

# 사고사례에 기초한 보일러 사고의 원인분석 및 대책

윤상권 · 장통일 · 임현교<sup>†</sup>

충북대학교 공과대학 안전공학과  
(2003. 4. 8. 접수 / 2003. 8. 5. 채택)

## Cause Analyses of Boiler Accidents and Their Counter-plans Based on Accident Cases

Sang-Kwun Yoon · Tong-Il Jang · Hyeon-Kyo Lim<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received April 8, 2003 / Accepted August 5, 2003)

**Abstract** : An accident involving a boiler can result in a disaster since it handles high-pressurized steam so that it may cause an explosion. Therefore, the boiler is very susceptible to industrial accidents. This thesis aimed to develop counter-plans to prevent industrial accidents involved the boiler.

At first, after collecting accident cases involving boilers, a survey on the trait of them was carried out. And, on the other hand, a qualitative analysis was conducted to draw out hazardous components in the boiler itself, and their inherent relative importance was assessed.

Through this procedure, 'negligence of unsafe condition' was noted as the major cause for unsafe acts, whereas 'fault in work procedure' for unsafe condition. In the meanwhile, results of a hazard analysis using FMEA technique ranked gas safety devices, a switch preventing gas from under-pressurization, protect relays high. In particular, it was pointed out that the water feeding and steam subsystem has more components in hazard than other subsystems.

Considering these analyses results, counter-plans to improve safety management was suggested also.

**Key Words** : accident analysis, boiler safety, FMEA, RPN, pareto's curve

### 1. 서 론

#### 1.1. 국내의 보일러 사용 및 사고현황

보일러는 난방용뿐만 아니라, 동력원으로서도 중요한 역할을 하고 있다. 그러므로, 보일러 및 압력용기가 날로 다양화되고, 용기의 기능, 구조 및 성능 면에서 현저한 발달을 보이고 있으며, 그 보급대수도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다<sup>1)</sup>.

반면, 기기 내부에 높은 압력과 많은 양의 열을 보유하고 있으므로, 기기의 파열이나 폭발과 같은 엄청난 파괴력에 의해 심각한 인적·물적 손실을 초래할 수도 있다.

Fig. 1은 최근 약 20년 동안의 보일러 및 압력용기에 의한 사고발생 건수 및 사상자 수를 나타낸 것

인데<sup>2)</sup>, 보는 바와 같이 사상자 수는 점차 감소하고 있는 추세이나, 사고발생 건수에 있어서는 그다지 큰 변화가 없을 뿐만 아니라, 90년대에는 오히려 80년대보다 발생 건수가 증가하였다.

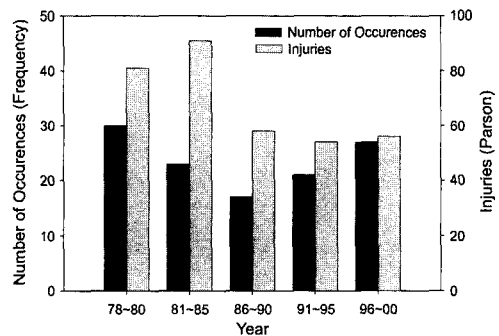


Fig. 1. Change of boiler accidents over the year

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
hklm@cbucc.chungbuk.ac.kr

### 1.2. 연구배경

보일러는 장비의 고장이나 결함에 대한 진단이나 정비기술에 대한 연구가 일부 실시되었고, 안전성이나 위험성의 평가에 관련된 연구는 거의 전무하다고 해도 과언이 아니다.

2000년에 한국중공업은 화력발전(發電)설비의 성능 및 신뢰성, 안전성의 유지 향상에 중요한 영향을 미치는 보일러 설비의 고장에 대한 정밀진단 및 수명평가에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 발전설비는 빈번한 기동 및 정지에 기인하여 급속한 부하 변동을 수반한 운전 조건의 악화 및 경년열화의 급속한 진행이 발생한다고 지적하였다. 이러한 노후보일러들에 대한 신뢰성을 유지하고 안전운전을 가능하도록 하는 설비진단 및 관리에 대한 효율적인 방법을 제시하였다<sup>3)</sup>.

한편, 송수영은 보일러의 안전대책에 대한 그의 연구에서 재해의 원인을 밝혔던 적이 있지만<sup>4)</sup>, 시대적으로 이미 20여년 전에 수행된 연구일 뿐만 아니라, 보일러 사고가 단순히 보일러 제조업 허가기준의 문제점이나 신기술에 대한 정보 부족 등에 기인한다고 할 정도로 연구결과도 크게 만족할 만한 정도는 아니었다.

그 이후도 보일러 사고의 원인분석이나 사고조사 방법에 대한 연구는 거의 행해지지 않았으며, 보일러 업계에서조차도 사고의 원인을 대부분 취급부주의라고 할 정도로 체계적이고 구체적인 재해조사방법이 없는 실정이다.

### 1.3. 연구방법

이처럼 보일러는 사고발생의 잠재위험성이 높고, 그에 대한 관리체계가 매우 취약하기 때문에 본 연구에서는 먼저 보일러의 사고사례들을 수집하여 사고의 원인들을 분석한 후, 그러한 원인들에 대한 적절한 대책을 제시하고자 하였다. 또한, 보일러를 구성하고 있는 계통이나 부품을 중심으로 고장의 발생형태 및 위험 우선순위를 평가하고, 점검이나 정비에 있어서의 우선순위를 밝혀 보일러 설비에 대하여 효율적이고 합리적인 안전관리가 이루어질 수 있는 방향을 제시하고자 하였다.

