

음향센서를 이용한 역지 밸브의 감시 및 진단 알고리즘 개발

Development of Diagnostic and Monitoring Algorithm for the Condition of A Check Valve

성승환, 허섭, 김정수, 박원만, 차대범, 김정택

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

역지 밸브(check valve)의 고장은 건전한 배관 조건에서도 원하지 않는 방향으로 유체 흐름을 유발하게 되므로 원자력 플랜트에서 안전에 위해를 줄 수 있는 중요한 문제 중의 하나이다. 고장난 역지 밸브에서 밸브의 분해 작업 없이 역방향으로의 유체 흐름을 탐지할 수 있는 음향방출 센서를 도입하여 고장 상태를 감시 및 진단할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘을 확인하기 위하여 4인치 스윙(swing) 역지 밸브를 포함한 유체 배관을 설계하였다. 역지 밸브의 고장 유형은 운전 중에 디스크(disk)가 닳은 경우와 외부 이물질이 삽입된 경우를 가정하였으며, 설계된 배관은 디스크 마모(disk wear) 나 외부 이물질(foreign object)의 삽입에 의해 역 유량이 발생할 수 있는 역지 밸브의 고장 상태를 모사할 수 있도록 하였다.

여러 가지 크기의 디스크 마모와 이물질에 의한 고장 상태를 각각의 압력 상태에서 측정 한 후에, 전문가의 도움 없이도 역지 밸브의 고장 유형과 그 크기를 판단할 수 있도록 신경회로망에 근거한 감시 및 진단 알고리즘을 개발하였다.

Abstract

The failures of check valves are one of the most important problems to safety in nuclear power plants because the reverse flows through the failed check valve impact

on the healthy hydraulic loop. We have suggested the monitoring and diagnostic algorithm for the condition of a check valve by using acoustic emission sensors for detecting the failures of check valves through measuring and analyzing the backward leakage flow without disassembling the check valve. Since the acoustic emission sensor could detect the sound originated from any flow, we have chosen the acoustic emission sensors as the detecting devices for sound originated from backward leakage flow of a failed check valve.

For validating the suggested algorithm, we designed a hydraulic test loop installing a typical four inches swing typed check valve. We have assumed that the major failure modes of check valves are disk wear in operation period and insertion of foreign object. The test loop was designed to identify the mechanical failures of the check valve in the case that the reverse backward leakage flows are induced through a failed section in the check valve with disk wear or an inserted foreign object.

After experimenting the hydraulic test with various sized disk wear or inserted foreign objects at the various pressures with room temperature, we have developed the monitoring and diagnosis algorithms by using a neural network model in order to identify the type and size of failure in the check valve without any help of expert's knowledge.

1. 서 론

원자력 플랜트에서 역방향의 유체 흐름을 방지하기 위해서 사용되는 역지 밸브(check valve)의 고장은 건전한 배관 조건에서 역방향으로 유동이 형성되게 되므로 원자력플랜트에서 주요한 사건을 불러 올 수 있다. 따라서 역지 밸브의 고장을 파악하여 그러한 사건의 발생 가능성을 줄이는 것이 매우 중요하나, 현재의 역지 밸브 고장을 탐지하기 위한 방법은 플랜트 정지 기간 동안에 역지 밸브를 분해하여 그 내부의 고장 상태를 직접 보고 판단하는 방식을 채택하고 있으므로 매우 번거롭다. 특히 운전 기간 중에 고장 상태를 판단하는 것은 매우 어렵고 주변의 방사능 때문에 매우 위험한 작업으로 분류되어 있다.

따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서 가동 중이거나 점검을 위한 정지 중인 원자력 플랜트에서, 역지 밸브를 분해하지 않고 고장 상태를 감시 및 진단하는 알고리즘을 개발하였다.

