

國內 微分炭 火力發電所에서 바닥재 再活用을 위한 乾式 바닥재 處理시스템 導入의 經濟性 分析

*吳 世 源

祥明大學校 工科大學 環境工學專攻

Economic Analysis of Dry Bottom Ash Handling System in a Pulverized Coal Thermal Power Plant in Korea

*Sewon Oh

Major in Environmental Engineering, College of Engineering, Sangmyung University,
Cheonan, Chungnam 330-720, Korea

요 약

국내 석탄화력발전에서 발생하는 바닥재 재활용의 경제성을 평가하고자 신설 500MW×2기 유연탄 화력발전설비를 대상으로 바닥재 재활용이 가능한 건식처리시스템 도입의 경제성을 중수중력식 습식처리시스템과 비교하여 검토하였다. 신규발전설비에 건식처리시스템 도입 시 시설투자비는 습식처리시스템의 약 150% 수준으로 초기투자비는 더 소요되나, 바닥재 재활용을 통한 판매이익을 고려한 연간시설운영비는 습식처리시스템의 약 17%까지 절감되는 것으로 예측되었다. 이를 기초로 경제성 분석을 수행한 결과 건식처리시스템 도입 시 추가로 소요되는 초기투자비는 4.8년에 회수가 가능하며 투자이익률은 21.1%로 평가되었다.

주제어: 바닥재, 건식처리시스템, 경제성 분석, 투자비회수기간, 투자이익률

Abstract

Economic benefits of the dry bottom ash handling system over the wet bottom ash handling system in a new 500MW × 2units pulverized coal thermal power plant in Korea were evaluated. The higher initial capital cost in the dry bottom ash handling system was estimated. However, this higher initial capital costs would be compensated with reductions of the operating cost mainly due to the recycling of bottom ash. Economic analysis showed that the payback period of 4.9 years and the internal rate of return at 21.1% were expected for the additional initial capital cost of the dry bottom ash handling system.

Key words: Bottom Ash, Dry Bottom Ash Handling System, Economic Analysis, Payback Period, Internal Rate of Return

1. 서 론

국내에는 2002년 현재 30기의 유연탄 화력발전기가 연간 약 4천만톤의 수입 유연탄을 이용하여 국내 발전 용량의 약 30%에 해당하는 14.7GW 용량으로 전력을 생산하고 있다. 이들 유연탄에는 통상 약 8~15%의 회

분이 포함되어 있는데, 이 회분은 연소 후 비산재(Fly Ash)와 바닥재(Bottom Ash)의 형태로 연소기 외부로 배출된다. 이 중 비산재는 그 크기가 대략 10-30 μm로 발생량은 시스템에 따라 다르나 전체 회 발생량의 약 80~85%를 차지한다. 이들 비산재는 전기집진기 등을 통하여 연소가스에서 분리된 후, 싸이클론과 같은 간단한 정제 공정을 거쳐 콘크리트 혼화재 등으로 대부분 재활용되고 있다. 이와 같은 비산재의 재활용에 따라 국내 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 재활용률은

* 2004년 5월 10일 접수, 2004년 9월 20일 수리

* E-mail: sewonoh@smu.ac.kr

지난 10년간 지속적으로 상승하여, 1991년에 15.1%에 불과하던 재활용률이 2002년에 72.4%까지 증가하였다. 2002년 석탄 화력발전 과정에서 발생한 석탄회는 총 510만 톤으로 이 중 약 370만 톤이 재활용되었다.¹⁾ 한편 전체 회발생량의 약 15~20%에 해당하는 바닥재는 그 크기가 약 1~2.5 mm로 연소가 하부로 낙하하여 모이게 된다. 이들 바닥재는 비산재보다 입자가 크고 일반적으로 미연탄소분을 최대 10%까지 함유하고 있어, 국내에서는 대부분 재활용되지 못하고 해수를 이용하여 바닥재를 배출시키는 습식처리시스템(충수중력식시스템, Water Impounded Gravity Feed System)을 이용하여 회사장으로 폐기되고 있다.

