중속디젤엔진 진동 DB 를 이용한 진동 예측과 저감

Prediction and Reduction of Medium Speed Diesel Engine Vibration using Database

김원현† ·이태경*·정건화*·이군희*·배종국*

Won-Hyun Kim, Tae-Kyoung Lee, Kun-Hwa Jung, Kun-Hee Lee and Jong-Gug Bae

Key Words : Medium speed diesel engine(중속디젤엔진), Generator set(발전기세트), Anti-vibration design(방진설계), HiMSEN engine(힘센 엔진)

ABSTRACT

Structural vibrations of generator sets with medium speed diesel engine mainly come from the resonance between the excitations of engine and natural modes of system. The countermeasures to reduce the vibration or to avoid the resonance are fairly well known to workers. However these processes which are applied after the completion of system need much time consumption and additional cost.

In this paper, the vibration measurement results collected for about 8 years were compiled as Database. Based on the database, the change of vibration was predicted with respect to variation of system such as engine type, generator weight, mount stiffness, and etc. As results of study, this paper presents the anti-vibration design procedures of newly composed generator sets using Database in the initial design stage and their effects.

1. 서 론

소형 선박의 추진용 또는 발전용으로 사용되는 중속디젤엔진은 최근 출력의 증가 및 경량화 추세로 인해 엔진 자체의 성능뿐만 아니라 진동 성능 또한 주된 설계 관점으로 그 중요성이 커지고 있다. 이런 이유로 힘센 엔진 개발 단계에서부터 폭발력과 관성력에 의한 엔진 기진력의 계산과 구조 진동 및 축계 진동 응답에 대한 세심한 평가가 선행되었다[1].

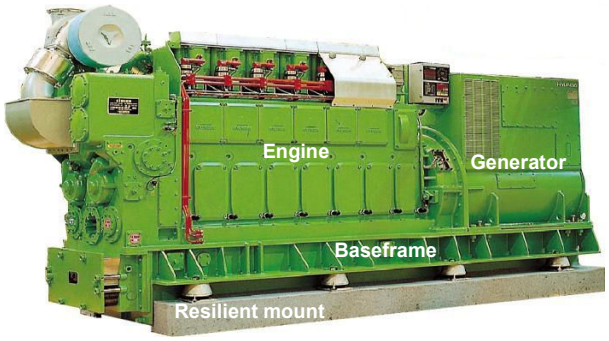


Fig. 1 탄성 지지된 발전기세트

그럼에도 불구하고 Fig. 1 에 보인 바와 같이 엔진과 발전기가 공통 베드(common bed 또는 baseframe)에 설치되고 탄성 마운트로 지지되는 발전기세트에서는 고객의 요구에 따라 같은 엔진이 적용되더라도 발전기 출력, 전압, 운전 속도 등의 변수가 많아 설계 단계에서 해석적으로만 진동을 평가하는 데는 그 한계가 있다. 그래서 진동 특성이 파악되지 않은 신규 공사에서는 진동 발생 가능성이 상시 존재하게 된다.

여러 해석과 계측 결과를 보면 발전기세트의 구조 진동은 엔진 기진력에 의한 강제 진동 보다 시스템 자체의 고유 진동수와 기진력의 공진에 의한 진동이 대부분인 것으로 파악되고 있다[1][2]. 발전기세트의 주된 고유 진동 모드는 탄성 마운트(resilient mount) 지지로 인한 6 개의 강체 모드(rigid mode)와 주로 베이스프레임 강성과 관련된 탄성 모드(flexible mode)이다.

위 모드들과의 공진에 의한 진동은 구조 변경 또는 보강 등의 방법으로 제어되고 있으며 구체적인 방법들이 설계자들에게 잘 알려져 있으나 문제는 발전기세트가 제작된 후에 발생한 진동에 대해 사후 처리하는 방법이므로 많은 비용과 시간이 소요된다는 것이다. 그러므로 발전기세트 설계 단계에서 이를 고려한 방진 설계가 선행되어야 하는데 앞에서 언급하였듯이 해석적인 방법은 한계가 있다. 또한 설계자의 경험을 바탕으로 기존의 실적을 고려하여 발전기세트를 구성할 수 있으나 역시 정확도 문제와 많은 제약이 따르게 된다.

† 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실
E-mail : whkim@hhi.co.kr
Tel : (052) 202-7404, Fax : (052) 202-5945

* 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

본 연구에서는 당사에서 개발한 힘센 엔진 발전기세트에 대해 약 8 년 동안 수행된 계측 결과들을 체계적으로 정리하여 데이터베이스화 하였다. 이를 바탕으로 여러 구성품의 변화에 대한 진동 변화(고유 진동 모드의 변화)를 정량적 또는 정성적으로 분석하여 발전기세트 초기 구성 및 설계 단계에서 공진 회피 설계에 적용하고자 하였다.

