

시멘트공장의 폐열발전기술

박 민 화

(한라시멘트(주) 옥계공장)

1. 폐열발전 시스템 개요

1) 서 론

우리나라의 경제성장과 함께 급속히 발전해온 시멘트산업은 제조공정상 Energy intensity가 높은 에너지다소비 업종이다. 우리나라 시멘트산업은 품질향상과 에너지 소비절감 등 생산성 증대를 위하여 습식에서 건식공정으로, SP에서 NSP Kiln으로, 수냉방식에서 AQC 방식 등으로 제조공정을 에너지 절약형으로 바꾸어온 노력이 거듭되어 많은 효과를 거두었으나 아직도 30~40%의 폐열이 방출되고 있는 실정이다.

현재 에너지수요는 계속 증가하고 있고 가격은 안정세를 유지하고 있으나 앞으로 점차 인상되리라는 전문가의 견해가 지배적이다. 에너지수급이 원활하고 가격이 안정된 이 때 에너지다소비형 시멘트 생산설비의 에너지 이용효율을 제고하고 에너지소비량과 비용을 절감하기 위하여 보다 적극적인 대책과 노력을 기울여야 할 시점이라 사료된다. 참고로 선진국인 일본의 예를 소개하면 일본의 시멘트산업에서도 폐열이용을 위해 많은 노력을 거듭한 결과 우수한 성능의 폐열발전설비가 설치되어 안정적이고 신뢰성 있고 저렴한 전력을 공급하여 에너지 비용절감을 통한 대외 경쟁력 제고에 크게 기여하고 있는 실정이다.

2) 폐열발전 시스템의 개요

일반적인 의미에서의 폐열발전 시스템이란 공장

내에서 공정중에 발생하는 폐열을 회수하여 보일러를 가동하고 이때 얻어지는 고압의 스팀을 이용하여 터빈을 가동시켜 전기를 생산하는 장치를 의미한다. 이러한 시스템을 이용할 수 있는 것은 “열은 곧 에너지란 사실을 인식함”에서 그 이용 배경을 찾을 수 있다.

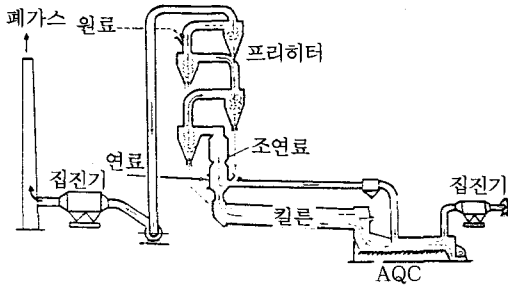
터빈을 가동시켜 열에너지를 운동에너지로 전환시켜 전력을 생산하는 것은 열에너지의 효과적인 이용의 한 대표적인 예라고 볼 수 있다. 이때 사용되는 보일러를 가동시킬 수 있는 폐열의 온도는 설비에 따라 다소의 차이가 있지만 대체로 터빈에서 사용되는 스팀을 얻기 위하여 보일러는 높은 온도의 열을, 터빈은 고압, 고온의 일정량의 스팀을 필요로 한다. 이러한 문제점으로 인하여 국내 업체에서는 아직 폐열발전 시스템의 이용이 빈약한 편이며, 투자에 대한 검토를 망설이고 있는 것으로 보여진다.

결론적으로 이러한 폐열발전 시스템의 이용에 있어서 가장 중요한 것은 에너지의 효과적인 이용이란 사실이며, 이러한 모든 것은 열역학의 이론이 밑바탕이 되고 있다는 것이다.

3) 시멘트 공정과 폐열원

최근의 시멘트 설비의 대부분은 하소로를 갖는 New suspension preheater 방식(NSP)으로서 90% 이상이 이 방식에 의하여 생산되고 있다.