최근 국내 화력발전소에서는 회사장 조성 및 운영과정에서 발생하는 여러 환경 및 민원문제에 근본적으로 대처하고자, 바닥재의 재활용률을 높여 회사장의 사용을 최소화하려는 방안이 검토되고 있다. 석탄 화력발전소에서 발생하는 바닥재를 비산재와 같은 용도로 재활용하기 위해서는 먼저 바닥재 처리 시스템이 건식이어야 경제성을 확보할 수 있으며, 처리시스템을 통해 배출된 바닥재의 물리, 화학적 특성이 비산재와 유사하여 국내외 석탄회 품질 기준을 만족시켜야 한다. 특히 최종 배출된 바닥재의 미연탄소분(LOI, Loss on Ignition) 함량은 재활용 여부를 결정하는 주요인자가 된다. 이와 같은 목적으로 바닥재를 건식으로 처리하여 재활용하는 시스템은 1980년대 후반 이탈리아의 "M"사에 의해 건식이송공정과 미분쇄공정으로 구성된 시스템이 개발되어 유럽의 화력발전소를 중심으로 적용되어 왔으며, 최근 일본, 중국으로 보급이 확대되어 2002년 현재 전 세계적으로 47개의 화력발전소에서 이와 같은 건식처리시스템이 운영되고 있다. 이들 건식처리시스템은 건식이송과정 중 냉각

공기의 유입에 의해 미연탄소분의 추가연소가 일어나게 되며, 이로 인해 별도의 미연탄소 분리공정 없이 건식처리시스템 단독으로 콘크리트 혼화재로 재활용이 가능한 품질의 바닥재가 생성된다.²⁾

국내에서도 최근 신규 화력발전설비를 중심으로 상기의 건식처리시스템의 도입이 검토되고 있는데, 이들 시스템의 도입을 위해서는 경제성의 확보가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 국내 신규 석탄 화력발전소에 바닥재 건식처리시스템 적용의 경제성을, 지금까지 대부분 국내 발전설비 바닥재 처리에 적용되어 왔던 충수중력식 습식처리시스템과 비교 분석하여, 바닥재 재활용 공정 도입의 경제적 타당성을 평가하고자 하였다.

2. 경제성 분석

2.1. 분석 방법 및 기준

경제성 분석은 신규 발전기의 바닥재 처리 시스템에 대하여 현재 국내 기존 화력발전소에서 주로 운영되고 있는 충수중력식 습식처리시스템을 도입하는 경우와, 바닥재의 재활용이 가능한 건식처리시스템을 도입하는 경우를 비교하여 수행하였다. 각 시스템 도입에 따른 시설투자비와 시설운영비를 산출한 후 이에 기초하여 건식처리시스템 도입에 따른 투자비회수기간(Payback period)과 투자이익률(Internal rate of return, IRR) 분석을 통해 시설 도입의 경제적 타당성을 평가하였다. 평가는 현재 국내 화력발전소 표준 용량인 500MW급 발전기 2기를 대상으로 하였는데, 이는 기존습식처리시스템이 발전기 2기의 바닥재 처리를 공동으로 운영하고 있어 각 기별 투자비 및 운영비를 분리하여 산출하기가

Table 1. Conditions used in the economic analysis.

Item	Conditions
1. Target	Bottom ash handling system in a 500 MW × 2 units pulverized coal thermal plant
2. Bottom ash production rate	67,000MT/year
3. Operating costs	
(1) Power cost	33W/kWh
(2) Maintenance cost	5% of the initial equipment cost per year
(3) Depreciation	Straight-line depreciation for 30 years
4. Ash disposal costs	
(1) Disposal cost to the ash pond	4,200W/MT
(3) Fly ash selling price	9,000W/MT

곤란하였기 때문이다. 습식처리시스템의 투자비 및 운영비는 “A” 화력발전소의 실제 투자비 및 연간운영비 자료를 기초로 산정하였으며, 건식처리시스템의 경우에는 이탈리아 “M”사에서 제공한 자료를 기초로 하였다. 바닥재 발생량 등 기타 발전기 운영 자료는 “A” 화력발전소의 값을 이용하였다. Table 1에 경제성 검토의 대상 및 사용된 주요 조건을 기술하였다.