이와 같은 연구를 수행하기 위하여 먼저 보일러 사고의 사례조사 및 검토를 행하여 분석할 사고사례를 선정하였다. 그리고, 선정된 사례들에 대한 사고의 원인을 분석하고, 직접원인 및 간접원인을 도출하여 원인에 대한 해결방안을 모색하였다.

한편, 보일러에 대한 구조분석을 실시하고, 분석모형을 구축하였다. 그 후, 하부 시스템 및 부품을 분류하고 각 부품별 고장모드를 도출한 후, 고장모드별로 발생 가능한 고장영향을 평가하여, 고장에 대한 사고의 잠재위험성이 높은 부품을 검출하였다.

이러한 두 방향의 원인분석방법에 의한 각각의 결과에 대한 고찰을 통하여 최종적으로 보일러에 대한 종합적인 안전관리 대책을 수립하고자 하였다.

## 2. 사고성향분석

산업재해조사표의 재해조사 항목은 발생형태, 상해부위, 불안전행동, 불안전상태 등 많은 항목들로 구성되어 있고, 가장 일반적으로 널리 알려진 방법이기 때문에 이 방법을 이용하였다.

본 연구에 사용된 분석 대상으로서는 '80년도에서 '97년도까지 발생하였던 보일러 및 압력용기 사고 중 모두 33건의 사례가 선정되었는데, 비록 그 수효는 적으나, 각각의 사례가 전형적인 사고들로서 재해의 특성을 파악하는 데에는 부족함이 없다고 판단되었다.

### 2.1. 직접원인

#### 2.1.1. 불안전 행동

불안전 행동의 경우, Fig. 2에서 보는 바와 같이 '불안전 상태의 방치'가 42.4%로 가장 많은 비율을 차지하고 있는데, 이는 평소 안전점검이나, 불안전 요소의 제거에 많은 주의나 관심을 기울이고 있지 않다는 것을 시사하는 것이며, 또한 '기계기구의 잘못 사용'과 '위험물 취급 부주의'가 각각 21.2%와 24.2%로 나타나, 보일러와 같은 위험물에 대한 안전한 사용법 교육을 더욱 강화해야 할 것으로 판단되었다.

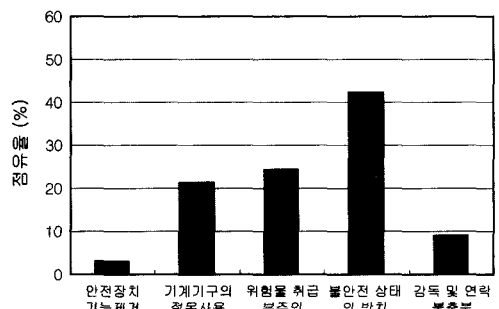


Fig. 2. Proportion of unsafe acts caused boiler accidents

## 사고사례에 기초한 보일러 사고의 원인분석 및 대책

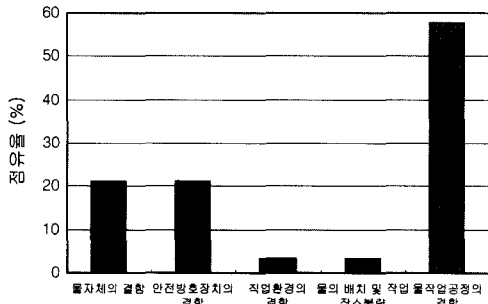


Fig. 3. Proportion of unsafe conditions caused boiler accidents

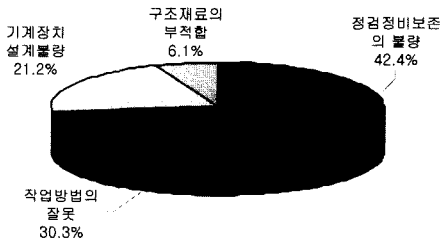


Fig. 4. Proportion of technical causes caused boiler accidents

### 2.1.2. 불안전 상태

불안전상태의 요인으로는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 '작업공정의 결함'이 전체의 57.6%로 가장 많았다. 작업공정의 결함은 그 세부 원인 중 특히, 부적당한 기계장치를 사용하였다거나, 안전장치가 불안전하였다는 내용이 가장 많은 것으로 나타났는데, 부적당한 기계장치나 안전장치에 대한 부품교체나 관리가 제대로 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

## 2.2. 간접원인

### 2.2.1. 기술적 원인

기술적 원인의 경우에는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 '정검정보준의 불량'이 가장 많은 원인이었다. 이는 위에서 살펴 본 바와 같이 보일러에 대한 평소의 소홀한 관리 상태를 나타내는 것이며, 특히 주목할 만한 사항은 '기계장치의 설계불량'이다.

이것은 약 21%를 차지하고 있는데, 이는 무적(無籍)기기의 사용, 즉 허가를 받지 아니한 제조업체에서 보일러를 제작하여 사용하고 있는 경우로서, 여기에 대한 대책이 시급하다고 할 수 있다.

