

API-581 절차에 의한 정량적 위험기반검사에서
부식성 균열에 의한 응력부식의 사고발생 가능성 해석
- Analysis of Likelihood of Failure for the Stress
Corrosion Cracking by Caustic Cracking through
the Quantitative Risk Based-Inspection using
API-581 BRD -

이 헌 창 *

Lee Hern Chang

최 성 규 **

Choi Sung Kyu

조 지 훈 ***

Cho Ji Hoon

함 병 호 ****

Ham Byung Ho

김 태 옥 *****

Kim Tae Ok

Abstract

The likelihood of failure for the stress corrosion cracking (SCC) of caustic cracking, which affect to a risk of facilities, was analyzed through the risk based-inspection using API-581 BRD. We found that SCC of the caustic cracking was occurred above 5 % NaOH concentration, and the technical module subfactor (TMSF) was maximized for above 50 % concentration. The heat traced and monitoring were not sensitive to the TMSF with NaOH concentration and

* 한국안전 E&C 대표, 명지대학교 산업기술연구소 책임연구원

** 명지대학교 대학원 화학공학과 석사과정

*** 한국산업안전공단 교육원 교수

**** 노동부 산업안전과 사무관

***** 명지대학교 공과대학 화학공학과 교수

2007년 1월 접수; 2007년 2월 수정본 접수; 2007년 2월 게재확정

temperature. But the steam out was more or less affect minimum value of the TMSF. Also, the inspection number, the inspection effectiveness, and the year since inspection were very sensitive to the TMSF with NaOH concentration and temperature. Therefore, the plan of next inspection will be established with compositively considering those at once.

Keywords : Risk Based-Inspection, API-581, Stress Corrosion Cracking, Caustic Cracking, Technical Module Subfactor

1. 서론

국내의 경우 1960년대부터 1980년대에 걸쳐 많은 산업시설이 건설되었으나 이들 설비들은 시간이 지남에 따라 점점 낡아지고 있다. 또한 운전 및 안전 기술과 관리시스템이 많이 발전되었음에도 불구하고, 최근 검사에 의해 사고를 예방지할 수 있는 유일한 사고원인 중의 하나인 기계적 고장이 약 42% 이상을 차지하고 있는 것으로 분석되었다[1]. 또한 기계적 결함이 일어나기 전에 악화를 감지하기 위한 검사 규정 및 제도가 시행되고 있고, 주기적인 검사를 요구하는 검사규정의 채택과 검사기술의 지속적인 발전에도 불구하고, 여전히 기계적 결함은 사고를 증가시키는 주요 원인으로 남아 있다. 이를 해결하기 위해 설비의 결함을 찾아내고, 검사 주기 및 방법을 제시하기 위해 최근에 도입된 기법이 위험기반검사(risk based-inspection, RBI)[2] 기법이다.

RBI는 미국기계학회에서 비행기의 제트엔진과 원자력의 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 처음 시도되었으며[3,4], 이 개념을 석유화학공업 분야로 개선하여 발전시켰을 뿐만 아니라 가장 활발하게 연구하고 있는 곳이 미국석유협회(American Petroleum Institute, API)[2,5]이다. API는 21개 업체와 공동으로 컨소시엄을 구성하여 5년 과제로 많은 연구비를 들여 석유화학공업의 설비 안전도 점검에 맞는 이론 개발과 윈도우 기반 프로그램을 개발·활용하고 있으며, 최근 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 급속히 발전하여 보급되고 있다. 또한 국내의 경우 RBI 프로그램 개발[6]을 중심으로 RBI 적용이 도입단계에 있으나 알고리즘에 대한 정확한 분석은 일부 손상메커니즘(damage mechanism)에 대해서만 수행된 바 있다[7,8]. 따라서 설비의 위험도에 영향을 주는 사고결과 크기와 사고발생 가능성의 분석이 선행되어야 할 필요성이 있는데, 이때 사고발생 가능성의 크기는 8가지 손상메커니즘, 즉 두께감소, 응력부식균열, 고온 수소침식, 노관침식, 기계적 피로, 취성과괴, 설비 라이닝 및 외부손상에 의해 크게 영향을 받는다. 특히, 응력부식은 유체에 의해 민감도가 큰 경우에 대하여 균열을 발생하여 누출을 초래할 수 있다. 응력부식은 사용하는 유체의 종류에 따라 9가지, 즉 부식성 균열, 아민 균열, 황화물 응력균열, 수소 유기균열, 탄산염 균열, 다중티온산 균열, 염화물 응력부식 균열, 불화수소산 수소응력균열 및 수소 유기균열로 구분된다. 특히, 부식성 균열은 1년 이상 지속적인 누출이 있어야 발생되며, 부식성 유체의 농도나 급속 온도의 증가로 인해 균열속도가 증가된다. 본 연구에서는 API에서 제시된 위험기반검사 절차인 API-581[5]에 의해 부식성 균열의 응력부식으로 인한 사고발생 가능성을 해석하였다.

