

API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석

- Analysis of Likelihood of Failure for the External
Corrosion of Stainless Steel through the Quantitative Risk
Based Inspection Using API-581 -

이 현 창 *

Lee Hern Chang

김 환 주 *

Kim Hwan Joo

김 태 옥 *

Kim Tae Ok

Abstract

Likelihood of failure (LOF) for the external corrosion of stainless steel, which affect to a risk of facilities, was analyzed quantitatively through the risk based inspection using API-581 BRD. We found that the technical module subfactor (TMSF) decreased as the inspection number increased and it increased as the inspection effectiveness and the used year increased, and that the TMSF showed high value for the case of the marine/cooling tower drift area as a corrosion driver. In this condition, the LOF for the external corrosion of stainless steel had lower than that for the carbon and low alloy steels

Keyword : Risk Based Inspection, API-581, Likelihood of Failure, Technical Module Subfactor, External Corrosion, Stainless Steel

1. 서 론

최근 화학설비의 노후화 등으로 대형사고의 발생 가능성은 그 어느 때보다 더욱 높아지고 있기 때문에 이들 장치들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야될 필요성이 있다[1,2]. 이를 해결하기 위해 선진국에서는 최근 위험도에 기반한 새로운 검사방법인 위험기반검사(risk based inspection, RBI)가 개발되어 상용화되고 있으나[3-5], 알고리즘에 대한 정확한 분석이

† 본 논문은 명지대학교 산학컨소시엄센터에 의해 지원되었음.

* 명지대학교 공과대학 화학공학과

나 국내실정에 적합한 프로그램의 개발 및 산업현장 적용은 거의 수행되지 못하고 있는 실정이다.

RBI는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱에 의해 공정이나 설비의 위험도를 산출하여, 위험도에 의해 공정 또는 설비의 검사 우선순위를 결정하고, 검사항목, 검사방법, 검사주기 등 효율적인 검사방법을 제시하며, 안전·환경 및 사업 수행에 장애를 주는 위험요소를 검토하여 비용-효과적인 방법으로 설비를 관리하는 방법이다. 따라서 RBI에 의해 검사자원의 효율적인 관리로 사고발생 가능성을 구조적으로 감소시킬 뿐만 아니라, 적절한 시기에 검사를 수행함으로써 검사비용을 최소화하고, 위험도에 근거한 안전관리시스템을 구축할 수 있다[6,7]. 이때, 사고발생 가능성의 크기는 8가지 손상메카니즘(damage mechanism), 즉 두께감소, 응력부식균열, 고온 수소침식, 노관침식, 기계적 피로, 취성과괴, 설비 라이닝 및 외부손상에 의해 크게 영향을 받는다. 특히, 외부손상(external corrosion)은 대부분의 공정설비에서 발생할 수 있으며, 그 결과로 두께감소 또는 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)이 발생할 수 있다. 특히, 스테인리스강에서는 표면에 염소가 축적되는 것을 방지하면 외부 CI-SCC가 발생할 수 있으며, 보온이 되지 않은 표면에 대해서는 유체나 미스트(mist), 또는 고체를 포함하고 있는 염소에 의해 응력부식에 의한 외부부식이 발생할 가능성이 높다[8,9].

본 연구에서는 위험 원인분석이 가능하고, 국내실정에 적합한 RBI 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 정성적 RBI 프로그램 개발[10]에 이어 미국석유학회(API)에서 제시된 RBI 절차인 API-581에 의해 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성을 분석하였다. 이를 위해 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수(technical module subfactor, TMSF)를 산출하여 매개변수의 영향을 해석하였다.

2. 이 론

정량적 RBI에서 누출 시나리오(s)별 설비의 위험도(risk)는 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF)과 사고결과 크기(consequence of failure, COF)의 곱으로 식 (1)과 같이 표현된다[4,11].

