

검사주기 최적화를 위한 NCC플랜트의 RBI 구축

이창헌, 한상인, 이재훈, 최송천, 박교식*, 이범희**

*한국가스안전공사, **호남석유화학

Application of Risk Based Inspection for Optimized Inspection Interval on NCC Plants

Chan-Hun Lee1, Sang-In Han, Jae-Hun Lee1, Song-Chun Choi, Kyo-Sik Park*,

Bum-Hee Lee**

*Korea Gas Safety Corporation, **Honam Petrochemical

1. 서론

국가기간산업시설의 성장으로 많은 석유화학플랜트들이 건설되어 가동 중에 있다. 지금까지 국내에 건설된 기간산업설비의 경우 20년 이상 경과된 노후시설이 전체 기간산업시설의 20% 이상이고 10년 이상 경과된 노후시설은 50%를 차지하고 있어 운전성능저하 및 재료의 손상과 열화에 의한 노후화로 사고발생 위험이 높아지고 있다. 그러한 산업설비의 노후화로 재해가 발생할 경우 관련 산업시설의 경제적 손실과 환경적 요인이 국가 경제에 많은 부분을 차지한다. 그런 노후화된 플랜트들에 대한 안전성향상과 사용수명연장에 대한 국가 및 산업체들의 관심이 높아지기 시작하였고, 안전성향상에 관련된 의식이 점점 높아지고 있는 추세이다. 그러므로 산업설비의 사용수명 연장 및 검사주기에 대한 안전성확보를 위해서는 정부와 산업체 모두가 투자와 관심이 필요하다고 생각된다. 석유화학플랜트는 가동중에 검사주기를 설정하기 위해 최우선되어 고려되는 사항이 플랜트의 신뢰성과 안전성의 보장이 다. 그러한 의식 가운데 API(미국석유협회)에서는 실제 플랜트에 적용하기 위한 API 580(Risk based Inspection), API 581(RBI Base Resource Document) 등 RBI 기술을 개발하였다. 효과적인 플랜트의 신뢰성과 안전성에 효율적인 작업을 하기 위해서 NCC플랜트 위험성평가를 KGS-RBI™을 적용하여 수행하였다. 이번 NCC플랜트의 KGS-RBI™의 적용으로 기기별 위험도분석 및 최적화된 검사주기산정을 하게 되어, 본 연구를 통해서 실제 플랜트에 적용이 가능한 한국형 석유화학플랜트 전용 KGS-RBI™ 프로그램을 NCC플랜트에 적용하여 안전성향상과 노후화에 따른 위험도 분류 및 잔여수명을 산출하여 최적화된 검사주기 및 안전성 확보를 위한 방법을 제시하고자 한다.

2. 위험도기반 검사(Risk Based Inspection)

RBI는 검사프로그램의 운용 및 효율성에 대해 위험도를 근거로 우선순위를 산정하는 위험성 평가기법이다. 높은 위험도를 갖는 기기에는 높은 수준의 검사 및 유지관리 비용을 배정하고, 상대적으로 낮은 위험도를 갖는 기기에는 검사횟수 및 검사비용 등을 감소시키는 등 설비의 합리적인 운용을 추구하는 것이 목적이다. RBI 구축의 장점으로는 최소 동등한 위험도 수준으로 유지시키거나 안전성을 향상시키면서 장치의 운전시간을 연장시키는 것이다. RBI 적용방법은 정성, 준-정량적 및 정량적 방법이 있다. RBI는 위험도를 산정하고, 위험부위를 확인하여 보다 세부적인 검사방법 또는 해석을 위한 우선순위를 정할 수 있는 체계적인 방법을 제공한다. 위험도는 두 가지 인자인 파손 확률 및 피해 결과의 곱(product)로 산정하며, 식(1)과 같다.

Risk_s = C_s × F_s (1)

여기서 s는 시나리오 수, C_s는 시나리오에 대한 결과(area in ft2 or S), F_s는 시나리오에 대

한 파손확률(per year)이다.

RBI 절차는 정성적으로, 정량적으로 또는 조합되어 적용할 수 있다. 두 접근 방법 모두 위험도를 구분하고, 주의해야 할 부위를 확인하며, 좀 더 깊이 있는 검사 또는 해석을 위한 우선순위를 정할 수 있는 체계적인 방법을 제공한다. 두 접근 방법 모두 파손 확률 및 피해 결과를 각각 평가하는데 사용되는 위험도 등급 평가 방법을 제공한다. 이 두 가지가 조합되어 위험도를 계산하여 정성적 또는 준-정량적 평가에서 산정된 위험도는 Fig. 1의 5×5의 위험도 행렬로 표현할 수 있다. 행렬에서 가로는 피해결과를 세로는 파손확률을 나타내며, 위험도는 Low Risk, Medium Risk, Medium-High Risk, High Risk의 4개로 분류한다. 화살표 방향이 좌측 하단에서 우측 상단으로 갈수록 위험도는 상승한다.

