

論文

Filament Winding 구조물의 설계와 공정자동화를 위한
와인딩패턴에 관한 연구

성기범** · 강태진* · 이재곤*

The Study on the Design and the Winding Pattern
for the Filament Winding Composites

Ki-Bum Seong**, Tae Jin Kang* and Jae Kon Lee*

ABSTRACT

A CAD program has been developed for optimum design and winding of the pressure vessel by the filament winding process. The functions to determine the winding thickness for a given pressure condition and the structural parameters of the vessel have been calculated.

To inspect validity of the relationship between structural parameters and process variables determined by the CAD program, experimental filament winding machine with multi-axis control has been constructed. A method for generating winding pattern has been proposed in graphic format for the control of computer numerical controlled(CNC) filament winding machine. It showed that the generated winding pattern gives uniform values of the structural parameters and performed with good reproducibility for the filament winding of pressure vessel.

초 록

Filament Winding 복합재료 제조공정 중 Pressure Vessel에 대한 CAD 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 최적의 Pressure Vessel 형태를 설계할 수 있는 기능과 응력해석을 통하여 Winding Angle, Winding Thickness등의 구조인자를 결정하는 기능, 그리고 결정된 구조인자를 얻기 위해 필요한 공정변수를 계산하는 기능 등을 포함하고 있다.

프로그램에서 얻은 구조인자와 공정변수와의 관계를 실험하기 위하여 Mandrel과 Filament Winding Machine의 모형을 제작하였다. 그리고 그 결과로부터 Computer Numerical Controlled(CNC) Filament Winding Machine의 제어 데이터로 이용되는 Winding Pattern의 생성방법을 제시하였다. 생성된 Winding Pattern은 저장되어 재현성을 가지며 Filament Winding 구조물의 제조시 제어 데이터로 이용되어 균일한 구조인자값을 부여할 수 있다.

* 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과

** 제일모직 화성연구소

1. 서 론

F/W 구조물을 제조하기 위해서는 공정상의 여러 가지 인자, 즉 Machine종류, 와인딩 방법, Mandrel의 준비와 제거, 필라멘트 정렬과 텐션 조절 등을 고려해야 한다. 이때 F/W 공정에서 최적의 기계적 성질을 보유하는 구조물을 얻기 위해서는 모든 응력이 필라멘트의 경로를 따라 균일하게 분포되도록 하는 것이 바람직하다. 단지 Hoop방향의 응력만 있을 경우 이러한 조건은 쉽게 만족시킬 수 있으나, 복합적인 응력이 작용할 경우에는 Mandrel의 설계, 와인딩 방법 등에 따라 크게 좌우된다. 그러므로 F/W 공정에서, 실제로 와인딩을 하기전에 Mandrel의 설계, 와인딩 방법, Winding Angle, 응력의 분포 등을 미리 고려해봄으로써 실제로 모든 응력이 필라멘트의 경로를 따라 분포되도록 할 수 있다. 특히 컴퓨터를 이용하면 실제 제조시의 결과를 예측하는 것이 더욱 용이하다.

최근 F/W 구조물에 대해 고품질의 제품이 요구되고 있으며, 이에 따라 최대의 내압성을 부여할 수 있는 응력해석과 제조공정의 자동화에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 초기의 F/W 구조물의 제조공정에서는 경험과 데이터의 부족으로 인하여 기계적 성질도 낮고 재현성도 떨어졌으며, F/W 공정이 경험식이나 Delivery Eye Point에 대한 수치해석치에 의해서만 결정되었다.^{1,2)} 그러나 F/W 구조물에 대한 연구가 진전되면서 기계적 성질과 공정변수와의 관계 및 최대의 효율을 부여할 수 있는 공정의 자동제어에 대해 많은 연구결과가 알려져 있다. 이에 따라 현재에는 Computer Numerical Control(CNC)방식을 사용한 F/W Machine이 개발되어 다축제어에 의해 복잡한 구조물도 와인딩할 수 있게 되었다.^{3,4)} 또한 이러한 F/W Machine에서는 주어진 압력에 대해 최소 두께를 성형하는데 있어서, 각 층에서의 섬유유 최적경로를 정해주기 위해 실제 와인딩 전에 Simulation을 통해 공정변수들을 찾아 적용시키는 방법이 채택되기도 하였다.⁵⁾ 그밖에도 컴퓨터상에서 공정변수들을 Winding Pattern이라는 Graphic Format으로 정의한 후, Edit 기능을 부여하여 최적의 공정변수들을 찾아낼 수 있는 방법들도 개발되고 있다.^{6,7)}

현대의 F/W Machine은 거의 대부분 컴퓨터 제어 시스템이 부착되어 있고, 이를 통해 다축에 대한 실시간(Real Time) 제어가 가능하며 CNC 방식에 의해 운영된다. 이에 따라 제어 데이터의 생성 및 수정이 F/W 공정에서 매우 중요한 부분을 차지하게 되었다.

