

Phase vector sum을 이용한 디젤엔진 구조진동의 평가 Evaluation of Diesel Engine Structural Vibration Using Phase Vector Sum

이수목* · 김관영**

Soo-Mok Lee, Kwan-Young Kim

Key Words : phase vector sum, structural vibration, resonance, mode, excitation, Diesel engine, HIMSSEN, ISO 8528-9

ABSTRACT

As an effective way of response evaluation in structural vibration analysis, the phase vector sum (PVS) method used in shaft torsional vibration analysis is introduced. Basic relation of PVS applicable to structural problem is derived and applied to Diesel engine structures. Concepts of forced phase vector sum (FPVS) and significance level (SL) are proposed to visualize the correlation between excitation orders and vibration modes in the SL map. The maximum responses and SL are compared and reviewed to confirm the validity of the method. It is regarded FPVS is adequate to newly evaluate the structural vibration based on excitation information.

1. 서 론

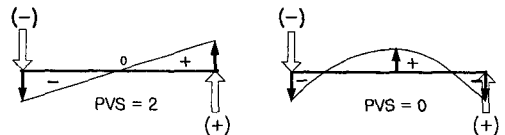
동적으로 최적화된 구조에 대한 설계적 요구는 구조물의 진동 해석에 있어 더욱 세밀한 모델링과 높은 예측 정확도를 추구하게 하고 있으며 컴퓨터와 수치해석의 비약적 발달에 힘입어 현실화되고 있다. 대개 수만에서 수십만 절점 및 자유도에 이르는 오늘날 구조진동 해석모델은 그 해석 과정 및 결과에서 많은 정보와 자료를 포함하고 있으며 매우 세밀한 분석을 가능하게 한다. 그럼에도 불구하고 동적 특성치 자료의 부족과 모델링의 부적합성 등은 여전히 예측과 실제의 큰 차이가 존재하게 하며 설계 및 운전의 측면에서 요구되는 정확도를 만족시키지 못하는 경우가 빈번하다. 또한 지나치게 방대한 진동해석의 정보는 해석자가 정확한 평가와 판단을 하는 데에 혼란을 초래하며 따라서 구조진동의 해석 결과의 처리 및 평가 방법에 대해 보다 체계적이고 단순하며 입체적인 방법을 요구하고 있다.

본 연구에서는 이러한 시도의 하나로 종래 단순한 축계 진동에서 응용하던 phase vector sum의 개념을 구조 진동 해석에 도입하여 그 개념 및 유도 과정을 제시하고 두 가지 산업용 엔진의 모델에 적용하여 결과를 검증하였다.

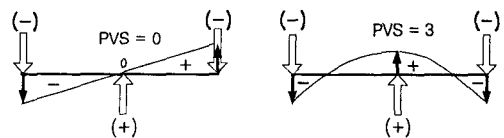
2. Phase vector sum의 개념

Phase vector sum (이하 PVS로 약기)은 동일한 크기와 형태의 기진력이 위상만 다르게 여러 점에 작용할 때 이러한 기진력의 집합이 특정 모드에 어떻게 효과적으로 작용하는지를 알아보는 방법이다. 따라서 고전적인 PVS는 기진력의 작용 위치 및 방향 (혹은 위상)만 알면 크기를 모르더라도 각각의 모드에 대해 계산이 가능하다.

PVS를 기초적 개념을 이해하기 위해서 아래와 같은 단순한 보의 예를 들어 보자.



(a) Hinge excitation for hinge and bending modes



(b) Bending excitation for hinge and bending modes

Fig. 1 Illustration for phase vector sum

* 현대중공업 선박해양연구소 동역학연구실
E-mail : smlee@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-5490, Fax : (052) 230-5495

** 현대중공업 선박해양연구소 동역학연구실

Fig. 1의 (a)와 같이 2개의 기진력이 보의 양끝에서 서로 다른 방향 (위상)으로 작용하고 있을 때 hinge mode는 이에 잘 반응하여 큰 진동을 일으킬 수 있는 반면 bending mode는 동일한 기진력에 대하여 서로 상쇄되어 진동이 최소화 된다. 한편 그림 (b)와 같이 3개의 기진력이 대칭적으로 작용할 때는 반대로 hinge mode는 반응을 못하는 반면 bending mode는 상대적으로 큰 응답을 보일 가능성이 높다. 이와 같이 진동 모드와 기진력의 패턴(위상)의 상관도를 살펴 이를 수치화 한 것이 phase vector sum 이다.

