KIGAS Vol. 14, No. 4, August, 2010
(Journal of the Korean Institute of Gas)

API-581 절차에 의한 위험기반검사에서 염산부식의 두께감소에 의한 사고발생 가능성 해석

이헌창* · 조지훈** · 신동일 · †김태옥
명지대학교 화학공학과, *한국안전이엔씨, **한국산업안전보건공단
(2010년 5월 21일 접수, 2010년 8월 30일 수정, 2010년 8월 30일 채택)

Analysis of Likelihood of Failure for the Thinning of Hydrochloric Acid Corrosion through Risk-Based Inspection using API-581 BRD

Hern Chang Lee* · Ji Hoon Jo** · Dong Il Shin · †Tae Ok Kim
Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea
**Korea Safety Engineering & Consulting*
***Korea Occupation Safety Healthy and Agency*
(Received 21. May. 2010, Revised 30. August. 2010, Accepted 30. August. 2010)

요 약

본 연구에서는 압력설비의 위험 원인분석 방법을 제시하기 위하여 API-581 절차에 의한 위험기반검사(RBI)에서 염산부식의 두께감소로 인한 사고발생 가능성을 해석하였다. 이를 위해 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수(TMSF)를 산출하고, TMSF에 미치는 매개변수의 영향을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, TMSF는 염화이온 농도와 온도가 증가할수록 증가하였으나, 설비두께, 검사횟수 및 검사유효성이 증가할수록 감소하였으며, 모니터링이 있는 경우와 과설계계수가 1.5배 이상인 경우에는 상당히 적은 값을 나타내었다. 이때, 검사횟수, 검사유효성 등급 및 과설계계수의 크기에 따라 TMSF가 민감하게 변화하였으며, 모니터링은 TMSF의 크기만 변화시켰다.

Abstract - To propose a cause analysis method of pressurized facilities, a likelihood of failure (LOF) for the thinning module by hydrochloric acid corrosion was analyzed through the risk-based inspection (RBI) using API-581 BRD. For this investigation, the technical module subfactor (TMSF), as a main factor of the LOF, was estimated, and the effects of parameters on the TMSF were analyzed quantitatively. As a result, we found that the TMSF increased with increasing chloride ion concentration and temperature, but it decreased with increasing thickness of the facilities, inspection number and inspection effectiveness. Also, the TMSF showed a relatively low value for the monitoring system implemented and the overdesign factor>1.5. In this condition, the TMSF changed sensitively with the inspection number, the inspection effectiveness and the overdesign factor, and its magnitude varied with the monitoring system.

Key words : risk-based inspection (RBI), likelihood of failure (LOF), API-581, thinning, hydrochloric acid (HCl), technical module subfactor (TMSF)

†주저자:kimto@mju.ac.kr

Ⅰ. 서론

최근 석유, 정유, 가스 산업 등에서는 사용하고 있는 압력설비에 대해 위험도(risk)를 바탕으로 검사의 우선순위를 결정하고, 검사에 소요되는 자원을 관리하기 위한 검사기법인 위험기반검사(risk-based inspection, RBI) 기술[1,2]을 활발하게 도입 · 적용하고 있다. 특히, 국내의 경우는 한국산업안전보건공단의 KOSHA-RBI, 한국가스안전공사의 KGS-RBI와 SK의 SK-RBI 프로그램이 개발되어 사용 중에 있으며[3], 고용노동부에서도 검사주기 결정에 RBI 기술을 적용하는 내용을 2006년에 입법화 하였으나, 2012년까지 유예기간을 두고, 적용할 예정에 있다.

