

## 밸브 스템 패킹 정비 기술 Valve Stem Packing Improvement Techniques

박준현\*  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

오정목  
한국전력공사 영광원자력 1발전소  
전남 영광군 홍농읍 계마리 514

### 요 약

밸브 패킹은 밸브 동작 사이클이 반복되고 사용 년수가 증가함에 따라 기밀작용이 저하되어 누설이 발생되게 된다. 정상운전 중에 고온, 고압계통 밸브에서 패킹 누설이 발생하면 정비에 어려움이 따르며 이에 소요되는 제반 비용도 매우 크다. 정상운전 중에 패킹 누설이 발생하는 것을 예방하기 위해서 계획예방정비 기간 동안에 많은 밸브 패킹을 점검 또는 교체하고 있지만 국내원전에서 패킹 누설로 인한 불시정지나 출력감발 사례는 해외 원전에 비해 아직 높은 수준이다. 여기에서는 외국의 패킹 정비기술과 국내 원전의 패킹 정비현황을 비교 분석하였으며 패킹 정비주기 연장과 패킹누설 예방에 기여할 수 있는 일련의 패킹 개선기술과 적용방안을 제시하였다. 이러한 패킹 개선기술을 국내원전에 체계적으로 적용할 경우에 패킹 정비에 소요되는 제반비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

### ABSTRACT

Valve stem packing tends to leak according to long term usage or frequent strokes of valves. In high energy systems, packing leaks during power operation causes high cost and much efforts to settle down the valve sealing problem. Even though hundreds of valves are inspected for repacking or retorquing every refueling outage in domestic nuclear power plants, plant shutdown or power reduction events caused by packing leak are still higher than that of U.S. Packing improvement experiences of foreign plants and domestic status of packing maintenance are reviewed, and packing improvement techniques and application methodology are presented in this paper. Cost down effects on packing maintenance are expected extremely high when those packing improvement techniques are systematically applied in domestic plants.

### 1. 서 론

밸브 스템 패킹(valve stem packing)은 밸브 동작에 따른 스템의 움직임을 보상하고 스템으로 유체가 누설되는 것을 차단하기 위한 누설방지 장치이다. 패킹은 밸브 동작 사이클이 반복되고 사용 년수가 증가함에 따라 기밀작용이 저하되어 누설이 발생되게 된다. 패킹에서 누설이 발생되면 그랜드 너트를 조여주어 패킹에 가해지는 힘을 보상하거나(retorquing) 새 패킹으로 교체하는 방법(repacking)을 사용하게 된다. 정상운전 중에 패킹이 누설되면 저온, 저압 계통에서는 비교적 용

이하계 정비를 수행할 수 있지만 고온, 고압의 증기나 방사성 물질을 함유한 유체가 누설되는 경우에는 정비에 상당한 어려움이 따르게 된다. 경우에 따라서는 패킹 누설을 정비하기 위해 출력을 감발하거나 발전소를 정지시켜야 하는 상황도 종종 발생한다.

미국에서는 1980년대 중반에 전력연구소(EPRI)를 중심으로 밸브 스템 패킹 개선 기술을 개발하고 이를 원전에 적용하여 우수한 효과가 있음을 확인하였으며 현재 많은 원전에서 패킹개선 기술을 도입하여 활용중이다. 국내에서는 일부 원전에서 이러한 패킹개선 기술을 부분적으로 적용하고 있으나 아직까지 다수의 원전에서는 패킹 개선기술이 체계적으로 적용되지 못하고 있는 실정이다. 본고에서는 패킹 누설발생을 최소화하여 패킹누설로 인한 불시정지를 예방하며, 패킹 교체주기를 연장하여 정비비용을 획기적으로 절감할 수 있는 스템 패킹 개선기술을 가동원전에 체계적으로 확대 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 패킹 구조 및 손상 사례

