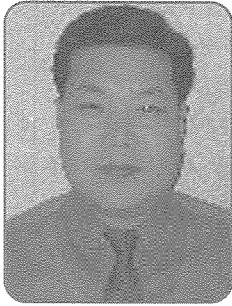


틸팅 패드 베어링 피벗 설계 (II - 1)



한전 기공(주) 기술연구소
책임 전문원 김성봉
TEL : (031) 710 - 4393

열병합 발전 설비에서 터빈을 비롯한 고속 회전체가 차지한 비중이 매우 크다. 소형 고속 회전체에서는 주로 틸팅 패드 베어링을 사용하고 있다. 이 베어링은 피벗을 통해 자유롭게 하중 방향에 적응하므로 베어링 특성이 매우 우수하다. 베어링 Babbitt에는 많은 관심을 기울이면서 상대적으로 피벗에는 무심경한 것이 이 분야에 대한 소개가 부족함이라 생각하여 여기 Dr. John C. Nicholas (Rotating Machinery Technology, Inc) 논문을 소개한다.

1. 개요

틸팅 패드 미끄럼 베어링의 단점 중 하나는 베어링 오일 유막과 지면 사이에 또 하나 유연성(Flexibility)이 부가되는 현상이다. 틸팅 패드 자체가 자기 고유의 유연성(Flexibility)을 가지고 있고 그리고 패드 피벗 또한 유연(Flexible)하다. 이들 유연성들은 분명히 베어링 강성(Stiffness)을 감소시키고 또한 베어링의 유효댐핑도 감소시켜 축의 위험 속도를 낮게 하고, 축 진동을 증가시킨다.

이런 이유로 패드 피벗을 가급적 강하게(Stiff)설계하는 것이 중요하다. 더 나아가 피벗 강성이 증가함에 따라 운전중 피벗 응력과 마모가 감소한다. 이는 피벗 마모에 따라 증가된 간격이 베어링 댐핑을 감소시킨다는 사실이 중요하다.

매우 높은 단위 하중 영역인 300, 400 또는 500psi에서 틸팅 패드 베어링 설계자는 피벗 응력 과 마모를

감소시키고 피벗사고를 방지하기 위한 설계 도전에 직면하게된다. 틸팅 패드 피벗이 Self-Align되어야하고 패드와 축사이의 오정렬에 따른 미세 각도를 조정할 수 있는 능력이 요구조건으로 나타나면서 이 문제가 악화되는 쪽으로 진행될 수도 있다. 이런 고 하중이 나타나는 형태는 고성능 기어박스나 매우 큰 기어 힘을 유발하는 여러 기어 비를 가진 압축기에서 볼 수 있다. 이런 설계 도전에 대한 시도로 다음에 소개되는 단순한 방정식들은 Nonaligning cylindrical pivot, a self-aligning sphere pivot, a self-aligning sphere-in-a-cylindrical pivot에서 피벗 강성과 응력을 해석하는데 유용하게 사용된다. 베어링의 댐핑과 강성 특성이 피벗의 유연성에 미치는 효과를 잘 조사하여 각 피벗 설계에 비교 분석 해볼 수 있다.

피벗 응력에 대한 단순 방정식의 이용은 고하중에서 피벗 파손사고를 막기 위한 피벗의 적정 크기를 결정하기 위한 방법으로, 설계 예로는 구형 피벗(Spherical pivot)을 사용하여 간략 계산 개요를 소개할 것이다. 전형적인 고 응력 피벗 사고는 그림1에 나타나있고 구형 피벗은 그림 2에 소개되어 있다. 그림 1에서 사고 시발점은 청동 패드 바닥에 있는 구형 자리에서 시작되었다. 다음 그림 1은 패드 중앙에서 균열이 나타났다. 그림 1에서 패드가 반으로 갈라지는 사고가 발생하였다. 이런 사고는 큰 불균형 힘에 의해서 고진동이 발생한 기계에서 실제 발생한 사실이

