

원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사 프로그램을 이용한 종합검사계획 수립  
이헌창\*, 최성규, 조지훈\*\*, 권혁면\*\*, 함병호\*\*\*, 차순철\*\*\*\*, 김태욱  
명지대학교 화학공학과, \*한국안전이엔씨, \*\*한국산업안전공단, \*\*\*노동부,  
\*\*\*\*차스텍이엔씨

## Comprehensive Inspection Plans Using the KS-RBI Program Supporting the Cause Analysis

H. C. Lee\*, S. K. Choi, J. H. Cho\*\*, H. M. Kwon\*\*, B. H. Hahm\*\*\*, S. C. Char\*\*\*\*, T. O. Kim

Dept. of Chemical Engineering, Myongji University,

\*Korea Safety E&C, \*\*KOSHA, \*\*\*Ministry of Labor, \*\*\*\*Char's Tech E&C

### 1. 서론

최근 화학설비의 안전성과 신뢰성을 극대화시키기 위하여 위험기반검사(risk based inspection, RBI)[1,2]기법이 적용되기 시작하였다. RBI 기법은 미국기계학회[3,4]에서 켄트엔진과 원자력에서의 안전성을 평가하기 위해 개발되었으며, 최근 들어 미국석유회社(American Petroleum Institute, API)를 중심으로 하여 급격하게 발전하였다. RBI에서는 설비의 고장발생 가능성과 사고 피해크기의 곱에 의해 결정되는 위험도에 따라 검사주기, 검사방법, 검사기법 등과 같은 종합적인 검사계획을 수립할 수 있다. 이러한 RBI 기법은 선진국을 중심으로 활발하게 연구되어 상용 프로그램을 개발하여 사용하고 있으며, 국내의 경우도 API-581 절차서[2]를 바탕으로 국내실정에 적합하도록 개발되어 있는 상태이다[5,6]. 그러나 사업장에서는 RBI에 대한 충분한 이해가 부족하고, 단지 경험과 법 규제[7,8]에 의해서만 검사를 수행해 왔기 때문에 RBI를 적용한 종합검사계획의 수립이 거의 불가능한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내 실정에 적합하고, 원인분석이 가능하도록 개발한 한국형 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 사용하여 종합검사계획 수립방안을 제시하고자 하였다.

### 2. 위험기반검사

#### 2-1. 검사프로그램

검사프로그램의 목적은 고장이 발생하기 전에 사용 중인 설비의 성능저하를 검출하는데 필요한 활동을 정의하고, 수행하는 것이다. 검사프로그램은 검출할 손상유형, 손상유형을 검출할 장소, 손상유형 검출방법(검사기법), 검출시기(또는 검출 빈도)를 체계적으로 확인해 가면서 전개한다.

#### 2-2. 손상유형

손상유형이란 검사기법에 의해 검출될 수 있는 물리적인 손상특성을 의미하고, 손상메커니즘은 부식이나 손상을 발생시키는 역학작용으로, Table 1은 손상유형 및 특성을 나타낸 것이다.

API-581 절차서에서 제시된 손상메커니즘은 두께감소, 응력부식, 고온 수소침식, 노관손상, 취성파괴, 기계적 피로, 설비라이닝 및 외부부식과 같이 크게 8가지로 구분하고 있다. 또한 두께감소의 경우 두께감소 유형에 따라 전면부식과 부분부식으로 구분하며, 두께감소 메커니즘에 따라 염산(HCl), 고온 황화물과 나프텐산, 고온 H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub>, 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 불화수소산(HF), 산성수(sour water), 아민(amine), 고온 산화에 의한 부식이 있다. 그리고 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)은 부식성 균열, 아민균열, 황화물 응력균열, 수소유기 균열과 수소 황화물 사용 중 수소유기 균열, 탄산염 균열, 다중티온산 균열, 염화물 응력부식

균열, 불화수소산 사용 중 수소응력균열, 불화수소산 사용 중 수소 유기균열과 수소 응력균열에 의한 응력부식이 있다.

