

# 케이블 트레이 설계시스템 개발

최두순\*, 최우석\*<sup>#</sup>

\*한국교통대학교 기계자동차항공공학부

## Development of a Design System for a Cable Tray

Du-Soon Choi\*, WooSeok Choi\*<sup>#</sup>

<sup>\*</sup>School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering,  
Korea National University of Transportation.

(Received 6 July 2017; received in revised form 14 July 2017; accepted 20 July 2017)

### ABSTRACT

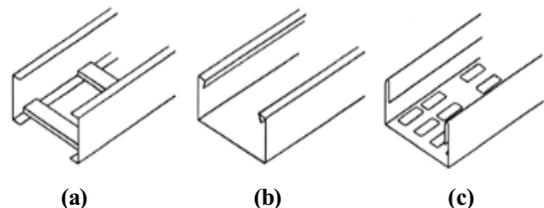
A cable tray is a structure made of metal or a non-combustible material that supports cables in the electrical wiring of buildings. Cable trays should be developed to meet the various requirements of the construction site. In this study, a design system was developed to calculate the maximum support load and the maximum deflection according to the cross-sectional shape of the cable tray. The cross-sections of cable trays were modeled by combining linear and arc elements, and cross-sectional characteristics such as the 2nd moment of area were calculated. The distributed load and the concentrated load were applied to the cable tray using the Euler beam theory, and then the deflection profiles and maximum stress were calculated. To verify the developed system, deflection distributions and maximum stresses for two types of cable trays were calculated and compared. The maximum deflection and maximum stress errors calculated from the developed system were found to be less than 4% compared with numerical analysis results.

**Key Words :** Cable Tray(케이블 트레이), Design System(설계시스템), Beam Deflection(보의 처짐), 2<sup>nd</sup> Moment of Area(단면 2차 모멘트)

## 1. 서 론

케이블 트레이(cable tray)는 건물의 배선 시공 시 케이블이나 전력관을 지지 및 보호하기 위한 지지 구조물이다. Fig. 1과 같이 형태에 따라 길이 방향의 양 측면 레일(siderail)을 각각의 가로 방향 부재(rung)로 연결한 사다리형(ladder type), 일체식 또는 분리식 직선 방향 측면 레일에서 바닥 통풍구가 없는 바닥밀폐

형(solid-bottom type), 바닥 통풍구가 있는 편창형(ventilated type)으로 분류된다<sup>[1-4]</sup>.



**Fig. 1** Types of cable trays (a) ladder type, (b) solid-bottom type, and (c) ventilated type

<sup>#</sup> Corresponding Author : w.choi@ut.ac.kr

Tel: +82-43-841-5132, Fax: +82-43-841-5120

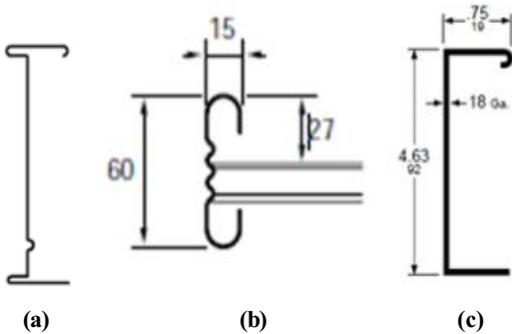


Fig. 2 Cable tray cross sections of representative companies (a) B-Line, (b) MEKA, and (c) Steven engineering

케이블 트레이 시장의 최근 경향은 기업이 판매 하는 제품 중 선택하여 구매하던 방식에서 소비자의 다양한 요구 조건을 만족하는 케이블 트레이 제작하는 방식으로 변화하고 있다. 시공 현장마다 사용하는 케이블의 종류 및 양, 지지대 사이의 간격 등이 다양하게 변하므로 다양한 요구 조건에 맞는 케이블 트레이의 설계 및 제작이 필요하다<sup>[5]</sup>. 특히, 해양 플랜트, 선박 등에서 사용되는 케이블 트레이는 높은 중량의 케이블을 지지하여야 하므로 NEMA<sup>[6]</sup>, IEC<sup>[7]</sup> 등의 관련 국제규격을 만족시켜야 한다. 또한, 제품의 특성상 원가의 70% 정도가 재료비로 소모되므로 제품의 경량화를 통한 원가 절감이 가격 경쟁력 확보에 필수적이다. 이에 따라 기존의 단순한 “C”자 형상이 아닌 Fig. 2와 같이 다양한 단면형상을 갖는 케이블 트레이가 개발되고 있다.

