

탄소섬유의 탄화 공정에 대한 실링 챔버 내 유로형상의 영향

고동국*, 압드엘모타립 하마다**, 김민우**, 이교우**, 임익태***†

*전북대학교 기계공학과, **전북대학교 기계설계공학부

e-mail: itim@jbnu.ac.kr

Effect of Labyrinth Shape in Sealing Chamber for the Carbonization Process of Carbon Fiber

Dong-Guk Ko*, Hamada Abdelmotalib**, 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

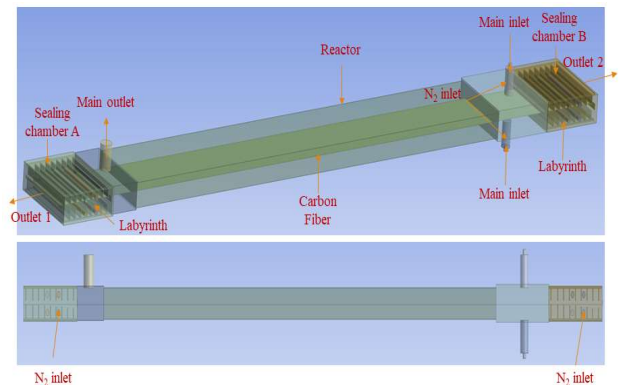
본 논문은 저온 탄화로(LTE) 내 실링 챔버의 유로 형상 변화가 탄소섬유의 탄화 공정에 미치는 영향을 분석한 것이다. 유로 사이의 배플(baffle) 수와 배플과 배플 사이의 간격(clearance) 그리고 상·하부의 배플 길이에 따른 노 내부의 질소가스(작동유체)의 거동을 파악하고 유동구조가 탄화 공정에 미치는 영향을 분석하였다. 상부면과 하부면 사이의 배플 간격이 일정할 경우 챔버에 큰 와류와 재순환영역이 발달하였다. 그 결과 상·하부면의 배플과 배플 사이의 유동간격을 배플길이의 1/4로 줄일 경우 섬유조직과 질소가스의 혼합률이 증가하고 공정 효율성이 상승하여 가스 배출량을 60.8%저감시킬 수 있었다.

1. 서 론

탄소섬유는 인장강도와 압축강도가 높으며 열 전도성이 우수하고 경량화가 가능하여 전 세계적으로 주목받는 소재이다. 따라서 자동차와 항공기의 본체와 브레이크 디스크, 선박용 프로펠러, 풍력발전용 블레이드 및 다양한 운동기구에 널리 사용되는 등 활용도가 매우 높다.^[1,2] 대부분의 탄소섬유에 관한 연구는 섬유조직의 물성치 개선에 관한 것이며 탄소섬유 개발을 위한 탄화로 내부에서 작동유체의 거동에 대한 연구는 미흡한 실정이다.^[3,4] 특히 실링 챔버 내 유로형상이 탄소섬유의 탄화 공정에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 탄화로 실링 챔버내 유로의 형상을 변화시켜가면서 챔버내로 유입된 기체의 흐름과 유동구조를 조사하고 유동특성을 분석하여 고효율 탄소섬유 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 수치해석

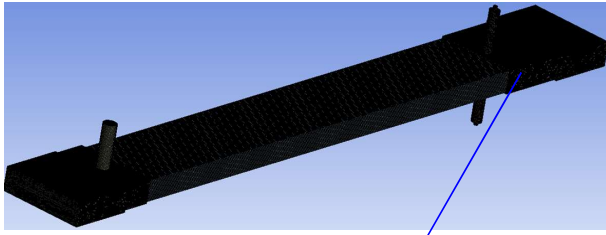
그림 1은 본 연구에 사용된 저온 탄화로(Low-Temperature Carbonization Furnace; LTF)의 형상과 수치해석을 위한 경계조건을 나타낸 것이다. 탄화로는 주 흡기구 2개와 주 배기구 1개 그리고 2개의 실링 챔버 유로(sealing chamber labyrinth A, B)로 구성되며 탄화로 중심에는 탄소섬유가 존재한다. 탄화로의 폭과 길이는 각각 130cm와 6



