

## 순환유동층반응기의 도전 - 2. 재료산업

### 2.2 세멘트산업

오늘날 세멘트산업은 세계적으로 연간 15억톤을 생산하여 양적으로는 1위의 재료 산업이라 하겠다. 보통 크linker가 화염온도 2200 'C인 로타리킬른에서 생성되고 있기 때문에 상당히 집중된 에너지소비로 인해 큰 어려움을 겪고 있으며 또한 CO2와 NOx의 배출도 심하다. 그러나 대부분의 연료 (80% 이상)는 낮은 온도에서 석회석의 소성에 사용된다. 따라서 여분의 연료를 사용하여 850 'C에서 저온 연소하여 거친 원료물질을 우선 예비소성을 수행하고 있다. 산업국에서는 세멘트 프렌트가 타 산업쓰레기, RDF, 플라스틱, 심지어 타이어들을 처리하는 장소가 되고 있다. 이러한 쓰레기를 예비소성단계에 사용하면 잔재물없는 연소를 보장할 뿐더러 (Rosemann and Grosse, 1995) 세멘트공정에 연료비를 크게 절감시켜준다. 거친 석회석을 예비소성하는 1400 t/d 규모의 CFB-소성로(calcines)가 98 % 이상의 높은 소성도와 적은 NOx 배출을 보이면서 실증되었다(Reh, 1995).

중국은 세계 1위의 세멘트 생산국이고 전기 수요가 매우 큰 국가인데 전기는 주로 고회분함량의 석탄을 사용하여 생산하고 있다. 근래들어 중국에서는 클링커, 전기, 열 세가지를 동시에 생산하는 세멘트 클링커 프렌트가 개발되어오고 있다. 이 세가지 생산모드는 몽골에 위치한 500 t/d clinker 생산프렌트에 성공적으로 적용되어 석탄연료를 크게 절감하였다(Deng, 1993; Li and Kong, 1999). 이 아이디어를 더 연장하여서 시설업체와 세멘트업체가 상호 협력하여서 Fig. 7에 보였듯이 아주 효율적인 세가지 생산을 하나의 공정으로 실현시켰다.

석회석과 고회분탄을 서로 따로 준비하고 파쇄한 후 이 두 가지 흐름을 온라인으로 비율을 조절함으로써 CFB 보일러에서 850 'C이상에서 석회석의 예비소성과 석탄의 연소를 동시에 높은 효율로 수행할 수 있다. 황은 증물질내로 완전히 잡히게 되는데, 증물질은 클링커와 같은 조성이고 시스템내에서 고체의 순환으로 인해 아주 잘 혼합되는 상태를 유지한다. 이 뜨거운 증물질은 작은 로타리킬른으로 직접 배출되는데 여기서는 주로 발열반응조건에서 클링커가 생성되는데 단지 적은 양의 석탄을 연료로 더 공급한다. 킬른에서 나오는 가스는 CFB 보일러로 주입되는 2차공기를 예열하는 데 사용되면서 냉각된다. 오른쪽의 보일러는 전형적인 대류냉각과 먼지포집방법을 사용하고있다. 이 세가지 동시생산 공정은 제각각의 생산 공정들에 비해 낮은 CO2 배출, 낮은 NOx 배출을 갖고 세멘트클링커, 전기, 열을 생산하는 잠재력을 제공한다. 세멘트를 만들때 들어가는 점토질대신 시스템에서 나오는 회

분을 사용함으로써 회분을 유용하게 처리할 수 있다. 투자비 역시 별도로 두 개의 프렌트를 건설하는 것보다 적을 것이며 열이용효율도 매우 높다. 이 기술은 중국, 인도, 구소련 처럼 석탄의 질이 낮고 전기배전망이 완전하지 않고, 세멘트와 전기 수요가 높은 개발도상국에서 아주 중요해질 수 있다.