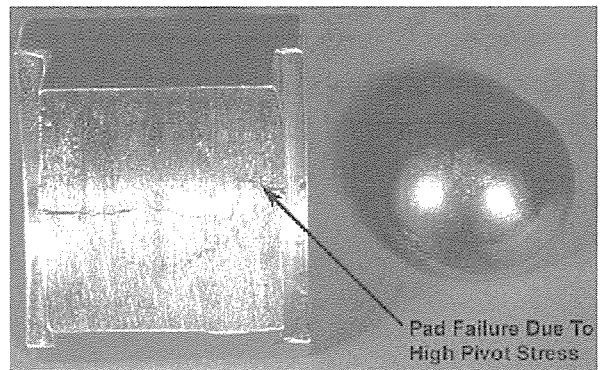


그림 1 사고 난패드와 피벗

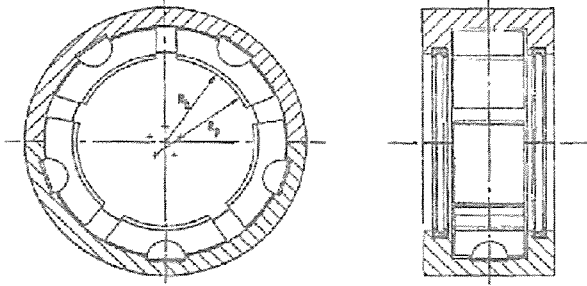


그림 2 대표적 피봇 베어링

다. 고진동은 큰 동적 하중을 패드에게 유발시키고 피봇은 패드를 균열시키면서 결국 파손으로 끝난다. 또한 유한요소해석 기법을 이용하여 구형피봇에서 단 순 방정식 결과와 비교 분석 해볼 수 있다.

2. 피봇의 구조 및 설계

가. 피봇 강성(Pivot Stiffness)

구형 피봇(Spherical Pivot)

자동조심 구형 피봇(A self-aligning sphere pivot)은 그림 3, 4에 묘사되어 있다.

청동으로 제작된 미끄럼 베어링의 틸팅 패드에 반 구로 가공된 자리에 강철 구 모양의 피봇이 올라타고 있다. 파라미터를 다음과 같이 정의한다.

W_p = pivot Load, lbs

D_p = pivot diameter, in

D_h = housing or spherical seat diameter, in

Kirt 와 Reedy는 피봇의 강성 K_p 를 다음과 같이 정의한다.

$$K_p = \frac{\partial W_p}{\partial \delta_p} \quad (\text{lbs/in}) \quad (1)$$

피봇의 변형량 δ_p 와 구형 피봇의 강성은 다음과 같다.

$$\delta_p = (1.040) \cdot \left(\frac{W_p^2 C_2^2}{C_1} \right)^{1/3} \quad \text{in} \quad (2)$$

$$K_p = (1.442) \cdot \left(\frac{C_1 W_p}{C_2^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

여기서

$$C_1 = \frac{D_h D_p}{D_h - D_p} \quad (4)$$

$$C_2 = \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \right) + \left(\frac{1 - \nu_h^2}{E_h} \right) \quad (5)$$

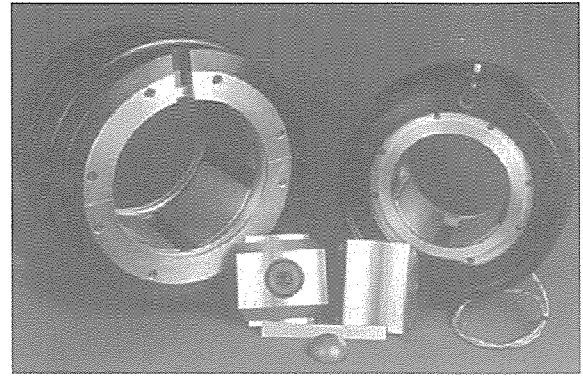


그림 3 황동 패드와 피봇

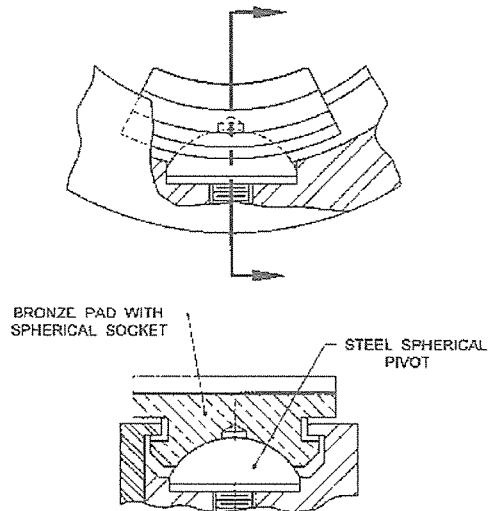


그림 4 Steel-On-Bronze Spherical Pivot

Sphere-in-a-Cylinder pivot

원통 하우징 안에 구형 피봇은 그림 5에 나타나 있다.

