

공기부양선의 추진 및 부양축계 횡진동 해석에 관한 연구

손선태† · 길병래* · 조권희* · 김정렬*

(원고접수일 : 2007년 11월 9일, 심사완료일 : 2008년 1월 8일)

A Study on the Analysis of Lateral Vibration of Flexible Shafting System for Propulsion and Lift in Air Cushion Vehicle

Seon-Tae Son† · Byung-Lea Kil* · Kwon-Hae Cho* · Jung-Ryul Kim*

Abstract : In this study, lateral vibration analysis has been conducted on a propulsion and lift shafting system for an air cushion vehicle using ANSYS code. The shafting system is totally flexible multi-elements system including air propeller, aluminum alloy of lift fan and thin walled shaft with flexible coupling. The analysis included the lateral natural frequencies, mode shapes and harmonic analysis of the shafting system taking into account three-dimensional models for propulsion and lifting shaft system. In case of ACV the yawing and pitching rate of craft will be quite high. During yawing and pitching of craft significant gyroscopic moment will be applied to the shafting and will generate high amplitude of lateral vibration. So, such a shafting system has very intricate lateral vibrating characteristics and natural frequencies of shafting must be avoided in the range of operating revolution. The control of lateral vibration is included in this study.

Key words : Air cushion vehicle(공기부양선), Propulsion and lift shafting system(추진 및 부양 축계), Lateral natural frequency(횡 고유진동수), Gyroscopic moment(자이로 모멘트), Three-dimensional models(3차원 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 케이싱을 갖는 감속기어, 두께가 극히 얇은 중

공축 및 유연 커플링으로 구성되어 있다. 이와 같이 구성된 추진 및 부양 시스템은 탄성지지된 유연 탄성 축계, 탄성체인 추진용 공기 프로펠러 및 부양용 송풍기를 포함한 시스템으로서 선박이나 항공기의 추진축계와는 상이한 횡진동 특성을 가진다 (1), (2).

본 연구에서 대상으로 하고자 하는 공기부양선의

† 교신저자 : ((주)한진중공업 특수선개발팀), E-mail : son_st@hanjinsc.com, Tel : 051)410-8090

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

추진 및 부양 계통은 2대의 가스터빈과 4대의 감속기어를 통하여 추진 공기 프로펠러 및 부양 송풍기를 동시에 구동하는 축계로 구성되어 있다. 특히 각 축계는 유연 커플링 및 얇은 중공축으로 구성되어 있고, 각 베어링 및 장비가 유연 탄성지지 되어 있으므로 횡진동 고유진동수가 축계의 운전영역에 포함될 수 있을 정도로 낮아져서 결과적으로 고유진동수가 축의 기진주파수 범위 내에 위치하게 되어 공진 발생 가능성이 높다^[3]. 그러나 본 축계는 가스터빈 엔진에 의해 구동되므로 왕복동 엔진 축계와는 달리, 횡진동 가진원은 축계 자중에 의한 굽힘, 축 정렬불량, 불평형 질량 및 자이로모멘트 등이며, 이러한 가진원과 작동 회전속도 범위에 위치하는 고유진동수의 공진에 대한 유해 여부의 검토가 선행된 후 축계 설계 변경이 고려되어야 한다.

또한 공기부양선은 고속선화가 가능하므로 고속선회시 축계에 작용하는 자이로모멘트의 영향^[4]에 대해서도 강제진동 해석시 검토가 수행되어야 대상 축계에 대한 진동특성을 정확하게 평가할 수 있다. 본 논문에서는 공기부양선의 추진 및 부양 축계의 가진원 분석 및 비감쇠 자유 횡진동을 해석하여 운전영역에서의 공진점 존재 여부 및 진폭을 파악하였고, 운전영역내에 존재하는 고유진동수에 대해 강제진동을 수행하여 유해성 판별 및 유해한 경우 축계 설계 변경을 검토하여 축계설계에 반영하고자 하였다. 이를 위하여 추진 및 부양 축계를 3차원 모델로 모델링하여 상용 프로그램인 ANSYS code를 이용하여 해석을 수행하였다. 여기서 횡진동 해석 검토 결과 축계 진동문제가 확인된 부양송풍기 축계에 대한 횡진동 해석결과는 실제 시운전시 계측치를 통하여 확인하였다.

