

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 (II)
- 既存設備 改善事業에 대하여

*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 (II)
- Case Study for Retrofitting the Existing Facility**

*Sewon Oh

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

요 약

국내 기존의 석탄화력발전기에서 운영 중인 중수중력식 바닥재 처리시스템을 바닥재의 재활용이 가능한 건식처리시스템으로 교체하는 개선사업에 대하여 500MW×2기 발전설비를 대상으로 경제성을 분석하였다. 건식처리시스템으로의 개선 시 초기투자비는 13,415,127천원이 소요되며, 시설운영비는 연간 935,345천원이 절감될 것으로 예측되었다. 이를 기초로 경제성 평가를 수행한 결과, 개선사업 시 소요되는 초기투자비는 자본 이익률 10%에서 시설사용연한 내에 회수가 불가능하였으며, 투자이익률은 5.6%로 산정되어, 현재 국내 조건에서 개선사업은 경제성을 확보하지 못하는 것으로 평가되었다. 이는 신규발전설비에 건식처리시스템의 도입이 경제성을 확보하는 것과 유럽에서 개선사업이 경제성을 확보하는 것과 다른 결과를 보이고 있는데, 이는 회매립비 차이에 기인하는 것으로 검토되었다. 향후 국내 시장 여건의 변화에 따라 회매립비와 회판매가가 변동할 경우의 경제성 분석결과, 개선사업은 회판매가가 17,000원/톤 이상으로 상승하거나 회매립비가 15,000원/톤 이상으로 상승할 경우, 경제성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

주제어 : 바닥재, 건식처리시스템, 기존설비, 개선사업, 경제성분석

Abstract

Economic feasibility for retrofitting the wet bottom ash handling system to the dry system in a existing 500MW×2 units pulverized coal thermal power plant in Korea was studied. Replacing to the dry system requires the initial capital costs of 13,415,127,000₩, and saves the operating costs of 935,345,000₩ per year. Economic analyses based on these results showed that the initial capital cost would not be recovered within the service life of the facilities at the interest rate of 10%, and the internal rate of return of 5.6% were obtained. Thus, the retrofitting to the dry system was not economically favorable in the current condition. However, the retrofitting would be profitable when the ash disposal cost and ash selling price were increased over 15,000₩/MT or 17,000₩/MT, respectively.

Key words : Bottom Ash, Dry Bottom Ash Handling System, Existing Facilities, Retrofitting, Economic Analysis

* 2004년 12월 10일 접수, 2005년 2월 17일 수리

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

1. 서 론

석탄화력발전은 2003년 현재 국내 발전용량의 28.4%를 차지하고 있는 주요 발전원으로, 총 36기의 발전기가 15,931MW의 용량으로 운영되고 있다¹⁾. 석탄화력발전은 연소 과정 중 원탄에 포함된 회분이 석탄회로 발생하게 되는데, 이들 석탄회 중 연소가스와 함께 배출되는 비산재는 전기집진기를 통하여 연소가스에서 분리된 후, 싸이클론과 같은 간단한 정제 공정을 거쳐 대부분 콘크리트 혼화재로 재활용되고 있다. 반면 보일러 하부로 낙하하는 석탄회인, 바닥재는 해수나 담수를 이용한 습식처리시스템에 의해 보일러 외부로 배출되어 발전소 내에 조성된 회사장으로 폐기된다. 2002년 국내 석탄화력발전소에서 발생한 석탄회는 총 510만톤으로 이 중 370만 톤이 재활용되고 있어 재활용률은 약 72.4%에 이르고 있는데, 이는 대부분 비산재의 재활용에 기인한다²⁾. 최근 국내 석탄화력발전소에서는 회사장 조성 및 운영과정에서 발생하는 여러 환경 및 민원문제에 근본적으로 대처하고자, 회사장으로 매립되는 석탄회의 상당 부분을 차지하는 바닥재의 재활용률을 높여 회사장의 사용을 최소화하려는 방안이 검토되고 있다. 바닥재의 재활용은 현재 콘크리트 혼화재로 재활용되고 있는 비산재와 혼합하여 같은 용도로 사용하는 것이 가장 현실적인 방안으로, 이를 위해서는 바닥재 처리 공정을 거친 최종 바닥재의 물리 화학적 성질이 비산재와 유사하여야 하며, 국내 석탄회 품질 기준을 만족시켜야 한다. 이와 같은 목적으로 연소기 하부에 모이는 바닥재를 처리하는 시스템은 이탈리아 Magaldi사에 의해 건식이송공정과 미분쇄공정으로 구성된 MAC 시스템이 개발되어, 2002년 현재 전세계적으로 47개의 화력발전소에서 운영되고 있다³⁾.

