API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 탄소강 및 저합금강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석

- Analysis of Likelihood of Failure for the External Corrosion of Carbon and Low Alloy Steels through the Quantitative Risk Based Inspection using API-581 -

이 헌 창 *
Lee Hern Chang
김 환 주 *
Kim Hwan Joo
장 서 일 *
Jang Seo Il
김 태 옥 *
Kim Tae Ok

Abstract

Likelihood of failure for the external corrosion of carbon and low alloy steels, 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. In this condition, the TMSF showed high value for the case of the marine/cooling tower drift area as a corrosion driver, poor quality of coating, no insulation, and low insulation condition.

Keyword : Risk Based Inspection, Likelihood of Failure, External Corrosion, Technical Module Subfactor, Carbon Steel, Low Alloy Steel

1. 서 론

석유화학, 정유, 가스 산업 등에서 사용되고 있는 압력설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차 노후화 되기 때문에 보수, 대체 또는 폐기하고 있으나 경제적 또는 환경

† 본 논문은 명지대학교 산학컨소시엄센터의 지원에 의하여 수행되었음.
* 명지대학교 공과대학 화학공학과

적 요인으로 인하여 보수나 대체가 용이하지 않기 때문에, 이로 인한 대형사고의 발생 가능성은 그 어느 때보다 높아지고 있다[1,2]. 따라서 이들 장치들은 유지 · 보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하거나 보수해야될 필요성이 있으며[3,4], 이를 해결하기 위해 선진국에서는 최근 설비의 위험도에 근거한 검사항목, 검사방법, 검사주기 등을 결정하는 위험기반검사(risk based inspection, RBI) [5-7] 기법이 개발되어 상용화되고 있으나, 알고리즘에 대한 정확한 분석이나 현장적용은 아직 미흡한 실정이다.

이와 같은 RBI를 수행하기 위해서는 설비의 위험도에 영향을 주는 사고결과 크기와 사고발생 가능성의 분석이 선행되어야할 필요성이 있다. 이때, 사고발생 가능성의 크기는 8가지 손상메카니즘(두께감소, 응력부식균열, 고온 수소침식, 노관손상, 기계적 피로, 취성파괴, 라이닝 손상, 외부부식)에 의해 크게 영향을 받는다. 외부부식은 대부분의 공정설비에서 두께감소나 응력부식균열로 일어나며, 특히 탄소강 또는 저합금강에서는 두께감소가 발생할 수 있고, 비가 많이 오고 더운 곳, 바다가 가까이 위치하고 있는 곳, 시원하고 건조한 육지 내에 위치하고 있는 플랜트, 그리고 온대기후, 냉각탑, 스팀벤트 가까이 위치하고 있는 설비, 사용온도가 규칙적으로 이슬점을 맴돌고 있는 공정 등에서 발생할 가능성이 매우 높다[8,9].

본 연구에서는 위험 원인분석이 가능하고, 국내실정에 적합한 RBI 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석[10]에 이어, 미국석유학회(API)에서 제시된 RBI 절차인 API-581[6]에 의해 탄소강과 저합금강에서 외부부식에 의한 사고발생 가능성을 해석하였다. 이를 위해 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수(technical module subfactor, TMSF)를 다양한 조건에서 산출하고, TMSF에 미치는 주요 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[6,11].