이러한 케이블 트레이의 초기 설계 단계에서는 허용지지하중, 처짐량, 경량화 등의 다양한 요구조건에 대하여 빠른 시간 내에 반복적인 형상설계와 해석을 수행하여야 하므로 전문 설계시스템의 필요성이 절실히 요구된다<sup>[8-11]</sup>.

본 연구에서는 케이블 트레이의 강도 및 강성 설계를 위하여 단면 형상에 따른 최대 응력 및 최대 처짐량을 계산 할 수 있는 설계 시스템을 개발하였다. 또한, 개발된 설계 시스템을 두 가지 형태의 케이블 트레이에 적용한 계산 결과를 수치 해석 결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

## 2. 케이블 트레이 설계시스템의 구성

대부분의 케이블 트레이는 아연 도금 강판이나 스테인리스 강판 등의 판재를 굽힘(bending) 성형하여 제작된다. 케이블 트레이가 지지하중, 처짐량 등의 기계적 요구조건을 만족시키기 위해서는 충분한 굽힘강도와 굽힘 강성을 확보해야 하며 이는 단면형상에 좌우된다. 사다리형의 경우 측면 레일의 단면형상, 바닥밀폐형이나 편칭형의 경우 전체 단면형상의 설계가 중요하다.

따라서, 판재의 단면 윤곽(profile)과 두께를 입력하면, 입력된 단면형상을 갖는 케이블 트레이의 허용하중, 처짐량, 무게를 쉽게 예측할 수 있도록 설계시스템을 구성하였다. 개발된 시스템의 전체 구성을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3과 같이 형상 정보 (케이블 트레이 종류, 판재 두께, 케이블 트레이 길이, 단면 윤곽)와 재료 물성 (탄성계수, 항복강도, 밀도), 적용하중 (분포하중, 집중하중, 안전계수) 을 입력하면, 처짐량 분포, 최대 처짐량, 최대응력, 무게를 결과로 출력한다.

### 2.1 단면형상 모델링

케이블트레이는 판재의 굽힘(bending) 성형을 통하여 제작되므로, 전체 단면 형상은 직선요소와 원호요소의 조합으로 나타낼 수 있다. 따라서 일련의 직선 및 원호요소들을 Fig. 4와 같이 입력받아 단면 형상을 모델링하도록 입력모듈을 구성하였다.

