

발전기세트 공진 회피를 위한 베이스프레임 최적설계에 관한 연구

A study on the design optimization of baseframe to avoid resonance of diesel generator set

정석현[†] · 곽용석* · 김원현**

S H Jeong, Y S Kwak and W H Kim

Key Words : diesel generator set, resonance, optimization, gradient descent method.

ABSTRACT

A structural modification of baseframe is an effective method to avoid resonance in marine diesel generator (D/G) set which consists of diesel engine, generator and baseframe. However the reinforcement with thick plates or additional parts to increase the natural frequency can be less effective because of increased weight. Especially fine control of target mode based on the experience is difficult because the weight and interference of system have to be considered

In this paper, the design optimization of baseframe was performed to reduce the resonant vibration using a gradient descent method. The design parameters such as thickness, shape and location of baseframe parts are optimized to increase the torsional natural frequency of D/G set. From the actual test, the new designed baseframe reduced the vibration level in resonance by 55% without any increase of weight and interference.

1. 서 론

Fig. 1 과 같이 중속디젤엔진, 발전기 그리고 베이스프레임으로 구성되고 탄성 마운트로 지지되는 발전기세트는 박용 또는 육상용 발전 시스템으로 널리 사용되고 있다.

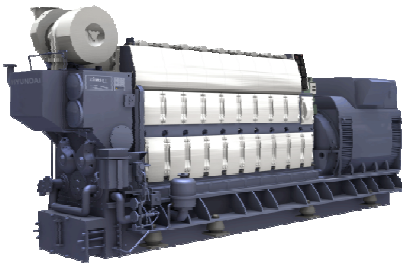


Fig. 1 Diesel generator set

이러한 발전기세트는 최근 효율을 높이기 위해 고출력, 경량화 되고 있는 추세인데 반해 진동에 대한 요구는 점점 더 엄격해 지고 있어 초기 설계 단계에서의 저진동 설계가 필수적이다.

발전기세트 진동 문제는 엔진 기진력과 발전기세트 고유진동수와의 공진이 일반적이데 탄성 마운트 지지에 의한 강체 모드 공진은 마운트 강성 변경으로 비교적 쉽게 해결이 가능하나 엔진, 발전기 등의 구조 강성에 영향을 받는 탄성 모드는 사후 설계 변경 또는 구조 보강이 어렵다. 이런 이유로 많은 엔진 제작사들이 쉽게 구조 변경이 가능한 베이스프레임을 탄성 모드 제어 방안으로 활용하고 있다. 그러나 베이스프레임은 구조 강성 변화 효과가 크지 않고 설계 변경 시 구동 부품과의 간섭을 고려해야 하며 강성 변화 효과보다 중량 변화 효과가 클 수 있어 공진 회피 대상 개별 모드에 대한 최적 설계가 필요하다.

본 논문에서는 개념 및 상세 설계 단계에서의 베이스프레임 최적화 기법 및 이를 이용한 공진 회피 설계가 특정 탄성 모드 제어에 효과적임을 보였다.

[†] 교신저자; 정회원, 현대중공업 선박해양연구소 진동소음 연구실

E-mail : shjeong0387@hhi.co.kr

Tel : 052-202-7404

* 현대중공업 기계전기연구소 풍력발전연구실

** 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

2. 베이스프레임 최적 설계

2.1 최적 설계 기법

최적 설계 기법 중 널리 사용되고 있는 방법이 gradient descent method 인데 Fig. 2 와 같이 설계 변수에 대한 목적 함수의 구배값(gradient)이 최소가 될 때까지 반복 작업을 통해 최적값을 찾는 방법이다. 여기서 설계 변수에 따른 응답값의 민감도를 구해야 하는데 직접 미분법은 구배값을 바로 계산하는 방법으로 정확도는 높으나 복잡한 요소에 대해서는 계산이 힘들다. 그래서 설계 변수가 적고 제한 조건이 많은 상세 설계 과정에 이용된다. 반면 보조 변수법은 계산을 단순화하여 설계 변수가 제한 조건보다 많은 경우에도 적용이 가능하기 때문에 개념 설계 단계에서 많이 이용된다.

