

論文

열가소성 수지 복합재료의 필라멘트 와인딩 공정에 관한 연구

김희준* · 이우일*

Analysis of Thermoplastic Composite
Filament Winding Process

Kim, Hee June* and Lee, Woo Il*

ABSTRACT

In this paper filament winding process of thermoplastic prepreg tape was studied. A filament winding machine using heated roller for consolidation was built. Finite element analysis on the melting and consolidation of thermoplastic prepreg layers was performed. Radiation configuration factor and the anisotropy of thermal conductivities for prepreg were considered. The results of finite element analysis were verified by experiments.

초 록

본 연구는 Thermoplastic 복합재료의 필라멘트 와인딩에 관한 것이다. 실험을 위하여 가열로울러를 이용한 Thermoplastic 필라멘트 와인딩 머신을 제작하였다. 가열로울러와 열가소성 프리프레그간의 국부적 열전달 과정에 대한 유한요소 해석을 행하였는데 복사형상계수와 프리프레그의 비등방성을 고려하였으며, 실험을 통해 온도분포를 측정하여 수치해석 결과의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

열가소성 수지를 이용한 복합재료는 손상 허용값(Damage Tolerance)과 파괴인성, 용제와 수분에 대한 저항력 등에 있어서 열경화성 수지를 이용한 복합재료보다 뛰어나고, 저장수명이 무제한이며 후가공과 재보수, 재성형등이 용이하다는 장점을 지니고 있다.

열가소성 수지 복합재료의 필라멘트 와인딩은 공정중에 국부적인 용융, 고화과정이 있어 열경화성 기지재료를 사용할 때 발생하는 잔류응력을 줄일 수 있고, 향상된 수치적 안정성을 제공한다. 또한 경화과정을 생략하고 생산공정의 자동화가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

Anderson and Colton[1]은 예열된 프리프레그를 가열 로울러로 적층하는 실험과 수치해석등을 행하

* 서울대학교 기계공학과

었다. 김재수[2]는 열가소성 프리프레그의 연속 적층 공정에 대하여 가열 로울러와 레이저 빔을 이용한 실험과 수치해석을 행하였다. 또한 Ghasemi, Nejhad[3]등은 레이저 열원을 이용하여 열가소성 프리프레그의 필라멘트 와인딩 공정에 대한 수치해석을 하고 해석해와 비교한 바 있다. Werdermann[4]은 예열기(Preheater)와 다축제어 로봇트를 이용하여 필라멘트 와인딩시스템을 구축하였다.

본 연구는 열가소성 수지중 하나인 PEEK와 탄소섬유를 재료로 하여 연속침침 과정을 거친 프리프레그 테이프를 필라멘트 와인딩 머신의 맨드렐에 감는 공정에 관한 것이다. 비등방성을 가진 프리프레그의 열전도율과 와인딩 각의 변화로 인해 3차원 원통 좌표계에서의 열전달 수치해석 과정이 필요하다. Fig.1은 가열 로울러와 프리프레그 테이프간의 열전달과정을 나타내는 개략적인 그림이다.

본 연구는 열가소성 수지와 탄소섬유로 이루어지는 복합재료 프리프레그 테이프의 제조, 컴퓨터에 의한 모터의 제어, 열전달 과정에 대한 유한요소 해석, 실제적인 실험장치의 설계와 제작, 실험의 수행과 그 결과의 분석, 비교 등으로 이루어진다.

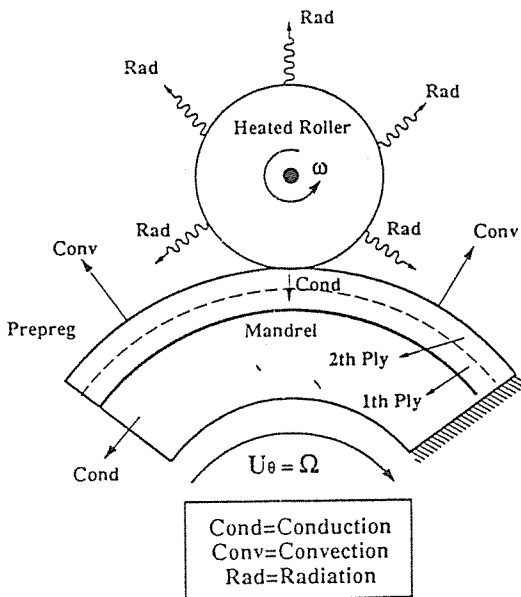


Fig.1. Schematic Description on the Three Modes of Heat Transfer in Control Volume.

