



CDU 내 탈황공정의 내부부식 된 파이프라인을 대상으로 한 RBI기법을 이용한 위험성 평가

임동휘 · 정태준 · 이인동 · 정인희 · †고재욱

광운대학교 화학공학과

(2019년 2월 19일 접수, 2019년 6월 20일 수정, 2019년 6월 21일 채택)

Risk Assessment Using RBI for Internal Corroded Pipelines in CDU Desulfurization Process

Donghui Lim · Taehun Jeong · In-Dong Lee · In Hee Jung · †Jae-Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received February 19, 2019; Revised June 20, 2019; Accepted June 21, 2019)

요 약

2010년대에 들어서 노후화된 공정으로 인하여 많은 공장들의 안전이 보장되지 않은 채로 가동되고 있다. 공정 및 설비의 노후화 문제를 근본적으로 해결하기는 어렵지만, 사전에 위험성 평가로 위험을 예방할 수 있다. 본 연구는 CDU(Crude Distillation Unit)의 탈황 장비에 있는 배관에서 황으로 인한 부식을 타겟으로 지정하였고, API RP 581를 참고한 RBI(Risk Based Inspection)기법으로 위험성 평가를 실시하였다. RBI 기법은 Frequency와 Consequence의 조합으로 Risk를 표현하고, 이들을 바탕으로 Risk Matrix를 만든다. 본 연구는 배관의 Hole Size를 Small과 Medium으로, Frequency의 감도는 'Low'로 선택하여 진행하였다. 기준을 통해 만들어진 Risk Matrix를 참고하여 배관에서 황으로 인한 부식의 사고 위험성을 평가하고 향후 사고 방지 계획을 세울 수 있다. 또한 이와 비슷한 방법으로 노후화에 대한 예방을 한다면 보이지 않는 크고 작은 사고들도 예방할 수 있다.

Abstract - in 2010s, many factories are operating without any safety guarantees due to the aging process. Although it is difficult to fundamentally solve the problem of aging process and equipment, Prevent risk by risk assessment in advance. This study targets the corrosion caused by sulfur in the piping in the CDU(Crude Distillation Unit) process desulfurization equipment and conducts the risk assessment by RBI(Risk Based Inspection) referring to API RP 581. RBI expresses the risk by combining frequency and consequence, and creates a risk matrix based on these expression. In this study, the hole size of the pipe was selected as Small and Medium, and the sensitivity of the frequency was selected as 'Low'. You can refer to the Risk Matrix created from the standard to evaluate the risk of corrosion of sulfur from pipes in the piping and to plan future accident prevention. Similarly, prevention of aging in a similar way can prevent large and small incidents that are not visible.

Key words : RBI, API 581, CDU, pipelines, sulfur, risk matrix

I. 서 론

산업 설비들은 시간이 지남에 따라 노후화되지

만 경제적 비용 때문에 적절한 유지, 보수가 어렵다. 따라서 노후화된 설비들의 상태에 따라 효과적이고 적절한 시기에 보수 및 검사할 필요가 있으며 이를 통해 안전성을 확보해야 한다. 가장 적합한 기법이 RBI이다.

RBI 기법은 Frequency와 Consequence를 조합

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

하여 Risk를 산출하고 설비의 검사 및 보수의 우선 순위를 결정하는 위험성 평가 기법이다. API는 공정 설비 분야에서 API RP 581 코드를 개발하여 활용하고 있다. 본 논문에서는 API RP 581에 근거하여 설비의 위험도를 산출하고, Risk Matrix를 통해 경제적인 설비 관리 방안을 선택할 수 있다.

II. CDU

CDU(Crude Distillation Unit)는 원유를 끓는점 차이에 따라 분리하는 공정이다. 구체적으로 원유의 수분과 염분들을 먼저 탈염기(Desalter)에서 제거한다. 가열로(Furnace)에서 340℃까지 가열하여 증류탑(Distillation Column)에서 LPG, Naphtha, 등유, 경유, 중유 등을 생산하고 이외의 불순물을 제거하기 위해 다음 공정으로 이송한다. 원유에 함유된 불순물들은 설비를 부식시키는 노후화의 원인 중 하나이다.

III. RBI

3. 1. RBI

RBI 기법은 산업 플랜트의 압력 용기, 열교환기 및 배관과 같은 장비를 검사하는 데 사용되는 최적의 유지 관리 기법이다. Frequency와 Consequence에 의해 산출한 Risk를 통해 검사체계의 운영과 공정 또는 장치의 검사 우선순위를 결정한다. 또한 안전, 환경 및 사업 수행에 장애를 주는 위험요소를 검토하여 효율적인 방법으로 설비를 관리할 수 있다.

