

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.11.1053>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5234(Online)

## 원전 동력구동 밸브 패킹 마찰력 예측에 관한 연구

류 동 화\* · 이 영 신\*\*†

\* 한국수력원자력, \*\* 충남대학교 기계설계공학과

### A Study on the Packing Friction Estimation of Power-Operated Valves in Nuclear Power Plants

Dong Hwa Ryu\* and Young Shin Lee\*\*†

\*Korea Hydro and Nuclear Power

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received May 26, 2013 ; Revised September 6, 2013 ; Accepted September 6, 2013)

**Key Words:** Packing(패킹), Stem Friction(스텝 마찰), Power-Operated-Valve(동력구동밸브), Confidence Interval(신뢰구간)

**초록:** 본 연구의 목적은 원자력 발전소에서 사용되는 동력구동밸브의 패킹 마찰력 예측에 대한 적절한 방법을 찾는 것이다. 밸브의 패킹은 스텝을 통한 누설을 방지하는 것이 목적이거나 누설방지를 위하여 글랜드 너트 강하게 조여줄 경우 패킹의 마찰력으로 인하여 밸브 작동성이 떨어지게 된다. 본 연구에서 패킹 마찰력 예측을 위하여 실험적 방법과 통계적 방법을 사용하였다. 실험적 방법은 패킹 조합의 fY값 측정후 현장 밸브에 적용하였으며, 통계적 방법은 과거 10년간의 안전관련 밸브의 진단시험 데이터의 패킹 마찰력값을 표본으로 신뢰구간을 만들어 분석에 이용하였다. 두 방법 모두 실측값과는 상당한 차이를 보였으나 fY값 측정을 통한 실험적 방법 보다는 과거 진단시험 데이터를 이용한 예측이 좀 더 정확한 결과를 보였다.

**Abstract:** The purpose of this study is to estimate the packing friction of power-operated valve in nuclear power plants. The roll of packing in valve is preventing leakage through stem. Packing friction is highly depend on gland nut tightness which means higher reliability in sealing is lower operability. For the estimation of friction, we used statistical analysis and experimental analysis. In experimental approach, we have performed packing fY test and applied it to valve field test. In statistical approach, we have used 10 years DB of safety-related valve in nuclear power plant and analyzed packing friction based on confidence interval of sample. The comparison of two results shows that statistical analysis for packing friction are more accurate than fY analysis even though both approach have error compared to measured value but we confirmed that statistical approach is proper way to estimate packing friction.

