

공정 폐열 보일러의 사고 개요

김 태 문

대성메탄올공업주식회사

Failure of a Process Waste Heat Boiler

Tae Moon Kim

Thesung Methanol Ind. Co. Ltd., Yeosoo 520, Korea

1. 서 론

대성메탄올(주) 여수공장은 일산 1,000톤 생산규모의 메탄올 제조 공장으로서 시설중에 개질로(改質炉, Reformer)로부터 폐열을 회수하여 시간당 213톤의 고압스팀(67기압, 482°C)을 발생시키도록 설계된 3기의 폐열 보일러(Waste Heat Boiler)가 1개의 스팀드럼에 연결되어 있다.

이중 개질로에서 나오는 공정가스(개질가스)로부터 폐열을 회수하여 약 1/3의 스팀을 발생하도록 된 개질가스 보일러가 시운전 기간중 사고를 일으켜 수리하였으나 다시 같은 사고가 발생 결국 설계상 결함으로 사용 불능이라고 판명되어 이를 신품으로 대체하여 사용중인바 이와 관련하여 추정되는 사고의 원인 특히 구 보일러의 설계상 문제점과 대체된 신 보일러의 설계기준에 대하여 간단히 검토하고자 한다.

2. 개질가스 보일러

개질로에서 폐열을 회수하여 스팀을 발생시키는 경로는 Fig. 1과 같다. 이중 문제의 개질가스 보일러는 개질로에서 나오는 20기압 840°C

의 개질가스를 수백본의 튜브속으로 통과시켜 이를 350°C까지 냉각시키면서 그 폐열로 동체(shell)측에 가득찬 약 70기압의 보일러 용수를 가열하여 시간당 72.5톤의 고압스팀을 발생시키게 된 자연순환식 수평 연관 보일러로서 친구 보일러 모두 직경 약 2m의 동체(shell) 양쪽에 붙은 관판(tubesheet) 사이에 외경 38mm, 길이 8m(또는 6.5m)의 튜브가 700본(또는 640본) 끼워져 있고 보일러 용수는 높은 곳의 스팀드럼으로부터 동체의 옆(또는 아래)에 붙은 여러개의 "down comer"를 통하여 동체로 흘러들었다가 발생한 스팀과 함께 동체위에 붙은 여러개의 "riser"를 통하여 다시 스팀드럼으로 돌아가는 이른바 자연순환(Natural circulation)을 하게 되어 있다.

이의 상세한 운전조건 및 설계는 Table 1과 같고 보일러의 구조는 Fig. 2, 3과 같다. 이때 보일러의 설계 제작상 가장 주의할 요하는 곳은 고온측 관판 부위, 즉 가스 입구측으로서 고온측 관판의 재질은 통상 탄소강이나 저 합금강인데 고온 및 높은 수소농도의 공정가스로 부터 이를 보호하기 위하여 보통 관판면 위에 특수 내화시멘트를 붙이고 다시 특수 합금강 보호판을 덮으며 튜브 입구측은 속으로 특수 Ferrule을 끼워 사용한다.