현재 각국에서 많은 연구가 진행되고 있으며 역지 밸브의 고장을 통하여 누출되는 역유량(reverse flow)을 탐지하여 그 고장 상태를 인지하는 방안이 주류를 이루고 있다.^{[1][2]} 본 연구에서도 고장이 발생한 역지 밸브의 상태를 감시 및 진단하기 위하여, 역지 밸브로 인하여 막혀 있어야 하는 방향으로의 유체 흐름을 감지하고 그 신호의 특성 분석을 통한 감시 및 진단 알고리즘을 개발하였다. 여기서 유체의 흐름을 감지하기 위한 방법으로 유체의 흐름에 의해 발생하는 음향 신호를 취득하는 음향 방출 센서(acoustic emission sensor)를 채택하였다.^{[1][3][4]} 또한 역지 밸브의 고장 원인은 많이 있으나 기존의 고장 사건을 분석한 결과 내부의 디스크(disk)가 닳은 경우와 외부로부터 이물질이 삽입되어 막혀 있어야 하는 유체 경로가 열려 원하지 않는 방향으로 유체의 흐름이 발생하는 고장을 그 주요 고장 유형으로 분류하였다.^{[5][6][7]} 고장의 유형을 가정하고 난 뒤, 감시 및 진단 알고리즘 개발을 위하여 역지 밸브를 포함한 배관을 구성하고 그 역지 밸브의 디스크가 닳아 고장난 상태를 인위적으로 발생시켜 그 신호의 특성을 분석하고 또 하나의 주요한 고장인 이물질이 삽입된 경우의 신호를 취득하여 감시 및 진단 알고리즘을 개발하였다. 감시 및 진단 알고리즘의 개발에 사용한 기법은 전문가의 판단을 대체할 수 있는 역전파 신경 회로망을 이용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서 역지 밸브의 고장 상태를 모의하기 위하여 구성된 실험 설비와 실험 조건에 대하여 설명하고 제 3 장에서 실제로 진행된 실험 결과에 대해서 정리하였다. 그리고 제 4 장에서 실험 결과를 이용한 감시 및 진단 알고리즘에 대하여 기술하고 마지막으로 제 5 장에서 결론을 기술하였다.

2. 실험 설비 및 조건

역지 밸브의 고장 상태를 모사하기 위하여 원자력 연구소 내에 설치된 DVI test loop의 일부를 변형하여 역지 밸브를 포함한 루프(loop)를 설계하였다. 설계된 루프를 통하여 정해진 압력의 유체가 흐르고 그 배관에 설치된 4 인치 크기의 스윙 형(swing-typed) 역

지 밸브(check valve)에 인위적인 고장을 모의하였다. 모의된 역지 밸브의 형태 및 신호 측정을 위한 센서의 위치는 다음 그림 1과 같다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 유체의 흐름을 측정할 수 있는 음향방출 센서의 위치는 역지 밸브의 유동 흐름이 나타나는 밸브 양단에 설치하였으며 음향 방출 센서의 신호를 확인 및 참조하기 위하여 역지 밸브의 진동 상태를 측정할 수 있는 가속도계(accelerometer)를 밸브 중앙부 양면에 설치하였다.

