

火力發電所에서 副産되는 石炭灰의 活用

The Utilization of Coal Lime, a By-Products
Come from the Thermal Power Plant

工學博士 千柄植

漢陽大學校 土木工學科 教授

1. 序 論

火力發電所의 使用燃料中 重油의 生産은 中東 國家들에 偏在되어 있어 需給 및 價格이 不安定한 實情이며, 더욱 最近 페르시아灣 事態로 中東產油國에 戰雲이 감돌고 國際高油價化로 國家經濟가 危機에 直面하고 있다.

이에 反하여 石炭은 地球上의 埋藏資源中 가장 長期間 採掘 可能한 燃料로서 低廉한 價格으로 安定的인 供給이 可能하여 石炭資源을 脫油代替 에너지로 利用하는 世界的 추세이어서 石炭發電의 比重은 점차 增大되고 있다.

전세계 石炭 生産량은 약 28억톤을 넘고 있는 바 이는 세계 1차 에너지 供給量의 약 32%에 해당한다. 우리나라의 경우에도 脫油電源政策에 따라 石炭火力發電所의 新規 建設이 增大되고 있는 바, 10년 후에는 總發電量의 43% 이상을 石炭火力이 담당하여 火力發電의 主宗을 이룰 展望이다.

이에 따른 灰發生도 增加될 展望이어서 灰處理問題는 더욱 加重될 것으로 豫想된다. 灰發生率은 無煙炭이 약 50%, 有煙炭이 약 15%이며 우리나라 총 8개 石炭화력에서 發生되는 양은 현재 약 200만톤/년이나 2001년도에는 500만톤/년 이상이 될 것으로 豫想된다. 일본의 경우는 1986년 현재 400만톤/년이 배출되었으며 2001년에는 약 1,500만톤/년이 될 것으로 推算하고 있다. 이와 같이 石炭회는 火력발전소에서 燃燒되어 副産되는 것 이외에도 製鐵所의 高爐 Slag, 연탄재등이 있으나 이중 高爐 Slag 만이 有效하게 利用되고 있을 뿐이다.

현재 運用중인 灰捨場의 규모는 가동중인 발전소 용량에 훨씬 미달되고 있어 舒川, 嶺東, 三浦等 발전소에서는 현재 大幅 擴張 내지는 增築設計중인데 그 공사비는 엄청나서 km^2 당 100~500억원이 소요된다. 협소한 우리의 국토여건상 수천만평의 방대한 灰捨場을 수용하기는 어려운 형편인 바 石炭회의 大量 活用方案만이 우

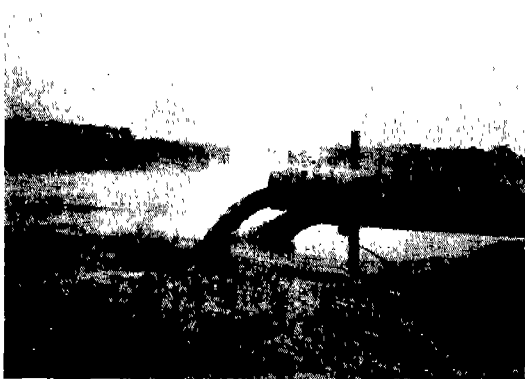
리의 電力需給計劃과 石炭火力立地難을 타개할 수 있는 시급한 관건이라 할 수 있는 바, 國家的次元에서 持續的인 研究開發이 있어야 할 것이다.

다행히 우리나라는 中央高速道路를 비롯, 西海岸高速道路, 京釜高速鐵道, 西·南海岸 國土埋立擴張事業¹⁾ 등 大規模 國土建設工事が 잇달아 있게 되는 등 막대한 土工材 소요가 전망되는 바 材料難 解消面에서나 石炭灰의 大量活用面에서 보아 매우 시기 적절하다고 본다. 더욱 이들 建設工事 位置와 火力發電所 立地(西·南海岸에 偏在되어 있음)가 일치하므로 수송비 절감 면에서도 매우 유리한 여건하에 있다.