2. 수학적 모델링과 수치해석

Thermoplastic 필라멘트 와인딩 공정에서 국부적인 생성열의 영향을 받는 지역을 감싸는 Eulerian 검사 체적을 선택하여 정상 상태로 문제를 기술할 수 있다. 수치해석에서 관심을 가지는 부분은 열전도율에 있어서 비등방성을 가지는 균질한 물질로 가정할 수 있다[5]. 또한 프리프레그 테이프의 폭 방향 양 모서리에서의 열손실은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가지며 가열 로울러의 접촉 표면에서의 온도가 시간과 위치에 따라 변화하지 않는다는 것을 가정할 수 있다.

좌표계는 원통형 3차원 좌표계를 사용하였고 검사체적이 충분히 클 경우 가열 로울러가 지나가지 않은 부분의 경계조건을 대기온도와 같게 설정할 수 있다[2]. 가열 로울러가 지나간 곳의 검사 체적을 충분히 크게 잡는다면 경계조건을 대기 온도로 가정할 수 있으나 수치해석의 총 유한요소량을 절약하기 위해 검사체적을 조금 작게 잡고 단열조건을 주었다.

또한 유한요소 해석 과정에서 격자를 세밀하게 자르지 않으면서 해와 진동을 막기 위해 Petrov-Galerkin 방법을 사용하였다. 가열로울러의 온도가 매우 높아 가열로울러에 의한 복사열 전달이 수치해석결과에 영향을 미칠 것으로 보아 각 유한요소와 가열로울러 표면간의 형상계수(Configuration Factor)를 계산하였다. 이때 가열 로울러와 프리프레그 테이프의 방사율은 모두 1.0으로 가정하고 수치해석을 행하였다. 또한 대류에 의한 열전달율은 기하학적 형상에만 의존한다고 생각하여 상수(h=5.0)로 가정하였다[3].

2-1. 지배방정식과 경계조건

3차원 원통좌표계에서 비등방성 균질물질의 열가소성 프리프레그에 대한 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \dot{T}(\vec{x}, \tau) + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

그리고, 식(1)에 대한 경계조건은 다음과 같이 주

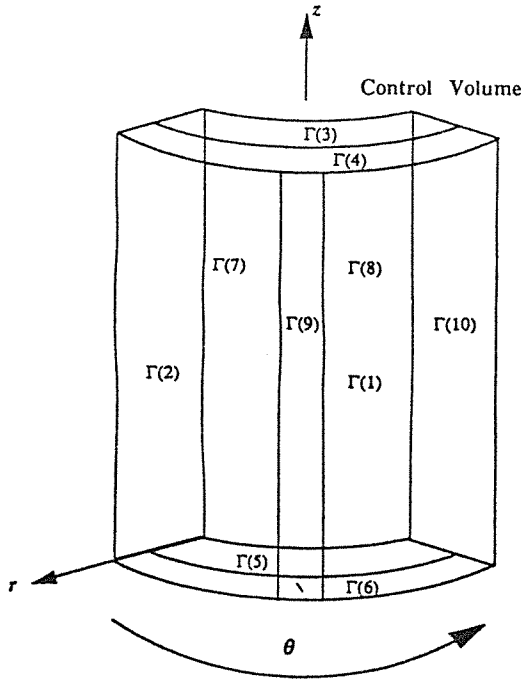


Fig. 2. The Goordinate System for Three Dimensional Finite Element Analysis and the Notation for the Applied Boundary Conditions.

어진다(Fig. 2).

