

노통연관식 보일러의 압력사고 방지대책

이근오 · 김종진*

서울산업대학교 안전공학과 · *한국에너지기술연구원

1. 서론

보일러는 폭발 등의 사고 잠재력을 항상 갖고 있는 위험한 기기이며, 폭발사고 발생 시에는 단지 그 기능이 손상되는 것뿐만 아니라 인명 피해와 폭발·화재 등의 2차 재해로 이어지기 때문에 이들 기기가 소기의 사용 목적을 다하기 위해서는 파손되지 않도록 함은 물론이고, 사용과정에서도 높은 수준으로 안전성을 유지하여 기능이 훼손되지 않도록 신뢰도를 높여 나감으로서 보일러 폭발에 의한 대형사고를 사전에 예방할 수 있다. 보일러의 파손은 보일러 내의 압력강하로 인한 보일러 수의 급증발 현상에 의한 체적의 순간팽창(약 1,700배)으로 인하여 그 방출에너지가 엄청나고, 고온이기 때문에 위험성이 크며, 연료를 취급하는 장소에서 사고가 일어나므로 화재 등 연료에 의한 2차 폭발 등이 우려된다. 고압의 장치가 파손되면 보일러 몸체뿐만 아니라 구성부품이나 파편이 고속으로 멀리 비산하게 되고, 이로 인하여 심각한 2차 재해를 유발한다.¹⁾

우리나라에서 1978~2000년 사이에 산업용보일러의 사고는 총 81건으로 206명의 사상자가 발생하였으며, 이 중 사망자의 수는 52명에 달하였다.²⁾ 따라서, 보일러사고는 발생 건당 2.54명의 사상자와 0.64명의 사망자를 발생시키는 대단히 위험한 기기로서 그 운용관리에 있어서 특별한 주의가 요구된다. 또한, 노통연관식보일러는 22건의 사고가 발생하여 18명이 사망한 것으로 볼 때 다른 형식의 보일러에 비하여 재해강도가 높고, 위험성이 특히 높은 것을 알 수 있다. 보일러 사고 중에서 노통연관식보일러의 압력은 보일러 내부의 증기, 열수가 대기중으로 급격히 부피팽창을 하여 그 반동으로 보일러가 비산하여 신체재해나 건물파괴 등을 유발시키는 매우 위험한 사고이다.

본 논문에서는 실제 압력사고가 발생한 노통연관식보일러의 사고원인을 종합적으로 분석하여 향후 발생될 수 있는 노통연관식보일러의 사고로 인한 재해를 예방할 수 있는 안전대책을 세우고자 한다.

2. 노통 연관식 보일러의 압력사고

2.1 노통 연관식 보일러의 구조

본 논문에서 연구대상인 노통연관식보일러는 증기보일러로써 전열면은 노통과 연관으로 구성되어 있고, 배기가스의 열을 회수하기 위하여 히트파이프식 공기에열기가 장착되어 있다.

노통연관식보일러의 구조도를 Fig.2-1에 도시한다. 이 보일러의 노통은 편심노통으로 모리슨 파형으로 제작되어 있고, 후연실은 습식으로 구성되어 있다. 버너에서 공급된 LNG는 연소실(파형노통 내부)에서 연소되고, 후연실에서 연관을 통하여 유입되어 보일러 앞 쪽으로 이동한다. 평균직경이 2,016mm인 연소실과 동일직경의 후연실을 연결하는 유로는 직경 482mm이고, 길이 360mm인 교축부로 구성되어 있다. 이 교축부의 수평중심선은 연소실의 수평중심선과 동일 선상에 위치하고, 교축부의 수직중심선은 연소실의 수직중심선에서 연관측으로 470mm 치우쳐 있다. 따라서, 연소실에서 발생된 연소가스는 단면적이 약 1/16로 교축되는 이 교축부를 통과하면서 혼합되는 구조로 되어 있다.

