

잔열제거계통 모터구동밸브의 압력잠김 및 열고착 현상 분석

송은실* · 김태일* · 이광남*

Pressure Locking and Thermal Binding Analysis of the RHR Motor Operated Valve

Song Eun Sil, Kim Tae Il and Lee Kwang Nam

Key Words : RHRS(잔열제거계통), Pressure Locking(압력잠김), Thermal Binding(열고착), Motor Operated Valve(모터구동밸브), Pressure Trapping(압력트랩핑)

Abstract

The stem thrust required to unwedging a gate valve is influenced by the pressure and temperature when the valve is closed and by the changes in these conditions between closure and opening. "Pressure Locking" and "Thermal Binding" refer to situations where pressure and temperature effects cause the unwedging load to be much higher than normal. A model of these phenomena has been developed. The effects of pressure and temperature are analyzed to determine the change in this disk-to-seat "interference". Flexibilities or Stiffness of the disk and body strongly influence the unwedging thrust. Calculation and limited comparison to data have been performed for the RHR motor operated valve designs and scenario. Pressure changes can increase the unwedging thrust when bonnet pressure exceeds the pressure in the adjacent piping and temperature changes can increase the unwedging thrust when a temperature change after closure produces an increase in the disk-to-seat interference.

1. 서 론

원자력발전소(이하 원전이라 칭함) 안전관련 모터구동밸브에서 동작불능 고장이 발생하면 원전의 안전성 및 신뢰성을 크게 저하시킬 수 있으므로 밸브 전반에 대한 안전성 입증에 대한 필요성이 대두되었다. 미국의 경우 규제기관 인 NRC(National Regulatory Commission)에서 발행한 모터구동밸브에 대한 규제지침('89년도) 및 동력구동밸브에 대한 규제지침('95년도)에 따라 전 원전에 대한 안전성 평가를 완료한 상태이며, 우리나라는 과학기술부에서 1997 년도에 발행한 모터구동밸브 및 동력구동밸브에 대한 규제 권고사항에 따라 전 원전에 걸친 안전성 평가를 수행중에 있다.⁶⁾ 이는 모든 안전관련 모터구동밸브가 설계기준 사고를 비롯한 다양한 운전조건하에서 수명기간 동안 적절히 동작할 수 있어야 하며, 모터구동밸브의 설계기준은 밸브 및 구동기 자체의 전기적 또는 기계적 설계요건과 용량요건 뿐 아니라 밸브가 운전되는 운전조건 및 주위 환경요건 등을 만족해야 함을 의미한다. 따라서 설계기준사고와 더불어 발

전소 운전조건에 의해 발생할 수 있는 동력구동게이트밸브의 압력잠김 및 열고착 현상에 대한 밸브의 안전성 평가를 수행하고 있으며, 모든 안전성 관련 동력구동밸브의 운전조건중 압력잠김 및 열고착 현상의 발생 가능성을 검토한 후 선정된 밸브 및 운전조건에 대한 압력잠김 및 열고착 현상의 정량적인 분석을 수행하여야 한다. 본 논문에서는 압력잠김 및 열고착 현상의 상세분석 방법을 제시하고 잔열제거계통 모터구동게이트밸브에 대한 압력잠김 및 열고착 해석결과를 분석하였다.

2. 압력잠김 및 열고착 현상

동력구동게이트밸브에 발생하는 압력잠김 및 열고착 현상은 게이트 밸브가 갖는 디스크와 시트 구조의 특성과 운전조건, 즉 계통내 유체의 압력과 온도에 크게 영향을 받는다.