筆者 등²⁾의 지금까지의 기초연구에 의하면 석탄회는 상당히 有利한 工學的 特性을 갖고 있어서 앞으로 實用化 研究가 좀 더 진행된다면 석탄회의 대량 활용으로 材料難 解消에도 일익을 담당하고 灰捨場 규모를 대폭 축소시킴으로써 공사비 절감은 물론 廢資源의 再資源化와 함께 環境改善도 가능할 것이다. 더욱 石炭火力에 대한 民怨 및 國家豫算을 줄일 수 있고 폐기된 방대한 灰捨場(사진 1 참조)을 工業用地, 農耕地, 福祉施設 등으로 활용함으로써 국토를 보다 效率的으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 國內外 利用現況 및 研究動向

우리나라 石炭灰 利用現況은 시멘트 혼화재로



〈사진 1〉 Pipe Line에 의해 圧送되는 石炭灰

서 Fly Ash 약 5% 정도가, 운동장 排水處理를 위한 粗骨材로서 또는 輕量骨材로서 약간의 Bottom Ash만이 이용되고 있을 뿐 대부분이 混合灰(FA:BA=80%:20%)로서 발전소 주위 또는 해안 근처에 高價로 축조된 灰捨場에 無用塗로 폐기되고 있다.

우리나라에서는 動力資源研究所³⁾에서 石炭灰의 概括的 活用方案, 그리고 韓電 등^{4), 5)}의 주관으로 콘크리트 混和材, 輕量 建築材 등에 관한 연구가 있었을 뿐 海岸埋立·盛土材 등 대량 활용을 위한 本格的이고 直接的인 研究結果는 아직 없으며, 筆者 등²⁾이 政府의 研究支援을 받아 석탄회에 관한 目的基礎研究를 1988년부터 실시하고 있는 바 이것은 우리나라 석탄회 전체를 대상으로 土工材로서의 활용을 위한 基礎的 研究이다. 이와 같이 석탄회 大量活用に 관한 研究^{6)~11)}는 아직은 初步段階에 있다고 할 수 있으며 實用化를 위해서는 國家的次元에서 보다 심도 깊은 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

한편 외국의 석탄회의 활용을 위한 개발연구^{12)~17)}는 수십년 전부터 꾸준히 진행되어 오고 있는 바, 현재는 각국의 여건에 따라 다소 차이는 있으나 30~50% 이상을 有效하게 活用하고 있다. 用途別로 구분하여 보면 시멘트 分野, 骨材 分野, 建築材料 分野, 土木 分野, 農水産 分野 등으로서 그 예로 영국, 독일, 일본 등에서는 이미 석탄회를 시멘트제조 또는 시멘트 混和材, 輕量骨材·人工骨材·斷熱材 등 建築材料, 海洋汚染防止材, 軟弱地盤安定材, 路盤材, 海岸埋立·盛土材, 複合肥料 등으로서 다양하게 쓰여지고 있는 실정이다.

특히 埋立·盛土材로서의 活用に 관한 直接的인 研究¹⁷⁾로는 일본 金澤大 烏居 Group, 土木研究所 塚田 Group, 清水技術研 堀内 Group의 研究實績 등은 괄목할만하다. 土粒子가 海水中에서의 沈降에 대한 연구는 Oxford대학의 Dr. Sills Group¹⁸⁾과 요코하마대학의 今井 Group¹⁹⁾이 1980년대 초반에 걸쳐 연구를 진행해 오고

있으며, 국내에서는 중앙대 연구실에서 기초적인 연구가 수행되어 오고 있다.

석탄회가 海水中에 投棄되었을 때, 粒子의 沈降特性和 強度變化를 검토함으로써 工業團地計劃·設計를 위한 필수적인 자료가 될 것으로 보는 바, 이를 위한 기초적인 제 Parameter를 찾아내며, 석탄회의 사용으로 인한 海岸 및 土壤汚染 여부와 이에 대한 公害對策을 위한 화학적 검토가 이루어져야 한다.

근래일본의 田口研究所²⁰⁾를 中心으로 海岸汚染防止用 濾過劑로서의 製造可能性에 대한 연구가 수행되어 상당히 기대했던 연구결과를 얻고 있다.

