#### 2003 추계학술발표회 논문집 한국원자력학회

# 고리 1호기 주급수 승압펌프 베어링 교체

## Replace Bearing of Kori #1 Booster Feed Pump

김계연, 고우식, 이우광 한국전력연구원 대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

고리1호기 주급수 승압펌프(Booster Feed Pump)는 모터구동 펌프로 정상운전증 진동 이 높고 베어링 메탈온도가 높아 이를 개선하고자 펌프 저널 베어링을 신규로 설계하여 교체하기로 하였다. 이에 따라 전력연구원에서 펌프 베어링 교체 전에 펌프 및 베어링에 대한 동역학적인 해석과 기술검토를 실시하여 신규베어링의 건전성을 확인하고, 펌프 베 어링에서의 진동을 예측하여 발전소 안정 운전에 기여하고자 하였다.

#### Abstract

Kori#1 Booster Feed Pump(BFP) which was driven by motor, suffered from hi vibration and hi bearing metal temperature. Therefor improving these status they decide to apply new designed bearing's to the pump journals. So KEPRI(Korea Electric Power Research Institution) analyzed rotor dynamics for the pump and bearing before replace new pump bearing, predict the new pump bearing's health and vibration character. Then KEPRI contributed to the power plant with stable operation.

1. 서 론

원자력 발전소 중요회전기기는 진동 및 베어링 메탈온도가 연속 감시되어 운전상태를 확인할 수 있다. 고리 1호기 주급수 승압펌프는 운전중 고진동 및 베어링 메탈온도가 높은 상태로 운전되어 계획예방정비기간 중에 신규 베어링으로 교체하여 문제점을 해소 하고자 하였다. 따라서 베어링 교체전에 펌프 동역학적 특성과 신규베어링의 특성을 기 술 검토하고 발생가능한 문제점을 사전에 점검하여 발전소 안정운전에 기여하고자 한다. 2. 본 론 : 주급수 승압펌프 동역학적 해석

가. 주급수 승압펌프 모델링

축 동력학 해석중 Lateral 진동에 따른 축의 안정성(Stability) 해석을 수행하였으며, Torsional 특성에 대한 해석은 금번 해석범위에 포함하지 않았음.

(1) 펌프 모델링



<그림 1> 주급수 승압펌프 모델

회색은 펌프 로타, 청색은 펌프 임펠러, 노란색은 베어링을 나타내며, 임펠러는 로타에 끼워 맞춤(Shrink fit)으로 조립됨.

- BFP 펌프는 축, 임펠러(단단 양흡입), 저어널 베어링으로 구성됨.

- 펌프 로타의 모델 형상은 도면과 동일하게 적용하였으며, 펌프 임펠러는 Added Mass로 구성하였다.

- 로타 축 제원 및 Added Mass에 대한 사항은 <표 1>과 같으며, 임펠러가 두 저어널 베어링 사이의 중간지점에 위치함.



#### <그림 2> 모델링 고유진동수 계산결과

모델링 고유진동수 계산결과의 청색 곡선은 고유진동수 164.7Hz(9884.9cpm)에서의 수평 방향 진폭을 나타내며, 적색은 수직방향 진폭을 나타낸다.

- 로타 및 임펠러의 1차 탄성모드의 Free-Free 상태(베어링제외)의 고유진동수는 9885cpm이며, 현장 FRF 고유진동수 측정값은 169.5Hz(10170cpm)로 모델링에 의한 계산 값과 오차는 2.8%로 거의 일치하고 있다.



<그림 3> 현장 FRF에 의한 고유진동수 측정값

현장 FRF(충격시험) 측정시 완전자유상태가 되어야 하나 공중에 매달기 위해 지지할 경우 강성이 추가되어 고유진동수가 다소 변화될 수 있다.

