

Coal Fly Ash로부터 경량 골재 생산을 위한 소성장치†

*崔榮允 · 南哲祐 · 金炳圭 · 金炳坤

韓國地質資源研究院

Kiln for Production of Light Weight Aggregate from Coal Fly Ash†

*Young-Yoon Choi, Chul-Woo Nam, Byoung-Gyu Kim and Byoung-Gon Kim

Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

요 약

국내 석탄 발전소에서 발생하는 Fly ash를 이용한 경량 골재 제조는 환경 보호와 천연 골재 고갈을 동시에 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 건축물의 초고층화는 골재의 경량화를 요구하고 있다. Dwight-Lloyd kiln은 운전이 쉽고 신뢰성이 높아 현재 유일하게 석탄회 소결 골재 상업 생산에 이용되고 있다. 본 고에서는 일본 Oomura 발전소의 Dwight-Lloyd kiln설비에 대해 자세히 설명하였고, 아울러 현재 개발 단계인 Circular grate kiln, Shaft kiln, Rotary kiln 설비에 대해서 개략적으로 소개하였다.

주제어 : 석탄회, 경량 골재, Dwight-Lloyd kiln, Circular grate kiln, Shaft kiln.

Abstract

In viewpoints of environmental and resource conservation, it is desirable to utilize fly ash generated from domestic coal power stations as light constructive material. Furthermore, the demand of light constructive materials has been increased as many building tend to become highly multistory buildings. In demonstration of converting fly ash to light constructive materials, the Dwight-Lloyd kiln of which the operation is relatively easy and the reliability very high has been informed to be only commercialized plant over the world. In this review, Dwight-Lloyd kiln plant operated at Oomura coal power station in Japan is explained. Circular grate kiln, Shaft kiln, Rotary kiln plants that are under developed is also introduced.

Key words : Coal fly ash, Light weight aggregate, Dwight-Lloyd kiln, Circular grate kiln, Shaft kiln.

1. 서 론

국내 석탄화력발전소는 연료로 유연탄 또는 무연탄을 분쇄하여 미분탄으로 사용하고 있으며, 이들 연료용 석탄은 종류 및 산지에 따라 다르나 일반적으로 미연소 물질인 회분을 5~30% 정도 포함하고 있어 보일러 내에서 연소하고 나면 석탄회가 남는다.

석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 보일러 바다에 낙하하는 클링커 석탄회와 절탄기 하부 및 집진 장치에서 포집되는 비산 석탄회(Coal fly ash)로 구분되며,

이들의 발생비율은 클링커 석탄회가 5~15%, 비산 석탄회가 85~95%로 비산 석탄회가 대부분이다. 국내 석탄회 발생량은 석탄화력발전소의 증가와 더불어 증가될 전망이다.

한편 국내 골재자원의 수급상 골재 이용가능 부존량의 감소, 골재 채취원의 원거리화, 교통체증 및 유통비용 상승으로 공급상 문제점이 내포되어 있으며 대체 자원으로 채석 및 바다 골재의 점유 비중이 점점 증가하고 있어 골재 품질이 떨어질 우려가 있다. 따라서 국내 석탄 발전소에서 발생하는 fly ash를 이용한 경량 골재 제조는 환경 보호와 천연 골재 고갈을 동시에 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

† 2007년 7월 27일 접수, 2007년 8월 10일 수리

* E-mail: yychoi@kigam.re.kr

2. 경량골재 생산기술

Fig. 1은 Lee B. Clarke¹⁾ 등이 1993년 IEA Coal Research에서 발표한 인공골재 제조 공정에 관한 것이다. 석탄회를 이용하여 인공골재를 생산하는 방법에는 소결 공정에서 온도에 따라서 분류된다. 소결 온도가 900°C 이하인 경우 결합 조제로 시멘트나 석회를 사용하고, 900°C 이상인 경우는 석탄회 중에 존재하는 미연탄소의 연소열과 외부 열원에 의하여 소결시켜 인공 골재를 제조한다. 유럽에서는 석탄회를 원료로 하는 인공 경량 골재 제조 기술 개발을 위하여 1950년대 초부터 노력을 기울여 왔다. 그 결과 영국의 Pozzolan Lytag Ltd.는 연간 50만 m³ 규모의 상업생산을 자랑한다. Lytag사는 900°C 이상의 고온에서 소성하는 방법에 의하여 인공 골재를 생산한다.