2. 발전기세트의 진동 특성

비정상적인 연소나 축계 잔류 불평형에 의한 진동이 드물게 발생하지만 중속디젤엔진이 적용된 발전기세트의 주된 진동 원인은 앞에서 언급하였듯이 엔진 기진력과 고유 모드의 공진에 의한 것이다. Fig. 2 에는 축계 잔류 불평형에 의한 1 차 성분의 진동을 현장 발란싱으로 제어한 사례를 보였다. 이러한 진동은 원인이 파악되면 비교적 간단한 조치로 진동을 저감할 수 있다.

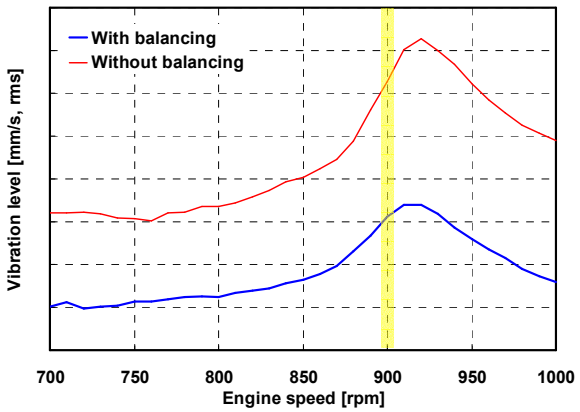
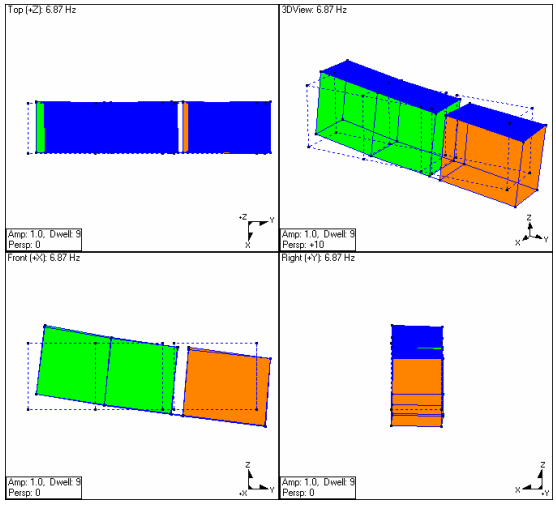


Fig. 2 축계 발란싱에 의한 1 차 진동성분의 제어

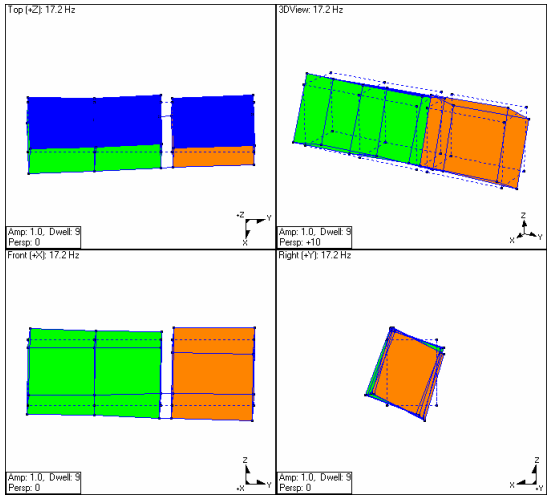
발전기세트는 특별한 목적을 제외하고는 탄성 마운트로 지지되는 것이 일반적이며 시스템의 관성과 마운트 강성의 지배를 받은 강체 모드가 주로 20 Hz 이하의 저주파에서 나타나고 엔진 블록, 발전기, 베이스프레임 등의 강성에 영향을 받는 탄성 모드가 20 Hz 이상에 주로 발현되고 있다.

강체 모드는 6 자유도 운동에 의한 모드가 모두 나타나는데 병진 방향의 lateral, longitudinal, bounce mode 와 회전 방향의 yawing, pitching, rolling mode 이다. Fig. 3 에 발전기세트 충격 시험으로부터 얻은 대표적인 모드들을 나타내었다.

강체 모드는 일반적으로 0.5 차, 1 차 등 엔진의 저차 기진력과 공진을 발생시키며 마운트 변경 또는 시스템의 무게를 변경시켜 진동을 제어할 수 있다.



(Pitching mode)



(Rolling mode)

