

모터구동게이트밸브의 동작시 유체 차압 영향 분석

Analysis for The Effect of Fluid Differential Pressure during The Motor Operated Gate Valve Operation

김 대웅, 박 성근, 강 신철, 홍 승열
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 각각 다른 유체 차압조건에서 모터구동게이트 밸브의 동작시험을 수행하고 유체 차압이 밸브 동작에 미치는 영향을 분석하였다. 시험은 차압이 없는 무차압 상태와 중차압 상태(1400 psid), 고차압상태(2160 psid)로 구분하여 각각 수행하였으며, 모터구동 밸브 진단장비를 사용하여 열림 및 닫힘 행정에 대한 진단신호를 취득하였다. 신호 분석 결과 밸브의 열림 및 닫힘 직전에 유체의 압력 및 쓰러스트가 급격히 증가하는 현상이 나타났으며, 또한 낮은 차압조건보다 고차압 조건에서 요구되는 쓰러스트가 더욱 증가하는 것을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents the effect of the varied fluid differential pressure(DP) during the motor operated gate valve operation. Valve test is performed under the zero DP, medium DP(1400 psid) and high DP(2160 psid) condition. and acquired the diagnosis signal for the opening and closing stroke. The result of signal analysis was verified the differential pressure and thrust is highly increased near the complete opening and closing stroke. Required thrust is more increased in high differential pressure condition than the low differential pressure condition.

1. 서론

밸브는 발전소와 화학플랜트 등의 배관계에 설치되어 유체의 흐름을 차단 또는 조절하는

역할을 수행하는 기기로 밸브의 형태와 사용처에 따라 매우 다양하게 분류되어 진다. 밸브를 동작시키는 동력원에 따라 모터구동밸브, 공기구동밸브, 유압구동밸브 등으로 분류되어지며, 밸브의 형태에 따라 게이트 밸브, 글로브 밸브, 버터플라이 밸브, 볼 밸브 등 매우 다양하게 분류되고 있다. 게이트 밸브는 디스크 형태에 따라 Flexible Wedge형, Solid Wedge형, Double Disc형, Split Wedge형등으로 구분되어지는데, 디스크의 형태에 따라 밸브의 거동 특성이 조금씩 다르기 때문에 디스크 형태 선정시 유체의 온도, 압력 등의 운전 조건과 밸브의 설치 목적, 설계요건등을 충분히 검토하여 선정하여야 한다. 특히 원자력발전소에 사용되어지는 안전관련 모터구동밸브는 밸브의 기능수행이 발전소의 안전 운전과 직접적으로 관계되어 있어 밸브의 설계와 제작이 공인된 규정에 의해 엄격히 관리되고 있으며, 성능개선을 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 미국에서는 1980년중반부터 원전에 사용되어지는 모터구동밸브의 성능 및 안전성 평가에 대해 중장기적이고, 체계적인 연구가 수행되고 있으며, 이를 계기로 모터구동밸브의 성능 평가를 위한 방법론과 시험방법, 진단방법 및 진단장비 등 최신 기술들이 개발되어지고 있다.

본 연구에서는 모터구동밸브중 발전소에서 가장 많이 사용되고 있는 게이트밸브에 대해 3가지 유체 차압 조건에서 동작 시험을 수행하고 이때 모터구동밸브 진단장비를 이용한 진단신호 취득 및 분석을 통하여 유체 차압이 밸브 동작에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본론

2.1 게이트 밸브의 특성 및 종류

게이트 밸브는 디스크가 유체의 흐름 방향에 수직으로 움직이면서 유체를 차단 또는 개방하는 기능을 수행한다. 게이트 밸브는 글로브 밸브에 비해 동작시 동력이 적게 요구되며, 차압을 적게 발생시키는 장점이 있으나, 유량을 조절할 수 있는 기능은 떨어지는 단점이 있다. 게이트 밸브중 flexible wedge형과 solid wedge형은 디스크가 쐐기형상으로 되어 있어 열림 및 닫힘 행정시 밸브 시트면에 디스크가 쐐기 형태로 깊게 박히게 되어 고차압 상태에서도 유체 밀봉 효과가 매우 좋은 특성을 가지고 있으나, 디스크와 밸브 시트면의 마찰력 증가로 동작시 동력이 많이 요구되어진다.