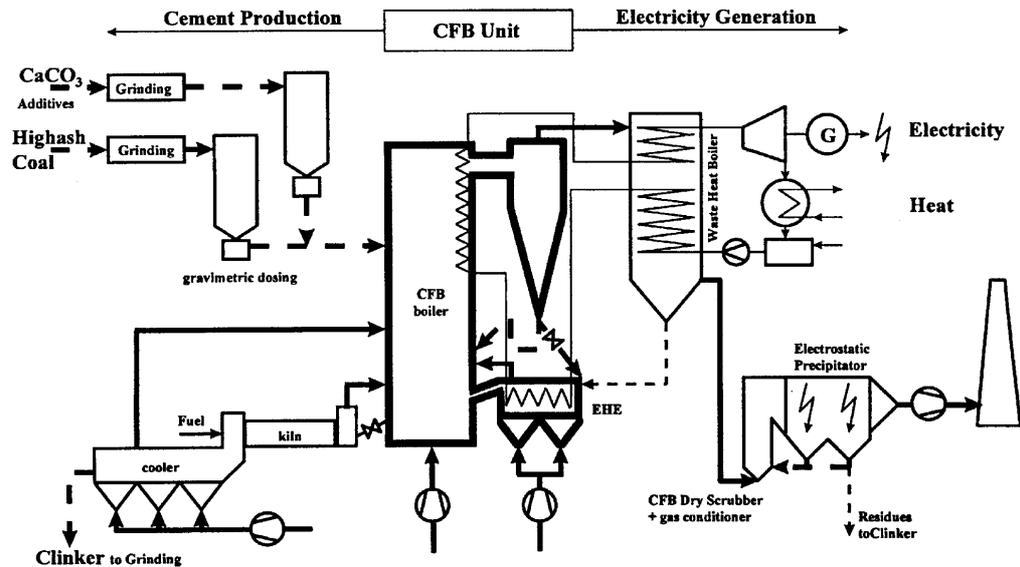


Fig. 7. Trigenation of cement, electricity and heat from high ash coal using CFB-technology.

### 2.3 철강산업

환경오염에 대한 인식과 규제가 증가하여, 특히 ‘온실가스’에 대한 논의가 급증하면서 CO2 배출을 감소하고자 하는 노력이 새로이 개발되는 진보적인 제철공정에서도 이루어지고 있다. 엄청난 양의 에너지와 탄소를 소비하는 철강산업에서는 CO2를 연간 약 2500만톤을 배출하고 있는 것이다. 전형적인 철강제조공정은 화염용광로(blast furnace)와 산소를 주입하는 전환로(oxygen blown converter)를 사용하는 공정으로 세계적으로 60% 이상 차지하고 있다. 이 공정에서는 철광석원료를 우선 소성 등을 통하여 응집시키고 석탄에서 코우크스를 만들고 있다. 두가지 모두 높은 투자비가 필요하고 배출되는 오염가스에 대한 규제는 점점 더 복잡해지고 있다.

한편 철강생산에 전기로(EAF, electric arc furnace)가 점점 더 많이 사용되고 있는데 이는 약 70%까지 재활용되는 물질을 보다 쉽게 사용할 수 있기 때문이다. 철광석으로부터 우선 연탄처럼 압축된형태(HBI) 혹은 펠릿형태로서 환원철(DRI, direct reduced iron)을 만들어야 한다. 즉 응집된 철광석이 CO+H2 가스나 값싼

메탄에서 만든 H<sub>2</sub> 가스로 환원되면서 이 중간생성물이 만들어진다. 광산에서 철광석의 가루가 점점 더 많이 생산되는 관계로 철광석가루로부터 직접 DRI를 생성하는 것을 더 부가적으로 복돋고 있다. 이러한 경향은 지난 세기들을 거치면서 더 두드러져왔다(Schlebusch, 1997; Weber et al., 1994). 1970년대 중반에 ELRED-공정의 개발을 기초로하여 LURGI는 CFB 반응기에서 석탄가스 혹은 수소(Circored 공정)를 환원제로 하여 철광석가루를 직접 환원시키는 공정을 처음으로 개발하여 산업화하였다.