3. 축계 진동에서의 PVS 정의

일반적으로 일차적인 진동 설계의 검토가 기진력의 가진 주파수와 모드의 고유진동수의 비교에 의한 공진(resonance) 여부를 주파수 영역에서 수행하는 것에 비해 이러한 phase vector sum 계산은 힘 (기진력)과 진동 모드 간의 공간적인 부합도를 검토하여 공진시 응답의 발생 가능성 혹은 심각도를 실질적으로 평가하는데 의미가 있다. 다만, 임의의 위상을 가진 기진력의 조합이 가능하므로 축계 진동해석에서는 아래와 같은 표현으로 phase vector sum을 정의해 왔다 [1]. 이를 실제의 예를 들어 도식적으로 보이면 Fig. 2와 같다.

$$p.v.s. = \left| \sum \Delta \right| = \sqrt{(\sum \Delta_i \sin \beta_i)^2 + (\sum \Delta_i \cos \beta_i)^2} \quad (1)$$

여기서, Δ_i 및 β_i 는 각 기진력 작용점 (엔진의 경우 각 실린더) i 에서의 특정 모드의 벡터 크기 및 기진력의 위상이다.

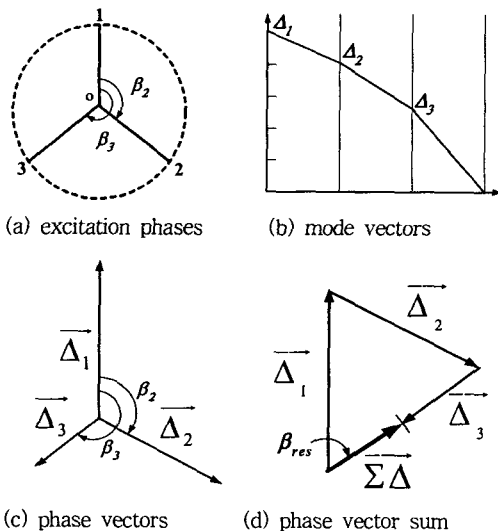


Fig. 2 Example showing PVS in shaft vibration

이러한 정의로부터 PVS는 아래와 같은 특성을 가진다.

- 1) PVS는 기진력의 크기를 필요로 하지 않는다.
- 2) 공진 응답 자체를 대상으로 하지만 고유진동수, 감쇠비 등의 모드 특성치는 고려하지 않는다.
- 3) PVS는 특정 모드의 전체적(global) 응답의 척도이다. 즉, 어떠한 국부적(local) 응답 특성도 갖지 않는다.
- 4) 기진력의 경우 힘과 모멘트의 크기뿐만 아니라 평가하는 데에 비해 PVS는 힘과 모드간의 부합도를 고려한 개념이므로 실제적인 공진 응답 (가능성)을 평가한다.
- 5) 비공진 영역의 응답 판정이나 평가에는 부적합하다.

4. PVS의 구조 진동에의 적용

이러한 축계의 진동해석에 적용해 오던 phase vector sum의 개념을 구조물의 진동 해석에 확장할 때에는 아래와 같은 차이점을 생각해 볼 수 있다. 즉, 축계의 각 가진점은 하나의 토크로 표현되는 1개의 자유도를 가지지만 구조물의 경우 여러 위치 및 방향으로 힘이 작용하므로 하나의 위상만으로는 가진점 (왕복동 엔진의 경우 실린더)의 특징을 표현할 수 없는 점이 있다.

예를 들어 왕복동 엔진의 경우, Fig. 3과 같이 실린더 헤드, 라이너, 베어링 등에 힘이 분산되어 작용하며 각각의 변화도 Fig. 4와 같이 모두 다르기 때문이다. 수평력과 수직력의 형태가 크게 다르며 특히 cylinder liner에 미치는 수평력은 piston의 이동에 따라 그 작용점이 지속적으로 변함에 유의할 필요도 있다.