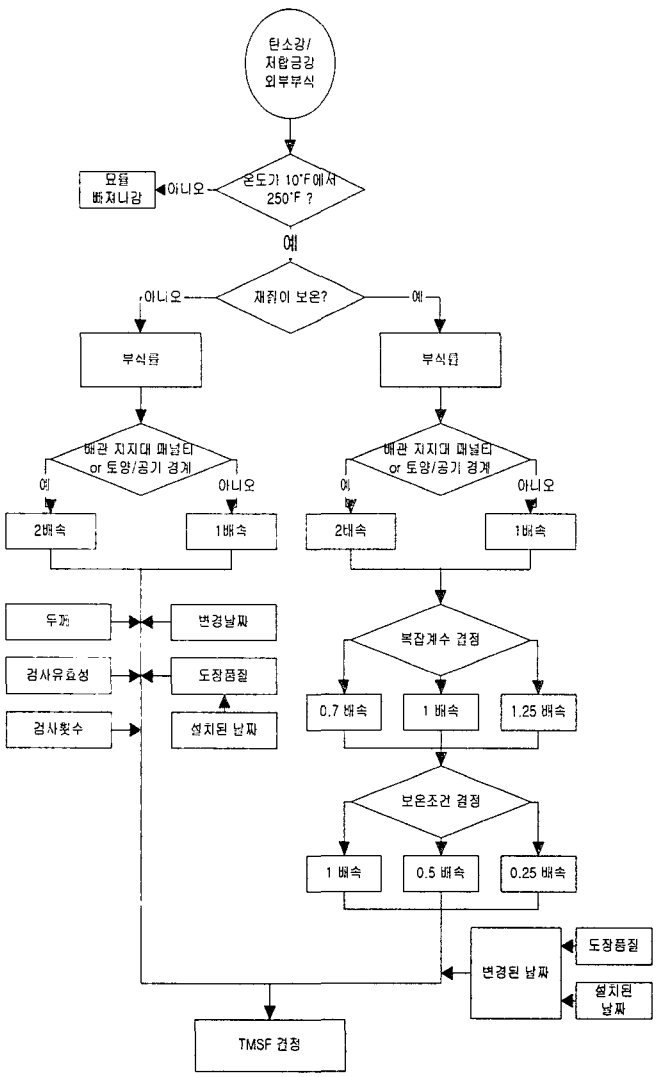
$$(Risk)_s = (LOF)_s \times (COF)_s \quad (1)$$

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.

$$\text{Frequency}_{\text{adjusted}} = \text{Frequency}_{\text{generic}} \times F_E \times F_M \quad (2)$$

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, 설비변경계수의 종속계수(기술종속계수, 보편적 종속계수, 기계적 종속계수, 공정종속계수)가 설비의 고장발생 가능성에 영향을 미친다. 이 중에서 기술종속계수는 특정 메카니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 인자로, 정상 또는 비정상 운전조건 하에서 손상메카니즘(damage mechanism)의 선별, 특정 환경 하에서 부식률, 검사프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 확률에 적용할 수 있는 설비변경계수 산출 등에 사용되며, 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 이때, 모든 탄소강 및 저합금강에서 발생되는 외부부식의 경우에 API-581 절차에 의해 작성한 TMSF의 산출순서는 < Fig. 1 >과 같다.



< Fig. 1 > Algorithm of TMSF calculation for the external corrosion of carbon and low alloy steels.

3. 결과 및 고찰

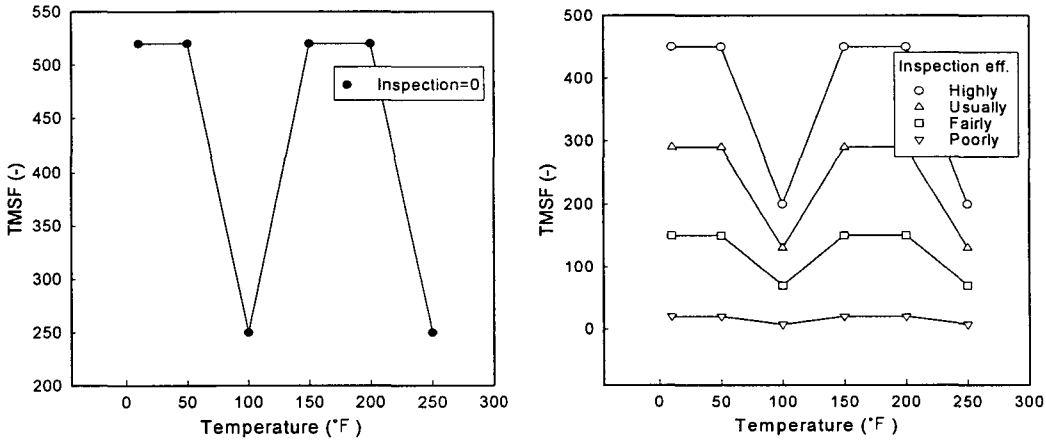
< Fig. 1 >의 알고리즘을 사용하여 탄소강 및 저합금강에서 TMSF를 산출하고, TMSF에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다. 이때, 탄소강 및 저합금강의 외부부식은 10~250 °F에서 발생하고, 보온재질에 따라 변화하며, < Table 1 >에서와 같이 검사횟수, 사용년수, 부식 조정자(corrosion driver), 그리고 도장품질 등에도 영향을 받는다[6].

