

엔진 실린더헤드 강건 설계 방안

양 철 호^{*1)} · 한 문 식²⁾

안동대학교 기계자동차공학과¹⁾ · 계명대학교 기계자동차공학과²⁾

Robust Design Study of Engine Cylinder Head

Chullho Yang^{*1)} · Moonsik Han²⁾

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University, Gyeongbuk 760-749, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 28 April 2011 / Accepted 25 May 2011)

Abstract : Maintaining adequate sealing in engine cylinder head is a crucial factor in engine design. Failure of engine operations occurs mainly owing to the leaking by decreased sealing pressure. Reliability-robustness concept is applied to the engine cylinder head system. Deterministic way to obtain engineering solution in CAE industry may not consider the effects of noises and disturbances experienced during operation. However, analytical reliability-robustness concept may make possible to reduce the sensitivity of system with noise factors. Influences of design factors including noise factors would be predicted in analytical way. Optimized design may be obtained by shrinking variability and shifting to design target. Three-dimensional finite element analyses have been performed to apply analytical reliability-robustness concept.

Key words : Reliability(신뢰성), Robustness(강건성), Finite element analysis(유한요소해석), Engine cylinder head(엔진실린더헤드)

1. 서 론

엔진 실린더헤드는 엔진실린더 블록과 더불어 엔진의 주요 구성부이다. 엔진실린더 헤드 부분은 실린더 블록 부분에 비하여 상대적으로 복잡한 형상을 지니고 있다. 오일의 급유부, 흡/배기구, 벨브트레인, 캠축 등이 복합적으로 구동하기 때문에 밀폐(sealing)의 유지가 엔진의 다른 부분보다 더욱 중요하다. 최근의 컴퓨터의 계산 능력 향상과 소프트웨어 부문의 발전은 자동차 산업의 차량 개발에 컴퓨터를 활용하는 CAE설계의 접목을 가능하게 하여 저비용, 최적화된 솔루션을 제공하여 왔다. 자동차 설계의 핵심인 엔진부분의 경우에도 설계에서부터 생산까지 CAE의 활용도는 빠르게 증가하였다. 그

러나 대부분의 경우에는 입력과 그에 따른 출력값만을 가지고 설계를 결정하는 결정론적(deterministic) 방법에 의한 설계에 의존하고 있어서 설계변수의 변동 가능성, 외부 환경에 의한 시스템의 혼란도(noise) 등에 대하여 신뢰할 수 있는 설계를 제공하는데 약점을 지니고 있다. 신뢰-강건성의 개념을 CAE에 적용한 해석적 신뢰-강건성 설계(analytical reliability and robustness design)는 제품 설계에 확률적인 방법을 이용함으로써 설계의 신뢰성과 강건성을 향상하여 결과적으로 최적화된 제품을 개발할 수 있기 때문에 개발 비용 절감과 제품의 내구성을 증진시킬 수 있다.¹⁾

본 연구의 2장에서는 신뢰성과 강건성의 개념에 대해서 설명하였고 2장에서 설명된 개념을 CAE와 연관하여 해석하는 절차는 3장에서 설명하였다. 실

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

린더헤드의 설계 예를 통해서 해석적 신뢰-강건 설계의 적용에 대한 소개를 하였다.

유한요소 해석은 4단계의 하중을 적용하였고 상용 유한요소 코드인 ABAQUS²⁾를 사용하였다.

2. 신뢰-강건성의 개념

신뢰성 (reliability)이란 시스템의 사용기간 중 의도된 기능의 수행 가능성을 확률적으로 표현한 것이다.³⁾ Fig. 1과 같이 시스템 성능을 평균값을 기준으로 한 정규분포로 나타낼 수 있다. 보통 시스템 설계나 사용 중 발생할 수 있는 혼란요소(noise factor)에 대하여 시스템 설계자는 강건 설계(robust design), 즉 외부혼란 존재에 대한 시스템의 의도된 기능 수행가능력을 수행한다. 강건 설계는 시스템 성능 목표치에 대한 편차를 줄여서 시스템 성능을 향상시키는 방법이다(Fig. 2).