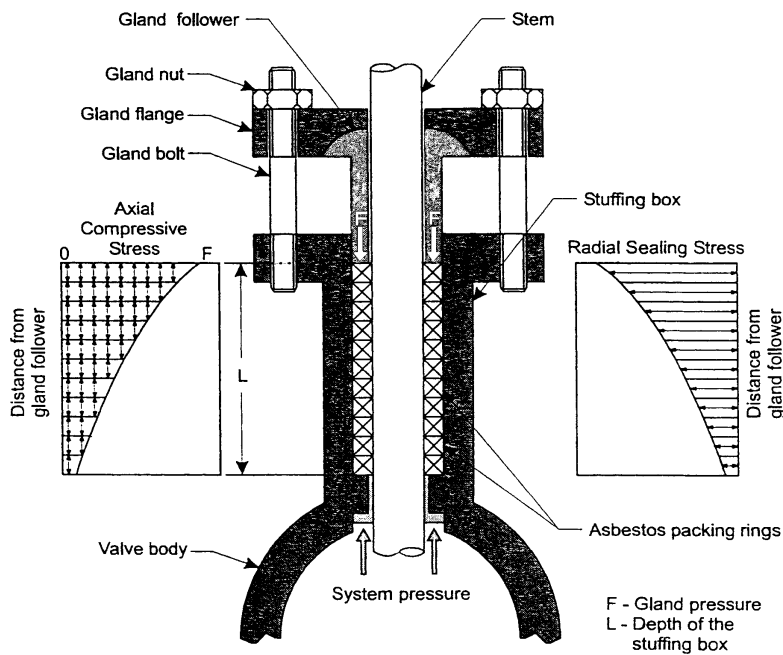


그림 1 일반적인 밸브 스템 패킹 구조

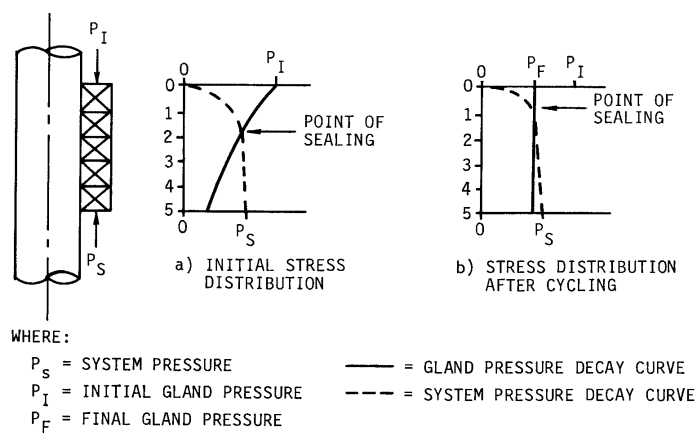


그림 2 스템 패킹 씰링 원리

밸브 스템 씰링 부위는 그림 1과 같이 스템과 패킹이 위치한 stuffing box와 패킹에 밀봉력을

가해주는 그랜드 등으로 구성되어있다. 패킹 씰링 원리는 계통유체가 패킹에 가하는 힘보다 큰 힘을 stuffing box 내의 패킹에 가해주어 누설을 방지하는 것이다. 그랜드에서 패킹에 전달된 수직 방향 힘은 stuffing box 내에서 반경방향 힘으로 변환되어 스템과 stuffing box에 밀봉력으로 작용하게되며 이러한 힘은 패킹 하부로 내려갈 수록 점차 감소한다. 이러한 패킹 밀봉력과 계통유체의 압력이 동일한 위치에서 씰링이 달성된다. 패킹에 작용하는 밀봉력의 변화가 없으면 씰링이 유지되지만 운전기간이 경과함에 따라 스템의 왕복운동 또는 패킹의 노화로 인해 밀봉력이 감소되기 마련이며 씰링 지점은 stuffing box 상부로 이동한다. 이러한 상황이 계속 진행되면 씰링이 실패하여 누설이 발생한다.

밸브 패킹과 관련한 정비는 국내·외 원전에서 가장 많이 발생하는 기계정비 항목중의 하나이다. 패킹누설은 발전소 초기 운전기에 많이 발생하고 패킹 정비 주기, 방법 및 기술 등이 정착됨에 따라 점차 감소되는 경향을 나타낸다. 1985년부터 1996년 동안 미국 NRC에 보고된 LER(licensee event report)에 따르면 32건의 밸브 패킹 누설사례 중에서 13건이 직접적으로 발전소 정지를 유발한 것으로 나타났다. 패킹 누설의 주요 원인으로서는 부적절한 stuffing box 설계, 부적절한 패킹 재질 사용, 패킹 다지기(consolidation) 불량, 부적절한 토크, 부적절한 retorquing, 패킹 교체주기 부적절 등인 것으로 조사되었다.

국내원전에서는 1985년부터 1998년까지 패킹이 누설되거나 패킹 불량으로 밸브가 고착되어 발전소가 정지된 사례는 7건으로 나타났다. 표 1은 패킹 누설·손상과 관련된 불시정지 사례와 운전/정비경험 보고서가 작성된 주요 정비 사례만을 조사한 것이다. 정상운전 중에 발생하는 패킹 손상 사례 중에서 안전성 및 비안전성 계통(증기, 급수, 추기 계통 등)의 일상적인 패킹 누설이나 정비 등은 별도로 운전/정비 경험보고서가 작성되지 않는다는 점을 감안하면 패킹 누설과 관련된 정비 사례는 훨씬 증가할 것으로 예상된다. 주요 원인으로서는 부적절한 패킹 재질 사용, 과도한 토크, 패킹 교체 주기 부적절 등으로 나타났다.

표 1 국내원전의 패킹 누설/손상 주요 사례

일시	누설 밸브	내 용
85.10	증기발생기 A 취출수 차단 밸브	밸브 패킹이 누설되어 정비작업 중 발전소 정지시킴
89.5	RTD 우회배관 차단밸브	스템 패킹 누설되어 무리한 back seating 시도하다가 스템 절단되어 발전소 정지
87.1	주급수 제어밸브	스템 패킹 불량으로 주급수 제어밸브 고착되어 발전소 정지
87.9	RTD 우회배관 차단밸브	스템 패킹 누설정비 위해 발전소 정지(스템 가공 및 패킹 교체)
93.1	증기발생기 4 수위제어 밸브	밸브가 개방 고착되어 발전소 정지(과도한 토크로 스템 손상 및 동작불능 유발)
89.6	RTD 우회배관 차단밸브	스템 패킹 누설되어 발전소 정지
93.9	잔열제거펌프 입구 밸브	스템 패킹 누설로 발전소 정지
98.9	증기발생기 C 취출수 밸브	패킹 누설되어 back seating 후 패킹 retorquing

### 3. 패킹 개선 기술

#### 가. 패킹 재질 개선

과거에는 석면(asbestos)패킹이 주로 사용되었으나 여러 가지 단점 때문에 현재는 사용범위가 감소되고 있으며 중요도가 낮은 밸브에서 주로 이용되고 있다. 흑연 패킹은 석면패킹의 단점을 잘 보완할 수 있는 우수한 씰링 재질이므로 근래에 사용범위가 점차 증대되고 있으며 외국 원전에서는 중요도가 높은 밸브일 수록 흑연패킹을 사용하고 있다. 석면패킹과 흑연패킹의 주요 특성은 다음과 같다.

