

가변곡률을 가진 나선형 블레이드 제작을 위한 원추형 롤 성형 공정설계

Process Design of Conical Roll-Shaping for Fabrication of Variable Curvature Spiral Blade

양성문¹, 심도식², 지호성³, 백준호⁴, 김봉식⁴, 안석영⁵, 박상후⁵✉
Sungmoon Yang¹, Dosik Shim², Hoseong Ji³, Joonho Baek⁴, Bongsik Kim⁴, Seokyoung Ahn⁵, and Sanghu Park⁵✉

¹ 부산대학교 기계공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 한국생산기술연구원 그린가공공정연구실융화그룹 (Green Manufacturing Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

³ 부산대학교 기계공학부 초소형기계부품혁신센터 (School of Mechanical Engineering, MEMS Technology Centre, Pusan National University)

⁴ 에스코알티에스 기술연구소 연구개발부 (Department of Engineering Research, ESCO RTS Co., Ltd.)

⁵ 부산대학교 기계공학부 정밀정형 및 금형가공연구소 (School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National University)

✉ Corresponding author: sanghu@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-1011

Manuscript received: 2016.3.16. / Revised: 2016.9.10. / Accepted: 2016.9.19.

A conical roll-shaping process was proposed for fabrication of a metallic spiral blade applied to a small-scale wind turbine system. A spiral blade has continuously different curvatures, with a range of 100 to 350 mm radius. To fabricate this complex shape, we developed a conical roll-shaping process having two main conical rollers for feeding a blank sheet, and two cylindrical side rollers for control of local bending. For clear understanding of the process parameters, numerical analyses were conducted using a commercial code, Pam-Stamp. This study optimized the effects of process parameters, such as gap and angle between the main rollers and side rollers, and also the movement of side rollers. In order to increase the forming efficiency, a central rotation point was also calculated by the analytical approach. This developed rolling process can thus be utilized in a sheet metal forming process for obtaining spirally curved sheet metal shapes.

KEYWORDS: Small wind turbine (소형 풍력발전), Spiral blade (나선형 블레이드), Roll-Shaping (롤 성형), Conical roller (원추형 롤러), Variable curvature (가변곡률)

1. 서론

수십 - 수백 kW급 용량을 가진 소형 풍력발전은 설치가 간단하고 에너지 변환효율이 전반적으로 높아 최근 다양한 발전용량과 용도에 맞추어 활발히 개발되고 있다.¹ 전 세계적으로 소형 풍력

발전기는 매년 20% 수준의 급격한 성장세를 보이고 있으며,² 소형 풍력발전은 회전축의 형태에 따라 일반적으로 프로펠러형 (Propeller Type), 다익형 (Multiblade), 네덜란드형 (Windmill), 세일윙형 (Sailwing)의 수평축 풍력발전기 (Horizontal Axis Wind Turbine)와 사보니우스형 (Savonius), 횡류형

(Cross-Flow), 자이로밀형 (Giomill), 다리우스형 (Darrieuse)의 수직축 풍력발전기 (Vertical Axis Wind Turbine)로 구분할 수 있다.^{3,4}

본 연구에서는 기존의 수평 및 수직형의 장점을 모두 가지는 나선형 풍력발전기의 블레이드 (Blade) 제작에 관한 연구로 블레이드는 아르키메데스 (Archimedes)의 나선식 수차 원리를 이용한 나선형 (Spiral) 형태로 설계되었다.^{5,7}

나선형 풍력발전시스템은 시동풍속 (Operating Velocity)이 저속에서도 회전이 가능함에 따라 풍속 3 m/s 이하에서도 전력 생산이 가능하다. 또한 독특한 형상의 블레이드로 인해 높은 효율과 경관성이 우수하여 도심지의 가로등 또는 산책로의 보안등, 빌딩 옥상 등에 적용이 가능하며, 발생소음이 45 dBA로서 생활소음 규제기준 이하이기 때문에 주거지 지역에서도 사용이 적합하다.⁸

