

일체형 케이블 트레이의 롤포밍 성형해석에 관한 연구

한명철*, 성창민*[#], 김정관*, 권유홍**

*부산대학교 기계공학부, **GH Innotek

Roll Forming Analysis for All-in-one Cable Tray

Myung-Chul Han*, Chang-Min Sung*[#], Jung-Kwan Kim*, Yu-Hong Gwon**

*School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., **GH Innotek.

(Received 21 May 2018; received in revised form 15 June 2018; accepted 25 June 2018)

ABSTRACT

A cable tray is a fixture to support and protect electrical and communication cables. In this study, a roll-forming analysis is conducted to produce an all-in-one cable tray. The number of process stands is calculated using an empirical formula. By applying bending methods to the design of the roll flower pattern, the final process stands and forming angles are determined. The shape and stress variations in the cable tray are modeled and observed by roll forming analysis using LS-DYNA Software. The width of the side rail and the maximum stress on all stands does not exceed the reference values. The forming machine and rolls are manufactured based on the results of the roll forming analysis. In addition, all-in-one cable trays satisfy the National Electrical Manufacturers Association standards when they are manufactured according to this design.

Key Words : Cable Tray(케이블트레이), Bending Method(밴딩 방법), Roll Flower Pattern Design(롤 플라워 패턴 설계), Roll Forming Analysis(롤포밍 성형해석)

1. 서 론

케이블 트레이는 전력, 통신 및 계장용 케이블 등을 배선 시 지지 및 보호하기 위하여 불연성 또는 금속으로 만들어진 지지대를 뜻한다. 케이블 트레이는 그림1과 같이 링(rung)과 사이드 레일(side rail)로 구성되어 있으며, 이 둘을 용접하거나 볼트를 이용하여 조립한 케이블 트레이가 전 세계적으로 보편화되어 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법으로 제작된 제품은 용접부에 산화나 부식의 문제가 발생할 수 있으며, 볼트조립에 의한 체결부에

폴림 현상이 발생할 수 있다. 따라서 링과 사이드 레일의 일체형 케이블 트레이가 제작될 수 있으면 용접 및 볼트로 인한 단점들을 해결할 수 있다. 또한 연결부 무게의 감소로 제품의 경량화가 실현될 수 있으며 이로 인한 원가절감 및 선박의 연비절감의 효과도 함께 가져올 수 있다.



Fig. 1 Rung and side rail for cable tray

Corresponding Author : cmsung@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-3033, Fax: +82-51-581-5982

링과 사이드 레일의 일체형 모델은 다단의 롤을 이용한 롤포밍 성형공정으로 제작될 수 있다. 롤포밍 성형은 공정 단면의 모양이 일정하고 단면의 길이에 비해 제품의 길이가 긴 경우에 유용하게 사용될 수 있는 성형공법이다^[1]. 롤포밍 성형 공정으로 케이블 트레이의 생산이 이루어질 경우, 그 생산성은 높일 수가 있고 생산 관리가 편해지며 품질 또한 우수해질 수 있다.

롤포밍 해석과 관련해서는 많은 연구가 이루어지고 있다. 정 등^[2]은 형상이 복잡한 모델에 대해 롤포밍 해석 시뮬레이션을 수행하였고, 손 등^[3]은 고강력 소재에 대한 롤포밍 해석 및 실험을 수행하였다. 그리고 김 등^[4]은 고강도의 차체에 대한 롤포밍 공정 해석 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 플라워패턴 설계의 기준을 제시하지 않고 성형해석 후 성형단수에 대한 고찰을 수행하였다. 또한, 진^[5]은 케이블 트레이의 롤포밍 성형해석에 관한 연구를 수행하였으나, 이는 성형해석이 전체 롤포밍 공정 중에서 일부에 해당되는 것이었고, 롤 플라워패턴 설계 또한 밴딩 응력 해석이 없는 설계자의 경험으로만 진행되었다. 플라워 패턴의 설계에 관해서는 Profil S/W를 사용할 수 있으며, 차^[6]등도 이를 활용하여 플라워 패턴 설계에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 해당 연구에서도 밴딩 방법에 대해서는 고려가 되지 않았다.

