

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.7.721

저탄장 자연발화 현상의 수치해석적 연구

김철진* · 박이선* · 손채훈**

* 세종대학교 기계공학과

Numerical Study on the Phenomenon of Spontaneous Ignition of Coal Stockpile

Chul Jin Kim*, I-Sun Park*, and Chae Hoon Sohn**

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

(Received April 5, 2010 ; Revised May 18, 2010 ; Accepted May 18, 2010)

Key Words: Coal Stockpile(저탄장), Porous Media(다공성 물질), Spontaneous Ignition(자연발화) Hot Spot(열점), Surface Chemical Reaction(표면화학반응)

초록: 석탄을 야적해두는 저탄장에서 석탄의 자연발화 현상은 안전 문제와 더불어 심각한 경제적 손해를 야기한다. 저탄장에서의 자연발화는 석탄의 산화반응으로 방출되는 열량이 주위로 손실되는 열량보다 클 때 발생한다. 본 연구에서는 2차원 비정상 상태 수치해석을 통해 자연발화 현상을 모사하였고, 수치해석 결과의 타당성을 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 수치해석을 통해 구한 시간에 따른 저탄 내부 온도의 변화 곡선은 실험을 통해 측정된 데이터와 잘 일치하였다. 자연발화 인자인 공극률에 따라 저탄장 내부온도 변화 및 압력, 산소 질량 분율의 변화 양상을 분석하였다. 계산 결과를 토대로, 저탄 형태의 변화에 따라 저탄장 내부에서의 시간에 따른 온도 변화를 비교 검토하였다. 열점의 형성과 자연발화 메커니즘을 분석하여 제시하였다.

Abstract: The spontaneous ignition of coal stockpile causes serious safety and economic problems. Such spontaneous ignition occurs in coal stockpile when the rate of heat released by the oxidation of coal is greater than the rate of heat lost to the surroundings. In this study, a two-dimensional unsteady model is adopted for studying spontaneous ignition and the numerical results are compared with experimental results. The numerical results are in a good agreement with the experimental ones. Depending on the porosity, the internal maximum temperature, pressure, and oxygen mass fraction during spontaneous ignition are investigated. On the basis of the numerical results, the transient temperature variations for several shapes of coal stockpiles are analyzed. Further, the physical mechanisms of hot-spot formation and spontaneous ignition are analyzed.

- 기호설명 -

- A : pre-exponential factor(s^{-1})
- D_p : 평균 석탄 입자 크기(m)
- E : 활성화 에너지(J/mol)
- κ : 투과율(m^{-2})
- ρ : 밀도(kg/m^3)
- R : universal gas constant
- Pr_a : 대기의 프란틀 수
- Pr_c : 저탄장의 프란틀 수
- Sc_a : 대기의 슈미트 수
- Sc_c : 저탄장 내부의 슈미트 수
- n : 반응 차수

- ϵ : 공극률
- k : reaction-rate constant

1. 서론

전 세계의 경제 성장으로 인하여 에너지 소비량은 매년 증가하고 있다. 또한 국내 산업의 발전으로 인하여 국내 에너지 소비량도 역시 매년 증가하고 있는 추세이다. 풍력 발전, 태양광 발전, 핵융합 발전 등의 신재생 에너지원이 꾸준히 개발되고 있지만, 여전히 화력발전이 국내 전기 에너지 공급원의 상당 부분을 차지하고 있다. 석탄은 다른 에너지 자원에 비해 가격 대비 에너지 밀도가 높고 저장성이 용이하기 때문에 에너지

† Corresponding Author, chsohn@sejong.ac.kr

자원으로서의 가치가 여전히 중요시되고 있는 상황이다. 발전소 및 산업시설에 쓰이는 석탄은 유연탄으로서 장기간 저탄시 자연발화의 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻⁸⁾