풍력 발전시스템용 블레이드는 풍속이 높은 경우에도 내구성 및 신뢰성이 확보되어야 하고, 비강성 및 진동 특성 등이 우수해야 하기 때문에 통상적으로 섬유강화 복합재료가 주로 사용된다. 그러나 나선형 블레이드의 경우 발전용량을 경제성이 높은 1.8 kW급 이상으로 올리기 위해서 그 직경이 2.8 m 수준으로 대형화가 필요하고 또한 형상이 복잡하기에 제작이 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 대형화에 따른 블레이드 경량화, 제작성 및 저비용 생산을 위해 원추형 롤 성형기술 (Conical Roll-Shaping)을 적용하여 금속 나선형 블레이드 제작공정을 개발하고자 한다.

롤 성형공정은 여러 개의 다단 롤러 (Roller)에 금속 박판을 통과시켜 원하는 형태로 가공하는 방법으로 튜브 (Tube), 파이프 (Pipe) 등을 만들 때 사용하는 금속성형공정으로 활용된다.⁹⁻¹² 본 연구에서는 원추형 롤러를 사용하여 가변곡률을 가진 블레이드 형상을 단일 공정으로 제작이 가능하도록 개발하였고, 공정변수에 대하여 상용 코드인 Pam-Stamp를 이용하여 해석적으로 연구하였다.¹³

2. 나선형 풍력 블레이드

나선형 풍력 블레이드는 항력과 양력 모두 이용함으로써 바람에 의한 공력성능을 극대화 할 수 있는 특성을 지니고 있으며, 프로펠러형 블레이드에 비해 상대적으로 적은 회전수에서 최대 발전효율을 얻을 수 있다. 특히 개방형 풍동의 출구와 주유동 방향의 축을 중심으로 접근유동장의 받음

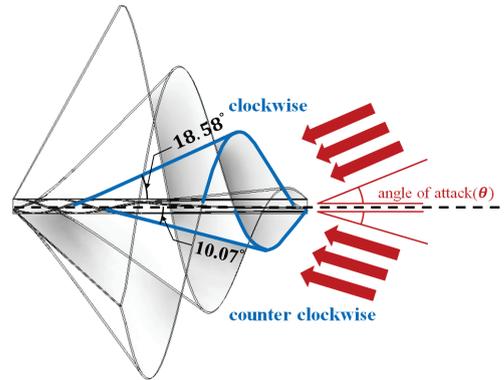
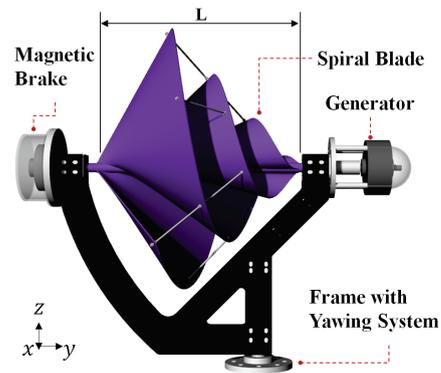
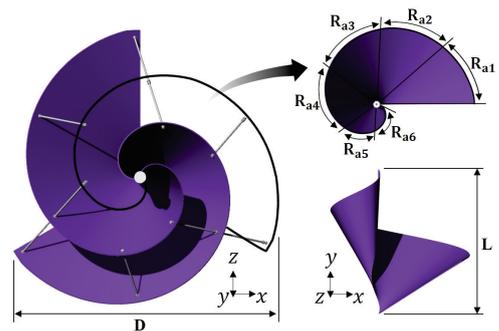


Fig. 1 Shape of spiral blade and definition on angle of attack and flow direction



(a) Assembled wind turbine system



(b) Spiral blades with each sectional average curvature

Fig. 2 Modeling of wind turbine system having spiral blades

각 (Angle of Attack) 변화에 따른 유동장 변화에 관한 선행연구를 살펴보면 Fig. 1에 나타난 바와 같이 날개의 축과 블레이드의 Spiral 이 이루는 각이 약 10° - 15° 사이에서 블레이드 내부에 가해지는 풍하중이 최대가 되어 접근 유동방향이 시계방향

