◎ 논 문

스윙형 역지밸브의 고장 원인 분석과 열림 특성에 관한 실험적 연구

송석윤* · 유성연**

Analyses of Failure Causes and an Experimental Study on the Opening Characteristics of Swing Check Valves

Seok-Yoon Song* and Seong-Yeon Yoo**

Key Words: Check Valve(역지밸브), Opening Characteristic(열림특성), Minimum Flow Velocity(최소유속), Disc Oscillation(디스크 진동), Performance(성능)

ABSTRACT

Check valves play a vital role in the operation and protection of nuclear power plants. Check valves failure in nuclear power plants often lead to a plant transient or trip. The analysis of historical failure data gives information on the populations of various types of check valves, the systems they are installed in, failure modes, effects, methods of detection, and the mechanisms of the failures. A majority of check valve failures are caused by improper application. The experimental apparatus is designed and installed to measure the disc positions with flow velocity, Vopen and Vmin for 3 inch and 6 inch swing check valves. The minimum flow velocity necessary to just open the disc at a full open position is referred to as Vopen, and Vmin is defined as the minimum velocity to fully open the disc and hold it without motion. In the experiments, Vmin is determined as the minimum flow velocity at which the back stop load begins to increase after the disc is fully opened or the oscillation level of disc is reduced below 1°. The results show that the Vmin velocities for 3 inch and 6 inch swing check valves are about 27.3% and 17.5% higher than the Vopen velocities, respectively.

1. 서 론

일반적으로 역지밸브는 유체계통에 설치되어 펌프가 정지할 때 역류를 막고 펌프의 역회전을 방지하여 펌프의 밀봉장치와 모터를 보호하는 역할을 한다. 또한 밸브 하류측의 탱크 또는 배관내 유체의 배수를 막는 역할을 하기도 한다. 역지밸브 개발 초기에는 밸브가 신속히 닫히고 효과적으로 배관을 격리하면 되는 것으로 생각하여 스윙형을 기준으로 설계되었다. 원자력발전소에서도 설계의 단순성, 낮은 압력손실, 효과적인 시트 밀봉능력, 보수의 편의성과 다양한 활용성 등으로 인하여 스윙형 역지밸브가 많이 적용되어 왔다. 원자력발전소에 있는 역지밸브 중에서 원자로냉각재 압력경계에 설치된 것은 위와 같은 기본 기능 이외에 원자로냉각재 유로에 연결된 배관의 파열이 발생할 경우 원자로 1차 냉각원인 냉각재의 유출을 막고 (Inventory 유지) 원자로냉각재 압력경계를 보호하

* 한국전력공사 전력연구원
** 충남대학교 기계설계공학과
책임저자 E-mail : sysong@kepri.re.kr

는 중요한 기능을 수행하고 있다. 또한 증기발생기 급수공급계통 및 보조급수계통에 설치된 역지밸브도 증기발생기 2차측에 연결된 배관의 파열이 발생할 경우 열제거원인 증기발생기 2차측 급수가 상실되는 것을 막고(Inventory 유지) 증기발생기 압력경계를 보호하는 중요한 기능을 수행한다.

원자력발전소에 설치되어 운전되고 있는 역지밸브들에 대한 국내외 고장 자료[1),(2)]에 의하면 스윙형 역지밸브가 고장발생 빈도가 가장 높고, 주로 힌지 및 힌지핀에서의 마모 손상, 디스크 스터드와 스탑과의 충격으로 인한 손상이 많았다. 밸브의 고장은 불완전한 시팅(improper seating)이 가장 많고 디스크나 일부 부품의 파손도 많은 것으로 조사되었다. 발생확률이 극히 낮지만 고장난 역지밸브에서 탈락한 일부 부품이 원자로 또는 증기발생기에 유입되면 원전연료 피복재 또는 증기발생기 전열관에 치명적인 손상을 가져올 수도 있다. 현재 국내외 원전에 설치되어 운전되고 있는 역지밸브 유형은 스윙형과 리프트형이 가장 많은 대수를 차지하고 있고, 고장 밸브 유형에서도 스윙형과 리프트형의 고장이 적지 않게 발생된 반면 다른 형태의 역지밸브의 고장은 거의 발생되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 스윙형 및 리프트형 밸브에 대한 성능 예측 모델을 개발하고 이에 대한 검증 실험을 수행하는 것이 향후 원전에서 역지밸브의 활용성 측면에서 매우 중요한 과제이다.

본 논문에서는 역지밸브의 고장 특성을 파악하기 위해서 국내외 고장 관련 자료를 조사하여 분석하였다. 여기에는 고장 이력의 검토, 고장 모드, 고장 영역, 고장발견방법, 밸브 유형 등을 조사하였다. 또한 스윙형 역지밸브의 열림 특성을 살펴보기 위한 실험장치와 실험 방법을 기술하고 균일 유동 조건에서 수행된 실험 결과를 제시하였다. 여기에는 3인치와 6인치 스윙형 역지밸브에 대하여 디스크 완전 열림에 필요한 완전열림 최소유속과 디스크 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운전을 보장하는 완전열림 안정유속 측정결과를 포함하였다.

2. 역지밸브의 고장 원인 분석

2.1 국내 원전의 역지밸브 고장 유형 및 사례

국내 원전에 설치된 역지밸브의 고장 사례를 분석하기 위하여 고리 3, 4호기와 영광 3, 4호기의 역지밸브에 관련된 밸브의 종류, 고장 발생시기, 고장 유형 및 원인, 고장영역, 고장조치사항, 고장발견방법 등의 자료를 조사하였다. 역지밸브의 고장과 관련된 자료는 국외 자료에 비하여 상당히 미흡한 점이 많았으며, 조사한 자료의 주요 내용은 아래와 같다.

