

강제 대류 온도기울기(F-TG) CVI 법 (프로판으로부터 C/C 복합체 제조)

S.Vaidyaraman, W. J. Lackey, and P. K. Agrawal, Carbon, **34(5)**, 609-617, (1996)

요약

강제대류 온도기울기(F-TG) CVI법에 의한 C/C 복합체 제조에 관한 연구로 2³ 회수의 실험이 행해졌다. 원료로서 수소로 희석시킨 프로판이 사용되었다. 독립변수로는 프리폼 지지대 하단부의 온도, 시약농도, 전체 유속이었다. 종속변수로는 침투시간, 최종기공도, 질량증가속도, 침투의 균일성이었다. 침투시간은 프리폼의 온도, 시약의 농도에 영향을 받았다. 침투 시간은 작게는 7시간에 이루어졌다. 만약 침투 공정이 정해진 압력강하에 도달할 때까지만 진행된다면 최종 복합체의 벌크밀도는 조작 조건에 무관하였다. 주어진 복합체 내 위치에 따른 밀도의 차이는 $\pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ 이하이었다. 증착효율은 3-14%로 온도에 따라 증가하였지만 유속에 따라 감소하였다. 복합체의 고온부와 저온부 가까이의 코팅두께 값이 프로판으로부터 탄소를 증착시키는 속도상수를 계산하는데 사용되었다. 활성화 에너지는 23.6 kcal/mol 이었고, 반응속도상수는 $\ln k_s = 2.2 - 23.6/RT$ 이었다.

1. 서론

C/C 복합체는 섬유강화 복합체의 바람직한 특성 즉 고강도, 단단함, 질감, 그리고 고온에서 강도를 유지하고 크립과 열충격 저항이 있는 탄소의 단열특성을 결합한 독특한 물질이다. 이 물질은 로켓 노즐, 항공기 브레이크 패드, 단열재 등에 쓰인다.

탄소 복합체의 제조 공정 방법은 매우 비효율적이고 느리게 진행된다. 이러한 한계점은 복합체의 가격을 올리고, 또한 이용을 제한하게 한다. 그러므로 빠르고 경제적으로 탄소 복합체를 제조하는 공정을 개발할 필요가 있는 것이다. 강제 대류 온도기울기 화학 증기 침착 (FCVI) 공정에 의해 프로필렌, 프로판, 메탄 등을 시약으로 C/C 복합체 제조할 수 있다. 그리하여 공정 시간을 3 시간까지 줄일 수 있었다. 현재의 연구는 프로판을 사용했을 때의 FCVI 공정을 최적화 하기 위해 수행되었다. 이러한 목적을 위해 FCVI 공정 변수의 영향을 정성적으로 이해하는 방향으로 연구가 추후되었다. 즉 온도, 프로판 농도, 유속이 침착 공정과 침착시킨 복합체의 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험 내용

실험 장비와 실험 순서에 대한 자세한 서술은 다른 문헌에 이미 설명되어졌다. 간단히 말하면 프리폼은 T-300 탄소 천으로 짜여진 직경 4.8cm, 면을 0-30-60° 로 배열시킨 40층으로 이루어졌다. 이 층들은 그라파이트 프리폼 지지대에 적층 되었다. 프로판을 이용한 탄소 증착을 위해서 제 3형 프리폼 지지대가 가스 주입구 위 7.6 cm 에 위치했다. 프리폼 지지대의 높이는 프리폼의 온도와 전체의 온도분포에 영향을 준다. 제 3형 지지대에 준비된 프리폼의 고온부와 저온부의 온도차는 150 °C 이다.

프리폼 하단부는 냉각수에 의해 냉각되는 가스 주입구에 의해 냉각되었고, 프리폼의 상단부는 반응로에 의해 가열되어져 온도기울기가 생기게 된다. 압력기울기가 가스가 프리폼

을 통과하게 해준다. 주입가스는 일반적으로 회석제로서 수소가 첨가된 프로판(99.5% 순수) 가스로 이루어져 있다. 증착이 진행됨에 따라 기공도가 줄어들게 되고 이는 배압(back pressure)을 증가시키는 원인이 된다. 운전은 일반적으로 프로판 가스 100 cm³/min과 수소 100 cm³/min로 이루어진 가스 흐름에서 배압이 ~156 kPa에 도달하게 되면 끝나게 된다. 증착시에 프리폼의 윗부분과 아래 부분은 K-형의 열전대에 의해 관찰되었다. 증착된 복합재는 반응로를 냉각시킨 후에 지지대로부터 제거된다.

