

유전기법을 이용한 속경화 수지 RTM 공정의 경화 모니터링에 대한 연구

박슬기* · 김철환* · 최진호*[†]

A Study on Cure Monitoring of Fast Cure Resin RTM Process Using Dielectrometry

Seul-Ki Park*, Cheol-Hwan Kim*, Jin-Ho Choi*[†]

ABSTRACT: Resin transfer molding (RTM) is a mass production process that allows the fabrication of composites ranging in size from small to large. Recently, fast curing resins with a curing time of less than about 10 minutes have been used in the automotive and aerospace industries. The viscosity of resin is bound up with the degree of cure, and it can be changed rapidly in the fast-cure resin system during the mold filling process. Therefore, it is advantageous to experimentally measure and evaluate the degree of cure because it requires much effort to predict the flow characteristics and cure of the fast curing resin. DMA and dielectric technique are the typical methods to measure the degree of cure of composite materials. In this paper, the resin flow and degree of cure were measured through the multi-channel dielectric system. A total of 8 channels of dielectric sensors were used and resin flow and degree of cure were measured and compared with each other under various pressure conditions.

초 록: RTM은 작은 크기에서 큰 크기의 복합재료를 생산할 수 있는 대량 생산 공정이다. 최근 경화 시간이 약 10분 이내인 속경화 수지가 자동차 및 항공우주 산업에 사용되고 있다. 수지의 점도는 경화 정도와 관련이 있으며, 금형 내부로 충전되는 과정에서 급격히 점도가 변할 수 있다. 따라서 속경화 수지의 유동 특성과 경화도를 해석적으로 예측하는 데 많은 노력이 필요하므로 실험적으로 측정하고 평가하는 것이 유리하다. 복합재료의 경화도를 측정하는 방법은 대표적으로 DMA, 유전기법 등이 있다. 본 논문에서는 다채널 경화 모니터링 시스템을 이용하여 속경화 수지의 유동과 경화도를 측정하였다. 총 8채널의 유전센서가 사용되었으며, 다양한 압력 조건에 따른 금형 내부의 유동과 경화도를 측정하고 상호 비교하였다.

Key Words: 수지이송성형(RTM), 유전기법(Dielectrometry), 소산계수(Dissipation factor), 필터(Filter), 수지(Resin)

1. 서 론

RTM 공법은 금형 내부에 복합재료 프리폼을 적층하고 내부로 수지를 주입하는 공법으로써, 기존의 오토클레이브를 이용하는 진공백 성형에 비해 적은 비용으로 성형 장비의 셋업이 가능하며, 다양한 형상의 복합재료를 성형할 수

있다. 또한, 사용하는 수지의 종류에 따라 수 분내로 경화가 가능하며 대량생산에도 적합하다. RTM 공법을 이용해 제작한 제품의 품질을 향상하기 위해서는 주입하는 수지에 대한 이해가 중요하다. 속경화 수지는 경화 반응이 시작되는 온도가 일반적인 수지에 비해 낮고, 수 분 내로 경화를 완료시킬 수 있으므로 많은 연구가 수행되고 있다. 그러

Received 30 March 2017, received in revised form 28 June 2017, accepted 30 June 2017

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University

[†]School of Mechanical and Aerospace Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: choi@gnu.ac.kr)

나 경화 과정에서 시간에 따른 점성의 변화가 크게 나타난다. 따라서 시간에 따른 속경화 수지의 점성 변화를 정확히 반영하여 유동 해석을 수행하고 수지의 경화 거동을 예측하기는 어렵다. 따라서 금형 내에 유전센서를 삽입하는 실험적인 방법으로 복합재료의 경화 과정을 실시간으로 모니터링하고 경화 온도 및 시간 등을 제어하면 보다 신뢰도 높은 제품을 생산할 수 있다. 복합재료의 경화도를 측정하는 방법에는 DSC(Differential Scanning Calorimetry), DMA(Dynamic Mechanical Analysis), 유전기법(Dielectrometry) 등이 있다. 이중 유전기법은 실제 제품의 성형공정에서 실시간으로 경화도를 모니터링하고 측정할 수 있는 방법으로 알려져 있다.

