

CFD Analysis(전산유체역학 해석)를 통한 Cement 제조공정 분석 및 활용 사례 소개

장 두 희

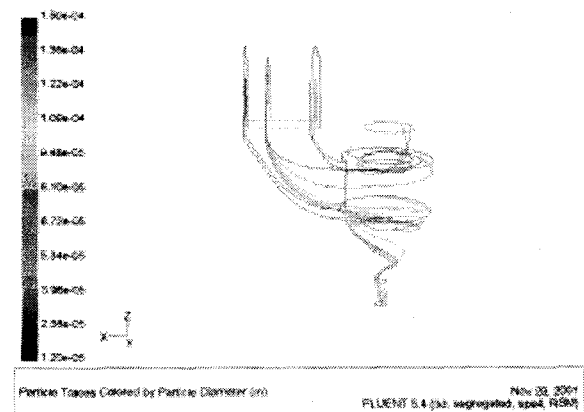
<쌍용양회 동해공장>

1. 배 경

전산유체역학 해석(Computational Fluid Dynamics analysis)방법은 과거 computer hardware 및 software의 제약으로 인하여 항공기 등 일부 첨단고가의 설비 및 공정 해석에 이용되었으나 최근 들어 computer의 기술발전으로 인하여 일반 제조 공정의 해석 및 개발에 널리 이용되고 있다. 최근 들어서는 Cement제조공정의 성능을 해석하고 설비를 개발하는데 실험설비의 비용 최소화, 실험회수 감소 및 효율증가 등의 이유로 전산유체역학해석방법을 이용하고 있다.

본 고에서는 전산유체역학 해석의 개념에 대하여 설명하고 여러분야의 활용사례중 cement 제조공정에서의 활용사례를 소개한다.

- 전산유체역학(computational fluid dynamics) : Computer를 이용, 수치계산을 적용하여 지배 방정식들의 근사해를 얻어 유체운동 및 유동 관련 현상을 해석하는 학문.



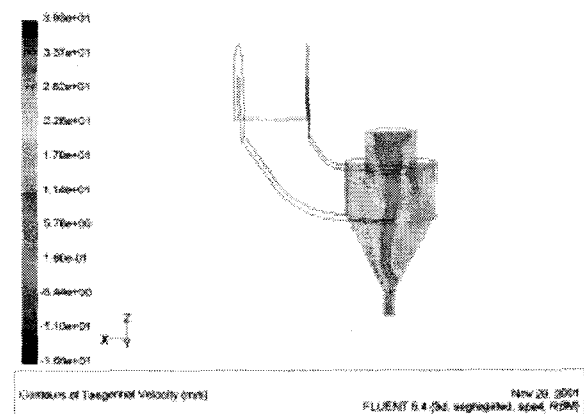
<그림 1> Cyclone 내에서 입자 Size에 따른 입자 궤적

2. 전산유체역학의 개념

2-1. 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics) 이란? ^{1), 2), 3)}

전산유체역학의 정의는 다음과 같으며 <그림 1, 2>에 그 적용 예를 표시한다.

- 유체 : 아무리 작은 힘이라 할지라도 유체 내에 전단응력이 작용되는 한 계속해서 변형하는 물질(액체, 기체상태에 있는 물질)
- 유체동역학(fluid dynamics): 운동하고 있는 유체입자사이에 서로 상호력이 작용될 때 유체에 작용하는 힘과 운동 사이의 관계로부터 유체의 운동을 해석하는 학문분야



<그림 2> Cyclone 내에서 tangential velocity 분포

연구하고자 하는 System이나 장치의 전산 model을 수립하고 이 가상의 모형(model)에 물리적인 유체역학을 적용하여 유체역학적인 output을 표시한다. CFD는 정교한 분석기법이며, 유동뿐만 아니라 열, 물질(흡착 등), 상변화(결빙, 비 등), 화학반응(연소등), 기계적인 이동(impeller 회전 등) 등의 이동현상에 대하여 예측한다.

- 전산유체역학 이용 : Engineering Tool (Computer를 이용한 실험, 설계, Trouble shooting)

2-2 전산유체역학 해석의 효과 ^{1), 2), 3)}

전산유체역학의 효과는 Insight(내부관찰), Foresight(예측) 및 Efficiency(효율성) 등이 있다.

- Insight : 물리적인 모형을 만들기 매우 어려운 장치나 system이 많다. 이 경우 CFD해석은 다른 수단을 통해서 볼 수 없는 system의 내부에서 일어나는 현상을 보여준다. CFD는 설계된 장치나 system의 이해를 증진시키고 가시화 하는 수단을 제공한다.
- Foresight : CFD는 어떠한 조건(환경)하에서 발생하는 현상을 예측하기 때문에 "만약 이런 조건이라면" 이란 의문에 대하여 빠른 해답을 제공한다. 설계된 장치의 성능이 어떤지 그리고 최적의 결과를 얻을 때 까지 여러 변수를 변화시키며 실험할 수 있다. 실제 현실의 model이나 실험을 행하기 전에 대부분을 행할 수 있다. 따라서 CFD의 도움을 통하여 설계를 적정한 상태로 조기에 실시 할 수 있다.
- Efficiency : 조기에 적정한 설계 및 분석을 통하여 설계 시간을 단축할 수 있다. 시간과 투자비가 절감될 수 있다. 장치의 개선시 시행 오차를 최소화 할 수 있다. CFD는 설계나 개발의 cycle을 단축 시킬 수 있다.