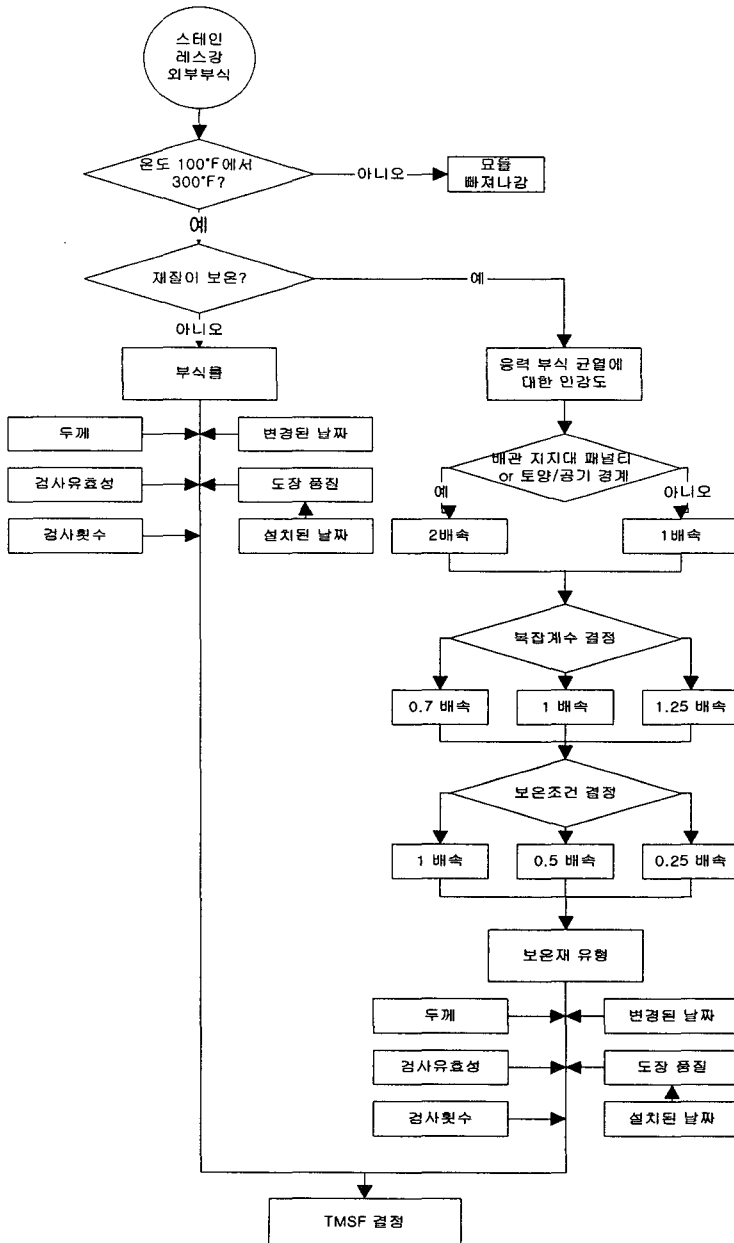
$$(Risk)_s = (LOF)_s \times (COF)_s \tag{1}$$

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

$$Frequency_{adjusted} = Frequency_{generic} \times F_E \times F_M \tag{2}$$

여기서 설비변경계수는 단위공정들과 단위공정 내 설비 구성요소들 간의 차이를 반영하는 것으로, 설비의 해당부분에만 적용되기 때문에 각 설비와 그 설비가 운전되는 환경에 따라 영향을 받는다. 즉, 설비변경계수에 대한 각각의 종속계수, 즉 기술종속계수,

보편적 종속계수, 기계적 종속계수, 공정 종속계수가 장치의 고장발생 가능성에 영향을 미친다. 이 중에서 기술종속계수는 사고발생 가능성 산출에 중요한 인자로, 검사효율과 검사주기 등을 결정할 수 있도록 한다. 이때, 스테인리스강의 설비에서 발생하는 외부손상의 경우 API-581 절차에 의해 작성한 TMSF의 산출순서는 <Fig. 1>과 같다.



< Fig. 1 > Algorithm of TMSF calculation for the external corrosion of stainless steel.

3. 결과 및 고찰

< Fig. 1 >의 알고리즘에 의해 비보온 및 보온 상태의 스테인리스강에서 TMSF를 산출하고, TMSF에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다.