2. 축계 시스템 해석 모델

해석 대상으로 하고 있는 추진 및 부양 시스템^{[1],[2]}은 단위체적당 출력이 아주 높은 고밀도 공기부양선에 적용된 체계로 Fig. 1과 같으며, 항공기형 고속터빈 방식의 4,000 SHP, 16,000 rpm 가스터빈 2대, 엔진 감속기어(베벨기어, 내부에 오버런 클러치 내장), 프로펠러용 감속기어, 부양 송

풍기용 감속기어, 부양 송풍기 2대, 프로펠러, 프로펠러 덕트, 분리 클러치, 부양 송풍기 베어링, 축 및 유연 커플링으로 구성되어 있다.

공기부양선의 추진 및 부양축계는 횡진동 특성상 자이로스코픽 감쇠의 영향이 크게 나타날 것이므로 이를 효율적으로 계산하기 위하여 축계 시스템 횡진동 해석 모델은 3차원 모델로 모델링한다. 프로펠러, 기어, 부양 송풍기용 임펠러 등은 상당 질량관성모멘트와 상당질량을 갖는 디스크로 모델링 하였으며, 유연 커플링은 유연 디스크 껍을 가진 구조로 동등 굽힘강성의 중공축으로 환산하여^[6] ANSYS Code Solid Pipe(PIPE16 Element)로 모델화 하였고, 동등 굽힘 강성은 커플링의 굽힘 변형 대 부하 곡선에서 계산되었다. 얇은 축 및 각 커플링 또한 ANSYS Code Solid Pipe(PIPE16 Element)로 모델화하였다.

가스터빈은 베벨기어를 통하여 축계와 직각으로 연결되어 횡진동에 영향이 없는 것으로 가정하여 모델에서 제외하였다.

축계의 재질은, 유연커플링 및 연결축은 합금강으로 밀도 $7,833 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수 206.5 MPa, 프와송 비 0.3 이고, 부양 송풍기 임펠러축은 스테인레스 강으로 밀도 $7,750 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수 206.5 MPa, 프와송 비 0.3 이다. 각 베어링의 모드 강성은 베어링 강성과 설치대의 강성이 직렬이 되도록 처리하여 베어링과 설치대의 강성을 합산하여 적용하였다.

기어 메시는 굽힘 강성을 유효하게 전달할 수 없는 것으로 가정하여 본 연구에서 대상으로 하는 추진 및 부양축계는 각 기어를 분리점으로 하여 전체 축계를 Table 1 및 다음과 같이 3개의 분리된 축계로 모델화 하였다.

- (1) 추진축계 (propeller shaft section)
- (2) 구동축계 (drive shaft section)
- (3) 부양축계 (lift fan shaft section)

Fig. 2는 추진 및 부양축계를 3차원으로 모델화하였고, 각 요소의 특성치는 각 장비 제작사에서 제시한 값을 이용하였다.

Table 1 Model of shaft section

| Shaft section | From | To |
|---------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | Propeller shafting | After end of propeller shaft |
| 2 | Drive shafting | Propulsion high speed gear |
| 3 | Lifting fan shafting | Lifting slow speed gear |

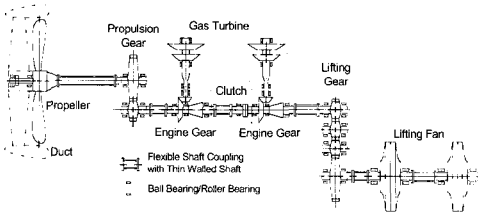


Fig. 1 Propulsion and lift system on ACV

3. 가진원 분석

공기부양선의 추진 및 부양계통은 고속으로 회전하는 탄성지지 된 탄성축계로 횡진동 가진원은 불평형, 정렬불량 등이 주 가진원이다^[5].

이 이외에 공기부양선은 운용 중 고속 선회 및 피칭과 같은 선체운동이 일어나므로, 축계 횡진동의 고유진동수에 영향을 끼치는 자이로스코픽 효과 외에도 고속의 선체운동에 의한 큰 자이로모멘트가 프로펠러 및 부양송풍기와 같은 큰 관성모멘트를 가지는 디스크에 작용하게 되며, 이에 따라 축계 시스템에 큰 횡진동 진폭이 유기된다. 따라서 각 가진원에 대한 공진을 확인하기 위하여 모드해석을 수행하며 선체 운동시 자이로모멘트에 의한 진동의 유해 여부를 검토하기 위하여 강제진동해석을 수행한다.