< Table 1 > Parameter ranges for calculation of TMSF at the external corrosion of carbon and low alloy steels

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

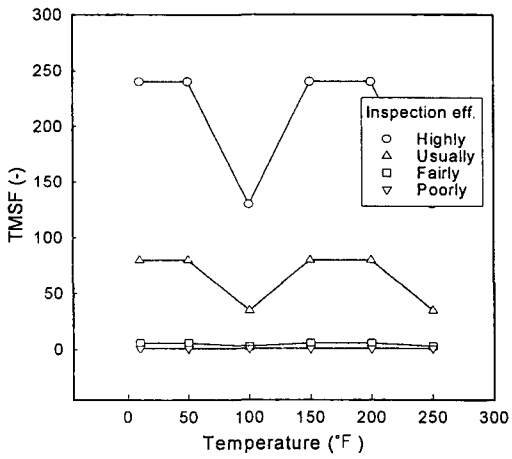
※ Shaded areas represent standard conditions.

< Fig. 2 >는 사용년수 10년에서 외부부식이 바다/냉각탑(marine/cooling tower)에 의해 발생할 경우 도장품질이 나쁘고, 보온되지 않은 상태에서 TMSF에 미치는 검사횟수, 검사 유효성 등급 및 온도의 영향을 나타낸 것으로, 검사가 수행되지 않았을 경우 0~50°F와 150~200°F의 범위에서는 TMSF가 약 530을 나타내어 외부부식이 활발하게 진행됨을 알 수 있다.

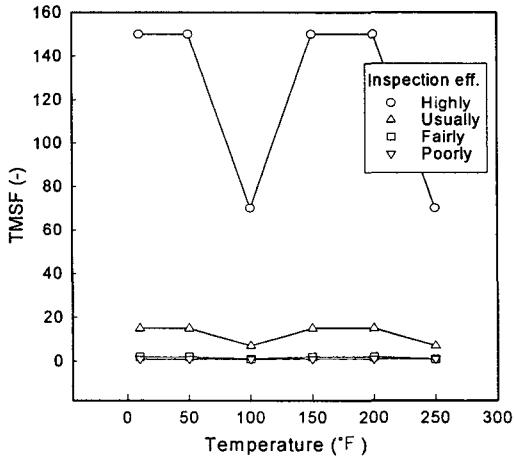


(a) Inspection No. = 0 (b) Inspection No. = 1

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



(c) Inspection No. = 3

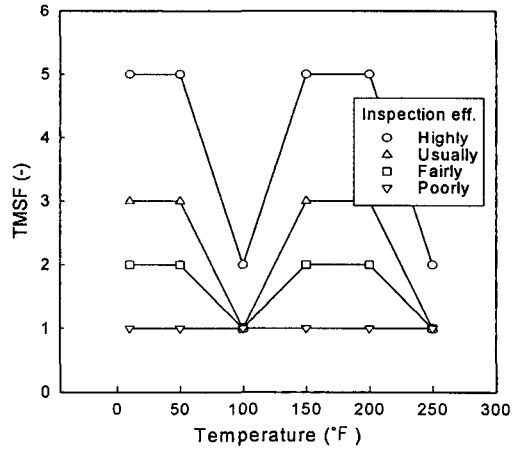


(d) Inspection No. = 5

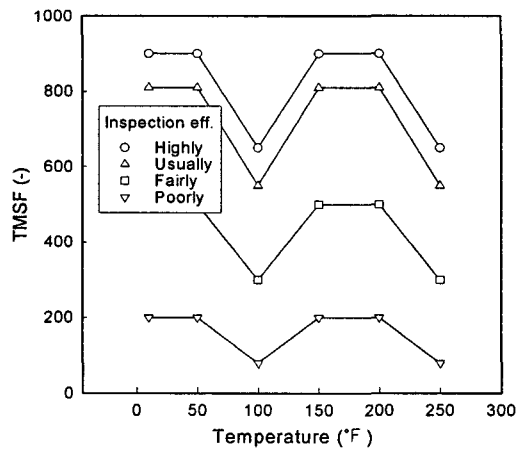
< Fig. 2 > (continued).

그리고 검사횟수가 1회, 3회, 5회로 증가함에 따라 기술종속계수의 최고값이 각각 450, 240, 150을 나타내어, 설비의 신뢰도가 증가하였다. 또한 검사 유효성 등급의 감소에 따라 1회 검사에서는 TMSF가 점차적으로 감소하였으나, 1회 이상 검사에서는 매우 효과적인 경우(highly)를 제외하고, 약 100 이하의 낮은 값을 나타내었다.

< Fig. 3 >은 1회 검사에서 사용년수의 증가에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 것이다.