본 연구에서는 가장 일반적인 F/W 구조물인 Pressure Vessel에 대해 최적 형태의 설계, 응력해석을 통한 각 와인딩층의 결정, 구조인자와 공정변수와의 관계결정 등의 기능을 갖춘 CAD 프로그램을 개발한 다음 다축제어 F/W Machine의 모형을 제작한 후 프로그램에서 얻은 공정변수를 이용하여 실험치와 비교, 검토하였다. 그리고 이로부터 CND F/W Machine 제어에 필요한 Winding Pattern의 결정방법에 대해 연구하였다.

2. Filament Winding 구조물의 해석

2-1. Dome 형태의 해석

Pressure Vessel의 설계시 Cylinder부분과 Dome 부분으로 구분할 수 있으며 Cylinder 부분의 설계 용이성에 비하여 Dome 부분의 설계에는 역학적 조건 및 Winding Angle, Cylinder와 Boss의 반경 등을 고려해야 한다. 이때 와인딩의 방법은 Helical Winding과 Hoop Winding 두가지를 사용하는 것으로 가정할 수 있다.

Dome 형태를 결정할 때, 중요한 조건 중의 하나가 섬유가 곡면을 지날 때 경로를 이탈하지 않도록 최단경로로 와인딩되어야 한다는 것이다. 기하학적으로 이 경로를 Geodesic Path라고 하며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1}(R_b/R_c) \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)은 Cylinder와 Dome이 만나는 부분의 Helical Winding Angle을 나타낸다. Dome 형태를 결정하기 위한 또 하나의 중요한 인자는 축방향 곡률반지름과 축과 수직방향 곡률반지름의 결정이다. 이러한 반지름은 다음과 같이 유도된다.

$$R_l = \frac{[1+y^2]^{\frac{3}{2}}}{y''} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_t = \frac{x[1+y^2]^{\frac{1}{2}}}{y} \dots\dots\dots (3)$$

식 (2), (3)로부터 축방향 곡률반지름과 축과 수직방향 곡률반지름은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{R_t}{R_l} = \frac{xy''}{y'[1+y^2]} = 2 - \tan^2\theta \dots\dots\dots (4)$$

2-2. 와인딩층의 응력해석

F/W 구조물에서 구조효율을 극대화하기 위해서는 보강재료로 사용된 모든 섬유가 균일하게 응력을 받아야 한다. Pressure Vessel의 구조는 대부분 축대칭의 형태이고 End Closure부분을 Dome 형태로 와인딩하게 되는데, 이때 Cylinder와 Boss의 직경비 및 Winding Angle 등이 Dome 형태의 변수가 된다. Cylinder가 받는 Hoop방향 응력과 Longitudinal 방향 응력은 다음과 같다.

$$S_h = \frac{S \cdot t_h}{t} + \frac{S \cdot \sin^2\theta \cdot t_0}{t} \dots\dots\dots (5)$$

$$S_l = \frac{S \cdot t_l}{t} + \frac{S \cdot \cos^2\theta \cdot t_0}{t} \dots\dots\dots (6)$$

그리고 전체 Winding Thickness를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$S = S_h + S_l = \frac{PD}{2t} + \frac{PD}{4t} \dots\dots\dots (7)$$

$$t = \frac{3PD}{4S} \dots\dots\dots (8)$$

한편, Helical Winding Thickness는 식 (5), (6)으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$t_0 = \frac{2t_l - t_h}{1 - 3\cos^2\theta} \dots\dots\dots (9)$$

또한 $t = t_0 + t_h + t_l$ 의 관계로부터 Hoop Winding Thickness와 Longitudinal Winding Thickness도 얻을 수 있다.

$$t_l = \frac{t}{3} - t_0 \cos^2\theta \dots\dots\dots (10)$$

$$t_h = \frac{2t}{3} - t_0 \sin^2\theta \dots\dots\dots (11)$$

2-3. Winding Point의 운동 해석

F/W 구조물의 Dome 형태, Winding Angle, Winding Thickness 등의 구조인자가 결정된 후에는 실제 F/W 공정에서의 공정변수를 제공해줄 수 있다. 즉, 원하는 구조인자를 얻기 위하여 Mandrel의 회전 각속도와 Traverse의 왕복 속도를 유도하거나 또는 이들 값이 주어졌을 때 Winding Point의 운동방정식이나 속도방정식을 해석할 수 있다. Winding Point의 운동은 Fig.1에서 보는 바와 같이 두개의

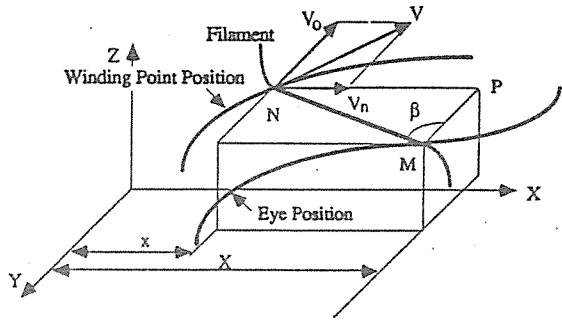


Fig.1. Three Dimensional Projection of Filament Winding.