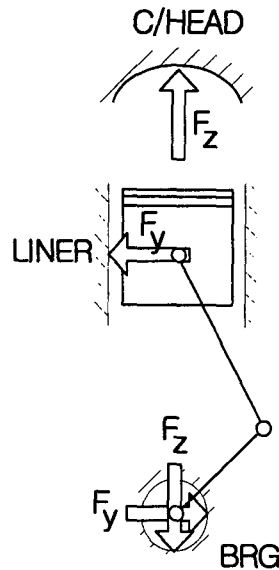


Fig. 3 Forces acting on engine structure

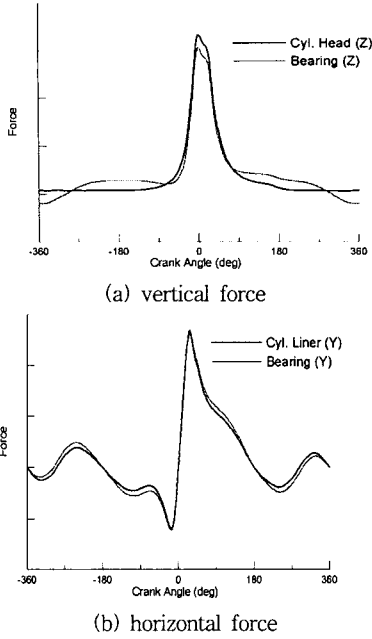


Fig. 4 Typical force variation on engine structure

따라서 이러한 구조물의 진동해석에는 축계와 같이 단순히 모드 벡터의 크기만으로 phase vector sum을 계산하기가 곤란하며 기진력을 직접 고려하는 것이 보다 타당한 방향으로 보인다. 물론 이러한 방법은 기진력에 대한 상세한 정보를 이용한다는 조건이 전제되며 구조물 진동해석의 경우 대개 이러한 정보는 제공된다.

구조물의 위상 벡터 합을 구하는 관계식의 유도 과정은 아래와 같다. 일반적인 모드 중첩법에 의한 특정점 j 의 진동 응답 계산식 (2)로부터 출발하자 [2].

$$X_j = \sum_k \sum_r \frac{\phi_{kr} \phi_{jr} f_k e^{i\psi_k}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (2)$$

여기서, ϕ_{kr} 과 ϕ_{jr} 는 기진점과 응답점의 모드 벡터, f_k 와 ψ_k 는 기진력 크기 및 위상이고 ω_r, ζ_r 은 각 모드의 고유진동수와 감쇠비이다. r 차 모드 만에 의한 공진응답을 선택하고 변위 대신 가속도 개념을 사용하면

$$A_{j,r} = \sum_k \frac{\phi_{kr} \phi_{jr} f_k e^{i\psi_k}}{2\zeta_r} i \quad (3)$$

로 되며 PVS의 개념을 적용하여 응답점의 모드 벡터를 1로 하고 모드 감쇠계수를 포함한 상수부를 역시 1로 단순화하면 PVS는 아래 식과 같이 주어질 수 있다.

$$PVS = \sum_k \phi_{kr} f_k e^{i\psi_k} \quad (4)$$

여기서 k 는 각 기진점의 번호이다. 이러한 기진점을 다시 set 별로 grouping하면,

$$PVS = \sum_l \sum_m \phi_{l'r} f_m e^{i(\psi_l + \psi_m)} \quad (5)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 l, m 은 각각 set(실린더) 번호 및 set내 기진력 번호를 의미하며 l' 는 해당 자유도를 말한다.

이러한 유도 과정 및 표현에는 특정점이 아닌 전체 혹은 상징적 대표점의 응답을 본다는 의미와 개개의 모드 감쇠계수를 배제하여 동일한 조건에서 관찰한다는 의도가 내포되어 있다. 따라서 축계에서의 PVS 계산법과의 차이점은 f_k 즉 기진력의 크기가 개입된다는 점이며 이는 각 기진력 분력들의 조화성분의 크기를 말한다. 따라서 이는 고전적 phase vector sum에 강제력을 더한 forced phase vector sum (FPVS)로 명칭될 수 있다.

$$FPVS = \sqrt{(\sum_k f_k \phi_{kr} \cos \psi_k)^2 + (\sum_k f_k \phi_{kr} \sin \psi_k)^2} \quad (6)$$

(1)식의 축계에 관한 PVS 식과 비교하면 각 항에 f_k 가 추가된 것이 차이점이다.