고리 3, 4호기의 경우에는, 호기당 안전관련 계통에 설치된 역지밸브가 210대가 있으며 모든 밸브에 대해 기본적인 정보 즉 재질, 밸브 크기, 설치 조건 등을 조사하였다. 분류된 역지밸브는 스윙형, 리프트형, 틸팅형 3종류이며, 종류별로는 리프트형이 53%, 스윙형이 45%, 틸팅 디스크형이 2%로 구성되어 있다.

영광 3, 4호기의 경우에는, 호기당 안전관련 계통에 설치된 역지밸브가 194대가 있으며, 밸브 종류는 스윙형이 57%, 리프트형(Y-Lift)이 32%, clear-way형이 1%, 기타 유형이 확인되지 않은 밸브도 10%정도 있음을 알 수 있다. 고리 3, 4호기와 영광 3, 4호기에 설치된 역지밸브는 스윙형과 리프트형이 주류를 이루고 있고, 고장밸브의 현장시공도면을 확인한 결과 대부분이 수평배관에 수직으로 설치된 것으로 확인되었다.

고리 3, 4호기의 경우에는, 호기당 안전관련 계통에 설치된 역지밸브 210대 중, 32대의 밸브에서 보수를 요하는 고장이 56회 발생하였으며, 고장발생 비율은 스윙형에서 20%로 가장 크고, 다음이 리프트형에서 11.7%인 것으로 조사되었다. 또한 총 56회의 고장에 대해 고장 유형을 분석한 결과 부적절한 시팅(improper seating)에 의한 내부 누설이 92%로 대부분을 차지하고, 외부로의 누설 4%, 구성품의 손상이 4%인 것으로 나타났으며, 이를 해결하기 위해서 디스크 래핑을 통해 기기를 보수하거나 디스크 또는 본넷 가스켓을 교체하여 문제점을 해결하였다. 자료의 부재로 인해 주요한 고장을 일으키는 정확한 원인을 찾기는 어렵지만 결함 형태와 조치방법으로 미루어 디스크와 디스크 시트의 마모 현상이 고장을 일으키는 주요 원인으로 판단된다.

영광 3, 4호기의 경우에는, 운영기간이 짧은 관계로 안전관련 계통에 설치된 역지밸브 194대 중, 8대의 밸브에서 총 8건의 보수를 요하는 고장이 발생한 것으로 조사되었다. 총 8회의 고장에 대해 고장 유형을 분석한 결과 시팅 고착(stuck seating)에 의한 내부 누설이 2회이고 나머지는 원인이 부정확하며, 이를 해결하기 위해서 디스크 와셔 너트와 너트교체, 글랜드 밀봉 교체, 본넷 및 힌지 씰링 교체, 래핑을 통

해 기기를 보수하였다. 운전기간이 짧고 고장사례가 적은 관계로 특정 문제에 국한되기 보다는 여러 유형의 문제가 도출되었다.

2.2 국외 원전의 역지밸브 고장 유형 및 사례

원자력산업에 있어서 역지밸브 고장의 특성 분석과 관련하여 현재까지 수행된 가장 중요한 연구는 NIC (Nuclear Industry Check Valve Group)와 ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*)에 의해 수행된 미국 원전에서 발생한 역지밸브의 고장사례를 분석한 것이다.

NIC는 원자력발전소에 설치되어 있는 역지밸브의 운전 경험, 시험 및 유지보수 활동과 관련된 기술적인 정보 교환을 목적으로 원전소유 전력회사들로 구성되어 있는데 2004년 12월 현재, NIC는 24개 전력회사 소속의 40개 원자력발전소가 가입되어 있으며 1996년부터 활발한 활동을 하고 있다. 1984년부터 NIC는 ORNL과 공동으로 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 Nuclear Power Reliability Data System(NPRDS)의 역지밸브 데이터를 Update에 기여하여 왔으며 이와는 별도로 NIC 자체의 Check Valve Performance Data Base를 구축하였고 지속적으로 데이터를 Update하고 있다. NIC 데이터베이스에는 총 4,000여대의 역지밸브 손상 데이터가 포함되어 있으며 여기에는 밸브 및 밸브가 설치된 계통에 대한 기본 정보이외에 고장 유형 및 조치 사항 그리고 손상 정도에 대한 정보를 포함하고 있다.

INPO의 NPRDS을 이용하여 10년 동안 검사한 20,000대의 역지밸브에 대하여 (1984년부터 1993년까지의 NPRDS 데이터) 제출된 고장보고서는 5,200건 이하였다. 보고된 역지밸브 고장 사례중 97%는 발전소 운전에 심각한 영향을 미치지 않고, 2%가 발전소 운영에 중대한 영향을 주는 것이었다. 1984~1991 기간의 NPRDS 데이터에 대하여 ORNL이 수행한 검토 결과, 분석된 4,000개의 고장사례중 1/3이 밸브 내부부품의 손상과 관련된 것이었다[3),(4)].

ORNL은 INPO의 NPRDS를 이용하여 1984~1990 기간에 발생한 고장사례들에 대한 자료를 평가하여 고장율과 기기수명, 발전소 수명 또는 기타 다른 인자들과 어떤 중요한 연관성을 확인하고자 하였다. 이때의 조사는 각각의 고장 이력을 검토하고, 고장 모드, 고장 영역, 고장 발견방법 등과 같은 중요한 인자들의 특성을 검토하였으나 밸브 유형에 대한 정보는 누락되어 있었다. 그 이후 ORNL은 1991~1992 기간에 발생한 고장사례에 대한 추가분석에서, 동기간의 고장사례 중 85%에 해당하는 밸브 그리고 NPRDS 데이터베이스에 있는 밸브 중 58%의 밸브 유형을 확인하였으며, 이로부터 밸브 유형과 고장 모드, 밸브 유형과 고장발견방법, 밸브 유형에 따른 밸브 및 고장 분포 등 이전에 분석되지 않았던 상관관계들을 알아내는 기초 자료를 제공하였다.

