

10MW급 대형 디젤엔진 본체의 구조진동시험 및 해석

Field Test and FEM Analytical Approach on Body Vibration for 10MW Large Low-Speed Diesel Engine Operated on Land

김연환 · 배용채** · 이현** · 이영신***

Yeon-Whan Kim, Yong-Chae Bae, Hyun Lee, Young Shin Lee

Key Words : Low-speed Diesel Engine, Structural vibration, Operational deflection sharp, Pressure pulsation, Resonance

ABSTRACT

Low-speed Diesel Engine 7K60MC-S, in Power Plant have been experienced high vibration frequently since these units were completed the construction works, but they did not have any fundamental vibration solutions up to date. Therefore, several vibration tests and analyses are conducted to identify the root cause of high vibration and to suggest the optimal countermeasures for diesel engine. The 9.25Hz & 25.4Hz vibrations have been observed on main body during operation. The magnitude of engine upper structural vibration is generally similar in horizontal transverse direction. However, differences in the 'Fore' and 'After' vibration magnitude at 9.25Hz occurs due to the inertia momentum added by SCR duct system with the same vibration phase angle. It is analyzed that the excess structural vibration be occurred when the natural frequency of engine body is accessed the exciting sources due to the explosion pressure and the discharge pulsation of 7 cylinders in resonance range.

1. 서론

1898년 MAN B&W사의 전신인 Burmeister & Wain사에서 제작한 디젤엔진의 실험적인 성공과 함께 지난 1세기 동안 발전을 거듭하고 있다. 디젤엔진은 열효율과 성능이 우수하여 국내의 도서지역에서 주 동력원으로 채용하고 있다. 디젤엔진을 사용한 발전은 도서 지역에 매우 유리하며 열효율, 내구성 및 신뢰성이 높다. 이러한 장점과는 달리 디젤엔진은 고유의 큰 기진력인 실린더 내 연소 폭발력에 의하여 높은 진동이 본체에 유기된다. 대형 디젤엔진 본체의 진동은 횡방향 진동형태로써 H형 모드 및 X형 모드가 있고 본체의 길이방향 진동으로써 L형 모드로 분류하고 있다. 선박 엔진에서는 구조 진동이 심할 경우 엔진 프레임과 선체 사이에 탑 브레이싱(top bracing)을 설치하여 손쉽게 진동을 제어할 수 있지만 육상용 발전시스템은 그 구조상 엔진 주변에 탑 브레이싱이 적합하지 않아 설계 초기부터 지반을 포함한 기

초, 엔진본체, 질소 산화물 처리 시스템(SCR), 과급기(turbocharger) 및 덕트로 구성되는 전체시스템 상호간의 연성에 의하여 발생하는 진동 특성이 매우 중요하다. Fig 1은 육상에 MAN B&W사의 7K60MC-S(13,931 bhp × 138.5 rpm) 디젤엔진을 전력생산용으로 설치한 모습이다.

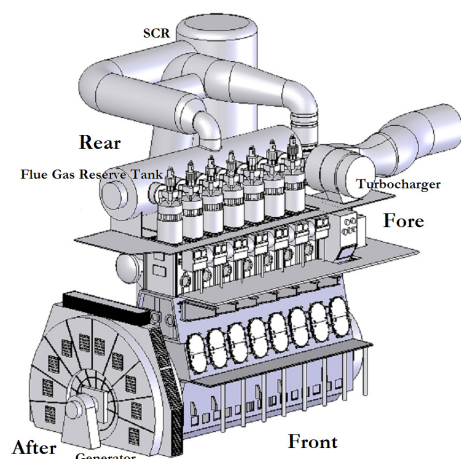


Fig 1. Low-speed Diesel power plant in 10MW class

본 논문은 국내 설치된 10MW급 발전용 대형 저속 2 행

† 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : ywkim@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-5426, Fax : (042) 865-5444

