

G/T 250톤 양방향 차도선 축계의 동특성에 관한 고찰

강병모* · 오영철**† · 배동균*** · 서광철**** · 고재용****

*, ** 목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과, *** (주)한국종합설계 부설연구소,

**** 목포해양대학교 해양공과대학 조선해양공학과

A Study on Shaft Dynamic Characteristic for G/T 250TON Double-Ended Car-Ferry

Byoung-Mo Kang* · Young-Cheol Oh**† · Dong-Gyun Bae*** · Kwang-Cheol Seo**** · Jae-Yong Ko****

*, ** Dep. of Ocean System Engineering, Graduate School, MMU, Mokpo 530-729, Korea

*** Annex Research Institute of Korea Consolidation Design Co., Ltd, Korea

**** Dep. of Naval Architecture & Ocean Engineering, College of Marine Technology, MMU, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 육지와 도서를 연결하는 차도선은 교통수단 기능과 물자수송을 담당하는 중요한 역할을 하고 있다. 이에 따라 차도선의 효율성 증대와 안전성 향상 및 경제적 요건 등을 고려한 선박이 개발 중이다. 유럽에서는 승객의 편의성 및 경제성을 고려하여 양방향 차도선(Double-ended Car Ferry)의 개발이 활발히 진행 중이며 국내에서도 이에 대한 연구 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 차도선 제작 시 축계의 제작 및 강도의 문제를 Campbell Diagram 및 Modal 해석을 통한 동특성 분석을 하였다. 이를 통하여 양방향 차도선의 추진 방향 및 후진 방향 축계 작동 시 공진 현상 및 위험속도를 분석 결과 안정성을 보인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 양방향차도선, 축계, 동특성, 캠벨다이아그램, 모달해석

Abstract : The car ferry operating between the mainland and the island plays an important role on transportation of goods and passengers. Therefore, the improvement of efficiency and safety as well as economic factor are importantly considered in the development process of car ferry. Double-ended car ferry is already popularized because of its economic feasibility and convenience for passenger in Europe and developed countries, and the demand is booming in domestic. In this paper, dynamic characteristics of propeller shaft and strength in double-ended car ferry are analyzed using campbell diagram and modal analysis. Based on the analysis of dynamic characteristics, resonant phenomenon and critical speed are stable when occurring the propeller shaft vibration due to forward and reverse propeller shaft working.

Key Words : Double-ended Car-Ferry, Shaft, Dynamic characteristic, Campbell diagram, Modal Analysis

1. 서 론

최근 주 5일 근무 확산으로 인하여 소규모 여행이 증가하는 추세에 있으며, 또한 이색 여행지 선호로 인한 도서간의 여행이 증가하는 추세에 있다. 이러한 도서간의 여행시 차도선의 이용이 증가하는 추세에 있으며 이러한 추세에 맞추어 조선업계에서는 이용자의 편의성을 고려한 선박의 생산 및 개발에 힘쓰고 있다. 하지만 이러한 증가 추세에 맞추어

차도선의 인명 사고 또한 증가하는 추세에 있다. 이러한 인명 사고의 원인중 하나인 차도선 내의 후진주차로 인한 사고 발생으로 양방향 차도선의 필요성이 대두 되고 있는 실정이다. 또한 도서간의 이동거리가 짧은 서남 해안권에서는 후진운행으로 인한 연료 효율이 떨어지는 실정이다. 이러한 실정에 맞추어 유럽 및 선진국에서는 양방향 차도선의 보편화로 인한 이용객들의 편의성을 확보 및 운영 비용 절감을 통한 효과와 미적 아름다움을 가지고 있다. 하지만 이러한 양방향 차도선은 높은 건조 비용 인한 국내 도입이 어려운 실정에 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 양방향 차도선의 국내화 추진이다. 이러한 연구 목적에 맞추어 양방향 차

* First Author : boomkang@naver.com, 061-240-7476

† Corresponding Author : yochoh@mmu.ac.kr, 061-240-7476

도선의 유한요소해석(F.E.M)을 통하여 선박의 구조체가 제 기능을 발휘 못하는 상태, 즉 최종한계상태와 구조기능 저하로 사용상 부적합한 상태(균열, 처짐, 진동 등)가 되는 사용한계상태를 고려하여 안정성에 중점을 두고 이와 같은 축 처짐의 발생을 피하고 구조물의 종류, 사용목적, 하중의 종류 등을 고려하여 최종한계상태를 규정하여 제반 영향을 주는 처짐 또는 그 외의 변형이 일어나지 않도록 충분한 강성이 확보하여 선박제작의 기간 단축 및 공정단축을 목적으로 한다. 본 논문에서는 선박의 양방향추진 축계에 대한 최종한계상태에서의 강도 유지와 진동 및 운동성 특성을 고려하여 차량운반선의 축계의 구조설계 및 동특성 분석을 통하여 축계 제작의 전문성 및 제작 기간의 단축 및 효율성 증대와 안정성을 확보하여 서·남해안의 중·소형 조선소의 경쟁력을 확보하는데 목적으로 한다.

