

## 마찰을 고려한 경편기용 정경빔의 설계에 관한 연구

임문혁\*, 김영규\*\*, 신현명\*

### A Study on the Design of the Warper Beam Considering Friction

Moon-Hyuk Im\*, Young-Gyu Kim\*\* and Hyun-Myung Shin\*

#### ABSTRACT

An analysis for the warping process has been performed to design the warper beam. Nonlinear material response is included in the physical model of polyester yarn. Large deformation finite element simulation considering contact and frictional analysis are used to obtain the pressure on the barrel of the warper beam. Loading condition on the flange is assumed by using the pressure on the barrel, winding number of yarn, Poisson's ratio of fiber, and fiber volume fraction. By using the above loading conditions NASTRAN finite element simulation is performed to calculate stress distribution and deformation of the warper beam. By comparing the deformed shape of the flange with experimental result, loading condition on the flange has been obtained. The obtained loading conditions on the barrel and flange can be utilized to design the warper beam.

**Key Words** : warper beam(정경빔), FEM(유한요소법), nonlinear(비선형), large deformation(대변형), friction(마찰)

#### 1. 서론

경편기(經編機)용 정경빔(整經 beam)은 지난 10여년간 경편기의 국내외 수요가 지속적으로 증가함에 따라 국내외 수요가 지속되고 있다. 국내에도 이러한 정경빔을 제작하여 국산화하고 다량 수출하고 있는 회사가 있으며, 수요업체들은 빔 교체시간을 단축하여 생산성을 향상시키기 위하여 대형빔의 개발을 희망하고 있으며, 수출시에는 재료비의 상승과 아울러 수출경쟁력이 취약해지므로 경량화된 빔의 개발이 요구되고 있다. 따라서 국내의 빔 생산업체로서는 경량화된 대형빔의 개발이 필요한 시점이나, 자체설계기술이 없으므로 곤란한 실정이다. 경편기용 정경빔은 고장력사를 사용하는 경우

가 많으며, 워낙 많은 양의 원사를 정경하는데 사용하므로 빔에 작용하는 하중이 매우 커서 사용 중에 빔이 파손될 위험성이 높다. 빔이 파손될 시에는 경편기 본체에도 손상을 줄 수 있어서 경편기용 정경빔의 변형에 대하여 ISO에서는 기준치를 규격화해 놓고 있다. 변형량을 줄이기 위해서는 빔 플랜지의 두께 등 치수를 증가시켜야 하나 이는 사용재료의 증가를 가져온다. 특히 빔의 경우 원재료는 수입된 재료를 사용하므로 국제경쟁력을 확보하기 위해서는 보다 정확한 설계기술의 개발로 제품을 경량화해 나아가야 한다. 정경빔의 설계를 위해서는 원사에 의하여 빔에 작용하는 하중상태의 자료가 필요하지만, 현재까지는 이러한 하중치에 대한 자료나 계산 방법이 없으며 실험적으로도 하중상태

\*\*\* 2002년 6월 5일 접수

\* 계명대학교 기계자동차공학부

\*\* 한국생산기술연구원

를 직접 파악할 수가 없으므로, 공학적인 빔 설계가 이루어지지 못하고 있다. 따라서 본 연구를 통하여 정경빔에 작용하는 적절한 하중상태를 계산함으로써 빔 설계에 활용하고자 한다.

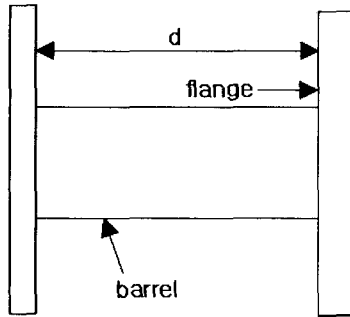


Fig. 1 Schematic diagram of the warper beam

## 2. 유한 요소 해석

### 2.1 정경빔의 물성치

경편기용 정경빔은 전세계적으로 알루미늄을 주로 사용하여 제작하고 있다. 국내에서는 플랜지 부분을 단조 공정을 통하여, 배럴 부분은 압출 공정에 의하여 가공한다. 가공된 두 부분을 자동용접법(MIG)에 의하여 용접하여 Fig. 1과 같이 빔을 제작한다. 재질이 다른 두 부분이라도 용접하면 강도가 증가하여, 항복이 일어나는 경우에도 용접부에서는 항복과 파괴가 발생하지 않는다. 정경빔의 변형과 응력분포를 해석하기 위해서는 재료시험을 통하여 물성치를 파악하여 해석에 사용하여야 하므로, 플랜지와 배럴의 ASTM B557-94 규격의 재료시험편을 사용하여 다음의 물성치를 구하였다.