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 \text{ 에서 } T = T_\infty \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Gamma_3 = \Gamma_5 \text{ 에서 } T = T_\infty \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Gamma_4 = \Gamma_6 = \Gamma_{10} \text{ 에서 } \vec{n} \cdot \nabla T = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_7 = \Gamma_8 \text{ 에서 } & -\tilde{k} \nabla T \cdot \hat{n} = h(T - T_\infty) \\ & + F_{21} \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \\ & + (1 - F_{21}) \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\Gamma_9 \text{ 에서 } T = T_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

2-2. 지배방정식과 경계조건

지배방정식과 경계조건들을 정상 상태 가정과 함께 변분 이론에 적용시키면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} [\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla T) \omega + \tilde{k} \nabla T \cdot \nabla \omega] d\Omega + \int_{\partial\Omega} \omega q_r d\Gamma = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

위 식에서 구하고자 하는 해인 온도에는 Galerkin 근사법을 적용하고 가중함수에는 대류항을 고려하기 위하여 Petrov-Galerkin 근사법을 사용하면 온도와 가중함수는 다음과 같이 표현된다.

$$T_h = \sum_{i=1}^{Ne} T_i \psi_i(r, \theta, z) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\omega_h = \sum_{j=1}^{Ne} \omega_j \bar{\psi}_j(r, \theta, z) \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 ψ 는 일반적인 Galerkin 근사법에 의한 형상함수이고 $\bar{\psi}$ 는 대류 지배적인 문제에 적용되는 Petrov-Galerkin 근사방법에 의한 형상함수이다. 위 식들을 모두 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$A_j = \int_{\Omega} \rho C_p u_\gamma (\sum_i T_i \psi_{i,\gamma}) \bar{\psi}_j d\Omega \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$B_j = \int_{\Omega} k_{\alpha\beta} (\sum_i T_i \psi_{i,\beta}) \bar{\psi}_{j,\alpha} d\Omega \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$C_j = \int_{\partial\Omega} h (\sum_i T_i \psi_i) \bar{\psi}_j d\Gamma \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$D_j = \int_{\partial\Omega} \varepsilon \sigma (\sum_i T_i \psi_i)^4 \bar{\psi}_j d\Gamma \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$E_j = \int_{\partial\Omega} \left\{ h T_\infty + \varepsilon \sigma [F_{2 \rightarrow 1} T_0^4 + (1 - F_{2 \rightarrow 1}) T_\infty^4] \right\} \bar{\psi}_j d\Gamma \quad \dots\dots (14)$$

이러 할 때 다음과 같은 텐서(Tensor) 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_j}{\partial T_i} = & \int_{\Omega} \rho \frac{\partial C_p}{\partial T_i} u_\gamma (\sum_i T_i \psi_{i,\gamma}) \bar{\psi}_j d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \rho C_p u_\gamma \psi_{i,\gamma} \bar{\psi}_j d\Omega \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial B_j}{\partial T_i} = \int_{\Omega} \left[\frac{\partial k_{\alpha\beta}}{\partial T_i} \psi_i (\sum_i T_i \psi_{i,\beta}) + k_{\alpha\beta} \psi_{i,\beta} \right] \bar{\psi}_{j,\alpha} d\Omega \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{\partial C_j}{\partial T_i} = \int_{\partial\Omega} h \psi_i \bar{\psi}_j d\Gamma \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{\partial D_j}{\partial T_i} = \int_{\partial\Omega} 4 \varepsilon \sigma (\sum_i T_i \psi_i)^3 \psi_i \bar{\psi}_j d\Gamma \quad \dots\dots\dots (18)$$

이때 Newton-Raphson 반복기법을 적용하면 다음과 같은 선형방정식들의 집합을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial T_i}\right)^s (\Delta T_i)^{s+1} = F_j^s \dots\dots\dots (19)$$

여기서

$$F_j = A_j + B_j + C_j + D_j - E_j \dots\dots\dots (20)$$

이고

$$\frac{\partial F_i}{\partial T_i} = \frac{\partial A_i}{\partial T_i} + \frac{\partial B_i}{\partial T_i} + \frac{\partial C_i}{\partial T_i} + \frac{\partial D_i}{\partial T_i} \dots\dots\dots (21)$$

이다. 또한 식(21)에서 상첨자 s는 프로그램 수행시의 반복단계를 의미한다. 각 격자점에서의 온도가 미리 설정되어 있는 오차의 한계보다 작은 값에 도달하게 되면 해는 수렴했다고 보고 수치해석 과정을 끝마치게 된다. 선형방정식의 해를 구하기 위해 Frontal Solver를 사용하였다[6].