○ 석면 패킹의 특성

- 사용중 다짐이 많이 발생 : 석면패킹은 밀도가 상대적으로 낮은 구조로 제작되므로 사용 중에 수분, 휘발성분이 증발되어 부피가 감소하기 때문에 다짐(체적 감소)이 많이 발생한다. 패킹 체적의 감소는 밀봉력의 감소를 가져오므로 retorquing 빈도가 증가하며 씰링 실패가 일어나기 쉽다.

- 마찰력이 크고 유연성 부족 : 석면패킹은 흑연 패킹에 비해 마찰력이 커서 스템의 왕복운동에 많은 힘이 소요되므로 스템 고착이 일어나기가 용이하다. 또한 사용 중에 석면패킹이 경화되어 유연성 및 탄성이 상실되므로 스템의 왕복운동에 따른 밀봉력의 변화를 보상하기 어렵다.

- 형태상의 문제점 : 석면패킹은 제작 기술상의 한계로 대부분 사각형태로 제작된다. 이러한 사각형태의 패킹은 그랜드에서 전달되는 수직방향의 힘이 반경방향의 밀봉력으로 전환되는데 불리하다. 또한 석면 패킹은 스테인레스나 인코넬 와이어를 삽입하여 제작하므로 스템의 굽힘, 고착 등을 유발할 수 있다.

○ 흑연 패킹의 특성

- 사용중 다짐이 적게 발생 : 흑연 패킹은 높은 밀도로 제작이 가능하므로 사용 중에 체적감소가 작게 발생한다.

- 마찰력이 작고 유연성 변화가 없음 : 흑연은 화학적으로 안정된 물질이고 흑연자체가 윤활제로 사용될 정도로 마찰력이 낮다. 또한 사용도중 유연성의 감소가 없어 스템 직경의 변화를 효과적으로 보상할 수 있다.

- 여러 형태로 제작 가능 : 흑연패킹은 사각형, 웨지형, 테이프형 등 다양한 형태로 제작이 가능하다. 특히 웨지형 흑연패킹은 그랜드에서 가해주는 축방향의 힘을 반경방향의 밀봉력으로 변환하는데 효과적이다.

그림 3은 패킹 씰링을 위해 필요한 그랜드의 압축력을 패킹 재질 및 형태별로 보여주고 있다. 계통 유체압력이 2000psi일 때 씰링을 위해 사각 석면패킹은 2800psi의 그랜드 압축력이 필요한 반면에, 사각 흑연패킹은 2000psi, 웨지형은 800psi 정도의 힘을 가해주면 씰링이 가능한 것으로 나타나 웨지형 흑연패킹의 우수한 씰링 효과를 말해주고 있다.

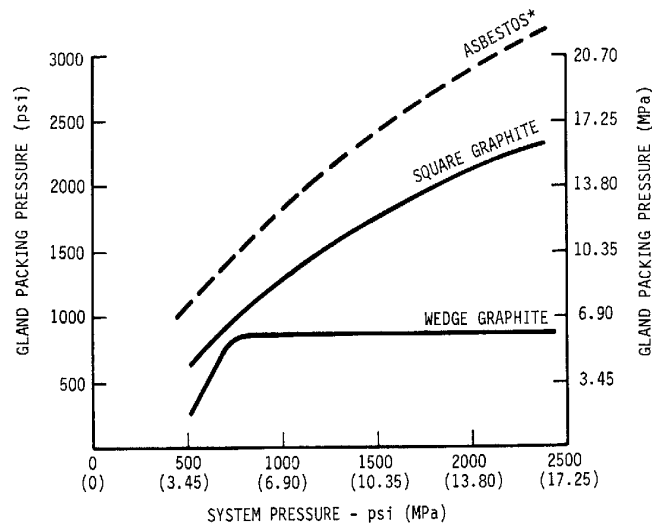


그림 3 패킹 재질 및 형태에 따른 밀봉력의 차이

나. 패킹 개수 축소

과거에는 패킹 씰링을 달성하기 위해서는 취급유체가 고압일 수록 패킹 개수가 많이 필요한 것으로 인식하고 8개 이상의 석면패킹을 사용하는 경향이 있었다. 경우에 따라서는 그림 1과 같이 11개 이상의 석면패킹을 장착한 밸브도 있다. 외국의 연구결과에 따르면 패킹이 많을 수록 다음과 같은 문제점으로 인해 씰링에 불리한 것으로 나타났다.