시스템 수명 주기 동안 발생하는 파손은 Fig. 3에 표시한 것과 같이 사용 기간 중의 혼란 요소에 대하여 많은 영향을 받는다. 사용 초기에는 파손이 주로 제조 결함에 의해서 발생하고 생산이 안정화됨에

따라 제조 결함에 의한 파손은 감소한다. 시간이 경과함에 따라서 시스템간의 상호 작용과 사용자의 사용 습관에 따른 파손이 발생하고 일정한 파손을 나타낸다. 장기간 시스템 사용 시에는 시스템 자체의 마멸에 의한 파손의 증가를 관찰할 수 있다.

시스템의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 시스템 성능향상과 관련된 설계변수의 적절한 선택, 재료 강도 향상 방안이 사용되어진다, 이러한 신뢰도 향상 방안은 Fig. 4와 같이 강건 설계 개념을 사용한 최적화 설계 방안으로 개념을 나타낼 수 있다. 첫째 단계는 수축(shrink) 단계로서 시스템 성능분포의 편차를 줄여 성능 요구치를 만족시킨다. 이러한 수축 방안은 최적화된 설계변수를 사용함으로써 성능 변

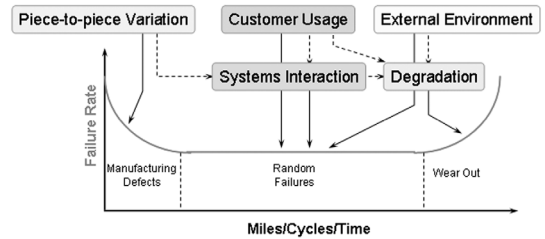


Fig. 3 Noise factors in life time

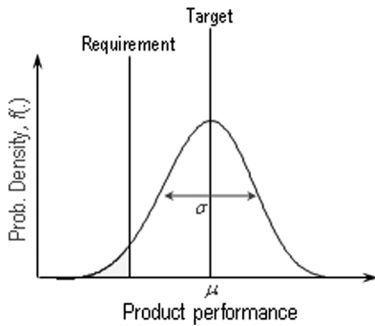


Fig. 1 Concept of reliability

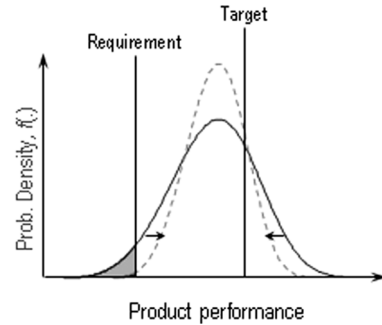


Fig. 4 Two steps for robust design (shrink and shift)

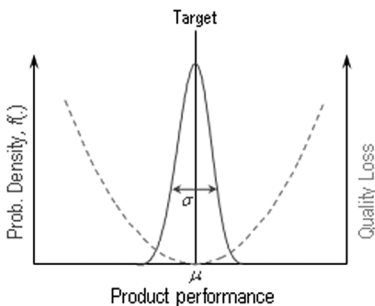
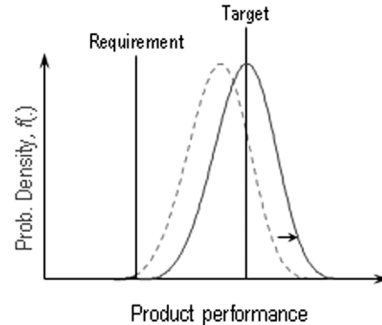


Fig. 2 Concept of robustness



동을 감소시킨다. 둘째 단계는 이동(shift) 단계로서 시스템 성능의 평균값을 목표치(target)로 옮기는 단계이다. 이는 주로 재료강도와 같은 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주는 설계변수의 변화에 의한 결과를 나타낸다. 두 단계를 거친 설계 과정은 강건 설계를 통한 신뢰성 향상을 실현 가능하게 하여 시스템 성능 요구치를 만족시키는 향상된 제품의 생산을 가능하게 한다.

3. 해석적 신뢰-강건 설계

CAE와 신뢰-강건성 개념을 체계적으로 결합하여 제품의 신뢰성 향상을 이루고자 하는 설계기법이 해석적 신뢰-강건 설계이다. 통상, 설계를 위한 CAE 해석은 평균 또는 극한의 경우를 설정하여 도출한 일회적인 해석결과를 분석하는 절차를 수행하였다. 그러나 이러한 결정론적 방법을 이용한 설계 해석 결과는 다양한 사용 환경을 해석 모델에 모두 적용할 수 없었고 그 결과로 강건한 시스템 설계를 구현하는데 애로가 있었다. 또한 해석 결과는 테스트 결과와 일치하기 쉽지 않을 뿐 아니라 강건 설계를 통한 제품의 신뢰-강건성 향상을 구현하기가 어려웠다.