### 2.2 폴리에스테르사의 물성치

정경시에 사용된 폴리에스테르사는 정경시 20gf의 균일한 장력으로 빔에 와인딩되면서 배럴에는 압축력을 작용하고, 플랜지에는 측면압력을 작용한다. 먼저 배럴에 작용하는 압축력을 계산하기 위하여 폴리에스테르사의 물성치를 인장시험과 굽힘시험을 통하여 구하였다.

Fig. 2의 선도로부터 폴리에스테르사의 초기 탄성계수  $1.0 \times 10^8 \text{ gf/cm}^2$ 을 구하였다. 폴리에스테르

Table 1 Material properties of the flange and barrel

	Flange		Barrel		
	Young's Modulus (E) (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (E) (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	
Radial Direction	$8.56 \times 10^4$	275.4	Lateral Direction	$7.5 \times 10^4$	170.7
Tangential Direction	$8.50 \times 10^4$	275.0	Thickness Direction	$7.1 \times 10^4$	172.2
Thickness Direction	$8.52 \times 10^4$	275.1	Tangential Direction	$7.6 \times 10^4$	186.6

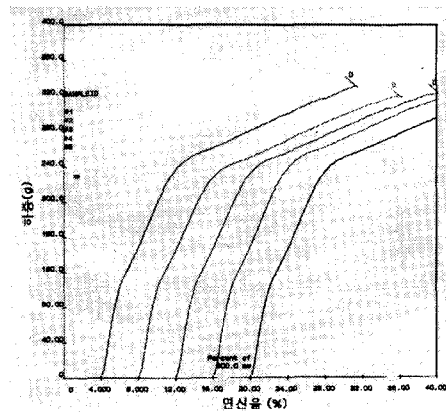


Fig. 2 Stress(Load)-strain curve of polyester yarn under uniaxial tension

사가 정경빔에 와인딩(winding)될 때 장력이 20gf로 균일하고, 와인딩될 때는 마찰상태에서 굽힘 변형을 하게 되므로 변형되는 폴리에스테르사에는 20gf 이하의 장력이 작용된다. 따라서 탄성계수는 초기 탄성계수를 구하여 사용하기로 하였다.

다음으로, 큰 변형을 하며 와인딩되는 폴리에스테르사의 굽힘거동을 구하기 위하여 Kawabata 굽힘시험기를 사용하여 굽힘실험을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 3과 같은 폴리에스테르사의 비선형 모멘트-곡률의 관계를 구하였다.

폴리에스테르사의 비선형 모멘트-곡률의 식은 Fig. 3을 사용하여 다음과 같이 구하였다.

$$M = 0.0000039 + 0.0067192 \kappa - 0.018558 \kappa^2 + 0.0238442 \kappa^3 - 0.0132098 \kappa^4 + 0.0026091 \kappa^5 \quad (1)$$

단, M : Moment(gf-cm),  $\kappa$  ; curvature(cm<sup>-1</sup>)

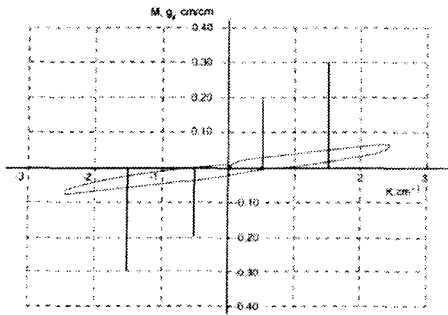


Fig. 3 Moment-curvature curve of polyester yarn

### 2.3 배럴에 작용하는 압력

#### 2.3.1 정경공정 시뮬레이션

경편기용 정경빔은 원사가 와인딩될 때 원사에 의하여 하중을 받아 응력과 변형이 발생하게 된다. 이러한 원사에 의한 하중상태를 파악하기 위하여 시뮬레이션 프로그램이 개발되었다.

원사의 와인딩 공정 중에는 원사의 대 변형 굽힘 공정이 주로 발생하고 있으며 원사와 원사와의 마찰 접촉문제를 고려하여야 한다. 개발된 프로그램은 원사의 비선형 굽힘특성을 고려할 수 있고 배럴과 접촉하며 와인딩되는 원사의 형상을 시뮬레이션할 수 있도록 개발되었다. 그러나 마찰 접촉문제는 포함되어 있지 않으므로 다음 절에서 별도로 고려하기로 한다.