4. 해석결과 및 검토

4.1 추진축계

추진축계의 모드해석 결과, Table 2는 첫 4개의 모드에 대하여 최대 작동 축회전수에서 자이로스코픽 효과를 고려한 경우 및 고려하지 않은 경우의 고유진동수를 보여주고 있으며, 공진모드는 Fig. 3의 캠벨 선도에서 알 수 있듯이 다음과 같다.

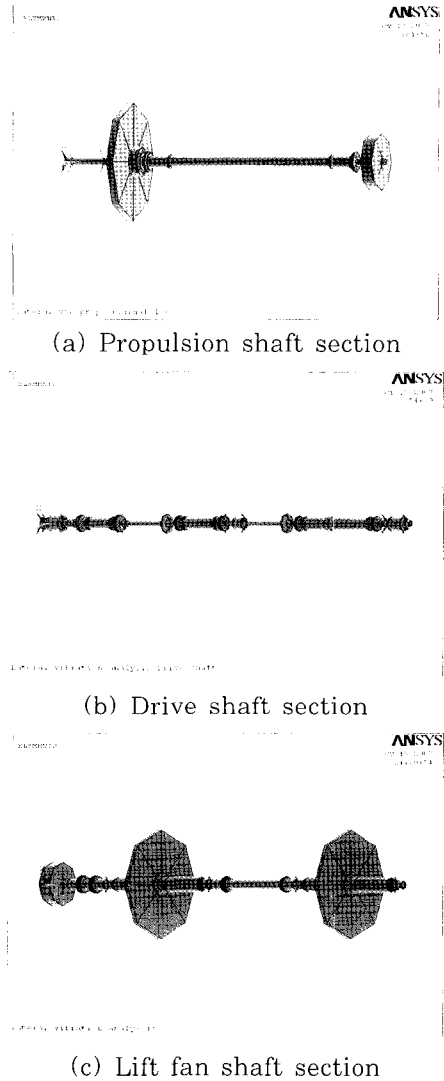


Fig. 2 Model of propulsion and lift shafting

- ▷ 1차 모드 : 고유진동수 1차 후향휘둘림 모드가 축 작동회전수 범위 내 위치하여 공진.

Table 2 Natural frequency of propeller shaft section

| Mode (order) | Natural frequency [Hz] | | |
|--------------|---------------------------|---|------|
| | Without gyroscopic effect | With gyroscopic effect(at max. shaft speed) | |
| 1st | Reverse | 22.5 | 20.3 |
| | Forward | 28.7 | 30.8 |
| 2nd | Reverse | 42.7 | 42.2 |
| | Forward | 43.8 | 44.9 |

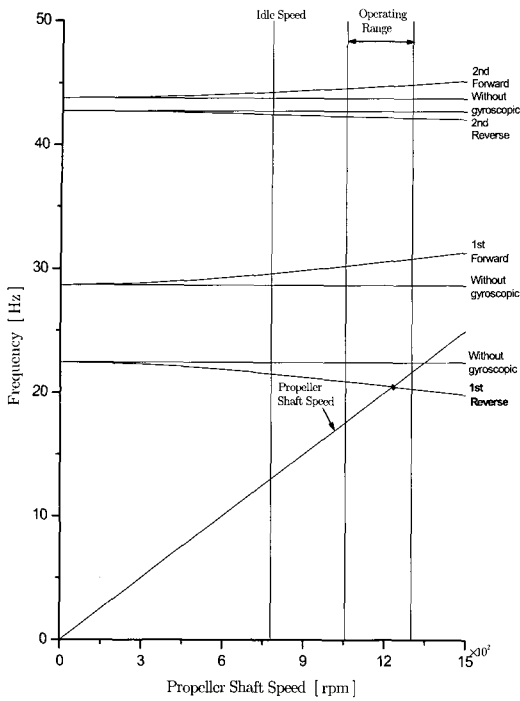


Fig. 3 Campbell diagram of propeller shaft excitation

1차 모드 형상은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 프로펠러 질량으로 인해 축의 유연 커플링에서 최대 진폭이 발생한다.

축 작동회전수 범위내에 위치하여 공진하는 1차 모드의 유해여부를 판단하기 위하여 강제진동해석을 수행하며, 유해할 경우 축계 구성요소의 변경을 수행하여 진동을 제어 한다. 따라서 횡진동 가진원 중 다음과 같은 불평형력이 가해졌을 때 조화진동 해석을 수행한다.