석탄회를 海岸에 投棄하여 埋立·盛土時는 물론, 灰捨場으로의 圧送에 있어서 소요 地盤強度(密度)를 얻기 위한 FA와 BA의 適正 混合比나 埋立·盛土時 補强材를 添加劑와 함께 사용하는 방법, 또는 化學藥液²¹⁾에 의한 支持力增大法과 凍結融解特성을 규명하여 路盤材 또는 凍上防止層材로서의 活用性을 검토하고, 폐기된 灰捨場에 防振目的의 地中壁을 설치 또는 地盤改良에 의한 再活用이 가능할 것이다.

3. 石炭灰의 工學的 特性

筆者 研究室에서 전국 총 8개 화력발전소 중 無煙炭灰로서 嶺東, 寧越, 舒川 그리고 有煙炭灰로서 三川浦, 湖南 등 5개 火力發電所에서 副産되는 飛灰와 底灰 또는 混合灰를 대상으로 수행되고 있는 이들 研究內容²⁾中 一般事項만을 요약, 정리하면 다음과 같다.

1) 物理, 化學分析에 의하면 석탄회는 실리카와 알루미늄이 약 70%를 차지하고, 飛灰의 粒度는 細沙~실트의 범위에 대부분 속하며 粒径이 均等한 편이다. 麗水, 三川浦, 舒川 底灰는 모래질의 良粒度이며 嶺東, 寧越 底灰는 高温에서 영킨 상태로서 間隙이 많은 자갈크기에 해당한다.

2) 석탄회는 일반흙에 비하여 比重 및 單位

體積重量이 작고 포졸란반응에 의한 自硬性 때문에 強度가 長期的으로 漸增하며 뒷채움재로 사용시 土斥의 輕減效果가 예상되고 地반의 支持力이 다소 부족한 곳에서도 사용이 가능할 것으로 보인다. 또한 耐久的結合力 및 摩擦特성을 갖고 있어서 일반흙에 비해 剪斷強度가 크다.

3) 路盤材料 및 海岸의 埋立·盛土材로서의 타당성을 검토하기 위하여 道路工事 標準示方基準과 비교해 보면 凍上防止層 및 그 以下の 材料로서 사용이 가능할 것으로 보인다. CBR試驗結果 嶺東, 寧越底灰가 各各 77%, 137%로서 補助基層工의 基準值인 30% 이상이 되고, 寧越底灰 또한 基層工 基準值인 30% 이상이 된다. 따라서 安定性, 摩耗減量등을 검토하여 사용하면 우수한 재료로 평가될 수 있으며 鋪裝두께를 減少시킬 수 있다.

4) 壓縮指數가 飛灰는 0.06~0.15, 底灰가 0.09~0.13이나 포졸란반응에 의하여 長期強度가 증대되므로 시공 후에는 計算值보다 작을 것으로 보이므로 壓密沈下가 작아져서 壓縮性이 큰 地반에 사용가능할 것으로 보인다.

5) UU試驗結果에 의하면 剪斷抵抗角은 底灰의 경우 34.2°~43.5°로 나타났다. 石炭灰의 다짐試驗結果를 일반흙에 비교하면 대체적으로 MDD는 낮고 OMC는 높으며 比重 및 單位體積重量이 모래에 비해 작으므로 輕量骨材로서의 활용도 가능하다.

6) 動彈性係數試驗結果 일반적으로 花崗土의 Mr曲線은 5개 飛灰들이 이루는 分布範圍에 있거나 근접하며 底灰와 花崗土의 관계도 역시 같다. 전체 飛灰와 底灰들은 拘束壓이 커질수록 각 試料들 간의 Mr값 차이가 커진다. 底灰와 飛灰를 비교하면 拘束壓의 증가에 따른 曲線分布範圍의 증가율에 있어서 底灰가 飛灰보다 크다는 것을 알 수 있다.

7) 自動車走行에 의한 地盤振動試驗에서 상대적인 加速度 레벨의 크기를 비교해 보면 灰捨場의 경우가 自然地盤보다 加速度 레벨이 전체적으로 크며, 거리에 따른 振動減衰效果는 自然

地盤의 경우가 灰捨場의 경우보다 훨씬 크게 나타났다.