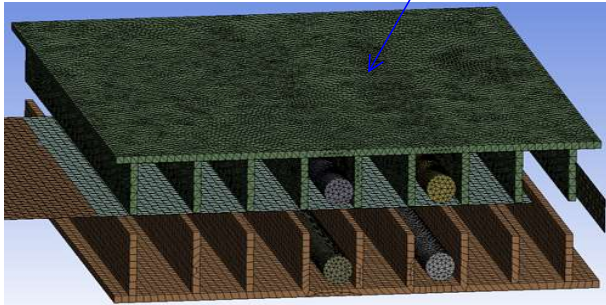
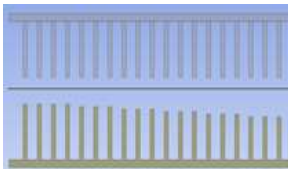
[그림 1] 저온 탄화로 형상과 해석 경계조건

m이다. 탄화 공정 시 탄화로 내의 섬유조직의 연소과정을 차단하기 위해 작동유체는 불활성 질소가스(N_2)를 사용하였다. 대부분의 질소가스는 노(爐)의 상부와 하부에 있는 2개의 주 흡기구를 통해 유입되고 1개의 주 배기구를 통해 토출된다. 탄화로 내부의 가스압력은 주변 대기압보다 높으며 섬유조직의 선단(先端)과 미단(尾端)은 두 개 실링 챔버에 의해 고정된다.

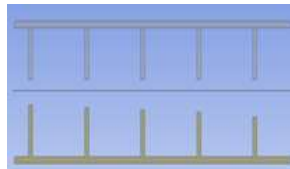
그림 3은 저온 탄화조에 격자계를 구성한 것이다. 사용된 격자는 정렬구조의 사면 체격자이며 격자수는 5,489,133개이다. 작동유체인 질소가스는 이상기체로 취급하였다.



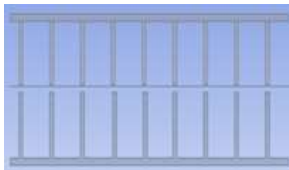
[a] 전체 해석모델에 대한 격자계

[b] 실링 챔버내 격자계
[그림 2] 저온 탄화로 격자계

[a] 모델 A 형상



[b] 모델 B 형상



[a] 모델 C 형상

[그림 3] 실링 챔버 내 다양한 유로형상

흡기구와 배기구의 경계조건은 각각 질량유량(kg/s)과 대기압으로 설정하였으며 벽면에서의 경계조건은 no-slip condition을 적용하였다. 탄소섬유는 120m/hr의 속도로 우측에서 좌측으로 움직이는 다공성 매질로 처리하였으며 탄화로 내부의 복잡한 유동흐름을 모사하기 위해 Shear Stress Transport(SST) $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. 압력과 속도의 보정을 위해서는 압력-속도 커플링 방법을 사용하였으며 압력, 운동량, 난류 운동에너지 및 소산율에 대해 2차승(second-order scheme) 이산화 기법을 적용하였다. 수치계산을 위해 사용한 해석용 프로그램은 ANSYS-FLUENT 2020 R2이며 해석결과의 수렴오차(convergence tolerance)는 0.001이다.^[5]

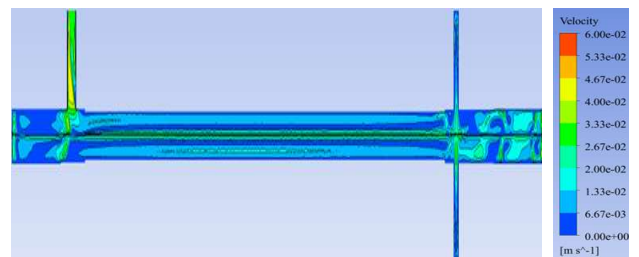
본 연구에서는 실링 챔버내 유로형상이 탄화로 내 가스유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 유로의 배플(baffle) 수와 배플과 배플 사이의 간극(clearance), 상·하부 배플길이를 변화시켜가면서 내부유동을 분석하였다. 해석모델은 그림 3과 같이 세 가지 서로 다른 형상이다. 모델 A는 배플수를 기본모델인 9개에서 19개로 증가시킨 것이며 모델 B

는 9개에서 5개로 감소시킨 것이다. 또한 모델 C는 기본모델의 상·하부 배플길이를 1/2로 줄인 것이다.