2.1 압력잠김 현상

압력잠김 현상(Pressure Locking)은 밸브가 닫혀 있는 상태에서 압력트랩핑(Pressure Trapping) 또는 본넷가열(Bonnet Heat-Up)현상에 의하여 본넷에 고압이 형성되어 밸브 전, 후단의 압력보다 클 경우 발생한다.(Fig. 1 참조) 정상적인 전, 후단의 차압에 더하여 고압의 본넷압력으로 인해 밸브 디스크를 가로질러 발생하는 부가적 압력이 디스크 및 시트

* 한국전력기술㈜

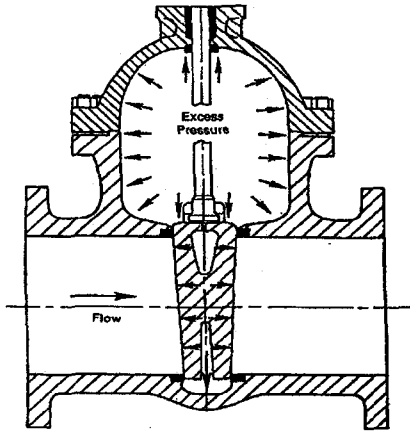


Fig. 1 Pressure Locking

를 더욱 밀착시켜 접촉력을 증가시킴으로 인해 열림 요구 쓰러스트를 증가시키는 현상이다. (1)(2)

2.2 열고착 현상

열고착 현상은 밸브의 열림 및 닫힘시 계통내 유체 및 주위온도와 관련된 현상으로서, 고온일 때 밸브가 닫히고 밸브를 열기전에 밸브가 충분히 냉각되는 경우에 발생한다.(Fig. 2 참조) 이는 밸브 본체와 디스크의 재질 또는 온도의 차이로 인해서 디스크와 본체의 팽창 및 수축의 차이에 의하여 디스크가 시트에 고착되는 현상이다. 즉 계통 및 주위온도의 변화에 의하여 밸브 몸체보다 디스크가 더 팽창하거나 디스크보다 밸브 몸체가 더 수축할 때 발생한다. (2)(6)

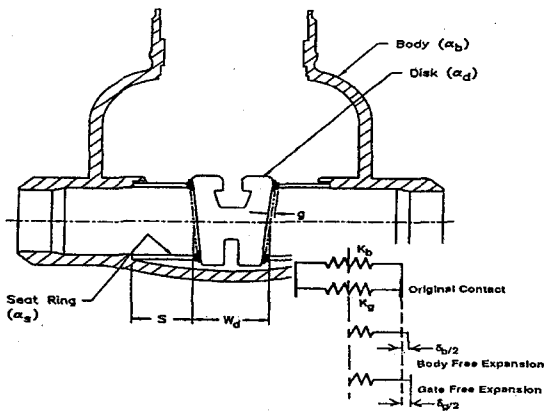


Fig. 2 Thermal Binding

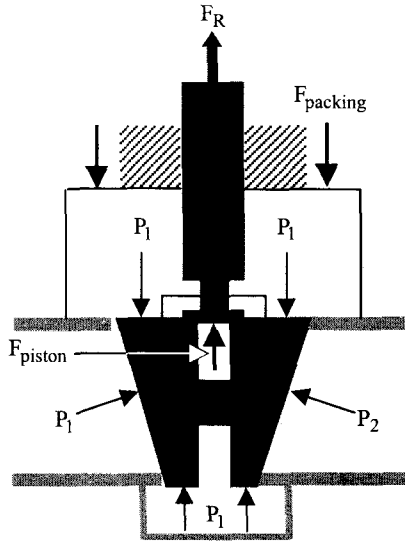


Fig. 3 Valve Stem Loading(at Unseating: $P_1 > P_2$)

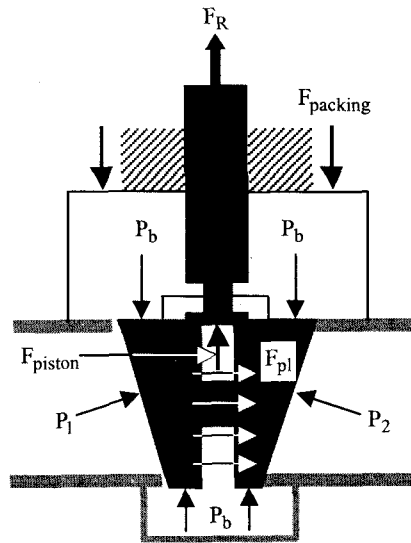


Fig. 4 Valve Stem Loading with PLTB
(at Unseating: $P_b > P_1, P_2$)

Fig. 3은 정상조건하에서 밸브 열림시 작용하는 힘들을 나타내었으며, Fig. 4는 압력잠김 및 열고착 현상 발생시 밸브 열림시 작용하는 힘들을 나타내었다.

