

위험기반검사에서 두께감소에 의한 사고발생 가능성 해석

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

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

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

서론

산업기술이 급속하게 발전함에 따라 각종 시설과 설비들이 복잡·다양화되고 있으며, 더욱이 생산효율을 증가시키기 위해 압력설비와 같은 고온·고압의 조건 하에서 운전되는 시설 및 설비가 급증하고 있다. 이와 같은 장치시설들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차 노후화 되기 때문에 보수, 대체 또는 폐기하고 있으나 경제적 또는 환경적 문제로 보수나 대체가 용이하지 않기 때문에 이로 인한 대형사고의 발생 가능성은 그 어느 때보다 높아지고 있다[1,2]. 특히 이들 장치들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야 할 필요성이 있으며[3,4], 이를 해결하기 위해 선진국에서는 설비의 위험도에 근거한 검사항목, 검사방법, 검사주기 등을 결정하는 위험기반검사(risk based inspection, RBI)[5-7] 기법이 개발되어 상용화되고 있으나, 알고리즘에 대한 정확한 분석은 아직까지 수행된 바 없다. 따라서 공정이나 장치의 위험도 산출에 필요한 사고발생 가능성과 사고결과 크기에 대한 해석이 선행되어야 할 필요성이 있으며, 이때 사고발생 가능성의 크기는 8가지 손상메카니즘에 의해 결정되며, 특히 두께감소는 부식이 진행됨에 따라 설비의 잔여수명을 감소시키고 있다.

본 연구에서는 미국석유학회(API)에서 제시된 위험기반검사의 절차인 API-581[7]에 의해 두께감소에 의한 설비의 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[7], 이때 사고발생 가능성은 설비의 고장발생 확률이나 고장횟수로, 일반 고장발생 확률에 설비변경계수(FE), 그리고 관리시스템평가계수(FM)를 곱하여 조정된 고장발생 확률로 나타낸다.

$$\text{Frequency adjusted} = \text{Frequency generic} \times \text{FE} \times \text{FM}$$

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 특정 메카니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 인자로, 정상 및 비정상 운전조건 하에서 손상메카니즘의 선별, 특정 환경 하에서 부식율, 검사프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 확률에 적용할 수 있는 변경계수 산출 등에 사용된다.

따라서 기술모듈에서는 사용중인 설비에 대해 발생 가능한 손상메카니즘을 정의하고, 이들의 기술중속계수(technical module subfactor, TMSF)를 이용하여 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 이때, 8가지 손상메카니즘 중 모든 설비에서 발생하는 두께감소의 경우 API-581에 의해 작성한 TMSF 산출순서는 Fig. 1과 같다.

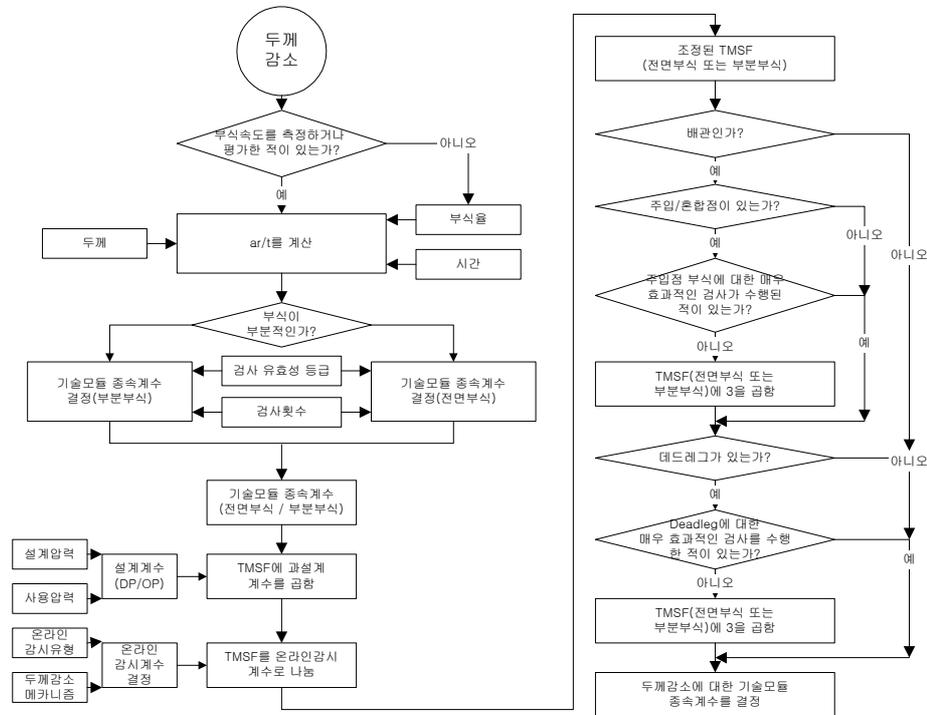


Fig. 1. Algorithm of TMSF calculation for the thinning module.