이러한 FPVS가 고차 모드로 갈수록 대체적으로 증가하는 것을 확인하고 이를 다음과 같이 정규화(normalization)하여 최종적으로 식 (7)과 같은 유의 수준(significance level, SL)의 정식화를 제창하였다.

$$SL = \frac{FPVS}{\sqrt{f_r}} \quad (7)$$

(f_r : r 차 모드의 고유진동수, Hz)

따라서, $w_r = 2\pi f_r$ 의 관계를 상기하면 이러한 SL은 가속도와 속도의 중간 정도의 물리량에 상당하며 일반적으로 구조물의 진동을 평가하는 스케일로서 타당하여 보인다. 단, SL의 크기는 모드 벡터 정규화 방법과 기진력의 단위에 따라 좌우되고 대상 계의 규모나 특성에 따라 달라질 수 있으므로 그 절대 크기의 평가에는 이러한 점을 유념할 필요가 있다.

본 연구에서는 중형 선박용 및 산업용 엔진에 대해 MKS 단위계를 사용한 모델링 및 기진력 체계에서 Table 1과 같이 4단계로 SL의 크기를 구분하여 평가의 기준으로 하였다.

이러한 유도과정을 거친 구조물의 PVS (FPVS, SL)는 축계에서의 PVS에 더하여 아래와 같은 특징을 가진다.

- 1) 각 성분별 기진력의 크기를 포함한다.
- 2) 속도와 가속도 중간 물리량 스케일을 가진다.
- 3) 진동 모드와 기진력 성분과의 상관도(correlation)의 의미를 가진다.
- 4) 모델 및 단위계에 따라 크기가 달라진다.
- 5) 평가는 대상 구조물의 종류와 특성에 따라 다르게 고려하여야 한다.

Table 1 Classification of phase vector sum (SL)

Class	SL level	Resonance	Evaluation
I	over 5	min ~ max operating speed	High level vibration expected within operation range
II	2 ~ 5	min ~ max operating speed	Significant level vibration expected within operation range
III	over 2	0.5 ~ 1 of min speed, 1 ~ 2 of max speed	Significant level vibration expected outside operation range
IV		Other cases	No special attention required

5. 구조물 진동에 대한 PVS의 적용 예

이러한 구조물 phase vector sum의 개념을 적용하여 당사(현대중공업)가 독자 개발한 HiMSEN 엔진의 구조진동 해석결과를 평가한 예를 들었다. 대상이 된 두 가지 발전기 세트의 간략 사안을 Table 2에 제시하고 Fig. 5에 대표적 엔진-발전기 세트의 사진을, Fig.6에 두 대상 엔진의 유한요소 해석모델을 보였다.

Table 2 Specification of engines

engine model	5H21/32	9H25/33
engine name	A-engine	C-engine
generator model	HFC7 504-10P	HFC7 636-8P
bore	210 mm	250 mm
stroke	320 mm	330 mm
speed	720 rpm	900 rpm
Pmax	200 bar	200 bar
power	800 KW	2610 kW
BMEP	24.1 bar	23.9 bar
firing order	1-2-4-5-3	1-3-5-7-9-8-6-4-2
engine weight	12.9 ton	25.4 ton
genset weight	22.1 ton	41.8 ton