- 기호설명 -

$F_{Pack}$  : 패킹 마찰력

$F_{Pack, Open}$  : 열림시 패킹 마찰력

$F_{Pack, Close}$  : 닫힘시 패킹 마찰력

$F_{Disk Weight}$  : 밸브 디스크 무게

$S_g$  : 글랜드 응력

$D_S$  : 스텝 직경

$H$  : 패킹 높이

$f$  : 패킹 마찰계수

$Y$  : 축방향 대 반경방향 응력비

$T_P$  : 글랜드 너트 토크

$K$  : 너트 계수

$D$  : 스텝 공칭 직경

$A$  : 패킹 넓이

$N$  : 글랜드 스텝 개수

$\bar{x}$  : 표본 평균

$t_{\alpha/2}$  : 유의수준  $\alpha$ 의 t분포 값

$s$  : 표본 분산

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

$n$  : 표본 크기  
 $\mu$  : 모평균

### 1. 서 론

패킹은 밸브의 열림 닫힘 동작을 허용함과 동시에 계통수의 누출을 막는 역할을 수행한다. 특히 원자력발전소 동력구동밸브의 패킹은 방사성 물질의 누출을 막는 매우 중요한 역할을 하는 밸브 구성품이면서 밸브의 가장 취약한 부분이기도 하다. 패킹 체결 토크를 높여 밀봉의 신뢰성을 높일 경우 마찰력 증가로 밸브 운전 여유도가 저하되며, 높은 운전 여유도 확보를 위하여 패킹 체결 토크를 낮출 경우 계통수가 외부로 누설되는 원인이 된다. 해외의 경우 1986년부터 미국과 캐나다에서 밸브 패킹의 마찰력 예측과 표준화된 관리체계 구축을 위하여 AECL(Atomic Energy of Canada Limited) 및 EPRI (Electric Power Research Institute)<sup>(1,2)</sup>를 주축으로 COG(CANDU Owners Group)<sup>(3)</sup> 및 패킹 제작사와 함께 패킹과 관련하여 많은 연구를 수행하였으며, 연구결과물을 바탕으로 패킹의 설계 및 관련 자료를 데이터베이스화 하고 패킹 형상관리를 위하여 SmartSeal<sup>(4)</sup>이라는 프로그램을 제작하기도 하였다. 국내 약 10년간의 동력구동밸브 안전성 평가 경험에 따르면 패킹의 마찰력은 밸브 작동시 양단간의 압력이 낮은 운전조건에서 동작하는 밸브의 경우 패킹의 마찰력이 운전 여유도를 결정하는 주요 인자임을 확인하였으며, 고차압 운전조건에서 작동하는 밸브의 경우 패킹 교체 및 글랜드 너트 조정 작업이 적절하게 수행되어 밀봉의 신뢰성 확보가 중요한 사안임을 확인하였다. 본 연구에서는 패킹 마찰력 예측을 위하여 패킹 조합의 마찰력 관련 물성치를 측정하는 실험적 방법과 10년간의 밸브 안전성평가 결과를 이용한 통계적 방법을 살펴보고, 현장 적용실험을 통하여 마찰력 예측을 위한 최적 방법론을 검토하고자 한다.

### 2. 패킹 마찰력 영향 인자

#### 2.1 패킹의 구조

밸브 패킹의 구조는 Fig. 1과 같이 밸브에서 요구되는 밀봉 조건을 형성하기 위해서 밸브 스템과 스템핑 박스와 360도 반경방향으로 접촉을 한

다. 글랜드 너트에 토크를 가하면 글랜드 팔로우를 거쳐 글랜드로 힘이 전달되어 패킹이 압축되게 된다. 압축된 패킹은 반경방향으로 팽창하여 유체를 밀봉하고 밸브 스템의 상하 작동중에도 누설이 발생하지 않도록 한다. 패킹은 누설방지 기능을 수행함과 동시에 스템과의 마찰을 발생시켜 밸브의 작동성을 저해하는 요소로 작용하게 된다. 패킹과 스템의 마찰에 영향을 주는 요소는 글랜드 응력, 패킹 재료, 설치 상태 및 운전조건 등 다양하며 밸브 내부의 유체의 점성, 온도, 압력 등도 패킹과 스템의 마찰에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 패킹은 크게 더블 패킹과 싱글 패킹으로 구분된다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 더블 패킹의 경우 패킹이 상하 2단계로 구분되어 있으며, 상하단 패킹세트의 사이에는 랜턴링이 삽입되어 있다. 랜