기존의 국내 석탄화력발전기의 바닥재 처리 시스템은 대부분 해수를 이용하여 바닥재를 회사장으로 폐기하는 습식처리시스템인 충수중력식시스템(Water Impounded Gravity Feed System)이 운영되어 왔으며, 최근 신규 화력발전설비를 중심으로 바닥재의 재활용이 가능한 상기의 건식처리시스템의 도입이 검토되고 있다. 이들 건식바닥재 처리시스템의 도입을 위해서는 경제성의 확보가 필수적인데, 신규발전설비의 경우 건식처리시스템의 도입이 국내 바닥재 처리, 판매비 등을 고려할 때, 충수중력식시스템 도입에 비해 경제성을 확보하는 것으로 검토되었다⁴⁾. 이에 따라 현재 건설이 계획 중인 국내 신규발전설비의 경우, 건식 바닥재 처리시스템의 적용

이 활발히 검토되고 있다. 반면 현재 운영 중인 기존 석탄화력발전기의 습식 바닥재 처리시스템을 건식처리시스템으로 변경하는 경우에는, 기존 바닥재 처리 설비를 철거하고, 새로운 설비를 다시 설치하여야 하므로 초기 투자비가 신규발전설비에 도입하는 경우에 비하여 상대적으로 과다하게 소요된다. 이로 인해 기존에 운영 중인 석탄화력발전소에서는 건식처리시스템의 도입을 적극적으로 추진하지 못하고 있는 실정이다. 하지만 환경친화적 공정 도입의 사회적 요구 및 국가 자원의 효율적 이용 등을 고려할 때, 기존 석탄화력발전소에서도 건식처리시스템으로의 변경에 대한 필요성이 증대될 것으로 예측되며, 이에 따라 상세한 경제성 검토가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 국내 기존 석탄 화력발전소에서 운영되고 있는 충수중력식 바닥재 처리시스템을 생산된 바닥재의 재활용이 가능한 건식처리시스템으로 교체할 경우의 경제성을, 석탄회 처분비용과 석탄회 판매비 등 주요 조건 변화에 따라 분석하여, 현재 및 향후 시장 변화에 따른 경제적 타당성을 제시하고자 하였다.

2. 경제성 분석법

경제성 분석은 기존 석탄화력발전소에서 운영 중인 충수중력식 바닥재 처리시스템을 건식처리시스템으로 변경하는 경우에 대하여, 현재 국내 화력발전소 표준 용량인 500MW급 발전기 2기를 대상으로 수행하였다. 경제성 평가는 건식처리시스템으로 변경에 따른 시설투자비와 시설운영비 절감액을 산출한 후, 이에 기초하여 초기투자비에 대한 투자비회수기간(Payback period)과 투자이익률(Internal rate of return, IRR) 분석을 통하여 수행하였다. 평가방법 및 투자비와 운전비 산출내역은 앞서의 논문에서 상세히 기술되어 있어⁴⁾, 본 논문에서는 주요한 내용을 중심으로 간략히 기술하였다. Table 1에는 경제성 검토의 대상 및 본 검토에서 사용된 주요 조건을 기술하였다.