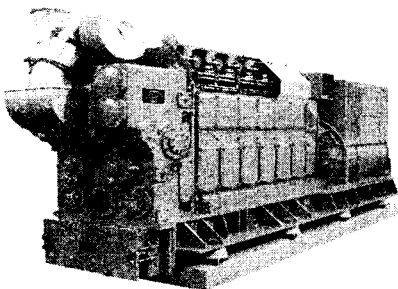
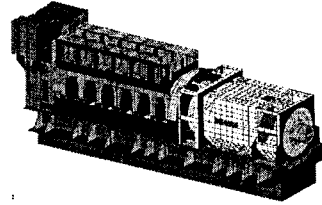
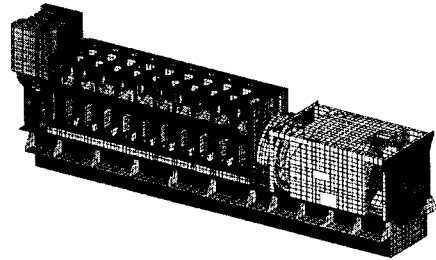


Fig. 5 Typical HiMSEN engine generator set



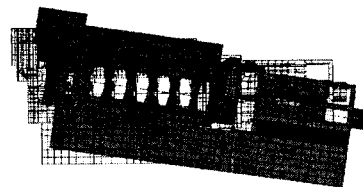
(a) 5H21/32 (A-engine)



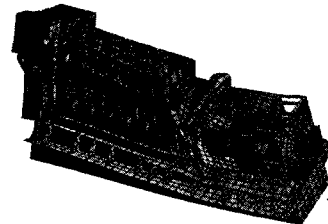
(b) 9H25/33 (C-engine)

Fig. 6 Finite element model for vibration analysis

또한 참조로 Fig.7에는 A-engine 에 대해 generator set 구조의 대표적 진동 모드들을 제시하였다. 일반적으로 탄성 지지된 generator set의 진동은 강체운동을 하는 6개의 rigid body mode와 구조물 자체의 변형을 수반하는 distortion mode로 분류된다 [3]. 강제모드는 하부 지지마운트의 강성에 의해 결정되고 변형 모드는 엔진, 발전기, baseframe등 구조 component의 강성에 의해 지배된다. 대표적인 모드로서 강체모드의 피치 모드, 변형모드의 비틀림 모드를 예시하였다.



(a) Rigid body mode (pitch, 10.5 Hz)



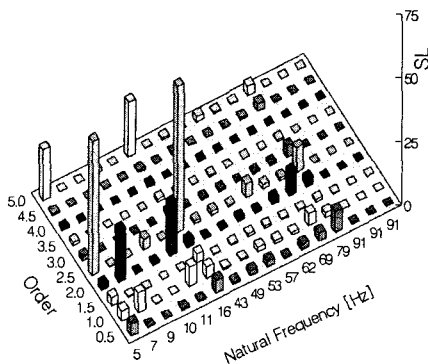
(b) Distortion mode (Torsion, 79.0 Hz)

Fig. 7 Modeshapes of genset structures (5H21/32)

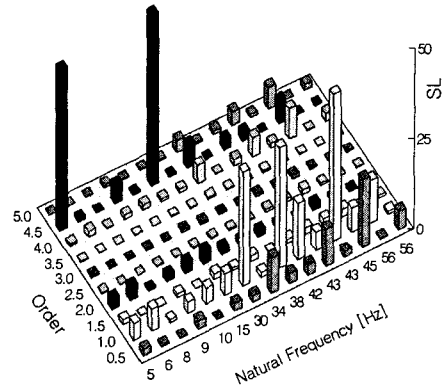
Table 3 Natural frequencies of major modes (Hz)

model/mode	5H21/32	9H25/33
1st roll	4.65	4.65
1st pitch	6.04	6.38
bounce	8.21	7.87
yaw	8.95	8.66
2nd pitch	10.48	9.73
2nd roll	15.11	15.2
V-bending	69.1	29.8
H-bending	56.5	33.8
torsion	79.0	45.3