일본에서도 1950년대 중반부터 석탄회를 이용하여 인공골재를 생산하기 위한 기술 개발이 시작되었다. 일본 시멘트(주)와 代常磐炭鐵(주)은 석탄회와 점토 및 펄프 폐액을 pellet으로 제조하여 rotary kiln에서 1200°C 이상으로 소성하여 "ゾライト"라는 상품명으로 판매한 적이 있으나, 1981년에 일본차차(주)와 석탄기술연구소(재)에 의하여 본격적으로 행하여졌다.

별도의 결합 조제 없이 고온에서 자체 소성만으로 석탄회를 원료로 인공골재를 생산할 때 여러 가지 잇점이 있다. 석탄회 중에 존재하는 미연 탄소분이 제거되어 골

재로 활용할 때 색상이나, 물에 대한 젖음성 방해 해소, 결합 조제 없이 제조함으로써 생산원가 절감 및 환경 오염 방지 등이 있다. 그러나 고온에서 소성하므로 보조 연료비, 소성로의 운전 보수 등에 따르는 문제점이 있다. 석탄회를 고온 소성하여 인공골재를 생산하기 위하여 개발된 소성로로는 로타리 킬른, 드와이트 로이드(Dwight-Lloyd)식 소성로, Circular Grate식 소성로, 입형 소성로 등이 있으나 현재 영국의 Lytag과 일본의 오오무라 발전소에서 가동 중인 Dwight-Lloyd식 소성로를 제외하고는 pilot 단계까지만 개발되었거나 현재는 생산 중단 상태이다.

2.1. Dwight-Lloyd 식 소성로

Fig. 2는 영국의 Lytag사와 일본의 오오무라 발전소에서 현재 가동 중인 D.L.식 소성로 시스템²⁾에 대한 공정도이다. 원료인 석탄회는 점결체와 물과 함께 적당한 비로 혼합하여 pelletizer로 보내져 green pellet으로 제조된다. 소성에 적합한 미연탄소의 함량은 4~5% 정도가 적당한 것으로 알려져 있다. 소성로는 이동 스톡카 방식으로 스톡카 바닥과 양옆은 5~15cm 두께로 소성된 pellet을 깔아 소성온도 유지 및 grate를 보호하도록 조업되고 있다. 소성로에 공급된 green pellet은 이동 스톡카 위에서 200~300의 하향 열풍에 의해서 건조되어 LPG 분탄 버너에 의하여 가열되는 소성 영역을 지나게 된다. 소성온도는 미연탄소 함량에 따라 다르지

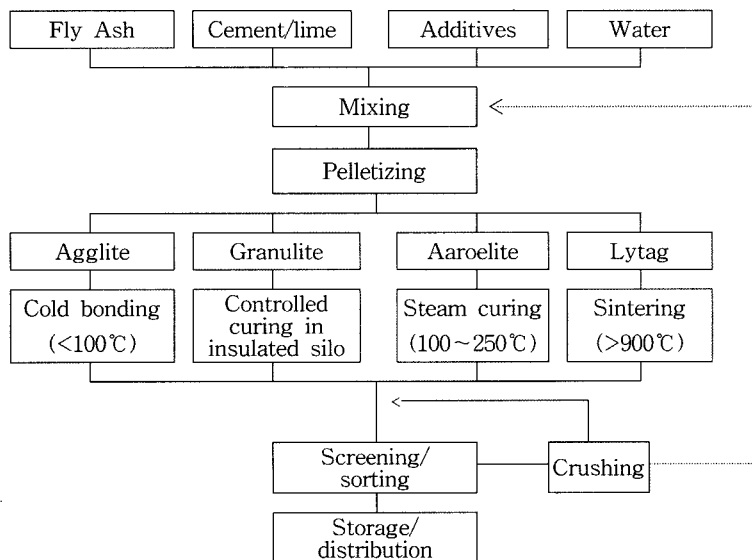


Fig. 1. Flow sheet of artificial aggregate production from coal fly ash¹⁾.