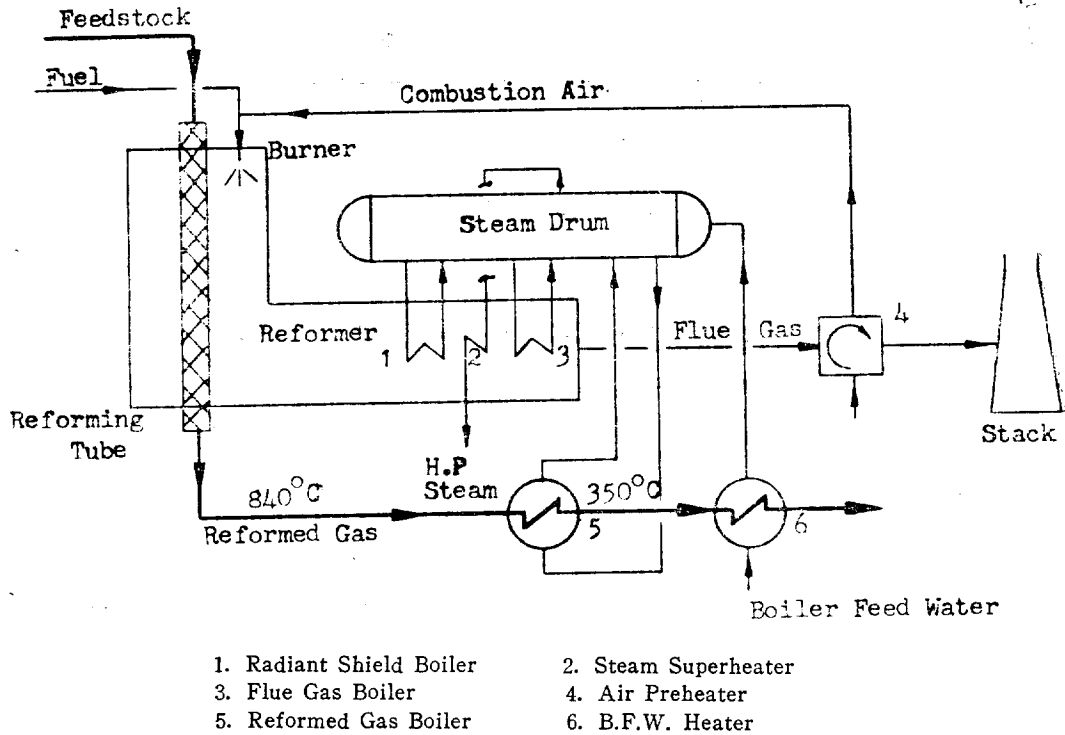


Fig. 1. Steam Raising System

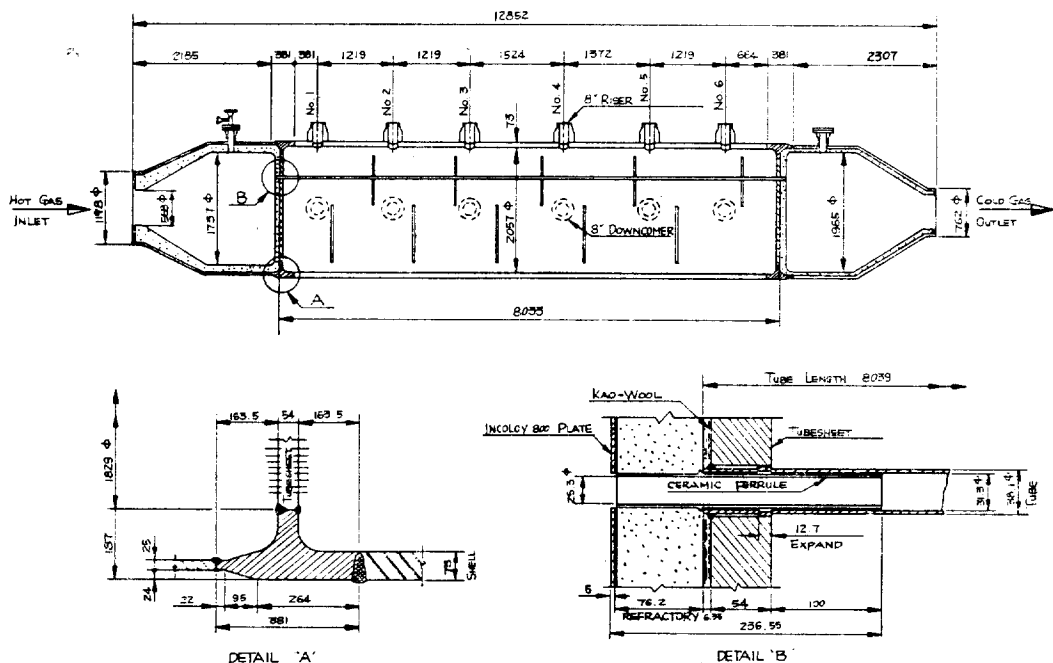


Fig. 2. Old Reformed Gas Boiler

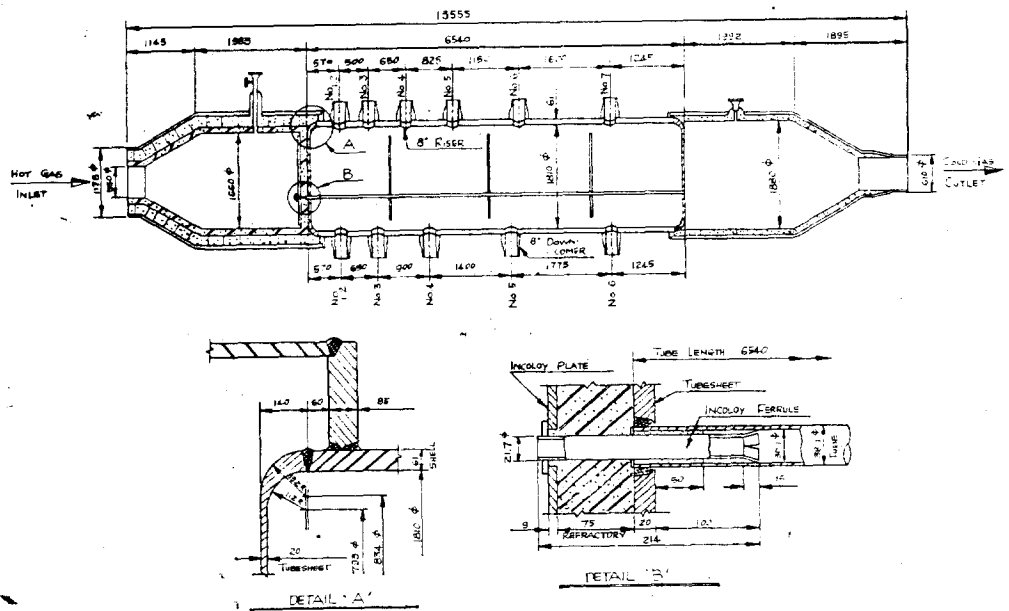


Fig. 3. New Reformed Gas Boiler

Table 1. 신구 보일러의 운전조건 및 설계 비교

	구 보 일 러	신 보 일 러
1. 운전조건		
가스측		
조성 (Dry Basis) Mole %	H ₂ : 68.235 CO : 16.347	CO ₂ : 11.675 CH ₄ : 3.743
Steam/Gas Mole 비		0.5568
유량 (Dry)		116,171 NM ³ /HR
온도 (입구/출구)		840°C/350°C
압력		19 기압
전열량		33.486 × 10 ⁶ KCAL/HR
보일러측		
온도 (급수/용수)		200°C/283°C
압력		66.5 기압
스팀발생량 (200°C 급수로부터)		72,470 KG/HR
2. 설 계		
전장 × 폭	12.9 M × 2.2 M	13.6 M × 2.3 M
중 량	62 톤	77 톤
CODE	ASME VIII DIV. 1	ASME VIII DIV. 1
오염계수		
가스측	0.001°C HR M ² /KCAL	0.0006°C HR M ² /KCAL
보일러측	0.0002°C HR M ² /KCAL	0.0000°C HR M ² /KCAL