2. 연구 배경 및 대상 선박

2.1 연구 배경 및 동향

현재 우리나라의 총 도서 수는 31,399개 중 유인도서 470개로 여객선이 취항하는 도서는 287개이며, 180여개의 여객선이 운항하지 않는 도서는 운항거리가 비교적 단거리일 경우, 차도선(CAR-FERRY)이 운항하고 있다. 그밖에도 지방자치단체의 행정선이 도서민의 교통편의를 제공하고 있다. 그중, 2마일 미만의 비교적 단거리 항로에는 130여척의 차도선이 운항하고 있으나 대부분 어선 또는 마을공동 소유 선박을 이용하여 섬, 육지를 왕래하고 있는 실정이다. 특히, 도서이나 유선업은 선박기술이 발달되지 못한 시대에 연안여객선의 취항이 수익성을 확보할 수 없는 소규모 항로에 연안여객 항로의 보조항로로서 시작된 사업영역이었으나 선박기술의 발달과 해양관광·레저 활동의 증가로 연안여객의 수요구조가 바뀌면서 새로운 연안여객시장으로 성장하고 있다. Fig. 1과 같이 대부분의 화객선은 100~500톤급이 주종을 이루고 있다. 이러한 차도선 들은 정박 및 출항 시 운용(Operating)비용이 많이 발생하고 있으며 사용 시 불편함을 보이고 있다. 이와 같은 문제점을 선진국들은 양방향 차도선을 활용함으로써 문제를 해결하고 있다. Fig. 2는 선진국의 대표적 양방향 차도선 사례이며 핀란드, 스웨덴 노르웨이 덴마크 등 북유럽 국가에서 대체적으로 사용하고 있다.

연안해운 통계에 따르면 Fig. 3과 같이 1시간에서 2시간미만의 짧은 거리 및 1시간미만의 평수 구역을 주로 운영 하는 것으로 파악 되었다. 이와 같이 연안 해안을 주로 운송 시에 접안 및 출항에 많은 운용비용이 산출 되며 이와 같은 문제로 양방향 차도선의 장점은 운용비용 감소 및 단시간 운용 시 운용 효율을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

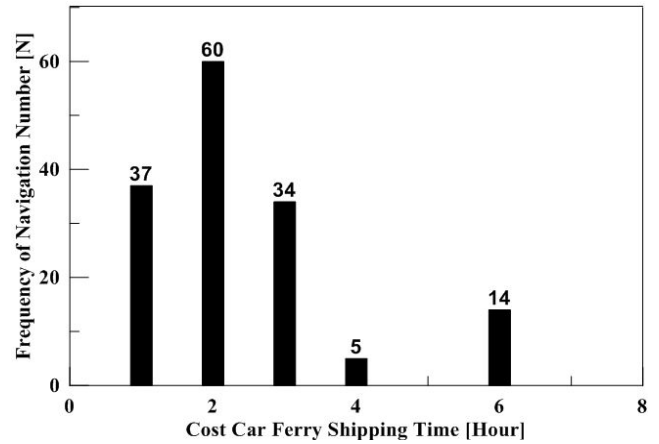


Fig. 1. Status of Specific-ton Cargo Ferry & Ship.



Fig. 2. Oversea Typical Double Ended Car Ferry Case.

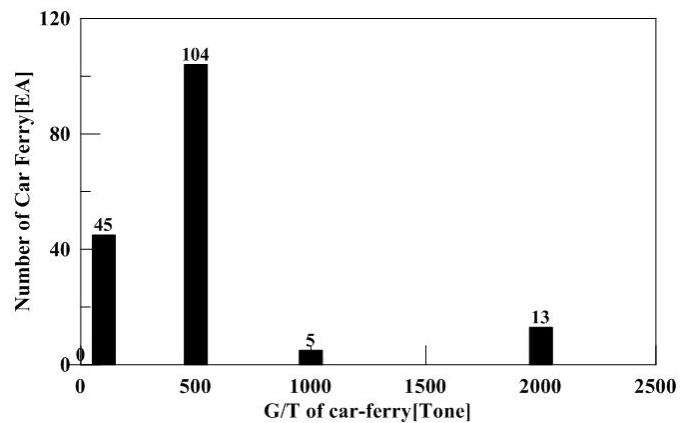


Fig. 3. Status of Navigation Time Cargo Ferry & Ship. [2013 Costal Shipping Statistics Course & Lead Time]

또한 지난 한해 연안 여객선 이용수가 1600만명을 넘어 사상 최고치를 기록했으며(해양수산부 연안 해운과 보도자료) 이와 같은 운영시간 및 증가하는 해상운송 수요에 따른 양방향 차도선의 개발이 필요한 실정이다.

선진국에서 및 국내 연구동향은 다음과 같다(Minchev, 2011). 선진국의 자본력을 바탕으로 한 덕트 프로펠러를 활용한 추진 체계를 일반적으로 사용하고 있으며 그에 대한 연구는 CFD를 활용한 선체 끝면부터 중간부 까지 형상에 대한 저항 측정 및

유체 흐름에 대한 연구를 하고 있다. 국내 연구 동향은 Lee et al.(2010)가 추진축계 정렬 프로그램 개발 및 신뢰성 평가에 대한 연구를 하였다. Kim et al.(2012)은 프로펠러 날개 및 중간축 설계 하중에 대한 특수선의 추진축 설계를 연구 하였다. 또한 Ha et al.(2014)는 선박 추진축계의 동특성 프로그램을 개발하여 단일 추진 축계에서 사용할 수 있는 프로그램을 개발 하였다. 이와 같이 국내·외에서 단일 추진 축계 및 덕트 프로펠러를 활용한 추진축계 해석을 실시하였으나 양방향 카페리선의 해석 절차는 미비한 실정이다.