이러한 효과에 대하여 실질적인 이익을 표현하면 다음과 같다.

- 설계 초기 단계에 실험보다 적은 시간에 상세

한 유동 해석가능

- Simulation을 통한 실험회수의 감소 및 Study 시간 단축
- 실험에서의 Risk 감소 및 경비 절감 효과
- 현상에 대한 이론적 접근 가능
- 유동장, 압력장, 온도장, 입자거동 등의 가시화

2-3 전산유체역학 Program들의 수치해석 기법 ^{1), 4)}

전산유체역학의 기본적인 수치해석 기법에 대하여 기술하면 다음과 같다.

- 1) 기본방정식(Laminar Flow, Turbulent flow에 대해서는 추가 기법 필요)

열유체역학의 기본방정식은 과거 벌써 Navier-Stokes equation으로 완성되었으며 기본적으로는 물질, Energy, Momentum, Species의 보존법칙에 근거한다.

· Conservation of Mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m$$

· Conservation of Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

· Conservation of Energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_{j,i} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h$$

· Conservation of Species

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i,i}) + S_i$$

- 2) CFD에 사용되는 수치해석 기법들

열유체해석 방정식의 analytic한 일반해는 없으며 이들은 Computer의 수치해석적인 기법에

의한 근사해를 구하여 공정을 해석하며 그 기법에는 유한차분법, 유한체적법, 유한요소법 등이 있다.

▷ 유한차분법 (Finite Difference Method)

편미분 방정식의 형태로 표현되는 지배 방정식을 Taylor Series나 polynomial 형태를 사용하여 근사화 하고, 계산영역을 이산화하여 절점들로 나누어 각 절점에 방정식을 적용하고 대수 방정식을 구성하여 해를 구하는 방법.

▷ 유한체적법 (Finite Volume Method)

적분형 방정식을 사용하며, 계산영역은 작은 volume들(계산 cell)로 나누어, 이들 기본 volume에 적분형 보존 방정식들을 적용하고 편미분 방정식을 상미분 또는 대수 방정식으로 변환하여 해를 구함.

▷ 유한요소법 (Finite Element Method)

적분형 방정식을 사용하며, 계산영역을 element로 나누어 방정식을 적용하고 해를 구함. 구조역학, 고체역학, 진동 등의 분야에서 유용한 수치 해석 tool로 사용되고 있으며, 유체역학 분야에서도 그 적용이 이루어지기 시작함.

2-4 전산유체역학 ackage의 구성³⁾

CFD package의 구성은 Preprocessor, Solver 및 Postprocessor의 3가지의 sub-program으로 구성되어 있다.

1) Preprocessor (전처리기)

가상의 model을 생성, 내부 유동 해석을 위한 Grid(Mesh) 생성 등을 수행하고, boundary condition 및 initial condition을 부여하며, physical property 설정 등 Solving을 위한 예비작업(Matrix의 구성)을 수행한다.

2) Solver

설정된 model에 대한 열 및 유체 해석 방정식의 해를 구하기 위한 반복계산을 수행한다. (Matrix solving)

3) Postprocessor (후처리기)

Solver에서 계산된 값들을 가공하고, 유동장을 알아보기 쉽게 가시화하고 data를 processing 한다.

3. CFD System의 제약사항

상업용 CFD software는 범용성이 뛰어나고 적용 model이 매우 다양하지만 모든 model에서 유용한 output을 기대하기는 어려워 다음과 같은 한계를 가지고 있다.

- 각 수치해석 model은 적용범위에 있어 제한조건이 반드시 존재하고, 경계조건이나 초기조건의 부여도 경우에 따라 매우 제한적이므로 각 별한 주의를 요함
- CFD Simulation과 실험은 항상 상호 보완적
- 물리적인 Data의 한계성
- 분체 특히 dense phase에 대한 해석의 어려움
- 현재 Hardware上 허용한계(convergence time, 격자수) : 복잡한 형상
- Good Engineer를 대체 할 수는 없음(성능에 대한 항목선정이 process에서 가장 중요)

이러한 한계를 극복하기 위하여는 물리현상의 정확한 이해와, 정확한 수치해석 model의 선정이 필요하다. 많은 제약사항으로 인하여 Model- ing이 곤란할 경우에 때로는 전혀 예측하지 않는 것보다는 몇 가지의 가정조건아래에서 오차가 크더라도 무엇인가 예측한 수치가 있으면 개선의 시발점이 된다는데 큰 의미가 있다.

