

탄성지지된 엔진, 고정지지된 발전기 및 탄성 커플링으로 구성된 발전기 세트의 엔진 본체 진동 특성에 관한 사례 연구

A Case Study on the Engine Body Vibration Characteristics of Generator Set consists of Engine-resilient-mounted, Generator-rigid-mounted and Flexible-coupling

김효정* · 김상환** · 이돈출†

Hyojung Kim, Sanghwan Kim and Donchool Lee

Key Words : Engine body vibration(엔진 본체 진동), Engine-resiliently-mounted(탄성 지지된 엔진), Generator-rigid-mounted(고정 지지된 발전기), Flexible-coupling(탄성 커플링).

ABSTRACT

Recently the demand for natural gas as clean and safe energy due to concerns about global warming and interests in green ship is increasing. The dual fuel(DF) engine, one of environmentally friendly engines, is preferred for general merchant ships and power plants as well as LNG carriers. This is for the reasons of having higher efficiency and lower nitrogen and sulfur oxides emissions by operating on LNG fuel with a small amount of light fuel oil.

In this study, the engine body vibration characteristics of 12V50DF in a generator set with engine-resilient-mounted, generator-rigid-mounted and flexible-coupling configuration are investigated through theoretical analysis and comprehensive vibration measurement. This analysis showed the dynamic behavior of engine excitation forces and seismic waves. And the suitable countermeasures for reducing vibration and safe operation are proposed.

최근 지구온난화와 함께 대기환경에 대한 관심이 높아지면서 가스연료의 수요가 증가하고 있다. 이중 LNG가스를 연료로 하는 이원연료(Dual fuel) 엔진은 미량의 디젤연료를 분사하여 점화를 시킴으로써 열효율을 47%까지 올릴 수 있고 질소산화물과 황산화물이 거의 없어 환경 친화적이다. 이러한 요구에 적합한 50DF엔진은 육상발전플랜트 뿐만 아니라 해상에서 LNG운반선을 비롯하여 일반 상선에까지 그 수요가 점차 증가하고 있다. 본 논문에서 진동을 줄이고 선박 운항의 안전성을 확보하기 위하여 엔진은 탄성지지, 발전기는 고정지지 그리고 엔진과 발전기사이는 탄성커플링으로 연결된 발전기 세트에서 12V50DF엔진을 연구 모델로 하여 엔진본체 진동에 대한 이론 해석 및 발전기 세트의 종합적인 진동 계측을 통해서 엔진 진동의 특성을 검토하여 방진대책을 제시하고자 한다.

기 호 설 명

- x : 축방향 좌표
- y : 좌우방향 좌표
- z : 상하방향 좌표
- α : x 축을 중심으로 회전좌표
- β : y 축을 중심으로 회전좌표
- γ : z 축을 중심으로 회전좌표

1. 서 론

† 이돈출: 정회원, 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : ldevib@mmu.ac.kr

Tel : 061-240-7219, Fax : 061-240-7201

* 바르질라-현대엔진

** 마이텍

2. 탄성지지의 동특성 및 이론 해석

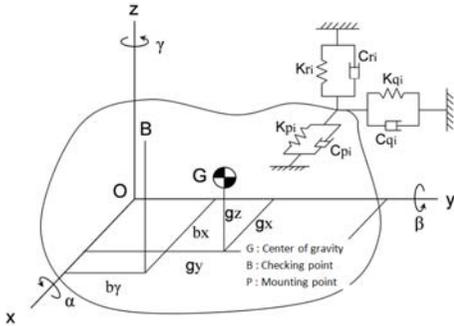


Fig. 1 Coordinate of resilient mount

Fig. 1에 보인바와 같이 엔진 전체를 1개의 강성체로 가정하고 축 방향을 x , 좌우 방향을 y 그리고 상하방향을 z 로 놓고 x, y, z 축을 중심으로 회전 좌표를 각각 α, β, γ 라 하고 진동 해석을 수행하였으며⁽¹⁾ 이론적인 계산식은 생략하였다. 또한 진동을 일으키는 내부 기진력으로 실린더가 폭발할 때 발생하는 가스압력을 조화 분석하여 α 회전방향으로 고려할 수 있도록 하였고 엔진에서 발생하는 1, 2차 불평형 우력 및 발전기에서 발생하는 불평형력 및 우력도 적용 할 수 있다. 또한 육상에서 지진이나 충격 등의 외부력도 시간을 중심으로 과도진동 해석을 위해 고려할 수 있다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