Kim[1]은 고온 성형용 복합재료의 경화 모니터링을 위하여 유전센서의 열응력 해석과 실험을 수행하였다. 또한, 센서 표면에 크롬 도금을 수행하여 전기적 특성이 우수한 유전센서를 개발하였다. Yeo[2]는 유전기법을 이용해 복합재료 기지재의 온도에 따른 경화 과정을 모니터링을 하였다. Kim[3]은 열경화성 수지 복합재료의 경화도를 모니터링하고 이를 DSC와 상호 비교하였다. Kwon[4]은 유전기법을 이용해 원통형 단일 겹침 접착 조인트의 경화 과정을 모니터링 하고 분석하는 방법에 대해 연구하였다. Skordos[5]는 유전 센서를 이용해 RTM 공정에서 유동 모니터링과 경화 모니터링을 수행하였다. Chin[6]은 RTM에 유전기법을 적용하여 굴착을 하지 않고 지하매설관을 보수 및 보강하는 방법에 대해 연구하였다. Lin[7]은 FEM을 이용해 RTM 공정에서의 대류 현상에 대해 연구를 하였다.

본 논문에서는 속경화 수지를 이용하여 RTM 공법으로 복합재료 평판을 성형하였으며, 유전기법을 이용하여 수지의 유동 및 경화도를 실시간으로 모니터링 하였다. 70°C로 예열된 금형 내부로 수지를 주입할 때, 3가지 주입 압력 조건에 대하여 속경화 수지의 유동 특성 및 경화도를 분석하였다.

2. 실험

2.1 유전센서 제작 및 측정 회로 설계

유전기법은 복합재료 속에 두 개의 전극으로 이루어진 유전센서를 삽입한 후, 교류전기장을 가한다. 이때 복합재료의 수지는 유전특성을 가지므로, 수지 내부의 쌍극자와 이온들이 교류전기장에 응답하여 운동한다. 이때 쌍극자나 이온들이 정렬하거나 이동하는 데 소비되는 에너지의 비를 소산계수(Dissipation Factor)라 칭하고, 이 값의 변화를 추적하여 복합재료의 경화도를 실시간으로 모니터링 및 분석한다. Fig. 1은 수지의 소산계수를 측정하기 위한 유전센서로서, 측정 감도를 향상하기 위해 접촉면적으로 증가시킨 구조로 되어 있다. 또한, 유전센서의 두께는 약 0.125 mm이며, 유연 박막형태로 제작하여 센서 삽입으로 인한 수지의 유동변화를 최소화하였다.

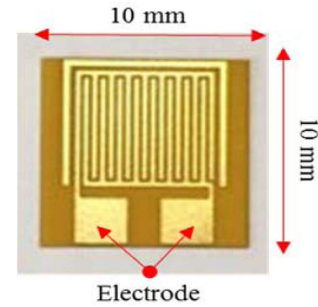


Fig. 1. Dielectric sensor

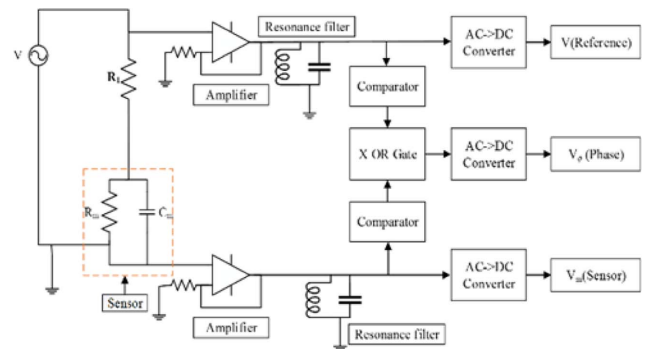


Fig. 2. Schematic diagram of dielectric Circuit

Fig. 2는 소산계수를 측정하기 위한 전용 회로도이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 유전센서를 저항 R_1 과 직렬로 연결한 후, 교류 전압 V 를 인가하여 유전센서에 걸리는 전압 변화를 측정하는 구조로 되어 있다. 이때 복합재료의 수지는 유전 특성을 가지기 때문에 저항(R_m)과 콘덴서(C_m)가 병렬로 연결된 구조로 표현할 수 있다. 교류 전압 V 와 복합재료에 인가되는 전압 V_m 과 위상차 ϕ 를 이용하여 소산계수 D 를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$D = \frac{1}{\omega R_m C_m} \quad (1)$$

