

석유화학플랜트 전용 KGS-RBI 프로그램 개발을 위한 공정대표물질 선정 및 피해결과 분석

박병섭*, 한상인¹, 최송천¹, 김지윤¹, 정태수
 성균관대학교 화학공학과, ¹한국가스안전공사 가스안전연구개발원
 (qudtjq@skku.edu*)

Selection of Process Representative Materials and Analysis of Consequence for Developing KGS-RBI Program of a Petrochemical Plant

Byung-Sub Park*, Sang-In Han¹, Song-Chun Choi¹, Ji-Yoon Kim¹, Tai-Soo Chung
 Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University;
¹Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
 (qudtjq@skku.edu*)

1. 서론

석유화학, 정유, 가스, 화력, 원자력 설비 등 중대 산업설비는 관련기술의 발전과 더불어 설비시설이 복잡·다양화되고 있으며, 생산효율을 증가시키기 위하여 고온, 고압의 조건하에서 운전하는 반응기, 저장탱크, 압력용기, 배관 등 장치류들이 증가하고 있다. 이러한 장치류들은 설치 후 가동시간이 늘어남에 따라 점차 노후화되어 파손에 의한 대형사고의 가능성은 어느 때보다 더욱 높아지고 있다. 사고의 가능성을 줄이기 위해 일부 노후설비들은 보수, 교체 및 폐기되고 있으나, 경제적·환경적 요인으로 이들의 일부는 수명연장에 의한 설비운영이 불가피한 실정이다. 따라서 노후화된 장치류들의 유지보존상태, 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야 될 필요성이 대두되면서 효율적이고 보다 선진화된 안전관리기법의 도입이 필수적이 되고 있다. 이러한 필요성에 적합한 기법이 RBI(Risk Based Inspection: 위험기반검사)이므로, 이에 대한 연구, 도입, 적용이 활발하게 이루어지고 있다.

RBI는 정유, 석유화학, 발전 설비등 광범위한 분야에서 응용되고 있다. 공정설비 분야에서는 API(American Petroleum Institute)가 20여 개의 업체와 공동 컨소시엄을 구성하여 5년간의 연구과제 수행결과로 제정한 API 581 절차가 대표적이다. 이 절차는 정유·석유화학 설비의 위험도 평가, 진단계획 수립에 활용되고 있다.

이에 API 581의 RBI base resource document에 포함된 평가절차에 따라 정성적·준정량적·정량적 RBI 알고리즘에 기초하여 정유플랜트용 KGS-RBI(Korea Gas Safety - Risk Based Inspection)를 개발하였으며 국내 정유회사에 적용하여 결과의 타당성을 이미 입증하였다. 하지만 석유화학플랜트에서는 API 581에서 제시하는 공정대표물질 이외에 다양한 공정물질이 사용됨에 따라 그에 따른 누출률, 누출지속시간, 누출유형, 누출가능량 및 각 누출시나리오에 따른 화재 및 폭발에 의한 피해와 독성에 의한 피해 등 피해결과분석(consequence analysis)은 매우 복잡하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 석유화학플랜트의 up-stream에 해당하는 NCC플랜트에서 사용되는 공정대표물질을 선정하고 API 581에서 제시하는 각종 수식적용을 통하여 확률론적 방법에 근거한 피해영향을 정밀 분석하였다.

2. 이론

2.1 RBI 절차

RBI에서 사용되는 위험도(risk)는 식 (1)로 표현된다.

$$\text{위험도} = \text{파손빈도} \times \text{파손피해} \quad (1)$$

여기서 파손빈도(likelihood of failure)는 정성적 또는 정량적 분석에 따라 장치나 설비가 파손될 수 있는 확률이나 일년 당 파손 횟수로 정의하고 파손피해(consequence of failure)는 한 건의 파손이 발생했을 경우 그 피해 정도를 피해면적 또는 피해손실액으로 정의한다. 포괄적인 RBI 절차는 각각 설비별로 위험등급 또는 위험도를 산정하고 이에 따라 검사의 우선 순위, 방법, 주기 및 일정계획 등을 수립하여 기술적인 근거에 의해 종합적이고 체계적인 검사를 수행하는 것이다.