Split wedge형과 double disc형은 디스크 단면이 parallel형태로 되어있어 밸브 시트면과의 마찰력이 커지 않아 밸브의 열림과 닫힘시 동력이 비교적 적게 요구되지만, 고차압에서 유체 밀봉효과는 떨어지는 것으로 알려져 있다. 현재 국내 발전소에서는 대부분 flexible wedge형 디스크를 사용하고 있으며, 부분적으로 split wedge형 또는 double disc형 디스크를 사용하는곳도 있다.

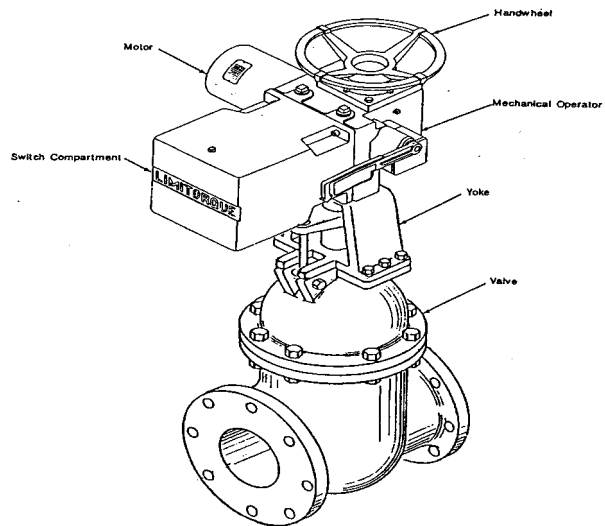


그림 1 모터구동밸브 형상(모터, 구동기, 밸브)

2.2 모터구동밸브의 동작 원리

모터구동밸브는 모터, 구동기, 밸브로 구성되어 있으며, 이 3가지 기기들의 상호 운전 메커니즘에 의해 밸브가 동작되어 진다. 모터에서 발생된 회전력은 구동기를 통하여 밸브 스템에 상하 운동으로 전달되어지며, 밸브 스템의 상하 운동에 의해 디스크가 상하로 움직이면서 배관내 유체를 차단 또는 개방하는 역할을 수행하게 된다. 모터에서 발생한 동력이 밸브 디스크까지 전달되는 과정에서 Helical gear를 비롯한 각종 기어의 연결에 의해 모터에서 발생된 토크가 최종적으로 밸브 스템에서는 쓰러스트로 변환되게 되며, 이와같은 동력전달 과정에서 각 기어간의 상호 마찰력에 의해 동력 손실이 발생되게 된다.