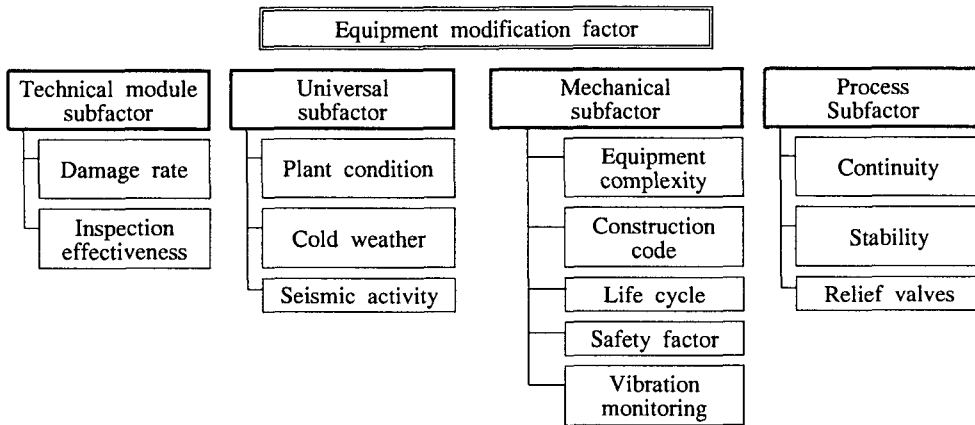
2. 이 론

위험도(risk)는 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF)과 사고결과 크기(consequence of failure, COF)의 곱에 의해 결정되며, 이때 사고발생 가능성은 일반 고장발생 확률(generic frequencies)에 설비변경계수(equipment modification factor), FE 그리고 관리 시스템평가계수(management system evaluation factor), FM을 곱하여 식 (1)과 같이 변형된 고장발생 확률로 나타낸다[5].

$$(Frequency)_{adjusted} = (Frequency)_{generic} \times FE \times FM \quad (1)$$

여기서 FE는 단위공정들과 단위공정 내 설비 구성요소들 간의 차이를 반영하는 것으로, 설비의 해당부분에만 적용되기 때문에 각 설비와 그 설비가 운전되는 환경에 따라 영향을 받는다. 즉, <그림 1>에서와 같이 설비변경계수에 대한 각각의 종속계수, 즉 기술모듈종속계수(technical module subfactor, TMSF), 보편적 종속계수, 기계적 종속계수 및 공정 종속계수가 장치의 고장발생 가능성에 영향을 미친다.

이 중에서 기술모듈종속계수는 특정 메커니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 방법으로, 정상 및 비정상 운전조건 하에서 손상메커니즘의 선별, 특정 환경 하에서 부식률, 검사프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 확률에 적용할 수 있는 변경계수 산출 등에 사용되는 중요한 인자이다.