이와 같이 RBI는 위험도를 정성적 또는 정량적으로 평가하여 전체 플랜트 위험도의 대부분을 차지하고 있는 20% 내외의 대상 설비를 찾아내어 이에 대해 최적의 방법으로 인적, 물적 자원을 집중적으로 투입함으로써 효율적인 안전성 확보와 함께 유지관리 경제성을 추구하는 기법이라 할 수 있다.

2.2 준정량적 RBI의 파손피해 분석절차

준정량적 RBI는 일부 공정이 아닌 전체 공정 및 설비 데이터를 가지고 해석해야 된다. 어떠한 누출이 발생하고, 그 누출이 어떠한 상황으로 진전되는지 결정하기 위해 여러 가지 지정된 누출시나리오를 고려하며 각각의 시나리오에 대해서 위험도를 결정한다. 준정량적 RBI에서는 위험 물질 누출에 의한 파손피해는 아래와 같이 9단계 절차를 수행하여 평가된다.

1. 대표물질을 결정한다.
2. 누출시나리오를 결정한다.
3. 누출 가능량을 결정한다.
4. 누출률을 결정한다.
5. 누출유형을 결정한다.
6. 대기로 누출될 때 유체의 상태를 결정한다.
7. 누출 후 감시·차단 시스템 효과를 결정한다.
8. 파손에 의한 피해면적을 평가한다.
9. 피해면적에 의한 파손피해 범주를 결정한다.

API 581의 대표물질 결정단계는 실제 정유·석유화학플랜트 공정 내에서는 단일단상의 유체를 사용하는 경우가 거의 없고, 혼합유체를 사용하고 있는 경우가 대부분이다. 혼합유체인 경우는 우선 비등온도, 몰무게를 식 (2)에 적용하여 Table1에서 가장 유사한 대표물질을 선택하여야 한다. 유사한 물질의 선택이 어려울 경우에는 밀도까지 식 (2)에 적용하여 Table 1에서 가장 유사한 대표물질을 선택한다.

$$(\text{property})_{\text{mix}} = \sum x_i \times (\text{property})_i \quad (2)$$

여기서 x_i 는 혼합물질의 몰분율이고 $(\text{property})_i$ 는 비등온도, 몰무게, 밀도 등이다.

하지만 본 연구에서는 PFD(Process Flow Diagram) 및 P&ID(Piping and Instrumentation Diagram)를 참고하여 대상설비의 입·출량에 해당하는 물질을 대표물질로 선정함으로써 API 581에서 결정하는 공정대표물질을 보다 세분화하여 석유화학플랜트의 다양한 물질에 적합하도록 하였다.

Table 2는 NCC 플랜트의 설비들을 중심으로 입·출량의 물질을 조사한 것이다.

Representative material	Example of applicable material	Unit	Feed	Product	Intermediate/By-product	Others
C ₁ - C ₂	Methane, ethane, ethylene, LNG	NCC	Naphtha	Ethylene	Ethane	Acid Gas
C ₃ - C ₅	Propane, butane, isobutane, LPG			Propylene	Propane	Amine Solution
C ₅	Pentane			Butadiene	Buthane	Tail Gas
C ₆ - C ₈	Gasoline, naphtha, light straight run, heptane			Aromatics	Hydrogen	H ₂ S
C ₉ - C ₁₂	Diesel, kerosene				Pyrolysis gasoline (C ₅ ~C ₉ ⁺)	
C ₁₃ - C ₁₆	Jet fuel, kerosene, atmospheric gas				Mixed C ₄	
C ₁₇ - C ₂₅	Gas oil, typical crude					
C ₂₅₊	Residuum, heavy crude					
H ₂	Hydrogen only					
H ₂ S	Hydrogen sulfide only					
HF	Hydrogen fluoride					
Water	Water					
Steam	Steam					
Acid(low)	Low-pressure acid with caustic					
Acid(medium)	Low-pressure acid with caustic					
Acid(high)	Low-pressure acid with caustic					
Aromatics	Benzene, toluene, zylene					
Styrene	Stylene					

