

SMART 제어봉구동장치용 볼스크류의 수명 계산

Fatigue Life Estimation of Ball Screw in Control Element Drive Mechanism of SMART

이재선, 김지호, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로에 사용되는 제어봉구동장치에는 여러 구동방식이 적용되고 있으나, 볼스크류 방식은 정밀 이송과 고강성을 갖는 특징으로 인해 SMART에도 그 적용이 검토되고 있다. 일반적으로 볼베어링 및 볼스크류는 정상 운전 상태에서 피로에 의한 플레이킹에 의해 파손이 발생하고 있으며, 이에 따른 피로 수명은 통계적인 방법을 이용해 예측되고 있다. 본 논문에서는 볼스크류의 피로 수명 평가 방법을 개발하고, SMART 운전 조건에서 적용 가능성을 검토하였다

Abstract

Various kinds of mechanisms are applied or studied for the driving control elements in reactors. One of these mechanisms is a ball screw type drive mechanism, which has advantages in precise operation and high stiffness. So this system is one of the candidate control element drive mechanism of SMART. The fatigue lifes of ball bearings and ball screws are generally limited by flaking at normal operation, and are estimated by statistical method. A method to estimate the fatigue life of the ball screw on a control element drive mechanism is presented, and the suitability of ball screw type mechanism is discussed in this paper.

1. 서 론

원자로에 장착되는 제어봉구동장치의 구동원리로는 마그네틱 잭 방식, 선형 펄스모터 방식, 랙-피니언 방식, 볼스크류 방식, 수압 피스톤 방식 및 와이어 드럼 방식 등 여러 종류가 사용되고 있다. 이중 SMART에 적용 가능한 제어봉 구동 방식으로 스텝모터를 이용하여 제어봉의 정밀한 위치 제어가 가능한 볼스크류 방식의 제어봉구동장치가 검토되고 있다[1].

볼스크류형 제어봉구동장치는 회전형 스텝모터의 회전 운동이 베벨기어를 통하여 외스

플라인으로 전달되면, 전달된 동력은 스플라인집합체의 내스플라인을 통하여 볼너트를 회전시킴으로써 스크류의 직선운동으로 변환된다. 스크류의 직선운동은 스크류와 베이요넷 장치로 연결된 연장봉으로 전달되어 하단의 제어봉 집합체를 상하 이송한다.

볼스크류는 제어봉 구동장치 원자로의 일차수로 윤회되어야 하므로 재질은 스테인리스강을 적용하여야 하며, 본 논문에서는 이와 같은 재질 및 윤회 조건 하에서 볼스크류의 피로 수명을 평가하도록 한다.

2. 볼스크류의 설계

2.1 볼의 순환방식 비교

볼스크류는 볼이 스크류와의 틈새를 순환한 후 다시 원래의 자리를 채우고 하중을 지지할 수 있도록, 스크류 너트 및 내부로 볼을 순환시킬 수 있는 순환튜브로 구성되어 있다.(Fig. 1 참조). 볼스크류의 외부에 순환 튜브를 갖고 볼을 순환시키는 구조를 외부순환방식(Fig. 1A)이라 하며, 반대로 너트에 구성된 Deflector를 이용하여 내부에서 볼을 순환시키는 구조를 내부순환방식(Fig. 1B)이라 한다.

제어봉구동장치에 사용되는 볼스크류는 제작이 용이한 외부순환방식을 채택하도록 한다.

