

유동총 소각로 설계 및 운영실무 교습

- 대구 달성 슬러지 소각시설을 중심으로 -

1996. 11.

임 광 토 건 주 식 회 사

목 차

1. 개 요	61
2. 소각시스템의 구조	61
① 소각처리 시스템 및 특징	61
(1) 시설의 개요	61
(2) 슬러지 투입설비	62
(3) 소각 및 폐열회수 설비	65
(4) 공해방지시설	74
(5) 본 유동상 소각로의 특징	79
② 시운전 결과에 대한 분석	80
(1) 유동상소각로의 START-UP 과정 및 슬러지 연소상태	80
(2) 소각로 성능검사 및 오염도 검사	83
(3) 소각로 부압 CONTROL SYSTEM	87
③ 개선을 요하는 사항	89

1. 개 요

본 고에서는 일본 JSW 사 및 미국 CPC 사와 기술제휴하여 당사가 설계 시공한 “달성사업소 폐수슬러지 소각시설(유동층 소각로)”을 준공하여 시운전한 결과를 분석하여 문제점을 보완하고 선진기술을 습득하여 국내환경에 적합하도록 개선 발전시켜 국내의 심각한 환경문제의 해결 및 국내 소각기술 향상에 도움이 되고져 한다.

본언에서는 첫째 소각처리 시스템 및 유동층 소각로의 특징을 소개하고 둘째, 시운전 결과를 분석하여 이에 따른 개선요구사항을 도출하도록 하여 추후 유동층 소각시스템 설계 및 운영에 있어 시행오차를 줄여 미약하나마 도움이 되었으면 한다.

2. 소각시스템의 구조

□ 소각처리 시스템 및 특징

(1) 시설의 개요

- 사업명 : 달성사업소 슬러지 소각시설 건설공사
- 위 치 : 대구광역시 달성군 논공읍 남리 471-1 일대
- 소각로 형식 : 유동층식
- 소각용량 : 50 톤/day × 1 기
- 소각물질 : 함수율 83.2% 의 탈수 슬러지
- 폐열회수시설 : 대류식 열교환기
- 오염방지시설 : 싸이크론 + 전기집진기 + 벤츄리 스크러버
- 운영방식 : 분산제어시스템(DCS)
- 설계 및 시공사 : 임광토건주식회사
- 기술제휴사 : JSW(JAPAN STEEL WORKS, 일본)

CPC(COMBUSTION POWER CPMPANY, 미국)

(2) 슬러지 투입설비

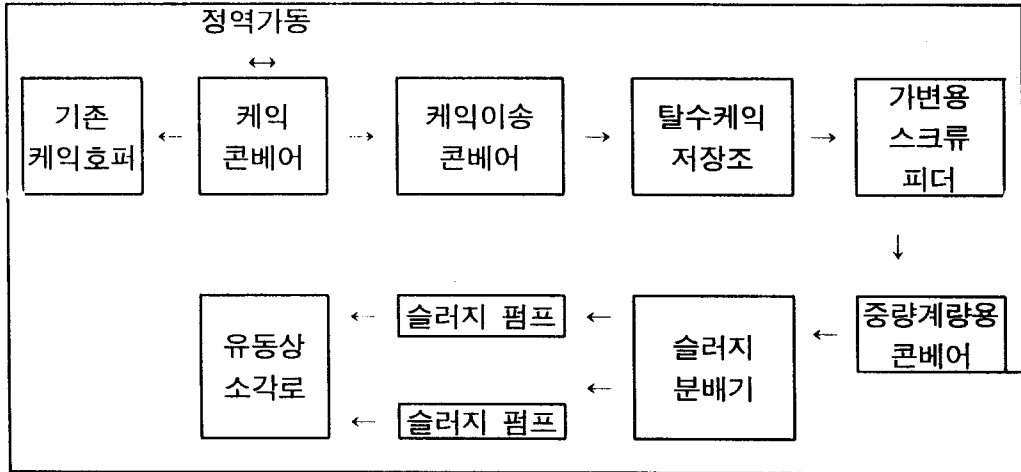


그림 2-1 슬러지 투입설비 흐름도

슬러지 투입설비는 그림 2-1에서 보여주는 것과 같이 구성되어 있다.

탈수기의 기종은 필터벨트프레스로 벨트폭 2m 용 3대가 설치되어 있으며 소화조가 없이 농축조에서 농축된 슬러지를 탈수하여 함수율은 보통 83~87% 정도를 유지한다. 달성공단폐수처리장은 표준 활성오니법으로 공장폐수와 생활폐수가 혼합되어 유입된다. 슬러지의 조성은 표 2-1과 같다.

탈수기에서 탈수된 탈수케익은 케이크콘베어를 통해 케이크이송콘베어나 기존 케이크호퍼로 이송된다. 케이크 이송콘베어는 정역이 가능하며 정상 운전시 소각시스템으로 탈수케익을 이송하고 비상시 기존케이크호퍼에 탈수케익을 저장하여 매립처리한다.

표 2-1 탈수케익 기본조성

항 목	단 위	함 량	비 고	
가 연 분	%	9.53	습량 기준	
불 연 분	%	7.27	습량 기준	
고위발열량	kcal/kg	3,413	건량 기준	
저위발열량	kcal/kg	26	"	
가 연 분 조 성	C	%	54.77	"
	H	%	9.34	"
	N	%	5.24	"
	S	%	0.01	"
	Cl	%	0.32	"
	O	%	30.32	"
수 분	%	83.20	"	

케익이송콘베어는 케익콘베어에서 이송된 탈수케익을 케익저장조로 이송하는 설비로 콘베어 설치 경사각이 31° 로 매우 크며 수평설치거리가 35m 로 매우 길어 기중선정에 어려움이 많았다. 보통 벨트콘베어의 설치각은 27° 이하로 제한되고 있다. 본 시설에서는 V-홈형 벨트를 V 자형으로 설치하여 콘베어를 가동한 결과 탈수케익의 이송은 원활하나 함수율이 높은 슬러지가 V-홈형 벨트에 끼여 이를 제거하는데 어려움이 있었다. 본 시설과 같이 경사가 큰 장소에서의 탈수케익 이송은 용적형 일축 스크류 펌프(모노펌프)를 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 모노펌프를 이용한 탈수케익의 이송수두는 약 70~80m 까지 가능한 것으로 알려지고 있다.

탈수케익저장조의 용적은 63m³ 이며 슬러지의 비중은 1.06 ton/m³ 로 최대 67 ton 을 저장할 수 있도록 설계하였다. 슬러지 저장조에는 슬러지 교반용 믹서를 설치하였으며 믹서의 임펠러는 φ 15 용 강봉을 300 mm 길이로 잘라 교반기 축에

500 mm 간격으로 5개를 회전각 90° 로 설치하였으며, 축하부 1,500 mm 를 스크류로 가공하여 저장호퍼 원추부에서 슬러지의 가교현상으로 투입구가 폐쇄되는 것을 방지시켰다. 탈수케익의 점도는 설계시 2,000 CP 정도로 추정하였으나 실측하여본 결과 2,600 CP 정도로 매우 높게 나타났다. 추후 설계시 슬러지 점도에 신중을 기하여야 할 것이다.

슬러지 교반용 믹서의 운전결과 슬러지의 투입은 매우 원활하였으며 교반기의 소요동력은 믹서의 회전수가 5 RPM 으로 매우 작았으며 동력은 3.7KW로 소량이 소요되었다.

가변용 스크류 피더와 중량 계량용 콘베어는 운전자가 슬러지 투입량을 분산 제어시스템(DCS)에서 입력하면 중량계량 콘베어에서 벨트속도와 로드셀로 중량을 감지 적산하여 투입량을 계산하고 그 결과를 가지고 가변용 스크류 피더의 속도를 조절함으로써 슬러지 투입량을 조절하게 하였다. 슬러지 분배기는 투입된 슬러지를 2대의 모노펌프에 분배하기 위하여 설치하였다. 슬러지 펌프는 용적형으로 투입량은 펌프의 회전수에 비례한다. 일반적으로 슬러지 펌프는 사용유체를 물을 사용하여 설계하고 슬러지 적용시 환산계수를 적용한다. 펌프 제작업체에서 펌프 설계시 슬러지의 점도가 매우 크므로 물을 사용할때보다 슬러지를 사용했을때가 효율이 클 것으로 판단하여 환산계수를 1.2정도로 적용하였다. 그러나 실제 슬러지를 대상으로 펌프를 시운전한 결과 슬러지 펌프의 효율은 물을 사용하는 것보다 슬러지를 적용하는 것이 약간 높은 것으로 나타났다. 이는 펌프의 용적효율이 슬러지를 사용할 때 누수가 없으므로 높게 나타난 결과이다.

