위험기반검사에 의한 화학설비의 위험도 경감방안

이헌창* · 최성규 · 조지훈** · 김태옥
한국안전이엔씨* · 한국산업안전공단** · 명지대학교 화학공학과

Methods for Reducing Risks of the Chemical Facilities by Risk Based-Inspection

Hern-Chang Lee* · Sung-Kyu Choi · Ji-Hoon Jo** · † Tae-Ok Kim
*Korea Safety Engineering and Consulting**
*Korea Occupation Safety Healthy and Agency***
Department of Chemical Engineering, Myongji University

1. 서 론

낡은 장치들은 유지·보존 상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하거나 보수해야 될 필요성이 있으며, 이를 해결하기 위해 최근 미국석유협회(API)에서 개발된 위험기반검사(risk based-inspection, RBI)는 위험에 기반하여 검사의 우선순위를 결정하고, 검사에 소요되는 자원을 관리하기 위한 검사방법이다[1,2]. 최근 국내에서도 위험기반검사에 대한 관심이 많아지고 있으나 대부분 RBI에 대한 알고리즘을 정확하게 이해하지 못하고 있다. 또한 API-581 절차서[3]에 의해 국내 환경에 맞는 RBI를 개발하였으나, 단지 검사주기 산정에만 치우치고 있고, 설비에 대한 위험도를 경감할 수 있는 방법은 제시를 하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 API-581 절차에 근거하여 한국 실정에 적합한 위험기반검사 프로그램을 개발하고, 이를 화학공장에 적용하여 설비의 위험성을 평가하고, 이를 바탕으로 위험도를 경감할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 위험기반검사

2.1. KS-RBI 프로그램

한국형 위험기반검사(KS-RBI Ver 3.0) 프로그램은 API-581 절차서[3]를 바탕으로 개발된 종합알고리즘[4]으로부터 NACE[5] 부식률 DB, ASME B31.3[6] 재질 DB 등을 구축하고 있으며, 재질은 KS, JIS, DIN 등과 호환된다.

RBI 프로그램의 수행은 RBI 팀[7]에 의해 P&ID와 PFD를 이용하여 시스템화(유체흐름, 장치 상세구분, 인벤토리 영역 등의 설정)를 수행하고, 설비에 대한 자료를 수집한다. 그리고 설비의 위험을 규명하고, 위험으로부터 사고발생 가능성과 피해크기 예측을 통해 설비별 위험도를 산출한 후 이를 반영하여 검사계획과 위험경감방안을 수립하도록 하고 있다.

2.2. 데이터 입력

화학공장인 D사의 H 공정에 대해 KS-RBI 프로그램을 사용하여 위험기반검사를 수행하였다. 유체와 설비에 대한 정보를 시스템화[7]를 통해 취득하였으며, 이때 입력된 대상설비는 고정설비 11기와 배관 23기이었다. 또한 시스템화를 통해 입력된 유체정보는 유체명을 포함한 22개 항목, 고정설비의 경우 설비명 및 설비형태 등을 포함한 44개 항목, 배관의 경우 설비명 및 배관사양 등을 포함한 49개 항목이었다. 이때, 시스템화에 의해 나누어진 구역, 즉 인벤토리 그룹은 Table 1과 같이 검출시스템, 차단시스템 및 완화시스템에 대하여 등급을 부여하였다. 그리고 검출시스템은 누출이 발생될 경우 이를 검출하는 시스템으로 완전자동(A), 반자동(B), 육안(C)로 구분하였고, 차단시스템은 누출로 인해 사고발생시 이를 차단하기 위한 시스템으로 완전자동(A), 반자동(B), 수동(C)로 구분하였다. 또한 완화시스템은 자동 또는 반자동차단시스템(A), 살수시스템과 방수총(B), 방수총(C) 및 소화거품 분사시스템(D)로 구분하였다.