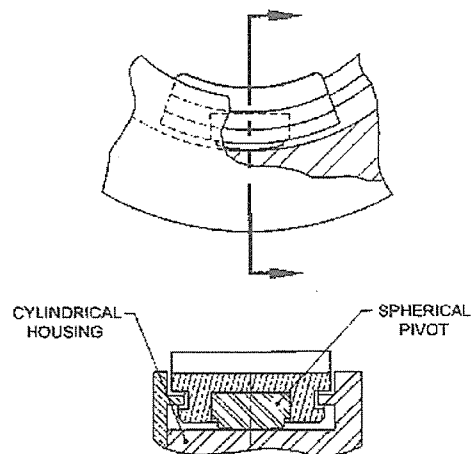


그림 5 Steel Sphere in a Steel Cylinder Pivot

이 피벗은 또 하나의 Self-aligning 저어널 패드 피벗의 배열을 나타낸다. 이 복합 표면의 변형량은 구형 피벗의 변형량과 평면 피벗 위 구형 변형량의 평균값과 유사하다.

$$\delta_p = (.52) \cdot (W_p^2 C_2^2)^{1/3} \left[\frac{1}{D_p} + \frac{1}{C_1} \right]^{1/3} \quad (6)$$

방정식 (1)을 사용하여 피벗의 강성은 다음과 같이 정의된다.

$$K_p = (2.885) \cdot \left[\left(\frac{D_p C_1}{D_p + C_1} \right) \frac{W_p}{C_2^2} \right]^{1/3} \quad (7)$$

원통 피벗 Cylindrical Pivot

원통 하우징 내에 있는 원통 피벗은 그림 6에 묘사되어 있다.

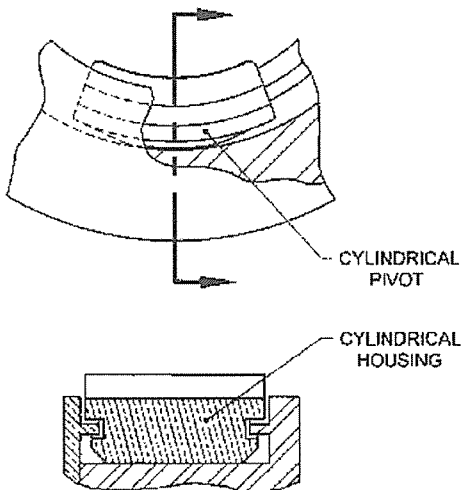


그림 6 Steel-on-Steel Cylindrical Pivot

이 피벗은 전형적인 Nonaligning 미끄럼 패드 피벗 배열이다. 피벗과 하우징은 같은 재질로 보통 탄소강을 사용한다. 탄성계수 E, 포이송 비(Poissons ratio) ν 로 하면

$$E = E_p = E_h \text{ (psi)} \\ \nu = \nu_p = \nu_h \quad (8)$$

$$\delta_p = \frac{2 W_p (1-\nu^2)}{\pi L_p E} \left(\frac{2}{3} + \ell_n \left(\frac{2 D_h}{b} \right) + \ell_n \left(\frac{2 D_p}{b} \right) \right) \quad (9)$$

여기서

$$b = 2.15 \sqrt{\frac{W_p D_h D_p}{L_p E (D_h - D_p)}} \quad (10)$$

강철 피벗 과 하우징인 경우

$$\nu_p = \nu_h = 0.3 \\ E = 30.0 \times 10^6 \text{ (psi)} \quad (11)$$

여기서 피벗의 강성은

$$K_p = L_p \left(1.93 \times 10^{-8} \left[16.74 + \ell_n \left(\frac{L_p (D_h - D_p)}{W_p} \right) \right] \right) \quad (12)$$

나. 차등 직경과 차등 열팽창(Differential Diameter and Differential Thermal Growth)

방정식 (3), (4), (7)와 (12)에서 피벗의 강성은 운전 온도에서 패드 직경과 하우징 직경 함수로 나타난다. 특히 차등 직경 ΔD 는 피벗 강성에 미치는 영향이 매우 크다. 이들 두 직경이 서로 더 가까우면 가까울수록, 피벗의 강성은 더 강해진다.

