

# 위험기반검사(RBI)에서 사고 가능성 분석

이헌창 · 김환주 · 김소미 · 장서일 · 김태욱

명지대학교 화학공학과

## 1. 서론

여러 형태의 결함을 가지고 있는 압력설비들은 대부분 운전에 지장은 없으나, 일부는 대형사고로 발전할 가능성을 지니고 있다. 따라서 석유화학, 정유, 가스 및 화학산업에서 사용되고 있는 압력설비들을 안전하고 효율적으로 사용하기 위해서는 설비별 위험도를 정량적으로 산출하고, 위험도 순위에 따라 설비의 검사, 유지, 보수에 우선순위를 결정하여 집중적으로 관리함으로써 최소의 비용으로 최대의 안전성을 확보하는 자율안전관리를 구축할 수 있다[1]. 이를 해결하기 위해 선진국에서는 설비의 위험도에 근거한 검사항목, 검사방법, 검사주기 등을 결정하는 위험기반검사(Risk Based Inspection, RBI)[2,3] 기법이 개발되어 상용화되고 있으나, 알고리즘에 대한 정확한 분석은 아직까지 수행된 바 없다. 따라서 위험도에 영향을 주는 사고결과 크기와 사고발생 가능성의 분석이 선행되어야 할 필요성이 대두되고 있다. 특히, 사고결과 크기는 장치와 화학물질, 그리고 공정조건에 의해 결정되기 때문에 인위적인 조절이 어려우나[4] 사고발생 가능성은 물질, 공정변수 등에 의해 결정되기 때문에 조업조건을 변경하여 사고발생 가능성 등급을 낮추어 위험도 등급을 낮게 할 수 있으므로 사고발생 가능성 등급에 대한 상세한 분석이 필요하다.

본 연구는 API 581 BRD[2]에 의해 한국형 위험기반검사 프로그램을 개발하기 위한 일환으로 위험도 결정에 중요한 사고발생 가능성을 7개의 손상메카니즘에 대해 분석하였다.

## 2. 이론

정량적 RBI에서 누출 시나리오(s)별 설비의 위험도(Risk)는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱으로 식 (1)과 같이 표현된다[2,3].

$$(Risk)_s = (Likelihood\ of\ Failure)_s \times (Consequence\ of\ Damage)_s \quad (1)$$

여기서 사고결과 크기는 피해면적 또는 피해 손실액으로 나타내고, 사고 가능성은 설비의 파손확율이나 파손횟수로, 일반 고장발생 빈도에 설비변경계수( $F_E$ ), 그리고 관리시스템평가계수( $F_M$ )를 곱하여 식 (2)와 같이 조정된 고장발생 빈도로 나타낸다.

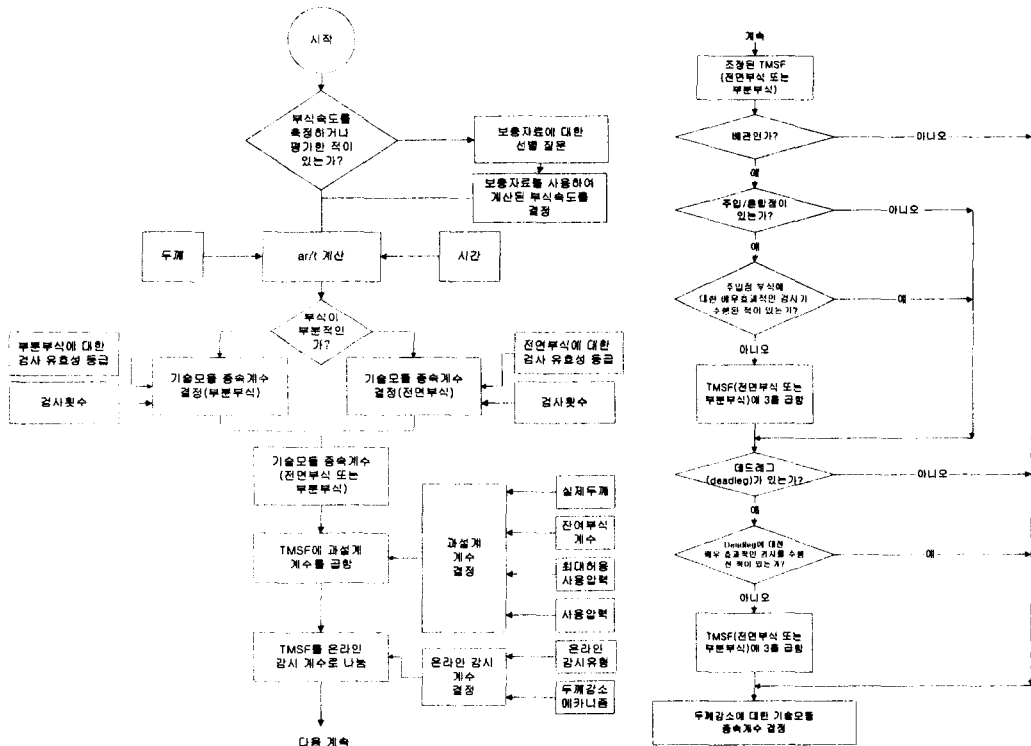
$$Frequency_{adjusted} = Frequency_{generic} \times F_E \times F_M \quad (2)$$