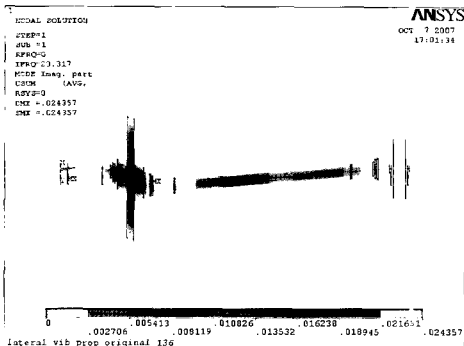


Fig. 4 Mode shapes of propeller shaft (20.3 Hz)

▷ 프로펠러에 ISO 1940-1:2003^[14]에 따른 균형도 등급 G6.3의 잔류 불평형 질량이 추가되었을 때의 조화진동 해석

잔류 불평형 질량이 축에 추가되었을 때 축계는 회전대칭이 되지 못하며 회전체의 무게 중심은 회전축으로부터 e 만큼 편심되어 있고 이에 따라 크기 $F = me\omega^2$ 의 원심력이 발생하고 이 힘이 외력으로 작용한다. 불평형력의 크기는 편심과 질량의 곱 $U = me$ 이다. 여기서, 균형도 등급, $G = \frac{U}{1000M} \times \omega$, U : 허용 잔류 불평형, M : 회전체 질량, ω : 회전체의 회전속도이다.

Fig. 5는 G6.3의 불평형 질량이 추가되었을 때의 조화진동 해석결과이며, 축계 운전 범위 내에 공진점에서 진폭은 0.087 mm (11.10 mm/s)로 FAA 프로펠러 밸런싱 기준치^[12] 0.25IPS(6.35 mm/s)를 초과하게 된다.

또한 공기부양선은 고속 선회 및 피칭과 같은 선체 운동이 일어나고 이때 축계에는 높은 자이로모멘트가 가해져 큰 진폭의 횡진동이 발생한다. 선체 종동요시 축이 ω 로 회전하고 선체가 Ω 의 각속도로 회전할 경우 축에 $H = I_p\omega$ 의 각운동량이 존재하고, 축계에는 자이로모멘트 $M_g = I_p\Omega\omega$ 가 추가되므로 이에 대한 강제진동해석을 다음과 같이 수행하였다.

▷ 공기부양선 선체의 피칭 및 선회율, 0.5 rad/s⁽⁴⁾ 시 자이로모멘트를 축계에 가할 때 강제진동 해석

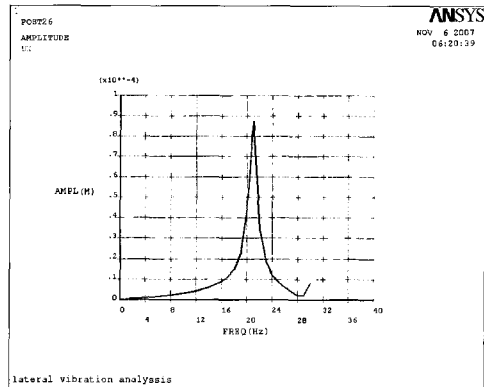


Fig. 5 Results of harmonic analysis of propeller shaft(G6.3 unbalanced)

Fig. 6은 이에 대한 해석결과로 프로펠러 지점에서의 공진진폭은 2.94mm(373mm/s)로 불평형에 따른 강제 진동 진폭에 비하여 크게 증가하여 축계손상을 초래할 것으로 판단된다. 따라서 축계의 구성요소를 변경하여 공진점을 축계의 작동범위 밖으로 변경하는 것이 필요하다.

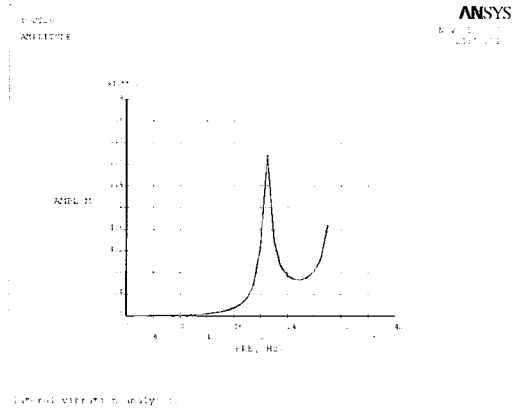


Fig. 6 Results of harmonic analysis of propeller shaft (yawing and pitching of craft)

축계의 고유진동수를 축의 최대 운전 회전수보다 15%^[13] 이상의 분리 여유를 가지도록 증가시키는 것을 목표로 하여 다음과 같은 요소를 변경하여야 한다.