Table 1. Damage types and characteristics

손상유형	설 명
두께감소(thinning)(전면, 국부 및 공식(pitting) 포함)	하나 이상의 표면에서 재료를 제거하는 것은 전면적일 수도 있고, 부분적일 수도 있음.
표면균열	하나 이상의 금속표면 균열
표면하(subsurface) 균열	금속표면 아래의 균열
미세균열(microfissuring)/미세기공(microvoid) 형성	금속표면 아래의 미세 균열 또는 기공
금속재질 변화	금속 미세구조에 대한 변화
치수 변화	물체의 물리적 치수 또는 오리엔테이션 변화
부풀음	판 내 기재물에 생기는 수소유기 부풀음
재질특성 변화	금속재의 재질 특성 변화

### 2-3. 검사기법

검사기법은 손상유형에 대한 검출능력을 토대로 선정된다. Table 2는 Table 1에서 열거된 각각의 손상유형에 대하여 검사기법의 유효성을 정성적으로 열거한 것이다.

Table 2. Effectiveness of inspection techniques for various damage types

검사기법	두께 감소	표면 균열	표면하 균열	미세균열/기공형성	금속 변화	치수 변화	부풀음
Visual examination	1-3	2-3	X	X	X	1-3	1-3
Ultrasonic straight beam	1-3	3-X	3-X	2-3	X	X	1-2
Ultrasonic shear wave	X	1-2	1-2	2-3	X	X	X
Fluorescent magnetic particle	X	1-2	3-X	X	X	X	X
Dye penetrant	X	1-3	X	X	X	X	X
Acoustic emission	X	1-3	1-3	3-X	X	X	3-X
Eddy current	1-2	1-2	1-2	3-X	X	X	X
Flux leakage	1-2	X	X	X	X	X	X
Radiography	1-3	3-X	3-X	X	X	1-2	X
Dimensional measurements	1-3	X	X	X	X	1-2	X
Metallography	X	2-3	2-3	2-3	1-2	X	X

[주] 1=매우 효과적, 2=알맞게 효과적, 3=가능한 효과적, X=정상적으로 사용되지 않음

### 2-4. 검사 유효성 등급(검사 요구수준)

검사기법의 유효성에 대하여 등급은 매우 효과적(highly, H), 대체로 효과적(usually, U), 효과적(fairly, F), 약간 효과적(poorly, P)으로 나누며, 손상밀도와 가변성, 시편의 유효성, 시편의 크기, 검출능력, 과거검사에 근거한 미래 예상치의 유효성 등을 고려하여 결정하는데, Table 3의 내부 전면부식 용기의 경우와 같이 등급을 표시할 수 있다.

Table 3. Guidelines for assigning inspection effectiveness at general thinning

정성 검사의 유효성 등급	전면부식의 예
매우 효과적(H) : 거의 모든 경우 예상, 사용 중 초음파 두께 산출과 결합된 완벽한 내부 육안검사 손상을 정확하게 확인(90%)	에 의한 전면부식 평가
대체로 효과적(U) : 대부분의 경우, 실제 손상상태를 정확하게 확인(70%)	초음파 두께 산출과 결합된 부분적인 내부 육안검사에 의한 전면부식 평가
효과적(F) : 실제 손상상태를 절반정도는 정확하게 확인(50%)	외부 지점 초음파 두께 검사에 의한 전면부식 평가
약간 효과적(P) : 정확하게 실제 손상상태를 확보하는데 정보를 거의 제공하지 못함(40%)	테스트, 텔테일(telltale) 구멍에 의한 전면부식 평가

### 3. 원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사 프로그램

#### 3-1. KS-RBI 프로그램(Ver. 3.0)

정량적 원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사(KS-RBI Ver. 3.0) 프로그램은 API-581 절차를 바탕으로 개발되었으며, 손상메커니즘별로 개방 및 비개방검사의 방법과 검사기법, 검사주기 등의 종합적인 검사계획을 제시할 수 있다.

Fig. 1은 개발된 KS-RBI Ver. 3.0 프로그램의 메인화면과 종합적인 검사계획을 수립할 수 있도록 제시하는 보고서의 예를 나타낸 것이다.