Table 1에 역지밸브에서 발생한 고장 유형을 나타내었다. 1984~1990 기간에 조사된 자료에 의하면, 모든 밸브 유형에서 부적절한 시팅(Improper Seating)

Table 1 Description of failure mode

Failure mode	Description
Improper Seating	This category includes all failures in which the valve failed to properly seat(excluding the stuck open and restricted motion case), whether due to seat erosion, lack of full seat/disk contact, or unknown causes of reverse flow leakage
Stuck Open	Includes valves in which the disk is clearly stuck open or cocked, including, for example, cases where foreign material prevented the valve from fully closing or the disk cocked in the seat due to wear of disk stud
Disc/Other Part off or Broken	Either the disk to other internal part has come loose from the assembly or a valve internal part was found to be cracked or broken
Stuck Closed	Valve will not open when forward pressure is applied
Restricted Motion/Flow	Free motion of the valve is restricted. In some case, this resulted in reduced flow through the valve
Loose/Damaged Part	Some portion of assembly, generally in the hinge pin or disk stud area, was found to be loose or otherwise not in a proper assembly condition(with no other attendant problems, such as stuck open, etc.)
Unknown or Miscellaneous	A failure which did not fit any of the above categories

이 가장 많이 발생하여 특히 주의를 기울여 정비를 수행해야 하는 것으로 나타났다. 그 다음으로는 개방 고착(Stuck Open)과 제한된 밸브 행정으로 유량 감소(Restricted Motion or Flow)가 많이 발생한 것으로 분석되었다.(Tables 3과 4 참조)

Table 2에는 역지밸브에서 고장이 발생했던 주요 부위 또는 부품을 나타내었는데 그 중 침투(Penetration), 전반적인 마모(General Wear), 이물질(Foreign Material)은 고장 영역을 정확히 지시하기 어렵기 때문에 고장 영역의 한 형태로 표시하였다. 조사된 고장들 중 내부 누설에 기인한 것이 대부분을 차지하였기 때문에 대부분의 밸브 유형에 대해 시트 영역이 가장 두드러진 고장 영역에 해당 되었다.

INPO는 NPRDS에서의 고장 모드를 어떤 기기의 고장이 발견되었을 때 그 기기가 나타내는 허용할 수 없는 성능을 기술하는 Component-Specific Code로 정의하는데, Table 3에 나타낸 바와 같이 여러 가지 고장 모드 중 세 가지 고장 모드 (Internal Leakage, Failure to Close, External Leak)가 1984~1993 NPRDS 고장 데이터의 85%를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 2 Description of failure areas

Failure area/source	Description
Hinge Pin	Degradation or failure in the hinge pin or the portion of the hanger arm that interfaces with the hinge pin, including bushings
Disc Stud/ Hinge Arm	Degradation or failure of disk stud or of the portion of the hanger arm that interfaces with the disk stud, including nuts, washers, and antirotation lugs; also includes the backstop area
Seat	Degradation or failure of the disk in the area where it interfaces with the seat, the seat itself, and/or disk/guide areas
Penetration	Degradation of a body penetration, such as packing or a stem which interferes with proper valve functioning
General Wear	Applied to cases where there was wear of a general nature and specific affected areas were not identified
Foreign Material	Degradation in which the presence of foreign material caused the valve to not function properly. Foreign material is not clearly not an "area"; its presence can cause degradation of any of the above listed valve parts
Unknown/ other	Self explanatory

Table 4는 1984~1990 ORNL 자료의 고장 모드별 고장 분포를 나타내었는데 Table 4에서는 내부 누설(Internal Leakage)가 대부분 제외되었으나, Table 3에서는 대부분의 내부 누설이 포함되었다. 따라서 Table 4의 ORNL 분석 결과를 보면 부적절한 시팅(Improper Seating)과 개방 고착(Stuck Open)이 주요 고장 모드로 나타났음을 알 수 있다. 부적절한 시팅은 내부 누설과 유사한 고장 모드이며 개방 고착은 닫힘 실패(Failure to Close)와 유사한 고장 모드이다.

고장 데이터를 설명하는 한 가지 방법은 기기를 수리하고 기능을 회복시키기 위해 기기에 어떤 변경을 하였는지에 대하여 고장 보고서의 내용들을 조사하는 것이다. 고장의 결과가 고장원인에 대한 설명과 일관성이 있는지를 결정하고 고장 모드가 수리 또는 조정에 의해 입증이 되는지를 살펴보기 위해 NPRDS 고장 보고서에서의 조치 활동 부분을 분석하였다.

Table 3 Distribution of failures by failure mode (1984~1993 NPRDS)

Failure mode	Failure distribution
Internal Leakage	36%
Failure to Close	25%
External Leak	24%
Test, Maintenance Fail to Open Not Operating Other	15%

Table 4 Distribution of failures by failure mode (1984~1990 ORNL)

Failure mode	Failure distribution
Improper Seating	45%
Stuck Open (Fail to Close)	28%
Disc/Part Broken	12%
Stuck Closed	7%
Restricted Flow	7%
Loose, Damaged Parts Miscellaneous	~1%

Table 5의 1984~1993 NPRDS 데이터를 보면 40%의 고장에 대해 부품 교체가 이루어졌고, 기존기기에 대한 수리가 37%, 당시의 11%의 기기가 교체되었다. 기타 약 12% 정도는 임시조치, 대체, 변경 등과 같은 조치가 취해졌음을 알 수 있다.

고장 발견 방법에 관심을 가지는 이유는 계획된 검사 또는 시험(Programmatic Method)과 우연에 의한 혹은 일상적인 점검(Nonprogrammatic Mean) 사이의 차이 또는 영향을 보고자 하는 것이다. Table 6, 7은 고장을 발견하기 위해 이용된 고장 발견 방법별 고장 분포를 나타낸 것으로 Nonprogrammatic Mean에 의한 고장 발견도 큰 비중을 차지함을 보여준다. 그러나 어떤 특정 고장발견방법이 고장을 발견하는데 이용되었는지에 대한 정보는 충분하지 않다.