Table 1. Setting of system ranking for inventory group

No.	Inventory Group Name	검출시스템	차단시스템	완화시스템
1	INV-11	A	B	B
2	INV-12	A	C	B
3	INV-13	A	B	B
4	INV-14	A	B	B
5	INV-15	A	B	B

3. 결과 및 고찰

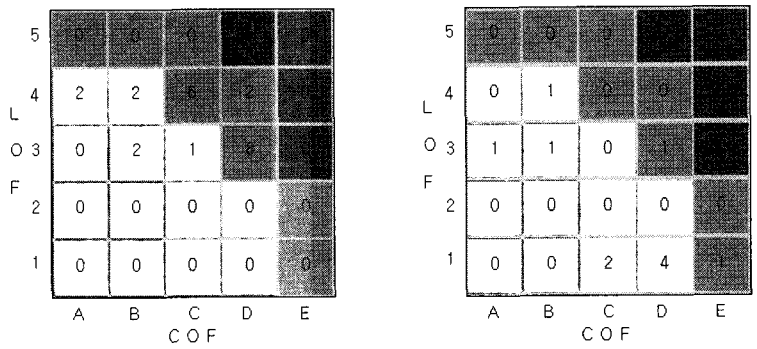
위험도 경감방안을 제시하기 위하여 사고 피해크기에 영향을 주는 시스템 순위와 사고발생 가능성에 영향을 주는 손상메카니즘, 검사 횟수 등에 대하여 분석하였다.

3.1. 공정설비의 위험도 분포

H 공정에서 공정설비의 위험도 분포는 고위험도 설비는 없었고, 중상위험도 설비가 18개로 약 52.94%, 중위험도가 12개로 약 35.29%, 그리고 저위험도는 4개로 약 11.76%를 차지하였다. 이때, 고정설비 및 배관에서의 위험도 분포는 Fig. 1과 같으며, 배관의 위험도 분포는 중상위험도 16개(69.57%), 중위험도 5개(21.74%), 그리고 저위험도 2개(8.70%)이었다. 또한 고정설비의 위험도 분포는 중상위험도 2개(18.18%), 중위험도 7개(63.64%), 그리고 저위험도 2개(18.18%)이었다. 특히, 배관에서는 보온된 상태에서 운전되고 있어 외부부식에 의한 손상메카니즘이 있어서 고장발생 가능성이 높게 나타났으며, 고정설비에서는 저장 용량이 많기 때문에 사고발생시 화재 또는 폭발의 위험이 클 것으로 예측되었다.

고정설비 및 배관에서의 활성중인 손상메카니즘은 유체흐름에 의한 두께감소와 외부부식이 예측되었으며, 외부부식의 경우 보온 및 부식이 예측되어 향후 검사에서는 보온재를 제거하고 외부검사를 수행할 필요가 있는 것으로 나타났다.

또한 내부부식의 경우 부식률은 2 mpy 이하로 나타났으며, 전면부식의 형태로 발생되는 것으로 예측되었다. 또한 손상메카니즘이 예측되는 설비는 배관이 67.65%, 열교환기 20.59%, 반응기 8.82%, 그리고 필터 2.94%를 차지하였다.



(a) Pipe (b) Static gacilities

Fig. 1. Risk distributions of static facilities and pipes.

3.2. LOF에 의한 위험 경감방안

Fig. 1에서 배관과 고정설비의 고장발생 가능성 등급(LOF)을 비교하면 전반적으로 배관에서 고장발생 가능성이 높게 나타났다. 이것은 배관이 보온재로 보온되어 있기 때문에 손상메카니즘이 보온 밑 부식(corrosion under insulation, CUI)이 예측되기 때문이다. 또한 D 사업장의 경우 설치 후 현재까지 배관에 대하여 검사를 수행하지 않았기 때문에 실제 외부부식이 발생되는지를 확인할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 배관에 대하여 외부부식이 발생되지 않는다는 경우에 배관에서의 위험도 행렬을 나타낸 것이다. 대상 배관에서 보온된 설비는 3개로, Fig. 1(a)의 위험도 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/3에서 Fig. 2의 B/2로 1개, 그리고 D/3에서 D/2로 1개의 설비가 LOF 등급이 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 검사를 수행함으로써 설비의 신뢰성을 높이고, 사고발생 가능성 등급을 낮출 수 있을 것으로 판단되었다.