Fig. 3 발전기세트의 대표적인 강체 모드

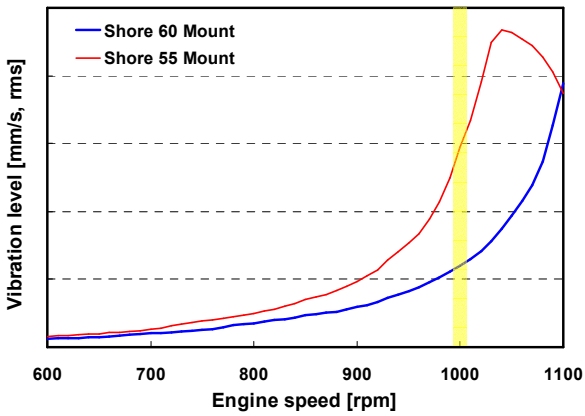
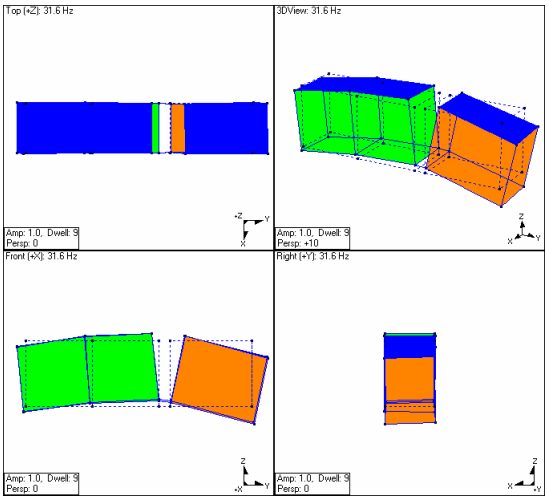


Fig. 4 마운트 강성(경도) 변경에 따른 공진 위치 변화

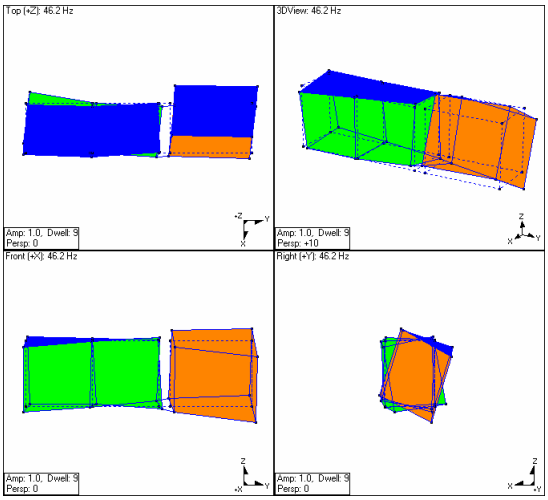
Fig. 4 에는 강체 모드와의 공진에 의해 발생한 진동을 탄성 마운트 강성 변경으로 제어한 사례를 나타내었다[3]. 그림에서 마운트 강성이 Shore 경

도로 55° 인 마운트를 장착하였을 때 bounce mode 와 엔진 0.5 차 기진력의 공진이 1000 rpm 정격 운전 속도에 근접한 경우이며 이를 해결하기 위해 경도 60° 마운트를 장착하여 공진을 회피한 것이다.

탄성 모드는 엔진, 발전기, 베이스프레임의 강성에 영향을 받는 모드로서 Fig. 5 에 보인 바와 같이 수직 굽힘 모드(vertical bending mode) 또는 비틀림 모드(torsional mode) 등이 주된 공진 모드이다. 물론 이 외에도 여러 탄성 모드가 존재하지만 위 두 모드가 주된 원인이다. 이러한 탄성 모드들은 강체 모드에 비해 비교적 높은 주파수이며 엔진의 guide force moment 등과 공진 시 큰 진동을 발생시킨다.



(Vertical bending mode)



(Torsional mode)

Fig. 5 발전기세트의 대표적인 탄성 모드

탄성 모드와의 공진 발생시 적용 가능한 구조 변경 또는 보강 방법을 Fig. 6 과 Fig. 7 에 예를 들어 설명하였다.

Fig. 6 은 발전기세트 수직 굽힘 모드와 엔진 3 차 기진력의 공진에 의해 정격 운전 속도인 900 rpm 에서 수직 방향으로 큰 진동이 발생한 경우이다. 문제 해결을 위해 수직 굽힘 모드를 운전 영역 아래로 이동시키는 방안으로 엔진과 발전기에 같이 연결되어 있는 플라이휠 커버(flywheel cover)를 제거하였다. 그 결과 운전 속도에서 진동이 크게 감소하는 효과를 얻었다[3].

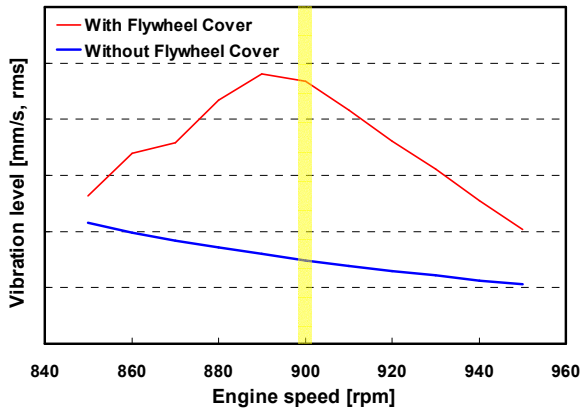


Fig. 6 F/W cover 제거에 따른 진동 저감

Fig. 7 은 발전기세트 비틀림 모드와 역시 3 차 기진력과의 공진에 의해 900 rpm 의 정격 운전 속도에서 과도한 진동이 발생한 사례이다. 대상 발전기세트에서는 비틀림 모드의 위치를 운전 속도 아래로 이동시키기 위해 베이스프레임 상판을 일부 제거하는 방법을 적용하였고 그 결과 운전 영역에서 진동이 크게 감소하는 효과를 얻었다[4].