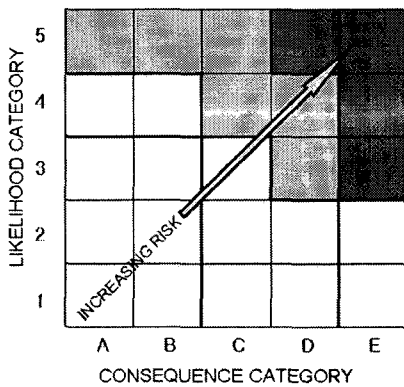


Fig. 1 5×5 Risk Matrix

>1,000	1	1	1	1	1	
[5]	5A	5B	5C	5D	5E	
100-1,000	6	6	4	4	4	
[4]	4A	4B	4C	4D	4E	
10-100	8	8	6	4	4	
[3]	3A	3B	3C	3D	3E	
1-10	8	8	6	6	6	
[2]	2A	2B	2C	2D	2E	
<1	8	8	8	8	8	
[1]	1A	1B	1C	1D	1E	
LOF	COF	<10ft ² [A]	1-100ft ² [B]	100-1,000ft ² [C]	1,000-10,000ft ² [D]	>10,000ft ² [E]

Category	Type of Risk
High	High
Medium-High	Medium-High
Medium	Medium
Low	Low

Fig. 2 Re-inspection interval for internal opening

내부 개방검사 주기는 부식속도, 운전조건, 검사원의 판단 및 관계법규에 따라 일반적으로 산정되며, RBI에서도 구축결과를 Risk Matrix를 분류하여 검사주기 정하고, 관련법규와의 기준과 비교하여 사용자가 최종적으로 결정한다. NCC플랜트에 KGS-RBI™을 이용하여 RBI를 구축하기 위해 Fig. 2를 검사주기 산정에 적용하였다. 이러한 검사주기와 감육에 의한 잔존 수명을 평가하기 위해서 파손확률(Likelihood Analysis)에서의 기기보정인자로 기기 Item의 파손 주기와 손상속도의 검사 효율성을 다루는 기술모듈인자 값인 Technical module Subfactor(TMSF)를 대상으로 평가하며, 정량적 RBI 평가에서 파손확률을 조정하는 매우 중요한 인자이다. Technical Module은 RBI 방법론에 검사우선순위를 결정하고, 검사에 소요되는 노력을 최적화시킬 수 있는 도구를 제공하고자 하는 것이 목적이다. module의 기본적인 기능은 존재할지도 모르는 손상의 양과 검사활동의 효율성을 통계적으로 평가하는 것이다. 계산된 TMSF는 확률이론에 근거하고 있지만, 신뢰성분석을 하기 위해 필요한 실제의 고장 확률을 반영하고자 하는 것은 아니다. 다만 TMSF는 각 module에서 언급한 가정을 근거로 하여 해당 기기에 대한 상대적인 관심도를 반영한다. TMSF는 손상기구에 따라 감육(Thinning), 응력부식균열(SCC), 고온수소침투손상(HTHA), 가열로 튜브(Furnace Tube), 배관피로(Piping Fatigue), 취성파괴(Brittle Fracture), 라이닝, 단열재 하 부식(External Damage) 등으로 분류한다. 또한 TMSF는 정상 및 비정상 운전 조건에서 손상기구들의 검토, 운전환경에서의 손상속도 평가, 검사 프로그램의 효율성을 정량화, 일반 파손 주기에 반영할 보정 인자를 계산 등의 기능도 포함한다. 검사의 효율성은 검사방법에 의존적인 TMSF에 영향을 미친다. 이번 연구에서는 상기 손상기구 중 감육(Thinning)에 의한 TMSF만을 고려하였다. 감육에 의한 TMSF와 관련된 주된 인자는 잔존수명이며 손상보조인자로 결정하는

데 ar/t look up table과 과 설계인자(over design factor)를 이용하며 궁극적으로 식(3), (4)로 잔여수명을 산정하여 보았다.