(18.58°)과 반시계방향 (10.07°)에서 각각 최대 회전 수를 나타낸다.¹⁴

본 연구에서 제안하는 나선형 풍력발전 시스템의 3차원 형상을 Fig. 2(a)와 2(b)에 표현하여 나타내었다. 나선형 풍력 블레이드는 3개의 나선형 블레이드가 한 개의 회전축에 대해 서로 120° 간격으로 연결되어 구조이다. 또한 강성증대를 위해 블레이드 사이를 금속막대로 연결하였다. 나선형 풍력 블레이드의 총 길이 (L)는 536 mm, 직경 (D)은 750 mm이며 각각의 블레이드는 중심축 (Shaft)에 대해 대칭적인 구조로 측면에서 보았을 때 삼각뿔 모양의 형상을 지니고 있다.

2.1 나선형 블레이드의 기하학적 분석

나선형 블레이드의 형상의 바깥쪽 곡률반경 (Radius of Curvature)은 390 mm에서 60 mm까지 연속적으로 변하는 가변곡률 (R_{a1} to R_{a6})을 가지고 있으며, 블레이드를 펼쳤을 때 블랭크의 길이 (L_b)는 850 mm, 직경 ($2R_b$)은 약 928 mm이다 (Fig. 3 참조). 이러한 나선형 블레이드는 연속적인 가변곡률을 가지고 있기 때문에 각각의 곡률중심이 다르다. 따라서 롤 성형 공정으로 제작하기 위해서는 몇 개의 구간으로 나누어서 Table 1과 같이 구간별 평균 곡률값을 이용하여 제작해야 한다.

공정을 위한 롤의 구성 및 기하학적 설정은 목적형상을 펼친 블랭크의 분석을 통해 이루어진다.¹⁵ 블랭크의 외곽라인 (원호)을 일정 세그먼트 수로 나눈 점에서 아이소커브 (Isocurves)를 추출하고 그 커브들의 연장선 그을 때 교차점들 (C_a to C_e)이 생성되는데 그 점들은 롤의 회전 중심점이 된다. 또한 그 중심점을 기준으로 여러 구간 (Section)으로 나누어지며 그 안에 존재하는 아이소커브의 각도는 각각 같은 값을 가진다. 이를 이용하여 나선형 블레이드 목적형상의 각 구간에서 평균곡률을 기하학적으로 분석하여 공정변수를 최적화 할 수 있다.

목적형상을 펼친 블랭크는 원의 일부인 형상으로 이를 벤딩하기 위해서 서로 다른 원주속도에 의한 이동량 차이를 이용하여 원뿔모양 (Cone)의 형상 제작에 주로 쓰이는 원주형 롤을 사용한다.^{16,17}

2.2 성형회전중심

목적형상을 펼친 블랭크 분석을 통해 발견된 교차점들은 롤 성형 공정에서 롤의 회전 중심점이 되어 성형을 위해 공정 도중에 반드시 이동되어야

Table 1 Average value of curvature in each section

R_{a1} (mm)	R_{a2}	R_{a3}	R_{a4}	R_{a5}	R_{a6}
351.0	306.3	254.4	190.4	128.6	77.7

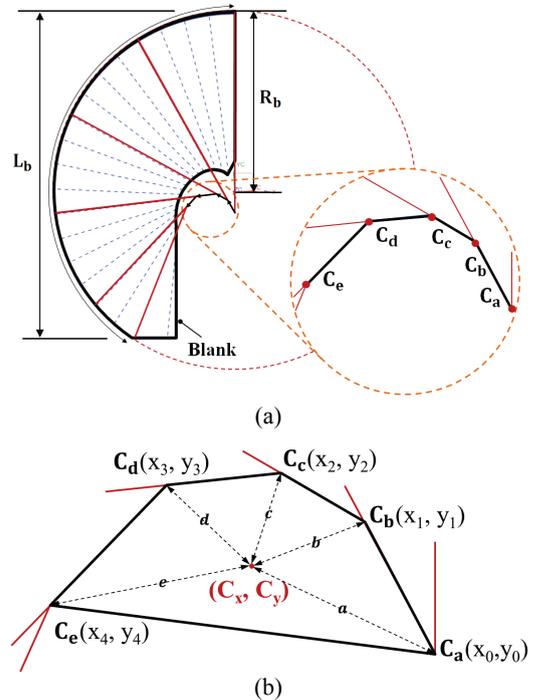


Fig. 3 (a) Blank shape and the central points of curvatures in each section (C_a to C_e), (b) Representative central point (C_x, C_y) calculated using five central points, ($a \doteq b \doteq c \doteq d \doteq e$)