주요 운동축에 의해 결정되며, 한번의 Distribution 주기동안 Mandrel의 Dimension은 변하지 않는다는 가정하에 그 속도를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V = V_n + V_o \dots\dots\dots (12)$$

또한 기하학적인 관계로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\tan\beta = \frac{V_n}{V_o} = \frac{x'}{V_o} = \frac{NP}{MP} \dots\dots\dots (13)$$

Delivery Eye Point의 위치와 Winding Point의 위치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$X = x + \overline{NP} \dots\dots\dots (14)$$

$$X = x + \sqrt{(Y-y)^2 + (Z-z)^2} \cdot \frac{x'}{V_o} \dots\dots\dots (15)$$

식 (15)로부터 Winding Point의 속도를 결정하는 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{V_0 \cdot (X-x)}{\sqrt{(Y-y)^2 + (Z-z)^2}} \dots\dots\dots (16)$$

3. CAD 프로그램

3-1. 프로그램

일반적으로 CNC Machine을 사용할 때의 F/W 공정은 Fig.2에서 보이는 것과 같은 단계를 갖는다. 본 연구에서는 여러 단계 중 형태설계와 Winding Pattern의 생성방법에 중점을 두고 CAD 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 F/W Pressure Vessel의 최적형태 설계, 응력해석을 통한 각 구조인자의 결정, 자동화 공정의 제어데이터로 이용되는 공정변수의 결정 등의 기능을 포함하고 있다.

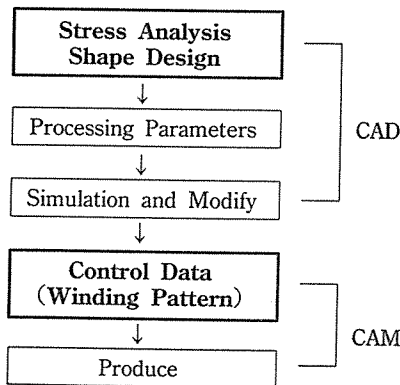


Fig.2. Filament Winding Process with CNC Machine.

Coding은 HP Workstation에서 C언어를 사용하였고 Mouse와 Digitizer를 지원하는 Pop-up Menu 방식으로 되어 있으며 대화식으로 데이터를 입력한다. 프로그램의 입출력 가능한 데이터는 다음과 같다.

입력 : F/W Pressure Vessel의 재원
 Operating Pressure 또는 Limit Pressure
 Material Strength

Manderl의 회전 각속도
 Liner의 재원
 출력 : Helical Winding Angle
 Dome 형태 데이터
 각 Winding Thickness
 Dwell Time
 Winding Pattern
 Shape Plotting

3-2. Flow Chart

전체 프로그램의 Flow Chart는 아래 Fig.3에 보이는 바와 같다. Winding Angle결정과 Dome 형태의 설계부분에 대한 Flow Chart는 Fig.4와 같다.

응력해석을 통한 Winding Thickness 결정부분의 Flow Chart는 Fig.5에 보이고 있다. F/W 구조물의 설계에서 가장 구조효율을 높이는 방법은 모든 보강 섬유가 똑같은 응력을 분담하도록 하는 것이다. 프로그램에서 Helical과 Hoop 두가지 방식으로 와인딩된 Pressure Vessel로 가정하여 각 와인딩층의 응력과 그에 따른 최소의 Winding Thickness를 계산하였다.

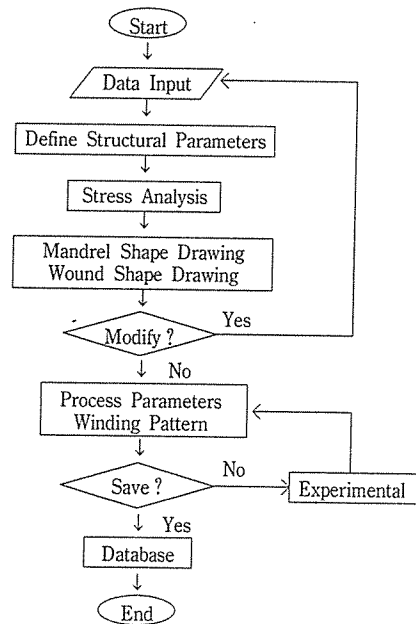


Fig.3. Flow Chart of the CAD Program.

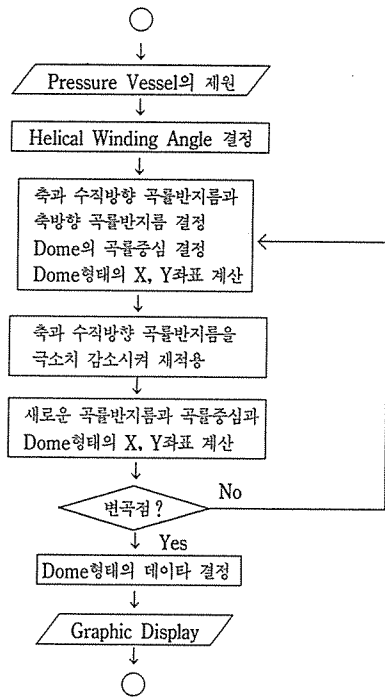


Fig. 4. Flow Chart for Determining Structural Parameters of the Pressure Vessel.