### 2.2.2. 교육적 원인

교육적 원인은 '안전지식의 부족'이나 '경험훈련의 미숙', '작업방법에 대한 교육 불충분'이 거의 비슷한 정도의 점유율을 보여, 전반적으로 보일러 운

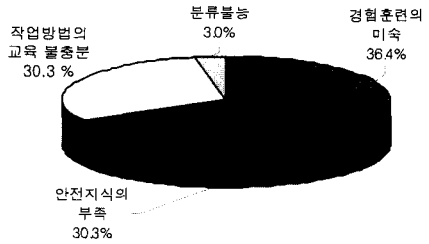


Fig. 5. Proportion of educational causes caused boiler accidents

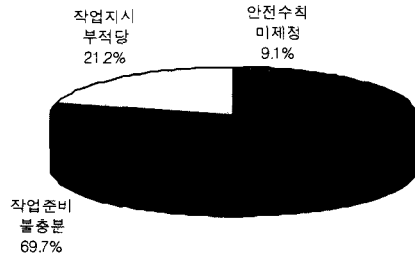


Fig. 6. Proportion of management causes caused boiler accidents

전에 대한 안전이나 작업방법에 대한 교육이 소홀한 것으로 나타났다. Fig. 5는 교육적 원인에 의한 사고발생 점유율을 나타낸 것이다.

### 2.2.3. 관리적 원인

Fig. 6은 작업관리상의 원인을 나타낸 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 '작업준비 불충분'이 가장 높은 점유율을 보여, 안전한 작업이 이루어지기 위한 작업 전 안전점검이나, 평소의 점검 등이 효율적으로 이루어지지 않고 있음을 시사하고 있다.

## 2.3. 사고성향평가에 의한 문제점

사고사례를 통하여 보일러 사고의 원인을 평가한 결과에 따르면, 체계적이지 못한 안전점검과 교육의 부재가 가장 큰 문제점으로 드러났다.

즉, 보일러사고의 직접원인인 불안전 행동의 경우는 불안전상태의 방치가 가장 큰 원인으로 지적되었는데, 이는 평소 보일러에 대한 안전점검이나 안전장치 작동상태, 그리고 기능점검을 소홀히 한 결과로 판단된다. 이는 매일 수행하는 반복작업에 운전자의 기계장치에 대한 안전점검의 태만이나, 체계화된 작업체계 또는 점검체계가 확립되어 있지 못하기 때문이다.

또한, 불안정한 상태는 부적당한 기계장치의 사용이나 불안정한 안전장치와 같이 작업공정의 미숙

함에 해당하는 원인이 가장 큰 것으로 나타났는데, 이것은 각종 안전장치에 대한 부품교체나 정비가 제 때 이루어지지 않거나, 방치하는 경우에 발생하는 것으로 운전자가 기계의 관리 포인트나 점검 주기 등에 대한 철저한 기술습득이 이루어지지 않았기 때문이다.

간접원인에 해당하는 기술적 원인이나 작업관리상의 원인에서도 점검정비보존이나 작업준비 불충분 같은 원인들이 심각하게 평가되었는데, 이 또한 앞서와 같이 보일러 조종의 기본은 작업 전후 안전점검인데, 이에 대한 관리가 절대적으로 부족하기 때문으로 여겨진다.

이러한 점을 종합하여 볼 때, 보일러 사고예방의 가장 근본이 되는 체계적이고 효과적인 점검이 이루어지도록 하는 체계 구축과 이러한 체계가 효율적으로 운용될 수 있는 교육 프로그램이 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 보일러 위험성의 정성적 분석

#### 3.1. 분석방법

시스템의 위험성을 평가하기 위해서는 위험요소 및 위험상황을 초래할 수 있는 원인을 도출하는 정성적 평가가 선행되어 이루어지고, 정량적 평가는 이미 정성적 평가에서 도출된 요소 및 원인에 대한 확률론적 평가가 이루어지는 것이 일반적이다.

그러나, 보일러 사고의 경우에는 폭발 및 화재에 의한 위험성이 높음에도 불구하고, 아직까지 주목할 만한 위험성 평가는 거의 전무한 실정이다. 그렇기 때문에 보일러에 대한 위험성 평가는 정량적 평가보다는 정성적 평가가 먼저 이루어지는 것이 시급하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 FMEA 기법을 이용하여 보일러 전체 시스템을 하부 시스템 및 부품으로 나누고, 발생가능한 고장모드와 그에 따른 하부 시스템 및 전체 시스템에의 영향을 평가하였다.

분석과정 중에는, 정량적인 평가가 곤란한 FMEA의 한계를 보완하고 시스템의 점검 및 보수에 대한 중요성 및 우선순위를 부여하기 위하여, RPN(risk priority number)을 구하였다. RPN은 발생빈도와 시스템에의 영향정도, 그리고 고장발생시의 검출도 등 모두 세 범주로 분류하여 평가하였으며, 각 범주를 5등급의 평가등급으로 나누고 각각의 범주에 대하여 평가한 세 값의 곱으로 나타내도록 하였다.

### 3.2. 분석

#### 3.2.1. 분석과제 정의 및 분석준비

분석 대상으로는 용량이 2ton/h 이하, 압력은 10kg/cm<sup>2</sup>인 수관식 가스형 관류 보일러를 선정하였다. 이 보일러는 건물관리나 산업용으로 가장 널리 사용되고 있으며 열효율이 높고 취급관리가 용이하나, 적기적시에 점검이나 정비가 이루어지지 않을 시에는 사고 발생률이 높다고 인식되어 있기 때문이다.