- 축계 질량 감소, 특히 프로펠러 질량 감소
- 축의 강성 증가
- 축의 지지 강성 증가

축계의 질량 감소의 경우 축의 질량을 감소시키기 위해서는 축경의 감소 또는 축의 두께를 감소시켜야 하므로 축의 강성 감소로 직접 연관되어 적용이 불가하며 프로펠러의 중량변경은 프로펠러의 설계상 불가하므로 고려하지 않는다. 따라서 축의 강성의 증가 또는 축의 지지강성의 증가만을 고려한다.

축의 강성을 증가시키기 위해서 유연커플링의 강성을 변경하는 방법을 1차적으로 적용한다. Fig. 7은 유연커플링의 강성을 200배까지 증가시켰을 때 축계의 고유진동수 증가를 표시한 것으로, 축계의 고유진동수 1차 모드가 축의 최대작동 회전수보다 15% 이상의 여유를 갖기 위해서는

기존 유연커플링 강성에서 150 배 이상의 강성 증가가 필요하다.

그러나 유연커플링의 강성을 지나치게 증가시킬 경우 유연커플링의 기능을 상실하여 축계 배치에 문제가 발생하므로, 유연커플링의 강성 증가와 병행하여 축의 강성을 증가(축 지름의 변경)시키는 방법을 적용한다.

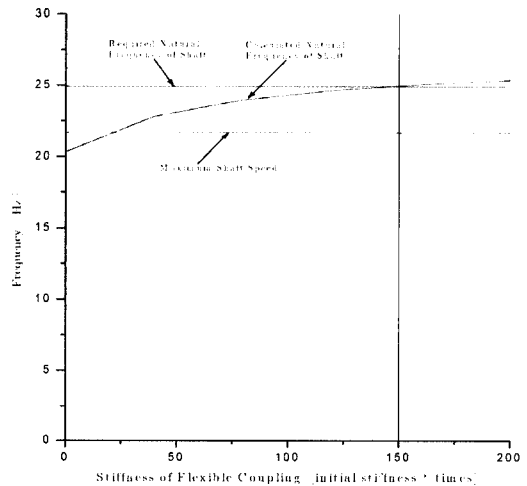


Fig. 7 Natural frequency vs. stiffness of flexible coupling

Fig. 8는 축경을 1.7배 증가시킨 후, 유연커플링의 강성을 증가시킬 경우의 축계 모델이며, Fig. 9는 유연커플링의 강성을 80배까지 증가시킬 때 축계의 고유진동수 증가를 표시한 것으로, 축계의 고유진동수 1차 모드가 축의 최대작동 회전수보다 15% 이상의 여유를 갖기 위해서는 기존 유연커플링보다 68배 이상의 강성 증가만 필요하게 된다. 따라서 축경 및 유연커플링의 강성을 동시에 증가시켜 진동을 제어한다. Fig. 10은 변경된 축경과 유연커플링 강성을 적용했을 때의 1차 모드에 대한 모드형상이다.

축의 지지강성을 증가시켜 축계의 고유진동수를 변경하는 경우 Fig. 4의 모드형상에서 축계에 직접적으로 영향을 주는 축의 지지강성은 프로펠러축의 베어링 및 베어링 지지대 강성의 조합으로 지지강성을 증가시키기 위해서는 베어링 지지대 강성을 증가시켜야 한다.

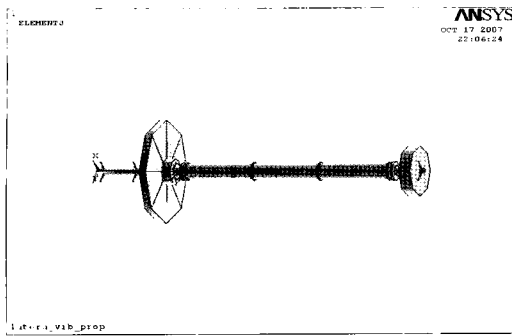


Fig. 8 Model of propulsion shaft section (Increasing shaft diameter)