2.2 대상 선박 및 연구모델

양방향 차도선의 예상 선형 및 구조 형상은 Fig. 4와 같으며 이와 같은 양방향 차도선의 제작 시 축계의 제작 및 강도의 문제가 발생 할 수 있으며 이러한 선박의 개발에 앞서 다음과 같은 모형 및 선형 설계를 반영 하여 축계 해석을 실시 하였다.

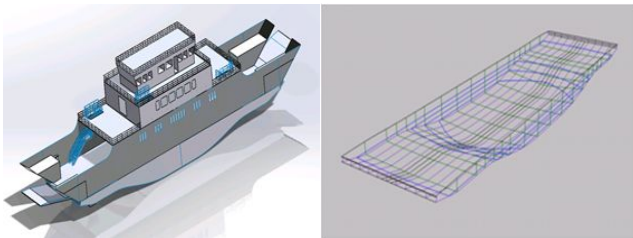


Fig. 4. Double Ended Car Ferry Predict Model.

Table 1. Double Ended Car Ferry Principal Dimension

Length O. A	49.000 M
Length B. P	27.000 M
Breadth Mould	10.000 M
Depth Mould	2.850 M
D.W.L.	2.000 M
Camber	0.080 M
Gross Tonnage	250 Ton
Crew	3 People
Passenger	92 People
Car	16
Navigation Area	Sea Water
Voyage Time	30 M
Voyage Schedule Time	1.5 Hour Under

항해 시간 및 구역은 양방향 차도선이 강점을 내세울 수 있는 1~2시간 사이의 구역을 설정 하였으며 이에 따른 양방향차도선의 축계 해석 모델을 선정 하였다

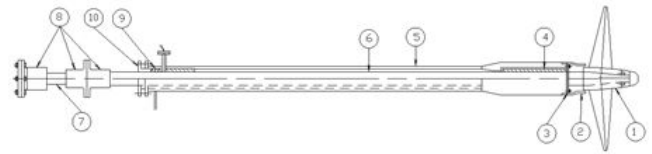


Fig. 5. Double Ended Car Ferry Shaft Model.

연구 모델은 Fig. 5와 같으며 해석 수행을 위한 순정 작업 및 정렬 작업을 시행 하였다(Choung et al., 2005). 또한 각 부재의 물성을 반영하여 데이터를 산출 하였으며 Table 2와 같은 각각의 부재에 맞는 물성 및 특성을 반영 하였다. 이와 같이 유한요소 해석 수행에 있어 양방향 차도선의 축계에 대한 분석을 하였으며, 이와 같은 부재 및 물성에 맞추어 Rule에서 정한 데이터를 기준으로 한 기준을 잡았으며 이에 대한 각각의 범위를 주어 해석을 수행 한다.

Table 2. Double Ended Car Ferry Shaft Material Properties

	DESCRIPTION	Material
1	PROPELLER WITH CAP	ALBC3
2	ROPE GUARD	STEEL
3	BEARING STOPPER	HBSC1
4	BEARING	LIGNUMVIATE
5	STERN TUBE	SC+STPG
6	PROPELLER SHAFT	STS304
7	INTER SHAFT	SF45
8	COUPLING	SF45
9	PACKING	COTTON
10	PACKING GLAND	HBSC1

3. 축계허용 응력 선정

양방향 차도선의 1차 지지부에 대한 강도 평가를 위해 축계의 비틀림 진동에 대한 한국선급에서 지정한 선급기술규칙을 적용한 선박의 중간축 추력축 프로펠러축 및 선미관축에 작용하는 허용 비틀림 진동응력 및 두께는 다음의 규정에 따른다. 중간축 및 추력축의 두께는 다음 식(1)~식(4)의 계산 값 이상이어야 한다(Korea Register of shipping, Machinery Installations, 2013). 이와 같은 선급의 Rule을 기준으로 축계의 비틀림 진동 응력에 대한 산출 값을 적용하였으며 추출된 데이터를 기준으로 해석 범위를 설정한다. 축계는 기본적으로 외팔보와 같은 개념을 가진다고 계산하여 축계 처짐 및 축계 회전시 응력 발생 부위에 대한 강도 강화를 위하여 두께 산정을 한다. 식(1)~(4)에서 나온 계산 데이터를 산정하여 기준 값으로 선정 한다(Han and Suh, 1980).

$$d_0 = F \times K_1 \sqrt[3]{\frac{P}{n} \times \frac{560}{(T+160)}} \text{ (mm)} \quad (1)$$

P : 기관의 연속최대출력시의 축 출력 (kw)
 n : 축의 연속최대출력시의 회전수 (Rpm)

$$d_p = 100 \times K_2 \sqrt[3]{\frac{P}{n} \times \frac{560}{(T+160)}} \text{ (mm)} \quad (2)$$

d_p : 선미관축의 지름

허용 비틀림 진동 응력은 다음과 같다.

$$\tau_1 = \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d (3 - 2\lambda^2) \quad (3)$$

(단, $0 \leq \lambda \leq 0.9$)

$$\tau_1 = 1.38 \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d \quad (4)$$

(단, $0.9 \leq \lambda \leq 1.05$)

τ_1 : 기관을 연속 사용하는 경우의 비틀림 진동 응력의 허용한도(N/mm^2)

λ : 사용회전수와 연속최대회전수와의 비

T_s : 축 재료의 규격최소인장강도 (N/mm^2)

C_k : 축의 종류 및 모양에 관한 계수

한국선급기술 규칙 2013에 의한 최소 추력축 직경 88.49 mm, 프로펠러 직경 113.27 mm과 같이 산정 되었다.

