



# 보일러 · 발전기 연도 공동사용으로 인한 사고

글/웅비엔지니어링 대표 강문식

## 1. 사고 현황

- 1) 비상 발전기 가동후 5~6초 후에 발전기 연도 (elbow) 엘보 3개소 (90°, 45°, 45°) 파손
- 2) 발전기 업체가 시공한 발전기 연도 (강관)과 후렉시블 콘넥타 뒤틀림

## 2. 사고 시 주변 여건

- 1) 보일러 운전 중 발전기 기동(starting)
- 2) 외기 상태는 저기압으로 안개 낀 흐린 날씨로 Main 연도의 통풍 효과 저감상태

## 3. 사고원인 예상

- 1) 저기압 상태에서 보일러 배기가스 배출 속도 저하, 발전기 연도로 역류현상발생과 발전기 배기가스의 불꽃과 혼합으로 폭발사고 발생 예상
- 2) 보일러 가동 중 (1대)에 발전기 기동으로 main 연도의 급격한 backpressure 작용으로 발전기 연도가 내압을 견디지 못하고 파손 발생 예상
- 3) 설계상의 문제점
  - 현장의 발전기 연도와 보일러 연도를 점검한

결과 (45° × 2, 90° × 1, 15° × 2)의 엘보를 사용하여 시공되어 있는 상태이고 발전기가 정지 중에는 발전기 연도가 부압상태가 되지 못하므로 자연 통풍은 이루어지지 못하는 시스템으로 시공되어 있다.

- 위에서는 언급 하였듯이 발전기 연도가 보일러 배기가스의 저장 Tank 역할을 했을 개연성은 충분하므로 사고원인의 첫 번째 주요원인인 것으로 사료됨
- 현재 사고 현장의 엘보 파손 상태 점검
- 배기관의 뒤틀림 현상
- 기타 파손파편 조각 점검
- 발전기 배기관의 굴곡개소 및 길이의 적정성 (배기가스의 체류 조건 검토)
- 굴곡 부위가 90°, 45°, 45°의 다수의 엘보가 사용되었고 가스 잔류 조건으로 적당하며 특히 배기관 길이가 50(m)정도로 무척 긴장상태에 있다.
- 파손된 엘보의 상태를 점검해 본 결과 일반적인 진동이나 보통의 압력으로 파손된 것으로는 생각되지 않고 용접 부위가 찢겨진 상태로 보아 급격한 공기 팽창에 의한 폭발로 예상됨
- 여기서 추론 할 수 있는 것은 보일러 미연소 가스 CO와 발전기 마지막 시운전후 잔류 가

스와 혼합된 상태에서 발전기 배기가스와 혼합과정에서 폭발한 것으로 결론 내릴수 있다.

#### 4. 사고 원인 분석

##### 1) 3. ①항의 원인에 의한 사고 분석

- 저기압 상태에서 보일러 연도효과 저감은 미비할 것으로 사료되나 미연소 배출가스의 발전기 연도로의 연소의 역류현상이 발생할 개연성은 충분하며 그것은 특히 통풍력 저하 한 상태에서 발전기 연도를 배기가스 저장 탱크 역할을 했을 것으로 사료됨
- 따라서 발전기 기동시 다량의 발전기 배기가스와 혼합되어 급격한 GAS 팽창에 의한 폭발했을 가능성은 상당히 높은 것으로 사료됨
- 현장의 발전기 연도와 보일러 연도를 점검한 결과(45°×2,90°×1,15°×2)의 엘보를 사용하여 시공되어 있는 상태이고 발전기가 정지 중에는 발전기 연도가 부압상태가 되지 못하므로 자연 통풍은 이루어지지 못하는 system으로 시공되어 있다.
- 위에서는 언급 하였듯이 발전기 연도가 보일러 배기가스의 저장 Tank 역할을 했을 개연성은 충분하므로 사고원인의 첫 번째 주요원인인 것으로 사료됨
- 현재 사고 현장의 엘보 파손 상태 점검
- 배기관외의 뒤틀림 현상
- 기타 파손파편 조각 점검
- 발전기 배기관의 굴곡개소 및 길이의 적정성 (배기가스의 잔류 조건 검토)
- 굴곡 부위가 90°, 45°, 15°의 다수의 엘보가 사용되었고 가스 잔류 조건으로 적당하며 특히 배기관 길이가 50(m)정도로 무척 긴장 상태에 있다.
- 파손된 엘보의 상태를 점검해 본 결과 일반적인 진동이나 보통의 압력으로 파손된 것으로는 생각되지 않고 용접 부위가 찢겨진 상태로 보아 급격한 공기팽창에 의한 폭발로 예상됨

○ 여기서 추론 할 수 있는 것은 보일러 미연소 가스 CO와 발전기 마지막 시운전후 잔류 가스와 혼합된 상태에서 발전기 배기가스의 불꽃과 혼합과정에서 폭발한 것으로 결론 내릴 수 있다.