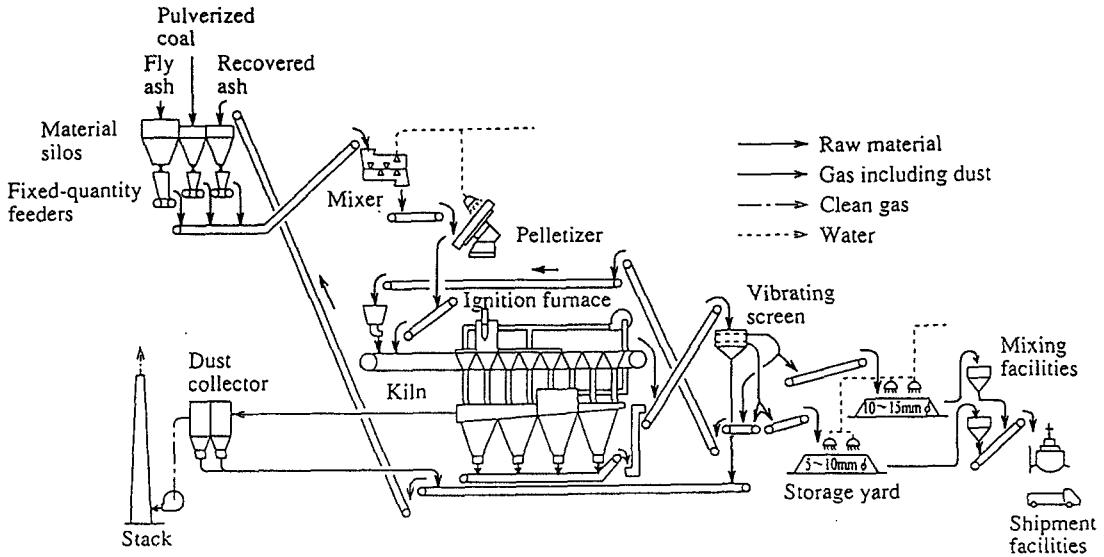


Fig. 2. Flow Chart of Dwight-Lloyd kiln system²⁾.

만 950~1150°C 정도인 것으로 알려져 있다. 소결이 끝난 석탄회는 150°C 이하로 냉각된 후 해쇄기를 거쳐 크기별로 분급되어 상품화된다. 일본 오오무라 발전소에서는 FA light라는 상품명으로 시판하고 있다. D.L.형 소성로는 고온에서 구동 부분이 많아 운전 보수비가 높고 노내의 기밀 유지가 어려워 산소 농도를 조절할 수 없다. 따라서 원료 중의 미연 탄소의 농도가 4~5%로 제한되는 단점을 가진 것으로 알려져 있다. 그러나 현재 가장 많이 상업 생산에 이용되는 노 형식으로 간단하고 신뢰성이 높다. 따라서 일본 오오무라 발전소에서 가동되는 D.L.형 소성로시스템에 대한 자료를 소개하고자 한다.

2.1.1. 오오무라 발전소의 석탄회 골재 생산 설비

오오무라 발전소의 경량골재 제조설비는 보일러에서 배출되는 fly ash(Multi-cyclone ash)를 원료로 하여, 탄재(炭材) 및 첨가제(bentonite)를 섞어 green pellet을 성형한 다음, Dwight-Lloyd식 소성로에서 열풍발생장치(미분탄연소 버너 2기)에 의해 예열, 착화하고, 함유된 탄분 및 fly-ash 중의 미연탄소의 연소에 의해 소결, 고화시켜 경량골재를 제조한다. Table 1은 Oomura 발전소 경량 골재 제조 설비의 개요를 나타낸 것이고, 생산 공정은 다음과 같다.

① 원료의 입수

Multi-cyclone의 각 hopper로부터 원료 저장 사일로

Table 1. Description of Oomura Facilities

	Description
Capacity	16.2 Ton/Hr(Wet), 12 Ton/Hr(Dry)
Raw material	Fly Ash(MC ash), Coal, Bentonite(Binder)
Pelletizer	Pan Pelletizer
Kiln type	Dwight-Lloyd
Product	粗骨材 「エフエイライト」

까지 압축공기로 수송된다.

② 미분탄의 입수

발전소의 미분탄기로부터 배출되어 사일로에 저장된 미분탄을 미분탄 사일로에 압축공기로 수송한다.