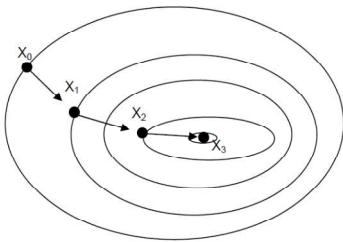


Fig. 2 Gradient descent method

참고로 직접 미분법은 응답값 g , 위치변수 u , 설계변수 x 의 관계를 식(1)과 같이 나타낼 수 있고, 보조 변수법은 보조 변수 a 를 이용하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial q^T}{\partial x} u + q^T \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial q^T}{\partial x} u + a^T \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial K}{\partial x} u \right] \quad (2)$$

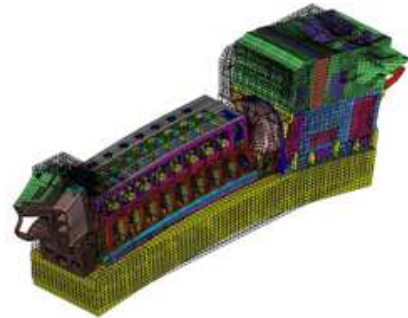
일반적으로 개념 설계 단계에서는 보조 변수법을 이용하고 상세 설계 단계에서는 직접 미분법을 이용한다. 본 연구에서는 최적화 대상에 따라 직접 미분법을 이용한 설계 인자 최적화 방법을 사용하였고 보조 변수법을 이용한 위상 최적화와 두께 최적화 방법도 적용하였다.

2.2 위상 최적화

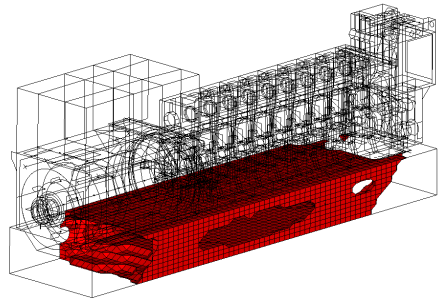
위상 최적화는 시스템의 주어진 하중과 경계조건에서 구조물이 가지는 부재의 배치를 최적화하는

기법을 말하며 개념 설계 단계에서 각 진동 모드별 고유진동수 변화에 영향이 큰 부재들의 위치 및 배치를 초기에 확인할 수 있는 장점이 있다. 발전기세트 수직 굽힘 모드와 비틀림 모드에 대한 위상 최적화 수행 결과를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타내었다. 베이스프레임 내부 전체를 솔리드 요소로 모델링하고 최적화를 수행하여 관련 모드에 지배적인 영향을 주는 요소들을 표시하였다.

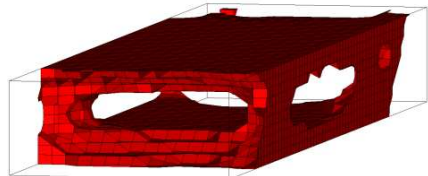
먼저 수직 굽힘 모드의 경우 Fig. 3 의 (b)에서 보듯이 베이스프레임 양 끝단을 제외한 대부분의 부재가 대상 모드의 강성에 영향이 큼을 알 수 있다. 이 결과를 좀 더 자세히 보면 (c)와 같이 내부가 비어있는 형태로 최적화 되었으며 베이스프레임 중앙의 일부 옆판도 영향이 없어, 각 부재 중 상판, 하판의 기여도가 크고 보강 등에 의한 내부 부재 영향은 작다는 것을 의미한다.



(a) Original vertical bending mode: 50.2Hz



(b) Optimized vertical bending mode: 52.1Hz



(c) Inner part of optimized baseframe

Fig. 3 Topology optimization for vertical bending mode

Fig. 4 의 비틀림 모드 경우는 수직 굽힘 모드에 비해 베이스프레임 양 끝단의 기여도는 더 작아지는 반면 옆판의 기여도는 높아진 것을 알 수 있다. 특히 모서리 부분(상판 또는 하판이 옆판과 만나는 부분)의 기여도가 크다는 것을 알 수 있다. 참고로 비틀림 모드 특성에 기인하여 최적화된 베이스프레임이 수직 굽힘 모드에 비해 비대칭이다.