4. 당사 보유 CFD package (FLUENT) 소개

- 현 보유 CFD Program
 - 현재 보유 software는 FVM(유한체적법)을 사용하는 FLUENT(미, FLUENT사) 보유
 - FLUENT는 범용성이 크고, 경제적인 Program으로 인정 받고 있음

- FLUENT

- 미국 Fluent 사의 범용 CFD software
- Numerical method : Finite Volume Method
- 적용범위 : Subsonic, transonic, super sonic & hypersonic flows Laminar, transitional and turbulent flows
- Physical model : Heat transfer, chemical reaction, multiphase flows

5-1. Fluent의 기본 modelling 능력과 그 적용분야 ⁴⁾

<Modeling Capabilities>

- Flows in 2D or 3D geometry(structured or unstructured-adaptive grids)
- Incompressible or compressible flows
- Steady-state or transient analysis
- Inviscid, laminar, and turbulent flows

5. CFD의 활용사례

5-2. Cement 제조공정에서의 활용 분야

공정 (설비)	응 용 분 야	적용의 난이도
공기식 수송 장치 및 집진기	<ul style="list-style-type: none"> - 기류흐름 분석을 통한 분체 적분 개선 - System의 압손 감소 방안 제시 - 입자 궤적 추적을 통한 마모부 개선 - 균일 분산을 통한 집진효율 개선 - 현장 trouble 발생에 따른 고급화된 대책 방안 제시 	용이
Kiln	<ul style="list-style-type: none"> - 연료의 특성에 따른 Flame 변화(온도분포, CO, NOx, Flame 길이변화 등) 추정 - Burner의 특성 및 운전조건에 따른 Flame 변화 추정 - 원료 및 연료 품위에 따른 탈탄산율, 열교환량, 내부 물질흐름 파악 - 기타 현장 trouble 발생에 따른 고급화된 대책 방안 제시 	적용시 기간 및 노력 많이 소요됨
Cooler	<ul style="list-style-type: none"> - 기류흐름 분석을 통한 2,3차공기 온도 증진 및 배기 Gas 온도 감소 - 운전조건에 따른 기류해석 및 공정 안정화 - 현장 trouble 발생에 따른 고급화된 대책 방안 제시 	보통
예열실	<ul style="list-style-type: none"> - Cyclone 성능개선을 위한 개조 방안 제시(포집효율, 압손) - 현장 trouble 발생(적분 및 coating trouble)에 대한 대책 수립 - 기류흐름 분석을 통한 압손 절감 방안 제시 - 현장 trouble 발생에 따른 고급화된 대책 방안 제시 	보통
분급기	<ul style="list-style-type: none"> - 분급효율 개선을 위한 개선 방안 제시 <ul style="list-style-type: none"> · 원료 및 공기의 공급방법과 위치 개선 · 분산판, rotor blade, guide vane의 최적조건 · 입자의 거동 특성 - 현장 trouble 발생에 따른 고급화된 대책 방안 제시 	보통
가소로	<ul style="list-style-type: none"> - 가소로 효율(탈탄산율, 연소효율, 균일분포 및 체류시간 등) 향상을 위한 개선 사항 제시 - 신형 가소로 개발시 적정 설계변수 선정 및 성능 추정 가능 	적용시 기간 및 노력 많이 소요됨

- Newtonian or non-Newtonian flow
- Convective heat transfer, including natural or forced convection
- Coupled conduction/convective heat transfer
- Inertial (stationary) or non-inertial (rotating) reference frame models
- Multiple moving reference frames, including sliding mesh interfaces and mixing planes for rotor/stator interaction modeling
- Chemical species mixing and reaction, including combustion sub-models and surface deposition reaction models, chemical vapor deposition(CVD)
- Nox formation and soot formation in combustion systems
- Arbitrary volumetric sources of heat, mass, momentum, turbulence, and chemical species
- Lagrangian trajectory calculations for a dispersed phase of particles /droplets/bubbles,

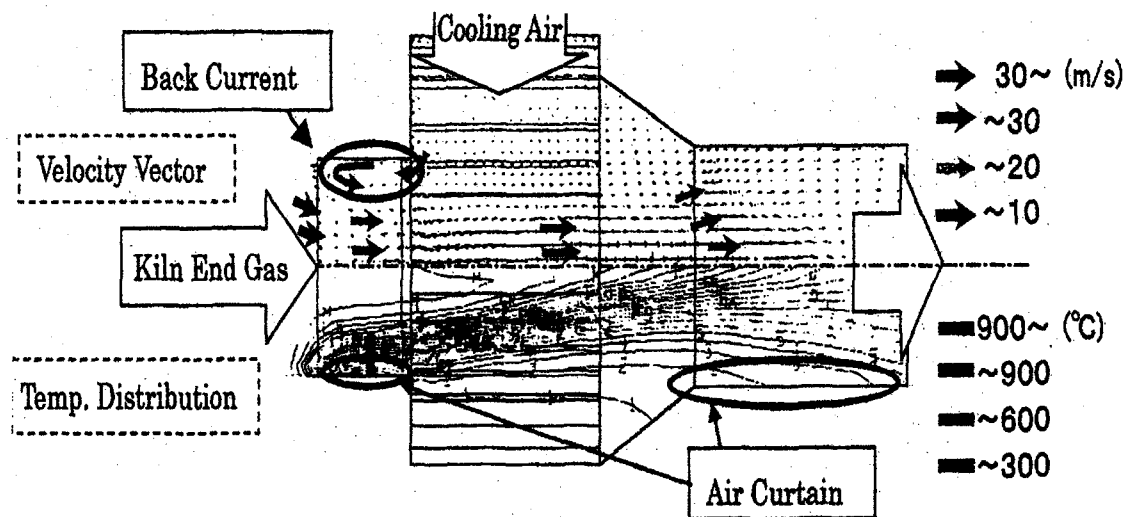
- including coupling with the continuous phase
- Flow through porous media
- One-dimensional fan/heat-exchanger performance models
- Two-phase flows, including cavitations
- Free-surface flows with complex surface shapes

