

## 공기부양선의 추진 및 부양축계 비틀림진동 해석 연구

손선태<sup>†</sup> · 김정렬<sup>\*</sup>

(원고접수일 : 2007년 1월 11일, 심사완료일 : 2007년 4월 19일)

### A Study on the Analysis of Torsional Vibration of Branched Shafting System for Propulsion and Lift in Air Cushion Vehicle

Seon-Tae Son<sup>†</sup> · Jung-Ryul Kim<sup>\*</sup>

**Abstract** : A propulsion and lift shafting system in an air cushion vehicle is flexible multi-elements system which consists of two aeroderivative gas turbines with own bevel gears, four stage lift fan reduction gear, two stage propulsion reduction gear, air propellers and high capacity of lifting fans. In addition, the system includes the multi-branched shafting with multi-gas turbine engines and thin walled shaft with flexible coupling. Such a branched shafting system has very intricate vibrating characteristics and especially, the thin walled shaft with flexible couplings can lower the torsional natural frequencies of shafting system to the extent that causes a resonance in the range of operating revolution.

In this study, to evaluate vibrational characteristics some analytical methods for the propulsion and lift shafting system are studied. The analysis, including natural frequencies and mode shapes, for five operation cases of the system is conducted using ANSYS code with a equivalent mass-elastic model.

**Key words** : Air cushion vehicle(공기부양선), Multi-branched shafting(다분지 축계), Torsional natural frequency(비틀림 고유진동수), Equivalent mass-elastic model(등가 질량-탄성 모델)

#### 1. 서 론

공기부양선(Air cushion vehicle, ACV)의 추진 및 부양축계는 중량을 최소화하기 위해 경량 고출력으로 고속 회전하는 가스터빈, 복합소재 공기 프로펠러, 알루미늄 재질의 부양송풍기, 알루미늄

늄 케이싱을 갖는 감속기어, 두께가 극히 얇은 중공축 및 유연 커플링으로 구성되어 있다. 추진용 프로펠러 및 부양용 팬을 구동하는 동력원으로서 주로 항공기형 가스터빈을 사용하며, 통상 공기 프로펠러 및 부양송풍기를 동시에 구동하는 특수한 시스템으로서 선박과 항공기 추진 시스템을 혼합한

<sup>†</sup> 교신저자((주)한진중공업 특수선개발팀), E-mail:son\_st@hanjinsc.com, Tel: 051)410-8090

<sup>\*</sup> 한국해양대학교 기관시스템공학부

형태이기 때문에 선박이나 항공기의 추진계통과는 상이한 진동특성을 가진다.

본 연구에서 대상으로 하고자 하는 공기부양선의 추진 및 부양 계통은 복수의 분지 시스템 및 4대의 감속기어를 갖는 축계로 구성되어 있다. 특히 각 축계의 커플링은 유연 커플링으로 구성되어 있고, 축은 얇은 중공축으로 구성되어 있기 때문에 비틀림진동의 고유진동수가 축계의 운전영역에 포함될 수 있을 정도로 낮아져서 결과적으로 고유진동수가 축의 기진주파수 범위 내에 위치하게 되어 공진 발생 가능성이 높다. 그러나 본 축계는 가스 터빈 엔진에 의해 구동되므로 구동토크는 회전계 계통으로 왕복동 엔진 축계와는 달리 균일하며, 이에 따라 작동 회전속도 범위에서 발생하는 유해한 엔진 속도의 동기성분은 먼 곳에 위치한다.

추진 및 부양 축계는 다수의 로터와 탄성축을 포함한 회전계 계통으로서 다수의 상이한 진동 모드를 갖는다. 가스터빈에 직결된 축계는 가스터빈의 터빈 로터, 감속기어, 부양송풍기, 프로펠러 등 많은 관성질량을 갖는 비틀림진동계를 형성하고 프로펠러 블레이드, 부양송풍기 날개, 가스터빈 날개, 축 회전수 등 일반 디젤엔진을 설치한 선박의 축계와는 상이한 기진원을 가지므로 이러한 기진원에 대한 검토가 필요하다.