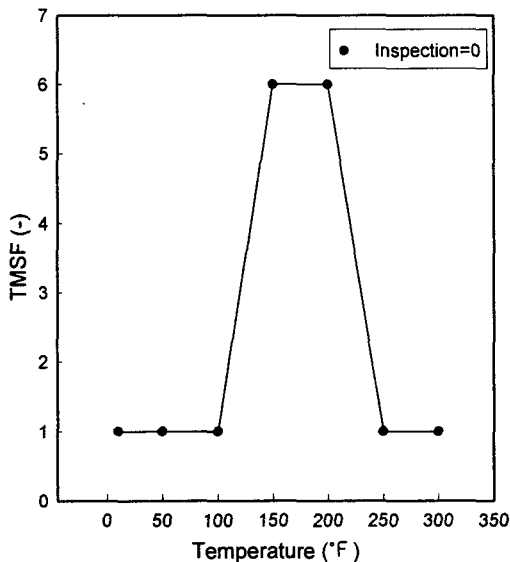
스테인리스강의 외부부식은 10~300°F에서 발생하고, 보온재질에 따라 변화하며[3], < Table 1 >에서와 같이 검사횟수, 사용년수, 부식 조정자(corrosion driver), 그리고 보온상태 등에도 영향을 받는다.

< Table 1 > Parameter ranges for calculation of TMSF at the external corrosion of stainless steel

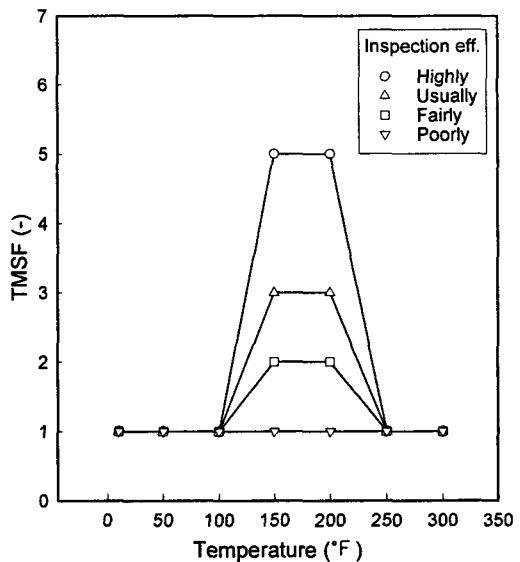
No.	Inspection No.	Used year	Corrosion driver	Insulation	Insulation condition
1	0	5	Marine/Cooling tower	None	Above average
2	1	10	Temperate	Yes	Average
3	3	20	Arid/Dry		Below average
4	5				

※ Shaded areas represent standard conditions.

< Fig. 2 >는 사용년수 10년에서 외부손상이 바다/냉각탑(marine/cooling tower)에 의해 발생할 경우 보온이 되지 않은 상태에서 검사횟수 및 검사 유효성 등급이 TMSF에 미치는 영향을 온도에 대해 나타낸 것이다.

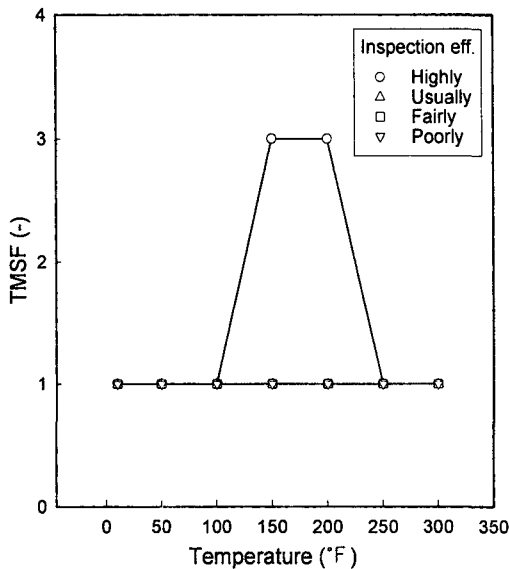


(a) Inspection No. = 0

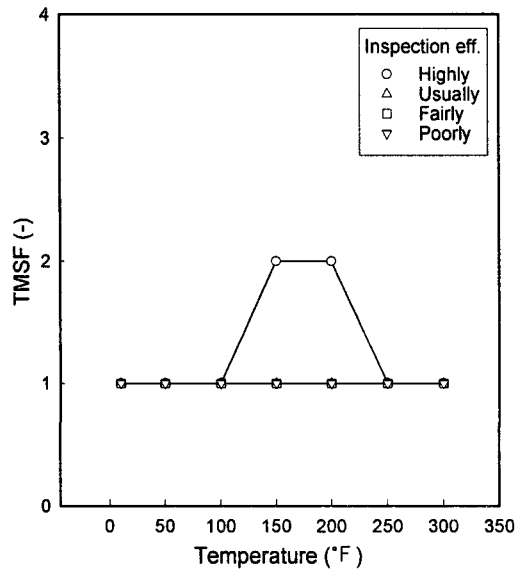


(b) Inspection No. = 1

< Fig. 2 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and inspection number on TMSF.