Fig.8에는 연구의 본 내용으로써 각 기진력 차수성분에 의해 각 모드에 유기되는 phase vector sum (SL)의 분포를 제시하였다. Fig.8 (a) 5H21/32엔진의 경우 5기통 엔진의 특징인 2.5차, 5차 기진력 성분의 rolling moment가 1차 모드 및 6차 모드의 roll mode와 작용하여 PVS가 크게 나타나고 반면 pitch 형태의 2차 기진력 성분은 2차 및 5차 모드의 pitch mode에 작용하여 비교적 큰 값을 보임으로써 가진력 형태와 모드 형태의 부합도 특성을 잘 보여준다. Fig.8 (b) 9H25/33의 경우 9기통 엔진이므로 4.5차 성분의 rolling moment가 지배적이어서 이와 부합되는 1차, 6차의 roll mode가 잘 나타남을 재확인 할 수 있고 0.5차 및 1차 기진력 성분이 30 Hz 이상의 distortion mode에 작용하여 비교적 큰 PVS를 나타내는데 대개 국부적인 모드의 가진으로 보여진다. 이러한 뚜렷한 PVS 들은 SL 30~60에 이르는 값으로서 실제 매우 심각한 공진에 해당되며 상시 운전을 피해야 하도록 설계되어야 하는 점들이다. 이와 같은 기진력 차수 및 모드에 대한 PVS의 입체적 분포를 통하여 특정 응답점의 국부적 특성을 벗어난 전체적 응답을 관찰할 수 있으며 심각한 진동 응답의 발생 가능성을 미리 파악할 수 있는 장점이 있다.



(a) PVS of 5H21/32 (A-engine)



(b) PVS of 9H25/33 (C-engine)

Fig. 8 Distribution of phase vector sum of two models

Fig.9은 C-engine의 대표점에서의 차수별 응답을 주파수 축에 중첩하여 그린 것이다. 45 Hz 부근의 비틀림 모드에 여러 차수의 공진 응답이 중복되어 나타나며 1차 성분, 2차 성분도 각각 관련 모드에서 발현됨을 볼 수 있다. Table 3에는 C-engine의 몇 가지 경우에 대해 계산된 SL 값과 전체 응답을 대표할 수 있는 점들에서의 공진 응답을 열거 비교하였다. 대개 SL이 클수록 대표점에서의 진동 응답이 크게 나타나며 SL이 5를 넘으면 실제 최대진동이 허용치 [4]를 초과하는 것을 확인할 수 있다.

Table 4에는 A-engine에 대한 SL과 실제 최대 진동치의 비교 결과를 제시하였는데 역시 대체적인 비례 관계를 확인할 수 있다. 특히, 고려되는 운전 영역은 아니지만 2nd roll mode와 주기진력 성분인 2.5차 성분이 공진되는 경우를 살펴보면 SL이 60에 달하며 이때 예측되는 각 점에서의 응답도 100 mm/s를 상회하는 매우 큰 진동으로서 PVS와 실제 응답의 강한 상관도를 검증하여 준다.

이와 관련하여 한 가지 유의할 결과로서 Fig. 10의 A-engine에 대한 차수별 응답선도를 살펴보면 2.5차 성분의 경우 조사된 500~1000 rpm 운전 범위에서는 공진점이 없으나 (실제 공진점은 363 rpm) 전 구역에 걸쳐 강한 2.5차 성분이 지배적인데 phase vector sum 분석에 의해서는 이러한 비공진 응답이 간과될 수 있다는 점이다. 이러한 경우가 공진응답 위주의 phase vector sum에만 의존하여 응답을 평가할 수 없는 예가 되겠으며 큰 PVS 값은 상당히 넓은 범위의 대하여 무시할 수 없는 비공진 응답 (non-resonant response)을 준다는 사실을 유념할 필요가 있다.

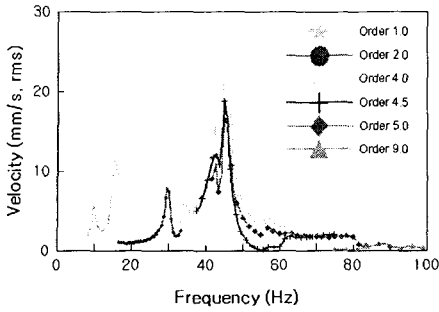


Fig. 9 Response of C-engine (B.F V)

Table 3 Comparison of SL and responses (C-engine)

mode	order	fpvs (SL)	actual response (mm/s, rms)			
			Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
yaw	1st	3.1	5	0	9	3
2nd pitch	1st	4.4	2	3	3	5
2nd roll	1st	5.8	7	14	7	12
V-bending	2nd	1.9	1	2	2	8
H-bending	4th	5.0	20	3	35	6
torsion	4th	8.5	24	16	28	27
	4.5th	6.4	18	13	20	20
	5.0th	5.9	15	10	19	18