저탄장에서의 자연발화 현상은, 석탄과 산소의 화학반응으로 방출되는 열과 수분에 의한 습윤열(heat of wetting),⁽⁷⁾ 태양으로부터 도달하는 복사에너지 등의 원인으로 저탄장 내부에 열이 축적되기 때문에 발생한다. 그중에서 석탄의 산화반응은 저탄장 내부 열 축적의 주요 요인이다. 저탄장 내부 열 축적에 영향을 주는 주요 인자로는 공극률, 저탄높이, 저탄각, 저탄시 초기온도, 석탄 입도, 수분, 바람 등이 있다.⁽¹⁻⁸⁾

이전 연구의 저탄장 자연발화 모델에 대해서 기술하면 다음과 같다. Salinger 등⁽²⁾은 자연대류에 의한 저탄장 내외부 압축성 유동, 산소농도, 산화반응율을 고려한 2차원 정상상태(steady state) 해석을 수행하였다. Akgun 등⁽¹⁾은 저탄장 외부의 대기를 고려하지 않은 2차원 과도(transient) 해석을 수행하였다. Moghtaderi 등⁽³⁾은 자연대류에 의한 저탄장 내외부 압축성 유동, 산화반응율, 산소농도, 유동을 고려한 2차원 과도해석을, 범용 수치해석 코드를 이용하여 수행하였으며 가장 현실적인 모델이라고 할 수 있다.

국내의 많은 화력 발전소에서 저탄장을 운영하고 있음에도 불구하고, 저탄장 자연발화 현상에 대한 연구는 거의 진행된 바 없으며, 참고자료로는 화력 발전소를 운영하는 산업체의 자체 보고서가 전부인 실정이다. 실규모의 저탄장 자연발화에 대한 국내연구 실적이 부진한 이유는, 저탄장 자연발화 인자에 대한 실험이 다음과 같은 제한을 받기 때문이다. 우선, 수천 톤에 이르는 석탄을 이용하여 자연발화 실험을 실시해야하므로 비용 문제가 발생한다. 다음으로, 자연발화에 대한 특성을 파악하기 위해서는 많은 양의 석탄을 야적하여 실험을 실시해야하기 때문에 공간적 제약이 있다. 그리고, 실험을 실시하는 지역의 위치나 환경적 영향을 받는다. 마지막으로 석탄은 탄종 및 채굴시기 및 운송기간에 따라서 저탄장 내부의 석탄 고유성분이 달라져 화학반응속도를 결정하는 인자인 활성화에너지, 선지수 인자(pre-exponential factor)가 달라지게 되므로 불확실성(uncertainty)이 개입된다. 이러한 애로사항으로 인하여 실규모의 실험적 방법을 수행하더라도 자

연발화 인자 및 자연발화 시점을 예측하기가 쉽지 않다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 다공성 물질의 표면화학반응을 고려하여 저탄장 내부의 온도장과 유동장의 변화를 고찰하였다. 기본적으로 Moghtaderi 등⁽³⁾이 채택한 모델을 따랐다. 선행 연구결과와 비교 분석하여 수치해석 결과의 타당성을 검증하였으며, 이를 토대로 자연발화 시간의 예측을 시도하였다. 또한 저탄형태에 따른 자연발화 양상을 수치해석적으로 연구하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 화학종 방정식의 풀이를 통해 저탄장 내외부의 반응 유동장(reactive flow field)을 모사하였다.