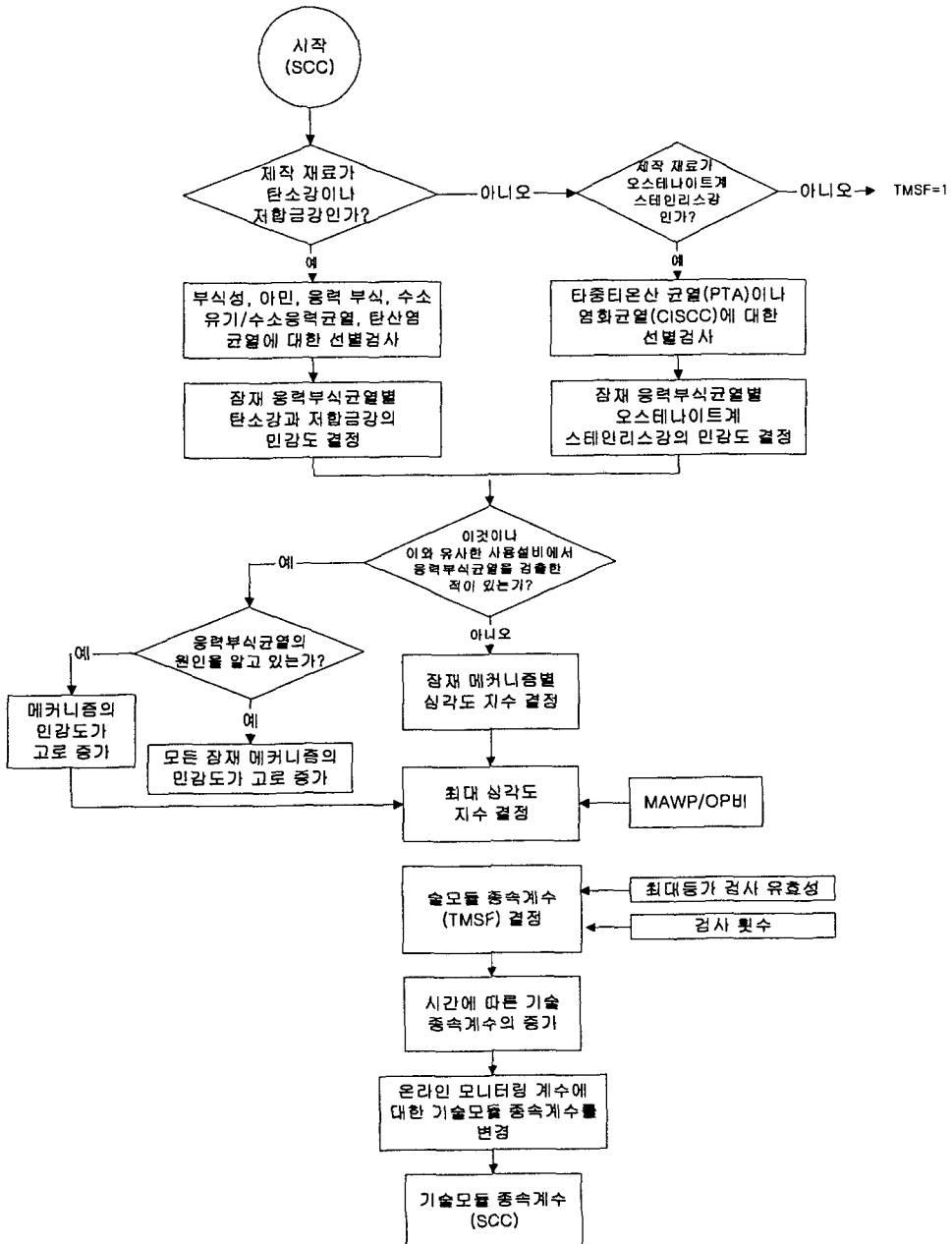


<그림 1> 설비변경계수의 구성.

따라서 기술모듈에서는 사용 중인 설비에 대해 발생 가능한 손상메커니즘을 정의하고, TMSF를 이용하여 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 특히, 응력부식은 설비에서 미세한 균열을 일으켜 유체의 누출을 발생시키고, 온도 및 농도에 민감하여 설비의 사고발생 가능성을 증가시키는 원인으로 작용하고 있다[5].

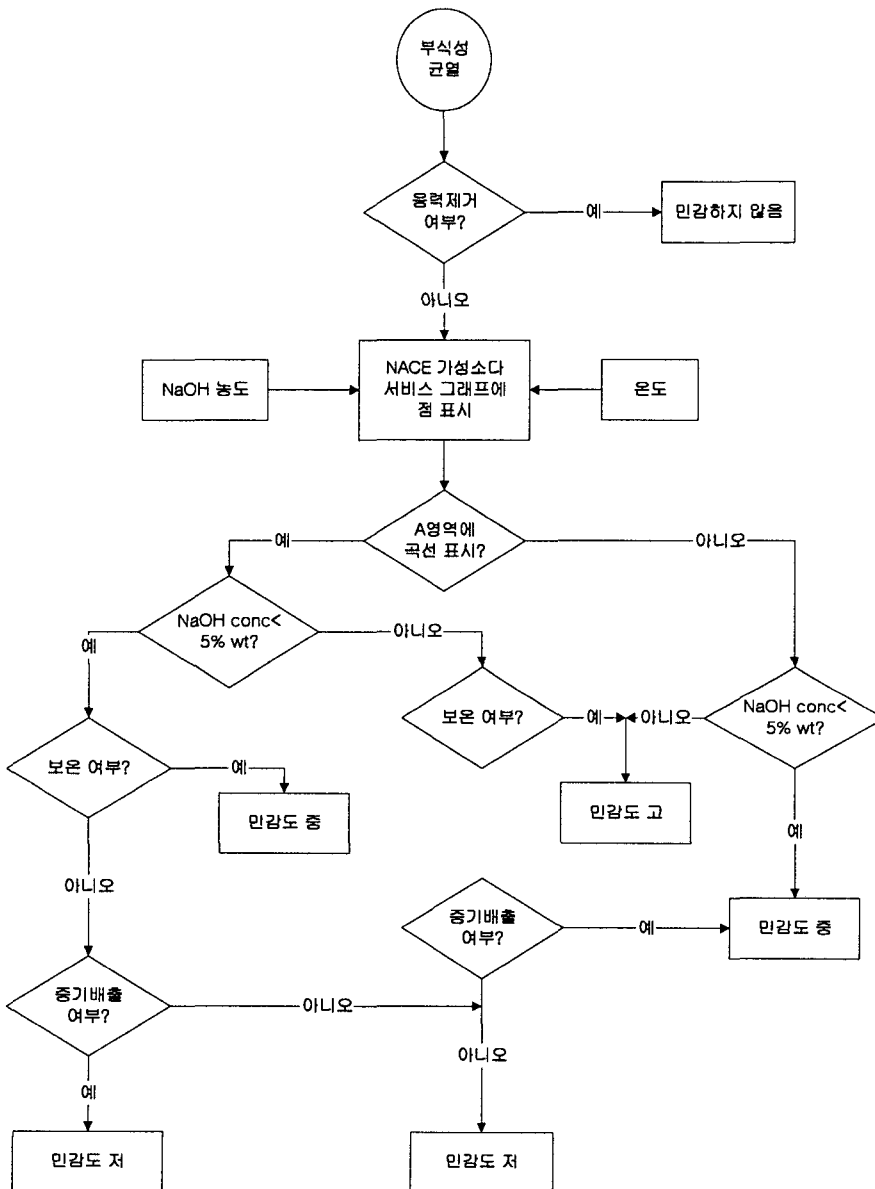
응력부식 중 부식성 균열은 고온에서 수산화나트륨(NaOH)이 존재할 경우 부식과 인장응력(tensile stress)의 복합작용에 의해 금속균열이 발생할 수 있으며, 주로 입계(intergranular)에서 발생하거나 탄소강 내부에서 미세한 망상구조(network)의 균열로

