

다구찌 방법을 통한 다단식 상하이동형 볼라드의 설계 최적화 연구

A study on design optimization of a multistage bollard by Taguchi method

변홍석*†

Hong-Seok Byun*†

(Received 01 May 2015, Revision received 02 September 2015, Accepted 02 September 2015)

Abstract : This study deals with optimal conditions for design parameters of the multistage bollard with up and down installed on the street to protect pedestrians or stop cars. FE simulation and Taguchi method are used to achieve the optimization for the automatic multistage bollard to minimize effective stress caused by the external force. Thickness, height of stage 2, diameter and over-all height which affect its structural strength are chosen as design parameters. According to the experiments combined by orthogonal array, each of the effective stresses is evaluated. And the results are analyzed by using the signal to noise ratio concept of Taguchi method. From their results, the optimal combination of design parameters are proposed.

Key Words : Multistage bollard, Taguchi method, FE simulation, Optimal design

1. 서 론

볼라드(Bollard)는 차도나 인도의 경계 또는 관공서, 아파트 건물 등의 입구에 설치되어 차량의 진입을 억제하거나 허용하여 보행자의 안전을 보호하고 차량이 보도에 주정차시 발생할 수 있는 보도의 파손을 방지하기 위해서 설치된 시설물이다.¹⁾

볼라드는 차량의 진입을 규제하거나 보행자의 진입을 규제하도록 구분되어 설계되는데 국내에서는 주로 보행로의 차량진입 규제용을 많이 볼 수 있다. 볼라드는 예전에 화강암이나 기타의 방지턱 등으로 차량을 규제하여 왔으나, 최근 들어 지주관 형태인 진입규제 볼라드로 대체되고 있다.

볼라드는 사람이 직접 수동으로 탈부착하거나

완전히 고정되어 있는 고정식 타입과 반자동 또는 자동으로 상하이동하는 자동식 타입 등으로 크게 구분할 수 있다. 자동식 타입의 볼라드는 자동으로 볼라드를 상하 이동시켜 차량진입을 억제 또는 허용할 수 있도록 제어할 수 있는 방식인데 에너지원으로는 유압, 공압 또는 전기를 사용한다. 이런 자동식 타입의 볼라드는 최근 들어 국내에서도 연구 개발이 진행되고 있으나 수입에 크게 의존하고 있는 게 현재 실정이다. 현재까지 국내의 볼라드 연구결과를 살펴보면, 고정식 측면에서는 보행자의 피해를 최소화하는 탄성력을 이용한 물리적인 기능을 적용하여 도시환경에 필요한 효율적인 볼라드의 디자인을 제안한 연구가 수행되었으며¹⁾ 자동식의 경우는 자동으로 승하강하는 타입의 볼라드에 대한 연구가 진행된 바가 있는

*† 변홍석(교신저자) : 울산과학기술대학교 기계공학부
E-mail : hsbyun@uc.ac.kr, Tel : 052-279-3127

*† Hong-Seok Byun(corresponding author) : School of Mechanical Engineering, Ulsan College.
E-mail : hsbyun@uc.ac.kr, Tel : 052-279-3127

데 상하이동에 대한 개념적 디자인 연구²⁾와 전기모터와 볼스크류를 사용하여 메카트로닉스 설계 이론을 접목시켜 볼라드를 승하강시키는 방식의 전동식 볼라드에 대한 개발 연구가 진행된 바 있다.³⁾

이러한 자동으로 상하이동하는 볼라드에 대한 최근 연구들은 매립시 돌멩이와 각종 배선 및 배관 때문에 볼라드를 매립할 수 없는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위해 볼라드를 다단식으로 설계하여 매립깊이를 최소화할 수 있는 상하이동 가능한 자동 볼라드 연구까지 진행되었다.⁴⁾ 그러나 현재까지의 연구는 상하이동형 자동 볼라드의 설계 프로세스와 제안 모델에 대한 구조적 강도를 간략하게 언급하고 있고 볼라드의 구조적인 설계변수를 고려한 설계 최적화에 대해서는 다루지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 기 개발된 자동으로 상하이동하는 볼라드가 구조적으로 만족하는 설계 변수를 찾기 위해서 최적 설계 연구를 수행하였다. 이를 통해 유한요소 시뮬레이션의 구조강도해석과 다구찌 방법을 통해 일정 충격강도를 견딜 수 있는 최적 파라미터를 제안하였으며 볼라드의 구조적 안정성을 평가하고자 하였다.