건식처리시스템 설비로의 변경에 따른 시설 투자비 및 시설 운영비는, Magaldi사의 국내 공급업체인 일본의 “K” 중공업사에서 제공한 자료를 기준으로 산정하였으며, 기존 습식처리시스템의 운영비는 국내 “A” 화력발전소의 2002년 연간운영비 자료를 기초로 산정하였다. 기존 습식처리설비의 철거비, 건식처리설비의 기자재비와 설치비를 고려한 500MW×2기 개선사업의 총 투자비는 13,415,247천원으로 산정되었다. 항목별 투자비 상세내역은 Table 2에 기술하였다. 반면, 건식처리설

Table 1. Conditions used in the study.

Item	Conditions
1. Target	Retrofitting the existing wet bottom ash handling system in a 500MW×2units pulverized coal thermal plant
2. Bottom ash production rate	67,000MT/year
3. Conditions used in estimating capital and operating costs	
(1) Removal cost	8% of the initial capital cost of the wet bottom ash handling system
(2) Power cost	33₩/kWh
(3) Maintenance cost	5% of the initial equipment cost per year
(4) Depreciation	Straight-line depreciation for 30 years
(5) Ash disposal costs	
- Disposal cost to the ash pond	4,200₩/MT
- Fly ash selling price	9,000₩/MT
(6) Energy saving cost	
- Boiler efficiency	0.155% increase in boiler efficiency due to post combustions of unburned carbons in dry bottom ash handling system
- Coal price	3,500₩/MT

Table 2. Initial capital costs and operating costs savings for retrofitting to the dry bottom ash handling system.

Item	Retrofitting to the dry bottom ash handling system
1. Initial capital cost(1,000₩)	
(1) Removal cost	666,027
(2) Equipment cost	10,422,720
(3) Installation cost	2,326,500
Total	13,415,217
2. Total operating cost savings(1,000₩/year)	
(1) Operating cost savings	
- Power cost savings	194,472
- Maintenance cost savings	Δ83,810*
- Depreciation savings	Δ170,647
Sub-total	Δ59,985
(2) Ash disposal cost savings	830,130
(3) Energy cost savings	165,200
Total	935,345

*Δ indicates increases in operating costs.

비로의 교체는 설비 운영 동력 감소에 따른 동력비 절감, 처리된 바닥재의 판매에 따른 회차분비 감소, 미연탄소분의 추가 연소에 의한 에너지 절감으로 인해 연간 시설운영비가 감소하게 된다⁴⁾. 먼저 설비 운영에 직접

적으로 관계되는 시설 운전비 절감액은 동력비, 유지보수비와 감가상각비를 기준으로 산출하였다. 건식처리시스템의 연간운전비는 905,210천원으로 기존 습식처리시스템의 연간운전비는 845,225천원에 비해 다소 상승하

Table 3. Payback periods and net presents worths at the different interest rates for retrofitting to the dry bottom ash handling system.

Interest rates(%)	Payback periods(years)	Net present worths(1,000\)
0	14.3	14,647,833
1	15.6	10,726,217
2	17.1	7,535,211
3	19.0	4,919,722
4	21.7	2,760,356
5	25.9	964,712
5.6*	29.8	0
6	33.9	-539,112
10	Not available within the service life	-4,596,951

*Internal rate of returns

는 것으로 산정되었는데, 이는 초기 시설투자비에 대한 감가상각이 동력비의 감소에 따른 운전비 절감액 보다 크기 때문이다. 이에 따라 건식처리시스템으로의 변경에 따라 감가상각을 포함하는 총 운전비는 59,985천원/년 상승할 것으로 예측되었다. 항목별 상세 내역은 Table 3에 기술하였다.