슬러지 펌프 토출배관은 유동상 소각로에 직결되어 투입된다. 소각로 가동중 슬러지의 투입이 중단되어 장시간 방치되면 슬러지가 고화되어 배관이 폐쇄될 것을 많이 우려하였으나 시운전 결과 약 15일간을 이러한 상태로 방치하였으나 배관의 폐쇄현상은 일어나지 않았으며 재가동시 원활한 운전이 되었다. 슬러지 투

입노즐을 보호하기 위하여 냉각용 공기를 투입하나 슬러지가 투입되기 시작하면 압축공기는 필요가 없어진다.

(3) 소각 및 폐열회수 설비

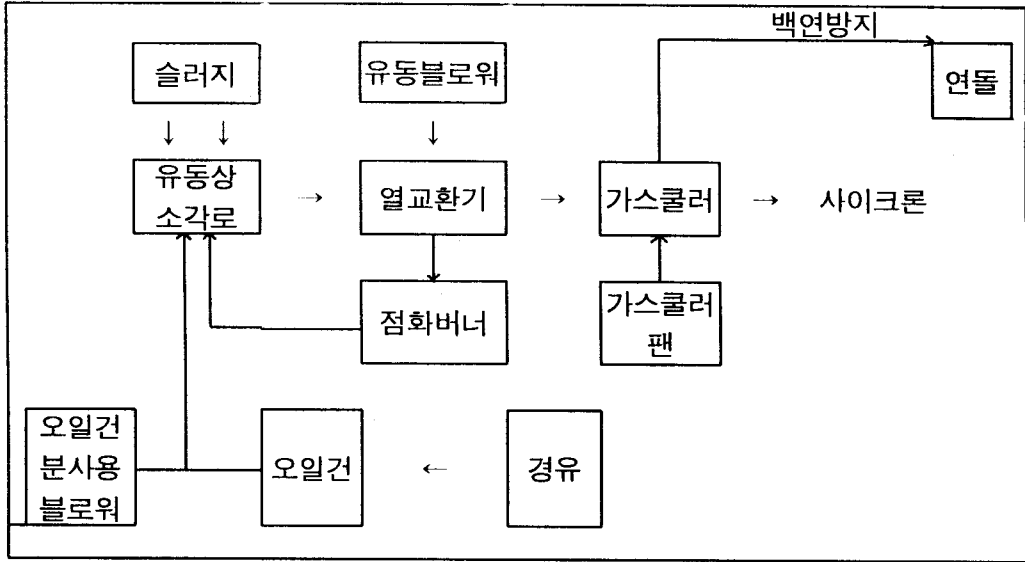


그림 2-2 소각 및 폐열회수 설비 개략도

본 유동층 소각로는 CPC(COMBUSTION POWER COMPANY, USA) 에 의해 특허 출원되어 오랜기간동안 사용되어온 것으로 윗면에 SLOT 형 개구부가 달린 원추형 TUYERE를 통해 유동상 하부로부터 공기를 균일하게 분배, 와류시켜 소각하는 방식이다. 유동상 소각로는 기·고 및 액·고간 접촉효율이 좋고 층내 체류물의 균일성 및 열, 물질의 전달효과가 우수할 뿐만 아니라 연소조작과 처리능력이 월등하다. 또한 강열감량이 타설비에 비하여 매우 우수한다.

당사가 시공한 유동상 소각로의 개략도는 그림 2-3 과 같다. 유동사의 투입은 유동사의 LIFE CYCLE를 고려하여 1일 약 24ℓ(유동사 충전량의 0.25%) 의 새

로운 유동사를 공급하도록 하였다. 소각로에서의 ASH 제거는 그림 2-4에서와 같이 TUYERE 의 상부 SLOT 형 개구부가 일정한 유동방향을 가지고 있어 유동사의 비중차에 의하여 소손된 폐유동사는 ASH 제거 PORT 로 모이게 되며 1일 1회 제거한다. 제거량은 슬러지 50 TON/DAY 소각시 약 42 L/DAY(80 KG/DAY) 정도이다.

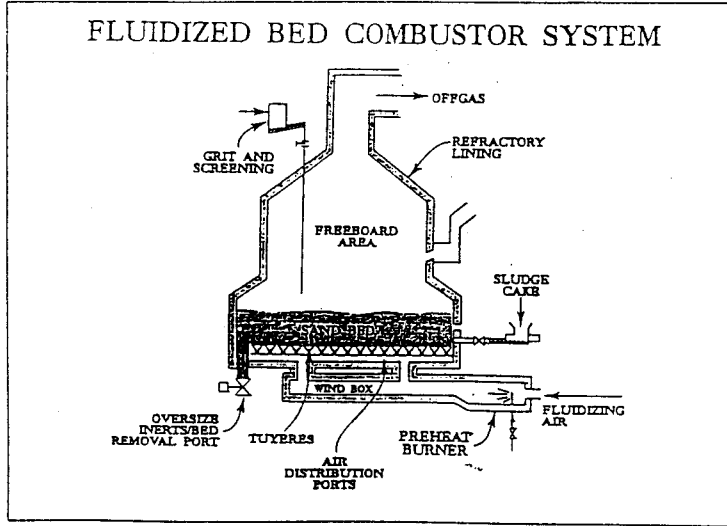


그림 2-3 유동상 소각로 개략도

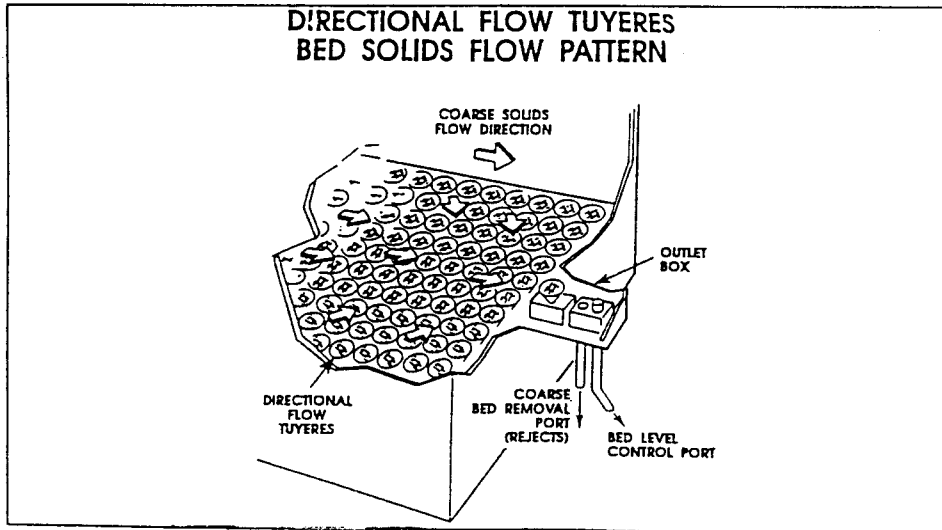


그림 2-4 유동상 소각로 TUYERE 개략도

본 소각로에서 사용한 유동사는 국내 주문진에서 생산되는 유동사를 사용하였으며 유동사 BED 부 높이는 1,200mm 로 하였다. 본 소각로에 사용한 유동사는 동호광업에서 시판하는 황사 #4호를 사용 (950℃ 까지 사용가능) 하였으며 유동사의 성분 및 비중등을 다음에 나타내었다.