- 그랜드에서 패킹에 가해주는 축방향 힘은 대부분 상부 패킹에 작용하고 하부패킹으로 내려갈 수록 급격히 감소하므로 씰링 효과는 패킹 개수의 많음과는 무관

- 패킹의 개수가 많을수록 더 큰 그랜드 힘이 필요하고 이는 스템 마찰력을 증가시켜 actuator의 동작 불능 유발
- 패킹 개수가 많을 수록 다짐량이 증가되므로 누설 가능성이 오히려 증가

또한 상기 연구에서는 계통의 압력에 상관없이 5개의 패킹을 장착하는 것이 최적의 씰링효과를 얻을 수 있다는 실험결과를 보여주었다. 이는 흑연패킹의 씰링효과가 우수하기 때문에 5개만 설치하여도 충분히 씰링이 가능하고, 패킹 개수가 감소하므로 패킹 다짐량이 감소되어 장기간 밀봉력을 유지하기 때문이다. 그림 4는 패킹 5개 장착시 축방향과 반경방향 힘의 분포를 보여주고 있다. 가장 바람직한 패킹 배열은 그림 5와 같이 상·하부는 꼬아 만든(braided) 흑연패킹을 사용하고 중간 부위에는 웨지형 흑연패킹을 장착하는 것으로 이는 두 형태간의 단점을 보완하고 씰링효과를 극대화시킬 수 있다. 예를 들어, 발전소에 설치된 밸브의 stuffing box에 8개의 패킹을 장착되었다면 5개의 흑연패킹만을 장착하고 제거한 패킹 3개의 공간은 carbon(또는 stainless) spacer를 삽입하면 된다.

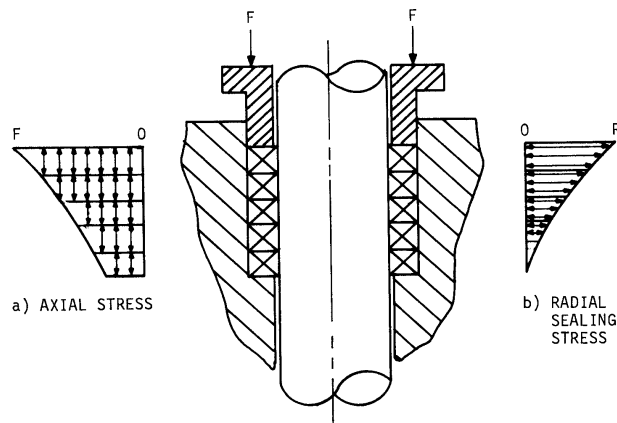


그림 4 패킹 5개 장착시 밀봉력의 분포

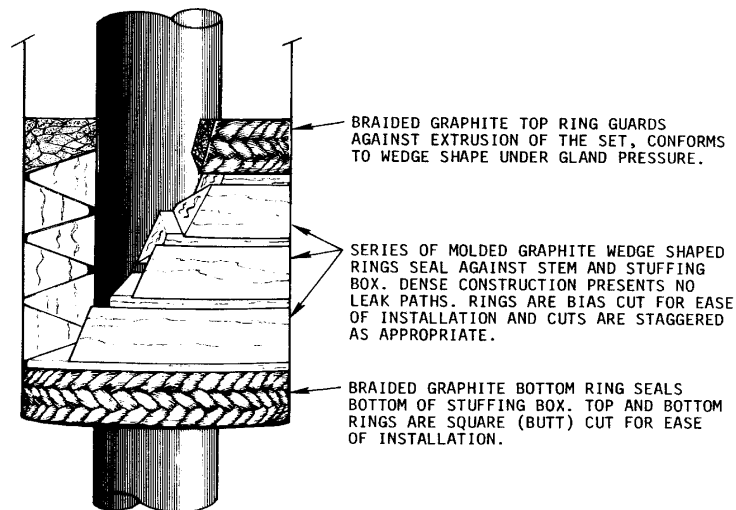


그림 5 패킹 5개 장착시 바람직한 흑연패킹의 사용 예

#### 다. Live-loading 장치 적용

Live-loading 장치는 패킹 다짐으로 인한 밀봉력 감소를 보상하여 씰링효과를 향상시키는 장치로 가동원전의 기존 밸브에 용이하게 장착할 수 있다. 이 장치는 그림 6과 같이 그랜드에 쟁반형 스프링을 장착하여 일정한 힘을 지속적으로 패킹에 가해줌으로써 패킹 다짐으로 인한 밀봉력 감소를 보상하여 장기간 씰링을 유지시킨다. 이 설비는 원래 중수로형 원전에서 고가의 중수 누설을 최소화할 목적으로 1970년대에 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)에서 개발하였다. 그후

효과의 우수성이 입증되어 80년대 후반부터 미국 원전에 도입되기 시작하였으며 현재 널리 적용되고 있는 보편적 씰링 기술이 되었다. 특히 이 설비는 동작이 빈번한 밸브나 기존의 패킹으로는 누설이 빈번한 밸브 등 씰링이 어려운 밸브에서 우수한 효과를 나타내고 있다. 또한 이 장치는 원전에서 사용중인 밸브에 비교적 용이하게 장착할 수 있다.

Live-loading 장치의 주요 특성은 다음과 같다.