이 기법은 설비나 공장에서 발생할 수 있는 Frequency와 Consequence의 조합인 Risk를 Risk Matrix를 통해 나타낸다. 평가 결과를 바탕으로 안전 검사에 필요한 자원 및 인력의 할당과 검사 주기 등을 결정한다. RBI 기법은 공정 설비의 안전성을 높이고 검사 및 유지 보수비용을 절감하는 위험성 평가 기법이다.

$$\text{Risk} = \text{func}(\text{Frequency}, \text{Consequence})$$

3. 2. API RP 581

미국 석유협회에서 개발 및 게시하는 RBI 수행 최소 가이드라인이다. RBI 기법을 이용하여 검사 프로그램을 확립하기 위한 정량적 절차를 제공한다. API RP 581은 설비 파손 확률(Probability of Failure)과 위험 지역의 넓이(Consequence Area)를 조합하여 위험도를 산출하는 방법론이다.

API RP 581은 가장 위험한 공정 설비에 초점을 맞춘 검사에 의해서 전체적인 공장의 위험을 관리하는데 사용될 수 있다. 이 방법은 검사 빈도, 세부사항의

단계, 그리고 NDT(Non-Destructive Testing)의 유형 결정에 상세한 기준을 제공한다. API RP 581은 유동적이며 여러 단계에 적용될 수 있다. 또한, 공정 유체를 포함하는 설비에 적용될 수 있다.

IV. API RP 581 기반 위험성 평가

4. 1. 대상 공정 선정

본 연구의 대상 공정은 CDU 내 LPG AMINE CONTACTOR 설비이며 Lean Amine Absorption을 통해 불순물인 H2S를 제거한다. H2S는 배관 부식의 큰 원인물질 중 하나이다. 따라서 H2S를 포함한 유체가 흐르는 배관이 부식으로 노후화가 진행되어 위험성이 점차 증가할 것으로 예측했고, 대상 공정으로 선정하였다.

4. 2. Frequency

Risk를 계산하는 주 지표 중 하나인 Frequency는 사고 발생 빈도를 의미한다. 이 논문에서는 API RP 581에 따라 설비 파손 확률인 Probability of Failure로 표현하며, 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P_f(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{MS} \quad (1)$$

$P_f(t)$ 는 Probability of Failure을, gff는 Generic Failure Frequency를, $D_f(t)$ 는 Damage Factor를, F_{MS} 는 Management Systems Factor를 나타낸다. gff의 경우 배관에 따라 API RP 581에서 정한 값을 따른다. 대상 공정에서 사용된 배관은 PIPE-6이므로 Hole Size를 Small, Medium의 단계로 나누어 계산하였다.

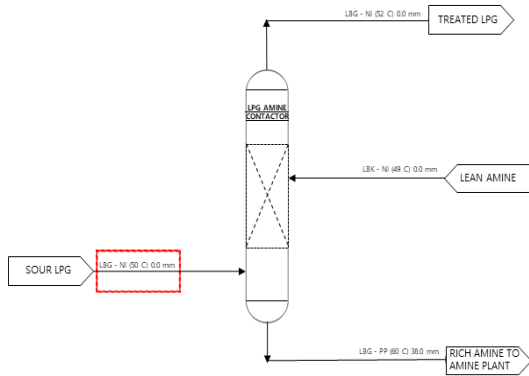


Fig. 1. Desulfurization process in CDU.

CDU 내 탈황공정의 내부부식 된 파이프라인을 대상으로 한 RBI기법을 이용한 위험성 평가

Table 1. gff value suggested by API RP 581

Component type	gff as a function of Hole Size(failures/yr)	
	Small	Medium
PIPE-6	8.00E-06	2.00E-05

Table 2. $D_f(t)$

Abbreviate	Full name
D_f^{thin}	Thinning
D_f^{elim}	Component Lining
D_f^{extd}	External Damage
D_f^{sc}	Stress Corrosion Cracking
D_f^{hta}	High Temperature Hydrogen Attack
D_f^{mfat}	Mechanical Fatigue
D_f^{brit}	Brittle Fracture

본 연구는 CDU 내 배관에 대한 황의 부식만을 볼 것이므로 Damage Factor의 경우 D_f^{sc} 에 대한 값만 계산하기로 한다. $D_f(t)$ 의 종류와 $D_f(t)$ 의 종류 중 하나인 D_f^{sc} 의 종류는 Table 2, 3와 같다

평가진행에서 공장은 20년 되었다고 가정하고 검사는 3년에 한 번씩 진행한다고 하였으며, 계산은 '감도(고/중/저/무)'와 '검사 범주(A/B/C/D/E)'로 결정한다. 감도의 경우 전문가의 조언이나 각종 절차에 따라 결정되며 감도가 낮을수록 위험도는 작아진다. 본 연구에서 감도는 '저'로 선택했다. 검사 범주는 A에 가까울수록 검사 효율이 높고, E에 가까울수록 검사 효율이 낮다.