Trinidad에 철광석가루와 메탄을 개질하여 얻어지는 수소를 주입하여 환원철 500,000 t/yr를 생산하는 Circored 공정이 처음으로 조업되었는데, 그 개략도를 Fig. 8에 보였다. 왼쪽의 CFB 가열기 유니트에서는 주된 환원과정에서 소모되는 열부하를 부분적으로 상쇄하기 위하여 철광석을 예열한다. 주 환원과정은 역시 온도 630 °C, 4기압 조건의 CFB 반응기에서 수행되며, 마지막으로 65에서 93%의 금속화환원은 단계적으로 이루어진 기포유동층에서 2-4 시간의 긴 체류시간을 갖고 수행된다. 그리고 아주 미세한 철입자들은 급속가열되면서 연탄화된다. 이러한 저온 환원공정은 조절해야 할 가스오염물의 배출이 없다. 따라서 Circored 공정은 상이한 반응기들을 적절하게 설계한 하나의 뛰어난 복합공정개념이라 하겠다.

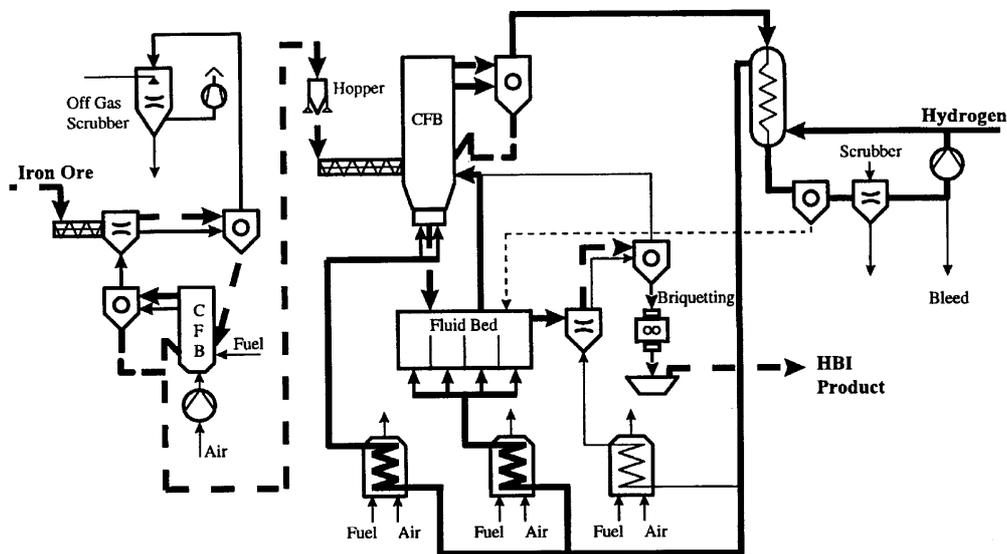


Fig. 8. Iron ore reduction with hydrogen in Circored®-process (LURGI).

## 2.4 FCC-cracking과 석유화학

기름산업은 오늘날 세계적으로 연간 33억톤의 원유를 취급하고 있다. 서두에서 언

급한바대로 CFB 상승관반응기의 기술은 fluid catalytic cracking에서 널리 인정되고 있다(Yu, 1994). CFB 상승관은 또한 주로 기름과 가스산업에서 많은 촉매반응에 사용되기 시작했다. 꽤나 여러가지 불균일 촉매유기반응들에 응용 잠재력이 있고 고려중에 있다(Berruti et al., 1995).

원치않는 부생성물을 피하고 높은 선택도와 전환율을 얻기위해서 가스와 고체촉매의 체류시간을 짧게주며 아주 미세하게 조절하는 것이 유리하다. 오늘날 상승관에서 사용되듯이 일 초 정도의 가스 체류시간과 상승관 벽 부근에서 이미 탄소가 침적된 촉매들이 역혼합(backmixing)되는 것은 반응의 선택도에 매우 불리하게 작용한다.

따라서 석유산업분야에서의 반응기 개발은 서서히 병류 downer cracker쪽으로 돌기시작했다. 이 반응기형태는 역혼합이 없는 이상적인 관형반응기로 높은 전환율과 선택도를 가져다 줄 것이다. 다량의 촉매를 재순환시켜야 하며 촉매에 달라붙은 탄소를 태워버려서 다시 재생시켜야 하므로 Fig. 9의 예에 보인것 처럼 결국 downer와 riser 반응기가 각각 적절한 기-고체 분리장치를 갖고 조합을 이루어야 할 것이다.