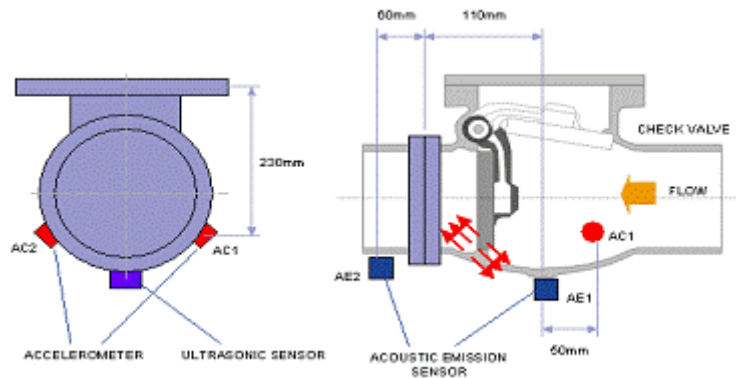


그림 1 역지 밸브의 구조 및 센서 위치

음향 방출센서는 주파수 100-500kHz 사이의 음향 신호를 측정하기 위한 센서로써 선행 실험 및 관련 연구를 통한 신호의 특성을 고려하여 주파수 범위를 선정하였다. 음향 방출 센서는 위와 같이 음향 신호를 측정할 수 있으므로 역지 밸브에 의해 막혀 있는 유로에 유체 흐름이 존재하는 경우에 발생하는 음향 신호를 취득할 수 있다. 밸브 양단 사이의 신호 차이 특성을 판별하고 신호 취득이 용이한 위치를 설정하기 위하여 밸브 내 유로의 양단에 설치하였다.

위와 같이 설치된 역지 밸브의 고장 상태를 모의하기 위하여 인위적으로 고장 조건을 생성하였다. 역지 밸브의 고장 유형은 기존의 고장 자료 분석을 통하여 내부 디스크 마모(disk wear) 및 외부 이물질 삽입을 가정하였다. 역지 밸브의 고장 상태를 모의하기 위하여 인위적으로 내부 디스크에 1mm, 2mm, 3mm를 절삭하여 디스크 마모(disk wear) 상태를 모사하였고, 외부 이물질(foreign object)은 흔히 이용되는 용접봉(weld rod)을 가정하고 그 크기를 1.0mm, 1.2mm, 1.6mm 로 고장 상태를 모의하였다. 따라서 실험 설비에 갖춰진 역지 밸브의 디스크를 고장난 상태의 디스크로 교체하여 유로 흐름 신호 측정을

위한 실험을 반복하였고 또한 정상적인 디스크에 위에서 정의한 크기의 용접봉을 밀착시켜 각 고장 유형에 의한 역방향 유체 흐름을 음향방출 센서를 이용하여 측정하였다. 또한 역방향으로의 유량을 측정하기 위한 초음파 유량계를 역시 밸브 배관에 부착하여 유량 신호를 측정하였다. 위와 같은 고장 유형에 따라서 실험 배관의 압력을 3 bar, 6 bar, 9 bar 로 변경하여 가면서 각각의 음향 신호 및 유량 신호를 측정하였다. 유체의 온도는 상온으로 설정하여 온도 변화에 의한 유체 흐름 변화를 실험하지 않았으며 또한 고장나지 않은 상태의 역지 밸브를 실험하여, 유체의 흐름이 발생하지 않는 경우에 음향 신호를 측정하여 배경 잡음 신호로 활용하였다. 위에서 열거한 실험 조건을 정리하여 아래와 같이 총 20가지의 조건이 형성하였으며, 그 구체적인 내용은 다음과 같다. 여기서 DW는 디스크 마모(disk wear), FO는 이물질 삽입(foreign object) 그리고 정상은 고장나지 않은 정상상태를 의미한다.

1. 압력 (3 bar): DW (1mm, 2mm, 3mm), FO (1mm, 1.2 mm), 정상
2. 압력 (6 bar): DW (1mm, 2mm, 3mm), FO (1mm, 1.2 mm 1.6 mm), 정상
3. 압력 (9 bar): DW (1mm, 2mm, 3mm), FO (1mm, 1.2 mm 1.6 mm), 정상

3. 실험 결과

위의 각 실험 조건에 따라 실험을 반복 수행하였으며 측정된 음향 신호를 시간대별이 아니라 주파수 성분을 표현하기 위하여 FFT 분석을 수행하였다.^[8] FFT 분석을 수행한 결과들 중에서 그 대표적인 경우를 다음 그림들에 나타내었다. 그림에서 y축으로 표현되는 FFT 결과의 크기(amplitude)는 표현의 편의를 위해 정규화 과정을 거친 값들이다. 이들 결과로 미루어 볼 때 역지 밸브가 고장나지 않은 정상상태의 신호는 그림 8과 9에 나타나 있으며, 특성 주파수를 분리하기 어려울 정도로 낮은 크기를 가지며 이들 신호의 특성은 역지 밸브 내에서 역 유량(reverse flow)이 발생하는 것이 아니라 주변의 배경 잡음으로 해석되었다. 그리고 그림 2, 4, 7은 각 압력에 따라 disk wear 크기에 따른 음향 방출 신호의 측정 결과를 나타내고 있다. 디스크 마모의 경우에 역 유량이 좁은 영역을 통과하면서 음향 신호를 방출하게 되므로 상당히 날카로운 주파수 특성이 검출되었다. 마지막으로 외부 이물질이 존재하는 경우 역시 그림 3, 5, 7에 나타내었다. 이들 신호의 주파