* 전력연구원 수화력발전연구소

** 충남대학교 기계설계공학과

정 디젤 엔진 엔진(Fig 1)에서 나타난 구조 진동 현상을 운전 중 변형시험과 고유진동수시험을 통하여 규명하고 기초를 비롯한 엔진 본체, 배가스 저장조(Flue gas reserve tank), 덕트 및 질소 산화물 처리시스템 등을 고려한 구조 모델링을 통하여 주 거동 모드를 규명하고 엔진 본체에서 유발되는 기진력을 시험 및 해석을 통하여 규명하고 질량을 추가하는 시험을 통하여 진동저감방안을 검토하였다.

2. 시스템 현황

7K60MC-S디젤 엔진 발전기의 제원은 Table 1과 같다. 7K60MC-S는 7실린더형 2사이클 직렬형 기관이다. Fig 1과 같이 배가스에 포함된 질소산화물 처리 시스템을 엔진 뒤쪽에 설치하고 디젤발전기 2대를 1조를 병렬로 계통부하에 전력을 공급한다. 엔진 앞쪽에는 회전체의 관성모멘트에 의하여 여기 되는 기진력 대책으로 비틀림 진동 댐퍼가 설치되어 있다.



Fig 2. View of flue gas reserve support cracked

Table 1 Specification of the 7K60MC-S generator set

Item		Specification
Engine	Type	7K600MC-S
	Cyl.bore×stroke	600×1,650 mm
	Power at MCR	10,450 kW×138.5 rpm
	Recip./rot. mass	5,425/3,733 kg/cyl.
	Firing order	1-7-2-5-4-3-6
	Conn. ratio(r/l)	0.364
	Crankshaft diameter	670 mm
	No. of cylinder	7 ea
Generator	Weight(dry)	388 ton
	Maker	Medensa
	No. of poles	52 ea
	Idling speed	70 rpm
	Dia of rotor/shaft	73,000/720 mm
	Weight of rotor	34.7 ton
	Thickness of rim	150 mm
	M.O.I for rotor	235.5 ton · m ²

엔진 본체는 고압의 폭발 변동력이 회전에너지로 변환되는 과정에서 크랭크축의 불평형 모멘트 및 회전축의 비틀림 모멘트에 의한 외력이 지지 베어링 및 실린더 프레임을 통하여 전달된다. 대상 7 실린더 엔진 본체의 주 비틀림모멘트인 7차 오더 및 그 정수배 차수에 의한 H형 진동보다는 X형 모드에 가까운 4차 오더 진동응답에서 진폭이 크게 나타났으며 엔진 상부 후면(Rear)에 위치한 배가스 저장조는 이와 별개로 L형으로 거동하였다. 특히 저장조 지지부에서 진동진폭이 진동 권고치를 초과하면서 피로 크랙이 진전되었다.

3. 엔진본체의 진동과 폭발 기진력

3.1 정상운전중의 본체 진동 분석

Fig 3은 90%부하에서 엔진 전수 전면부와 배가스 저장조 중앙 지지부의 횡진동 스펙트럼을 비교한 것이다. 전면부의 주 진동은 4차의 9.25Hz와 7차의 16.1Hz이나 후면부에서는 11차의 25.4Hz를 중심으로 10차와 12차 진동이 크게 나타난다. 특히, 전면부 진동스펙트럼에서는 9.25Hz에서 최대 피크가 나타났으며 주변에 10~11Hz에서 구조진동특성이 분석된다. 25.4Hz는 저장조 지지부의 종방향 진동으로써 총 진동이 권고레벨을 초과하는 37.5mm/s, o-p (= 26.3 mm, rms) 이었다.