NPRDS 데이터는 역지밸브 유형별 고장 데이터 분류가 불가능하였다. NPRDS는 제작사 모델, 모델 번호 등으로 데이터를 분류할 수 있지만 어떤 경우에는 제공된 정보로부터 밸브 유형을 결정하는 것은 어렵다. NIC은 자체적으로 수행한 설문 조사 결과를 토대로 1991년 밸브 유형에 따른 분석을 수행하였는데, 추가로 필요한 정보는 제작사 카탈로그와 역지밸브에 대한 EPRI(Electric Power Research Institute) 데이터베이스를 이용하였다. 분석결과는 Table 8에 나타낸 바와 같다.

Table 5 Corrective action taken (1984~1993 NPRDS)

Corrective actions	Failure distribution
Replace Parts	40%
Repair Component	37%
Replace Component	11%
Modification/Substitutions Temporary Measures Adjustment	12%

Table 6 Method of failure detection (1984~1993 NPRDS)

Failure detection methods	Failure distribution
Surveillance Test	40%
Routine Observation	20%
Abnormality	14%
Special Inspection	8%
Inservice Test	8%
Incidental Observation	5%
Preventive Maintenance	3%
Other	2%

Table 7 Method of failure detection (ORNL)

Specific detection method	1984-1990 (%)	1991* (%)	1991** (%)
Nonspecific	33	18	20
Leak Test	20	41	22
Disassembly & Inspection	13	9	17
Hydraulic Indications	12	18	15
Nonhydraulic Indications	11	6	13
Pump/Component Rotation	6	4	8
Other, Nonintrusive	5	5	5

* All 1991 Failures
** Significant 1991 Failures Only

Table 8 Failures by valve type (NPRDS)

Valve type	1991 failures
Lift	34%
Swing	33%
Unknown	15%
Tilting	10%
Double Disc	5%
Stop-Check	2%
Inline Check (Nozzle)	1%

2.3 스윙형 역지밸브 고장 유형 분석

전체 역지밸브의 고장 중에서 스윙형 역지밸브에 관련된 고장의 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다. 밸브 내부를 흐르는 유체의 유속이 밸브 완전 열림에 필요한 요구량에 못 미치거나, 상류에 교란요소로 인하여 디스크의 진동(oscillation) 및 태핑(tapping)이 발생하며, 반복된 충격(repeated slamming)에 의해 힌지핀(hinge pin) 또는 디스크 스터드(disc stud)에 파손 또는 손상이 발생함을 알 수 있었다. 그리고 위와 같은 현상으로 인해 디스크의 오정렬(misalignment)와 오작동(malfunction)이 야기됨을 알 수 있다. 위와 같은 결과는 디스크와 시트의 부적절한 시팅으로 인하여 내부 누설을 발생시키는 것으로 나타났다. 또한 고장이 발생하는 주요 부위는 힌지핀, 디스크, 시트 면으로 조사되었다.

증기계통에 설치된 역지밸브는 하류 쪽 격리밸브의 누설로 인해 배관내의 증기가 응축되고 응축수가 하류쪽 배관에 존재하는 증기트랩(steam trap)으로 배수

되면 정상조건에서 닫혀 있는 스윙형 역지밸브의 디스크의 진동(oscillation)으로 인하여 힌지 핀에 마모를 유발시킴을 알 수 있다.

3. 스윙형 역지밸브의 열림 특성

3.1 유속에 따른 디스크 거동

Fig. 1은 스윙형 역지밸브에 대하여 유속에 따른 디스크 위치와 디스크 진폭을 디스크각으로 나타낸 것으로 유속에 따라 크게 세가지 영역(Oscillation, Tapping, Stable)으로 나눌 수 있다. 디스크의 열림 초기에는 디스크의 진동이 거의 없으나 유속이 일정속도에 도달하게 되면 유동에 의하여 디스크의 진동이 커지기 시작한다.

Oscillation의 주요 원인은 vortex shedding 현상으로 알려져 있는데[5] oscillation 영역은 디스크의 진폭이 일정 크기 이상으로 커지기 시작하는 지점에서 디스크가 백스탑에 닿기 직전, 즉, 디스크와 백스탑사이에 tapping이 발생하기 직전까지의 영역이 이에 해당한다. 이 영역에서는 디스크 스터드에는 어떠한 충격도 발생하지 않지만 이 영역에서 오랜시간 운전하게 되면 힌지핀이나 부싱에서는 디스크의 진동으로 인하여 마모가 과도하게 발생할 수 있다.

Tapping 영역은 유속이 점점 증가함에 따라 밸브 flutter의 원인인 vortex shedding force가 점점 감소하고 국부적인 난류 유동 또는 계통내 유동 변동에 의하여 디스크와 백스탑이 접촉과 분리를 반복하는 영역이다. 이 영역은 밸브 디스크가 완전 열림 위치에 가까운 위치에서 운전되거나(V_{open}), 완전 열림 위치에 있더라도 tapping이 발생하지 않을 정도로 충분한 유속이 존재하지 않은 상태에서의 밸브 운전 영역이다. 이러한 tapping 현상은 유속을 더 증가시킴으로써 밸브 디스크를 백스탑에 확실히 접촉하도록 하여 방지할 수 있다. Charbonneau[5]의 실험에 의하면 디스크가 백스탑에서 약 7° 이내에 위치해 있을 때 tapping이 발생함을 보여 주었다. 이 영역에서는 힌지핀이나 부싱에서의 마모 뿐만 아니라 백스탑과의 반복적인 충격으로 인하여 디스크 스터드의 피로손상이 발생할 수 있기 때문에 이 영역에서 운전되고 있는 밸브에 대해서는 주요 부품의 마모뿐만 아니라 피로 손상 가능성을 염두에 두어야 한다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 tapping 영역은 유속