<Applications>

- Process and process equipment applications
- Power generation and oil/gas and environmental applications
- Aerospace and turbo-machinery applications
- Automobile applications
- Heat exchanger applications
- Electronics/HVAC/appliances
- Materials processing applications
- Architectural design and fire research

5-3. 해외 타사의 Cement 제조공정에서의 활용 사례

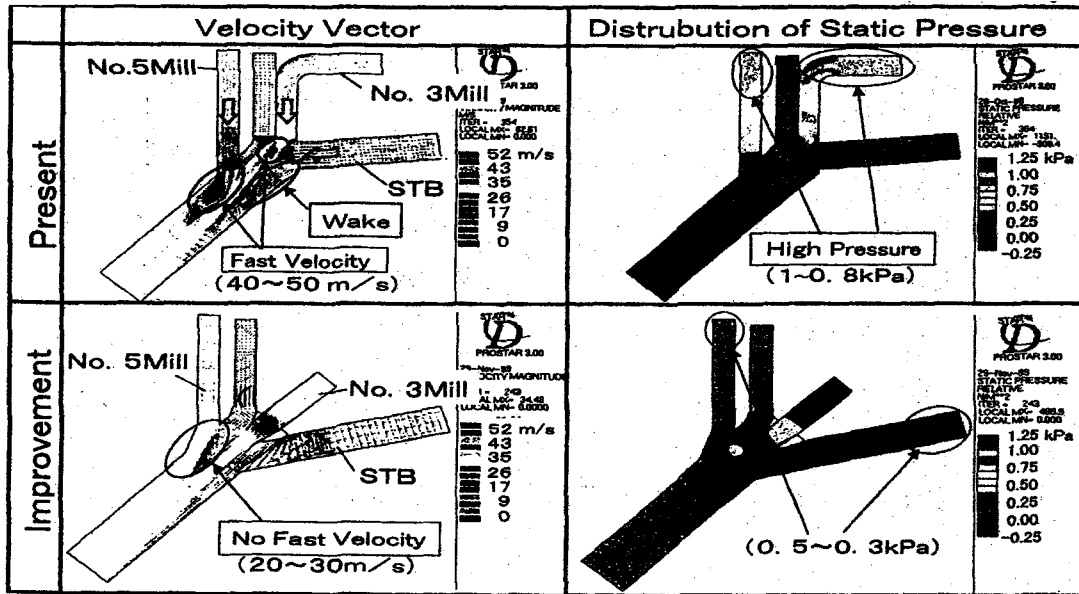
1) CI bypass system용 Probe ⁵⁾



<그림 3> 속도 vector 및 온도 分布 ⁵⁾

- 접선방향으로 유입된 냉풍공기에 의하여 선회류가 형성되고 이에 따라 Probe내벽에 저온부가 형성되어 Probe가 보호되며 CI의 용점이하 온도에 의해 Coating형성이 방지됨

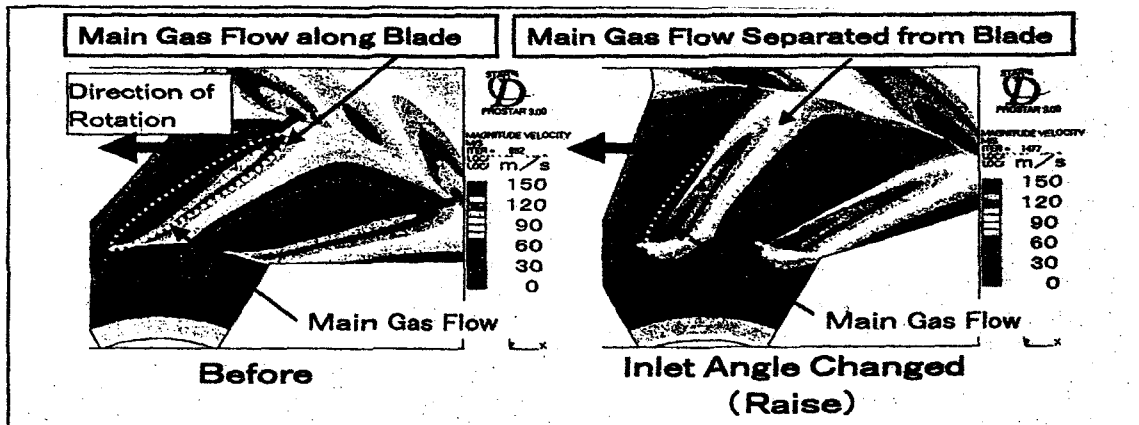
2) Kiln 배기 gas Duct 5)



<그림 4> Duct에서 속도 vector 및 정압 분포 5)

- Kiln 배기 duct의 정압분포와 속도분포로부터 현재 국부적인 고유속부, 부균일한 고 정압부가 존재하는 문제점을 파악하여 합류부에서 균일한 속도분포, 정압분포가 되도록 duct 합류위치를 변경 함으로서 duct부 압력손실을 감소시킴(duct 노후 교체시 공사 시행)

3) Fan blade coating 부착 방지 5)



<그림 5> Fan Rotor에서의 속도 분포 5)