RBI 기술은 지금까지 미국석유협회(API)를 중심으로 한 알고리즘(API-580, 581) 개발[2,4,5], 현장적용을 위한 기준(code) 제정[6], DNV사의 ORBIT 등의 상용 프로그램 개발, 설비의 안전성 향상을 위한 RBI의 현장적용 등[7-9]에 관한 연구가 주로 수행되고 있다. 특히, RBI는 현장적용을 통하여 비용 효과적으로 검사 주기 및 방법 등을 결정할 수 있을 뿐만 아니라 위험요인에 대한 정확한 분석을 통하여 위험도를 감소시키는 방안을 제시할 수 있기 때문에 설비의 위험 원인분석이 매우 중요하다. 따라서 위험의 원인분석을 위해서는 정확한 알고리즘 분석과 위험도에 미치는 매개변수의 영향 분석이 필요하지만 이에 관한 연구는 아직도 매우 미흡한 실정이다. 이때, 위험도에 영향을 미치는 사고발생 가능성은 크게 8가지 손상메커니즘(damage mechanism), 즉 두께감소(thinning), 응력부식균열(stress cracking corrosion), 고온 수소침식(high temperature hydrogen attack), 노관 침식(furnace tube creep), 기계적 피로(fatigue), 취성파괴(Brittle fracture), 설비 라이닝(equipment lining) 및 외부손상(external damage)에 의해 크게 영향을 받는다[4,5].

본 연구에서는 RBI에서 압력설비의 위험 원인분석 방법을 제시하기 위한 연구의 일환으로, 염화이온(chloride ion)이 함유된 물질을 사용하는 공정에서 API-581 절차[4]에 의해 염산부식의 두께감소에 의한 사고발생 가능성을 해석하였다. 이를 위해 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수(Technical module subfactor, TMSF)를 산출하고, TMSF에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다.

Ⅱ. 이 론

정량적 RBI에서 누출 시나리오(s)별 위험도는 식(1)과 같이 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF)과 사고결과 크기(consequence of failure, COF)의 행렬(matrix)로 나타낸다[4,10].

$$(Risk)_s = (COF)_s \times (LOF)_s \quad (1)$$

여기서 COF는 피해면적 또는 피해 손실액으로 나타내고, LOF는 설비의 파손확률이나 파손횟수로 나타내며, 특히 일반 고장발생 확률에 설비변경계수(equipment modification factor, F_E)와 관리시스템평가계수(management system evaluation factor, F_M)를 곱하여 식 (2)와 같이 조정된 고장발생 확률로 나타낸다.

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

여기서 F_E는 단위공정들과 단위공정 내 설비 구성요소들 간의 차이를 반영하는 것으로, 설비의 해당부분에만 적용되기 때문에 각 설비와 그 설비가 운전되는 환경에 따라 영향을 받는다. 즉, F_E의 종속계수인 기술종속계수(TMSF), 보편적 종속계수, 기계적 종속계수 및 공정 종속계수가 설비의 고장발생 가능성에 영향을 미친다. 이 중에서 TMSF는 특정 메커니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 주요 인자로, 정상 및 비정상 운전조건 하에서 손상메커니즘 선별, 특정 환경 하에서 부식률, 검사 프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 확률에 적용할 수 있는 변경계수 산출 등에 사용된다. 따라서 기술모듈에서는 사용 중인 설비에 대해 발생 가능한 손상메커니즘을 정의하고, 운전조건에서 TMSF를 산출하여 검사효율과 검사주기를 결정하거나 위험도 경감방안 수립 등에 사용한다.

8가지 손상메커니즘 중에서 모든 설비에서 발생되는 두께감소의 경우에 API-581 절차에 의해 작성한 TMSF의 산출순서는 Fig. 1과 같다. 이때, 두께감소모듈은 사용하는 유체의 종류에 따라 8가지, 즉 염산(HCl) 부식, 고온 황산/나프텐산 부식, 고온 H_2S/H_2 부식, 황산(H_2SO_4) 부식, 불화수소(HF)산 부식, 산성수 부식, 아민 부식, 그리고 고온 산화로 구분된다.

Ⅲ. 연구 내용 및 방법

염산 부식은 탄소강과 300 계열의 오스테나이트(austenite)계 스테인리스강에서 자주 발생하며[2], 염화이온(Cl) 농도와 운전온도 등에 영향을 받는다[11]. 따라서 본 연구에서는 사용재질이 탄소강인 경우에 Fig. 1의 알고리즘을 사용하여 염산

Table 1. Parameter ranges for calculation of TMSF at the HCl thinning.