한다. 각 구간에서 다음 구간으로 중심점 이동을 위한 단속적인 작업의 비효율적 과정을 줄이기 위해서 Fig. 3에서 보는 것처럼 각 교차점에서 최단 거리에 위치하는 도심 (Centroid)을 이용하여 하나의 성형회전중심 좌표 (C_x, C_y)를 기준으로 회전시켜서 한번에 성형한다. 이러한 접근방법은 실제 제작형상의 오차가 어느 정도 예상되지만 효율적인 차원에서 매우 중요하고 제작오차량에 대해서는 추후 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

도심은 평면도형의 모든 점들의 산술적 평균 위치로 최단 거리에 위치된 중심점이다.¹⁹ N각형 도형의 각 꼭지점을 (X_i, Y_i) 로 i 는 0 에서 N-1으로 가정하고 마지막 꼭지점 (X_N, Y_N) 은 시작점과 같다고 가정한다. 여기서 N 각형 도형의 면적은 식(1)으로 구할 수 있다.

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (1)$$

N 각형의 면적을 이용하여 아래의 식(2)와 식(3)에서 도심의 좌표를 구할 수 있다.

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2)$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

2.3 원추형 롤 성형 공정 설계

원추형 롤 성형 공정은 일반적으로 큰 원추각을 갖는 형상을 만들기 위한 공정이다. 나선형 풍력 블레이드 성형을 위한 롤 벤더 (Roll Bender)는 크게 판재의 이송을 위해 원추형의 상·하부 롤 (Upper and Lower Roller)과 굽힘 (Bending)에 의한 곡률생성을 위한 실린더형의 측면 롤 (Side Roller)로 구성되어있다. 상·하부 롤의 원주속도 비는 목적형상의 상·하단 반경의 비율과 같으며, 측면 롤은 판재가 벤딩되어 나오는 방향에서 굽힘을 발생시키는 역할을 한다. 측면 롤은 아이소커브 사이의 각도에 일치되게 이동시킨다. 또한 판재가 성형되는 과정에서 아이소커브 사이의 각도에 따라 각 성형구간에서 목적형상이 갖는 평균곡률반경을 계산하여 공정변수로 적용시킨다. Fig. 4는 각 구간이 다음과 같은 공정의 반복으로 이루어짐을 나타낸 것이다.

먼저 각 구간의 평균곡률에 맞게 기하학적 계산을 통해 예측되는 측면 롤의 높이만큼 이동시킨다. 이 때, 측면 롤에 의해 굽힘이 일어나며 상·하부 롤의 회전을 통하여 판재가 이송된다. 다음 구간까지 판재가 이송되면 다음 구간에서의 각도를 고려한 각도만큼 측면 롤을 벌린다. 다음 구간의 곡률 형성의 위해 처음 같은 방식으로 반복 실행한다.

2.4 구간별 평균 곡률반경 계산

공정에서 굽힘 (Bending)에 의한 곡률 반경은 측면 롤의 이동량에 따른 높이 차에 의해 생성된다. 각 구간에서 평균곡률반경은 상부 롤과 내접하고 측면 롤과 외접하는 원으로 목적형상에서 측정하여 알 수 있다. 이때 각 구간에서 측면 롤의 위치는 평균곡률반경을 갖는 원과 접할 때의 좌표로 기하학적인 분석을 통하여 구할 수 있다.