2. 상하이동식 볼라드 시스템

차량의 진입을 억제하기 위해 볼라드를 매립하는 고정식 타입의 볼라드는 차량 진입시 수동으로 볼라드를 탈부착 해야 하거나 설치 초기부터 고정되어 차량을 진입할 수 없도록 설계된다. 이와 달리 상하이동식 자동 볼라드는 탈부착에 따르는 작업의 비효율성을 제거하고 차량진입을 효과적으로 차단, 허용하며 보행자의 안전을 보호할 수 있도록 설계되어진다.

Fig. 1은 상하이동식 자동 볼라드의 모델을 나타낸다. 그 구조는 상부관과 하부관으로 나눌 수 있고, 상부관은 1단과 2단 즉 다단식으로 포괄 수 있으며 하부관은 볼라드 고정을 위해 땅속에 매립된다. 이 볼라드의 큰 장점은 매립시 굴착 깊이를 낮게 할 수 있다는 것이다.

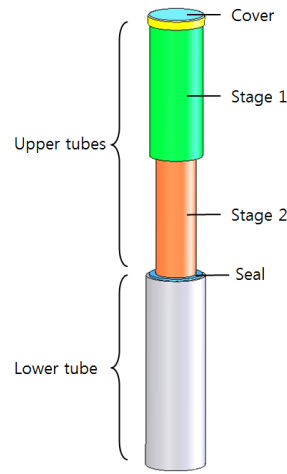


Fig. 1 Structure of a multistage bollard

3. 다구찌 방법

다구찌 방법은 강건설계 방법 중 하나로 그 기초적 원리는 최소한의 실험으로부터 다양한 설계 파라미터의 조합에 대한 효과와 개별 파라미터에 대한 효과를 해석하는 것이다. 파라미터 설계를 위한 다구찌 방법의 목적은 대상 실험의 수행 시간과 비용을 최소화시키고, 제품 품질에 있어서 변화를 감소시키며, 설계 파라미터의 최적 조합조건을 도출하는데 있다.

다구찌 방법은 현재의 변화를 양적화하기 위해 일반적인 S/N(Signal to noise)비를 사용하는데, S/N비는 포함된 특정한 특성치에 의존하고, 설계 목적에 따라서 망목특성(NB:nominal is best), 망대특성(HB:higher is better), 망소특성(LB:lower is better)의 3가지로 적용할 수 있다. 본 연구와 관련된 망대특성에 대한 S/N비는 아래와 같이 주어진다.

$$(S/N)_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

여기서, n 은 잡음인자를 고려하여 동일 설계변수 조건하에 수행한 시뮬레이션 반복 횟수를 나타내며, y 는 특성치를 나타낸다.

Table 1 Levels of design parameters

(unit:mm)

| Level \ Parameters | Thickness(A) | Height of stage 2(B) | Diameter(C) | Over-all Height(D) |
|--------------------|--------------|----------------------|-------------|--------------------|
| 1 | 3 | 340 | 115 | 800 |
| 2 | 4 | 390 | 140 | 900 |
| 3 | 5 | 440 | 165 | 1000 |

그리고 설계 파라미터에 최적 조합을 획득하기 위해 평균 분석 해석이 사용되고, S/N에 대한 반응도표를 구성하기 위해 식(1)이 적용된다.

또한 수준 i에 대해 j번째 인자의 평균 S/N비를 구하기 위해 식(2)와 같이 주어진다.

$$M_{ji} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{L_j} (S/N)_{ji} \quad (2)$$

여기서, n_j 는 직교배열표에서 j번째 인자에 나타나는 수준 i의 수이고, $(S/N)_{ji}$ 는 수준 i의 j번째 인자 S/N비를 의미한다.

3.1 목적함수

본 연구에서는 상하이동식 자동 블라드의 최적 설계를 위해 어느 충격하중 범위 내에서 구조적 강도를 가질 수 있도록 충격하중에 대해 발생하는 블라드의 유효응력을 목적함수로 선정하였다. 즉, 충격하중에 대해 상부관에 발생하는 유효응력을 최소화하는 설계 파라미터의 조합을 구하고자 하는데 그 목적이 있겠다.

해석 관심 대상 영역의 목적함수 유효응력은 아래와 같은 식(3)으로 표현할 수 있으며, 소성변형이 일어나는 시점인 항복응력보다 작은 유효응력에만 제한한다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

$(\bar{\sigma} \leq \sigma_Y)$

3.2 파라미터 설계

블라드가 외부로부터 충격을 받을 때 특성치에 영향을 주는 설계 파라미터는 Fig. 2에서 보여주고 있다. 설계 파라미터는 블라드 성능인 유효응력에 영향을 미치는 설계변수이므로 블라드 전체 높이, 2단 높이, 블라드 두께 그리고 상부관 두께를 네 가지 인자로 결정하였고 직교배열표에서 제어인자로서 선정하였다. 모든 인자는 3수준으로 적용하였고, Table 1에서 네 가지 제어인자에 대한 각각 3수준을 나타내고 있다.