개발된 프로그램은 대 변형 보 이론과 유한요소법을 사용하며, 재료와 기하학적 비선형 문제의 해석이 가능한 프로그램이다. 여기에 배럴과 같은 원형 단면과의 접촉문제를 해결할 수 있는 접촉 알고리즘이 포함되어 있다. 따라서 원사와 같은 유연한 비선형 재료의 물질이 배럴과 원사를 와인딩하는 공정의 해석이 가능하다.

다음은 시뮬레이션에 사용된 입력값들이다.

- (1) 원사 길이: 202cm
- (2) 원사 장력: 20gf
- (3) 배럴 반경: 15cm
- (4) 요소 수: 101개
- (5) 요소 길이: 2cm
- (6) 노드 수: 102개

- (7) 원사 초기 탄성계수:  $1.0 \times 10^8 \text{ gf/cm}^2$
- (8) 원사 단면적:  $6.04 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$
- (9) 원사 관성모멘트:  $4.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^4$
- (10) 원사 밀도:  $1.38 \text{ gf/cm}^3$
- (11) 시뮬레이션 타임스텝: 0.000005 sec
- (12) 시뮬레이션 시간: 2 sec (2 wdg)

위의 입력값들을 사용하여 반경 15cm의 배럴에 폴리에스테르사가 와인딩되는 형상을 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다. Fig. 4에서 배럴의 원주길이가 942.5mm 이므로 절점(node number) 47까지가 1번 감긴 원사에 해당되며 절점이 1씩 증가할 때 회전각은 0.021 rad 만큼 증가한다.

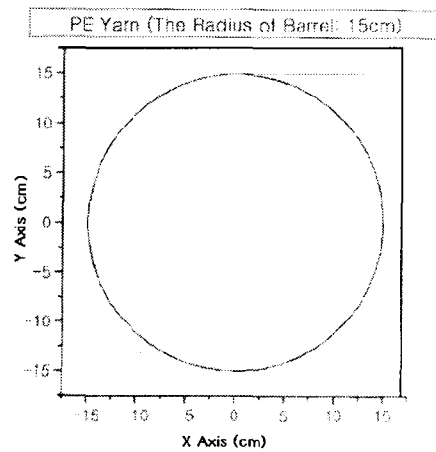


Fig. 4 Wound Shape of polyester yarn obtained by warping simulation

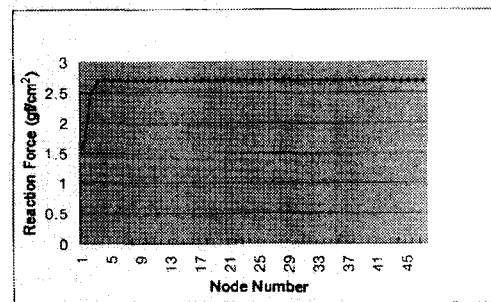


Fig. 5 Reaction forces acting on the yarn nodes calculated by warping simulation

폴리에스테르사의 와인딩 공정 시뮬레이션은 사용할 수 있는 요소갯수에 제한이 있어서 배럴의 표면에 2회 와인딩하는 공정을 시뮬레이션하였다. Fig. 4의 결과에서 보는 바와 같이, 본 연구를 통하여 개발된 프로그램은 폴리에스테르사가 15cm 반경의 배럴 표면에 와인딩되는 형상을 보여준다. 상단의 수평부분은 장력이 작용하는 부분이다.

폴리에스테르사에 작용하는 반력은 고정단에서 장력에 대응하는 반력이 계산되었으므로 시뮬레이션이 성공적으로 이루어진 것을 알 수 있다(작용 반작용의 원리). 따라서 계산된 반력값들을 배럴에 작용하는 하중으로 생각할 수 있으므로 Fig. 5에서와 같이 각각의 절점에서의 분력을 사용하여 압력 분포를 계산하였다. 결과적으로 원사가 1회 감긴 경우에 배럴에 작용하는 압력은 1.345gf/cm인 것으로 계산되었다.

반경이 5cm와 10cm인 배럴(barrel)에 원사가 와인딩되는 공정을 시뮬레이션해 본 결과, 5cm인 경우 압력이 4.25gf/cm, 10cm인 경우에는 압력이 2.07gf/cm 가 작용하는 것으로 계산되었다. 따라서 배럴에 작용하는 단위길이당 압력은 배럴의 반경에 반비례하는 것을 알 수 있었다.