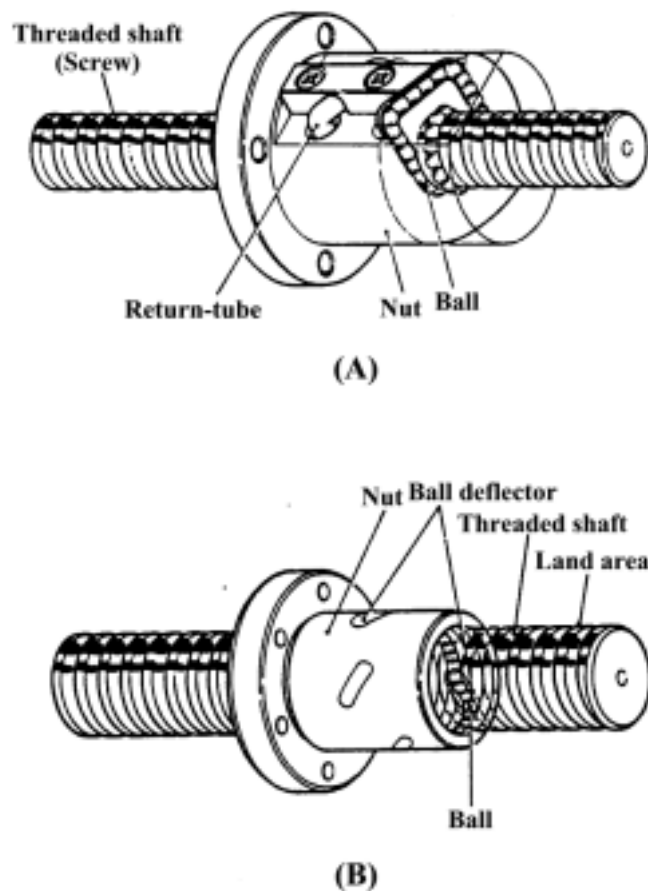


Fig. 1 Ball transfer methods

2.2 볼스크류의 정격하중

볼스크류형 제어봉구동장치에 적용되는 볼스크류에는 경방향 하중이 거의 작용되지 않고 축방향 하중이 지배적으로 작용하게 되므로 베어링의 피로 수명을 예측함에 있어 기본 축방향 동정격 하중을 고려한다. 볼스크류에 있어서 기본 축방향 동정격 하중(basic axial dynamic load rating)이란 볼스크류가 100만 회전의 정격 회전수명을 갖도록 하는 일정한 축방향의 하중을 의미한다. 이 경우 볼스크류는 기본 축방향 동정격 하중이 작용하는 상태에서 100만 회전 후에 스크류 또는 볼스크류 궤도 그루브 면이나 볼의 표면에 박리(flaking)형태의 파손이 90%의 볼스크류에서 발생하지 않는 확률적 수명으로 정의된다.

볼스크류는 구조 상 일정한 접촉각을 갖는 앵귤러 콘택트 볼베어링이 볼스크류의 열수만큼 복열로 배열된 형태로 고려할 수 있다. 복열의 스러스트 베어링의 기본 축방향 동정격 하중은 다음 식으로 얻는다[3].

$$C_a = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{C_{ai}} \right)^{\frac{10}{3}} \right]^{-\frac{3}{10}} \quad (1)$$

여기서 Z_i : i 번째 베어링의 볼개수
 C_{ai} : i 번째 베어링의 기본정격하중
 n : 베어링 열수

볼스크류는 하나의 볼스크류에 완전한 베어링을 이루는 n 개의 권수와, 볼의 순환을 위해 0.5개의 불완전한 베어링을 형성하게 되며, 동일한 형태의 볼스크류가 N 개 연결되어 있는 일반적인 형태를 갖는다. 이러한 경우 볼스크류의 총 권수는

$$n_{total} = (n + 0.5)N \quad (2)$$

와 같으며, 완전한 권인 경우에 1권당 볼개수는 다음과 같다.

$$Z = Integer \left[\frac{\sqrt{l^2 + (\pi D)^2}}{d} \right] \quad (3)$$

여기서 l : 이송 리드 (mm)
 D : Ball center diameter (mm)
 d : 볼지름 (mm)

이와 같이 계산된 볼개수를 이용하여 볼개수 Z_1 개의 완전한 권이 $n \times N$ 개이고, 볼개수 Z_2 개의 불완전한 권이 N 개이면 식 (1)의 기본 동정격하중은 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$C_a = (Z_1 n N + Z_2 N) \left[\left(\frac{Z_1}{C_{a1}} \right)^{\frac{10}{3}} n N + \left(\frac{Z_2}{C_{a2}} \right)^{\frac{10}{3}} N \right]^{-\frac{3}{10}} \quad (4)$$