2.2. 투자비 비교

각 처리시스템별 초기 투자비는 시스템 기자재비와 이의 설치비를 합하여 산정하였다. 습식처리시스템의 경우 2000년에 설치 운영중인 “A” 화력발전의 실투자비와 설치비에 연 물가 상승률 3%를 적용하여 2003년 기준으로 총시설투자비를 산정하였다. 산정된 시설투자비는 자체비 7,629,802천원, 설치비 695,540천원으로 총 8,325,342천원으로 추정되었다. 건식처리시스템의 경우 “M”사 시스템의 국내 공급업체인 일본의 “B”사에서 2003년 제공한 자료를 기준으로 환율 1,100원/엔을 적용하여 산정하였다. 이를 통해 산출된 건식처리시스템의 시설투자비는 기자재비 10,422,720천원, 설치비 2,326,500천원으로 총 12,479,220천원으로, 건식처리시스템의 시설투자비가 기존 습식처리시스템의 약 150% 수준으로 초기투자비가 더 소요되는 것으로 나타났다. 이는 건식처리시스템의 경우 연소기 하부로 낙하하는

고온의 바닥재를 건식으로 이송시키는 이송설비와 바닥재를 비산재 수준으로 미세하게 분쇄하는 분쇄 설비에 기인한다. 각 시스템별 초기시설투자비를 Table 2에 비교하여 나타냈다.

2.3. 운영비 비교

각 시스템별 총 운영비는 크게 세 가지로 나누어 비교하였다. 첫 번째로 각 설비 운영에 직접적으로 관계되는 시설 운전비를 동력비, 유지보수비와 감가상각비를 고려하여 산출하였다. 인건비 등 기타 운전비는 각 시스템별로 차이가 크지 않아 검토에서 제외하였다. 동력비는 습식처리시스템의 경우 “A” 화력발전의 2002년 운전 소비전력량을 기준으로 발전소내 전력단가 33원/kWh를 적용하여 산출하였으며, 건식처리시스템의 경우 하루 8시간 운전을 기준으로 기기별 예상 소비전력량을 합산하여 총 소비전력량을 산정한 후 동일한 전력단가를 적용하여 산출하였다. 산출된 소비전력량과 동력비는 습식처리시스템이 각각 6,348,429kWh/년, 209,498천원/년으로, 건식처리시스템이 각각 452,600kWh/년, 14,936천원/년으로 건식처리시스템이 동력의 소비가 매우 적은 공정임을 알 수 있다. 유지보수비는 연간 각 처리시스템 기자재비의 5%를 적용하였으며, 감가상각비는 시설사용연한 30년을 기준으로 각 시스템의 초기 시설투자비를 균등감가상각(straight-line depreciation)하

Table 2. Capital and operating costs of dry and wet bottom ash handling systems.

Item	Dry bottom ash handling system	Wet bottom ash handling system
1. Initial capital cost(1,000W)		
(1) Equipment cost	10,422,720	7,629,802
(2) Installation cost	2,326,500	695,540
Total	12,479,220(149.9)*	8,325,342(100)
2. Total operating costs(1,000W/year)		
(1) Operating cost		
- Power cost	14,936	209,408
- Maintenance cost	465,300	381,490
- Depreciation	424,974	254,327
Sub-total	905,210	845,225
(2) Ash disposal cost	Δ548,730	281,400
(3) Energy saving cost	Δ165,200	0
Total	191,280(17.0)	1,126,625(100)

*Values in parentheses indicate that the relative values to values of the wet bottom ash handling system.

여 산정하였다. 동력비, 유지보수비, 감가상각비를 포함하는 운전비는 습식처리시스템과 건식처리시스템이 각각 845,225천원/년, 905,210천원/년으로 산정되어 시스템별로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Table 2에 이들 운전비 내역을 기술하였다.

두 번째로는 발생된 바닥재의 처리에 관련된 비용을 시스템별로 비교하였다. 습식처리시스템의 바닥재는 재활용되지 못하고 회사장으로 폐기되고 있어 본 검토에서도 전량 회사장으로 매립되는 것을 기준으로 하여 “A” 화력발전의 회사장 조성, 운영비 자료에 근거하여 바닥재 톤당 매립비를 산정하여 연간 회차분비를 추정하였다. “A” 화력발전의 바닥재 발생량 67,000톤/년과 회사장 매립비 4,200원/톤을 적용한 결과 습식처리시스템의 회차분비는 281,400천원/년으로 추정되었다. 반면 건식시스템의 경우 바닥재는 이송과정 중 외부공기의 유입으로 미연탄소분의 추가 연소와 미분쇄공정을 통하여 비산재에 상당하는 품질을 확보하게 되고 이들은 통상 비산재와 혼합하여 재활용되고 있다.²⁾ 본 검토에서도 건식처리시스템에서 생성된 바닥재는 전량 비산재와 혼합하여 콘크리트 혼화재로 판매하는 것을 기준으로 하였다. “A” 화력발전소의 2002년 비산재 평균 판매단가 9,000원/톤을 적용하면 건식처리시스템의 회차분비는 Δ548,730천원/년(“Δ”는 이익을 나타냄)으로 회차분에 따라 이익이 발생된다.