수 특성 및 평균제곱근(root mean square : RMS) 그리고 측정신호의 signal strength 등의 많은 특성이 있으나 본 논문에서는 대표적인 몇 가지 실험 경우 중에서 FFT 분석 결과만을 나타내었다. 다른 신호 특성은 다음 장에서 기술되는 신경회로망을 이용한 진단 알고리즘에서 사용된다.

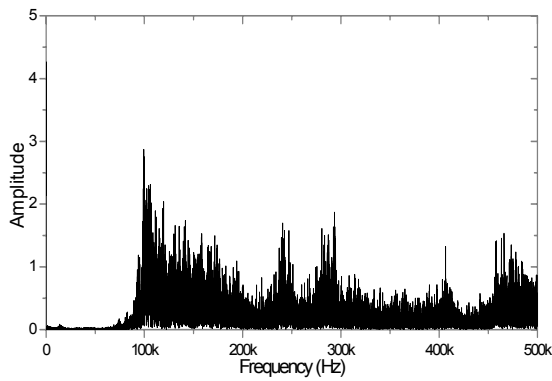


그림 2 디스크 마모 FFT 신호(2.0mm 3bar)

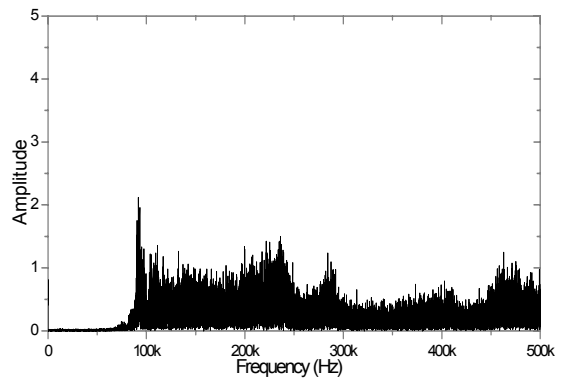


그림 3 외부이물질 FFT 신호(1.0mm, 9bar)

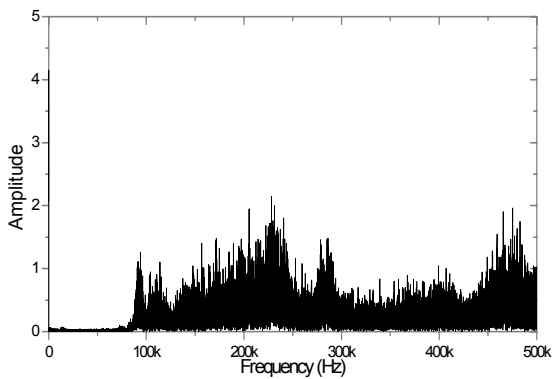


그림 4 디스크 마모 FFT 신호(1.0mm 9bar)

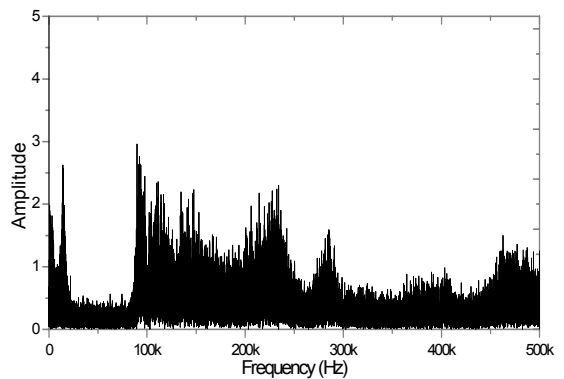


그림 5 외부이물질 FFT 신호(1.2mm, 6bar)