MAX. HEAT FLUX	244000 KCAL/HR M ²	244000 KCAL/HR M ²
류 보		
길이/외경/두께	7925 mm/38.1 mm/3.4 mm	6500 mm/38.1 mm/4 mm

본수(배열)	700 (54 mm □)	641 (57 mm △)
재 질	SA-209 GR. T 1	SA-213 GR. T 12
전열면	653.7 M ²	498 M ²
관 판		
재질(고온측/저온측)	SA-516 GR. 65/동일	SA-336 GR. F12/SA-105
두께	54 mm	20 mm
동 체		
재질/두께	SA-516 GR. 65/73 mm	SA-516 GR. 70/61 mm
CHANNEL		
재 질	SA-516 GR. 65	SA-516 GR. 70
고온측 관판 보호		
내화재(재질/두께)	94% Al ₂ O ₃ /75 mm	94% Al ₂ O ₃ /75 mm
Ferrule(재질)	Ceramic	Incoloy 800 H

이와 같은 연관식 폐열 보일러는 암모니아, 메탄올, 수소, 도시가스 제조 공장 등의 개질로에 널리 사용되어 1000°C에 가까운 고온의 공정가스로부터 폐열을 회수하여 고압(60—100 기압)의 스팀을 발생시키고 있다.

3. 사고 발생

1차 : 공장 건설이 완료되고 시운전이 거의 완료 단계에 접어든 76년 7월 중순(당시 보일러 총 운전시간 : 약 2개월) 개질가스 보일러의 입구 가스온도가 35°C 급강하하여 그대로 유지되는 일이 발생하였다.