요소번호	D_Bending	D_Mass	D_Torsion	Length	비고
1	47	47		37	
2	50	50		40	
3	54	54		58	
4	70	70		56	
5	105	105		58	
6	105	105		69	
7	105	105		100	
8	114.3	114.3		132	
9	114.3	114.3		100	
10	120	120		36	
11	120	120		84	
12	120	146		20.5	
13	120	146		20.5	
14	120	136		9.5	
15	120	136		9.5	
16	120	120		30	
17	120	120		30	
18	120	136		9.5	
19	120	136		9.5	
20	120	146		20.5	
21	120	146		20.5	
22	120	120		84	
23	120	120		36	
24	114.3	114.3		100	
25	114.3	114.3		132	
26	106	106		100	
27	105	105		79	
28	105	105		125	
29	103	103		40	
00	103	103		130	<b>T</b>
30	95	95			1 aper
31	50	50		24	
				1,800	로타길이

<표 1> BFP 펌프 로타 Modeling Data (단위: mm)

펌프 로타 각 요소를 총 31개로 분할하고, 요소간의 길이, Bending 직경, 질량 직경을 표시하였음. 30번 요소는 축이 Taper형태로 이를 해석하기 위해 2개의 부가요소로 구성 하였으며 전체 로타의 길이는 1800mm이다.

나. 베어링 모델링

저어널 베어링은 구형과 신형 베어링으로 구분하여 Modeling을 실시하여 ARMD Software를 이용하여 분석함.

(1) 윤활유 조건

- 동점도

40°C : 32 CST (Centi\_STock), 100°C : 5.38 CST

동점도를 베어링 프로그램에 입력한 결과 Mobil DTE 797 Turbine Oil과 동점도가 거의 동일한 것으로 나타났다.

- 운전온도

급유온도 : 31~33℃, 배유온도 : 35~40℃, 메탈온도 : 45~46℃







<그림 5> 윤활유 Weight Density - 온도 곡선

베어링 교체전후 윤활유에 대한 변화는 없으므로 베어링 정적해석을 위한 점도 입력 및 밀도결정에 상기 <그림 4> <그림 5> 그래프의 최대운전온도 46℃를 적용하여 2.5×10<sup>-6</sup> CST 및 0.0304LB/in<sup>3</sup>을 적용하기로 함.

(2) 신, 구형베어링 차이

<표 2> 신, 구형베어링 차이점

구 분	구형베어링	신형베어링	비고		
베어링 형식	Cylinder	Lemon			
베어링 간극(상하, 좌우)	15/100mm	10/100, 20/100mm	최대간극		
상부 Pad Sharp Edge	있음	없음	Pr. Dam		
하부 Drain Hole	5개	3개	베어링 운전온도 저감		

신형베어링은 로타 와의 상하 간극이 감소하고 좌우 간극이 증가하였으며, 압력댐을 제거한 타원형(Lemon)베어링으로 설계함. 베어링에서 간극비(최대간극/최소간극)는 베어 링의 부하용량, 마찰력, 소요유량, 냉각율과 같은 정적특성 뿐만 아니라 강성 및 댐핑계수 와 같은 동적특성에 영향을 미친다. 금번 베어링 교체시 베어링 메탈온도 저감을 위해 하 부 Drain Hole의 숫자를 5→3개로 감소시키고 직경을 변화시켜 베어링 내부의 윤활유 흐 름 특성을 개선하고자 하였음.



<그림 6> 구형베어링 중앙부의 단면 <그림 7> 신형베어링 중앙부위 단면

구형베어링은 상부베어링에 단차가 있는 Dam 형식이며, 상부 베어링의 양쪽면은 하부 베어링과 같은 진원형으로 구성되어 있음.(좌, 우측(X)은 윤활유가 유입되는 통로) 신형베어링은 베어링의 상하간극이 좌우간극의 1/2인 Lemon(타원)형 베어링 구조로 진원형 베어링에 비하여 윤활유 유량이 많이 필요하다. (3) 구형베어링 해석결과

<표 3>의 결과에서 Side Leak 및 Inlet Flow는 유입 윤활유량 입력을 '0'으로 가정하여 계산한 결과이며, 이는 윤활유의 보충이 필요한 것으로 의미하며 동특성 검토에는 영향이 없음.