3. 해석계통 및 운전조건

원전의 잔열제거계통(정지냉각계통)은 발전소 정지 및 기동시 원자로냉각재계통을 냉각 및 가열시키는 역할을 하는 계통이다. 정상운전중에 잔열

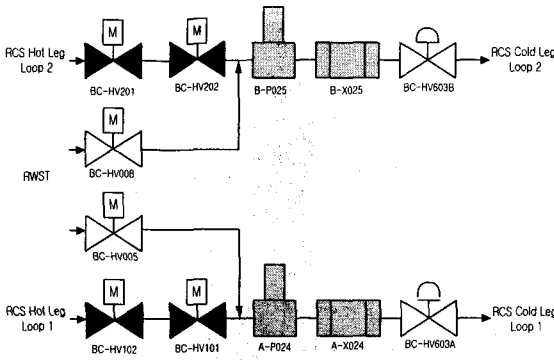


Fig. 5. Simplified Residual Heat Removal System

제거 계통은 원자로냉각재계통으로 부터 격리되어 있다가 발전소 정지시 일정한 압력 및 온도 (367psig, 176°C)가 되면 밸브를 열어 원자로냉각재 계통에 연결된다(Fig. 5 참조). 또한 발전소 기동시 잔열제거계통이 연결된 상태에서 발전소를 기동하며 일정압력 및 온도(750psig, 176°C)가 되면 밸브를 닫으므로 원자로냉각재계통으로 부터 격리된다. 따라서 밸브를 열고 닫는 시점에서의 원자로냉각재계통의 상태는 거의 일정하나 원자로냉각재계통과 잔열제거계통의 연결 또는 격리시키는 잔열제거계통의 모터구동밸브는 운전모드에 따라 변하는 원자로냉각재계통의 압력 및 온도에 직접적인 영향을 받으므로 압력잠김 및 열고착 발생 가능성이 높다.

3.1 압력조건

정상운전에서 밸브가 닫혀있는 상태에서 전단 밸브의 누설로 인해 밸브 본넷에는 정상운전중의 원자로냉각재계통의 압력이 작용하고 발전소 정지시 잔열제거계통이 원자로냉각재계통에 연결되므로 밸브 전단은 잔열제거계통이 원자로냉각재계통에 연결될 때의 원자로냉각재계통의 압력이 작용하고 밸브 후단은 밸브가 닫혀있음으로 인해 대기압이 작용한다. 따라서 본넷압력이 밸브 전,후단의 압력보다 높음으로 인해 압력잠김이 발생할 수 있다.(4)(5)

3.2 온도조건

잔열제거계통 모터구동밸브는 발전소 기동시 밸브가 열려있는 상태에서 일정한 원자로냉각재계통 온도(176°C)에서 첫번째 밸브(BC-HV102 /201)를 먼저 닫고 두번째 밸브(BC-HV101/ 202)를 닫는다. 정상운전 동안 계속 닫혀있다가 발전소 정지시 일정한 원자로냉각재계통 온도(176°C)에서 밸브 BC-

HV102/201를 먼저 열고 밸브 BC-HV101/202를 연다. 따라서 밸브 BC-HV101/202는 원자로냉각재계통의 온도가 176°C에서 닫고 정상운전 동안 밸브 상단은 밸브 BC-HV102/201에 의하여 원자로냉각재계통과 격리되어 있으므로 거의 대기압, 상온조건을 유지한다. 따라서 발전소 정지시 밸브 BC-HV101/202를 열고자 할때 단합시에 비해 밸브가 충분히 냉각되므로 인해 열고착 현상이 발생할 수 있다.(4)