처음에는 단순히 입구측에 삽입된 온도계의

이상으로 간주하였으나 점차 보일러 다음의 열교환기에서 압력차가 증가하여 가스의 유량이 줄어들었으므로 보일러 튜브 파손으로 인한 용수 누설의 가능성을 고려, 개질가스에서 회수되는 응축수 등을 정밀 점검한 결과 시간당 약 2톤 정도의 보일러 용수가 누수됨이 확인되어 76년 8월초 공장을 정지하기에 이르렀다. 공장정지후 보일러를 점검한 결과 우선 고온측 관판과 상부의 내화시멘트가 상당히 많이 붕괴되어 쪼개져 나갔고(Fig. 6) 그 부분에서 3~4본의 튜브가 분명히 파손된 것이 확인되었으며 튜브의 균열부를 통하여 고압의 보일러 용수가(온도 약 280°C) 전면으로 분출되어 온도계를 직접 때림으로써 온도지시를 낮추었으며 이 물이 부근의 내화시멘트를 쪼개 내어 그 조각이 개질가스와 함께 보일러 튜브를 통과하면서 일부는 그 안에 남고 일부는 다음 열교환기(급수 예열기)의 튜브 입구에 끼여 점차 가스의 소통을 막은 결과 압력차가 증가하였음이 판명되었다. 이에 고온측 관판의 내화시멘트를 완전 제거하고 Ferrule을 빼낸 다음 양측 관판에 대하여 정밀 조사를 진행한 결과 다음과 같이 손상부는 고온측 관판의 상반부에만 국한되고 그 하반부와 저온측 관판은 이상이 없었다(Fig. 4).

1) 4본의 튜브는 튜브 자체에 원주방향의 균열이 발생하였으며 균열 발생 위치는 튜브와 관판의 용접근 부위와 거의 일치하였음(Fig. 7).

2) 105본의 튜브는 튜브와 관판과의 용접부에 반경방향의 균열이 발생하였음(Fig. 8).

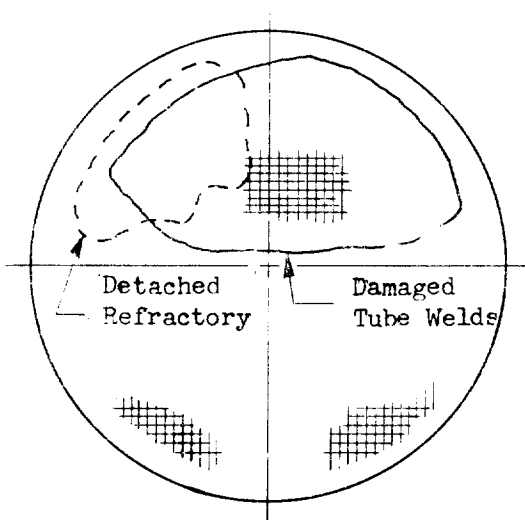


Fig. 4. Damage on Inlet Tubesheet

- 3) 1개소에는 관판 자체에 망상의 미세한 균열이 발생함(Fig. 9).
- 4) 관판 상반부의 튜브는 고온측 관판 후면 200~300 mm 지점에서 상당히 휘어 있었음(하반부 튜브는 거의 휘지 않음).