여기서 C_{a1} : 완전한 권의 기본 동정격하중 (N)
 C_{a2} : 불완전한 권의 기본 동정격하중 (N)

식 (4)를 정리하면 다음과 같다.

$$C_a = N^{\frac{7}{10}} (n Z_1 + Z_2) \left[n \left(\frac{Z_1}{C_{a1}} \right)^{\frac{10}{3}} + \left(\frac{Z_2}{C_{a2}} \right)^{\frac{10}{3}} \right]^{-\frac{3}{10}} \quad (5)$$

각 열을 이루는 기본 베어링의 기본 축방향 동정격하중은 다음과 같다.

$$C_a = b_m f_c Z^{\frac{2}{3}} d^{1.8} \quad (6)$$

for $d < 25.4 \text{ mm}$ and $\alpha = 90^\circ$

$$C_a = b_m f_c (\cos \alpha)^{0.7} \tan \alpha Z^{\frac{2}{3}} d^{1.8} \quad (7)$$

for $d < 25.4 \text{ mm}$ and $\alpha \neq 90^\circ$

$$C_a = 3.647 b_m f_c Z^{\frac{2}{3}} d^{1.8} \quad (8)$$

for $d > 25.4 \text{ mm}$ and $\alpha = 90^\circ$

$$C_a = 3.647 b_m f_c (\cos \alpha)^{0.7} \tan \alpha Z^{\frac{2}{3}} d^{1.8} \quad (9)$$

for $d < 25.4 \text{ mm}$ and $\alpha \neq 90^\circ$

여기서 b_m : 베어링 성능 향상 보정 계수 (= 1.3)

f_c : 표로부터 구해지는 계수[2]

Z : 볼개수

d : 볼 지름

D : 볼중심 지름

α : 접촉각

ISO 기준에서는 고탄소 크롬 베어링 강을 이용하여 제작하고, 전경화 열처리된 베어링에 대해 상기의 기준을 적용할 수 있기 때문에 스테인리스 강을 사용하는 제어봉구동장치에 볼스크류에 대해서는 표면 경도의 저하에 따른 정격하중의 감소를 고려하여야 한다. 일반적인 베어링 강인 경우 웨도룬의 표면 경도는 HRC 60 ~ 64의 값을 갖게된다. 웨도룬 및 전동체의 표면 경도가 HRC 58 이하인 경우에는 다음과 같이 정격 하중의 감소를 고려하여야 한다[3].

$$C_a' = C_a \left(\frac{RC}{58} \right)^{3.6} \quad (10)$$

여기서 RC : Rockwell hardness (C scale)

2.3 볼스크류의 정격수명

볼스크류의 수명이라 함은 볼스크류를 이루는 각 베어링에 있어 궤도를 또는 전동체에 첫번째 피로 파손이 발생하게 되는 볼스크류 궤도의 상대 회전수를 말한다. 일반적으로 볼스크류의 수명을 나타냄에 있어 사용되는 기본 정격 수명(basic rating life)이란 동일한 운전 조건하에서 개개의, 또는 동일 볼스크류 군 중에 90%의 생존 신뢰성을 갖는 수명을 말한다[3]. 원자로에서와 같이 베어링의 파손이 원자로 시스템 전체에 치명적인 결과를 야기할 수 있는 경우에는 95% 또는 99%의 생존 수명이 보장되어야 하므로 이에 따른 영향을 고려하도록 한다.

볼스크류의 피로수명은 정격회전수명과 정격거리수명으로 구분할 수 있는데 두 수명 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$L_s = \frac{Ll}{10^6} \quad [km] \quad (11)$$

여기서 l : 이송 리드 (mm)
 L_s : 정격거리수명
 L : 정격회전수명

정격회전수명은 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$L = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C_a}{P} \right)^3 \times 10^6 \quad [revolutions]$$

여기서 P : 볼스크류에 작용하는 축방향 하중

a_1 : 수명 보정 계수 (신뢰도 계수)

베어링의 생존 확률에 따른 보정 계수, 90% 생존 수명의 경우 1로 적용

a_2 : 수명 보정 계수 (재료 계수)

베어링 재질을 고려한 계수

a_3 : 수명 보정 계수 (운전조건 계수)

윤활 특성에 따른 계수로 볼베어링의 경우

- 점도가 13 cSt이하

- dmN값이 10,000 이하인 경우

(dm : 피치원 지름(mm), N : 회전속도 (rpm))

등에서는 1 이하의 값을 가짐.

