

## 대형 컨테이너 선박의 합성수지계열 RAILKO BUSH 적용 연구

임재훈<sup>†\*</sup>, 박건우\*, 김경호\*

한진중공업 기장설계팀\*

### The Study of Synthetic Material Bush (Railko Bush) Application on Large Container Vessel

Jae Hun Lim<sup>†\*</sup>, Kun Woo Park\* and Kyung Ho Kim\*

Hanjin Heavy Industries & Construction Co., LTD.\*

#### Abstract

Recently, the synthetic material stern tube bush has been applied by ship owner's requirement because the synthetic material has a merit. That is to say, when stern tube seal is damaged and sea water comes into stern tube, it can work without problem because of water lubricating property. However, the material also has a demerit of temperature rise problem when some factors meets on synthetic material, for example, not sufficient lubrication oil supply and not proper shaft alignment and so on. As known in the world, the RAILKO bush is rampant for synthetic material by some ship owner because of the above mentioned reason. However, the bush has several accidents on large container vessel. Unfortunately or fortunately, our yard has a chance to apply the RAILKO bush owing to requirement of specific ship owner. Therefore, it is much more required to approach the accurate shaft alignment analysis. In line with this reason, we had a shaft alignment calculation considering hull deformation and hull flexibility (hull stiffness). Also, in the calculation, we had considered dynamic condition which is reflected the propeller thrust forces and moments and oil film stiffness on the shaft alignment calculation. According to the shaft alignment calculation, bearing slope was applied on the stern tube bush and was measured. The RAILKO bush should be applied the running in procedure according to maker's recommendation for performing the oil film on the bush surface. Finally, the vessels were delivered successfully without any problem with RAILKO bush as shown on this paper.

※Keywords : Shaft alignment calculation (축계정렬해석), Hull deflection (선체변형), Propeller Forces and moments (프로펠러 추력), Stiffness (강성), Flexibility (유연성), Synthetic material bush(합성수지 베어링), Bush fitting (베어링 설치)

1. 서론

축계정렬계산은 주엔진 작동 시 베어링에 압력이 적절히 가해지는지, 축응력이 베어링 재료의 응력 범위 안에 들어오는지 그리고 프로펠러 추력과 모멘트에 의해 축의 거동이 어떻게 변하는지에 달려 있다. 그러므로 선체변형, 프로펠러 추력 및 모멘트 그리고 정적 및 동적 상태의 축 거동을 고려하여 초대형 컨테이너선의 축계정렬계산을 수행하였다.

최근 합성수지 선미관 베어링인 Railko Bush 를 적용한 컨테이너호선에서 시운전과 항해 중에

발열 사고가 났으며 그로 인해 많은 시간과 비용을 들여 그 선박들은 재입거 (Redocking) 해야만 했다. Table 1 을 참고 바란다.

당사는 Railko Sternsafe Bush 를 적용해야 하는 대형컨테이너선의 건조주문을 받았다. 그러므로 사고를 막기 위해 모든 종류의 발열사고 가능성을 확인해야만 했고 축계정렬계산은 Railko Bush 에 초점을 맞춘 선체 변형과 함께 고려되어야만 했다. 그 결과 선미 베어링(After Bush)의 압력 분포와 베어링 내에서의 축 거동을 볼 수 있었고 축계정렬계산은 축계정렬의 안정된 적용을 도와줬다.