또한 축계에 사용된 축과 유연 커플링으로 인하여 비틀림 고유진동수가 낮기 때문에 불가피하게 기진주파수를 회피하지 못하는 경우가 발생할 가능성이 있으므로, 이와 같은 공진에 의한 축의 위험도를 판단하기 위해 비틀림진동해석을 수행하여 모드형상을 검토할 필요가 있다. 이러한 각 모드형상을 확인하여 진동특성을 파악하는 것은 추진 및 부양 축계를 설계함에 있어서 중요한 고려사항이다.

본 논문에서는 이와 같은 공기부양선의 추진 및 부양 축계에 대해 비감쇠 자유 비틀림진동을 해석하여 운전영역에 공진점 존재 여부 및 진폭을 파악하여 축계설계에 반영하고자 하였다. 이를 위하여 추진 및 부양 축계를 집중질량계로 모델링하였으며, 이에 대한 해석은 신뢰도를 높이기 위하여 현재 일반적으로 널리 사용하고 있는 상용 프로그램인 ANSYS code 를 이용하였다. 여기서 비틀림진

동 해석은 축계의 운전모드를 5가지로 구분하여 수행하였으며, 고유진동수 및 모드형상을 통하여 진동특성을 확인하였다.

## 2. 추진 및 부양 축계 시스템

해석 대상으로 하고 있는 추진 및 부양 시스템은 단위체적당 출력이 아주 높은 고밀도 공기부양선에 적용된 체계로 Fig. 1 과 같으며, 항공기형 고속터빈 방식의 4,000 SHP, 16,000 rpm 가스터빈 2대, 엔진 감속기어(베벨기어, 내부에 오버런 클러치 내장), 프로펠러용 감속기어, 부양 송풍기용 감속기어, 부양 송풍기 2대, 프로펠러, 프로펠러 덕트, 분리 클러치, 부양 송풍기 베어링, 축 및 유연 커플링으로 구성되어 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 추진 및 부양축계를 Fig. 2 (a) 와 같이 모델링하였고, 각 요소의 특성치는 각 장비 제작사에서 제시한 값을 이용하였다.

Fig. 2 (b) 는 클러치 C1, C2, C3를 중심으로 Fig. 2 (a) 를 간략화한 것이다.

프로펠러, 기어, 부양송풍기용 임펠러 등은 1질점계로 모델링하였으며 각 축계, 가스터빈, 클러치 등은 다질점 상당 질량관성모멘트와 상당 스프링으로 모델링하였다. 극관성 모멘트가 작은 유연 커플링과 얇은 중공축은 질량이 없는 축으로 간주할 수 있으나 축계의 특성을 고려하여 복수의 스테이션으로 간주하여 각 부분의 관성을 강체디스크에 집중시켜 축에 대해서는 강성만 존재하고 질량이 없는 축으로 간주한다. 각 기어 시스템에 대한 관성과 강성의 치환을 위한 기준축은 추진기어와 부양기어를 연결하는 엔진기어 EG1, EG2 의 출력축을 기준으로 하였다.

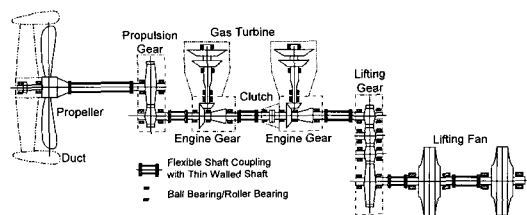


Fig. 1 Propulsion and lift system on ACV

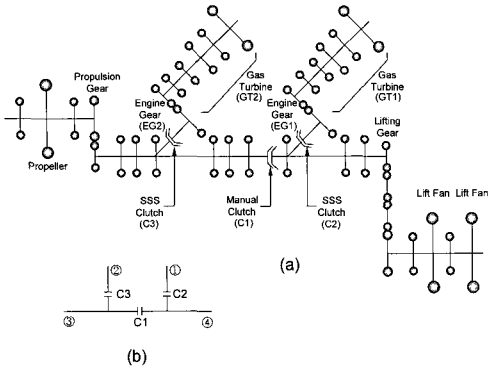


Fig. 2 Mass and elastic model of propulsion and lift shafting

3. 계통의 운전조건 및 해석 범위

공기부양선의 추진 및 부양계통은 2대의 가스터빈으로 프로펠러 및 부양송풍기를 구동하며, 3개의 클러치에 의해 계통이 분리, 통합 운전되는 복잡한 체계이므로 비틀림 진동해석 범위를 결정하기 위해 계통의 작동을 다음과 같이 나누어 검토한다.