4. 해석 모델 및 하중 선정

양방향 축계의 도면 및 경계조건을 Fig. 6에 나타내었다. 축계는 inter shaft, propeller shaft, stern tube, bearing 등으로 이루어져 있다. 하중선정은 베어링 반력을 위치에 산정 하였으며 해수 유입에 대한 부력 하중을 산정 하였다. Table 1은 재료의 성질을 나타내었으며, 베어링 요소인 COMBI214를 적용하여 베어링 감쇠를 적용하였다. 또한 유한 요소 모델은 소성 탄성체, 응력보강, 처짐 대변형, 비압축성, 탄소성 재료변형, 비압축성 고탄성 재료에 적합한 SOLID187을 사용하였다(Lalanne and Ferraris, 1990). 이를 회전속도, 재료의 두께에 따른 범위로 나누어 해석을 실시한다. 회전속도는 100%~70%로 나누며, Shaft 두께는 KR Rule에서 정한 값을 기준으로 다음과 같이 해석을 실시하였다.

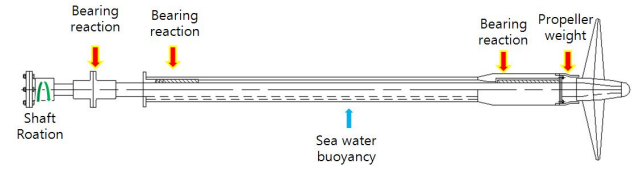


Fig. 6. Double Ended Car Ferry Boundary condition.

유한요소 모델의 노드(Node)수는 3,007,119개의 모델을 가지며 요소(Element)수는 1,988,447의 요소를 가지며 수행한다. 이를 Table 1에 따른 물성을 Table 3과 같이 적용하여 해석을 수행한다.

Table 3. Material Properties

Mat.	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness
SF45	693	400	26.2	160
SUS304	620	330	70	85
HBsC1	430	150	10	100
STPG	412	245	25	40

5. 해석 결과

5.1 축 처짐 해석 결과

축처짐의 일반적인 베어링 반력에 의한 해석 결과는 Fig. 7~Fig. 8에 나타난 일반적형태의 축 처짐으로 관찰 되었으며 이를 응력 집중 현상이 Inter Shaft에 집중적으로 나타난 것으로 관찰 되었다.

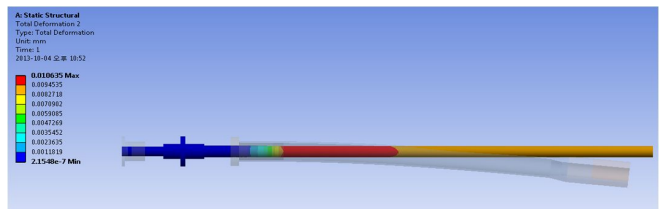


Fig. 7. Analysis result Displacement Inter shaft.

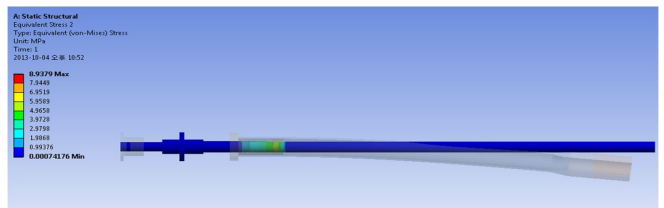


Fig. 8. Analysis result for Equivalent Inter shaft.

G/T 250톤 양방향 차도선 축계의 동특성에 관한 고찰

이러한 결과를 바탕으로 각 출력별 해석을 수행 하였으며 수행 결과 Table 4와 같은 결과를 산출 할 수 있었다. 출력이 감소할수록 Inter Shaft의 등가응력 값이 증가하는 것을 볼 수 있었으며 이는 Inter Shaft와 Stern Tube, Coupling간 마찰 및 회전에 의한 진동의 영향으로 증가하는 것으로 사료 되었다. 또한 Shaft의 물성 관계상 Inter Shaft와 Coupling간의 마찰로 인한 Inter Shaft의 마모가 예상 되며 이에 따른 보완 조치가 필요하다고 생각하여 기존의 Rule에서 정한 Shaft보다 안전계수에 따른 추력축의 두께를 상향 조정하여 반영 할 필요가 있다고 생각한다.

Table 4. Output Different Analysis result

Output	Rpm	Equivalent Stress [MPa]	
		I	S
100 %	495.05	8.9379 MPa	19.173 MPa
90 %	445.54	8.9385 MPa	19.173 MPa
80 %	396.04	8.9391 MPa	19.173 MPa
70 %	346.54	8.8696 MPa	19.173 MPa

[I]= Inter shaft, [S]=Stern tube

한국선급의 Rule에 따른 축계의 안정성 검토를 위한 기준 직경 112.5 mm를 기준으로 다음과 같이 나누어 Critical Speed 및 고유 진동 수를 계산 하였다. 계산 결과는 Table 5와 같이 110 mm에서도 안정을 보이거나 Critical Speed 값이 592 Rpm에서 계속 되었다. 이러한 결과로 보아 선급에서 사용하는 Rule에 의거하여 양방향 차도선의 추력축을 제작함이 타당하다.