구체적인 분석 절차로는, 먼저 전체 시스템을 연료공급계통과 전기/제어계통 및 급수 및 증기계통의 서브시스템(subsystem)으로 나누었다.

연료공급계통은 크게 5가지 부품으로 이루어지는데, 보일러로 유입된 가스는 가스압력 저하스위치(gas pressure low switch)를 통하여 공급되는데, 이 장치는 가스가 설정압력 이하로 저하되는 것을 방지하는 역할을 한다.

전기/제어계통은 압력스위치(pressure switch)에 의해서 증기의 압력이 조절이 되고, 과압력 스위치(over-pressure switch)는 증기압력이 설정값 이상인 경우에 보일러를 정지시키는 역할을 한다.

급수 및 증기계통은 연수기에서 연수된 급수를 탱크(tank)에 저장하여 급수 펌프에 의해 보일러에 물을 공급하며, 가스연소에 의해 증기를 발생시켜 기수분리기를 통해 부하(load)측으로 공급된다.

이러한 과정에 의하여 보일러의 일반적인 구조를 바탕으로 FMEA를 수행하기 위한 기능 블록 다이어그램을 구성하였다.

#### 3.2.2. 분석의 실시

먼저, 장비특성과 관련된 부품의 모든 고장모드를 나열하였다. 이 때 각각의 고장은 시스템 내의 다른 고장들과 관계없이 독립적으로 발생하며, 단지 그 고장들의 효과로 발생할 수 있는 부수적인 효과에만 영향을 미친다고 가정하였다.

다음으로, 고장영향에는 고장위치에 미치는 부품 고장의 직접적인 효과와, 다른 장비나 전체적인 시스템에 미치리라 예상되는 기대효과를 모두 나열하였다. 특히 시스템의 사고를 예방하기 위해서는, 시스템 설계안에 존재하는 안전방호장치가 정상적으로 작동하지 않는다고 가정하고, 그 결과 예견될 수 있는 최악의 상황을 염두에 두고 영향을 평가하였다.

또한 원래 고장이란 발생하자마자 검출되는 것이 아니라, 얼마나 신속하게 고장을 검출하고 신속한

Table 1. FMEA result of the fuel supply system (part)

Equipment name	Function	Item No.	Failure mode	Failure cause	Failure Effect		Failure detection	Alternative provisions	발생도 기준	영향도 기준	검출도 기준	RPN 값
					Local effect	End effect						
gas strainer	가스의 이물질 제거	101	막힘	가스에 이물질 혼입	가스공급 기능저하	운전불가	B/R (Alarm)	설비 및 자동제어공정 재검토	3	3	1	9
supply gas pressure	공급되는 가스압력 표시	102	압력표시 불량	싸이폰 공기침입	압력현상 확인불가	없음	없음	설비 및 자동제어공정 재검토	3	3	1	9
gas pressure low switch	가스압력 저하방지 스위치	103	작동불량	자체고장	점화불화	운전불가	B/R (Alarm)	설비 및 자동제어공정 재검토	3	4	3	36
			압력불량	빈번한 작동으로 지침 및 내부마모로 인한 고장	점화불능	운전불가	B/R (Alarm)		3	4	3	36
gas safety shut valve	운전정지 시 가스안전 차단밸브	104	작동불량	기동신호 없음 전자변 coil 불량	점화불능	운전불가	B/R (alarm)	설비 및 자동제어공정 재검토	3	4	3	36
gas leak switch	메인가스 차단누설 감시장치	105	작동불량	자체고장	점화불능	운전불가	B/R (Alarm)	설비 및 자동제어공정 재검토	3	3	3	27
			감지불량	내부마모 고장	점화불능	운전불가	B/R (Alarm)		3	3	3	27
gas pressure	가스압력을 표시	106	압력표시 불량	싸이폰내 공기침입 및 압력계 자체 고장	현장압력 확인불가	없음	없음	없음	2	2	1	4
gas pressure rise switch	가스압 상승 스위치	107	작동불량	빈번한 작동으로 지침 및 내부마모 고장	점화불능	운전불가	운전불가	설비 및 자동제어공정 재검토	3	3	2	18
main gas shut valve	연소실 점검시 가스공급 차단밸브	108	작동불량	기동신호 없음	점화불능	운전불가	B/R (Alarm)	자동제어 재검토	2	3	2	12

조치를 취하는가에 따라 그 피해규모가 달라지므로, 그 검출 난이도도 평가하였다.

그리하여, 최종적으로 발생도와 치명도, 검출도 등 세 가지의 값에 의하여 결정되는 RPN (risk priority number) 값을 계산하였다.

Table 1은 이러한 과정에 의한 각 하부시스템의 FMEA 분석결과의 일부를 나타낸 것이다.

### 3.2.3. 분석결과의 정리

본 연구에서는 각 부품에 대한 RPN 값을 기준으로 위험의 우선순위를 결정하였다. 즉, Fig. 7에서 보는 바와 같이 분류 기준으로는 RPN 값이 30 이상으로 평가된 고장모드를 포함하는 부품을 A그룹, 30 미만 25 이상인 부품은 B그룹, 25 미만이고 15 이상인 부품을 C그룹, 그리고 15 미만인 부품을 D 그룹으로 분류하여, 네 그룹으로 나눈 것이다.