##### 2) 3. ②항의 원인에 의한 사고 분석

○ 보일러 기동 중 (1대) 발전기 기동으로 Main 연도의 backpressure 작용이 극대화 되어 발전기 연도의 가장 약한 부분인 elbow 부분이 파손된 것을 근거로 계산하면 발전기 단독으로 운전되었을 때 backpressure calculation,

- ○ 발전기 사양

Model 명 : MTu 12V 4000G 80

배기 가스량(Q) : 324 m<sup>3</sup>/min = 5.4 m<sup>3</sup>/s

설계 Dia SIZE : 500mm

배기가스 밀도 : 0.5kj/m<sup>3</sup>

- ○ 배기가스 배출속도 Calculation

배기 가스량 Q의 식은 다음과 같다.

$$Q[m^3/s] = V[m/s]A(m) \quad -①$$

(단, V는 배기가스 속도, A는 연도 단면적) 연도 단면적은 원이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A(m^2) = \pi r^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{D}{4}\right)^2 \quad -②$$

② 식을 ① 식 대입하면

$$Q[m^3/s] = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \times V \quad -③$$

③ 식을 V에 관해 정리하면

$$V = \frac{Q^4}{\pi D^2} \quad -④$$

설계 Dia의 크기 500mm = 0.5m 이고 Q = 5.4m<sup>3</sup>/s 이므로 이 값을④식에 대입하여 배기가스 속도를 구하면

$$V[m/s] = \frac{5.4 \times 4}{\pi \times 0.4992^2} = 27.52m/s \text{ 가 된다.}$$

○ 도면 HEAD Loss



## 사고사례

headloss란 마찰에 의한 손실을 의미하며 majorloss, minorloss 및 발전기 자체 loss로 나뉜다.

※ 여기서 ε배관소재에 따른 friction이고 밀도  $\rho_{gas} = \frac{r}{g}$ 이므로  $R = \epsilon \frac{V^2}{2g}$  ⑤ 식이 된다. (r : 단위체적에 대한 물체의 무게) 발전기는 강제 배기이므로 통풍압은 고려하지 않는다.

- ○ Majorloss

$$R_{major} = \rho_{gas} \times f \times (L/D) \times \frac{V^2}{2} \times 10^{-3} (\text{kPa}) \quad - \text{⑤}$$

단,  $\rho_{gas}$  : 배기가스밀도 0.5kg/m

f = friction factor (STS303일 경우 0.033)

D : 연도지름 0.5m

L 연도전체길이 = 수평길이 = 122.44[m]

V : 계산속도 = 27.52(m/s)

⑤ 식에 대입하여 구하면

$$R_{major} = 0.5 \times 0.033 \times \left(\frac{122.44}{0.5}\right) \times \frac{(27.52)^2}{2} \times 10^{-3} = 1527.8^2 \text{Pa} = 1.527 \text{kPa}$$

- ○ minorloss

minorloss은 다음과 같이 구한다.

$$R_{minor} = \rho_{gas} \times \sum nk \times \frac{V^2}{2}$$

단 n은 각각 수량 k는 각각 Coefficient 각 minorloss를 가지는 부품들의 k값표는 다음과 같다.

구분 번호	제품명	minorloss coefficient value	비고
k <sub>1</sub>	manifold Tee	0.104	
k <sub>2</sub>	45Lateral Tee	0.033	
k <sub>3</sub>	90 wye Tee	0.0625	
k <sub>4</sub>	15 Elbow	0.005	
k <sub>5</sub>	30 Elbow	0.01	
k <sub>6</sub>	45 Elbow	0.025	
k <sub>7</sub>	90 Turns	0.0625	
k <sub>8</sub>	Bellow joint	0.0067	
k <sub>9</sub>	Drain section	0.0208	
k <sub>10</sub>	Exit Come	0.0206	
k <sub>11</sub>	stack cap	0.0417	

당 현장에서는 k<sub>1</sub> 1개, k<sub>6</sub> 2개, k<sub>3</sub> 1개, k<sub>4</sub> 2개

$$\begin{aligned} \text{따라서 } \sum nk &= 10 \times 104 + 0.025 \times 2 + 1 \times 0.0625 \\ &+ 2 \times 0.005 \\ &= 0.104 + 0.05 + 0.0625 + 0.01 \\ &= 0.2265 \end{aligned}$$

