

한국에너지공학회(2001년도)
추계 학술발표회 논문집 P25~32

DTF를 이용한 BSU 가스화기 내의 회분 용착 거동에 관한 수치 모델

임병표, 최병철, 김형택
아주대학교 에너지학과

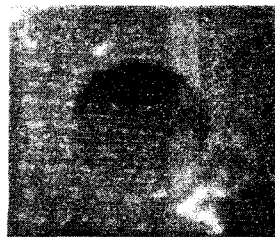
Numerical Model of Ash Deposition Behavior in the Bench Scale Entrained-bed Gasifier with DTF(Drop Tube Furnace)

Byung-Pyo Lim, Byung-Chul Choi, Hyung-Taek Kim
Dept. of Energy Studies, Ajou University

1. 서론

미분탄을 사용하는 분류층 가스화 방식에서는 미립입자의 존재 때문에 입자의 일부가 비말 동반되므로 미분탄내의 회분을 100% 용융슬래크로 처리하기는 불가능하고, 수 % 정도는 생성 석탄가스와 함께 가스화기 밖으로 배출된다. 이때 고온 분위기로 인하여 비산회분은 고형의 재형태보다는 용융상태의 슬래크로 배출되기 쉽다. 따라서 부착성이 비산재보다 훨씬 강한 비산슬래크가 가스화기 출구의 배출관로나 열교환기 튜브에 부착하여 열전달의 감소 및 관로 막힘을 유발하여 운전장애 등을 유발하여 발전소 전체 효율을 저하시키는 결과를 야기한다. 이러한 석탄 회분의 용착현상은 화학적으로는 시간과 온도에 의존하며, 물리적으로는 입자의 모양 및 크기분포, 보일러 온도, 분위기 가스 등의 영향을 받는 매우 복잡한 문제로써 슬래킹 방식을 택하는 대부분의 가스화기 뿐만 아니라, 용융 소각로 등과 같이 회분을 포함하는 고형물질의 용융 시스템에서 항상 발생할 수 있는 문제로 근본적인 해결 대책이 요구되고 있는 실정이다.

일반적으로 사용되는파울링 용착지수들은 회분 중의 알칼리 물질들의 양과 관련이 있으며, 이 용착지수와 보일러의 용착현상은 비례한다 할 수 있다. 그러나, 고등기술원에서 실시한 BSU 실험 결과 용착지수가 높은 Baiduri탄의 경우 관로에 비산슬래크가 용착하는 현상이 관찰되지 않았으나, 용착지수가 낮은 Alaska Usibelli탄의 경우 열교환기의 냉각수를 충분히 공급하여 열교환기 관의 온도를 저하시켜도 비산슬래크가 부착하여 관로를 축소시키는 문제를 발생시켰다. 고등 기술 연구원에서 실제 운전 중인 가스화기에서 대표적으로 극단적인 용착 현상이 발생하는 alaska usibelli 탄과 indonesia baiduri 탄의 용착 사진을 [그림 1]에 나타내어 비교하였다.