본 연구에서는 케이블 트레이의 롤포밍 성형해석을 위해 경험식에 의해 최종단수를 정한 뒤, 롤 플라워패턴을 설계하며 4가지의 밴딩 방법에 따른 밴딩 응력을 관찰한다. 그리고 가장 안정적인 밴딩 방법을 선택하고 롤 플라워패턴 설계를 확정한다. 이에 대한 각 단계에서의 성형각도를 이용하여 롤 금형 설계를 진행하고, 성형해석 프로그램을 이용하여, 설계 형상 및 요건 충족 여부를 검토한다. 설계를 바탕으로 제작된 롤 금형과 포밍기를 사용하여 실험을 수행하고 그 결과를 비교 검토한다.

2. 성형해석을 위한 설계

2.1 경험식에 의한 단수 설계

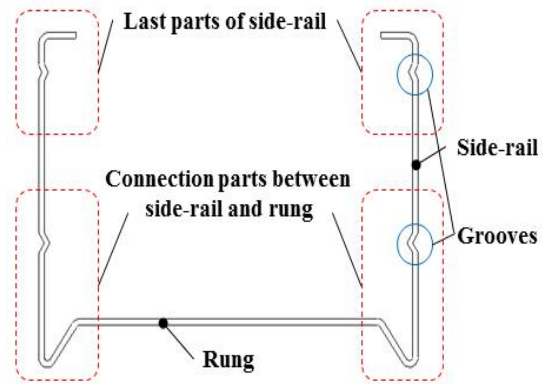


Fig. 2 All-in-one type cable tray sectional plan and name of each part

그림 2는 일체형 케이블 트레이의 설계 단면을 나타낸다. 좌우 대칭 형상으로 사이드 레일과 링으로 구성되어 있고, 그 연결부가 용접이 아닌 일체형으로 이어져 있다. 사이드 레일에 두 개의 홈이나 있는 것이 특징이며, 이 홈들 또한 롤포밍 공정으로 가공하고자 한다. 케이블 트레이의 최종 형상을 위한 롤 플라워 패턴 설계에 앞서 롤의 단수를 결정해야 한다. 롤의 단수를 결정하기 위해서는 다양한 플라워 패턴 설계를 통한 응력 계산을 이용하여 최적의 단수를 결정할 수도 있지만, 본 연구에서는 다음과 같이 나타낼 수 있는 George T. Holmos의 경험식에 의해 롤 단수(n)를 결정한다^[7].

$$n = \left(0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right) \left(\frac{0.003Y^{2.1}}{U} \right)^{0.15} \times s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

여기서, h 는 단면의 최대높이, t 는 소재의 두께, α 는 최종 굽힘 각의 합, Y 는 소재의 항복강도, U 는 소재의 최대인장강도, s 는 형태인자, e 는 여분의 추가 단수, f 는 공차인자를 나타낸다.

본 연구의 대상인 케이블 트레이의 최종형상 및 가공소재인 ss400의 물성을 이용하여, 경험식의 설계 변수를 표1과 같이 산정하고, 최종 단수를 결정하였다.

Table 1 Design variables

Parameters	Values
$h(\text{mm})$	150
$t(\text{mm})$	2.3
$\alpha(\text{degree})$	356
$Y(\text{MPa})$	317
$U(\text{MPa})$	380
s	1.1
z	0.05
e	1
f	1
n	22.95
Designed stands	23

2.2 밴딩 방법에 따른 롤 플라워 패턴 설계

롤 플라워 패턴 설계 시, 밴딩 방법은 고려해야 하는 설계변수 중 하나이다. 밴딩 방법에 따라 플라워 패턴의 형상 및 굽힘 부의 응력 또한 달라진다. 본 연구에서는 4가지의 다른 밴딩 방법^[8]을 제안하고, 그 특성을 비교하여, 최종 밴딩 방법을 결정한다.