(c) Inspection No. = 3



(d) Inspection No. = 5

< Fig. 2 > (continued).

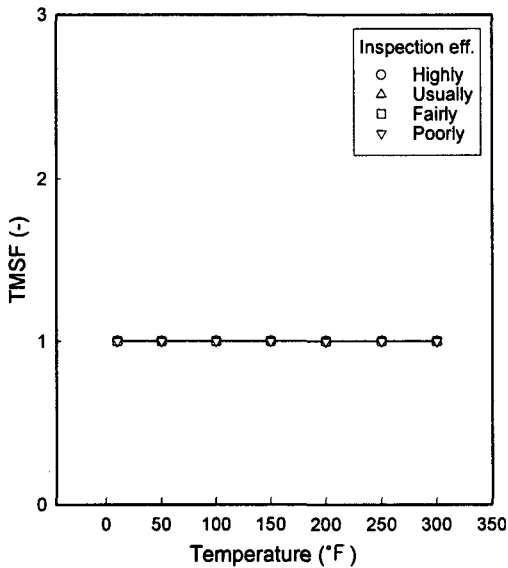
< Fig. 2 >에서 10년 동안 검사가 이루어지지 않았을 때 스테인리스강은 150~200 °F에서 외부부식이 온도에 민감하였고, 검사횟수가 1, 3, 5회로 증가함에 따라 TMSF의 최고값은 각각 5, 3, 2로 감소하였다. 또한 검사횟수 및 검사 유효성 등급에 따른 영향은 검사횟수가 증가할수록, 그리고 검사 유효성 등급이 낮아질수록 기술종속계수가 감소하였으며, 3회 이상의 검사에서는 매우 효과적인 경우(highly)를 제외하고, 거의 일정한 값을 나타내었다. 특히, 매개변수의 변화범위 내에서 스테인리스강의 TMSF는 탄소강이나 저합금강에서보다 약 1/100 이하의 적은 값을 나타내어[12] 스테인리스강은 외부부식에 의한 사고발생 가능성이 매우 낮음을 알 수 있었다.

1회 검사에서 사용년수를 증가시키면서 검사 유효성 등급에 대한 온도의 영향은 <Fig. 3>에서와 같이 5년에 1회 검사한 경우에 기술종속계수는 온도와 검사 유효성 등급에 크게 영향을 받지 않으나, 10년에서는 약 5, 그리고 20년에서는 약 460으로 증가하여 사용년수의 증가에 따라 기술종속계수도 급격히 증가하여 설비의 위험도가 증가하였다.

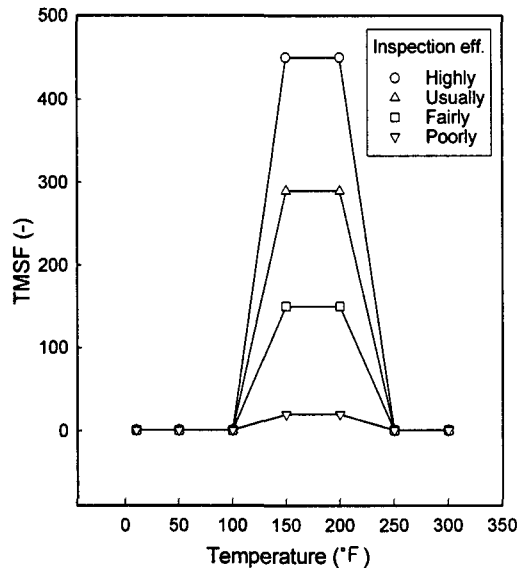
<Fig. 4>는 사용년수 10년 동안 검사가 1회 수행된 경우 TMSF에 미치는 외부부식 조정자의 영향을 나타낸 것으로, 외부부식 조정자가 바다/냉각탑인 경우(Fig. 2b 참조)는 기술종속계수의 최고값이 약 5이었으나, 온대(temperate)와 메마름/건조(arid/dry)에서는 약 1로 거의 영향을 받지 않았다. 따라서 보온이 되지 않은 경우에는 사용년수가 긴 바다/냉각탑에서만 사고발생 가능성이 큼을 알 수 있었다.