보통 하우징 직경 D_h 는 피벗 직경 D_p 보다 약간 더 크다. Cylindrical 과 Sphere-in-a-Cylinder 피벗인 경우, 이 직경 값은 피벗 설계 과정에서 결정된다. 보통 피벗 과 하우징은 탄소강으로 거의 같은 재질을 사용하므로 정상 운전중 온도로 인한 차등 팽창에 따른 직경 변화는 매우 미미하다. 이런 경우 차등 열팽창에 따른 효과를 무시하면 차등 직경은 상온에서 하우징 과 피벗의 직경 차로 단순화된다.

$$\Delta D = D_h - D_p \text{ in} \quad (13)$$

구형 피벗인 경우, 일반적으로 피벗은 탄소강으로 만들어지고 구형 하우징 안에 위치한 톨링 패드는 청동으로 만들어진다. 이때는 운전 온도에 따른 차등 직경 변화가 피벗 강성 변화에 큰 영향을 미친다. 패드와 피벗에서 온도는 같고 ΔT 는 상온에서 온도 상승 분이라고 가정 할 때 차등 열팽창은 다음과 같다.

$$\Delta D_t = (\mu_h - \mu_p) \cdot \Delta T \cdot D_p \text{ in} \quad (14)$$

탄소강 피벗과 청동 패드 인 경우에 열팽창 계수 μ 는 다음과 같다.

$$\mu_p = 6.8 \times 10^{-6} \text{ in/in}^\circ\text{F} \\ \mu_h = 10.0 \times 10^{-6} \text{ in/in}^\circ\text{F} \quad (15)$$

Steel-on-Bronze Spherical 피벗의 여러 직경에 따른 차등 열팽창을 그림 7에 나타냈다.

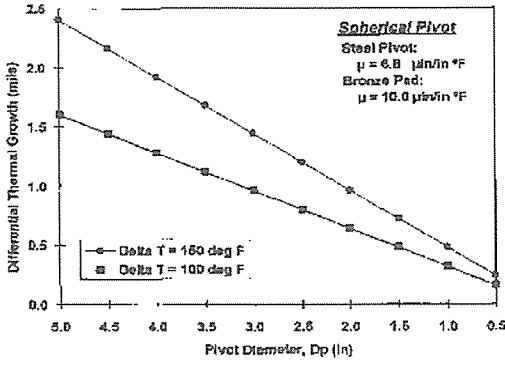


그림 7 Steel-on-Bronze Spherical Pivot 차등 열팽창 ΔD

분명한 것은 ΔT 가 증가하고 피벗직경 D_p 도 증가함에 따라 차등 열팽창이 증가한다. 예로 $D_p=2.0in$ 인 경우 $\Delta T=100^\circ F$, $\Delta D=0.64mil$ 이 되고 $D_p=4.0in$ 인 경우 $\Delta T=150^\circ F$, $\Delta D=1.92mil$ 이 된다.

Steel-on-Bronze Spherical Pivot인 경우 차등 직경은 주위 온도에 부가하여 차등 열팽창을 고려한 차등 직경이다.

$$\Delta D = \Delta D_t + (D_h - D_p) \text{ in} \quad (16)$$

차등 직경에 따른 피벗 강성 효과는 여러 피벗 직경에 따른 Steel-on-Bronze Spherical Pivot 그림 7에 나타나 있다. 차등 직경이 증가함에 따라 피벗 강성이 감소한다. 반대로 피벗 직경이 감소함에 따른 결과도 참이다. 그림 8에 겹쳐 그려진 곡선은 $\Delta T=100^\circ F$ 일 때 방정식 14.15.16을 이용하여 차등 직경을 계산한 것과 상온일 때 즉 $D_h=D_p$ 일 때 구형 피벗을 비교하여 표시 한 것이다. 이들 경우 피벗 강성은 18.0에서 30.0×10^6 lb/in이다.