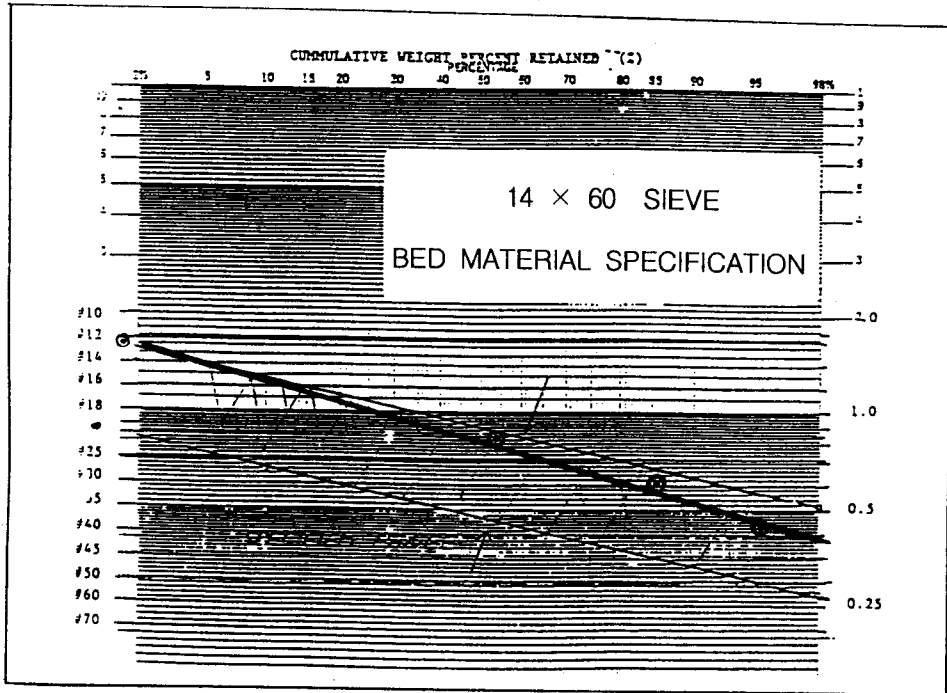


그림 2-5 유동사의 입도분포

표 2-2 유동사 성분 분석

시험항목	단 위	결과치	시험방법	비 고
SiO ₂	%	82.8	I.C.P	
Al ₂ O ₃	%	5.26	I.C.P	
Fe ₂ O ₃	%	0.24	I.C.P	
CaO	%	0.25	I.C.P	
MgO	%	0.05	I.C.P	
수분	%	0.25		

유동화에 필요한 유동사의 직경은 다음 식으로 산출한다.

$$D_p = \sqrt{\frac{50 \mu (1 - \epsilon) V_o}{g (\rho_p - \rho) \varphi_s^2 \epsilon^3}}$$

여기서

μ = 점도 [kg/m·s]

ρ_p = 유동사 밀도 [kg/m³]

ρ = 유동사의 겉보기 밀도 [kg/m³]

ϵ = 공극률 [유동시 유동층 높이/정지시 유동층 높이]

V_o = 공탑속도 [m/s]

φ_s = 모래의 원형도 [상수]

g = 중력가속도 [m/s²]

한편 유동층의 용적은 다음 식으로 계산한다.

$$V = \frac{S_h \cdot H_L + A \cdot C_p \cdot T + X_o H}{K}$$

여기서

S_h : 슬러지 처리량 [kg/hr]

H_L : 슬러지 저위 발열량 [kcal/kg]

A : 유동 공기량 [kg/hr]

C_p : 유입 공기의 비열 [kcal/kg, °C]

T : 유동사 온도 [°C]

X_0 : 보조연료 사용량 [kg]

H : 경유의 발열량 [kcal/kg]

K : 열전달계수 [kcal/m², hr]

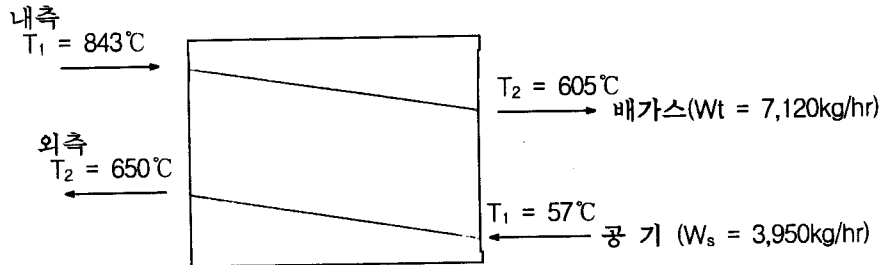
본 유동층 소각로의 화상면적당 부하율은 습윤 슬러지 280 kg/m²hr 이며 유동사 소요량은 8.9m³ 이고 유동층의 정지시 높이는 1.2 m, 유동시 높이는 1.8m 정도이다.

유동사는 초기 유동블로워 가동시 유동을 하지 않고 유동층의 높이가 가장 낮은 부분에서만 부분적인 유동이 발생한다. 유동사의 온도가 점차 승온하여 350℃ 에 달하면 부분적 유동부분이 서서히 넓어져 완만한 부분적 유동이 시작된다. 유동사의 온도가 계속 상승하여 500℃ 이상이 되면 유동사의 유동은 활발해 진다. 유동사의 온도가 600℃ 에 달하여 경유의 자연 발화점을 넘으면 오일건을 분사하게 된다.

오일건은 유동사가 유동하는 유동층에 분사되며 경유는 오일건 분사용 송풍기에서 공급되는 고압의 공기속에 벤츄리의 효과를 응용하여 공기와 잘 혼합되도록 하여 연소효율이 상승하도록 하였다. 유동사의 온도가 600℃ 까지 승온하는데는 약 15시간이 소요되며 오일건을 분사하여 슬러지를 투입 소각할 수 있는 780℃ 까지 승온하는데는 약 4시간이 소요된다. 오일건을 사용하여 유동사의 온도가 780℃ 에 도달했을 때 소각로 상부 온도는 약 530℃ 정도를 유지한다. 슬러지를 투입하기 시작하면 유동사의 온도는 서서히 떨어지고 소각로 상부의 온도는 급격히 상승하기 시작한다. 이는 슬러지의 발열량 및 열유동매체로 인하여 하부의 열량이 상부로 급격하게 전달되기 때문이다.

유동상 소각로의 하부온도는 오일건의 경유 투입량으로 조절하며 소각로 상부 온도는 유동 블로워의 공기량과 SPRAY-WATER 를 사용하여 조절한다.

열교환기와 가스쿨러는 대류식으로 공기와 공기의 열교환을 하는 건식TYPE
으로 열교환기와 가스쿨러의 VENDOR 는 미국 AMERICAN SCHACK CO., 이며
열교환기의 설계조건은 다음과 같다.



건식 열교환기는 복사식 + 대류식열교환기를 일조로 사용하는 것이 국내의 통념
이며 설계 심의시 대류식 열교환기만을 사용하는 것에 대한 효율에 대하여 많은
의문점이 제기되었다. 본 열교환기를 시운전한 결과 열교환 효율은 매우 좋게 나
타났으며, 열교환기에 대한 설계공식을 다음에 기술하여 놓았다.

① 열교환량 계산

$$Q = Wt \times C_{Pt} \times (T_2 - T_1)$$

여기서

Wt : 유동매체의 유량 [kg/hr]

C_{Pt} : 유동매체의 비열 [kcal/kg, °C]

T_2 : 입구 온도 [°C]

T_1 : 출구 온도 [°C]

② 대수 평균 온도차

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \times F$$

여기서

Δt_1 : 외측평균 온도차 [°C]

Δt_2 : 내측평균 온도차 [°C]

F : 온도보정계수(내측 및 외측이 완전 교류형 일때는 "1")