세 번째는 보일러효율 상승에 따른 에너지절감 비용으로 건식처리시스템의 경우 앞서 살펴본 바와 같이 건식이송 과정 중 바닥재 미연탄소분의 추가 연소가 발생하게 되어 습식처리시스템에 비해 보일러 효율이 향상된다. “M”사의 건식처리시스템 운영 자료에 의하면 건

식처리시스템의 도입에 의해 통상 약 0.155%의 보일러 효율이 상승되는 것으로 보고 되고 있다.²⁾ 이에 따라 상승된 효율에 해당하는 만큼의 석탄 소비가 감소되는데 “A”화력발전에 공급되는 석탄단가인 35,000원/톤을 적용한 결과 건식처리시스템도입에 의한 에너지절감액은 Δ165,200천원/년으로 예상되었다. 이상의 시스템별 운전비, 회차분비, 에너지절감액을 고려한 총 시설운영비는 습식처리시스템은 1,126,625천원/년으로, 건식처리시스템은 191,280천원/년으로 산정되어, 건식처리시스템의 시설운영비가 습식처리시스템 운영비의 17.0%에 불과한 것으로 검토되었다.

2.4. 경제성 평가

상기의 검토 결과 건식처리시스템은 습식처리시스템에 비하여 초기투자비는 4,423,878천원이 더 소요되나 시설운영비는 연간 935,435천원이 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 건식처리시스템 도입의 경제성 여부는 이들 초기 추가 투자비와 연간 운영비 절감액을 종합적으로 고려하여야 하는데³⁻⁵⁾ 본 검토에서는 투자회수기간과 투자이익률을 사용하여 분석하였다. 먼저 건식처리시스템 도입에 따른 단순 투자비 회수기간은 습식처리시스템과 비교한 시설투자비 증가액을 연간시설운영비 절감액으로 나누어 산출하였다. 산출된 단순 투자비 회수기간은 4.7년으로 시설의 사용연한인 30년 내에 회수가 가능하며 이후 매년 연간 931,283천원의 운영비가 절감된다. 이와 같은 단순 투자비 회수기간은 투자된 자본의 이익률을 고려하지 않은 것으로서, 자본의 이익률을 고려한 투자비 회수기간을 추가로 산정하여 경제성을 분석하였다. 분석 결과 추가로 투자된 자본의 이익

Table 3. Payback periods at the different interest rates for the dry bottom ash handling system.

Items		Dry bottom ash handling system
1. Additional capital cost(1,000W)		4,423,878
2. Operating cost saving(1,000W/year)		935,435
3. Payback periods(years)	Interest rate 0%	4.7
	Interest rate 4%	5.4
	Interest rate 8%	6.2
	Interest rate 12%	7.4
	Interest rate 16%	9.5
	Interest rate 20%	16.0
	Interest rate 21%	26.2
	Interest rate 22%	Not available within the service life

Table 4. Net present worth at the different interest rates for the dry bottom ash handling system.

Items		Dry bottom ash handling system
1. Additional capital cost(1,000)		4,423,878
2. Operating cost saving(1,000/year)		935,435
3. Net Present Worth(1,000)	Interest rate 0%	23,639,172
	Interest rate 4%	11,751,695
	Interest rate 8%	6,107,047
	Interest rate 12%	3,111,223
	Interest rate 16%	1,354,490
	Interest rate 20%	233,593
	Interest rate 21.1%	0
	Interest rate 24%	-532,372

*Net Present Worths(NPW) are calculated by the following equation.

$$NPW = -4,423,878 + 935,435 \times n \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

where n is the service life and i is the interest rate.