후연실에서 혼합된 연소가스는 연관을 거쳐서 보일러 전면으로 이동하면서 보일러 수에 열을 공급한 후, 배기가스는 보일러 전면 상부에 설치된 히트파이프식 공기에열기를 거쳐 연도로 배출된다

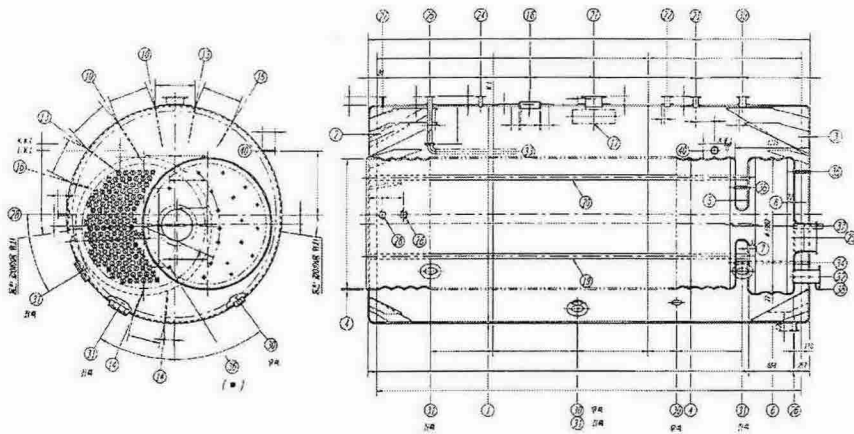


Fig. 2-1 사교보일러의 구조도

2.2 압케 사고에 의한 보일러 상태

(1) 노통의 변형상태

사고보일러는 노통 상부가 압케되었으며, 특히 노통길이방향으로 중앙부가 심하게 압케되었다. 또한, 노통은 연소실의 뒤쪽이 앞쪽보다 훨씬 심하게 압케되었다.

노통이 연결되는 앞쪽 경관은 원형을 유지하고 있었지만, 뒤쪽 노통경관의 상부는 일부 압케되어 있었다. 노통 후부의 압케 상태를 Fig. 2-2에 나타낸다. 노통 압케부에는 물이 가득 차 있었고, 채워진 물의 수면은 동체의 천장에서 1,680mm에 위치하였다.

동체 내부에 들어가서 노통 상부에서 측정된 노통 압케부의 치수를 Fig. 2-3에 나타낸다. 단, 압케부의 수평길이는 노통의 중심선에 대하여 수직한 방향으로 압케된 길이를 측정된 값이다.

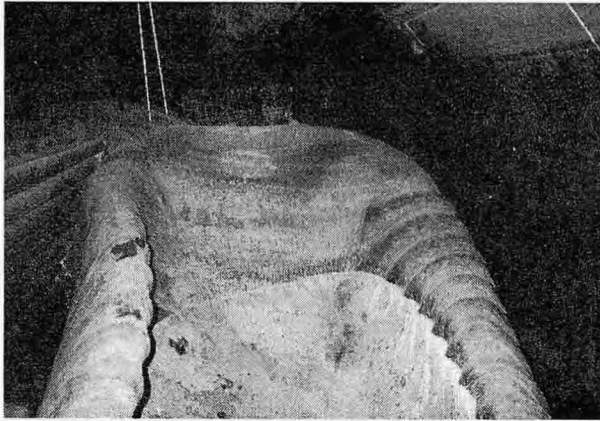


Fig. 2-2 노통 후부의 압개 상태

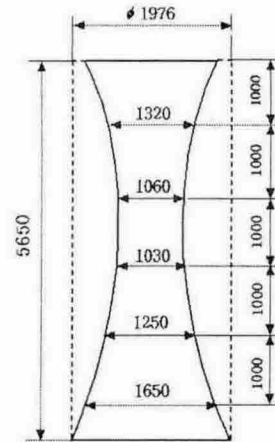


Fig. 2-3 노통 압개부 스케치

(2) 사고 시점의 수위변화

1) 사고 당시 최저수면의 위치

동체 내면에 나타나 있는 수면의 흔적을 확인한 결과, 최저수면의 위치는 동체 천장에서부터 아래방향으로 약 1,700mm에 위치하였다. 즉, 노통 압개부에 채워진 물의 수면의 위치(1,680mm)보다 20mm 정도 아래쪽에 위치하였다.