여기에 안전율 1.5를 고려하여 계산하면

$$\sum nk = 0.2265 \times 1.5 = 0.33975 \text{ 이다. 이}$$

것을 minorloss 식에 대입하여 구하면

$$R_{minor} = 0.5 \times 0.33975 \times \frac{(27.5)^2}{2} = 64.38 \text{Pa} = 0.064 \text{kPa}$$

- ○ 발전기 자체 loss - 보통 1kPa를 넘지 않으므로

- ○ Total loss

$$1) + 2) + 3) = 1.527 + 0.064 + 1 = 2.591 \text{kPa}$$

○ 보일러 단독 운전시 main 연도의 backpressure 계산

- ○ 노통 5ton 2

배기가스량 (Q) : 8200m<sup>3</sup>/hr = 2.28m<sup>3</sup>/s

설계 DiA SIZE : 900mm

배기가스 밀도 : 0.5kg/m<sup>3</sup> (여기서 경유의 밀도보다 GAS밀도가 적기때문에 안전을 고려하여 경유밀도 적용)

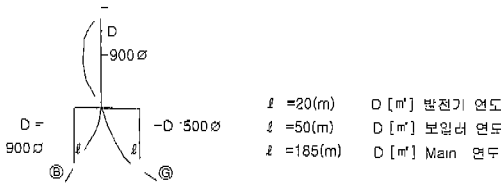
- ○ 배기가스 속도 계산

$$V = \frac{4 \times 2.28}{3.14 \times (0.9)^2} = 3.58 (\text{m/s}) \text{ 이므로}$$

- ○ majorloss

$$\begin{aligned} R_{majorloss} &= 0.5 \times 0.033 \times \left(\frac{324.5}{0.9}\right) \times \\ &\frac{(3.58)^2}{2} = 38.123 \text{Pa} \\ &= 0.038 \text{kPa} \end{aligned}$$

○ 보일러와 발전기 동시 가동시 backpressure calculation



- ○ 여기서 발전기와 보일러 연도의 계통을 살펴보면 알 수 있듯이 보일러 연도 배기가스와 발전기 가스가 함께 main 연도에 작용했을때 Back Pressure 계산하면,

- 단,  $Q_1$  발전기 배기 가스량 [m<sup>3</sup>/s]
- $V_1$  발전기 배기가스 속도 [m/s]
- $Q_2$  보일러 배기 가스량 [m<sup>3</sup>/s]
- $V_2$  보일러 배기가스 속도 [m/s]
- $Q_3$  main 배기 가스량 [m<sup>3</sup>/s]
- $V_3$  main 배기가스 속도 [m/s]

라고하면

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = 5.4 + 2.28 = 7.68 \text{ [m}^3/\text{s] 이고}$$

- ○ Main 배기가스 속도  $V_3$  [m/s]을 구하면

$$V_3 = \frac{4 \times 7.68}{\pi \times (0.9)^2} = 12.07 \text{ [m/s] 이고 } V_3' = \frac{4 \times 5.4}{3.14 \times (0.9)^2} = 8.492$$

- ○ 여기서 발전기 연도에 미치는 backpressure를 구하면

$$R_o = \rho_{gas} \times f \times (L/D) \times \frac{V^2}{2}$$

$\rho_{gas}$ : 배기가스밀도 0.5kg/m<sup>3</sup> (경유의 배기가스 밀도로 계산)

$f$ : friction factor (STS 304 일 경우 0.033)

$b$ : 연도지름 0.5m,  $L$ : 전체연도길이: 324.5 (수평길이를 환산)발전기 설계 사양 참조)

$V$ : 12.07 [m/s]이라면

- ○ 여기서 발전기 friction Data을 근거로 연도 전체  $f$ 을 구하면

$$100 = 0.5 \times f \times \frac{(324.5)}{0.9} \times \frac{(8.492)^2}{2}$$

$$f = \frac{180}{11700.5} = 0.0154$$

- ○ 따라서,  $R = 0.5 \times 0.0154 \times \frac{(324.5)}{0.9} \times \frac{(12.07)^2}{2} = \frac{364}{1.8} = 202.2\text{Pa}$

$$= 0.202\text{kPa}$$

- ○전체 backpressure  $R' = 2.591 + 0.202 = 2.793\text{kPa}$  이므로

위의 결과로부터 알 수 있듯이 backpressure의 작용은 0.2kPa 증가정도 이므로 이것으로 발전기 연도가 파손 될 정도의 압력은 아닌 것으로 사료됨

### 3) 3. ③ 항의 설계상의 문제점에 의한 사고분석

○ 발전기 제작업체의 연도 설계 사양을 검토하고 보일러 사양을 검토하여 설계의 미비점을 검토한 결과 문제점으로 다음과 같은 것을 예상 할 수 있다.