저탄장 내부는 수많은 석탄 입자로 구성되어 있으며, 단순화를 위해 석탄 입자를 구형 등방성의 다공성 물질로 가정하였다. 이 경우, 근사적으로 저탄장을 거대한 하나의 다공성 물질로 간주할 수 있다. 고체로 된 다공성 물질 내부의 유체 흐름은 Darcy's law로 나타낼 수 있으며, 이를 연속 방정식과 운동량 방정식으로 나타내면 식 (1), (2)와 같다.^(9,10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho) + \nabla \cdot (\epsilon\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho U) + \nabla \cdot (\epsilon\rho U U) = \\ -\epsilon\nabla p + \nabla \cdot (\epsilon\tau) + \epsilon B \\ - \frac{\epsilon^2 \mu}{\kappa} U - \frac{\epsilon^3 C_F \rho}{\sqrt{\kappa}} |U| U \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 U 는 유동 속도, B 는 체적력 벡터(body-force vector), C_F 는 수력학적 항력계수를 나타내며, 투과율(permeability)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\kappa = \frac{D_p^2 \epsilon_b^3}{150(1-\epsilon)^2} \quad (3)$$

식 (1), (2)에서 공극률, ϵ 이 1.0이고 투과율이 ∞ 가 되면 두 식은 각각 저탄장 외부에서의 연속방정

식과 운동량 방정식과 같아지게 된다. 에너지 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 q 는 열 유속이며 열 유속을 전도, 복사, 확산에 대한 항으로 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho h) + \nabla \cdot (\epsilon\rho U h) = \nabla \cdot q + \epsilon\tau : \nabla U + \epsilon \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

$$q = \lambda \nabla T + q_r + \sum_{i=1}^{N_g} J_i h_i \quad (5)$$

위에서 T 는 온도, q_r 은 복사 열 유속, N_g 는 기체 상태의 화학종(species) 수, h_i 는 i 번째 화학종의 엔탈피를 나타낸다. 식 (5)에서 λ 는 저탄장내부 열전도율이며 이를 다공성 물질내 고체와 유체의 열전도율 λ_s 와 λ_f 로 표현하면 다음과 같다.

$$\lambda = -2\lambda_s + \frac{1}{\frac{\epsilon}{2\lambda_s + \lambda_p} + \frac{1-\epsilon}{3\lambda_s}} \quad (6)$$

저탄장 내부에서의 화학종 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho Y_i) + \nabla \cdot (\epsilon\rho U Y_i) = \nabla \cdot J_i + \dot{w}_i \quad (7)$$

여기서 Y_i , J_i , \dot{w}_i 는 각각 i 번째 화학종의 질량 분율, 확산 유속, 생성률(production rate)을 나타낸다.

2.2 수치해석 기법 및 경계조건

저탄장에서의 자연발화는 석탄의 표면화학반응으로 생성되는 열이 저탄장 내부에 지속적으로 축적되어 발생한다. 저탄장내 표면 화학반응은 아래 1단계 화학반응식으로 모사하였다.⁽³⁾



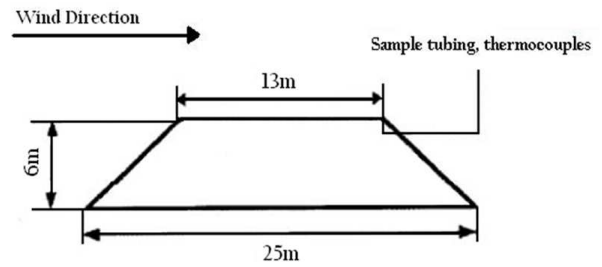
화학반응 속도상수, k 는 식 (9)와 같이 Arrhenius 형태로 표현할 수 있으며, 속도상수에 관한 인자의 값은 Table 1에 명시되어 있는 값을 사용하였다.