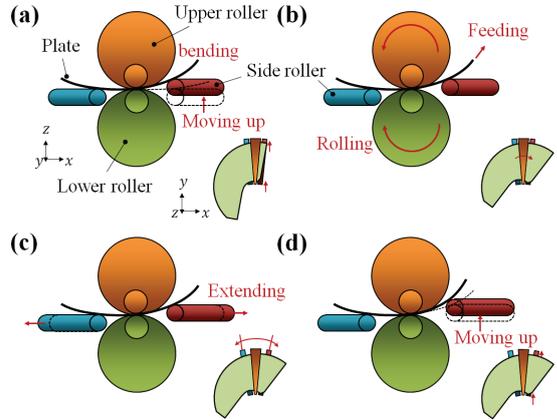


Fig. 4 Four steps of conical roll-shaping: (a) Bending blank by moving up the right side roller, (b) Rolling the couple conical rollers to feed and shape the blank, (c) Angle change between two side rollers for resetting their positions, (d) Moving up again the right side roller for bending

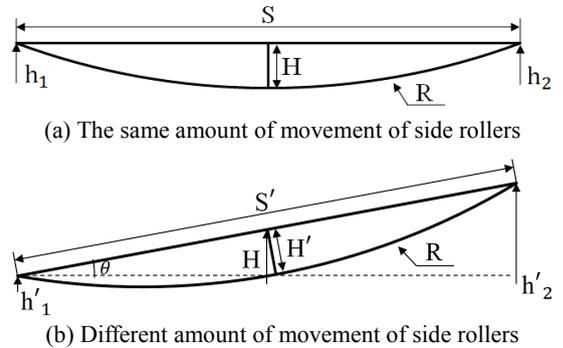


Fig. 5 Radius of curvature depending on movement of side rollers in two cases

Fig. 5를 살펴보면 각 구간에서의 평균곡률반경 (R)은 현의 길이 (S)와 호의 높이 (H)를 측정하여 간단하게 구할 수 있다.¹⁸ 여기서 현의 길이는 측면 롤의 간격으로, 호의 높이는 측면 롤의 이동량으로 정의 할 수 있다.

호의 양 끝단에 측면 롤이 위치하고 그 중심에 상·하부 롤이 위치한다고 가정할 때 h_1 과 h_2 는 측면 롤의 이동량이 되고 현의 길이는 측면 롤의 간격이 된다. 측면 롤의 이동량이 같을 경우 호의 높이는 두 측면 롤 이동량의 합에 대한 평균값으로 계산할 수 있다. 곡률반경 (R)은 다음과 같은 식(4)으로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{S^2}{8H} + \frac{H}{2} \quad (4)$$

식(4)에서 호의 높이 H 에 관한 식으로 바꾸어 나타내면 식(5)와 같이 표현할 수 있다. 곡률반경과 측면 롤의 간격이 정해져 있을 때 식(5)를 통해 측면 롤의 이동량이 결정된다.

$$H = R - \sqrt{R^2 - \frac{S^2}{4}} \quad (5)$$

측면 롤의 이동량이 다를 경우 역시 h_1 과 h_2 의 합에 대한 평균값 (H)으로 호의 높이 (H')에 대한 곡률반경을 계산하여 구할 수 있다. 여기서 $\cos\theta$ 는 1에 가깝고 H'와 H는 $\cos\theta$ 를 서로 나눈 값과 같으므로 둘은 동일하다고 가정한다.

3. 유한요소법을 이용한 해석

3.1 경계조건 및 해석방법

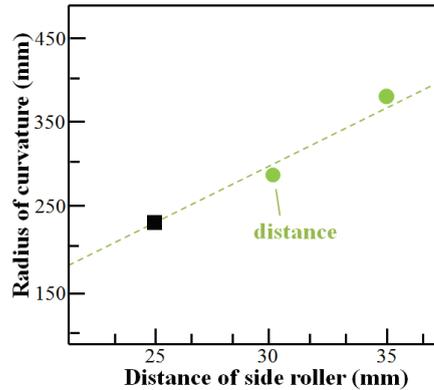
해석을 위한 롤의 규격과 위치는 블랭크 분석을 통해 이루어 졌으며 각 구간의 곡률반경을 얻기 위해 유한요소해석을 진행하였다. 해석에 사용되는 소재는 가공성, 용접성이 우수한 SUS304로 1.2 mm두께를 갖는다. 각 구간별 곡률반경을 얻기 위해 측면 롤의 간격과 높이를 조절하여 각각의 사례별로 해석을 실시하였다.