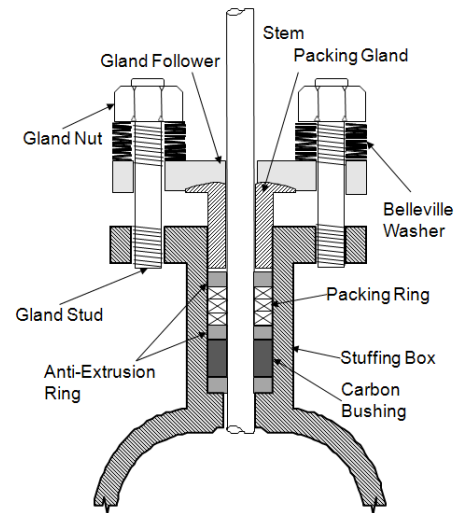


Fig. 1 Packing configuration

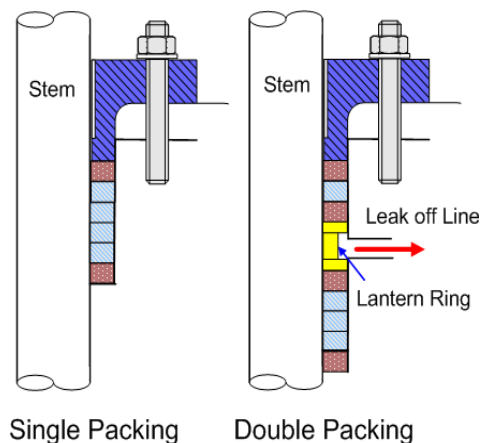


Fig. 2 Configuration of single and double packing

턴링 위치에는 누설 감시를 위한 누설 감시 배관 (Leak off line)이 연결되어 있다. 패킹의 열화 및 기타 고장으로 인하여 하단의 패킹에서 누설이 발생되면 상단의 패킹은 계통수가 외부로 유출되는 것을 막고 누설 감시 배관으로 계통수를 흘러 보내게 되며, 사용자는 누설을 확인하고 계통 격리 및 밸브 정비를 위한 조치를 취하게 된다. 싱글 패킹의 경우 패킹의 상하 구분없이 하나의 패킹 세트로 구성되어 있어 누설감시를 위한 배관이 설치 되어 있지 않다. 원자력발전소에서 더블 패킹의 경우 주로 계통수 누설이 매우 심각한 사고로 발생할 수 있는 계통과 방사성 유체가 흐르는 배관에 많이 사용되고 있다. 패킹세트의 일반적 구성은 압축력을 받는 양단에 밀림 방지를 위하여 밀림방지 링(Anti-extrusion ring)을 삽입하며, 밀봉을 위하여 패킹링을 삽입한다. 또한 패킹의 설치 조건에 따라서 스테핑 박스의 빈 공간을 메우기 위한 스페이서나 정크링, 패킹의 정렬을 잡기 위한 부싱 또는 누설 감시 배관 설치를 위한 랜턴링 등을 추가하기도 한다. 패킹 재질은 대부분 흑연(Graphite) 재질의 패킹을 사용하나, 특수한 경우 테플론 재질의 패킹을 사용하기도 한다.

2.2 패킹의 강화 현상

Fig. 3에서 보는 바와 같이 패킹 요소는 재료 자체에 빈공간(void)을 포함하므로 밸브 스테핑 박스에서 압축시 부피가 감소하게 되며 스템 및 스테핑 박스와의 마찰로 인해 패킹 상부에만 응력이 편중되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 응력 편중은 밸브의 동작 횟수 또는 시간의 경과에 따라 해소되면서 상부의 응력이 밀봉에 필요한 글랜드 응력보다 낮아지게 되면 누설이 발생하게 된다. 이런 현상을 패킹의 강화(Consolidation)<sup>(2)</sup>라고 한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 이러한 글랜드 응력의 평균화로 인한 누설을 방지하기 위하여 패킹 설치후 반복적인 동작과 글랜드 너트 체결을 통해서 패킹의 응력분포를 누설이 발생하지 않는 응력에서 가능한 일정하게 개선해주는 것이 필요하다. 또한 밸브가 잦은 동작을 할 경우 강화현상으로 인하여 운전중 누설을 일으킬 수 있으며, 운전빈도가 높은 밸브 및 발전소 운전중 글랜드 너트 재체결이 어려운 밸브에 대해서는 Fig. 1에서와 같이 스프링 와셔(Belleville spring washer)를 이용한 활하중(Live loading)을 적용하여 운전에 따른 패킹의 강화를 보상하기도 한다.