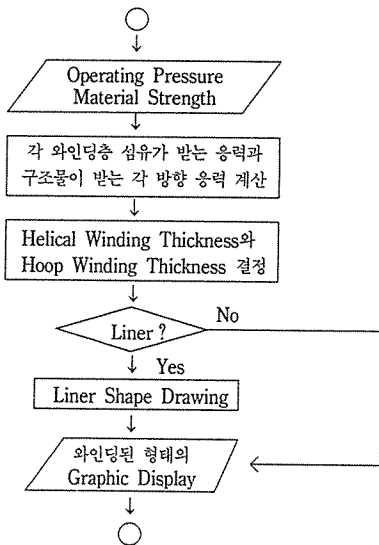


Fig. 5. Flow Chart for Stress Analysis of the Pressure Vessel.

Winding Pattern의 결정부분에 대한 Flow Chart는 Fig.6에 보이고 있다. 본 연구에서는 Mandrel위의 섬유가 알맞은 경로를 이룰 수 있도록 F/W Machine에게 전해지는 정보, 즉 Machine의 위치나 위치간의 Time Relationship 등을 Winding Pattern이라는 Format으로 정의하였다. 일반적으로 Winding Pattern은 Tabular Form이나 Plotted Form으로 나타내는데, 프로그램에서는 Fig.7에 보이는 형태의 Plotted Form을 사용하였다. Mandrel의 경우에는 시간에 대한 회전각의 cosine값을 채택하였으며, Traverse의 경우에는 시간에 대한 운동방향으로 변위를 채택하였다.

Winding Pattern을 결정하기 위해 Mandrel의 회전 각속도를 기준으로 한 각 공정변수값이 프로그램에서 제공되면, 사용자가 회전 각속도를 선택하여 입력하는 방법을 이용하였다.

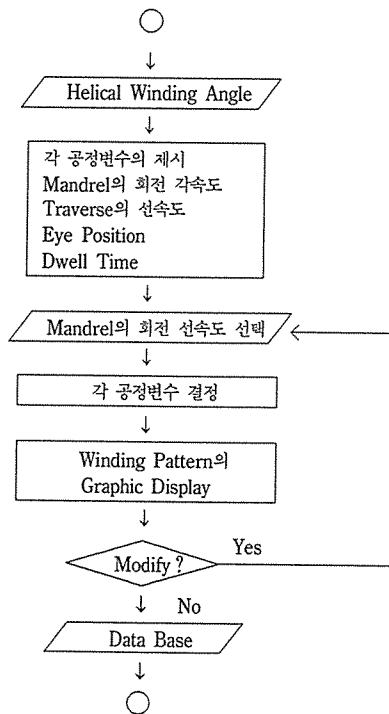


Fig. 6. Flow Chart for Determining the Winding Pattern of the Pressure Vessel.

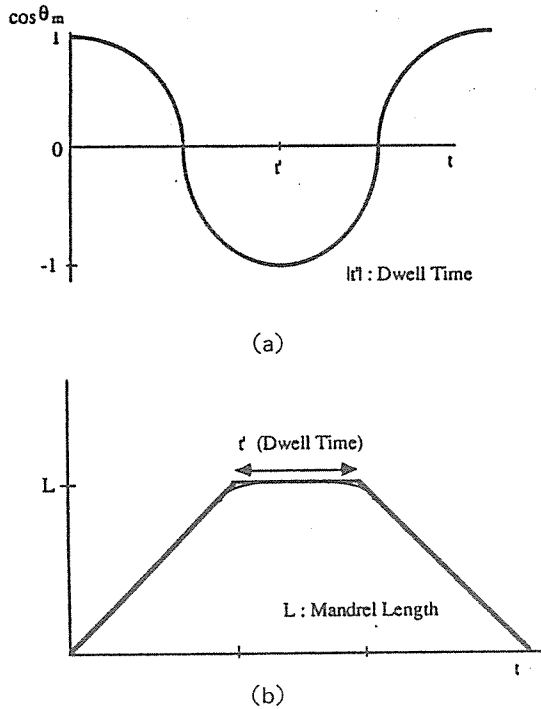


Fig. 7. Graphic Format of Winding Pattern; (a) Mandrel (b) Traverse.

4. 모형제작 및 실험

4-1. F/W Machine 모형의 제작

Winding Pattern을 생성하는 방법은 크게 두가지가 있다. 하나는 컴퓨터나 Programming Station을 이용하여 각 축의 위치를 미리 예측, 계산해내는 Analytical Method이며, 다른 하나는 위와 같은 방법으로 얻은 데이터를 적용하여 실제 F/W Machine을 실행시킨 후 원하는 결과를 얻을 때까지 Winding Pattern의 수정을 반복하는 Tracing Method이다. Program에서 계산한 공정변수들은 이론적인 값이므로 와인딩시의 조건에 따라 실제 F/W Machine상에서는 오차를 보이게 된다. 그러므로 본 연구에서는 위 두가지를 혼합한 방법을 제시하고 그 결과를 검증하기 위해 F/W Machine의 모형을 제작하였다. 모형의 제원 및 구성은 Fig.8에 보이고 있다.