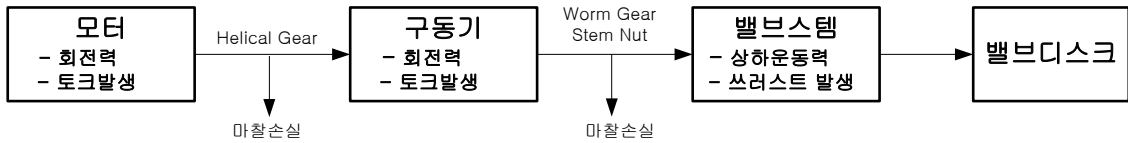


그림 2 모터구동밸브의 동력 전달 과정

2.3 진단원리 및 진단 신호

모터구동밸브의 진단장비는 미국에서 개발된 VOTES, MOVAT 또는 UDS 장비등이 있으며, 최근에는 그 성능이 가장 뛰어난 UDS 장비가 가장 널리 사용되어 지고 있다. 진단은 구동기 또는 밸브 부품에 센서를 부착하여 센서에서 발생하는 신호를 진단장비로 취득하는 방법으로 수행된다. 주요 취득 데이터는 모터전류 및 전압, 밸브스템 쓰러스트, 구동기출력 토크, 스프링 팩 움직임, 리밋스위치 작동시간, 스템위치, 유체 압력등을 측정할수 있으며, 이러한 데이터들은 각종 센서들을 사용하여 취득된다. 센서의 종류는 토크 또는 쓰러스트와 같은 힘을 측정하기 위한 Strain gauge형으로 Top Mounted Load Cell, TTC(Torque Thrust Cell), QSS(Quick)이 있으며, 스템의 이동거리를 측정하기 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 스프링 팩의 움직임을 측정하기 위한 DMT(Displacement Measuring Transducer)등이 있다. 취득된 데이터는 진단신호 분석을 통하여 모터, 구동기 및 밸브의 운전 상태와 부품의 이상상태를 점검하고 밸브의 운전 성능 평가에 활용된다. 그림 [4] 및 [5]는 진단장비를 사용하여 취득하게 되는 모터구동밸브게이트 밸브의 전형적인 신호 상태를 나타내고 있으며, 각 행정별로 유체 차압이 존재하지 않는 상태(No Load, 점선)와 유체 차압이 존재하는 상태(ΔP Condition, 실선)를 함께 나타내고 있다.

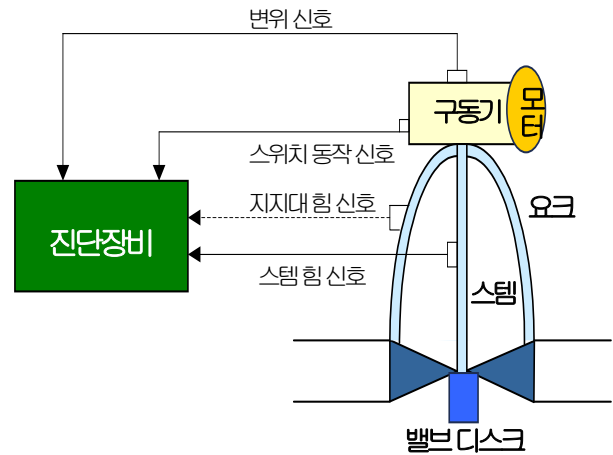


그림 3 모터구동밸브 진단 개념도

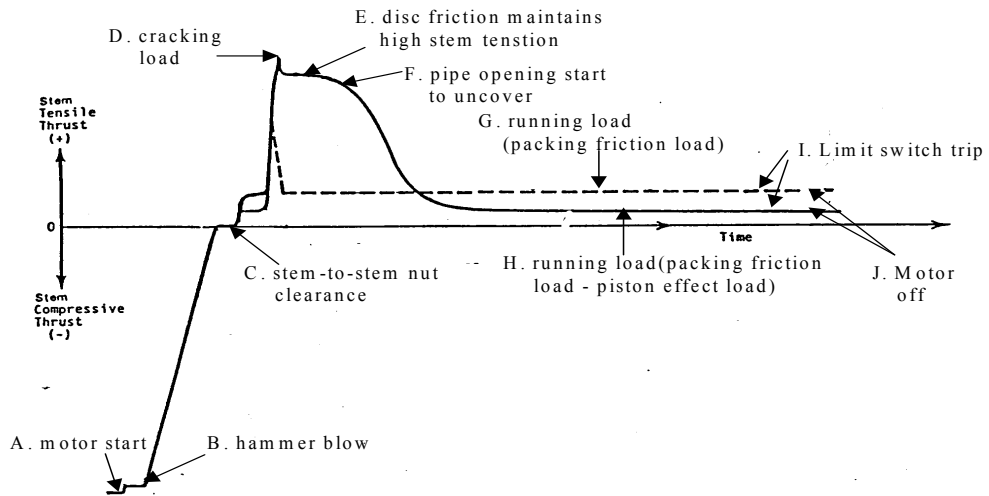


그림 4 게이트 밸브 열림행정의 전형적인 진단신호(stem thrust vs time)