$$k = A T^m e^{-E/RT} \quad (9)$$

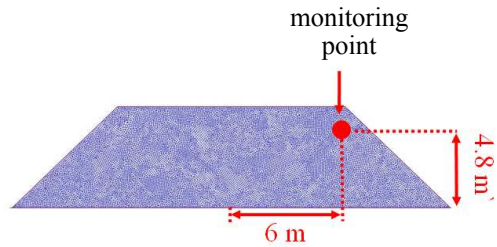
실제 저탄장의 형태는 높이 방향에 비해 길이

Table 1 Values of physical constants used in numerical calculations⁽³⁾

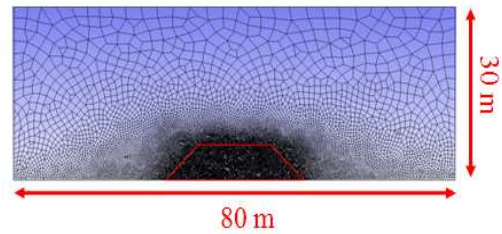
Symbol	Name	Value
A	pre-exponential factor	$2.1 \times 10^{-10} \text{ kgs}^{-1} \text{ kmol}^{-0.7} \text{ m}^{-0.9}$
E	activation energy	$7.5 \times 10^{-4} \text{ J mol}^{-1}$
n	order of reaction	0.6



(a) Cross-section of coal stockpile⁽³⁾



(b) Monitoring point in coal stockpile



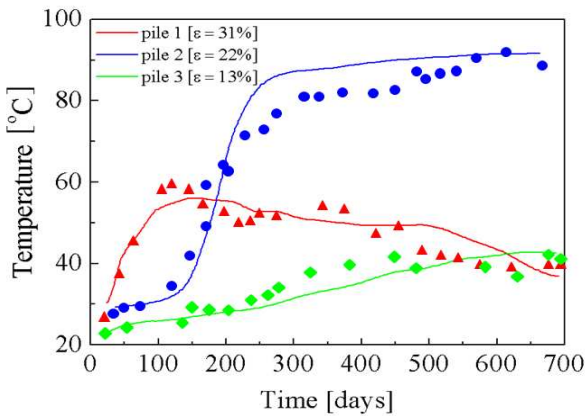
(c) Grid systems adopted

Fig. 1 Geometry and computational grids of coal stockpile and its surroundings

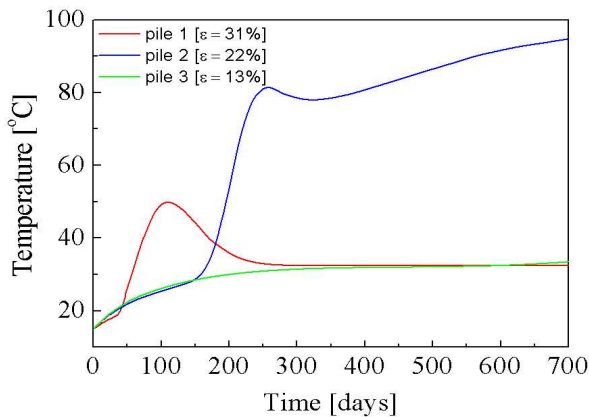
방향이 충분히 길기 때문에 Fig. 1과 같은 2차원 형태로 설정하였다. 저탄장의 해석 영역(domain)의 크기는 가로 25 m, 세로 6 m로 참고문헌[3]의 저탄장 크기와 동일하게 설정하였다. 저탄장내 온도변화를 관찰하기 위한 지점은 저탄장 중심으로부터 가로로 6 m, 세로로 4.8 m 떨어진 위치에 두었다. 경계조건의 영향을 작게 하기위해서 전

체 해석영역의 크기는 가로 80 m, 세로 30 m로써 저탄장에 비해 충분히 크게 설정하였다. 경계 조건으로 far-field에서의 자유 유동(free stream) 조건과 288 K의 일정 온도를 부여하였다. 본 계산에서 초기에 저탄장 외부에서는 유동이 없는 상태이고, 전체 영역의 초기 온도를 288 K으로 두었다. 저탄장 지면의 조건은 등온(isothermal) 조건으로, 저탄장 외부의 지면 조건은 단열 조건으로 설정하였다.