재료 강도의 변동과 사용 응력의 변동을 고려하지 않은 기존의 결정론적 방법을 사용하면 설계 여유(safety margin)는 Fig. 5의 첫 번째 경우가 두 번째 경우보다 적지만 평균강도와 평균 사용응력의 분포를 고려하면 첫째 설계의 경우가 파손에 대한 신뢰성은 향상되어 안전한 설계를 할 수 있다.

해석적 신뢰-강건 설계에서는 먼저 P-diagram을 작성하여 제어 가능한 설계 변수와 제어 불가능한 혼란요소를 설정한다. 시스템 혼란요소에 대한 대응 모델(surrogate model)을 설정하고 설계 변수와 혼란 요소의 데이터를 수집한다. 혼란요소의 영향을 고려한 시스템 모델의 강건 설계를 얻기 위하여 실험설계법(design of experiment)을 사용하여 수치모사를 수행한다. 수치모사 결과를 이용하여 시스템의 성능을 좌우하는 설계 변수들의 영향도를 결정한다. 결정된 시스템의 성능에 영향을 주는 주요 설계요소를 조절하여 시스템의 성능을 강건하게 하는 최적화를 수행한다.

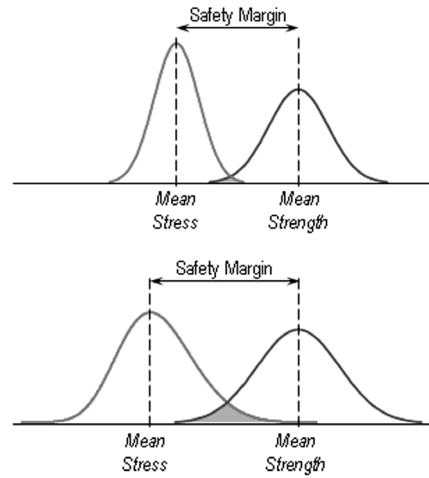


Fig. 5 Safety factor and reliability relationship

3.1 엔진실린더헤드 적용

실린더헤드와 블록 결합에서의 가장 큰 문제점은 결합부위에서의 밀폐(sealing)이다.⁴⁾ 특히 차량용 엔진의 경우에는 경량화하기 위하여 알루미늄을 주로 사용하나 높은 열팽창성 때문에 발생하는 변형에 의한 밀폐 문제가 대두된다. 긴밀한 밀폐를 유지하기 위해서는 조인트에서의 적절한 압력 유지가 필요하다. 이 예에서는 주요설계변수를 바탕으로 전체적인 설계목표치를 유지하기 위한 강건/신뢰 설계의 방안을 제시하였다. 해석모델은 아래 Fig. 6, 7과 같이 실린더헤드, 헤드볼트, 헤드개스킷, 실린더블록으로 구성되어 있다. 유한요소모델의 크기는 대략 230,000개의 솔리드요소와 300,000개의 절점으로 구성되어 있다. 실린더 헤드, 볼트는 육면체요소(hexahedral element)를 사용하여 모델링하였고 헤

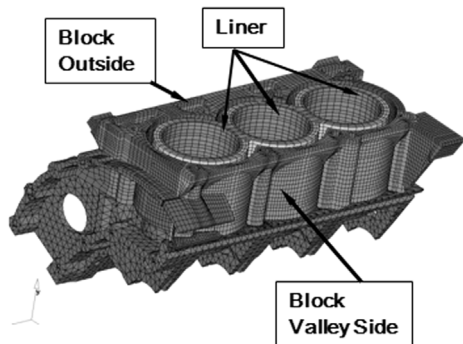


Fig. 6 FEA model for simulation

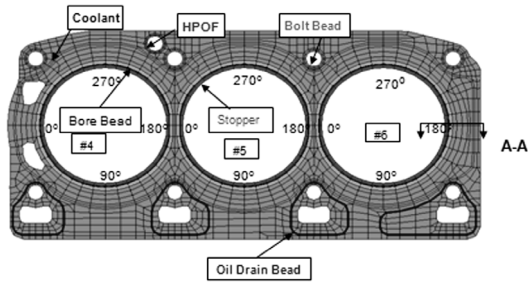


Fig. 7 FEA gasket model for simulation

트개스킷은 ABAQUS에서 제공하는 솔리드요소인 GK3D8를 사용하였다. 접촉부에서는 접촉모델링(contact modeling)을 적용하였고 대칭조건을 사용하여 V-엔진의 한쪽 뱅크만 사용하였다. 실린더 블록의 하부면을 강체 운동을 억제하기 위하여 고정하였으며 대칭면에는 대칭조건을 사용하였다.