단일점 회전 롤 성형 해석을 위해서 먼저 기하학적 분석을 토대로 공정변수 (Process Parameters) 분석을 실시하였다. 공정변수로는 상·하부 롤과 측면 롤 사이의 앞쪽간격 (Distance)과 각도 (Angle), 측면 롤의 평균높이 (H)가 있다.

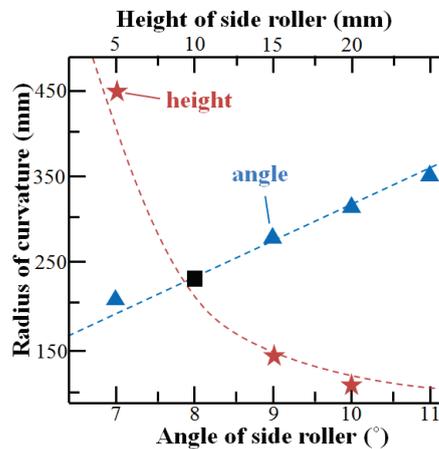
각각의 공정변수가 곡률반경 (R)에 미치는 영향의 확인을 위해 각도 8°, 간격 25 mm, 높이 10 mm를 기준으로 하나의 공정변수를 조금씩 변화를 주어 시뮬레이션을 진행하였고 각각의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 측면 롤의 각도와 간격이 증가함에 따라 곡률반경은 증가하지만 측면 롤의 높이가 증가할수록 곡률반경은 급격히 작아지게 됨을 알 수 있다. 시뮬레이션은 박판 성형 해석의 대표적인 상용 프로그램인 PAM-STMAP를 이용하였다.

3.2 해석결과 및 분석

각 구간에 설정된 각도 (7°-11°)의 변화를 적용할 때 측면 롤의 뒤쪽 (Back of Side Roller)은 앞쪽



(a) Graph of distance of side roller



(b) Graph of angle and height of side roller

Fig. 6 Effects of radius of curvature

(Front of Side Roller)을 기준으로 의 각도가 변함에 따라 수평방향으로 8.8 mm - 9.0 mm씩 거리 (Interval)가 증가하게 된다. 하지만 곡률반경이 점점 작아지는 나선형 블레이드 형상을 성형에서 있어 간격과 각도를 증가시킬수록 측면 롤의 이동량이 많아져야 원하는 곡률을 얻을 수 있다. 측면 롤의 이동량이 많아지게 되면 관재에 대한 모든 롤러에 작용하는 반력이 커지게 되고 정밀한 곡률성형이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 측면 롤의 간격 25 mm, 각도 7°로 고정하였다. 따라서 최종적으로 측면 롤의 높이를 변화시켜 원하는 곡률을 성형하기 위한 해석을 실시하였다.

단일점 회전 롤 성형을 위해서 먼저 각 구간의 회전점들의 도심을 구하여 단일점으로 설정하고 각 구간의 평균곡률에 상응하는 측면 롤의 높이를 적용시켜 Fig. 7에서 보는 것처럼 가변곡률을 형성한다.