배럴에 원사 1개가 1번 와인딩시에 작용하는 하중은 반경이 5cm이면 133.38gf, 10cm이면 129.74gf, 15cm이면 126.77gf로 계산되었다. 따라서 반경 증가에 따른 원사 1회 와인딩시 배럴에 압축력은 다소 감소하는 경향을 보이니 설계를 위하여는 안정성을 고려하여 반경이 15cm 이상의 경우 126.77gf로 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다.

### 2.3.2 마찰을 고려한 배럴의 압축력 모델링

앞의 계산결과는 원사의 마찰조건을 고려하지 않은 가정 하에 이루어진 것이므로, 다음에서 원사의 마찰조건을 고려하여 배럴에 작용하는 압력을 계산하였다. 폴리에스테르사의 마찰계수로 0.58을 사용하였다.<sup>1</sup>

한쪽 끝단이 고정된 원사가 마찰있는 배럴이나 원사에 1회전 와인딩될 때 원사에 작용하는 장력은 다음의 식으로 표시된다.<sup>3</sup>

$$T = T_0 \cdot e^{\mu\theta} \quad (2)$$

단, T: 장력

$T_0$ :  $\theta=0$ , 고정단에서의 장력

$\mu$ : 마찰계수

$\theta$ : 각도

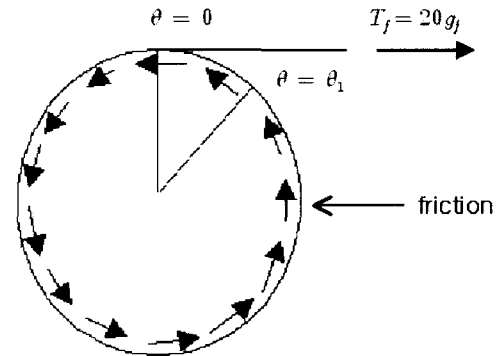


Fig. 6 Wound shape model of polyester yarn considering friction

주어진 장력조건을 고려하면( $\theta = 2\pi$ 에서  $T=20gf$ ) 위의 식은 다음과 같다.

$$T = 0.523 e^{0.58\theta} \quad (3)$$

따라서 배럴에 작용하는 압력함수는 장력에 비례하므로 앞의 식과 같은 지수함수로 표시되며,  $\theta = 2\pi$ 에서 P가 1.345gf/cm 이므로 경계조건을 사용하면 압력함수는 다음의 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = 0.035 e^{0.58\theta} \quad (4)$$

식(4)의 압력함수를 사용하여 원사의 1회전시의 압축력을 적분에 의하여 계산하면 33.7 gf가 되며, 584개 yarn의 1회전시 압축력은 19.7 kgf가 된다. 와인딩이 증가하여도 원사의 1회전시 압축력의 변화는 없는 것으로 가정하였으므로 29,550번 와인딩시의 총 압축력은 581.6 tonf이며, 배럴의 표면에 작용하는 압력은 14.06 N/mm<sup>2</sup>이 된다.

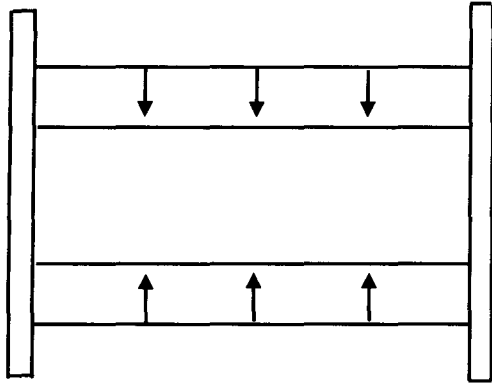


Fig. 7 Pressure model acting on the barrel

**2.4 플랜지에 작용하는 하중 모델링**

원사가 빔에 적층될 때 배럴에는 압축력이 작용하며, 플랜지에는 측압이 작용하게 된다. 이 압력은 플랜지 반경 150mm에서부터 원사의 적층이 이루어지므로 이 위치에서 최대 압력이 플랜지에 작용하며, 반경이 증가할수록 원사의 적층이 적어지므로 측압도 작아진다.

또한 섬유 단면이 원형이며 원사는 공극률이 많으므로 압력이 큰 하중에서는 공극률이 작고 상층으로 갈수록 공극률이 증가한다. 따라서 플랜지에 작용하는 측면 압력도 작아지게 된다.