여기서 ω 는 함수발생기에서 공급되는 교류 신호의 각속도이며, 수지의 저항과 콘덴서는 각각 식 (2), (3)과 같이 구할 수 있다.

$$R_m = \frac{|V_m/V|}{\cos\phi - |V_m/V|} R_1 \quad (2)$$

$$C_m = -\frac{\sin\phi}{\omega R_1 |V_m/V|} \quad (3)$$

$$\phi = \pi \left(\frac{V_\phi}{5} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 식 (4)의 위상차 ϕ 는 V 와 V_m 이 비교 측정기(Comparator)와 배타적 논리합 게이트(X-OR Gate)를 통과



Fig. 3. Resonance filter

하여 얻어진 전압 값이다. 비교측정기는 입력 교류 신호가 양의 값을 가질 때만 +5 V의 사각파로 출력을 하는 역할을 하며, 비교측정기를 통과한 V 와 V_m 이 배타적 논리합 게이트를 통과하여 위상차 ϕ 를 얻을 수 있다. 최종적으로 V , V_m , V_ϕ 신호는 AC→DC Converter를 거쳐 직류 신호로 변환된다. Fig. 2에서 입력 교류 전압 V 의 주파수와 저항 R_1 은 수지의 종류에 따라 적절히 선정하여야 한다. 본 논문에서는 입력 교류 전원 V 의 주파수 $f = 5 \text{ kHz}$ 로, $R_1 = 2 \text{ M}\Omega$ 로 설정하였다. 이상의 유전회로는 다양한 노이즈 환경에 노출될 수 있으므로, 입력 교류 전원 이외의 신호는 노이즈로 간주할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 $f = 5 \text{ kHz}$ 의 신호만 통과시킬 수 있는 동조 필터를 유전회로의 앞부분에 배치하여 노이즈에 의한 영향을 최소화하였다.

Fig. 3은 본 논문에서 구성한 동조 필터로서, 동조 주파수를 입력 교류 전원과 같은 $f = 5 \text{ kHz}$ 로 설계하였다. Fig. 4는 제작된 경화 모니터링 시스템으로 전원부, 함수 발생기, 노이즈 필터, 출력 조절 단자 등으로 구성돼 있다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 8개의 유전센서 신호를 동시에 측정할 수 있는 8채널 경화 모니터링 시스템을 제작하였으며, 이를 이용하여 금형 내부의 위치별 유동 특성 및 경화도를 분석하였다.

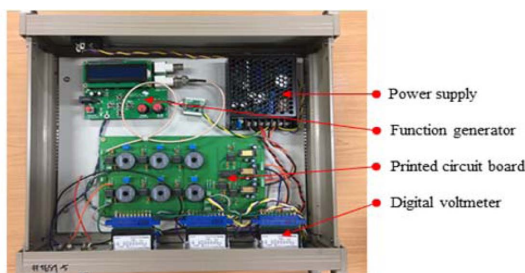


Fig. 4. Manufactured dielectric Circuit



Fig. 5. 8-channel Cure monitoring system

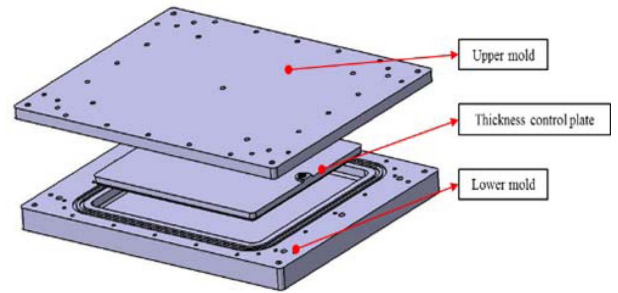


Fig. 6. RTM mold

2.2 RTM 금형 및 실험조건

본 논문에서 사용된 RTM 금형은 Fig. 6과 같다. 금형은 상·하부 금형으로 이루어져 있으며, 중간에 복합재의 두께를 조절하기 위한 평판이 포함되어 있다. 상부 금형의 네 군데에서 수지를 주입하고, 수지 토출구가 중앙에 위치한 구조로 되어 있다.