Table 1  
RAILKO BUSH REFERENCE LIST

NO.	VESSEL TYPE	OWNER	SHIPYARD	HULL NO	SUPPLY	SHAFT DIA	CLASS	N.B/REP.	TROUBLE
1	CONTAINER	AP MOLLER	CHINA SHIPBUILDING KEELUNG	679	2002	525	LR	R	
2	TANKER	AP MOLLER	GUANG ZHOU	03130001	2004	475	LR	NB	
3	TANKER	AP MOLLER	GUANG ZHOU	03130002	2005	475	LR	NB	
4	TANKER	AP MOLLER	GUANG ZHOU	03130004	2004	475	LR	NB	
5	TANKER	AP MOLLER	GUANG ZHOU	03130005	2004	475	LR	NB	
6	TANKER	AP MOLLER	GUANG ZHOU	03130007	2004	516	LR	NB	
7	LPG	AP MOLLER	HYUN DAI HEAVY IND.			537	LR	R	
8	VLOC	AP MOLLER	HYUN DAI HEAVY IND.	1166	2004	800	LR	R	사고발생
9	VLOC	AP MOLLER	HYUN DAI HEAVY IND.	1234	2004	800	LR	R	사고발생
10	TANKER	AP MOLLER	NEW DALIAN SHIPYARD	1100-20	2004	630	LR	NB	사고발생
11	TANKER	AP MOLLER	NEW DALIAN SHIPYARD	1100-23	2004	630	LR	NB	사고발생
12	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	193	2004	872	LR	NB	
13	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	194	2004	872	LR	NB	
14	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	195	2004	872	LR	NB	
15	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	197	2004	971	LR	NB	
16	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	198	2004	971	LR	NB	
17	SUPPLY TUG	AP MOLLER	CURASAO DRY DOCKS	301	2004	393	LR	R	
18	TANKER	AP MOLLER	OLD DALIAN SHIPYARD	PC350-3	2004	475	LR	NB	
19	TANKER	AP MOLLER	OLD DALIAN SHIPYARD	PC350-4	2004	475	LR	NB	
20	CONTAINER	AP MOLLER	ODENSE	196	2004	872	LR	NB	
21	REPLENISHMENT TANKER	ROYAL NAVY	HARLAND & WOLFF	1727	2004	610	LR	R	
22	REPLENISHMENT TANKER	ROYAL NAVY	HARLAND & WOLFF		2004	610	LR	R	
23	REPLENISHMENT TANKER	ROYAL NAVY	SWAN HUNTERS	129	2003	610	LR	R	
24	REPLENISHMENT TANKER	ROYAL NAVY	SWAN HUNTERS		2003	610	LR	R	
25	CONTAINER	SAFMARINE	VOLKSWEST STRALSUND	449	2004	640	LR	NB	사고발생
26	CONTAINER	SAFMARINE	VOLKSWEST STRALSUND	450	2004	640	LR	NB	사고발생
27	CONTAINER	SAFMARINE	VOLKSWEST STRALSUND	451	2004	640	LR	NB	사고발생
28	RO-RO SHIP	US SEALIFT	ODENSE	111	2004	702	ABS	R	
29	TUG VESSEL	UAE COMPANY	WUXI SHIPYARD	1148	2003	203	ABS	NB	
30	TUG VESSEL	UAE COMPANY	WUXI SHIPYARD	1149	2003	203	ABS	NB	
31	LNG CARRIER	MISC	MHI NAGASAKI	2177	2004	840	LR	NB	사고발생
32	LNG CARRIER	MISC	MTSUI ENG	1562	2004	840	LR	NB	사고발생
33	LNG CARRIER	MISC	SAM SUNG SHIPYARD	1502	2004	740	LR	NB	사고발생

실제로, 적절한 축계정렬은 계산에 의해 적용되어야 한다. 특히 선미 끝단의 과도한 하중을 방지하기 위해 선미관 베어링의 선미 경사(Slope)는 조심스럽게 고려되어야 한다. 다음으로는, 효율적인 배관 정렬을 통해 충분한 윤활유의 공급이 유지되어야 한다. 당사는 개선된 배관 정렬로 적절한 윤활유 공급을 수행하였다.

또한 합성수지 선미관 베어링의 좋은 표면 상태를 위해 신중한 길들이기(Running-In)가 수행되어야 하며 이것은 축과 베어링 사이에 적절한 유막을 형성시킨다.

이 논문은 합성수지 베어링 축계정렬의 여러 과정을 자세히 소개한다. 이것은 극초대형 컨테이너선에 설치된 합성수지 베어링의 좋은 선례를 위함이다.

## 2. 본론

앞에서 명기한 바와 같이 몇몇 조선소는 합성수지 베어링의 특성으로 인한 사고로 인해 어려움을 겪었다. 당사의 경우 선미관 사고에 대처하기 위해 모든 종류의 요소들을 고려해야만 했고 다음과 같은 심열을 기울였다.