- 스프링에 에너지를 저장하여 패킹 다짐으로 인한 밀봉력의 저하를 지속적으로 보상
- 밸브 동작시 행정에 따른 스템 직경변화를 효과적으로 보상하여 씰링 효과 증대
- Repacking 횟수를 1/20로 감소시킴
- Retorquing 횟수를 1/45로 감소시킴
- 스템 누설량을 1/10 ~ 1/40로 감소시킴
- 기존 밸브의 개조가 용이하고 비교적 비용 저렴(밸브당 50만원 내외)

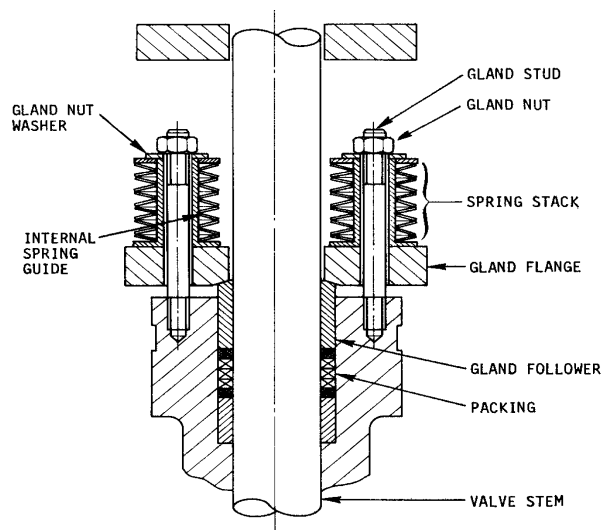


그림 6 Live-loading 장치의 대표적인 예

표 2 그랜드 형태에 따른 패킹 씰링효과 비교

밸브 그랜드 형태	일반적인 그랜드		Live-loading 그랜드	
	Woven asbestos	Graphite/ Woven asbestos	Woven asbestos	Graphite/ Woven asbestos
Repacking 빈도 (/100개 밸브/yr)	20	2-10	0-1	0-1
Retorquing 빈도 (/100개 밸브/yr)	45	5-25	0-1	0-1
누설률 (kg/100개 밸브/day)	100-400	0.5-3	10 이하	0.2 이하
한계 스템 왕복 횟수 (repacking 때까지)	10-20	20-40	5,000 이상	5,000 이상

#### 라. 외국의 패킹 개선 사례

1980년대 중반에 EPRI에서는 당시까지 개발된 밸브 패킹 기술을 분석하고 입증하는 연구를 수행하였으며 이 연구결과를 Oconee 2 호기에 시범 적용하여 흑연패킹과 live-loading system의 우수한 씰링효과를 확인하였다. 이 연구결과가 발표된 이후 많은 미국 원전에서 밸브 패킹개선 프로젝트를 수행하였으며 주요 내용으로는 패킹개수 최적화, 패킹재질 개선(석면 → 흑연), 주요밸브에 live-loading 장치 적용 등이다.

이러한 대대적인 패킹 개선 기술의 적용결과로 1991년 이후 패킹 누설과 관련된 LER이 단 한 건

도 발생되지 않았다. 그림 7은 미국 원전에서 패킹 누설과 관련된 LER 발행 건수를 연도별로 나타내고 있다. 대표적인 패킹 개선 사례로는 1985년에 착수된 Susquehanna 원전 1, 2 호기 사례를 들 수 있다. 동 발전소에서는 1997년까지 22,000개 밸브 중에서 12,000개의 밸브 패킹을 흑연패킹으로 교체하였으며 교체이후 패킹 누설은 거의 발생하지 않은 것으로 알려졌다.

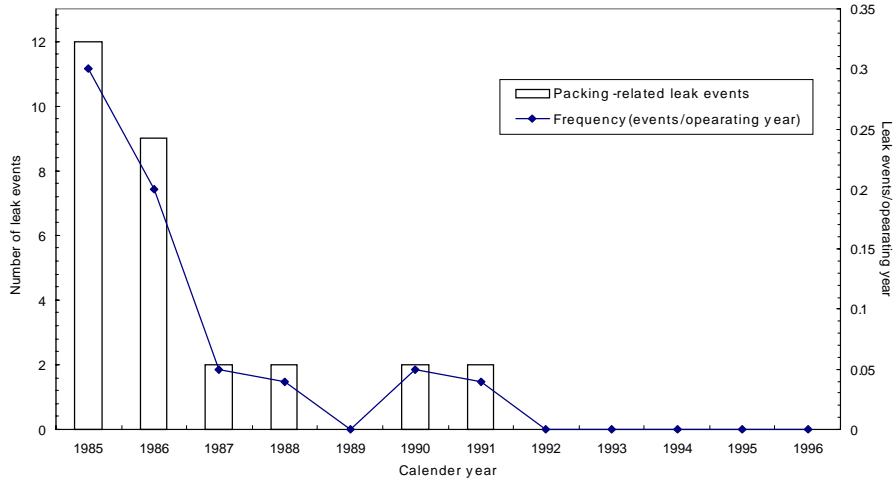


그림 7 패킹누설과 관련된 LER 건수

#### 4. 국내원전의 패킹 정비 현황

일반적으로 원자력발전소에서는 정상운전 중에 밸브패킹 누설 및 손상으로 인한 피해(불시 정지, 출력 감발, 방사성 물질 누출 등)를 최소화하기 위해 주기적으로 패킹을 교체하는 예방정비 전략을 사용한다. 국내원전의 패킹 손상 및 누설로 인한 정비사례는 80년대 말을 정점으로 점차 감소되고 있다. 현재까지 국내원전의 패킹 정비 현황과 이로 인한 문제점은 다음과 같다.