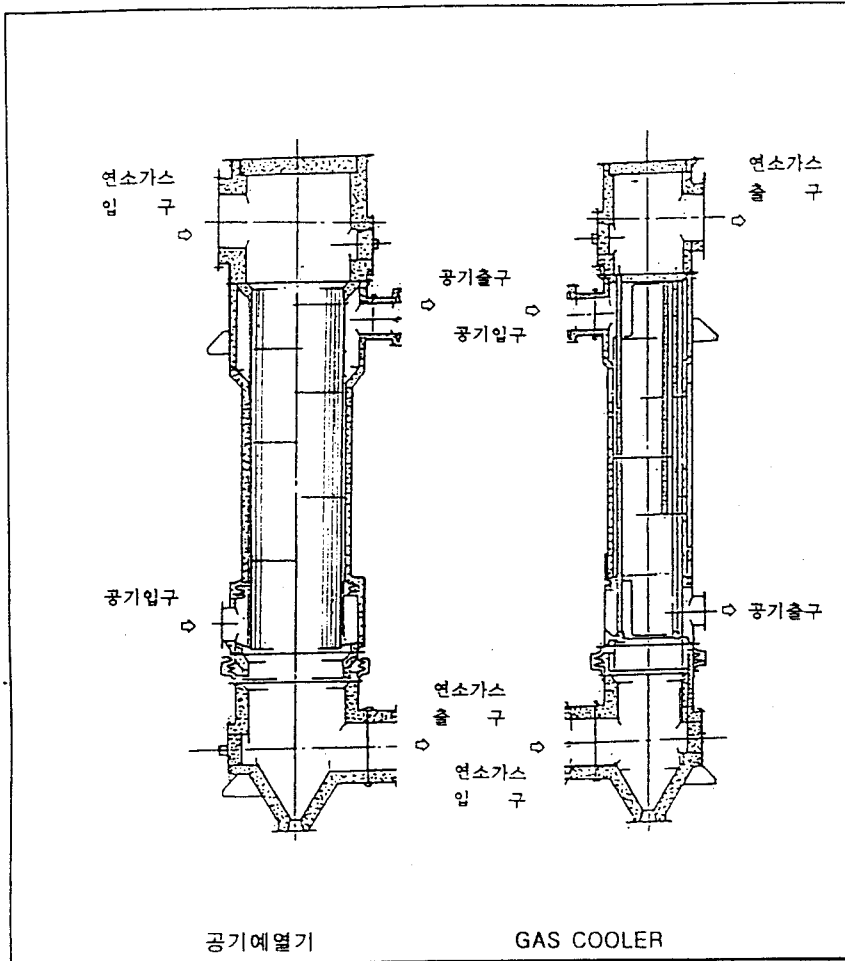


그림 2-6 다관형 대류식 열교환기 구조

③ 소요전열면적

$$A = Q / (U \times \Delta t)$$

여기서

U : 총괄전열계수 [30.3 kcal/m²,hr,°C]

④ 내측압력손실계수

$$\Delta P_i = \frac{f_t \times G_t^2 \times L \times \alpha_T}{6.35 \times 10^{10} \times S_t \times D_i \times \psi_c}$$

여기서

f_t : 레이놀드수에 의한 유체마찰계수

G_t : 내측 질량속도 [W/ α_i]

α_i : 내측 유로의 면적 [m²]

L : 유로의 길이 [m]

S_t : 유체의 비중 [g/cm³]

D_i : 유로의 내경 [m]

ψ_c : 유체의 점도보정계수

$$\Delta P_r = 128 \times U_t^2 \times S_t$$

여기서

ΔP_r : 곡관부의 압력손실 [mmH₂O]

U_t : 관내 유속 [m/s]

$$\Delta P_t = \Delta P_i + \Delta P_r$$

VENDOR 인 AMERICAN SCHACK CO., 의 권고치는 $\Delta P_t = 80\text{mmH}_2\text{O}$ 이하이다.

⑤ 외측압력손실계수

$$\Delta P_i = \frac{f_s \times G_s^2 \times \alpha_s \times (N+1)}{6.35 \times 10^{10} \times S_c \times D_c \times \psi_c}$$

여기서

f_s : 유체의 마찰계수

G_s : 외측 질량속도 [W/α_s]

α_s : 외측 유로의 면적 [m^2]

D_s : 외측 내경 [m]

N : 마찰판의 수

S_c : 외측 유체의 비중 [g/cm^3]

D_c : 외측 상당 직경 [m]

ψ_c : 외측 유체의 점성보정계수

VENDOR 인 AMERICAN SCHACK CO., 의 권고치는 $\Delta P_s = 250\text{mmH}_2\text{O}$ 이하이다.

오일건을 분사한 후 30분이 경과하면 점화버너를 끄고 열교환기를 통하여 폐열로 회수된 공기를 공급하게 된다. 가스쿨러는 방지시설에 적당한 온도를 유지하기 위하여 설치하며 방지시설 전단부의 배가스 온도는 $250 \sim 300^\circ\text{C}$ 를 유지하는 것이 좋다. 가스쿨러에서 회수된 폐열은 연돌의 백연방지용으로 사용된다. 가스쿨러를 통과한 배가스는 공해방지시설에 유입된다.

(4) 공해방지시설

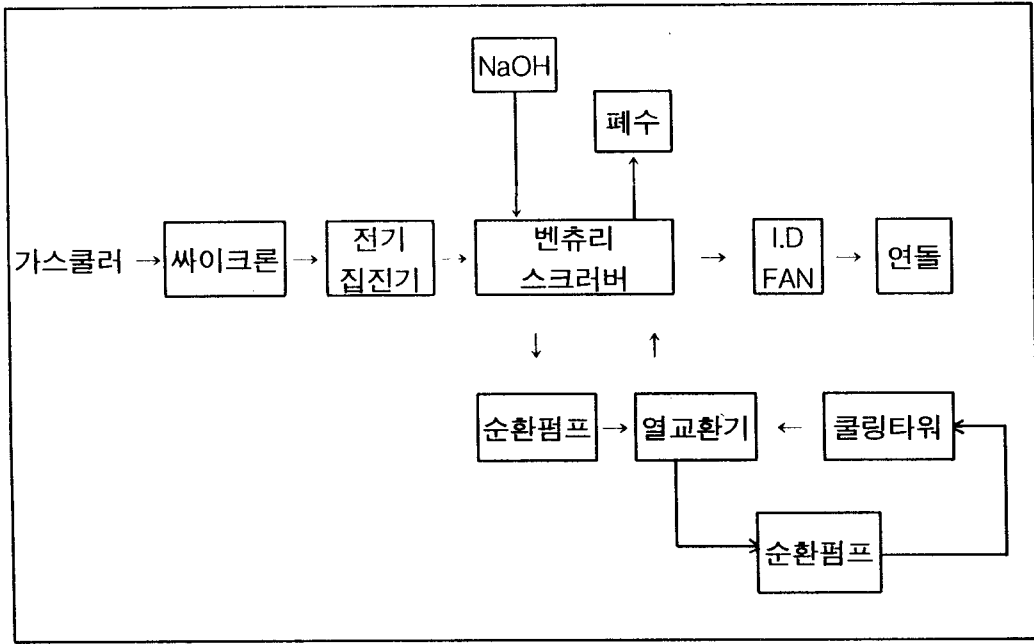


그림 2-7 공해방지시설 개략도

공해방지시설은 그림 2-7와 같이 설계, 시공하였다.

사이클론은 30 μ m 이상의 조대한 DUST를 포집하기 위하여 설치한다. 사이클론은 상부 사이클론 포집부와 포집된 ASH 저장호퍼로 구성된다. 사이클론의 설계시 적용되는 식은 여러 가지가 있으나 본 설계에 적용한 공식은 다음과 같다.

① 유효 회전수(Ns)

$$V_i = Q / A_i$$

여기서

V_i : 입구가스 유속 [m/s]

Q : 가스 유량 [m^3/hr]

A_i : 유입구 단면적 [m^2]

V_i 를 구하여 유효회전수 효율곡선에서 Ns 값을 구한다.

② 싸이크론 통과 최소입경(Dpmin)

$$Dp_{\min} = \sqrt{\frac{9 \times \mu_G \times W}{\pi \times N_s \times V_i \times (\rho_p - \rho_G)}}$$

μ_G : 가스의 점도 [kg/m,hr]

W : 싸이크론 유입구 폭 [mm]

N_s : 유효 회전수

V_i : 유입가스속도 [m/s]

ρ_p : 입자밀도 [kg/m³]

ρ_s : 가스밀도 [kg/m³]

③ 포집입자경과 포집효율

$$Dp/Dp_{\min} = 1.85$$

여기서

Dp : 포집입자경 [μm]

Dp_{\min} : 최소포집 입자경 [μm]

포집효율은 "Typical Normalized Fraction Collection Efficiency Curve"를 사용하여 구한다.

④ 선회속도(m/s)

$$V_s = \frac{4.7 \times (W)^{0.4} \times (V_i)^{2/3}}{(D_b)^{1/3}}$$

여기서

V_s : 선회속도 [m/s]

W : CYCLONE 의 유입폭 [mm]

V_i : 입구가속도 [m/s]

D_b : CYCLONE 의 원통내경 [mm]

CYCLONE 에서의 압력손실은 입구측 압력손실, 입자가속 압력손실, BARREL 압력손실, 곡관부 압력손실, 출구측 압력손실등으로 구성된다. 압력손실은 보통 100 mmH₂O 이하로 설계한다. 한편 전기집진기는 30 μ m 이하의 미세한 DUST를 포집하기 위하여 설치한다. 유입 배가스 온도는 285 $^{\circ}$ C로 설계되었으며 집진효율 95%로 유입부하는 4,689 mg/Nm³, 유출부하는 234 mg/Nm³ 이다. 집진기는 1 CHAMBER 2 FIELD 로 구성되며 1차측 전원은 AC 380 V 이고 2차측은 60 KV DC 100mA 로 전원이 공급된다. 본 전기집진기의 형식은 전식 수평류 장방향이며 방전판의 형식은 FLAT BAR TYPE 이고 압력손실은 약 20 mmH₂O 이다. 전기 집진기의 성능에 미치는 요소는 다양하나 핵심요소는 집진면적, 집진판과 방전선 간의 거리, 방전선의 TYPE, 가스통과속도, 가스체류시간, H.T. RECTIFIER 의 용량 및 기능등이다.