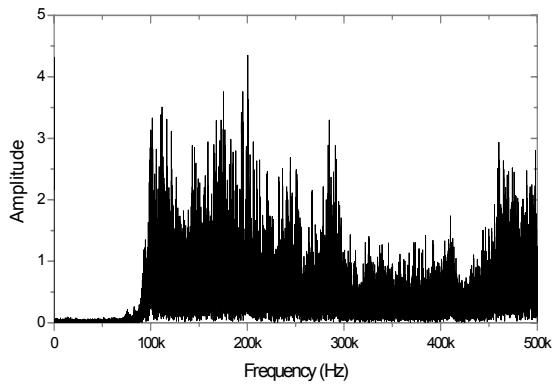


그림 6 디스크 마모 FFT 신호(3.0mm 6bar)

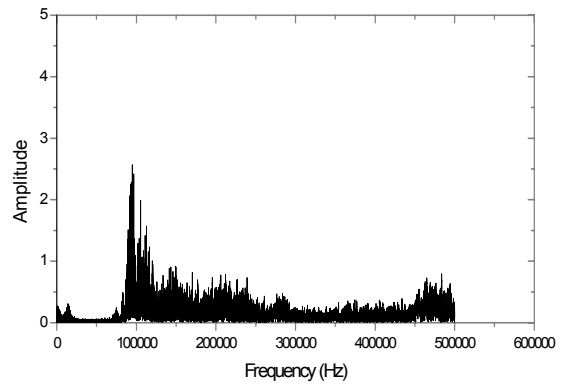


그림 7 외부이물질 FFT 신호(1.6mm, 9bar)

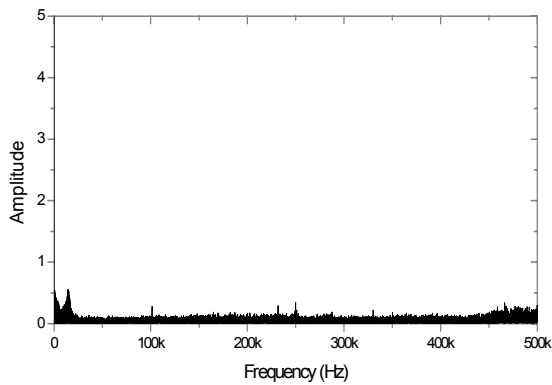


그림 8 정상상태 FFT 신호(3bar)

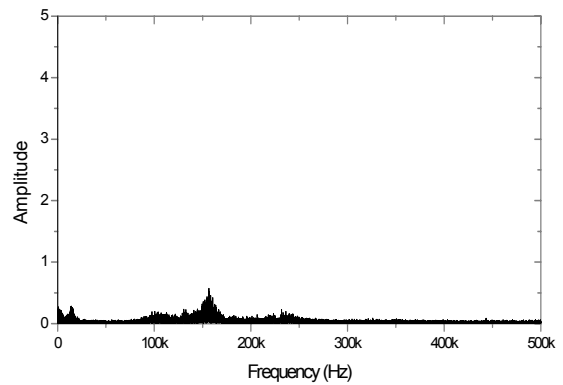


그림 9 정상상태 FFT 신호(9bar)

4. 감시 및 진단 알고리즘

위에서 구한 실험 결과를 바탕으로 역지 밸브의 고장 상태를 감시하고 진단할 수 있는 알고리즘을 역전파신경회로망(back-propagation neural network : BPN) 모델을 이용하여 개발하였다. 역전파신경회로망의 구조 및 이론은 잘 알려져 있으므로 본 논문에서는 표기하지 않고 개발된 진단 알고리즘에 대하여만 기술한다.^{[3][9]}

4.1 진단 알고리즘 구조

실험에서 가정한 역지 밸브의 고장 유형은 디스크 마모와 이물질 삽입이 있다. 현재 개발된 알고리즘은 크게 3 개의 신경회로망 모델을 계층적으로 연결하여 역지 밸브의 고장을 추론하여 진단하도록 하였다. 전체적인 구조는 그림 10에 나타난 바와 같으며, 그림에서 나타난 BPN은 신경회로망 모델을 의미한다.