③ 원료공급

원료 fly ash (M.C. 회수 분진) 및 연료탄은 각 사일로로부터 정량공급기로 소정의 배합비로 정량 배출하여, 원료공급 바켓 엘리베이터로 혼합가습설비에 운송된다.

④ 혼합, 가습설비

수평형 강제교반식 믹서로 원료를 균일하게 혼합하고 동시에 물을 첨가하여 약 20%의 수분이 되도록 가습한다.

⑤ 조립설비

혼합, 가습된 원료를 조립기(pan pelletizer: Photo. 1)에 공급하고, 조립에 적합한 양의 물을 첨가하여 적절한 평균입径의 green pellet으로 조립한다. 조립기는 디

스크형으로 팬 직경이 5 m, 높이가 50cm 이고 팬 경사가 52°이다. 3시 방향과 12시 방향에 scrapper가 설치되어 있다.

⑥ Green pellet 입도 선별 및 공급설비

조립기로 조립된 green pellet은 컨베이어에 의하여 회전 roll type 입도 선별기(Photo. 2)에서 적당한 크기의 pellet만 광폭의 컨베이어에 의해 소성로의 grate상에 일정한 두께로 공급된다. 조립이 안 된 미분이나 크기가 커 사용이 어려운 pellet은 다시 조립기로 되돌아간다.

⑦ 소성설비

소성로는 이동 grate의 하부에 열풍을 하향으로 흡인하는 열풍상자가 설치되어 있는 Dwight-Lloyd 식이며, grate에 green pellet을 올려 열풍발생로 내를 통과하는 동안에 강열되어, 착화·소결된다(Photo. 3).

Pellet은 일단 착화하면 열풍상자에 의해 흡인되는 하향 기류에 의해서 자연(自燃)하여 소결이 시작된다. grate의 이동과 함께 pellet의 소결은 상층에서부터 하층으로 이동하며 소결이 완료된다. 이 후단의 grate는 냉각대로서 작용하여, pellet은 냉각되고 배광부에 설치되어 있는 double crusher(Photo. 4)에 의해 해쇄되어 분급설비에 운송된다.

⑧ 제품분급설비

Grate에 의해 운반된 소결 pellet은 분급 스크린에서 15 mm 이상, 15~5 mm, 5 mm 이하로 분급되고, 15~5 mm의 것은 제품으로서 2차 분급기에 의해 15~10 mm, 10~5 mm로 분급된다.

⑨ Grate 설비

Grate의 내열보호와 pellet의 불규질한 소성을 방지하기 위해서, green pellet과 grate 사이에 바닥 벽 및 측벽(약 50 mm, 가변)을 설치한다. 벽 재료는 제품의 분급에 의해서 얻어진 15~5 mm의 것을 damper를 이용하여 일부 분리 저장한 후 grate에 공급한다.

⑩ 製砂 설비

소성설비에서 운반된 소결 pellet은 그 일부 또는 전량을 건식 製砂 시스템에 의해 細骨化 한다.

⑪ 除塵 설비

각 설비에서 발생하는 분진은 multi-cyclone, 전기집진기 및 bag filter에 의해 집진하고, 회수 분진으로서 재이용한다.

⑫ 제품 출하 설비

저장 야드에 산적된 제품은 살수 야드에서 규정의 함수율이 되도록 살수된 후, 15~10 mm(L size), 10~5 mm(S size)의 경량골재 hopper에 저장된다. 출하 시에



Photo 1. Pelletizer.

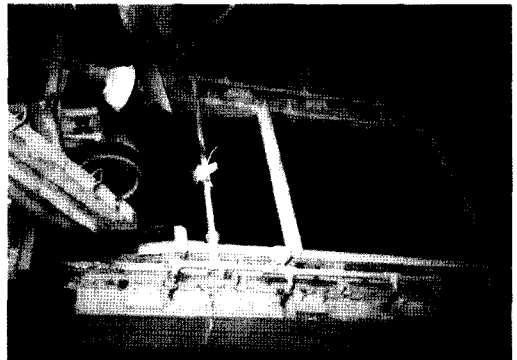


Photo 2. Roll Screen.



Photo 3. Dwight Lloyd Furnace.

는 각각의 hopper에서 규정량을 꺼내어 가습·세정하고, 트럭 및 선적 장치에 의해 출하된다.