##### ○ 패킹 누설로 인한 발전소 불시정지 사례

미국에서는 85년부터 96년까지 총 13건의 밸브패킹 누설 및 손상사례가 발전소 정지를 유발하였다. 국내원전의 경우에는 85년부터 98년까지 총 7건의 패킹 누설 및 손상사례가 발전소 정지를 유발하였다. 운전중인 원전기수를 고려할 때 이는 국내원전(0.063회/년.기수)의 수치가 미국(0.015회/년.기수)에 비해 월등히 높은 것으로 국내원전의 패킹개선이 필요함을 시사하고 있다.

##### ○ 패킹 재질

국내원전에서는 현재까지 석면패킹을 주로 사용하고 있는 반면 미국 원전은 흑연패킹을 주로 사용하고 있다. 석면패킹은 흑연패킹에 비해 다짐량이 많아 누설이 발생하기 쉬우며 이로 인해 retorquing 및 패킹 교체주기가 빈번해져 정비 작업량이 증가하게 된다. 또한 석면패킹에는 인코넬 와이어가 삽입되어있어 스템 손상 및 스템 고착이 발생할 수 있다.

##### ○ 패킹 배열 및 개수

국내원전의 1, 2차 계통 주요 밸브 중에는 패킹이 8개 이상 장착된 밸브가 상당수 존재한다. 일반적으로 패킹 정비시에 패킹 개수 및 배열상태를 변화시키지 않고 밸브 도면에 명시된 대로 패킹을 교체하고 있다. 패킹 개수가 많으면 다짐량이 증가하여 씰링이 실패하기 쉬우며 스템 마찰력이 증가하여 밸브 actuator 동작불능으로 인한 고착이 발생하기도 한다.

##### ○ Live-loading 장치 적용

미국 원전에서는 동작이 빈번한 밸브, 누설이 많은 밸브, 발전소 운전에서 중요한 밸브 등에는 live-loading 장치를 보편적으로 적용하고 있다. 국내 가압경수로형 원전에서는 live-loading이 장착된 밸브가 1차계통에 일부 적용되고 있으나 이 밸브들은 대부분 발전소 건설시에 설치된 것이다. 반면에 AECL에서 설계한 월성원전은 패킹부위를 통한 중수누설을 최소화할 목적으로

live-loading 밸브가 많이 설치되어 있다.

국내에는 밸브에 live-loading 장치를 부착하는 설비개선이 부진한 실정인데 이는 동 장치의 원리, 구조, 적용 방법, 효과 등이 엔지니어에게 잘 알려지지 않았기 때문이다. 근래에 고리 1호기에서는 2차계통 밸브에 live-loading 장치를 부분적으로 도입하고 있으나 1차 계통에는 안전성 측면의 우려 때문에 적극 활용되지 못하고 있다. Live-loading 장치는 발전소 운전에 핵심적인 밸브에 장착할 때 보다 큰 효과를 나타내므로 패킹 누설/손상으로 발전소 운전이 지장을 초래한 사례가 있는 밸브, 누설이 빈번한 밸브 등에 우선적으로 장착되어야 한다.

#### ○ 패킹 교체 주기 및 정비량

원전 1기당 밸브 수량은 약 10,000~12,000개(배기/배수용 수동밸브 제외) 정도이며 이중 지속적으로 관리 및 정비가 필요한 밸브는 대략 2,000~2,500개 정도이다. 패킹 교체주기는 대략 2~6년 정도이며 이는 동작주기, 누설사례, 중요도 등에 따라 다르게 적용되고 있다. 계획예방정비 기간에 패킹을 교체하는 밸브는 약 200~300개 정도이며 이는 발전소 상황에 따라 유동적이다('99년 고리 1 계획예방정비 기간에는 패킹교체 대상 밸브가 약 160개, 기타 분해 정비시 패킹을 교체하는 밸브가 약 100개 정도임).

현재 국내원전에서 패킹 예방정비에 소요되는 비용은 패킹 개선기술을 적용한 미국에 비해 매우 높은 것으로 추측된다. 패킹 교체주기의 단축은 누설 예방 측면에서 효과가 있지만 패킹의 구조와 재질 특성을 명확히 이해하지 못한 상태에서의 패킹 교체는 오히려 패킹누설을 증가시킬 수 있으며 이로 인한 작업량 증가 및 경제적 손실도 매우 크다.

## 5. 개선 방안

국내원전의 패킹 정비현황에서 살펴본 문제점들은 해결하기 위해 다음과 같은 패킹정비 개선 기술을 체계적으로 적용하는 것이 필요하다.

#### ○ 패킹 재질 개선

현재 국내원전에서 주로 사용하고 있는 석면패킹을 흑연패킹으로 교체하여 패킹 누설 최소화하고 스템 고착방지, 교체주기 연장 및 정비작업량을 감소시킨다.

#### ○ 패킹 개수 최적화 및 배열 개선

패킹 개수가 8개 이상인 밸브는 패킹을 5개로 축소하고 나머지 공간은 spacer로 대체하고 불필요한 lantern-ring은 제거함으로써 패킹 누설을 최소화하고 정비 작업량을 감소시킨다. 또한 각 밸브 특성에 적합한 패킹 형태(사각형, 웨지형, chevron형 등)를 선정하여 씰링효과를 극대화한다.