- A : 밸브 동작 신호를 받아 모터의 동작이 시작
- B : 모터의 회전력이 구동기로 전달되어 구동기의 stem nut가 움직이기 시작
- C : 밸브 스템이 디스크를 들어올리기 직전 스템과 스템너트의 비접촉 상태(압축력과 인장력이 0인 지점)
- D : 밸브 디스크가 디스크 시트에서 뿔혀지기 직전 최대 부하(load) 발생 상태
- E : 디스크가 최초로 뿔혀지고 유체 차압에 의한 부하(load)가 지속 발생중인 상태
- F : 밸브의 열림이 본격적으로 시작되는 지점
- G : 스템과 패킹의 마찰력만 존재하는 상태(열림 진행중)
- H : 스템과 패킹 마찰력 - 유체에 의한 피스톤 효과(열림 진행중)
- I : 리미트스위치가 동작하여 밸브의 열림 행정이 완료
- J : 모터 정지

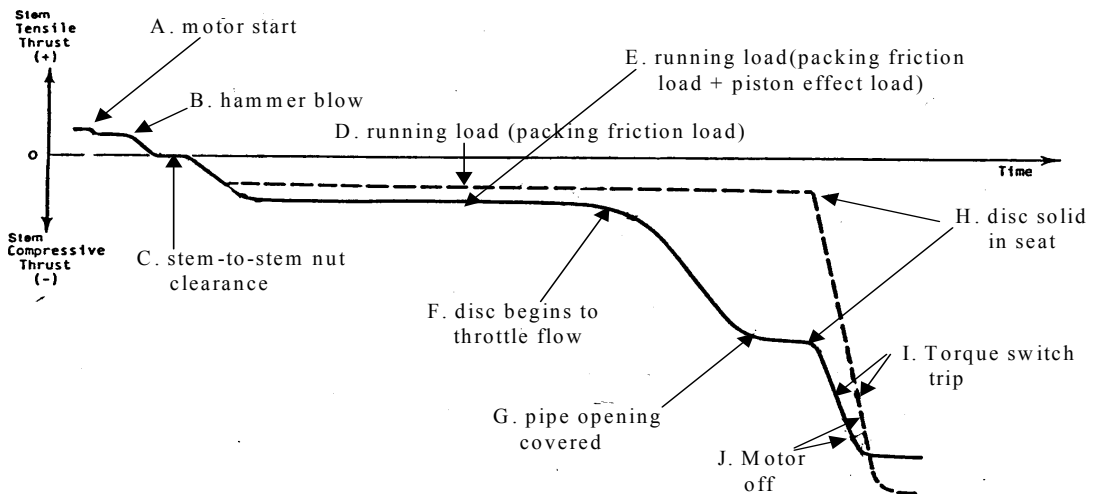


그림 5 게이트 밸브 닫힘행정의 전형적인 진단신호(stem thrust vs time)

- A, B, C : 열림행정과 동일
- D : 스템과 패킹의 마찰력만 존재하는 상태(닫힘 진행중)
- E : 스템과 패킹 마찰력 + 유체에 의한 피스톤 효과(닫힘 진행중)
- F : 유체의 흐름이 급격히 줄어드는 상태(통상 닫힘 80% 이상 진행시 나타남)

- G : 유체의 흐름이 완전히 차단되는 상태
- H : 디스크가 밸브 시트면에 완전 밀착되는 상태
- I : 토크스위치가 동작하여 밸브의 닫힘 행정이 완료
- J : 모터 정지

2.4 밸브의 동작 특성 및 신호 분석

2.4.1 게이트 밸브의 동작 특성

Flexible wedge형 게이트 밸브의 주요 내부형상은 그림 [6]과 같다. 디스크는 쐐기형(wedge)으로 되어 있으며, 디스크 하단 중앙부에 홈이 파져있어 디스크를 flexible 하게 하고 약간의 형상 변형을 허용하는 구조로 되어 있다. 밸브의 동작시 구동기에서 발생된 토크는 패킹마찰력, 피스톤효과, 유체의 차압, 시트 마찰력등 밸브 동작시 발생하는 각종 부하(load)들을 극복하고 닫힘 또는 열림동작을 수행하게 된다. 패킹마찰력은 밸브 스템이 상하로 동작시 스템 부분으로의 유체 누설을 방지하기 위해 설치한 패킹과의 마찰력을 말하며, 피스톤 효과는 디스크 단면적에 작용하는 유체의 저항력(닫힘시) 또는 반발력(열림시)을 의미한다. 시트 마찰력은 디스크의 상하 동작시 밸브 시트면과 접촉하는 부분에서 발생하는 마찰력은 의미하며, 유체차압은 디스크 양단면에 발생하는 유체의 압력차를 의미하는데 위에서 열거한 여러 가지 밸브 부하들중 유체 차압이 밸브 설계시 고려해야할 가장 중요한 설계 요소로 알려져 있다. 밸브는 동작시 이러한 부하들에 의해 각 부분에서 특징적인 동작 특성이 나타나며, 이러한 특성은 진단신호를 분석함으로써 밝혀낼수 있다.