엔진의 온도분포를 계산하기 위하여 엔진 열해석(Engine thermal analysis)이 먼저 시행되었다.^{5,6)} 온도 분포는 엔진작동에 의한 열 하중을 계산하기 위한 입력값으로 사용되었다.

유한 요소 모델에 순차적으로 적용한 하중은 다음과 같고 중첩된다.

- ① 상온에서의 엔진어셈블리 하중
- ② 엔진 작동에 의한 열 하중
- ③ 최대 연소압력 하중 (hot-firing)
- ④ 엔진온도 -40°C 유지 (cold-firing)

3.1.1 실험설계법(Design of Experiment)

실린더헤드와 블록은 개스킷으로 접촉되어 있고 설계의 목적은 접촉부에서의 선하중(line load)이 설계목표치(design target) 이상을 유지하도록 하는 것이다. 주요 설계변수와 혼란요소를 P-diagram으로부터 설정하고 강건/설계의 설계 개념을 이용하여 어떤 설계변수가 시스템에 가장 큰 영향을 미치는지 평가한다. 혼란요소를 포함함으로써 시스템의 강건성을 향상시킨 설계가 가능하다. 실린더헤드모델의 설계변수와 혼란요소중에서 선하중에 잠재적으로 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 요소들을 P-diagram에서 선택하였다. 10개의 설계변수, 4개의 혼란요소와 수준(level)은 Table 1과 같이 설정하였다.

제어요소들의 최적표본점(optimal sampling point)을 사용한 CDOE(computational design of experiment)

Table 1 Design range of control factor and disturbance range of noise factor

Control factor		Design range			
Parameter No.	Parameter description	Lower bound	Upper bound	Level	Base line value
1	Cylinder head stiffness	1.0	1.3	18	71(GPa)
2	Cylinder block stiffness	1.0	1.3	18	71(GPa)
3	Head deck thickness	0.7	1.3	18	10 (mm)
4	Head water jacket roof stiffness	0.85	1.6	18	71(GPa)
5	Block outside wall stiffness	0.85	1.6	18	71(GPa)
6	Block valley side wall stiffness	0.85	1.6	18	71(GPa)
7	Counterbore depth	0.5	1.5	3	40(mm)
8	Gasket stopper height	1.0	1.67	3	0.12(mm)
9	Saw cut between bores	No	Yes	2	1
10	Coolant flow path	0	2	6	50(%)
Noise factor		Disturbance range			
Parameter No.	Parameter description	Lower bound	Upper bound	Level	Base line value
1	Liner protrusion / Recession	-0.02 (mm)	0.02 (mm)	3	0(mm)
2	Head bolt load	0.6	1.0	18	60(kN)
3	Deck face flatness	0 (mm)	0.02 (mm)	2	0(mm)
4	Cylinder pressure	0.74	1.04	9	1350(MPa)

는 Table 2와 같이 구성하였다. CDOE 매트릭스 각각의 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과(line load)를 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 Bore, HPOF, Water Jacket에서 가장 낮은 선하중(line load)을 측정하였다. 기준 모델(baseline model), 18 case의 시뮬레이션 결과를 비교하면 어셈블리, hot-firing의 경우에서도 목표치보다 낮은 선하중을 보인 경우가 있었으나, 특히 cold-firing의 경우에는 모든 case에서 목표치보다도 아주 낮은 하중 분포를 보여주었다.