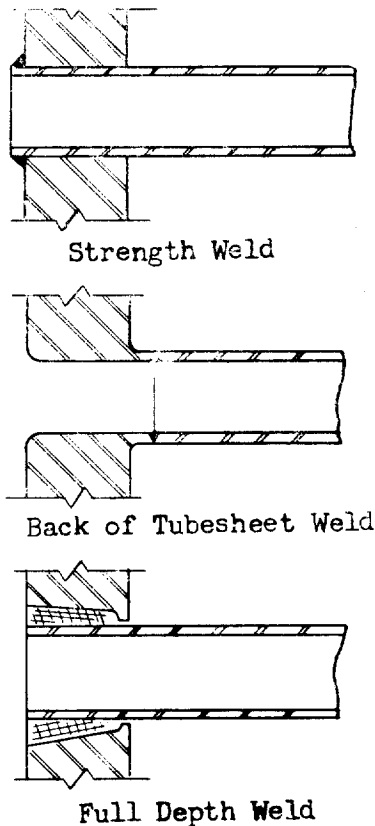


Fig. 5. Tube to Tubesheet Welds

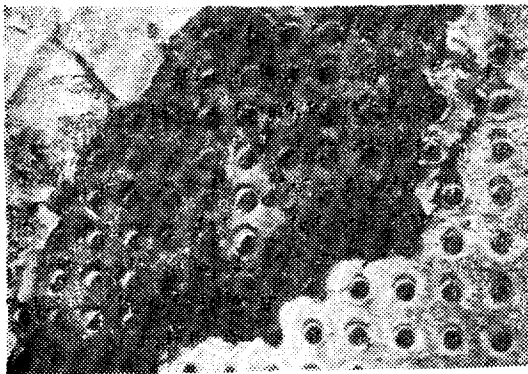


Fig. 6. Top Left Hand Quadrant of Inlet Tubesheet, Showing Detached Refractory



Fig. 7 Circumferential Crack in Tube Bore Originating from Root of Fillet Weld.

2차 : 1차 수리 완료후 재 가동 7일만인 76년 10월 중순 1차 고장과 유사한 현상이 발생, 다시 보일러 용수가 누수됨이 확인되어 공장을 정지하고 보일러를 점검한 결과 이번에도 1차 고장시와 유사하게 고온측 관판의 상반부에 위치한 97 본의 튜브가 튜브와 관판과의 용접부에서 반경방향의 균열을 나타내었다.

4. 수리의 개요

1차 : 1차 사고후 당 공장의 설계와 건설을 담당하였던 영국의 Davy Powergas사와 보일러 제작자인 Clarke-Chapman사의 전문가와 함께 사고 원인과 수리 방법에 대한 협의를 행한바 일단 제작자의 의견에 따라 설계상의 근본 문제점은 없고 Ferrule 삽입시 단열시공이 불완전 하였다고 생각하여 원형대로의 수리를 행하였다.

이때 손상된 4 본의 튜브는 제거하고 관판상의 구멍을 막았으며, 나머지 튜브는 전부 관판과의 용접부를 갈아내고 재 용접을 한 뒤 도자기제 대신 Incoloy 제 Ferrule을 Kaowool로 감아 튜브에 끼우고 내화시멘트를 붙였다.

2차 : 1차 수리후 동일한 사고가 재발하였고, 파손된 튜브에 대한 재료 시험 결과 이들 손상이 고온 크리프(creep) 및 열피로(thermal fatigue)에 기인한 것으로 판명되는 등 동 보일러의 설계상 근본적인 하자가 있어 이의 장기

정상 가동은 불가능하고 신규 보일러로의 대체가 필요하다는 결론을 내리게 되었다.

이때 지적된 구 보일러의 결함과 그 개선방법은 뒤에 설명하는 신 보일러의 설계에 전부 반영되었거니와 당시 일본의 Babcock-Hitachi 사에 발주한 신 보일러의 제작 기간이 6개월로 되어 있어, 이 동안 기존 보일러를 일부 개조하여 사용하기로 한 것이 2차 수리이다. 개조 작업은 보일러를 원형대로 수리하는 외에 고장의 원인 중 하나로서 고온측 관판 상반부의 스팀 체류 현상과 그에 따른 관판의 과열을 초래한 보일러수 순환비(용수/스팀) 부족을 해결하기 위하여 고온측 관판 바로 후면에 8인치 riser와 down comer를 각 2분씩 추가 연결하여 순환비를 20:1 이상이 되도록 하였다.