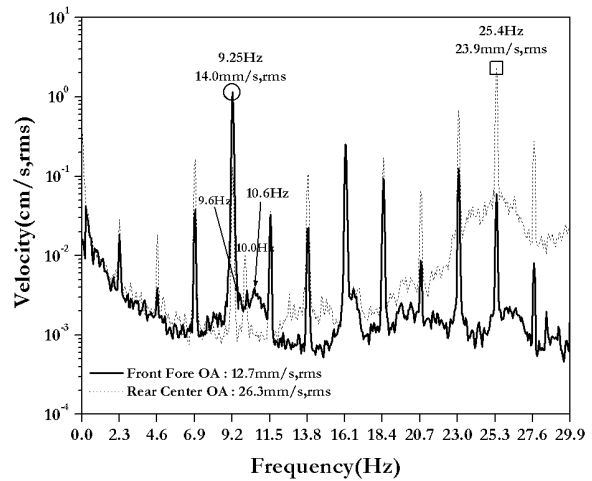


Fig 3. Transverse vibration of engine body at 90% Load

3.2 운전 중 진동형상 변형 모드분석

Fig 4는 진동변형이 큰 엔진본체 상부에 대하여 운전 중 진동형상 변형시험(Operating Deflection Shapes)을 수행한 결과이다. 기준 센서를 엔진상부 과급기 측에 설치하고 전체 측정방향을 36개 지점 대하여 진동을 시험하고 ME' scope VES를 사용하여 9.25Hz와 25.4Hz의 진동변형을 분석하였다.

Fig 4(a)는 9.25Hz는 본체에서 과급기가 위치한 본체 변

위가 크고 발전기 쪽의 본체 변위가 작은 횡방향 진동모드
로써 H형 또는 X형과 다른 형태의 거동을 나타내었다.
25.4Hz는 본체 진동모드와 별개로 뒷측(Rear)의 배가스 저
장조가 종방향 진동모드를 나타내는 형태로서 Fig2의 저장
조 지지부의 피로 손상 모습은 25.4Hz의 영향으로 분석할
수 있다.

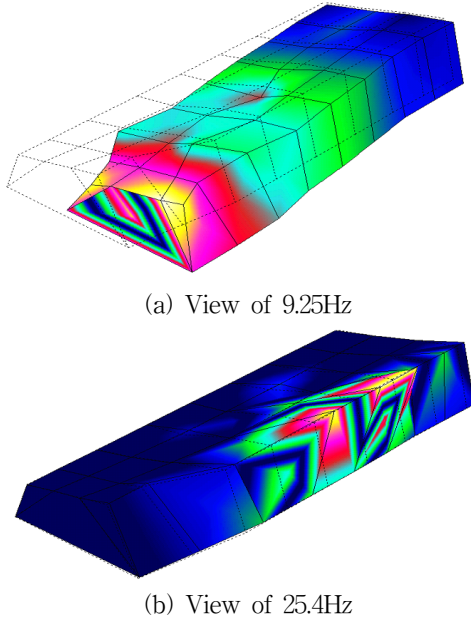


Fig 4. Operating deflection shapes of engine top part

3.2 정지중 고유진동수 시험

“Dytron”의 임팩트해머 Model 5803A를 사용하여 본체를
가진하고 가속도센서를 본체의 고유진동수를 시험하였다.
Fig 5는 4대의 발전기중 2개 호기가 발전하는 조건이어서
신호에 운전해 해당하는 특성이 나타나나 옆호기가 정지되
어 있는 조건이었다. 주 고유진동수가 10.0 ~ 10.6 Hz사이
에 1차가 위치하고 2차가 25.0 ~ 26.0 Hz 사이에 위치하는
것으로 분석할 수 있다.