먼저 A1 밴딩법은 밴딩 시, 밴딩부의 길이가 일정하게 유지되는 가운데, 밴딩부의 각도와 반지름 중 하나의 값을 설정하면, 다른 하나는 값을 계산을 통해 결정하는 방식이다. A2 밴딩법은 밴딩부의 반지름이 일정하게 유지될 때, 밴딩부의 각도를 설정하면, 이전 단계의 밴딩 부 요소를 참조하여 밴딩부의 길이를 새로 계산하여 적용하는 방식이다. A3 밴딩법은 A2 밴딩법에서 밴딩부의 길이를 계산할 때, 다음 단계의 밴딩부 요소를 참조한다는 점을 제외하고는 모두 동일하다. A4 밴딩법은 A2와 A3 밴딩법을 합친 방법으로 새로운 밴딩부 길이를 계산할 때 이전, 이후 단계를 모두 참조하는 방식이다. 롤 플라워 패턴 설계 시, 각 단계에서의 굽힘 응력이 소재의 항복강도를 벗어나면 안 되기 때문에, 플라워패턴 설계에 따른 항복강도 값을 검토하여야 한다. 여기에 4가지의 다른 밴딩법을 적용하

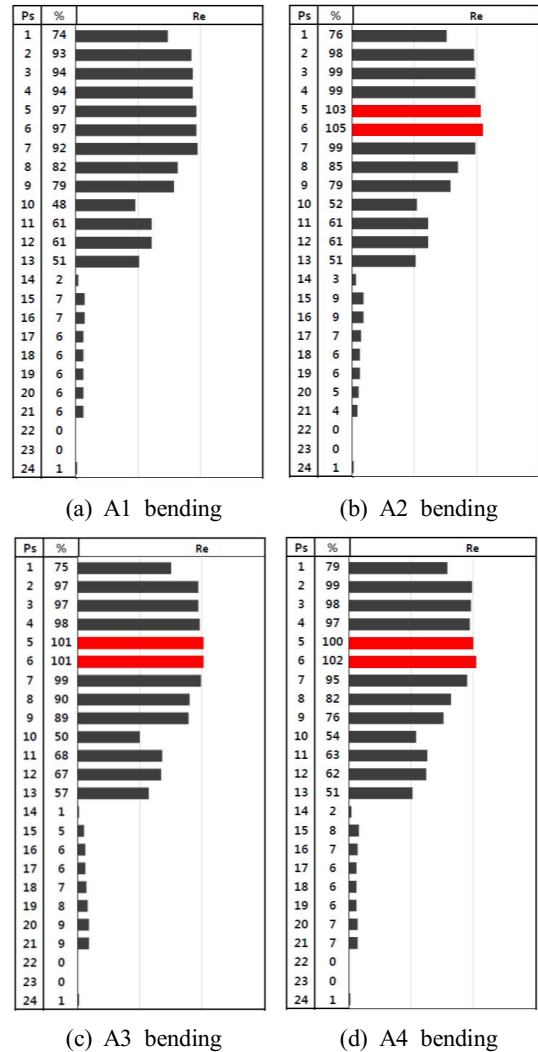


Fig. 3 Bending part stress according to bending method

여, 항복 강도를 벗어나지 않는 범위에서의 롤 플라워패턴 설계를 수행하고, 이에 따른 보다 안정적인 밴딩법을 선정한다.

본 연구에서는 Profil S/W를 사용하여, 롤 플라워 패턴 설계를 수행하며, 각각의 밴딩법을 적용한 플라워 패턴의 설계 시, 각 단계에서 발생하는 응력 값을 관측한다. 제시된 4가지의 밴딩 방법을 적용