여기서 설비변경계수는 단위공정들과 단위공정 내 설비 구성요소들 간의 차이를 반영하는 것으로 설비의 해당부분에만 적용되기 때문에 각 설비와 그 설비가 운전되는 환

경에 따라 영향을 받는다. 즉, 설비변경계수에 대한 각각의 종속계수, 즉 기술모듈 종속계수, 보편적 종속계수, 기계적 종속계수, 공정 종속계수가 장치의 고장발생 가능성에 영향을 미친다. 이 중에서 기술모듈 종속계수는 특정 메카니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 방법으로 정상 및 비정상 운전조건 하에서 손상메카니즘의 선별, 특정 환경하에서 손상을, 검사프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 빈도에 적용할 수 있는 변경계수 산출 등에 사용되는 중요한 인자이다.

따라서 기술모듈에서는 사용중인 설비에 대해 발생 가능한 손상메카니즘을 정의하고, 이들의 기술종속계수(TMSF)를 이용하여 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 그리고 손상메카니즘은 두께감소, 응력부식균열, 고온수소침식, 노튜브, 기계적 피로, 취성파괴, 설비라이닝, 외부손상 등으로 구분된다.

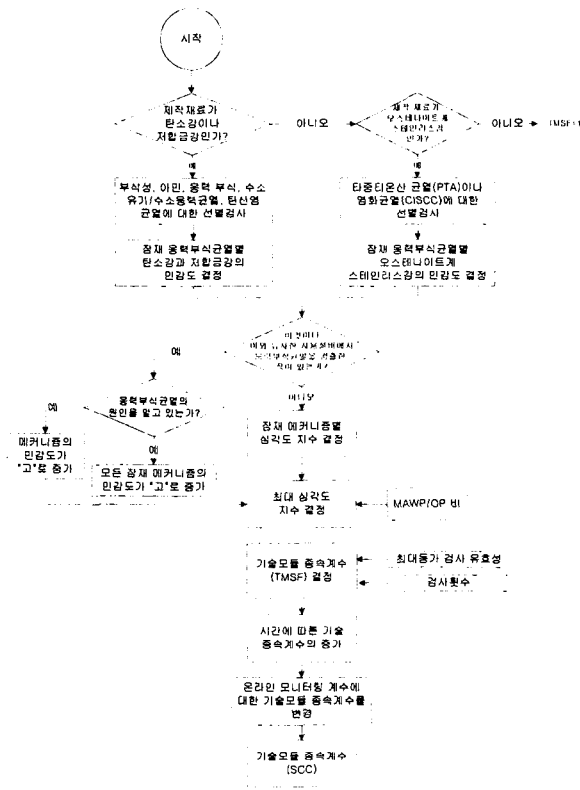
모든 설비에서 발생하는 두께감소와 응력부식균열의 경우에 TMSF를 결정하는 순서는 [그림 1]과 [그림 2]에 나타내었다.