- i) 유한요소법을 이용한 축계정렬계산을 수행했다.
- ii) 당사의 선미관 윤활 배관 설계도(Piping Diagram)는 선미관 제작업체인 Railko 가 승인했다.
- iii) 윤활유는 선미베어링 끝에 설치된 선미관 구멍을 통해 직접 공급되어 채워졌다.
- iv) 축계정렬에서 선체 변형이 고려되어야 하기 때문에 베어링 설치(Fitting)는 선박이 도크에 있을 때 행해졌다.
- v) 축계정렬은 진수(Launching) 후에 점검되어야 한다. 그것은 선체가 해수에 잠긴 후 축정렬의 차이가 발생하기 때문이다.

### 2.1. 축정렬계산

축계정렬의 목적은 어떤 조건하에서도 베어링 손상을 입지 않게 하기 위해 주엔진 베어링, 중간축 베어링, 선미관 베어링이 적절한 반력 하중을 받게 하는 것이다. 따라서 정적 상태뿐만 아니라 동적 상태 그리고 특정 선적 상태>Loading Condition)가 고려되어야 한다. 특히, 선미관 베어링의 후미 끝부분에는 매우 큰 하중이 걸리게 된다. 대형 컨테이너선은 큰 프로펠러와 큰 축 직경을 가지므로 끝단의 하중을 분배하는 것이 축계정렬계산의 주요 사항이다. 기본적으로 모든 선급들은 선미관 베어링의 평균 압력이 8 bar 를 넘지 않아야 한다고 규정하고 있다.

선미관 베어링의 후미에 적절한 경사(Slope)를 계측하기 위해 각 선급들은 그들의 안내서를 제공하고 있다. LR 와 ABS 는 축과 베어링의 정렬이  $0.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$  이 초과할 때 베어링 경사(Slope)를 적용할 것을 추천한다. DNV 는 선박의 하중 조건에서 축의 굽힘 각도가 축과 베어링의 틈새(Clearance)의 반을 초과할 때 베어링 경사(Slope)를 고려할 것을 추천하고 있다.

축정렬계산을 위한 유한요소법으로부터 당사의 계산은 모든 선적조건을 하에서 베어링 하중이 베어링 재료의 허용 압력 강도 한도 내에 들어와야 한다고 채택했다.

#### 2.1.1. 정적 축정렬계산

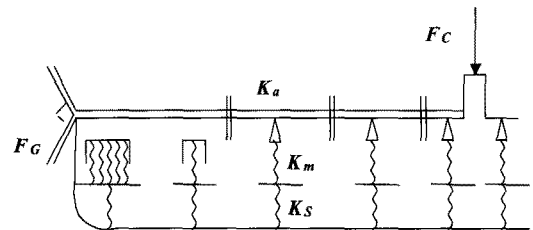


Fig. 1 Static shaft alignment

정적 조건하에서 축계정렬계산은 축하중, 외력뿐만 아니라 각 베어링과 선체의 강성 또한

고려되어야 한다. 상기 그림.1 축계정렬 모델로부터 정적 평형을 고려하여 다음과 같은 식들이 유도될 수 있다.

$$\sum F = 0, \quad \text{이므로,}$$

$$\{[K_a] + [K_a][K_s]^{-1}[K_m]\}[U_m] + [K_m][U_{ip}] + [F_{ga}] = 0 \quad (1)$$

여기서,

$[K_a]$  : 선형 축 강성행렬(Liner shaft stiffness matrix = shaft bearing influence number) [26x26]

$[K_s]$  : 구조 강성행렬(Structure stiffness matrix) [26x26]

$[K_s]^{-1} = [E_s]$  : 선체 유연행렬(Hull flexibility matrix) [26x26]

$[K_m]$  : 베어링 소재 탄성(Bushing material elasticity) [26x26]

$[U_m]$  : 베어링 중심과 축 중심의 상대 변위(Relative position of shaft center with bush center) [26x1]

$[U_{ip}]$  : 초기 참고선 관련하여 오프셋수치(Offset value in regard to the initial reference line) [26x1]