위의 조건들을 사용하고 폴리에스테르사의 프와송 비(Poisson's ratio)를 0.43로 고려하면 플랜지에 작용하는 측압은 반경이 150mm일 때 6.05 N/mm<sup>2</sup>가 되고, 반경이 증가할수록 반경 증가의 제곱에 비례하여 감소하게 된다.<sup>2</sup> 실제로 정경실험 결과 측정된 플랜지 변위값과 근사한 변위를 얻기 위하여 측압은 반경이 150mm 일때 5.45 N/mm<sup>2</sup>로 계산되었다.

다음의 선도는 플랜지에 작용하는 측압을 나타낸 것이다.

**2.5 정경실험과 수치해석 결과 비교**

정경기용 정경빔은 고장력사를 사용하는 경우가 많으므로 고장력사인 폴리에스테르사를 사용하여 정경실험을 수행하고 빔의 변형량을 측정하였다. 빔의 변형량은 플랜지의 내면의 거리를 측정하므로써 이론적인 해석결과와 비교하였다.

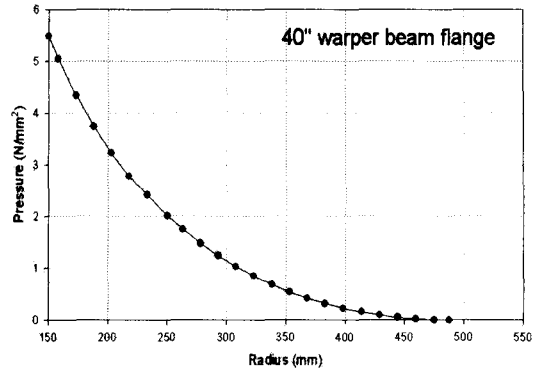


Fig. 8 Pressure model acting on the flange

정경실험에는 폴리에스테르 75D/72f SD 가 사용되었으며, 정경실수는 584개, 장력은 20gf, 총실의 길이는 59,001m, 최대 와인딩은 29,550번이었으며, 플랜지 내면간의 거리 d는 Fig. 1에서 초기값 430.2mm에서 최대 와인딩시에 432.5mm가 되었다. 따라서 플랜지 내면간의 거리가 최대 와인딩시에 2.3mm 증가하였다.

앞에서 구하여진 배럴의 압축력과 플랜지의 측압을 사용하여 정경빔의 변형과 응력상태를 구하여 보았다. 다음은 압력 P = 14.06 N/mm<sup>2</sup>이 배럴에 작용하는 그림이다.

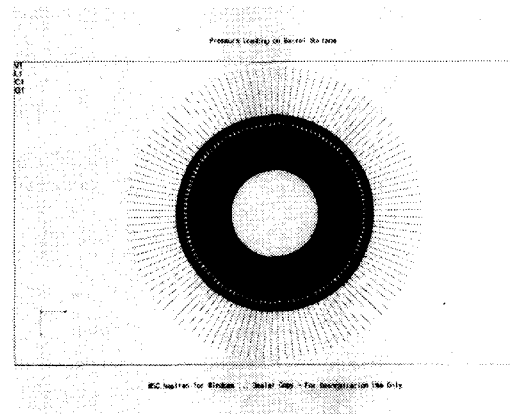


Fig. 9 Pressure input acting on the barrel for simulation

Fig. 10은 플랜지 내면에 작용하는 축압의 입력을 보이는 그림이다.

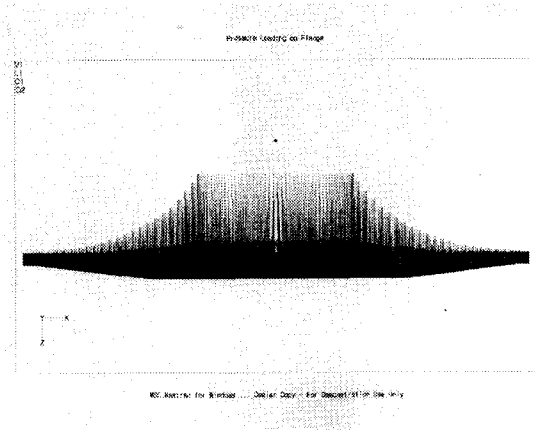


Fig. 10 Pressure input acting on the flange for simulation

Table 1의 재료 물성치와 앞의 하중상태들을 사용하여 해석을 수행한 결과 Fig. 11에서와 같은 변위의 분포도를 얻을 수 있었다. 계산 결과 플랜지 최대 변위는 끝단에서 1.195mm이었다.