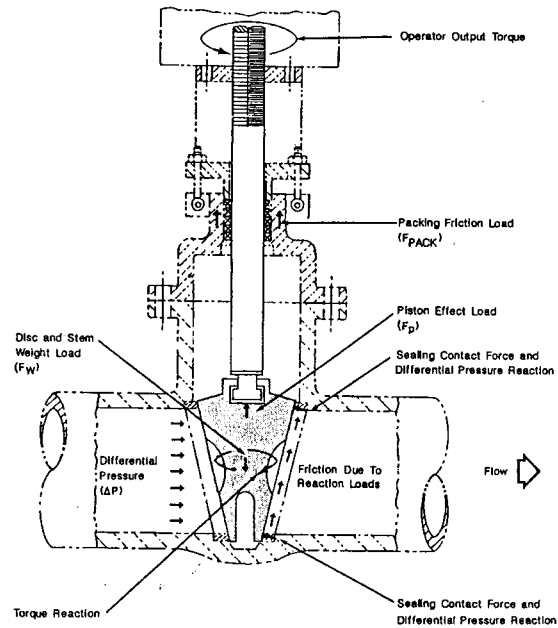


그림 6 게이트밸브에 발생하는 부하(load)

2.4.2 시험밸브의 선정 및 시험 조건

본 연구의 시험대상 밸브는 모터구동게이트 밸브중 국내 원자력발전소에서 가장 많이 사용되고 있는 flexible wedge형 타입 3inch 게이트 밸브를 선정하였으며, 시험은 발전소 현장의 펌프와 밸브등을 이용하여 수행하였다.

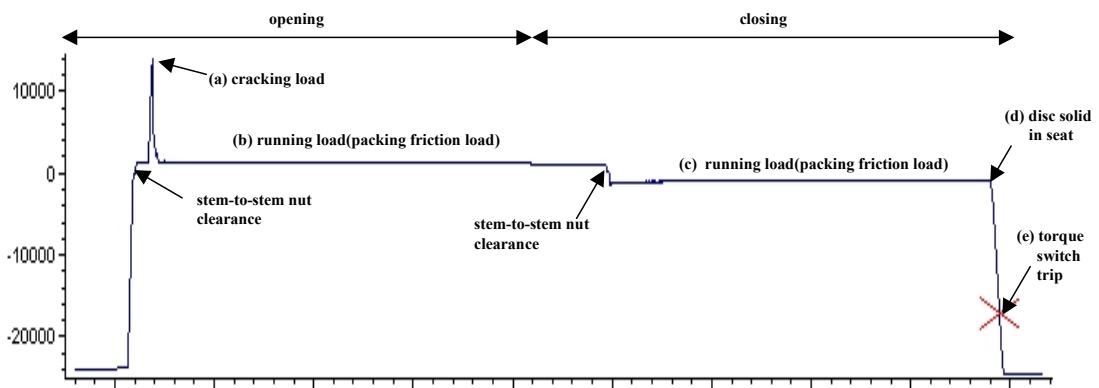
표 2-1 시험 대상 밸브 개요

디스크 형태	flexible wedge	설계압력	158 bar
크기	3 inch	설계온도	286 °C
밸브 제작사	Velan Rateau	모터용량	3.6 kW
구동기 제작사	Joucomatic	토크스위치 설정위치	1.0