계산한 값을 바탕으로 API RP 581을 참조하여 어떤 등급에 놓이는지를 확인한다. 등급 기준은 Table 4와 같다.

4. 3. Consequence

Risk의 또 다른 지표인 Consequence는 사고가 발생했을 때 위험의 크기를 말한다. Consequence에는 피해 금액, 예상 인명 피해 등 다양한 지표로 나타난다. API RP 581에서 Consequence는 위험 지역의 넓이(m^2)를 나타낸다. Consequence Analysis는 Level 1과 Level 2 두 가지의 방법이 존재한다. Level 1이 더 단순화된 방법으로 계산 과정이

Table 3. D_f^{sc}

Abbreviate	Full name
$D_f^{caustic}$	Caustic Cracking
D_f^{amine}	Amine Cracking
D_f^{ssc}	Stress Sulfide Cracking
$D_f^{HIC/SOHC-H_2S}$	Hydrogen-Induced Cracking and Stress-oriented Hydrogen Induced Cracking in Hydrogen Sulfide
$D_f^{carbonate}$	Carbonate Cracking
D_f^{PTA}	Polythionic Acid Cracking
D_f^{CLSCC}	Chloride Stress Corrosion Cracking
D_f^{HSC-HF}	Hydrogen Stress Cracking to Hydrofluoric Acid
$D_f^{HIC/SOHC-HF}$	Hydrogen-induced Cracking and Stress-oriented Hydrogen Induced Cracking in Hydrofluoric Acid

Table 4. Frequency criteria

Category	Frequency
1	$P_f(t) \leq 0.00028$
2	$0.00028 < P_f(t) \leq 0.0028$
3	$0.0028 < P_f(t) \leq 0.014$
4	$0.014 < P_f(t) \leq 0.028$
5	$0.028 < P_f(t)$

간단하지만, 몇 가지 대표 유체에서만 사용 가능한 방법이다. 위험성 평가 대상이 된 유체의 물성은 Table 5, 6와 같으며, C3-C4 대표 유체로 설정 가능하므로 Level 1로 계산을 진행한다.

(1) 대표 유체 및 물성 결정

유체의 물 조성에 따라 대표 유체는 C3-C4로 선택한다.

(2) Hole Size 결정

분석 대상이 되는 배관은 'PIPE-6'이다. 따라서 가능한 Hole size는 Small, Medium 두 가지 이다.

Table 5. molar composition of fluid

Component	Mole %
H ₂ S	2.4
Ethane	0.5
Propane	31.8
I-butane	29.6
N-butane	34.7
C _n (단, n ≥ 5)	1.0
Total	100

Table 6. Physical properties of fluid

Temperature[°C]	50
Pressure[barg]	23
Mass Rate[kg/hr]	91,954

Table 7. W_n value according to Hole Size

Hole Size	Small	Medium
W _n [kg/s]	2.620823	23.69695

(3) 방출 속도 계산

대상 유체는 외부로 유출될 때 Gas이다(외부 조건은 1 atm, 25°C). 따라서 방출 속도(W_n)는 다음 식을 이용하여 계산하며, W_n는 파이프가 누출 될 경우 구멍을 통한 유체의 흐름에 관한 식이며 Cd 및 C₂는 배출계수를 정의하며 An은 Hole size, Ps는 압력 그리고 나머지는 음속흐름에 관한 항이다. 계산 결과는 Table 7과 같다.

$$W_n = \frac{C_d}{C_2} A_n P_s \sqrt{\left(\frac{k M W g_c}{R T_s}\right) \left(\frac{2}{k+2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2)$$

(4) 방출 유형 결정

방출 유형을 Continuous 혹은 Instantaneous로 선택한다. Continuous 유형은 서서히 일정한 양이 누출되는 것이며, 임의의 Hole에 의해 10,000 lbs[4,536 kg]의 유체가 방출되는 데 필요한 시간을

Table 8. emission type according to hole size

	Small	Medium
D _n [mm]	6.4	25
W _n [kg/s]	2.62	23.70
t _n [s]	1730.75	191.42
방출 유형	Continuous	Continuous

Table 9. Hole Size에 따른 rate_n^{tox} 값

Hole Size	Small	Medium
rate _n ^{tox} [kg/s]	0.062899752	0.5687268

Table 10. Constant value

상수	값
C ₄	2.205
C ₈	0.0929

계산하여 판단한다. 이 때, t_n = $\frac{4536 \text{ kg}}{W_n}$ 이다.