설계 파라미터가 4개이고 3수준이므로 직교배열표에서 $L_9(3^4)$ 를 선택하였다. 설계 파라미터에 대해 네 가지 인자 A,B,C,D를 할당하고 구조강도 해석을 각각 수행하였으며, 인자간 교호작용은 무시하였다.

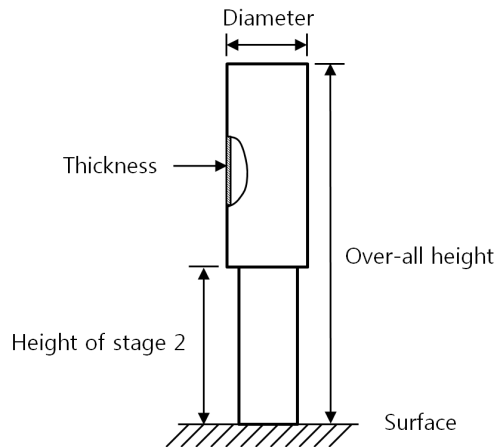


Fig. 2 Design parameters of a bollard

4. 구조해석

4.1 구조해석 모델

수치해석을 수행하기 위한 대상 모델에 대해 3차원 형상모델링은 Inventor에서 수행하였으며, 구조해석을 위해서는 범용 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하였다. ANSYS를 통한 구조해석 관련 연구들은 여러 문헌⁵⁻⁷⁾에서 볼 수 있는데, 그 해석결과는 실제 실험데이터와 잘 일치하여 실제 모델에서 발생할 수 있는 구조적 문제를 사전에 예측할 수 있는 장점이 있다.

해석에 사용된 모델의 요소 타입은 사면체이고, 요소와 노드 수는 인자와 수준에 따라 볼라드의 크기가 다르므로 약간의 차이가 있으며 전체 평균 요소 수는 9,606개, 노드 수는 19,353개이다.

Table 2 Material properties for FE simulation

| Material | STS |
|-----------------------------|-------|
| Density(kg/m ³) | 7,750 |
| Modulus of elasticity(GPa) | 193 |
| Yield Strength(MPa) | 207 |
| Ultimate Strength(MPa) | 586 |
| Poisson's ratio | 0.31 |

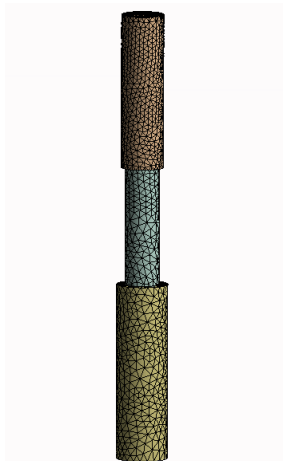


Fig. 3 Initial mesh model of a bollard

본 해석모델에 사용된 재료는 눈 또는 비 때문

에 녹이 스는 것을 방지하기 위해 실제로 사용되고 있는 스테인레스강으로서 그 물성값은 Table 2와 같다.

4.2 경계조건 및 하중조건

자동볼라드의 경계조건은 하부관을 땅에 굴착하여 콘크리트로 매립되므로 하부관 전체 면(Face)을 고정(Fixed support)으로 두어 6개 자유도를 모두 구속하도록 하였다. 또한 상부관 1단과 2단의 경우는 서로 미끄러짐되어 접촉하고 있고 반경 방향으로 상호 지지되어 있으므로 반경방향으로의 면을 완전 구속하기 위해 접촉부 상호 고정(Bonded) 경계조건을 두었다.

그리고 하중은 하부관 상단으로부터 높이 500mm 위치의 상부관 1단 면에 2톤의 힘이 볼라드 축에 대해 수직방향으로 작용하도록 하였고 이로부터 볼라드의 응력과 변형을 살펴보고자 하였다.

4.3 해석절차

볼라드는 차량 등의 충격에 대해 그 기능을 수행하고 제품의 형상 변형 정도가 적으며 파괴가 이루어지지 않도록 설계하는 것이 중요하다.