보온상태가 평균이하인 경우에 외부부식 조정자의 영향은 <Fig. 5>에서와 같이 온대와 메마름/건조인 경우에 TMSF는 바다/냉각탑의 경우(Fig. 2b 참조)와 비슷하였으

며, 조정자의 종류에 대해서는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나 보온재 상태가 평균이상인 경우에는 전 온도범위에서 약 1을 나타내어 외부부식에 대한 영향이 매우 적은 것으로 나타났다.

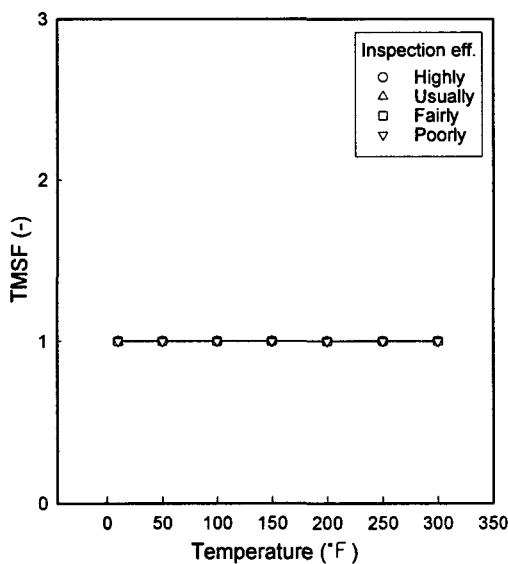


(a) Used Year = 5

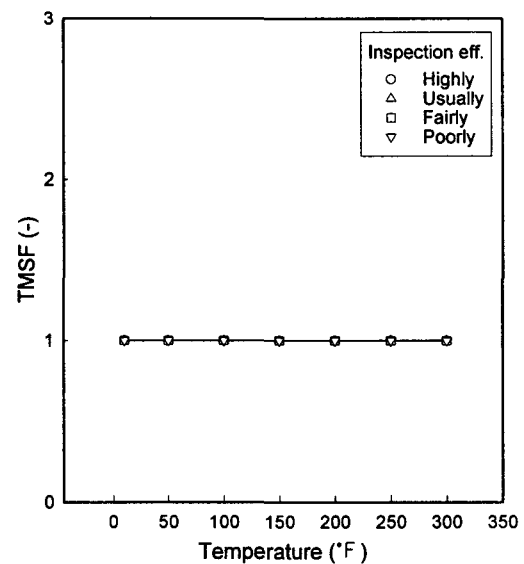


(b) Used Year = 20

< Fig. 3 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and used year on TMSF.