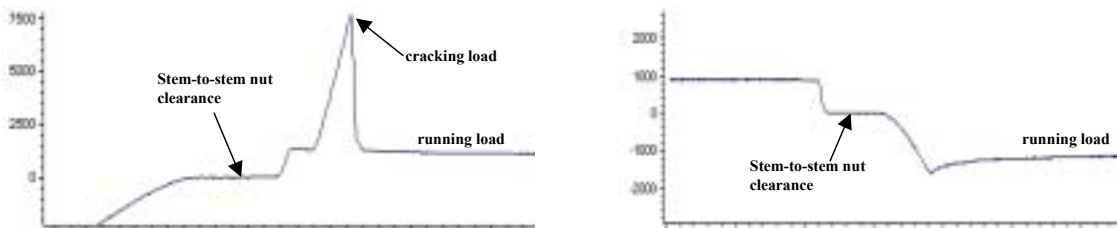
시험은 유체 차압이 존재하지 않는 정적시험과 유체 차압이 발생하는 동적시험으로 분류하여 수행하였으며, 동적시험은 유체 차압 크기에 따른 밸브 동작 특성을 분석하기 위하여 중차압 조건(차압 1400 psid)과 고차압 조건(차압 2160 psid)에서 시험을 수행하고 진단 신호를 비교 분석하였다.

2.4.3 정적진단 신호 분석

시험은 우선 유체의 차압이 없는 상태에서 밸브 동작 시험을 수행하고 진단신호를 취득 분석 하였다. 유체 차압이 존재하지 않는 상태의 시험을 통상 정적진단시험이라고 부르는데, 정적진단 시험은 유체 차압이 없는 상태에서 밸브를 동작시킴으로써 밸브의 부품이상 상태 혹은 동작 이상상태를 점검하고 토크스위치 및 리밋스위치가 적절히 설정되어 있는지 점검하게 된다. 정적진단시험에서 취득한 진단신호를 분석한 결과 결과 열림 및 닫힘 행정에서 stem-to-stem nut clearance, cracking load, runnig load, torque switch trip등 주요 진단점들이 양호한 상태로 나타나고 있으며, 이상신호가 발생하지 않아 비교적 밸브가 건전한 상태를 유지하고 있음을 알수 있다. 취득된 정적진단 신호 및 주요 쓰러스트값은 아래와 같다.



(a) 열림 및 닫힘 행정



(b) 열림 및 닫힘 확대 (stem-to-stem nut clearance)

그림 7. 정적진단시험 취득 신호

표 2-2 정적진단시험 쓰러스트 측정값

지점	a	b	c	d	e
쓰러스트 (lbs)	7690	1104	1083	1040	11110

2.4.4 동적진단신호 분석

동적진단시험은 중차압 조건인 1400 psid와 고차압 조건인 2160 psid에서 각각 수행하였으며, 각 시험조건에서의 진단신호는 그림 [8] 및 [9]와 같다. 열림 및 닫힘행정에서 그림 [4]와 [5]에서 보여준 전형적인 신호 형태와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히 "A"구간 및 "C"구간에서 유체 차압에 의한 영향이 크게 발생하는 것을 신호 분석을 통하여 알 수 있다. 유체 압력신호와 쓰러스트 신호를 비교하여 분석해 보면 고차압 열림 시험에서 cracking load가 발생하기 전까지 유체의 압력은 전단압이 2160 psi, 후단압이 0 psi를 나타내고 있으며 밸브 디스크가 유체의 흐름을 완전히 차단하고 있는 상태이고, 밸브 디스크 전후단에 미치는 차압이 최대인 것을 알 수 있다. Cracking load 발생후 밸브가 조금씩 열리기 시작하면서 유체가 밸브를 통하여 흐르기 시작하면 전단압력은 급격히 떨어지기 시작하고, 후단압력은 반대로 급격히 상승하기 시작한다[A구간]. 밸브가 일정 개도 개방되면 밸브 디스크 전후단의 압력이 같아지게 되는데, 이때는 밸브 동작시 유체 차압의 영향은 거의 없으며, 오직 밸브 스템과 패킹간의 마찰력과 디스크의 피스톤 효과에 의한 부하만 발생하게 된다(running load, B구간). 피스톤 효과는 밸브 디스크 단면적에 미치는 유체의 힘으로 열림 행정에서는 열리는 방향으로 유체 압력이 작용하므로 오히려 밸브의 열림 작용을 도와주는 부하로 작용하며, 닫힘 행정에서는 그 반대로 밸브 닫힘시 극복해야하는 부하로 작용한다. 닫힘행정 신호를 분석해 보면, 닫힘동작이 시작하기 직전까지 밸브 디스크 전후단의 유체 차압은 동일하며, 닫힘동작이 시작되고 밸브의 일정개도 상태(통상 80% 닫힘행정)까지는 유체 차압이 일정하게 유지된다. 일정 개도 상태를 벗어나면 유체 통과 유량이