제일 하부에 존재하는 신경회로망인 고장 판단 BPN에서 정상적인 역지 밸브와 고장이 발생한 역지 밸브를 구별한다. 만일 고장 상태가 발견되지 않으면 진단 알고리즘은 종료하고 고장이 발생한 경우에는 디스크 마모, 이물질 삽입의 고장 유형으로 구별한다. 고장 판단 BPN의 입력 노드는 FFT 분석을 수행한 이후의 평균 amplitude 크기, 현재 압력, 그리고 가장 높은 amplitude를 나타낸 특성 주파수 1과 특성 주파수 2를 입력으로 하여 9 개의 은닉층 노드를 거쳐 최종적으로 고장 상태를 나타내는 2 개의 출력 노드로 추론된다. 각 출력 노드는 0.5의 한계치를 두어 각 출력 노드별로 출력 상태를 판별한다. 즉, 첫 번째 출력 노드가 0.5 이상의 값을 가지면 디스크 마모 고장을 의미하고 두 번째 노드가 0.5 이상의 값을 가지면 이물질 삽입 고장을 의미한다. 두 개의 출력 노드 모두가 한계치 이하의 값을 가지면 역지 밸브는 고장나지 않은 정상 상태를 의미한다. 이 경우 모든 입력 변수는 그림에서 나타난 바와 같이 [0,1] 사이의 정규화된 값으로 입력된다.

만일 디스크 마모 고장 유형이 발견된 경우에는 디스크 마모 크기를 판별하는 DW 크기 BPN 모델로 관련 데이터를 전송하여 측정된 자료에 따라서 디스크 마모의 크기를 판별한다. 이 경우에 입력 노드는 FFT 분석을 수행한 이후의 평균 amplitude 크기, 현재 압력, signal strength, 측정 신호 자체의 RMS를 입력 조건으로 하여 9개의 은닉층을 거친 후 최종적으로 디스크 마모의 크기를 결정한다. 출력 노드의 값을 {0.3, 0.6, 0.9}로 나누어 각각 디스크 마모 1mm, 2mm, 3mm를 의미하게 하였다. 이 경우 역시도 모든 입력 변수는 정규화된 값으로 입력된다.

마지막으로 이물질 삽입에 의한 고장이 추론된 경우는 디스크 마모의 고장 유형과 같은 형태의 신경회로망 모델을 통하여 그 이물질의 크기를 추론하였다. 입력 노드는 디스크 마모와 마찬가지로 FFT 분석을 수행한 이후의 평균 amplitude 크기, 현재 압력, signal strength, 측정 신호 자체의 RMS를 입력 조건으로 하여 9개의 은닉층을 거친 후

최종적으로 삽입된 이물질의 크기를 결정한다. 출력 노드의 값을 {0.3, 0.5, 0.9}로 나누어 각각 1.0mm, 1.2mm, 1.6mm의 이물질 삽입을 의미하게 하였다. 이 경우 역시도 모든 입력 변수는 정규화된 값으로 입력된다.

위와 같이 구성한 신경회로망 모델을 학습시키기 위하여 총 30개의 학습 자료를 측정된 실험 치로부터 생성하여 학습을 수행하였다. 각각의 모델을 독립적으로 최종 오차율을 0.005 수준으로 학습을 수행하였다.