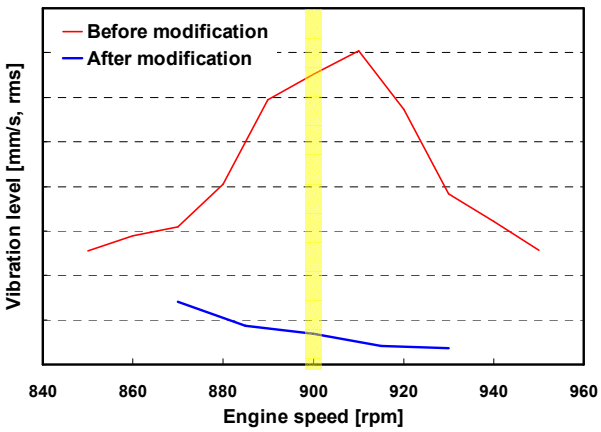


Fig. 7 베이스프레임 상판 제거에 따른 진동 저감

이상의 탄성 모드 공진에 의한 진동은 비록 그 원인을 파악하고 구조 변경을 통해 공진 회피 목적은 달성하였지만 원인 분석을 위한 계측, 구조 변경을 위한 추가 비용, 공기 지연 등 적지 않은

시간과 비용이 들게 된다.

3. 진동 DB 의 구축

당사에서는 힘센 엔진 개발 이후 다양한 종류의 발전기세트를 생산, 납품해 왔다. 개발 단계에서의 정밀한 진동 계측과 해석 자료를 보유하고 있으며 일부 진동 문제 발생 공사에 대해서는 시스템의 변경, 보완, 수정 등을 통해 진동 문제를 해결해온 바 있다. 본 연구에서는 여러 엔진과 발전기세트에 대한 계측 결과를 체계적으로 수집, 정리, 분석하여 진동 DB 를 구축한 다음 이를 이용해 발생 가능한 진동을 사전에 예측을 하고자 하였다.

진동 DB 의 구축에 있어서 실제 계측 데이터 즉, 충격 시험과 진동 응답 계측 결과 등을 입력하는 것이 주된 것이지만 그 활용을 위해서는 공진(정확히는 고유 진동 모드)에 영향을 줄 수 있는 여러 부품들의 변화 가능한 설계 변수를 분류하고 이 변수들에 대한 고유 진동 모드 변화를 정량적 또는 정성적으로 분석하는 것이 궁극적인 목적이다. 이에 대한 내용은 4 절에서 자세히 언급하였으며 본 절에서는 진동 DB 구축 과정에 대하여 설명하였다.

먼저 Table 1 에 고유 진동 변화에 영향을 줄 수 있는 부품과 설계 변수를 정리하였다. 엔진은 기본적인 사항이므로 변수에서 제외하였다.

Table 1 고유 진동 변화에 영향을 주는 부품 및 설계 변수

부품	설계 변수	영향
발전기	중량	강체 모드와 탄성 모드 변화
베이스프레임	구조	탄성 모드 변화
탄성 마운트	경도, 개수	강체 모드 변화
플라이휠 커버	구조	탄성 모드 변화

발전기 무게는 강체 모드와 탄성 모드 변화에 모두 영향을 미치므로 중요한 설계 변수가 된다. 발전기 자체의 구조 강성도 어느 정도 영향을 미치지만 주된 변수는 중량이다. 베이스프레임은 철판의 용접 구조물로서 부재 두께 및 배치가 발전기세트 구조 강성을 결정하며 주로 탄성 모드 변화에 영향을 준다. 탄성 마운트는 고무의 경도(강성)와 설치 개수가 강체 모드에 영향을 주며 플라이휠 커버는 그 종류에 따라 탄성 모드에 영향을 준다. 진동 DB 에는 이러한 부품들과 설계 변수를 그에 따른 진동 계측 결과와 같이 입력하여 진동 예측에 유용한 정보를 얻고자 하였다.

엔진 진동 DB 는 정보의 저장, 분류, 검색 등을 위해 MS SQL 을, 정보의 입력 및 출력과 DB 관리를 위해 ASP 를 사용하였고 사내 intranet 에서 구동되도록 web 기반으로 구축하였다. DB 의 구조는 Fig. 8 에 보인 바와 같이 공사(project)에 대한 일반 정보와 엔진, 발전기 주요 사양 입력부, 고유 진동 특성에 영향을 줄 수 있는 시스템의 여러 사양 입력부, 그리고 충격 시험 및 진동 응답 계측 결과 입력부 등 크게 3 부분으로 구성되어 있다.