- (i) 클러치 C1을 연결하여 추진계통과 부양계통을 통합하여 운전하는 경우
- (ii) 시스템을 클러치 C1으로 추진계통과 부양계통으로 분리하여 별개로 운전하는 경우

(1) 추진 및 부양 통합 운전

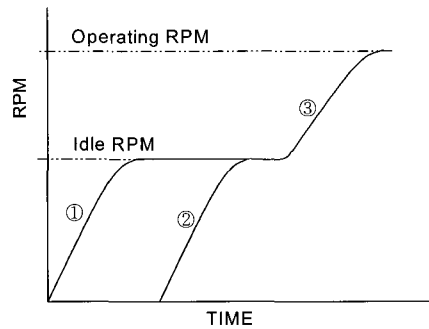
Fig. 2에서 수동클러치 C1을 연결하여 시스템을 운전하는 경우이며 정상운전시에 사용하는 방법이다. 시동시에는 프로펠러를 0 (zero) 피치로 유지하고 가스터빈 2대중 먼저 1대를 시동시키는데, 이 때 시동되는 가스터빈 엔진기어내의 오버런 클러치가 자동 연결되고 정지된 가스터빈축의 오버런 클러치는 분리된 채로 유지되어 계통 전체는 1대의 가스터빈만으로 무부하 회전수로 운전된다 (Fig. 3). 여기서는 ①번 가스터빈 (GT1)을 먼저 기동시키고 다음에 ②번 가스터빈 (GT2)을 기동시키는 것으로 한다.

가스터빈 1대가 기동되어 연결되고 나면, 정지해 있는 가스터빈을 시동시킨다. 이 가스터빈이 시동되어 무부하 회전수가 되면 오버런 클러치가 연결

되어 계통전체는 2대의 가스터빈으로 운전되며, 2대의 가스터빈의 회전수를 작동회전수로 상승시켜 프로펠러 피치를 조정하여 추진한다.

(2) 비상 작동

- i) 가스터빈 1대가 고장나면, 가스터빈 1대로 전계통을 구동하고 프로펠러 피치를 낮추어 엔진부하를 감소시킨다.



- ① Starting of GT1, Clutching of C2
- ② Starting of GT2, Clutching of C3
- ③ Operating of GT1 and GT2

Fig. 3 Operating map of system

이 때 고장난 가스터빈은 엔진기어 내의 클러치에 의해 자동으로 분리된다.

- ii) 프로펠러 또는 부양송풍기에 고장이 발생하면 수동클러치 C1으로 추진계통과 부양계통을 분리하여 운전한다.

이상과 같은 작동개념에 따라 다음과 같은 5가지 경우에 대해 비틀림 진동을 해석한다.

Table 1 Operation case

Case	Manual Clutch C1	Gas turbine		Propeller	Lift fan
		GT1	GT2		
1	en	on	on	on	on
2	en	on	-	on	on
3	en	-	on	on	on
4	disen	-	on	on	-
5	disen	on	-	-	on

### 4. 해석결과 및 검토

시스템의 각 경우별 해석은 ANSYS code로 수행하였으며 여진 주파수대의 고유진동수 해석결과는 Table 2와 같다. 표에서 밑줄로 그어놓은 부분은 무부하 운전 또는 정상운전 영역 내에 존재하는 고유진동수이다