- Kiln IDF blade에 coating이 부착되는 것은 blade뒷면을 따라서 흐르는 빠른 유속의 기류에 의해 미립자가 모여 농도가 높게 되기 때문으로 판단하여 blade입구각을 세우고 blade 간격과 만곡형상을 개조함

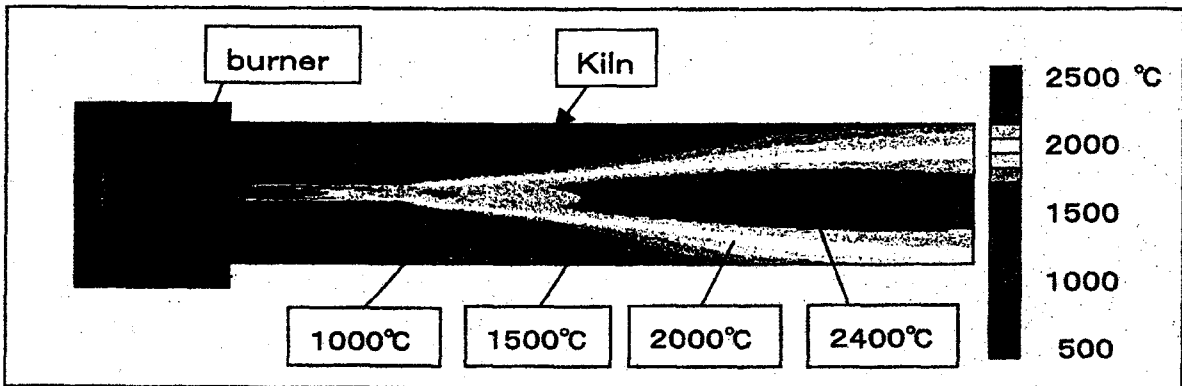
4) Cyclone 해석 ⁷⁾



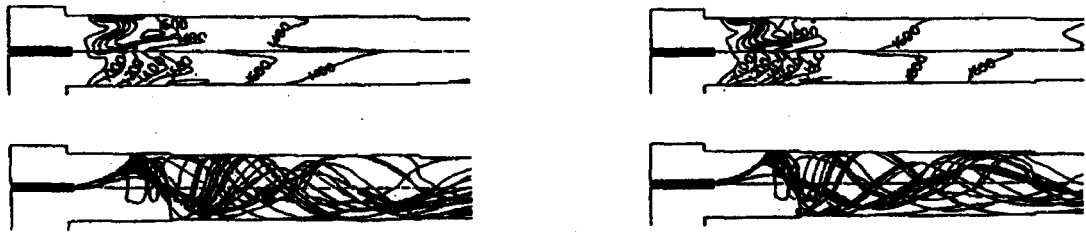
<그림 6> Cyclone의 physical grid 및 속도 vector ⁷⁾

- 최적 cyclone 개발을 위한 3차원 simulation model 개발을 통하여 포집효율 증가와 압력손실 감소의 효과를 얻을 수 있으며 입구부 및 출구부 Duct의 형상에 따른 기류흐름을 분석하여 압력손실 증가 및 coating 부착문제를 해결할 수 있음