3. 사례 연구

사례연구 모델인 12V50DF엔진의 전체적인 모습은 Fig.2에, 주요 요목은 Table 1과 같다. 이 엔진은 실린더 직경이 500mm로 대구경이고 최대회전수가 514r.p.m.으로 출력 대비 중량이 매우 크다. 따라서 발전기와 공유하는 공동지지대(Common bed)의 설계 및 설치는 현실적으로 어렵다. 따라서 탄성지지 배치는 중·소형 일반 디젤엔진과는 달리 엔진만 설치하고 발전기 및 외부 연결부는 탄성지지로 할 수가 없다. 우선 탄성지지도 대 중량을 지지해야하므로 일반 소형에서 검토되는 고무요소에 설치 각을 주어 세 방향의 강성을 유지하기가 어렵고 한 방향만 지지할 수 있는 탄성지지를 설계, 배치해야만 한다. Fig. 3은 탄성지지의 배치를 보이며 엔진의 자중을 지지하기 위해 상하방향으로 총 54개, 좌우방

향은 총 8개, 전후방향은 총 12개의 탄성지지를 설치하였다. 그리고 크랭크축과 발전기 회전축은 유연한 탄성지지로 연결하였다. 이를 기준으로 진동에 대한 고유진동수를 계산하면 Table 2와 같다. 여기서 상하진동의 고유진동수는 발전기의 동기회전수인 514r.p.m.보다 높게 설계하였다. 강제진동 해석을 위해 엔진을 하나의 강체로 가정하면 V형 12실린더 엔진의 기진력은 완벽하게 영이 된다. 따라서 주파수 영역에서 해석을 위하여 한 실린더가 착화실패가 일어난다고 가정하고 이론적으로 계산한 결과를 Fig. 4, 5에 보인다. Fig. 4는 진동을 체크했던 엔진 후미상부중앙의 변위 진폭을 보이며, Fig. 5는 상하방향으로 설치된 코너 부위의 54번째(Fig. 3 참조) 탄성지지에서 동적변위에 의한 외부(선체)에 전달되는 동적인 힘을 계산한 결과다. 또한 육상 플랜트 설치를 위하여 1940년 El Centro에서 관측된 지진파를 좌우 방향의 외부 가진원으로 하여 시간영역에서 해석한 결과를 Fig. 6에 보인다. 여기서 탄성지지의 변위는 제작사에서 허용하는 값 내에 모두 있다. 이론적인 해석에 대한 검증을 위하여 사례 연구 발전기 세트의 진동을 Fig. 7과 같이 진동 계측 장비를 배치하여 종합적인 계측을 수행 하였으며 엔진 후미상부에서 좌우, 상하방향의 진동 계측결과를 각각 Fig. 8~11에 보인다. 이론상 한 실린더가 착화실패 또는 실린더 간의 부하가 고르지 못하더라도 기진력이 크지 않아 진폭이 작지만 계측한 결과는 예상 밖에 크다. 이는 아마도 엔진자체를 하나의 강체로 볼 수 없으며 실린더 폭발력에 의해서 일어난 것으로 추정된다. Fig. 11은 상하방향의 진동을 차수 분석한 결과로 여기서 1차 진동은 동기 회전수에서 부하변동에 따라 진동의 변화가 없는 것을 고려할 때 회전체의 기계적인 운동에 의해서 일어난 것으로 판단된다. 그 외 차수는 부하가 증가하면 진동 역시 증가하며 이는 발전기와 엔진이 서로 분리된 계로 비틀림 진동에 의한 가진력으로 판단된다. Fig. 12는 엔진후미의 진동에 의해서 발전기로 전달될 수 있는 기진력을 도식화한 것으로 발전기 전단(Driving end)에서 1차 진동은 2차의 전후방향 구조진동으로 전환되고, 발전기 후단(Non driving end)에서는 상하좌우방향 구조진동으로 전환 될 수 있다. 이는 실제 발전기의 진동 계측 결과에 의해서 확인하였다.