이러한 방식에 의한 공정의 계통은 <그림-1>과 같으며 입열의 약 55%는 클링커의 소성을 위하여 소비되고 나머지 45%는 계 외에 방출되어 그 중 일부가 시멘트 원료의 건조 및 연료인 석탄의 건조에



<그림-1> 시멘트소성 공정계통 구성도

사용되고 있을 뿐이다. 즉, 계 외에 배출되고 있는 가스를 크게 구분하면 Suspension preheater에서 배출되는 Preheater gas와 Air Quenching cooler(AQC) 속에서 클링커 냉각후 방출되는 Cooler gas가 있으며, 전자는 통상 240~400℃ 정도로 방출되어 원료의 수분 함유량에 따라 약간씩 차이가 있기는 하지만 250~300℃까지 분산된 물에 의하여 감온되어 원료 건조에 사용되고 있다. 또 후자는 약 250℃ 정도로써 보통 대기에 방출되고 있다.

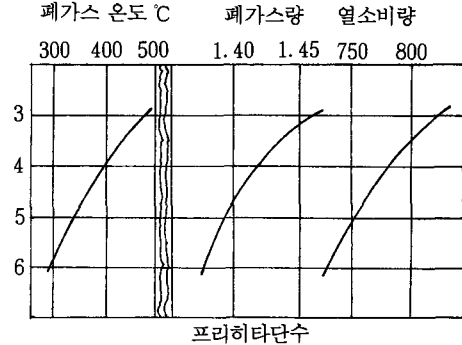
시멘트 설비에 폐열회수 스팀 설비를 설치할 경우 Preheater를 나온 온도와 원료 건조를 위하여 필요한 온도차에 의한 열량 및 Cooler에서 배출되는 가스가 지닌 열량을 사용하는 방법이 있다.

(1) Preheater 폐가스

Preheater의 단수는 4단이 많이 사용되어 왔으나 현재에는 5단 및 6단이 보급되어 Preheater에서의 배기가스 온도를 낮추어 열소비를 절감하고 있다. 클링커 생산의 열소비는 단수가 많을수록 감소하므로 때로는 5단 Preheater도 사용되고 있다. <그림-2>는 Preheater 단수에 대한 폐가스 온도, 폐가스량, 열 소비량의 관계를 나타낸 것이다.

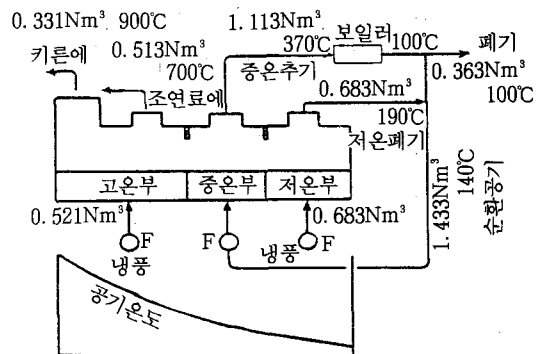
(2) Cooler 폐가스

Kiln에서 소성된 클링커는 약 1,400℃로 Cooler에 들어가나, 이 클링커에 의해 Cooler에 투입된 열량의 60~65%는 Kiln 및 하소로의 연소공기로서 사용되며, 나머지 30~35%는 250℃로서 대기로 방출된다. 이 대기 방출 경로에 폐열 보일러를 설치하여 열회수를 하는 방법이 일반적으로 생각되고 있



<그림-2> Preheater 단수와 폐가스 특성치와의 관계

으나, 폐가스가 갖는 온도가 낮으므로 증기 사이클에서 열효율이 높은 값을 얻기는 어렵다. Cooler 내의 공기온도는 클링커 온도보다 약간 낮아서 Cooler 입구부에서는 약 1,300℃ 정도이며, 출구부에서는 약 100℃가 되는 온도분포를 나타낸다. 따라서 Cooler의 중앙부에 추가구멍을 설치하여 가스를 얻을 수 있으므로 이 부분에 폐열 보일러를 설치하여 열회수를 한 후 Cooler에 다시 돌려보내는 방식이 고안되었으며, 이러한 방식을 Double pass 방식이라고 한다. Double pass AQC 방식의 한 예에 대한 Heat Balance를 <그림-3>에 나타냈다. 추출되는 중간 부분을 협소하게 하여 고온부로 접근해 가면 추출가스 온도는 상승되나, 추출가스의 양이 감소되므로 가스 자체의 열량은 감소하게 된다.