2차 수리의 효과는 제한된 운전 조건(입구 가스온도를 840°C 대신 780°C로 낮춤)하에서의

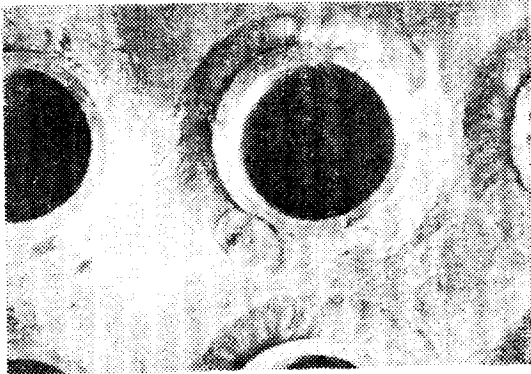


Fig. 8. Radial Cracks in Fillet Weld

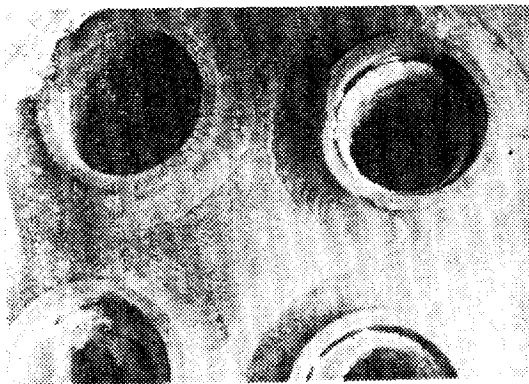


Fig. 9. Circumferential Cracks at Toe of Fillet Welds, Small Area of Craze Cracking on Tubesheet

가동이기는 하나 신 보일러 도착전까지 3개월여의 가동후 조사 결과 손상이 없었다.

5. 설계상의 문제점 검토

구 보일러의 설계상의 문제점 및 이들 사항이 신 보일러 설계에서 어떻게 보완되었는가를 간단히 살펴 보면 하기와 같다.

신구 보일러의 설계 기준 대비

	구보일러	신보일러
1) 관 판	54 mm (TEMA 기준)	20 mm (STAYED BOILER 기준)
2) 튜브와 관판의 용접	보강 용접 및 확	전폭 용접
3) 용수의 순환비 (고온측 관판 후면 riser에서)	6.5	19.5
4) 튜브의 길이	8000 mm	6500 mm

$$* \text{용수의 순환비} = \frac{\text{용수 순환량}}{\text{스팀 발생량}} \text{의 무게비}$$

1) 관판의 설계 기준

연관 보일러의 관판 설계 기준은 TEMA에 기 준한 두꺼운 관판(thick tubesheet)과 STAYED BOILER 기준의 얇은 관판(thin tubesheet)으 로 구분된다. 이의 선정은 관판의 온도구배 및 기계적 유연성 등을 고려하여 결정될 것이나, 근래의 연관 공정 보일러의 경우는 하기와 같은 사유로 얇은 관판을 많이 사용하고 있다.

가) 얇은 관판은 관판의 고온부 및 평균 온도가 두꺼운 관판의 경우보다 낮으며 높은 온도구 배를 피할 수 있다.

나) 얇은 관판은 관판을 두꺼운 동체(shell)에 Butt Welding 하기 위하여 Knuckle Radius 를 갖게 되며 두꺼운 관판에서 볼 수 없는 기 계적 유연성을 가지고 있어 튜브와 용접부 응 력을 상당히 감소시킬 수 있다.

2) 튜브와 관판의 용접방법

연관 공정 보일러의 튜브와 관판의 용접방법

으로는

- 가) 보강용접 (strength weld)
- 나) 후면용접 (back of tubesheet weld)
- 다) 전폭용접 (full depth weld)

등을 고려할 수가 있다.

연관 공정 보일러의 고온측 관판의 전면(가스측) 온도는 얇은 관판의 경우에도 상당히 높으며(신 보일러 365°C, 구 보일러 430°C로 예상) 따라서 이곳에 위치하는 튜브와 관판의 용접은 고온부위 중에서도 가장 주의를 요하는 부위이다. 보강 용접에 의한 용접의 경우에는 튜브 확관을 병용하게 되며, 이러한 방법의 용접법에서는 관판과 튜브, 동체와 튜브 등의 온도차로 인한 용접부와 확관부의 응력 및 반복되는 열 주기에 의해 결국 튜브의 확관부가 이완되게 되며 일단 튜브의 확관부가 이완되면 이틈으로 보일러 용수가 들어가서 증발하는 과정을 반복하여 용수중 고형분의 침적 및 반복 응력 작용 등에 의해 튜브나 용접부에 손상을 일으킬 가능성이 높다.

나)와 다)의 용접 방법은 이러한 결점을 보완한 용접 방법으로 초기 제작시 상당한 비용이 추가되나 사고 예방을 위한 좋은 방편이 된다.