**Table 2 Natural frequency of torsional vibration**

Mode (order)	Natural Frequency [Hz]				
	Case 1 Twin engine	Case 2 GT1 engine	Case 3 GT2 engine	Case 4 Propulsion	Case 5 Lifting
1	2.6	2.7	2.6	7.7	3.5
2	4.4	4.4	4.7	34.1	6.2
3	6.4	6.5	7.6	46.6	13.5
4	9.7	<u>13.6</u>	10.0	72.3	38.8
5	<u>13.6</u>	<u>23.5</u>	34.4	<u>161.9</u>	135.7
6	34.4	39.0	46.9	<u>251.1</u>	144.3
7	38.9	68.5	54.4	<u>258.3</u>	151.3
8	47.8	72.4	72.3	-	277.9
9	72.3	121.9	124.2	-	-
10	135.7	135.7	135.7	-	-
11	148.4	148.4	167.0	-	-
12	<u>203.9</u>	<u>204.1</u>	<u>222.1</u>	-	-
13	<u>251.5</u>	<u>254.3</u>	<u>249.1</u>	-	-
14	277.1	277.1	<u>263.3</u>	-	-
15	282.7	-	-	-	-

해석대상 축계는 구조가 복잡하고 또한 다양한 축계 특성치를 포함하고 있는 관계로 인하여, 고유진동수가 운전점 이하 낮은 모드에서부터 가스터빈 작동회전수 영역까지 많은 진동수와 다양한 모드형상으로 나타나고 있다.

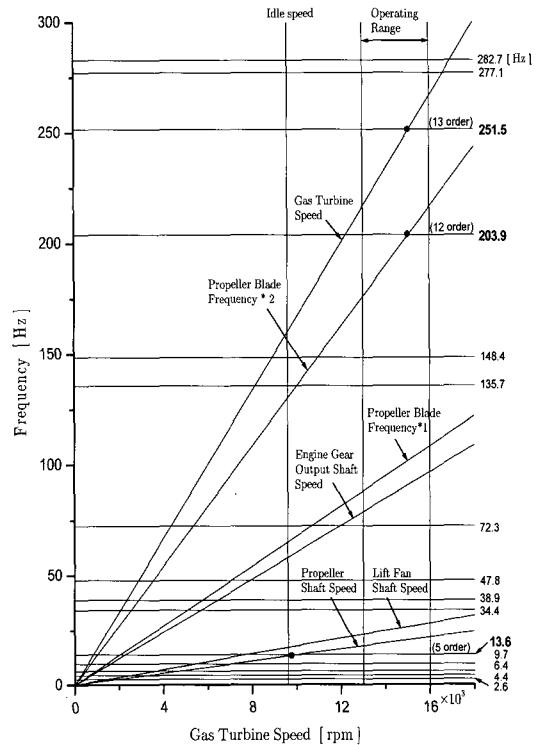
다음은 각 Case 별 해석에 대한 검토 결과이다.

(1) Case 1 (가스터빈 2대 구동)

Case 1의 경우 고유진동수는 Table 2에 나타낸 바와 같이 MCR 영역까지 모두 15개 모드가 존재하는데, 그 중에서 공진가능성이 있는 진동모드는 Fig. 4의 캠벨 선도에서 알 수 있듯이 다음과 같다.

- 5 차 (13.6 Hz) 모드 : 무부하 운전시 프로펠러와 공진

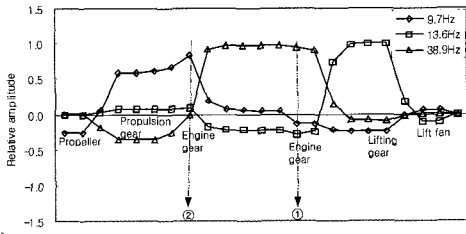
- 12 차 (203.9 Hz) 모드 : 프로펠러 블레이드 2차 성분과 공진
- 13 차 (251.5 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진



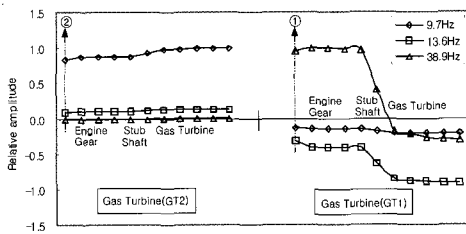
**Fig. 4 Campbell diagram of shafting excitation (Twin engines)**

Fig. 5 및 Fig. 6에서 Fig. 5~6 (a)는 프로펠러에서 클러치 C1을 거쳐 부양송풍기에 이르는 축계이고, Fig. 5~6 (b)는 가스터빈에서 엔진 감속기여까지이다. 그리고 Fig. 5~6 (b)에서 ①과 ②는 각각 터빈 GT1 ① 및 GT2 ②와의 연결점이다.

