

# 탄소섬유 탄화로 내 생성가스의 토출 안정화에 관한 해석적 연구

고동국\*, 김민우\*\*, 이교우\*\*, 임익태\*\*†  
 \*전북대학교 기계공학과, \*\*전북대학교 기계설계공학부  
 e-mail: kdg2002@jbnu.ac.kr

## An numerical analysis study on the discharge stabilization of generated gas in carbonization furnace for carbon fiber

Dong-Guk Ko\*, Min-Woo Kim\*\*, Gyo-Woo Lee\*\*, Ik-Tae Im\*\*†  
 \*Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University  
 \*\*†Division of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University

### 요약

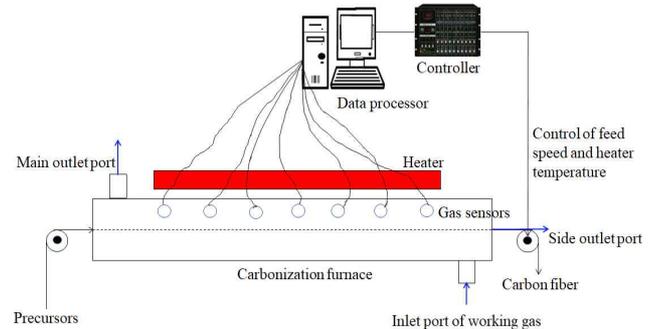
본 논문은 탄소섬유의 탄화로(Carbonization Furnace; CF) 내 생성되는 가스의 토출 안정화에 대한 공정변수의 영향을 수치해석적 방법을 통해 분석한 것이다. 공정조건은 탄소섬유의 이송속도와 다공도 및 배출구의 압력이며 사용된 작동유체는 질소가스(N<sub>2</sub>)이다. 주 흡입구를 통해 유입되는 질소가스의 질량유량은 0.001 kg/s이며 왼쪽 실링 챔버와 오른쪽 실링 챔버의 측면으로 각각 0.00068 kg/s, 0.00043 kg/s의 질소가스가 추가로 공급된다. 결과적으로 탄화로 내 탄소섬유의 이송속도가 0.06 m/s와 0.10 m/s사이 이고 다공도가 0.5와 0.7일 경우 토출되는 생성가스의 유동은 안정화되었다. 반면 토출되는 가스의 유동의 안정화에 대한 배출구 토출압력의 영향은 매우 작았다.

### 1. 서론

탄소섬유는 탄소함량이 92% 이상인 소재이며 높은 탄성률과 열전도성 및 고강성이 가능하여 차량용 부품, 항공기 및 풍력발전 블레이드 등 경량소재에 다양하게 적용되고 있다.<sup>[1]</sup> 현재 대부분의 탄소소재에 대한 연구는 섬유조직의 기계적 특성과 열전도도에 대한 것 들이다. 특히 탄소섬유를 제작하는 과정 동안 발생하는 가스는 탄화로의 부식과 내구성에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 프리커서를 활용하여 탄소섬유를 제작하는 동안 발생하는 배출가스의 원활한 유동흐름을 모사하고 안정적인 배출에 대한 공정 설계변수의 영향을 고찰하기 위한 연구는 미흡한 실정이다.<sup>[3, 4]</sup> 따라서 본 연구는 탄화과정 시 설계변수인 탄소섬유의 이송속도(fiber feed velocity;  $v_f$ )와 다공도(porosity;  $\epsilon$ ) 및 주 배출구의 압력(main outlet pressure)을 변화시켜가면서 탄화로 내 생성가스의 유동흐름을 파악하고 생성가스의 유동구조를 분석하였다.

### 2. 탄화과정 및 수치해석

그림 1은 탄화로 내 탄소섬유의 생성과정 과정을 모식화한 것이다. 탄소섬유의 프리커서는 탄화로의 왼쪽으로 들어가 탄화된 후 오른쪽으로 이송이 되며 질소가스가 탄화로 내부로 유입된 후 배출구를 통해 토출된다. 수치해석 시 사용된 작동유체는 질소가스이며 이상기체로 가정하였다. 흡입구와 배출구의 경계조건은 각각 질량유량(kg/s)과 압력으로 지정하였으며 주 배출구의 압력은 해석변수로 설정하였다.