각 복합재의 부피는 메탄올($\rho=0.79 \text{ g/cm}^3$)을 이용한 아르키메데스의 원리에 의해 측정되었다. 열린 기공의 부피는 메탄올로 채워진 복합재의 무게를 측정함으로써 계산된다. 이 두 값들은 벌크 부피를 얻기 위해 더해진다. 증류수로 위의 과정을 반복하여 벌크 부피를 얻었다. 전체 기공도는 증착물 밀도가 1.9 g/cm³ 라고 가정하고 계산되었다. 침투의 균일화를 결정하기 위해 복합재는 10 mm 길이, 4 mm 가로, 2 mm 두께로 잘라졌다. 이 잘라진 조각의 자세한 위치는 문헌에 나와 있다. 각 조각의 밀도는 무게와 부피를 이용하여 구한다. 조각의 부피는 조각의 칫수를 이용하여 계산한다.

각 복합재 면의 전체 단면은 에폭시로 싸여지고 연마된다. 이렇게 연마된 면은 축과 반경 방향의 위치의 함수로서 코팅 두께를 측정하기 위하여 전자 현미경으로 관찰되었다.

2.1. 실험 장치와 자료 분석

실험장치 설계는 다른 문헌에 설명되어 있다. FCVI 공정을 연구하기 위해 두 개의 중심 점을 포함한 2³ 개의 실험이 선택되었다. 연구되어진 독립변수들은 프리폼 하단부의 온도, 프로판의 농도, 그리고 전체 유속을 포함한다. Table 1은 각 독립변수들의 최고, 최저, 중간 값을 보여주고 있다. 이 값들은 프로판 실험에서 실행 가능한 연구에 기반을 두었다. Table 2는 각 실험의 공정 조건이 나와있다. 프리폼 하단부의 온도는 침투과정동안에 10-15°C 사이로 변했다. 분석을 위해서 시간에 대해 평균 온도가 사용되었다. 본 연구에서 프리폼 위의 압력은 1기압으로 고정되고, 초기 프리폼 기공도는 50%이었다.

증착 공정의 종속 변수들은 공정과 생성물의 필요조건을 기반으로 선택되었다. 여기에는 증착시간, 최종 기공도, 무게 증가 속도, 치밀화의 균일화, 증착 효율들을 포함되어 있다. 치밀화의 균일성은 복합재 표본에서 잘라진 조각의 밀도로부터 확인되었다. 침투시간과 최종 기공도를 줄이는 것이 실험의 목적이고 동시에 증착된 복합재는 균일하게 치밀화되어야 하고 치밀도가 위치에 따라 변하지 않아야 한다.

공정 변수들의 영향이 선형 모델을 이용하여 분석되어졌다. 최종 모델의 선택은 공정의 물리적 현상을 대변하는 모델을 선정하였다.

3. 결과 및 토론

Table 3에 프로판을 시약으로 사용한 11번의 FCVI에서의 침착시간, 질량증가속도, 기공도, 밀도, 침착효율 등이 나타나 있다. 아래에 종속변수와 독립변수와의 관계에 대해 자세히 설명될 것이다.

“TC”(PA-9)를 제외한 모든 증착실험에서 치밀한 탄소복합체가 만들어졌다. 여기서 “TC”는 실험의 온도와 농도가 가장 높은 단계의 값에서 실험이 수행되는 것을 의미한다. 이 실험에서 배압(back pressure)은 증착 2시간 후에 5분만에 1에서 4 psig로 증가하였다. 압력

의 빠른 증가는 복합체의 저온부에서 선택적으로 밀도가 높아지기 때문이다. 이는 낮은 유량 즉 긴 체류시간에 의해 야기되는 것이고, 그 결과로 프리폼의 다른 한 쪽면으로 가스가 흐르는 것을 방해하게 된다. 그래서 프리폼 상단부의 25 개 섬유층이 침착되지 않아서 쉽게 분리되는 불균일한 침착을 초래하게 된다. 그래서 이러한 실험은 극단적인 행태를 나타내므로 “TC” 실험없이 통계분석을 이끌어냈다.