이상과 같은 분류는 RPN 값이 총 평점(5×5×5 = 125)의 상위 20%에 해당하는 25 이상을 위험도가

높다고 판정한 것이다.

이와 같은 기법은 파레토도(Pareto's curve)의 특성으로서 분류항목의 합계에 대한 비율(상대도수, 누적상대도수)을 구하거나, 분류항목을 몇 개 합하여 그 전체에 접하는 비중을 발견하게 되는 등 개선을 위해 노력을 투입하여야 할 방향을 정하는 데 도움을 줄 수 있다.

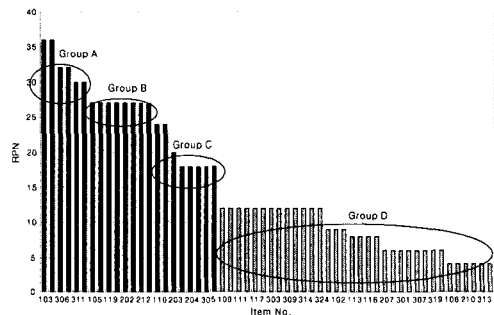


Fig. 7. Risk level classification of components by RPN values

Table 2. Critical items in the fuel supply system (RPN≥25)

Equipment name	Function	Item No.	Failure mode	Failure cause	Failure Effect		Failure detection	발생도	영향도	검출도	RPN 값
					Local effect	End effect					
가스압력 저하스위치	가스압력 저하방지	103	작동불량	자체고장	점화불능	운전불가	Alarm	3	4	3	36
			압력불량	빈번한 작동으로 내부지침 마모고장	점화불능	운전불가	Alarm	3	4	3	36
gas safety shut valve	운전정지시 가스 안전 차단밸브	104	작동불량	기동신호 없음 전자밸브 coil 불량	점화불능 점화불능	운전불가	Alarm	3	4	3	36
gas leak switch	가스차단 밸브의 가스누설 감시	105	작동불량	자체고장 내부마모	점화불능	운전불가	Alarm	3	3	3	27
			감지불량	고장	점화불능	운전불가	Alarm	3	3	3	27
가스버너	가스연료 연소장치	116	오염상태	스파크롤 scale 및 간격 부적당	연소불능	운전불가	Alarm	3	3	3	27
			작동불능		연소불능	운전불가	Alarm	3	3	3	27
연소안전 제어장치	연소화염 유무감시 안전제어 장치	120	입출력불량 단락	작동불량	점화불능	운전불가	Alarm	3	3	3	27
				자체고장	점화불능	운전불가	Alarm				

이 중 특히 A, B 그룹에 해당하는 부품들과 그것들의 고장모드에 대한 결과를 각 하부시스템별로 살펴보면 아래와 같다.

1) 연료 공급계통

Table 2는 연료공급계통에 대한 FMEA 분석결과 중 RPN 평가 결과가 25 이상인 고장모드들을 나타낸 것이다.

가스안전차단장치는 이상 소화되었을 경우, 통전 등이 정지되었을 경우, 보일러 수위가 안전 저수위 이하가 되었을 경우, 증기 압력이나 온도가 과도하게 높아졌을 경우 등과 같은 경우에는 폭발 및 위험상태 등의 발생방지를 위하여 신속하게 연료를 차단하여야 한다. 이것은 단 시간 내에 작동하게 하는 연소안전장치로서 가장 중요한 역할을 하며, 고장모드인 작동불량은 위험도가 비교적 높은 것으로 평가되어 보일러의 과열과 같은 심각한 결과를 초래할 수 있기 때문에 점점 정비시 가스안전차단장치에 대한 확인점검이 가장 우선적으로 실시되어야 할 것이다.

가스 누설 감시장치는 작동불량의 고장모드가 발생도, 영향도, 검출도의 평가결과 비교적 RPN 값이 높게 나타나, 내부누설을 대비하여 보일러 작동기능에 이상이 생기지 않도록 수시로 점검할 필요가 있다.

그리고, 가스 압력 저하 스위치에서 발생가능한

고장모드는 작동불량 및 압력불량으로써 사용가스 압력이 이상증가 또는 이상감소하게 되면 불완전 연소가 발생하므로 수시로 확인할 필요성이 있는 부품이다.

또한 연소안전제어기의 경우에는 고장모드가 작동불량 및 자체고장일 때 보일러의 운전불가라고 하는 심각한 결과를 초래하기 때문에 자외선방식 또는 정류작용을 이용한 플레임 로드(flame rod)에 의한 형식으로 하고, 오동작이 없고 신뢰성이 있는 것으로 사용하고, 수시로 보수점검 및 정비를 하여야 할 것으로 판단된다.

가스버너의 고장모드는 오염상태 및 작동불량으로서, 연소불능상태가 되어 결국 운전을 할 수 없는 상태가 되기 때문에, 잠재위험성이 높은 것으로 판단된다.

이 외에 공급가스 압력계의 고장모드인 압력표시 불량인 경우에는 검출도는 1로 평가되어 비교적 검출이 용이하였지만, 영향도나 발생도는 모두 3 이상인 것으로 평가되어 이에 대한 점검관리를 소홀히해서는 안 될 것으로 판단되었다.