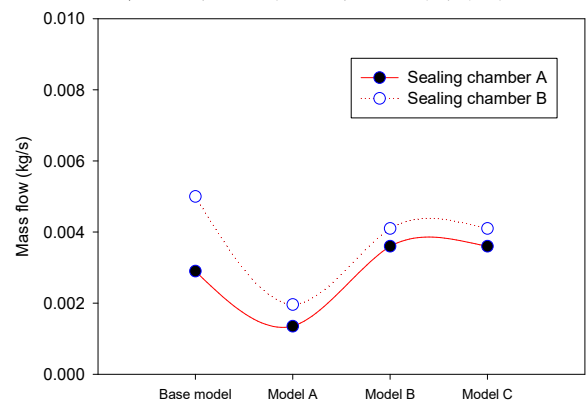
3. 결과 및 고찰

그림 4는 탄화로 내 가스의 속도분포를 중심단면에서 나타낸 것이다. 가스의 유동속도는 탄소섬유 시트가 왼쪽으로 이동함에 따라 탄화로 내 중심부분에서 높게 나타났으며 증가하였다. 주 배기구를 통한 가스의 출구속도는 탄화로 내의 압력과 대기압과의 압력차로 인해 상승하였다. 또한 배기구를 통한 토출가스는 주 배기구의 박리(separation)와 역압력구배(back pressure gradient)로 인해 후류(wake)가 발생하고 왼쪽으로 치우치는 유동형태를 보였다. 주 배기구를 통해 토출되는 가스의 질량유량은 0.0017kg/s로서 유입 가스의 전체 질량 대비 17.7%를 차지하였으며 그 외 가스는 좌우 실링 챔버 측면으로 각각 0.0029kg/s(20.2%), 0.0050kg/s(52.1%) 배출되었다.

그림 5는 실링 챔버 내 유로형상 변화에 따라 실링 챔버 A와 B의 보조 배기구(outlet 1, 2)를 통해 토출되는 가스의 질량유량을 나타낸 것이다. 실링 챔버 A의 보조 배기구를 통해 토출되는 가스의 배출량은 모델 A의 경우 기본모델과 비교하여 53.5% 낮은 반면 모델 B와 C의 경우 각각 19.5% 높게 나타났다. 실링 챔버 B에서의 토출가스 배출량은 모델 A, B, C 전부 기본모델과 비교하여 적은 값을 보였으며 특히 모델 A의 경우 기본모델보다 60.8% 적게 나타났다. 따라서 유로내 배플을 조밀하게 설치할 경우 탄소섬유 시트와 질소가스의 상호 유동교란(flow disturbance)이 활발하



[그림 4] 저온 탄화로 중심 단면에서의 속도분포



[그림 5] 실링 챔버 출구의 질량유량에 대한 유로형상의 영향

여 섬유조직의 탄화공정에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 저온 탄화로 실링 챔버내 유로의 형상변화가 탄화 공정에 미치는 영향을 분석하기 위해 탄화로 내 작동유체(질소가스)의 유동구조를 모사하고 유동특성을 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 실링 챔버내 상·하부면의 배플과 탄소섬유 시트의 간격이 넓을 경우 큰 소용돌이와 재순환 영역이 형성된 반면 간격이 좁을 경우 작은 소용돌이가 발달하였다.
- 2) 실링 챔버내 유동공간을 배플길이 대비 1/4로 줄일 경우 작동유체의 토출유량을 60.8% 줄일 수 있으며 유동흐름에 의한 탄소섬유의 탄화공정에 효과적일 것으로 예상된다.

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.