시간경과에 따른 열점(hot spot)의 생성 및 변화를 관찰하기 위하여 과도 상태 수치해석을 수행하였다. 시간 적분시 시간 간격(time step)은 저탄 온도 특성 변화율(또는 특성 시간)을 고려하여 1 일(= 86,400 초)로 설정하였고, 시간 간격에 의한 오차는 5% 이내임을 확인하였다. 위의 지배방정식의 풀이를 위해 열유체 범용 해석범용코드인 CFD-ACE+(10)를 사용하였다.



(a) Numerical & experimental data in a previous work⁽³⁾



(b) Present numerical data

Fig. 2 Comparison of the present numerical data with a previous measured and calculated data within three test coal stockpiles

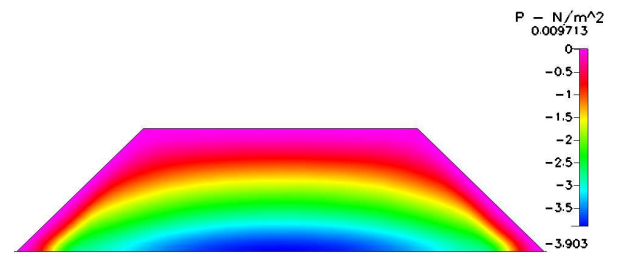
3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 수치해석 결과 검증

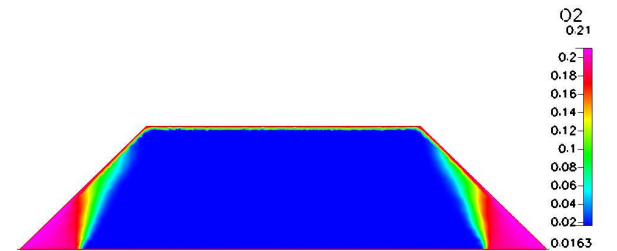
먼저, 수치해석 결과의 비교 검증을 위해서 선행 연구결과⁽³⁾와 본 연구결과를 Fig. 2에 비교하여 나타내었다. Fig. 2(a)에서 실선은 선행 연구에서 보고된 수치해석 결과를 나타내며, 기호(symbol)는 실험 결과를 나타낸다. 본 계산결과는 Fig. 2(b)에 나타내었는데, 저탄장 공극률이 0.31일 경우 100일까지 저탄장 내부의 온도는 급상승하고 100일에서 최고의 온도에 도달한다. 100일 이후에는 완만하게 온도가 감소한다. 공극률 0.22일 때에는 약 120일까지는 완만하게 온도가 상승하지만 120일 이후부터 210일까지 급격하게 온도가 상승한다. 210일 이후에는 다시 완만하게 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 공극률이 0.13일 때에는 700일까지 완만한 온도 상승을 하고 30



(a) Temperature field



(b) Pressure field



(c) Mass fraction of O_2

Fig. 3 Temperature, pressure, and mass fraction fields of coal stockpiles at the initial process of spontaneous ignition

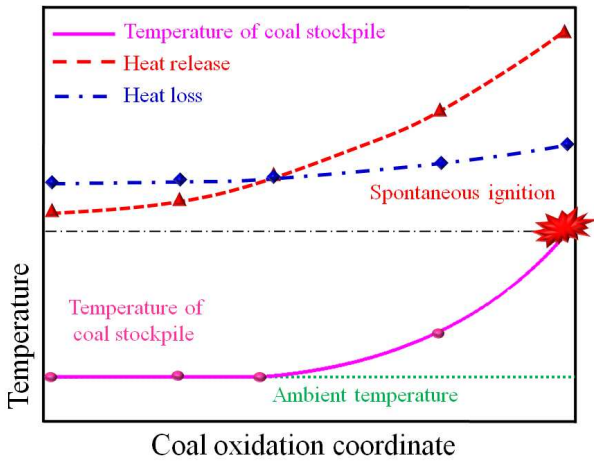


Fig. 4 Process of spontaneous ignition of coal stockpiles

℃ 정도의 온도에 수렴한다.