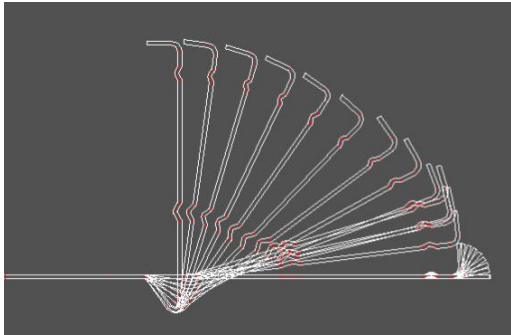


Fig. 4 Roll flower pattern for cable tray

해서, 일체형 케이블 트레이에 적합한 밴딩 방법을 선정한 후, 플라워 패턴 설계를 수행한다. 그림 3의 (a)-(d)는 4가지의 밴딩 방법에 따른 각각의 응력분포변화를 나타낸다. 제일 좌측 열은 가공 완성품(1)을 시작으로 소재(24)까지의 각 단의 번호, 두 번째 열은 소재의 항복강도에 대한 현재 단계에서 발생하는 응력의 비율, 그리고 다음 열은 이에 대한 크기를 막대그래프로 표시한 것이다. 해당 단계에서의 응력의 비율이 항복강도의 값을 벗어나면 그래프의 색깔이 바뀌어 나타난다. 여기서의 응력은 물성자체를 탄성계수로 표현된 선형상태로 나타낸다. 그림 (a)-(d)를 비교해 볼 때, 전반적으로 비슷한 응력분포양상을 보인다. 각 단의 번호를 볼 때, 1번에서 13번까지는 링과 사이드레일 연결부의 롤포밍 공정을, 14번부터는 사이드레일 끝단부에 대한 성형을 나타낸다. 사이드 레일 끝단 가공 부는 낮은 응력 값 분포를 나타내는 반면, 사이드 레일과 링 연결 부위는 높은 응력 값 분포가 나타나는 것이 밴딩 방법에 상관없이 동일하게 나타난다. 그러나 A2-A4의 밴딩방법은 A1의 방법보다 비교적 큰 응력 값 분포를 나타내며, 특히 5, 6번에서는 항복응력을 넘어서는 것을 알 수 있다. 밴딩부의 각도 및 반지름을 일정하게 하는 것이 밴딩부의 길이를 일정하게 유지하는 것보다 큰 응력이 나타나는 것인데, 이는 본 연구의 케이블 트레이와 같은 형태의 밴딩 가공시, 일정한 각도 및 반지름으로 밴딩을 하게 하면 밴딩되는 부분의 길이가 짧아져서 더 큰 응력이 발생되기 때문으로 사료된다.



Fig. 5 (a) Roll design from 1st to 10th stands

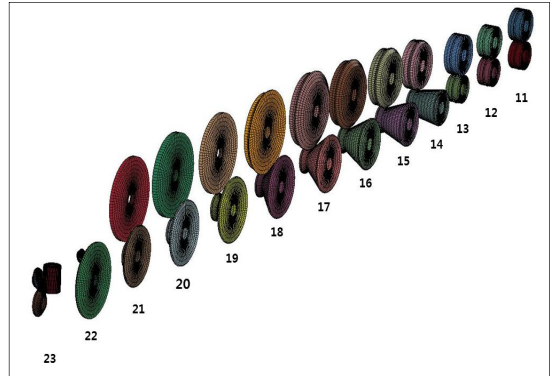


Fig. 5(b) Roll design from 11th to 23rd stands

따라서 보다 안정적인 플라워패턴 설계를 위해, 본 연구에서는 A1 밴딩 방법을 적용한다. A1 밴딩 방법을 적용한 케이블 트레이의 23단 롤 플라워 패턴은 그림 4와 같다.

그림 4의 플라워 패턴은 케이블 트레이의 형상이 좌, 우 대칭이므로 한쪽의 플라워 패턴만 나타내었다. 또한, 이는 분배형의 플라워 패턴을 나타내는데, 모든 굽힘각을 각 단계에서 동시에 점진적으로 성형하는 것이 아니라, 사이드 레일의 끝단부와 링과 사이드 레일 연결부를 따로 성형하는 방식이다. 이는 본 연구의 케이블 트레이와 같이 홈이 있는 복잡한 형상에 적합한 방법이며, 다른 형태의 플라워 패턴에 비해, 사이드 롤의 사용을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