[그림 1] 두께감소모듈의 TMSF 결정

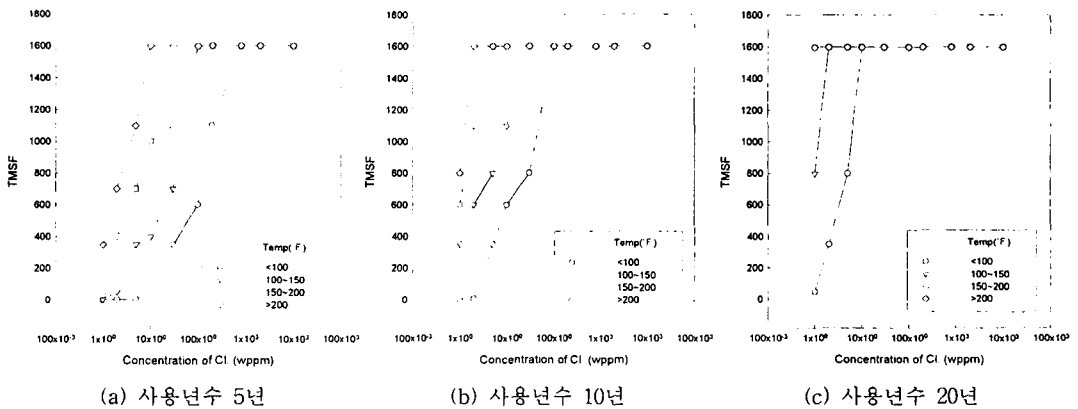
### 3. 결과 및 고찰

두께감소모듈에서 염산부식은 정유공정 설비에서 주로 많이 발생되는데, TMSF에 미치는 CI 농도, 사용연수, 온도의 영향은 [그림 3]에 나타내었다. 염산부식은 CI 농도가 증가함에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었고, 온도범위가 100°F 이하에서는 사



[그림 2] 응력부식균열모듈의 TMSF 결정

낮은 범위에서는 농도의 영향이 없으나 5이상의 농도범위에서는 급격히 증가하고, 사용 시간이 짧을수록 높은 값을 나타내어 수소침식은 초기에 주로 발생함을 알 수 있었다. 그러나 압력이 증가할수록 낮은 수소농도에서도 침식이 일어날 뿐만 아니라 사용시간은 TMSF에 영향을 미치지 않았다.