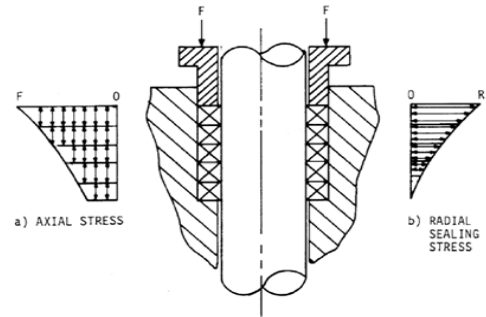


Fig. 3 Packing stress after initial gland nut torque

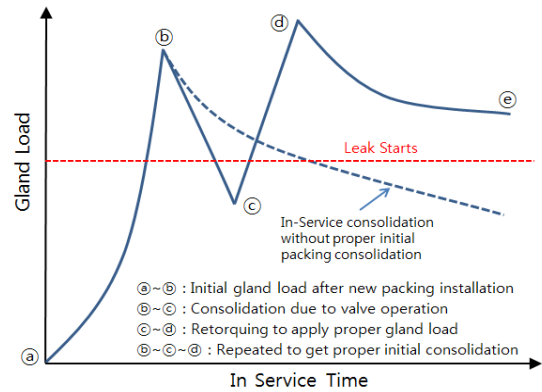


Fig. 4 Packing consolidation by stroke-retorque

2.3 패킹 마찰력의 성분 분석

밸브 진단시험에서 패킹 마찰력을 측정하며 진단시험은 1회의 As Found 시험과 2회의 As Left 시험으로 구성된다. As Found 시험은 밸브의 3~5년 운전후의 상태를 진단하는 것이며, As Left 시험은 As Found 시험 및 밸브 정비작업 이후 수행하는 진단 시험이다. 마찰력 예측이 필요한 시점은 밸브 정비 후이므로 As Left 시험에서 측정된 패킹 마찰력을 기준으로 하였으며 2회의 As Left 시험의 평균값을 사용하였다. 패킹 마찰력은 열림과 닫힘으로 구분되어 취득되고, 진단시험의 특성상 패킹 마찰력 단독 측정은 불가하며 밸브 디스크의 무게가 합산되어 측정된다. 고압력 조건에서는 피스톤 효과가 매우 크므로 경우에 따라 디스크 무게를 무시할 수 있으나, 내부 압력이 없는 경우에는 디스크의 무게를 무시할 수가 없다. 열림시 패킹 마찰력에는 식 (1)과 Fig. 5에서 보는바와 같이 디스크의 무게가 열림시 패킹 마찰력에 더해져 측정되며 닫힘시 패킹 마찰력에는 디스크의 무게가 감해져 측정되므로 디스크 무게를 제거하고 순수 패킹 마찰력을 얻기 위하

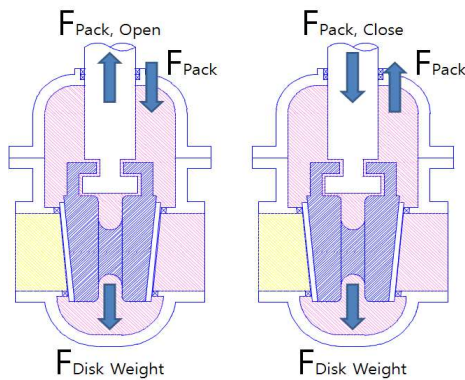


Fig. 5 Friction force of valve operation

여 패킹 마찰력을 평균 하였다. 그리고 패킹 마찰력은 스템의 직경과 비례 관계에 있어 단순비교는 불가하며 평균화된 마찰력은 다시 스템 직경으로 나누어 스템 단위 직경당 마찰력으로 변환하여 분석하였다.

$$\begin{aligned}
 F_{Pack, Open} &= F_{Pack} + F_{Disk Weight} \\
 F_{Pack, Close} &= F_{Pack} - F_{Disk Weight} \\
 F_{Pack} &= \frac{F_{Pack, Open} + F_{Pack, Close}}{2}
 \end{aligned} \quad (1)$$

### 3. 패킹 마찰력의 실험적 분석

#### 3.1 패킹 마찰력 관계식

패킹 마찰력은 글랜드 응력, 패킹과 스템 사이의 마찰 계수, 스템 직경 및 패킹 구성품의 설치 개수(=높이)의 함수로 식 (2)로 표현이 가능하며, 비회전 상승 스템(Non-rotating rising stem) 밸브의 패킹 마찰력을 예측하는 관계식<sup>(4)</sup>으로 알려져 있다. 패킹 마찰력 예측값은 글랜드 너트 토크가 발생시키는 글랜드 응력을 계산하여, 이 응력값에 의해 발생하는 패킹 마찰력을 계산한다. 식 (3)는 정해진 글랜드 응력을 형성해 주기 위해 필요한 글랜드 너트 토크 값을 산출하는 수식이다. 패킹세트를 구성하는 요소는 각각의 마찰 특성을 가지고 있으나 본 연구에서는 패킹세트를 하나의 마찰 요소로 가정하고  $fY$ 값을 측정하였다.  $fY$ 값은 마찰계수( $f$ )와 축방향 대 반경방향 응력비( $Y$ )의 곱으로 나타내며 분리가 어려워 하나의 계수로 다루었다.