$$\frac{a \times (r + RL)}{t} \leq 0.4 \quad (3)$$

$$RL = \frac{0.4 \times t}{a} - r \quad (4)$$

여기서 a는 부식속도, r은 사용년수, t는 설계두께, RL은 잔여수명이다. 식(3), (4)은 ar/t look up table을 기반으로 높은 효율성을 가지는 검사를 4번 이상 실시하여 손상인자(Damage Factor)가 10이상으로 나온 경우 해당 장치는 거의 수명을 소진한 상태에 있거나 그에 근접한 상태이며, 즉, 부식속도에 대해 비교적 정확한 검사가 충분히 이루어졌고, 추가적인 검사를 하여도 손상인자를 더 이상 개선시킬 수 없다는 것을 의미한다. 검사계획 방법은 압력과 부식허용치 등의 보정으로 ar/t = 0.4를 기준으로 하여 평가된 년수에서 제시된다. ar/t = 0.4를 기준으로 수치가 1년 이하일 경우, 적용된 부식속도, 운전년수, 검사횟수 등을 근거로 하여 “장치의 수명이 거의 소진된 상태이거나 그에 근접한 상태”와 “데이터 검토 및 장치 상태의 확인을 권고”한다.

3. NCC 플랜트 RBI에 의한 평가

NCC플랜트의 검사주기산정을 위한 RBI를 적용한 결과 값에 대하여 기기의 건전성에 관심을 갖고 검사주기 최적화를 위해서 지켜봐야 할 부분은 파손확률의 검사주기이다. Risk의 평가 값에서 피해범위는 사고발생이 일어난 후의 값을 나타내지만 가동중인 기기에 대해서는 안전한 측면에서 파손확률 부분에 더 많은 관심을 가져야 한다. Table 1.에 제시되는 결과 값은 파손확률과 피해범위를 한 조합에 따른 검사주기 산정 값과 TMSF의 감육에 의한 잔존수명예측 값을 4A~5E 부분에 대하여 나타내었다.

Table 1. NCC Plant Result

설비정보		손상보조인자					잔존수명 year	Enhanced (with MBT) Quantitative Risk Analysis					Inspection Interval (yr)
Equipment No	Equipment Type	Corrosion Rate	Service Date	Thickness (ft)	Ar/t	LOF		COF(m2)	Risk Matrix	Risk Ranking	Risk (m2/yr)		
E-FA302	DRUM	30.13	1992-04	0.062	0.55	1	0.1032092	929.886446	5E	High	2.92E+01	3	
E-FA303	EXCHANGER	27.64	1992-04	0.073	0.821	7	0.1528226	92.235328	5D	High	3.44E+01	3	
E-FA416	DRUM	3.09	1992-04	0.02	0.176	18	0.01171248	1457.416301	4E	High	1.71E+01	1	
E-FA419	DRUM	3.09	1992-04	0.02	0.176	18	0.00400608	1509.529915	4E	High	6.05E+00	1	
E-DA402	COLUMN	1.63	1992-04	0.102	0.018	287	0.010557	543.7884624	4E	High	5.74E+00	1	
E-FF301B	DRUM	1.63	1992-04	0.066	0.028	181	0.0041652	1173.631776	4E	High	4.89E+00	1	
E-FF301A	DRUM	1.63	1992-04	0.066	0.028	181	0.0041652	1173.631776	4E	High	4.89E+00	1	
E-FA304	DRUM	1.63	1992-04	0.128	0.015	363	0.0132444	296.6452032	4E	High	3.93E+00	1	
E-EA112	EXCHANGER	1.63	1992-04	0.052	0.035	140	0.0041964	86.5844352	4D	Medium High	0.363342541	4	
E-EA709	EXCHANGER	4.81	1992-04	0.034	0.161	20	0.0038532	43.904496	4D	Medium High	0.169172522	4	
E-FA607	DRUM	5.34	1992-04	0.026	0.232	10	0.00897	81.2936928	4D	Medium High	7.29E-01	4	
E-DA402	COLUMN	1.63	1992-04	0.102	0.018	287	0.0107406	107.8915536	4D	Medium High	1.16E+00	4	
E-EA443	EXCHANGER	3.09	1992-04	0.095	0.037	134	0.0054132	136.9453248	4D	Medium High	7.41E-01	4	
E-FA328AX	EXCHANGER	5.96	1992-04	0.031	0.218	11	0.00897	64.153296	4D	Medium High	5.75E-01	4	
OPI-TK-1401D	TANK	1.86	2001-09	0.136	0.005	346	0.011886	44.7742032	4D	Medium High	5.32E-01	4	
OPI-TK-1401C	TANK	6.49	1991-04	0.136	0.058	86	0.011886	44.7742032	4D	Medium High	5.32E-01	4	
OPI-TK-1401B	TANK	6.19	1991-04	0.136	0.056	91	0.011886	44.7742032	4D	Medium High	5.32E-01	4	
E-FD307X	FILTER	2.93	1992-04	0.016	0.203	13	0.035298	4.6325856	4C	Medium High	1.64E-01	4	
OPI-TK-1411B	TANK	6.49	1991-04	0.048	0.167	21	0.00553	25.7318352	4C	Medium High	1.42E-01	4	
OPI-TK-1411A	TANK	6.49	1991-04	0.048	0.167	21	0.00553	25.7318352	4C	Medium High	1.42E-01	4	
OPI-TK-1406B	TANK	6.49	1991-04	0.048	0.167	21	0.00553	25.7318352	4C	Medium High	1.42E-01	4	
OPI-TK-1406A	TANK	6.49	1991-04	0.048	0.167	21	0.00553	25.7318352	4C	Medium High	1.42E-01	4	
OPI-TK-1404A	TANK	6.49	1991-04	0.048	0.167	21	0.00553	24.4512048	4C	Medium High	1.35E-01	4	
E-EA132	EXCHANGER	22.98	1992-04	0.043	0.612	1	0.0197652	19.992504	4B	Medium High	3.95E-01	6	