기본적으로 같은 모델을 사용했음에도 본 수치 해석의 결과와 선행 연구 결과⁽³⁾ 사이에는 다소의 차이가 있다. 부분적으로 본 계산 결과의 정확도가 더 높은 면도 있으며, 그 반대의 면도 공존한다. 이는 세부적인 수치 모델의 오차에 기인하기도 하겠으나, 주로 선행 연구 결과의 보고 내용에 실험 및 수치해석시 저탄온도, 저탄장 온도 측정 위치가 명확히 명시되어 있지 않기 때문이라고 판단된다. 그러나, 선행 연구 결과의 수치 해석 및 실험 결과와 근사하게 본 수치 해석 결과는 온도 변화의 경향성을 정성적/정량적으로 잘 예측한다고 볼 수 있다.

3.2 열점 형성 및 자연발화 메커니즘

자연발화가 발생한 경우에는 항상 저탄 가장자리에서 열점(hot spot)이 먼저 형성되었고, 그 열점이 저탄 중앙부로 전파하였다. 결국, 자연발화 여부는 열점의 형성과 점화에 의해 좌우되었다.

자연발화 초기의 저탄내부 온도, 압력, 산소 질량분율을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 저탄장내 열점은 저탄장 가장자리 하부에서 초기에 낮은 온도로 발생하게 된다. 열점 및 저탄장내 평균 온도의 상승으로 인해 저탄장 내부의 공기 온도가 상승하게 되어, 저탄장 내부의 공기 밀도는 상대적으로 낮게 된다. 즉 Fig. 3(b)와 같이 저탄장 하단 중앙 부분은 대기압보다 약 4 Pa 정도 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 화학반응의 진행에 의해 저탄장 내부 중앙부분의 산소 질량분율은 현저히 낮아진다. 저탄장 내외부의 압력 차이로 인하여 외부의 공기

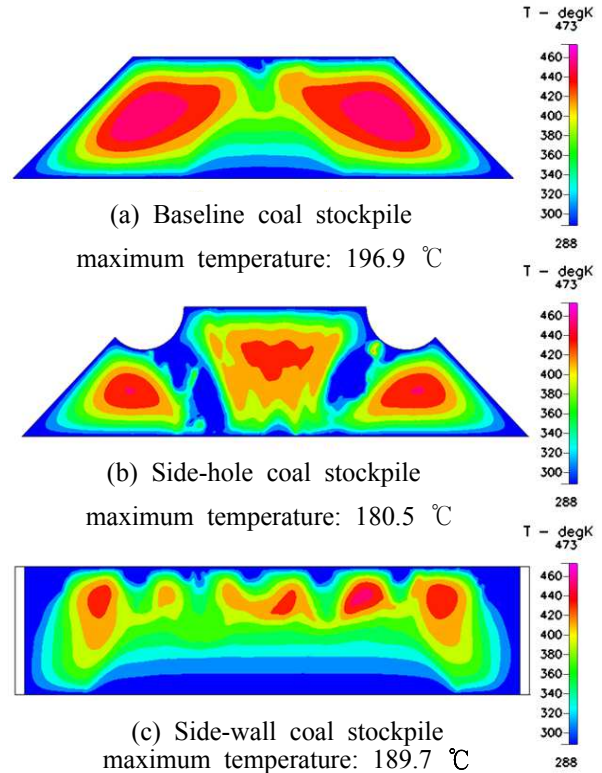


Fig. 5 Temperature fields in coal stockpiles with various shapes

가 저탄장 내부로 유입되고, 유입된 공기에 의해 산소가 공급되므로 석탄과 산소는 산화반응을 지속적으로 유지하게 된다. 지속적인 산화반응으로 저탄장내 온도는 더 상승하게 되며 더 많은 양의 공기가 유입되어 열점의 영역이 넓어지며 온도도 상승하면서 저탄장의 중심부로 이동한다.