5) Kiln의 연소해석 ⁵⁾

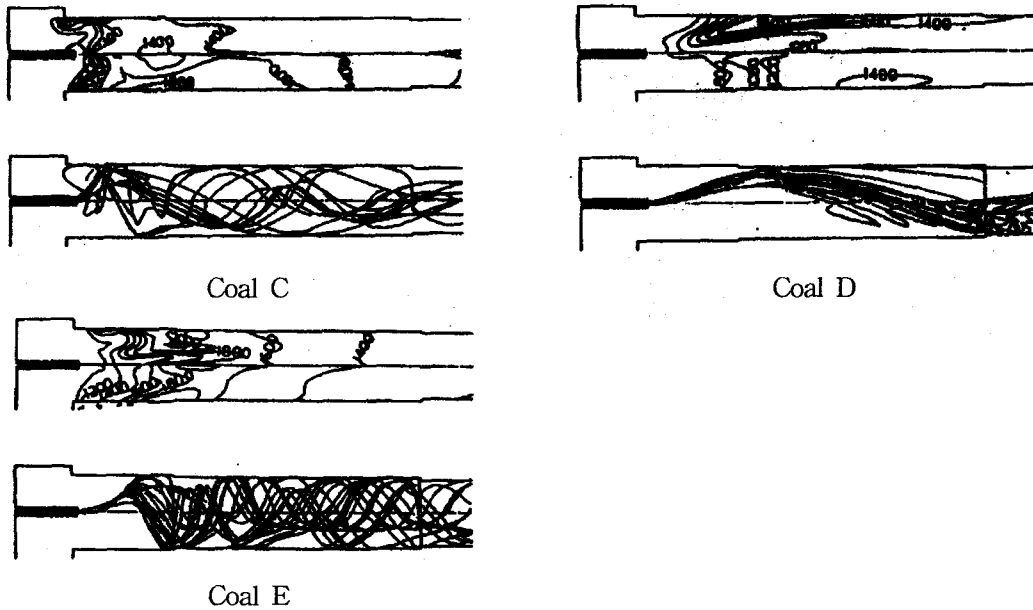


<그림 7> Kiln에서의 온도 분포 ⁵⁾



Coal A

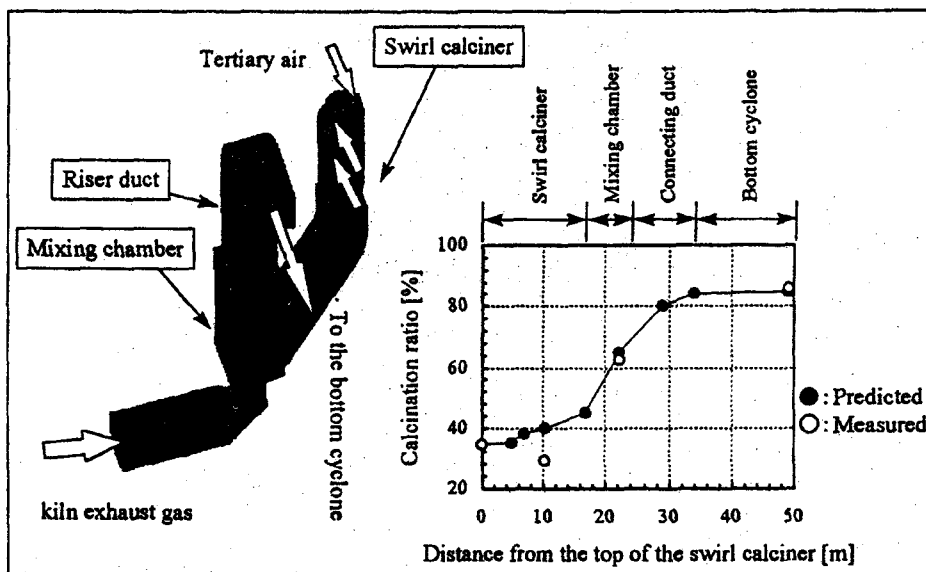
Coal B



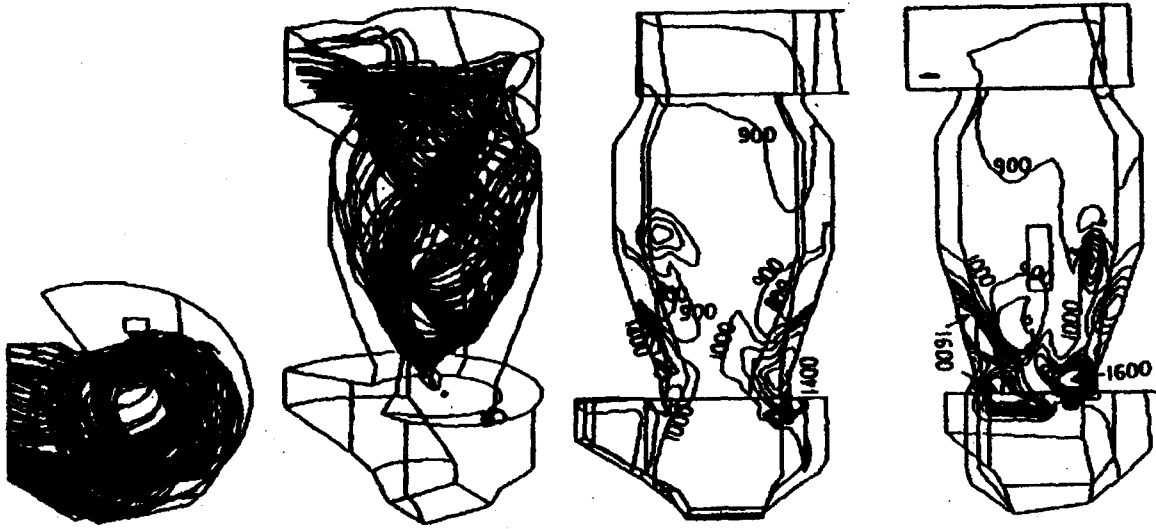
<그림 8> 여러가지 종류의 Coal에 대한 온도분포 및 입자궤적 ⁸⁾

- <그림 7>은 Kiln내 화염온도분포를 표시하고 <그림 8>은 kiln내 Coal 연소시 coal 종류별 온도분포와 입자궤적추적도를 표시함. 미분탄의 착화성(700℃ 등온곡선), Kiln길이에 따른 평균온도 분포 곡선, 미연소율, 화염길이(고온유지시간), 원료의 환원분위기 등의 성능을 평가 ⁸⁾하여 coal(저가탄포함)의 평가, burner 평가, Kiln 운전조건 평가와 개선에 응용함.