Table 2. NCC 플랜트의 새로운 공정대표물질

Table 1. API 581에서 규정한 공정대표물질

3. 결과 및 고찰

NCC 플랜트내의 컬럼 16개의 상부와 하부, 32기 장치의 파손피해 데이터와 인벤토리 그룹 모듈을 통해서 계산된 누출 가능량 값을 사용해 평가한 화재 및 폭발에 의한 장치 피해면적, 인명 피해면적, 독성에 의한 독성 피해면적 등의 파손 피해 평가결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3은 API 581 코드에 맞춰 파손빈도 및 파손피해 모두 작업한 A항과 파손빈도 평가결과를 고려하지 않고 순수히 파손피해 평가결과만 평가한 B항이 있으며 새로운 공정대표물질을 각 수식에 대입하여 얻은 C항으로 이루어져 있다.

Table 3의 파손피해를 분석한 결과 장치번호 N-DA-235TOP인 spent caustic stripper의 top부는 독성에 의한 피해면적이 5,295.47m²로 가장 크게 평가되었다. 이유는 이 spent caustic stripper가 길이 10,750mm, 직경 1,400mm로서 타 장치에 비해 크기가 작지만, 누출 시의 대표물질인 독성이 황화수소가 약 37.5%를 차지하기 때문이다. 또한 C항은 새로운 공정대표물질을 대입한 값으로서 4,987.06m²로 가장 크게 평가되었지만 A항에 비해 308.41m² 낮은 수치를 나타내었다. 그 이유는 누출 시의 황화수소로 인한 피해는 똑같으나 A항은 API 581 코드에 명시돼 있는 공정대표물질 C1-C2의 평균 물성값을 사용하여 파손피해를 분석하였지만 C항은 이 장치에 맞는 ethane의 물성값을 사용한 차이이다.

