

## 강재승온해석용 프로그램 개발

이치승, 이성철, 노동순\*

한양대학교 화학공학과, 한국에너지기술연구소\*

### Program development for predicting billet temperature characteristics in a forging furnace

Chi-Seung Lee, Sung-Chul Yi, Dong-Soon Noh\*

Department of Chemical Engineering, CPRC, Hanyang University, *KIER*\*

#### 서론

단조작업을 수행하기 전에 사용되는 가열로는 강철의 전성 및 연성과 같은 물리적인 특성을 변화시키는 중요한 예비처리작업에 해당한다. 단조작업이 가능하기 위해서는 가열로 내부에 존재하는 강재의 온도가 일정한 온도까지 상승해야 한다. 이 때 온도의 상승은 가열로 내부로 투입되는 열에너지의 양에 비례하게 되는데, 일반적으로 1000°C 이상까지 상승해야 하는 강재의 특성을 고려해볼 때 가열로 내부로 투입되는 에너지의 양은 상당하다. 에너지 다소비 공정에 해당하는 가열로의 소요 에너지를 감소시키기 위해서는 적은양의 에너지의 투입으로 원하는 온도까지 강재를 가열해야 한다.

이와 같이 최적의 투입 에너지량을 결정짓기 위해서는 가열로 내부로 에너지를 공급하는 버너의 운전 패턴을 최적의 조건으로 설정하여야 한다. 하지만, 최적 조건의 설정은 실험을 통한 방법만으로 찾아내기에는 상당한 어려움이 있기 때문에 수치적인 방법을 병행할 경우 절감된 시간과 비용으로 가능하다.

본 연구에서는 수치적인 접근 방법에 의해 가열로 내부에 존재하는 강재의 승온 패턴을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 이는 가열로 운전에서 최적 운전패턴을 결정짓는데 기본 자료로서 활용될 수 있다고 사료된다.

#### 본론

##### (1) 시스템 구성 및 가정

그림 1.과 그림 2.는 본 연구에서 사용된 시스템을 나타내고 있다. 가열로의 폭과 길이 그리고 높이는 각각 2.3 m, 2.43 m, 1.8 m에 해당한다. 또한 가열로를 둘러싸고 있는 벽의 두께는 0.35 m로서 바닥을 제외한 모든 면에서 둘러싸고 있는 모든 면에서의 두께는 일정하다. 오른쪽의 유입, 유출구는 20초의 절환주기를 가지고 유체의 유·출입이 바뀌게 되는데, 이는 왼쪽의 유입구가 20초 뒤에는 유출구로 오른쪽의 유출구가 20초 뒤에는 유입구로 바뀐다는 의미이다. 유입구에서의 유체는 150,000 Kcal/h(180,000 Kcal/h)의 용량의 버너에 의해 가열되어 120 m/s의 속도로 유입된다. 가열로의 중앙의 위치에 직경과 길이가 각각 50 cm, 100 cm인 강재가 장입되어 가열되며 유입구와 유출구를 바라보며 길이 방향으로 바닥에서 약 30 cm 떨어진 위치에 지지대에 의해 자리 잡고 있다.

전산모사를 수행하는데 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (i) 유동은 3차원 정상상태의 난류유동이다.
- (ii) 조업유체는 공기이며 비압축성이다.
- (iii) 절환주기(20초) 사이의 작업의 시간적차이가 존재하지 않는다.

- (iv) 온도에 의한 유동의 변화는 없다. (자연대류효과 무시)
- (v) 복사열전달 효과는 무시할 수 있다
- (vi) 중력의 영향은 무시할 수 있다.
- (vii) 가열로 벽면을 통한 열손실은 일정하다.

## (2) 지배방정식 및 경계조건

가열로 내부의 유동과 온도분포는 연속방정식, 운동량보존식, 에너지 보존식에 의해 지배된다. 또한 고속으로 유입되는 유체의 유동은 가열로 내부에서 난류를 형성하게 되는데, 난류의 모델링을 위해서는 기본적인 운동량방정식 이외에 난류방정식을 추가로 계산해야 한다. 난류방정식으로는 1974년 Launder와 Spalding이 제안한 *standard k-ε model*을 사용하였다. 본 연구에서는 유동에 관해서는 정상상태를, 열전달에 관해서는 비정상상태를 계산하였다. 대류열전달의 경우 정상상태의 유동결과를 coupling하여 열전달계산에서 사용하였다.