유전센서는 Fig. 7, 8에서 보는 바와 같이 수지 주입구에서 토출구까지 등 간격으로 상호 대칭적인 8개 지점에 배열하였다. 유전센서는 금형 내부에 적용되는 복합재 사이에 삽입하였으며, 금형 내부로 들어오는 수지의 전기적 특성을 측정하여야 하므로 탄소섬유와의 접촉을 방지하여야

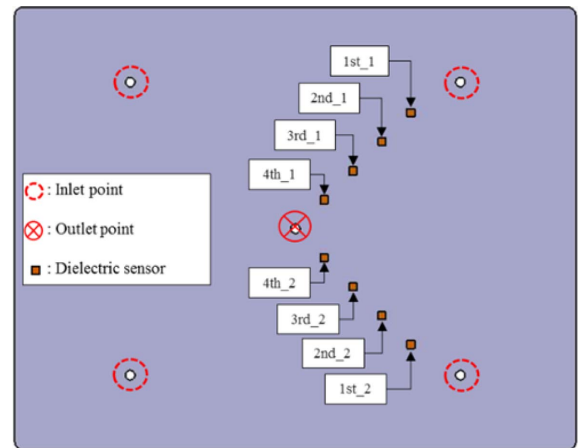


Fig. 7. Sensor configuration

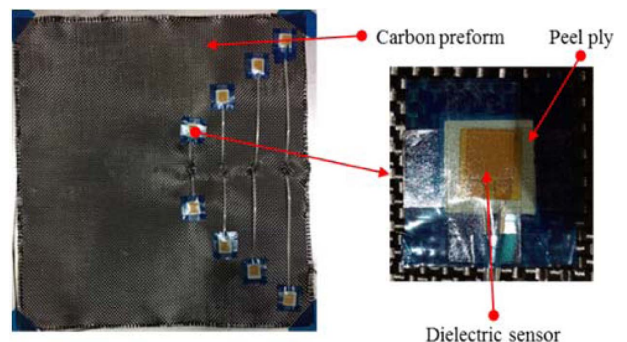


Fig. 8. Mounting position of dielectric sensor

Table 1. Material properties of CF-3327

Property	CF-3327
Fiber strength [MPa]	3,690
Fiber modulus [GPa]	232
Thickness [mm]	0.27 ± 0.05

Table 2. Material properties of SCH-370

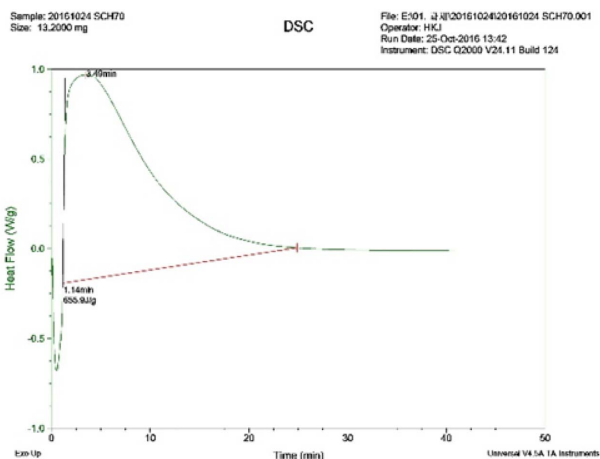
Property	SCH-370R	SCH-370H
Viscosity 25°C [cps]	448	
Viscosity 70°C [cps]	100	
Curing cycle	25°C, 76 min	120°C, 10 min
Gel time 25°C [min]	76	
Gel time 100°C [sec]	210	

한다. 탄소섬유와 유전센서의 접촉을 방지하기 위하여 유전센서와 탄소섬유 사이에 필 플라이(Peel Ply)를 삽입하였다. 금형의 예열 온도는 70°C로 설정하였으며, 0.01, 0.02, 0.04 MPa의 세 가지 수지 주입압력에 대하여 경화도를 측정하였다.

실험에 사용된 탄소섬유는 한국카본사의 CF-3327이며, 속경화 수지는 신아 티앤씨사의 SCH-370R/SCH-370H가 사용되었다. 탄소섬유와 속경화 수지에 대한 물성치는 Table 1과 2에 나타나 있다.