전기집진기의 집진면적은 다음 식으로 구한다.

$$A = -\frac{Q}{W_n} \log(1 - \eta) \times \alpha$$

여기서

A : 집진면적 [m²]

Q : 유입배가스량 [m³/s]

W_n : 분진이송속도 [m/s]

η : 처리효율

α : 여유율

집진판과 방전선간의 간격은 전기집진기 제작사에 따라 다양하나 보통의 경우 75~150 mm 의 간격을 유지하는 것이 보통이다. 방전선은 날카로운 돌출부가 많을수록 고압 맥류파의 코로나가 잘 발생된다. 그러나 설치작업과 유지관리의 용이성을 고려하여 선정하여야 한다.

한편 습식 벤츄리 스크러버 시스템은 건식 전기집진기로부터 배가스를 공급받아 벤츄리부 상단으로 유입되는데 수분이 가스를 충분히 적셔 미세한 DUST 입자를 응집시킨 뒤 충전탑의 마지막 정화과정동안 가스를 세정한다. 냉각된 배가스는 산성오염물(SO_x , HCl)흡수에 사용되는 알카리 용액이 차 있는 탑으로 유입된다. 세정된가스는 ENTERTAINMENT 분리기를 통해 스크러버 상부로 유출된다.

벤츄리부는 압력강하조절을 위한 자동 흡입구와 세정액의 순환을 위한 세정수 공급 시스템으로 구성된다. 세정액의 PH는 산성오염물을 제거하기 위하여 가성소다 용액(20%)을 공급하여 PH 6.7정도에서 운전된다.

PH 6.7 이상이 유지되면 산성오염물의 제거효율은 향상되나 거품이 발생하여 점차 처리효율이 급강하게 되어 소포제를 사용하여야 한다. 본 시스템은 PH 6.7로 운전하도록 설계하였다.

세정수의 온도는 스크러버 충전물이 POLYPROPYLENE 제작 되었으므로 60℃ 이하에서 운전되어야 한다. 충전물의 허용온도는 100℃이며 스크러버 세정수의 온도가 60℃ 이상이 되면 배가스중 과열증기의 일부가 응축되지 않고 증기로 유출되어 백연 현상이 발생하는등 연돌에 미치는 영향이 적지않다.

슬러지에 포함된 함수율 83.5%의 수분은 소각로에서 증발하여 과열증기로 변화되고 배가스속에 포함되어 후단시설로 유출된다. 전기집진기를 통과한 250℃ 정도의 배가스는 벤츄리 스크러버에서 온도가 급격히 하강하여 60℃정도가 된다. 이때 과열증기는 상이 변하여 응축수로 변화된다. 응축수는 스크러버 탱크에 저장된다. 1일 50톤의 슬러지를 소각할 경우 41.75톤의 물이 응축수로 발생된다. 이중 30% 정도는 스크러버 상단에 설치된 데미스터를 통과하여 연돌로 배출되고 약 70%는 스크러버 탱크에 저장된다.

또한 전기집진기를 통과한 234mg/Nm³의 DUST는 스크러버에서 제거되어 스크러버 저장조에 침전된다. 스크러버 응축수는 포집된 DUST와 황이나 염소산화물과 중화하여 발생한 중화염으로 오염된다. 따라서 스크러버에 저장된 세정수 일정량을 폐수로 배출하여야 하며 부족한 물은 새로이 공급하여야 한다. 폐수의 배출은 스크러버 저장조의 레벨에 의하여 자동운전한다.

스크러버의 세정수의 온도는 별도의 냉각시스템이 없으면 급격히 상승한다. 따라서 이를 제어하기 위한 냉각시스템이 갖추어져야 한다. 스크러버 세정수의 온도가 저하되면 침전물의 침전량이 증가하고 가성소다용액의 용해속도가 저하된다. 따라서 세정수의 온도는 30~40℃ 정도로 운전하는 것이 좋다. 세정수에 가성소다를 공급하지 않고 운전하면 약 5분이 경과하면 세정수의 PH는 2.3정도로 저하하여 강산이 된다. 따라서 가성소다 용액의 공급은 세정수의 PH에 따라 자동공급되도록 하였다.

벤츄리부에 설치된 댐퍼는 목부의 유입유출측 차압에 의하여 개폐각을 자동으로 조절하도록 하므로써 수분이 배가스와 충분히 접촉하도록 하였다. 그러나 벤츄리 댐퍼를 40%이상 폐쇄하였을 경우 소각로 내부의 차압을 조절하기가 매우 어려워 벤츄리 댐퍼의 운전범위는 40~80%정도가 바람직한 것으로 판명되었다.

스크러버 후단에는 I.D FAN이 설치된다. I.D FAN은 습도가 높은 배가스를 유체로 사용하므로 재질은 스테인레스강을 사용하여야 한다.

(5) 본 유동상 소각로의 특징

당사가 달성사업소에서 설치한 유동상 소각로의 특징은 다음과 같다.

- 완벽한 연소로 강열감량이 매우 좋다 (강열감량은 약 1%이하)
- 유동상의 소모량이 매우 적다 (1일 0.25%소모)
- 폐유동사 및 ASH의 배출이 용이하고 배출량이 매우적다
- 운전이 매우 용이하며 운전의 자동화에 적합하다
- 운전중 충격적 부하가 발생하지 않으며 안정적으로 연소한다
- 폭발 등 위험의 개소가 없으며 매우 안전성이 높다
- 불완전 연소된 슬러지가 소각로 내부에 축적되거나 탄화하지 않는다
- 연속운전 및 간헐운전이 매우 용이하다
- DUST 및 ASH 의 배출량이 매우 적다(약 1%정도)
- 열효율이 매우높다(슬러지 1톤 연소량 보조연료 사용량은 약 50Kg)
- 소각물질의 성상변화에 민감하지 않다
- TUYERE의 수명이 길고 유지관리가 용이하다

[2] 시운전 결과에 대한 분석

(1) 유동상소각로의 START-UP 과정 및 슬러지 연소상태

유동상 소각로가 슬러지를 연소시키는 정상조업상태에 도달하려면 투입된 슬러지가 착화하여 연소할 수 있는 온도이상으로 유동사를 HEATING 하여야 한다. 이와같이 소각로의 BED 를 가열하기 위한 START-UP 계통은 여러가지가 있으나 본 고에서는 최초 상온상태의 유동사를 가열하여 START-UP 하는 절차를 기술한다. 초기 승온시는 점화버너를 사용하여 유동사를 승온시킨다. 유동사가 승온하여 경유의 자연발화점 이상이 되면 오일건을 분사하여 승온을 계속시킨다. 오일건을 분사하여 30분이 경과하면 점화버너의 온도를 500℃이하로 강하시켰다가 잠시후 정지시킨다. 오일건의 분사온도는 안정성을 고려하여 590℃ 이상에서 분사한다. 유동사의 온도가 승온하여 760℃ 이상이 되면 슬러지의 투입이 가능하다. 슬러지를 760℃ 이상의 고온으로 가열된 유동사에 투입하면 슬러지는 급격하게 고열에 의하여 산화하게 된다. 유동사의 온도는 800℃정도를 유지하여 운전하는 것이 좋다.

유동사의 온도가 너무 과열되어 840℃ 이상이 되면 소각로 하부의 악영향을 미치게 된다. 소각로 하부에 설치된 TUYERE 가 열팽창으로 인한 변형이 서서히 진행될 수 있으며 이로 인하여 소각로의 수명단축 및 성능의 감소를 초래할 수 있다. 또한 860℃ 이상의 고온으로 가열하면 THERMO COUPLE 을 통한 열전달 현상에 의해 케이블이 용융되어 파손되거나 성능저하 현상이 발생할 수 있다. 따라서 소각로 하부 온도는 840℃이상이 되지않도록 분산제어시스템에서 제어된다. 유동사의 온도는 한번 가열되면 냉각되는데 많은 시간이 소요된다. 따라서 반드시 허용 운전범위를 벗어나지 않도록 하여야 한다. 점화버너의 온도는 초기 300℃까지는 급격히 상승하나 300℃ 이상은 시간당 80℃ 이상을 증가시켜서는 안된

다. 80°C/HR 이상의 승온조건으로 급격히 승온시켰을 경우 열쇼크로 인하여 내 화물에 악영향을 미치게 되므로 유동사의 온도는 매우 서서히 증가시킨다. 점화 버너와 유동사의 승온 온도는 보통 약 200°C 정도의 차를 보여주고 있으며 슬러지 투입조건까지 소요되는 시간은 약 30시간이 소요된다. 소각로 상부의 온도는 거의 승온되고 있지 않다가 슬러지 투입이 시작되면 급격하게 상승한다.