저탄장내 산소분율 관점에서 열점이 발생하는 원인을 분석하면 다음과 같다. 저탄장 가장자리는 상대적으로 공기가 쉽게 침투할 수 있고, 저탄장 중심부로 갈수록 석탄입자에 의해서 유동저항을 크게 받아 유속이 크게 감소한다. 산소는 저탄장 중심부에 도달하기 전에 산화반응에 참여하여 소모되므로, 중심부에서는 산화에 필요한 산소 공급이 원활하지 않아 온도가 낮게 형성되며 열점이 발생하지 않는다. 즉, 저탄장 가장자리에서 열점이 먼저 발생하는 이유는 저탄장 하부 가장자리에서는 외부 공기의 유입이 더 원활하기 때문이다. 이러한 분석 결과는 향후 자연발화 억제 방법을 고안하는데 이용될 수 있을 것이다.

저탄장에서의 자연발화는, 열점의 형성과 전파 과정에서 석탄과 산소의 화학반응으로 인한 열 방출량과 열 손실량의 경쟁관계에 의해 발생 여

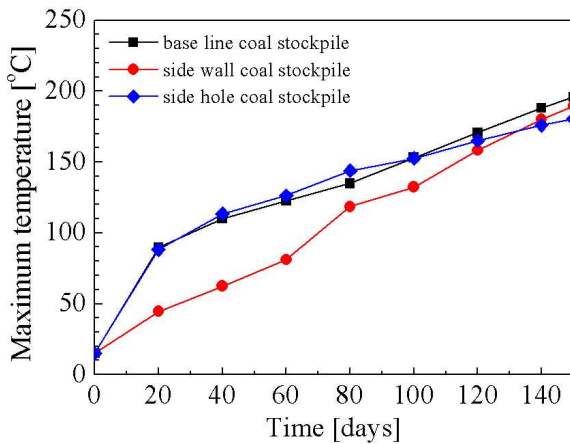


Fig. 6 Transient maximum temperatures in coal stockpiles with various shapes

부가 결정된다. 석탄의 산화과정에 따른 열방출/손실 및 온도 변화를 개념적으로 Fig. 4에 나타내었다. 석탄의 산화반응이 느릴 경우 저탄장내 열손실률이 상대적으로 더 크기 때문에 저탄장의 온도는 주변 대기온도로 유지되어 자연발화는 발생하지 않는다. 하지만 저탄장내 열 방출률이 열손실률보다 클 경우 저탄장내 온도는 상승하며, 산화반응 속도도 증가하게 된다. 지속적으로 열방출률이 열손실률보다 클 경우 저탄장내 온도가 자연발화 온도에 도달하게 되고 결국 자연발화가 발생하게 된다.

3.3 저탄 형태 및 시설물의 효과

저탄장 자연발화를 지연시키기 위해 저탄장 형태 및 저탄장 주변 시설물이 자연발화에 미치는 영향을 연구하였다. 초기 열점의 형성과 열방출/손실이 자연발화에 중요한 영향을 끼침을 알았기에 이를 억제하기 위해 두 가지 방법을 적용하였다. 한 가지는 저탄장 윗부분의 양쪽에 hole을 두어 열점으로부터의 열손실을 크게 해주는 형태(side hole이라 부름)이며, 다른 방법은 저탄장 양 옆면에 벽면을 세워 주위로부터의 공기 유입을 억제하는 형태(side wall이라 부름)이다. Fig. 5에 각 형태의 저탄 내부 온도를 기준(baseline) 형태에서의 내부 온도와 비교하여 나타내었다. 또한, 각각에 대해 시간에 따른 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Side hole의 경우, 기준 저탄 형태와 초기 온도상승 경향성이 비슷하나 시간이 경과함에 따라서 온도 상승이 완만해져 120일 후에는 온도 상승률이 작아진다. 열점으로부터의 열 손