사용된 지배방정식은 다음과 같으며 경계조건은 표1에 나타나 있다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

운동량보존식

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

에너지보존식

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i(\rho E + p))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{eff}]$$

$$where, E = -\frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$$

k-방정식

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k - \rho \epsilon$$

ε-방정식

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

## (3) 수치적접근방법

경계조건의 설정에 있어서 난점은 유입구로 유입되는 유체의 온도 및 가열로 외벽에서의 설정이었다. 조업에 사용되는 버너용량이 고정된 상태에서 운전이 되어도 유입구를 통해 유입되는 공기의 온도는 축열체로 인해 매 시간 달라진다. 유입온도 변화의 적절한 예측을 위해 실험에서 구해진 가열로 내부의 분위기 온도의 승온 패턴을 이용하였다. 유입되는 유체의 온도의 증가율은 가열로 내부의 분위기 온도의 증가율과 같다면 초기유입유체의 온도만 결정된다면 유체의 승온패턴은 결정지어질 수 있다. 초기유입유체의 온도는 시행오차법으로 알아냈으며 이렇게 사용된 경계조건이 결과를 예측하는데 무리가 없음을 알 수 있었다.

가열로 외벽의 경우 상온의 공기로 둘러싸여 있기 때문에 외벽에서 발산되는 열이 외부 상온의 공기로 전달되는 현상으로 처리할 수 있다. 이는 수치해석적으로 대류열전달 경계조건에 해당하는 대류열전달 경계조건에 있어서 알아야하는 값은 대류열전달계수에 해당한다. 대류열전달계수는 이론적인 몇 가지 경우를 제외하고는 그 상황에 맞는 값이 주어지지 않기 때문에 각 상황에 맞는 값을 적절하게 찾아내거나 실험을 통해서 알아내야 한다. 본 연구에서는 어느 정도 운전이 진행되

있을 때의 외벽에서의 온도가 약 70°C라는 사실을 바탕으로 외벽과 내벽의 온도차이를 이용하여 시행오차를 통하여 대류열전달계수를 구할 수 있었다.

**결론**

가열로 내부 유동의 경우 실제 유동이 매 20초마다 다른 유입구로 유입되기 때문에 비정상상태의 계산으로 접근해야 하겠지만, 실제 계산결과 매 20초 주기마다 5초 이후에는 유동이 대부분 발달하여 정상상태와 같은 유동 형태를 나타내었다. (그림 3. 그림 4.)

또한 가열로 내부의 열전달 현상의 경우 대류열전달에 의해 로내 분위기 온도가 결정지어지게 되며 로내 분위기 온도는 강재의 온도를 상승시키는 주요한 인자로서 작용한다. 분위기 온도의 경우 대류열전달 현상에의에 조업후 1시간 이내에 온도가 상당히 상승하게 되며 로내에 계속해서 유입되는 에너지의 축적량이 강재의 온도를 높여주는 원인으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 두 가지 경우의 전산모사를 통해 얻은 기본 데이터를 바탕으로 일정 영역 내의 열용량을 지닌 버너에 따른 강재의 승온 특성을 얻을 수 있는 프로그램을 개발하였다.