$$F_{Pack} = S_g \times \pi \times D_s \times H \times f Y \quad (2)$$

$$T_p = \frac{K D S_g A}{N} \quad (3)$$

#### 3.2 패킹 조합별 $fY$ 측정 실험

동력구동밸브 작동시 밸브는 패킹의 마찰력에 양단간의 차압, 내부유체의 온도, 압력 및 밸브팩터 등 많은 여러 인자들에 의해 직간접적으로 영향을 받는 것으로 밝혀져 있으며<sup>(5)</sup> 특히 밸브 스템에 스트레인 게이지를 이용한 신호 취득시 동시에 이러한 여러 인자들의 영향이 혼합되어 나타나게 되어 각 영향 인자들에 대한 개별적 분석이 어렵게 된다. 이런 이유로 인하여 본 연구에서는 타 인자들에 대한 영향을 최대한 제거하기 위하여 밸브가 완전히 비어있고 밸브 양단간 차압이 없는 상태에서 실험을 수행하였으며 밸브 러닝행정 구간에 한정하여 데이터를 취득하였다. 밸브 러닝구간의 경우 패킹 마찰력, 유체에 의한 피스톤 효과가 지배적이거나<sup>(5)</sup> 내부 압력을 제거할 경우 피스톤 효과는 나타나지 않는다. 패킹 강화를 위하여 Fig. 6과 같은 절차를 글랜드 응력의 차이가 5% 이내가 될 때까지 최소 5회 이상 수행후 추가행정을 3회 더 실시하여 마지막 행정에서  $fY$ 값을 측정하였다.  $fY$  측정 실험에서는 글랜드 스테드에 스트레인 게이지 부착을 하여 글랜드 응력을 계산하였으나 현장 시험에서는 글랜드 스테드에 스트레인 게이지 부착이 어려워 글랜드 너트에 가해진 토크를 측정하여 너트 팩터  $K$ 값 0.2로 가정하여 글랜드 스테드에 발생하는 응력을 예측하였다.

#### 3.3 실험장치 구성

$fY$  측정실험을 위하여 Fig. 7과 같은 실험 장치를 제작하였다. 글랜드 스테드 표면에 스트레인 게이지를 부착하여 글랜드 응력을 구하고 패킹 마찰력 측정을 위하여 스템에 스트레인 게이지를 부착하였다. 토크 렌치를 이용하여 글랜드 너트 조임을 수행하여 조임 토크량을 측정하였다. 스템 동작을 위한 구동기는 리미토크사의 L120 모델을 사용하였으며 동력구동밸브 진단시험시 사용되는 진단장비인 모비즈(MOVIDS)를 사용하여 밸브 열림 및 닫힘중 발생하는 신호를 취득하였다.

### 4. 패킹 마찰력의 통계적 분석

본 연구에서는 최적 패킹 마찰력 예측을 위하



여 fY측정을 통한 마찰력 예측과 함께 통계적 기법을 적용하였다. 현장 진단시험에서는 두가지 방법을 통해 밸브 패킹 마찰력을 대략적으로 판단하고 있다. 첫 번째 방법은 스템의 직경에 4448.2 N (=1000 lb)을 곱하여 마찰력 값을 예측하는 방법이 있으며 다른 하나의 방법은 진단시험 대상밸브와 유사한 밸브를 현장에서 임의로 선정후 과거 진단시험의 패킹 마찰력 데이터의 단순 평균을 내어 비교하는 방법이며, 두 방법 모두 대략적으로 밸브 패킹 마찰력의 적정성을 확인할 때 많이 사용하는 방법이나 상당히 많은 오차를 가지게 된다. 본 연구에서는 이 두가지 방법의 적정성을 평가하였으며 실험적 방법과 비교하여 패킹 마찰력 예측을 위한 최적의 방법을 검토하여 보았다.

4.1 직경당 일정 마찰력 방법의 평가

첫 번째 방법의 적정성 평가를 위하여 밸브의 설계정보 및 과거 진단시험 결과를 이용하여 가설검정을 수행하였다. 가설검정을 위하여 표본이 되는 밸브의 등급을 재분류를 수행하였다. 밸브는 운전 조건별로 ASME B16.34에 따른 등급을 가지게 되는데 표준 등급(Standard class)은 Table 1와 같이 6가지로 분류하고 있다.<sup>(6)</sup> 또한 ASME B16.34에서는 중간 등급(Intermediate class)를 정의하고 있으며 실제 분석에 사용된 다수의 밸브가 중간 등급을 사용하고 있었다. 이러한 분류 문제를 조정하기 위하여 표준 등급의 중간수치를 중심으로 중간점 보다 낮을 경우 하위의 표준 등급으로, 높을 경우 상위의 표준 등급으로 재분류하여 가설검정을 수행하였다. 가설검정 수행을 위하여 범용 통계 분석 소프트웨어인 미니탭<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 가설검정은 유의수준 5%에서 귀무가설  $H_0 = 4448.2 \text{ N}$ , 대립가설  $H_1 \neq 4448.2 \text{ N}$ 으로 등급 및 패킹 타입별로 구분하여 수행하였으며 2500 싱글 패킹 밸브의 경우 표본이 확보되지 않아 가설검정을 수행하지 않았다.