ECC_	BRG Load	ECC 각도	Power_Loss	Film_Thick	Max_Pr	Side_Leak	Inlet_Flow
Ratio	Ν		Watt	mm	Pascal	L/min	L/min
0.30	3786	334.4	7.17E+02	5.25E-02	1.27E+06	1.03	-4.09
0.40	6534	326.4	7.59E+02	4.50E-02	2.05E+06	1.26	-4.32
0.50	10493	320.0	8.23E+02	3.75E-02	3.30E+06	1.48	-4.51
0.60	16819	314.0	9.22E+02	3.00E-02	5.51E+06	1.68	-4.68
0.70	28332	307.8	1.07E+03	2.25E-02	1.00E+07	1.87	-4.79

<표 3> 구형베어링 특성 해석결과

(4) 신형(Lemon)베어링 해석결과

Side Leak 및 Inlet Flow는 유입 윤활유량에 대한 입력을 '0'으로 가정하여 계산한 결과이며, 이는 윤활유 보충이 필요한 것으로 의미하며 동특성 검토에는 영향이 없음.

신, 구형 베어링의 큰 차이점은 신형베어링의 부하수용능력이 편심율 0.5에서 구형은 10493N이나, 신형은 26358N으로 2배이상 증가하였으며, 반면에 동력손실은 구형 823W에 서 신형은 1004W로 증가함. 또한 최소유막두께가 구형베어링에서 0.0375mm에서 신형베어 링이 0.025mm로 감소하였으며, 윤활유의 필요유량이 구형은 4.51ℓ/min에서 신형 베어링 은 9.7ℓ/min으로 약 2배가량 증가한 것으로 나타났다.

동력학적인 변수인 베어링의 강성값(K)은 구형베어링 보다 신형베어링이 증가하였으며 이는 베어링 수직 간극의 감소에 영향이 있는 것으로 판단됨.

ECC_	BRG Load	FCC 7HE	PowerLo	DSS	Film Thick		Maz	Max_Pr		Side Leak		nlet Flow
Ratio	Ν	EUC 41	Watt		mm		Pascal		L/min			L/min
0.30	11494	329.5	8.72E+0	)2	3.50E-02		2.85E+06		0.46			-9.84
0.40	17537	323.6	9.41E+0	9.41E+02		3.00E-02		4.59E+06 (		0.57		-9.77
0.50	26358	318.1	1.04E+0	1.04E+03		-02 7.40E+		E+06	0.65			-9.70
0.60	40542	312.7	1.20E+0	)3	2.00E-	00E-02 1.24		E+07	0.71		-9.62	
0.70	66349	307.1	1.43E+0	)3	1.50E-02		2.261	E+07	(	0.74		-9.53
편심율 0.5	Kxx	Kxy	Kyx	Куу		D	) <sub>XX</sub>	Dx	у	Dyx		Dyy
구형	2.19E+08	1.01E+08	-4.69E+08	2.94E+08		1.64	lE+06	-1.34I	E+06	-1.34E+	-06	4.85E+06
신형	8.17E+08	3.20E+08	-1.84E+09	9 1.39E+09		5.53	3E+06	-4.93I	E+06	-4.94E+	-06	1.94E+07

<표 4> 신형베어링 특성 해석결과

### 나. 펌프 동역학 해석

#### (1) 고유치 해석

회전축은 질량과 휨 강성으로 인해 고유진동수가 존재하며, 베어링을 일종의 스프링으 로 간주하면 회전축-베어링 계를 구성하여 복합진동계를 이루게 되어 계의 고유진동수가 나타나게 된다. 이때 계의 고유진동수와 같은 주파수의 진동이 외부로부터 가해지면 진동 폭이 위험할 정도로 커지는 공진현상이 발생하는 바, 이러한 속도를 위험속도라고 한다.