발생한다. 또한 페라이트계 저합금강도 비슷한 균열 민감도를 갖는다. 이러한 부식성 균열은 강제 재질의 민감도를 결정하는 주요 매개변수인 부식성 물질의 농도, 금속 온도 및 인장응력의 정도에 의해 결정된다. 그리고 부식성 균열로 인한 고장은 운전시작 후 며칠 이내에 발생하는 가하면, 대개 1년 이상의 지속적인 노출이 있어야 발생하기도 한다.



<그림 2> 응력부식에 대한 기술모듈종속계수의 산출 알고리즘.

부식성 균열의 경우 API-581 절차에 의해 작성한 TMSF를 산출하는 순서는 <그림 2>와 같이 사용 중인 재질의 종류를 분석한 후 재질과 사용유체에 대한 민감도를 결정하고, 민감도에 의해 세부 손상메커니즘별로 심각도를 산출한다. 그리고 검사 유효성 등급과 검사횟수 등을 반영하여 최종 기술모듈중속계수를 산출한다. 이때, 부식성 유체인 수산화나트륨에 의한 부식성 균열에서 민감도 산출절차는 <그림 3>과 같이 농도, 후열처리(PWHT), 보온 여부, 증기배출 여부 등을 판단하여 민감도를 결정한다.



<그림 3> 부식성 균열에서 민감도 산출 알고리즘.

3. 결과 및 고찰

부식성 균열에 영향을 주는 주요 매개변수는 <표 1>과 같이 부식성 온도, 금속온도, 인장응력 등이 있으며, 주로 1년 이상의 지속적인 노출이 있어야 발생한다. 또한 강재는 약 115°F 이하의 금속온도에서 부식성 균열이 발생되지 않으며, 115~180°F 사이에서 균열의 민감도는 부식성 농도의 함수이고, 180°F 이상에서는 약 5 wt% 이상의 모든 농도에서 균열이 발생할 가능성이 매우 높다. 비록 5 wt% 이하 농도의 부식성 용액에서는 균열 민감도가 현저히 낮아진다 하더라도 고온에서는 균열 민감도를 증가시킬 수 있을 정도의 높은 농도가 국부적으로 발생할 수 있다[9-11]. 이때, API-581[5]에서 제시한 검사방법에 따른 검사 유효성(inspection effectiveness) 구분은 <표 2>와 같다.