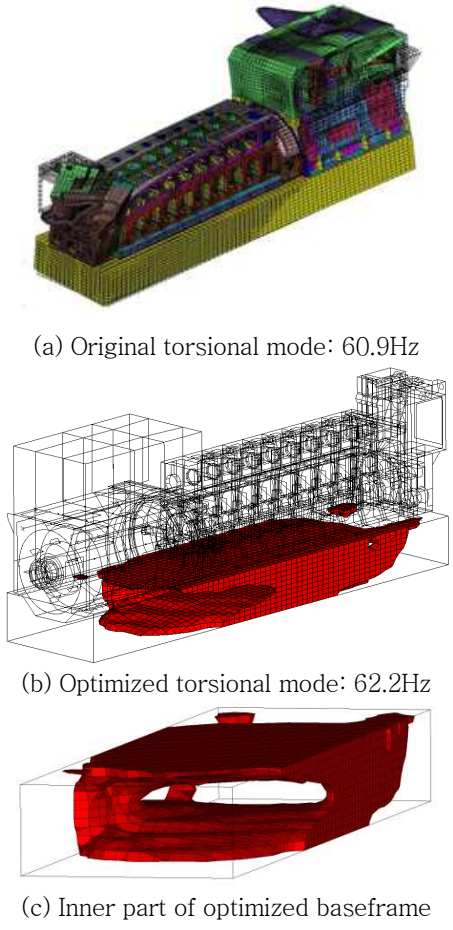


Fig. 4 Topology optimization for torsional mode

이상의 결과로 볼 때 베이스프레임 설계 시 양 끝단의 부재는 얇게 설계하고 중앙 부재의 두께를 증가시키면 탄성 모드 고유진동수 상승에 효과적이며 일반적인 많이 사용되고 있는 내부 보강은 효과가 크지 않음을 알 수 있다.

2.3 형상 최적화

시스템 각 부재의 기여도 분석을 위한 위상 최적

화와는 달리 형상 최적화는 시스템의 최적 형상 및 치수를 찾는 기법이다. 박용 발전기세트의 경우 선박 내 설치 조건 및 공간 제약 때문에 진동 측면에서 베이스프레임의 크기를 무작정 증가시킬 수 없다. 본 논문에서는 주어진 공간 내에서 기존 부재의 위치 및 두께는 변화 없이 베이스프레임의 길이, 폭, 높이에 대해 형상 최적화를 통한 기여도를 분석해보았다. Table 1 에 비틀림 모드를 대상으로 기존 형상 대비 형상 최적화 결과를 정리하였다.

Table 1 Shape optimization for torsional mode

Part	Dimension range	Optimal value	Torsional Mode [Hz]
Length	±10mm	-8mm	+0.1%
Width	±10mm	+16mm	+0.3%
Height	-100mm ~ 500mm	+372mm	+2.3%

결과를 보면 베이스프레임의 길이와 폭은 설계 범위가 좁기 때문에 비틀림 모드의 변화율이 미비하나 높이는 상대적으로 설계 범위가 크므로 효과적인 제어가 가능함을 알 수 있다. 대표적으로 베이스프레임 높이에 대한 최적화 전후 해석 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

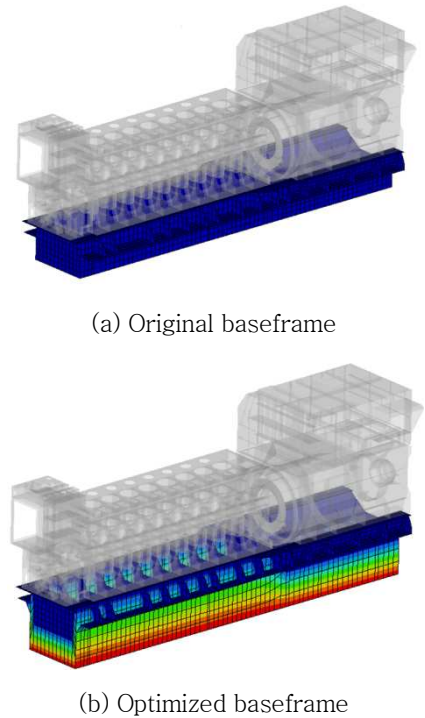


Figure 5 Shape optimization by height variation of baseframe

3. 비틀림 모드 제어용 베이스프레임 최적설계

2 장의 위상 최적화 결과를 바탕으로 발전기세트 비틀림 모드 고유진동수 증가를 위한 각 부재 별 두께 최적화를 수행하였다. 일반적으로 비틀림 모드는 수직 굽힘 모드에 비해 구조 보강 등에 의한 고유진동수 상승 효과가 크지 않고 경험에 기반한 보강이 쉽지 않기 때문에 본 논문에서 최적 설계 대상 모드로 선정하였다.