위와 같이 석탄회 자체의 여러 가지 工學的 特性 및 석탄회로 이루어진 지반의 動力學的 舉動 特性이 파악되었는 바, 석탄회는 그 透水性, 剪斷特性, CBR 및 壓密特性 등이 同一 粒徑의 一般土에 비해 매우 有利한 바 석탄회의 建設材로서의 活用可能性은 매우 높다 하겠다.

主要構造物의 부족한 支持力增大 또는 遮水效果增大 目的의 地盤改良(시멘트 또는 藥液)에 대하여도 다방면으로 검토되었으며 交通荷重 등 反復荷重을 가하였을 때 생기는 殘留變形 및 彈性變形 그리고 反復載荷後 剪斷強度試驗을 행하여 應力-變形率관계 등을 구하고 여기에 미치는 反復回數와 反復荷重에 대해서도 검토하였다¹⁰⁾ 석탄회를 凍上防止層材로 뿐만 아니라 시멘트 處理로 改良된 路盤材로서의 活用性, 地盤注入에 있어서 가장 큰 문제점인 Hydraulic Fracturing 發生 機構²¹⁾에 대해서도 검토하였다.

석탄회로 造成된 地盤에서의 注入材에 의한 防振對策의 일환으로 地中壁을 설치하여 그 振動狀態를 周波數分析技法에 의해 파악하고 振動의 效果의 吸收를 위해 地中壁의 狀態, 注入材의 종류, 配合設計, 注入方法등을 검토하고 (사진 2), 非破壞試驗인 表面波傳達技法을 이용하여 衝擊條件·衝擊裝置등을 바뀌가면서 심도에 따른 動的物性值를 추정, 改良效果判定 方法을



(사진 2) 灰捨場에서의 地盤振動實驗 光景

모색하였다.

4. 結論 및 提議

石炭火力發電所가 偏在해 있는 西·南海岸 地域에 最近 西海岸高速道路, 西·南海岸國土埋立 擴張工事 등 大規模 國土建設事業으로 인해 막대한 海岸埋立·盛土材가 所要되는 바 엄청난 費用과 無用途로 廢棄되는 石炭灰를 先進 外國처럼 大量 活用함으로써 (火力立地와 海岸埋立位置가 일치하는 등 매우 有利한 여건임) 建設 材料難解消는 물론 國土의 效率의 利用, 火力立地難緩和, 環境改善, 國家豫算節減 등 一石二鳥, 三鳥의 連鎖效果가 있을 것으로 期待되며, 이와 같은 石炭灰의 利用을 增大 또는 擴大시킬 수 있는 筆者의 所見을 감히 提示하여 보면,

- 先進外國(서독, 일본, 영국)과 같은 產·學 協同體制에 의한 研究가 요망되는 바, 이를 위해서는 基本 研究施設을 確保하고 關聯研究實績이 있는 大學을 中心으로 한 產學協同研究가 바람직하다.

- 短期間에 걸친 研究로 實用化 내지는 經濟性만을 追求하지 말고 10年 以上을 내다보는 끊임없는 研究로 우리 실정에 맞는 活用方案을 講究하며,

- 石炭灰 處理 및 活用に 관한 各種 技術事項 등을 政府 建設關係 標準示方書, 指針, 품셈, KS, 環境法 등에 反映하고 官界, 學界, 業界, 言論 등 對外에 弘報하여 利用率을 높이는 方案을 推進토록 하며,

- 外國과 같이 初期에는 未加工(埋立·盛土材, 콘크리트 混和材 등)에 의한 活用方案을 集中研究하고, 다음으로 加工(大量 消費處 確保, 販賣網 定立 등 포함)에 의한 活用方案研究가 바람직하며,

- 灰捨場의 再活용을 위한 計劃的인 灰生産 및 處理對策이 요망되는 바, Pipe Line에 의한 壓送時 所要 地반강도를 얻기 위한 FA와 BA의 適正混合比率, 地盤改良材의 添加, 灰捨場에 投棄

方法 및 다짐방법 등의 대책을 강구하여야 한다.