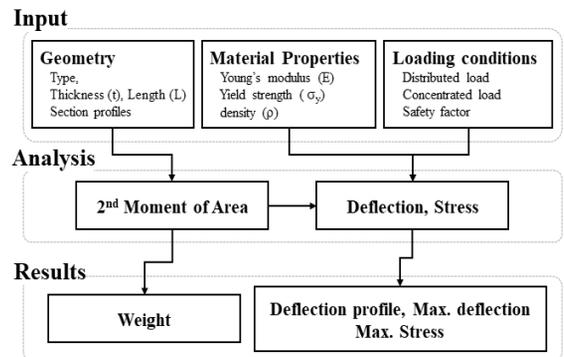


Fig. 3 Schematic diagram of developed design system

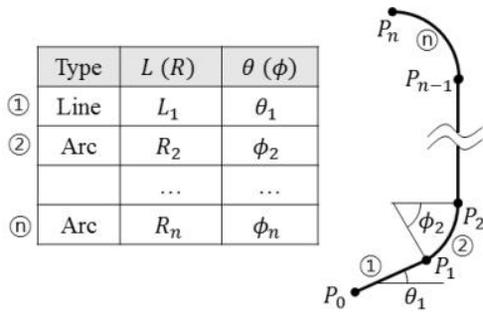


Fig. 4 Modeling method of section profile of cable tray

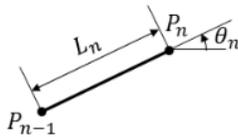


Fig. 5 Schematic diagram of line segment

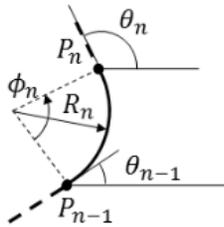


Fig. 6 Schematic diagram of arc segment

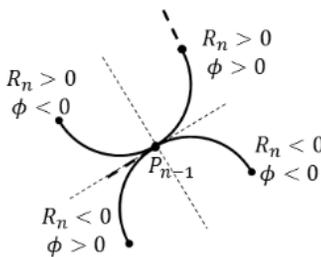


Fig. 7 Generation of arc segment according to signs of radius and angle

### 2.1.1 직선요소

직선요소의 입력은 직선의 길이( $L_n$ )와 기울기 각( $\theta_n$ )의 입력으로 구성된다. 이 때, Fig. 5와 같이  $n$ 번째 직선요소의 점  $P_n$ 의 좌표 ( $X_n, Y_n$ )는 다음과 같이 계산된다.

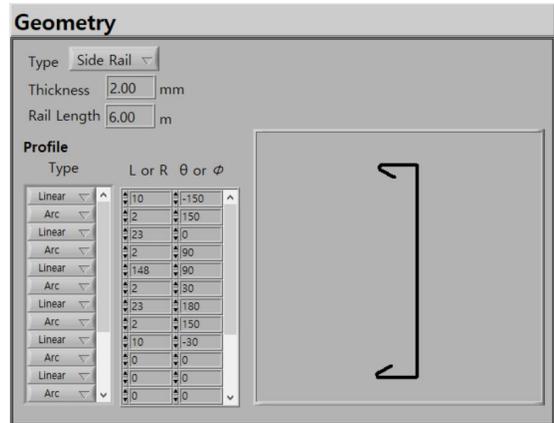


Fig. 8 Geometry input module of the developed design system.

$$\begin{aligned} X_n &= X_{n-1} + L_n \cos \theta_n, \\ Y_n &= Y_{n-1} + L_n \sin \theta_n. \end{aligned} \quad (1)$$

### 2.1.2 원호요소

원호요소의 입력은 해당 원호의 반지름( $R$ )과 중심각( $\phi$ )의 입력으로 구성된다. 굽힘 성형에서 생성된 원호부는 인접한 직선부와 접하게 되므로 원호의 시작점은 이전 직선요소와 접하는 조건을 부여하였다. Fig. 6와 같이  $n$ 번째 원호요소의 점  $P_n$ 의 좌표 ( $X_n, Y_n$ )와 끝단의 각도 ( $\theta_n$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} X_n &= X_{n-1} + R_n [\sin (\theta_{n-1} + \phi_n) - \sin \theta_{n-1}], \\ Y_n &= Y_{n-1} - R_n [\cos (\theta_{n-1} + \phi_n) - \cos \theta_{n-1}], \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + \phi_n. \end{aligned} \quad (2)$$

이 때, 반지름( $R_n$ )과 중심각( $\phi_n$ )의 부호에 따라 Fig. 7과 같이 4가지 원호 중 하나가 결정된다.

입력 결과를 그래픽으로 출력하여 설계자가 입력 결과를 확인할 수 있도록 구성하였다. Fig. 8은 구현된 시스템의 단면형상 입력부를 나타낸다.

## 2.2 단면 2차 모멘트의 계산

무게, 응력 및 변형량 계산을 위해서는 도심을 지나는 축에 대한 단면 2차 모멘트(second moment of area,  $I_{xx}$ )가 필요하며, 평행축 정리를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$I_{cx} = I_x - AS^2. \quad (3)$$

이 때,  $I_x$ 는  $x$ 축에 대한 단면 2차 모멘트,  $A$ 는 단면의 전체 면적,  $S$ 는  $x$ 축으로부터 도심을 지나는 축까지의 거리이며 각각 다음과 같이 계산된다.

$$I_x = \sum_{n=1}^N I_x^n, \quad A = \sum_{n=1}^N A_n, \quad (4)$$

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N \left( \int_{A_n} y dA \right)}{A} = \frac{\sum_{n=1}^N (G_x^n)}{A}.$$

이 때,  $N$ 은 전체 요소의 개수,  $A_n$ ,  $G_x^n$ ,  $I_x^n$ 는 각각  $n$ 번째 요소의 단면적, 단면 1차 모멘트, 단면 2차 모멘트로 요소의 종류에 따라 다음과 같이 계산된다.