Table 1. List of independent variables for infiltration with propane

Variable	Name	Low Value	Mid Value	High Value	Coded Variables
T	Preform Bottom Temp (°C)	900	950	1000	$(T-950) \div 50$
C	Concentration (%)	25	37.5	50	$(C-37.5) \div 12.5$
Q	Total Flow Rate (cm ³ min ⁻¹)	200	300	400	$(Q-300) \div 100$

Table 2. Operating conditions of the FCVI runs with propane

Run Number	Experiment	Actual Values			Coded Values		
		T (°C)	C (%)	Q (cm ³ min ⁻¹)	T _{cod}	C _{cod}	Q _{cod}
PA-2	(1)	903	25	200	-0.940	-1	-1
PA-12	(1)	903	25	200	-0.940	-1	-1
PA-4	T	1008	25	200	1.153	-1	-1
PA-14	C	901	50	200	-0.984	1	-1
PA-9	TC	1001	50	200	1.011	1	-1
PA-10	Q	905	25	400	-0.892	-1	1
PA-13	TQ	1001	25	400	1.011	-1	1
PA-7	CQ	895	50	400	-1.107	1	1
PA-5	TCQ	992	50	400	0.839	1	1
PA-6	TCQ	992	50	400	0.846	1	1
PA-3	Mid	952	37.5	300	0.032	0	0
PA-11	Mid	931	37.5	300	-0.376	0	0

Table 3. Properties of the infiltrated composites

Run Number	Initial Porosity (v/v)	Infiltration Time (h)	Rate of Weight Gain (g h ⁻¹)	Total Porosity (%)	Open Porosity (%)	Density (g cm ⁻³)	Deposition Efficiency (%)
PA-2	47.2	28.3	0.3548	11.7	—	1.609	7.36
PA-12	48.9	34.0	0.3340	10.6	6.1	1.632	6.93
PA-4	49.7	19.0	0.6779	6.8	3.4	1.705	14.06
PA-14	47.9	19.0	0.5817	9.9	5.7	1.645	6.03
PA-9	49.8	2.9	2.5869	—	—	—	26.08
PA-10	49.1	34.0	0.3380	10.0	3.5	1.643	3.50
PA-13	48.1	17.0	0.7073	6.8	6.0	1.704	7.33
PA-7	48.6	18.5	0.6341	8.7	5.2	1.668	3.29
PA-5	49.5	7.0	1.7017	9.2	—	1.659	8.82
PA-6	49.4	7.0	1.7323	8.3	4.6	1.676	8.98
PA-3	48.8	12.5	0.9086	10.0	6.4	1.644	8.26
PA-11	48.9	12.5	0.8961	10.7	5.6	1.631	8.38

3.1. 증착 시간

침착 시간은 프로판이 100 cm³/min, 수소가 100 cm³/min일 때 배압이 5 psig가 되는 시간이 다. 증착 시간은 모든 독립변수가 최고치일 때 가장 짧은 것이 7시간정도였다. 가장 긴 침착 시간인 34시간이 실험 “(1)”과 “Q”에서 얻어졌다. 침착 시간과 조작 변수들과의 관계가 다음과 같이 주어진다.

$$\text{증착 시간} = 17.6 - 6.48T_{\text{cod}} - 6.88C_{\text{cod}} \quad (1)$$

위의 식은 실험데이터와 아주 잘 맞았다. 그러나 독립변수들의 편차는 같지는 않았다.

이는 제한된 실험 자료 수나 반응에서 이차적인 영향을 미치는 것 때문이다. 이차적인 영향은 기존의 실험으로는 예측될 수 없었다. 그러나 어떠한 이차적 영향도 매우 크지는 않을 것이라고 예측한다. 왜냐하면 온도와 농도 향이 침착 시간 변화의 86%를 설명하기 때문이다.

침착 시간은 온도와 원료의 농도에만 영향을 받는다. 그 영향의 크기는 매우 유사하였다. 농도나 온도를 증가시키면 증착 시간이 감소된다. 전체 유속은 침착 시간에 영향을 주지 않는다. 프로판의 침착 시간은 프로필렌의 실험 때보다 두배 정도 더 길었다. 예를 들면 "T" 실험은 프로판의 경우 19시간에 비해 프로필렌의 경우에는 11시간이 소요되었다. "TCQ" 실험의 경우에는 프로필렌의 경우에 11시간에 비해, 프로판의 경우 7시간이 소요되었다.

3.2. 질량증가속도

질량증가속도는 총 질량의 증가를 증착 시간으로 나눈 것으로 계산된다. 이 변수는 CVI 실험의 질량증착속도로 간주될 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\text{질량증가속도} = 0.881 + 0.374T_{\text{cod}} + 0.361C_{\text{cod}} + 0.205T_{\text{cod}} \cdot C_{\text{cod}} \quad (2)$$