(a) Indonesia Baiduri

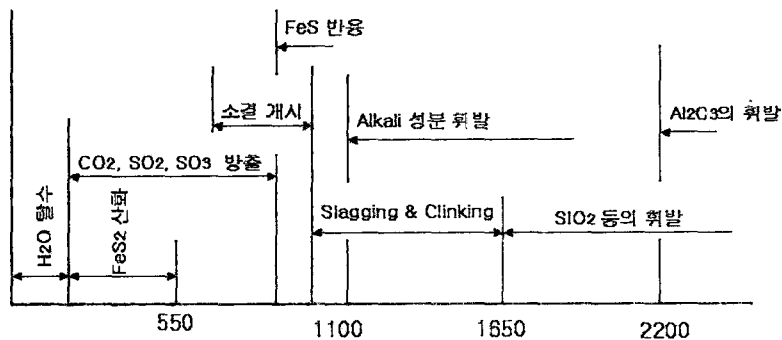


(b) Alaska Usibelli

[그림 1] IAE BSU gasifier에서의 실제 Fouling 사진

스팀을 생성하는 연료내에 존재하는 대다수의 불순물로 많은 종류의 원소가 있지만, 상당량의 농도로 존재하여 연소 운전 중에 문제를 발생시킬 수 있는 것은 단지 14종류인 것으로 알려져 있다. 이러한 물질들은 대부분의 화석 연료내에 존재하는 물질로써 Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Cl, S 등의 주요 mineral 성분들을 들 수 있으며, 슬래깅, 파울링 그리고 부식 (corrosion) 등의 운전상의 문제를 일으킨다. [그림 1]과 같은 냉각부 관로 부착 현상은 파울링 현상으로 규정지을 수 있으며, 예상할 수 있는 메커니즘은 배가스 중의 황산화물과 회분 중의 Na, K, Ca/Cl, F, S 등의 알칼리/휘발성 성분들이 연소 및 가스화 영역에서 휘발화되어서 황산 알칼리가 되고, 다시 이 물질이 구형의 비산재와 결합하여 대류 열전달 구역에 유착되어 운전 장애를 유발하는 것¹⁾으로 유추할 수 있다. 즉 이 구역에서의 초기 유착분의 경우 다른 부분에 비해 몇 배의 알칼리 성분이 존재함을 발견할 수 있으며, 대류 열전달 구역에서의 파울링의 경우 석탄 회분내의 알칼리 및 휘발 성분이 중요한 parameter이라 할 수 있겠다.

[그림 2]는 석탄내에 존재하는 이러한 미네랄 성분들이 온도가 상승함에 따라 일반적으로 변화하게 되는 단계적인 과정을 나타낸 것이다. 이 그림에 의하면 H₂O 성분의 탈수 (Dehydration) 반응이 가장 먼저 일어남을 알 수 있다. 그리고 탄산 성분과 황산 성분이 분해되면서 CO₂와 SO₂가 방출되며 Pyrite(FeS₂)가 산화된다. 이어서, 약 650°C 부근에서 부분적인 용융이 일어나며, 입자들 사이의 반응에 의해 슬래크를 형성하는 액체상은 약 1000°C에서 형성된다. 또한 1100°C 이상에서는 석탄내의 유기물이 분해되어 염소와 황 같은 성분이 HCl 및 H₂S 형태로 되면서 알칼리(Na₂O 또는 K₂O) 성분과 함께 휘발화가 일어난다.



[그림 2] 온도에 따른 석탄내 미네랄의 일반적인 변화

따라서 가스화기 출구에서의 회재의 용착성을 판단하기 위해서는 회재의 특성을 고려한 적절한 평가방법의 사용이 요구되며, 본 연구의 목적은 대부분의 탄에 대하여 대류 열전달 구역의 파울링 경향을 예측할 수 있는, 기존의 정성적인 용착지수와는 다른 속도 개념이 포함된 정량적인 RD식이라는 파울링 용착경향 예측의 한 방법을 제시하는 것에 있다. RD식은 반응기내의 열적 거동 및 유체 흐름까지 고려한 파울링 예측식이라 할 수 있다.

2. 이론

열전달면(heat-transfer surface)에 대한 회분 용착 연구는 오랜 기간 동안 수행이 되어졌으나, 아직도 석탄 연소에 의한 화력 발전에 있어 경제적으로나 운전상으로는 제약으로 남아 있는 실정이다. 연소 운전 중의 용착 과정은 매우 복잡하기 때문에, 회재에 대해서 단진 성분 분석만으로 구하여진 단순성분 용착지수로 용착 문제를 나타내기에는 무리가 따른다²⁾.

그러므로 석탄 회분에 대한 여러 가지 용착지수가 제시되어 왔으나, 이러한 용착지수들은 한계를 지닐 수밖에 없었다. 특히 이러한 용착지수들은 특정탄을 사용하여 얻어진 현장 데이터를 기반으로 용착경향의 예측에 사용되어져 왔으며, 다른 석탄에 대해서는 자료의 내삽 및 외삽 등의 방법들을 사용하였으나, 이러한 방법들은 상당한 오차를 안고 있다. 미국과 유럽의 130여 보일러 operator들에게 설문을 통한 조사로 연구를 수행한 Barret^[3,4]에 의하면, 이러한 용착지수들이 단지 50%의 정확성만 지닌다고 한다.