비열과 열전도율 모두 온도의 함수로 주었으며 맨드렐의 물성치는 일반적으로 알려져 있는 자료를 사용하였다[7].

2-3. 복사 형상계수의 결정과 계산

필라멘트 와인딩 공정에서 열가소성 수지를 용융시키기 위하여 가열 로울러를 사용하는데 이 로울러와 프리프레그 테이프간의 거리가 매우 가까울 뿐만 아니라 로울러 표면의 온도가 매우 높아서 복사열전달이 지배방정식과 경계조건, 방정식의 해 등에 영향을 미치게 된다.

Fig.3에서 유한요소의 크기를 충분히 작게 자르면 그 유한요소는 미소 면적을 가지는 곡률을 가지지 않는 2차원 평면으로 가정할 수 있다. 이 가정을 통해 모든 유한요소는 그 요소내의 어느 위치에서도 법선 벡터가 변화하지 않게 되어 2중 적분을 하지 않아도 된다. 2개의 물체에 관한 복사 형상계수는 일반적으로 다음과 같은 적분식으로 주어진다[8].

$$F_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{A_2} \left[\int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_1 \right] dA_2 = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2} dA_1 \dots\dots\dots (22)$$

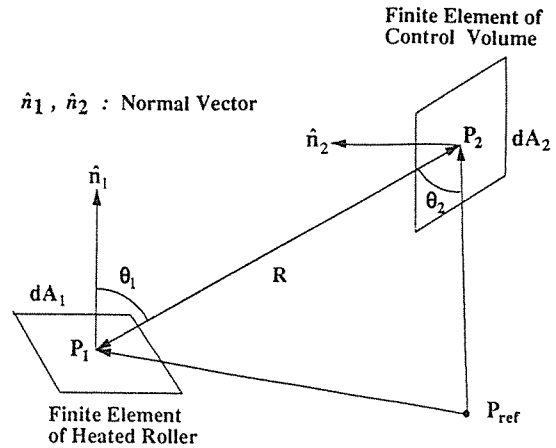


Fig.3. Geometrical Description for the Radiation Configuration Factor

앞서 언급한 충분히 작은 유한요소에서는 다음과 같은 근사가 가능하다(Fig.3).

$$F_{2 \rightarrow 1} \cong \sum_j \frac{-(\hat{n}_1 \cdot \vec{R})(\hat{n}_2 \cdot \vec{R})}{\pi [R(j)]^4} \Delta A_1(j) \dots\dots (23)$$

여기서 첨자 j는 가열 로울러 표면의 j번째 유한요소를 의미한다. 가열 로울러의 표면은 수치해석에서 100개 또는 200개의 미소면적으로 구성되며 각 미소면적은 곡률을 가지고 있다. 그러나 검사체적내의 유한요소는 복사 형상 계수 계산시 곡률을 가지지 않는 미소 평면으로 가정하였다.

2-4. 물성치

본 논문에서 사용된 재료는 ICI사에서 생산한 APC-2로 PEEK의 부피분율이 약 40%이다. 본 논문에서는 Grove[6]에 의하여 실험적으로 측정된 물성치를 사용하였다.

APC-2의 열용량은 실험적 물성치를 각 온도 구간별로 다항식의 보간함수를 사용하여 근사하였다. 절대온도 613K와 634K 사이에서 흡열반응이 존재한다. 또한 APC-2의 주방향(반경방향과 섬유길이 방향)의 열전달율에 있어서 매우 심한 비등방성(Anisotropy)을 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 필라멘트 와인딩 머신의 제작

필라멘트 와인딩 머신은 크게 와인딩 시스템과 무빙 가이드 시스템, 가열 로울러 시스템의 세 부분으로 구분된다.