따라서, 압개사고시 보일러의 최저수면은 동체 천장에서 1,700mm 하방, 즉 노통 중심에서 위쪽으로 90mm 위치까지만 물이 차있었고, 노통의 상부 920mm 정도는 물이 없었던 것으로 추정할 수 있다.(Fig. 2-4 참조)

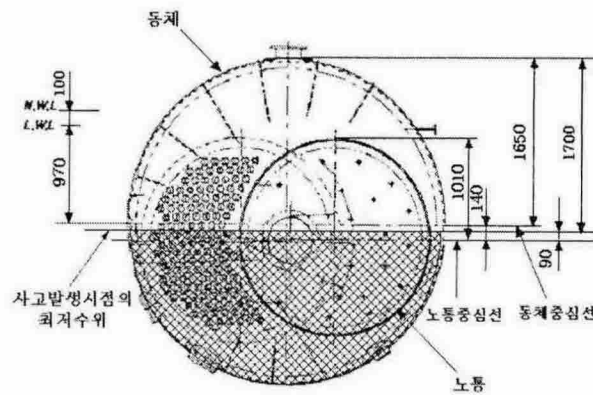


Fig. 2-4 사고발생시의 최저수위

2) 사고 보일러의 기타 수면수위

Fig. 2-5에서 고수위시의 위치(H.W.L)는 동체의 중심선에서 약 1,108mm 상부에 위

치하고, 정상수위(N.W.L)는 동체의 중심선에서 약 1,070mm 상부에 위치하며, 저수위로 펌프가 구동되는 위치(L.W.L)는 동체의 중심선에서 1,039mm 상부에 위치한다. 그리고 수위가 더욱 하강하여 동체 중심에서 1,020mm에 도달하면 맥도널에서 버너를 끈다. 그러나 어떠한 이상으로 인하여 수위가 계속 감소하면, 마지막으로 전극봉의 극저수위차단장치가 작동하여 연소를 차단하게 된다. 이때 수위는 동체중심선에서 995mm 상부에 위치한다. 모든 수위조절안전장치가 작동하는 H.W.L, N.W.L, L.W.L은 모두 선명한 Band 내부에 위치한다. 더욱이 H.W.L은 선명한 Band의 상부선보다 약 40mm 하부에 위치하고, L.W.L은 선명한 Band의 하부선보다 약 130mm 상부에 위치한다. 따라서, 극저수위스위치 작동수위보다 수면이 85mm 이하로 내려갔다가 고수위 위로 40mm까지 상승하는 과정을 수없이 많이 반복했다는 것을 짐작할 수 있다.

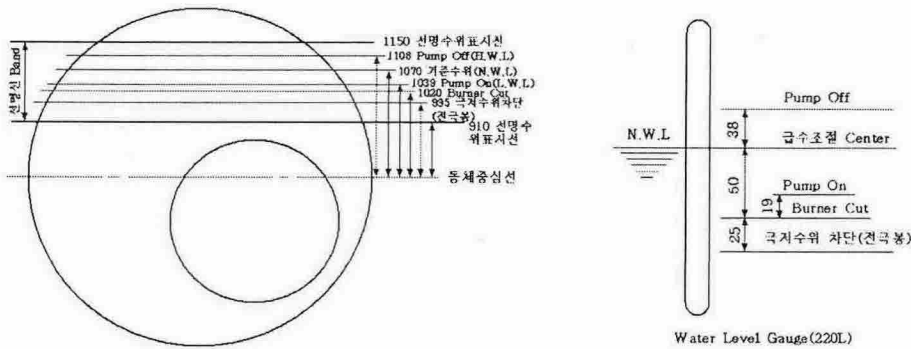


Fig. 2-5 고·저수위 위치관계

H.W.L과 L.W.L을 포함하는 선명한 Band가 형성된 것은 맥도널 스위치의 배관부에 슬러지가 퇴적된 후, 수위조절장치(맥도널)의 응답성이 늦은 상태로 상당히 오랫동안 운전되면서 형성된 것으로 판단이 된다. 그리고 정상수위를 중심으로 운전된 수위선들은 이 선명한 Band 내에 포함되어 지워진 것으로 사료된다.