질량증가속도는 온도, 농도, 그 둘의 이차적인 상호관계에 영향을 받는다. 이차적인 상호관계는 낮은 온도 실험 때와 비교했을 때 높은 온도 실험에서 농도를 변화시킬 때 질량증가속도에 더 큰 영향을 주는 것을 설명한다. 다시 말해서 총 유속은 질량증가속도에 영향을 주지 않는다. 유속이 질량증가 속도에 영향을 주지 않는 것은 물질전달이 증착 공정에 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 평균질량증가속도는 프로필렌의 1.5 g/h에 비해 프로판은 0.95 g/h 였다. 프로판 실험에서 더 낮은 질량증가속도를 보이는 것은 다음과 같은 점 때문이다. (1) 이중결합이 없어서 느리게 진행되는 탄소 증착과 (2) 고온부 온도가 제 2형 프리폼 지지대(프로필렌)를 사용했을 때의 온도인 1300℃ 정도인 것과 비교했을 때 제 3형 프리폼 지지대(프로판)를 사용했을 때는 1100℃ 이하라는 것이다. 즉 평균 프리폼 온도는 프로판 침착 때 더 낮았다.

3.3. 기공도와 밀도

전체와 열린 공극율은 각각 7-11%, 3.5-6.5% 범위였다. 앞에 언급되었듯이 전체 최종 공극율은 매트릭스 밀도가 1.9 g/cm³라고 가정하고 결정된 값이다. 평균 벌크밀도는 1.66 g/cm³이었다. 최소, 최대치는 1.71, 1.61 g/cm³이었다. 벌크밀도는 독립변수와 상관없이 분석되었는데, 벌크밀도는 조작 조건에 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다. 이것은 배압이 고정치에 도달했을 때 침착공정을 멈춘 실험들의 결과이다. 프로필렌에서 관찰된 것과 같이 저온부가 미리 과도하게 침투되지만 않는다면 배압 측정치가 침착 공정의 끝이라는 것은 신빙성 있는 방법이었다.

3.4. 밀도 기울기

각 복합체의 다른 부분에서 얻어진 조각의 벌크밀도를 측정하여 치밀화의 균일성을 점검하였다. 위치에 따른 밀도 변화가 Fig. 1에 나타나 있다. 이 그래프는 복합체의 다른 부

분의 밀도에 큰 차이가 없는 것을 보여 준다. 고온부의 밀도가 1.63 g/cm^3 이고, 중간 부분의 밀도는 1.68 g/cm^3 이다. 고온부의 밀도가 낮은 것은 프리폼내 거대 기공의 불균일한 분포에 기인한 것이다. SEM을 통해서 프리폼을 압축하는 동안 압력이 불균일하여 복합체의 고온부에 기공이 더 많았던 것을 관찰하였다. 이 때문에 고온부의 밀도가 낮은 것이었다. 저온부의 밀도는 1.55 g/cm^3 로서 고온부나 중간부분의 것보다 낮았다. 추가적으로 밀도 변화를 분석하기 위하여 시료의 밀도 범위가 계산되었다. 최소와 최대치는 0.12 와 0.23 g/cm^3 이었고, 평균은 0.16 g/cm^3 이었다. 밀도 변화는 프로필렌의 경우보다 약간 작았다. 밀도 변화가 줄어든 것은 프리폼 제3형 지지대를 사용하여 복합체를 걸쳐 온도 변화가 줄었기 때문이었다. 프로필렌의 실험에 사용된 제 2형 지지대의 경우에 고온부가 더 많이 치밀화 되어 가스 유량의 통로를 차단하는 경향이 있었다. 이 때문에 저온부에 더 많은 기공을 가진 구조가 만들어 졌다. 그러나 제 2형 지지대를 사용했을 때는 제 3형 지지대에 비해 프리폼의 평균 온도가 더 높아서 공정 시간을 많이 줄였다. 그래서 침착의 속도가 빨라져서 좋았지만 치밀화의 균일성에 손해가 있었다.