$[F_{ga}] = [F_g] + [F_c]$  : 중력과 외력(Gravity force and external force) [26x1]

### 2.1.2. 동적 축정렬계산

그림. 2 와 같이 동적 조건에는 프로펠러 추력 및 모멘트가 고려되어야 하고 유막 강성 또한 정적 축계 모델에 추가되어 동적 조건이 되어야

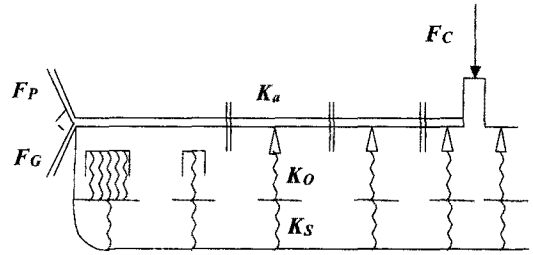


Fig. 2 Dynamic shaft alignment model

한다. D'Imbert principle 로부터 다음의 식들이 유도된다.

$$\sum F = 0, \quad \text{이므로,}$$

$$\{[K_a] + [K_a][K_s]^{-1}[K_{of}]\}[U_m] + [K_{of}][U_{ip}] + [F_{ga}] = 0 \quad (2)$$

여기서,

$[K_a]$  : 축 강성행렬(Liner shaft stiffness matrix = shaft bearing influence number) [26x26]

$[K_s]$  : 구조 강성행렬(Structure stiffness matrix) [26x26]

$[K_s]^{-1} = [E_s]$  : 선체 유연행렬(Hull flexibility matrix) [26x26]

$[K_{of}]$  : 유막 강성행렬(Oil film stiffness matrix) [26x26]

$[U_m]$  : 베어링 중심과 축 중심의 상대변위(Relative position of shaft center with bush center) [26x1]

$[U_{ip}]$  : 초기 참고선 관련하여 오프셋수치(Offset value in regard to the initial reference line) [26x1]

$[F_{ga}] = [F_g] + [F_c] + [F_p]$  : 중력과 외력(Gravity force and external force propeller force) [26x1]

2.1.3. 축정렬계산 결과

선체변형과 강성 그리고 유막 강성이 고려된 축정렬계산은 다음과 같이 유한요소법을 이용하여 수행되었다.