2.3 노통 압괴 발생원인

사고발생순간 노통 중심에서부터 90mm 상부까지만 수면 아래에 있고, 노통 상부 910mm 정도가 물이 없는 상태에서 화염에 직접 노출되어 가열된 경우이다. 이때 노통 상부의 온도는 적어도 1,000℃ 이상으로 추정할 수 있다. 노통의 재료로 사용한 SB 410에 대하여 온도변화에 따른 최대인장강도를 나타내었다. SB 410은 350℃까지는 최대인장응력 값이 42kgf/mm²로 유지되다가 온도가 450℃가 되면 23kgf/mm²로 저하되어 상온에서의 1/2정도가 된다. 또한, 450℃를 초과하면 SB 410은 기계적인 성질을 상실하게 되어 사용할 수 없다.

따라서, 사고보일러의 노통압괴원인은 금속조직현미경검사와 수면측정결과로부터 노통상부가 1,000℃ 이상 가열되어 인장강도가 급격히 감소된 상태에서 동체 내의 압력으로 인하여 노통상부가 내측으로 압괴되었다고 말할 수 있다. 그러므로 당해 보일러의 노통압

퀘사고는 저수위로 인한 사고로 결론지을 수 있다.

2.4 저수위 사고의 원인

사고 보일러에 저수위를 검출하여 연소차단을 할 수 있는 안전장치로써 맥도널 스위치와 전극봉식 저수위검출기가 2중으로 설치되어 있으며, 부가적으로 배기가스온도상한 스위치가 설치되어있다.

(1) 저수위 안전장치의 점검

1) 맥도널 스위치

맥도널 저수위 스위치의 플로트실에 슬러지가 부착한 것을 알 수 있다. 그 슬러지의 일부를 제거하여 관찰하면 미세한 분말상의 물질로 구성되어 있었다. 맥도널 저수위스위치를 보일러 배관에서 분리한 상태로 맥도널 저수위스위치의 접점을 콘트롤판넬과 결선하여 맥도널 저수위스위치의 접점을 확인한 결과 접점은 정상적으로 작동하였다. 따라서, 맥도널 스위치 자체는 이상이 없음을 알 수 있다.

2) 전극봉식 저수위차단기

전극봉식 저수위검출기의 전극봉 2개가 설치되어 있었음. 그러나 사고 당시에 전극봉식 저수위차단기는 Common결선 상태이었던기 때문에 그 기능이 무효화되어 있어 저수위차단 인터록이 작동하지 않았다.

3) 배기가스 온도스위치

사고 보일러에 설치된 온도스위치를 정상운전 중인 4호기 보일러에 설치하여 배기가스온도계의 지시값이 220℃인 경우에 온도스위치의 작동여부를 확인하였다. 그 결과를 Table. 2-1에 나타낸다.

온도스위치의 연소차단은 실제배기 가스온도 보다 약 30℃ 낮은 온도에서 발생하였다. 이것은 배기가스 온도스위치의 센서가 전연실에 설치된 것을 고려하면 전연실의 가스온도는 배기가스온도 보다 약 20~30℃ 높은 것으로 판단되기 때문에 온도스위치의 연소차단은 전연실 실제 가스온도 보다 약50~60℃ 낮은 온도에서 작동하는 것으로 판단된다. 이것은 배기가스 온도스위치의 온도 Probe의 길이가 짧아서 Probe의 선단이 전연실의 캐스터블 표면과 거의 동일한 위치에 설치되어서 배기가스 평균온도를 감지 할 수없는것에 기인하는 것으로 판단된다

Table. 2-1 4호기 온도스위치 점검결과

	온도스위치 설정온도(℃)	작동 여부
1차 시험	180	소화
2차 시험	190	소화
3차 시험	190	소화
4차 시험	200	무작동

(2) 사고 보일러의 제어계통 점검

사고 보일러의 제어계통에 이상이 발생하여 연소차단이 되지 않았는지의 여부를 파악하기 위하여 사고 보일러에서 설치된 제어판넬의 연료차단 여부를 확인하였다.