4.2 유사 그룹의 평균을 이용한 마찰력 평가

앞서의 방법으로 재분류된 밸브그룹에서 대상 밸브와 같은 등급 및 동일한 패킹 타입을 가지는 밸브를 찾았으며, 이들중 대상밸브의 스템 직경과 동일하거나 유사한 직경을 가지는 밸브를 임의로 적정 수량을 선정하였다. 선정된 밸브의 과거 진단시험 데이터베이스에서 밸브 열림 및 닫

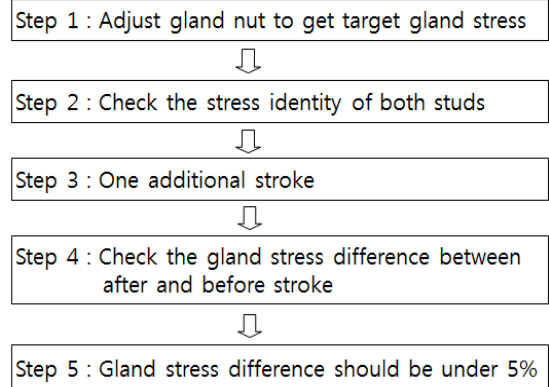


Fig. 6 Packing consolidation procedure

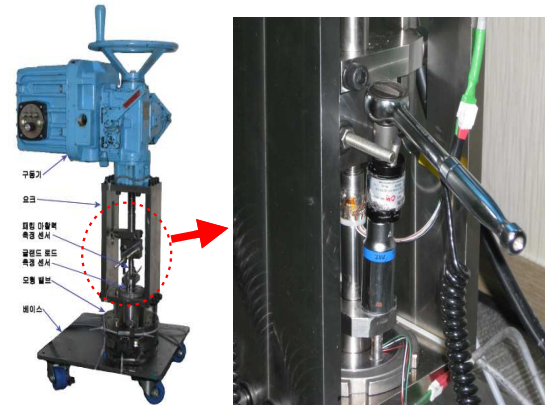


Fig. 7 Packing test equipment and sensor installation

힘시 마찰력을 표본 데이터로 구성하였다. 분석을 위한 방법은 식 (4)를 이용한 각 표본의 95% 신뢰 구간을 구하여 이를 실험값과 비교하였다.

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

5. 분석 결과

5.1 실험적 및 통계적 분석 결과

스템 직경당 일정 마찰력을 가정한 가설검정의 결과인 P값을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 대부분의 경우 단위 직경당 마찰력이 4448.2 N라고 말할 수 없음을 확인하였다. fY측정값을 이용한 마찰력 분석을 위하여 비회전 상승 스템 타입의 밸브 8대를 선정하였으며 대상 밸브의 패킹관련 설계정보를 Table 2에 나타내었다. 선정된 밸브에 설치된 패킹 조합은 총 3가지 타입이며 이와 동일한 형상의 패킹을 대상으로 하여 fY 측정실험을 수행하였다. 목표 글랜드 응력은 더블 8링 및 싱글 6링의 경우 20.7

MPa(=3000 psi) 및 27.6 MPa(=4000 psi)로 구분하여 실험을 수행하였으며 싱글 5링의 경우 앞선 실험에서 다른 조합의 패킹의 fY 변화량 보다 커서 추가적으로 글랜드 응력 34.5 MPa (=5000 psi)에서 한번 더 데이터를 취득하였다. Table 3에서 보여지듯이 일부 패킹 조합의 경우 fY 최대값은 최대 글랜드 응력에서 나타나지 않았으며 패킹링의 수에 따라 다른 글랜드 응력값에서 최대값을 나타내었다. 양단의 밀림 방지링을 포함하여 8개의 패킹링과 랜턴링을 가지는 더블 패킹 조합의 경우 약 27.6 MPa의 목표 글랜드 응력에서 최대의 fY값을 나타내었다. 패킹 강화 완료후 마지막 추가 세 번째 행정에서 fY값 0.01429를 가졌으며 그때의 글랜드 응력은 25.8 MPa로 강화 완료 시점의 글랜드 응력 26.6 MPa보다는 약간 감소하였다. 랜턴링이 없는 싱글 패킹의 경우 패킹링 수에 따라 목표 글랜드 응력 20.7 MPa 및 34.5 MPa 근방에서 최대의 fY값을 가졌으며 강화 완료후 추가 세 번째 행정에서 fY 값 0.01178 및 0.02016을 가졌으며 글랜드 응력은 강화완료 시점보다 미소하게 감소하였다. 그리고 여기서 실험에서 얻어진 fY 값을 이용한 패킹 마찰력 값과 표본의 95% 신뢰구간을 이용하여 얻어진 단위 직경당 마찰력 값에 스템의 직경을 곱하여 그 값을 Table 4에 제시하였다.