### 2.2.1 직선요소

판재의 두께가  $t$  일 때,  $n$  번째 직선요소의 단면적 ( $A_n$ )은 다음과 같다.

$$A_n = tL_n. \quad (5)$$

Fig. 9에서와 같이  $n$ 번째 직선요소의 단면 1차 모멘트 ( $G_x^n$ )와 단면 2차 모멘트 ( $I_x^n$ )는 다음과 같다.

$$G_x^n = \int_{A_n} y dA = \int_0^{L_n} y(l) (t dl) \quad (6)$$

$$= \int_0^{L_n} (Y_{n-1} + l \sin \theta_n) (t dl)$$

$$= tL_n \left( Y_{n-1} + \frac{L_n}{2} \sin \theta_n \right).$$

$$I_x^n = \int_{A_n} y^2 dA = \int_0^{L_n} y^2(l) (t dl) \quad (7)$$

$$= \int_0^{L_n} (Y_{n-1} + l \sin \theta_n)^2 (t dl)$$

$$= tL_n \left( Y_{n-1}^2 + Y_{n-1} L_n \sin \theta_n + \frac{L_n^2}{3} \sin^2 \theta_n \right).$$

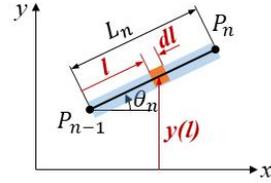


Fig. 9 Calculation for 1st and 2nd moment of area for a line segment

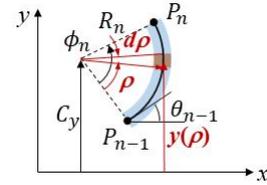


Fig. 10 Calculation for 1st and 2nd moment of area for an arc segment

### 2.2.2 원호요소

판재의 두께가  $t$  일 때,  $n$  번째 원호요소의 단면적 ( $A_n$ )는 다음과 같다.

$$A_n = \pi t \phi_n. \quad (8)$$

Fig. 10에서와 같이  $n$ 번째 원호요소의 단면 1차 모멘트 ( $G_x^n$ )와 단면 2차 모멘트 ( $I_x^n$ )는 다음과 같이 계산된다.

$$G_x^n = \int_{A_n} y dA = \int_0^{\phi_n} y(\rho) (t R_n d\rho) \quad (9)$$

$$= \int_0^{\phi_n} [C_y - R_n \cos(\theta_{n-1} + \rho)] (t R_n d\rho)$$

$$= t R_n [C_y \phi_n - R_n \sin(\theta_{n-1} + \phi_n) - \sin \theta_{n-1}].$$

$$I_x^n = \int_{A_n} y^2 dA = \int_0^{\phi_n} y^2(\rho) (t R_n d\rho) \quad (10)$$

$$= \int_0^{\phi_n} [C_y - R_n \cos(\theta_{n-1} + \rho)]^2 (t R_n d\rho)$$

$$= t R_n C_y^2 \phi_n$$

$$- 2t R_n^2 C_y [\sin(\theta_{n-1} + \phi_n) - \sin \theta_{n-1}]$$

$$+ \frac{t R_n^3}{2} [\phi_n + \sin(\theta_{n-1} + \phi_n) \cos(\theta_{n-1} + \phi_n)$$

$$- \sin \theta_{n-1} \cos \theta_{n-1}].$$

이 때,  $C_y$ 는 원호 중심점의  $y$ 좌표로 다음과 같이 계산된다.

$$C_y = Y_{n-1} + R_n \cos \theta_{n-1}. \quad (11)$$

### 2.3 처짐량, 최대응력 계산

NEMA 등의 케이블 트레이 관련 규격에서 규정하는 하중시험 조건은 케이블트레이의 양단을 지지하고 균일한 분포하중을 가하였을 때의 처짐량과 파손 여부를 판별하는 것이다. 또한 케이블 트레이 시공 시 작업자가 케이블 트레이 위에서 작업하는 경우 일정 이상의 집중 하중이 가해진다. 따라서 설계된 케이블 트레이의 양 끝단이 지지된 상태에서 분포하중 및 집중하중이 가해질 때의 처짐량과 최대응력이 계산되도록 설계 시스템을 구성하였다.

케이블 트레이의 경우 두께가 길이에 비해 훨씬 작기 때문에 오일러 보 이론(Euler beam theory)을 적용할 수 있다. 탄성계수  $E$ 의 소재로 제작된 길이  $l$ 의 케이블 트레이에 Fig. 11과 같은 균일 분포 하중  $w$ 와  $c_x$  위치에서의 집중 하중  $c_w$ 이 가해질 때, 처짐량  $y$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -w - c_w \delta(c_x). \quad (12)$$

이 때,  $\delta(x)$ 는 디랙 델타(dirac delta) 함수이다.