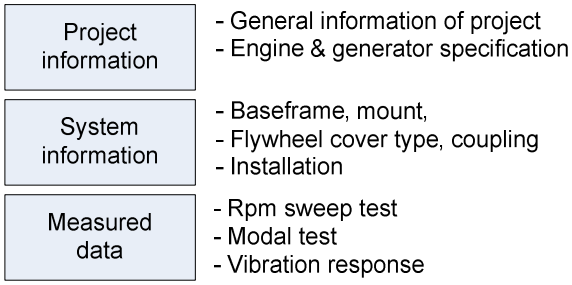


Fig. 8 진동 DB 의 구성

Fig. 9 에 위 구성 중 발전기세트 공사 관련 정보와 가장 중요한 엔진 및 발전기 정보 입력창을 보였다. 여기에는 중량 데이터뿐만 아니라 엔진과 발전기의 주요 사양을 포함하고 있다.

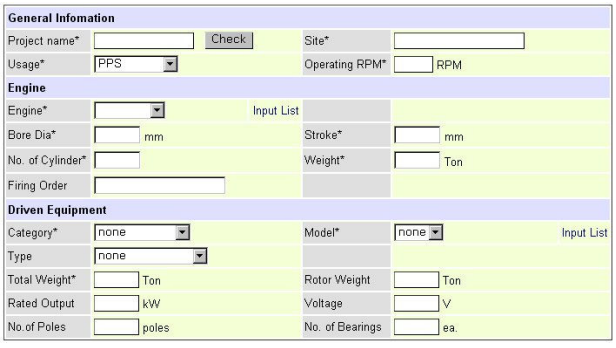


Fig. 9 엔진 및 발전기 주요 제원 입력 창

Fig. 10 에는 엔진과 발전기 외에 발전기세트 고유 진동 특성에 영향을 줄 수 있는 부품들의 제원 입력 창을 보였다.

Fig. 10 발전기세트 부품 제원 입력 창

엔진과 발전기, 그리고 각 부품들의 제원이 입력되면 Fig. 11 과 같이 각 계측 위치에서의 진동 응답(rpm sweep test), 충격 시험 결과 등이 입력된다. 입력된 계측 결과는 Fig. 12 에 보인 바와 같이 원하는 차수 성분들에 대해 그래프로 볼 수 있다.

Channel	Measure point	Direction	Physical unit	Data
1	Baseframe, Cam. Side, Free End	Z	mm/s, rms	
2	Baseframe, Exh. Side, Free End	Z	mm/s, rms	
3	Front Module,	Y	mm/s, rms	
4	Generator Frame, DE Top	Y	mm/s, rms	
5	Generator Frame, NDE Top	Y	mm/s, rms	
6	Engine Block, DE Top	Y	mm/s, rms	
7	Baseframe, Cam. Side, Gen. End	Z	mm/s, rms	
8	Baseframe, Exh. Side, Gen. End	Z	mm/s, rms	
9	Generator Frame, NDE Center	Y	mm/s, rms	
10	Generator Bearing,	X	mm/s, rms	
11	Generator Bearing,	Y	mm/s, rms	
12	Generator Bearing,	Z	mm/s, rms	

Fig. 11 진동 응답 계측 결과의 입력

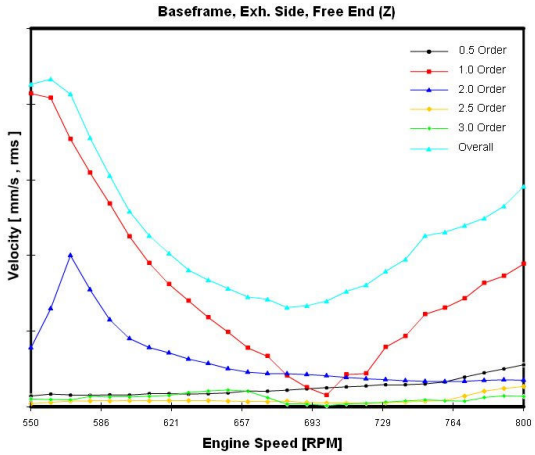


Fig. 12 진동 응답 계측 결과의 출력

이상과 같이 입력된 여러 발전기세트 계측 결과로부터 부품들의 사양 변경 및 수정에 대한 고유 진동 특성 변화를 분석하기 위해 Fig. 13 과 같이 엔진, 발전기, 마운트 등의 항목에 대한 검색이 가능하도록 하였다.