No.	Temperature (°F)	Used year	Thickness (inch)	Inspection no.	Inspection effectiveness	Overdesign factor	Monitoring type
1	<100	1	1	0	Highly	1.0~1.5	None
2	100~150	2	2	1	Usually	>1.5	Corrosometer probe
3	151~200	3	3	2	Fairly		Corrosion coupon
4	>200	5	5	3	Poorly		
5		10		4			
6		20		5			

※Shaded areas represent standard conditions.

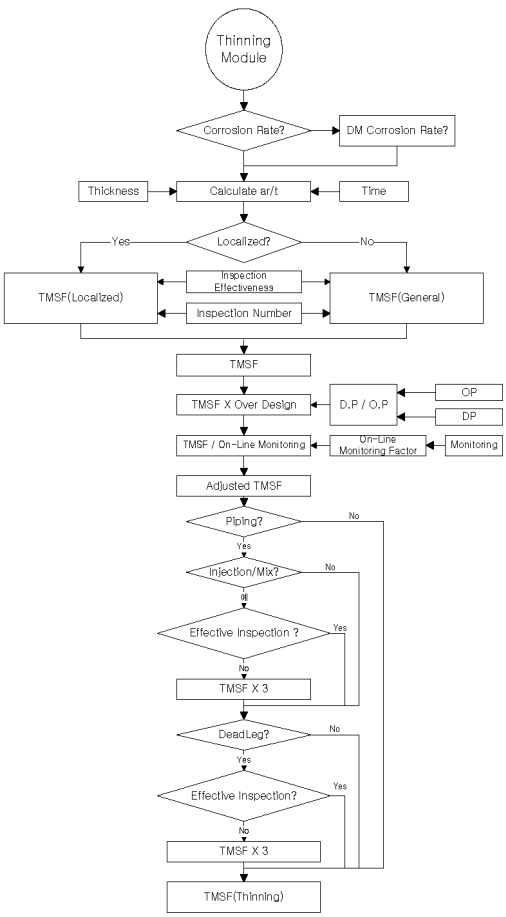


Fig. 1. Algorithm of TMSF calculation for the thinning module.

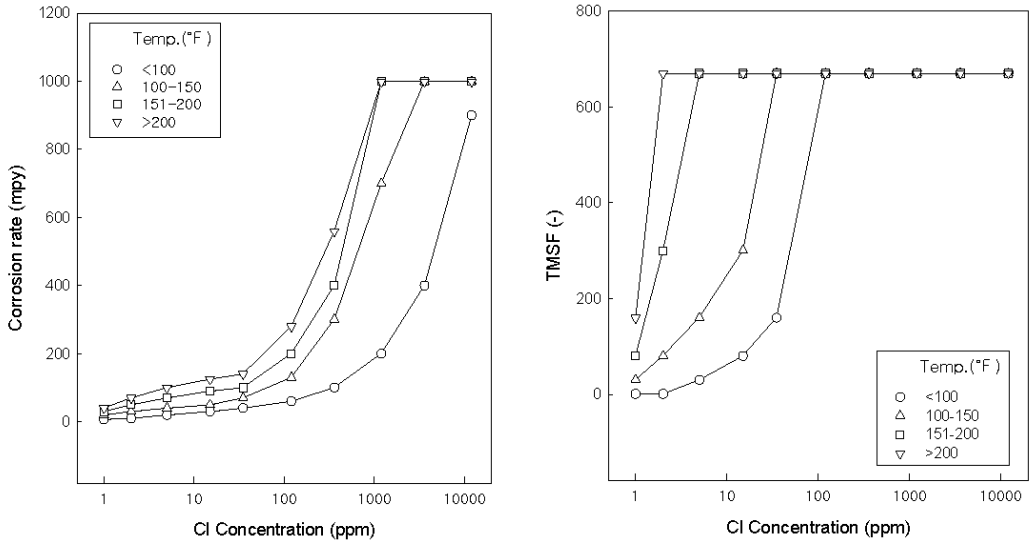
부식에 대한 TMSF를 산출하여 매개변수의 영향을 해석하였으며, 이때 매개변수의 변화범위는 Table 1과 같다.