특히, 두께감소는 사용하는 유체에 따라 6가지, 즉 염산 부식, 고온 황산/나프텐산 부식, 고온 H₂S/H₂ 부식, 불화수소산(HF) 부식, 산성수 부식, 그리고 고온산화로 구분된다. 일반적으로 부식이 진행됨에 따라 설비수명은 점차적으로 감소하고, 위험도에 영향을 미치는 TMSF는 증가하게 된다.

2-2. 사고발생 가능성 해석

염산부식에서 표준조건, 즉 사용년수 10년, 1인치 두께, 2회 검사, 효과적인 검사, 그리고 과설계계수가 1.5 이상인 경우에 대한 결과는 Fig. 2(a)와 같이 염화이온의 농도가 1~100 ppm 범위에서 급격하게 증가하였다.

고온 황산/나프텐산 부식에 대한 기술중속계수는 Fig. 2(b)에서와 같이 낮은 유속의 경우 산가가 낮을 때에는 약 600~700°F 범위에서 급격하게 증가하였으며, 특히 산가가 증가할수록 온도가 낮은 범위에서도 급격하게 증가하였다. 또한 산가가 2.0 이상에서는 TMSF가 약 450°F에서 민감하게 증가하여 위험도에 크게 영향을 미치며, 황화물 속도가 0.2~0.6 ft/s에서는 산가 증가에 따라 약 500~700°F 범위에서 민감하게 증가하였다. 그리고 황화물 유속의 증가에 따라 기술중속계수의 최고값은 변화가 없었으나 민감하게 반응할 수 있는 온도범위가 점차 확대되어 낮은 온도영역에서도 TMSF가 증가되었다.

고온 H₂S/H₂에 의한 두께감소에서 탄화수소 유형별 온도와 H₂S 농도에 따른 9Cr강의 TMSF 변화는 Fig. 2(c)에서와 같다. 나프타의 경우 TMSF는 황화수소 농도가 0.002 mol% 이하에서는 온도에 민감하지 않았으나, 황화수소 농도가 각각 1 mol% 이상, 0.06~0.1 mol%, 0.006~0.01 mol%에서는 약 600°F, 700°F, 800°F 이상에서 급격하게 증가하였다.