<그림-3> Example of heat balance in double pass air quenching cooler (AQC)

2. 폐열발전에 의한 에너지절감 사례

1) 연 혁

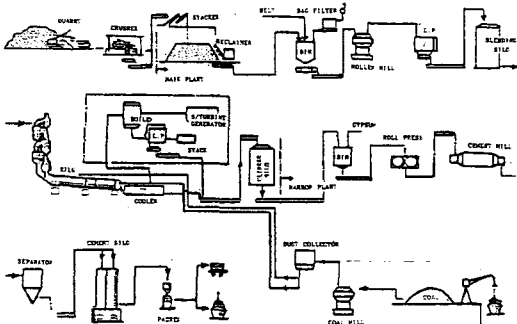
'78. 1. 27	한라시멘트(주) 법인설립
'84. 4.	공장건설 재착공(120萬ton/년)
'85. 8. 13	공장 준공
'87. 7. 8	증설공사 착공(400萬ton/년)
'87. 7.	육계항 건설 착공
'90. 11. 30	#3 Kiln 화입
'91. 1. 14	#2 Kiln 화입
'92. 5. 21	폐열 발전 설비 가동

2) 공장소개

회 사 명	한라시멘트주식회사
소 재 지	강원도 명주군 육계면 산계리 280-1번지
종 업 원 수	880名
생 산 품 및	포틀랜드시멘트 1종(KS L 5201)
생 산 능 력	520萬ton/년
폐열발전능력	7,000萬kwh/년

3) 공사개요

(1) 설비공정도



(2) 폐열발전설비 배경

시멘트제조업은 1820년대 영국에서 포틀랜드시멘트가 처음으로 개발된 후 그간 여러가지 공정개선으로 열효율 및 에너지 원단위면에서 획기적인 발전이 있었으나 아직도 시멘트 제조원가중 전력비 비중이 약 20% 이상인 실정이다. 당사는 국내 시멘트 업계로서는 처음으로 시멘트제조공정에 폐열발전설비를 설치하여 총소요 전력의 15%를 충당하고 있다.

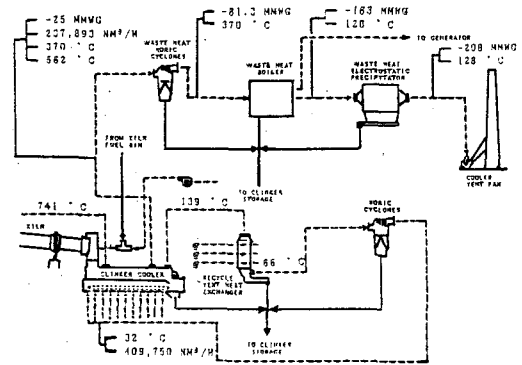
(3) 폐열발전설비 개요

폐열발전설비는 시멘트제조공장설비중 클링커 Cooler(AQC)에서 나오는 고온의 공기로부터 폐열을 효과적으로 이용할 수 있도록 설계된 폐열회수 발전설비이다.

Kiln에서 소성된 클링커를 냉각시키기 위한 공기가 AQC를 거쳐, 배출된 공기중 고온부의 공기가 Kiln 및 Calciner의 연소용 공기로 사용된다. 천정부에서 추출된 중온부 공기는 집진기를 거쳐 폐열보일러(WHB)로 보내지며 대기로 방출되기 전에 전기집진기를 거쳐 분진을 제거토록 되어 있다. 저온부의 공기는 AQC의 하부를 통과하기전에 열교환기를 거쳐 집진기를 통과하도록 되어 있다.

당공장에는 2대의 Kiln(2,3호)을 설치하고 각각의 AQC에 1대씩 총 2대의 폐열 보일러를 갖추고 있다. 각각의 폐열 보일러는 두 종류의 스팀, 즉 고압의 과열증기와, 저압의 포화증기를 생산하여 발전을 위한 한대의 터빈 발전기에 들어 가도록 되어 있다. 스팀 터빈은 입구 노즐에서 고압의 스팀을 얻는 어드미션 타입으로 되어 있다. 터빈에서 작업을 끝낸 스팀은 배출 노즐을 통하여 응축기로 들어가 응축수로 바뀐다. 이 응축수는 다시 폐열보일러로 이송되며 응축기에 쓰이는 냉각탑에 순환되어 냉각된다. 냉각탑에서 응축기로 공급된 냉각수에 의해 터빈에서 나온 스팀은 응축수로 전환되고 더워진 냉각수는 다시 냉각탑으로 보내져 대기에 의해 냉각되어 다시 응축기로 보내진다.