TMSF의 산출방법은 먼저 일정한 온도와 염화이온 농도에서 API에서 제시된 부식률[4]을 이용하여 염화이온에 대한 부식률을 산출하고, 예측된 부식률과 사용년수, 설비두께, 검사횟수 및 검사효율을 고려하여 초기의 TMSF를 산출하였다. 그리고 과설계계수(overdesign factor)와 부식에 대한 모니터링을 고려하여 TMSF를 보정하였으며, 본 연구에서는 주입점(injection point)과 데드레그(deadleg)는 고려하지 않았다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

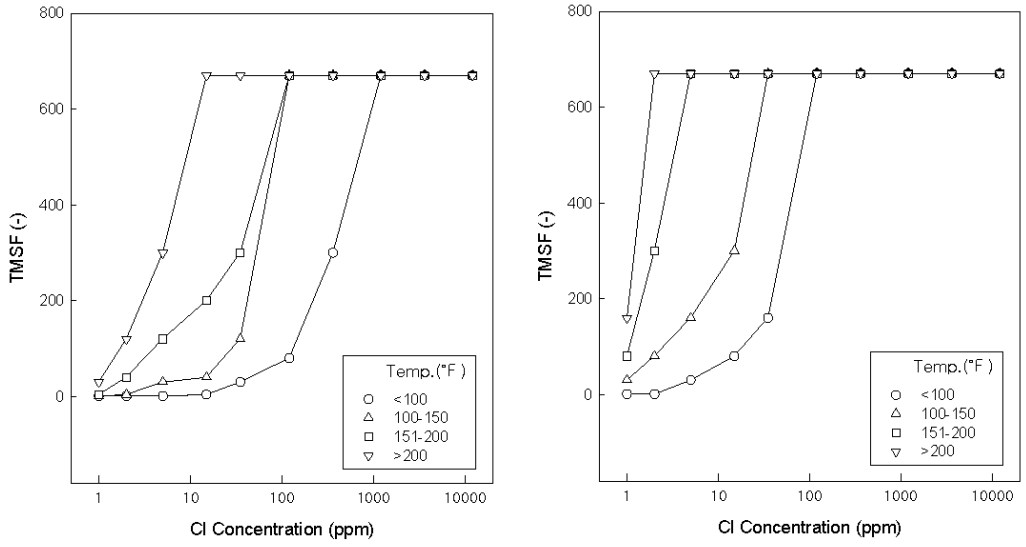
염산 부식에서 표준조건, 즉 사용년수 10년, 1인치 설비두께, 2회 검사, 효과적(fairly)인 검사 및 과설계계수가 1.0~1.5인 경우에 부식률과 TMSF의 산출결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서와 같이 부식률은 염화이온 농도가 증가할수록 약 100 ppm 미만에서는 서서히 증가하다가 그 이후의 높은 농도에서는 급격하게 증가하였다. 그리고 낮은 염화이온 농도에서는 온도가 부식률에 크게 영향을 미치지 않았으나 약 100 ppm 이상의 농도에서는 온도 증가에 따라 급격하게 증가하였다. 이와 같은 결과로, 약 200°F 이상의 온도에서는 TMSF가 염화이온 농도에 거의 무관하게 약 670의 값을 갖지만, 그 이하의 낮은 온도에서는 염화이온 농도가 증가함에 따라 TMSF도 급격히 증가하였다. 이때, LOF 등급은 TMSF 값에 따라 1등급<1≤2등급<10≤3등급<100≤4등급<1000≤5등급으로 구분한다[4].