양 끝단의 지지조건을 적용하면 케이블 트레이의 처짐량  $y$  및 굽힘 모멘트  $M$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{i) } 0 \leq x \leq c_x & \quad (13) \\ y(x) &= -\frac{w}{24EI} \{x^4 - 2lx^3 + l^3x\} \\ & \quad + \frac{c_w}{6EI} \frac{l-c_x}{l} \{x^3 - c_x(2l-c_x)x\}, \\ M(x) &= -\frac{w}{2}x^2 + \frac{lw}{2}x + c_w \left(1 - \frac{c_x}{l}\right)x. \end{aligned}$$

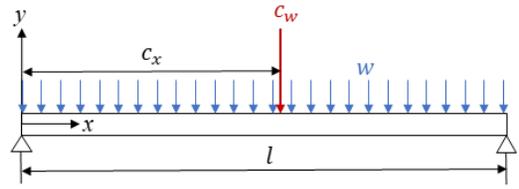


Fig. 11 Schematic diagram of loading and supporting conditions

$$\text{ii) } c_x < x \leq l \quad (14)$$

$$\begin{aligned} y(x) &= -\frac{w}{24EI} \{x^4 - 2lx^3 + l^3x\} \\ & \quad + \frac{c_w c_x}{6EI} \{(l-x)(x^2 - 2lx + c_x^2)\}, \\ M(x) &= -\frac{w}{2}x^2 + \frac{lw}{2}x - \frac{c_w c_x}{l}x + c_w c_x. \end{aligned}$$

하중에 의한 발생 응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma = My_c / I_{c_x}. \quad (15)$$

이 때,  $y_c$ 는 도심을 지나는 축으로부터의 거리이다.

## 3. 설계시스템의 검증

개발된 설계시스템의 해석결과를 두 가지 사례에 대하여 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다. 수치해석은 상용 소프트웨어 ANSYS를 사용하여 수행하였고, 케이블 트레이를 셸(shell) 요소를 사용하여 모델링하였다.

### 3.1 바닥밀폐형 사례

첫 번째 예제는 Fig. 12와 같은 바닥밀폐형 케이블 트레이에 대한 검증을 수행하였다. NEMA 20A 조건에 따라 균일분포하중( $w$ ) 74kg/m 에 안전계수 1.5를 적용한 111kg/m의 하중을 부여하였고, 집중하중은 부여하지 않았다. 수치해석은 1/2 대칭영역에 대하여 수행하였다.

바닥면에서 길이 방향에 따른 처짐량 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었고, 개발된 설계시스템의 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