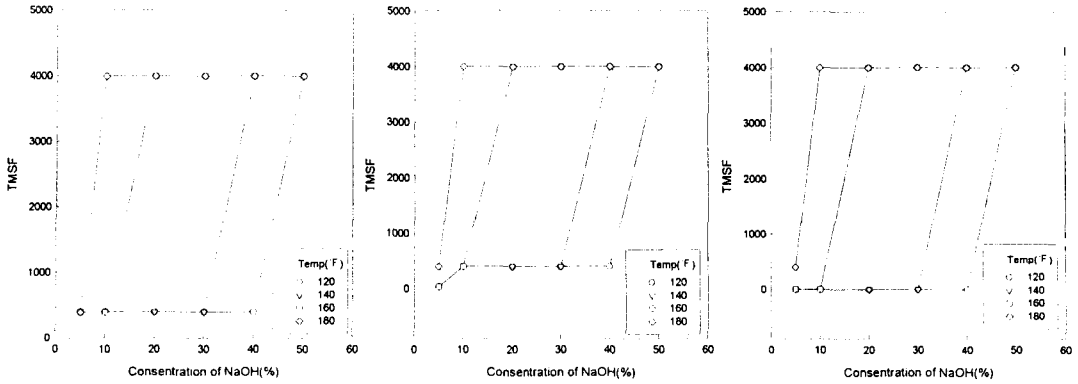


[그림 3] 두께감소모듈의 염산부식에 대한 사용연수 영향

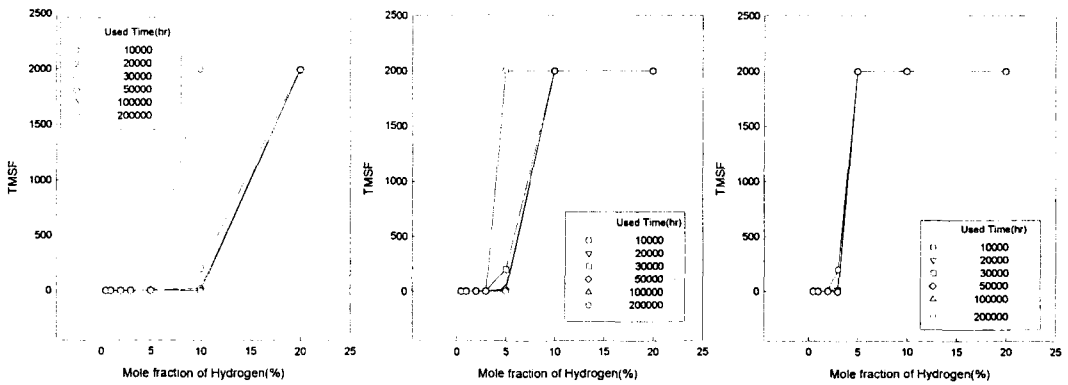
용년수에는 크게 의존하지 않으나, 100°F 이상에서는 사용년수가 증가함에 따라 TMSF가 급격히 증가하였다. 또한 일정한 사용년수에서는 농도가 낮은 범위이고, 운전온도가 증가할수록 TMSF가 증가하였다.

응력부식균열은 115~180°F의 탄소강에서 발생하며, 보온여부 및 증기 배출여부에 따른 NaOH 농도와 온도의 영향은 [그림 4]와 같다. 온도가 낮은 영역의 낮은 농도에서는 TMSF 값이 매우 적으나 온도가 증가할수록 낮은 농도에서도 부식이 일어나서 약 180°F에서는 전 농도범위에서 큰 값을 나타내었다.

고온수소침식은 높은 온도에서 수소의 높은 분압에 노출된 탄소강이나 저합금강에서 발생되는데, 수소의 물분율, 운전압력 및 사용시간의 영향은 [그림 5]와 같다. 100 psi 압력에서 수소의 물분율이 약 5% 이하의



(a) 보온(Y)/증기배출(Y/N)      (b) 보온(N)/증기배출(Y)      (c) 보온(N)/증기배출(N)  
 [그림 4] 응력부식균열모듈의 부식성균열에 대한 보온 및 증기배출 영향



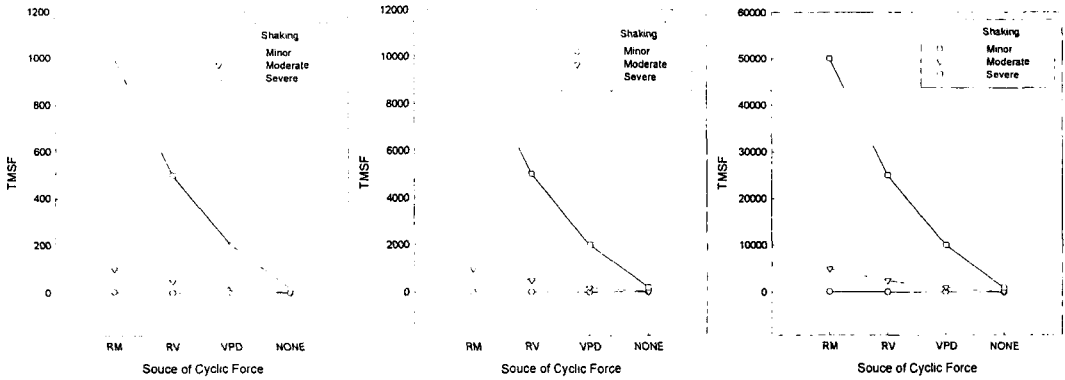
(a) 운전압력 100 pisa      (b) 운전압력 200 pisa      (c) 운전압력 300 pisa  
 [그림 5] 고온수소침식모듈에서 운전압력 영향

기계적피로모듈은 주로 배관에서 나타나며, 응력 발생원, 진동정도, 진동주기의 영향은 [그림 6]과 같다. TMSF는 진동정도에 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 진동이 심할수록 진동원에 영향을 받으며, 왕복기계>RV 펄림>밸브 고압강하(VPD)의 순서를 나타내었다. 또한 진동주기가 증가할수록 TMSF가 상당히 증가하였다.