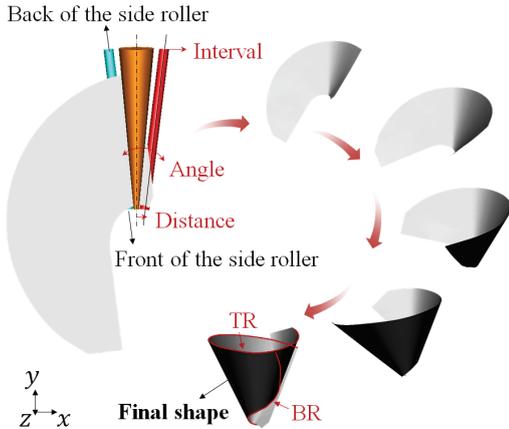
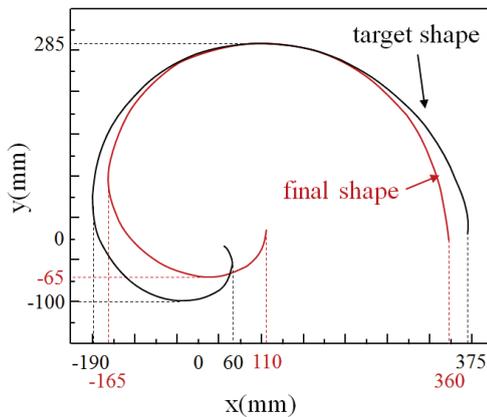
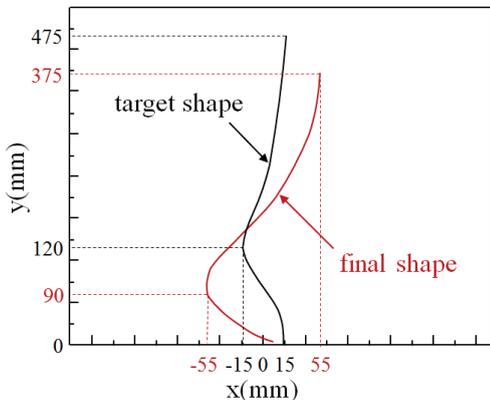


Fig. 7 Interim and final shape during deformation by conical roll-shaping with single point rotation (TR: Top radius of curvature, BR: Bottom radius of curvature)



(a) Top view of shapes with TR



(b) Side view of shapes with BR

Fig. 8 Curves compared between target and final shape

각 구간별로 설정된 측면 롤의 높이를 이용하여 결과 비교를 위한 목적형상과 최종형상의 단면 프로파일을 Fig. 8(a)와 8(b)에 나타내었다. 목적형상과 최종형상의 상·하단 곡률반경 (Top and Bottom Radius of Curvature of Shape: TR and BR)을 각각 비교하였을 때 상단 곡률의 경우 각 구간별로 10 - 50 mm 정도, 하단 곡률의 경우 약 40 mm의 오차가 발생하였음을 알 수 있다. 단일점 회전 롤 성형 해석의 경우 나선형 블레이드의 연속적인 가변곡률을 각 구간별 평균곡률로 계산하여 해석하였으며, 성형회전중심 (도심)을 이용하여 한번에 성형하였기 때문에 각 구간별 오차가 발생한 것으로 판단된다.

최종적으로 나선형 풍력 블레이드 제작을 위해 가장 중요한 평가치는 용접을 위한 하단 곡률의 직선도이다. 그러므로 마지막 구간과 형상 하단의 곡률반경 (BR)의 오차를 5 mm 이하로 줄이기 위해서는 측면 롤을 활용한 심화적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 논문의 궁극적인 목표는 롤 성형 공정을 이용하여 나선형 블레이드를 제작하는데 있어 공정 설계를 위한 기초연구이다. 목적형상의 기하학적 분석과 롤 성형 공정의 굽힘원리를 바탕으로 이를 구현할 수 있는 공정설계를 위해 상용 판재해석 소프트웨어인 PAM-STAMP를 이용하여 단일점 회전 롤 성형 공정을 해석하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 연속적인 곡률을 가지는 블레이드 형상에 대하여 본 연구에서 제한하는 원추형 롤-성형 공정을 통해 제작이 가능함을 해석적으로 입증하였다.
- (2) 측면 롤의 간격 (S)과 높이 (H)에 따른 곡률반경 (R)을 기하학적으로 계산하여 해석에 적용시킬 수 있으며, 측면 롤의 이동량이 곡률형성에 가장 크게 작용하였고 롤의 간격과 각도를 줄일수록 적은 측면 롤의 이동량으로 원하는 곡률을 성형할 수 있다.
- (3) 단일점 회전 롤 성형해석을 통한 최종형상은 탄성회복량을 고려하였을 때 목적형상과 상·하단에서 10 mm - 50 mm정도의 오차가 발생하였고, 공정변수에 대한 최적화 과정이 향후 필요함을 알 수 있다.