<표 1> 부식성 응력부식균열에서 기술모듈종속계수 산출을 위한 매개변수 설정

No	온도 (°F)	NaOH 농도 (wt%)	보온 유무	증기배출 유무	검사 횟수	검사 유효성	검사후 경과년수	모니터링
1	115	5	Yes	Yes	1	매우 효과적	1	Y
2	120	10	No	No	2	대체로 효과적	2	N
3	140	20			3	효과적	3	
4	160	30			4	비효과적	4	
5	180	40			5		5	
6		50						

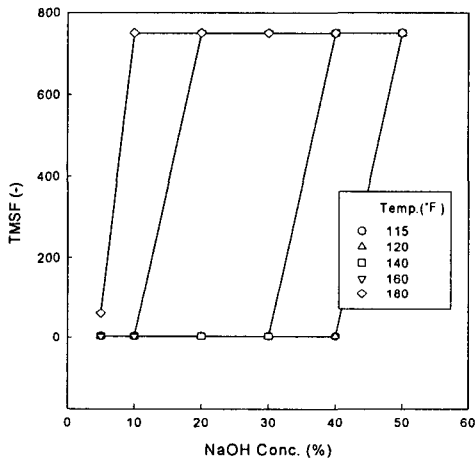
※ Shaded areas represent standard conditions.

<표 2> 부식성 응력부식균열에서 검사방법에 따른 검사 유효성 구분

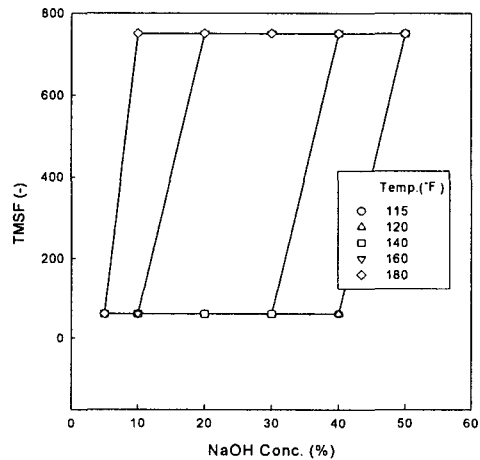
검사 유효성	개방검사	비개방 검사
매우 효과적	25~100%의 용접/냉각부위에 대한 습식 형광자분(wet fluorescent magnetic particle) 또는 건식침투시험	25~100%의 용접/냉각부위에 대한 전단 파초음파시험(shear wave ultrasonic testing) 또는 50~100%의 용접/냉각부위에 대한 방사선투과시험
대체로 효과적	10~24%의 용접/냉각굴곡부위에 대한 습식형광자분 또는 건식침투시험	10~24%의 용접/냉각부위에 대한 전단 파초음파시험 또는 25~49%의 용접/냉각 band 부위에 대한 방사선 투과시험
효과적	10% 미만의 용접/냉각부위에 대한 습식 형광자분 또는 건식침투시험	용접/냉각부위에 대한 10% 이하 전단파 초음파시험 또는 25% 이하 방사선투과 시험
약간 효과적	육안검사	육안누출검사

따라서 부식성 용액부식균열에 대하여 <표 1>의 매개변수를 변화시키면서 <그림 2> 및 <그림 3>의 절차에 따라 기술모듈종속계수를 산출하고, 매개변수의 영향을 해석하였다.

<그림 4>는 표준상태에서 보온(heat traced) 유무에 따라 수산화나트륨 농도와 온도 변화에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 TMSF의 최저값이 보온이 되지 않은 경우는 거의 0을, 그리고 보온이 된 경우에는 약 50을 나타내었으나, TMSF의 최대값에는 보온 유무가 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그리고 온도증가에 따라 TMSF는 낮은 수산화나트륨 농도에서도 민감하게 증가하였다.



(a) Heat traced = no



(b) Heat traced = yes

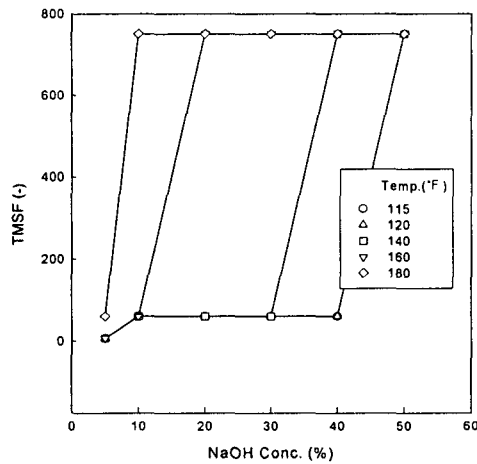
<그림 4> 표준상태에서 보온 유무에 따른 기술모듈종속계수에 미치는 NaOH 농도 및 온도의 영향.