아래의 그림 2-8 에 소각로 승온곡선을 나타내었다.

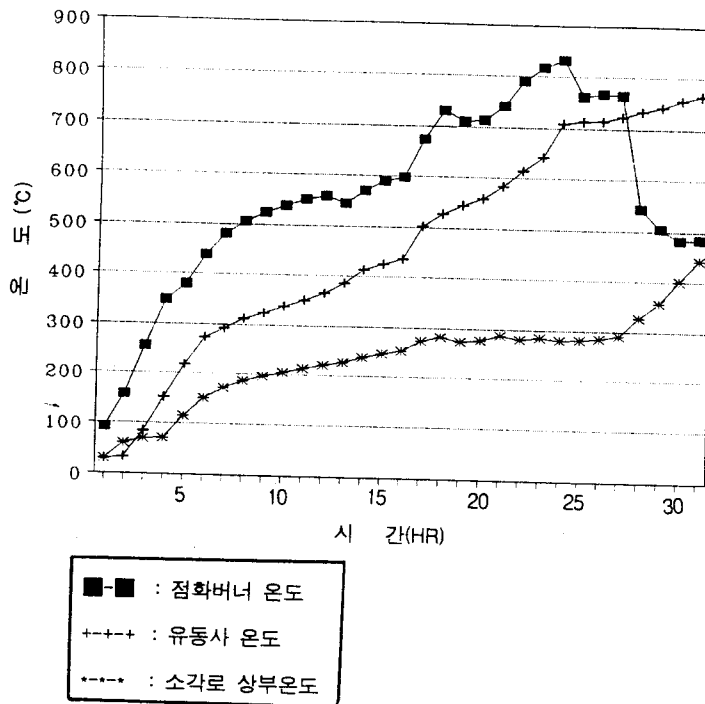


그림 2-8 소각로 승온곡선

유동사의 온도가 760 이상이 되어 슬러지를 투입하면 다음과 같은 과정을 통하여 산화된다.

소각로 내부상태가 연소조건이 되었을때 슬러지를 투입하면 소각로로 투입되는 슬러지 입자는 짧은 시간에 변화하여 산화하게 된다. 초기 투입되는 슬러지는 로내에 축적된 유동사의 축적된 열과 오일건의 화염에 의해 슬러지내에 함유된 수분이 증발함에 따라 건조하게 된다. 이때 건조된 슬러지는 유동사와 함께 로내에서 유동하게 되며 이 과정에서 슬러지 표면에서 증기가 발생하게 되어 증발 연소의 과정을 거쳐 열을 발산하게 된다. 슬러지가 연소하는 동안 발열량에 의해 온도는 800℃ 이상의 고온상태가 유지되며 슬러지는 POROUS(다공) 상태로 되어 유동공기와 반응 미세하게 분해되면서 완전연소가 이루어진다.

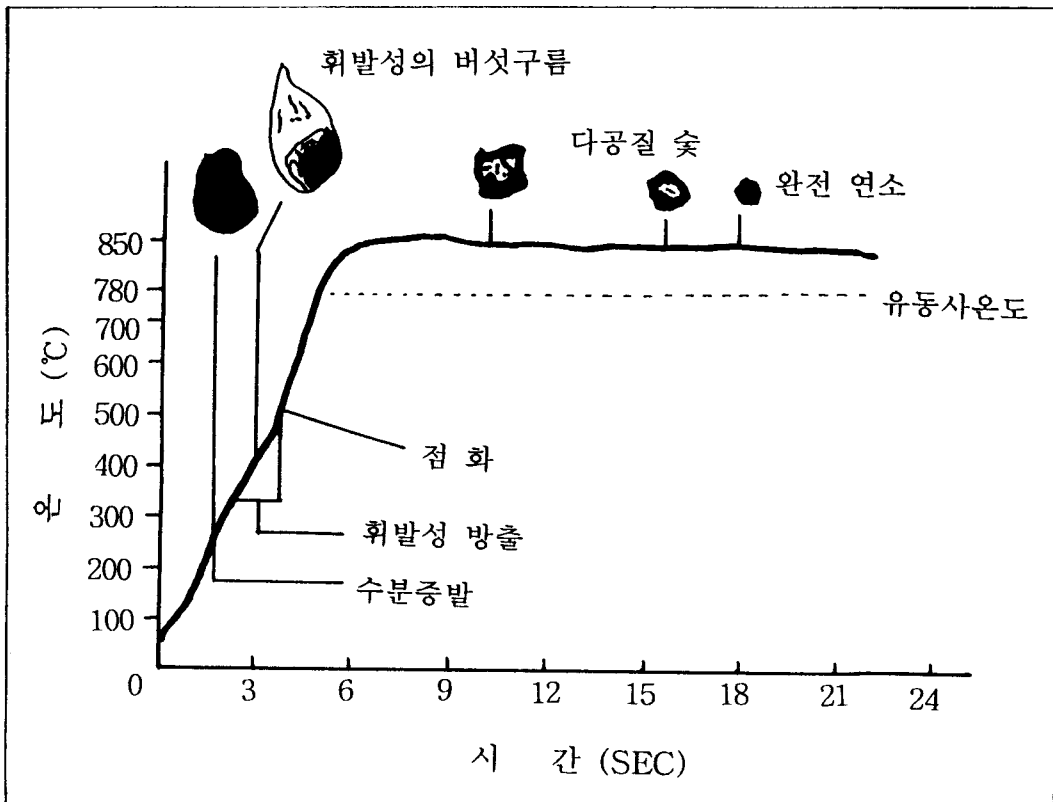


그림 2-9 BED 내 슬러지 입자의 온도변화

본 소각로는 하부로부터 1/3 지점에 소각로 내부 감시용 CCTV 를 설치하였다. 이 지점은 유동층의 유동과 슬러지의 연소상태를 관찰할 수 있는 지점으로 CCTV 를 통하여 고찰한 결과 점화버너만 가열한 상태에서 소각로 내부온도가 저온일때는 암흑으로 인하여 내부를 볼수가 없었다. 온도가 서서히 증가하여 유동사가 유동을 시작하고 유동사가 붉은 광택을 발하기 시작하면 미세한 유동사의 유동이 모니터에 희미하게 나타나며 점차 붉은 기운이 상승한다. 유동사 온도가 상승하여 오일건을 분사하면 유동사의 유동이 더욱 활발해지며 부분적이고 간헐적인 불꽃이 보이기 시작한다. 불꽃이 출현하는 강도는 유동사의 온도가 증가함에 따라 점차 증가한다. 슬러지를 투입하면 슬러지 입자가 미세하게 분해하여 확산되므로 소각로 내부는 갑자기 흑색의 슬러지 분산입자로 어두워지며 불꽃의 유동은 더욱 활발해 진다. 소각로 상부의 SIGHT GLASS 를 통하여 소각로를 관찰하면 불꽃은 관찰되지 않으나 고온의 선홍색 유동사와 강렬하게 연소되고 있는 슬러지 입자로 인하여 선홍색의 잔잔한 바다와 같은 모양이 관측되었다.

(2) 소각로 성능검사 및 오염도 검사

소각로의 성능검사는 보통 7일간 연속하여 실시한다. 본 소각로는 국가에서 지정한 환경관리공단의 검사기관에서 성능검사를 실시하였으며 오염도 검사는 부경대학교 환경연구소에서 실시하였다. 성능검사는 소각 플랜트의 외관 및 기능검사, 소각 플랜트의 성능검사, 시설의 안정성 및 기타사항으로 구성된다.

슬러지를 투입하여 연소한 결과는 다음과 같다.