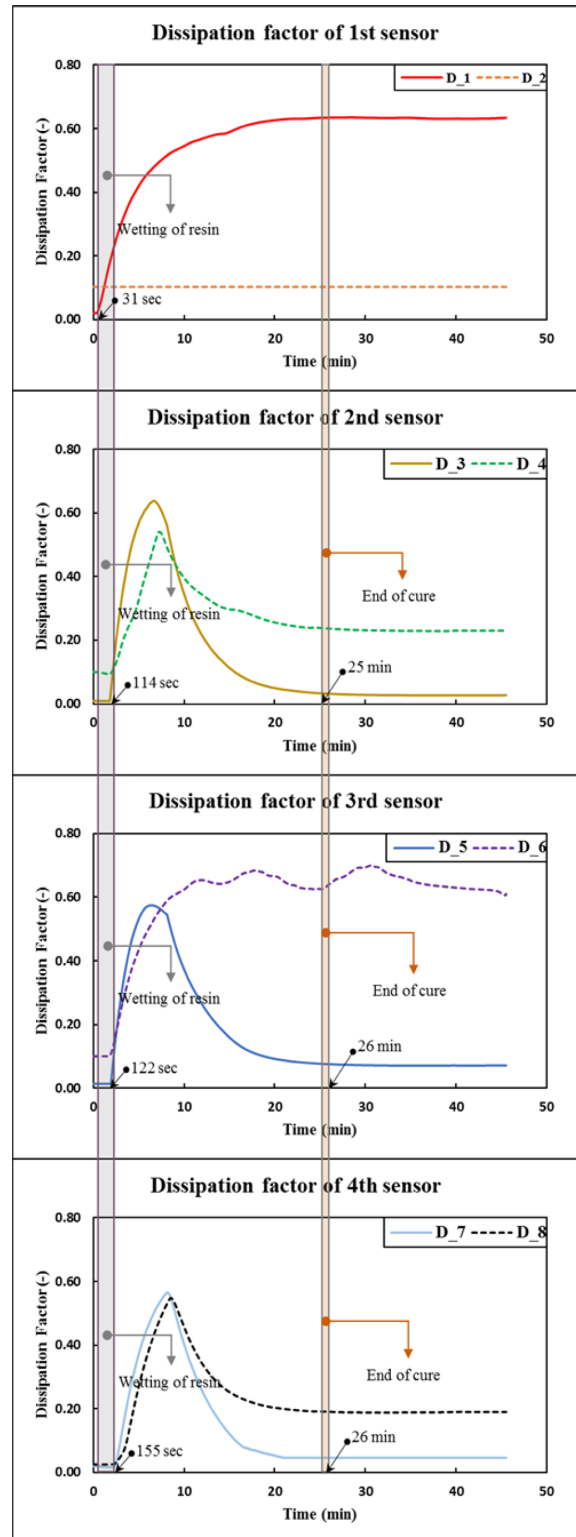
2.3 DSC를 이용한 수지의 특성 분석

실험을 수행하기에 앞서 실험에 사용할 수지의 특성을 파악하고, 유전기법을 통해 측정한 경화도의 타당성을 검증하기 위해 DSC 등온 주사를 수행하였으며, 주사 온도는 70°C로 설정하였다. 등온 주사의 결과는 Fig. 9와 같으며, 수지 혼합물이 약 26분 만에 경화가 완료 된 것을 확인하였다.

**Fig. 9.** Isothermal scan of SCH-370

3. 실험 결과

총 3가지 수지 주입압력 조건에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험결과는 Fig. 10-12에 나타나 있다. 그림에서 Resin

**Fig. 10.** Variation of the dissipation factor (P = 0.04 MPa)

wetting은 유전센서에 수지가 함침된 시점을 나타내고, End of cure는 경화가 종료된 시점을 나타낸다.

Fig. 10은 수지 주입압력을 0.04 MPa로 설정하였을 때의 소산계수 측정 결과이며, 금형 내부 전체로 수지가 함침되

는 데 소요된 시간은 155초이며, 총 경화 시간은 24분이다. 그림에서, 1st sensor의 D_1, 3rd sensor의 D_6의 경우, 수지 함침은 측정하였으나, 노이즈 유입으로 정확한 경화 완료 시점을 측정할 수 없었다. 또한, 1st sensor의 D_2는 측정값