4. 정량적 해석

4.1 해석모델

모터구동밸브의 압력잠김 및 열고착 현상을 해석하기 위한 해석모델은 Fig. 6과 같다. 밸브 디스크 모델을 위한 기본적인 가정은 밸브 디스크는 허브로 연결된 두개의 디스크로 가정하며, 밸브 시트와 디스크사이의 마찰계수는 일반적인 차압상태에서와 마찬가지로 압력잠김 및 열고착이 발생한 상태에서도 같다고 가정한다.(1)(2)

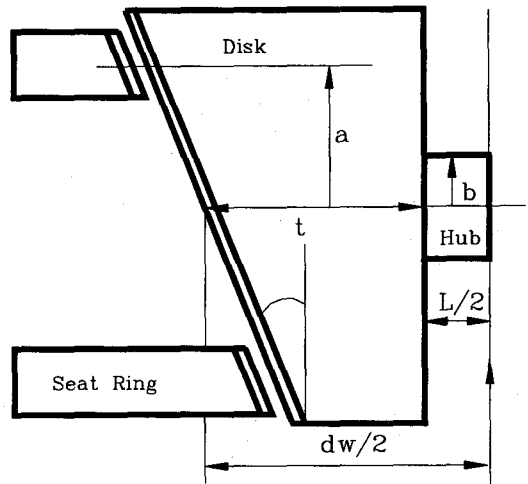


Fig. 6 Valve Model

4.2 압력잠김 및 열고착 현상을 고려한 스템 요구쓰러스트

밸브 시트와 디스크의 바깥쪽 에지 사이에 분포하는 힘은 균일하게 작용하는 것으로 가정한다. 이 힘은 디스크의 바깥쪽 직경부분을 안쪽으로 휘게하고 디스크 허브를 압축시키는 역할을 하며, 본넷압력에 의한 힘은 디스크를 바깥쪽으로 휘게하고 디스크 허브를 팽창시키는 역할을 한다. 따

라서 본넷압력에 의한 디스크 및 시트사이의 변위는 시트에 작용하는 힘에 의한 변위에 의해 균형을 이루어 반대방향으로 작용하며, 이러한 변위 정도에 의하여 열림시 요구 쓰러스트가 결정된다. (1)(2) 이러한 대칭되는 두 힘인 시트로드 및 압력에 의한 변위 및 요구 쓰러스트의 계산방법은 다음과 같다.(2)

압력 및 시트로드에 의한 허브, 디스크 및 밸브몸체의 변위율은 다음과 같다.

$$G_h = \frac{2/L}{\pi \cdot b^2 \cdot E_d}$$

$$G_p = \frac{\Phi}{E_d \cdot t^3}, \quad G_s = \frac{\Psi}{E_d \cdot t^3}$$

$$K_p = \frac{dw}{4\pi \cdot (a+tb) \cdot tb \cdot E_b}, \quad K_s = \frac{dw^2}{4 \cdot tb \cdot E_b}$$

여기서, G_h : 허브의 변위율, (in/lbf)
 G_p, K_p : 압력에 의한 디스크 및 밸브 몸체의 변위율, (in/psi)
 G_s, K_s : 시트로드에 의한 디스크 및 밸브 몸체의 변위율, (in/lbf)

밸브 닫힘과정에서 웨징 쓰러스트에 의하여 밸브의 허브, 디스크 및 몸체에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_c = A_c^{-1} \cdot P_c$$

여기서, A_c : 계수항, P_c : 압력항, S_c : 힘항

$$S_c = \begin{pmatrix} S_{dc} \\ H_{dc} \\ F_{dc} \\ S_{uc} \\ H_{uc} \\ F_{uc} \\ H_c \end{pmatrix}$$

압력, 디스크 및 몸체의 온도, 및 시트로드에 의한 디스크-시트사이의 변위는 다음과 같다.

