

위험기반검사에서 응력부식에 의한 사고발생 가능성 해석

이헌창, 김환주, 장서일, 김태옥*
 명지대학교 화학공학과
 (kimto@mju.ac.kr*)

Analysis of Likelihood of Failure for SCC Module at Risk Based Inspection

H. C. Lee, H. J. Kim, S. I. Jang, Kim T. O. Kim*
 Dept. of Chemical Engineering, Myongji University
 (kimto@mju.ac.kr*)

서론

위험기반검사(risk based inspection, RBI)는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱에 의해 위험도를 산출하고, 위험도에 의해 검사체계의 운영과 공정 또는 설비의 검사 우선순위를 결정함으로써 정량화된 위험도를 제공하여 공정 내 주요설비를 효율적으로 검사할 수 있는 검사방법을 제시할 뿐만 아니라 안전·환경 및 사업 수행에 장애를 주는 위험요소를 검토하여 비용-효과적인 방법으로 설비를 관리해줄 수 있도록 하는 새로운 검사방법이다[1,2]. 또한 RBI는 검사자원을 보다 효율적으로 운영하여 사고발생 가능성을 구조적으로 줄일 수 있도록 하며, 가장 적절한 시기에 검사를 수행함으로써 검사비용을 최소화하고, 설비에 대한 신뢰도를 증가시킬 수 있도록 할 뿐만 아니라 위험도를 통해 설비의 검사방법과 검사 유효성을 제시하여 유지·관리함으로써 위험도에 근거한 관리시스템을 구축할 수 있다[3-5]. 그러나 지금까지 RBI 알고리즘에 대한 정확한 분석이나 위험도에 영향을 주는 사고발생 가능성 및 사고결과 크기에 대한 매개변수의 영향 해석 등은 거의 수행되지 않았기 때문에 한국 실정에 맞는 RBI 프로그램을 개발하기 위해서는 이들에 대한 분석이나 해석이 필요하다. 이때, 사고발생 가능성은 두께감소, 응력부식, 고온 수소침식, 기계적 피로, 노관부식, 설비 라이닝, 취성과괴, 외부손상 등 8가지 손상메카니즘에 의해 산출될 수 있으며, 이 중에서 응력부식은 사고를 발생하는 가장 중요한 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 미국석유화학회(API)에서 제시된 위험기반검사의 절차인 API-581[5]에 의해 응력부식에 의한 사고발생 가능성에 대하여 해석하였다.

본론

2-1. 정량적 RBI

정량적 RBI에서 누출 시나리오(s)별 설비의 위험도(risk)는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱으로 나타내며, 이때 사고발생 가능성은 설비의 고장발생 확률이나 고장횟수로, 일반 고장발생 확률에 설비변경계수, 그리고 관리시스템평가계수를 곱하여 조정된 고장발생 확률로 나타낸다[5]. 이때, 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.

따라서 기술모듈에서는 사용중인 설비에 대해 발생 가능한 손상메카니즘을 정의하고, 이들의 기술종속계수(technical module subfactor, TMSF)를 사용하여 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 이때, 가장 빈번하게 발생하는 응력부식(stress corrosion cracking, SCC)의 경우 API-581[5]에 의해 작성한 TMSF 산출순서는 Fig. 1과 같다.

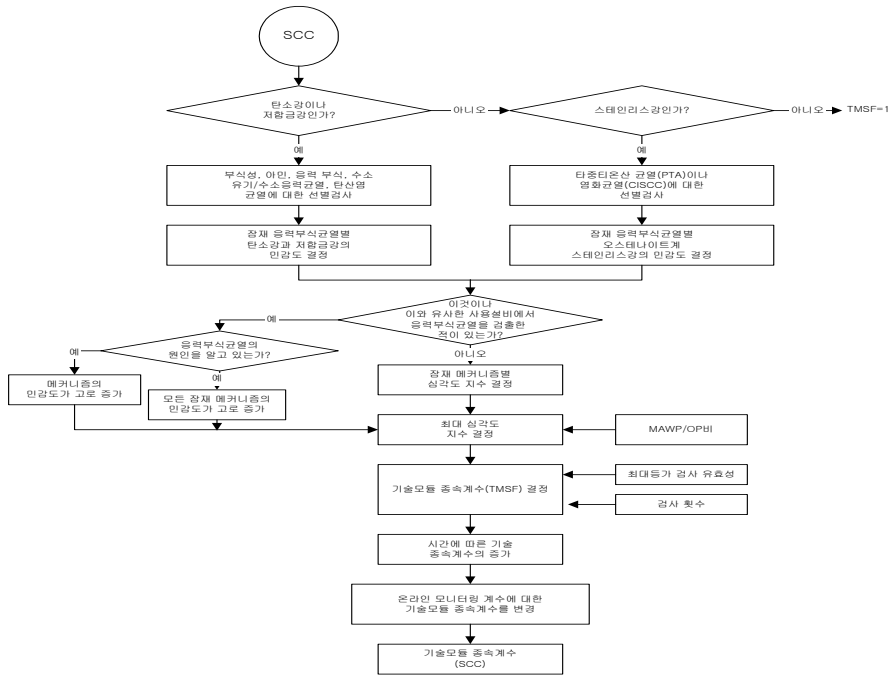


Fig. 1. Algorithm of TMSF calculation for the SCC module.