(a) Used year = 5

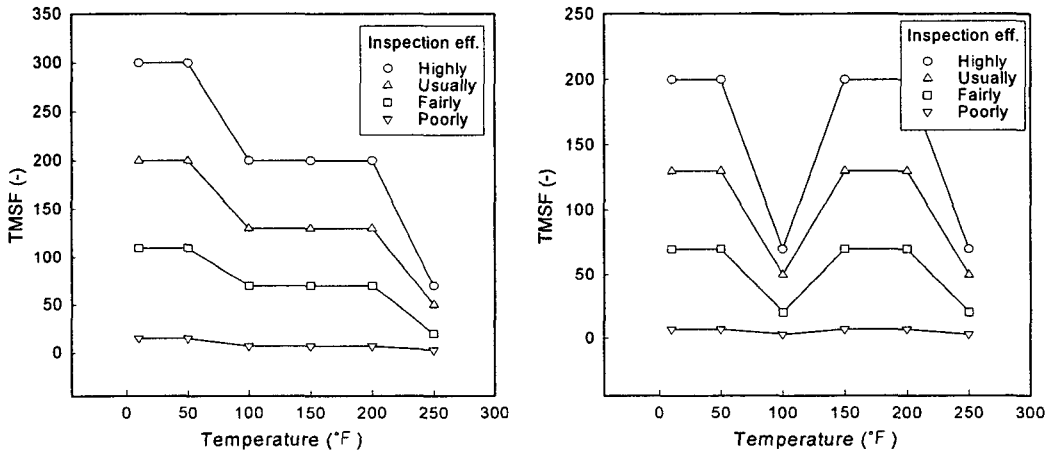


(b) Used year = 20

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

< Fig. 3 >에서 TMSF의 최고값은 5년에서 약 5를 나타내었고, 10년에서는 약 450을(Fig. 2b 참조), 그리고 20년에서는 약 900을 나타내어 사용년수가 증가함에 따라 급격히 증가하였다.

10년 동안 검사가 1회 수행되었을 때 외부부식 조정자(driver)에 따른 TMSF는 < Fig. 4 >와 같이 바다/냉각탑에서 최고값이 약 450이었으나(Fig. 2a 참조), 온대(temperate)에서는 약 300, 메마름/건조(arid/dry)서는 200을 나타내어 바다/냉각탑 영역에서 가장 외부부식이 심각함을 알 수 있었다. 또한 온대에서 외부부식의 영향은 다른 조정자의 영향과는 달리 100~200°F 범위에서 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 250°F에서는 TMSF가 최저값을 나타내었다. 그리고 메마름/건조에서는 바다/냉각탑(Fig. 2b 참조)에서와 비슷한 경향을 나타내었다.



(a) Driver = Temperate (b) Driver = Arid/Dry

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

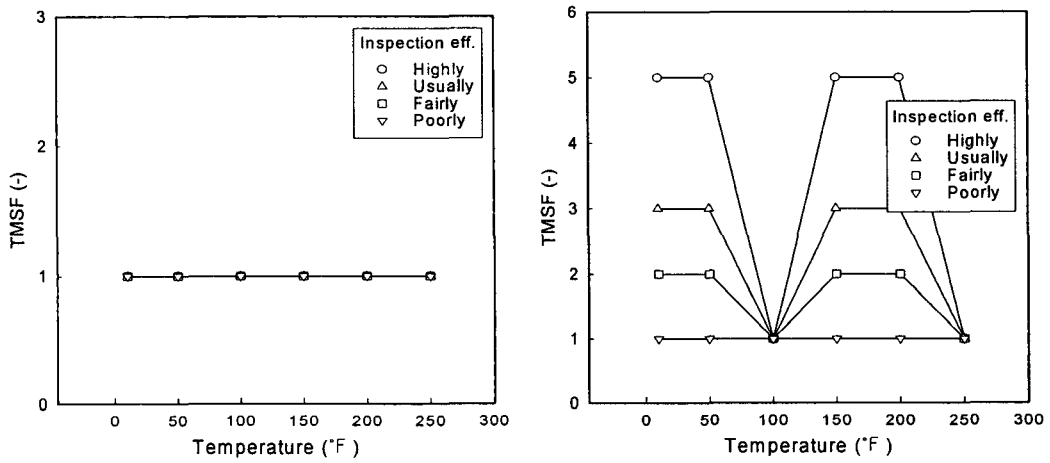
< Fig. 5 >는 10년 동안 검사가 1회 수행되었을 때 도장 품질상태에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 것으로, 도장 품질상태가 우수한 경우에는 외부부식이 가장 심각하게 나타났던 바다/냉각탑에 대해서도 거의 영향을 받지 않았으며, 보통인 경우에도 영향을 줄만큼 증가하지 않았다. 그러나 도장품질이 나쁠 경우(Fig. 2b 참조)에는 기술종속계수의 최고값이 약 450까지 증가하여 설비의 외부부식이 심각하였다.