API RP 581에서 Hole Size와 방출 속도에 대한 기준에 의하여 방출 유형은 Continuous로 결정된다.

(5) 독성 방출율 계산

방출 속도(W_n)를 바탕으로 독성 방출율(rate_n^{tox})을 다음 식에 따라 구한다. 본 공정에서 H₂S의 몰분율은 m.frac^{tox} = 0.024이다.

$$rate_n^{tox} = m.frac^{tox} \cdot W_n \quad (3)$$

(6) Hole size 별 위험 지역 추정

독성 방출률을 이용해 Hole Size 별로 위험 지역의 넓이(CA_{i,nj,n}^{tox})를 구한다.

$$CA_{i,nj,n}^{tox} = C_8 \cdot 10^{(c \cdot \log_{10}[C_4 \cdot rate_n^{tox}] + d)} \quad (4)$$

C₄, C₈ 등 대표 유체를 뜻하는 표현이며 C₄는 Propane, butane, isobutane, LPG 등의 물질에 적용하는 상수를 의미하며 C₈ gasoline, naphtha,

CDU 내 탈황공정의 내부부식 된 파이프라인을 대상으로 한 RBI기법을 이용한 위험성 평가

Table 11. constants values c and d according to the emission duration

	c	d
5min	1.2411	3.9686
10min	1.2410	4.0948
20min	1.2370	4.238
40min	1.2297	4.3626
60min	1.2266	4.4365

Table 12. risk area according to emission duration

	Small	Medium
5min	74.4429	1144.5403
10min	99.5655	1530.4575
20min	139.8108	2130.2374
40min	188.6270	2828.2014
60min	224.9901	3350.4687

Table 13. risk area according to emission duration

방출지속시간	위험 지역의 넓이[m ²]
5min	767.5278
10min	1026.329
20min	1428.864
40min	1897.812
60min	2248.67

light straight run, heptane 또한 적용되는 물질의 특성에 따른 상수 이다.

(7) 방출 시간에 따른 위험 지역의 넓이 계산

이러 확률 가중 평균을 사용한 다음 식에 따라 모든 Hole Size의 경우를 종합한 방출지속시간에 따른 위험 지역의 넓이를 구한다.

$$CA_{inj}^{tox} = \left(\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA_{inj,n}^{tox}}{gff_{total}} \right) \quad (5)$$

Table 14. Consequence criteria

Category	Consequence
1	$CA_{inj}^{tox} \leq 1000$
2	$1000 < CA_{inj}^{tox} \leq 1400$
3	$1400 < CA_{inj}^{tox} \leq 1800$
4	$1800 < CA_{inj}^{tox} \leq 2200$
5	$2200 < CA_{inj}^{tox}$

Table 15. Risk matrix for pipes entering the desulfurization process

Freq \ Cons	Freq				
	1	2	3	4	5
E	1.86	1.86	9.29	37.16	92.89
D	1.57	1.57	7.84	31.36	78.40
C	1.18	1.18	5.90	23.61	59.04
B	0.85	0.85	4.24	16.96	42.40
A	0.63	0.63	3.17	12.68	31.71

Table 16. Risk Criteria

Risk Criteria	위험도
$r < 0.28$	안전
$0.28 < r < 3.92$	비교적 안전
$3.92 < r < 25.2$	보통
$25.2 < r < 61.6$	비교적 위험
$r > 61.6$	위험

(8) Consequence 등급 기준

계산한 값을 바탕으로 API RP 581을 참조하여 어떤 등급에 놓이는지 확인한다. 등급 기준은 Table 12와 같다.

4. 4. Risk Matrix

Frequency와 Consequence를 바탕으로 한 계산 결과, Table 13과 같은 Risk Matrix가 만들어진다.