또한 수산화나트륨 농도가 5% 이하에서는 부식성이 거의 나타나지 않았으나, 50% 이상의 농도에서는 민감도가 높아 TMSF가 최대값을 나타내었다. 따라서 수산화나트륨과 같은 부식성 유체를 사용하는 경우에는 민감도를 고려하여 재질을 선택하는 것이 바람직하며, 보온 유무는 공정의 운전조건을 유지하기 위해 반드시 필요하지만 설비의 TMSF에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

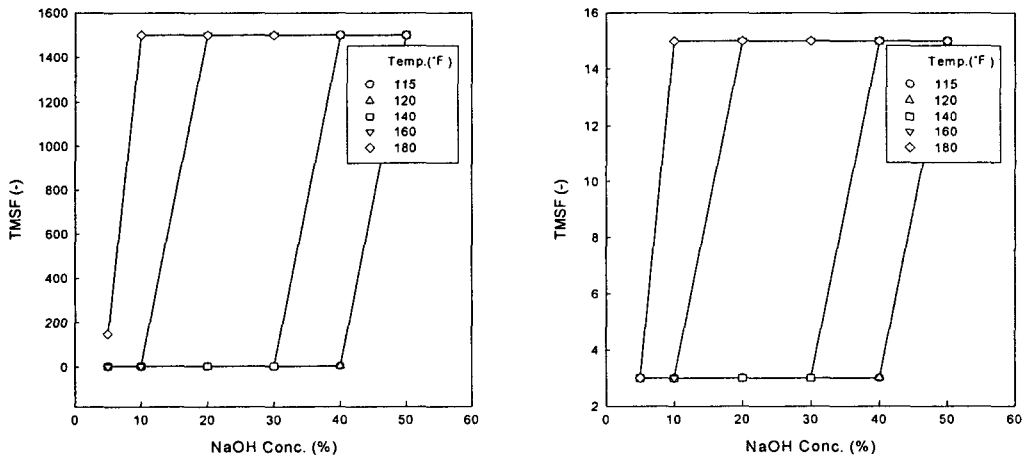
<그림 5>는 표준상태에서 증기배출이 있는 경우 수산화나트륨 농도와 온도 변화에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 것이다. 증기배출은 설비 내에서 유체가 일정부분에 축적되어 고형분을 형성할 경우 뜨거운 증기를 붙여 넣어 고형분을 녹이기 위해 사용되며, 일반적인 공정에서는 잘 사용되지 않고 있다. 이와 같이 증기배출이 있는 공정에서는 증기배출이 없는 경우(<그림 4a> 참조)와 유사한 경향을 보였으나, TMSF의 최저값이 다소 증가하였다. 그러나 용액부식의 경우 TMSF 값이 적은 경우에도 설비의 균열이 발생할 수 있기 때문에 특별한 조치와 관리가 필요하다.

<그림 6>은 검사횟수에 따른 NaOH 농도와 온도 변화에 의한 TMSF 변화를 나타

낸 것으로, 검사횟수가 1회인 경우 TMSF의 최고값은 약 1500을 나타내었으나, 검사 횟수가 5회인 경우에는 최고값이 약 15를 나타내어 검사가 1회에서 5회로 증가하면 TMSF는 약 1/10로 감소하였다. <그림 4a,b>에서 표준상태에서 검사횟수가 2회일 때 TMSF의 최대값은 약 750을 나타낸 것과 비교하면 검사횟수의 증가에 따라 TMSF가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 검사횟수가 증가함에 따라 설비의 신뢰도가 증가되기 때문에 부식성 응력균열의 발생이 예상되는 설비에서는 검사횟수가 고장발생 가능성을 낮추는 가장 민감한 변수임을 알 수 있다. 따라서 부식성 유체를 오랫동안 사용하는 설비는 적절한 검사주기를 부여함으로써 설비의 신뢰도와 안전성을 유지시킬 수 있으며, 이때 검사비용도 동시에 고려하여 검사를 수행할 필요가 있다.



<그림 5> 증기배출이 있는 경우 기술모듈중속계수에 미치는 NaOH 농도 및 온도의 영향.



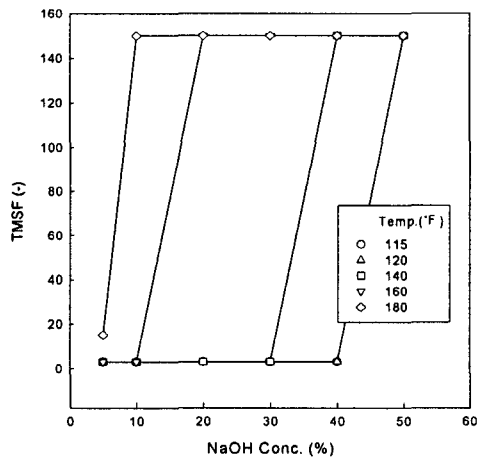
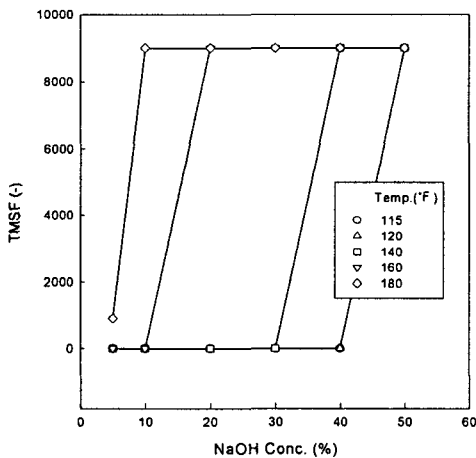
(a) Inspection no. = 1

(b) Inspection no. = 5

<그림 6> 검사횟수 변화에 따른 기술모듈중속계수에 미치는 NaOH 농도 및 온도의 영향.