그러므로 펌프계의 고유치를 확인하여 위험속도와 운전속도가 어느 정도 이격되어 있 는 가를 점검하여 신규베어링의 안전성을 검토하고자 한다.

(가) 구형베어링

- Rigid Mode :

축 강성이 베어링 강성에 비하여 훨씬 큰 상태에 나타나는 진동형태 임.





- 1차 모드



Backward

Forward

<그림 9> 구형베어링 1차 모드

구형 베어링 1차 모드는 5678, 5683rpm으로 운전속도인 1800rpm보다 높은 강성로타임 을 알 수 있으며, 임펠러 부위에서 진폭이 가장 크게 나타남.

- 2차 모드



Backward

Forward

<그림 10> 구형베어링 2차 모드



- Rigid Mode :



<그림 11> 신형베어링 Rigid Mode

구형베어링의 1066rpm 보다 약 320, 400rpm 증가된 것으로 나타났으며, 정상운전속도 1800rpm과는 이격되어 있어 펌프 운전에는 별 영향이 없을 것으로 판단됨.





<그림 12> 신형베어링 1차 모드

구형베어링에 비하여 Backward가 260rpm 감소된 상태이나 이는 정격운전속도 (1800rpm)와 크게 떨어져 있음.

- 2차 모드



Forward <그림 13> **신형베어링 2차 모드** 

#### (다) 신, 구형베어링 고유진동수 비교

- Rigid Body Mode

<표 5> Rigid Body Mode의 비교 (단위 CPM)

	구	형	신형			
Rigid Body Mode	1066	1067	1385	1460		

Rigid Body Mode는 베어링 조건에 따라 나타나는 현상으로 기동시 신속히 통과되므로 운전중에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

- 탄성 Mode

<표 6> 탄성 Mode의 비교 (단위 CPM)

Mada	Back	ward	Forward			
Mode	구형	신형	구형	신형		
1차 Mode	5,679	5,415	5,683	5,545		
2차 Mode	19,574	19,222	19,806	19,809		
3차 Mode	29,700	29,433	30,539	29,710		

로타 계에서 운전속도가 탄성 1차 모드의 고유진동수 이상에 있을 경우 탄성 로타라고 하며, 반대로 운전속도가 탄성 1차 모드 고유진동수 이하에 있을 경우 Rigid 로타라고 정의하는데 고리 1호기 주급수 승압펌프는 탄성 1차 모드가 5600cpm으로 Rigid 로타이 다. (일반적으로 펌프 로타는 Rigid 로타로 설계됨.)

(2) 안정성 해석

축 저널의 정적 평형상태에서 저널의 중심이 베어링중심에서부터 옆으로 편심이 되고 이를 중심으로 저널 중심이 흔들릴 경우 저널 중심이 이동하는 방향과 다른 방향으로 베 어링 반력이 작용하며 이러한 특성이 회전축계의 불안정성을 야기할 수 있다. 안전성 해석을 위해 펌프 임펠러 위치에 2 Unit의 Unbalance를 가정하고 속도상승에 따른 진동변화를 점검하였다.

감쇠 시스템의 고유치를 해석하여 나타난 해는 u + vj 의 복소수 형태로 나타난다. 이 때 'v' 및 'u'는 각각의 시스템의 고유진동수 및 댐핑 계수이며, '-u/v'는 Logarithmic Damping Factor로 정의되며 이 값이 음의 값을 갖는 경우 시스템이 불안정해지는 것을 나타낸다.

(가) 구형베어링



Rigid Mode를 제외 (세로축 확대) <그림 14> 구형베어링의 로타 안정성

계열3~8은 각각의 진동모드로 계열3, 4는 탄성1차 모드를 의미함.

구형베어링은 속도비 0.1(180rpm) 이후에 -u/v 값이 일정하며, 모든 속도비에서 음의 값을 갖는 영역이 없어 불안정한 현상은 없는 것으로 판단되나 -u/v 값이 0.01이하로 신형베어링의 결과에 비하여 상당히 낮은 값임.