○ 보일러 연도와 발전기 연도는 공동으로 사용하지 않는 것이 설계의 기본이다

○ 왜냐하면 보일러의 배기가스 배출속도는 5~10[m/s]로 설계하는 것이 보통이고 발전기의 배출속도는 25[m/s]로 설계하므로 여기서 배기가스 속도의 차이로 인하여 발전기 연도에 backpressure 작용하므로 발전기의 Turbo charger의 Blade가 파손되고 수명에 심대한 영향을 미치기 때문이다.

따라서, 발전기 연도와 보일러 배기 연도를 함께 설계 할 경우에는 발전기 배기가스 속도에 맞추어 설계하는 것이 원칙이다.

○ 이것을 수치적으로 계산하면 발전기 배기가스 배출속도는 25(m/s) 이하로 설계하고 보일러 배기가스 속도는 5~10(m/s)이하로 설계하므로 발전기 연도에서 계산한 보일러 배출가스에 의한 속도는 3.58m/s 이므로 배기가스 속도를 5m/s로 가정하고 배기가스량을 위에서



계산한 Q<sub>3</sub>를 사용하면

$$D \geq \sqrt{\frac{4 \times 7.68}{3.14 \times 5}} = \sqrt{\frac{30.72}{15.7}} = 1.3988$$

이므로 직경은 140mm 되어야 함을 알 수 있다.

- 여기서 특히 주의 하여야 할 것으로는 보일러 연도와 발전기 연도를 공동사용할 경우에는 발전기 연도로 보일러 배기가스가 역류 할 가능성이 아주 많으므로 이에 대한 대책을 강구하여야 한다.
- 위의 결과로 보일러 연도와 발전기 연도를 공동으로 사용하는 것은 아주 위험한 설계 방법임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

- 위에서 언급하였듯이 사고원인을 추론하면 사고원인 예상의 1), 3) 항의 원인에 의한 복합적으로 일어난 사고로 추론 할 수 있다.

### 6. 사고 방지 대책 방안

#### 1) 발전기 연도와 보일러 연도 분리 시공

현재 현장의 지하 7층의 풍도가 있는 것으로 확인 되었으므로 연도를 분리하여 시공하는 데는 문제가 없음(매연에 대한 대책으로는 첨부자료를 확인)

여기서 본인 생각으로는 발전기 연도와 보일러 연도를 꼭 분리하여 시공하는 것이 앞으로의 사고를 방지할 수 있는 최상의 방법이며 이것을 적극 추천하는 바입니다. (첨부자료 참조요)

#### 2) 위에서 추천한 대로 수정이 곤란한 경우 아래와 같은 보완 system을 구성하여 운전하는 것이

안전 할 것으로 사료됨

발전기 기동/정지 시 배기가스의 잔류방지 system 설치 : 자동 퍼지(purge) 시스템 적용

#### 3) 현재의 굴곡개소를 최소한으로 하되 backpressure 감소되도록 시공

- 4) 발전기 연도의 내압이 5(kPa+)이상 되도록 보완
  - 굴곡부분의 엘보 는 완전한 용접시공 - 수직 구배 최소화 되도록 수정
  - 연도의 고정방식을 수평 밀림을 방지 할 수 있도록 고정방식으로 처리
  - 발전기 배기관은 될 수 있으면 main 연도 쪽으로 상향 구배로 시공
  - 보일러, 발전기 병행운전 방식을 피하여 운전

#### 5) 자동 퍼지 system 적용이 어려울 경우에는

- 발전기 배기관 (muffler)1차/2차 측에서 수동 을 자연 통풍력에 의한 배기할 수 있는 수동 개폐밸브 설치

#### 6) 발전기 기동시는 발전기의 충분한 예열과 잔류 배기가스를 충분히 배출 뒤에 기동한다.

- 첨부 부 : 매연 방지 system (대성 씨스텍), 발전기 설계자료.
  - 참고자료 : - 연소 공학 (송규근, 최병철 공저) 청문각
    - 유체 역학 (강성남, 김중현 공저) 기전연구소
    - 발전기 설계자료 (백산 설계자료)
- (끝)

우리는 모든 남자와 여자가 평등하게 태어났음을 자명한 진실로 생각한다.

Elizabeth Cady Stanton(엘리자베스 케이디 스톤)  
[미국 혁명가, 1815~1902]