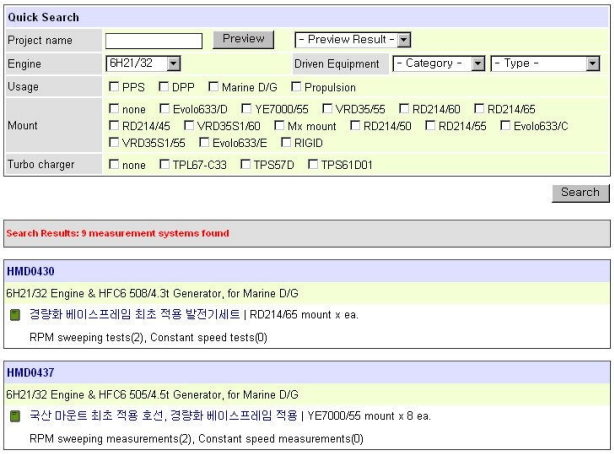


Fig. 13 진동 DB 검색 화면

4. 발전기세트 진동 특성의 예측

구축된 진동 DB 로부터 시스템의 변화에 대한 진동 변화 양상을 정성적 또는 정량적으로 분석하고 기존 발전기세트에서 시스템의 변화가 발생하거나 신규 발전기세트의 설계시 진동(정확히는 고유 진동수) 특성을 예측하고자 하였다.

신규 발전기세트의 설계는 고객이 원하는 출력이 정해지면 엔진 type 과 기통수 그리고 운전 속도, 그리고 발전기 모델이 결정된다. 이후 발전기세트를 지지할 베이스프레임이 설계되고 최종적으로 적절한 탄성 마운트의 종류 및 강성, 그리고 개수가 결정되게 된다. 이러한 설계 과정에서 미리 공진 회피 설계가 될 수 있도록 본 절에서는 구축된 DB 로부터 여러 부품들의 변화에 대한 고유 진동 특성을 분석하였다.

먼저 발전기 모델(중량)에 따른 동일 엔진 발전기세트의 수직 굽힘 모드 변화 양상을 파악하였다. Fig. 14 는 9H25/33 힘센 엔진이 적용된 발전기세트에서 발전기 무게 변화에 따른 수직 굽힘 모드(2 차 기진력과 공진 발생)의 변화를 진동 DB 로부터 얻은 것이다. 적용된 베이스프레임 사양에 따라 조금의 변화는 있지만 발전기 무게가 증가할수록 공진 위치는 거의 선형적으로 낮아짐을 알 수 있다. 결과적으로 이 그래프로부터 9H25/33 엔진이 적용된 발전기세트의 설계 단계에서 수직 굽힘 모드와의 공진을 피할 수 있는 발전기 모델을 결정할 수 있게 된다.

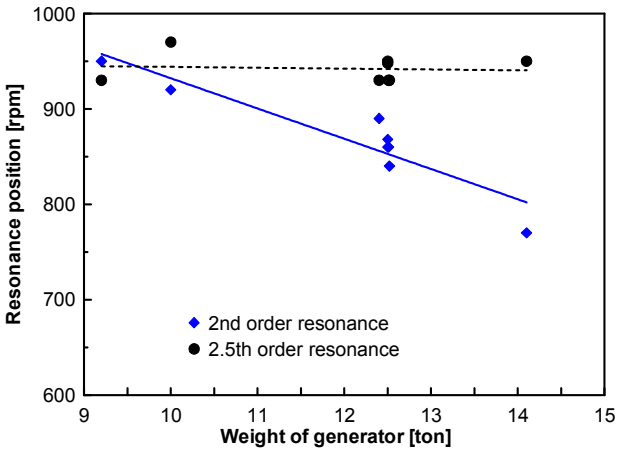


Fig. 14 발전기 무게 변화에 따른 진동 특성 변화 (9H25/33 엔진 적용)

플라이휠 커버 종류에 따라 역시 발전기세트 탄성 모드가 변화할 수 있는데 Fig. 15 에 보인 바와 같이 주물 구조로 된 상하부 플라이휠 커버가 엔진과 발전기 양측에 모두 볼트로 고정되어 있는 H21/32 힘센 엔진 발전기세트에서 Fig. 16 과 같이 상부 플라이휠 커버를 제거하거나 발전기 측에만 연결한 경우 등의 설치 조건 변화에 따른 탄성 모드 변화을 분석하였다.

Fig. 15 주물 구조로 된 상하부 flywheel cover

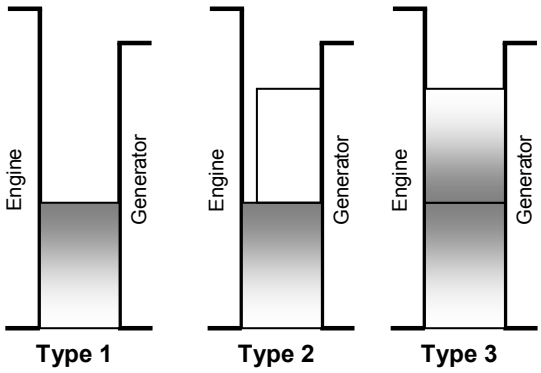


Fig. 16 상부 flywheel cover 의 변경

Fig. 17 에 9H21/32 힘센 엔진 적용 발전기세트에서 플라이휠 커버 구조 변경에 대한 수직 굽힘 모드와 비틀림 모드 변화를 나타내었다. 수직 굽힘 모드 경우는 최대 7 Hz 정도의 차이가 나며 3 차 기진력과의 공진시 최대 140 rpm 정도의 공진 위치 변화가 있다. 이 결과로 볼 때 발전기세트 플라이휠 커버는 큰 비용 없이 진동 제어에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