두 번째로는 발생된 바닥재의 처리 비용 절감액을 산출하였다. 습식처리시스템의 바닥재는 재활용되지 못하고 회사장으로 폐기된다. “A” 화력발전소의 회사장 조성, 운영비 자료에 근거하여 바닥재 톤당 매립비를 산정한 결과, 습식처리시스템의 회처리비는 281,400천원/년으로 추정되었다. 반면 건식시스템으로의 변경 시 생성된 바닥재는 비산재와 혼합하여 콘크리트 혼화재로 판매가 가능하게 된다. 본 검토에서는 생성된 바닥재는 전량 콘크리트 혼화재로 판매하는 것을 기준으로 하여, “A”화력발전소의 2002년 비산재 평균 판매단가 9,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 산출된 연간 회판매비는 548,730천원으로 추정되었다. 따라서 건식처리시스템으로의 변경 시 연간 281,400천원의 회처리비 절감과 연간 548,730천원의 회판매비로 인한 이익으로 인해, 회처리와 관련된 시설운영비 절감액은 연간 830,130천원에 이를 것으로 예측되었다.

마지막으로 보일러효율 상승에 따른 에너지 절감 비용을 산정하였다. 건식처리시스템의 경우 바닥재 미연탄소분의 추가 연소에 의해 보일러 효율이 약 0.15% 상승하게 되며, 이에 따라 상승된 효율에 해당하는 만큼의 석탄 소비가 감소하게 된다. “A”화력발전소에 공급되는 석탄단가인 35,000원/톤을 적용한 결과 건식처

리시스템으로 변경에 의한 에너지절감액은 165,200천원/년으로 예상되었다. 이상의 운전비, 회처리비, 에너지 절감액을 고려한 총 시설운영비 절감액은 935,345천원/년에 이를 것으로 추정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건식 바닥재 처리시스템 개선 사업의 경제성 분석

앞의 검토 결과 기준에 운영 중인 충수중력식 바닥재 처리설비를 건식처리시스템으로 변경할 경우, 초기 시설 투자비는 13,415,247천원이 소요되나 시설운영비는 연간 935,435천원이 절감되는 것으로 나타났다. 따라서 건식처리시스템으로 변경의 경제성 여부는, 이들 초기 추가 투자비와 연간 운영비 절감액을 종합적으로 고려하여야 하는데, 본 논문에서는 투자비 회수기간(Payback periods)과 투자이익률(Internal rate of returns, IRR) 분석을 이용하여 평가하였다⁵⁻⁷⁾. 먼저 투자비 회수기간은 투자된 자본에 대해 기대하는 이익률에 따라 다른 값을 가지게 되는데, 이익을 기대하지 않은 단순 투자비 회수기간은 14.3년으로 시설의 사용연한인 30년 내에 회수가 가능하다. 그러나 투자된 자본의 이익을 고려할 경우, 이익률 5% 이상에서 투자비의 회수가 불가능하며, 일반적으로 자본 투자 시 고려되는 이익률 10%에서는 투자비 회수가 불가능한 것으로 평가되었다. 또한 투자비의 총 현재가(Net Present Worth, NPW) 분석을 통해 투자비의 현재가가 0이 되게 하는 이율인 투자이익률은 5.6%로, 신규설비에 적용할 경우의 투자이익률인 21.1%⁴⁾에 비해 매우 낮게 분석되어, 신규설비에 적용하는 경우에 비

하여 경제성이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. Table 3에 자본이익률에 따른 투자비 회수기간 및 총현가 상세 내역을 기술하였다.