Table 2 CDOE Matrix for simulation runs

Run	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	1.27	1.07	0.91	1.00	0.91	1.12	0.5	1.25	yes	0.4	-0.02	0.69	0.00	0.81
2	1.05	1.27	1.23	0.96	1.60	1.30	1.0	1.67	no	2.0	0.02	0.84	0.02	0.89
3	1.03	1.03	0.74	0.91	1.06	0.97	1.0	1.25	no	0.0	0	0.76	0.02	0.74
4	1.23	1.09	1.27	1.18	0.85	1.06	0.5	1.00	no	1.6	0	0.67	0.02	0.93
5	1.28	1.11	1.30	1.04	1.04	1.04	1.5	1.25	yes	1.2	0	0.98	0.02	0.78
6	1.02	1.22	1.02	1.36	1.12	1.60	0.5	1.25	no	0.8	0.02	0.95	0.00	0.85
7	1.12	1.16	0.81	1.24	1.00	0.91	1.5	1.00	yes	0.8	-0.02	0.91	0.00	0.78
8	1.30	1.05	1.09	1.60	0.94	0.89	1.0	1.67	no	1.6	0.02	0.62	0.00	1.04
9	1.22	1.25	0.84	0.85	1.24	1.48	1.5	1.67	no	1.2	0	0.81	0.00	0.74
10	1.09	1.12	1.20	1.48	0.87	0.94	1.5	1.67	no	0.8	-0.02	0.72	0.02	0.89
11	1.20	1.30	1.05	1.54	1.54	1.54	1.0	1.67	yes	2.0	-0.02	0.86	0.00	1.00
12	1.25	1.23	0.77	1.42	1.48	1.36	1.5	1.00	no	2.0	-0.02	0.88	0.02	0.93
13	1.07	1.20	1.10	0.97	1.36	1.42	1.5	1.00	yes	1.2	0.02	0.65	0.00	0.96
14	1.18	1.02	0.70	1.30	0.89	0.85	1.0	1.25	yes	1.6	0	0.60	0.02	0.96
15	1.11	1.00	0.95	1.06	0.97	0.87	1.0	1.67	yes	0.5	0.02	1.00	0.00	0.85
16	1.16	1.28	0.98	0.87	1.30	1.24	0.5	1.00	yes	0.0	0.02	0.74	0.02	0.81
17	1.00	1.14	1.16	1.12	1.18	1.18	0.5	1.25	yes	0.0	-0.02	0.93	0.02	1.00
18	1.14	1.18	0.88	0.89	1.42	1.00	0.5	1.00	no	0.4	0	0.79	0.00	1.04

A: Cylinder Head Stiffness ratio, B: Cylinder Block Stiffness ratio, C: Head Deck Thickness ratio, D: Head Water Jacket Roof Stiffness ratio, E: Block Outside Wall Stiffness ratio, F: Block Valley Side Wall Stiffness ratio, G: Counterbore Depth ratio, H: Gasket Stopper Height ratio, I: Saw Cut Between Bores, J: Coolant Flow Path from intake side ratio, K: Liner Protrusion/Recession(mm), L: Head Bolt Load ratio, M: Deck Face Flatness (mm), N: Cylinder Pressure ratio

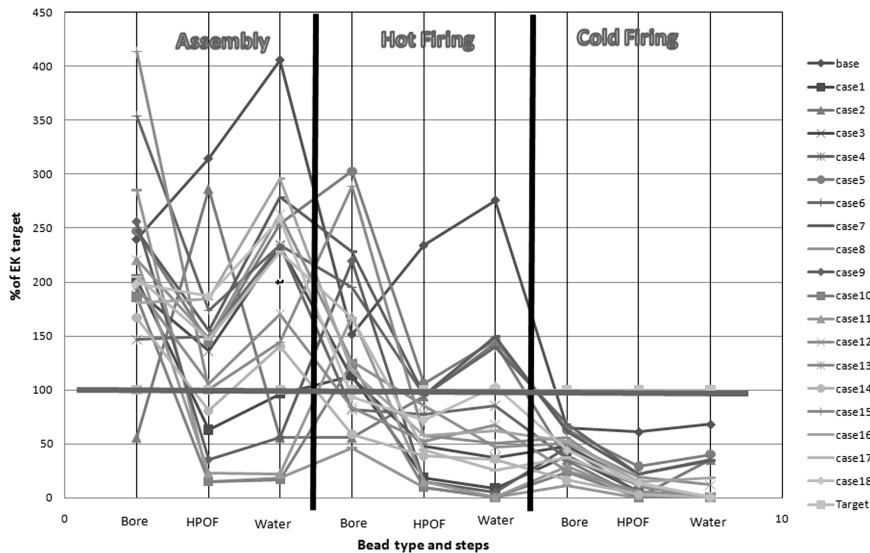


Fig. 8 Line load evaluation for each case

3.1.2 Main effect plot

CDOE 매트릭스와 결과를 Auto-slam(Auto-Successive Linear Approximation)의 입력값으로 사용하여 시스템의 반응에 대한 설계변수의 영향을 구하

고 이를 주 영향곡선(main effect plot)을 이용하여 나타내었다.