Table 1 Specification of the generator set

Flexible coupling	Type	Vulkan G5620
	M.O.I(total)	979 kg-m ²
	Diameter×Width	1,710 × 1,064 mm
	Torsional stiffness	1,400 kN-m/s
	Weight	3,130 kg
Engine	Type	12V50DF(V Type)
	Cyl.bore×stroke	500×580 mm
	Power at MCR	11,400 kW×514 r.p.m.
	Reciprocating mass	535.7 kg/cyl.
	Firing order	1-5-3-6-2-4 with A, B bank firing interval 45°
	Conn. ratio(r/l)	0.364
	Crankshaft diameter	450 mm
	No. of cylinder	12 ea
Generator	Weight(dry)	188 ton
	Type	B225X14
	No. of poles	14 ea
	Idling speed	480 r.p.m.
	Dia of rotor/shaft	1,812/315 mm
	Weight of rotor	25.33 ton
Length of spider	1,350 mm	
M.O.I for rotor	9101 kg-m ²	

Table 2 Natural frequencies of the system

Vibration direction	Natural Frequency	Excitation	Remarks
Longitudinal	307.9		
Transversal	223.9		
Vertical	613.8		
Rolling	680.1	Torsional	
Pitching	583.0		
Yawing	370.9		



Fig. 2 Overview for 12V50DF engine

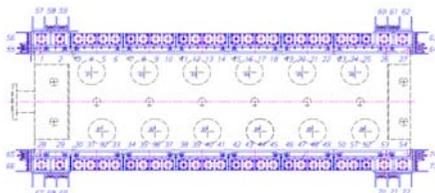


Fig. 3 Resilient mounts arrangement for case study engine

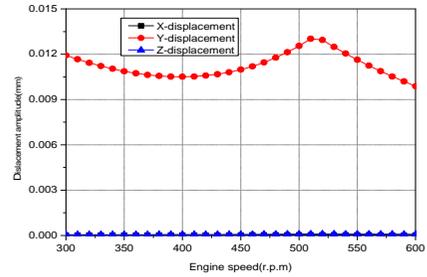


Fig. 4 Displacement amplitude of vibration check point in one cylinder misfiring condition

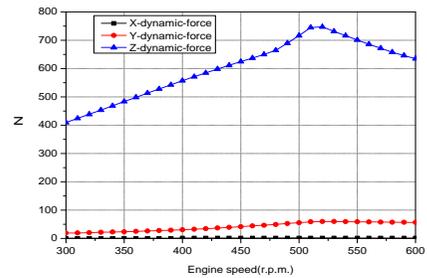


Fig. 5 Dynamic force of resilient mount No. 54 in one cylinder misfiring condition

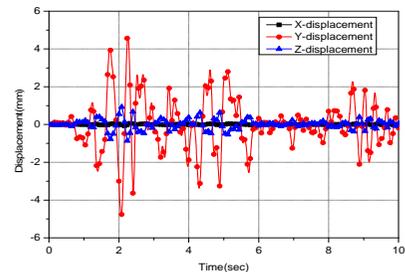


Fig. 6 Displacement of resilient mounts No. 54 by N-S direction of El centro earthquake

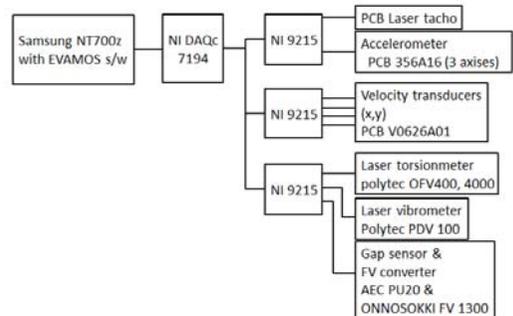


Fig. 7 Equipment arrangement for vibration measurement

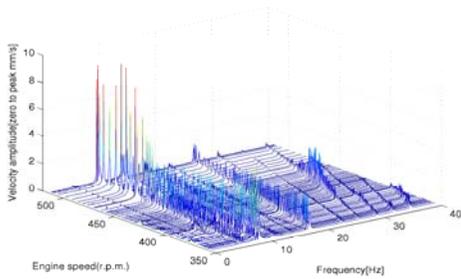


Fig. 8 Measured transversal vibration level at aft-top center of case study engine