결국 보일러에서의 파울링 효과를 분석하기 위해서는, 고전적인 회분중의 조성에만 의지하는 정성적인 fouling index들을 상용하기보다는 용착속도(rate of deposition)의 개념이 포함되어 있는 정량적인 예측방법이 필요하게 된다. 냉각중인 보일러 튜브위로의 배가스 중 생성된 회분의 thermal-deposition rate를 정확히 계산하기는 튜브 주위 경계층의 온도 구배 등의 불확실성으로 인해 어려움이 있지만 불가능한 작업은 아니다. 반응의 초기 mechanism이 휘발분(volatile species)의 응축으로 시작되기 때문에 alkali-bonded 파울링 용착을 정량화하기 위한 방법은 배가스 중의 알칼리 성분 농도와 연료 중의 알칼리 성분 수준에 크게 의존하게 된다¹⁾.

$$R_D = \frac{A(M_g - M_s)}{(S_c)^{2/3}(P_r)^{1/3}} (\mu\rho)^{1/2} \left(\frac{v}{D}\right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 μ, ρ, v : 배가스의 점도(viscosity), 밀도(density), 그리고 속도(velocity)

D : 채집구역의 직경

Mg, Ms : 배가스 내의 그리고 퇴적 표면에서의 Na₂SO₄ vapor 농도 (mg/ℓ)

A : 상수(stream-lined gas(충류 가스)=0.5, 난류흐름일수록 더 높다.

식 (1)은 저자가 2000년도 추계 에너지공학회에 제시하였던 것⁵⁾으로, Sodium과 Sulfer의 영향을 고려한 식이다. 물론 이 두 요소가 대류 열전달 영역의 fouling mechanism을 지배한다고 말할 수는 있으나, Alaska Usibelli 탄의 경우는 Subbituminous 석탄으로써 Ca의 영향 또한 결코 무시할 수 없다. 또한 몇몇의 연구 결과¹⁾에서처럼 fouling에 대한 K 성분의 영향 또한 무시할 수 없기에 이러한 나머지 alkali metal 성분과 S, Cl 등의 휘발성분 모두를 고려한 개선된 R_D식(Modified R_D Eqn.)이 요구된다.

R_D식은 보일러 내의 대류 영역에서의 파울링을 고려하기 위한 식이다. 실제의 BSU 가스화기에서 회수된 회분들을 살펴보면 매우 강하게 용융된 것에서부터 분말 형태(powdery)의 것에 이르기까지 넓은 분포를 이루고 있다. 일반적으로 파울링 용착 형성은 용착 성장(deposit growth)과 내구도 발전(strength development), 두 과정의 상호 작용이랄 수 있다. 그러나 strength development의 경우 매우 다양하고 복잡한 회분중의 성분들 구조상의 변화를 수반하기 때문에 본 연구에서 고려하는 R_D식은 오직 용착성장(deposition growth)과정만을 고려한다.

회분의 용착 mechanism은 매우 다양하고 복잡하나 주요 과정은 관성 충돌(inertial impaction)에 의한 과정이다. 특히 충돌되는 입자 중 접촉되는 정도는 회분 입자의 열전달 표면으로의 도달능과 충돌효율(impact efficiency), 그리고 열전달 표면으로의 점착능(ability to stick to the surface)에 의존하게 된다. 본 연구에서는 impact efficiency와 sticking efficiency가 1이라는 가정 하에 R_D식을 유도하였다. 점착 효율(sticking efficiency)이 1이라는 가정은 회분중의 알칼리 휘발성분 모두가 용착에 관여한다는 R_D식으로 표현이 가능하다. 다만 impaction efficiency의 경우 각 반응기의 geometry와 연관된 함수이기에 R_D식의 항에는 고려하지 않음으로써 그 효율이 1임을 표현할 수 있다. Wessel과 Righi⁶⁾의 연구를 추론하면 impact intensity를 혼합 배가스의 속도로 표현 할 수 있게된다. 즉, 배가의 점도와 밀