이 결과는 각각의 주요소의 변화에 따른 시스템의 반응을 나타내므로 어떤 변수가 시스템 설계에

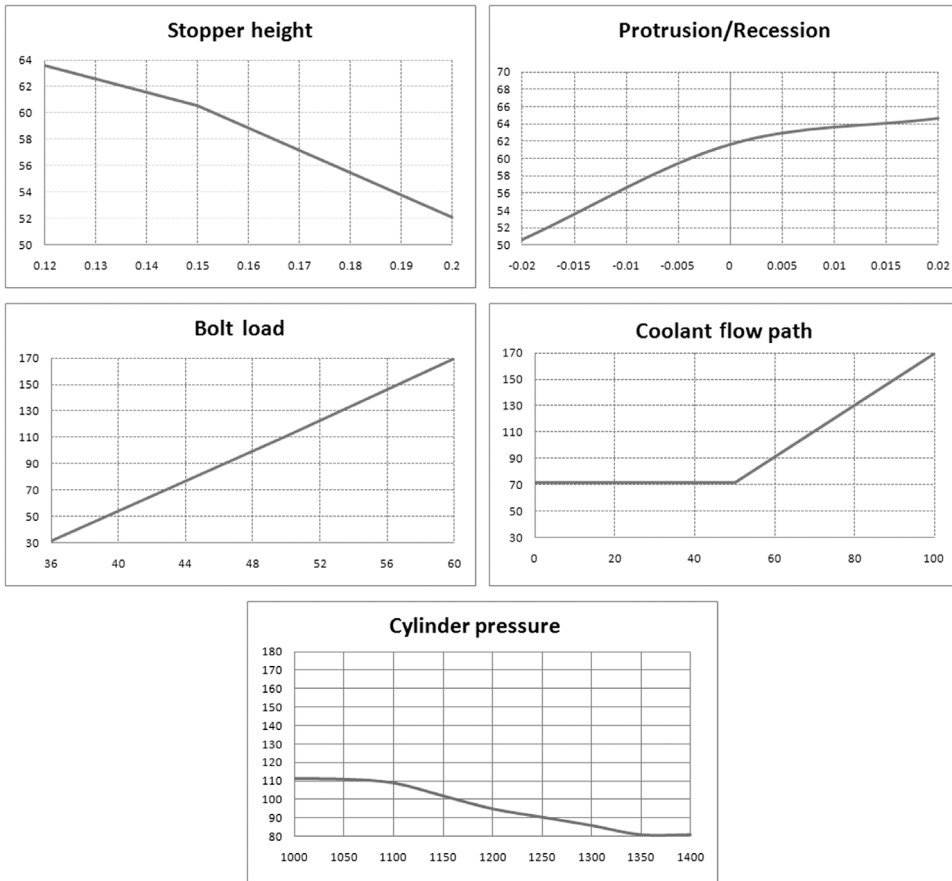


Fig. 9 Main effect plots (horizontal axis: design range, vertical axis: line load)

가장 큰 영향을 미치는 지를 결정할 수 있다. 10종류의 제어요소, 4종류의 혼란 요소중에서 연소 밀폐 선하중(combustion seal line load) 값에 영향을 주는 라이너돌출(liner protrusion/recession), 스톱퍼 높이(stopper height), 볼트하중(bolt load), 냉각수 유동량(coolant flow path), 실린더압력(cylinder pressure)에 대한 주 영향곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 요소중에서 라이너돌출(liner protrusion/recession), 스톱퍼 높이(stopper height), 볼트하중(bolt load)이 시스템의 반응에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

3.2 강건설계

3.2.1 수축(shrink) 적용

강건 설계의 첫째 단계인 수축(shrink) 단계를 실린더헤드 개스킷의 밀폐 압력유지에 적용하였다.

주요설계변수의 편차를 줄여 개스킷 주변 압력 분포의 성능 요구치를 만족시킨다. 개스킷의 분포압력은 볼트하중의 크기 및 분포와 데크면의 편평도에 영향을 받는다.⁴⁾ 이러한 수축 방안은 주로 시스템 성능과 관계된 설계변수를 사용함으로써 성능변동을 감소시킨다. 개스킷의 예에서는 Fig. 10과 같이 실린더라이너의 재료를 cast iron에서 알루미늄으로 대체하여 열팽창에 대한 편차를 줄임으로서 편평도(flatness), 볼트하중과 같은 혼란요소에 대한 시스템의 민감도를 감소할 수 있었다.