률을 20%로 산정하여도 투자비 회수기간이 16.0년으로 건식처리시스템의 도입이 경제성을 확보하는 것으로 평가되었다. Table 3에 자본이익률을 따라 산출된 투자비 회수기간을 나타냈다.

이상의 단순 투자비 회수기간이나 자본 이익률을 고려한 투자비 회수기간은 현금의 시간적 가치를 올바르게 반영하지 못하는 단점이 있으며, 이를 고려하고자 일반적으로 다른 분석기법이 보완되고 있다.⁴⁾ 본 검토에서는 투자이익률의 분석을 통하여 현금의 시간적 가치를 반영한 경제성 분석을 수행하였다. 투자이익률이란 투자안의 증가 또는 현가가 0이 되게 하는 비율로 투자의 현금 흐름도를 기초로 여러 비율에 대하여 시행착오(Trial and error)과정을 통하여 구해진다. 본 검토에서는 건식처리시스템의 도입에 따른 추가 투자비 4,423,878천원과, 시설연한 30년간의 운영비 절감액 935,435천원/년에 대하여 Spreadsheet 프로그램을 이용하여 투자이익률을 계산하였다.⁵⁾ Table 4에 투자이익률에 따른 투자안의 증가를 나타냈다. 산출된 투자이익률은 연 21.1%로, 건식처리시스템의 도입 시 추가 소요되는 투자비는 연 21.1%의 이익률에 해당하는 경제적 이익이 얻어지는 것으로 평가되었다. 이상의 투자비회수기간과 투자이익률 분석 결과, 국내 신규 미분탄화력 발전 설비에 바닥재 건식처리시스템의 도입은 습식처리시스템에 비해 경제성을 확보하는 것으로 나타났다.

3. 결 론

신설 500 MW×2기 석탄화력발전 설비를 대상으로 바닥재의 재활용이 가능한 건식처리시스템과 바닥재의 매립이 필요한 충수중력식 습식처리시스템과의 경제성 분석을 통하여 다음의 결과가 도출되었다.

1. 건식처리시스템과 습식처리시스템의 시설투자비는 각각 12,749,220천원, 8,325,342천원으로, 시설 운영비는 각각 191,280천원/년, 1,126,715천원/년으로 산정되어, 건식처리시스템이 습식처리시스템에 비해 초기 투자비는 더 소요되나 시설운영비는 감소하는 것으로 검토되었다.
2. 건식처리시스템 도입 시 추가되는 시설투자비 4,423,878천원은 시설운영비 절감액 935,435천원으로 4.8년에 투자비가 회수되며, 투자이익률은 21.1%로 국내 신규 석탄화력발전설비에 바닥재 건식처리시스템의 도입이 충수중력식 습식처리시스템에 비해 경제성을 확보하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 한국남부발전(주)의 지원으로 (재)한국계면공학연구소와 공동으로 수행된 연구의 일부입니다. 또

한 본 논문의 일부는 상명대학교 2004학년도 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

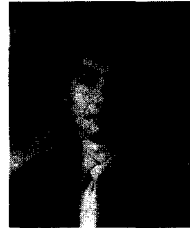
Edition, pp. 319-357. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.

5. Newnan, D. G., Lavelle, J. P., and Eschenbach, T. G., 2002: Engineering economic analysis, 8th Edition, pp. 241-274. Oxford University Press, Inc., New York, USA.

참고문헌

1. Moon, K. W., and Oh, S. W., 2003: Fly ash utilization in Korea. Proceedings of the Japan/Korea International Symposium on Resources Recycling and Material Sciences, pp. 244-251, Kansai University, Osaka, Japan. 4-5 September 2003.
 2. <http://www.magaldi.com>
 3. Ardalna, A., 2000: Economic and financial analysis for engineering and project management, pp. 55-74. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA.
 4. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., and West, R. E., 2003: Plant design and economics for chemical engineers, 5th

吳世源



- 1990년 서울대학교 공업화학학과 (현 응용화학부)공학사
- 1992년 서울대학교 공업화학학과 (현 응용화학부)석사
- 2001년 University of Florida 환경공학과 박사
- 현재 상명대학교 토목환경공학부 조교수

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技術 報告	實際的인 試驗, 調査의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政정보를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外의 研究 機關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜 등
Group 紹介	企業, 研究機關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.