- 특히, 直接的인 灰發生者는 灰處理 및 活用に 관한 技術開發을 위한 폭넓고 深度 깊은 研究를 主導的으로 하여야 하며 (RND 등 果敢한 研究費 支援 등으로), 確保된 技術을 自体建設工事に 先導入하여 品質의 優秀性을 立證하고 灰利用을 위한 매뉴얼화, 코드화, 그리고 關聯分野에 弘報하는 등 여러가지를 積極的으로 措處해 나가면 外國의 先例에 비추어 보아 上記日

的達成이 어렵지 않을 것으로 確信하는 바이다.

謝辭

끝으로 筆者의 研究에 협조해 주신 韓國電力, 韓國科學財團 및 국내 여러 火力發電所, 특히 수차에 걸쳐 現場실험을 할 수 있도록 편의를 제공해 준 嶺東火力關係者 여러분께 이 자리를 빌어 심심한 감사의 뜻을 전한다.

參考文獻

- (1) 洪性雄, “2000年代의 國土利用과 國土開發”, 國土開發研究院, 1987. 9
- (2) 千柄植, 李秉夏, 吳在應, “火力發電所 産業廢棄物인 石炭灰의 建設材料로서의 活用に 관한 基礎的 研究”, 韓國科學財團 日의 基礎研究(課題番號 880607)
- (3) 韓國動力資源研究所, “石炭灰의 活用方案 研究”, 1983
- (4) 例, 許成五, “Fly Ash 活用に 관한 研究”, 韓電技術研究所, 1974. 12
- (5) 例, 金基豊 외 1인, “石炭灰의 利用擴大方案”, 韓電技術研究所, 1983. 12
- (6) 例, 金修三, 金東律, 中旻浩, “石炭灰의 土質力學的 特性에 관한 實驗的 研究” 大韓土木學會 1987 學術發表概要集
- (7) 例, 千柄植, 曹泳求, “火力發電所에서 副産되는 石炭灰의 工學的 特性”, 大韓土木學會 論文集 8(2), 1988. 6
- (8) 例, 千柄植 외 3인, “産業廢棄物로 發生되는 石炭灰의 土質力學的 特性에 관한 研究”, 大韓土木學會 論文集, 10(2), 1990. 3
- (9) 例, 千柄植 외 3인, “石炭灰의 建設材料로서의 活用に 관한 基礎的 研究(I)~(IV)”, 大韓土木學會 1989, 1990 學術發表會概要集
- (10) 例, 千柄植, 朴興圭, “石炭灰의 反復載荷에 의한 變形特性”, 大韓土木學會 論文集 10(1), 1990. 3
- (11) 例, KOPEC, “湖南火力灰捨場 增築”, KOPEC, 1987. 10
- (12) 例, “Coal Ash Disposal Manual”, National Technical Information Service, 1979. 12

- (13) 例, “FDD Sludge Disposal Manual”, 2nd Ed. Electrical Power Research Institute, 1980. 9
- (14) 例, J. Havukainen, “The Utilization of Compacted Coal Ash in Earth Works”, Proc. of 8th European Conference on SMFE, Vol. 2, Helsinki, May 1983
- (15) 例, Gray, D. H. and Kim, Y. K., “Engineering Properties of Compacted Fly Ash”, J. of SMFE, ASCE, Vol. 98, April 1972
- (16) 例, CEGB, “PFA-A 20th CENTURY BY-PRODUCT”, Electricity Central Generating Board, October 1970
- (17) 例, 塚田幸廣外 4人, “石炭灰を利用した輕量盛立工法に關する研究”, 日本土木學會 第43回年次學術講演會, 1988. 10
- (18) Sills, G. C. and Been, K., “Escape of pore fluid from consolidating sediment”, Soil Mechanics Internal notes, Department of Engineering Science, Oxford University. Box No. 9, SM108/SRC, OUEL 1378, 1981
- (19) Imai, G., Tsuruya, K., Yano, K., “Atreatment of salinity in water content determination of very soft clays”, Soil and Foundation, JSSMFE, Vol. 19 No. 3, 1979
- (20) 例, Yoshio Taguchi, “Characterization of the GLOLIT - Treated Fly Ash”, Taguchitechnical laboratory, 1988
- (21) 例, 森麟, 千柄植, “砂質地盤における割裂發生機構”, 日本土木學會 論文集 III, No. 388, III - 7, 1987. 12