발전기는 감속기어를 거쳐 터빈에 연결되어 있으며 터빈은 그곳에 공급되는 스팀에 의해 전기를 발



AQC 주변공기 흐름도

생한다. 발전기는 상용 전기와 병행하여 일정하게 가동되도록 설계되어 있다. WHRS는 중앙조정실(C.C.R)에서 펌프 및 기타 장치를 조정 감시하며 on-off 동작을 행하도록 되어 있다. WHRS의 기동 및 정지시 수동 밸브가 정위치가 되도록 조작하며 발전기가 가동하여 동시운전되기까지 터빈의 조정은 터빈 발전실의 터빈 현장판넬(T.L.P)과 전기실의 발전기 조정판넬(G.C.P)에서 수행한다. 수처리 설비는 수처리실에 있는 별도설비의 조정판넬에 의해 운전, 조정된다.

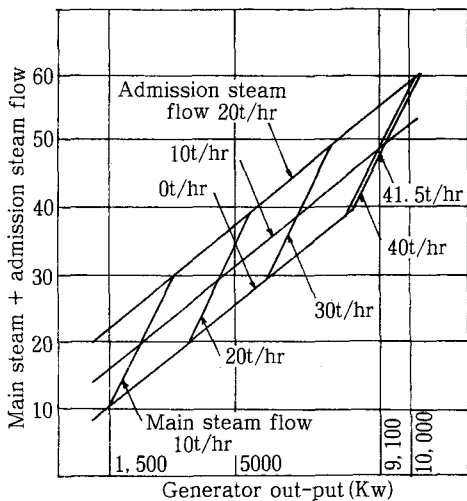
4) 폐열발전 현황

(1) 설비현황

① 보일러 설비

구 분	설 비 사 양
Capa, q'ty	27ton/hr × 2基
Type	수직형 강제순환식 이중압력 수관식보일러
Pressure	H. P. B : 25kg/cm ² , L. P. B : 2kg/cm ²
Steam volume	H. P. B : 17, 500kg/hr, L. P. B : 9, 500kg/hr
Steam temp	H. P. B : 340°C, L. P. B : 133°C
Gas volume	237, 893Nm ³ /hr
Gas temp	입구 : 370°C, 출구 : 128°C
공급처 (제작)	TAKUMA (한라 중공업)

* H. P. B : High Pressure Boiler
 L. P. B : Low Pressure Boiler



Steam consumption for 10MW, turbine/generator

② 터빈 설비

구 분	설 비 사 양
Type	Pulse, Multi-stage (14 Stage) 급기(給氣)형
Max. Output	10, 600Kw
Speed Turbine Generator	3, 975/1, 800rpm
Main steam pressure	24kg/cm ²
Main steam temp	335°C
Exhaust steam pressure	0. 075kg/cm ²
공급처 (제작)	TAKUMA (신일본)

③ Generator 설비

구 분	설 비 사 양
Type	브러시리스 동기 발전기
용 량	12, 500KVA
회 전 속 도	1, 800rpm
전 압	6, 600Volt
공급처 (제작)	TAKUMA (MEIDENSHA)

④ 수처리 설비

① 설비 사양

유 형	활성화된 카본 필터를 갖춘 완전 자동의 혼합 베드형 탈이온기
용 량	120m ³ /cycle
동 작 시 간	10hr
재 생 시 간	4hr
품 질	pH 7~8 전리도 10μs/cm ↓ 실리카(SiO) ₂ 0. 2ppm ↓
공급처 (제작)	한라 중공업

② 수처리 관리의 중요성

보일러와 터빈 시스템에 있어 보일러 공급수 수처리 및 냉각탑 순환수의 수처리 관리는 설비 운전을 위한 주요 항목중의 하나이다. 부적절한 수처리 및 수처리 관리는 다음과 같은 문제점이 발생된다.