Table 1.에 제시되는 결과 값은 파손확률과 피해범위를 한 조합에 따른 검사주기 산정 값과 TMSF의 감육에 의한 잔존수명예측 값을 비교하여 안전성 확보에 기인할 수 있는 검사주기 최적화를 고려하여야한다. 그러나 잔여수명은 설비의 전반적인 손상기구를 조합한 평가결과가 아닌 단지 부식 감육에 의한 잔여수명입은 명기해 둔다. 그러한 잔여수명 값과 검사주기 값을 비교하여 검사주기 최적화를 위한 방법에 대하여 예를 들면 E-DA402, E-FF301A, E-FF301B 등은 검사주기 1년에 비해 100년이 넘는 감육에 의한 잔존수명이 예상되었다. 이러한 기기들에 대해서는 기기의 건전성을 고려하여 검사주기를 재평가하여 현재 내부 개방 검사를 할 필요는 없다는 것이다. 그리고 반대로 E-EA453 등과 같이 열교환기가 잔존수명이 1년 이하로 예상되어 감육 될 경우에는 RBI 결과에서 도출된 검사주기 결과 값과 비교하여 운전 전에 반드시 사용적정성평가(Fitness-For-Service)로 정확한 잔여수명 판정을 실시할 필요가 있다. 여러 가지 예를 살펴본 결과 RBI를 통해 얻어진 결과 값만을 전부로 믿고 의지하면 경제적 손실 및 즉시 생길 위험에 대한 예측은 불가능하다고 생각된다.

4. 결론

산업설비의 검사주기 최적화에 따른 사용수명 연장에 대한 안전성확보를 위한 NCC플랜트 KGS-RBITM 적용에 대한 결과 값은 준정량적인 위험도에 의한 검사주기의 평가 값과 감육에 의한 잔존수명평가 값이 대부분 유사한 양상을 보였다. 그러나 검사주기 최적화를 위해서 상이한 양상을 보이는 기기에 대해서는 지속적인 관심과 관리가 필요하며, 검사주기의 최적화를 위해서 기기의 잔존수명이 검사주기보다 많이 남아있는 경우도 있고, 반대로 검사주기보다 적게 잔존 수명이 남아 있을지라도 장치 파손 후 피해 영향 범위가 아주 높을 경우에는 누출에 따른 검출, 격리 및 완화 장치의 추가적인 예방 설비가 안전성확보를 위해 보완되지 않는 한 검사주기 연장은 어려울 것으로 사료되며, 그것과는 상반되게 검사주기에 비해 잔존수명은 적게 남아있는 기기에 대해서는 기기의 안전성과 건전성을 관리하기 위해서 지속적인 관리나 검사주기의 재설정이 필요하다고 생각한다. 따라서 예외적인 사례의 경우 기기에 대한 보완 및 점검이 필요하고 안전성확보가 되었을 때 이에 대한 대응 방안으로 요구된다.

5. 참고문헌

1. API RP 581; "Risk-Based Inspection - Base Resource Document", API (American Petroleum Institute), 1st edition, 2000
2. John T. Reynolds; "Risk-Based Inspection - Where are we today?", CORROSION 2000, NACE International, Paper No. 00690, 2000
3. John T. Reynolds; "The Application of Risk-Based Inspection Methodology in the Petroleum and Petrochemical Industry", ASME, PVP-Vol. 336, p.125, 1996