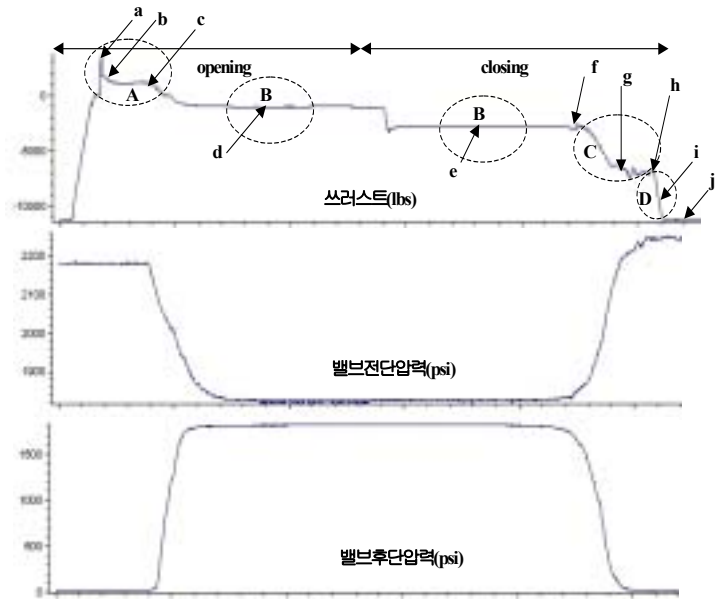


그림 8 고차압(2160 psi) 동적시험 진단신호

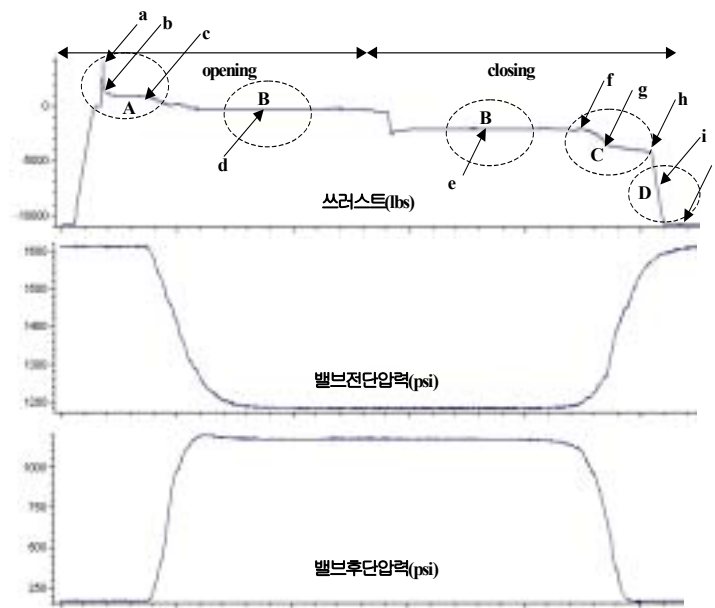


그림 9 중차압(1400 psi) 동적시험 진단신호

줄어들기 시작하고 전단압력이 급격히 상승하기 시작하며, 후단 압력은 급격히 떨어지기 시작한다[C구간]. "C"구간에서 급격한 유체 차압에 의한 영향이 쓰러스트 증가로 나타나게 되며, 유체의 흐름이 차단될때까지 쓰러스트는 지속적으로 증가하게 된다. 밸브의 닫힘후 잠시 쓰러스트가 더 이상 증가하지 않고 일정해 지는 구간이 발생하는데, 이것은 유체 차압이 더 이상 증가하지 않으며, 밸브의 닫힘으로 유체의 유동이 없음을 나타낸다. 게이트 밸브는 닫힘후 디스크와 시트면을 완전 밀착시켜 유체의 누설을 방지하기 위해 닫힘후에도 더 많은 쓰러스트를 디스크에 가해 주는데, 이 과정에서 쓰러스트는 다시 급격히 증가하게 되며, 설정해 놓은 토크스위치가 동작할때까지 쓰러스트는 증가하게 된다[D구간]. 중차압 조건에서 취득한 진단신호도 고차압 동적시험 신호와 유사한 형태를 보여주고 있으나, 차압의 크기가 달라 "A" 및 "C"구간에서 고차압 동적시험이 중차압 동적시험보다 쓰러스트가 더 급격히 증가함을 알수 있다. 닫힘행정의 경우 유체 차압의 영향이 크게 미치지 않는 지점 "e"와 "f"는 고차압시험과 중차압시험의 쓰러스트값이 유사하게 나타났으나, 유체 차압이 급격히 변하기 시작하는 지점 "g"와 "h"에서는 쓰러스트값의 차이가 크게 발생하는 것을 알수 있다. 즉 밸브가 100% 닫히기 위해서 고차압 조건의 경우 쓰러스트가 5448 lbs가 요구되어지고 중차압 조건은 3282 lbs가 요구되어져 고차압 조건에서 약 40%의 더 많은 힘이 요구됨을 알수 있다.

표 2-3 동적진단시험 쓰러스트 측정값

지점	고차압시험 (lbs)	중차압시험(lbs)	지점	고차압시험(lbs)	중차압시험(lbs)
a	5929	4354	f	1497	1508
b	2644	1529	g	5448	3282
c	1295	924	h	5385	3717
d	913	890	i	8359	8189
e	1688	1603	j	10334	10334

3. 결론