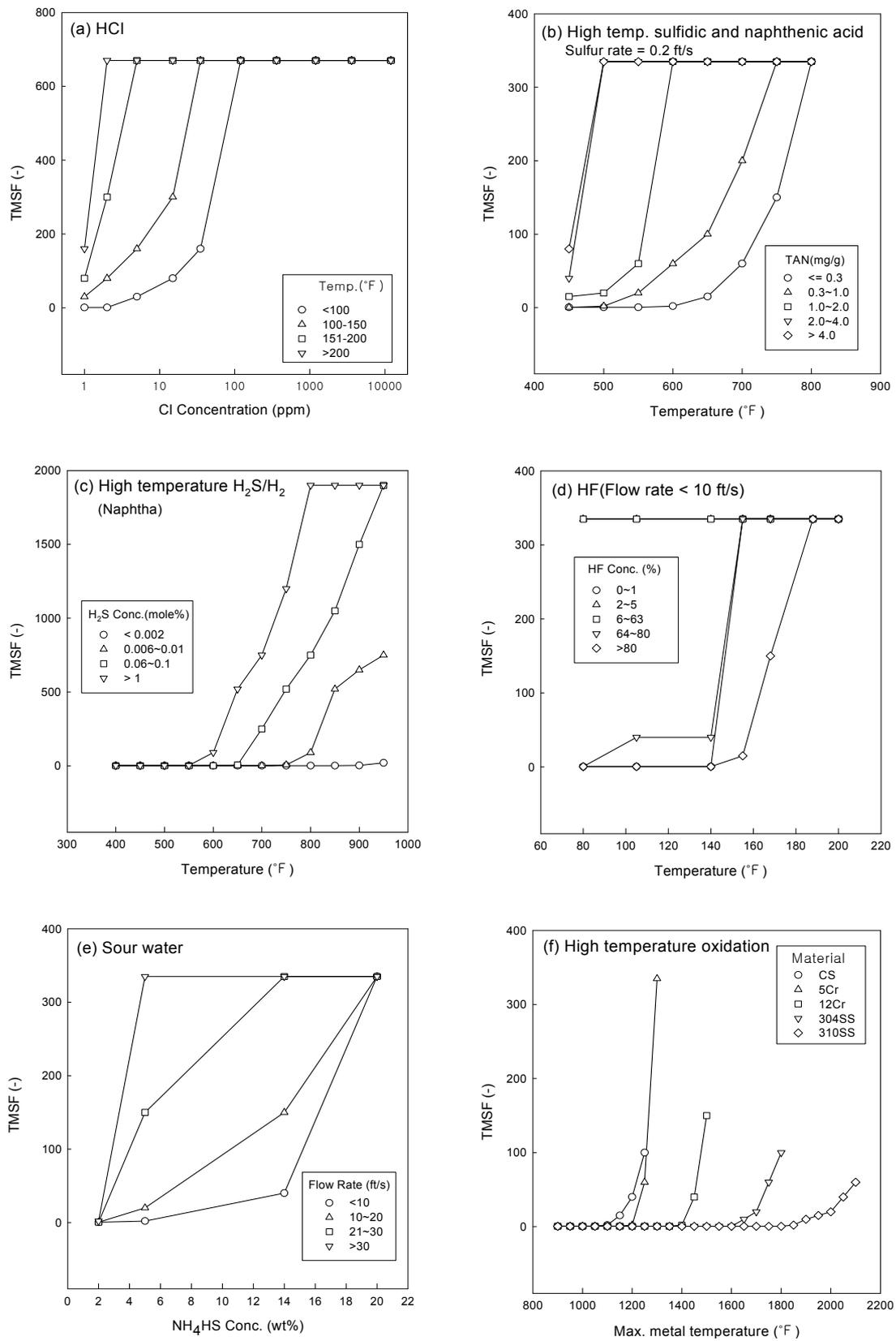


Fig. 2. Effect of thinning type on TMSF with various chemical at standard condition.

특히, 황화수소 농도가 1 mol% 이상에서는 약 800°F 이상에서 TMSF 값이 최대값을 나타내었다. 또한 가스오일의 경우는 나프타보다 TMSF가 민감하게 변화하는 온도시점이 낮아져서 황화수소 농도가 1 mol% 이상, 0.06 ~ 0.1 mol%, 0.006 ~ 0.01 mol%, 0.002 mol% 이하에서 각각 약 500°F, 600°F, 700°F, 850°F에서 급격하게 증가하였다.

Fig. 2(d)는 불화수소산 부식에서 불화수소의 온도와 농도에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 것으로, 유속이 10 ft/s 이하일 때 농도가 2 ~ 5%와 6 ~ 63%인 경우는 전 온도범위에서 TMSF가 최고값을 나타내었으며, 나머지의 농도에서는 140°F 이상에서 급격하게 증가하는 경향을 나타내어 부식율에서와 같은 경향을 나타내었다. 또한 유속이 10 ft/s 이상일 때 농도가 2 ~ 5%와 6 ~ 63%인 경우 전 온도범위에서 TMSF가 최고값을 나타내었으며, 나머지 농도에서는 80°F 이상의 온도에서 최고값에 도달하였다.

산성수 부식에서 NH₄HS 농도와 유속에 따른 TMSF의 변화를 나타낸 Fig. 2(e)에서와 같이, TMSF는 NH₄HS 농도가 2 wt%일 때 최대값에 도달하였으며, 21 ~ 30 ft/s에서는 2 ~ 14 wt%의 범위에서 민감하게 증가하였다. 그리고 10 ~ 20 ft/s에서는 2 ~ 20 wt% 농도에서 서서히 증가하였고, 유속이 낮은 10 ft/s 이하에서는 14 wt% 이상에서 급격하게 증가하였다.

Fig. 2(f)는 고온산화에서 최고 금속온도에 대한 각 재질별 TMSF의 변화를 나타낸 것으로, TMSF는 부식율에서와 같이 최대 금속온도가 증가할수록 증가하였으며, 이때 탄소강(CS)과 5크롬강(5Cr)은 약 1100 ~ 1200°F, 12크롬강(12Cr)은 1400°F, 304계열 스테인리스강(304SS)은 1600°F, 그리고 310계열 스테인레스강(310SS)은 약 1800°F 이상에서 급격하게 증가하였다. 또한 5크롬강(5Cr)의 TMSF 최대값은 약 350을 나타내어 다른 재질에서 보다 낮은 온도에서 큰 값을 나타내었다.

두께감소모듈에서 TMSF에 미치는 매개변수의 영향은 부식의 종류에 따라 다소 차이가 있었으나 일반적으로 사용년수가 작고, 두께가 큰 경우 민감하게 변화하는 범위가 줄어들었으며, 검사횟수의 증가, 검사 유효성의 감소, 과설계계수의 증가에 따라 TMSF의 최대값이 감소하였다.

결론

API-581에 의한 위험기반검사에서의 두께감소에 의한 사고발생 가능성을 해석한 결과, 기술중속계수(TMSF)는 화학물질 농도, 온도 및 검사 유효성 등급이 증가할수록 증가하였으나, 검사횟수와 설비두께가 증가할수록 감소하였으며, 모니터링이 있는 경우와 과설계계수가 1.5배 이상인 경우에 상당히 적은 값을 나타내었다. 이때, 검사횟수, 검사 유효성 등급 및 과설계계수의 크기에 따라 TMSF가 민감하게 변화하였으며, 모니터링은 TMSF의 크기만을 변화시켰다.

참고문헌

1. Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries", Butter-worths, London (1980).
2. Kletz, T. A., "What Went Wrong", Gulf publishing Co., Houston, TX(1986).
3. KAERI, "The 7th Korea-Japan PSA Workshop", Korea Atomic Energy Research Institute, May(2002).
4. ASME, "Risk-Based Testing : Development of Guidelines", Center for Research and Technology Development(CRTD), 40(1), American Society of Mechanical Engineers, (2000).
5. ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, 20(1), American Society of Mechanical Engineers(1994).
6. API 580, "Risk-Based Inspection", American Petroleum Institute, New York(2001).
7. API, "RBI Basic Resource Document : API 581", American Petroleum Institute (2000).