검사 유효성에 따른 TMSF의 변화는 <그림 7>에서와 같이 검사 유효성이 매우 효과적인 경우(highly)에 TMSF의 최고값은 약 9000을 나타내었으나, 비효과적인 경우(poorly)에는 약 150을 나타내어 약 1/6로 감소하였다. 또한 <그림 4a,b>에서 표준상태의 검사 유효성이 효과적(fairly)인 경우에는 최대값이 750이었다.

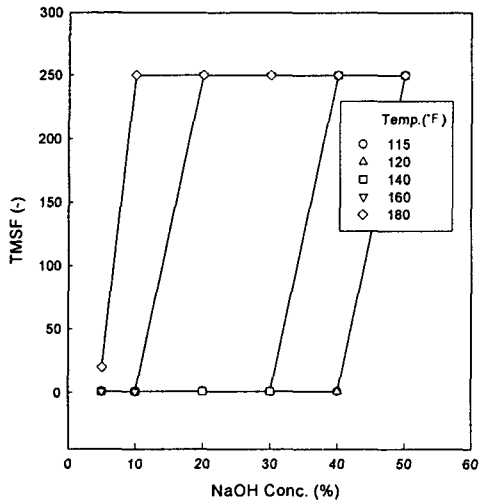
이것은 검사 유효성 등급이 설비상태를 가장 잘 나타내는 변수로, 설비상태가 좋지 않아 신뢰도가 낮은 경우에는 매우 효과적인 방법을 사용하고, 반대로 설비상태가 좋아서 신뢰도가 높은 경우에는 약간 효과적인 방법을 사용하기 때문이다. 일반적으로 검사 유효성 등급은 매우 효과적, 대체로 효과적(usually), 효과적, 비효과적으로 구분하며, 각 등급에 따라 25-100%, 10-24%, 10%이하, 육안검사와 같은 방법으로 개방검사를 실시하도록 하고 있다.



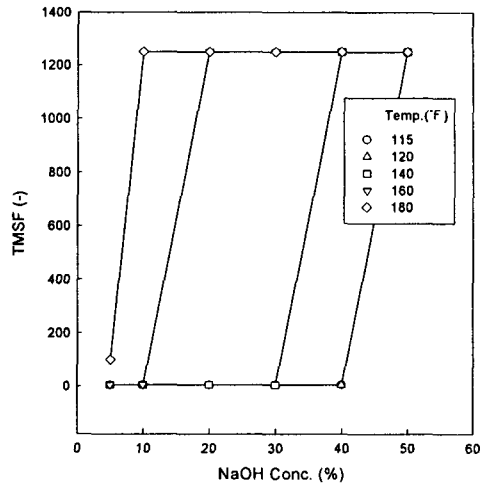
(a) Inspection effectiveness = highly (b) Inspection effectiveness = poorly
 <그림 7> 검사 유효성 변화에 따른 기술모듈중속계수에 미치는 NaOH 농도 및 온도의 영향.

따라서 설비의 고장발생 가능성을 낮추기 위해서는 검사 유효성 등급을 높게 해줌으로 향후 검사에서 엄격한 검사를 수행하고, 이를 반영함으로써 설비의 신뢰도가 높아져 고장발생 가능성은 낮아질 것이다. 그리고 검사를 수행할 경우 <그림 6>에서 고려된 검사횟수와 함께 검사 유효성 등급을 고려하여 검사주기와 검사방법을 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

검사 후 경과연수 변화에 따라 TMSF는 <그림 8>에서와 같이 검사 후 1년이 경과 되었을 때 최대 약 250을 나타내었으나, 검사가 5년이 경과된 경우에는 약 1250으로 약 5배가 증가하였다. 또한 <그림 4a,b>에서 검사 후 경과연수가 3년인 경우에는 TMSF의 최대값이 약 750을 나타내어 검사 후 경과연수가 증가함에 따라 TMSF는 급격하게 증가됨을 알 수 있다. 따라서 향후 검사는 검사 후 경과연수에 따른 TMSF의 증가를 고려하여 설비의 신뢰도가 너무 낮기 전에 검사를 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다.