[그림 1] 탄화로 내 탄소섬유의 생성 공정과정

벽면에서의 경계조건은 no-slip condition을 적용하였다. 탄소섬유는 좌측에서 우측으로 이송되는 다공성 매질로 처리하였다. 탄소섬유의 이송속도  $V_f$ 는 0.00 m/s, 0.02 m/s, 0.04 m/s, 0.06 m/s, 0.08 m/s, 0.10 m/s, 0.12 m/s, 0.14 m/s이며 다공도( $\epsilon$ )는 0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0이다. 주 배출구의 압력은 -100 Pa, -75 Pa, -50 Pa, -25 Pa, 0 Pa이다. 난류모델은 탄화로 내부의 복잡한 유동구조와 재순환영역을 효과적으로 모사하기 위해 Shear Stress Transport(SST)  $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 압력과 속도의 보정을 위해서는 압력-속도 커플링 방법을 사용하였으며 압력, 운동량, 난류 운동에너지 및 소산율에 대해서는 2차승(second-order scheme) 이산화기법을 적용하였다. 수치계산을 위해 사용한 해석용 상용 프로그램은 ANSYS-FLUENT 2020 R2이며 해석결과의 수렴오차(convergence tolerance)는 0.1이다.<sup>[5]</sup> 본 연구에서는 이러한 해석기법을

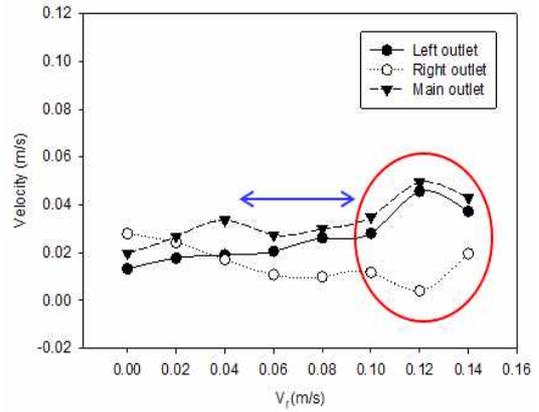
사용하여 탄화로 내 탄소섬유의 이송속도와 다공도 및 주 배출구의 압력변화에 따른 탄화로 내부유동 흐름을 분석하고 토출구에서의 배기가스 안정화를 파악하였다.

### 3. 결과 및 고찰

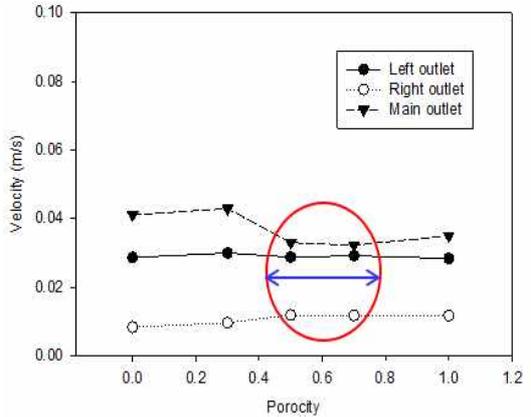
Fig. 2는 탄소섬유의 이송속도와 다공도 및 주 배출구의 압력 변화에 따른 탄화로 출구속도의 평균 값을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 탄소섬유의 이송속도가 탄화로 출구에서의 배기가스 유동 안정화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 탄소섬유의 이송속도가 0.12 m/s 이상일 경우 토출되는 질소가스의 속도 값은 불규칙하였으며 이러한 현상은 탄화로 우측 보조 배출구(right outlet)에서 크게 발생하였다. 이는 주 흡입구(main inlet)를 통해 유입된 질소가스가 탄화로의 우측 보조 흡입구와 충돌하고 복잡한 유동을 형성한 후 우측 보조 배출구로 토출되기 때문이다. 이송속도가 0.12 m/s 일 경우 주 배출구의 속도 평균 값은 0.049 m/s 였다. 이 수치는 공정과정 동안 배기가스의 속도 평균 값인 0.033 m/s 와 비교하여 67.35% 상승한 것이며 매우 큰 변동 폭과 불규칙한 유동구조를 형성하였다. 따라서 탄화 공정 시 탄화로부터 발생된 가스의 안정된 토출을 위해서는 탄소섬유의 이송속도를 0.06 m/s 와 0.10 m/s 사이로 설정할 필요가 있다. Fig. 2(b)는 탄화로 출구에서의 배기가스 유동 안정화에 대한 탄소섬유 다공도의 영향을 나타낸 것이다. 다공도가 0.5 미만일 경우에는 탄화로 배출구에서의 속도는 상이한 값을 보인 반면 0.5와 0.7 일 경우에는 거의 유사하고 안정된 값을 나타내었다. 이러한 현상은 주 배출구에서 주로 발생하였다. 이는 배출구와 탄화로가 교차하는 부분이 수직으로 이루어져 박리(separation) 현상이 발생하고 이에 따라 압력강하가 형성되기 때문이다. 따라서 탄화로의 주 배출구 안쪽을 곡관(elbow) 형태로 제작하여 압력차에 의한 불균일한 유동현상을 저감시킬 필요가 있다. Fig. 2(c)는 탄화로 출구에서의 배기가스 유동 안정화에 대한 주 배출구 압력의 영향을 나타낸 것이다. 배기가스의 유동속도는 주 배출구에서 가장 크게 나타난 반면 우측 보조 배출구에서 가장 낮았다. 이는 탄소섬유의 탄화공정 시 생성되는 배기가스의 대부분이 주 배출구를 통해 토출되고 일부만 좌·우 보조 배출구로 유출되기 때문이다. 특히 우측 보조 배출구를 통한 배기가스의 평균 속도가 가장 낮은 이유는 배기가스가 보조 흡입구와 충돌한 후 재순환(recirculation)이 발생되고 일부 공간은 정체구간(stagnation region)이 형성되어 배기가스가 원활하게 흐르지 못하기 때문이다.