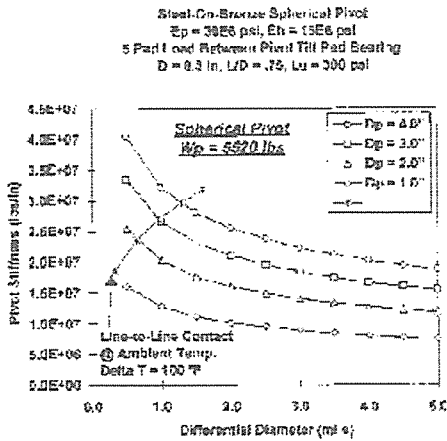


그림 8 Steel-On-Bronze Spherical Pivot Stiffness vs Differential Diameter

차등 직경 함수와 피벗 강성 비교는 그림 9에 설명되어 있다.

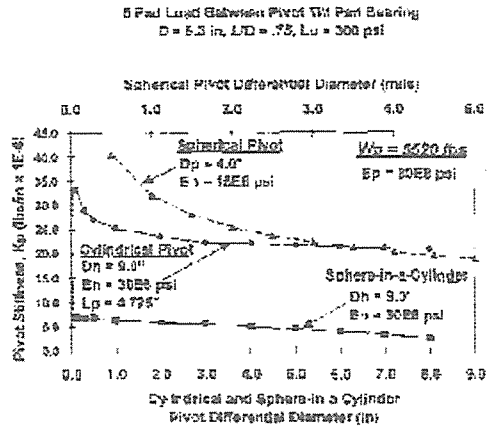


그림 9 Pivot Stiffness Vs Differential Diameter

일반적으로 구형 과 원통형 피벗들은 20.0×10^6 lb/in 이상 범위에서는 거의 같은 높은 피벗 강성을 나타낸다. 반면에 Sphere-in-a-Cylinder 피벗은 7.0×10^6 lb/in 아래에서는 비교적 낮은 피벗 강성을 나타낸다.

그림 8, 9에 나타난 모든 피벗은 5패드 틸팅 베어링으로 $D=6.3in$, 패드 길이 $L=4.725in$ 단위 하중 $Lu=300psi$ 사양이다. 5 LBP(Load Between Pad)에서 피벗 하중 W_p 는 다음과 같이 계산된다.

$$W_p = \frac{L_p \cdot L \cdot D}{2 \cdot \cos(35^\circ)} \quad (17)$$

이렇게 계산한 피벗 하중 결과는 $W_p=5520lb$ 로 적용된다.

다. 등가 강성과 댐핑 Equivalent Stiffness and Damping

피벗 유연성은 오일 필름의 강성과 댐핑 특성에 선형 또는 급수적으로 변화하므로 낮은 피벗 강성은 이들 특성이 감소하거나 하락에 따른 결과이다. 강성의 감소는 로타의 위험 속도를 운전 범위 이내로 낮게 하는 결과를 가져 올 수 있고, 댐핑의 감소는 이미 잔존하고 있는 불균형을 더 크게 할 수도 있다. 같은 효과는 지지대나 케이싱 유연성(Flexibility)에서도 나타날 수 있다.

틸팅 패드, 피벗, 지지대가 무한 강성이라고 하면 로타는 오일 필름의 강성 과 댐핑에 직접적인 영향을

받는다. 오일 필름 뒤 유연한 피봇으로 인해, 이들 두 유연성(오일 필름과 피봇)들은 일반적으로 베어링 고유 특성보다 낮은 등가 강성과 댄핑을 나타낸다. 로타는 같은 상수이지 더 높은 베어링 상수는 아니다. 피봇 강성과 오일 필름 유연성에 결부하여 이용하는 모델은 그림 10, 11에 묘사되어 있다.