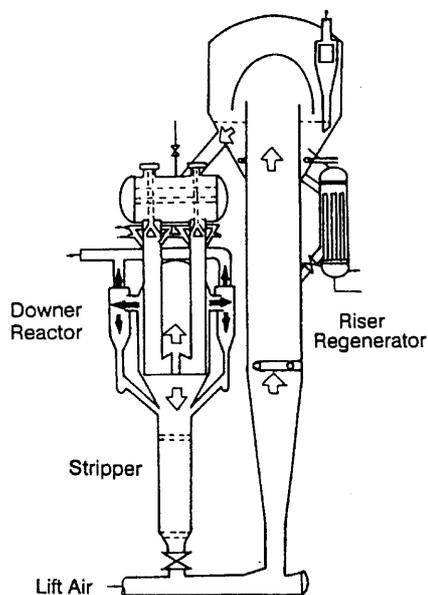


Fig. 9. A proposed future FCC design with downer reactor (Murphy, 1992).

대규모의 downer 반응기에서 유체역학을 살펴보면, 반경방향으로의 고체농도는 좀 더 균일하다고 제시되고 있으며, 산업용 프렌트에서는  $G_s > 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  정도로 꽤 높은 고체프럭스가 요구되어 촉매들이 반응가스흐름으로 반경방향으로 빠르고도 효율적으로 분산되도록 하고 있다(Wei et al., 1994; Meili, 1995; Schiewe, 1997;

Zenklusen and Reh, 1998). 그렇지 못하면, 기-고체 상호작용이 적은 한 가닥의 흐름안에서만 고체들이 운동할 수 있기 때문에 원하는 선택도에 도달하지 못할 수 있다(Roques et al., 1994; Talman and Reh, 1998). 이제 흥미있는 downer 반응기 분야의 개발이 시작된 것이다.

### 3. CFB 개발의 미래

이상의 조사에서 알 수 있는 것은 점차 강화되는 환경규제와 경제정치적인 영향으로 인하여 일차에너지소비를 감축하고 원자재물질을 보다 더 효율적으로 이용하려는 요구로 인해 지난 2세기동안 기본적인 생산공정에 상당한 구조적 변화를 가져왔다는 것이다. 장차 세계적인 인구 증가와 맞물려 물자 및 에너지의 소비 역시 증가할 것이므로 투자비 적고 좀 더 효율적이고 깨끗한 공정이 요구될 것이다.

CFB의 연구개발은 이러한 요구에 더욱 다가가야만 한다. 미세입자를 갖는 기-고체 흐름 반응기에서 riser와 함께 downer도 점점 그 이용이 더 확대되고 있는데, 한편으로 이는 다른 화학반응기 시스템처럼 온도, 압력, 물질에 관한 공정의 요구에 폭넓게 부응할 수 있는 공정의 핵심으로 간주되어야 한다. 다른 한편으로는 CFB 프렌트는 반응구역, 분리 그리고 고체의 재순환 시스템이 모두 묶여져 있는 전체적인 시스템으로 취급되어야 할 것이다. 이들은 적절하게 설계되고 조절되어야 한다 (Steiner, 1997; Hugi, 1998).

CFB 반응기의 scale-up은 수치적인 계산이나 실험적인 방법으로는 취급할 수 없는 규모범위에서 계속 이루어지고 있다. 특히 순환이 큰 CFB에서 지배적으로 나타나는 집합적으로 가속되거나 감속되는 기고체 흐름의 조건에서 scale-up이 수행되고 있다(Reh, 1998). 에너지 최소화 multi-scale 방법(Li and Kwauk, 1994)을 사용하여 집합적인 흐름을 모델링하는 기본적인 접근방법이 제시되었으나 아직 까지 이렇게 꽤나 복잡한 흐름조건을 묘사하는데는 많은 부분들에서 답이 제시되어야 한다. 수치계산유체역학(CFD) 연구자들과 프렌트 운전자들 사이의 밀접한 공동 협력들이 역시 다른 부분들에서 필요하다.

개선의 열쇠는 주로 CFB 반응기의 산업체 사용자들의 손에 있다고 하겠다. 그들은 우선 대담하게 좀 더 자세한 프렌트 측정 데이터를 개방해야한다. 둘째로 그들은 단기적 안목에서 공정의 후처리나 현공정의 최적화에 관심을 두는 것 보다는 좀 더 장기적인 공정혁신을 수행함으로써 스스로 장래의 요구에 부응할 수 있도록 해야할 것이다.