TMSF는 Fig. 3에서와 같이 사용년수에 무관하게 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 약 100 ppm



(a) Corrosion rate (b) TMSF

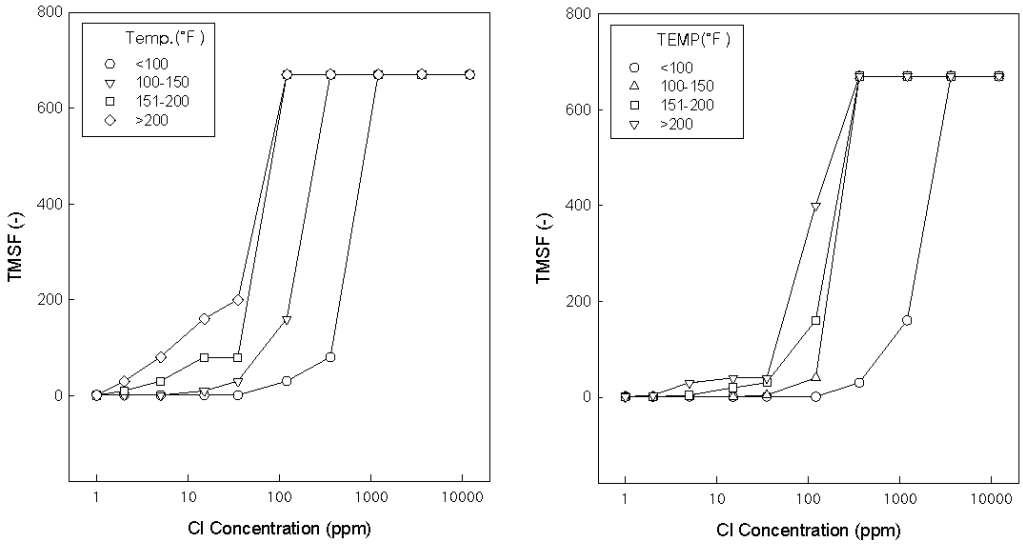
Fig. 2. Effect of Cl^- concentration and temperature on corrosion rate and TMSF at standard conditions.



(a) Used year = 5 (b) Used year = 20

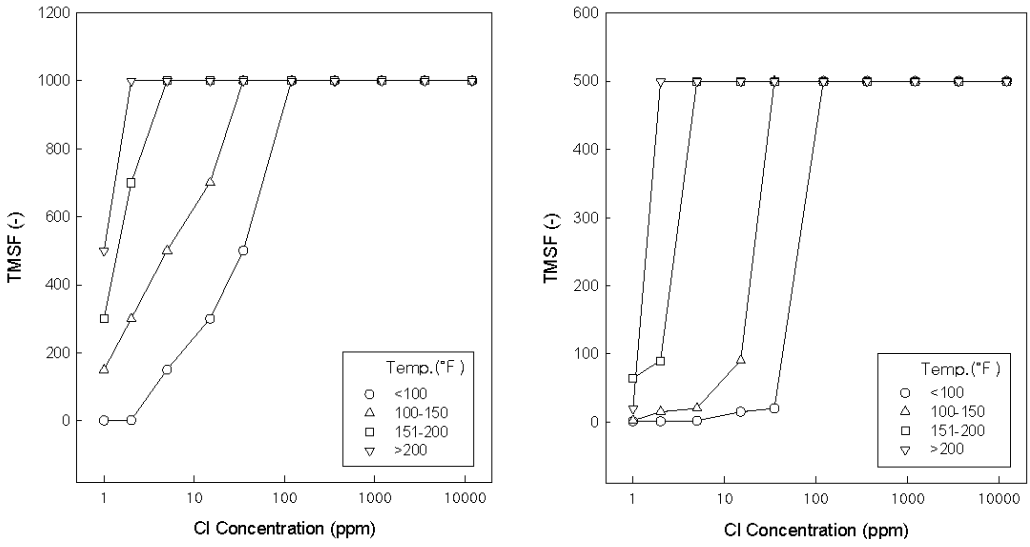
Fig. 3. Effect of Cl^- concentration and temperature on TMSF with various used years.