6) NSP 가스로 해석 ^{6), 9)}



<그림 9> RSP calciner에서 탈탄산율 ⁶⁾

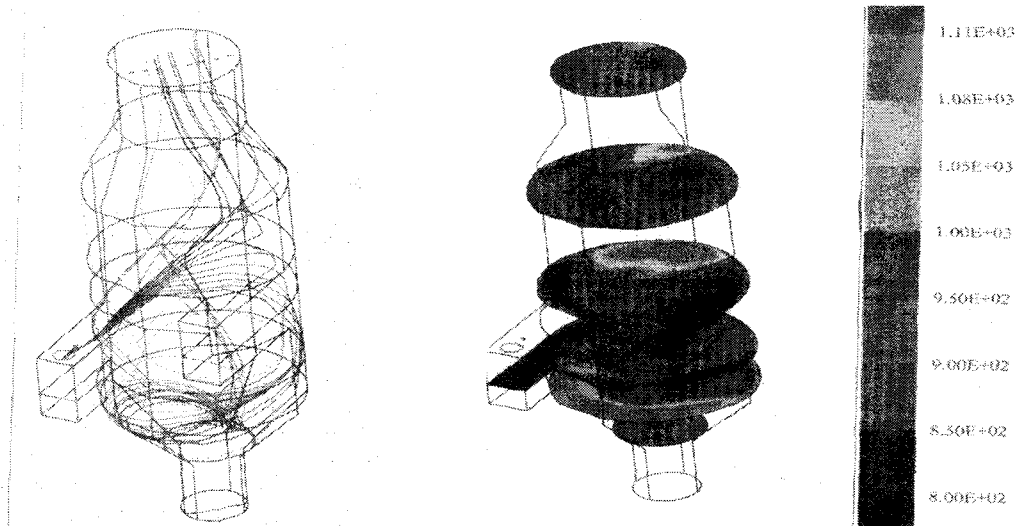


<그림 10> 가소로에서 입자궤적 및 온도분포 ⁹⁾

- <그림 9>는 RSP 가소로에서 탈탄산율을 simulation한 결과와 실측치를 표시. <그림 10>은 CSF 가소로에 대한 온도분포와 원료입자의 궤적을 추적한 결과 표시. 가소로의 성능은 탈탄산율, 국부적인 고온부가 존재하지 않은 균일한 온도분포와 균일한 원료농도분포, coal의 연소율 등으로 표현될 수 있고 이를 개선하기 위하여 CFD system을 이용하여 simulation을 실시함.

5-4. 당사에서서의 활용 사례

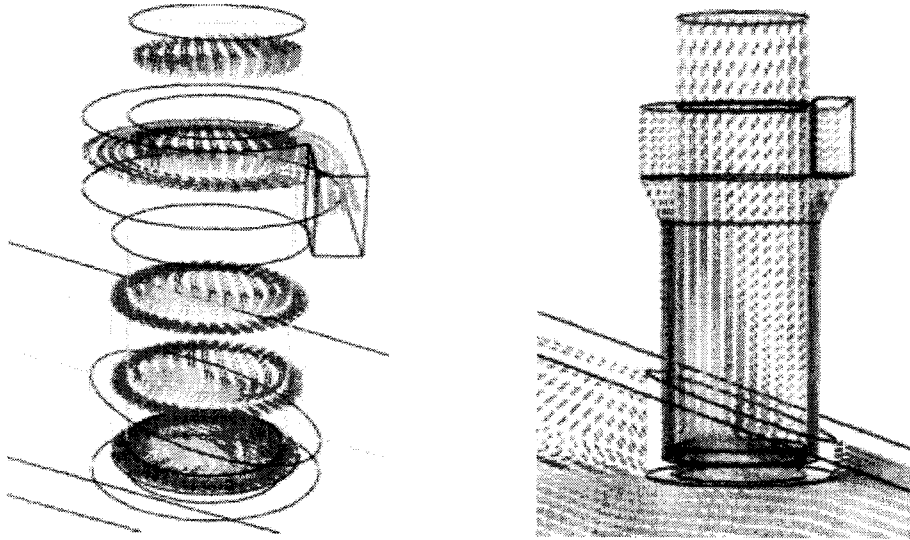
1) NSP 가소로 개발 ¹⁰⁾



<그림 11> 가소로에서의 입자궤적 및 온도분포 ¹⁰⁾

- 1995년 기술연구소 개발하여 영월공장에 pilot 설치한 가소로에서의 coal입자궤적과 온도분포를 보여주며 cold model 및 hot model을 설치하기 전에 simulation한 결과를 바탕으로 최적조건을 선정하고 설계하는데 사용함.

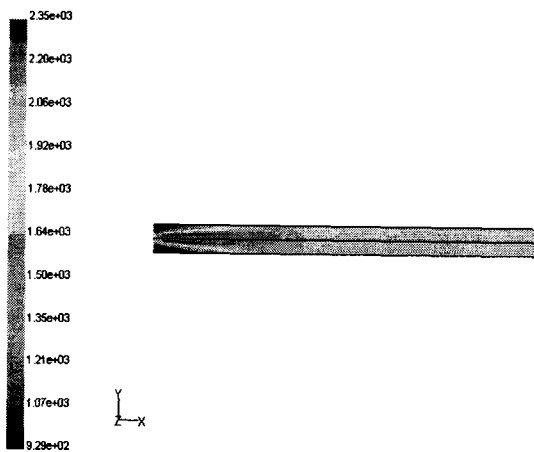
2) Cl bypass system용 Probe ¹¹⁾



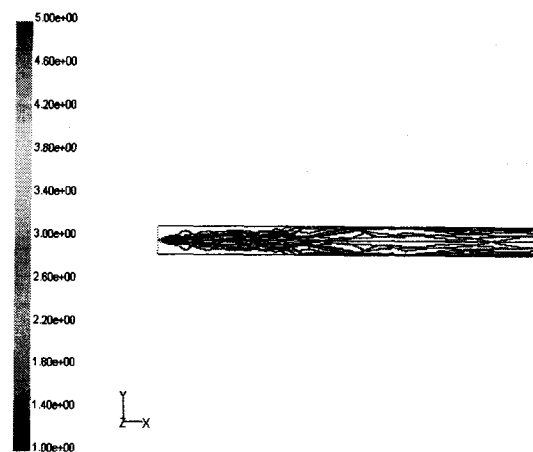
<그림 12> Clbypass용 Probe에서 속도 vector 분포 ¹¹⁾

- 영월공장에 설치된 Cl bypass system(pilot test 설비)용 probe의 유속분포를 보여주며 probe가 고온에서 보호되고 coating이 형성되지 않는 구조를 가져야 함.