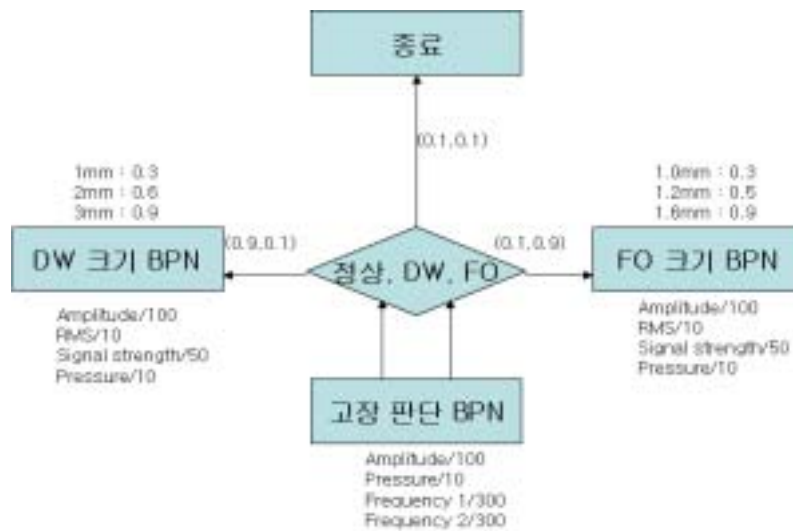


그림 10 진단 알고리즘 체계도

4.2 진단 결과

학습된 신경회로망을 이용하여 학습에 사용되지 않은 측정값을 대상으로 총 300개의 경우에 대하여 진단 알고리즘을 수행하여 그 결과를 살펴보았다.

먼저 계층적인 구조 하단의 고장 유형 진단을 위한 신경회로망의 학습 결과를 살펴보면 다음과 같이 아주 잘 맞음을 확인할 수 있었다. 전체적인 학습에 의한 평균 오차율은 약 3% 정도로써 역시 밸브의 고장 여부와 그 고장 유형을 판단하는 진단 알고리즘으로써의 유용성이 입증되었다.

두 번째로 디스크 마모의 크기를 진단하는 신경회로망의 학습 결과를 살펴보면 평균

오차율이 10% 이내로 역시 밸브 내에서 디스크 마모 고장이 발생한 경우에 그 크기를 실험 압력에 무관하게 제대로 그 크기를 진단해 낼 수 있음을 확인하였다. 하지만 총 300개의 미학습(unlearning) 자료 중에서 약 10개 정도가 50% 정도의 오차율을 보였다. 이 경우는 대부분 디스크 마모의 크기가 1mm 인 경우에 1.5mm 정도를 추론하는 진단을 수행하므로 전체적인 고장 유형에 따른 고장 상태를 판단하는 진단 알고리즘으로써의 유용성을 크게 해치지 않는 것으로 판단되었다. 그러나 진단 알고리즘의 정확성을 검증하기 위하여 추후 재 실험을 통하여 이 들 데이터의 정확성 및 신경회로망 모델을 다시 검증할 예정이다.

마지막으로 이물질 삽입에 의한 고장 발생 시에 삽입된 이물질의 크기를 진단하는 신경회로망을 검증하였다. 이 경우 평균 오차율은 디스크 마모의 경우와 유사하게 나오나, 총 300개의 미학습 자료 중에서 50 개의 경우에서 오차율이 약 60%에 육박하는 것으로 나타났다. 이는 삽입된 이물질이 내부 압력에 의해 변형을 일으켜 반복되는 실험에서 학습에 사용된 자료에서 추론된 이물질의 크기와 반복된 실험에서 사용된 이물질의 크기가 일치하지 못하였음을 판별하였다. 따라서 이물질의 크기 변화를 정확히 추론하거나, 학습 및 진단 알고리즘에서 사용되는 데이터를 개선해야 하는 것으로 판단되었다. 따라서 데이터 분석 및 신경회로망 모델에 수정이 요구되고 있으며, 디스크 마모의 경우와 마찬가지로 추후 재 실험 및 정확하게 삽입된 이물질의 크기를 산정하는 알고리즘으로 개선할 예정이다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 원자력 플랜트의 안전성에 위협을 줄 수 있는 역시 밸브의 고장을 분해 작업 없이 판단할 수 있는 새로운 방법론이 개발되었다. 개발된 방법은 현재 각국에서 많은 연구가 진행되고 있는 것과 유사하게 역시 밸브의 고장을 통하여 누출되는 유량을 탐지하여 그 고장 상태를 인지하는 방안을 도입하였다. 유체의 흐름을 감지하기 위한 방법으로 유체의 흐름에 의해 발생하는 음향 신호를 취득하는 음향 방출 센서(acoustic emission sensor)를 채택하였다. 또한 측정된 신호를 바탕으로 고장이 발생한 역시 밸브의 상태를 감시 및 진단하기 위하여, 역시 밸브로 인하여 막혀 있어야 하는 방향으로의