실이 크기 때문이며, 150일 경과 후 저탄장내 최고온도가 16 °C 낮게 형성됨을 확인하였다. Side wall은 150일 경과 후 저탄장내 최고온도가 189.7 °C에 도달하며 저탄장 가장자리에서의 공기의 공급이 원활하지 않아 열점이 위치가 일정하지 않음을 알 수 있다. 그러나 초기온도 상승률이 확연히 낮으므로 side wall 형태는 저탄기간이 짧은 저탄장에 적용 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

저탄장에서 발생할 수 있는 자연발화 현상을 모사하기 위해 저탄장 내부를 등방 다공성 물질(porous material)로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 먼저, 본 수치해석 결과를 선행 연구 결과와 비교하여 본 수치해석 기법의 타당성을 검증하였다. 저탄장에서의 자연발화와 관련된 주요 현상인 열점의 형성, 온도 변화 및 이동 경로를 관측하기 위해서 저탄장 내부의 온도와 압력, 산소분율의 공간적 분포를 분석하고 열점의 형성과 자연발화 메커니즘을 분석하였다.

저탄장내 열점의 형성 및 자연발화의 지연 및 억제제를 위해 저탄형태의 변경과 시설물 설치에 따른 자연발화 현상의 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 두 가지 저탄 형태의 변화에 대한 계산을 수행하였고, 이를 통해 저탄형태 변경 및 구조물의 설치에 의해 자연발화를 어느 정도 지연시킬 수 있음을 알았다. 이러한 분석 결과를 토대로 향후 다양한 저탄 형태에 대한 해석을 수행하여 최적 형태를 파악할 것이고, 외부 바람의 속도의 효과를 분석할 것이다. 이를 통해 궁극적으로 효과적인 자연발화 억제 방법을 도출할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국동서발전(주)의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 09302)주관으로 수행된 과제임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Akgun, F. and Essenhigh, R. H., 2000, "Self-Ignition Characteristics of Coal Stockpile :

- Theoretical Prediction from a Two-Dimensional Unsteady-state Model," *Fuel*, Vol. 80, pp. 409~415.
- (2) Salinger, A. G., Aris, R. and Derby, J. J., 1994, "Modeling the Spontaneous Ignition of Coal Stockpiles," *Journal of AIChE*, Vol. 40, No. 6, pp. 991~1003.
- (3) Moghtaderi, B., Dlugogorski, B. Z. and Kennedy, E. M., 2000, "Effects of Wind Flow on Self-Heating Characteristics of Coal Stockpiles," *Trans. IChemE(B)*, Vol. 78, pp. 445~453.
- (4) Brooks, K., Bradshaw, S. and Glasser, D., 1988, "Spontaneous Combustion of Coal Stockpiles an unusual Chemical Reaction Engineering Problem," *Chemical Engineering Science*, Vol. 43, No. 8, pp. 2139~2145.
- (5) Brooks, K., Balakotaiah, V. and Luss, D., 1998, "Effect of Natural Convection on Spontaneous Combustion of Coal Stockpiles," *Journal of AIChE*, Vol. 4, No. 3, pp. 353~364.
- (6) Ejlali, A., Aminossadati, S. M., Hooman, K. and Beamish, B. B., 2009, "A New Criterion to Design Reactive Coal Stockpiles," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36 pp. 669~673.
- (7) Nordon, P. and Bainbridge, N. W., 1983, "Heat of Wetting of a Bituminous Coal," *Fuel*, Vol. 62, No. 5, pp. 619~621.
- (8) Krajciova, M., Jelemensky, L., Kisa, M. and Markos, J., 2004, "Model Predictions on Self-Heating and Prevention of Stockpiled Coals," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17, pp. 205~216.
- (9) Nield, D. A. and Bejan, A., 2006, *Convection in Porous Media*, 3rd Ed., New York, Springer.
- (10) CFDRC, 2009, CFD-ACE-GUI User Manual, Ver. 2009.