Table. 5 Inter Shaft Thickness Different Analysis result

Mode (mmΦ)	Whirl	Mode Stability	Critical Speed (Rpm)	Natural Frequency (Hz)
110	FW	STABLE	592.15	9.8691
110	BW	STABLE	592.17	9.8694
112.5	FW	STABLE	612.73	9.9289
112.5	BW	STABLE	612.76	9.9293
115	FW	STABLE	634.33	9.9388
115	BW	STABLE	634.36	9.9393
117.5	FW	STABLE	654.51	10.309
117.5	BW	STABLE	654.81	10.313

5.2 Campbell Diagram 해석

Shaft의 회전 속도 및 이에 따른 위험속도 분석을 하기 위하여 위험 임계속도(Critical Speed) 및 고유진동수 분석을 통한 Campbell Diagram 해석을 수행하였다. 위험속도선도는 위험속도를 해석하는 도구로써 이용되고 있으며, 공진 가능성을 조사하기 위해 일반적으로 이용되는 선도로는 캠벨선도(Campbell diagram)가 있다.

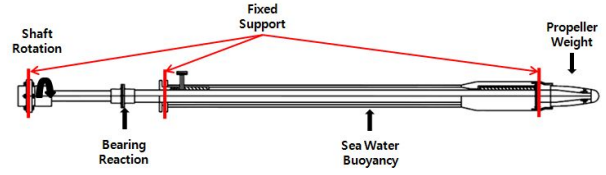


Fig. 9. Boundary Condition.

이는, 운전속도의 함수로 고유진동수를 나타낸 것이다. 이 선도에서는 가진력 주파수를 함께 나타내며, 가진력 주파수의 선은 좌표 원점으로부터 퍼지는 직선으로 표현된다. 회전속도는 가진 진동수를 나타내고, 불평형력과 같이 가진 진동수가 회전주파수가 된다(Hamdoon, 2009). 운전속도영역 내에서 가진력 주파수의 선과 고유진동수 가 교차하는 영역은 잠재적인 공진영역을 나타낸다. 경계조건 Fig. 9는 일반적인 단방향 샤프트와는 다르게 프로펠러 단면적에 의한 파력에 대한 외력을 진행 방향 반대 샤프트에서 고려할 필요성이 있다. 이와 같은 공진 영역 분석을 통한 추진 축계의 공진 현상을 분석 한다. Campbell Diagram 해석 결과는 Fig. 10과 같다.

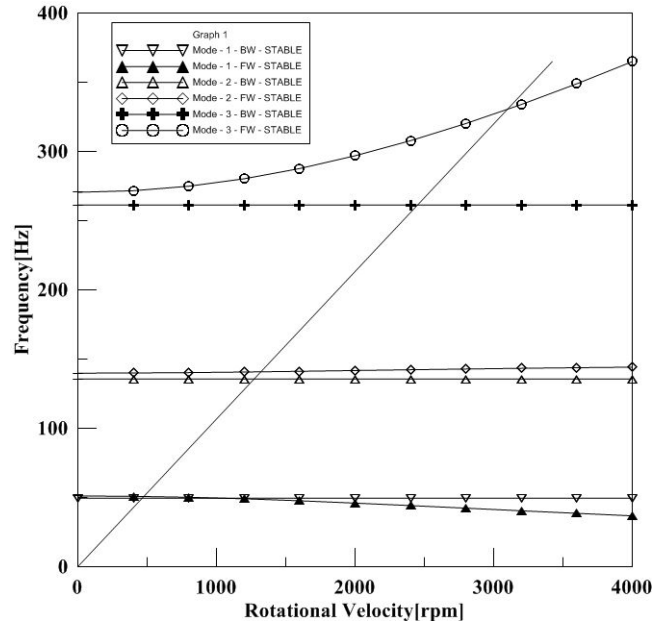


Fig. 10. Campbell Diagram.

Campbell Diagram 해석 결과를 바탕으로 1모드~3모드 형상을 Fig. 11~Fig. 16과 같이 나타내었다. 모드형상 분석을 통하여 극한 상태의 고유 주파수 추출 및 진동 운동의 특성에 따른 축 변형, 축 처짐, 축계의 변형 등 분석을 통한 추진 축계의 안전성 검토를 수행 하였다.

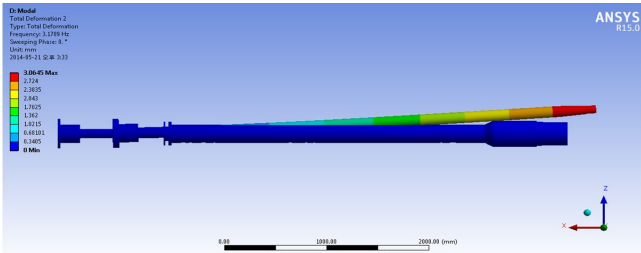


Fig. 11. 1 Mode Shape FW.

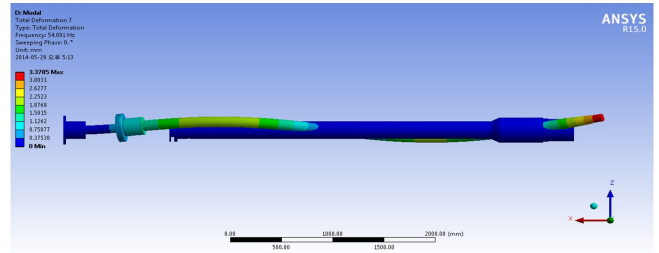


Fig. 16. 3 Mode Shape BW.

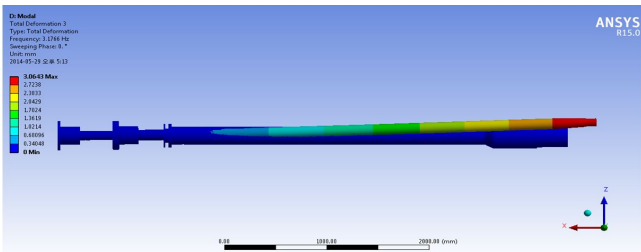


Fig. 12. 1 Mode Shape BW.