Fig. 5에서 5차 (13.6 Hz) 모드형상은 엔진 구동후 무부하 운전시 프로펠러 축과 동조하는 것으로 되어 있는데, Fig. 5 (a)에서 프로펠러 축 부위의 진폭이 적어 공진으로 인한 큰 문제는 발생하지 않을 것으로 예상되지만, 무부하 운전점은 변경설정이 가능하므로 공진으로 인한 문제를 최소화하기 위해서 무부하 운전점을 재설정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

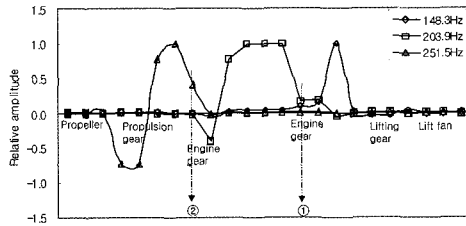


(a) Shafting between propeller and lift fan

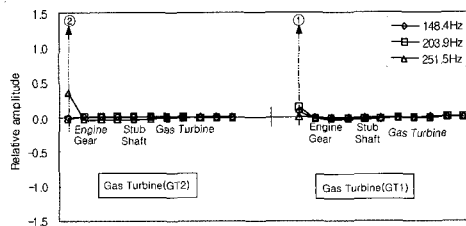


(b) Shafting between gas turbine and engine gear

Fig. 5 Mode shapes of shafting (Twin engines, 9.7 Hz, 13.6 Hz, 38.9 Hz)



(a) Shafting between propeller and lift fan



(b) Shafting between gas turbine and engine gear

Fig. 6 Mode shapes of shafting (Twin engines, 148.4 Hz, 203.9 Hz, 251.5 Hz)

Fig. 6에서 12차 (203.9 Hz) 모드형상은 프로펠러 블레이드 2차 성분과 동조하지만 Fig. 6 (a)에서 알 수 있듯이 프로펠러 및 프로펠러 축 부위의 진폭이 작고, 또한 13차 (251.5 Hz) 모드형상은 가스터빈 축과 동조하는 것으로 되어 있지만 Fig. 6 (b)에서 알 수 있듯이 여기서도 마찬가지로 진폭이 작으므로 결과적으로 양쪽 모두 공진으로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

이상의 검토에서 가스터빈을 2대 작동시켜 정상 작동하는 경우 3개의 고유진동수가 운전영역에 존재하지만, 진동문제를 유발할 수 있는 경우는 예상되지 않는다. 다만 축 설계시 무부하 운전점 및 축 강성에 대해 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

이 때, 축 강성 증가에 따른 축 중량 증가는 공기부양선의 특성상 문제가 되므로, 중량이 증가되지 않는 유연 커플링의 강성 증가 방안이 축 배치한 계내에서 고려되어야 한다. 또한 엔진기어 내에 위치한 오버런 클러치는 진동에 강한 형식으로 선정하여야 한다.

(2) Case 2(가스터빈 GT1 1대 구동)

Case 2의 경우 고유진동수는 Table 2에 나타난 바와 같이 MCR 영역까지 모두 14개 모드가 존재하는데, 그 중에서 공진모드는 Fig. 7의 캠벨 선도에서 알 수 있듯이 다음과 같다.

- 4차(13.6 Hz) 모드 : 무부하 운전시 프로펠러와 공진
- 5차(23.5 Hz) 모드 : 무부하 운전시 부양 팬과 공진
- 12차(204.1 Hz) 모드 : 프로펠러 블레이드 2차 성분과 공진
- 13차(254.3 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진

Fig. 8에서 4차 (13.6 Hz) 모드형상은 엔진 기동후 무부하 운전시 프로펠러와 동조하고 5차 (23.5 Hz)는 무부하 운전시 부양 송풍기와 동조하는 것으로 되어 있는데, 그림에서 모드 형상을 보면 13.6 Hz일 때 프로펠러 축에 절점이 존재하지만 진폭이 그다지 크지 않고, 23.5 Hz일 때

부양 팬과 동조하지만 진폭이 아주 작으므로 문제가 되지는 않을 것으로 사료된다.