3-1. 와인딩 시스템

맨드릴과 맨드릴 지지부, 교류모터와 모터제어부로 구성된다. 열가소성수지와 탄소섬유를 이용하여 만들어진 프리프레그 테이프는 최고 1400RPM으로 회전하는 교류모터와 1200:1의 감속비를 가지는 기어박스, XL기어, 타이밍 벨트 등에 의해 최고 1.7 RPM으로 회전하는 맨드릴위에서 일정한 와인딩 각도를 유지하며 감기게 된다.

3-2. 무빙 가이드 시스템

선형운동을 하게 해주는 스크류와 스크류 지지부, 복동식 공압실린더를 운송하고 지지해주는 부분, 직류 서보 모터와 모터 드라이버, 모터의 회전방향과 회전 각속도를 PC에서 소프트웨어적으로 제어하게 해주는 컴퓨터 인터페이스 등으로 구성된다.

3-3. 가열 로울러 시스템

총출력 800Watt의 카드리지 히터 4개가 내장된 가열 로울러와 로울러 회전 지지부, 로울러 회전 지지부를 와인딩 각도에 따른 회전 정렬을 허용하는 크로스 로울러 베어링, 크로스 로울러 베어링과 공압실린더의 연결부, 복동식 공압실린더의 전진과 후진을 허용하는 다이세트용 볼 케이스 등으로 구성된다. 또한 가열 로울러와 맨드릴간의 마찰력을 배제하기 위한 가이드가 보조로 장착되어 있다. 가열 로울러 시스템은 열경화성 수지를 이용한 필라멘트 와인딩 공정에는 없는 부분으로 열가소성 수지의 특성을 이용한 공정 중 프리프레그간의 분자결합을 위해 필요한 까다롭고 중요한 부분이다.

4. 결 과

4-1. 실험과 수치해석 결과의 비교

수치해석 결과와 실험을 비교하기 위한 공정조건은 [0/0]의 와인딩 각도와 섭씨 380도의 가열 로울러 온도에 맨드릴의 회전속도는 0.16rpm이다. 회전속도 0.16rpm은 바깥층의 프리프레그에서의 선속도 1mm/sec에 해당한다. 맨드릴의 반경은 60mm이고 프리프레그 한층의 두께가 0.17mm이다.

압축공기와 무빙가이드 시스템에 부착되어 있는 공압실린더에 의하여 프리프레그와 맨드릴에 가해지는 힘은 약 270N으로 가열 로울러와 프리프레그 사이에 작용하는 압력은 약 23기압 정도이다. 맨드릴의 회전이 매우 느려 타코미터를 이용한 회전속도의 측정이 불가능하여 맨드릴이 1회전 하는동안 회전속도가 변하지 않는 것을 가정하여 그 시간을 측정하여 각속도를 계산하였다. 프리프레그 시편은 모두 2층으로 적층되는 것으로 실험하였다.

압력의 변화로 인한 온도 분포의 변화를 측정할 수도 있었으나 열전달 과정의 해석 관점에서는 검사체적에 압력이 작용한다는 사실을 알지 못하므로 최소한의 압력을 작용시켜 실험하였다. 압력을 전혀 주지 않을 경우 프리프레그 간의 접촉이 용이하지 않으므로 가능한 최소의 압력을 주었다.

온도의 측정은 열전대에서 나오는 전위차를 그대로 측정할 수 있는 서보코더(Servocorder)를 이용하여 수행하였다. 사용한 열전대는 K Type으로 직경 0.08mm이다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 수치해석 결과와 실험이

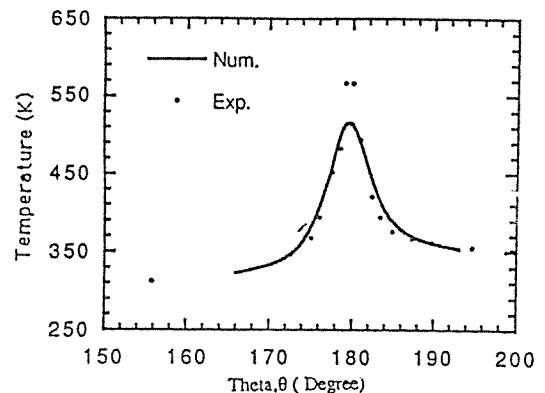


Fig. 4. Comparison Numerical Results with Experimental Results on Temperature Distribution at the Middle Point in Two Layers of Prepreg.

잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 프리프레그가 가열 로울러와 접촉하는 곳에서 실험에 의한 온도가 더 높게 나온 것은 프리프레그가 가열 로울러에 의해 눌러 축적하고자 하는 반경방향의 위치가 변경되었기 때문이다. 즉, 열전대가 가열 로울러의 접촉점으로 더 접근하여 수치해석의 결과보다 더 상승된 온도가 나온 것이다.

4-2. 수치해석 결과

본 연구에서는 여러가지 와인딩 각도에 대하여 온도와 속도를 변화시켜 가며 수치해석을 행하고 수치해석의 결과를 바탕으로 실제 필라멘트 와인딩 공정중 가열 로울러에 의한 국부적인 가열로 인한 열전달 과정에 영향을 미치는 공정 변수들을 알아 보는데 중점을 두었다. Fig.5-(a)와 (b)는 [0/0]의 와인딩 각도를 가질 때 온도의 변화를 두 가지로 주어 반경 방향과 가열 로울러의 진행방향으로 등

온선을 그린 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 400도의 경우 맨드렐의 외경 아래로 하나의 등온선이 더 그려지게 된다. 열가소성 프리프레그의 반경 방향 열전도율이 약 0.6W/m·k 정도이고 일반강으로 되어 있는 맨드렐의 열전도율이 약 60W/m·K이므로 100배 정도의 차이를 보인다. 따라서 가열 로울러와 프리프레그 사이의 접촉에서 생기는 높은 온도가 맨드렐로 미처 도달하지 못하고 있으며, 프리프레그 내부에서 급격한 온도 구배를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig.5-(a)와 (c)는 같은 온도의 가열 로울러에 대하여 검사체적의 속도를 다르게 한 경우이다. 속도가 더 빠른 경우에 온도가 로울러의 진행방향으로 더 멀리까지 전달되고 있음을 알 수 있다.

Fig.5-(a)와 (d)는 가열 로울러의 온도와 속도를 일정하게 하였을 때 서로 다른 와인딩 각도에 대하여 로울러의 진행방향과 맨드렐 반경방향으로의 등온선을 나타낸다. 그림에서 보듯이 60도의 와인딩