3) 용수의 순환비

상기 2)에서 관판 전면의 예상 온도는 보일러 용수에 의해 관판 후면이 적절히 냉각되는 상태(전열계수 $h=500 \text{ BTU/FT}^2\text{HR } ^\circ\text{F}$ 이상 기준)에서의 예상치로서 부적절한 순환비의 적용등으로 보일러에서 발생되는 스팀의 배출이 용이하지 않은 경우에는 스팀 체류 현상이 생겨 관판 후면의 냉각이 충분하지 못하게 되며 따라서 관판 전면의 온도가 과도하게 상승하여 튜브 및 용접부 손상의 큰 요인이 될 수 있다.

상기한바와 같이 사고후 점검결과 고온측 관판 상반부에 위치한 튜브의 상당수가 관판과의 용접부에 균열을 나타내고 관판 후면 200~300 mm 지점에서 위로 상당히 휘어 있었는데 이는 보일러 용수의 평균 순환비는 19:1로 설계되어 있었으나 riser 및 downcomer의 배열이 적절하지 못하여(Fig. 2) 고온측 관판 후면의 순

환비가 겨우 6.5:1 밖에 되지 않아서 그 부위에 스팀 체류 현상이 있었던 것으로 판단되며 이로 인한 관판의 냉각 불충분으로 관판이 과열사고를 촉진한 것으로 판단된다. 따라서 신 보일러의 경우에는 riser 1본 추가 및 riser의 배열을 조정하여(Fig. 3) 전 riser의 순환비가 거의 균일하도록 하였으며 특히 고온측 관판 후면 riser의 순환비가 20:1이 되도록 하여 관판의 냉각을 원활히 하였다.

참고로 신구 보일러의 개략적인 용수 순환비는 하기와 같다.

구 보일러 용수 순환비

riser 번호	1	2	3	4	5	6	평균치
순환비	6.5	10	14	19	33	33	19

신 보일러 용수 순환비

riser 번호	1	2	3	4	5	6	7	평균치
순환비	19.5	17	17	17	19	21		18.5

4) 튜브의 길이

정상 가동 온도하에서 보일러의 동체와 튜브의 온도차로 인한 상대적인 열팽창으로 인하여 튜브와 관판의 용접부에 상당한 응력이 가해지게 된다. 특히 구 보일러의 경우는 튜브의 길이가 8000 mm 나 되어 상대적인 열팽창차로 인한 용접부의 응력이 통상의 튜브 길이가 짧은 보일러의 경우보다 높아 용접부에 과도한 응력이 작용하게 된 것으로 판단되며 따라서 신 보일러의 설계에서는 튜브 길이를 6500 mm로 줄였다.

참고로 독일에서도 당 공장 보일러와 유사한 설계의 보일러에서 2건의 유사한 사고가 발생하였는바 당시 사고 원인 분석에서 보일러의 튜브 길이가 긴 것(7500 mm)이 사고의 큰 원인으로 부각되었다고 한다.

6. 결 론

지금까지 당 공장에서 체련한 보일러의 사고와 수리를 설명하고 이와 관련하여 연관식 공정 보일러의 설계 기준에 대하여 간단히 검토하였

다.

사고의 원인을 정확히 지적하기는 어려우나 위에 열거한 설계상 결함 사항이 복합적으로 작용하여 사고를 일으킨 것으로 생각된다.

즉 유연성이 없는 두꺼운 판판 및 긴 튜브의 사용으로 인하여 튜브와 판판의 용접부에 강한 응력이 작용하게 되고, 또한 판판 후면의 용수 순환비 부족으로 용접부가 과열되어 응력 집중 부인 튜브와 판판의 용접부위에 균열이 발생한 것으로 판단된다.

신 보일러는 상기와 같이 이들 결함 사항을 보완한 설계로 77년 5월 설치한 이래 현재까지 만족스러운 가동을 지속하고 있다.

References

1. Peter Hinchley, "How to avoid problems of waste-heat boilers," *Chemical Engineering*, Sept. 1, 1975.
2. H.J. Streich and F.G. Fealey, "Process waste heat boiler-cautions," Paper No. 55 d, Symposium on "Control of miscellaneous explosion hazards", 64th National Meeting of AIChE, San Francisco, Calif., Nov. 28-Dec. 2, 1971.
3. Davy Powergas Ltd., "Analysis of failure of reformed gas waste heat boiler", Nov. 19, 1976.