(나) 신형베어링

- 신형베어링은 구형베어링에 비하여 낮은 속도에서 -u/v 값이 구형베어링 보다 약 2 배 정도 크고, 음의 값의 갖는 영역은 없으며 운전속도 부근에서의 -u/v 값이 구형보다 는 약 10배 정도 크므로 로타계의 안정성이 구형베어링에 비하여 크게 향상된 것으로 판단됨.



<그림 15> 신형베어링의 로타 안정성

(3) Unbalance Response

임펠러 위치에 2 Unit의 Unbalance를 가정하여 속도상승에 따른 진동 진폭의 변화를 점검하는 것이 목적임.

(가) 구형베어링

Node 6, 26은 베어링 위치이며, Node 17은 임펠러 위치임. 구형베어링은 정격속도 (속도비 1.0)에서 임펠러 위치가 15µm의 진폭을 나타냄. (나) 신형베어링

Node 6, 26은 베어링 위치이며, Node 17은 임펠러 위치임.

신형베어링은 정격속도 (속도비 1.0)에서 임펠러 위치가 23µm, 베어링 위치가 6µm의 진폭을 나타내어 구형베어링 보다 진폭이 약간 큼.

- Unbalance 응답에서 신형, 구형 베어링 모두 Rigid Body Mode의 고유진동수(1000 혹은 1300rpm)에서 진동상승이 없으므로 운전 중 영향이 없음을 확인할 수 있음.



<그림 16> 구형베어링의 Unbalance Response



<그림 17> 신형베어링의 Unbalance Response

(4) Transient 응답

과도상태 응답해석은 회전체에 임의의 가진력(불평형)을 가하여 로타 계에서 예상되는 순시 최대 진폭을 계산하는 것으로서, 펌프 기동중 발생되는 순시최대진폭과 펌프 내부설계간극을 비교하여 설계내부간극의 여유를 판단할 때 사용한다. 또한 정상상태에서

의 진동 진폭도 이론적으로 예측할 수 있으나 모터와 연성된 해석을 실시하여야 정확한 값을 얻을 수 있으며 모터를 제외할 경우 실제와 다를 수 있다.

(가) 구형베어링



<그림 18> 구형베어링의 Transient Response

(2) 신형베어링



<그림 19> 신형베어링의 Transient Response

과도상태에서 최고 진동값은 임펠러 (Node 17H)에서 약 65µm의 Peak를 나타냈고, 정상상태에서 최고 진동값은 임펠러 (Node 17H)에서 약 20µm의 Peak를 나타냄.

#### 3. 결 론

고리 1호기 주급수 승압펌프는 운전중 고진동 및 베어링 메탈온도가 높은 상태로 운 전되어 정비기간 중에 신규 베어링으로 교체하여 문제점을 해소하고자 하였다. 따라서 베어링 교체전에 펌프 동역학적 특성과 신규베어링의 특성을 기술 검토한 결과 베어링 교체 전, 후의 동역학적 특성은 Rigid Body Mode에서 약간의 차이가 있었으나, 펌프 운 전중 저속에서 급속히 통과하는 Mode로 고유진동수에 대한 문제점은 없는 것으로 판단 하였다. 또한 탄성 1차 모드의 고유진동수(약 5600cpm)가 운전속도(1800cpm) 보다 높아 Rigid 로타인 것을 알 수 있었다.

베어링의 정역학적 특성은 신형베어링이 동력손실이 다소 증가하였으나, 베어링의 최대 압력이 증가하여 부하수용능력이 상당히 증가한 것으로 나타났으며, 윤활유 유량흐름을 변화시켜 베어링의 메탈온도도 감소하였다.

베어링의 동력학적 특성 중 안전성은 불안정한 현상은 없으며, 신형베어링의 안정성이 구형베어링에 비하여 향상된 결과를 나타내어 구형베어링에서 신형베어링으로 교체하는 것이 타당한 것으로 판단된다.