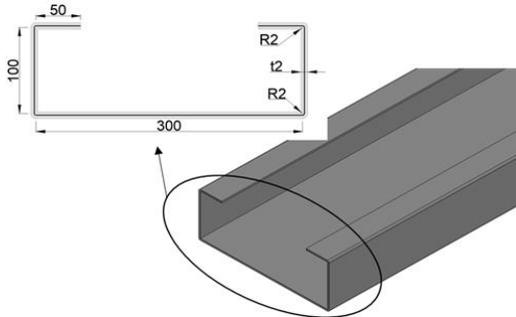


Fig 12 Geometry of solid-bottom type cable tray

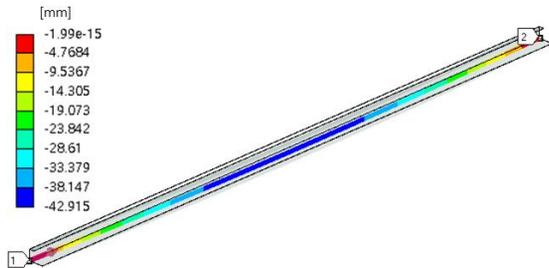


Fig. 13 Numerical result of deflection distribution along the bottom edge

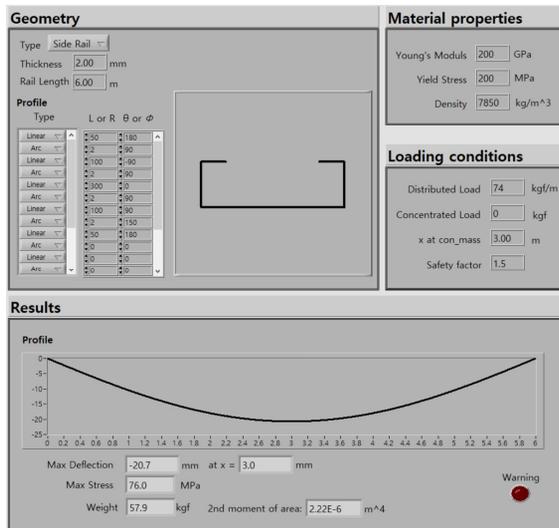


Fig. 14 Analysis results of developed design system for solid bottom type cable tray

Fig. 15에 설계시스템 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내었고, 두 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

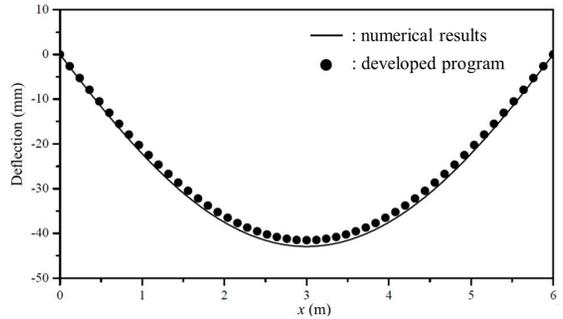


Fig. 15 Comparison of deflection profiles of solid bottom type cable tray

최대 처짐량의 경우 수치해석은 42.915mm, 설계시스템은 41.541mm로 3.2%의 오차를 나타내었고, 최대 발생응력은 수치해석이 158.14MPa, 설계시스템이 152.8MPa로 3.4%의 오차를 나타내었다.

### 3.2 사다리형 사례

두 번째 예제로는 Fig. 16과 같은 사다리형 케이블 트레이를 선정하였다. 사다리형 케이블 트레이의 경우 하중지지 역할의 대부분을 양 측면 레일이 담당하므로, 측면 레일의 단면형상만 입력받도록 시스템을 구성하였다. 적용 하중으로는 균일분포하중( $w$ ) 74 kgf/m 와 집중하중( $c_w$ ) 100kgf 에 안전계수 1.5를 적용한 111kgf/m, 150kgf 의 하중을 부여하였다. 집중하중의 위치( $c_x$ )는 4.2m 이다.

설계시스템의 결과를 Fig. 17에 나타내었고, 수치해석 결과와 비교한 처짐량 분포를 Fig. 18에 나타내었다.