3) 무연탄 연소해석 ¹²⁾



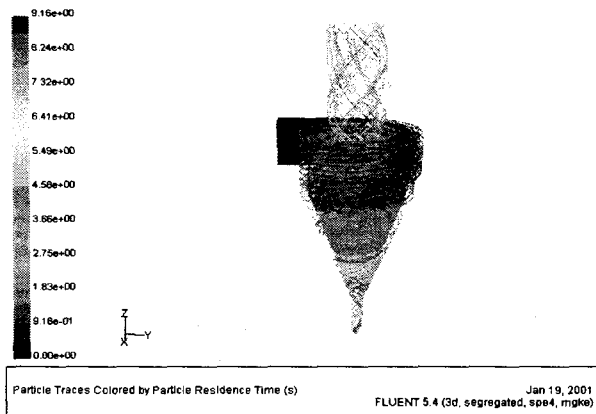
<그림 13> Kiln에서 화염의 온도분포 ¹²⁾



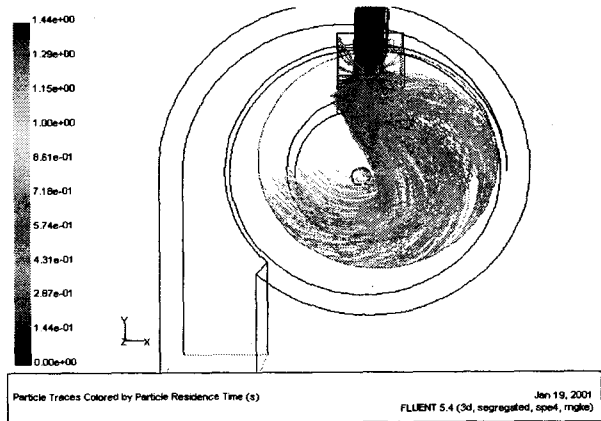
<그림 14> Kiln에서 coal 입자의 궤적 ¹²⁾

- <그림 13, 14>는 각각 무연탄 사용시 Kiln에서 화염온도 분포와 입자궤적을 보여줌 coal 전소시 대비 화염온도 분포를 크게 변화시키지 않는 무연탄 사용량 및 burner 선정에 이용 되었으며 이때 연소조건을 추정한.

4) Cyclone 해석



<그림 15> Cyclone에서 입자의 궤적



<그림 16> Cyclone 분산 box에서 입자의 궤적 및 출구선회기류 분포

- Cyclone의 포집효율 및 압력손실 등 성능을 분석하고 기류흐름을 분석함으로써 Cyclone 적분 현상을 개선하고 열효율을 증진시킬수 있음. Cyclone 출구의 원료분산상태를 분석함으로써 출구에서의 원료흐름 및 Coating 상태를 개선할 수 있음

6. 결 론

공정을 분석하고 개선할 때 사용되는 공정분석 방법은

- 물질 및 열수지 (Mass, Gas, Heat balance)
- Trend에 의한 방법
- Benchmarking에 의한 방법
- 설비의 설계조건 및 이론적 원리에 입각하여 분석

등과 같은 기법들이 사용되고 있다. 이러한 분석 방법 중 전산유체해석 기법은 설계조건 검토 및 정성적, 이론적 접근방법에 가장 적합한 Tool로서 사용될 수 있다.

<참고 문헌>

- 1) 명현국, "전산열유체공학", 문운당, 2000
- 2) Fluent Inc., "What is CFD", Fluent seminar, 1998
- 3) Fluent Inc., "CFD Introduction", Presentations about FLUENT 5, 2000
- 4) Fluent Inc., "FLUENT5 User's Guide", Fluent Inc., 1998

- 5) 三隅正機 外, "流れ問題のシミュレーション適用", セメント製造技術シンポジウム報告集 (2000), pp54~60
- 6) 氏川淳一 外, "熱流体シミュレーション技術のセメント製造プロセスへの適用", セメント製造技術シンポジウム報告集(1999), pp44~51
- 7) 横下俊章 外, "セメント製造プロセスのシミュレーション", セメント製造技術シンポジウム報告集(1992), pp80~85
- 8) 大野猛 外, "ロータリーキルンの微粉炭燃焼解析", セメント製造技術シンポジウム報告集 (1992), pp72~79
- 9) 須藤勘三郎 外, "仮焼爐の微粉炭燃焼解析", セメント製造技術シンポジウム報告集(1993), pp86~93
- 10) 곽홍배 외, "고유 model NSP system 개발 연구", 쌍용연구보고, 1995
- 11) 유재상 외, "소성공정 순환물질 감소에 관한 연구", 쌍용연구보고, 2000
- 12) 박춘근 외, "폐 FRP의 시멘트 연료/원료로의 재활용시 소성공정 및 시멘트 품질에 미치는 영향에 관한 연구", 충남대학교, 1999