- 보일러-터빈 (공급수-스팀라인)
 - 보일러 내부표면의 스케일 부착 → 낮은 열효율 및 수관의 과열 초래

- 보일러 내부의 부식 초래
- 터빈 날개의 스케일링 및 부식 초래
- 냉각탑-응축기 라인(냉각수 라인)
- 응축기 파이프의 녹
- 냉각탑의 녹
- 응축기 튜브나 파이프의 부식

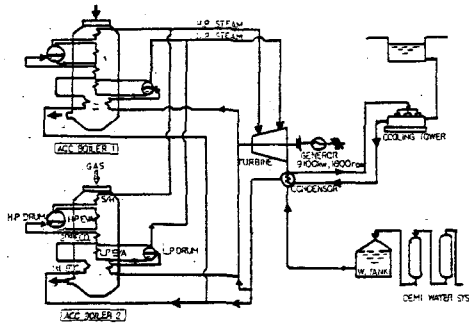
그러므로 이상의 문제를 예방하기 위하여 적절한 화학 약품(청관제, 방식제, 살균제) 투입이나 순환수의 응집을 방지하기 위한 배출이 필요하다.

③ 순수 제조과정

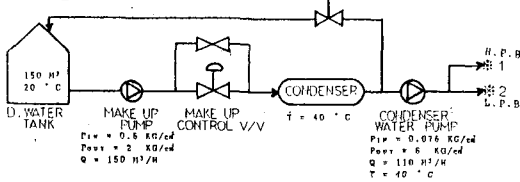
- 이온교환수지를 사용하여 원수중의 규소(SiO₂) 성분 및 이온화된 전해질(Na⁺, Ca⁺⁺, Cl⁻ 등)을 제거하여 순수를 제조하기 위한 설비이다.
- 순수처리된 물은 순수 Tank에 저장되어 보일러와 터빈의 보충수로 사용된다.

(2) 공정 및 열수지

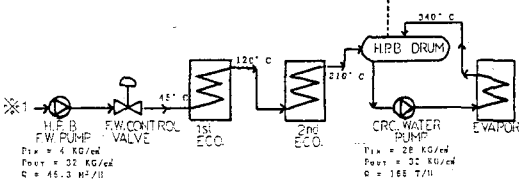
① 폐열발전설비 공정도



② Water flow

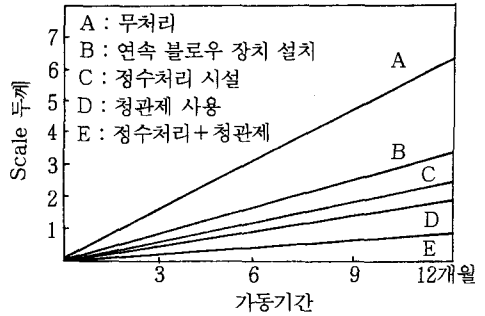


• High pressure boiler



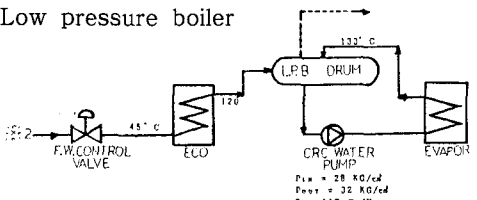
- 일정양의 순수를 제조한 후 순수처리 설비의 이온교환수지(양이온, 음이온)는 자동으로 HCl (35%) 과 NaOH (25%) 를 사용하여 재생되어 진다.
- 재생공정 중 발생하는 폐수는 중화조에 모여 중화공정을 거친 후(pH 7-9) 방출된다.