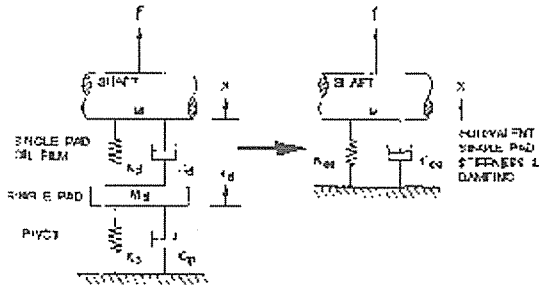


그림 10 등가 Single 패드 강성과 댄핑 모델

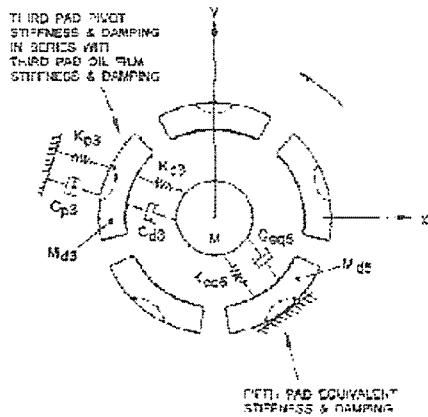


그림 11 3, 5번째 패드의 등가 강성과 댄핑 모델

각 패드는 피봇이 있으므로 Single 패드 오일 필름 강성 K_d , Single 패드 오일 필름 댄핑 C_d , 는 부록에 유도되어 있는 방정식(A-8, A-9, A-10, A-11, A-12)에 의해 패드의 피봇 강성 K_d 와 결합된다. 피봇의 댄핑과 패드의 무게도 또한 포함 될 수 있지만 보통 무시된다. 이는 Single 패드에서 등가 강성 K_{eq} , 등가 댄핑 C_{eq} 라는 결과를 낳는다. 다음 각 패드의 등가 강성과 댄핑들은 전체 틸팅 패드 베어링 K_{exx} , K_{eyy} , C_{exx} 와 C_{eyy} 의 등가 특성을 얻기 위해 참고 문헌 6, 7에 구성되어 있다.

등가 베어링 강성에서 피봇 유연성 효과는 그림 12에 묘사되어 있다. $K_p = 20.0 - 30.0 \times 10^6$ lb/in인 피봇 강성 범위 내에서(Steel-on-Bronze Spherical 피봇과 Steel-on-Steel Cylindrical 피봇), 등가 베어링 강성이

비교적 일정하다. 이 영역 밑으로 K_p 가 내려가면 등가 강성은 더 심하게 내려가는 추세를 나타낸다. 예를 들어 Keyy에서는 Spherical & Cylindrical 피봇 영역인 8.0×10^6 lb/in에서 Sphere-in-a-Cylinder 피봇 영역인 3.5×10^6 lb/in까지 감소한다. 유사한 베어링 등가 댄핑 곡선은 그림 13에 나타나 있다. 다시 댄핑이 Spherical & Cylindrical 피봇 영역에서 Sphere-in-a-Cylinder 피봇 영역까지 급격하게 떨어진다. 특히 C_{eyy} 는 5,500에서 1,000 lb-s/in까지 5.5 비율로 감소한다. (약 85% 감소)

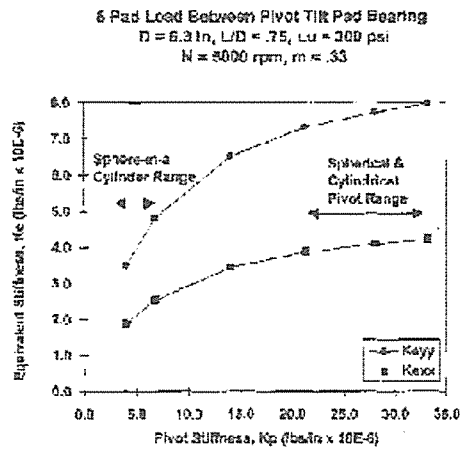


그림 12 등가 베어링 강성 대 피봇 강성

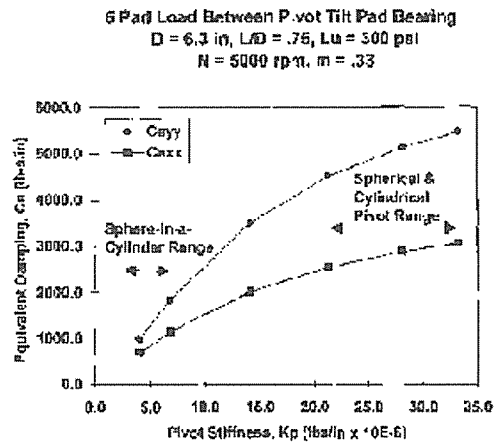


그림 13 등가 베어링 댄핑 대 피봇 강성

라. 헤르츠 접촉 피봇 응력

피봇이 하우징 내에서 하중을 받을 때, 점 혹은 선 접촉은 접촉 면적에 따라 변한다. 헤르츠 접촉 응력 결과가 표면 파괴 원인이 아니라는 사실이 매우 중요하다. Shigley와 Mitchell이 유도한 방정식은 피봇 하중 결과로부터 최대 응력, 접촉 깊이, 접촉반경을 계

산하는데 사용된다.