3.5. 증착속도

층 사이나 층 내의 다발내 거대 기공내 코팅 두께는 SEM을 사용하여 측정하였다. 평균 증착속도를 얻기 위하여 코팅두께를 침착시간으로 나누었다. 두께 측정은 저온부로부터의 거리의 함수로서 반경 방향으로 세 위치에서 측정하였다. 이렇게 얻어진 증착속도가 Fig. 2,3,4에 있다. 반경방향 위치는 r/R 로 표시하였다. 증착속도 자료는 프로필렌 연구에서처럼 어떤 일정한 경향을 보이지 않았다. 프로필렌의 경우에는 증착속도가 저온부로부터의 거리에 지수적으로 증가하였다. 이 두 시스템의 행태의 차이는 프리폼내의 온도기울기가 다른 것에 기인한 것이다. 제3형 지지대를 사용한 프로판의 경우에는 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 이었으나, 제 2형 지지대를 사용한 프로필렌의 경우에 저온부와 고온부의 온도 차이는 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 이었다. 이것을 보면 프로필렌의 연구에서 다른 변수보다 온도가 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 평균 증착속도가 프로필렌의 경우보다 프로판의 경우에 훨씬 낮았다. 이것은 프로판 침투의 경우에 고온부의 온도가 낮고, 탄소 증착이 느린 것이 겹쳤기 때문이다. 또한 프로판 침착의 경우에 증착속도 커브가 훨씬 평평한 것으로 나왔다. 즉 주어진 시료의 경우에 최고 증착속도 대 최소 증착속도의 비가 훨씬 낮았다. 예를 들면 "TCQ" 실험의 경우에 그 비가 프로판의 실험에서 1.5 이었고, 프로필렌의 실험에서는 9 이었다. 이것은 프로판의 경우에 온도기울기가 낮고, 결과적으로 더 균일한 밀도가 얻어지는 것이다. 결론적으로 프로판의 경우에 증착속도에서 공간적 차이가 더 작은 것을 알 수 있다.

3.6. 증착효율

증착효율은 프리폼내 증착에 사용된 반응물내 탄소의 양을 말한다. 프로판의 증착효율은 3-14%이었다. PA-9 실험의 증착효율이 높았는데, 그 이유는 복합체의 완전한 치밀화가 끝나기 전에 침착실험이 끝났기 때문이다. 천 형태의 프리폼에 침착하는 동안에 증착효율이 감소한다는 것이 탄소에 대해서는 Vaidyaraman에 의해, 그리고 SiC에 대해서는 Roman에 의해 입증되었다. 프로판의 증착효율이 프로필렌의 증착효율보다 약간 낮았다. 프로판을 사용할 때는 증착효율은 온도에 의해 양으로 영향을 받고, 전체 유속에 대해서는

음으로 영향을 받는다. 결과식은 식(3)이다.

$$\text{증착효율} = 8.1 + 2.91 T_{\text{cod}} - 1.95Q_{\text{cod}} \quad (3)$$

3.6. 반응속도론

거대 기공내 코팅 두께를 측정하여 얻은 각 복합체의 고온부와 저온부의 증착속도 자료는 1차 반응속도상수를 얻는데 사용하였다. 탄소 증착공정은 전형적으로 탄화수소 반응물 농도의 1차 함수이다. 속도상수를 결정하기 위해 수행된 여러 단계의 작업은 다른 논문에 설명되어 있다. 여러 속도상수 자료로부터 얻어진 k_s 값의 자연대수 값이 $1/T$ 에 대해 그려졌고 다음의 식이 얻어졌다.

$$\ln(k_s) = 2.2 - 23,610 / (RT) \quad (4)$$

여기서 k_s 는 단위면적당 속도상수(cm/s), R은 이상기체상수 (cal/mol K), T는 온도 (K).

활성화 에너지는 23.6 ± 5.6 kcal/mol, 이 값은 문헌상의 값 48-60 kcal/mol에 비해 상대적으로 작았다. 이 차이의 이유는 다음 중의 하나라고 사료된다. (1) k_s 를 계산하기 위해 평균 증착속도를 사용하였다. (2) 고온부 근처의 반응물 농도를 예측하기 위해 증착 효율을 사용하였다. (3) 온도 범위가 단지 250 °C이었다.

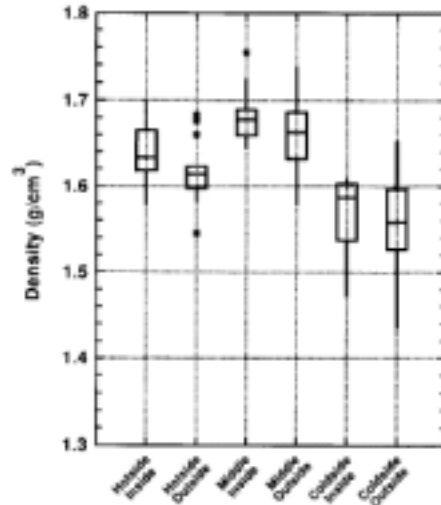


Fig. 1. Bulk density as a function of axial and radial position within composite disk.