첨가, 설비 변동에 따른 Scale 두께



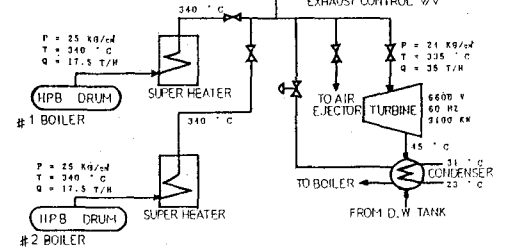
두 개	0.5	0.8	1.0	1.25	1.6	2.2
전열손실율	4	7	9	10.7	12.5	14.2

• Low pressure boiler

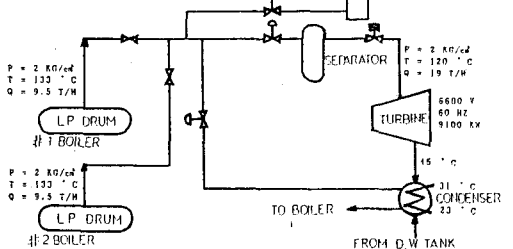


③ Steam flow

• High pressure boiler



• Low pressure boiler



② 열수지

① 보일러

구 분	보 일 러
유량(Nm ³ /h)	475,786
입구온도(°C)	370
출구온도(°C)	128
입구 엔탈피(Kcal/kg)	118.3
출구 엔탈피(Kcal/kg)	40.4
입구열량(Kcal/hr)	56,285,000
출구열량(Kcal/hr)	19,222,000

$$\begin{aligned} \text{보일러 효율 } \eta_B &= \frac{(\text{입구} - \text{출구}) \text{ 열량}}{\text{입구 열량}} \times 100 \\ &= \frac{56,285,000 - 19,222,000}{56,285,000} \times 100 \\ &= 65.9\% \end{aligned}$$

② 터빈

구 분	터빈 입구		터빈 출구
	H. P 스팀	L. P 스팀	
유량(Nm ³ /h)	35,000	18,000	53,000
온도(°C)	335	120	45
엔탈피(Kcal/kg)	739.2	646.2	45
열량(Kcal/hr)	25,872,000	12,277,800	2,385,000

- 터빈 입구 증기열량(Q₁) = 38,149,800 (Kcal/hr)
- 터빈 출구 증기열량(Q₂) = 2,385,000 (Kcal/hr)
- ΔQ = Q₁ - Q₂ = 35,764,800 (Kcal/hr)
- = 35,764,800 (Kcal/hr) ÷ 860
- (Kcal/Kwh)
- = 41,587Kw
- 발전기 출력 = 9,100Kw

$$\begin{aligned} \text{터빈 효율 } \eta_T &= \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 \\ &= \frac{9,100}{41,587} \times 100 = 22\% \end{aligned}$$

5) 효과 파악

(1) 경제성 분석

① 분석 결과

당사의 폐열 발전 설비 투자는

① 총투자비에 대한 내부수익율(IRR) 37.21%

는 현재 일반적으로 목표인 기준수익율(Cut off

rate)이 15% 정도임을 고려하면 경제성이 우수함.

② 자본회수기간(PBP) 2.99년 역시 일반적인 기준(Cut off payback period)이 5년 정도임을 고려하면 경제성이 우수함.

③ 에너지 절약시설에 대한 세제상 지원을 포함한다면 경제성은 더욱 향상될 것임.

④ 시멘트 공장의 폐열발전설비 투자는 경제성이 매우 우수한 것으로 평가되므로 타당성이 있음.

② 분석기준 자료

① 투자비 : 7,589백만원

② 감가상각 : 감가상각 - 정액법
내용년수 - 20년
잔존가치 - 10%

③ 금리 : 년 10%

④ 세세 및 보험료 : 투자비 × 0.5%

⑤ 운전인원 : 9명 (3인 × 3교대)

⑥ 보수 유지비 : 투자비 × 2%/년

⑦ 설비가동시간 : 7,790시간/년

⑧ 연간 발전량 : 70,880,832kwh

③ 투자비 내역

① 기자재비

(단위 : 백만원)

구 분	수 량	금 액	비 고
폐열 보일러	2대	1,490	내자
증기터빈 발전기	1대	2,443	외자
수처리 설비	1식	114	내자
냉각수 설비	1식	256	내자
전기계장 설비	1식	933	외자
소 계		5,236	

② 건설공사비(건축포함) : 362백만원
 ③ 수입 부대비용 : 873백만원
 ④ 기술용역 및 감리비 : 1,118백만원
 계 : 7,589백만원

④ 연간 지출비용

① 인건비 : 49.5백만원
 ② 보수유지비 : 151.8백만원
 ③ 세세 및 보험료 : 37.9백만원
 ④ 기타비용 : 13.2백만원
 ⑤ 지급이자(년10%) : 785.9백만원
 계 : 1011.3백만원