2) 전기/제어계통

전기/제어계통에 대한 FMEA 분석결과에 따르면, 수위제어장치는 급수펌프 및 버너를 자동제어하고 관체의 과열을 방지하여 운전중 급수가 저수위에

Table 3. Critical items in the electrical/control system (RPN≥25)

Equipment name	Function	Item No.	Failure mode	Failure cause	Failure Effect		Failure detection	발생도	영향도	검출도	RPN 값
					Local effect	End effect					
low water alarm	관체의 수위를 제어하는 역할	201	중수위전극불기능 상실	scale고착및전극봉자체결합	pump 구동력불가	관체 수위저하	Alarm	3	3	3	27
			저수위전극불기능 상실	scale고착및전극봉자체절연불량	안전수위이하로물저하	보일러 파열	관체의 고온경보 (Alarm)	3	3	3	27
protect relay	연소제어, 농축수 blow 배출기능 제어	202	단락	단락으로 자체결합	연소제어불가및농축수blow조정불가	운전불가	Alarm	3	3	3	27
			절연불량	절연불량으로 단락 자체결합	scale고착으로 파열	Alarm	3	3	3	27	
gas leak alarm	가스차단밸브의 가스누설을 감시	203	잡음	개방고장	panel 전원불가	운전불가	Alarm	3	3	3	27
			단락	절연불량으로 단락결합및잡음	panel 전원불가	운전불가	Alarm	3	3	3	27
boiler tube thermostat	관체과열상태및화재발생방지장치	204	단락,잡음	단락및절연불량	전원불가	운전불가	Alarm	3	3	3	27
			입출력, 절연불량	으로인한고장	전원불가	운전불가	Alarm	3	3	3	27

도달하면 버너의 연소회로를 자동으로 차단한다. 급수펌프는 이 때 수위가 고수위에 도달하면 급수펌프를 제어하고 고수위 이하로 내려가면 30초 후에 재급수되어 고수위에서 차단된다.

고장모드인 전기전도도의 불량은 보일러의 파열과 같은 심각한 결과를 초래할 수 있기 때문에 위험도가 높을 것으로 판단되며, 점검정비시 수위제어장치에 대한 점검이 우선적으로 실시되어야 한다.

프로텍트 릴레이(protect relay) 장치의 폐쇄고장 및 성능열화는 발생도 영향도 검출도 등의 평가결과 RPN 값이 가장 높게 나타났다. 프로텍트 릴레이 장치의 주접점 이상시 보일러의 연소기능에 이상이 생기지 않도록 수시로 점검 정비할 필요성이 있다.

가스누설 감지장치의 고장모드는 단락 및 감지불량으로서, 가스누설시 감지가 되지 않았을 경우에는 폭발 및 화재로 이어질 가능성이 매우 높으므로, 수시로 점검되어야할 중요한 부품으로 판단되며, 교체시 고신뢰도의 부품으로 교체할 필요가 있다.

한편, 관체과열 방지장치의 고장모드는 단락 및 절연불량으로 보일러관체 온도가 비정상적으로 상승했을 경우 관체과열 방지스위치가 작동하지 못하게 되면, 폭발의 위험으로부터 자동으로 관체를 보호할 수 없기 때문에, 이에 대한 점검정비도 소홀히해서는 안 될 것으로 판단된다.

3) 급수 및 증기계통

급수 및 증기계통의 분석결과에 따르면, 수위조절장치의 경우 모두 두 개의 고장모드가 평가되었

는데, 보는 바와 같이 고장모드 전체가 위험도가 높은 것으로 나타났으며, 보일러의 파손과 같은 결과를 초래할 수 있기 때문에, 정비점검시 수위조절장치에 대한 확인이 가장 우선적으로 실시되어야 할 것으로 판단되었다.

급수펌프의 고장모드인 “빈번한 작동”은 비록 고장에 의한 영향이 낮게 평가되었다 하더라도, 발생도 및 검출도가 높게 평가되어 적시에 고장을 검출하지 못하였을 경우에는 급수가 적절하게 이루어지지 않아, 보일러의 가장 기본적인 기능에 문제가 발생하기 때문에 자주 점검을 해야 할 필요가 있다.

그리고, 안전밸브의 경우에는 폐쇄고장이 발생되었을 때, 보일러의 파열이라고 하는 심각한 결과를 초래하기 때문에 이에 대한 점검도 무시할 수 없는 순위라고 할 수 있다.

또한, 약주입펌프와 약주입펌프모터는 보일러의 관수의 이물질을 제거하는 데 사용되는 약품을 공급하는 역할을 하는 부품으로서, 이 두 부품에 이상이 발생하였을 때는 관수에 약품공급이 중단되고, 이는 관체의 부식이나 스케일의 고착과 같은 결과를 초래하게 되어 결국, 보일러의 파열을 발생시킬 수 있는 잠재위험성이 높을 것으로 판단된다.

이 이외에도 급수탱크 수위조절장치의 “수위조절기능 상실” 이나 급수펌프의 “출구 급수압력 없음”의 경우에는 검출도가 1로 각각 평가되어 비교적 검출이 용이하였지만, 발생도나 영향도는 모두 3 이상인 것으로 평가되었으므로 이에 대한 관리도 소홀히해서는 안 될 것으로 판단되었다.