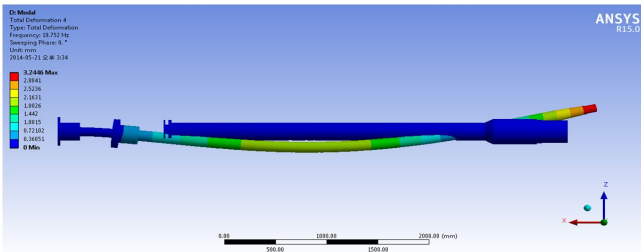


Fig. 13. 2 Mode Shape FW.

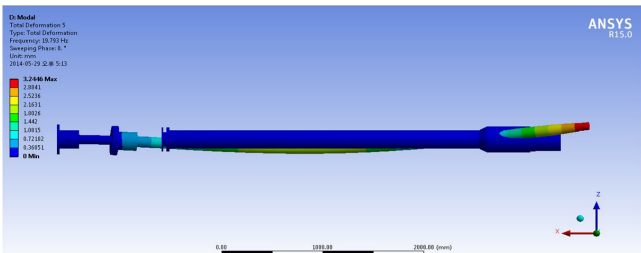


Fig. 14. 2 Mode Shape BW.

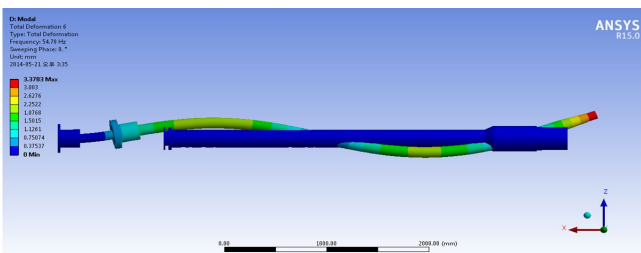


Fig. 15. 3 Mode Shape FW.

해석 범위는 0 Rpm-4000 Rpm까지 가속조건을 주어 다음과 같이 해석을 수행 하였다. 축계의 형상을 다음과 같이 1모드~3모드를 다음과 같이 추출하여 FW(Forward whirl), BW(Backward Whirl)로 나누어 총 6단계로 나누어 형상추출을 실시하였다 (Hong et al., 2012). 위의 Fig. 11~Fig. 16에서 나온 형상을 기반으로 이에 따른 Rpm 결과를 밑의 Table 6과 같이 산출 하였다. 일반적으로 구조물이 외부로부터 순간적인 하중을 받으면 진동하게 되는데 이때 구조물의 특성에 따라서 진동하는 형상 및 진동수가 결정된다. 이때 샤프트의 모양의 따라 진동수를 나타내며 가장 먼저 나타나는 형상을 1차 모드 즉, 1차 고유 진동수라 한다. 이후 진동수를 높여가며 형상을 2차 모드라고 한다. 일반적으로 진동 해석 수행 시 3차 모드까지 진행한다.

Table 6. Result of analysis of Campbell Diagram

Mode	Whirl Direction	Critical Speed	0. Rpm	2000. Rpm
1	BW	495 Rpm	49.514 Hz	49.514 Hz
2	FW	506 Rpm	51.062 Hz	36.712 Hz
3	BW	1355 Rpm	135.52 Hz	135.52 Hz
4	FW	1408 Rpm	139.79 Hz	144.13 Hz
5	BW	2613 Rpm	261.3 Hz	261.3 Hz
6	FW	3422 Rpm	270.48 Hz	364.86 Hz

5.3 주파수 응답해석

주파수 응답해석은 Rotor Dynamic의 회전 구조물의 거동 및 진단에 대한 응용 역학의 전문 분야이다. 일반적으로 회전체 구조물의 거동을 분석하는 데 사용된다. 가장 기본적인 수준 Rotor Dynamic에서 하나 이상의 기계 구조가 베어링에 의해 지지 된 단일 축을 중심으로 회전하는 내부 현상에 의해 영향에 관한 것이다. 지지 구조는 고정 자이라고 하며, 회전 속도는 진동의 진폭을 증가 시키며 종종 임계 속도(한계속도)를 통과한다. 이 진폭은 일반적으로 회전하는 구조의 불균형에 의해 발생된다. 이러한 위험 속도로 진동의 진폭이 이상적으로 클 경우에는 치명적인 결함이 발생한다. 축계는 부품의 구성에 따라 진동을 생성한다. 또한 축계 시스템의 작은 오류 및 오차로 인한 불균형(Unbalance) 현상이 올 수 있으며, 불균