#### ○ Live-loading 장치로 밸브 개선

운전에 중요한 밸브, 누설이 빈번한 밸브, 정상운전시 정비에 어려움이 있는 밸브 등 주요 밸브들에 대해서는 live-loading 장치로 개선하여 정상운전중 패킹 누설을 최소화하여 발전소 안전성 및 신뢰성을 향상시킨다.

#### ○ 패킹 교체주기 연장

위와 같은 패킹 개선 기술을 도입하고 현재 적용중인 패킹 교체주기를 5~10년으로 연장하여 패킹 정비작업량을 감소시킨다.

#### ○ 패킹 교체시 다지기 최대화

패킹 교체시에 새로운 패킹을 장착하고 그랜드를 조인 후에 바로 작업을 종료하면 밀봉력이 그림 8의 ②지점에서 점선방향으로 감소되어 패킹누설이 발생하기 쉽다. 이것은 패킹 교체 후 다짐이 충분히 되지 않은 상태에서 작업을 종료하였기 때문에 발생하는 현상이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 패킹 교체 후에 밸브 스템을 여러번 동작시키고 나서 다시 그랜드를 조여주어야 한다. 이러한 retorquing을 반복함으로써 패킹에 가해지는 밀봉력은 ④지점으로 상승하게 되며 이 경우에는 발전소 운전중에 다짐이 적게 발생하여 장기간 밀봉력을 유지할 수 있다. 이러한 작업방법은 단순하지만 패킹 누설방지에는 큰 효과를 발휘한다.



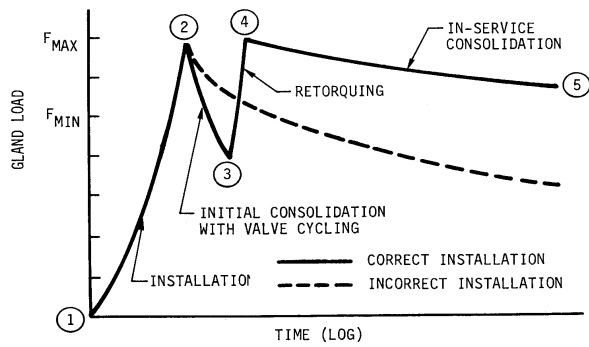


그림 8 패킹 교체시 시간에 따른 다짐량 변화

나. 패킹 개선 기술 이행 절차

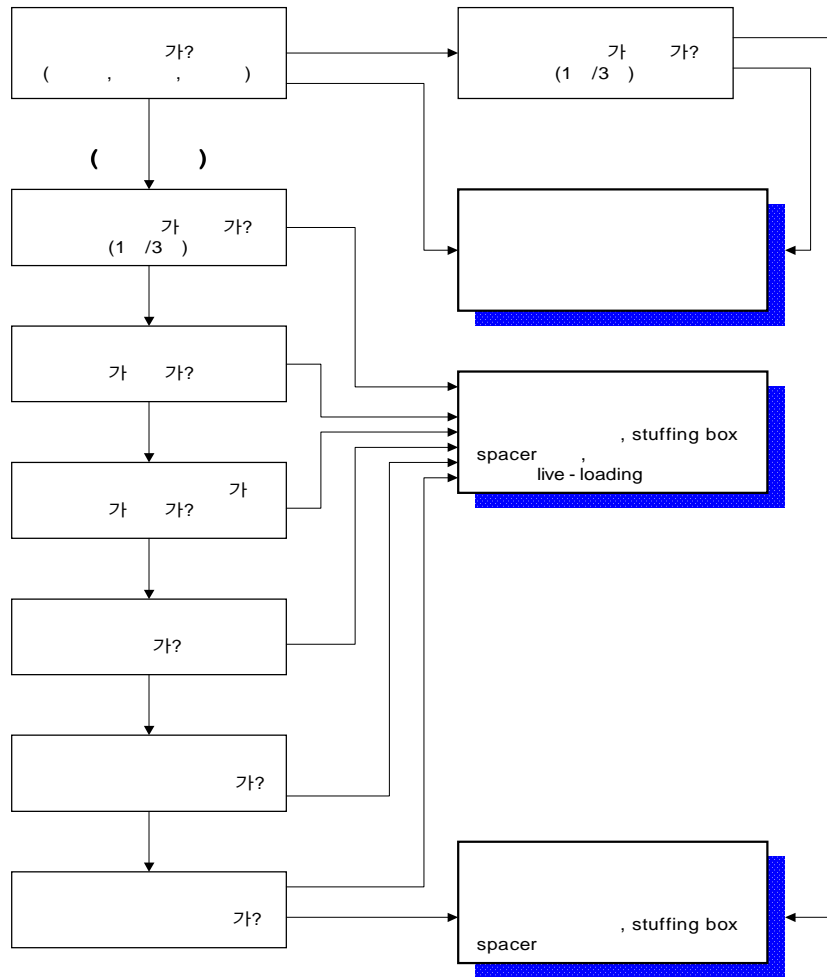


그림 9 패킹 개선을 위한 밸브 선정 과정

위에서 언급한 패킹 개선 기술은 그림 9와 같은 선정과정을 거쳐 밸브 중요도 및 특성에 따라 다음과 같이 우선 순위를 분류하고 이에 따른 적절한 개선 기술을 적용한다. 즉시 개선이 필요한 중요한 밸브는 차기 계획예방정비시에 최우선적으로 패킹 개선기술을 적용한다. 적용기술로는 흑연패킹으로 교체, 패킹 개수 및 배열 최적화, live-loading 장치 적용 등이다. 즉시 개선이 필요치 않은 밸브는 점진적으로 차기 패킹 교체주기 시에 개선기술을 적용한다. 적용기술로는 흑연패킹으로 교체, 패킹 개수 및 배열 최적화 등이고 live-loading 장치는 적용하지