보일러의 맥도널 저수위스위치의 동작에 의한 연료차단이 발생하는가를 알기 위하여 맥도널 저수위스위치의 점점의 상태를 변화시켜서 연료차단밸브의 작동여부를 확인하였다. 그 결과 맥도널 저수위스위치의 연소차단상태에서 연료차단밸브의 폐쇄가 정상적으로 이루어졌다. 따라서, 사고 보일러의 제어판넬이나 이와 관련된 배선상에는 이상이 없는 것을 확인하였다

3. 저수위 사고원인 분석

이번 사고 보일러의 노통 압력사고는 전술한 이유를 들어 '저수위에 의한 노통의 압력사고' 라고 판단할 수 있다. 맥도널 저수위스위치가 작동을 하지 않은 직접적인 이유는 ① 맥도널 저수위스위치와 그 연결배관에 슬러지가 퇴적하여 수면저하를 검출할 수가 없었고, ② 전극봉식 저수위차단기도 저수위를 검출하지 못하였으며, ③ 배기가스 온도상한스위치도 배기가스온도 상승을 정확히 감지하지 못하였기 때문이다.

3.1 맥도널 저수위스위치

맥도널 저수위스위치가 작동을 하지 않은 직접적인 이유는 맥도널 저수위스위치와 그 연결배관에 슬러지가 퇴적하여 배관폐쇄로 인하여 수면저하를 검출할 수가 없었기 때문이라는 것에는 자명한 사실이다. 슬러지가 맥도널 저수위스위치와 그 연결배관에 퇴적한 이유는 다음과 같은 측면에서 검토할 수 있다

(1) 맥도널 저수위 스위치 배관의 구조적 문제점

Fig. 3-1(a)는 사고보일러에 설치되어있는 맥도널 스위치이다. 사고 당시 맥도널 스위치의 배관 중의 수부연락관에 차단밸브가 부착되지 않아서 수부연락관을 통하여 분출되는 포화수와 증기부연락관을 통하여 분출되는 포화증기가 동시에 분출되는 구조이다.

일상점검 시에 맥도널 저수위스위치 배관의 분출점검을 행하였지만, 저수위스위치 배관 하부에 슬러지가 퇴적된 것은 수부연락관에 밸브 E가 설치되지 않아서 유체역학적인 유로가 불확실한 것이 1차적인 원인이다.

따라서, 맥도널 스위치 배관의 수부연락관에 Fig. 3-1(b)와 같이 밸브 E가 설치되어 일상점검 시에 밸브 E를 닫은 상태에서 밸브 B, C, D를 개방한다면, 맥도널 저수위스위치 배관에 유로가 형성되어 슬러지 퇴적이 발생되지 않았을 것이다.