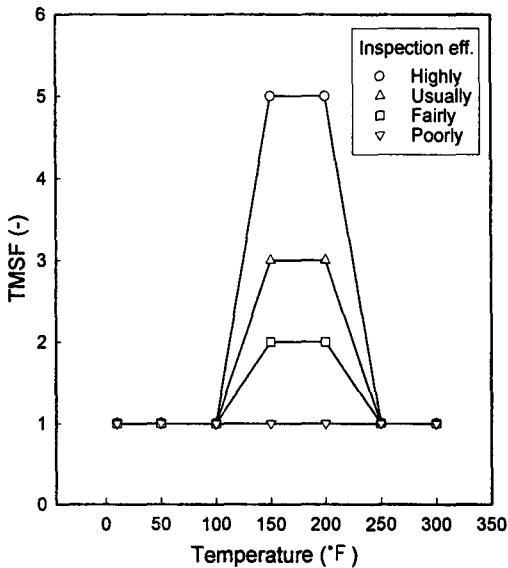


(a) Driver = Temperate

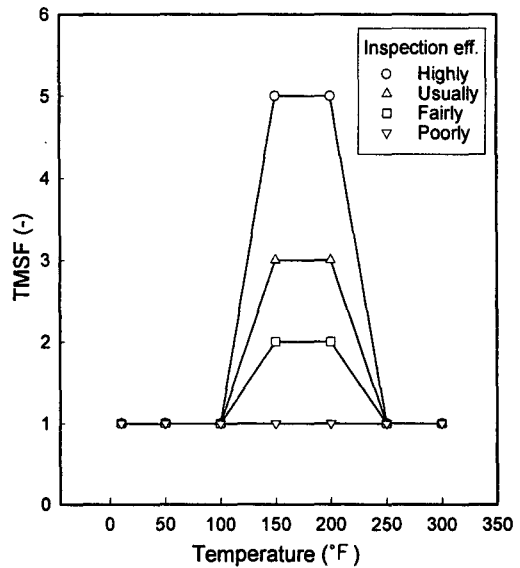


(b) Driver = Arid / Dry

< Fig. 4 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and driver on TMSF.



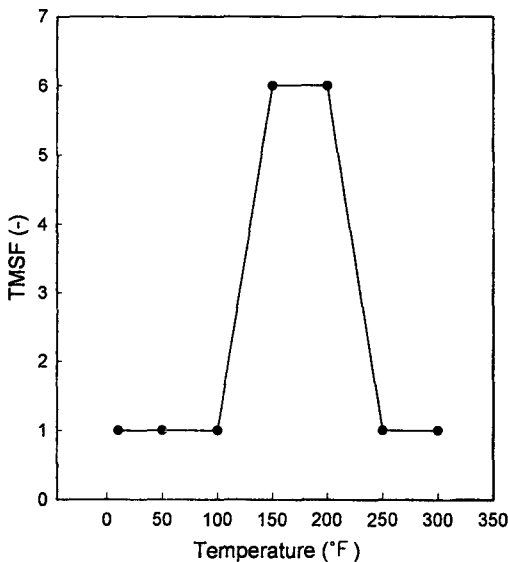
(a) Driver = Temperate



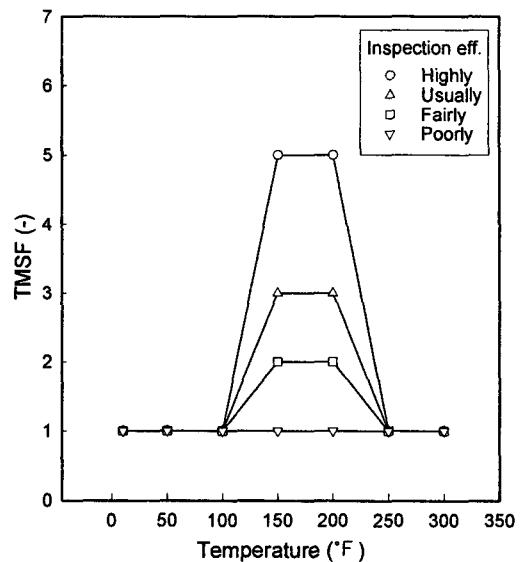
(b) Driver = Arid / Dry

< Fig. 5 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and driver on TMSF for insulation.

< Fig. 6 >은 보온상태가 평균이하인 경우에 검사횟수의 영향을 나타낸 것으로, 보온이 되지 않은 경우(Fig. 2 참조)와 비교하였을 때 TMSF는 비슷한 값을 나타내었다.