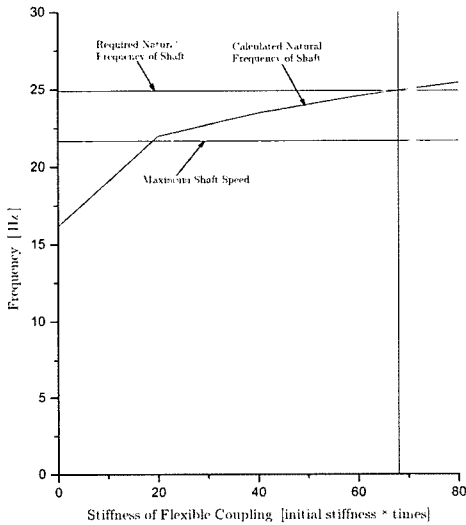


Fig. 9 Natural frequency vs. stiffness of flexible coupling (increasing shaft diameter)

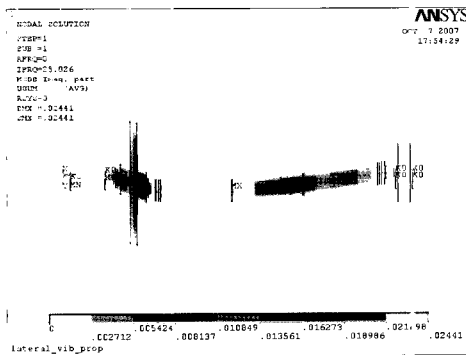


Fig. 10 Mode shapes of propeller shaft (25.026 Hz, increasing shaft diameter and flexible coupling)

베어링의 지지대는 Fig. 12 와 같은 프로펠러 덕트의 형상으로 되어 있으며, Fig. 11 은 지지대 강성의 변화에 따른 고유진동수 변화를 나타낸다. Fig. 11 에서 고유진동수 1차 모드가 축의 최대작동 회전수 보다 15% 이상의 여유율을 갖기 위해서는 기존 지지대보다 5.8배 이상의 강성이 필요하다.

그러나 Fig. 12 의 프로펠러 덕트 강성해석 모델에서 보는 바와 같이 덕트는 구조적으로 성능 및 중량을 유지하며 지지대 강성을 증가시키는 것은 매우 곤란하며, 더구나 5.8배의 강성을 증가시키는 불가능하다고 판단된다. 따라서 지지대 강성의 증가에 의한 축계 고유진동수의 증가방법은 타당하지 않다.

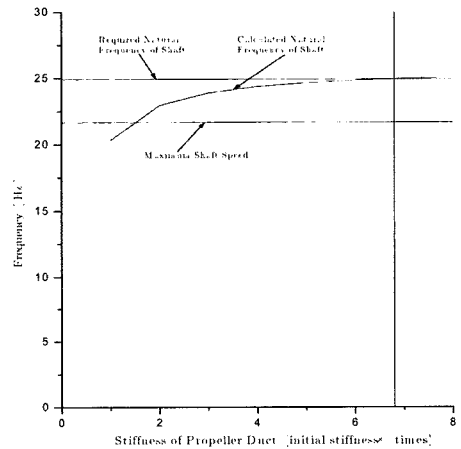


Fig. 11 Natural frequency vs. stiffness of propeller bearing supports (duct strut)

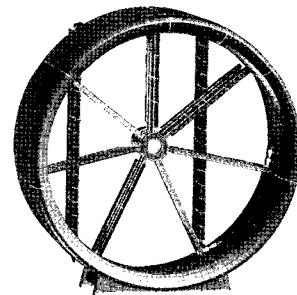
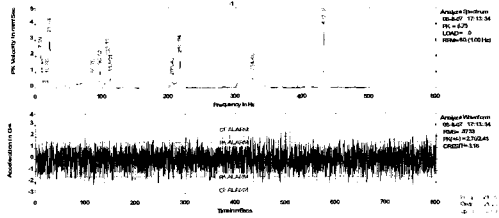


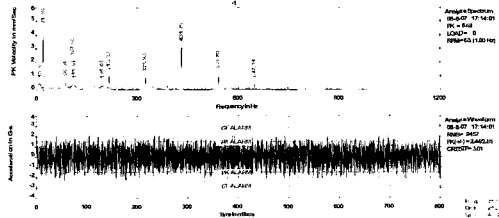
Fig. 12 Model for stiffness analysis of propeller duct

Fig. 13 은 실제 운용시 프로펠러 부분의 진동을 계측한 값이다. 프로펠러 최대회전수에서 계측한 값

은 수직방향, 축회전수 1차 주파수에서 4.4mm/s로 FAA 프로펠러 진동기준치 0.25IPS(=6.35mm/s)를 초과하지 않은 양호한 값으로 진동제어가 적절하였음을 보여준다.