또한 사용년수 10년에서 외부보온이 되어 있는 경우 검사횟수에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 <Fig. 6>에서와 같이 보온이 된 경우에도 150~200°F 범위에서 부식이 온도에 민감하였으며, TMSF는 검사횟수의 증가에 따라 점차 감소하였으나, 그 크기가 작아서 위험도에 영향을 크게 미치지 않았다.

탄소강 또는 저합금강에서 외부보온이 되어 있는 경우 사용년수의 증가에 따른 TMSF의 변화는 <Fig. 7>과 같이 5년 동안 사용의 경우는 TMSF가 일정하였으나,

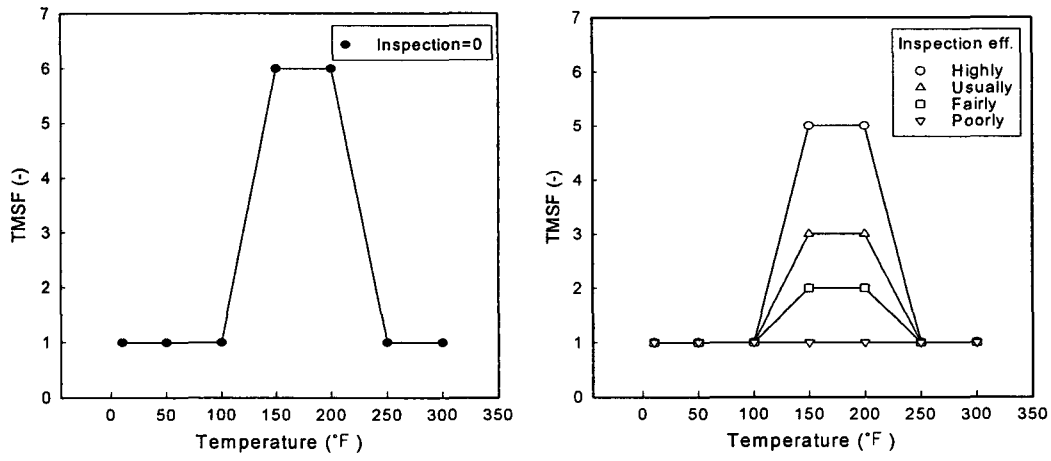
20년이 경과된 후에는 TMSF의 최고값이 약 480까지 증가하여 위험도가 증가하였다.

따라서 설비를 장기적으로 사용할 경우에는 외부에 보온재를 주기적으로 교체를 해 주어야만 외부부식에 의한 손상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.



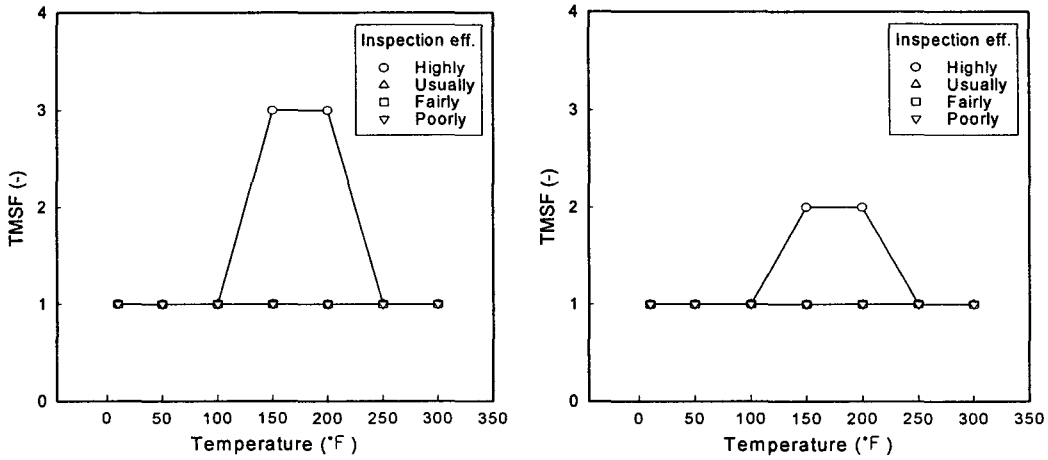
(a) Coating quality = High (b) Coating quality = Medium

< Fig. 5 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and coating quality on TMSF.



