탄화로 내 탄소섬유의 이송속도 변화에 따른 내부유동 특성에 관한 연구

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

A Study on the Internal Flow Characteristics according to the Feed Velocity Variation of Carbon Fiber in Carbonization Furnace

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

요 약

본 논문은 탄화로(Carbonization Furnace; CF) 내 탄소섬유의 이송속도(v_t) 변화에 따른 탄화로 내부의 유동특성을 분석한 것이다. 탄소섬유의 이송속도는 $0.00\,\mathrm{m/s}$, $0.02\,\mathrm{m/s}$, $0.04\,\mathrm{m/s}$, $0.06\,\mathrm{m/s}$, $0.08\,\mathrm{m/s}$, $0.10\,\mathrm{m/s}$, $0.12\,\mathrm{m/s}$, $0.14\,\mathrm{m/s}$ 이며 해석에 사용된 작동유체는 질소가스(N_2)이다. 주 유입구를 통해 유입되는 질소가스의 질량유량은 $0.001\,\mathrm{kg/s}$ 이며 왼쪽 실링 챔버와 오른쪽 실링챔버의 측면으로 각각 $0.00068\,\mathrm{kg/s}$, $0.00043\,\mathrm{kg/s}$ 의 유량이 추가로 공급된다. 왼쪽 실링 챔버와 오른쪽 실링챔버의 토출구 압력은 각각 대기압이며 주 배출구의 토출압력은 $-100\,\mathrm{paz}$ 설정하였다. 결과적으로 탄화로 내 탄소섬유의 이송속도가 $0.10\,\mathrm{m/s}$ 이상일 경우 탄화로 내부의 유동흐름은 유사한 경향을 보였으나 토출구의 정압과 속도는 불규칙한 값을 나타내었다. 특히 이송속도가 $0.12\,\mathrm{m/s}$ 일 경우 주 토출구의 평균 속도는 $0.049\,\mathrm{m/s}$ 로서 탄소섬유가 이송되는 전 속도구간에서의 평균 값인 $0.033\,\mathrm{m/s}$ 와 비교하여 67.35% 상승하여 불안정한 유동구조를 형성하였다. 따라서 탄화 공정 시 탄화로 내에서 발생되는 가스의 안정된 토출을 위해서는 탄소섬유의 이송속도를 $0.06\,\mathrm{m/s}$ 와 $0.10\,\mathrm{m/s}$ 사이로 설정해야 한다고 판단된다.

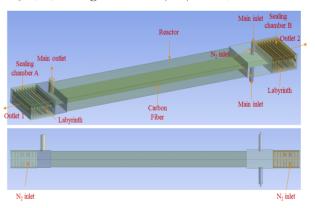
1. 서론

탄소섬유는 열전도성과 인장강도 및 압축강도가 높고 경량화가 가능하여 전 세계적으로 주목받는 소재 중 하나이다. 특히 차량용 브레이크 디스크, 선박용 프로펠러, 풍력발전용 블레이드 및 다양한 경량 소재부품 분야에 적용되는 등 활용도가 매우 높다. [1, 2] 기존의 탄소섬유에 대한 연구는 대부분 섬유조직의 열전도도와 강도 등 물성치를 개선하기 위한 것이며 탄소섬유 개발을 위해 탄화로 내부로 유입되는 작동유체의 거동에 대한 연구는 미흡한 실정이다. [3,4] 특히 탄화로 내탄소섬유의 이송변화가 탄화로 내부유동에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 탄화로 내탄소섬유의 이송속도(fiber feed velocity; v_f)를 변화시켜가면서단화로 내부로 유입된 기체의 흐름과 유동구조를 모사하고유동특성을 분석함으로써 고효율 탄소섬유를 개발하기 위한기초자료를 얻고자 한다.

2. 수치해석

그림 1은 본 연구에 사용된 탄화로(Carbonization Furnace; CF)의 형상과 수치해석을 위한 경계조건을 나타낸 것이다. 탄화로는 주 흡기구 2개와 주 배기구 1개 그리고 2개의

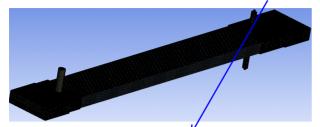
실링 챔버(sealing chamber A, B), 반응기(reactor)로 구성



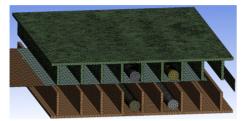
[그림 1] 탄화로 형상과 경계조건

된다. 좌·우 실링 챔버 측면에는 각각 4개의 보조 유입구가 있으며 중심단면 양쪽 끝에는 각각 1개의 보조 출구(outlet 1, 2)가 존재한다. 탄화로 중심에는 탄소섬유가 존재하는데 이는 우측 실링챔버에서 좌측 실링챔버로 이송이 가능하도록 구현된 것이다. 탄화로의 폭과 길이는 각각 130 cm와 6 m이다. 탄화 공정 시 탄화로 내의 섬유조직의 연소과정을 차단하기 위해 작동유체는 불활성 질소가스(N₂)를 사용하였다. 대부분의 질소가스는 노(魔)의 상부와 하부에 있는 2

개의 주 흡기구를 통해 유입되고 1개의 주 배기구를 통해 토 출된다. 탄화로 내부의 가스압력은 주변 대기압보다 높으며



[a] 해석모델 격<mark>사</mark>계



[b] 실링 챔버 격자계 [그림 2] 탄화로 격자계

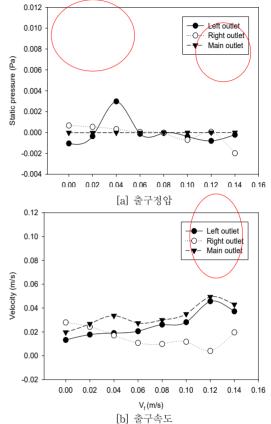
탄소섬유의 선단(先端)과 미단(尾端)은 두 개의 실링 챔버에 의해 고정된다.