⑤ 연간 손익계산

(단위 : 천원)

항목	금액(원/년)
수입(W. H. R 가동 기여율)	3,544,000
비 용	1,170,780
1) 인건비	49,500
2) 보수 유지비	151,800
4) 제세 및 보험료	37,900
4) 기타 비용	13,200
5) 지급 이자	758,900
6) 감가 상각비	159,480
순 이 익	2,373,220

⑥ 자본 회수 기간(Pay-back period, PBP)

$$\frac{\text{투자비}}{(\text{생산전력비}-\text{년간지출비용})} = \frac{7,589}{(3,544-1011.3)} = 2.99(\text{년})$$

(2) 전력 원가 분석

① 전력생산 원가

① 당사 전력생산 원가 15.3(16.8)원/kwh는 수전단가 대비 31~34%로서,

② 전력 생산량이 적어도 설비를 가동하는 것이 경제적이며 1,500kwh가 설비가동 한계치임.

③ 인건비, 보수유지비, 감가상각비 등 고정비는 설비가 가동정지 되더라도 투자되는 항목이므로 가능한 설비 가동 시간을 증대하는 것이 유리함.

② 전력생산 원가내역

구 분	금액(원/kwh)	비 고
보존설비소요동력비	4.2(5.7)	()보일러 1대 가동시
약품 투입비	1.8	
인 건 비	0.9	
보 수 유 지 비	2.6	
감 가 상 각 비	5.8	
계	15.3(16.8)	

주) 평균생산량 : 6.8Mwh

- ① 보조설비 소요동력비 : 4.2(5.7)원/Kwh
 - 주변설비 및 보일러 2대 가동 : 4.2원/Kwh
 - 주변설비 및 보일러 1대 가동 : 5.7원/Kwh
 ② 약품투입비 : 1.8원/Kwh
 - 수질관리약품 및 수처리 약품

$$8,658,000\text{원}/\text{월} \div 896,000\text{Kwh}/\text{월} = 1.8\text{원}/\text{Kwh}$$

③ 인건비 : 0.9원/Kwh

- 근무인원 : 3명×3교대=9명

- 인건비 : 4,200,000원/월

$$4,200,000\text{원}/\text{월} \div 4,896,000\text{Kwh}/\text{월} = 0.86\text{원}/\text{Kwh}$$

주) 평균 생산량 6.8Mwh 기준임. ('92.10.20~11.11)

④ 보수유지비 : 2.6원/Kwh

$$12,648,333\text{원}/\text{월} \div 4,896,000\text{Kwh}/\text{월} = 2.6\text{원}/\text{Kwh}$$

⑤ 감가상각비 : 5.8원/Kwh

$$28,458,333\text{원}/\text{월} \div 4,896,000\text{Kwh}/\text{월} = 5.8\text{원}/\text{Kwh}$$

주) 정액법, 내용년수 20년, 잔존가치 10%

(3) 폐열발전에 의한 전력 기여 효과

구 분		내용(원/ton-ce')
전력비 단가		5,289
W. H. R	전력 기여율	15%
	시멘트제조 기여율	3%
	시멘트제조 기여단가	793

주) '92.7월 생산 기준

W. H. R 100% 가동 기준임.

6) 맺 음 말

① 폐열발전 전력의 전량을 한전 전력과 병렬 사용하고 있으며, 한전 전력 수전 시스템과는 전혀 문제없이 운영되고 있음.

② 기존 공장 #1 Line의 폐열을 사용하는 방안을 적극 검토 중에 있으며,

③ 최근 들어 확산되고 있는 환경보호 및 폐자재 활용 측면에서 페타이어, 페비닐 등 자체적으로 발생하는 각종 산업 폐기물을 에너지로 활용하는 방안도 적극 검토할 계획이며,

④ 부존자원의 절대부족이라는 우리의 현실과 폭발적인 전력수요로 인한 전력부족 현상이 발생되고 있는 현재, 전력 다소비업종인 시멘트업계에 본 폐열발전 시스템이 하나의 모델로 제시 되기를 바란다.