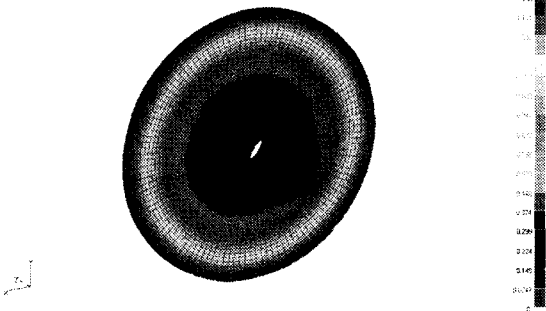


Fig. 11 Deformation of warper beam

응력분포의 계산 결과는 다음과 같으며, 최대 응력은 배럴 중심에서 147.0 N/mm<sup>2</sup>이다.

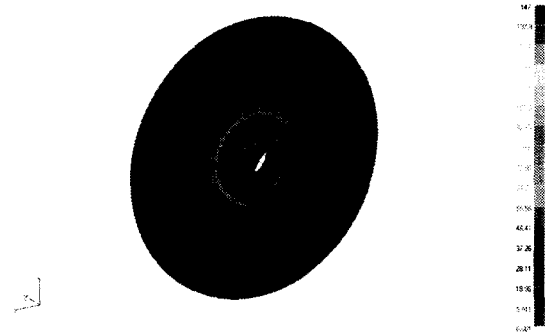


Fig. 12 Stress distribution of warper beam

플랜지의 최대변위는 정경실험 결과치인 1.25mm에 근접하므로 Fig. 6과 Fig. 7의 하중상태 모델링이 매우 적합하다는 결과를 보인다.

응력분포의 계산결과 최대 응력은 배럴 중심에서 147.0 N/mm<sup>2</sup>이나, 배럴의 항복응력이 170.7 N/mm<sup>2</sup> 이상이고, 플랜지에서 최대응력이 114.0 N/mm<sup>2</sup>이나 항복응력이 275.4 N/mm<sup>2</sup>이므로 현재의 정경빔의 설계가 하중에 대하여 안정적인 것을 알 수 있었다.

### 3. 42inch 정경빔의 설계 및 해석

현재 생산되고 있는 40inch 정경빔을 근거로 하여 42inch 정경빔을 Fig. 13과 같이 플랜지 외경이 각각 350, 400, 500 mm에 대해 축대칭 모델링하고 각각에 대하여 응력과 변형상태를 계산하였다.

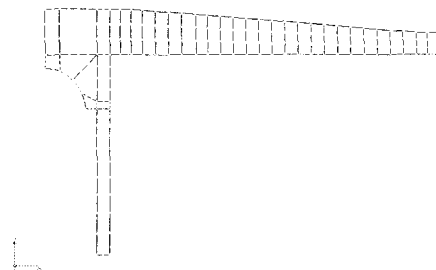


Fig. 13 Modelling of 42" Warper beam

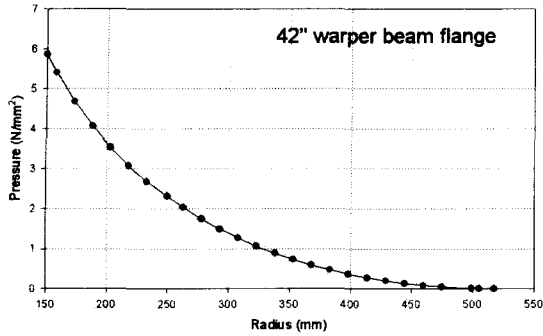


Fig. 14 Pressure model acting on the 42" warper beam flange

42inch 빔은 40inch 빔에 비하여 원사의 정경사장이 많으므로 배럴과 플랜지에 작용하는 압력이 크다. 따라서 42inch 빔의 배럴에 작용하는 압력은 15.1 N/mm<sup>2</sup> 가 되고 플랜지에 작용하는 압력도 증가하여 Fig. 14에서와 같이 최대 압력이 5.85 N/mm<sup>2</sup>가 된다.

앞에서 모델링된 42인치 빔들에 대하여 응력과 변형량을 해석해 본 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었으며 지면상 플랜지의 변형이 가장 큰 500mm의 응력과 변형 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다.