새로운 CFB의 응용을 성공적으로 잡아내기 위해서는, 학계와 산업계에서 여러 다

른 분야에서 전문가들이 상호 유연하게 장기적인 안목으로 협력하는 하나의 시스템 접근 방법이 필요하다. 이를 통하여 장차 CFB 기술의 도전은 충분히 탐구될 수 있다.

## References

- Anon (1998) Clean coal combustion technologies. EdF-brochure at Power-Gen 98 Conference, Milan.
- Anon (1997) Modern power systems, Review.
- Anthony, E. J. (1995). *Progress in Energy Combustion Science*, 21, 239–268.
- Balzer, G., Simonin, O., Boelle, A., & Lavicville, J. (1997). *Circulating fluidized bed technology*, vol. V (pp. 432–439). In: M. Kwauk, & J. L. Beijing: Science Press.
- Berruti, F., Chaouki, J., Godfroy, L., Pugsley, T. S., & Patience, G. S. (1995). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73(10), 579–601.
- Buck, J., Hornig, H., Eichhorn, R., Krüger, J., & Krone, J. (1996). *Müll und Abfall*, 3, 169–177.
- Cabrera, C.A., & Mott, R.W. (1982). *Proceedings of the third annual fluid catalysis cracking symposium*, Amsterdam, May 26–29, Paper No. 6.
- Chen, J.C. (1996). *Fluidization and fluid particle systems*. A.I.Ch.E. symposium series no. 313, vol. 92.
- Deng, X. (1993). *Fourth international conference on circulating fluidized beds*, Hidden Valley (pp. 472–477). August 1–5 A.I.Ch.E.-Preprint Volume.
- Eitz, A. (1996). Brochure for 75th anniversary of EVT, Stuttgart (pp. 3–15).
- Engstroem, F. (1998). Presentation at A.I.Ch.E. Annual Meeting, Miami Beach, FL, November 15–20.
- Graf, R. (1998). *Proceedings of festive colloquium at retirement of Prof. Reh* (pp. 19–34). Institute of Process Engineering, ETH Zürich, July 3.
- Graf, R. (1995) Proc. EPRI/EPA/DOE 1995 SO<sub>2</sub>-control symposium, Miami, FL, USA, March 28–31.
- Hugi, E., & Reh, L. (1998). *Chemical Engineering Technology*, 21(9) 716–719.
- Jacob, T., Roulet, V., Dutheillet, Y., & Flour, I. (1998). *Presentation at VGB-Congress power plants*, Strassburg, October 13–15. Publication in preparation for VGB-Power Technology.
- Jin, Y. (1996) et al., Chinese Patent ZL 93 2 19972.0.
- Kehl, P., Scharf, K. -F., Scur, P., & Wirthwein, L. (1998). *ZKG International*, 51, 410–426.
- Klutz, H.-J., Klöcker, K.J., & Lambertz, J. (1996). *VGB-Kraftwerkstechnik*, 76(3), 224–229.
- Kühle, K. (1984). *ZKG*, 37, 219–225.
- Lerou, J.J., & Ng, K. M. (1996). *Chemical Engineering Science*, 51(10), 1595–1614.