여기서 a_1 계수는 베어링의 생존 수명 확률에 따른 계수로 다음 표와 같다[3].

Table 1 신뢰도 수명 보정 계수(a_1)

Reliability (%)	a_1
90	1
95	0.62
96	0.53
97	0.44
98	0.33
99	0.21

a_2 와 a_3 계수는 일반적으로 a_{23} 계수로 함께 고려하며, 특히 윤활 조건에 따라 고려되어야 하는 계수이다. 윤활 오일의 점도 변화에 따른 계수는 다음 그림을 참고한다[3].

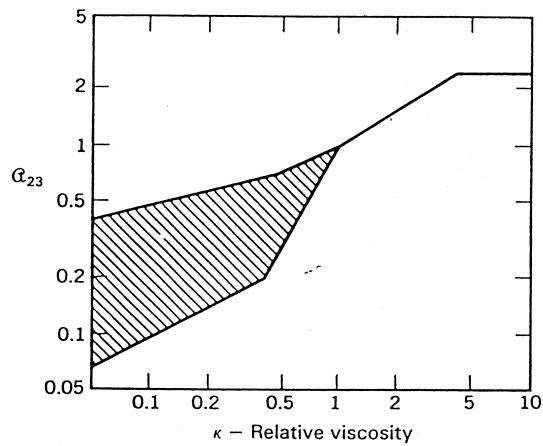


Fig. 2 Bearing life adjustment factor with respect to lubricant viscosity

Fig. 2에서 상대점도값(κ)은 적절한 윤활 조건하에서의 오일 점도에 대해 실제 운전 조건하에서의 운전 조건 비를 나타낸다.

a_{23} 계수의 값은 각 경우에 대해 이미 결정되어 있는 값이 아니므로 이 값의 결정은 실험적 결과를 바탕으로 예측하여야 한다.

3. 볼스크류의 기본 동정격 하중 및 피로 수명 예측

볼스크류에는 가동부의 자중과, 하단에 있는 해제스프링의 복원력이 작용하게 된다. 따라서 볼스크류에는 외부 교란이나 동역학적 거동에 의한 경방향 하중을 제외하고는 지배적으로 큰 축방향 하중이 항상 작용하게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 적용 조건하에서 볼스크류의 피로 수명을 예측하도록 하였다.

3.1 볼스크류의 크기 및 형식의 결정

볼스크류를 설계함에 있어 기본적인 설계 사양으로 단열의 3권의 완전한 권과 0.5권의 불완전 권을 갖는 볼스크류로 잠정 설계를 진행하도록 한다.

볼스크류에 사용되는 볼은 수급을 고려하여 4.7625mm(3/16")를 선정하며, 재질은 STS440C로 한다.

볼스크류의 기본 설계 데이터는 다음과 같다.

접촉각	: 45°
볼중심지름	: 30 mm
리드	: 15mm
열수	: 3열
불완전열수	: 0.5열

볼스크류의 내부 설계를 위해서는 케도홈 반지름 및 볼개수의 선정이 필요하다. 베어링에 있어 외륜의 역할을 하는 볼스크류 케도홈 반지름과, 내륜의 역할을 하는 스크류 케도홈 반지름은 볼지름의 55%의 값을 고려하도록 한다.

3.2 볼스크류에 작용하는 하중

SMART에서 볼스크류에는 가동부 중량으로 인한 하중이 약 65kgf 작용하고 있으며, 해제스프링에 의해 자중과 같은 방향으로 복원력이 작용한다. 해제스프링의 복원력은 최대 1,500N 이다. 제어봉구동장치의 경우 심한 외부의 교란 하중은 항상 작용하는 것이 아니므로 기계의 진동과 충격에 의한 영향을 고려하는 하중 계수의 값은 1.2 ~ 1.5로 한다[3]. 볼스크류에 작용하는 하중은 외력에 하중 계수를 곱한 값을 사용하며, 안전 설계를 고려하여 하중 계수를 1.5로 산정하였다.