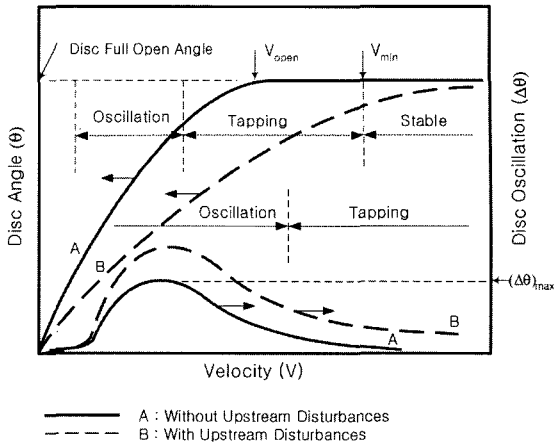

Fig. 1 Disc position vs. flow velocity for swing check valve

을 기준으로 $V_{tapping}$과 V_{min} 사이의 영역에 해당되며 밸브 완전 열림에 필요한 최소 유속을 구하기 위한 V_{open} 모델은 밸브의 위치를 결정하는데 이용될 수 있고, 밸브 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운전을 보장할 수 있는 최소 유속을 평가하기 위해서는 V_{min} 모델이 이용될 수 있다. 따라서 V_{open}과 V_{min}에 대한 정확한 예측이 중요함을 알 수 있다.

V_{min}을 평가할 수 있는 실험식을 처음으로 제시한 밸브 제작사는 Crane사였고, Chiu & Kalsi[6] 및 EPRI[7]에서는 스윙형 역지밸브의 V_{open}을 디스크에 작용하는 유동 모멘트와 관성 모멘트 그리고 디스크와 힌지 암의 무게를 고려하여 해석적 모델을 제시하였다. W. J. Rahmeyer[8]는 스윙형 역지밸브에 대하여 유동 모멘트 및 관성 모멘트, 디스크 및 밸브 암의 무게 뿐만 아니라, 밸브 전 · 후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시팅 힘을 고려하여 V_{min} 모델을 제시하였다.

3.2 실험장치 및 실험방법

3.2.1 성능실험장치

Fig. 2에 역지밸브의 성능실험장치 개략도를 나타내었는데, 폐회로(closed loop)로 구성하여 원자력 발전소에 있는 역지밸브의 운전환경에 가깝도록 설계 · 제작하였다. 실험장치의 주요 기기는 저장탱크, 펌프, 역지밸브, 공기구동 제어밸브, 글로브 밸브, 게이트 밸브, 버터플라이 밸브와 연결 배관으로 구성되어 있다. Table 9은 성능 실험장치 각각의 구성요소의 상세 사양을 나타내고 있다.

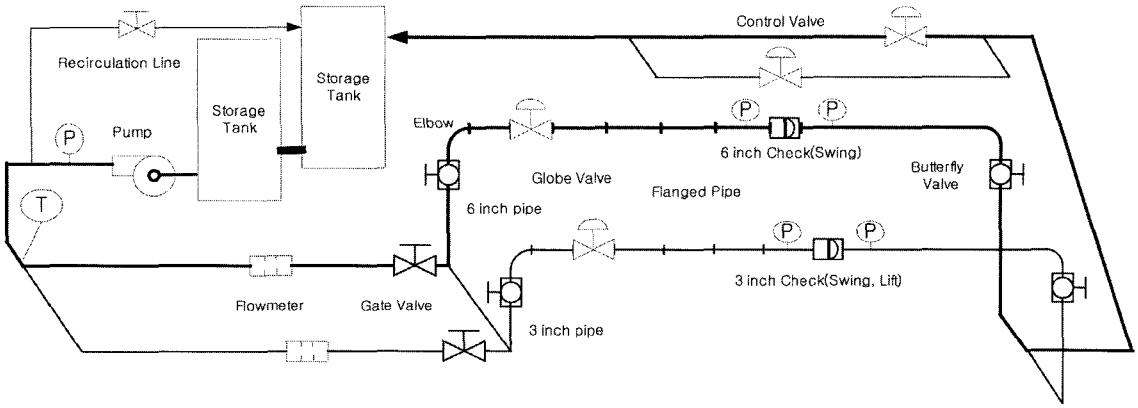

Fig. 2 Schematic diagram of performance test facility for swing check valves

Table 9 Specifications of test facility equipment

Equipment	Specifications
Centrifugal Pump	Head : 71.85 m, Flow rate : 5.4 ㎥/min Power : 92.52 kw
Control Valve	Globe valve, 6 inch
	Globe valve, 2 inch
Storage tank	FRP, 2 ㎥
Check valve	3 inch(swing, lift)
	6 inch(swing)
Globe valve	3, 6 inch
Gate valve	3, 6 inch
Butterfly valve	3, 6 inch
Flow Meter	Electromagnetic : 5 ~ 180 ㎥/hr, ±0.5% rate, 4 ~ 20 mAdc
	Turbine : 80 ~ 800 ㎥/hr, ±1% rate, 4 ~ 20 mAdc
Pressure Transmitter	0 ~ 25 bar, 0.15%FS, 1 ~ 5 Vdc
DP Transmitter	1, 0.5 kg/㎠, 0.15%FS, 1 ~ 5 Vdc
Load cell	0~200 kg, 4 ~ 20 mAdc
Temperature Transmitter	PT100, Head type, 0 ~ 100 ℃, 4 ~ 20 mAdc
Radial Displacement	Potentiometer type, 4 ~ 20 mAdc

원심 펌프의 용량은 3인치 및 6인치 스윙형 역지밸브의 성능 실험에서 요구되는 전 유량 범위를 거의 일정한 수두(0~7.2 ㎥/min, 72.61~61 m)에서 공급할 수 있고, 저 유량에서 펌프 보호를 위해서 재순환관을 설치하였다. 역지밸브의 실험 유로는 역지밸브의 크기에 따라 2개(3인치, 6인치) 로 구성되어 있고, 배관을 일정 길이의 연결배관(flanged pipe) 형식으로 연결하여 배관 및 밸브의 위치 이동이 수월하도록 제작하여 역지밸브 상류 교란 요소의 거리에 따른 영향 실험이 가능하다. 또한 각 유로로의 배열은 실험 유로 전·후단에 설치된 버터플라이 밸브를 이용하고, 유량의 제어는 실험유로 하류에 설치된 2인치와 6인치 공기구동 글로브 밸브를 제어하여 설정된 유량을 맞추었다.