않는다. 차순위로 개선이 필요한 중간등급의 중요한 밸브는 그림 9의 선정과정에 따라 적합한 개선기술을 점차적으로 적용한다. 중요도는 낮지만 손상이 빈번한 밸브는 “즉시 개선이 필요치 않은 중요한 밸브”와 동일한 개선기술을 적용한다.

#### 다. 패킹 개선 기술 적용 전략

패킹 개선 기술은 난이도가 높은 기술은 아니지만 패킹 개선 경험에서 습득한 기술과 상당수준의 정비 엔지니어가 투입되어야 효과를 극대화시킬 수 있다. 밸브 특성에 따른 패킹 재질/형태 선정, 바람직한 패킹 개수/배열 결정, live-loading 장치 적용시 적절한 hardware 선정 등 각 단계에서 나름대로의 기술이 필요하다. 이러한 기술은 선행 경험이 있는 EPRI를 통해 관련자료와 기술을 제공받을 수 있으며 또한 패킹 및 live-loading 장치에 대해서는 이를 생산하는 Chesterton사와 같은 패킹 제조회사로부터 관련기술을 전수 받을 수 있다.

원전에 설치된 밸브는 그 수량이 많으므로(10,000 여개/호기) 패킹 개선기술을 일시에 적용하는 것은 곤란하며 5~10년 정도의 중기 계획을 수립하여 점진적으로 수행해야 한다. 우선 중요도가 높은 긴급한 밸브부터 개선 기술을 적용하고 잔여 밸브는 발전소 정비계획에 따라 점차적으로 개선하는 것이 바람직하다. 본 개선기술을 전 원전에 효과적으로 적용하기 위해서는 시범대상 발전소를 선정하여 1주기 동안 시범 적용하여 관련기술을 습득하고 여기서 얻은 경험과 기술을 타 원전에 전파하는 방안이 바람직하다. 본 기술은 정비개선 기술이므로 정비회사, 패킹 제조회사가 초기부터 참여하는 것이 효과 제고에 도움이 된다.

## 6. 결론

밸브 패킹은 주기적으로 교체되는 소모성 부품이므로 정비 엔지니어의 기술적 관심도가 타 기계부품보다 낮은 것이 일반적인 현상이다. 중요한 부품에 대해서는 정비엔지니어의 관심도가 높기 때문에 외국의 신기술이 비교적 단시간에 적용되지만 패킹과 같이 중요성이 낮은 부품은 정비기술 개선의 사각지대로 남을 가능성이 높다. 패킹은 중요성이 낮은 부품이지만 발전소에 설치된 수량이 매우 많기 때문에 정비기술 개선효과는 대단히 크다. 본 고에서 제시한 밸브 패킹 정비기술을 국내원전에 적용했을 때 예상되는 개선효과는 다음과 같다.

- 패킹 누설이 감소되어 패킹 누설에 의한 제반 손실비용 절감
- 패킹 교체 빈도가 감소하여 주기적인 패킹 교체에 소요되는 제반비용(정비, 자재, 인력, 품질, 관리, 제염, 방사선 피폭 등) 절감
- 밸브 스템 마찰력이 감소하여 동력구동밸브에서 운전불능 예방 가능
- 패킹 누설로 인한 출력 감발 또는 불시정지 예방
- 패킹 씰링효과 향상으로 원전 안전성 및 신뢰성 향상

패킹 개선 기술은 외국에서 이미 효과가 입증된 기술이므로 국내원전에 이를 적용하는 데에는 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다. 밸브 중요도에 따라 우선순위를 정하여 시급한 밸브부터 개선 기술을 적용하고 점진적으로 중요도가 낮은 밸브로 확대해 나가는 방안이 경제성 측면에서 유리하다. 기술적 측면에서는 밸브 설계 및 운전특성에 따라 적절한 패킹 개선기술을 조합하여 사용하여 씰링효과를 높일 수 있다. 본 기술을 성공적으로 적용하기 위해서는 관련기술에 숙련된 엔지니어의 양성이 필요하며 적용 초기에는 시범발전소를 선택하여 우선적으로 적용한 후에 다른 원전에 점차 확대해 나가는 방안이 바람직하다.

## 참고 문헌

1. NUREG/CR-6582, Assessment of Pressurized Water Reactor Primary System Leaks, December 1998.
2. EPRI NP-5697, Valve Stem Packing Improvements, May 1988
3. William O'Keefe, Packing and seals for valves and pumps, Special report of Power, August 1984.
4. Packing Engineering Data(Chesterton, John Crane, Garlock Co.)
5. 운전 및 정비 경험 보고서
6. 원전 고장 및 정지 사례집
7. Maintenance engineer's Handbook