G/T 250톤 양방향 차도선 축계의 동특성에 관한 고찰

형에 의한 기계 진동의 거동을 상세히 분석 검토 하여 설계 시 고려해야 한다. 또한 축계의 모든 부품은 각각의 구조에 따른 고유 진동수를 포함하고 있으며, 이러한 고유진동수가 회전속도의 진동수와 일치 할 때 기계의 오류 또는 결함이 생기며 이때 위험속도가 발생한다. 위험속도는 최초로 검출된 최저 속도를 첫 번째 위험 속도라 하며 속도가 올라가면서 추가적인 위험속도가 발생한다. 따라서 축계 회전 운동 시 불균형적인 불필요한 외력을 최소화 할 필요가 있으며, 이러한 작업들은 공진 현상을 줄여주는데 중요한 역할을 한다. 이러한 진동의 공진은 축계 설계 시 가장 중요한 분야이며 공진 현상이 발생할시 파괴적 에너지를 발생하여 축계의 손상이 끼친다. 이러한 현상들을 분석 및 파악 하고자 주파수 응답 특성 해석을 수행하였다. 이번 양방향 차도선의 축계의 주파수 응답해석은 출력 및 프로펠러 자중, 부력, 베어링 반력 등을 반영하여 이에 따른 진동수를 다음과 같이 응답상태 특성을 그래프 화 하여 공진 현상을 살펴보았다. Fig. 17에서는 일반적인 축 처짐 현상으로 인하여 총 변화 값이 프로펠러축 끝부분에서 가장 크게 일어나고 있음을 보이고 있다.

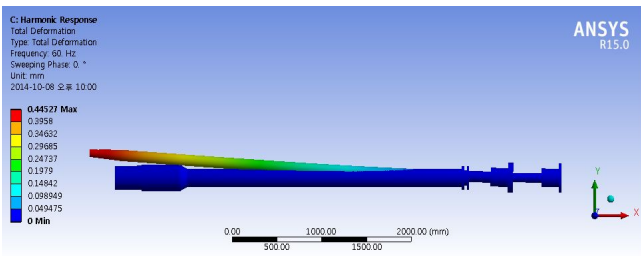


Fig. 17. Harmonic Response Total Deformation - 1Mode.

하지만 Fig. 18에서 보면 등가 응력 분포가 Inter Shaft와 Coupling에서 가장 크게 나타남을 볼 수 있다 이와 같이 기존의 Campbell Diagram 해석 및 모드별 형상 분석을 통한 결과와 마찬가지로 Inter Shaft의 보강이 필요한 실정이며 꾸준한 운영시 Inter Shaft의 마모 및 균열이 발생할 우려가 있다. 이와 같은 부분은 Inter Shaft의 강성을 키우거나 두께를 늘리는 법으로 대처 할 수 있으며 향후 Coupling 및 Inter Shaft의 강성 변화 가 필요하게 된다.

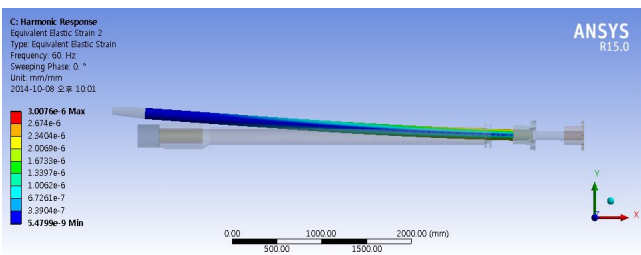


Fig. 18. Harmonic Response Equivalent Elastic Strain - 1Mode.

다음은 주파수 응답특성에서 3모드 일 때 형상 분석을 통한 변화 값을 Fig. 17~Fig. 18에서 살펴보았다. 해석 결과는 Inter Shaft의 변화를 자유 상태로 가정하여 모드 해석을 하였을 때 변화 값이다. 1모드일 때 보다 총 변형량 값이 크게 측정 되었으며, 모드 변화를 통한 등가 응력 값 역시 크게 측정 되었다.

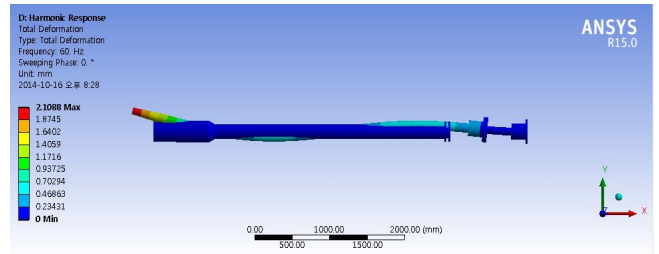


Fig. 19. Harmonic Response Total Deformation - 3Mode.

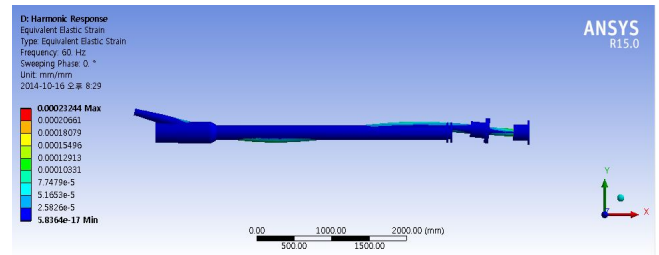


Fig. 20. Harmonic Response Equivalent Elastic Strain - 3Mode.

Fig. 17~Fig. 20에서 결과에서 볼 수 있듯이 기준을 초과하는 변위 값과 등가 응력 값이 검출 되지 않았으며 이를 통한 축계 설계 및 베어링 설계에 대한 안전성을 확인 할 수 있었다. 이와 별개로 공진 현상에 대한 분석은 Fig. 21~Fig. 23에서 볼 수 있다.

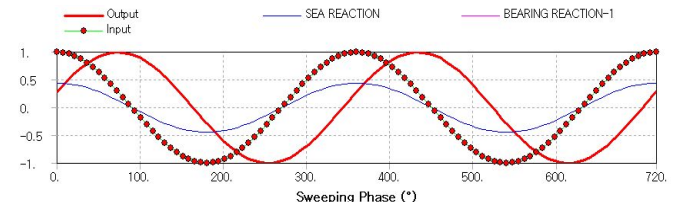


Fig. 21. Phase Response Directional Deformation.