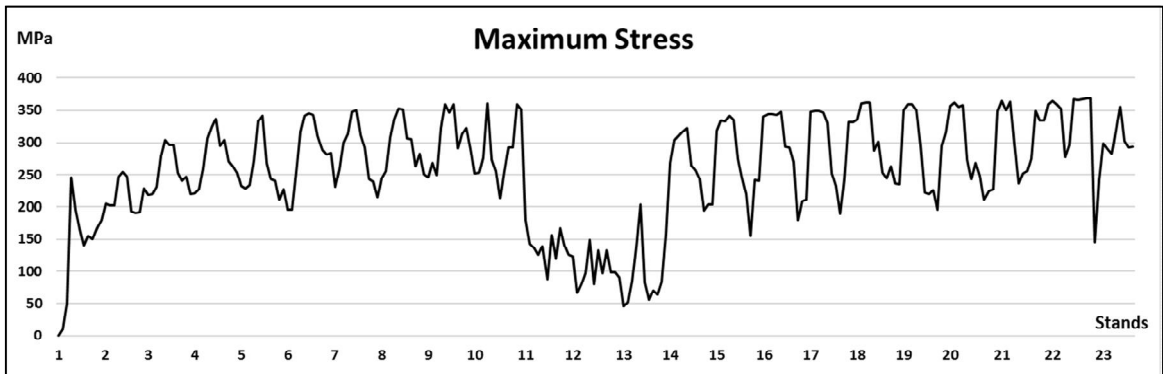


Fig. 6 Maximum stress of cable tray

3. 성형해석 및 실험

3.1 롤 금형 설계

롤포밍 성형해석을 위한 롤 금형을 모델링하였다. 설계된 롤 플라워페턴의 각 단별 굽힘 각도를 바탕으로 각 롤의 모델링을 수행하였다. 각 단은 대부분 상하단 롤로 구성되어 있으며, 23단에서는 최종 형상 및 스프링백의 최소화를 위해서 사이드 롤을 추가하였다. 그림 5는 소재가 시작되는 1단에서부터 10단까지의 롤 형상을 나타내며, 여기에서는 그림 1의 사이드 레일의 끝단 부 및 1개의 홈에 대한 성형이 이루어진다. 1단에서 3단까지는 홈 성형이, 4단에서 10단까지 사이드 레일의 끝단 부 성형이 이루어진다. 그림 6은 11단에서부터 23단까지의 롤 형상을 나타내며 여기에서는 그림 1의 링과 사이드 레일의 연결부 및 1개의 홈에 대한 성형이 이루어진다. 11단에서 13단까지는 사이드 레일의 또 다른 하나의 홈 성형이, 14단에서 23단까지 사이드 레일과 링이 연결되는 굽힘 부의 성형이 이루어진다.

3.2 성형해석 결과분석

LS-DYNA S/W를 사용한 롤포밍 성형해석에 의해, 케이블 트레이에 발생하는 최대응력은 그림 6과 같이 나타난다. 1단에서 23단까지의 굽힘 부 성형에 따른 각 단에서의 발생하는 최대응력 분포를

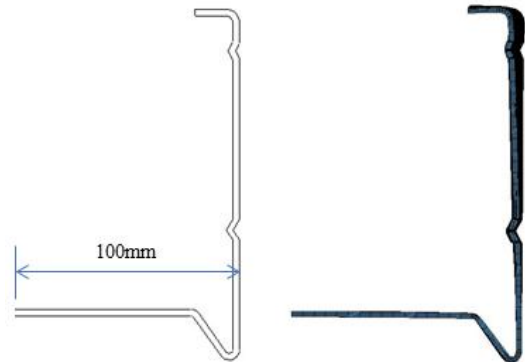


Fig. 7 Design(left) and forming(right) analysis sectional plans of cable tray

나타내고 있다. 소재에 발생하는 모든 응력분포는 소재의 인장강도 이하의 값을 나타낸다. 최대 응력 값은 인장강도에 근접하나, 그 값을 넘지는 않는다.