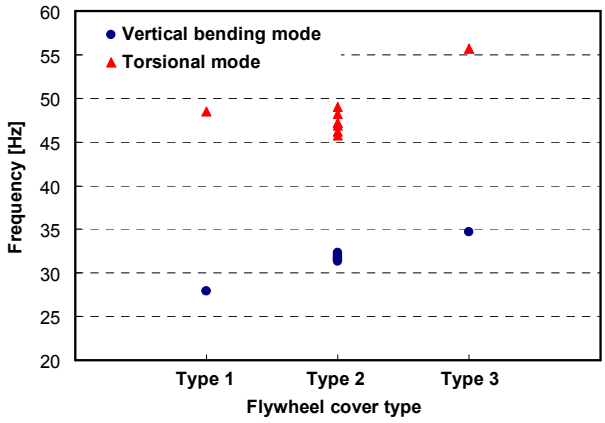


Fig. 17 F/W cover 변경에 따른 고유모드 변화 (9H21/32 엔진 적용)

마운트 강성에 따른 강체 모드의 변화도 동일한 방법으로 분석하였다. Fig 18 에는 동일한 5H21/32 힘센 엔진이 적용된 발전기세트에서 정적 강성이 각각 3.7, 4.4, 5.0 kN/mm 인 3 종류의 탄성 마운트 강성 변화에 따른 6 개의 강체 모드 위치를 나타내었다. 설치된 마운트 개수와 발전기 무게, 그리고 베이스프레임 모두 계측된 8 대에서 동일하다.

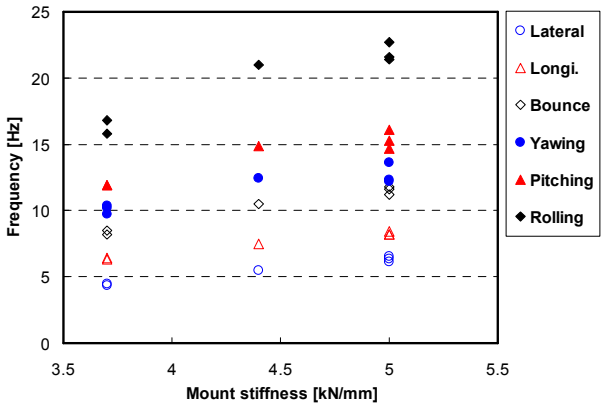


Fig. 18 마운트 강성 변화에 따른 강체 모드 변화 (5H21/32 엔진 적용)

Fig. 19 에는 9H21/32 힘센 엔진 적용 발전기

세트에 탄성 마운트 정적 강성이 각각 3.7, 5.0, 5.6 kN/mm 일 때 역시 강체 모드 변화를 정리한 것이다. 계측 대상 발전기세트들에서 마운트 개수와 베이스프레임은 완전히 동일하나 발전기 무게는 조금의 차이가 있다.

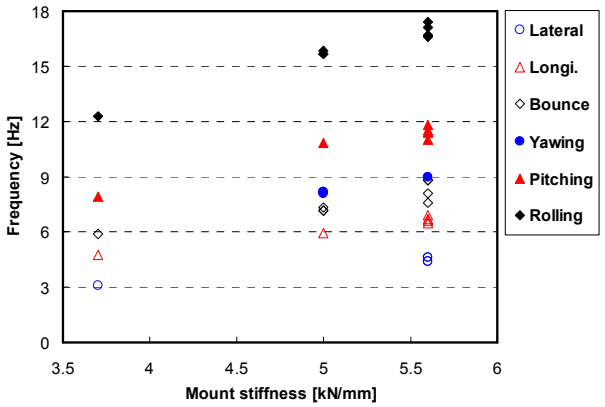


Fig. 19 마운트 강성 변화에 따른 강체 모드 변화 (9H21/32 엔진 적용)

위 두 결과에서 마운트 강성에 따라 강체 모드가 거의 선형적으로 변하고 있음을 알 수 있으며 동일한 엔진 적용 발전기세트의 탄성 마운트 모델 결정시 유용하게 사용할 수 있음을 의미한다.

5. 방진 설계 적용 예

신규로 설계되는 발전기세트의 구성에 있어서 진동 DB 로부터 얻은 자료를 이용한 설계 예를 설명하였고 적용 결과를 보였다.

(1) 탄성 모드의 제어

대상 발전기세트는 9H25/33 엔진이 적용되고 정격 운전 속도와 출력이 각각 900 rpm, 2700 kW 이다. 초기에 선정된 발전기 무게는 11 ton 이었고 이에 대한 발전기세트 공진 가능성을 검토하였다. 4 절의 Fig. 14 를 사용하여 현재 설계된 발전기의 적절성을 파악한 결과, 900 rpm 에서 2 차 기진력과 수직 굽힘 모드와의 공진 발생 가능성이 클 것으로 예상되었다.