또한 운전영역 내에서 프로펠러 블레이드 2차 성분과 동조하는 12차(204.1 Hz) 모드를 살펴보면 Fig. 9에서 프로펠러 및 축 부분의 진폭은 작고, 가스터빈과 동조하는 13차(254.3 Hz) 모드에서도 가스터빈 부분에서는 진폭이 작으므로 문제시 되지는 않는다.

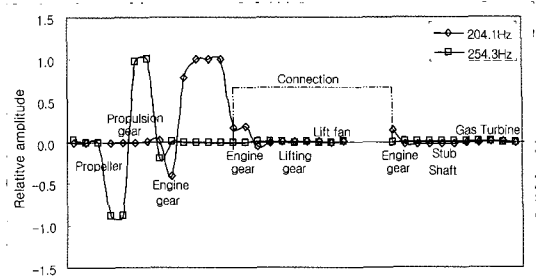


Fig. 9 Mode shapes of shafting (Front engine, 204.1 Hz, 254.3 Hz)

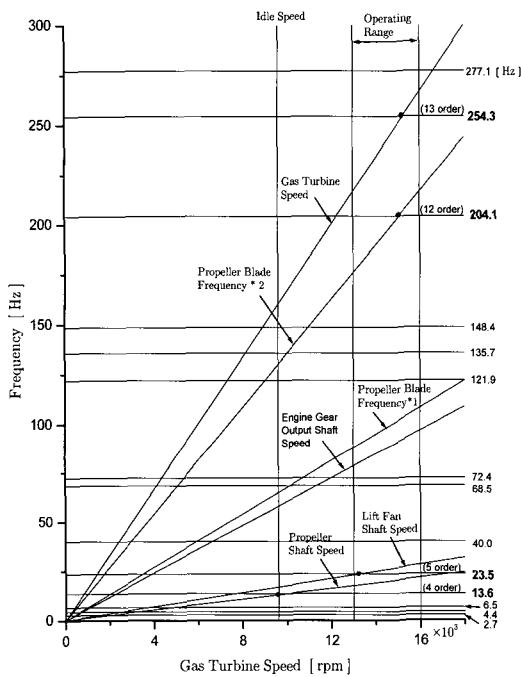


Fig. 7 Campbell diagram of shafting excitation (Front engine)

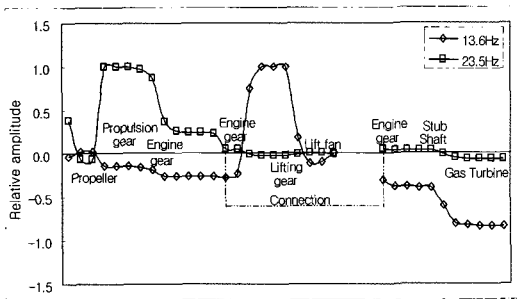


Fig. 8 Mode shapes of shafting (Front engine, 13.6 Hz, 23.5 Hz)

(3) Case 3(가스터빈 GT2 1대 구동)의 해석결과 검토

Case 3의 경우 고유진동수는 Table 2에 나타난 바와 같이 MCR 영역까지 모두 14개 모드가 존재하지만, Case 2의 경우와 달리 공진모드는 Fig. 10의 캠벨 선도에서 운전영역에서만 존재하며 다음과 같다.

- 12 차(222.1 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진
- 13 차(249.1 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진
- 14 차(263.3 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진

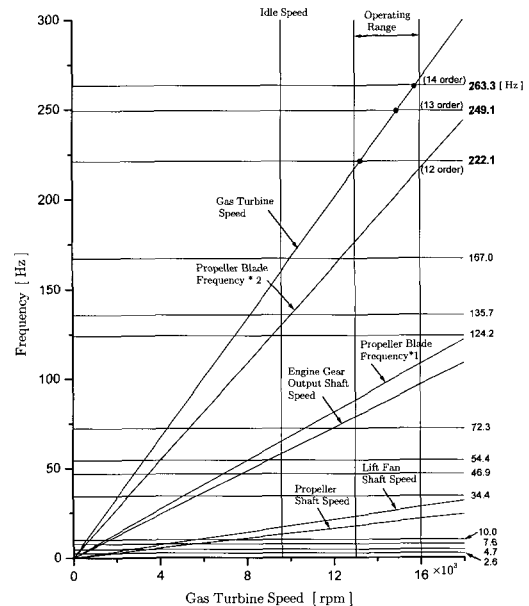
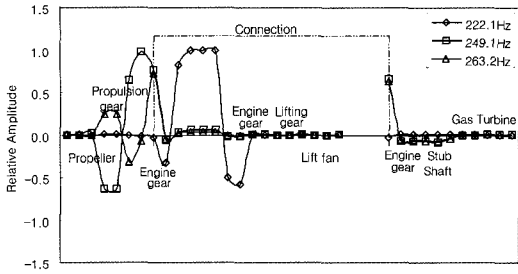