실험유로의 유량을 계측하기위한 전자기 및 터빈 유량계, 유동 유체의 온도를 계측하기위한 온도계, 펌프출구와 역지밸브 전·후단에서의 압력을 계측하기 위한 압력계, 역지밸브에서의 압력강하를 계측하기위한 차압계 등이 있고, 이들 계측장치로부터 취득된 자료는 자료수집장치(DAS)을 통하여 PC로 수집된다.

Fig. 3은 실험에 사용된 스윙형 역지밸브의 상세도로서 유속에 따른 디스크 각과 디스크가 열리면서 백스탑에 해당하는 부분에 충격이 가해지는 것을 측정하기 위한 Load cell이 설치되어 있다.

3.2.2 실험방법

실험을 시작하기 전에 저장조 및 유동 유로를 충수한 후 충분한 배기(vent)를 실시하여 펌프 기동으로 인한 실험용 밸브 및 계측기가 파손되지 않도록 유의한다. 실험하고자하는 유로로 밸브 정렬을 하고, 나머지 유로는 닫는다. 공기구동 밸브를 10% 정도 열림 상태로 펌프를 기동한다. 모터 보호를 위해서 펌프 기동 후 펌프출구 압력이 6.6 bar 이하가 되지 않도록 유의한다.

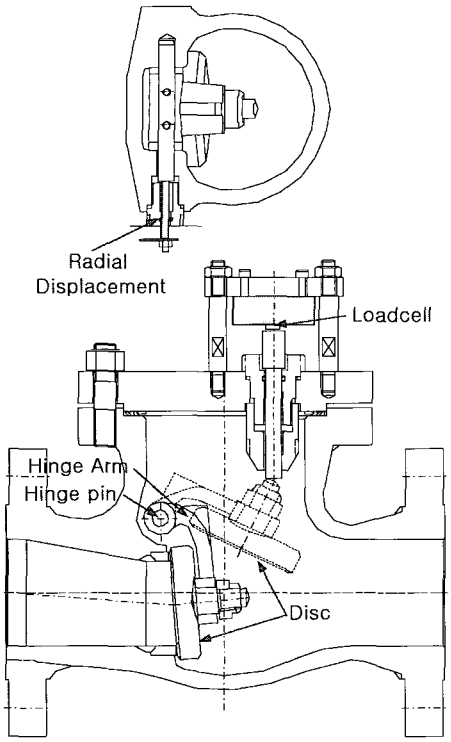

Fig. 3 Schematic diagram of swing check valve

원하는 유량으로 조정 후 유동 유체의 설정 유량이 3초의 주기 동안에 편차가 3% 이내에 만족하는지를 점검하여 이 조건이 만족한 정상상태(steady state)에서 측정시작 버튼을 눌러 데이터를 입력 받는다. 정상상태에서 유량, 디스크 각, load cell 하중 등의 자료를 실시간으로 자료수집장치(DAS)에서 수집하고, 취득하고자 하는 신호를 지정된(100/1000s) sampling 주기로 데이터를 읽어 시트(sheet)에 나타내고, 마지막은 읽은 값에 대한 평균값을 나타낸다. 동일한 유량에서 50개의 신호를 수집하고 이것의 평균값을 취하여 총 51개의 자료를 구한다. 그리고 다른 유량으로 맞추기 위해 공기구동 제어밸브를 제어하여 원하는 유량으로 설정하고 그 조건에서 역지밸브의 성능에 관련된 신호의 안정성을 점검하여 50개의 신호를 수집한다. 적절한 유량의 제어 간격이 되도록 공기구동 제어밸브에 입력신호를 0.2 V씩 변화시켜 가면서 설정된 유량으로 제어한다.

3.3 실험 결과 및 고찰

실험에 사용된 스윙형 역지밸브의 상세한 사양은 Table 10에 나타내었다. Fig. 4는 스윙형 역지밸브의 디스크와 힌지 암(hinge arm)이 결합된 상태의 사진이다.

스윙형 역지밸브의 디스크와 힌지암은 일체형과 분리형이 있는데, 분리형은 디스크 스터드 볼트와 힌지암의 간극에 의한 자유도에 의해 디스크가 시트에 잘 밀착되어 밀봉능력은 증가하나 열림 상태에서의 디스크 안정성은 떨어지게 된다. 실험에 사용된 스윙형 역지밸브는 디스크와 힌지 암이 스터드 볼트에 의해 조립되어 스터드 볼트가 풀리지 않도록 전둘레 용접되어 있다. 또한 일반적으로 시트에 각을 주어 디스크 행정거리를 줄여 디스크가 닫힐 때 추가의 밀봉을 제공한다. 역지밸브에서의 밀봉은 밸브 몸체에 있는 시트의 평면부와 디스크의 평판 밀봉면의 밀착에 의해 이루어진다. 힌지와 힌지 핀과 분리형일 경우 디스크와 스터드 핀 사이의 간극에 의해 효과적으로 밀봉이 될 수

Table 10 Specifications of swing check valve

Parameter	3 inch	6 inch
Pipe I.D.(㎜)	77	143
Seat I.D.(㎜)	62	114
Disc Dia.(㎜)	82	134
Seat angle(°)	4.574	4.574
Disc angle measured from vertical(°)	65.064	63.424
disc & Hinge Arm Weight(㎏)	1.3	4.9
Hinge Pin to Disc center(㎜)	62	100.5
Hinge Pin to Disc CG(㎜)	25	20
Disc Assy CG Angle(°)	22	11.25
Material	SUS	SUS
Pressure Class	class 300	class 300