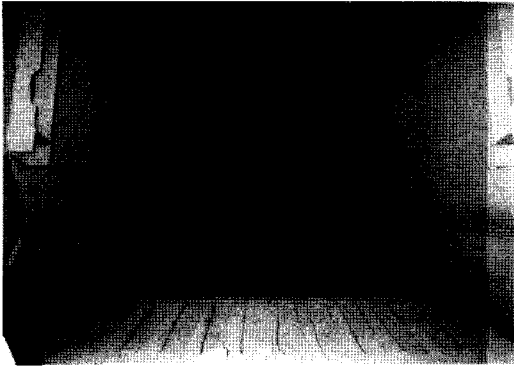


Photo 4. Double Crusher.

Table 2는 오오무라 발전소의 석탄회로부터 경량 골재 생산원가를 나타내었다. 제조원가의 가장 많은 42%를 유지 관리비가 차지하는데 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 고온 부분에서 작동하는 부분이 많아 내화물 및 Grate 보수비가 높기 때문이다. 인건비 비중이 높은 것 역시 부품 교체와 자동화 설비의 미비로 인한 것이다.

2.2. Circular Grate 식 소성로

Fig. 3에 나타난 Circular grate 방식³⁾의 소성로는 D.L. 소성로의 단점을 보완하고자 미쓰비시 중공업과 큐슈대학에서 개발된 방식이다. D.L 소성로는 grate가 직선이

어서 밀폐가 어려운 반면 circular grate 방식의 소성로는 grate가 원형이고, 순환하고 움직이는 하부 구조와 상부 노 본체 사이에 물로 기밀을 유지하도록 설계되어 있다. 따라서 노내의 산소 농도를 조절할 수 있어 원료 중의 탄소 함량이 높은 석탄회도 소성이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

Table 3은 미쓰비시중공업에서 실시한 pilot plant 규모의 소성 장치에 대한 주요 장치들의 사양을 나타낸 것이다. 미쓰비시중공업에서는 이와 같은 소규모 연속식 Plant를 이용하여 6~12톤/일 규모에서 미연탄소 함량이 3.3~9.6%, LPG 소모량이 300~500Nm³/m²h, 산소 농도를 5~13%로 변화시켜 실험한 결과 제조한 골재의 압괴 강도가 낮은 미소성 영역과 강열감량이 1%를 넘어 pellet이 융착을 일으키는 융착 영역 사이에 적정 영역이 있어, 석탄회 중의 미연탄소의 함량이 많은 경우에 노 내의 산소 농도를 낮추어 소성하는 것이 바람직한 것으로 결론지었다. 즉 적정 소성온도 영역은 1150~1200°C 근처에 있고, 적정 온도조절 범위는 50~70°C로 좁다. 소성온도가 이 온도 범위에 있도록 연소 공기 중의 산소 농도를 가감하여 조절한다.

Circular grate 소성로는 움직이는 부분과 노 본체 사이의 기밀 유지를 통하여 원료 석탄회 중의 미연탄소 함량에 대한 제한은 완화되었지만 이 노 역시 이동 스

Table 2. Composition of production cost of light weight aggregate in Oomura power plant (unit : %)

Depreciation	Labor	Energy	Fuel	Maintenance	Others
3	35	9	8	42	3

Table 3. Description of Mitsubishi Circular Grate Kiln

Name	Type	Description
Mixer	Pan Mixer	Dimension : width 546 X length 2,150 mm Power : 5.5 Kw
Pelletizer	Disc Pelletizer	Pan dia. : dia. 1,500Φ X hight 130~250 mm Pan rpm : 11~30, Pan angle : 20 ~60° Power : 1.5 Kw
Roller Screen	Multi Roll	Roller dimension : width 550 X length 1,344 mm Screen opening : 5 mm, 25 mm
Furnace	Circular grate	Grate dimension : Dia. 4,000 X width 300 mm Grate speed : 0.32~1.2 rpm power : 0.2 Kw
	Ignition furnace	Dimension : 400 X 400 X height 1,000 mm Burner : LPG max 4N
Vibrating Screen	Vibrating screen	Screen dimension : width 530 X length 1,100 mm Screen opening : 5 mm, 25 mm