모터구동게이트 밸브의 정적 및 동적진단시험 수행을 통하여 유체 차압이 밸브 동작에 미치는 영향을 분석하고, 취득된 진단신호를 분석하여 각 구간별 유체 압력 및 쓰러스트 변화 특성을 알아 보았다. 정적진단시험 및 동적진단시험 모두 취득된 신호의 형태가 flexible wedge형 게이트밸브의 전형적인 신호형태와 유사한 신호로 나타났다. 유체 차압의 영향이 거의 없는 running load는 정적진단시험과 동적진단시험의 결과가 유사하게 나타났으며, 유체 차압이 큰 영향을 주는 구간에서는 유체의 압력이 급격히 증가함에 따라 쓰러스트도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 닫힘 행정의 경우 밸브 완전 닫힘 지점에서 각 차압상태별로 쓰러스트값을 비교해 보면 무차압 상태의 경우 1040 lbs, 중차압 상태에서는 3282 lbs, 고차압 상태에서는 5448 lbs로 각각 나타나 고차압상태에서 가장 높은 쓰러스트가 요구되는것을 알수 있었다. 따라서 동일한 밸브 일지라도 밸브가 운전되는 유체의 압력조건에 따라 요구되어지는 힘의 크기가 다르므로 밸브 및 구동기 설계시 디스크 전후단에 발생하는 차압의 크기를 정확히 알아내는 것이 중요한 설계 요소임을 알수 있다.

참고 문헌

- [1] "Application guide for Motor Operated Valves in Nuclear Power Plant, Final Report", NP-6660-D, EPRI, 1990
- [2] "Gate Valve Design Effects Testing Results", TR-103255, EPRI, 1994
- [3] "ISA Handbook of Control Valves", 2nd Edition, Instrument Society of America, Pittsburgh, Pennsylvania, 1976
- [4] "Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe" Technical Paper No. 410. Engineering Division, Crane Co.
- [5] 한국전력공사 KEPRI, 2002, "2001년 전 원전 동력구동밸브 안전성 평가 절차서"
- [6] 한국전력공사 KEPRI, 2002, "2001년 전 원전 동력구동밸브 최종 평가 보고서"