이상의 결과는 기존의 충수중력식 바닥재 처리 설비를 건식처리시스템으로 개선하는 사업은, 초기 투자비의 자본이익률을 고려할 경우, 현재 국내 조건에서 경제성을 확보하지 못하는 것을 보여준다. 이와 같은 국내 평가 결과는 35기 이상의 기존 바닥재 처리시스템 개선사업을 수행하여 경제적 이득을 얻고 있는 유럽의 경우와 큰 차이를 나타내는데, 이와 같은 상이한 평가 결과는 회사장으로 폐기되는 회처리분비 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 본 검토에서는 회처리분비를 국내 "A" 화력발전소에서 제공한 회사장 조성비 및 운영비 자료에 근거하여 톤당 4,200원을 기준으로 하였으나, Magaldi사는 경제성 검토 시 회처리분비를 약 37-50\$/톤으로 산정하고 있어, 본 검토에 비해 약 10배 이상의 비용을 적용하고 있다. 이와 같은 회처리분비 산정의 국가별 차이는, 회사장 조성을 위한 부지 매입비 및 관련 비용의 차이에 따른 것으로서, 이에 따라 개선사업의 경제성 여부는 크게 좌우되게 된다.

3.2. 회처리분비 변화에 따른 경제성 분석

국내에서도 첨예화하고 있는 각종 환경 문제로 인해, 향후 회사장 조성 부지 확보의 어려움과 운영비의 증가

등으로 회사장 매립비가 상승할 가능성 있다. 이에 따라 기존 처리시스템 개선 사업의 경우에도 회처리분비 변화와 같은 국내 시장 여건 변화에 따라 향후 경제성의 확보가 가능해질 수 있다. 따라서 본 검토에서는 개선 사업의 경제성 평가 시 가장 주요한 인자인 회처리분비 변동에 따른 경제적 타당성을 검토하였다. 먼저 기존 습식처리시스템에서 회사장으로 회처리분비는 현재의 4,200원/톤에서 유럽의 산정가 수준인 30,000원/톤까지 단계적으로 변경하여 검토하였다. 또한 건식처리시스템으로 변경 시 최종 생산되는 바닥재의 판매비는 국내 건설 경기에 의해 크게 좌우되는데 본 검토에서는 2,000원/톤에서 18,000원/톤까지 단계적으로 변경하여 경제성을 분석하였다. 이들 회처리분비와 회판매비의 변화에 따라 건식처리시스템으로 개선사업에 대하여 투자이익률과 자본이익률 10%에서 투자회수기간을 산정하여 Table 4에 기술하였다.

먼저 회처리분비를 고정하고 건식공정에서 생산되는 회판매비의 변화에 따른 경제성을 분석하였다. Table 4에서 나타난 바와 같이, 본 논문의 검토 기준인 현재 국내 회처리분비 4,200원/톤의 경우, 회판매가가 17,000원/톤 이상이 되면 경제성을 확보 할 수 있는 것으로 평가되었다. 회판매가 17,000원/톤에서, 투자회수기간은 30년, 투자이익률은 10%로 산정되었다. 반면 회판매비를 고정된 후 회처리분비의 변화에 따른 경제성 분석을 수행

Table 4. Payback periods and internal rate of returns for at various values of ash disposal costs and ash selling prices. Payback periods are at 10% interest rate and expressed in years. IRRs are in parentheses.

Ash selling price (1,000/MT)	2	6	9	10	14	17	18
Ash disposal cost(1,000/MT)							
4.2	NA* (0.9%)	NA (3.8%)	NA (5.6%)	NA (6.2%)	NA (8.4%)	30.0 (10.0%)	24.6 (10.5%)
5	NA (1.5%)	NA (4.3%)	NA (6.1%)	NA (6.7%)	NA (8.9%)	25.1 (10.4%)	21.6 (11.0%)
10	NA (5.2%)	NA (7.5%)	NA (9.2%)	36.3 (9.7%)	18.2 (11.7%)	14.2 (13.2%)	13.2 (13.7%)
15	NA (8.4%)	25.1 (10.4%)	17.4 (11.9%)	15.9 (12.4%)	12.1 (14.4%)	10.3 (15.8%)	9.8 (16.3%)
20	20.3 (11.2%)	14.2 (13.2%)	11.7 (14.6%)	11.1 (15.1%)	9.2 (17.0%)	8.2 (18.4%)	7.9 (18.8%)
25	12.8 (13.9%)	10.3 (15.8%)	9.0 (17.2%)	8.7 (17.7%)	7.5 (19.5%)	6.8 (20.9%)	6.6 (21.4%)
30	9.6 (16.5%)	8.2 (18.4%)	7.4 (19.8%)	7.1 (20.2%)	6.3 (22.1%)	5.8(23.5%)	5.7 (23.9%)