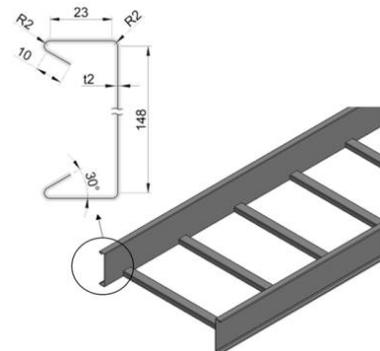


Fig 16 Geometry of ladder type cable tray

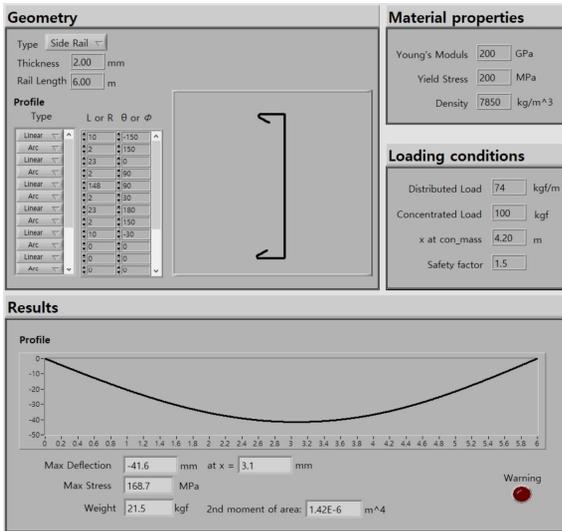


Fig. 17 Analysis results of developed design system for ladder type cable tray

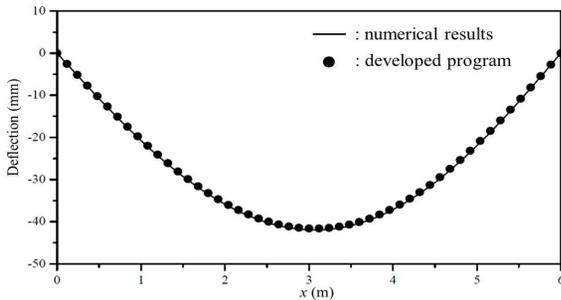


Fig. 18 Comparison of deflection profiles of ladder type cable tray

최대 처짐량의 경우 수치해석은 41.96mm, 설계시스템은 41.625mm로 0.8%의 오차를 나타내었고, 최대 발생응력은 수치해석이 171.13MPa, 설계시스템이 168.7MPa로 1.4%의 오차를 나타내어 바닥밀폐형의 경우보다 더 작은 오차를 보였다. 바닥밀폐형의 경우 하중에 의한 바닥면의 변형으로 인하여 단면 형상이 변화하지만, 사다리형의 경우 측면 레일의 단면 형상 변화가 미미하기 때문인 것으로 분석된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 케이블 트레이의 강도 및 강성 설계

를 위하여 단면 형상에 따른 최대 응력 및 최대 처짐량을 계산 할 수 있는 설계 시스템을 개발하였다.

1. 케이블 트레이의 단면 형상을 직선 요소와 원호 요소의 조합으로 모델링하는 형상 입력 모듈을 구성하고 이를 바탕으로 단면 2차 모멘트를 계산하였다.
2. 오일러 보 이론을 이용하여 처짐량 분포 및 최대 발생 응력을 계산하였다.
3. 개발된 설계 시스템의 정확성 검증을 위하여 두 가지 형태의 케이블 트레이에 대하여 설계 시스템의 계산 결과와 수치 해석 결과를 비교하여 검증 하였으며, 처짐량 오차는 약 3.2% 이내, 최대 응력 오차는 3.4% 이내로 나타남을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 설계 시스템은 복잡한 수치 해석 프로그램을 사용하지 않고 간단하게 처짐량 및 최대 응력을 예측 할 수 있으므로 다양한 형태의 케이블 트레이 개발을 위한 설계 분야에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

1. Steward, W. E. and Beck, R. A., Modern Wiring Practice, Newnes, pp. 266-272, 2010.
2. Eder, S. J. and Yanev, P. I., "Evaluation of Cable Tray and Conduit Systems Using the Seismic Experience Data Base", Nuclear Engineering and Design, Vol. 107, No. 1-2, pp. 149-153, 1988.
3. Kar, A. K., "Cable Trays and their Supports", Proceedings of Second ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, Vol. 1, Paper 11-8, 1980.
4. Reigles, D. G., Brachmann, I., Johnson, W. H. and Gürbüz, O., "Test-based Approach to Cable Tray Support System Analysis and Design: Behavior and Test Methods", Nuclear Engineering and Design, Vol. 302, Part A, pp. 27-36, 2016.
5. Smith, P. D., Eder, S. J. and Conoscente, J. P., "SQUG Cable Tray and Conduit Evaluation Procedure", Nuclear Engineering and Design, Vol.

- 123, No. 2-3, pp. 241-245, 1990.
6. “NEMA VE-1 – Metal Cable Tray Systems”, National Electrical Manufacturers Association, pp. 5-9, 2009.
  7. “Cable tray systems and cable ladder systems for cable management”, British Standards Institution, pp. 5-13, 2002.
  8. Park, H. G., Jang, J. S., Yoo, W. S., Kim, M. S., Lee, H. J. and Lee, J. W., “Development of a Design Support Program for Pivot Points of Working Devices in Construction Equipment using Planar Multi-body Dynamic Analysis”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 49-56, 2015.
  9. Byon, S., Lee, D. and Choi, H., “Design of Railway Vehicle Wheel Profile Suitable for Dual-rail Profile”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 30-37, 2017.
  10. Kim, J. Y., You, K. J., Park, R., “Study on the Photoelectric Composite Cable for Hybrid Interconnection Implementation”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 138~145, 2017.
  11. Lee, C. H., Kim, D. M., Yang, H. S., Kim, S. H., “Design and Analysis of Cryogenic Turbo Expander for HTS Power Cable Refrigeration System”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 141~148, 2015.