3.1 기존 설계 변경 방법

탄성 모드 고유진동수 증가를 위한 기존 설계 변경 방법은 베이스프레임 주요 부재인 상판, 옆판, 하판의 두께를 늘리거나 내부 보강하는 방법을 적용하고 있다. Table 2 는 각 부재의 두께를 일정하게 증가시켰을 때의 고유진동수 변화를 정리한 것으로 수직 굽힘 모드의 증가 효과는 크지만 비틀림 모드의 증가 효과는 거의 없거나 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 이는 2 장의 위상 최적화 결과에서 보듯이 비틀림 진동 모드에 영향을 주는 부재가 베이스프레임 중앙 부재이고 양 끝단 부재는 거의 영향을 주지 않지만 전체 두께를 증가시킬 경우 질량 증가로 인해 고유진동수가 감소한 것으로 판단된다.

Table 2 Natural frequency variation by baseframe modification

Design modification	Vertical bending mode	Torsional mode
Top plate thickness + 15mm	+ 2%	0%
Top plate thickness + 15mm Bottom plate thickness + 7mm	+ 4%	0%
Side plate thickness + 20mm	+ 3%	-1%

3.2 최적 설계 기법 적용

(1) 균일 두께 변경 조건

3.1절의 결과를 바탕으로 베이스프레임 각 부재의 두께를 무조건 증가시키지 않고 상판, 옆판, 하판 두께를 균일하게 변경하는 조건으로 최적화 해석을 수행하였다. 각 부재에 대한 설계 변경 범위는 1mm에서 100mm로 설정하고 대상 모드는 비틀림 모드로 설정하였다.

해석 결과로써 최적화된 부재의 두께를 기존 부재에 대한 증감량의 비로 Table 3 에 정리하였다.

Table 3 Optimized design for uniform thickness modification

Variables	Optimized thickness
Top plate	-81.2%
Side plate	-53.2%
Bottom plate	-31.1%
Torsional mode	+ 2.9%

결과를 보면 부재 두께의 최적값은 오히려 기존 수치보다 감소한 것을 확인할 수 있다. 즉 부재의 두께 증가로 인한 강성 증가 효과보다는 무게 경량화로 인한 고유진동수 증가량이 더 크다는 것을 의미한다. 다만 상판 두께가 10mm 이하 일 경우 엔진과 발전기 설치용 고정 나사의 가공이 불가능하며 구조 안정성 측면에서 실제 적용은 어려우나 의미 있는 해석 결과이다.

위 제한 조건을 고려하여 각 부재의 두께를 최소 20mm 로 설정하고 최적화 해석을 수행한 결과를 Table 4 에 정리하였다. 초기 해석 결과에 비해 고유진동수 상승 효과는 낮게 나타났지만 기존 베이스프레임에 비해 두께 감소가 고유진동수 증가에 더 효과적이라는 결과는 이전 해석과 동일하다.

Table 4 Optimized design for uniform thickness modification considering installation

Variable	Optimized thickness
Top plate	-50.0%
Side plate	-40.0%
Bottom plate	0.0%
Torsional mode	+ 0.9%

(2) 부분적 두께 변경

주요 부재를 동일한 두께로 변경하는 방법은 비틀림 모드 상승 효과가 제한적이거나 실제로 적용할 수 없는 설계 결과임을 확인하였다. 그러므로 질량 증가 효과는 최소화하면서 동시에 강성 증가 효과를 최대화 하기 위해 각 주요 부재의 두께 분포를 설계 변수로 둔 최적화를 수행하였다.

그 결과를 Fig. 6에 나타내었으며 베이스프레임 중앙부의 붉은색으로 표시된 부분이 상대적으로 부재의 두께가 두꺼운 부분을 의미한다. 즉 비틀림 강성에 지배적인 베이스프레임의 중간 부재 두께는 기존과 동일하게 유지하는 대신 양 끝단의 두께를 줄여서 강성 효과는 유지하거나 증가시키는 반면에 질량 효과는 감소시키는 방법이 효과적인 것으로

나타났다.