현재 발견되는 오차를 줄이기 위해서 각 측면 롤의 직경 조절, 하중을 가할 수 있는 추가적인

롤러의 사용, 또는 비대칭적인 형상이나 위치의 롤러의 사용 등 조금 더 심화연구가 필요하며 향후 실제공정으로 확립하고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 장비 구성과 제작을 통한 실험적 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (G031711211 & G031896311) 그리고 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 지역특화산업육성사업으로 수행된 연구결과입니다. (G02A01190063301)

REFERENCES

1. Bahaj, A., Myers, L., and James, P., "Urban Energy Generation: Influence of Micro-Wind Turbine Output on Electricity Consumption in Buildings," *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 2, pp. 154-165, 2007.
2. Hong, W. P., "Technical Trend of Small Wind Turbine System for Smart Green Building," *Proc. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, No. 1, pp. 57-70, 2013.
3. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., "Wind Energy Handbook," John Wiley & Sons, 2001.
4. Kim, J. H., Yang, H. D., Park, S. H., and Shin, J. H., "Application of New Paradigm for Effectivity of Small-scaled Wind Power Generators," *Proc. of the KSME Spring Annual Conference*, pp. 113-118, 2012.
5. Lu, Q., Li, Q., Kim, Y.-K., and Kim, K.-C., "A Study on Design and Aerodynamic Characteristics of a Spiral-Type Wind Turbine Blade," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 10, No. 1, pp. 27-33, 2012.
6. Dalley, S. and Oleson, J. P., "Sennacherib, Archimedes, and the Water Screw: The Context of Invention in the Ancient World," *Technology and Culture*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-26, 2003.
7. Gipe, P., "Wind Energy Basics: A Guide to Home and Community-Scale Wind-Energy Systems," Chelsea Green Publishing, 2009.
8. Park, Y. H., Park, J. H., Park, J. C., and Rhee, E. K., "A Study on the Application of Small Wind Turbine System in Super High-Rise Building," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 187-193, 2013.
9. Feng, Z. and Champlaud, H., "Three-Stage Process for Improving Roll Bending Quality," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 2, pp. 887-898, 2011.
10. Feng, Z. and Champlaud, H., "Modeling and Simulation of Asymmetrical Three-Roll Bending Process," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 9, pp. 1913-1917, 2011.
11. Hua, M., Sansome, D., and Baines, K., "Mathematical Modeling of the Internal Bending Moment at the Top Roll Contact in Multi-Pass Four-Roll Thin-Plate Bending," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, No. 2, pp. 425-459, 1995.
12. Hua, M., Baines, K., and Cole, I., "Continuous Four-Roll Plate Bending: A Production Process for the Manufacture of Single Seamed Tubes of Large and Medium Diameters," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 6, pp. 905-935, 1999.
13. Heislitz, F., Livatyali, H., Ahmetoglu, M. A., Kinzel, G. L., and Altan, T., "Simulation of Roll Forming Process with the 3-D FEM Code Pam-Stamp," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 59-67, 1996.
14. Li, Q., Kim, H. D., Ji, H. S., and Kim, K. C., "Flow Characteristics Around Archimedes Wind Turbine according to the Change of Angle of Attack," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 11, No. 1, pp. 28-33, 2013.
15. Kim, B.-M., Jo, Y.-J., Oh, K. H., Park, S.-W., Lee, S.-K., et al., "Process Development of Variable Curvature Extrusion for Automotive Aluminum Bumper," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 32, No. 4, pp. 327-332, 2008.
16. Feng, Z. and Champlaud, H., "Investigation of Non-Kinematic Conical Roll Bending Process with Conical Rolls," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 27, pp. 65-75, 2012.
17. Zeng, J., Liu, Z., and Champlaud, H., "FEM Dynamic Simulation and Analysis of The Roll-Bending Process for Forming a Conical Tube," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1, pp. 330-343, 2008.

18. Math Open Reference, "Radius of an Arc or Segment," <http://www.mathopenref.com/arcradius.html> (Accessed 12 October 2016)
19. Paul Bourke, "Calculating the Area and Centroid of a Polygon," <http://paulbourke.net/geometry/polygonmesh/> (Accessed 12 October 2016)