- 슬러지 투입시간 : 1일 (24시간 연속)
- 슬러지 소각량 : 51.055 TON/DAY
- 평균 슬러지 소각량 : 2.177 TON/HR

- 경유 사용량 : 3,089 KG/DAY
- 평균 경유 사용량 : 128.7 KG/HR
- 슬러지 1톤 소각당 경유 사용량 : 60.5 KG/TON (70.3 L/TON)

성능검사 결과 본 소각로의 성능은 슬러지 소각능력 및 경유 사용량 측면에서 매우 우수한 성능을 보였다. 슬러지 1톤을 소각하는데 소요되는 보조연료비는 현재 경유의 시가를 적용하여 24,000 원/톤 정도가 소요된다. 따라서 현재 슬러지를 매립하는 경비와 소각하는 경비를 비교하였을때 소각하는 비용이 1.5배 정도 더 소요되는 것으로 판단되었다.

아래 그림 2-10은 슬러지 투입량 및 경유 사용량곡선이다.

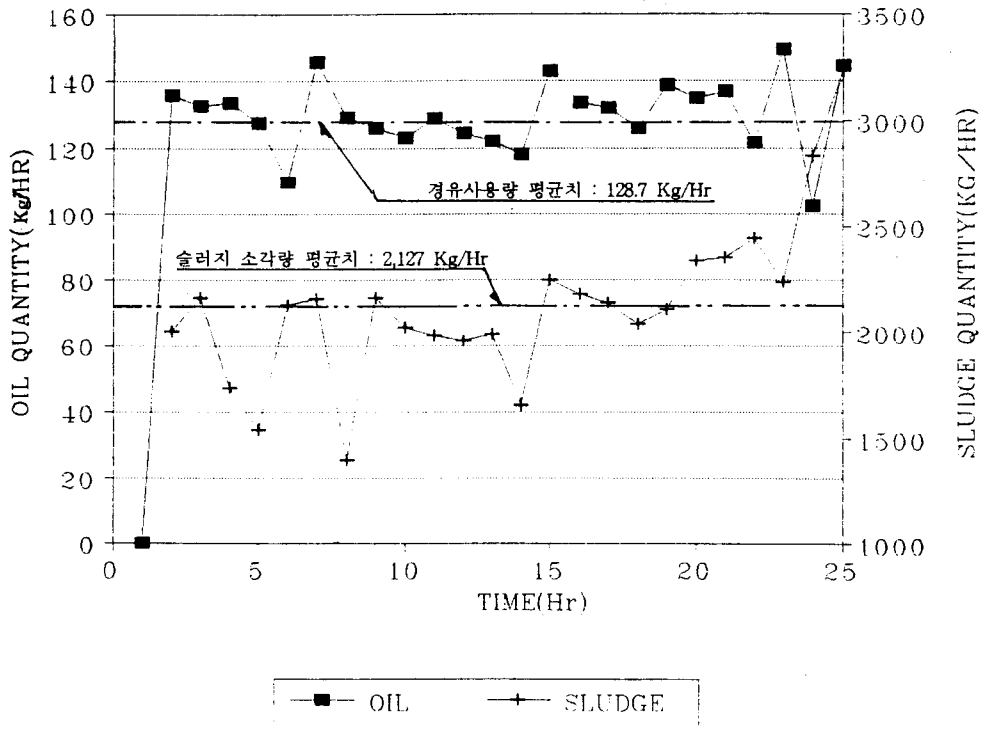


그림 2-10 슬러지 투입량 및 경유 사용량

아래 그림 2-11는 1일 50톤 소각시 평균 슬러지 투입량 2,083 KG/HR 에 대한 경유 사용량 환산곡선이다. 환산결과 평균 경유 사용량은 130.73 KG/HR 가 소요 되었다.

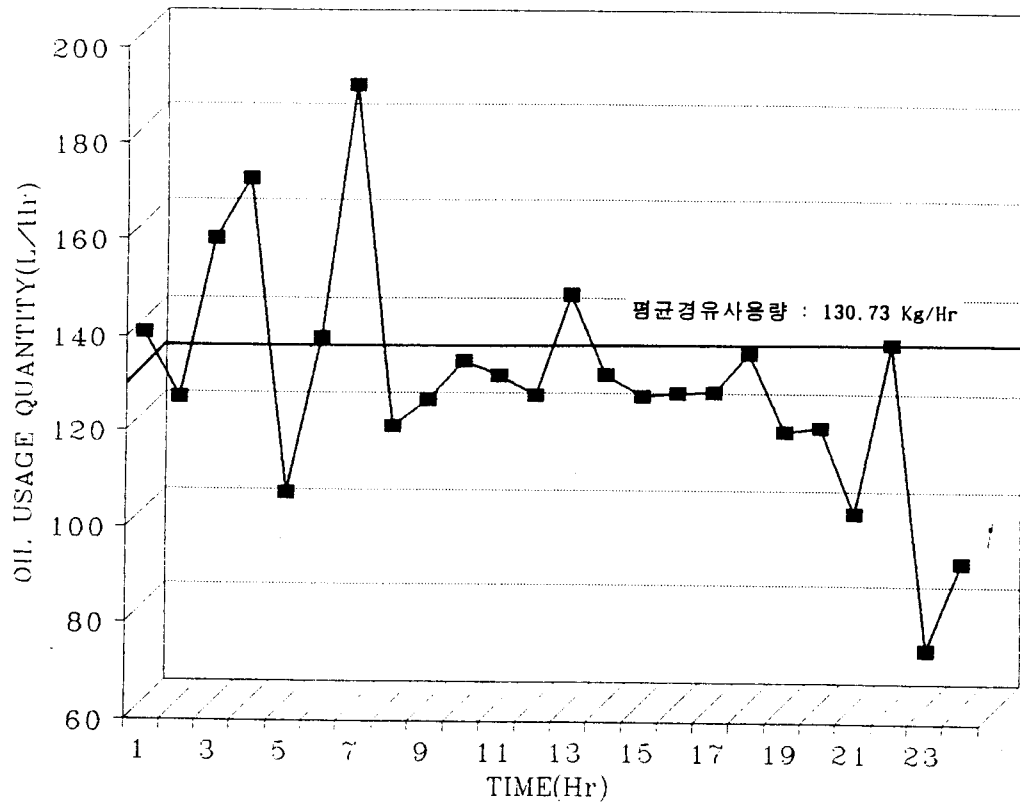


그림 2-11 슬러지 투입량 2,083 KG/HR 에 대한 경유사용량 환산곡선

한편 오염도 검사를 실시한 결과는 다음과 같으며 배가스의 오염도는 모두 허용 기준치 이내로 매우 양호하였다.

표 2-3 배출가스 측정결과

구분	측정항목	측정결과	분석방법	비고
가스상 물질	CO	27.55 PPM	배출가스 자동분석기 (Brcharach 3000 NSX)	
	SO ₂	ND	"	
	NOx	18.37 PPM	"	
	O ₂	11 %	"	
	NH ₃	6.578 PPM	인도페놀법	
	HCl	ND	티오시안산 제이수은법	
	Cl ₂	Tr	오르토톨리딘법	
	Br ₂	ND	티오시안산 제이수은법	
	HCHO	Tr	아세톤알데히드법	
	HCN	ND	질산은 적정법	
	H ₂ S	Tr	요오드 적정법	
	C ₆ H ₆ O	ND	4-아미노안티피리딘법	
입자상 물질	먼지	0.0354 mg/Sm ³	STACK SAMPLER (MODEL CE-22-ADS)	
	Cd	0.019 mg/Sm ³	원자흡광광도법	
	Cr	0.034 mg/Sm ³	"	
	Pb	ND	"	
	Cu	0.054 mg/Sm ³	"	
	Zn	ND	"	

* ND : NOT DETECTED

Tr : TRACE

(3) 소각로 부압 CONTROL SYSTEM

유동상 소각로의 내부 압력은 미세한 부압상태로 유지하는 것이 좋다. 보통 소각로 내부압력의 최적 조건은 -20 mmH₂O 정도의 압력을 유지하는 것이 좋다. 그러나 소각로의 유입조건등이 변화함에 따라 소각로 내부압력은 연속적으로 변화를 한다. 소각로 내부압력의 변화폭이 적을 수록 안정적인 연소가 이루어진다. 소각로 내부압력의 운전범위는 -300 mmH₂O 로부터 +300 mmH₂O 까지로 한정된다.