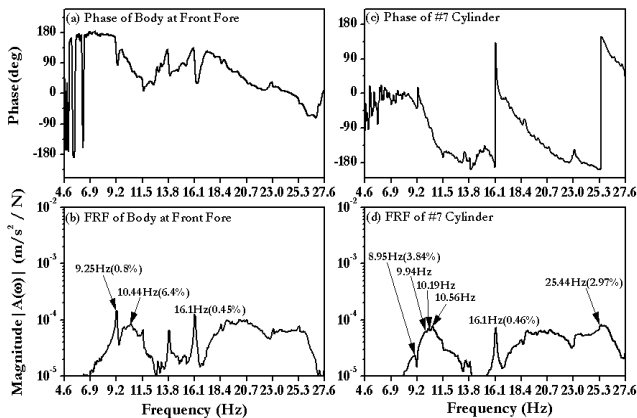


Fig 5. Natural frequency response of engine body

3.3 기진력 검토

엔진 본체 진동의 주 기진력은 실린더의 폭발력으로 인하
여 발생하는 우력은 X형 모멘트 및 H형 모멘트가 알려져
있다. Fig 6은 육상에 채용한 7K60MC-S 디젤엔진의 7개
실린더의 맥동압센서를 사용하여 90%부하조건에서 계측한
각 실린더의 폭발 압력이다. 각 실린더는 부등 간격으로 착
화하는 형태이다.

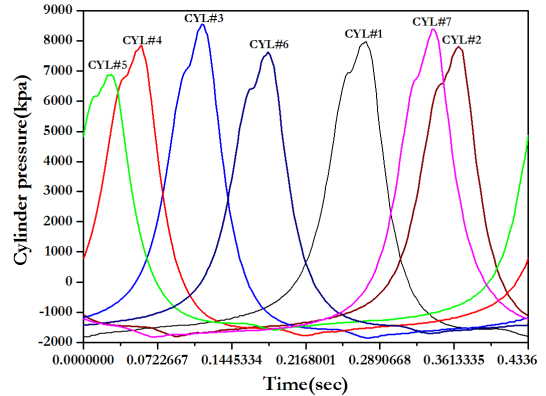


Fig 6. Explosion pressure of cylinders

엔진 몸체에 작용하는 우력은 피스톤이 실린더 벽면을 미
는 힘과 반작용인 크랭크 샤프트가 베어링을 미는 힘에 의
하여 구조진동이 발생한다. Fig 7은 각 실린더의 벽면에서
발생하는 실측한 Fig 6을 사용하여 구한 각각의 측면 힘이
다

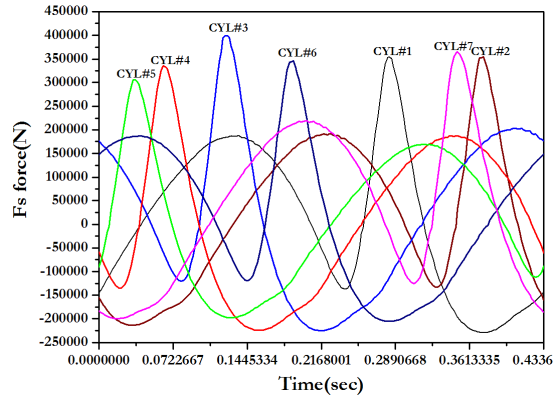


Fig 7. Guide forces of cylinders

i 번째 실린더에서 k 차 H형 모멘트는 식(1)과 같이 표
현된다.

$$M_{Hk} = l_c F_k \sin \{ k(\theta + \alpha_i) + \beta_k \} \text{-----(1)}$$

여기서, θ 크랭크각도, α_i : 착화 지연각, F_k : k 차의 측면
힘, l_c : 모멘트 암의 길이, k : 조화차수, 및 β_k : 각 조화차
수의 위상을 각각 나타낸다.

엔진 본체가 강제인 경우 식(1)에 의한 우력은 H형 진동

만을 발생시키나 엔진은 유연구조물이므로 실린더 사이에서 발생하는 우력에 의한 진동 모드를 X형 진동으로 정의하고 있으며 그 기진력을 X형 모멘트로 정의하고 i 번째 실린더에서 k 차 모멘트는 식(2)과 같이 표현된다.

$$M_{Xk} = F_k L_i \sin\{k(\theta + \alpha_i) + \beta_k\} \text{-----}(2)$$

여기서 L_i : 엔진 중심으로부터 해당 실린더 중심까지의 거리이다. Fig 8은 모멘트 암의 길이는 변동 길이를 적용하여 각 실린더 측면 힘에 대한 변동 모멘트를 구한 결과이다.