Table 2의 결과에서 변위는 ISO 기준인 변위 3mm 범위 내로 수렴되고 있으며 플랜지 응력도 항복응력인 248.6 N/mm<sup>2</sup>보다 작고 배럴 응력도 항복응력인 170.7 N/mm<sup>2</sup> 보다 작으므로 폴리에스테르사에 대하여 안전하다.

Table 2 Results of FEM analysis

플랜지 외경 (mm)	플랜지 변위 (mm)	플랜지 최대응력 (N/mm <sup>2</sup> )	배럴최대응력 (N/mm <sup>2</sup> )	배럴 총하중 (Ton)
350	1.854	138	160	82
400	1.774	143	160	82
500	1.665	142	160	82

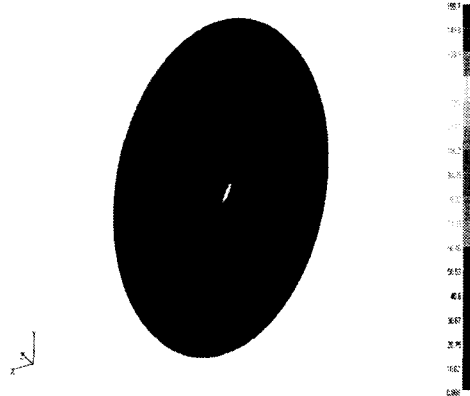


Fig. 15 Stress distribution of 42" warper beam with 500mm flange radius

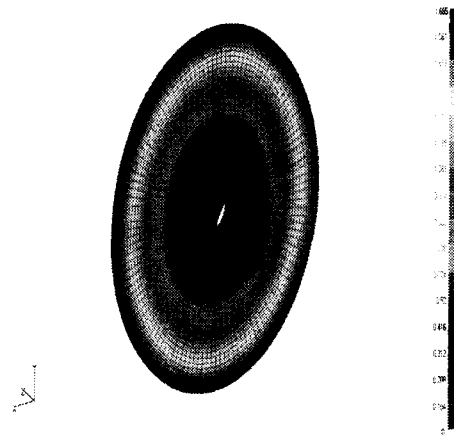


Fig. 16 Deformation of 42" warper beam with 500mm flange radius

현재 해석결과는 플랜지 외경에 무관하게 변위, 응력이 모두 설계안전 범위내에 있으나, 정경시험에 사용된 폴리에스테르사 보다 장력이 큰 실을 정경할 경우에는 플랜지 외경이 500mm인 경우에도 플랜지 변위가 2.74mm까지 증가할 수 있을 것으로 판단되어 안전도를 고려하여 플랜지 외경을 500mm로 선정하였다.

#### 4. 42inch 정경빔 플랜지의 압축 시험 및 고찰

42inch 정경빔용 플랜지를 ISO 기준에 맞추어 압축시험을 실시하였다. 플랜지의 밑면에 직경 300mm의 링으로 받친 후에 상부에 직경 816mm의 링을 사용하여 하중을 주어 변형시키며, 플랜지 끝단에서 10mm 떨어진 곳에서 다이얼 게이지를 사용하여 변위를 측정한다. 이 시험법은 ISO 8116-4에 따라서 수행하였으며 하중은 200Ton 프레스에서 압력을 증가시켜가면서 플랜지 변위를 측정하였다. Fig. 17은 플랜지 시료를 프레스에 42inch 빔을 올려 놓고, 플랜지 외경에서 10mm 안쪽에 변위를 읽기 위하여 다이얼 게이지를 설치한 그림이다. 플랜지 하중 시에는 하부에 링을 설치하고 플랜지를 설치하였으며, 프레스로 하중을 주기 위하여 상부에 링을 설치하였다.

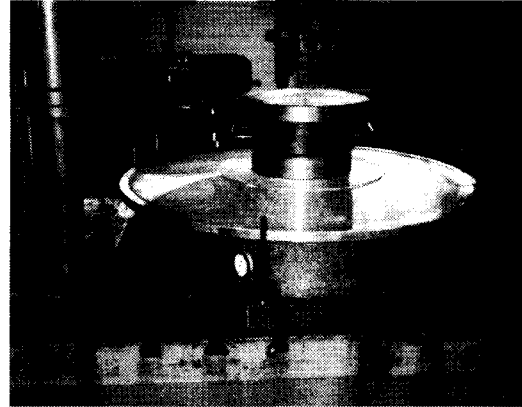


Fig. 17 Compression test of 42" warper beam

시험 결과가 Table 3에 정리되어 있다. 42인치 플랜지는 앞의 해석에서 총 하중 82ton을 작용했을 때 1.665mm 변형되는 것으로 계산되었으며, 1차 압축시험 결과에서는 82ton에서 1.62mm 변형되는 것을 알 수 있으며, 2차 압축시험 결과에서는 1.746mm 변형되는 것을 알 수 있다. 따라서 2회 시험결과를 평균하면 1.683mm 변위이므로 해석 결과와 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 이론적인 예측계산결과와 실험치와 일치하므로 앞에서 개발된 하중상태 모델링과 설계방법은 매우 적합한 것으로 판명되었다.