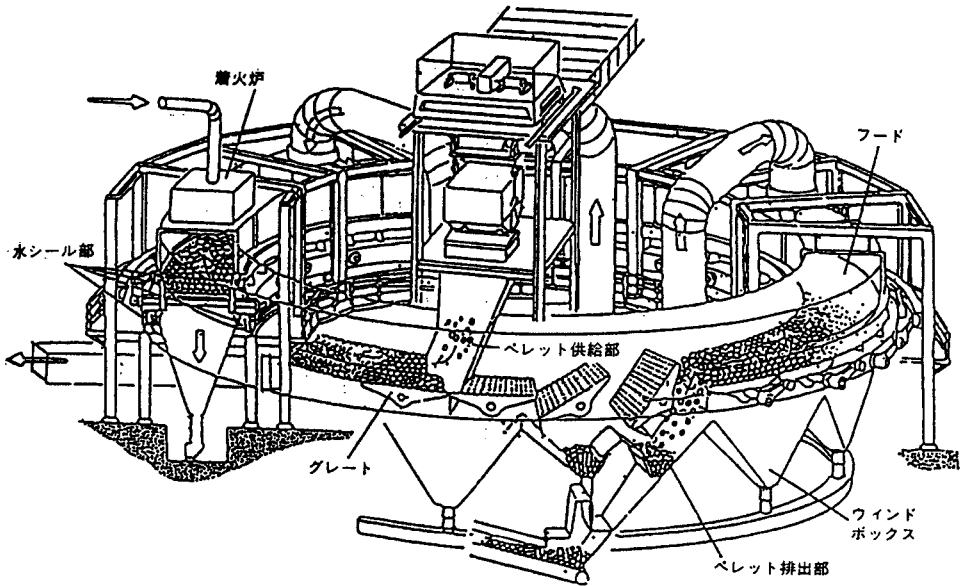


Fig. 3. Circular Grate Kiln³⁾.

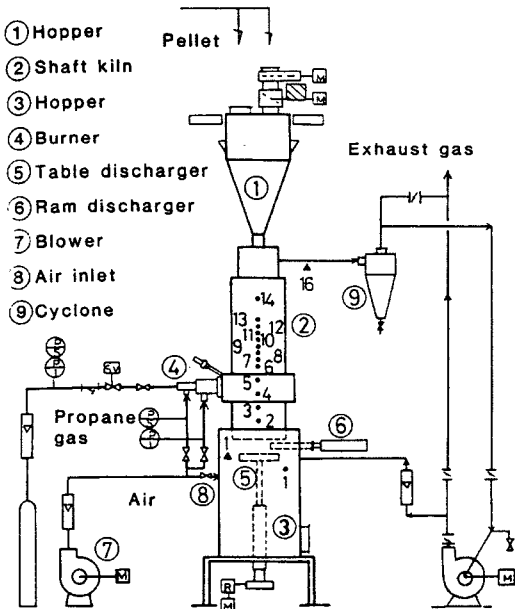


Fig. 4. Shaft Kiln⁴⁻⁶⁾.

토카 방식이기 때문에 고온에서 이동하는 grate 마모가 심하여 운전 보수비가 높은 단점이 있다.

2.3. 직립형 소성로

Fig. 4는 일본의 화학연구소 Kawamura⁴⁻⁶⁾ 등이 개발한 직립형 소성로 시스템에 대한 공정도이다. 앞의 두

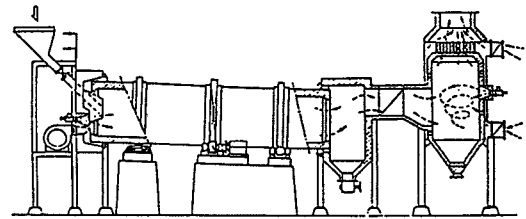


Fig. 5. Rotary Kiln.