해석 후의 최종 형상 또한 고려되어야 할 사항이다. 특히 제품의 폭의 차이는 $\pm 6\text{mm}$ 이하로 The National Electrical Manufacturers Association (NEMA) 규격⁹⁾에서 규정하고 있다. 이는 롤포밍 성형 시에 발생하는 스프링 백 현상과 가장 밀접한 관계가 있는데, 최종형상 이후에 발생하는 스프링 백 현상을 관측할 필요가 있으며, 비록 스프링 백 현상이 발생한다고 하더라도 규정의 폭 범위 안에만 들어오면 만족될 수 있다. 그림 7은 케이블 트레이의 설계도와 성형해석 후 모델의 형상 단면을 나타내고 있다. 굽힘부 및 절곡부가 설계도와 같이 성형이 이루어진 모습을 확인할 수 있다. 성형해석

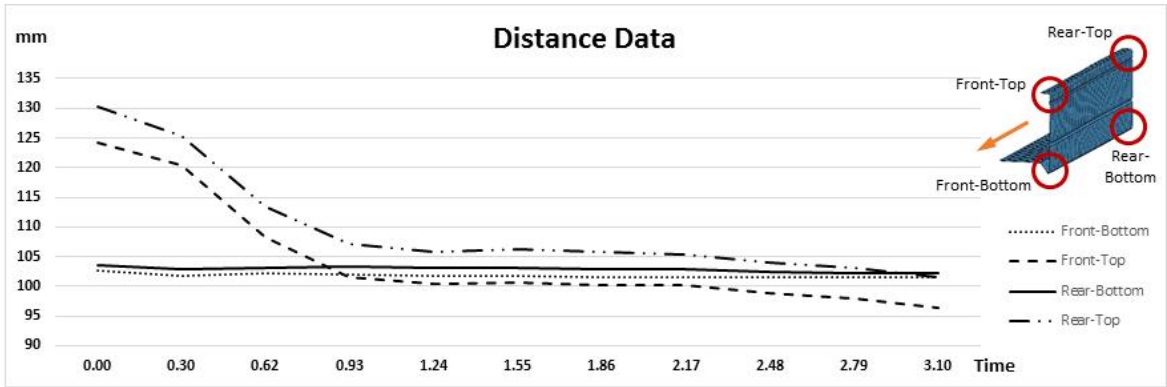


Fig. 8 Width variations

모델은 한쪽 폭이 100mm이며, 최종 단에서 발생하는 사이드 레일 상·하부의 폭의 변화를 그림 8과 같이 나타내었다. 롤포밍 진행방향을 기준으로 케이블 트레이의 앞뒤쪽 부분의 각각 상·하부 4개소의 값을 나타내었다. 가로축은 케이블 트레이가 최종 단을 통과하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 최종단을 통과할 때, 사이드 레일의 위쪽 부분이 령과 수직이 되도록 접히는 것을 치수로써 확인할 수 있는데, 설계 치수인 폭 100mm로 수렴함을 확인할 수 있다. 앞뒤 모두 아래 부분은 큰 치수 변화 없이 오차범위를 만족하였고, 위쪽부분은 오차가 발생하지만 그 범위를 만족시키는 것으로 확인할 수 있다. 특히, 앞, 뒤 제일 끝부분은 불연속적인 면으로써 앞쪽에서는 기준 치수보다 약간의 굽힘 현상이 더 일어나고 뒤쪽 부분은 덜 굽혀지는 것을 함께 확인할 수 있다.



Fig. 9 Roll forming machine(3S Co. LTD.)

3.3 실험

성형해석 결과가 케이블 트레이의 설계조건에 만족되므로, 롤 플라워 패턴에서의 각도설계를 바탕으로 그림 9와 같이 롤 금형을 제작하고 23단의 롤포밍 성형을 수행할 수 있는 포밍기를 구성하였다. 실험은 4개의 다른 너비를 가진 케이블 트레이를 대상으로 수행하였다. 각각의 너비 치수는 다르지만 만족해야 하는 오차의 범위는 동일하다. 그림 10은 제작된 포밍기를 통해 롤포밍 성형공정이 완료된 케이블 트레이의 모습을 나타낸다.