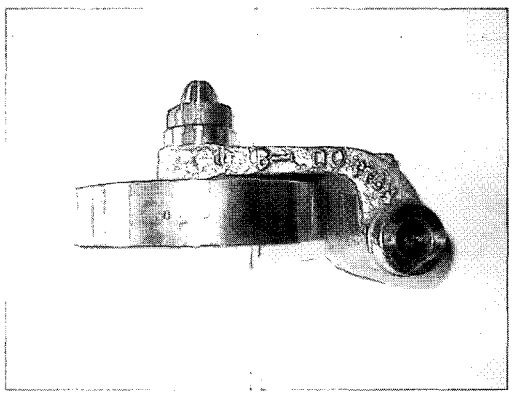

Fig. 4 Photo of disc assembly of swing check valve

있도록 자체 정렬이 이루어진다. 실험에 사용된 3인치 역지밸브는 디스크가 완전 닫힘 시 시트 각은 4.574°로 설계되고 완전 열림 시 디스크 각이 56.74°로 계측되어, 수직면으로부터의 디스크 각은 61.314°로 계산된다. 또한 6인치 역지밸브는 디스크가 완전 닫힘 시 시트 각은 4.574°로 설계되고 완전 열림 시 디스크 각이 58.13°로 계측되어, 수직면으로부터의 디스크 각은 62.704°로 계산된다.

디스크와 힌지 암의 무게를 정확히 아는 것이 중요한데 3인치 밸브의 무게를 실측한 결과는 1.3 kg이고, 6인치 밸브의 무게를 실측한 결과는 4.9 kg이다. 같은 크기의 디스크라 할지라도 제조과정에 따라서 디스크 무게는 약간씩 차이가 난다. 그리고 유동 유체의 유속은 시트(seat) 내경을 기준으로 하여 구하였다.

스윙형 역지밸브의 성능을 평가하기 위해서는 유동 유체의 속도에 따른 디스크 위치, 디스크의 진동(oscillation) 진폭, 디스크 백스탑에 가해지는 힘의 정도를 나타내는 load cell에 가해지는 load, 밸브에서의 압력강하 등의 계측이 필요하다. 스윙형 역지밸브의 특성곡선을 상류측 유동이 완전히 발달된 균일유동 상태에서 나타내기위하여 상류측 교란요소로부터의 거리는 12D에 위치시켰다.

Fig. 5는 실험에 의해 구해진 3인치와 6인치의 스윙형 역지밸브에 대하여 유동 유체의 속도에 따른 디스크의 위치와 백스탑에 가해지는 힘(force)을 평균유속에 따라서 나타낸 것이다. 유속이 증가함에 따라 디스크가 열리기 시작하여 완전 열림 위치에 도달함을 알 수 있다. 밸브 디스크 열림 각이 증가함에 따라 디스크가 열리는데 필요한 유속 모멘텀이 더욱더 필요하고, 이것은 유속의 증가에 의해 이루어질 수 있다. 본 실험에서 Vopen 은 디스크가 백스탑에 위치하는 열림각으로 나타난 최소의 평균 유속으로 정하였다. 디스크 완전 열림 위치에 도달하기 위한 평균유속인 Vopen은 3인치 밸브는 3.59 m/s 이고, 6인치 밸브는 3.47 m/s 이다. 또한 백스탑에 가해지는 힘은 3인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 4.57 m/s에서부터 계속 증가하고, 6인치 밸브에서는 밸브가 완전 열림 후 4.08 m/s 에서부터 계속 증가하는 것으로 나타났다. 백스탑에 가해지는 힘은 처음에는 유속이 증가하여도 어떤 일정한 값을 유지하는데 이것은 배관 내면의 압력에 의해 백스탑에 가해지는 힘으로 나타난 것으로 판단된다.

유속의 증가와 더불어 디스크가 완전 열림 이후에도 백스탑에 가해지는 힘이 증가하는데, 여기서부터는 유동 모멘트의 증가분이 백스탑에 가해지는 힘의 증가로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 유동 유체의 속도에 따른 디스크의 위치와 밸브 전·후단에서의 압력강하 값을 평균 유속에 따라서 나타낸 것이다. 유속이 증가함에 따라 디스크가 열리면서 밸브 전·후단에서의 압력강하 값은 거의 변화가 없는데 이것은 유동에너지의 거의 전부가 디스크를 열리는데 소모되고, 디스크가 다 열리고 나서부터 압력강하 값이 증가되고 있음을 볼 수 있다. 3인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 3.59 m/s에서부터 서서히 증가하고, 6인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 3.47 m/s에서부터 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 유동 유체의 속도에 따른 디스크의 위치와 밸브 디스크의 불규칙한 진동을 진동의 최대 진폭으로 평균 유속에 따라서 나타낸 것이다. 6인치 밸브에서는 유속의 증가에 따라 불규칙한 진동이 급격히 증가하여 디스크가 완전 열리기 직전 2.21 m/s에서 최대 진폭(2.06°)이후 급격히 감소하여 완전 열림 후 4.08 m/s에서 진폭(0.89°)로 감소하였다가 유속의

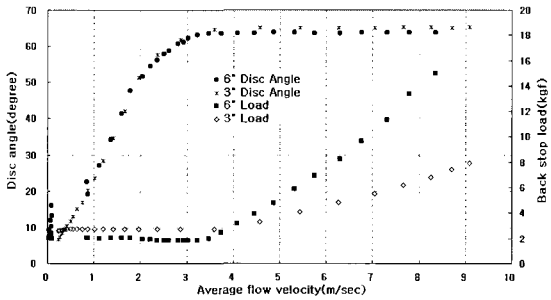

Fig. 5 Disc position and load cell load at various flow velocity for swing check valves with uniform Flow