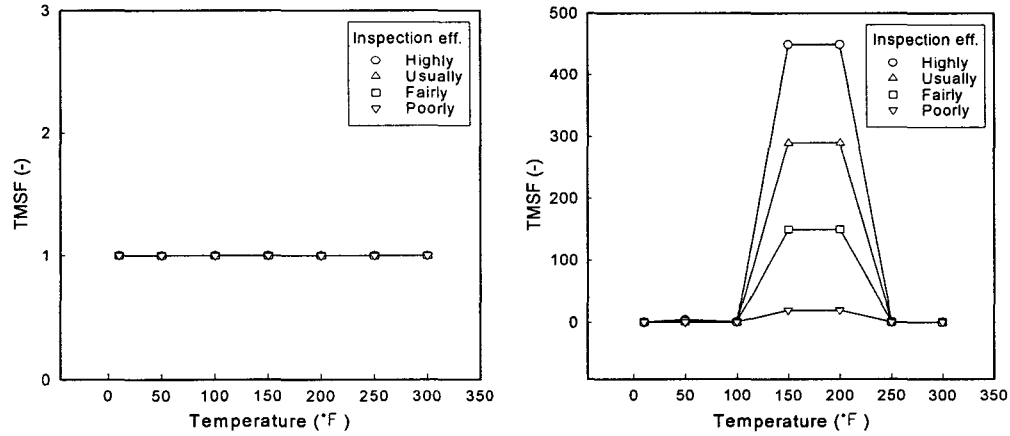
(a) Inspection No. = 0 (b) Inspection No. = 1

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



(c) Inspection No. = 3 (b) Inspection No. = 5

< Fig. 6 > (continued).



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

< Fig. 7 > Effect of temperature, inspection effectiveness, and used year on TMSF for insulation.

또한 탄소강 및 저합금강에서 외부에 보온이 되어 있는 경우에 외부부식 조정자가 바다/냉각탑, 온대 및 메마름/건조에 대한 기술종속계수의 변화는 바다/냉각탑을 제외하고, 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 보온재의 상태(평균이상, 평균, 평균이하)가 평균이하를 제외하고, 거의 경향을 받지 않음을 알 수 있었다.

따라서 이 결과를 사용하여 설비의 위험 원인분석이나 위험 경감방안을 제시할 수 있다.

4. 결 론

위험 원인분석이 가능하고, 국내실정에 적합한 한국형 위험기반검사(RBI) 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로, API-581에 의한 RBI에서 탄소강과 저합금강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술종속계수는 검사횟수가 증가할수록 감소하고, 검사 유효성 등급과 사용년수가 증가할수록 급격히 증가하였으며, 부식 조정자가 해양/냉각탑인 경우, 불량 도장상태, 보온되지 않은 상태, 그리고 보온상태가 평균 이하인 경우에 큰 값을 나타내어 사고발생 가능성이 높았다. 따라서 이 결과를 사용하여 설비의 위험 원인분석이나 위험 경감방안을 제시할 수 있다.

5. 참 고 문 헌

[1] Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries", Butter-worths, London, 1980.

[2] T. A. Kletz, "What Went Wrong", Gulf publishing Co., Houston, TX, 1986.

[3] API, "Fitness For Service : API 579", American Petroleum Institute, 1999.

[4] KAERI, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop", Korea Atomic Energy Research Institute, May, 2002.

[5] API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580", American Petroleum Institute(API), 2001.

[6] API, "RBI Basic Resource Document : API-581", American Petroleum Institute, 2000.

[7] DNV, "User Manual for Process Hazard Analysis Software Tools (PHAST)", Ver 4.1, DNV Technical Manual, 1993.

[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] 이헌창, 김환주, 김태옥, "API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석", *안전경영과학회지*, **6**(3), 99-107, 2004.

[11] ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, **20**(1), American Society of Mechanical Engineers, 1994.

저 자 소 개

이 헌 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

장 서 일 : 명지대학교 가스안전센터 전임연구원(공학박사), 관심분야는 공정시스템의 위험성 평가 및 안전관리 비용-편익분석

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