방식이 모두 이동 Grate형으로 고온에서 움직이는 부분의 고장이 잦아 운전 보수비가 높고 초기 투자비가 많이 소요되는 단점이 있다. Kawamura 등이 개발한 직립형 소성로는 1톤/일 규모의 소규모 pilot plant 규모로 상부 hopper의 용량은 1 m³이고, 노 본체 상부 직경이 30cm, 하부가 39cm, 높이가 2.5m인 이동상로 형식이다. 석탄회 green pellet을 노에 채우고 LPG로 착화한 후 연료는 차단하고 연소 공기 공급에 의해 연소열로 소성이 이루어진다. 소성이 끝난 pellet은 하부의 배출기⑥에 의해서 제거되고 새로운 green pellet이 위에서 공급된다. 직립형이기 때문에 효율적인 열 회수가 가능하며 pellet의 이동이 중력에 의한 낙하이어서 간단하고 고온 부분에서 움직이는 부분이 없다. 따라서 유지 관리비가 저렴하고 초기 투자비가 저렴한 것으로 알려져 있으나 대형화 할 경우 소성온도 조절이 어려워 pellet간의 응착에 의한 막힘 현상이 발생하여 조업이 어렵다. Kawamura 등은 1000톤/일 규모로 계산할 때

초기 투자비는 로타리 킬른의 약 1/3 정도이고 석탄회 골재 생산 원가는 3000엔/톤 정도라고 발표하였다.

2.4. Rotary Kiln형 소성로

Fig. 5는 rotary kiln형 소성로의 개략도를 나타낸 것인데 rotary kiln은 팽창열을 이용한 팽창형 경량골재 제조에 주로 이용되고 있으나 온도제어가 어렵고 킬른 내에서 분진의 용착으로 인하여 조업성이 좋지 않다. 또한 로체의 회전에 따라 소성 전 green pellet의 마찰에 의한 파괴 등이 수반되어 green pellet의 강도가 낮은 석탄회에 적용하기가 곤란하다.

조업은 원통형 로에 일정경사를 유지하고 하부에서 버너를 이용하여 로의 온도를 일정 온도 까지 유지하고 로체를 회전시키면서 상부에서 green pellet을 장입하면 pellet은 하부로 이동되면서 건조 및 소성이 이루어 진다.

3. 결 론

국내 전력 수급 상 석탄회의 발생량은 계속 증가가 예상되고, 천연 골재의 부존량은 제한되어 있으며 환경 문제 등을 고려할 때 석탄회를 이용한 경량골재 생산은 좋은 해결책이 될 것으로 사료된다. 국내 석탄발전소에서 발생하는 석탄회는 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 로 구성되어 있어서 점토 성분과 비슷하고 자체 미연 탄소를 함유하고 있어 적절한 소성 장치를 고안 할 경우 추가

연료 없이 자체 연소열만으로 소결이 가능할 것으로 사료된다. 본 고에서 소개한 직립형 소성로는 초기 투자비가 적고 효율적인 열관리가 용이한 잇점이 있어서 PLC를 이용한 장치의 자동화 장치로 소성온도를 정밀 조절하고 용착을 방지하는 움직이는 화격자 설치 등 적절한 장치의 개발이 이루어 질 경우 생산비 절감이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Lee, B. Clarke *et al.*, 1993: "Utilization options for coal-use residues" An international overview ACAA 10th Int. Ash Use Symp.
2. FA Light 人工輕量骨材 Catalog, 九州電力産業(株).
3. 藤原邦久, *et al.*, "フライアッシュを原料とする人工輕量骨材制條裝置の關", 三菱重工技報, 29(5), p. 1992.
4. Takeshi OHTAKE, *et al.*, 1984: "Development of Light Weight Aggregate Production Process from Coal Fly Ash with a Shaft Kiln(Part 1)", Ygyo-Kyokai-Shi, 92(8), p. 40.
5. Mitsutaka KAWAMURA, *et al.*, 1986: "Development of Light Weight Aggregate Production Process from Coal Fly Ash with a Shaft Kiln(Part 2)", Ygyo-Kyokai-Shi, 94(9), p. 72.
6. Mitsutaka KAWAMURA, *et al.*, 1986: "Development of Light Weight Aggregate Production Process from Coal Fly Ash with a Shaft Kiln(Part 3)", Ygyo-Kyokai-Shi, 94(10), p. 50.

崔 榮 允

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 본 학회지 13권 2호 참조
-

南 哲 祐

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 본 학회지 13권 2호 참조
-

金 炳 圭

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 본 학회지 13권 2호 참조
-

金 炳 坤



- 1988년 2월 서울산업대학교 재료공학과 공학학사
 - 1994년 2월 연세대학교 세라믹공학과 공학석사
 - 2000년 2월 강원대학교 자원공학과 공학박사
 - 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
-