i) 정적 축정렬계산 결과

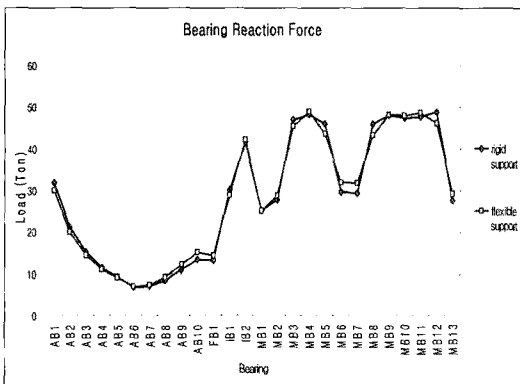


Fig. 3 Bearing reaction force at bearing position

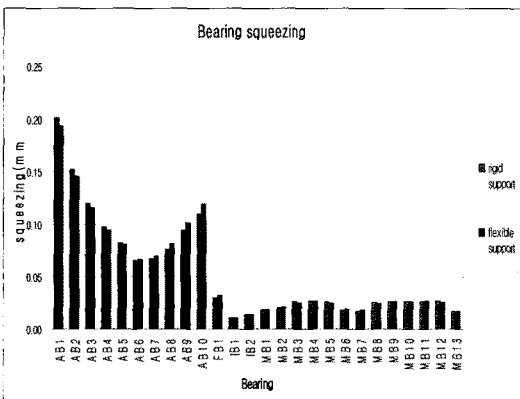


Fig. 4 Bearing squeezing value

ii) 동적 축정렬계산 결과

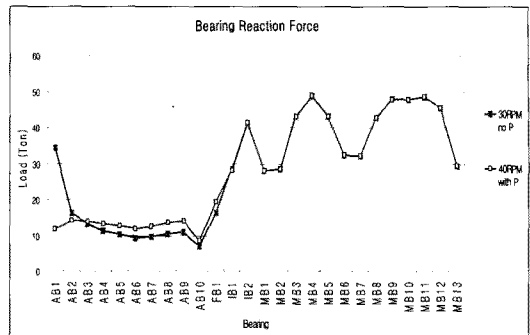


Fig. 5 Bearing Reaction force at dynamic condition

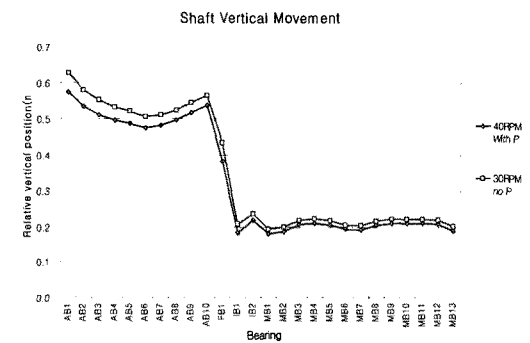


Fig. 6 Shaft vertical movement at dynamic condition

iii) 정적과 동적 조건의 비교

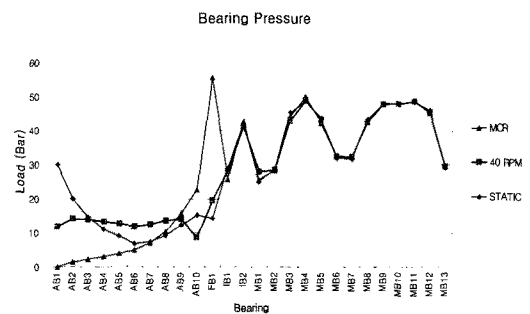


Fig. 7 Bearing reaction pressure at static & dynamic condition

IV) 선적 조건(Loading Condition)에 따른 결과

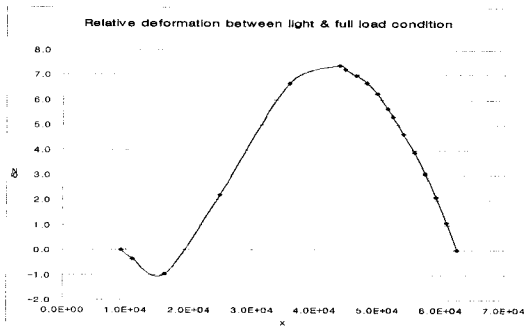


Fig. 8 relative deformation of hull

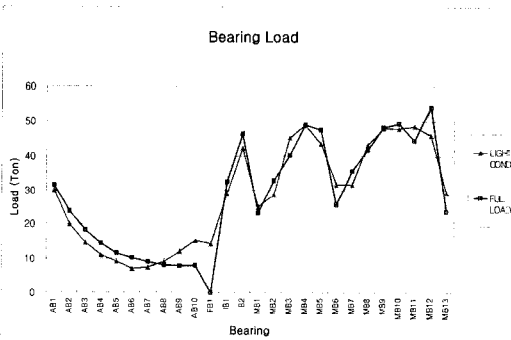


Fig. 9 Bearing reaction force at light and full load condition

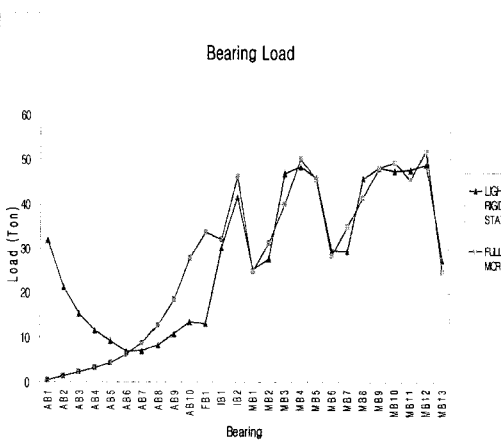


Fig. 10 Bearing load at light static and full load MCR condition

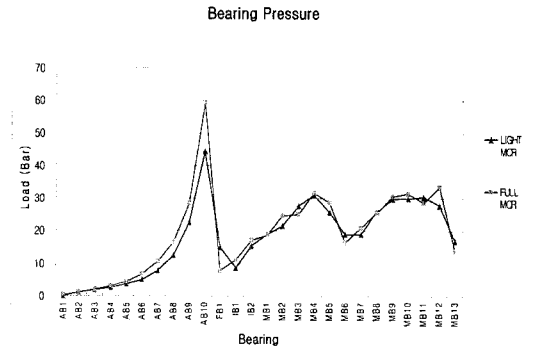


Fig.11 Bearing pressure at light & full load condition

2) 함성수비 베어링(RAILKO Sternsafe Bush) 설치

당사는 함성수비 베어링을 다음과 같은 과정으로 설치하였다.