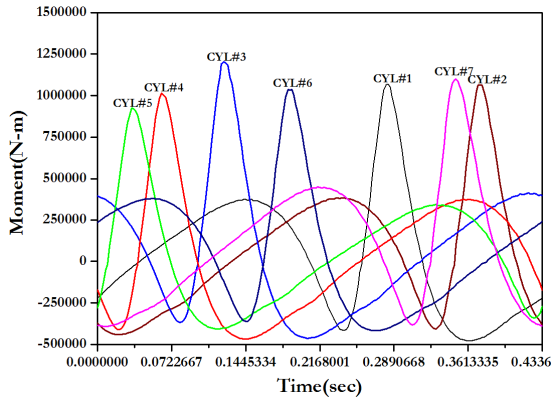


Fig 8. Guide force moments of cylinders

3.4 기진원으로써의 배가스 맥동압 분석

Fig 9는 엔진의 기동정지 시험에서 실린더의 배가스가 모이는 저장조에 대하여 시험한 7차 order의 압력맥동을 3차원 맵으로 나타낸 것이다. 맥동압은 84rpm 이후에서 진폭이 큰 것을 볼 수 있으며 최대 피크는 7차 order의 85~91rpm으로써 9.8~10.6Hz 범주에서 증폭도가 큰 것을 보여준다. 이 결과는 Fig 6의 7개 실린더 폭발압의 조합에 의한 결과의 기진특성에서 엔진 본체의 1차 고유진동수에 접근하는 기진원으로써 의미를 가질 수 있다.

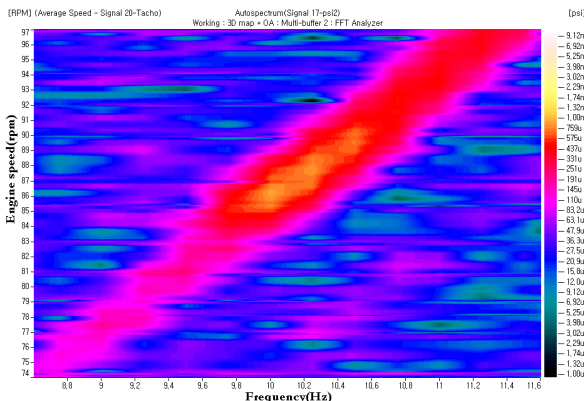


Fig 9. The 7th order pressure pulsation in flue gas reserve tank

4. 기진력에 대한 본체 진동응답 검토

4.1 유한요소 해석모델

디젤엔진의 모드규명 및 기진력 해석을 수행하기 위하여 유한요소모델링 및 진동해석은 ANSYS 코드를 사용하였다. 다양한 형상학적 특성(real property)과 단면 두께의 복잡한 형상의 엔진본체는 주로 셸(shell)요소로 고려하였고 엔진 기초인 콘크리트 구조물은 solid요소를, 크랭크샤프트 및 길이 방향이 긴 볼트 및 덕트 등은 빔(beam)요소를 적용하였다. 사용된 전체 노드 수는 61,624개, 요소 수는 60,619개였다. 디젤엔진은 베드플레이트(bed plate) 하단과 콘크리트 기초(foundation) 구조물을 체결하는 긴 볼트위치에서 절점을 서로 공유하도록 고려하였다. 콘크리트 하부는 고정(fixed) 조건으로 적용하였다.

4.2 고유진동 모드 규명

7K60MC-S 디젤 엔진의 유한요소모델링에 대한 고유진동 모드 해석은 non-reduced method의 하나인 Block-Lanchos method를 사용하였다.