3.2.2 이동(shift) 적용

강건 설계의 두 번째 단계인 이동(shift) 단계는 시스템 성능의 평균값을 목표치로 이동하여 최적의 상태로 시스템의 성능을 향상시켜주는 단계이다. Fig. 11에서 나타난 것과 같이 냉각수의 유동율을 변

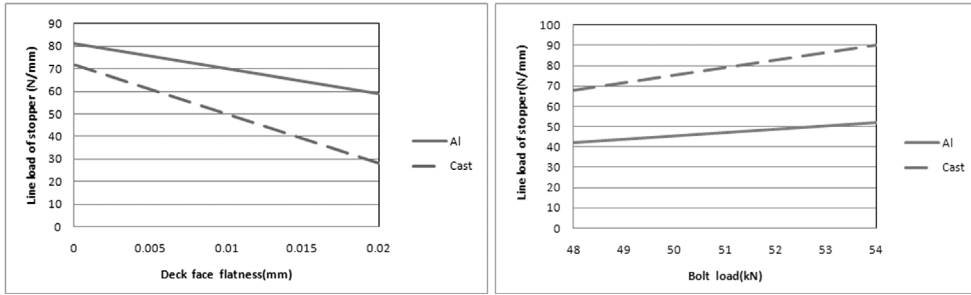


Fig. 10 Comparison of sensitivity of line load using cast iron and Al

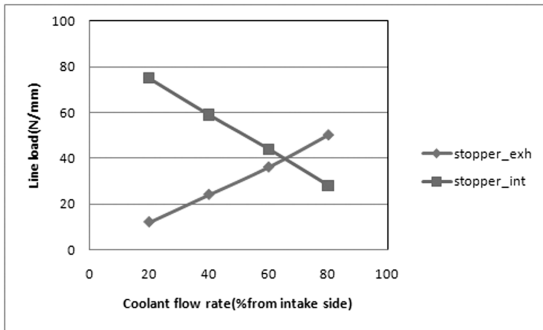


Fig. 11 Optimum coolant flow rate for line load

화시켜 보여주어에서의 선하중을 측정 한 결과 65%의 냉각수 유동률을 유지하는 하는 경우가 보여 주위의 최적 선하중을 가능하게 하였다.

4. 결론

CAE 분야에서 일반적으로 사용하는 결정론적 해석 방법은 해당 설계조건에 적합여부를 판정하는데 사용되고 있다. 이러한 방법은 제어할 수 없는 시스템의 혼란 요소의 변동을 고려하지 않고 있으므로 강건 설계 방향을 제시할 수가 없다. 혼란요소의 변동을 감안한 설계 방식은 혼란요소의 변동에 따른 시스템 반응 민감도를 감소시키는 방향으로의 설계를 가능케 하여 전체적인 설계를 강건하게 할 수 있다. 강건 설계의 개념을 설명하기 위하여 실린더헤드 가스킷의 밀폐압력유지 설계를 예로 사용하였다. 먼저 실린더헤드의 밀폐를 유지하기 위하여 가

장 큰 영향을 주는 3종류의 제어요소와 혼란요소를 결정하였고 수축과 이동 단계를 적용하여 혼란요소에 대한 민감도를 줄이는 강건한 설계방안을 제시하였다.

References

- 1) C. Yang and M. Han, "Finite Element Analysis of Engine Cylinder Block and Main Bore for Reliable Design," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.39-48, 2005.
- 2) ABAQUS Users Manual, Ver 6.2, HKS, 2002.
- 3) S. Chowhury, Design for Six Sigma: The Revolutionary Process for Achieving Extraordinary Profits, Dearborn Trade Pub., Detroit, MI, 2002.
- 4) C. C. Lee, K. N. Chiang, W. K. Chen and R. S. Chen, "Design and Analysis of Gasket Sealing of Cylinder Head under Engine Operation Conditions," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.41, pp.1160-1174, 2005.
- 5) J. Park, W. Joo and K. Kim, "Thermal and Mechanical Behavior of Gasoline Engine Head and Block," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.19-30, 1999.
- 6) B. Kim and H. Chang, "Finite Element Analysis of Cylinder Head/Block Compound," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.28-38, 2003.