**참고문헌**

1. Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation (1980)
2. J. Blazek, "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", ELSEVIER (2001)
3. Soong Kee Kim, Dong Hoon Shin, Chang Kook Ryu and Sang Min Choi, "Computational and Experimental Approaches to the Studies of Thermal Flow in Incinerators", J. Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol 11., No 4., 545-555 (1994)

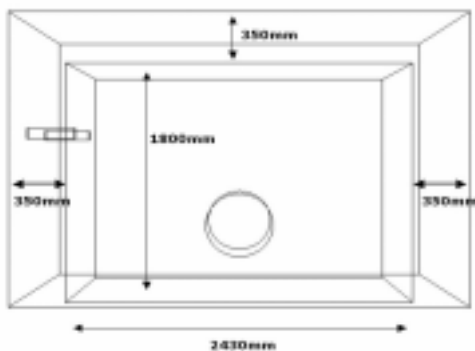


그림 1. 가열로의 구성도 (옆면도)

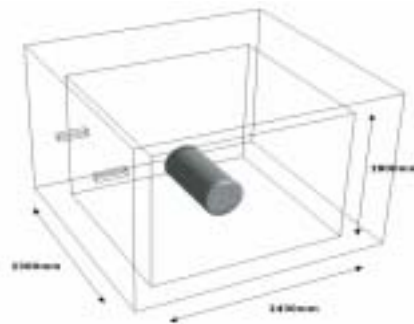


그림 2. 가열로의 구성도 (측면도)

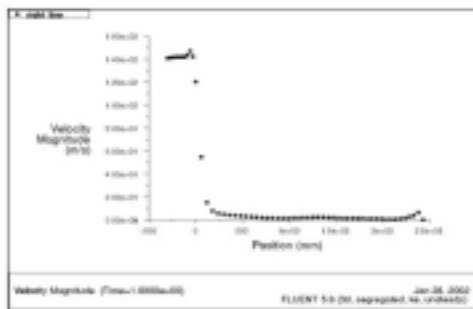


그림 3. 오른쪽 유출구에서 뒷벽으로 이은 경로에서의 속도값의 변화 (비정상상태, t=5초)

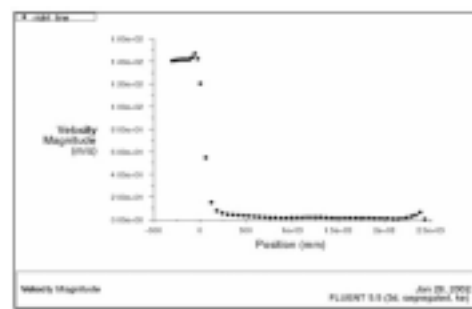


그림 4. 오른쪽 유출구에서 뒷벽으로 이은 경로에서의 속도값의 변화 (정상상태)

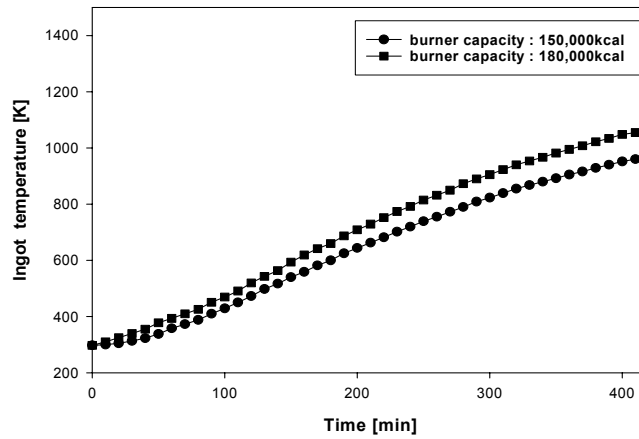


그림 5. 버너 용량에 따른 강재의 승온 그래프

표1. 경계조건

inlet	$120m/s$ , $Q=150,000Kcal/h$
outlet	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
turbulence intensity	10%
hydraulic diameter	80mm
wall left	$h = 35 W/m^2K$ , $T_f = 293K$
wall right	$h = 35 W/m^2K$ , $T_f = 293K$
wall front	$h = 35 W/m^2K$ , $T_f = 293K$
wall rear	$h = 35 W/m^2K$ , $T_f = 293K$
wall top	$h = 35 W/m^2K$ , $T_f = 293K$
wall bottom	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

표2. 물성치

Material / Properties	Air	Billet
density [ $kg/m^3$ ]	1225	7900
heat capacity [ $J/kg \cdot K$ ]	1006.43	452
conductivity [ $W/m \cdot K$ ]	0.0242	72.7
viscosity [ $kg/m \cdot s$ ]	1.7894e-05	-