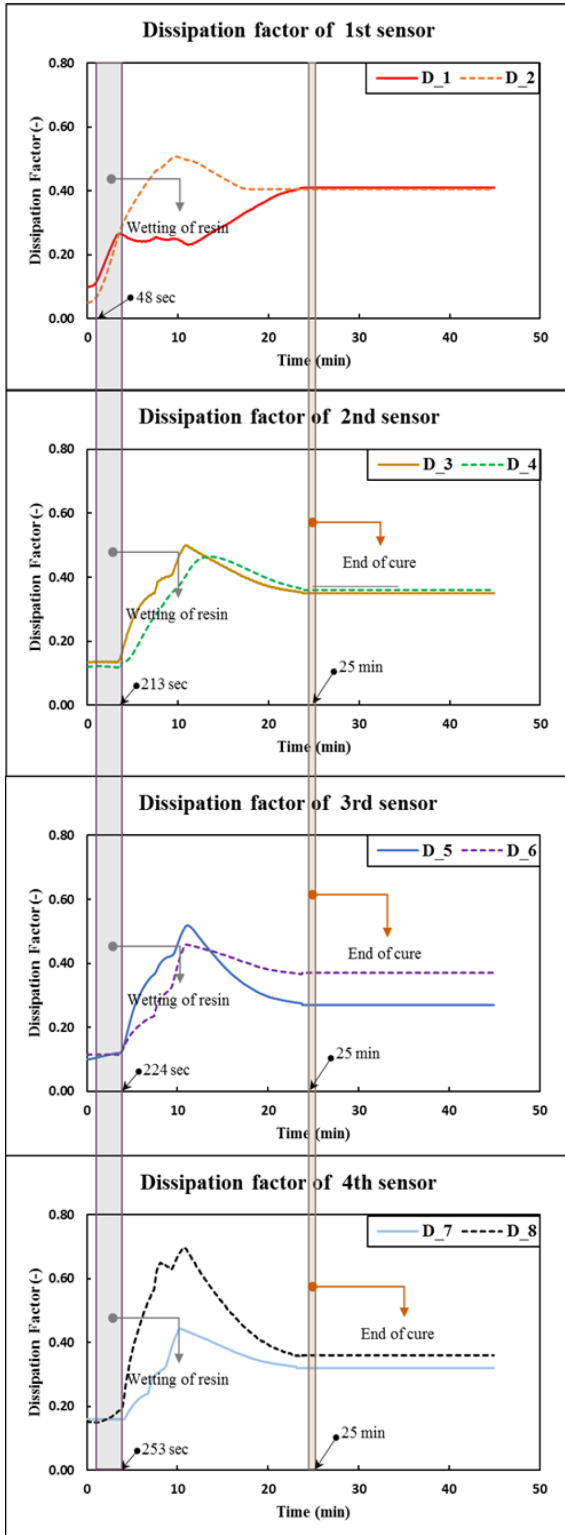


Fig. 11. Variation of the dissipation factor ($P = 0.02$ MPa)