- Li, J., & Kong, J. (1999) *Proceedings of the fourth world congress recovery recycling, re-integration R'99*, February 2-5. Geneva, in preparation.
- Li, J., & Kwauk, M. (1994) Particle-fluid two-phase flow. Beijing: Metallurgical Press.
- Lucat, P., Morin, J.-X., Smedard, J.-C., Jaud, P., Joos, E., & Masniere, P. (1993). *Proceedings of the 12th international fluidized bed combustion conference 1993*, San Diego, CA (pp. 9-16). New York: ASME. vol. 1.
- Makansi, J. (1997). *Power*, 141(3), 33.
- Meili, R.T. (1995). Ph.D. Thesis ETHZ Nr. 11199, VDI-Fortschrittsberichte 3, No. 417. Dusseldorf: Verlag.
- Murphy, J. R. (1992). *Oil Gas Journal*, May 18, 49-58.
- Nieuwland (1995). Ph.D. Thesis, University Twente.
- Palonen, J., Nieminen, J., & Berg, E. (1998). *Modern Power Systems*, 18(2), 37-41.
- Pruschek, R., Oeljeklaus, G., & Brand, V. (1996). *VGB-Kraftwerkstechnik*, 76(6), 441-448.
- Reh, L. (1986a). In P. Basu, *Circulating fluidized bed technology* (pp. 105-118). Canada: Pergamon Press.
- Reh, L. (1986b). *Chemical Engineering Proceedings*, 21(3), 117-127.
- Reh, L. (1995). *Chemical Engineering Technology*, 18, 75-89.
- Reh, L. (1997). In M. Kwauk, & J. Li, *Circulating fluidized bed technology V* (pp. 1-15). Beijing: Science Press
- Reh, L. (1998). Preprints on 1st European symposium process technology in pharmaceutical and nutritional sciences, PARTEC 98, March 10-12, Nürnberg, (pp. 1-16).
- Reh, L. & Büssing, W. (1999). *Proceedings of the fourth world congress recovery, recycling, re-integration R'99*, February 2-5, Geneva, Switzerland, Vol. II, 81-86.
- Reh, L., Nicolai, R., & Büssing, W. (1997) *The future of fluidized bed combustion*. Technical report, VGB-TW 212e. VGB-Power plant Technology Essen, Germany.
- Rosemann, H., & Grosse, K. (1995). In A. Barrage, & X. Edelmann, *Proceedings international recycling congress R'95 recycling, recovery, re-integration*; February 1-3, Geneva (pp. 92-98). St. Gallen; (EMPA) vol. V ISBN 3-90555-00-X.

- Roques, J., Gautier, T., Pontier, R., Briens, C.L., & Bergougnou, M.A. (1994). In A. A. Avidan, *Circulating fluidized bed technology IV*. (pp. 555-559). New York: A.I.Ch.E.
- Sainz, F. A., Warfe, W. A., Douglas, M. A., Day, R. F., & Anders, R. (1986). In P. Basu, *Circulating fluidized bed technology* (pp. 349-362). Canada: Pergamon Press.
- Sapy, G. (1998). Modern power systems (pp. 19 and 21).
- Schiewe, T. (1997). Ph.D. Thesis, University Erlangen.
- Schlebusch, W. (1997). *MPT International*, 5, 48-56.
- Schröfelbauer, H., Draxler, A., & Tauchnitz, J. (1996). *VGB-Kraftwerkstechnik*, 76(6), 449-456.
- Stahl, K., & Necrgard, M. (1996). *VGB-Kraftwerkstechnik*, 76(4), 327-330.
- Stambler, I. (1997). Gas turbine world, (pp. 30-34).
- Steiner, Ch. (1997). In M. Cache, & J. Li, *Circulating fluidized bed technology V* (pp. 358-368). Beijing: Science Press.
- Talman, J. A., & Reh, L., *Chemical Engineering Journal*, in preparation.
- Taylor, E. S. (1986). In P. Basu, *Circulating fluidized bed technology* (pp. 363-376). Canada: Pergamon Press.
- Thurlow, G. G. (1970). *Journal of the Institute of Fuel*, 43, 473.
- Uchiyama, Y. (1997). *E-coal*, 23, 7.
- Upadhyya, K. (1986). *Journal of metals*, 3, 46-51.
- Weber, P., Hirsch, M., Bresser, W., & Husain, R. (1994). *Proceedings of the international ironmaking conference* (pp. 491-498).
- WEC (1998). *Conclusions and recommendations of 17th world energy council congress*, Houston.
- Wei, F., Wang, Z. -W., Jin, Y., Yu, Z. -Q., & Chen, W. (1994). *Powder Technology*, 81, 25-31.
- Yerushalmi, J. (1986). In P. Basu, *Circulating fluidized bed technology* (pp. 97-104). Canada: Pergamon Press.
- Yu, Z. (1994). In P. Kwauk, *Advances in chemical engineering*, vol. 20 (pp. 39-83). San Diego, CA: Academic Press.
- Zenklusen, F., & Reh, L. (1998). *Chemical Engineering Communications*, in preparation.
- Zhu, J. -X., Yu, Z. -Q., Jin, Y., Grace, J. R., & Issangya, A. (1995). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73(10), 662-677.