Fig 10은 엔진 본체의 1차 고유진동 모드로써 Fig 4(a)의 운전 중 9.25Hz의 변형모드 결과와 유사한 거동을 나타내며 엔진회전수의 4차와 본체의 고유진동모드가 접근함으로써 9.25Hz의 진동이 커져 본체의 주 진동 성분으로 나타난 것으로 분석되었다. 따라서 9.25 Hz의 거동은 H형 모드도 X형 모드도 아닌 10.187Hz의 본체 고유진동 모드의 진동으로 볼 수 있다. 즉 9.25Hz의 기진모멘트는 실린더들 간의 우력에 의한 진동이므로 엔진의 착화가 비등간격 조건에서 발생한 H형 모멘트에 의한 진동의 한 형태로 볼 수 있다. 단 형태상으로 X형과 유사한 진동이어서 기존의 형태로 구분기 어려운 진동모드로 분석된다.

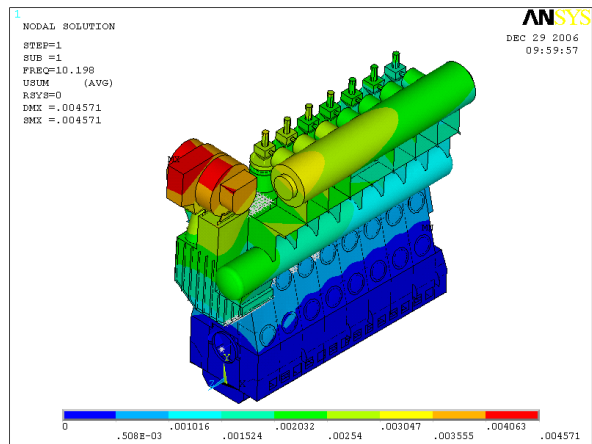


Fig 10. Natural vibration mode shape of 10.198Hz

Fig 11은 Fig4의 모드가 엔진본체의 고유진동수라기 보다는 배가스 저장조의 국부 진동모드로 보인다. 해석결과 실제 값인 25.4Hz와 유사한 거동은 24.34Hz와 26.545Hz의 결과를 얻었다.

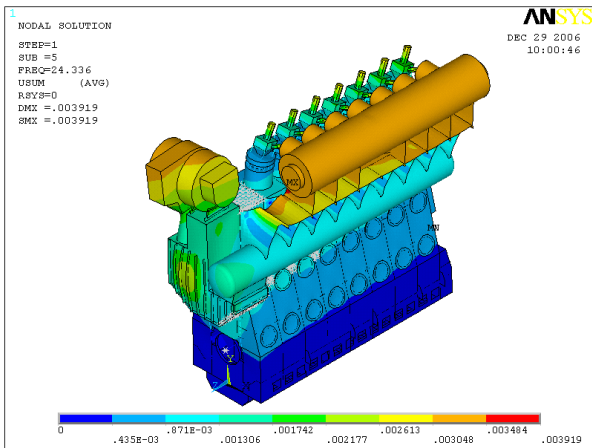


Fig 11. Natural vibration mode shape of 24.34Hz

4.3 실린더 폭발압력의 기진력 응답 해석

Fig 12는 Fig 6의 실린더 폭발압과 Fig 8의 실린더 측면력에 의한 모멘트를 유한요소모델의 기진력으로 적용하여 구한 과도응답결과이다. Fig 12의 응답은 7개 실린더의 폭발순서에 따라 기진된 엔진 본체의 응답으로써 Fig 4(a)와 같이 횡방향 진동응답은 Fore end에서 가장 크고 중앙부(= 4번 실린더)의 진폭이 크고 After end(1번 실린더) 위치에서 가장 낮은 응답의 형태이다. 해석결과에서 본체는 폭발압에 의하여 4차 오더보다 파장이 짧은 본체의 1차 고유진동수인 10.2Hz의 파장에 가까운 형태로 응답하는 것을 알 수 있다. 해석결과에 근거할 때 본체는 각 실린더가 Fig 6~8과 같이 2.31Hz의 주기성의 정수 조화파 형태로 기진될 때 본체 고유진동수에 의해 영향을 받는 것을 해석적으로 보여준다.