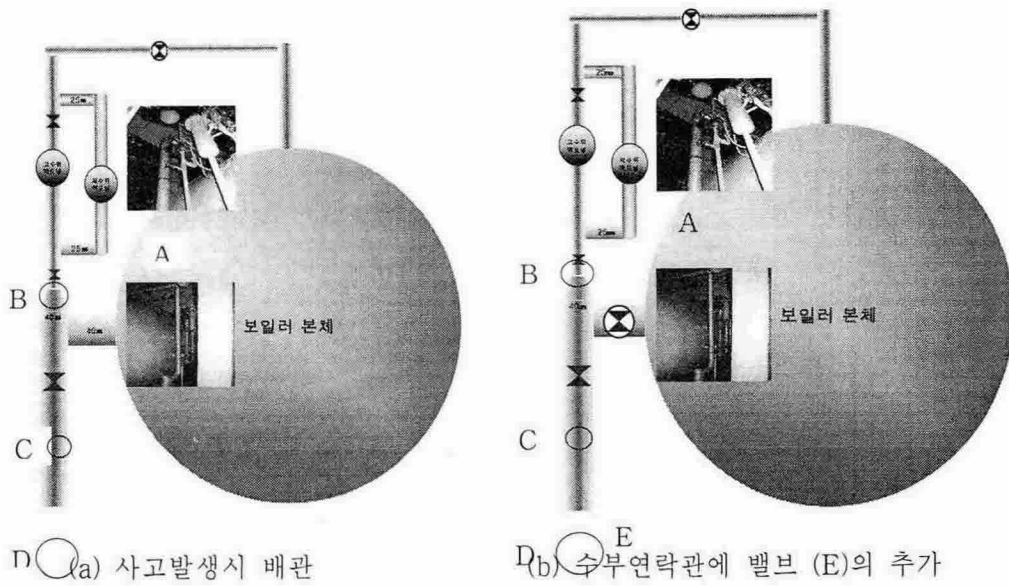


Fig. 3-1 맥도널 스위치 배관의 개략도

(2) 관리적인 원인

세관작업 후 약 3개월 경과된 시점(가동시간 186시간)에서 맥도널 저수위스위치의 배관이 슬리지로 폐쇄되어 압케가 발생한 것을 고려해 보면, 보일러 운전관리자가 매일 일상점검을 하였다는 것을 납득하기가 어렵다. 매일 보일러의 일상점검을 실시하였고, 일상점검 시에 맥도널 스위치 배관의 증기분출을 원칙에 따라서 실시하였는지 의문을 제기하지 않을 수 없다.

3.2 전극봉식 저수위차단장치

전극봉식 저수위차단기가 작동하지 않은 직접적인 이유는 전극봉식 저수위차단기의 접점을 Common으로 연결한 것이라 판단할 수 있다.

전극봉식 저수위차단기의 전극봉이 자주 이탈하였기 때문에 전극봉식 저수위차단기의 접점을 Common으로 연결할 수밖에 없었다고 운전관리자는 주장을 하지만, 어떠한 이유이든 안전장치의 접점을 Common으로 연결하였다는 것은 중대한 사고원인이라고 지적하지 않을 수 없다.

3.3 배기가스온도 상한스위치

사고 당시 최저수면 상부에 위치한 연관수는 51개로서, 전체 연관수 139개의 약 36.7%에 상응한다. 이 51개의 연관들은 사고 당시에 물과 접촉을 하고 있지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 물과 접촉한 연관들은 전체연관의 63.3%로서 그 연관들의 출구가스온도를 300℃라고 하고, 물과 접촉하지 않은 연관들의 출구가스온도를 1000℃라고 하면 연관 출구에서의 근사적인 평균온도는 557℃로 계산된다

2) 배기가스 온도 상한스위치의 온도가 320℃에 설정되어 있으나 Probe의 설치 위치가 부적절하여 연소차단이 이루어지지 않은것으로 생각된다

4. 결 론

- (1) 일상점검시에 맥도널 스위치 배관의 증기분출을 정확한 밸브 조작 원칙에 따라서 실시하여 맥도널 저수위치 배관에 슬러지가 폐쇄되지 않도록 해야한다. 또한, 고수위 맥도널과 저수위 맥도널 스위치 배관에 밸브를 따로 설치하여 증기분출을 실시할 수 있도록 보일러 설계시 고려되어야 한다.
- (2) 맥도널 스위치 배관의 수부연락관에 차단밸브를 설치하여 일상점검시 맥도널 스위치 배관의 증기분출유로를 확실히 확보하여야 한다.
- (3) 맥도널 스위치 배관에 설치되는 밸브는 개폐를 쉽게 확인할 수 있는 구조이어야 한다.
- (4) 전극봉식 저수위차단기의 주위에 보호덮개 등을 설치하여 보일러 동체내의 유체저항으로 인한 전극봉 이탈등의 손상을 막을 수 있는 구조이어야 한다.
- (5) 배기가스온도스위치의 온도센서의 길이가 짧거나 설치위치가 너무 낮으면, 연관출구에서의 배기가스 평균온도를 초과해도 배기가스 상한스위치의 설정온도에서 연소차단이 이루어지지 않으므로 배기가스 상한스위치의 위치가 적절하게 설치되어야 한다.

참고문헌

- [1] 이근오, “소형가스용 관류보일러의 검사제도 개선에 관한 연구”, 한국산업안전학회, pp.23-27, 2002
- [2] “보일러 및 압력용기 안전사고 사례”, 에너지관리공단, pp.3-7, 2001.3
- [3] 어일수, “보일러 안전대책: 설비형식마다 다른 사고유형 집중분석”, 에너지관리, 10월호, pp.104-109, 1997
- [4] 박이동, 이관중, 장영근, “노통연관식 폐열보일러의 최적 설계”,성균관대학교 과학기술연구소, pp.703-715, 1995
- [5] “대용량 노통연관식 보일러의 사용과 특징”, 한국에너지기술연구소, pp.52-61, 1997
- [6] “산업용보일러 취급안전”, 한국산업인력공단, pp.5-7, 2000