Table 4. Bulk density (g cm^{-2}) of slices from composites fabricated using propane

Run Number	Experiment	Hot Side				Middle				Cold Side			
		Inside		Outside		Inside		Outside		Inside		Outside	
PA-12	(1)	1.632	1.617	1.600	1.622	1.647	1.649	1.667	1.609	1.537	1.536	1.522	1.514
PA-4	T	1.616	1.630	1.584	1.615	1.683	1.680	1.629	1.670	1.604	1.610	1.543	1.557
PA-14	C	1.672	1.7	1.66	1.679	1.725	1.702	1.703	1.738	1.587	1.579	1.578	1.526
PA-10	Q	1.633	1.630	1.620	1.62	1.69	1.689	1.659	1.686	1.586	1.605	1.597	1.573
PA-13	TQ	1.663	1.682	1.676	1.682	1.671	1.755	1.701	1.674	1.592	1.600	1.566	1.541
PA-7	CQ	1.602	1.641	1.613	1.544	1.664	1.659	1.598	1.647	1.501	1.534	1.652	1.434
PA-6	TCQ	1.664	1.608	1.598	1.614	1.684	1.675	1.688	1.653	1.555	1.609	1.600	1.625
PA-3	Mid	1.578	1.62	1.593	1.597	1.647	1.643	1.631	1.576	1.533	1.471	1.528	—
PA-11	Mid	1.634	1.681	1.592	1.622	1.682	1.675	1.681	1.658	1.603	1.593	1.511	1.626

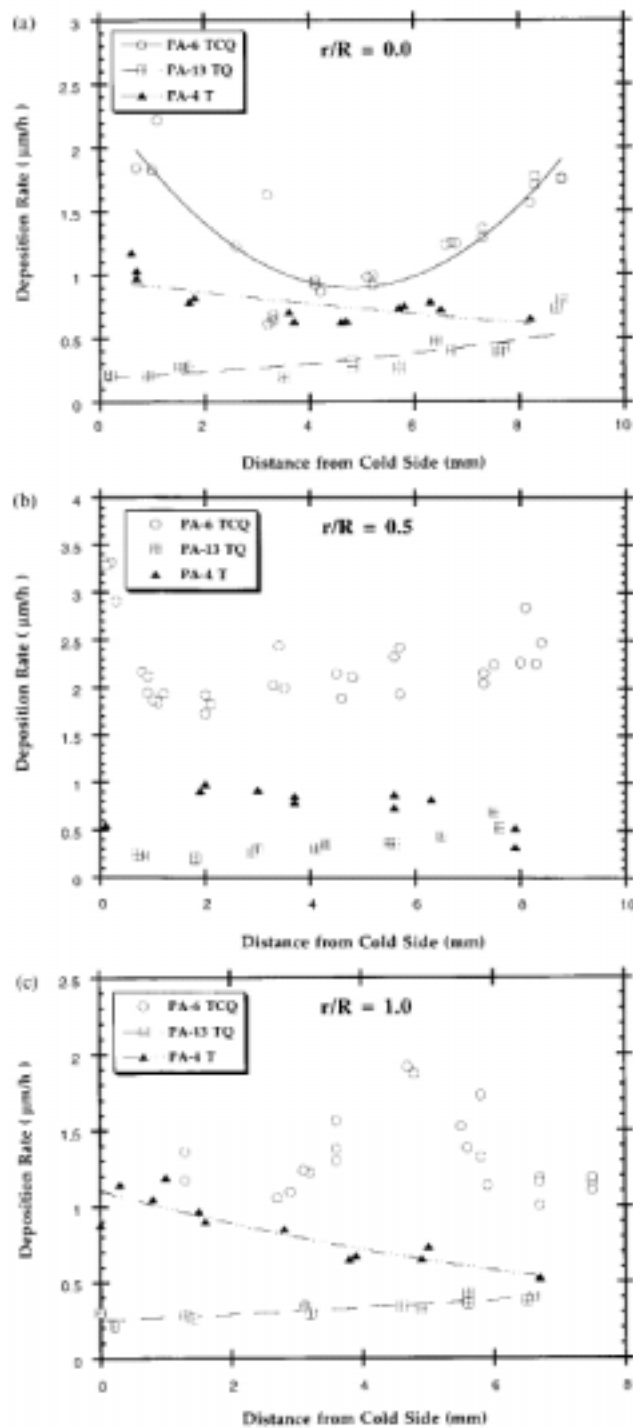


Fig. 2. Deposition rates for experiments at high temperature (a) near the center of the composite disk, (b) between the center and circumference of the composite disk, (c) near the circumference of the composite disk.