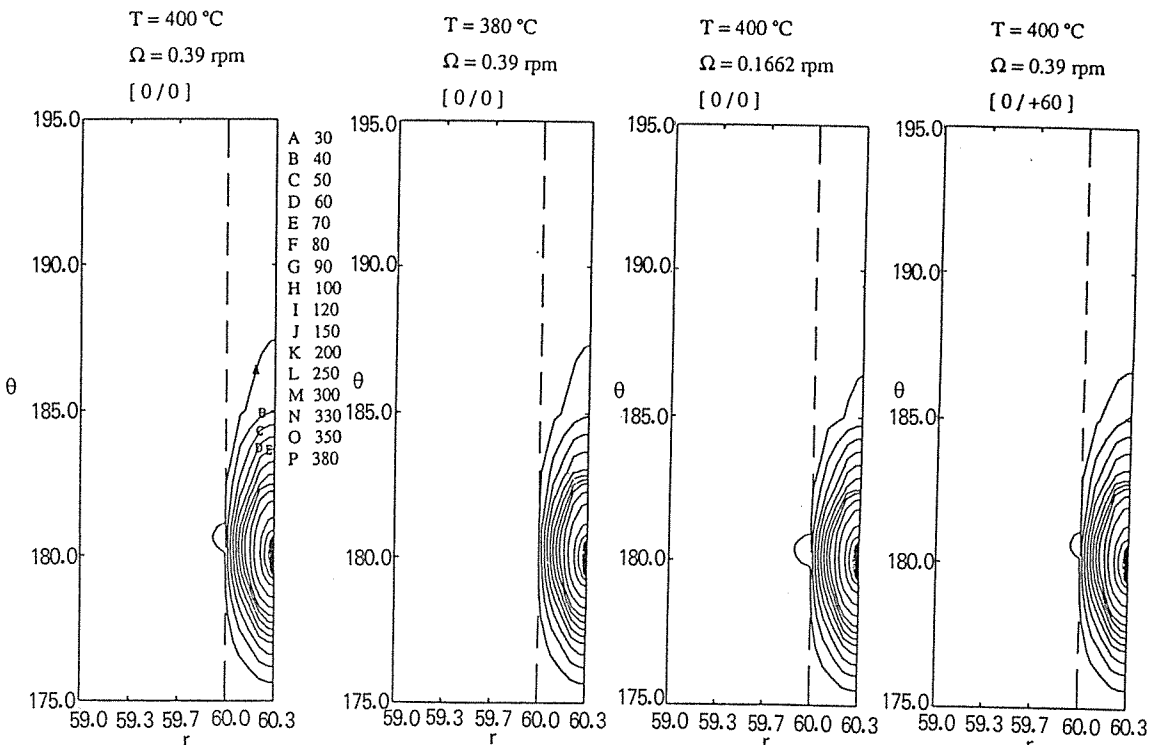


Fig. 5. Comparison Temperature Distribution for the Filament Winding Process
 (a)(b): Temperature, (a)(c): Angular Velocity, (a)(d):Winding Angle

각도에서는 0도의 와인딩 각도에 비해서 로울러의 진행방향으로 온도분포가 상대적으로 좁게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 프리프레그의 섬유방향 열전도율이 가열 로울러의 진행방향으로 더 작아지기 때문이다.

5. 결 론

열가소성 필라멘트 와인딩 공정에서 열전달 과정과 온도 분포에 영향을 주는 공정 변수로는 맨드렐의 회전속도, 가열 로울러와 프리프레그간의 접촉온도, 와인딩 각도, 열가소성 프리프레그와 맨드렐의 물성치 특히 열전도율 등이 있음을 알아내었다. 특히 맨드렐의 열전도율이 큰 경우 반경 방향의 열전달이 지배적이 되어 섬유 길이 방향으로 효과적인 열전달이 일어나지 않게 되므로 단열성이 좋고 경도가 높은 맨드렐의 사용이 필수적이다.

또한 실제 공정중 가열 로울러에 의한 가열과 압착으로 인하여 열가소성 프리프레그의 표면이 매끄럽지 못하게 성형되는 문제점을 안고 있는데 이는 맨드렐과 가열 로울러 표면의 정밀한 가공으로 개선될 수 있으리라 본다.

3차원 수치해석의 경우 격자점 수의 증가로 인한 계산시간이 매우 많이 필요한데 이에 대해 프로그래밍의 개선이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Anderson and Colton, "Automation of Thermoplastic Composite Processing", *Journal of Composite Materials*, Vol.24, pp.150-174, February 1990.
2. 김재수, "열가소성 프리프레그의 연속 적층 공정에 관한 연구", 서울대학교 공학석사학위논문, 1991.
3. M.N. Ghasemi Nejjhad, R.D. Cope and S.I. Guceri, "Thermal Analysis of Insitu Thermoplastic-Matrix Composite Filament Winding", *University of Delaware*, February 1990.
4. Cord C. Werdermann, "Design and Fabrication of an On-Line Consolidation Facility", *CCM Report 89-01*, April 1989.
5. S.M. Grove, "Thermal Modeling of Tape Laying with Continuous Carbon Fibre-Reinforced Thermoplastic", *Journal of Composite Materials*, Vol.19, No.5, pp.367-375, September 1988.
6. E. Hinton and D.R.J. Owen, *Finite Element Programming*, Academic Press, 1977.
7. J.P. Holman, *Heat Transfer*, Sixth Edition, McGraw-Hill Book Company, 1986.
8. Robert Siegel and John R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, 1981.