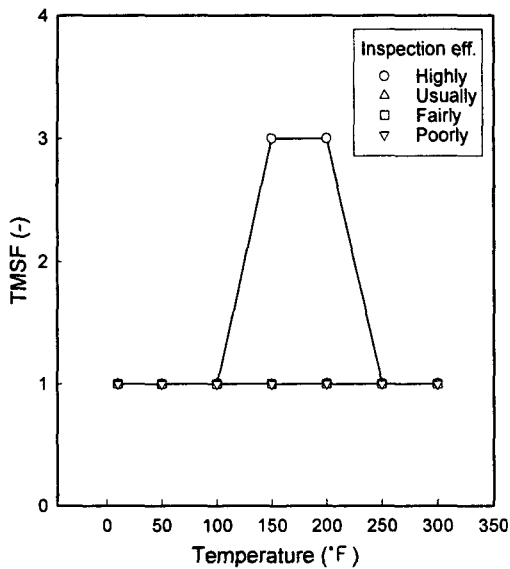


(a) Inspection No. = 0

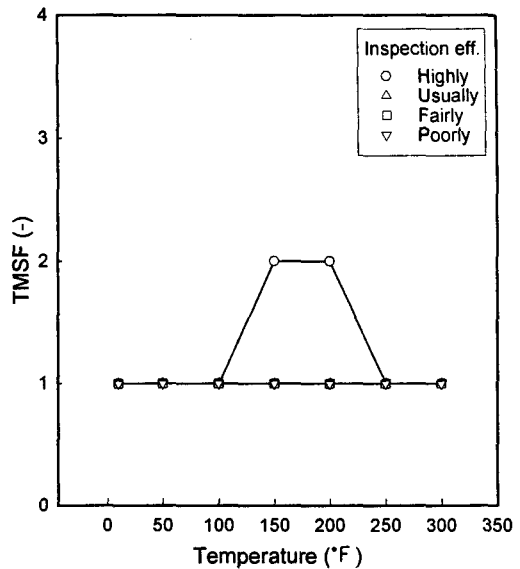


(b) Inspection No. = 1

< Fig. 6 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and inspection number on TMSF for insulation.



(c) Inspection No. = 3



(d) Inspection No. = 5

< Fig. 6 > (continued).

4. 결론

국내실정에 적합한 위험기반검사 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로, API-581 절차에 의해 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, 기술중속계수는 검사횟수가 증가할수록 감소하고, 검사 유효성 등급과 사용년수가 증가할수록 증가하였으며, 부식 조정자가 해양/냉각탑인 경우에 큰 값을 나타내었다. 특히, 스테인리스강에서 사고발생 가능성은 탄소강이나 저합금강에서보다 약 1/100로 매우 낮은 값을 나타내었다. 따라서 이 결과를 사용하여 설비의 위험 경감방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고 문헌

- [1] API, "Fitness For Service : API 579", American Petroleum Institute, 1999.
- [2] KAERI, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop", Korea Atomic Energy Research Institute, May, 2002.
- [3] API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API 580", American Petroleum Institute(API), 2001.
- [4] API, "RBI Basic Resource Document : API 581", American Petroleum Institute, 2000.
- [5] DNV, "User Manual for Process Hazard Analysis Software Tools (PHASt)", Ver 4.1, DNV Technical Manual, 1993.

- [6] F. I. Khan and M. M. Haddara, "Risk-Based Maintenance(RBM) : A Quantitative Approach for Maintenance/Inspection Scheduling and Planning", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **16**, 561-573, 2003.
- [7] J. R. Shims and R. E. Feigel, "The Use of Risk-Based Approaches in Post-Construction Standards", *J. of Pressure Vessel Technology*, **122**, 147-154, 2000.
- [8] W. G. Ashbaugh, "Inspection of Vessels and Piping for Corrosion Under Insulation Corrosion : When, Where, and How To Do It", *Materials Performance*, **29**(6), 38-42, 1990.
- [9] NACE, "A State-of-the-Art Report for Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel Surfaces Under Thermal Insulation and Cementitious Fireproofing", National Association of Corrosion Engineers Publication 6H189, Item No. 54268, 1978.
- [10] 이현창, 유준, 김환주, 김태욱, "API-581에 의한 정성적 위험기반검사(RBI) 프로그램 개발", *안전경영과학회지*, **6**(1), 49-60, 2004.
- [11] ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, **20**(1), American Society of Mechanical Engineers, 1994.
- [12] H. C. Lee, "Improved Risk-Based Inspection Supporting the Quantitative Cause Analysis", Ph.D. Thesis, Myongji University, August, 2004.

저 자 소 개

이 현 창 : 명지대학교 산업기술연구소 전임연구원(공학박사), 관심분야는 위험기반검사, 공정 위험성 평가 및 전문가 시스템 개발

김 환 주 : 명지대학교 화학공학과(석사과정), 관심분야는 위험기반검사 및 공정 위험성 평가

김 태 욱 : 명지대학교 화학공학과 교수(공학박사)/명지대학교 공과대학장/가스안전센터 소장, 관심분야는 가스안전 및 공정 위험성 평가