Spherical Pivots

피봇 하중 W_p 가 Spherical 피봇에 작용한다고 하면 원형 접촉 반경 a 는 다음과 같다. (그림 14)

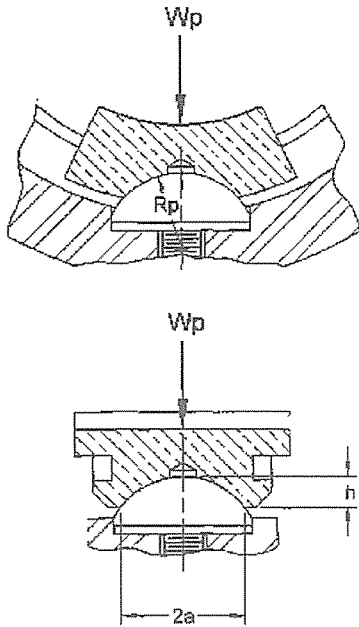


그림 14 Spherical Pivot의 피봇 응력을 위한 모형도

$$a = \left(\frac{3 \cdot W_p \cdot C_1 \cdot C_2}{8} \right)^{1/3} \quad (18)$$

접촉 깊이 h 는

$$h = R_p - \sqrt{R_p^2 - a^2} \quad (19)$$

또는

$$a = \sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p + h)} \quad (20)$$

그리고 접촉 면적은

$$A = 2\pi h R_p \quad (21)$$

여기서 C_1, C_2 는 방정식 (4) (5)에서 구할 수 있다.

최대 응력 σ_m 은

$$\sigma_m = \frac{3 \cdot W_p}{2\pi \cdot a^2} \text{ psi} \quad (22)$$

원통 피봇 Cylindrical Pivots

피봇 하중 W_p 를 가진 원통 피봇에서 직사각형 접촉 폭의 반을 d 라고 하면

$$d = \left(\frac{3 \cdot W_p \cdot C_1 \cdot C_2}{\pi \cdot L_p} \right)^{1/2} \quad (23)$$

최대 응력은

$$\sigma_m = \frac{2 \cdot W_p}{\pi \cdot d \cdot L_p} \quad (24)$$

Sphere-in-a-Cylinder Pivot

평판 위 구인 경우 $C_1 = D_p$ 로 놓고 방정식 (18, 19, 20, 21, 22)을 사용한다. 여기서 응력은 Spherical 피봇과 평판에서 구의 응력이 두개의 평균값 과 매우 유사하다.

마. 피봇 마모와 베어링 간격에 대한 고찰

Pivot wear and bearing clearance consideration

고 헤르츠 접촉 응력은 베어링 틸팅 패드와 패드 피봇 위에 높은 정, 동 하중이 작용하기 때문에 일어난다. 잘못 설계된 피봇인 경우 이들 고 응력들은 그림 1-3에 나타난 바와 같이 구형 피봇의 파괴를 나타낸다. 잘못 설계된 Steel-on-steel Cylindrical 피봇에서는 패드 외경이 휘어지는 현상이 종종 발견된다. 이런 놀림 손상은 패드와 하우징 마모가 분명히 나타나는 그림 15에 나타나있다.