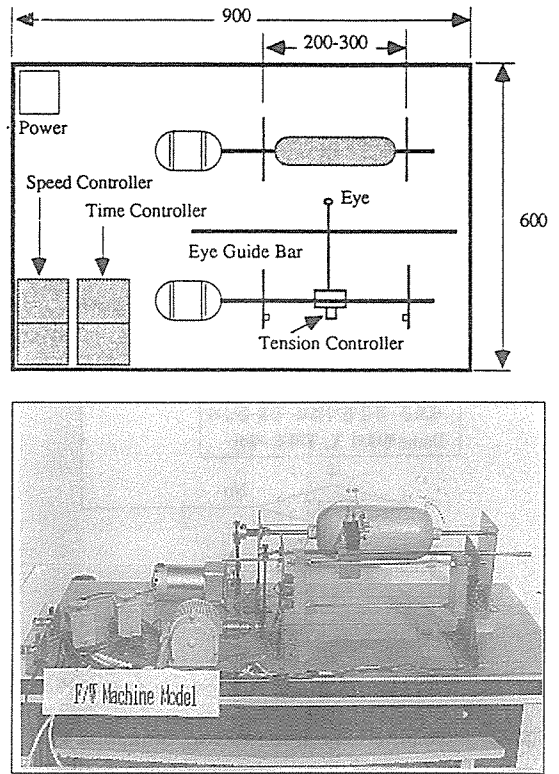


Fig.8. Schematic Representation of the F/W Machine Model.

이 모형은 Mandrel의 회전운동, Traverse의 직선운동, Eye의 위치이동 등의 제어가 가능하게 제작되었으며 Pressure Vessel의 와인딩시 Dome 부분에서 Geodesic Path를 이룰 수 있도록 Dwell Time의 제어기능도 첨가하였다. 주 운동축인 Mandrel과 Traverse는 Speed Controller가 부착된 DC Servo Motor로 구동하였으며, Eye Guide Bar를 설치하여 Eye가 구조물의 표면을 따라 이동할 수 있도록 하였다. Dwell Time의 제어는 Timer를 사용하였으며 Traverse 운동의 역전과 Dwell Time 적용을 위해서 Limit Switch를 사용하였다.

4-2. Winding Pattern의 결정 및 검증

먼저 프로그램을 통해 입력된 Pressure Vessel의 제원으로부터 구조인자들을 결정하고, 이 값들의 응

력해석을 통해 Analytical Method로 공정변수들을 계산하였다. 그리고 이 공정변수들을 Machine과 Mandrel의 모형에 적용시켜 와인딩 실험을 행하였고 설정된 오차한계를 만족시킬 때까지 Teaching Method에 의하여 공정변수들을 수정, 재적용하였다. 실험을 위해 오차한계는 Winding Angle의 경우 1° 이내, Geodesic Path가 Boss에서 이루는 각도는 0.1 Radian이내로 설정하였다. 얻어진 최적의 공정변수는 Graphic Format인 Winding Pattern으로 Database에 저장하여 재현성을 가질 수 있게 하였다.

실험방법은 Winding Angle의 목표값을 4가지 (14.48°, 33.37°, 54.75°, 75.16°)로 설정한 후, 각각의 경우에 대해 프로그램 내에서 Mandrel의 회전 각속도를 0.1~3.2 radian/sec로 변화시키면서 그에 따른 Traverse의 선속도와 Dwell Time을 취하여 F/W Machine의 모형에 적용하였다. 또한 Fig.9에서 보인 방법에 의해 Winding Pattern의 수정은 최대 3회까지 반복하였다.

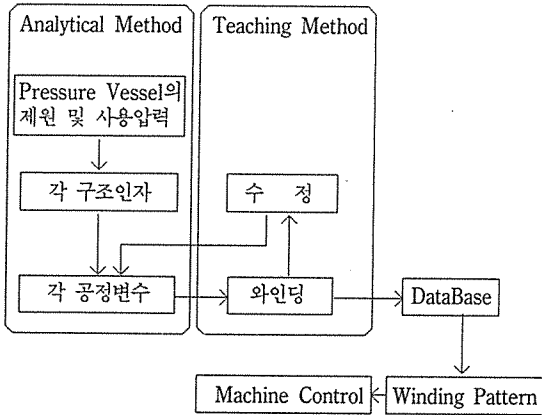


Fig. 9. Modification Methods of the Winding Pattern.

5. 결과 및 검토

5-1. 프로그램의 출력

CAD 프로그램의 결과를 Fig.10부터 Fig.15에 보이고 있다. Fig.10에서는 Pressure Vessel의 재원을 대화식으로 입력한 후, 최대의 내압성을 갖는 Dome

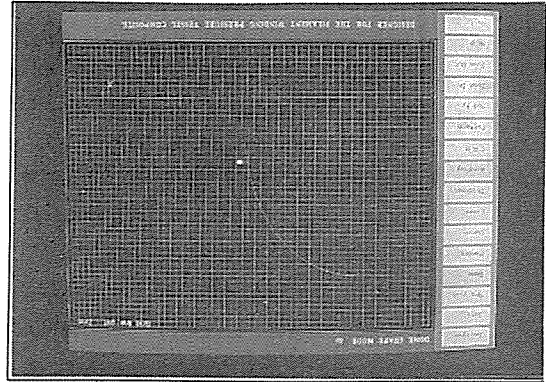


Fig. 10. Plotting Mode of the Dome Shape.