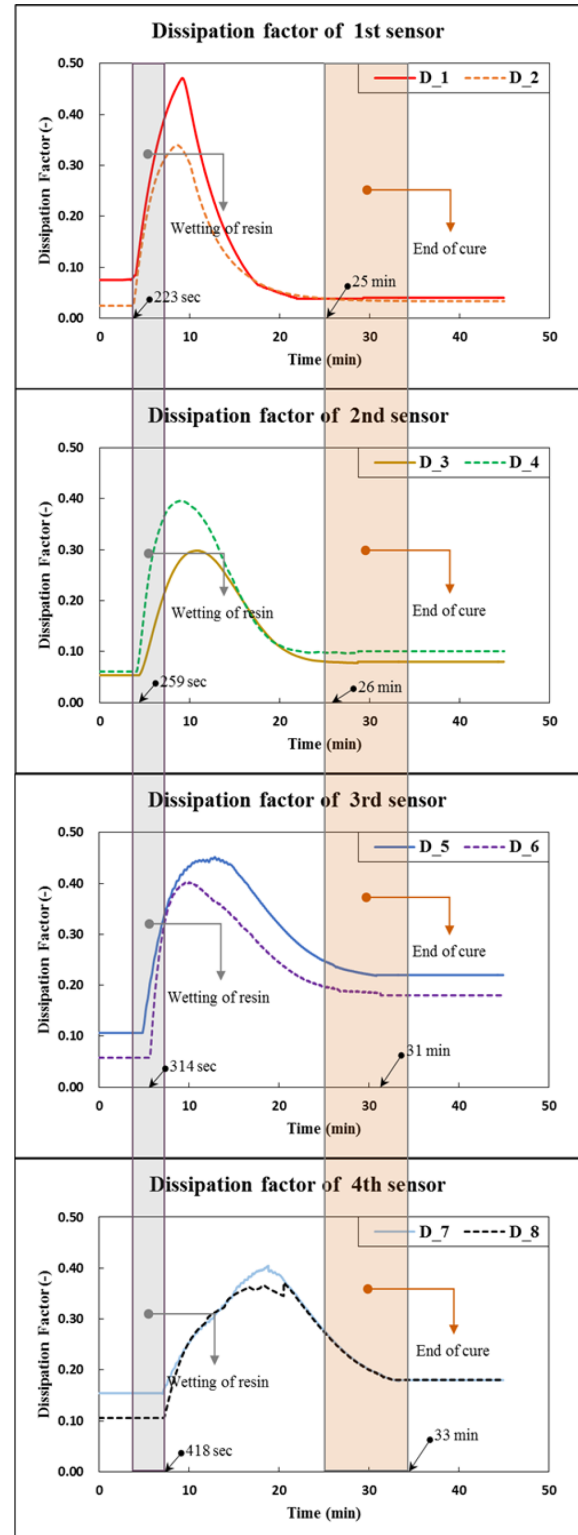


Fig. 12. Variation of the dissipation factor ($P = 0.01$ MPa)

의 변화가 관찰되지 않았는데, 상·하부 금형의 체결과정에서 압착으로 인한 유전센서의 손상이 발생하였음을 육안으로 확인하였다.

Fig. 11은 수지 주입압력을 0.02 MPa로 설정하였을 때의 소산계수 측정 결과이며, 금형 내부 전체로 수지가 함침 되는데 소요된 시간은 253초이며, 총 경화 시간은 22분이었다. 1st sensor의 D_1은 노이즈 유입으로 정확한 경화 완료 시점을 측정할 수 없었다.

Fig. 12는 수지 주입압력을 0.01 MPa로 설정하였을 때의 소산계수 측정 결과이며, 금형 내부 전체로 수지가 함침 되는데 소요된 시간은 418초이며, 총 경화 시간은 27분이다.

Fig. 13은 각 위치에 부착된 유전센서의 평균 수지 함침 시점을 정리한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 수지 주입압력이 0.02 MPa와 0.04 MPa인 경우는 함침시간의 차이는 다소 발생하지만, 그래프의 형태는 서로 유사함을 볼 수 있으며, 0.01 MPa인 경우와는 다소 상이한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 복합재료 내의 수지 유동은 Darcy's law로 표현할 수 있으며, 이를 1차원 유동으로 가정하여 수지 함침시간 t 와 함침길이 l 의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$t = \frac{l^2 \mu e}{2K\Delta P} \quad (5)$$

μ : Viscosity

K : Permeability

e : Void Ratio

ΔP : Pressure difference

Fig. 13에서 수지 주입압력이 0.01 MPa인 경우, 식 (5)의 이차함수와 유사한 형태를 보인다. 이 때 1st sensor의 수지 함침시간은 223초로서, 다른 주입압력 조건에 비해 매우 큰 값을 가지므로 수지의 점도가 충분히 낮아져 비교적 일정한 값을 유지하면서 주입이 완료된 것으로 추정할 수 있다. 수지 주입압력이 0.02, 0.04 MPa인 경우는 2nd, 3rd sensor를 통과하는 시점부터 수지의 점도가 저하되어 수지 토출구가