Type	Equipment Damage			Potential Fatality			Toxic			Risk		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
N-DA-101-TOP	52.37	55.91	0	104.74	116.76	0	6.83	1.8	1.82	104.74	116.76	1.82
N-DA-101-BTM	146.64	317.98	0	596.13	937.44	0	0	0	0	596.13	937.44	0
N-DA-102-TOP	66.34	30.35	0	118.25	97.79	0	0	0	0	118.25	97.79	0
N-DA-102-BTM	28.84	10.41	0	127.51	29.87	0	0	0	0	127.51	29.87	0
N-DA-103-TOP	0	0	0	17.31	52.75	0	0	0	0	17.31	52.75	0
N-DA-103-BTM	41.44	10.41	0	137.08	29.87	0	0	0	0	137.08	29.87	0
N-DA-104-TOP	33.55	64.04	0	67.1	139.42	0	5.16	3.99	4.17	67.1	139.42	4.17
N-DA-104-BTM	109.6	10.41	0	470.02	29.87	0	0	0	0	470.02	29.87	0
N-DA-105-TOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-DA-105-BTM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-DA-201-TOP	14.42	73.92	0	34.61	184.21	0	2.88	4.18	4.1	34.61	184.21	4.1
N-DA-201-BTM	57.69	14.2	0	161.62	40.26	0	0	0	0	161.62	40.26	0
N-DA-202-TOP	41.44	180.05	0	106.57	439.8	0	0	0	0	106.57	439.8	0
N-DA-202-BTM	86.53	350.39	0	188.99	849.86	0	0	0	0	188.99	849.86	0
N-DA-203-TOP	28.54	127.41	0	59.81	291.09	0	0	0	0	59.81	291.09	0
N-DA-203-BTM	92.6	178.1	0	102.92	435.16	0	0	0	0	102.92	435.16	0
N-DA-204-TOP	50.7	126.88	0	252.75	289.83	0	0	0	0	252.75	289.83	0
N-DA-204-BTM	0	0	0	0	0	0	161.52	166.33	166.33	161.52	166.33	166.33
N-DA-205-TOP	0	0	0	43.26	52.68	0	211.01	102.42	102.42	211.01	102.42	102.42
N-DA-205-BTM	0	0	0	0	0	0	92.9	0.18	0.18	92.9	0.18	0.18
N-DA-235-TOP	75.14	130.06	0	136.62	235.35	0	5295.47	4987.06	4987.06	5295.47	4987.06	4987.06
N-DA-235-BTM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-DA-401-TOP	65.12	287.65	0	133.59	713.47	0	0	0	0	133.59	713.47	0
N-DA-401-BTM	301.93	642.74	0	805.16	1462.28	0	0	0	0	805.16	1462.28	0
N-DA-402-TOP	102.47	201.08	0	204.93	467.16	0	0	0	0	204.93	467.16	0
N-DA-402-BTM	414.42	599.72	0	819.73	1360.63	0	0	0	0	819.73	1360.63	0
N-DA-404-TOP	163.64	266.65	0	442.5	662.41	0	0	0	0	442.5	662.41	0
N-DA-404-BTM	224.52	873.63	0	588.39	2102.67	0	0	0	0	588.39	2102.67	0
N-DA-405-TOP	33.55	116.17	0	88.8	286.79	0	0	0	0	88.8	286.79	0
N-DA-405-BTM	74.99	264.19	0	164.4	620.72	0	0	0	0	164.4	620.72	0
N-DA-406-TOP	178.97	208.7	0	353.85	485.26	0	0	0	0	353.85	485.26	0
N-DA-406-BTM	810.62	275.95	0	2315.74	685.06	0	0	0	0	2315.74	685.06	0

Table 3. NCC 플랜트의 Column에 대한 파손피해결과

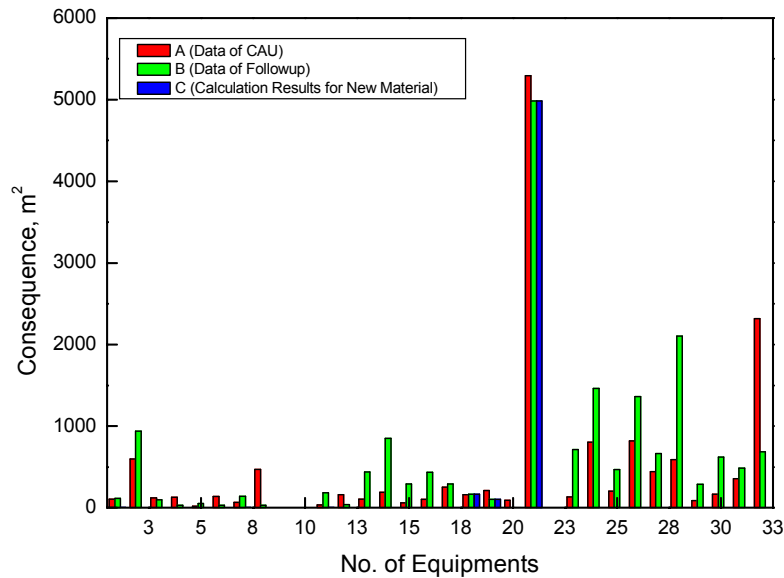


Figure 1. 공정대표물질에 따른 파손피해결과

4. 참고문헌

1. API, 2000, "Risk-Based Inspection Base Resource Document", *API Publication 581*, 1st edition.
2. Shim, S. H., Song, J. S., Kim, J. Y., Yoon, K. B., 2003, "A Study on Implementation of Risk Based Inspection Procedures to a Petrochemical Plant" *Journal of KSME*. vol. 27, No. 2, pp.416~423