Table 4. Critical items in the water feeding and steam system (RPN≥25)

Equipment name	Function	Item No.	Failure mode	Failure cause	Failure Effect		Failure detection	발생도	영향도	검출도	RPN 값
					Local effect	End effect					
수위조절 장치	보일러내 수위조절	322	고수위전극봉 기능상실	스케일부착 및 자체결합	급수넘침 계속	운전불가	없음	3	3	3	27
			저수위전극봉 기능상실	스케일부착 및 자체결합	안전수위 이하로 수위저하	보일러 파열	관체의 고온경보	3	3	3	27
급수펌프	관체내급수공급	306	빈번한작동	급수관수 누설	펌프수명 저하	없음	없음	4	2	4	32
safety vavle	관체고압방비	325	폐쇄고장	밸브자체 기계적고장	관체증기압 상승	보일러 파열	없음	2	4	4	32
약주입 펌프	관체에 약품공급	311	출구압력없음	펌프고착및 모터구동력없음	약주입공급 불능	관체부식 촉진	육안	3	2	5	30
약주입펌프 모터	약주입 펌프 구동력 발생	312	모터출력없음	펌프고착, burning-out, 기동신호 없음	약주입펌프 구동불능	관체부식 촉진	육안	3	2	5	30

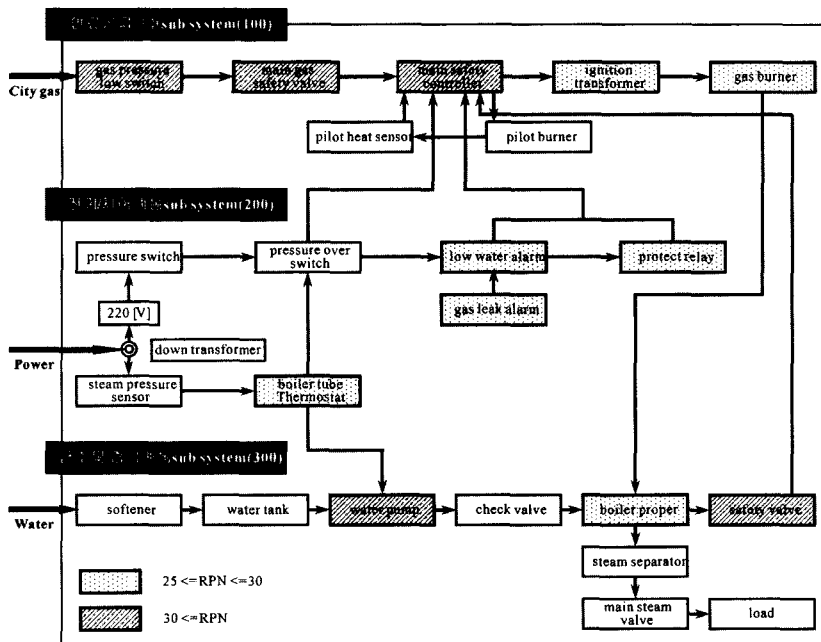


Fig. 8. Critical components in a boiler system derived from FMEA

### 3.3. 위험성 평가에 기초한 위험부품

Fig. 8은 본 연구의 FMEA 분석결과 보일러 시스템 전체에 심각한 영향을 미칠 수 있는 부품들을 나타낸 것이다. 이 중 위험성이 가장 높게 평가된 부품들은 연료공급계통의 경우, 가스안전차단장치였으며, 급수 및 증기계통에서는 급수펌프, 안전밸브, 약주입펌프, 약주입펌프모타 등으로 이러한 부품들에 대해서는 다른 어느 부품보다 철저한 관리점검이 필요할 것으로 판단되었다. 특히, 급수 및 증기계통의 경우에는 다른 하부시스템보다 RPN 값이

높은 부품의 수가 많은 것으로 나타나, 잦은 일상점검을 통하여 부품의 결합에 의한 시스템의 고장을 방지하여야 할 것으로 판단되었다.

한편, 그 다음으로 위험성이 높은 그룹에 해당되는 부품을 각 하부시스템별로 살펴보면, 연료공급계통의 경우 가스누출밸브, 가스버너, 연소안전제어장치 등이었다. 또한, 전기/제어계통에서는 저수위 경보장치, 프로젝트 릴레이, 가스누설감시장치, 관체 파열 방지장치 등이었으며, 급수 및 증기계통의 경우에는 수위조절장치이었다.



이 중 특히, 연료공급계통의 주 안전제어의 경우에는 해당 하부시스템의 부품들과 연결되어 있을 뿐만 아니라, 다른 하부시스템의 안전장치들과 연결이 되어 있어, 일단 이 부분에서 고장이 발생하게 되면, 다른 안전장치들의 작동의 신뢰성을 보장할 수 없기 때문에 특히 많은 주의를 기울여야 하고, 수시로 점검할 필요가 있다고 판단되었다.

#### 4. 고 찰

산업용 보일러는 그 특성상 늘 고온·고압 하에서 운전을 해야 하기 때문에, 평소 그 관리를 소홀히 하였을 경우에는 생각지 못한 커다란 재해로 이어질 위험성이 항상 존재한다고 할 수 있다. 특히 열응력에 의한 설비의 열화문제라든가, 열매유를 사용하는 경우도 있기는 하지만 대부분 물을 사용하고 있기 때문에 발생할 수 있는 부식 및 스케일에 의한 파열이 그러한 위험성을 증가시킨다.