5.2 패킹 마찰력 실측치와의 비교

실측치와 비교를 위하여 대상 밸브 8대에 대한 패킹 마찰력을 측정하였다. 적절한 마찰력 취득을 위하여 Fig. 8에 표시된 빨간 박스에서 보여지듯이 열림 및 닫힘 행정시 약 65 ~ 75 % 열린구

간에서의 측정된 마찰력의 평균값을 사용하였으며, 실측치와 fY를 이용한 마찰력 예측치와의 비교 및 신뢰구간을 이용한 마찰력 예측치와의 비교 결과를 Table 5에 나타내었다. fY 측정실험을 통한 마찰력 예측의 경우 오차율이 최소 34.6 %에서 최대 73.7 %까지 발생하였으며 신뢰구간을 이용한 예측값과 비교시 모든 밸브의 예측값이

Table 2 Test packing specification

Valve No	Packing Type	Stem Dia. [mm]	Stuffing BoxDia. [mm]	Ring		Stud	
				No	Height [mm]	No	Dia [mm]
1	Double	44.45	60.33	8	63.5	2	19.05
2	Double	44.45	60.33	8	63.5	2	19.05
3	Double	44.45	60.33	8	63.5	2	19.05
4	Double	47.63	66.68	8	76.2	2	19.05
5	Double	28.58	41.28	8	50.8	2	15.88
6	Double	63.50	82.55	8	76.2	2	28.58
7	Single	38.00	57.99	6	54.10	2	19.99
8	Single	22.00	32.00	5	23.88	2	10.01

Table 3 Maximum fY test result

Type	Ring No.	Gland Stress after Consolidation [MPa]	Measured Value	
			Gland Stress [MPa]	fY
Double	8	26.6	25.8	0.01429
Single	6	20.0	18.9	0.01178
Single	5	34.2	33.0	0.02016

Table 4 Result of valve friction estimation

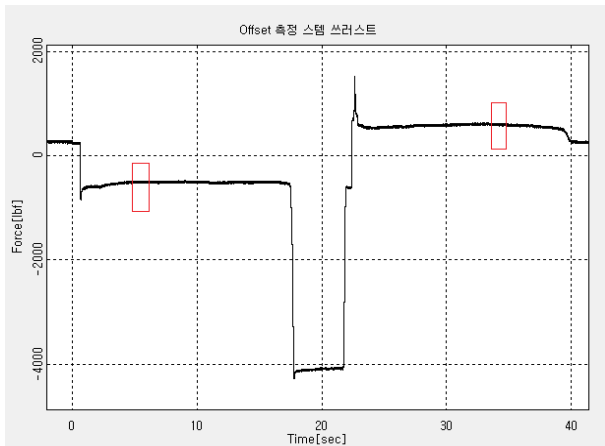
Valve No	Estimation using fY Test [N]	Estimation using Confidence Interval [N]			
		Sample Size	C.I Lower	C.I Upper	Mean
1	3797.0	65	7979.7	9501.0	8740.3
2	3797.0	65	7979.7	9501.0	8740.3
3	3797.0	65	7979.7	9501.0	8740.3
4	4610.6	69	10725.1	13723.2	12223.7
5	1917.2	270	5969.1	6450.8	6209.7
6	5990.2	41	11336.3	15700.0	13518.1
7	2499.7	63	5325.4	6429.5	5877.9
8	658.3	92	2578.6	3033.2	2805.9

Table 1 Result of hypothesis testing

Class	P Value			
	Single Packing		Double Packing	
	As Found	As Left	As Found	As Left
150	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
300	0.686	0.239	0.060	0.026
600	<0.005	<0.005	0.924	0.359
900	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
1500	0.262	0.916	<0.005	<0.005
2500	N/A	N/A	0.075	0.334

**Table 5** Comparison of valve friction estimation result

Valve No	Measured Friction [N]	Error Rate (Estimated-Measured)/Measured [%]			
		f <sub>y</sub> Test	C.I. Lower	C.I. Upper	Mean
1	6612.3	42.6	20.7	43.7	32.2
2	7493.0	49.3	6.5	26.8	16.6
3	6759.5	43.8	18.1	40.6	29.3
4	9033.0	49.0	18.7	51.9	35.3
5	4919.7	61.0	21.3	31.1	26.2
6	9850.6	39.2	15.1	59.4	37.2
7	3822.4	34.6	39.3	68.2	53.8
8	2501.7	73.7	3.1	21.2	12.2



**Fig. 8** Stem friction signal

신뢰구간 안에 들어오지 못하였으나 하한값을 이용하여 비교시 오차율이 3.1 ~ 39.3 %이며 상한값 및 평균값의 경우 각각 21.2 ~ 68.2 % 및 12.2 ~ 53.8 %로 평가되었다.