4. 검증 시험

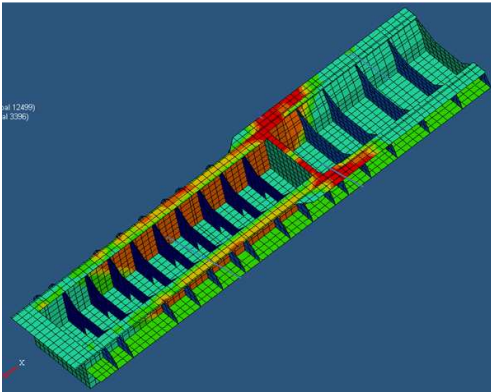


Fig. 6 Optimal design for partial modification

위 해석 결과를 바탕으로 베이스프레임 제작성을 고려한 실 적용 최종 설계 안을 Table 5에 정리하였다. 베이스프레임 양 끝단의 상판과 옆판은 부분적으로 두께를 감소시켰고 하판의 두께는 기존 베이스프레임과 동일하게 유지하였다. 무게 측면에서는 최종 베이스프레임 개선안이 기존에 비해 약 13% 감소하였다. 최종 설계 안에 대한 탄성 모드 해석 결과를 Table 6에 정리하였다. 비틀림 모드는 1.7% 정도 증가하였고, 수직 굽힘 모드는 약 -2.9% 감소하지만 운전 영역 근처에서 기진력과 공진 현상은 발생하지 않는다.

Table 5 Final optimized design for partial modification

Variable	Optimized thickness
Top plate	-50% (partial modification)
Side plate	-43% (partial modification)
Bottom plate	0.0%
B/F weight	-12.6%

Table 6 Flexible mode of D/G set with optimized baseframe

Mode	After optimization
Vertical bending	-2.9%
Horizontal bending	-0.9%
Torsion	+1.7%

대상 발전기세트는 엔진 폭발 기진력과 발전기세트 비틀림 모드와의 공진으로 정격 운전 속도 근처에서 진동 문제가 예상되었다. 비틀림 모드 고유진동수 제어를 위해서는 기존 플라이휠 커버를 강성이 강한 주물형으로 교체하는 방법이 있으나 공진 회피를 위해서는 5Hz이상의 고유진동수 이동이 필요하기 때문에 추가로 베이스프레임 최적화 설계가 필요하였다.

최적화 해석을 통해 제안된 베이스프레임 실제 발전기세트에 적용하여 응답 계측을 수행하였다. Fig. 7에 기존 베이스프레임과 개선 안을 적용한 베이스프레임에 대한 진동 응답을 비교하였다.

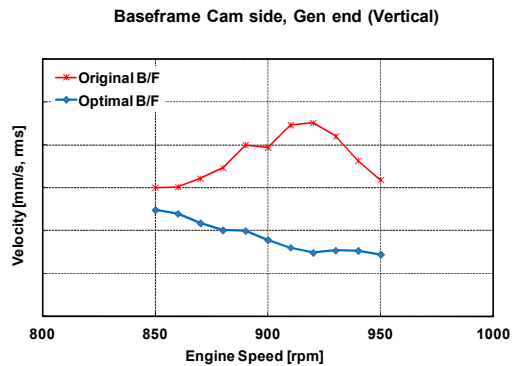


Fig. 7 Vibraton reduction by optimal baseframe

계측 결과 920rpm 에 존재하던 비틀림 모드는 80rpm 이상 증가한 것으로 나타났다. 이전 적용 사례에 대한 계측 결과를 기준으로 주물 커버에 의한 비틀림 모드의 상승 효과는 약 50rpm 정도이므로, 베이스프레임에 의한 비틀림 모드 상승 효과는 약 30rpm 정도로 판단된다. 비틀림 모드에 대한 베이스프레임 최적화 해석 및 계측 결과를 Table 7에 정리하였다.

Table 7 Increment of torsional mode by baseframe optimization

Analysis	Measurement
+1.7%	+3.3%

공진 회피 효과는 계측에서 두드러지게 나타났으며 베이스프레임에 대한 최적화 설계가 공진 회피에 효과적임을 잘 나타내고 있다. 진동 응답은 정격

운전 속도(900rpm)에서 기존 대비 55% 진동 저감 효과를 확인하였다.

5. 결 론

발전기세트의 탄성 모드를 제어하기 위해 베이스 프레임 구조에 대한 최적 설계를 수행하였다. 설치 조건과 다른 탄성 모드의 영향을 고려하여 최적 베이스프레임 부재의 두께를 결정하였고, 최적화된 베이스프레임은 실 발전기세트에 적용하여 진동 저감 효과를 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) W.H. Kim, T.G. Lee, G.H. Jung, K.H. Lee and J.G. Bae, 2005, "Prediction and Reduction of Medium Speed Diesel Engine Vibration using Database", Proceeding of the KSNVE, 2007 Annual Spring Conference, pp. 399-406.
- (2) Lee, S.M., Kim, W.H., Kim, H.S. and Bae, J.G., 2007, "Anti-Vibration Design System for HiMSEN Engines", 27th CIMAC World congress.
- (3) OptiStruct Optimization manual, Altair.