그러므로, 부식이 발생하였을 경우에는 각종 안전장치의 기능에도 영향을 미치기 때문에, 평소에 관리를 철저히 해 두지 않으면, 보일러에 이상이 발생하였을 경우 그 기능을 상실할 우려가 있으므로 각별한 주의 및 관리를 하지 않으면 안 된다.

그러나, 앞에서 이미 지적한 바와 같이 현재 보일러 사고의 가장 큰 원인이 되고 있는 것은, 안전관리 및 점검, 그리고 안전운전에 대한 교육의 부재가 가장 큰 문제로 드러났다.

보일러의 올바른 관리를 위해서는 보일러의 용량, 사용조건, 등을 고려하여 연간 및 일상의 운전 계획 및 보전 계획을 세우고, 이에 근거하여 관리하는 일이 중요하다.

일상점검의 경우에는, 이미 앞에서 살펴 본 바와 같이 수면계, 자동급수 조절장치, 저수위 조절장치 등의 기능확인 및 증기압력, 수위(水位), 급수펌프, 수(水)처리, 연소상태 및 분출 등의 점검이 매우 중요하다. 이 점검결과에 대해서는 기록표를 작성하고, 그 내용을 기록해 놓아 시계열(時系列) 변화에 따른 변동을 파악하는 것이 바람직하다.

한편, 스케일(scale) 등의 퇴적물에 의한 오작동이나 사고를 방지하기 위하여 연료 공급계통, 급수 및 연소계통, 전기/제어계통의 부품에 대한 이상유무 등도 세밀하게 점검하여야 한다.

그러나, 보일러가 이처럼 많은 위험요소를 안고 있는데도 불구하고, 실제로 현장에서 이루어지고 있는 보일러에 대한 교육은 직무교육 정도가 전무인 실정이다.

현재, 보일러에 관련된 교육은 “에너지 이용 합리화법령 보칙(법 제88조)”에 의거하여 에너지 관리의 효율적 수행 및 검사대상 기기의 안전관리를 위해서 시공업의 기술인력 및 보일러 조종자에 대하여 실시하지만<sup>5)</sup>, 현실적인 교육은 3명 정도의 강사가 주입식 강의로 실시되고 있다.

더욱이 현장실무에 능숙한 실무자가 전문강사로 위촉되어 실시되는 것이 아니라, 실무경력과는 관계없이 자격선임에 의한 교육대상의 선정으로 교육이 이루어지므로, 위험하고 중요한 기기를 다루는 검사기기 조종자의 교육으로서는 더 더욱 바람직하지 못하다고 판단된다.

이와 같은 상황을 개선하려면, 사고사례 중심의 현장실무를 중심으로 보일러 기능이론을 교육하는 실무 중심적인 교육을 매년 의무화함으로써 그 효과를 기대할 수 있을 것이다.

또한, 보일러 작업은 대부분 지하와 같은 폐쇄된 공간에서 작업자 한 사람의 단독작업으로 수행되는 경우가 대부분이므로, 작업자 개개인의 위험예지능력이 발견능력, 그리고 문제해결능력이 사고예방에 매우 중요한 역할을 한다. 그러나, 주입식 교육이나 암기식 교육으로는 이와 같은 능력을 육성하기 곤란하므로, 1인 위험예지훈련이나 지적확인 등을 통한 교육훈련대책을 마련하는 것도 시급하다고 판단된다.

#### 5. 결 론

보일러에 대한 사고사례를 통하여 그 원인을 분석하고, FMEA를 이용하여 보일러의 안전성에 대한 평가를 해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 보일러 사고에 관련된 직접적 원인인 중 불안정한 행동으로는 ‘불안전상태의 방지’가 가장 큰 원인으로 지적되었으며, 불안전상태로는 ‘작업공정의 결합’이 주요 원인으로 지적되었다.

2) 보일러 자체가 갖는 구조적·기능적 위험성을 분석한 결과, 급수 및 증기계통에 위험성이 높은 부

품이 다수 해당되어 일상점검 정비의 주요대상으로 지적되었다.

3) 보일러 설비에 대한 효율적이고 합리적인 안전관리를 위해서는 먼저, 연간 및 일상의 운전 및 보전 계획을 세우고, 그것에 근거하여 관리하는 일이 중요하다고 판단되었다.

끝으로, 사고사례 중심의 현장실무를 중심으로 하는 교육을 매년 의무화함으로써 보일러에 대한 안전관리가 효과적으로 이루어질 수 있도록 해야 하며, 위험예지훈련이나 지적확인 등 작업자 개개인의 위험예지능력 및 감수성을 향상시키는 교육훈련 대책 및 기법의 개발이 시급하다고 판단되었다.

## 참고문헌

- 1) 박병석 외, 보일러 산업 50년사, 한국보일러공업 협동조합, 1998.
- 2) 2001 에너지관리 실무교육, 한국에너지관리공단, 2001.
- 3) 한국중공업(주), 발전설비 진단 및 정비기술 개발(연구보고서), 과학기술부, 2000.
- 4) 송수영, 보일러 및 안전대책에 관한 연구, 동국대학교 행정대학원, 1983.
- 5) 가스용 보일러 조종자 교재, 한국에너지관리공단, 1997.