특히, 응력부식은 사용하는 유체에 따라 8가지, 즉 부식성 균열, 아민 균열, 황화물 응력 균열, 수소 유기균열, 수소 응력균열, 탄산염 균열, 다중티온산 균열, 염화물 균열, 그리고 응력부식 균열로 구분된다.

2-2. 사고발생 가능성 해석

부식성 균열에서 수산화나트륨 농도와 온도에 따른 TMSF의 변화는 Fig. 2(a)에서와 같이 보온되지 않은 경우 TMSF의 최저값은 약 0을, 그리고 보온된 경우에는 약 50을 나타내었으나, TMSF의 최대값에는 보온 유무가 영향을 미치지 않았으며, 또한 온도증가에 따라 낮은 수산화나트륨 농도에서도 TMSF가 민감하게 증가하였다.

아민 균열에서 TMSF는 Fig. 2(b)와 같이 보온유무에 크게 영향을 받지 않으며, 모노에타놀아민(monoethanolamine, MEA) 경우는 180°F 이하에서 일정하였으나, 그 이후에서는 민감하게 증가하였다. 또한 디소프로파날아민(disopropanalamine, DEA)과 에틸디에타놀아민(ethyl-diethanolamine, MDEA)은 전 온도범위에서 거의 일정한 값을 나타내었다.

황화물 균열에서 TMSF는 Fig. 2(c)와 같이 브리넬 경도(Brinell hardness)가 200 이하에서는 최저를, 237 이상에서는 황화수소 농도가 10,000 ppm에서 pH 8.0까지는 12, 8.5에서는 3, 9에서는 12를 나타내었고, 5,000 ppm의 경우 pH 5.5에서는 12, 6.0~7.5 pH는 3, 8.0 이상의 pH는 12를 나타내었으며, 또한 1,000 ppm 이하에서는 TMSF가 3으로 일정하게 나타났다.