이하의 낮은 염화이온 농도에서는 사용년수의 증가에 따라 TMSF에 미치는 염화이온 농도와 온도의 영향이 다소 증가하였다. 또한 TMSF에 미치는 설비두께의 영향은 Fig. 4에서와 같이 설비두께가 증가할수록 TMSF의 변화경향은 비슷하였으나, 염화이온 농도가 약 100 ppm 이하에서는 TMSF가 다소



(a) Thickness = 3 inch (b) Thickness = 5 inch

Fig. 4. Effect of Cl^- concentration and temperature on TMSF with various thicknesses.

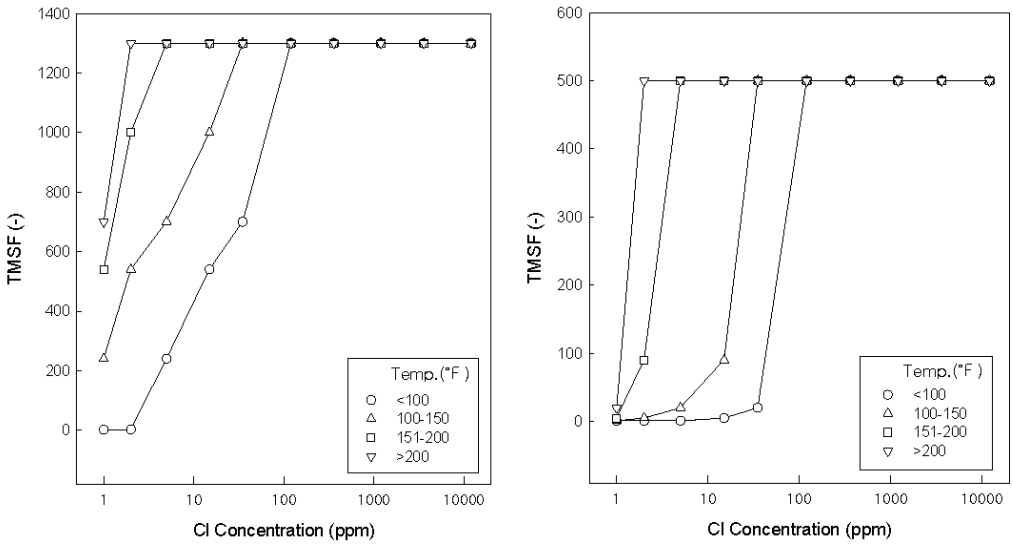


(a) Inspection no. = 1 (b) Inspection no. = 5

Fig. 5. Effect of Cl^- concentration and temperature on TMSF with various inspection numbers.

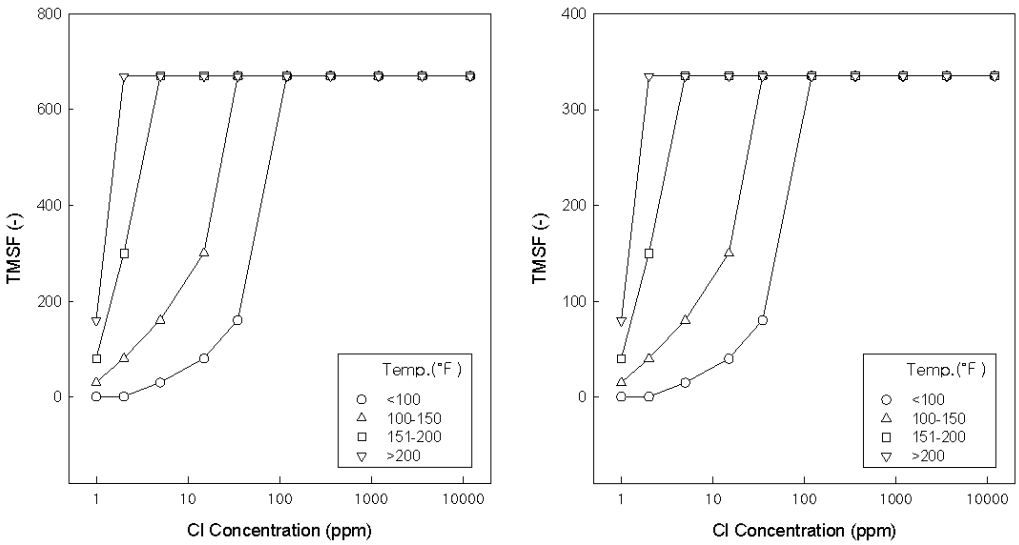
감소하여 안전도가 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 TMSF에 미치는 10년 동안 실시된 검사 횟수의 영향을 나타낸 것으로, 검사횟수가 증가함에 따라 TMSF의 최대값은 급격히 감소하여 1회는 약 1000, 2회는 약 679(Fig. 2의 (2) 참조), 그리고 5회는 약 500을 나타내었다. 또한 검사횟수가 증가함에 따라 낮은 온도범위와 약 100 ppm 이하의 염화이온 농도에서는 TMSF가 상당히 감소하였는데,