공진 회피를 위해 베이스프레임의 설계 변경 또는 발전기 모델 교체를 검토하였고 공진 회피 효과를 보기 위해서는 상당한 부재 변경이 필요한 베이스프레임 보다 발전기의 모델을 변경하는 것으로 결정하였다. 그 결과 11.8 ton 의 발전기로 설계 변경하였고 Fig. 20 에서와 같이 수직 굽힘 모드와의 공진을 회피할 수 있었다. 물론 이 때 중량 증가로 인한 강체 모드도 함께 고려되었다.

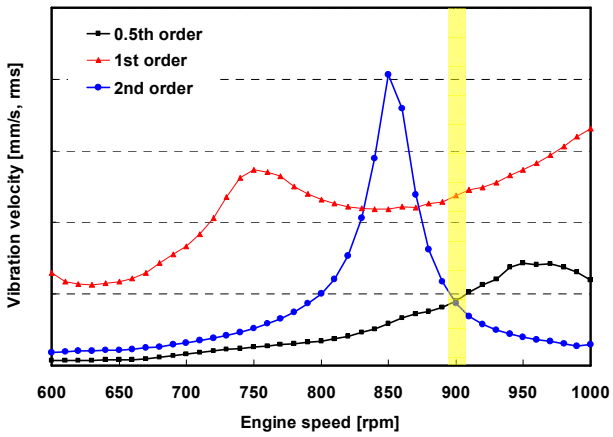


Fig. 20 공진 회피 설계의 적용 효과 (탄성 모드)

(2) 강체 모드의 제어

Fig. 21 에서 보듯이 정적 강성이 5.6 kN/mm 인 마운트가 적용된 기존 발전기세트에서 1 차 기진력과 rolling mode 의 공진이 980 rpm 위치에 존재하였다. 그러나 고객의 요구에 따라 발전기 내부가 수정되어 발전기 무게가 약 0.5 ton 증가하였고 이에 따라 980 rpm 에 있던 공진 위치가 정격 운전 속도인 900 rpm 에 근접할 것으로 예상되었다.

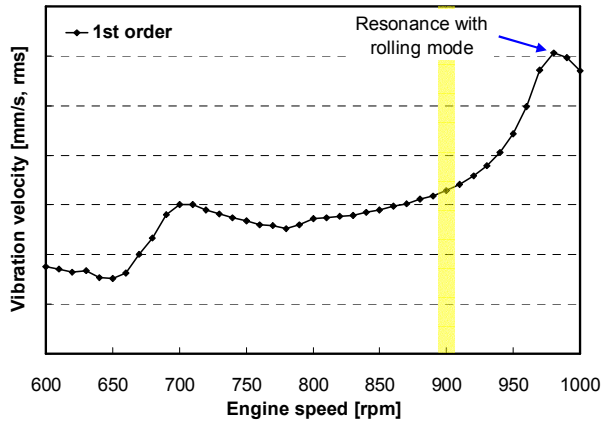


Fig. 21 공진 회피 설계의 적용 효과 (강체 모드)

Fig. 19 의 결과에서 마운트 강성을 낮추는 방안과 높이는 방안이 고려될 수 있는데 강성을 낮추는 것은 늘어난 중량에 대한 정적 처짐의 부담이 있으므로 강성을 높이는 것으로 결정하였고 강성이 7.4 kN/mm 인 마운트를 적용한 결과 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

다년간에 걸쳐 축적된 힘센 엔진 발전기세트의 진동 계측 결과를 DB 화 하여 부품의 제원 변화에 대한 고유 진동 특성 변화를 정량적, 정성적으로 분석하고 데이터화 하였다. 고객의 다양한 요구 조건에 부합하는 발전기세트의 설계시 이 데이터를 이용하여 초기 시스템 구성 과정에서 공진 회피 설계를 비교적 짧은 시간에 수행할 수 있으며 시스템 구성 후에 발생할 수 있는 진동 문제의 해결에 투입되던 많은 시간과 추가 비용을 줄일 수 있었다.

진동 계측 자료의 확보 및 DB 화는 계속 될 것이며 이러한 자료가 많이 축적될수록 진동 예측 정확도는 향상될 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) 이수목, 김관영, 김원현, 2002, “디젤 발전기세트 구조진동특성 연구”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.948~954.

(2) 이군희, 배종국, 이수목, 2005, “탄성 마운트 장착 디젤 발전기세트의 진동 특성과 예방에 관한 연구”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.921~924.

(3) S.M.Lee, W.H.Kim, H.S.Kim and J.G.Bae, 2007, “Anti-Vibration Design System for HiMSEN Engines”, 27th CIMAC World Congress (submitted)

(4) K.H.Lee, S.M.Lee and J.G.Bae, 2005, “Vibration Reduction of Diesel Generator Set by Structural Modification”, 12th ICSV.