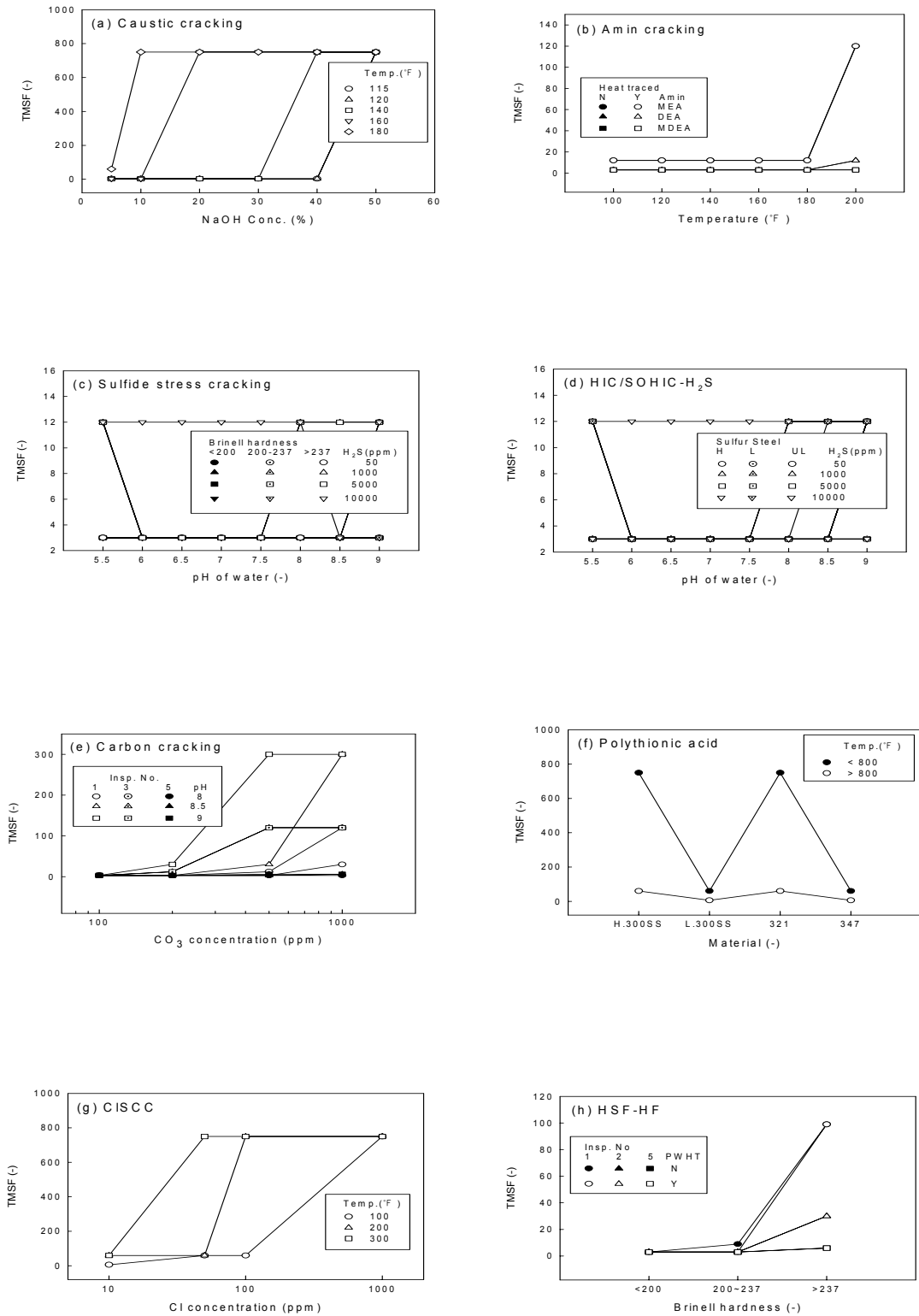


Fig. 2. Effect of SCC type on TMSF with various chemicals at standard condition.

Fig. 2(d)는 수소유기 균열(HIC/SOHIC-H₂S)에서 황강의 종류에 따른 환경 심각도에 의해 결정된 TMSF를 나타낸 것으로, 0.01% 이상의 황을 함유하는 고풍강(high sulfur steel)에서는 TMSF 최고값이 약 12를 나타내었고, 0.002~0.01% 황 함유의 저황강은 pH 5.5에서 12, pH 6.0~7.5에서는 3, 그리고 pH 8.0 이상에서는 12를 나타내었다. 또한 0.002% 이하 황 함유의 초저황강에서 TMSF는 전 pH 범위에서 최저값인 3을 나타내어 고장발생 가능성이 매우 낮았다. 또한 고풍강과 초저황강에서 황화수소의 영향은 없었으나, 저황강에서는 pH 7.5 이상에서 황화수소 농도가 높은 경우에 TMSF가 증가하였다.

탄산염 균열에서 TMSF는 Fig. 2(e)에서와 같이 탄산염 농도가 증가할수록 증가하고, pH가 8.0에서 9.0으로 증가함에 따라 증가하였다. 또한 검사횟수가 1, 3, 5회로 증가할 때 증가폭은 1회에 비해 3회에서는 최대 TMSF가 약 1/3, 5회에서는 약 1/100 정도 감소하였다. 따라서 검사횟수가 많을수록 탄산염 농도가 TMSF에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다.

다중티온산(polythionic acid) 균열에서 TMSF는 Fig. 2(f)와 같이 열처리가 되지 않은 용접 상태에서 H등급 300 시리즈 스테인리스강과 321 스테인리스강의 경우 사용온도가 800°F 이하에서는 800°F 이상에서보다 약 7배가 증가된 약 750을 나타내었으며, L등급 300 시리즈와 347 스테인리스강에서는 온도에 크게 민감하지 않았다. 또한 열처리된 경우는 열처리되지 않은 경우에 비해 사고발생 가능성이 상당히 감소하였다.

염화물 균열에서는 Fig. 2(g)와 같이 pH가 10이상인 경우에 TMSF는 염화이온 농도가 증가함에 따라 100°F에서는 약 100 ppm 이상에서, 200°F에서는 50 ppm에서, 그리고 300°F에서는 10 ppm에서 민감하게 증가하여 최대값을 나타내었다. 그리고 pH가 10 미만인 경우 200°F이하의 온도에서는 TMSF가 염화이온 농도에 거의 영향을 받지 않았으나, 300°F에서는 염화이온 농도가 100 ppm 이상에서 민감하게 증가하였다.

불화수소산에 의한 수소 응력균열에서 TMSF는 Fig. 2(h)와 같이 열처리가 되지 않은 용접상태에서는 검사횟수에 관계없이 브리넬 경도가 낮은 경우에는 낮았으나 높은 경우에는 최대 100을 나타내었으며, 열처리 후인 경우에 TMSF는 검사횟수가 1회인 경우 최대, 그리고 검사횟수가 5회인 경우에 매우 적은 값을 나타내어 민감하지 않는 것으로 나타났다.

결론

API-581에 의한 위험기반검사에서의 응력부식에 의한 사고발생 가능성을 해석한 결과, 기술중속계수(TMSF)는 보온이 되지 않고 증기배출이 있는 경우, 그리고 검사횟수가 적고, 검사 유효성 등급이 높으며, 검사 후 경과년수가 오래되거나 모니터링이 없는 경우에 높은 값을 나타내었으며, 화학물질 농도와 유속, 온도 및 압력의 증가에 따라 증가하였다. 이때, TMSF는 검사횟수, 검사 유효성 등급 및 모니터링에 대해 크게 민감하였다.

참고문헌

1. ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, **20**(1), American Society of Mechanical Engineers(1994).
2. KAERI, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop", Korea Atomic Energy Research Institute, May(2002).
3. ASME, "Risk-Based Testing : Development of Guidelines", Center for Research and Technology Development(CRTD), **40**(1), American Society of Mechanical Engineers (2000).
4. API 580, "Risk-Based Inspection", American Petroleum Institute, New York(2001).
5. API, "RBI Basic Resource Document : API 581", American Petroleum Institute (2000).