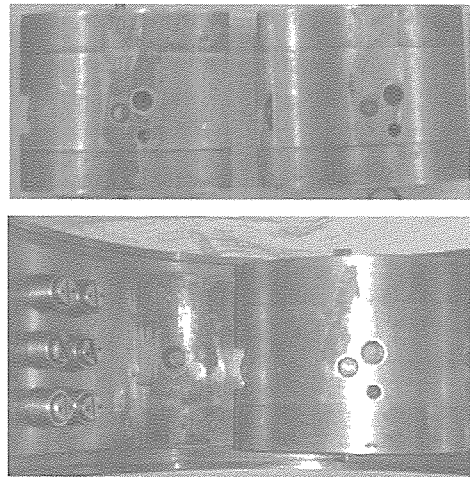


그림 15 Steel-on-steel Cylindrical Pivot-Housing and Pivot Wear

이 마모는 운전중 베어링 간격 증가라는 결과를 낳는다. 간격이 증가함에 따라 베어링 댐핑이 감소하여 로타 진동이 증가하는 원인이 된다. 이는 베어링

패드에 동하중을 증가시켜 마모가 증가되는 원인이 된다. 베어링의 등가 강성과 댐핑이 증가된 베어링 간격과의 관계는 그림 16, 17에 나타나 있다. 베어링 간격이 증가함에 따라 등가 베어링 댐핑, 강성 모두 감소한다. 베어링 간격이 7.5mil에서 18mil까지 변화함에 따라 베어링의 수평 등가 강성은 4.6×10^6 lb/in에서 2.0×10^6 lb/in까지 변하는데 이는 약 57% 감소이다. 유사하게 베어링의 수직 등가 강성은 8.7×10^6 lb/in에서 4.0×10^6 lb/in까지 변하는데 이는 약 54% 감소이다.

Steel-on-Steel Cylindrical Pivots

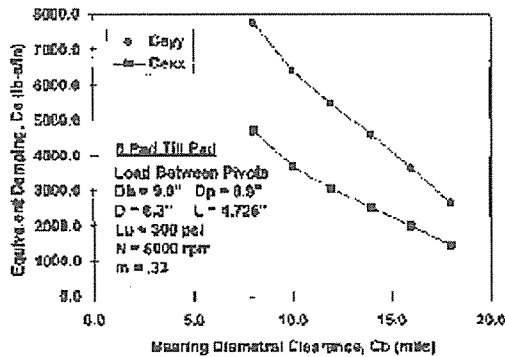


그림 16 등가 베어링 강성 대 베어링 간격

Steel-on-Steel Cylindrical Pivots

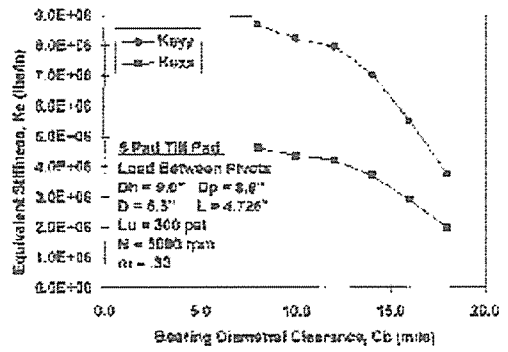


그림 17 등가 베어링 댐핑과 베어링 간격

또한 베어링의 유효 댐핑도 수평 성분이 4.7×10^3 lb/in에서 1.3×10^3 lb/in 변하는데 이는 72% 감소이고, 수직 성분은 7.8×10^3 lb/in에서 2.6×10^3 lb/in으로 67% 감소한다. 만약 베어링 내경이 6.3 Inch라고 하면 일반적인 설계 간격은 약 9.5에서 12.5mil로 된다.(저어널 직경 당 인치 간격은 1.5에서 2.0mil이다)

탈질설비 적용사례(보일러, 소각로, 시멘트 설비)



Fuel Tech. Korea
박정봉 이사장
TEL : (0502) 669-7627

1. 개요(ABSTRACT)

Urea(요소)를 사용하는 SELECTIVE NON-

CATALYTIC NOx REDUCTION 장치는, 한국의 Cement kiln이외에 많은 보일러에도 성공적으로 적용되어 있다. 1993년 이후로, Urea SNCR기술인 "NOxOUT Process" 장치는 상업적으로 250Mwe 발전용량의 석탄연료 사용 유틸리티 보일러(Coal-Fired Utility Boilers) 2대와, 4대의 석탄을 연료로 하는 공업용 열병합발전 보일러들(Coal-Fired Industrial Co-Gen. Boilers), 10대 이상의 도시생활 폐기물 소각로들(Municipal Solid Waste Incinerators)과 다수의 산업폐기물 소각로들에 설치되어 있다. 또한 단기간의 시험 적용들(short-term tests)은 정유공장의 Process heater, Refinery Package Boiler와 클링커 생산 시멘트