도, 그리고 속도와 퇴적부의 특성 길이관 항을 조합하게 되면 식 R_D 식의 오른쪽 term $[(\mu\rho)^{1/2} (\frac{v}{D})^{1/2}]$ 인 속도(m/sec) 단위의 impaction intensity를 만들 수 있게된다. 여기에, 혼합 배가스의 열적 거동과 물리적 거동을 표현하는 parameter로 무차원수인 Sc No.와 Pr No.를 첨가하면, 각 탄종별로 배가스 내에서 생성된 회분의 용착 경향을 나타낼 수 있게 된다. 여기에 알칼리 성분 중의 휘발량이 실제 용착과 관련이 있다는 이시훈⁷⁾의 회분중 휘발분율의 개념을 도입하게되면 식 (2)의 새로운 개선된 R_D 식(Modified R_D Eqn.)이 나오게 된다.

$$R_D = \frac{CC^*KA(VM_{ash})S_{coal}}{(S_c)^{2/3}(P_r)^{1/3}} (\mu\rho)^{1/2} (\frac{v}{D})^{1/2} \quad (2)$$

여기서, C = 변환상수 (g/L → mg/m³), 10⁶

C* = 무차원수(Sc Pr)에 대한 보정값

→ 1.5×10⁴ for combustion, 1.5×10⁴ for gasification

K = specific characteristic constant of coal dependent upon combustion/gasification (Kc/Kg)

VM_{Ash} = ASTM 회분중의 휘발분율

S_{coal} = 원탄 중의 회분분율

C*의 값은 R_D 값이 매우 작아지는 것을 방지하기 위해 각 탄종에 대해서 구하여진 무차원수 값들을 조건별로 합산하여 평균을 구한 값이며, K 값의 경우 ASPEN PLUS 시뮬레이션을 통하여 각 탄 1g이 발생시킬 수 있는 배가스의 양(L)을 값을 역수로 구하였다. 즉 K 값의 의미는 특정 원탄에 대해 배가스 1L당 몇 g의 탄이 들어가는지를 알 수 있게된다. 특히 이 K 값에 C와 석탄 중의 회분 분율(S_{coal})과 회분중의 휘발분율(VM_{ash})을 곱하게 되면 특정 원탄이 발생시키는 배가스 1 m³에 대한 휘발성 회분의 농도(mg/m³)를 구할 수 있게된다. 위의 과정을 통해 특정 탄에 대해, 특정 연소 조건에서 일정 면적으로의 회분의 용착 정도를 나타낼 수 있는 R_D 식을 만들 수 있게 되었다. 이 식을 사용함에 있어 분명히 해야할 점은 impaction efficiency를 1로 가정한 것인 만큼, 식의 결과를 원탄의 특정 연소 조건에 대한 용착 정도의 지표(index)로만 사용할 수 있다는 것이다. 만약 반응기에 대한 용착량을 구하고자 한다면, 실험적으로 impaction efficiency를 구하여야 할 것이다.

3. 실험

가) 장치구성

본 실험의 주요 관심사는 IGCC BSU 반응기 상단 수랭식 열교환기의 회분 용착 형성에 의한 파울링현상에 대한 모사와 이에 대한 규명에 있다. 실제 분류층 가스화기의 고온 연소/가스화 조건을 모사할 수 있는 DTF(Drop Tube Furnace)를 사용하여 석탄의 고온특성을 관찰하였다. DTF 장치는 저자가 2000년도 추계 에너지공학회에 제시하였던 논문⁵⁾ 자세히 설명이 되어있으므로 참조하기 바란다.