취성과파괴모듈에서 낮은 온도/낮은 인성파괴는 주로 균열이나 결함에 의해 갑작스런 사고를 일으키는 경우로, 300°F 이하의 낮은 온도범위에서 발생하는데, 열처리 성질과 운전온도의 영향은 [그림 7]과 같다. 탄소강 또는 저합금강의 경우 낮은 운전온도에서는 설비의 두께가 증가할수록 TMSF가 급격히 증가하고, 온도증가에 따라 두께의 영향이 감소하여 약 200°F 이상에서는 두께 영향이 무시할 수 있었다. 또한 열처리를 하지 않은 경우가 열처리를 한 경우 보다 약 5배의 TMSF 값을 나타내었다.

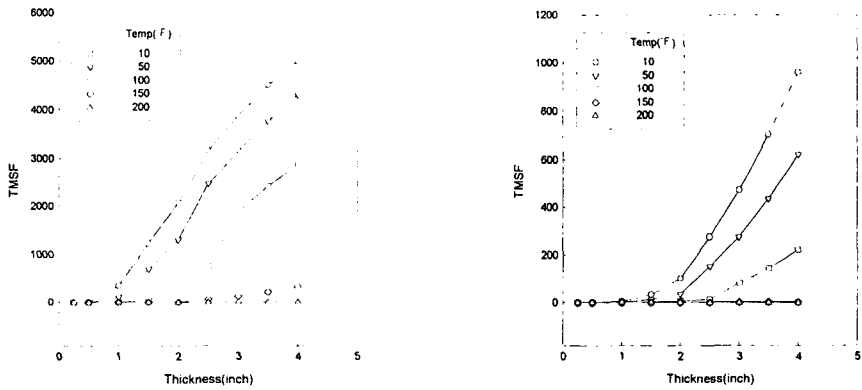
설비 라이닝은 내성을 지니게 함으로써 환경으로부터 재료를 보호하기 위해 사용하는데, TMSF에 미치는 라이닝 상태, 검사후 경과년수 및 라이닝 종류의 영향은 [그림 8]과 같다. Castable 내화물질은 라이닝 상태에 따라 약 10배 이상의 차이를 나타내며, 검사후 경과년수가 약 10년 이후에서 급격히 증가하였다. 그러나 다른 라이닝에서는

TMSF에 미치는 검사후 경과년수와 라이닝 상태의 영향이 매우 적었다.



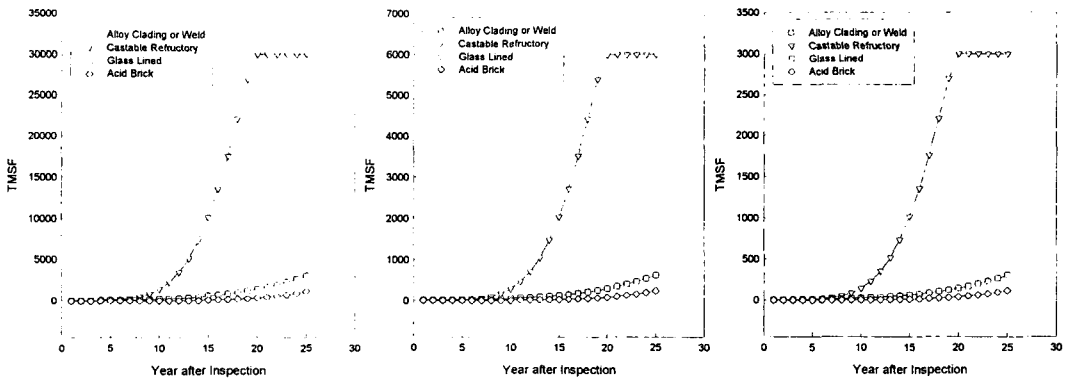
(a) 진동 0~2주기 (b) 진동 3~13주기 (c) 진동 14~52주기