Fig. 10 Campbell diagram of shafting excitation (Rear engine)



**Fig. 11 Mode shapes of shafting (Rear engine, 222.1Hz, 249.1 Hz, 263.2 Hz)**

Fig. 10 에서 12 차(222.1 Hz), 13 차(249.1 Hz), 14 차(263.3 Hz) 모두 가스터빈과 동조하는 것으로 나타나는데, Fig. 11 의 모드 형상을 보면 12 차는 진폭이 작아 문제는 없을 것이라고 사료되지만, 13 차와 14차의 경우에는 후부 엔진기어 (EG2)의 입력부 진폭이 커 공진으로 인해 엔진 기어부분 및 엔진 기어 내부의 클러치가 진동에 취약할 수 있다.

Case 1 의 경우와 마찬가지로 엔진기어 내에 위치한 오버런 클러치를 진동에 강한 자기동기(SSS, self synchronized shift) 클러치로 선정하는 것이 타당하다.

**(4) Case 4, 5(분리 구동)의 해석결과 검토**

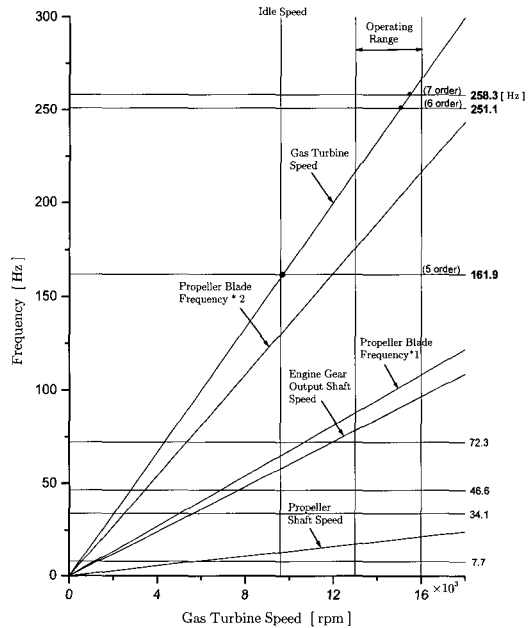
수동클러치 C1 으로 추진계통과 부양계통을 분리하여 운용시 프로펠러만 구동하는 Case 4 의 경우에는 7개의 고유진동수가 존재하고, 부양 팬만 구동하는 Case 5 의 경우에는 8개의 고유진동수가 존재한다.

프로펠러만 구동하는 Case 4 의 경우 공진모드는 Fig. 12 의 캠벨 선도에서 다음과 같은 운전영역에서만 존재한다.

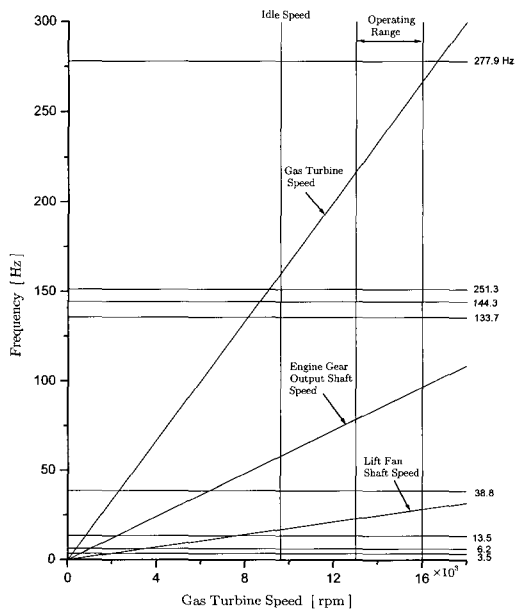
- 5 차(161.9 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진
- 6 차(251.1 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진
- 7 차(258.3 Hz) 모드 : 가스터빈과 공진

Case 5 의 경우에는 Fig. 13 의 캠벨 선도에서 알 수 있듯이 전 영역에서 공진점이 존재하지 않으므로 문제는 없다.