대상탄의 입경 분포는 74 micron 이하의 입자가 85% (85% less than 74 micron)인 조건이다. 본 실험에서는 연소 반응을 위해 1차 흐름가스와 2차 흐름가스로 공기를 사용하였는데 대상탄의 완전연소를 위하여 공기 과잉율을 20%로 공급하였다. 가스화 반응에서의 실험은 연소반응과 거의 비슷한 방법에 따라 진행하였다. 연소반응과의 차이점은 1,2차 흐름가스로 공기를 사용하지 않고, 1차 흐름의 가스로는 가스화 반응을 위한 산화제인 산소 가스를 그

리고 2차 흐름가스는 반응기 내부로 공기가 유입되어 반응에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 질소가스를 사용하였다. Injector와 Probe등의 장치는 연소반응에서와 마찬가지로 같은 위치를 유지하도록 하였다. 선행 실험의 결과를 기준으로 하여 CO의 양이 가장 많이 생성되는 산소/석탄비의 값 0.72를 가스화 반응의 실험조건으로 채택하였다.

나) 실험

회재의 부착성을 판단하기 위해서는 대상탄의 기본적인 물성치도 중요하나, 근본적으로 석탄의 연소 특성을 구분 짓는 석탄의 등급(rank)또한 인지하여야 할 것이다. 그래서 본 실험에서는 대상탄을 고급탄과 저급탄의 2 group으로 나누어 고급탄으로는 Bituminous 탄 3종 (China Datong, USA Cyprus, Russia Denosovsky)을, 저급탄으로는 Subbituminous 탄 3종 (USA Alaska Usiblli, Indonesia Adaro & Baiduri)을 선정하였다. <표 1>에 대상탄의 기본적인 물성치를 나타내었다.

<표 1> 대상탄의 기본 물성치

| 대상탄 | | Bituminous Coal | | | Subbituminous Coal | | |
|-----------------------------------|-------|-----------------|------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| | | China Datong | USA Cyprus | Russia Denisovsky | USA Alaska Usibelli | Indonesia Adaro | Indonesia Baiduri |
| Proximate Analysis (dry-basis) | V. M. | 33.52 | 46.64 | 25.81 | 48.19 | 48.45 | 53.95 |
| | F. C. | 57.36 | 47.30 | 60.98 | 41.75 | 48.54 | 41.02 |
| | Ash | 9.12 | 6.06 | 13.19 | 10.06 | 3.01 | 5.03 |
| Ultimate analysis (ash-free base) | C | 73.86 | 68.22 | 85.6 | 63.56 | 72.73 | 68.16 |
| | H | 4.75 | 5.25 | 5.16 | 5.32 | 5.38 | 5.04 |
| | O | 20.00 | 24.55 | 7.75 | 30.17 | 20.89 | 21.74 |
| | N | 0.73 | 1.19 | 1.13 | 0.75 | 0.81 | 1.27 |
| | S | 0.66 | 0.79 | 0.36 | 0.20 | 0.19 | 0.79 |

석탄 회분에 대한 여러 가지 용착지수가 제시되고있으나, 채굴탄의 지역적, 물리·화학적 특성상 이러한 용착 지수들은 한계를 지닐 수밖에 없다. 이러한 용착지수의 예로 회분중의 알칼리 농도를 이용하는 방법, 회분의 용융성(fusibility)을 이용하여 용착지수를 제시하는 방법, 조성, 점성도 및 용융점 등을 이용한 slagging 용착지수 및 fouling 용착지수를 제시하는 방법 등이 있다. 상기에서 제시된 모든 등급의 탄에 적용되는 일반적인 파울링 용착지수 중 가장 일반적으로 사용되는 것은 Na 함량지수¹⁾와 총알칼리지수²⁾이다. 두 용착지수의 경우는 회분중의 대표적인 알칼리 농도인 Sodium(Na)과 Potassium(K)의 농도를 fouling 용착지수로 나타낸 것인데, 특히 Total alkali 지수를 보편적인 파울링용착지수로 사용하고 있다. 본 연구에서 제시하는 R_D식의 경우는 회재의 용착이 일어나는 영역의 유체 및 열적 특성과 알칼리 성분을 고려한 식으로써 속도의 개념이 들어간 대상탄들의 상대적인 용착정도는 제시하는 지수이다. 각 탄의 회분 중 주요 알칼리 성분을 기준으로, <표 2>에 Na 함량지수와 Total alkali 지수를 나타내었는데, 계산 결과처럼 왜 Alaska Usibelli 탄이 Baiduri 탄보다