유체 흐름을 감지하고 그 신호의 특성 분석을 통한 감시 및 진단 알고리즘을 개발하였다.

디스크 마모와 이물질 삽입을 주요한 역지 밸브의 고장의 유형으로 가정하고 역지 밸브를 포함한 배관을 구성하여 인위적으로 고장을 발생시킨 역지 밸브의 역 유량에 대한 음향 신호를 취득하여 감시 및 진단 알고리즘을 개발하였다. 감시 및 진단 알고리즘의 개발에 사용한 기법은 전문가의 판단을 대체할 수 있는 역전파신경회로망을 이용하였다. 진단 알고리즘의 수행 결과를 살펴보면 제 4 장에서 나타난 바와 같이 대부분 그 유용성이 입증되었으나 일부 자료에서 진단 알고리즘의 유용성에 문제가 되는 사항이 발견되었다. 이는 입력 데이터의 잘못으로 일차 판단하였으나, 이물질 삽입의 경우 반복되는 실험에 의해서 그 크기가 변경된 경우도 발견되었다. 따라서 추후 재 실험을 통하여 측정 자료의 정확성과 이물질 삽입의 크기가 변화하는 경우에 대하여 진단 알고리즘을 개선을 진행할 예정이다.

마지막으로 실험 장치의 한계로 인하여 상온에서 최대 9 bar의 압력만을 실험 조건으로 사용하였는데 이는 플랜트 유지 보수 기간 중에는 충분한 활용성을 가지나 고온 고압의 조건을 가지는 가동 중 플랜트에 대해서 적용하기는 어려우므로 추후 실험 장치의 확장을 통하여 가동 플랜트에서도 적용 가능한 진단 알고리즘을 개발할 예정으로 있다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

- [1] H.D. Hayes, "Aging and Service Wear of Check Valves Used in Engineering Safety-Feature Systems of Nuclear Power Plants," NUREG/CR-4302 (ORNL-6193/V2), Vol. 1, "Operating Experience and Failure Identification", Oak Ridge, TN, April 1991.

- [2] J.I. Braverman, et. al., "Assessment of Age-Related Degradation of Structure and Passive Components for US Nuclear Power Plant," NUREG/CR-6679, BNL-NUREG-52587, NRC, August 2000.
- [3] M.K. Yang, "Acoustic and Ultrasonic Signals as Diagnostic Tools for Check Valves," J. of Reactor Vessel Technology, Vol. 115, pp135-141, May, 1993.
- [4] C. Sim, H. Choi and H.K Baik, "The Development of a Non-Intrusive Test of Check Valve Using Acoustic and Magnets,"J. of Acoustic Society of Korea, Vol. 16 No. 1E, 1997.
- [5] H.D. Hayes, "Evaluation of Check Valve Monitoring Methods," Proceedings of the 17th Water Reactor Safety Meeting, October 23-25, Rockville, MD, 1989
- [6] R.E. Uhrig and L.H. Tsoukalas, "Application of Neural Networks", EPRI/TR-103443-P1-2, Knoxville, TN, January 1994.
- [7] A. Agostinelli, "Check Valve Diagnostics Utilizing Acoustic and Magnetic Technologies," Nuclear Plant Journal, pp. 80-90, November, 1990.
- [8] A.V. Oppenheim and R.W. Schafer, Digital Signal Processing, Prentice Hall Inc.
- [9] J.M. Zurada, Artificial Neural Systems, West Publishing Company, 1992.