(a) Inspection effectiveness = Highly (b) Inspection effectiveness = Poorly

Fig. 6. Effect of Cl^- concentration and temperature on TMSF with various inspection effectiveness.

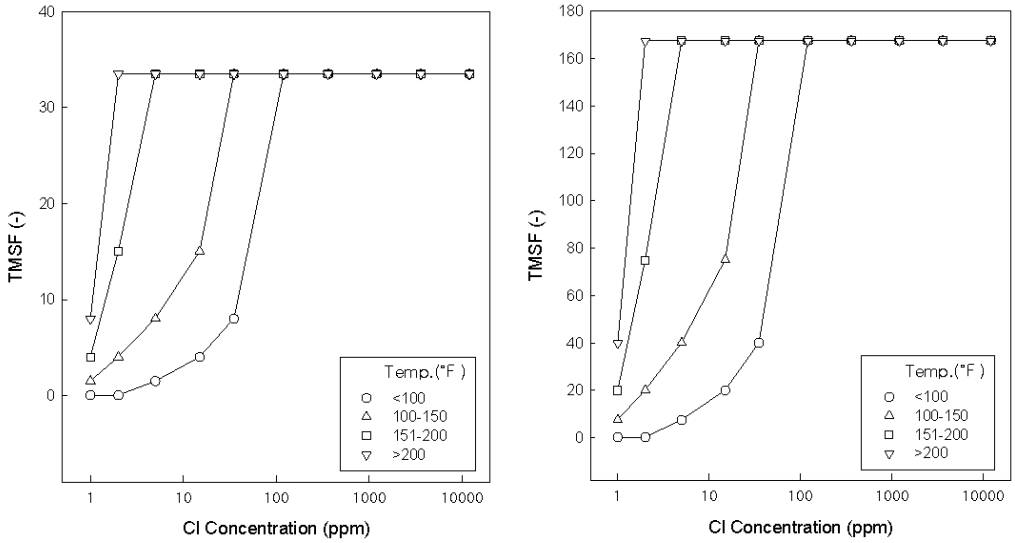


(a) Overdesign factor = 1.0～1.5 (b) Overdesign factor > 1.5

Fig. 7. Effect of Cl^- concentration and temperature on TMSF with various overdesign factors.

이것은 검사에 따른 신뢰도가 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 TMSF에 미치는 검사 유효성의 영향을 나타낸 것으로, 검사 유효성이 감소(highly>usually>fairly>poorly)할수록 TMSF는 급격하게 감소하였는데(Fig. 2의 (2) 참조), 이것은 이전검사에서 설비상태가 좋음을 반영하였기 때문에 위험도가 감소되는 것으로 판단된다. 따라서 검사 유효성은



(a) Corrosometer probes (b) Corrosion coupons

Fig. 8. Effect of Cl^- concentration on TMSF with various online monitorings.