1) Sodium content : % Na₂O in the ASTM ash

Lignite ; (<2.0, low) , (2-6, medium), (6-8, high), (8>, severe)

Bituminous ; (<0.5, low), (0.5-1.0, medium), (1.0-2.0, high), (>2.5, severe)

2) Alkali Content : Σ(%Na₂O + 0.6589%K₂O) in ASTM ash

=> 1)의 Na 함량지수와 동일

더욱 파울링이 잘 일어나는지에 대한 원인을 규명할 수 없게된다. 그러므로 R_D 식과 같은 보다 개선된 방안이 필요하게 된다.

<표 2> 대상탄의 회분중 주요 알칼리 성분 및 용착지수

| | Adaro | Alaska | Baiduri | Cyprus | Datong | Denisovsky |
|-------------------|-------|--------|---------|--------|--------|------------|
| CaO | 11.57 | 21.98 | 10.57 | 8.01 | 8.37 | 4.42 |
| Na ₂ O | 0.82 | 0.97 | 4.75 | 1.06 | 0.63 | 0.43 |
| K ₂ O | 1.47 | 1.32 | 0.1 | 1.06 | 1.38 | 1.7 |
| Na 함량지수 | 0.82 | 0.97 | 4.75 | 1.06 | 0.63 | 0.43 |
| Total alkali 지수 | 1.79 | 1.84 | 4.82 | 1.76 | 1.54 | 1.55 |

회분중의 알칼리 성분들은 전부 휘발화되는 것이 아니며, 그 복잡한 구조적 특징 등으로 인해 회분에 따라 특정 원소의 일정부분만 휘발화가 된다. 그러므로 이러한 양들을 총량적으로 나타내기 위해 회분중 휘발분의 양을 측정하여 회분중 휘발분율을 <표 3>에 나타내었다. ASTM ash는 750℃에서 생성되기에 800℃ 이상에서 휘발되는 알칼리 성분들이 온전히 있다고 가정할 수 있다. 그리고 이렇게 제조된 ASTM ash들을 TGA에서 1600℃, N₂ 조건으로 지속시키면 회분중의 알칼리 성분들이 휘발되어 slag 형태의 volatilized ash가 된다.

<표 3> 회분 중 휘발분율

| 탄 중 | Adaro | Alaska | Baiduri | Cyprus | Datong | Denisovsky |
|----------|--------|--------|---------|--------|--------|------------|
| 회분중 휘발분율 | 0.0985 | 0.1034 | 0.2103 | 0.0877 | 0.1279 | 0.0471 |

DTF를 이용하여 상기 실험을 통해 구하여진 ash deposit rate 값을 mg/m^2 -sec의 단위로 환산하여 <표 4>에 나타내었다. 실험 결과의 경우 역시 alaska 탄이 baiduri 탄보다 더욱 높은 값의 용착 성향이 나옴을 알 수 있는데, 이는 역시 회분중의 알칼리 농도보다는 전체 반응기에 주입되는 회분의 양과 알칼리량 모두가 고려되는 속도 개념이 도입된 용착지수의 필요함을 반증하는 것이다.

<표 4> 실험으로 구하여진 R_D 값(Experimental R_D data)

(단위 : mg/m^2 -sec)

| | Adaro | Alaska | Baiduri | Cyprus | Datong | Denisovsky |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|------------|
| Combustion | 131.36 | 300.14 | 126.78 | 128.05 | 149.4 | 310.43 |
| Gasification | 159.05 | 370.06 | 101.45 | 135.17 | 181.23 | 281.69 |

다) 이론적인 R_D 값 계산

R_D 식은 배가스의 열역학적 property 및 퇴적이 일어나는 부분의 유체거동 역시 고려되어 있는 식이다. 연소조건의 경우 20% excess air 기준으로, 가스화 조건의 경우 O₂/Coal ratio가 0.72의 조건으로 ASPEN PLUS simulation code의 R-Gibbs reactor model을 이용하여 각각

의 조성을 구하였다. 구하여진 조성으로 얻어진 각 조건의 변수 값들과 변수 값들로 구하여진 이론적인 R_D 값을 <표 5>에 나타내었다.