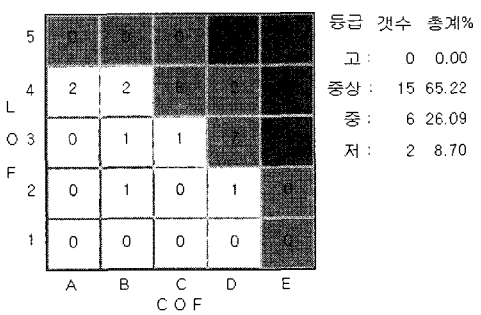


Fig. 2. Risk distributions of pipes for non-existence of external corrosion.

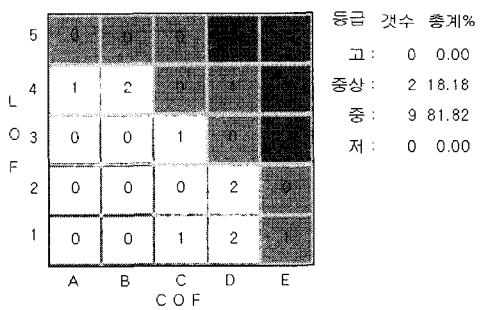


Fig. 3. Risk distributions of static facilities for non-execution of inspection.

고정설비는 법적으로 재검사를 수행하도록 되어있기 때문에 주기적으로 검사를 실시하고 있다. 본 연구에서 검사횟수에 의한 경감방안을 제시하기 위하여 고정설비에서 검사를 하지 않은 것으로 가정하고, Fig. 3과 같이 고정설비의 위험도 행렬을 나타내었다. Fig. 1(b)의 위험도 행렬에서 COF/LOF 등급이 A/3 등급의 1개가 A/4로 이동하였고, B/3 등급의 1개가 B/4로, C/1 등급의 1개가 C/3으로, 그리고 D/1 등급 2개가 D/2로 각각 이동됨을 알 수 있다. 즉, 고정설비에서 검사를 수행하지 않은 것으로 가정한 경우 설비의 신뢰성이 낮아져서 사고발생 가능성 등급이 높아짐을 알 수 있다. 따라서 배관에서 검사를 수행할 경우에는 고장발생 가능성 등급이 전체적으로 낮아지게 됨을 알 수 있었다.

LOF에 크게 영향을 미치는 인자는 부식률로, 부식이 심각하게 발생될 경우에는 LOF 값이 증가하게 된다. KS-RBI Ver 3.0 프로그램은 NACE의 부식률을 DB화 하였는데, NACE 부식률은 보수적인 방법으로 공정조건에서 최대값을 사용하고 있다. 따라서 검사를 통해 측정 부식률을 구하고 이를 반영한다면 LOF 값은 낮아 질 수 있다.

H 공정에서 부식률은 전반적으로 2 mpy 이하로 예측되었으며, 위험도 행렬에서 COF/LOF 등급이 D/4인 1개의 배관에 대해 부식률을 1 mpy로 가정하고, 위험도를 산출한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 COF/LOF 등급이 D/4인 설비는 D/3 등급으로, LOF 등급이 낮아짐을 알 수 있다.