그림 2는 탄화로에 격자를 구성한 것이다. 사용된 격자는 정렬구조의 정사면체 격자이며 격자수는 5.489.133개이다. 작동유체인 질소가스는 이상기체로 가정하였다. 흡기구와 배기구의 경계조건은 각각 질량유량(kg/s)과 대기압, -100 Pa(주 배기구)로 설정하였으며 벽면에서의 경계조건은 no-slip condition을 적용하였다. 탄소섬유는 우측에서 좌측 으로 이송되는 다공성 매질로 처리하였으며 v_f는 0.00 m/s, $0.02 \,\mathrm{m/s}$, $0.04 \,\mathrm{m/s}$, $0.06 \,\mathrm{m/s}$, $0.08 \,\mathrm{m/s}$, $0.10 \,\mathrm{m/s}$, $0.12 \,\mathrm{m/s}$, 0.14 m/s이다. 해석방법으로는 탄화로 내부의 복잡한 유동 흐름을 모사하기 위해 Shear Stress Transport(SST) k-ω 난류모델을 사용하였다. 압력과 속도의 보정을 위해서는 압 력-속도 커플링 방법을 사용하였으며 압력, 운동량, 난류 운 동에너지 및 소산율에 대해 2차승(second-order scheme) 이 산화 기법을 적용하였다. 수치계산을 위해 사용한 해석용 프로그램은 ANSYS-FLUENT 2020 R2이며 해석결과의 수렴오차(convergence tolerance)는 0.1이다. 5 이러한 해석 적 방법을 통해 본 연구에서는 탄화로 내 탄소섬유의 v_t를 변화시켜가면서 탄화로 내부의 유동구조를 분석하고 유동 특성을 파악하였다.

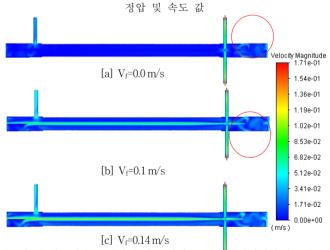
3. 결과 및 고찰

그림 3은 탄화로 내 탄소섬유의 v_f 변화에 따른 탄화로 출구의 평균 정압과 평균 속도 값을 나타낸 것이다. v_f 가 0.04 m/s이하 그리고 0.12 m/s이상일 경우 토출되는 질소가스의 정압과 속도 값은 불규칙한 경향을 보였으며 특히 이러한 현상은 우측 실링 챔버의 출구(outlet 2)에서 나타났다. 이

는 주 유입구(main inlet)를 통해 유입된 질소가스가 우측 실링 챔버의 보조 유입구와 충돌하고 복잡한 유동형태를



[-] 그림 3] 탄소섬유의 v_f 변화에 따른 탄화로 출구의



[그림 4] 탄소섬유 v_i 변화에 따른 탄화로 중심 $^{\bullet}$ 단면에서의 속도분포

형성한 후 우측의 보조 출구로 토출되기 때문이다. 반면 주토출구(main outlet)를 통해 유출되는 질소가스의 정압은 유사한 값을 보였으며 속도 값은 v_f 가 0.10~m/s일 때까지 대체적으로 안정된 결과를 나타내었다. v_f 가 0.12~m/s일 경우주 토출구의 평균 속도 값은 0.049~m/s이었다. 이 수치는 탄

소섬유의 이송속도 전 구간에서의 평균 속도 값인 0.033 m/s와 비교하여 67.35% 상승한 것으로서 상당히 큰 오차율을 보였다. 따라서 탄화 공정 시 탄화로내에서 발생된 가스의 안정된 토출을 위해서는 v_f 를 $0.06\,\mathrm{m/s}$ 와 $0.10\,\mathrm{m/s}$ 사이로 설정할 필요가 있다고 판단된다.

그림 4는 탄화로 내 탄소섬유의 v_f 변화에 따른 탄화로 내부의 속도분포를 중심단면에서 나타낸 것이다. 탄소섬유의 v_f 가 0.00~m/s일 경우 질소가스의 속도는 탄화로 중심의 탄소섬유 근처에서도 낮은 값을 보인 반면 0.10~m/s이상에서는 높게 나타났다. 또한 v_f 가 0.1~m/s과 0.12~m/s에서는 속도분포 경향이 유사하였으며 우측 실링 챔버의 보조 출구 (outlet 2) 근처에서는 복잡한 난류유동(turbulence flow)과 와류(vortex flow)가 발생하였다.

4. 결론

본 연구는 탄화로 내 탄소섬유의 이송속도 변화에 따른 탄화로 내부의 유동특성을 분석한 것으로서 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄소섬유의 이송속도가 0.10 m/s이상일 경우 토출구의 정압과 유속은 불규칙한 값을 나타내었다.
- 2) 주 토출구의 정압은 탄소섬유의 이송속도와 무관하게 유사한 값을 보인 반면 실링 챔버 근처에서는 유입된 질소가스가 보조 유입구와 충돌한 후 복잡한 유동구조 를 형성하였다.
- 3) v_f가 0.12 m/s일 경우 주 토출구의 평균 속도 값은 탄소 섬유의 이송속도 전 구간의 평균 속도 값과 비교하여 67.35% 상승하였다.
- 4) 따라서 탄소섬유의 이송속도를 0.06 m/s와 0.1 m/s 사이로 설정할 경우 탄화 공정 시 발생되는 가스의 안정적 인 토출을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지원사업인 소재부품기술 개발사업의 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.