Table 3 Compression Test Results

항목 시료	1 차 시 험		2 차 시 험	
	하중 (Ton)	변형량 (mm)	하중 (Ton)	변형량 (mm)
정 경 빔 플 랜 지 (Φ42인치× 50T)	25.1	0.2	40.2	0.5
	40.2	0.5	50.2	0.8
	50.2	0.8	54.0	0.9
	62.8	1.1	60.3	1.1
	75.4	1.4	62.8	1.2
	77.9	1.5	69.1	1.4
	88.0	1.8	75.4	1.6
	-	-	79.1	1.7
	-	-	85.4	1.8
	-	-	88.0	1.9
-	-	90.4	2.0	

ISO의 품질등급을 참조해 보면 총 하중 82ton에서 1.7mm 변위는 820KN에서 1.7mm 변위이므로 가장 높은 등급인 class 4에 해당한다. 따라서 개발된 42inch 빔은 국제적으로 가장 높은 등급의 빔으로 판명되었다.

#### 5. 결론

중기청 기술혁신개발사업인 “대형 스판덱스(spandex) 정경빔 개발”과제를 통하여 세계 최초로 42inch 정경빔을 설계 제작하였으며, 정경빔을 국내에서 자체적으로 설계할 수 있는 원천기술인 설계 기술을 확보함으로써, 향후 다양한 정경빔을 자체 설계 개발할 수 있게 되었다. 본 과제를 통하여 개

발된 기술의 특징은 다음과 같다.

1. 정경공정 해석용 대변형 유한요소 프로그램의 개발, 폴리에스테르사의 비선형 물성기동 분석, 정경빔 하중상태 모델링, 국내 최초의 독자적인 정경빔 설계기술개발 및 경량화 설계, 알루미늄 단조 기법 개선 등을 통하여 세계 최초로 42inch 대형빔



을 설계하고 제작하였다.

2. 개발된 빔의 치수는 42inch × 21inch × 50T 이며, 중량은 175.4kgf 이다. 밸런싱 조건은 10g이내에서 만족하며, 플랜지 항복강도가 248MPa, 인장강도는 324MPa으로써 개발목표치를 만족하고 있다. 정경시험 결과 원사의 정경 후에 빔의 변형이 ISO 기준보다 적은 안정된 범위 내에 있었으며(1.6mm), 플랜지와 배럴의 용접부위에도 문제가 없는 것이 검증되었다.

3. 개발된 42inch 정경빔은 기존의 빔에 비하여 대형 빔이므로 수요업체의 빔 교체시간을 절감할 수 있다. 빔 1개당 월간 20시간의 작업정지 시간을 절감하여 수요업체인 경편업체의 생산성을 향상시킨다. 또한 빔 교체시간을 약 33.3% 절감하므로써 소요인력을 약 33.3% 절감하여 인건비 절감효과를 기대할 수 있다. 따라서 향후 개발된 대형빔의 수요가 크게 증가할 것으로 기대된다.

4. 개발된 빔 설계기술 개발은 기존의 설계기술로는 경량화 할 수 없었던 빔의 중량을 경량화 함으로써 제조업체의 원가절감에도 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 한국생산기술연구원의 생산기술연구 사업으로 수행된 연구임. 본 연구를 위하여 협조를 아끼지 않았던 형제정밀기계(주)의 최병기 사장님과 최인성 전무님께 감사를 드리는 바이다.

## 참고문헌

1. Morton, W. E. and Hearle, J. W. S., "Physical Properties of Textile Fibers," 3rd Ed., The Textile Institute, Manchester, 1993.
2. 이대훈, 박사학위 논문, 서울대학교, 서울, 1985.
3. Crandall, S. H. and Dahl, N. C., "An Introduction to the Mechanics of Solids," McGraw-Hill, N. Y., 1959.