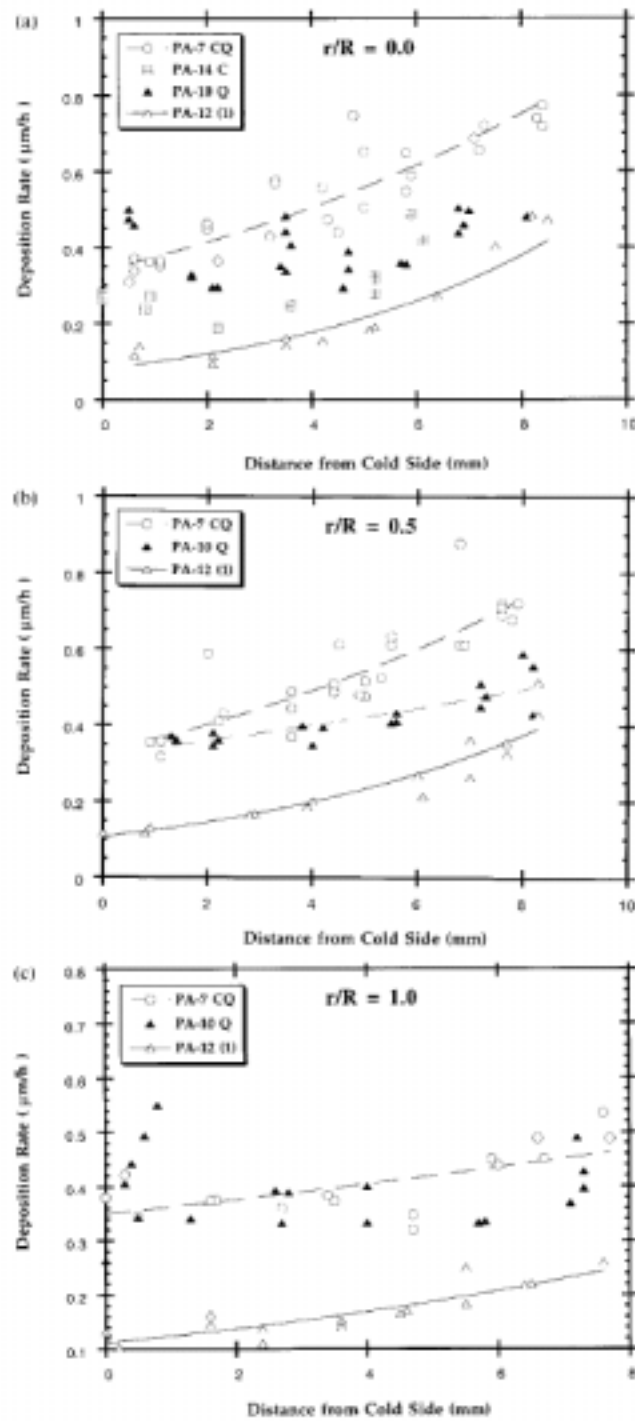


Fig. 3. Deposition rates for experiments at low temperature (a) near the center of the composite disk, (b) between the center and circumference of the composite disk, (c) near the circumference of the composite disk.