*Not Available

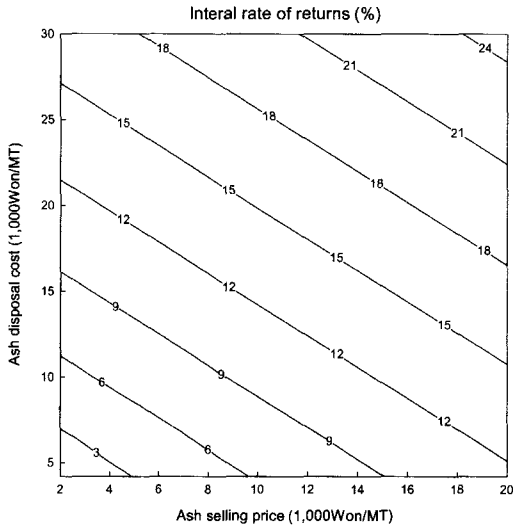


Fig. 1. Internal rate of returns depending on ash selling prices and ash disposal costs.

하였는데, 현재의 회판매비 9,000원/톤에서 건식공정에서의 개선사업은, 회판매비가 15,000원/톤 이상에서 경제성을 갖는 것으로 검토되었다. 이 조건에서의 투자비 회수기간과 투자이익률은 각각 17.4년과 11.9%로 산정되었다. 또한 회판매비가 20,000원/톤까지 상승할 경우 건식처리시스템으로 개선사업은 생산되는 회판매가가 2,000원/톤까지도 경제성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. 이상의 결과를 도식화하기 위해 투자이익률에 대한 반응표면도를 작성하여 Fig. 1에 나타냈다.

4. 결 론

기존의 500MW×2기 석탄화력발전설비에서 운영 중인 중수중력식 바다재 처리시스템을 바다재의 재활용이 가능한 건식처리시스템으로 변경하는 개선사업에 대하여 경제성 분석을 수행하여 다음의 결과가 도출되었다.

1. 건식처리시스템으로의 개선 시 초기투자비는 13,415,127천원이 소요되며, 시설운영비는 연간 935,345천원이 절감될 것으로 예측되었다.
2. 초기투자비는 통상의 자본 이익률 10%에서 시설 사용연한 내에 회수가 불가능하였으며, 투자이익률은 5.6%로 산정되어, 현재 국내 조건에서는 경제성을 확보하지 못하는 것으로 평가되었다.

3. 회판매비와 회판매가 변동에 따른 개선사업의 경제성 분석 결과, 회판매가 17,000원/톤 이상으로 상승하거나 회판매비가 15,000원/톤 이상으로 상승할 경우, 경제성을 확보 할 수 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 한국남부발전(주)의 지원으로 (재)한국계면공학연구소와 공동으로 수행된 연구의 일부입니다. 또한 본 논문의 일부는 상명대학교 2004학년도 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 2004: 한국전력통계
2. 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.
3. [http:// www.magaldi.com](http://www.magaldi.com)
4. 오세원, 2004: 국내 미분탄 화력발전소에서 바다재 재활용을 위한 건식 바다재 처리시스템 도입의 경제성 분석, 자원리사이클링, 13(5), pp. 51-56.
5. Ardalna, A., 2000: Economic and financial analysis for engineering and project management, pp55-74, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, USA.
6. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., and West, R. E., 2003: Plant design and economics for chemical engineers, 5th Edition, pp. 319-357, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.
7. 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.



吳世源

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