$$w_c = 2 \cdot G_h \cdot H_c + (G_s + K_s) \cdot (S_{uc} + S_{dc}) + 2 \cdot K_p \cdot P_{bc} + G_p \cdot (P_{uc} + P_{dc} - 2P_{bc}) - dw \cdot \alpha_d \cdot (T_{dc} - T_r) + dw \cdot \alpha_b \cdot (T_{bc} - T_r)$$

밸브 열림시 압력 및 디스크/몸체의 온도에 의한 변위는 다음과 같다.

$$w_o = w_c + dw \cdot \alpha_d \cdot (T_{do} - T_r) - dw \cdot \alpha_b \cdot (T_{bo} - T_r) - G_p \cdot (P_{uo} + P_{do} - 2P_{bo}) - 2K_p \cdot P_{bo}$$

열림시 디스크-시트사이의 변위를 기본으로 열림시 요구되는 쓰러스트는 다음과 같다.

$$S_o = A_o^{-1} \cdot P_o$$

여기서, A_o : 계수항, P_o : 압력항, S_o : 힘항

$$S_o = \begin{pmatrix} S_{uo} \\ H_{uo} \\ F_{uo} \\ S_{do} \\ H_{do} \\ F_{dc} \\ H_o \\ F_o \end{pmatrix}$$

밸브 열림시 압력잠김 및 열고착 현상을 고려한 스템의 총 요구되는 쓰러스트는 다음과 같다.

$$F_{total} = F_o + F_{packing} - F_{piston}$$

여기서, $F_{packing}$: 패킹력

F_{piston} : 피스톤효과에 의한 힘

$$\left(= \frac{\pi}{4} D_s^2 \right)$$

5. 해석 조건 및 결과

5.1 해석조건

잔열제거계통 모터구동밸브의 분석자료는 Table 1 과 Table 2 와 같다. Table 1 은 밸브를 실측하여 얻은 밸브의 형상 및 차원에 대한 자료이며, Table 2 는 분석을 위한 계통 및 밸브의 운전조건을 나타낸다.

Table 1 Dimension of RHR motor operated valve

Variable		BC-HV101 / HV202
Disk Thickness	t	1.958
Seat Radius	a	5.697
Hub Radius	b	2.260
Hub Length	h	0.4035
Disk Total Width	dw	4.72
Wedge Seat Angle	θ	6.5
Stem Diameter	Ds	2.5

Table 2 Operating data of RHR motor operated Valve

변 수	BC-HV101/HV202			
	닫힘		열림	
Bonnet Press. (psig)	Pbc	0	Pbo	2485
Upstream Press. (psig)	Puc	0	Puo	367
Downstream Press. (psig)	Pdc	0	Pdo	0
Disk Temp.(°C)	Tdc	176	Tdo	176
Body Temp (°C)	Tbc	176	Tbo	20

5.2 해석결과

잔열제거계통의 모터구동밸브에 대한 압력잡김 및 열고착 현상 상세분석 결과는 다음과 같다. Table 3 은 정상조건일때의 상세분석 계산결과이며, Table 4 는 열고착현상 만을 고려하여 계산한 계산 결과이다. 또한 Table 5 는 압력잡김 및 열고착 현상을 모두 고려하여 계산한 결과이고 Table 6 은 각각의 경우시 닫힘 및 열림시 디스크-시트사이의 변위량에 대한 계산결과이다.

Table 3 Results of opening stem thrust without PL&TB

Variable	BC-HV101 (lbf)	BC-HV202 (lbf)
Packing Load	4,689	3,042
Closing Total Stem Force	33,609	30,344
Closing Force on Disk	28,920	27,302
Opening Force on Disk	29,450	28,355
Opening Total Stem Force	32,334	29,596

Table 4 Results of opening stem thrust with TB

Variable	BC-HV101 (lbf)	BC-HV202 (lbf)
Packing Load	4,689	3,042
Closing Total Stem Force	33,609	30,344
Closing Force on Disk	28,920	27,302
Opening Force on Disk	34,148	30,390
Opening Total Stem Force	34,371	31,632