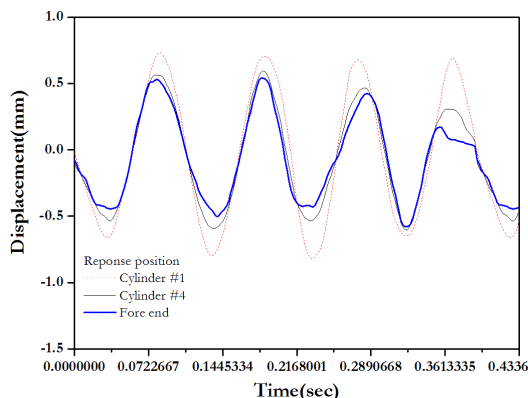


Fig 12. Time history analysis result on explosion pressure of cylinders

4.4 저장조의 음향모드 검토 및 맥동

Fig 13은 Fig 1의 배가스 저장조에 대하여 Ansys로 구한 길이방향 음향모드의 형상이다. 저장조의 1차 음향 정재파에 해당하는 음향모드의 주파수는 25Hz근처에 있는 것으로 계

산이 되면 SCR 덕트에서 가장 큰 음압이 나타났으며 저장조의 Fore측 끝단과 After측 끝단에서 서로 압력차가 나는 음향모드이어서 저장조는 1차 음향정재파가 기진 될 경우 또는 고유진동수 근처에 위치하게 될 때 종방향으로 심하게 움직일 수 있는 조건이다. Fig 3의 후면부 진동에서의 25.4Hz에서 증폭율이 크게 나타난 현상과 Fig 4(b)의 운전 중의 진동변형 모드 및 Fig 5에서 시험된 고유진동수 결과는 Fig 2의 손상과 연관이 있음을 보여준다.

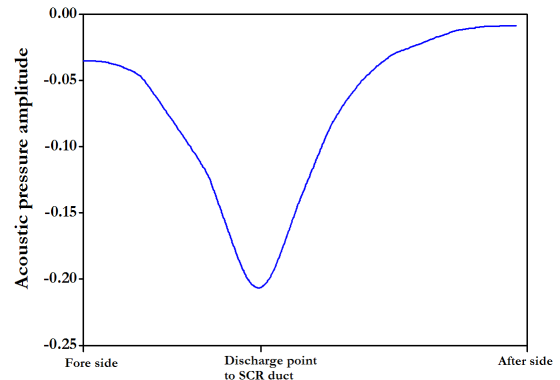


Fig 13. Acoustic mode shape of flue gas reserve tank

5. 진동저감 방안 검토

Fig 1의 육상에 설치된 7K60MC-S는 진동은 엔진본체의 주진동 모드인 9.25Hz의 진동은 본체의 10.2Hz 고유진동 모드가 기진력인 폭발압과 7개 실린더의 착화조합에 의하여 발생하는 배가스 맥동특성의 일치에 의한 진동으로 분석되었으며 25.4Hz의 국부 진동모드는 저장조 자체에서 만들어지는 맥동모드와의 접근에 의한 결과로 분석된다.

Fig 13은 정상 운전 중 본체 상부 fore측에 부가질량을 추가한 모습이다.



Fig 13. View of adding mass for engine vibration test

따라서 기진원인인 9.25Hz 맥동특성과 25Hz의 저장조의 정재파에 대하여 본체의 고유진동수를 변경하는 방법을 찾기

위하여 부가질량을 Fig 13과 같이 설치하여 진동시험을 하였다. Fig 14는 90% 부하에서 4ton의 질량을 부가할 때 9.25Hz 진동이 40%이상의 진동 저감 효과를 나타내었다. 전반적인 진동에 양호한 결과를 나타내었다.