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 13 Results of lateral vibration measurement (propeller section @1300 rpm, MCR 100%)

4.2 구동축계

구동축계 해석결과에서 축계 1차 회전수 성분과의 공진을 검토한다. Table 3은 진동해석 결과중 첫 2개의 모드를 나타낸 것이며 Fig. 14의 캠벨 선도에서 알 수 있듯이 운전영역에서 공진 모드는 나타나지 않는다.

Table 3 Natural frequency of drive shaft section

| Mode (order) | | Natural frequency [Hz] | |
|--------------|---------|---------------------------|--|
| | | Without gyroscopic effect | With gyroscopic effect (at max. shaft speed) |
| 1st | Reverse | 31.7 | 28.4 |
| | Forward | | 37.6 |
| 2nd | Reverse | 158.4 | 154.4 |
| | Forward | | 162.4 |

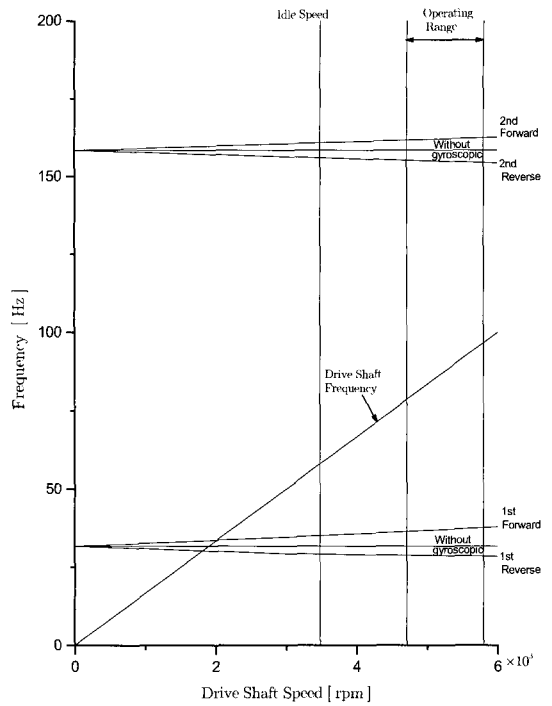


Fig. 14 Campbell diagram of drive shaft excitation

4.3 부양축계

부양축계를 모델화하여 진동해석을 수행하여 첫 2개의 모드에 대해 Table 4에 목록화 하고 Fig. 15와 같이 캠벨 선도에서 공진유무를 도시하였다. 캠벨 선도에서 보는 바와 같이 1차 모드가 최대 축회전수에 근접되어 있으므로 축계의 유연 커플링 강성을 변경하여 축계의 1차 고유진동수를 증가시켜 분리여유를 15% 이상 확보하도록 한다.

Table 4 Natural frequency of lift fan shaft section

| Mode (order) | | Natural frequency [Hz] | |
|--------------|---------|---------------------------|--|
| | | Without gyroscopic effect | With gyroscopic effect (at max. shaft speed) |
| 1st | Reverse | 37.4 | 29.8 |
| | Forward | | 48.7 |
| 2nd | Reverse | 101.2 | 99.5 |
| | Forward | | 103.1 |