Fig. 10 Cable tray after roll forming process

Table 2 Result of experiment^[10]

Width	Experiment (Max/Min)	Reference
200	201/198mm	200±6mm
400	402/398mm	400±6mm
600	603/599mm	600±6mm
800	801/797mm	800±6mm

설계 도면과 동일하게 령과 사이드 레일간의 연결부, 사이드 레일의 절곡부, 그리고 사이드 레일 끝단부의 각도성형이 수행된 것을 알 수 있다. 제작된 케이블 트레이의 폭의 치수는 제품의 크기 별로 표 2와 같이 최대값과 최소값이 측정되었으며, 실험 결과 또한 NEMA 규격을 만족시키는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 일체형 케이블 트레이의 롤포밍 성형공정을 위한 성형해석 및 실험이 이루어졌다. 이론식을 통하여 전체 포밍 단수를 선정하고, 이를 바탕으로 롤 플라워 패턴을 설계하였다. 이때, 4가지의 다른 밴딩방법을 고려하여 각 밴딩방법에 따른 밴딩부의 응력을 비교하였으며, 결론적으로 밴딩부의 길이를 일정하게 유지하면서 밴딩 공정을 수행하는 것이 다른 3가지의 방법보다 안정적인 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 하여 최종 롤 플라워 패턴을 도출하였다. LS-DYNA S/W를 이용한 성형해석을 통하여, 설계된 롤 형상에서 케이블 트레이의 롤포밍 공정이 수행되며, 설계 형상과 동일하게 제작될 수 있음을 확인할 수 있었다. 아울러, 성형 해석 중 발생하는 최대 응력 값이 소재의 인장강도의 값을 넘지 않음을 확인하였다. 이러한 해석 결과를 토대로 롤 금형과 포밍기를 구성하고 시제품을 제작하였다. 설계된 도면과 동일하게 각도 형상 및 홈 형상이 가공되었으며, 사이드 레일의 폭의 치수 또한 설계 규정에 만족되는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 일체형 케이블 트레이가 롤포밍 공정을 통해 안정적으로 제작될 수 있음을 성형해석과 실험을 통해 입증하였다. 본 연구 결과가 다른 형태의 다양한 케이블 트레이의 롤포밍 공정

을 위한, 플라워 패턴 설계 및 성형해석 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Wick, C., Benedic, J. T., and Veilleux, R. F., “Tool and Manufacturing Engineers Handbook”, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, Vol. 2, Chapter 8, 1984.
2. Jung, D. W., Park, S. H., and Jeong J. H., “A Study on Forming Analysis for the Roll Forming Process of 3 Point Under Rail”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No 6, pp. 52-58, 2012.
3. Son. H. J., Kim S. Y., Oh. B. S., and Kim K. S., “Development of Vehicle Door Side Impact Beam with High Tensile Steel using Roll Forming Process”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 82-87, 2012.
4. Kim, K., Jang, S., Jung, H., Oh, K., Yun, J., and Park, C., “The Development of High Strength Steel Car on Sill Side by Roll Forming Process”, The KSAE Spring Conference, pp. 29-34, 2011.
5. Jin, T. H., “Forming Analysis study on the roll forming process of the cable tray”, Master thesis, Pusan National University. Republic of Korea, 2016.
6. Cha, T. W., Kim, J. H., Kim, G. H. and Kim, B. M., “Design of Flower Pattern in Roll Forming Process for Ultra High Strength Bumper Beam”, Transactions of Materials Processing, Vol. 25, No. 5, pp. 319-324, 2016.
7. Halmos, G. T., Roll Forming Handbook, CRC Press, pp. (5-64)-(5-73), 2006.
8. Ubeco Profil User Manual, 2016.
9. NEMA Standards Publication VE 1-2009.
10. Busan Techno Park Test Report, MMAP-201607250009.