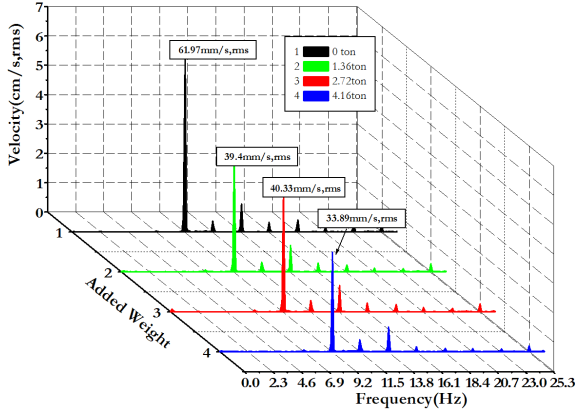


Fig 14. Vibration level in transverse direction of engine top-fore by adding mass

6. 결론

국내 설치된 10MW급 발전용 대형 저속 2 행정 디젤 엔진 본체에서 H형도 X형도 아닌 특이한 형태의 운전 중 진동변형 모드가 나타났고 저장조 지지부 등 일부 부품에서 균열 현상이 발견되어 육상에 설치된 7개 실린더형 디젤엔진에서 발생하는 진동현상에 대하여 현장실험과 유한요소 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 엔진본체의 진동은 After측에 비해 Fore측 진동이 높게 나타나 90% 운전 부하(load limit)에서 제작자의 권고치 범주에 있었다. 특히, 후면부 배가스 저장조 중간 지지부에서 25.4Hz진동이 권고레벨을 초과하는 37.5mm/s,0-p로 나타났다.

(2) 본체의 주 진동모드는 일반적으로 디젤 엔진에서 잘 나타나지 않은 H형도 X형도 아닌 특이한 형태로 운전중 진동 변형모드가 나타났고 배가스 저장조에서 국부적인 중진동 모드가 나타났다. 이는 실린더의 착화 및 폭발압이 본체의 고유진동모드를 기진하는 특성과 배가스 저장조에서의 압력 맥동과 연관이 있는 것으로 분석되었고 회전체의 비틀림모멘트의 영향도 주요 기진원의 하나로 추정되었다.

(3) 본체 후면부 배가스 저장조 지지부의 손상은 저장조내의 종방향 1차 정재파가 배가스 저장조 시스템의 고유진동수에 근접하고 있는 특성에 따른 공진경향과 정재파 자체가 저장조 양끝단의 압력차 발생으로 저장조가 종방향으로 기진함에 따라 지지대의 피로한도를 초과하고 있는 것으로 분

석되었다.

(4) 본체진동은 일종의 공진문제로서 본체의 고유진동수를 변경하기 위하여 부가질량 시험을 통하여 본체의 기진 주파수와 떨어지도록 영향을 주어 진동레벨을 40%정도 저감시킬 수 있음을 확인하였으며 질량부가가 저장조 지지부의 진동저감에도 양호한 영향을 주는 것으로 분석된다.

참 고 문 헌

- (1) 박종표, 신언탁, 1996, “발전용 대형 2행정 디젤엔진 및 기초의 진동해석”, 한국소음진동공학회지, 제10권, 제3호, pp.493~499.
- (2) 이돈출, 김의간, 전효중, 1996, “병렬 엔진의 X형 진동 위상 조정에 의한 디젤발전 플랜트 진동 제어”, 한국소음진동공학회지, 제6권, 제6호, pp.701~708.
- (3) 박종표, “대형 디젤엔진의 진동·건전성 해석”, 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp41~49.
- (4) ISO, 1991, Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets- Part 9 : Measurement and evaluation of mechanical vibrations(ISO 8528-9).
- (5) 한국선급, 선박 진동·소음 제어지침, 1997, pp344~351.