Table 4 Comparison of SL and responses (A-engine)

mode	order	fpvs (SL)	actual response (mm/s, rms)			
			Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
1st roll	0.5th	5.1	30	8	21	9
2nd pitch	1st	8.0	1	16	1	22
2nd roll	1st	4.6	5	4	8	16
2nd roll	2.5th	(61.3)	(117)	(100)	(125)	(117)
H-bending	5th	2.1	5	1	17	9
torsion	5th	3.6	15	7	11	12
	5.5th	2.1	9	4	6	7

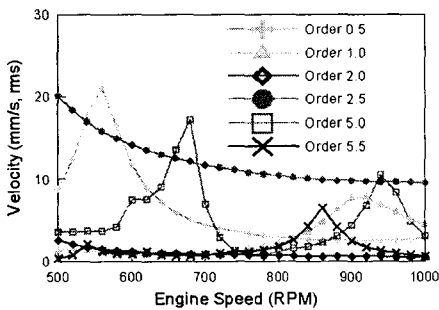


Fig. 10 Response of A-engine (gen top H)

끝으로 두 가지 모델에 대하여 계산된 SL과 예측된 최대 응답의 상관도를 그림으로 비교하여 phase vector sum 접근법의 유효성을 평가해 보았다. Fig. 11에 Table 3 및 Table 4의 경우들에 대해 가로축의 SL과 세로축의 최대응답의 점들로써 산포를 보였는데 A, C엔진의 강제 모드와 변형 모드

에 대해 각각 4가지로 구분하여 표시하였다. 두 가지 엔진의 크기와 운전 조건의 차이에도 불구하고 비슷한 범위에서 분포함을 알 수 있고 강제 모드와 변형 모드의 분포도 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 전체적으로 SL과 최대응답사이에서 대체로 완만한 양(positive)의 상관도를 보이는데 특히 'A'로 표기한 경우를 제외하면 Table 1에서 Class I으로 규정한 SL 5이상의 경우 (Zone II)는 모두 ISO 허용치 18 mm/s를 초과하는 Zone I에 포함되어 있다. 이는 SL만에 의한 허용 응답 판정이 어느 정도 가능함을 시사하고 있으므로 흥미있는 결과이다.

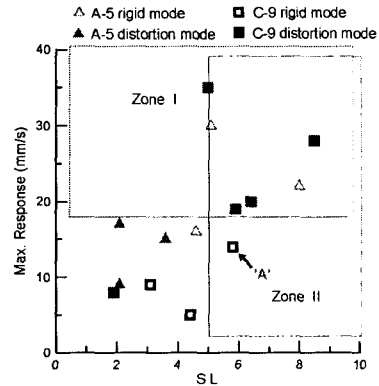


Fig. 11 Correlation of SL vs. maximum response

6. 결론

축계 진동해석에서 사용하던 phase vector sum의 개념을 구조 진동분야에 적용하여 대형 구조물의 진동해석에 대한 입체적 분석 및 평가를 시도하였다. 본 연구를 통하여 제안한 유의수준 (significance level, SL)의 개념은 산업용 디젤 엔진의 경우 구조진동 평가의 기준으로서 비교적 잘 적용되었으며 복잡하고 자유도가 많은 구조물의 강제응답 예측에 대한 보완적 방법으로서 본 phase vector sum은 유용한 정보를 주는 새로운 방법으로 평가된다.

참고 문헌

- [1] B.I.C.E.R.A., "A Handbook on Torsional Vibration", Cambridge University Press, 1958
- [2] Maia, Silva의 "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Research Studies Press, 1997
- [3] 이수목, 김관영, 김원현, "디젤 발전기 세트의 구조진동 특성 연구", 소음진동공학회 춘계학술대회, 2002.5
- [4] ISO 8528-9, "Reciprocating combustion engine driven alternating current generating sets - Part 9 : Measurement and evaluation of mechanical vibrations", 1995