a) 선미관 유회 배관 설계도(Piping Diagram)는 선미관 제작업체인 Railko 가 확인하였다.

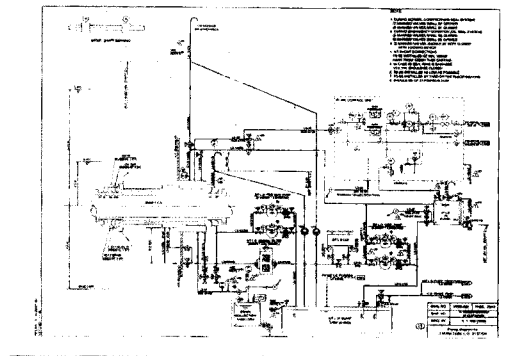


Fig. 12 Stern tube Lub. Oil piping diagram

선미관의 냉각을 위해 충분한 순환 펌프 용량을 설정한다.

b) 윤활유는 선미 끝단에 설치된 공급 파이프를 채워져야 한다.

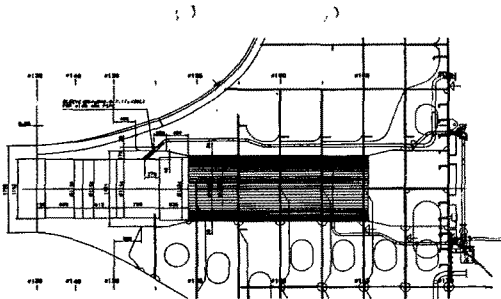


Fig.13 S/T LO piping arrangement

c) 축계정렬에 선체 변형이 고려되어야 하기 때문에 베어링 설치는 도크에서 수행되었다.

축계정렬계산 사진과 같이 선미 베어링의 후미 끝단에 초과 압력이 가해지는 것을 막기 위해 당사는 경사(Slope)를 가진 베어링을 설치하였다.

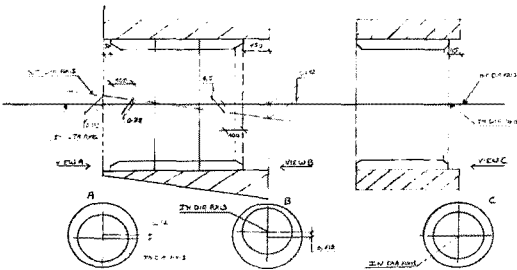


Fig.14 Stern tube bush slop drawing

d) 선미 선체와 강철 케이스의 간섭치

합성수지 베어링 제작업체인 Railko 는 적절한 억지끼워맞춤 하중을 위한 간섭치 (Interference)를 0.03~0.06mm 로 추천한다.

하지만 당사의 여러 경험을 통해 선미 베어링은 0.00~0.02mm 그리고 선수 베어링은 0.01~0.03mm 로 설치하였다.

### 3. 실제 호선의 결과

a) 축정렬은 진수(Launching) 후에 확인되어야 한다. 그것은 선체가 해수에 잠겨있을 때 축정렬에 차이가 나기 때문이다.

당사는 계산결과와 비교하기 위해 베어링 반력을 Jack-Up Method 로 측정하였다. 다음의 결과는 선미 베어링의 경사(Slope)에 의해 달라진 각각의 베어링의 반력을 보여준다. 또한 실제 베어링 반력은 선미관의 선미 베어링의 충분한 경사(Slope)와 조화 되었다.