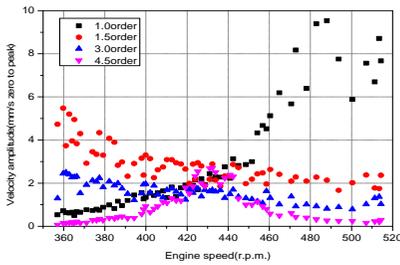


Fig. 9 Order analysis of transversal vibration at aft-top center of case study engine

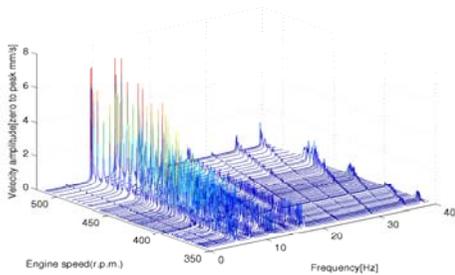


Fig. 10 Measured vertical vibration level at aft-top center of case study engine

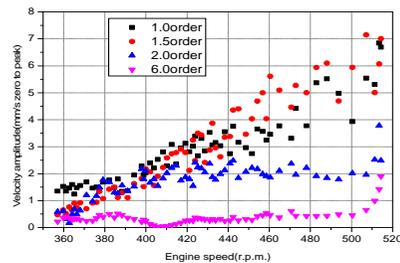


Fig. 11 Order analysis of vertical vibration at aft-top center of case study engine

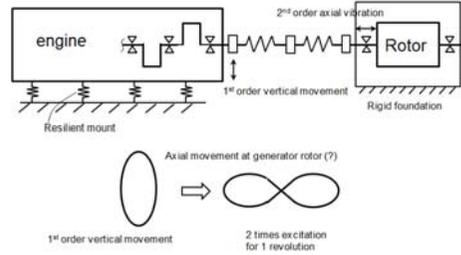


Fig. 12 Generator vibration mechanism generated by engine vibration

4. 결 론

본 연구에서는 엔진은 탄성지지, 발전기는 고정지지 그리고 엔진과 발전기 사이는 탄성커플링으로 연결된 발전기세트에서 12V50DF엔진을 사례 모델로 하여 엔진본체진동에 대한 이론적 해석과 종합적인 진동 계측을 통해서 진동의 특성을 검토하였으며 이를 정리 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 탄성지지로 엔진의 배치 및 설계를 위한 1-질량-6-자유도의 강제진동해석을 위하여 이론적 해석을 수행하였고, 12V50DF 엔진을 모델로 하여 설계 절차를 시스템화 하였다. 특히 육상에 적용되는 발전기 설계를 위하여 지진파를 이용하여 엔진의 동적거동을 해석하였다.

(2) 탄성지지로 지지된 엔진은 강체로 가정하여 이론상 1-질량-6-자유도로 해석할 수 있다. 그리고 사례 연구 엔진은 이론상 기진력이 영으로 진동이 일어나지 않지만, 실제로 고압의 실린더 폭발력에 의한 1차 기진력과 상하진동의 고유진동수가 발전기를 운전하는 동기회전수에 인접하여 엔진회전수와 같은 주파수인 1차 진동이 주 진동으로 존재하였다.

(3) 탄성커플링은 탄성지지된 엔진에서 발생하는 진동과 충격 등을 고정된 발전기 축에 전달하는 것을 차단할 목적으로 설치되어 비틀림 진동과 함께 고차의 진동은 차단할 수 있다. 그러나 회전축에서 발생하는 1, 2차의 기계적인 진동은 발전기로 일부 전달됨을 확인하였다. 따라서 발전기의 횡진동을 검토하여 이러한 회전수와 관련된 기계적 진동 차수인 1, 2차 진동의 공진을 피하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- (1) Allan G. Piersol and Thomas L. Paez, Harris' Shock and Vibration Handbook(6th Edition), 2010, McGrawHill Co., Ltd.
- (2) Korean Register, 2014, Control of Ship Vibration and noise(3rd Edition), Textbooks Co., Ltd.
- (3) Nippon Kaiji Kyokai, 1984, Guide to ship vibration, Nippon Kaiji Kyokai, Tokyo.
- (4) Vertec, 1985, Vibration Control in Ships, Vertec, Norway.