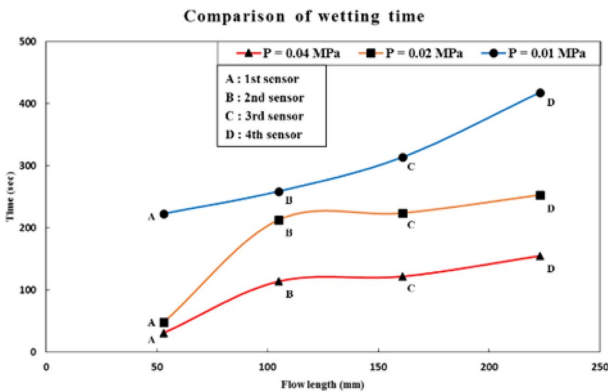


Fig. 13. Variation of wetting time according to resin pressure

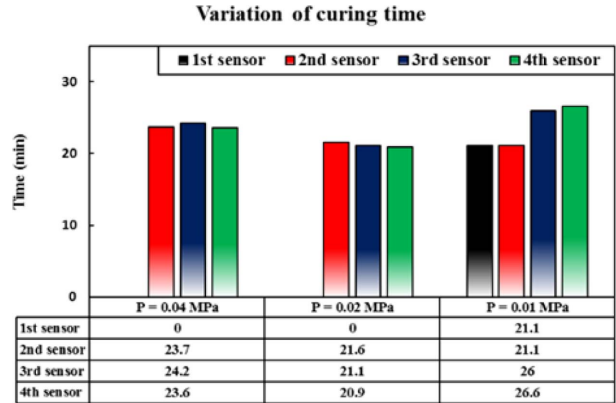


Fig. 14. Variation of curing time according to resin pressure

에 가까워 질수록 함침에 소요되는 시간이 감소됨을 볼 수 있다.

Fig. 14는 수지의 총 경화 시간을 나타낸 그래프로써, 경화 종료 시간(End of cure)에서 수지 함침시간(Resin wetting)을 뺀 값이다. 그림에서 보는 바와 같이, 수지 주입압력이 0.02 MPa와 0.04 MPa인 경우는 총 경화 시간이 위치별로 크게 차이가 나지 않는 반면, 수지 주입압력이 0.01 MPa인 경우는 수지 토출구에 가까워질수록 총 경화 시간이 크게 증가하여, 위치별 경화 시간의 차이가 심하게 발생됨을 볼 수 있다. 이는 수지가 경화에 소요된 총 시간은 Fig. 9의 DSC 등은 주사의 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 유동해석으로 예측하기 힘든 속경화 수지를 이용하는 RTM 공정에서 속경화 수지의 비선형적 점도 변화를 유전기법을 활용하여 실시간으로 모니터링 및 분석하였다. 70°C로 예열된 금형 내부로 수지 주입압력을 0.01 MPa, 0.02 MPa, 0.04 MPa로 변경하여 실험하였으며, 수지 주입압력이 0.02, 0.04 MPa인 경우는 2nd, 3rd sensor를 통과하는 시점부터 수지의 점도가 저하되어 수지 토출구에 가까워 질수록 함침에 소요되는 시간이 감소됨을 실험적으로 확인할 수 있었다.

초고압을 이용한 속경화 수지 RTM 공정에서는 경화가 수 분 내에 일어나고 위치 별 점도 및 경화도 차이가 심하게 발생할 수 있으므로, 본 논문에서 제시한 다채널 경화 모니터링 시스템을 적용하면 보다 효과적으로 금형 내의 유동현상을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 민·군기술협력사업(Civil-Military Technology Cooperation Program)이 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kim, I.Y., Choi, J.H., and Lee, D.G., "A Study on the Performance Test and Manufacture of the Dielectric Sensor for the Cure Monitoring of the High Temperature Composites", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, Vol. 1, 2001, pp. 30-38.
2. Yeo, K.-J., Lee, S.-K., Um, M.-K., and Hwang, B.-S., "Cure Monitoring of a Composite Matrix by Dielectrometry", Proceedings of the Korean Society for Composite Materials Conference. 2001, pp. 110-113.
3. Kim, H.G., and Lee, D.G., "Dielectric Cure Monitoring of Thermosetting Matrix Composites", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 5, 2003, pp. 409-417.
4. Kwon, J.-W., Chin, W.-S., and Lee, D.-G., "On-line Cure Monitoring of Adhesive Joints by Dielectrometry", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, No. 4, 2003, pp. 51-58.
5. Alexandros A Skordos, and Ivana K Partridge, "Dielectric Flow Sensing in Resin Transfer Moulding of Carbon Fibere Reinforced Composites", *Journal of Plastics Rubber and Composites*, Vol. 29, No. 8, 2000, pp. 391-394.
6. Chin, W.S., and Lee, D.G., "Development of the Trenchless Rehabilitation Process for Underground Pipes Based on RTM", *Journal of Composite Structures*, Vol. 68, No. 3, 2005, pp. 267-283.
7. Lin, M.Y., Kang, M.K., and Hahn, H.T., "A Finite Element Analysis of Convection Problems in RTM Using Internal Nodes", *Journal of Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 4, 2000, pp. 373-383.