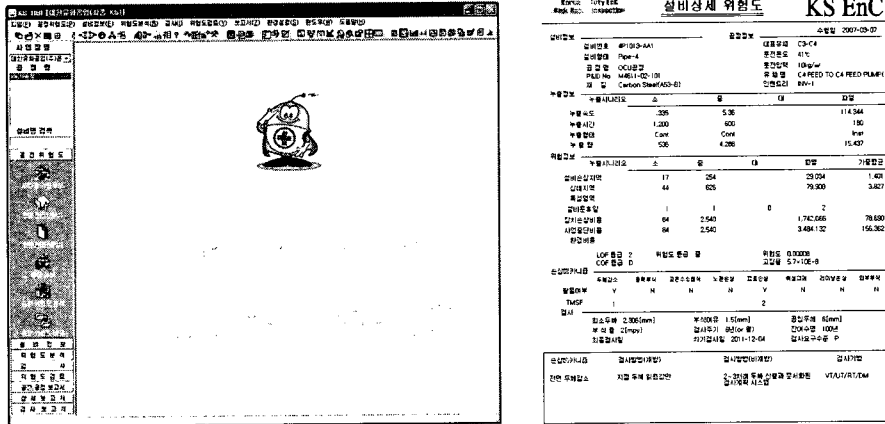


Fig. 1. Example of overall inspection plan for KS-RBI Ver. 3.0.

#### 3-2. 검사방법

KS-RBI에서 검사주기는 설비에서의 위험도 등급과 설비검사 요구수준 정도에 따라 결정되며, 용력부식균열의 경우는 Table 4와 같다. 즉, 설비의 검사 요구수준은 예측되는 개별 손상메커니즘에 대한 기술중속계수(technical module subfactor, TMSF)를 기준으로 정의된다. 또한 고장발생 가능성과 사고 피해크기로부터 예측되는 위험도 등급에 검사요구를 함께 고려하여 최종적인 검사주기를 선정하고, 검사 요구수준을 고려하여 각 손상메커니즘별로 적합한 검사방법 및 검사기법을 제시하도록 한다.

Table 4. Inspection frequency by effectiveness with the TMSF for SCC

SCC TMSF	최고 검사수준	검사 요구수준			
		H	U	F	P
TMSF < 10	P : 약간 효과적	1	1	2	3
10 < TMSF ≤ 100	F : 효과적	2	3	4	5
100 < TMSF ≤ 1000	U : 대체로 효과적	3	4	5	6
1000 < TMSF	H : 매우 효과적	4	5	6	8

### 4. 결론

API-581 절차에 따라 정량적 원인분석이 가능하도록 개발한 한국형 위험기반검사 프로그램을 사용하여 석유화학공장에 적용한 결과, 제시된 종합검사계획은 타당성이 있었으며, 산업장에서 일반적으로 관리하고 있는 방법과 크게 차이가 없음을 확인하였다. 따라서 향후 RBI를 적용시 제시된 방법을 이용함으로써 보다 효율적이고, 객관적인 종합 검사계획을 수립할 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 참고문헌

1. API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580", American Petroleum Institute(API), (2001)
2. API, "RBI Basic Resource Document : API-581", American Petroleum Institute, (2000)
3. ASME, "Risk-Based Testing : Development of Guidelines", Center for Research and Technology Development(CRTD), 40(1), American Society of Mechanical Engineers, (2000)
4. ASME, "Risk-Based Inspection, Development of Guidelines", CRTD, 20(1), American Society of Mechanical Engineers, (1994)
5. KOSHA, "Development of K-RBI Program II", Korea Occupational Safety & Health Agency(KOSHA), Technical Manual, (2004)
6. KS E&C, "KS-RBI Ver. 3.0 Program Manual", Korea Safety Engineering & Consulting, Technical Manual, (2007)
7. 고압가스안전관리법 시행규칙 별표 22, (2006.2.26 개정)
8. 산업안전보건법 49조의2 ㉞항(공정안전보고서의 제출 등), (2005.3.31 개정)