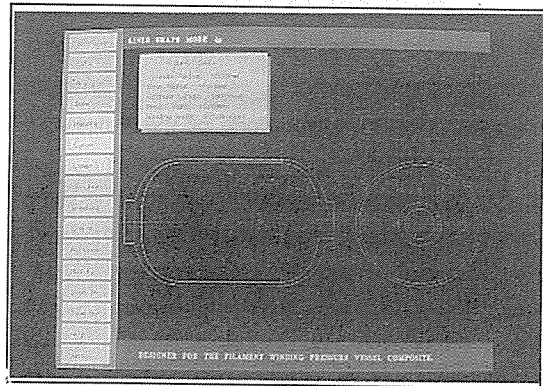


Fig. 11. Plotting Mode of the Mandrel Shape.

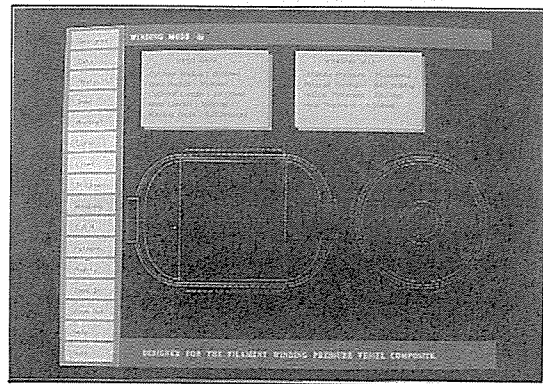


Fig. 12. Plotting Mode of the Pressure Vessel.

의 형태 데이터를 계산하여 그 형태를 XY평면에 도시하여 Plotting한 것이다. Fig.11은 Mandrel의 전체 형태를 입력데이터와 함께 출력한 것이다. 여기에는 사용자가 Mouse나 Digitizer를 이용하여 Liner 형태의 설계기능과 수정기능을 포함하고 있다. Fig.12

에서는 Operating Pressure와 Material Strength를 대화식으로 입력하여 응력해석을 통해 최적 Winding Angle과 각 Winding Thickness를 결정한 후, 그 결과를 적용하여 와인딩된 형태를 보여주고 있다.

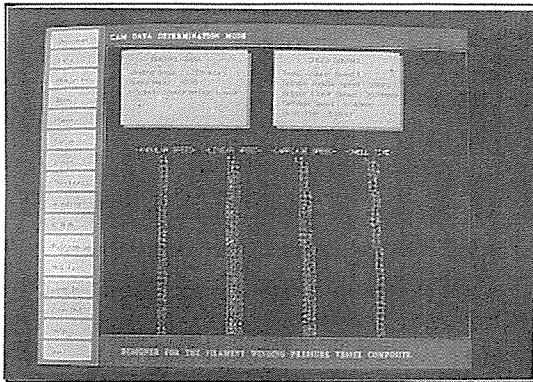


Fig. 13. Determination Mode of the Process Variables.

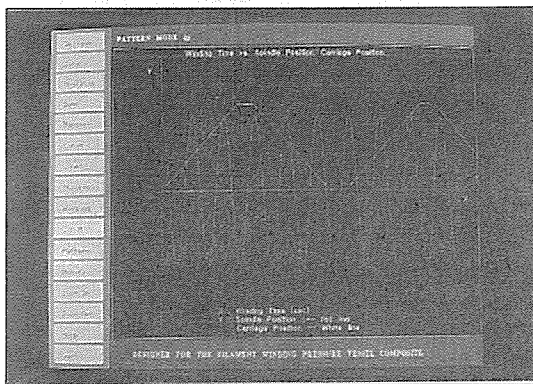


Fig. 14. Winding Pattern Determined by Analytical Method.

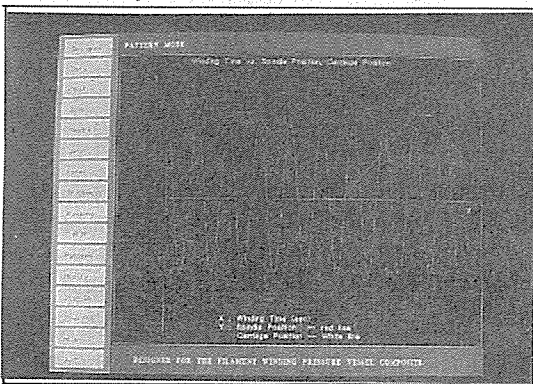


Fig. 15. Winding Pattern Modified by Teaching Method.

각 공정변수간의 관계를 출력한 후, 사용자의 선택에 의해 Analytical Method로 공정변수값을 계산 하는 과정을 Fig.13에 보이고 있다. Fig.14와 Fig.15에 나타난 것은 특정한 Winding Angle(ex. 75.16°)을 부여하기 위한 Graphic Format의 Winding Pattern으로, Fig.14는 단순계산에 의한 Analytical Method로 출력한 형태이고 Fig.15는 Fig.9에서 보인 Teaching Method에 의해 수정을 가한 후에 얻은 형태이다.