### 4. 결 론

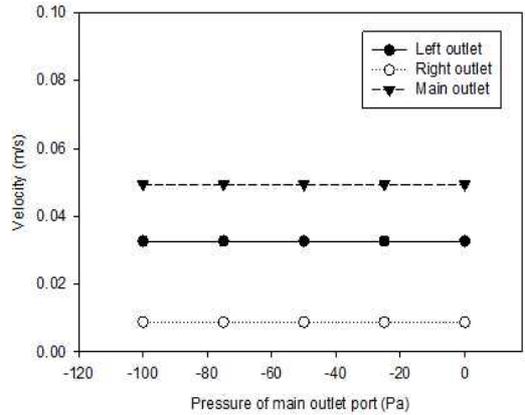
본 연구는 탄화로 내 탄소섬유의 이송속도와 다공도 및 주 배출구의 변화가 탄화 공정 후 토출되는 가스의 안정화에 미



[a] 탄소섬유의 이송속도



[b] 탄소섬유의 다공도



[c] 주 배출구의 압력

[그림 2] 탄화로 내 공정변수에 따른 탄화로 출구의 평균속도 값

치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 탄소섬유의 이송속도가 0.12 m/s 일 경우 주 배출구의 속도 평균 값은 공정과정 동안 배기가스의 속도 평균 값과 비교하여 67.35% 상승하였으며 탄화공정 시 불안정한 유동구조를 형성하였다.
- 반면 탄소섬유의 이송속도가 0.06 m/s 와 0.10 m/s 사이일 경우에는 주 배출구를 통한 토출가스의 유동은 안정적이었으며 균일한 속도 값을 나타내었다.
- 탄소섬유의 다공도를 0.5 또는 0.7로 설정하고 주 배출구와 탄화로가 교차하는 부분을 곡관(elbow)형태로 제작할 경우

배기가스의 유동안정을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 주 배출구의 설정압력 값은 주 배출구를 통한 배출가스의 유동안정화에 미치는 영향이 매우 작았다. 따라서 탄화 공정 시 발생하는 가스를 인위적으로 배출시키기 위한 장치는 제조 설계상 필요하지 않을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 지원사업인 소재부품기술개발사업의 연구결과로 수행되었음.(NO. 20011577)

#### 참고문헌

- [1] Bhatt, P., and Goel, J., "Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use," Material Science Research India, Vol. 14, No. 1, pp. 52-57, 2017.
- [2] Xiaosong Huang., Review Fabrication and Properties of Carbon Fibers," 2nd Ed., Materials, pp. 2369-2403, 2009.
- [3] TK, E. W. and Michael, K., "Composites market report 2016 market developments, trends, challenges and opportunities," AVK Carbon Composites, pp. 1-46, 2016.
- [4] Lucintel., "Growth Opportunities in Carbon Fiber Market 2010 - 2015," pp. 440, 2011.
- [5] TSNE, ANSYS Fluent User's Guid, ANSYS Co., Seoul, 2018.