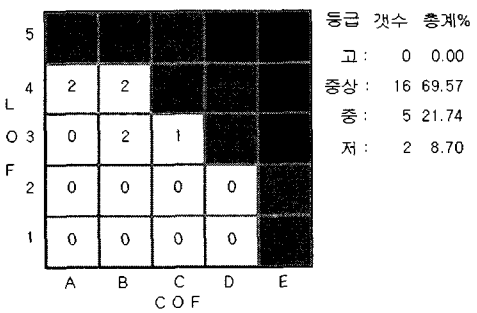


Fig. 4. Risk distributions of pipes for low corrosion rate(1 mpy).

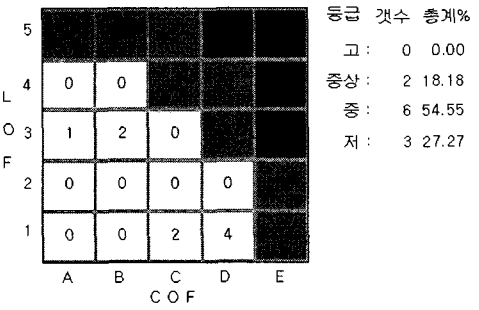


Fig. 5. Risk distributions of static facilities for highly inspection effectiveness.

또한 LOF 등급에 의해 위험도를 경감하기 위한 노력으로는 검사 유효성 등급을 들 수 있다. 즉, 검사를 수행함에 있어서 검사수준을 엄격하게 하는 경우와 보다 덜 엄격하게 하는 경우를 들 수 있는데, 이것은 엄격하게 검사를 수행할 경우 검사의 신뢰도를 높이는 반면에, 보다 덜 엄격하게 수행할 경우에는 신뢰도를 낮출 수 있기 때문에 LOF 등급에 영향을 주게 된다.

Fig. 1(b)의 위험도 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/4 등급인 설비는 이전 검사에서 효과적(fairly)인 수준으로 검사를 수행하였으나 매우 효과적(highly)로 검사를 수행하였다고 가정할 경우 Fig. 5의 행렬에서 COF/LOF 등급이 B/3 등급으로 낮아짐을 알 수 있다.

3.3. COF에 의한 위험 경감방안

사고의 피해크기는 누출속도 및 누출량, 그리고 누출 지속시간에 의해 결정된다. 이때, 누출속도 및 누출량은 공정조건 및 누출 시나리오에 영향을 받으며, 운전과 관련하여 변경이 어려운 변수이다. 그러나 누출 지속시간은 검출시스템과 차단시스템에 의해 영향을 받으므로, 시스템을 보완함으로써 단축할 수 있다.

Table 2는 차단시스템의 변경 전후의 설비의 위험도 변화를 나타낸 것으로, 이때 인벤토리 그룹은 INV-11에서 15까지의 검출시스템은 모두 A등급이었고, 차단시스템은 INV-12는 C등급이었으며, 나머지는 모두 B등급이었다. 따라서 INV-12에서 차단시스템에 대해 완전자동(시스템 상에서 차단)으로 제어할 수 있는 밸브를 설치하였다고 가정하고, 위험도를 분석하였다.

Table. 2. Comparisons of consequence area for before/after change of isolation system

장치번호	장치형태	COF	위험도	차단시스템(C등급)		차단시스템(A등급)	
				가중장치 피해(ft^2)	가중상해 영역(ft^2)	가중장치 피해(ft^2)	가중상해 영역(ft^2)
400-1-P-4256-F1	Pipe-1	B	저	63	157	47	119
400-2-P-4274-F1	Pipe-2	C	중	358	857	270	650
400-3-P-4252-F1	Pipe-4	D	중상	2373	6523	1909	5217
400-4-P-4250-A1	Pipe-4	D	중상	1305	3556	1055	2854
V-156	Tank	E	중상	37241	110908	30265	89367

Table 2에서 COF 및 위험도 등급은 차단시스템 변경 전후에 대하여 변화가 없었으나, 가중평균에 의한 장치피해 및 상해영역은 차단시스템 A등급인 경우가 C등급인 경우보다 감소됨을 알 수 있다. 즉, 가중 피해범위가 변경될 경우 COF 등급은 변경이 가능하며, 이에 따라 위험도 등급도 변경될 수 있음을 의미한다.