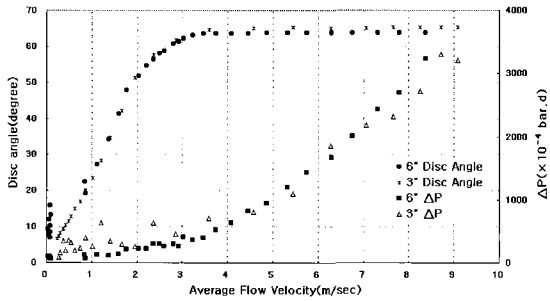

Fig. 6 Disc position and pressure drop at various flow velocity for swing check valves with uniform Flow

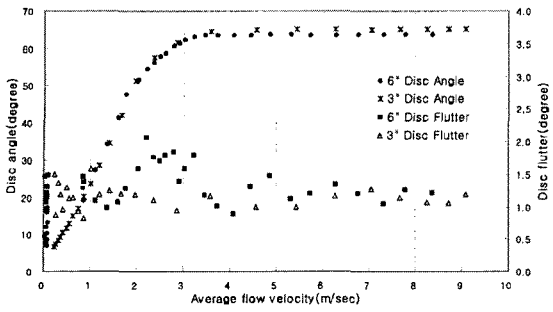

Fig. 7 Disc position and disc flutter at various flow velocity for swing check valves with uniform flow

증가에도 불구하고 거의 일정한 값으로 유지하고, 3인치 밸브에서는 1.02 m/s에서 최대 진폭(1.58°)이후 유속의 증가에도 불구하고 거의 일정한 진폭으로 움직이는 것으로 나타났다. 그리하여 Vmin 은 디스크가 백스탑에 위치하는 완전 열림 후 백스탑에 가해지는 힘이 증가하거나, 디스크 진동의 진폭이 최대 값에서 감소하여 1° 이내로 유지되는 최소의 평균 유속으로 정하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 3인치와 6인치 밸브에 대한 Vopen 측정값은 각각 3.59 m/s, 3.47 m/s 이었지만 이렇게 결정된 Vmin 측정값은 각각 4.57 m/s, 4.08 m/s로 Vopen 보다 약 27.3%, 17.5% 정도 증가한 값을 보여주었다. 그러나 본 실험결과는 밸브 상류측 교란요소의 영향을 배제한 균일유동 조건에서 얻어졌기 때문에 밸브 상류측 교란요소가 밸브에 근접하여 설치되어 있을 경우에는 그 영향을 고려할 필요가 있다.

4. 결 론

원자력발전소에 설치되어 운전되고 있는 역지밸브에 대한 국내외 설치 현황, 형태, 고장 발생 건수, 고장 유형, 고장발견방법 및 밸브 유형 등에 대한 자료를 조사하였다. 조사된 자료를 분석한 결과 스윙형과 리프팅형이 가장 많이 설치되어 운전되고 있으며, 고장 발생 빈도도 가장 높은 것으로 나타났다. 미국에서 운전되고 있는 역지밸브의 고장모드 중 내부 누설, 닫힘 실패, 외부 누설이 고장 데이터의 85%를 차지하는 것으로 나타났다. 스윙형의 경우 고장이 발생하는 영역은 주로 힌지 핀에서의 마모 손상, 디스크 스터드와 스탑과의 충격으로 인한 손상과 그로인한 불완전한 시팅(improper seating)으로 내부 누설이 발생하는 것으로 조사되었다.

스윙형 역지밸브의 열림 특성을 살펴보기 위한 실험 장치로부터 3인치와 6인치 스윙형 역지밸브에 대하여 밸브 완전 열림에 필요한 완전열림 최소유속(V_{open})과 밸브 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운전을 보장하는 완전열림 안정유속(V_{min})을 측정하였다. V_{open}은 디스크가 백스탑에 위치하는 열림각으로 나타난 최소의 평균 유속으로 하였고, V_{min}은 디스크가 백스탑에 위치하는 완전열림 후 백스탑에 가해지는 힘이 증가하거나, 디스크 진동의 진폭이 최대값에서 감소하여 1° 이내로 유지되는 최소의 평균 유속으로 정하였다. 균일 유동조건에서의 측정결과를 보면, 3인치와 6인치 밸브에 대한 V_{min} 측정값은 각각 3.59 m/s, 3.47 m/s 이었지만 이렇게 결정된 V_{min} 측정값은 각각 4.57 m/s, 4.08 m/s로 V_{open} 보다 약 27.3%, 17.5% 정도 증가한 값을 보여주었다.

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기사업 "원전 역지밸브 고장원인 분석 및 성능진단 관리기법 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) S.K. Park, I.H. Kim, Y.S. Kim, D.W. Kim, D.H. Lee, S.C. Kang, "Development of Diagnostic Method for Check Valve Performance and Failure Cause Analysis *annual report*", 2003

(2) EPRI TR-100857, "Check Valve Maintenance Guide," 1995.

(3) NUREG/CR-5944, "A Characterization of Check Valve Degradation and Failure Experience in the Nuclear Power Industry," 1993.

(4) NUREG/CR-5944, "A Characterization of Check Valve Degradation and Failure Experience in the Nuclear Power Industry," Volume 2, 1991 Failures, 1995.

(5) A.G. Charbonneau, "Innovations in Non-Intrusive Testing and Trending of Motor Operated Valves and Check Valves," Paper H3, pp. 301~310, 2nd International

Conference on Developments in Valves and Actuators for Fluid Control, Manchester, England, 28~30 March 1988.

(6) Chong Chiu & M.S. Kalsi, "Plant Availability Improvement by Eliminating Disc Vibrations in Swing Check Valves," ASME Paper 86-JPGC-NE-6, 1986.

(7) EPRI, Application Guidelines for Check Valves in Nuclear Power Plants, EPRI NP-5479, Rev. 1, EPRI, 1993.

(8) W.J. Rahmeyer, "Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits," Transactions of ASME, Vol. 115, pp. 406~410, Nov. 1993.