5-2. Winding Pattern

Fig.14에서 보인 Analytical Method에 의한 Winding Pattern을 모형에 적용하여 Helical Winding 하면 목표로 제시된 Winding Angle 75.16°에 비하여 측정된 평균값은 78.8°가 되어 설정된 오차의 한계를 벗어난다. Teaching Method로 수정한 후 얻은 Fig.15의 Winding Pattern을 이용하여 실험한 결과, 측정된 Winding Angle의 평균값은 74.8°이며 설정된 오차의 한계를 만족시켰다. Fig.16과 Fig.17은 Fig.14와 Fig.15에서 보였던 Graphic Format을 수치 데이터로 변환시켜서 Plotting한 것이다. Tarverse 속

Wing Angle : 74.8(degree)
 Angular Speed : 0.6(rad/s)
 Traverse Speed: 10.1(mm/s)
 Dwell Time : 4.9 sec

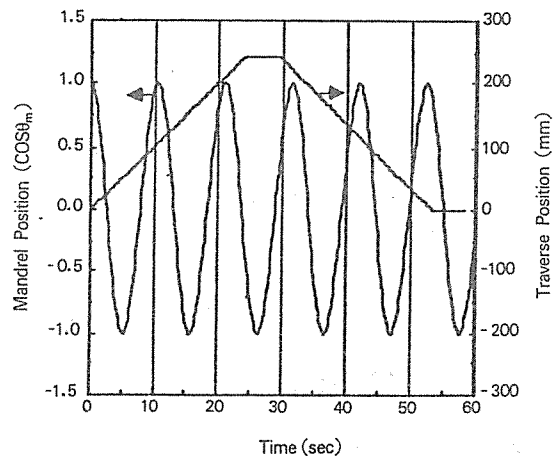


Fig. 16. Modified Graphic Format of Winding Pattern with Winding Angle of 75.16°.

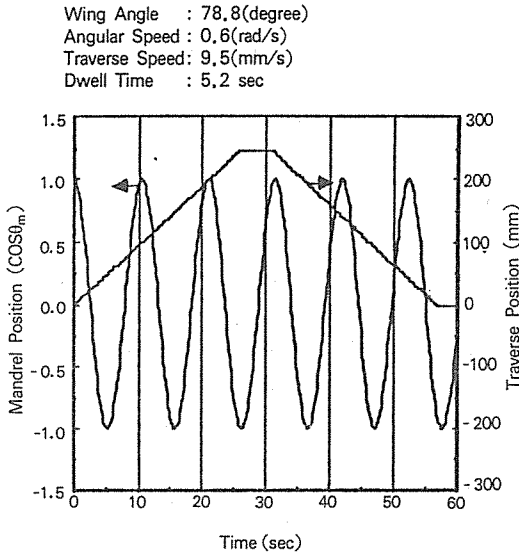


Fig. 17. Unmodified Graphic Format of Winding Pattern with Winding Angle of 75.16°.

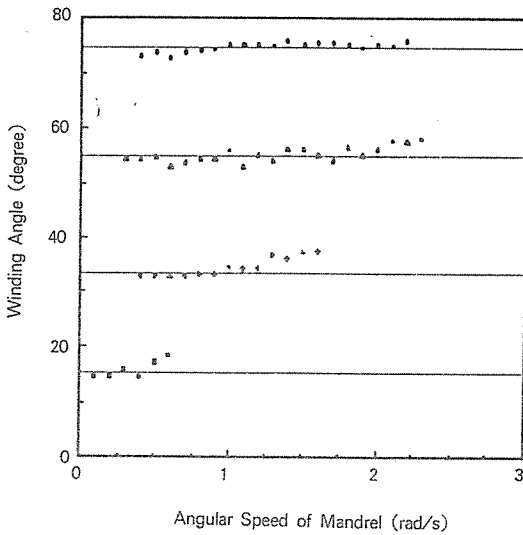


Fig. 18. Winding Angle before Modification with Target Angle of; ● : 75.16°, ▲ : 54.75°, ◆ : 33.37°, ■ : 14.48.

도와 Dwell Time의 수정에 의해 Winding Angle의 목표값에 근접하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 18은 4가지로 제시된 Winding Angle에 대해 Analytical Method로만 얻은 Winding Pattern을 이용하여 실험한 후, Winding Angle을 측정된 결과

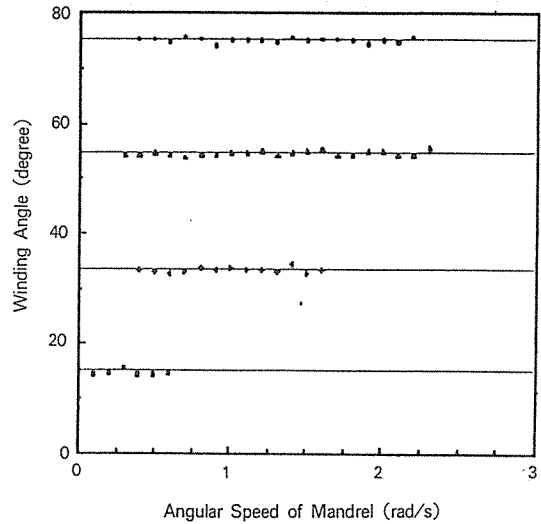


Fig. 19. Winding Angle after Modification with Target Angle of; ● : 75.16°, ▲ : 54.75°, ◆ : 33.37°, ■ : 14.48.