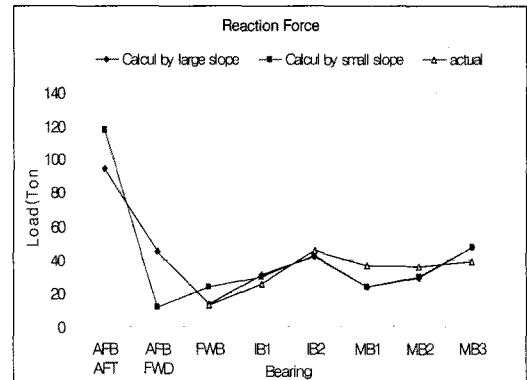


Fig.15 shaft alignment result for 1<sup>st</sup> vessel

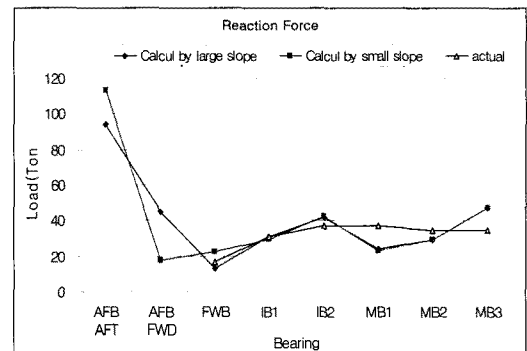


Fig.16 shaft alignment result for 2<sup>nd</sup> vessel

b) 시운전 결과

시운전 동안 선미관 베어링에 설치된 5 개의 센서를 이용하여 선박들의 온도를 측정하였다.

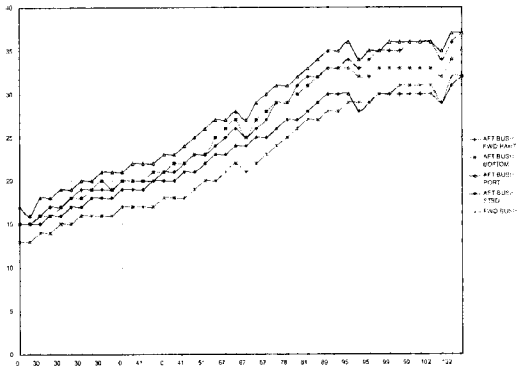


Fig.17 Temp. distribution of 1<sup>st</sup> vessel.

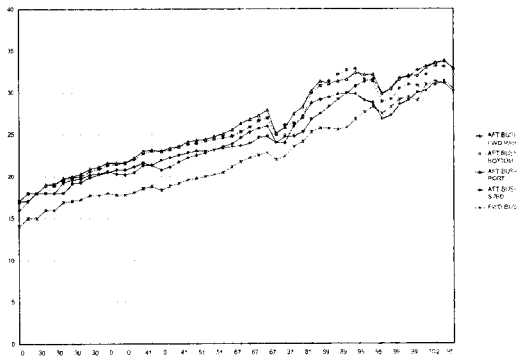


Fig.18 Temp. distribution of 2<sup>nd</sup> vessel

상기의 결과로부터 선미 베어링의 온도가 40 도 이하임을 알 수 있고 이것은 선미관 베어링에 매우 안정적인 조검임을 나타낸다.

4. 결론

처음으로 합성수지 베어링을 적용에 대한 많은 우려에도 불구하고 다음의 작업 과정을 통해 좋은 경험을 쌓게 되었다.

- 1) 유한요소법을 이용한 축계정렬계산
- 2) 발열량을 통한 적절한 윤활유 공급
- 3) 축계정렬계산에 따른 적절한 설치 방법
- 4) 계산을 통한 최적의 축계정렬 적용

참 고 문 헌

- ABS, 2002, Shaft alignment Program ShAL manual
- DNV , 2004, Nauticus Machinery Calculation package maual
- Lech Murawski , 2005 “Shaft line alignment analysis taking ship construction flexibility and deformations into consideration”Marine structure 18(2005) 62-84.
- Ville R. 1986 “Actual dynamic behavior and calculated approach to stern tube white metal bush.” Paris : Bureau Veritas pp. 200-227.
- Wartsila 2002,Technical Circular to licensees 7354



< 임 재 훈 > < 박 건 우 > < 김 경 호 >