3.3 볼스크류의 피로 수명 계산

볼스크류의 수명을 예측하기 위해 기본 축방향 동정격 하중을 계산한다[식 (5) 및 (7) 참조].

먼저 각열의 베어링에 공급되는 볼개수를 식 (3)을 이용하여 계산하고, f_c 계수는 표로부터 내삽법을 이용하여 구한다. 이제 식 (7)을 이용하여 단열 앵글러 콘택트 볼베어링의 기본 축방향 동정격 하중을 계산하면 다음과 같다.

$$C_{a1} = b_m f_c (\cos \alpha) Z_1^{2/3} d^{1.8} = 10150.9 \text{ [N]}$$

$$C_{a2} = b_m f_c (\cos \alpha) Z_1^{2/3} d^{1.8} = 6394.7 \text{ [N]}$$

상기 결과를 이용하여 전체 볼스크류의 동정격하중을 구하면 다음과 같다.

$$C_a = N^{\frac{7}{10}} (nZ_1 + Z_2) \left[n \left(\frac{Z_1}{C_{a1}} \right)^{\frac{10}{3}} + \left(\frac{Z_2}{C_{a2}} \right)^{\frac{10}{3}} \right]^{-\frac{3}{10}} = 24475.99 \text{ [N]}$$

볼스크류에 작용하는 하중은 자중 및 해제스프링의 복원력이며, 안전 설계를 위해 해제스프링이 최대 압축되었을 때를 가정하여 전체 축방향 하중으로 고려한다.

$$P = 650 \times 1.5 + 1500 = 2475 \text{ [N]}$$

이제 베어링의 피로 수명은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{10} &= a_1 a_{23} \left(\frac{C}{P} \right)^3 \times 10^6 \\ &= a_1 a_{23} \times 967 \times 10^6 \text{ [rev.]} \end{aligned}$$

수명 보정 계수를 고려하기 위해 a_{23} 계수는 Fig. 2를 참고하여 윤활 조건이 열악한 경우를 반영할 수 있도록 0.5를 선정한다. 이 계수는 베어링 수명 시험을 기초로 하여 최종 보정될 값이다.

a_1 계수는 생존 수명 99%일 때 0.21을 고려하므로 최종 예측 피로 수명(99% 생존 수명)은 다음과 같다. 볼스크류가 1회전함에 따라 스크류는 15mm 움직이게 되므로 스크류의 수명을 거리로 환산할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1 &= 0.21 \cdot 0.5 \cdot L_{10} = 101 \times 10^6 \text{ rev.} \\ &= 1515 \text{ km} \end{aligned}$$

4. 결 과

1. 제어봉구동장치의 제어봉 이송에 사용되는 볼스크류의 피로 수명 예측 방안을 제시하였으며, 특히 물로 윤활되는 조건과 볼스크류 99% 생존 확률에 대해 볼스크류의 피로 수명을 예측하였다.
2. 일반적인 수명 보정 계수를 적용하는 경우, 볼스크류의 피로 수명은 매우 크게 예측됨에 따라 제어봉구동장치에 적용이 가능할 것으로 판단된다.
3. 볼스크류의 예측 피로 수명은 일반적으로 광유로 윤활되는 경우에 적용되는 실험식 및 통계식이므로, 물로 윤활되는 경우 실험을 통한 수명 계수의 산정이 필요하다. 따라서 추후 실험을 통한 수명 보정 계수에 대한 연구가 필수적이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 한국원자력연구소, “신형원자로기술개발 일체형원자로 기기개발 및 검증시험 1단계 최종보고서”(과학기술부), 1998
- [2] (주)세일중공업, “정밀 Ball Screw 개발에 관한 연구 최종보고서”(과학기술처), 1992
- [3] Tedric A. Harris, “Rolling Bearing Analysis”, John Wiley & Sons, Inc.,
- [4] “KBC Rolling Bearing Catalogue”, 한화기계(주)