Table 5 Results of opening stem thrust with PL&TB

Variable	BC-HV101 (lbf)	BC-HV202 (lbf)
Packing Load	4,689	3,042
Closing Total Stem Force	33,609	30,344
Closing Force on Disk	28,920	27,302
Opening Force on Disk	155,200	154,100
Opening Total Stem Force	147,713	144,974

Table 6 Results of disk-to-seat interference

Condition	Interference	BC-HV101 (inch)	BC-HV202 (inch)
Normal	Wc	0.00106	0.00100
	Wo	0.00134	0.00128
TB	Wc	0.00106	0.00100
	Wo	0.00145	0.00139
PL & TB	Wc	0.00106	0.00100
	Wo	0.00518	0.00512

6. 결론

잔열제거계통 모터구동밸브에 대한 압력잡김 및 열고착현상 상세분석 결과는 Table 3, 4, 5 및 6 과 같으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압력잡김 및 열고착현상을 고려한 디스크-시트사이의 변위 및 열림시 요구 쓰러스트는 차압에 의해 요구 쓰러스트가 결정되는 정상적인 상황(조건)에 비해 열림시 요구 쓰러스트가 4 배 이상 크게 증가하였다.

(2) 압력잡김에 의한 열림시 요구 쓰러스트는 본넷압력, 밸브 몸체 및 디스크의 크기가 클수록 크게 작용하는 것으로 나타났다. 따라서 일반적으로 정상운전중 닫혀있는 고압계통과 연결된 분기배관의 격리밸브중 비상 및 사고시에 열림이 요구되는 밸브는 솔리드 웨지형(Solid Wedging) 밸브 또는 디스크에 홀(hold)을 만드는 등의 압력잡김 현상을 고려한 설계가 필수적이라고 판단된다.

(3) 열고착 현상은 디스크가 최대한 팽창하고 밸브 몸체가 최대한 수축하는 경우 가장 큰 영향을 나타낸다. 따라서 계통유체의 온도차 변화율의 최대치를 적용하여 디스크 및 밸브몸체의 온도차를 최대로 하여 계산하였으나 디스크-시트사이의 변위 및 열림 요구 쓰러스트의 변화량이 매우 작으므로 그 효과는 미미한 것으로 나타났다.

(4) 밸브 닫힘 및 열림시 밸브 몸체 및 디스크의 온도차에 의해서 열고착으로 인해 부가되는 요구 쓰러스트가 결정된다. 원전의 경우 대부분 밸브 몸체 및 디스크의 재질이 같고, 다르다 하더라도 재질의 따라 결정되는 계수(열팽창계수, 탄성계수등) 값의 차이가 적으므로 계통 유체 및 주위온도의 차이에 의한 밸브 몸체 및 디스크의 온도차가 크지 않을 것으로 판단된다.

(5) 따라서 원전 잔열제거계통(정지냉각계통)의 원자로냉각재계통 격리밸브들은 일반적으로 밸브 몸체 및 디스크의 재질이 같고, 온도차도 크지 않으므로 열고착 현상에 의한 밸브 동작불능 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Brian D. B., John F. K, 1996, "Commonwealth Edison Company Pressure Locking Test Report", Fourth NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing, NUREG/CP-0152
- (2) P.S. Damerell, D.H. Harrison, P.W. Hayes, J.W.Simons and T.A.Walker, 1998, "Effect of pressure and temperature on gate valve unwedging", Fifth NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing, NUREG/CP-0152
- (3) Dana E. S.,1995, "Calculation to predict the Required Thrust to Open a Flexible Wedge Gate Valve Subjected to Pressure Locking", Workshop on Gate Valve Pressure Locking and Thermal Binding, NUREG/CP-0146
- (4) K. G. Dewart,1998, "Results of Pressure Locking and Thermal Binding Tests of Gate Valve", 1998, INEEL/EXT-98/00161, NUREG/CR-6611
- (5) "Operating Experience Feedback Report - Pressure Locking and Thermal Binding of Gate Valve", 1993, NUREG-1275
- (6) 한국전력공사, 원자력교육원, 2000, "동력구동밸브 안전성 평가 및 진단시험