소(1/4 inch), 중(1 inch), 대(4 inch), 파열(직경 또는 16 inch)의 4가지 누출 시나리오에 대해 누출공에 의한 피해범위는 Table 3과 같이 누출공이 작은 경우에는 크게 차이가 나지 않으나, 파열인 경우는 상당히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 시스템 조건을 변경시킴으로써 피해범위를 줄이고, 설비의 위험도 등급을 경감할 수 있을 것으로 판단된다.

Table. 3. Comparisons of consequence area for various release scenarios

장치번호	피해 (ft^2)	차단시스템(C등급)				차단시스템(A등급)			
		소	중	대	파열	소	중	대	파열
400-1-P-4256-F1	장치	28			417	21			314
	상해	71			1,018	54			772
400-2-P-4274-F1	장치	32	480		1,867	24	362		1,409
	상해	82	1,169		4,422	62	887		3,355
400-3-P-4252-F1	장치	54	822		45,484	41	620		36,974
	상해	138	1,980		127,541	105	1,502		102,789
400-4-P-4250-A1	장치	15	231		27,089	12	174		22,021
	상해	40	571		74,337	30	433		59,910
V-156	장치	17	253	28,926	212,941	13	191	23,515	173,103
	상해	44	623	79,598	636,781	33	473	64,150	513,199

3.4. 종합적인 위험 경감방안

고위험도 설비의 경우 위험도를 낮추기 위해 사고발생 가능성(LOF)과 사고결과 크기(COF)를 동시에 낮출 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 즉, 검사가 수행되지 않은 설비에 대해서는 검사를 수행하여 설비의 신뢰도를 높이고, 검사수준을 엄격(매우 효과적)하게 수행하여야 할 것이다. 또한 검사를 수행함에 있어서 예측된 손상메카니즘에 대한 확인과 정확한 두께 측정이 병행되어야 한다. 그리고 시스템에 대한 위험도를 고려하여 검출 및 차단 시스템의 수준을 결정해야 할 것이다.

4. 결 론

API-581 절차에 따라 개발한 한국형 위험기반검사 프로그램(KS-RBI Ver 3.0)을 화학설비에 적용하여 화학설비의 안전성을 평가하고, 설비의 위험도를 경감시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 그 결과, 위험도를 낮추기 위해 사고발생 가능성(LOF)와 사고결과 크기(COF)를 동시에 낮출 수 있는 방안을 제안하였다. LOF의 위험 경감방안으로 손상메카니즘, 검사횟수, 검사 유효성 등을 고려할 수 있으며, COF의 위험 경감방안으로는 검출 및 차단, 완화시스템의 수준을 최상의 조건으로 하여 위험도를 낮출 수 있도록 하여야 한다.

따라서 설비에서 위험도를 경감함으로써 검사주기는 자연적으로 확장될 것이며, 검사주기 연장으로 인한 검사비용 및 인건비 절감 등을 기대할 수 있다.

5. 참고문헌

1. API, *Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580*, American Petroleum Institute, New York, (2001)
2. CRTD/ASME, *Risk-Based Inspection - Development of Guidelines*, American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, (1991)
3. API, *Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API-581*, American Petroleum Institute, New York, (2000)
4. KOSHA, *Development of K-RBI Program Ⅱ*, Korea Occupational Safety & Health Agency, Technical Manual, (2005)
5. NACE, *Corrosion Data Survey - Metals Section*, National Association of Corrosion Engineers International, 6th Ed., Houston, Taxas, (1985)
6. ASME, *Process Piping : ASME Code for Pressure Piping, B31.3*, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1999)
7. 이헌창, 신평식, 임대식, 김태옥, "한국형 위험기반검사(K-RBI)의 절차 개발", *한국안전학회지*, **21**(2), 31-37, (2006)