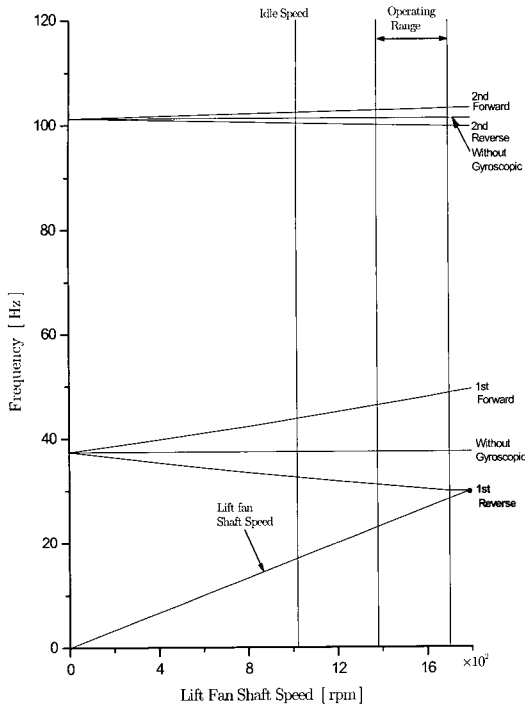


Fig. 15 Campbell diagram of lift fan shaft excitation

4. 결 론

본 연구에서는 공기부양선 유연탄성축계의 비감쇠 자유 횡진동 해석을 수행하여 자이로스코픽 효과에 의한 고유진동수 변화를 검토하였다. 또한 공진하는 횡 고유진동수에 대하여 강제진동해석을 수행하여 선체가 고속회전 및 피칭하는 경우 축에 추가되는 자이로모멘트에 의한 공진의 유해여부를 파악하였고, 공진점 회피를 위한 축설계 변경을 검토하였다. 이에 대한 해석은 상용 프로그램인 ANSYS code를 이용하여 수행하였다.

이상으로 추진 및 부양 축계에 있어서 횡진동에 대한 진동특성 및 진동제어를 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축계를 집중질량계로 3개의 모델로 구분하여 모델링하여 횡진동 해석을 수행하였으며, 각 해석결과 자이로스코픽 효과가 고유진동수에 큰 영향을 주는 것을 확인하였는데 이는 고속으로 회전하는 공기부양선의 축계 진동해석에 주요 고려사항임을 확인하였다.

- (2) 고속으로 회전 및 피칭하는 공기부양선의 축계에는 선체 운동에 의한 자이로모멘트가 추가되어 운전영역 내에 고유진동수가 존재할 경우 진폭이 과대하여 유해한 진동을 유발하므로 고유진동수가 운전영역에 존재하지 않도록 제어가 필요하다.
- (3) 고유진동수 제어에 가장 효과적인 방법은 축 유연커플링 및 축의 강성을 동시에 변화시키는 방법을 적용하는 것이다.

참고문헌

- [1] 손선태, 김정렬, “공기부양선의 추진 및 부양축계 비틀림 진동 해석 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 4호, pp. 335 ~ 342, 2007.
- [2] 손선태, 김병래, 김정렬, “공기부양선의 추진 및 부양축계 종진동 해석 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 6호, pp. 768~ 776, 2007.
- [3] J. S. Rao, “Rotor Dynamics”, John Wiley & Sons Inc, 1983.
- [4] G. H. Elsley, A. J. Devereux, “Hovercraft Design and Construction”, David & Charles Newton Abbot, 1968.
- [5] Liang Yun, Alan Bliault, “Theory and Design of Air Cushion Craft”, John Wiley & Sons Inc. 2000.
- [6] Den Hartog, “Mechanical vibrations” New York: McGraw-Hill, 1956.
- [7] 송승훈 “산업용 송풍기의 진동저감에 관한 연구”, 한국소음진동학회 1999년도 추계 학술대회 논문집, pp. 492 ~ 497, 1999.
- [8] 전효중, 이돈출, “추진축계 진동론”, 다듬출판사, 2003.
- [9] 한국기계연구소, “공기부양정의 소음해석 및 진동소음 계측”, 1989.
- [10] 전효중, 박용남, 박현호 “선박추진축계 종진동 및 횡진동의 전산프로그램개발에 관한 연구”, 한국박용기관학회, 1986.

- [11] Y.Kang, Y.-P. Chang, J.-W. Tsai, L.-H. Mu, Y.-F. Chang, "An Investigation in Stiffness Effects on Dynamics of Rotor-Bearing-Foundation Systems", Journal of sound and vibration (2000) 231(2), pp 343-347.
- [12] TEC Aviation Division "Guide to Propeller Balancing", 1996.
- [13] MIL-STD-167-2, "Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment." Department of the Navy, Naval Ship Systems Command, 1974.
- [14] ISO 1940/1, "Balance Quality Requirements of Rigid Rotors." International Organization for Standardization, 2003.



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.

저 자 소 개



손선태(孫善太)

1958년 5월생, 2002년 선박기계기술사, 2008년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 졸업(공학박사), 1983년 1월~현재 (주)한진중공업 특수선개발팀 부장



길병래(吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 대학원 기계공학과(공학박사수료), 1996년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 정회원. 관심분야 : 프로세스 제어



조권회(趙權回)

1979. 2. 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 1979-1996. 라스코해운, 현대상선 기관장, 조선감독, 1999. 2. 부경대학교 제어기계공학과(공학석사), 2001. 2. 부경대학교 제어기계공학과 박사과정 수료, 2007. 3 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수