(a) Year since inspection = 1



(b) Year since inspection = 5

<그림 8> 검사 후 경과년수에 따른 기술모듈종속계수에 미치는 NaOH 농도 및 온도의 영향.

또한 모니터링이 있는 경우는 TMSF가 최대 약 750을 나타내어 모니터링이 없는 경우(<그림 4a> 참조)와 크게 차이가 없음을 알 수 있었다. 즉, 모니터링(monitering)은 공정조건을 관리하기 위해 필요하지만, 부식성 균열에서 설비의 신뢰도를 높이기 위해서는 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

4. 결론

API-581 절차에 의해 부식성 균열의 응력부식에 의한 사고발생 가능성을 해석하였다. 그 결과, 수산화나트륨의 농도가 5% 이상인 경우에는 심각한 사고가 발생할 수 있으며, 특히 50% 이상의 농도에서는 기술모듈종속계수(TMSF)가 최대값을 나타내어 민감도를 고려하여 재질을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

그리고 보온 및 모니터링은 운전조건을 위해 필요하지만 TMSF에는 민감하지 않았으나 증기배출이 있는 경우에는 TMSF의 최저값을 다소 증가시키는 것으로 나타났다.

또한 TMSF는 검사횟수가 증가할수록 급격하게 감소하고, 검사 후 경과년수가 증가함에 따라 급격하게 증가하였으며, 검사 유효성 등급이 높을수록 TMSF는 적은 값을 나타내었다.

따라서 향후 검사를 수행할 경우에는 검사횟수, 검사 유효성 등급 및 검사 후 경과년수를 동시에 고려하여 검사계획을 수립하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

5. 참 고 문 헌

- [1] Marsh-McClenn Lab., "Http://www.mmc.com/knowlegdycenter/index.php", Marsh-McClenn Lab., 2006
- [2] API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580", American Petroleum Institute(API), 2001
- [3] ASME, "Risk-Based Testing : Development of Guidelines", Center for Research and Technology Development(CRTD), 40(1), American Society of Mechanical Engineers, 2000
- [4] ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, 20(1), American Society of Mechanical Engineers, 1994
- [5] API, "RBI Basic Resource Document : API-581", American Petroleum Institute, 2000
- [6] KOSHA, "Development of K-RBI Program II", Korea Occupational Safety & Health Agency, Technical Manual, 2005
- [7] 이현창, 이중희, 김태욱, "API-581에 의한 위험기반검사에서 고온 황화물 및 나프텐산 부식의 두께감소에 의한 사고발생 가능성 해석", 안전경영과학회지, 7(4), 101-110, 2005
- [8] 이현창, 김환주, 장서일, 김태욱, "API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 탄소강 및 저합금강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석", 안전경영과학회지, 6(4), 239-248, 2004
- [9] Gegner, P., "Corrosion Resistance of Materials in Alkalies and Hypochlorites", Process Industries Corrosion, National Association of Corrosion Engineers International, Houston, TX, pp.296-305, 1975
- [10] NACE, "Corrosion Data Survey-Metals Section", National Association of Corrosion Engineers International, 5th ed., Houston, TX, pp.274, 1974
- [11] Nelson, J. K., "Materials of Construction for Alkalies and Hypochlorites", Process Industries Corrosion-The Theory and Practice, National Association of Corrosion Engineers International, Houston, TX, 197-310, 1986

저 자 소 개

이 현 창 : 한국안전 E&C 대표 및 명지대학교 산업기술연구소 책임연구원(공학박사),
관심분야는 위험기반검사 및 정량적 위험성 평가

최 성 규 : 명지대학교 대학원 화학공학과(석사과정), 관심분야는 정량적 위험성 평가

조 지 훈 : 한국산업안전공단 교육원 교수(공학박사), 관심분야는 공정 위험성 평가

함 병 호 : 노동부 산업안전과 사무관(공학박사), 관심분야는 안전관리제도 및 정량적
위험성 평가

김 태 욱 : 명지대학교 공과대학 화학공학과 교수(공학박사), 명지대학교 사회교육원
장, 보육교사교육원장, 시스템안전센터 소장, 관심분야는 가스안전, 공정
위험성 평가 및 위험기반검사

저 자 주 소

이 현 창 : 경기도 용인시 처인구 김량장동 321-13 2층

최 성 규 : 경기도 용인시 처인구 남동 615-2 성현빌딩 503호

조 지 훈 : 인천광역시 부평구 기능대길 25 한국산업안전공단 교육원

함 병 호 : 경기도 군포시 재궁동 한성목화 APT 123-501

김 태 욱 : 경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 공과대학 화학공학과