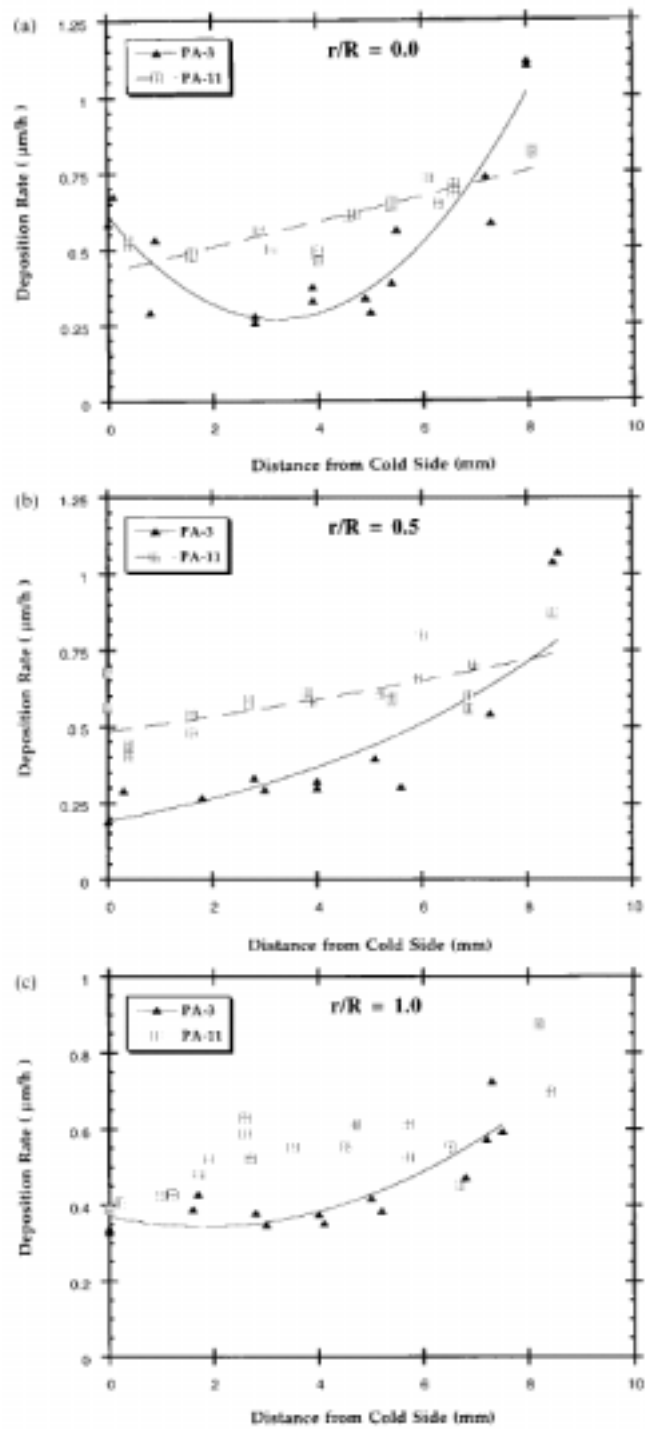


Fig. 4. Deposition rates for midpoint experiments (a) near the center of the composite disk, (b) between the center and circumference of the composite disk, (c) near the circumference of the composite disk.

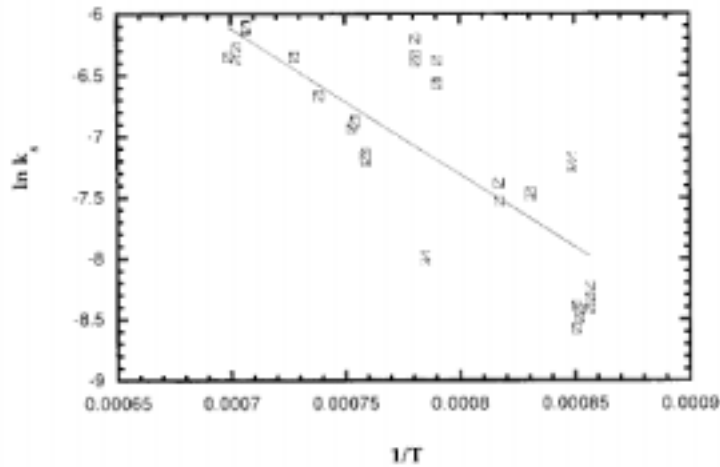


Fig. 5. Arrhenius plot for deposition of carbon in the preforms.

4. 결론

프로판을 사용한 C/C FCVI 공정에 대해 다음의 결론이 얻어졌다.

침투 시간은 단지 프리폼의 하단부 온도와 반응물 농도의 영향을 받는다. 유속은 침투 시간에 영향을 미치지 않는다. 질량 증가 속도는 프리폼의 하단부 온도, 반응물 농도, 그리고 이 두 변수의 상호 관계의 영향을 받았다.

온도, 농도, 유속의 공정 조건이 최대한 되었을 때 최소 침투 시간 7 시간이 얻어졌다. 시약으로 프로필렌 대신에 프로판을 썼을 때 침투 시간은 더 길었다. 이것은 프로판으로부터 탄소의 증착이 원천적으로 더 느리고, 프로판 침투에 사용된 프리폼내 온도 기울기가 더 낮았다는 것 즉 낮은 평균온도 때문이었다.

복합체의 최종 벌크 밀도가 공정 조건에 영향을 받지 않는다는 것은 배압이 침투의 정도를 나타내는 믿을만한 지표라는 것이다.

"TC" 실험에서는 반응물의 높은 체류 시간 때문에 프리폼 저온부에서 선택적인 침투를 보였다.

복합체내 밀도 변화는 평균적으로 $\pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ 이었다.

프로필렌 연구에서보다 프로판으로 제조된 복합체 밀도의 축방향 변화는 적었다. 따라서, 거대 기공내 증착속도는 주어진 복합체내에 위치의 함수로서 일관된 방법으로 변하지 않았다. 축방향 위치와 무관하게 균일 침착이 얻어진 것은 프로판으로 만들어진 복합체내 축방향으로 온도 기울기가 적기 때문이다.

증착속도 자료는 아레니우스 식으로 표현되었다. $\ln(k_s) = 2.2 - 23610/RT$

활성화에너지는 23.6 kcal/mol이었다.