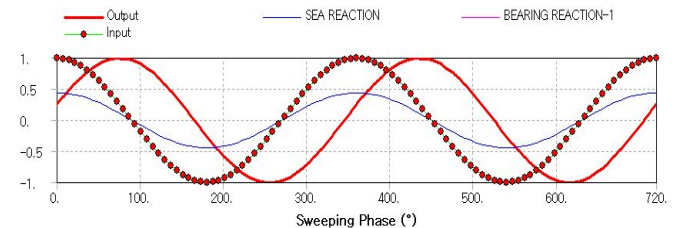


Fig. 22. Phase Response Normal Stress.

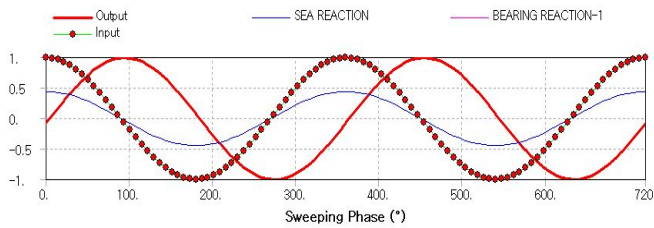


Fig. 23. Phase Response Normal Elastic Strain.

Fig. 21~Fig. 23에서 출력, 부력, 베어링 반력 등을 주파수화 하여 공진 현상을 검토 하였다. 응력, 등가응력, 변위3가지에서 공진현상은 발생 하지 않으며 공진의 문제는 발생 하지 않는다고 할 수 있다. 또한 이번 주파수 응답 해석은 주파수 영역 설정을 실제 측정 되는 0~400 Hz 범위 안에서 실시하였다. 이와 같은 해석을 통하여 추진축계에 영향을 미치는 외력에 의한 주파수 특성을 분석한 결과 공진 현상이 발생하지 않는 것으로 확인 할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 양방향 차도선의 추진 축계 및 그에 따른 물성 및 지지부재에 영향을 받는 형상을 고려한 유한요소 해석 결과를 얻게 되었으며, 해석 결과 양방향 차도선의 추진 방향 및 후진 방향 축계 작동 시 공진 현상 및 위험속도 측정에 대한 결과는 안정성을 보인 것으로 판단된다. 또한 기존 중소조선업의 축계 설계 및 생산에 큰 도움이 될 것으로 생각 된다. 향후 양방향 차도선의 이븐킬(Even keel) 상태에 따른 선체 변형을 고려한 추진축계 변형에 대한 연구를 할 예정이며 본 논문에서는 양방향 차도선의 기본 축계 운용시 주파수 응답특성 및 베어링 지지에 따른 변화를 살펴 보았다.

감사의 글

이 연구는 전남과학연구단지 기초·원천연구개발지원사업 「FEM을 고려한 카페리선의 최종한계상태 구조설계 기술개발」 연구과제 지원으로 수행되었으며 연구 지원비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Choung, J. M., I. K. Choe and S. H. Shin(2005), A Study On Elastic Shaft Alignment Using Nonlinear Bearing Elements, Journal of the Society Naval Architects of Korea, Vol. 42,

No. 3, pp. 259-267.

- [2] Ha, J. M., J. M. Lee, J. H. Lee, Y. W. Kim, B. H. Ahn, B. K. Choi and W. C. Kim(2014), Development of Analysis Program of Dynamic Characteristic for the Propulsion Shafting System, Journal of the Korean Society for Power System Engineering - Vol. 18, No. 2, pp. 57-61.
- [3] Hamdoon, F. O.(2009), Application of a Finite Element Package for Modeling Rotating Machinery Vibrations Eng. & Tech. Journal, Vol. 27, No. 12, pp. 2268-2276.
- [4] Han, Y. C. and J. I. Suh(1980), An Experimental Study on the Resuction of the Torsional Vibration Stress in a High-Speed Diesel Engine Crankshaft, Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 4, No. 4, pp. 142-151.
- [5] Hong, D. K., S. W. Jung, J. B. Jeong, G. B. Kim and C. W. Ahn(2012), "Comparison of 1,2,3 Dimensional Rotordynamics for High Speed Induction Motor of Rotor", Proc. of the KSNVE Annual Autumn Conf., pp. 496-497.
- [6] Kim, Y. G., J. W. Oh, Y. C. Kim and U. K. Kim(2012), A study on the propulsion shafting design of ice class vessel, Proceeding of the 36th KOSME Spring Conference, pp. 183-183.
- [7] Korea Register of shipping, Machinery Installations(2013), pp. 41-45.
- [8] Lee, J. U., K. M. Park, J. W. Oh, H. J. Kim, R. J. Kim and J. H. Cha(2010), A Study on the Developement of Shaft Alignment Program and Its Reliability Evaluation, Proceeding of the 34th KOSME Spring Conference, pp. 295-296.
- [9] Lalanne, M. and G. Ferraris(1990), "Rotordynamics Prediction in Engineering", John Wiley & Sons Ltd., ISBN 0-471-92633-7.
- [10] Minchev, A.(2011), Double-Ended Ferries - Propulsive Performance Challenges and Model Testing Verification smp'11, Hamburg, Germany, June, www.marinepropulsors.com.

Received : 2014. 10. 28.

Revised : 2015. 01. 21. (1st)

: 2015. 02. 13. (2nd)

Accepted : 2015. 02. 25.