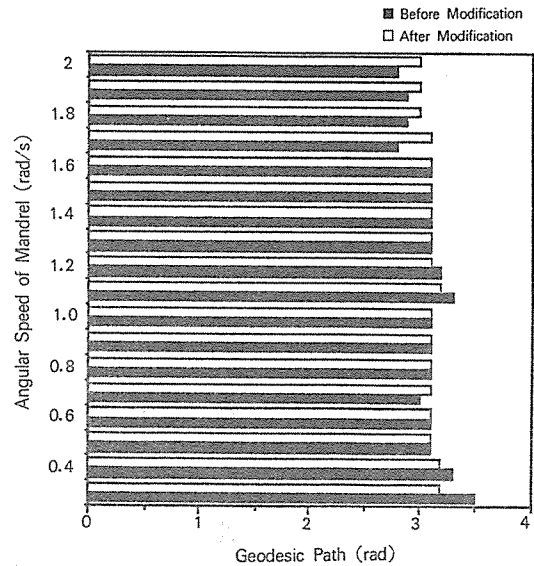


Fig. 20. Modification of Path on Dome with Winding Angle of 54.75°

이다. Fig. 19는 같은 조건에서 Teaching Method로 Winding Pattern을 수정하여 실험하고 Winding Angle을 측정된 결과로서 Fig. 18에 비하여 균일한 값을 얻었으며 $\pm 1^\circ$ 의 오차한계를 만족시켰다.

Fig. 20은 Geodesic Path의 형성을 비교하기 위하

여, Analytical Method와 Teaching Method의 두 경우에 대해 보강섬유가 Boss에 도착하는 점과 다시 출발하는 점이 Boss의 중심과 이루는 각을 측정하여 비교한 것이다. Teaching Method를 이용한 경우 ± 0.1 Radian의 오차한계를 만족시켰다.

6. 결 론

본 연구에서는 Filament Winding 복합재료 중의 하나인 Pressure Vessel의 최적형태를 설계할 수 있고, 응력해석을 통한 각 구조인자의 해석 및 각 공정변수를 결정할 수 있는 기능을 갖춘 CAD 프로그램을 Workstation 환경하에서 개발하였다. 그리고 모형실험을 통해 Computer Controlled F/W Machine의 공정자동화에 필수적인 Winding Pattern의 개발방법을 Analytical/Teaching Method를 혼합 사용하여 제시하였다. Analytical Method로 계산된 공정변수의 이론치를 Machine에 적용시킨 후, 설정된 오차범위를 만족시킬 수 있도록 Teaching Method로 수정하면 정확한 Winding Angle 및 Geodesic Path를 얻을 수가 있다. Analytical/Teaching Method를 혼합 사용한 결과로 얻어진 Winding Pattern을 제어데이터로 이용하면 균일한 구조인자값을 나타내는 구조물을 얻을 수 있으며 DATABASE에 저장되어 재현성을 지닌다.

후 기

본 연구는 일주학술문화재단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사하는 바입니다.

참 고 문 헌

1. E.D. Efremov, A Differential Equation of

Motion for the Winding Point, Tech. of Textile Industry, pp.91-96, 2(1960).

2. E.D. Efremov, The Equation of Yarn Winding on a Surface of Rotation, Tech. of Textile Industry, pp.76-80, 2(1965).

3. R.W. Eshbauch, Upgrading Mechanical Filament Winding Machines with Computer Controls, 41st Annual Conference, Composite Institute, Session 3-B(1986).

4. M.J.Owen, V. Middleton and D.G. Elliman, Developments in Filament Winding, Proceeding of 2nd Conference on Advanced Composites, pp.35-43(1986).

5. M. Maheshwari, F/W of Non-Axisymmetric Fuel Tank, 31st International SAMPE Symposium, pp.880-889(1986).

6. R.R. Roser, Computer Graphics Streamline the Programming of the Filament Winding Machine, 30th National SAMPE Symposium, pp.1231-1237(1985).

7. R.R. Roser, New Generation Computer Controlled Filament Winding, 31st International SAMPE Symposium, pp.810-821(1986).

8. K.W. Kirberg, G.Menges and J. Mitscherling, How to Determine Control Data for Filament Winding, 42nd Annual Conference, Composite Institute, Session 6-F(1987).

9. Hechmi, T.J. Kang and A. El-Shiekh, On the Mechanics of Filament Winding, Part 1: A Generalized Model, 34th International SAMPE Symposium, pp.1130-1141(1989).

10. P.O. Sjoblom, Software-A Necessary Tool in Composite Design, 30th National SAMPE Symposium, pp.1202-1209(1985).