[그림 6] 기계적피로모듈에서 진동주기 영향



(a) 열처리 전 (b) 열처리 후

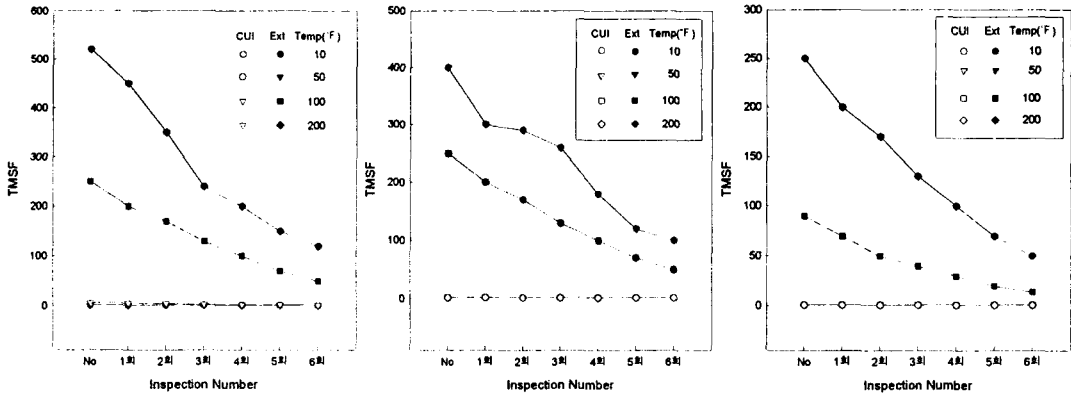
[그림 7] 취성파괴모듈의 낮은 온도/낮은 인성파괴에 대한 열처리 영향



(a) 좋지 않음 (b) 평균 (c) 좋음

[그림 8] 설비라이닝모듈에서 라이닝 조건의 영향

외부손상의 결과로 나타나는 두께감소에서 TMSF에 미치는 검사횟수, 운전온도, 보온여부, 그리고 조정자의 영향은 [그림 9]와 같다. 설비보온이 없는 탄소강의 경우(Ext)는 검사횟수가 증가함에 따라 신뢰도 증가로 TMSF가 감소하였으나, 보온 밀 부식(CUI)에서는 거의 0의 값을 나타내어 부식이 일어나지 않았다. 또한 TMSF는 바다/냉각탑 표동영역>온도>메마름/건조의 순서를 나타내었으며, 온도가 11~60°F와 120~200°F 범위에서 민감하여 다른 온도에서 보다 큰 값을 나타내었다.



(a) 바다/냉각탑 표동영역 (b) 온도 (c) 메마름/건조  
[그림 9] 탄소강에 대한 외부손상모듈의 조종자 영향

#### 4. 결론

API 581에 의한 위험기반검사에서의 손상메카니즘에 따른 사고발생 가능성을 분석하였다. 그 결과, 기술종속계수는 두께감소모듈의 경우 염소농도가 증가할수록 증가하였고, 용력부식균열에서는 NaOH 농도와 운전온도에 민감하였다. 그리고 고온수소침식은 약 300 psia, 5% 이상의 수소농도에서, 기계적피로모듈에서는 왕복기계에 의한 진동이 심각한 경우에, 취성파괴모듈에서는 낮은 온도와 열처리 전에서, 설비 라이닝모듈에서는 Castable 내화물질이 검사후 약 10년 이상에서, 그리고 외부손상모듈에서는 비 보온의 바다/냉각탑 표동영역에서 큰 TMSF 값을 나타내었다.

#### 참고문헌

1. API 580, "Risk-Based Inspection", American Petroleum Institute, New York(2001).
2. API 581, "Risk-Based Inspection - Basic Resource Document", American Petroleum Institute, New York(2000).
3. CRTD/ASME, "Risk-Based Inspection - Development of Guidelines", American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York(1991).
4. CCPS/AIChE, "Consequence Analysis of Chemical Release", American Institute of Chemical Engineers, New York(1999).