이전검사에서 설비상태를 반영하기 때문에 설비상태가 좋지 못한 경우, 즉 신뢰성이 낮은 설비는 엄격한 검사를 수행하여 설비의 신뢰성을 높여야 함을 알 수 있다.

TMSF에 미치는 과설계계수의 영향은 Fig. 7과 같이 운전압력에 대한 설계압력의 비 즉, 과설계계수가 1.0~1.5인 경우는 TMSF의 최대값이 약 670을 나타내었으나, 1.5 이상에서는 약 1/2로 상당히 감소하였다. 이것은 설계압력을 운전압력보다 높게 설정할수록 설비의 신뢰성이 증가되기 때문에 안전도가 증가됨을 의미한다.

Fig. 8은 TMSF에 미치는 모니터링의 영향을 나타낸 것으로, 부식시편의 경우는 부식에 대한 온라인 감시로 인해 TMSF가 최대 35를 나타내었고, 부식산출 탐촉자는 최대 170을 나타내었다. 이와 같은 결과는 온라인 모니터링이 없는 경우의 최대값인 670(Fig. 2의 (2) 참조)과 비교했을 때 설비의 신뢰성이 증가되어 TMSF는 최대 약 1/4 및 1/20로 감소되었다.

Ⅴ. 결 론

위험기반검사(RBI)에서 압력설비의 위험 원인분석 방법을 제시하기 위한 연구의 일환으로, API-581 절차를 사용하여 염산부식의 두께감소로 인한 사고발생 가능성을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수(TMSF)는 염화이온의 농도와 온도가 증가할수록 증가하였으나, 설비두께, 검사횟수 및 검사유효성이 증가할수록 감소하였으며, 모니터링이 있는 경우와 과설계계수가 1.5배 이상인 경우에는 상당히 적은 값을 나타내었다. 이때, 검사횟수, 검사유효성 등급 및 과설계계수의 크기에 따라 TMSF가 민감하게 변화하였으며, 모니터링은 TMSF의 크기만 변화시켰다. 따라서 운전조건과 설비상태를 고려한 검사 유효성과 검사횟수를 결정하여 검사를 수행함으로서 설비의 사고발생 가능성을 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] CRTD/ASME, *Risk-Based Inspection : Development of Guidelines*, American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, (1991)

[2] API, *Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580*, American Petroleum Institute, New York, (2001)

[3] 한국산업안전보건공단, *현장적용을 통한 사용자 중심의 위험기반검사 발전방안 수립*, 연구보고서, (2008)

[4] API, *Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API-581*, American Petroleum Institute, New York, (2000)

[5] API, *Risk-Based Inspection technology : API Recommended Practice 581*, American Petroleum Institute, New York, (2008)

[6] ASME, *Risk-Based Testing : Development of Guidelines*, CRTD, 40(1), American Society of Mechanical Engineers, (2000)

[7] 김태옥, 이헌창, 신평식, 최병남, 조지훈, 최병용, 박성후, 김성근 "석유화학공장에서 한국형 위험기반검사에 의한 화학설비의 안정성 평가", *한국안전학회지*, **22**(6), 35-40, (2007)

[8] 이헌창, 조지훈, 김규정, 권혁면, 김태옥, "정량적 원인분석이 가능한 위험기반검사(KS-RBI)에 의한 화학설비의 위험도 경감방안", *한국가스학회지*, **12**(2), 110-117, (2008)

[9] 이중희, 최성규, 이헌창, 조지훈, 김태옥, "석유화학공장에서 재정적 위험도에 의한 위험기반검사의 적용", *한국가스학회지*, **13**(3), 53-60, (2009)

[10] ASME, *Risk-Based Inspection : Development of Guidelines*, Centers for Research and Technology Development(CRTD), **20**(1), American Society of Mechanical Engineers, (1994)

[11] Lee, T. S. and Hodge, F. G., *Resistance of Hastelloy Alloys to Corrosion by Inorganic Acids*, Materials Performance, September, p.29, (1976)