타겟으로 설정한 탈황 설비 근처의 배관의 각 조건에 따른 Risk Matrix보았을 때, 인화성 유체가 흐르는 배관의 관리 및 검사가 잘 되지 않은, 예를 들어

Consequence D등급 이상 및 Frequency 4 등급 이상의 상태인 것을 확인 하였을 때 Risk Matrix를 통하여 사고를 미연에 방지 할 수 있는 검사 등 예방 조치를 계획 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구를 통해 CDU 내 배관에서 황으로 인한 부식의 위험성 평가를 진행했고 Risk Matrix를 제작하였다. 진행한 위험성 평가의 타겟의 범위는 매우 작지만 다음과 같은 방법을 기반으로 황에 대한 노후화뿐만 더 크고 다양한 분야에서 RBI 라는 방법을 통해 준비, 예방을 할 수 있다. RBI는 보다 경제적인 설비 관리 방안을 수립할 수 있으며 Frequency 수치를 낮추기 위해서는 안전검사의 횟수를 늘리고 검사 효율을 증가시켜 빈도를 계속해서 줄일 수 있으며 완전히 막을 수는 없지만 가능한 최소의 사고 빈도를 유지하기 할 수 있도록 한다. Consequence는 수치적으로 줄이기는 어렵다. 따라서 보통의 사고 예방 조치로는 Consequence 수치 보다는 Frequency 수치를 낮추는 방법을 택하는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 검사를 시행했을 때 Frequency 5등급, Consequence E등급의 조합으로 '위험' 등급을 나타낼 때 Risk Matrix가 없었다면 Frequency 1등급으로 내리는 방안을 실시하겠지만, 이 Risk Matrix를 통하여 같은 Criteria인 Frequency 2등급까지만 내려도 안전함을 알 수 있기 때문에 경제적 이득을 얻을 수 있다. 결과적으로 Risk Matrix를 이용하여 경제성과 안전성 모두 최적이 되는 점검 횟수를 설정할 수 있다. RBI 기법을 통해 제작한 Risk Matrix를 통해 노후화된 설비의 사고를 예방할 수 있고, 설비관리의 우선순위를 설정함으로써 최적화된 검사주기로 안전성과 경제성을 모두 확보할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원받았습니다(No. 2015001950003).

사용기호

$P_f(t)$: Probability of failure as a function of time
 gff : Generic Failure Frequency
 gff_n : generic failure frequencies for each of the release hole sizes selected for the

type of equipment being evaluated
 gff_{total} : is the sum of the individual release hole size generic frequencies
 $D_f(t)$: Damage factor as a function of time
 F_{MS} : Management Systems Factor
 W_n : theoretical release rate associated with the release hole size, [kg/s]
 C_d : discharge coefficient
 C_2 : Properties of the Representative Fluids (methane, ethane, ethylene, LNG, fuel gas)
 A_n : hole area associated with release hole size (mm^2)
 P_s : storage pressure
 k : the release fluid ideal gas specific heat capacity ratio
 MW : release fluid molecular weight, kgb/kg-mol
 g_c : gravitational constant = $1.0(kg-m)/(N-s^2)$
 T_s : storage or normal operating temperature, [K]
 t_n : is the time to release 4536kg of fluid mass, calculated for each of the release hole sizes selected, seconds
 R : the universal gas constant = $8,314 J/(kg-mol)K$
 D_n : Hole diameter
 $mfrac^{tox}$: mass fraction of toxic material in the released fluid mixture
 $rate_n^{tox}$: release mass rate of toxic component used in the consequence calculation, associated with the release hole size [kg/s]
 $CA_{inj, n}^{tox}$: personnel injury toxic consequence area, associated with the release hole size [m^2]

REFERENCES

- [1] American Petroleum Institute(API), "API RP 581: Risk-Based Inspection Methodology-Documenting and Demonstrating the Thinning Probability of Failure Calculations Second Ed", American Petroleum Institute(API) (2008)
- [2] D. A. Crowl, J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications Third Ed.", PRENTICE HALL (2011)

- [3] European Commission, "Corrosion-Related Accidents in Petroleum Refineries", JRC Scientific And Reports (2013).
- [4] W. Shin, "Risk Priority Number of Chemical Facilities by the Risk Assessment of Injury Analysis in the Chemical Plant", *Journal of the Korean Institute of gas*, 17(4), 39-44 (2013)
- [5] G. B. Alleman, "Performance-Based Project Management: Increasing the Probability of Project Success", AMACOM (2014)
- [6] I. Song, "Application of RBI to Hydrogen Fluoride Equipments Using API-581", Graduate School of Industry, Chungbuk National University Department of Production Engineering (2015)
- [7] S. Kim, B. Choi, W. Kim, "Prognostics for Industry 4.0 And Its Application for Fitness-for-Service Assessment of Corroded Gas Pipelines", *Journal of the Korean Society for Quality Management*. 45(4), 649-664 (2017)