<표 5> 계산으로 구하여진 R_D 값(Theoretical R_D data)

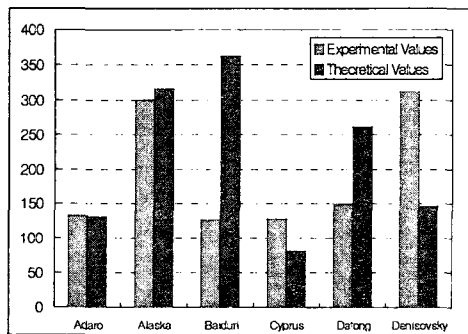
(단위 : $mg/m^2\cdot sec$)

| | Adaro | Alaska | Baiduri | Cyprus | Datong | Denisovsky |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Combustion | 1.300E+02 | 3.154E+02 | 3.616E+02 | 8.222E+01 | 2.616E+02 | 1.416E+02 |
| Gasification | 1.205E+02 | 3.605E+02 | 3.218E+02 | 1.005E+01 | 3.153E+02 | 1.498E+02 |

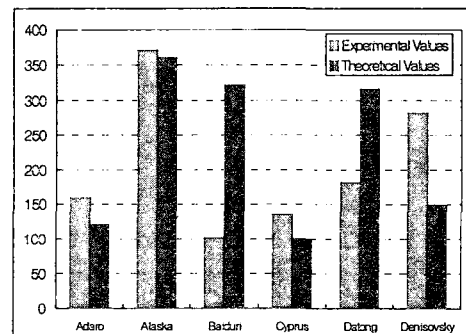
4. 결론

가) 일반적 접근에 의한 분석

[그림 4]와 [그림 5]에 연소 및 가스화 조건에서의 이론적인 R_D 값과 실험적인 R_D 값을 비교하여 그래프로 나타내었다. 그래프에 표현된 바와 같이 실험값과 이론적인 계산값의 크기의 차이는 수식의 조절로 인해 별 차이가 없다. 그러나 Baiduri 탄과 Denisovsky 탄의 경우 실험값의 결과가 이론값과 반대로 나는데 이는 TGA analysis에서의 정확한 분석값을 토대로 사용한다면, 회분 분석상의 오차인지, 아니면 특정탄의 특정 반응기 geometry에 대한 결과인지 분명히 밝혀질 수 있으리라 여겨진다. 나름대로 오차의 원인을 든다면 이론적인 모델식의 경우 회입자와 알칼리 성분이 상향으로 올라가다가 열교환기에서 응착되는 것을 모델로 한 반면 실험의 경우 하향으로 배가스가 흐르면서 회분이 응착뿐만 아니라 퇴적까지 되어 그 값이 더 크게 나오지 않았나 예상된다. 식을 좀 더 개선하고, 회분 분석값을 신뢰할만한 데이터를 대체하면 충분히 두 값이 수렴하리라 예상된다. 특히 회분중 휘발분 data의 분석시 고온 furnace를 이용함으로써 생긴 오차의 원인도 무시할 수 없기 때문에, TGA를 이용하여 더욱 신뢰할 만한 값을 얻어 이론값의 신뢰성을 높여야겠다.