### 6. 결과 고찰

f<sub>y</sub>값 측정을 이용한 패킹 마찰력 분석은 실측치와 비교시 과소 예측하였으며 표본 신뢰구간을 이용한 마찰력 예측의 경우 실험적 예측방법에 비해 모든 측정값이 실측치에 좀 더 근접하였으나 여전히 차이가 존재하였다. 이는 패킹 마찰력은 패킹의 재질에도 영향을 받지만 실제 현장에 설치된 밸브 패킹관련 부품의 상태에 따라 마찰력이 크게 영향을 받는것으로 판단된다. 하나의 예로써 실제 발전소 현장의 밸브는 글랜드 너트 및 글랜드 스테르드의 나사산 상태에 따라 분석에

서 사용된 너트 팩터와는 다른 값을 가질 것으로 추정하고 있다. 실측시의 글랜드 응력은 너트 토크, 너트 팩터 및 글랜드 면적을 이용한 계산상의 결과이며, 너트팩터의 가정치가 현장의 밸브와 다른값을 가질 경우 실제 현장에 설치된 밸브의 패킹의 글랜드 응력은 계산치와 다른값을 가지게 되며 이는 오차 발생의 주요한 원인이 된다. 이외에도 스템 조도, 스테어링 박스의 상태 등이 영향을 미치는 것으로 추정하며, 이러한 밸브 상태에 대한 신뢰성 있는 추정 방법이 없을 경우 단순히 패킹 조합별 f<sub>y</sub>값 측정을 통한 패킹의 마찰력 예측은 적절하지 않은 것으로 생각된다. 패킹 타입 및 스템 직경을 고려한 유사밸브 그룹을 통한 통계적 추정 역시 오차를 동반하나 본 연구의 경우 발전소의 건설 시점, 밸브의 운영 환경 등의 고려없이 전원전을 대상으로 표본을 구성한 것이 오차의 주요 원인으로 판단되며 스템 직경 등의 설계 데이터 외에 대상밸브의 사용 년수 및 사용 환경 등 추가적인 조건을 고려하여 표본을 구성하여 패킹 마찰력을 추정한다면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 7. 결론

본 논문에서는 패킹 조합별 f<sub>y</sub>측정을 통한 실험적 분석과 과거 진단시험 결과를 이용한 통계 분석을 이용하여 밸브 패킹 마찰력 예측과 관련한 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) f<sub>y</sub> 측정을 통한 마찰력 예측은 현장에 설치되어 운영중인 밸브 구성품의 열화 상태에 대한 신뢰성 있는 정량적 추정이 불가능 할 경우 예측값에 상당한 오차를 동반하게 되며 본 연구의 경우 실측치와 비교시 오차율이 34.6 ~ 73.7 %로 평가 되었다.

(2) 유사밸브의 과거 진단시험 결과를 이용한 마찰력 예측의 경우 모든 조건에서 신뢰 구간을 이용한 추정과 오차가 발생하였으나 적용 방법에 따라 오차율이 3.1 ~ 68.2 %로 f<sub>y</sub> 측정값을 이용한 방법에 비해 감소하였으며 밸브 관련 정보를 고려하여 표본을 구성한다면 좀 더 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) EPRI, 1988, "Valve Stem Packing Improvements,"

- EPRI NP-5697
- (2) EPRI, 2002, "Valve Packing Performance Improvement: Sealing Technology & Plant Leakage Reduction Series," EPRI TR-1000923, pp. 5-2~5-4.
  - (3) EPRI, 2006, "Compilation of COG Valve Packing Reports 2002-2003," EPRI 1013275.
  - (4) Joseph, A. P., 2009, "Verification and Validation for the Smartseal Software Application V4.1," Insert Key Solutions, Inc., Chadds Ford, pp. 4~12.
  - (5) Kim, D. W. and Yoo, S. Y. 2007, "Effects of Differential Pressure on the Performance of Motor Operated Flexible Wedge Gate Valve" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 31, No. 2, pp. 151~158.
  - (6) ASME B16 Committee, 2009, "Valves - Flanged, Threaded, and Welding End," ASME B16.24-2009, pp.184~187.
  - (7) Minitab Inc., 2010, "Meet Minitab 16"