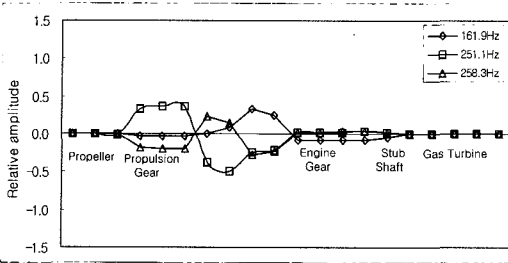
Fig. 14 의 모드 형상을 보면 상기 모두 가스터빈부에서 진폭이 크지 않으므로 그다지 문제가 되는 않을 것으로 생각한다.



**Fig. 12 Campbell diagram of shafting excitation (Separate operation)**



**Fig. 13 Campbell diagram of lifting shafting (Separate operation)**



**Fig. 14 Mode shapes of shafting (Separate operation, 251.1 Hz, 258.3 Hz)**

### 4. 결 론

본 연구에서는 다수의 기어, 공기프로펠러, 부양 송풍기 임펠러 및 2개의 분지축을 포함하는 축계에 대해 민감성 자유 비틀림진동을 해석하여 운전영역에 공진점 존재 여부 및 진폭을 파악, 축계 설계에 반영하기 위하여 시스템을 역학적 등가계로 모델링하여 상용 프로그램인 ANSYS code를 이용하여 해석하였다.

그리고 추진 및 부양 축계에 있어서 비틀림진동에 대한 기진력 특성을 검토하고, 고유진동수와 모드형상을 구하여 축계의 진동특성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 축계의 작동을 5가지 모드로 구분하여 비틀림 진동해석을 수행하였으며, 해석결과 얇은 중공축과 유연커플링의 특성으로 인해 다수의 고유진동수가 시스템의 무부하 운전 및 운전영역 내에 존재함을 확인하였다.

(2) 무부하 운전점 부근에 공진점이 존재하므로 무부하 운전점의 변경을 고려할 필요가 있다.

(3) 후부엔진 GT2 1 대만으로 프로펠러 및 부양팬을 가동시킬 때 후부엔진 기어부분 및 엔진기어 내부 클러치부분이 진동에 취약할 수 있으므로 진동에 강한 자기동기(SSS) 클러치를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 참고문헌

[1] J. S. Rao, "Rotor Dynamics", John Wiley & Sons Inc, 1983.

[2] 이성진, 이채우, "공기부양선", 교양문화사, 1991

[3] G.H. Elsley, A. J. Devereux, "Hovercraft Design and Construction", David & Charles Newton Abbot, 1968.

[4] 전효중, 이돈출, "추진축계 진동론", 다솜출판사, 2003

[5] 옥유관, "모드해석법에 의한 분지를 갖는 추진축계의 합성 비틀림 진동계산에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 석사학위 논문, 1988.

[6] 전효중, "여러 개의 분지를 갖는 동력장치의 비틀림 진동해석", 한국과학재단, 1989.

[7] 한국기계연구소, "공기부양정의 소음해석 및 진동소음 계측", 1989.

[8] Stratford Division, Textron Lycoming, "TF25/KTMI Hovercraft Propulsion System Torsional Analysis", 1988.

### 저 자 소 개



#### 손선태(孫善太)

1958년 5월생, 2002년 선박기계기술사, 2005년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 졸업(석사), 현재 (주)한진중공업 특수선개발팀 부장



#### 김정렬(金正烈)

1961년 9월. 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사). 1998년 일본 나고야대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1988년 8월~1993년 2월 현대중공업 엔진사업부 근무. 1993년 3월~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수.