[그림 4] 연소 조건에서의 R_D 값의 비교



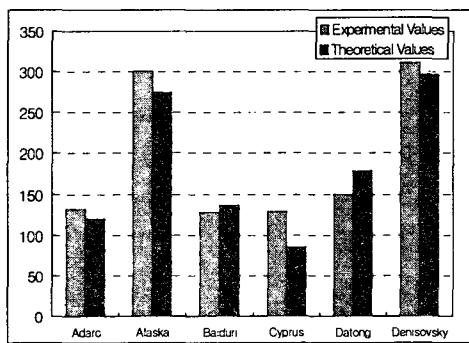
[그림 5] 가스화 조건에서의 R_D 값의 비교

나) DTF ash를 bottom ash로 가정한 분석적 접근

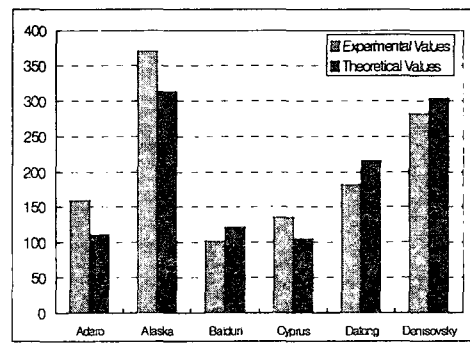
실험 결과를 보다 명확히하기 위해 다른 접근 방식으로 Baiduri 탄과 Denisovsky 탄의 경향의 어긋남을 분석하자면 다음과 같다.

일반적으로 ash는 반응기 내의 stream flow에 따라 2개로 분류할 수 있는데, 하나는 fouling과 연관이 되는 up stream flow ash(즉, fly ash)이고, 다른 하나는 중력에 의해 바닥으로

내려오는 down stream flow ash(즉, bottom ash)이다. 본 R_D 식이 언급하고자 하는 바는 up stream flow ash인 fly ash이다. 그러나, DTF를 통해 얻어진 ash sample의 경우 up stream ash와 down stream ash가 혼재하여, 그 분율로 봐선 up stream ash라기보다는 down stream ash에 가깝다 할 수 있다. 즉, 이러한 DTF ash deposition data가 온전한 down stream ash라고 가정을 한다면, R_D 식 중의 VM_{Ash} 항을 $(1-VM_{Ash})$ 으로 바꿈으로써 R_D 식을 down stream ash deposition rate 식으로 변형시킬 수가 있게 된다. 변형된 결과를 가지고 R_D 값을 구하여서 실제 DTF ash deposition rate data와 비교를 하면 다음 [그림 6]과 [그림 7]의 결과를 얻을 수 있게된다. 참고로 이론적인 R_D 값은 실제값과의 비교상의 편의를 위해 그 값을 10으로 나눈 값이다.



[그림 1-11] 연소 조건에서의 down stream R_D 값의 비교



[그림 1-12] 가스화 조건에서의 down stream R_D 값의 비교

이상의 결과로 알 수 있듯이 DTF deposit probe 위의 ash가 모두 down stream ash라는 가정 하에 제안된 down stream ash에 대한 R_D 식의 경우, 실제 실험 결과 data의 경향과 일치함을 알 수 있다. 이는 $(1-VM_{Ash})$ 을 다시 VM_{Ash} 으로 변환시킴으로써 fouling을 유발하는 up stream ash의 R_D 식의 경향이 나름대로 타당함을 보일 수 있게된다.

5. 참고문헌

- 1) Fireside Slagging, Fouling, and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surfaced Due To Impurities In Steam-Raising Fuels, Richard W. Bryers, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 22, pp.29-120, 1996
- 2) Mineral Impurities in Coal combustion. Raask, E., Hemisphere, Washington, 1985
- 3) Slagging and fouling as related to coal and boiler parameters, Barrett, R. E., Murin, J. M., Dimmer, J. P. and Mehta, A. K., Conference on the Effects of Coal Quality on Power Plants, Electric Power Research Institute, Atlanta, Georgia, 1987
- 4) Designing Boilers to avoid slagging and fouling, Barret, R. E., Power, February, 1990
- 5) 석탄가스화기 파울링 현상 해석을 위한 탄종별 회분퇴적속도연구, 임병표, 최병철, and 김형택, 추계 에너지공학회, 2000
- 6) Generalized correlations for inertial impaction of particles on a circular cylinder, Wessel, R. A. and Righi, J., Aerosol Sci. Technol., 9: 29-60, 1988
- 7) 석탄 회분의 용착성향 예측, 이시훈, 박주식, 한국에너지공학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51, 1995