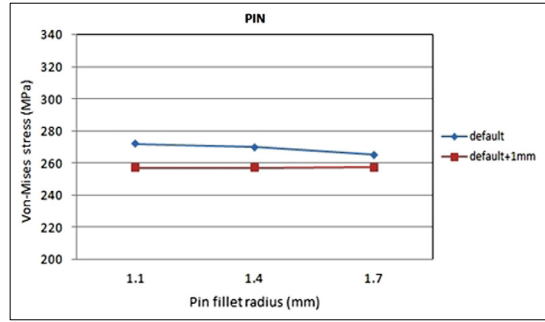


Fig. 10 Plot to predict optimum fillet radius of crankshaft

력을 비교하여 적절한 응력수준을 지닌 설계가 가능할 것이다(Fig. 9).

강건설계의 두 번째 단계인 이동단계(shift)는 필렛부의 최대응력값을 목표치로 이동하여 크랭크샤프트의 내구성을 향상시켜주는 단계이다. 각 수준에서 구한 핀필렛부와 저널필렛부의 최대응력 기울기를 측정하면 목표최대 응력값에 상응하는 필렛의 반경을 예측할 수 있다(Fig. 10).

4. 결론

본 연구에서는 CAE와 CDOE기법을 연계하여 크랭크샤프트 필렛 부의 응력 집중이 감소된 설계를 얻고자 하였다. 인자간의 주작용과 교호작용의 결과를 바탕으로 하여 설계에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 그리고 강건 설계개념을 크랭크샤프트 설계에 연계하여 혼란요소에 대하여 강건한 설계 방향을 제시하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 크랭크샤프트에 나타나는 응력수준에 영향을 미치는 인자는 혼란요소인 작용하중임을 확인하였다.

- 2) 핀 필렛과 저널 필렛의 각각의 설계인자들의 교호작용은 미미한 것으로 나타났다.
- 3) 기존 모델과 응력 감소 모델을 비교했을 때 핀 필렛부는 24.4 %, 저널필렛부는 23.7 %의 감소된 최대응력을 보여주었다.
- 4) CAE와 CDOE기법을 연계하여 사용한 설계는 응력집중의 감소를 기대할 수 있으며, 크랭크샤프트의 수명과 내구성 증가를 기대할 수 있다.
- 5) 크랭크샤프트 설계에 강건 설계를 적용하여 예측이 어려운 외부혼란 요소에 대해 강건한 설계 방향을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2015학년도 안동대학교 국제학술교류 보조금에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J. Lee, B. Lee, S. Kim and C. Chung, "Optimization of Crankshaft Pin Shoulder Design Using DFSS," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.231-237, 2012.
- 2) H. Kim and K. Choi, "The Crankshaft Stress Analysis of Automotive Engine," Auto Journal, KSAE, Vol.13, No.1, pp.15-24, 1991.
- 3) M. Han and C. Yang, "Robust Design of Connecting Rod," Transactions of KSAE, Vol.22, No.1, pp.142-147, 2014.
- 4) S. Kim, C. Lee, H. Kim, S. Park and Y. Ko, "Development of Automotive Crankshaft with High Strength Bainite Steel," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2386-2392, 2011.
- 5) ABAQUS Users Manual, Ver.6.4, HKS, 2003.
- 6) Minitab Users Manual, R14, Minitab Inc., State College, PA, 2010.
- 7) H. Kim and K. Choi, "The Crankshaft Stress Analysis of Automotive Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.15-24, 1991.
- 8) C. Yang and M. Han, "Robust Design Study of Engine Cylinder Head," Transactions of KSAE, Vol.19, No.6, pp.133-139, 2011.