소각로의 내부압력은 유동 블로워, 벤츨리스크러버 댐퍼, 유인팬, 슬러지 투입등이 주요 인자이며 기타 압력손실이 미세한 영향을 미친다. 유동 블로워는 소각로의 연소조건에 따라 완전연소가 가능하도록 배가스의 잔류 산소량에 따라 흡입측 댐퍼를 조절하여 소요풍량이 공급되도록 자동 운전된다. 따라서 유동블로워의 풍량이 변화하면 I.D FAN 댐퍼를 조절하여 소각로 내부압력이 부압조건이 되도록 자동운전 되어야 한다.

본 시설은 설계시 소각로 내부압력을 2가지 방식으로 운전하도록 설계하였다. 첫째는 F.D FAN 및 I.D FAN 의 흡입측에 설치된 댐퍼를 제어하는 방식이며 둘째는 F.D FAN 및 I.D FAN 에 인버터를 설치하여 전동기의 회전수를 변화시켜 제어하는 방식을 채택하였다. 인버터 제어방식은 고가의 경비가 소요되지만 원활한 운전이 될 것으로 기대되었다. 그러나 시운전 결과 다음과 같은 결과가 도출되었다.

첫째 댐퍼조절방식은 일반적인 소각로의 제어방식으로 상용되는 범용방식이다. 댐퍼의 개폐각도와 송풍기의 풍량 및 풍압, 소요동력은 다음과 같은 관계가 있다.

$$P = \text{CONSTANT}$$

$$Q = a X^2$$

$$L = \text{CONSTANT}$$

여기서

P : 송풍기의 토출압력

Q : 송풍기의 토출유량

L : 송풍기의 토출동력

α : 보정상수

X : 댐퍼의 개도각

송풍기 댐퍼의 각도를 조절하면 풍압 및 소요동력은 일정구간에서 댐퍼의 개도각에 따라 변화하지 않고 일정하며 풍량은 2차 함수적으로 변한다. 소각로의 부압조절은 댐퍼의 개도각에 따라 토출유량이 2차 함수적으로 변화하므로 이를 선형화 시키기 위하여 댐퍼의 개폐기에 댐퍼의 개폐각에 따라 풍량이 선형적으로 변화하도록 조절하는 PLC 의 POSITIONER 를 부착하면 DCS SYSTEM 에서는 선형적인 제어가 이루어진다. 따라서 댐퍼를 사용한 소각로의 압력조절은 매우 용이하다.

한편, 인버터를 사용하여 전동기의 회전수를 제어할 경우 송풍기의 회전수 및 풍량, 풍압, 동력과의 관계는 다음과 같다.

$$P = \alpha_1 \gamma^2$$

$$Q = \alpha_2 \gamma$$

$$L = \alpha_3 \gamma^3$$

여기서

P : 송풍기의 토출압력

Q : 송풍기의 토출유량

L : 송풍기의 토출동력

γ : 송풍기의 회전수

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 보정상수

송풍기의 풍량은 회전수에 비례하고 풍압은 2차 함수적으로 변화하며 동력은 3차 함수적으로 변화한다. 따라서 인버터 제어를 할 경우 에너지의 절약효과는 매우 높다. 그러나 풍압이 2차 함수적으로 변화하기 때문에 회전수에 대한 변화폭이 매우 커서 소각로의 내부압력 조절시 목적하는 압력에 도달하는데 많은 시간이 소요된다. 소각로 내부압력이 안정화되는데 많은 시간이 소요되자 소각로의 압력이 안정화 되기전 소각로에 또다른 압력변화 조건이 입력되어 소각로의 안정화 반복시간은 더욱 길어진다. 이러한 반복현상으로 소각로의 안정적인 운전은 어려워진다. 결국 인버터를 이용한 송풍기의 회전수 변화로 제어하는 소각로 내부압력 조절방식은 실효성이 없는 것으로 판단되었다. 그러나 이러한 인버터 제어방식은 에너지 절감효과가 좋으며 송풍기의 운전이 매우 원활하여 송풍기의 수명이 매우 길어진다. 따라서 이러한 제어시스템은 반드시 사용되어야만 한다.

추후 우리는 소각로 내부압력 조절시간을 단축시킬수 있는 소프트웨어를 개발하여 인버터를 사용한 소각로 내부압력제어를 재시도할 계획이다.

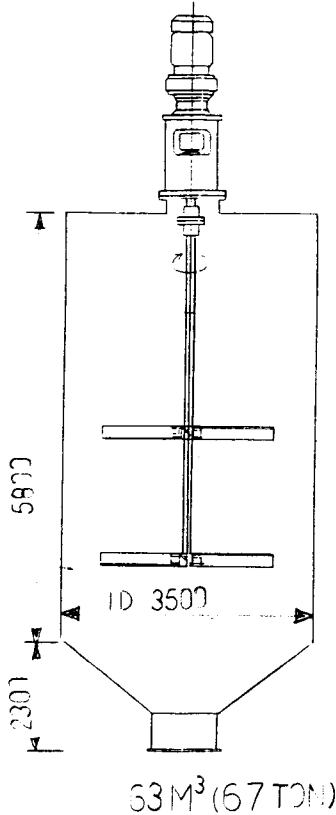
③ 개선을 요하는 사항

국내의 초기단계에 속하는 유동층 슬러지 소각로를 건설하여 시운전한 결과 다음과 같은 사항은 개선과 더불어 기술개발이 필요한 것으로 판단되어 기술한다.

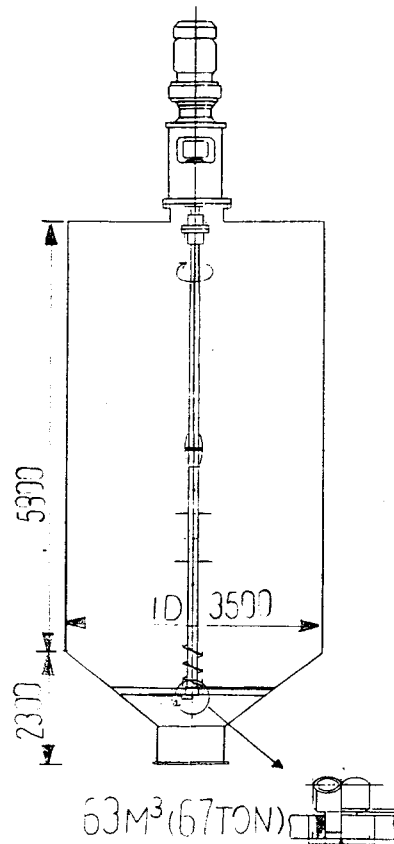
- (1) 슬러지 투입시설중 벨트콘베어 시스템은 악취발생 및 벨트의 사행, 슬러지의 낙하등으로 유지관리가 어렵다. 본 현장에서는 슬러지 투입용으로 모노펌프를 사용한 결과 운전이 매우 원활하고 유지관리 용이하였다. 따라서 슬러지 이송에는 모노펌프를 사용하는 것이 더욱 효율적이라고 판단된다.

(2) 슬러지 저장탱크 교반 믹서

슬러지 비중량(1.06 TON/m^3) 및 점도 ($2,600\text{CP}$), 슬러지 저장탱크 용량등은 교반 믹서의 설계시 매우 중요하다. 본 소각설비의 교반믹서는 JSW(일본)에서 설계하였으나 1차 설계에 문제점이 발생하여 2차 때에는 임펠러의 형태와 RPM 을 수정, 재설계하여 설치한 결과 매우 만족할만한 결과를 얻었다. 1차 설계시 교반기의 회전수는 12 RPM 이었고 2차 설계시 회전수는 5 RPM 이었다. 소요동력은 동일하게 3.7 KW 가 소요되었다.



(A) 1차 설계시 슬러지 믹서



(B) 2 차 설계시 슬러지 믹서

그림 2-12 슬러지 교반믹서

(3) 밀폐된 공간에 설치된 고온 측정용 THERMOCOUPLE

일반적으로 열전대(THERMOCOUPLE)는 저온부터 고온까지 온도 측정폭이 매우 높다. 고온에 사용되는 열전대를 설계할 때에는 소각로 내부의 고온이 열전대를 통하여 전달되는 열을 충분히 외부 공기로 전달할 수 있는 길이를 확보하여야 한다. 본 현장에서는 6개의 열전대를 교체, 설치하였다.

(4) 소각로 내부압력 조절 시스템

소각로 내부압력 조절시스템은 송풍기의 운전이 원활하고 에너지를 절감할 수 있는 송풍기 회전수 제어 시스템을 도입하여야 한다. 따라서 이에 필요한 소프트웨어를 개발하여야 한다.