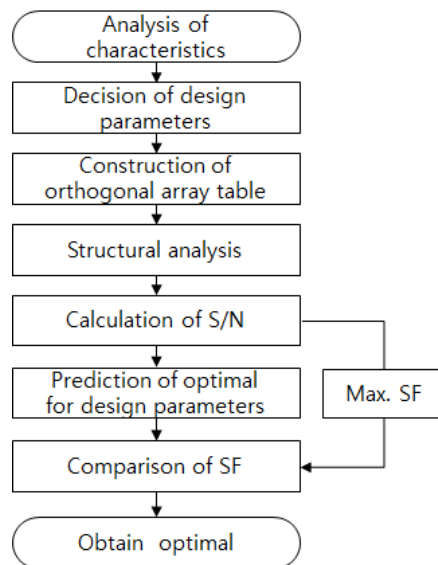


Fig. 4 Design procedure of a bollard

Table 3 S/N ratios for forming load

| Experiment Number | Factors | | | | Effective stress(MPa) | S/N |
|-------------------|---------|---|---|---|-----------------------|--------|
| | A | B | C | D | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 640.38 | -56.13 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 392.42 | -51.88 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 287.19 | -49.16 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 318.44 | -50.06 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 210.61 | -46.47 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 559.31 | -54.95 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 177.11 | -44.96 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 496.97 | -53.93 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 282.08 | -49.01 |

따라서 블라드의 구조적 기능에 영향을 주는 특징 형상을 설계 파라미터로 선정하고 다구찌 방법과 구조해석을 적용하여 자동 블라드의 최적 설계 파라미터를 도출하고자 하였다.

블라드의 해석절차는 Fig. 4에서 보여지듯이 최초에 블라드의 설계 파라미터를 결정하고 인자의 수준을 결정하여 직교배열표를 구성한다.

직교배열표의 실험순서에 따라 구조해석을 수행하고 목적함수의 유효응력을 분석한다. 이로부터 S/N비를 계산하고 최적 파라미터를 예측한다. 예측된 최적 파라미터의 설계조합으로부터 S/N비와 안전계수(SF, safety factor)를 계산하고 이전 값의 S/N비에 비해 높으면 수락한다. 이때 안전계수의 값이 1보다 큰 지를 확인하고 최적 설계 파라미터 조합으로 결정한다.

5. 해석결과

상하이동형 자동 블라드의 최적 설계를 위해 설계 파라미터를 블라드 두께, 2단 높이, 블라드 직경, 전체 높이를 제어인자로 하고 유효응력을 목적함수로 하여 구조해석을 수행하였다.

Table 3에서 유효응력을 목적함수로 한 직교배열표와 유한요소해석의 최대 유효응력과 이를 S/N비로 변환시킨 데이터를 보여주고 있다. 이들 S/N비 분석결과로부터 각 인자의 영향도를 Table 4에서 나타냈다.

Table 4 Response table for S/N ratios of effective stress

| Level | A | B | C | D |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | -157.17 | -151.15 | -165.01 | -151.61 |
| 2 | -151.48 | -152.27 | -150.94 | -151.79 |
| 3 | -147.90 | -153.12 | -140.60 | -153.15 |
| Difference | 9.27 | 1.97 | 24.41 | 1.54 |
| Rank | 2 | 3 | 1 | 4 |

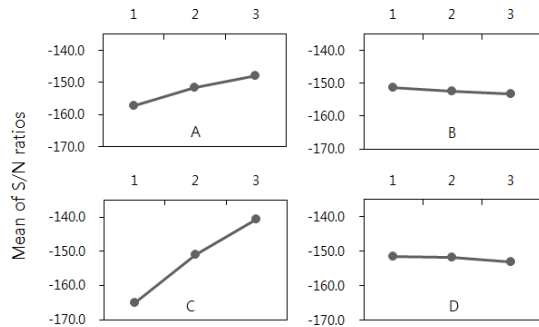


Fig. 5 Main effects for S/N ratios

Fig. 5는 Table 4의 분석결과를 나타낸 것이다. Table 4와 Fig. 5에서 S/N비가 가장 큰 수준들을 찾을 수 있으며, 이에 따라 설계조합조건은 A₃B₁C₃D₁임을 알 수 있었다. 그리고 이들 결과에 의하면 제어인자 C가 유효응력에 가장 큰 영향을 미치고 다음으로 A, B, D 순서임을 알 수 있었다. 그리고 이들 제어인자가 유의인자인지를 확인하

기 위해서 분산분석표를 작성한다.

Table 5 ANOVA table for S/N ratios

| | S | ϕ | V | F0 |
|-------|----------|--------|---------|----------|
| A | 14.5617 | 2 | 7.2808 | 30.7323 |
| B | 0.6505 | 2 | 0.3253 | 1.3729 |
| C | 100.0816 | 2 | 50.0408 | 211.2215 |
| Error | 0.4738 | 2 | 0.2369 | |
| Total | 115.7677 | 8 | | |

조건이 최적설계조합조건이며 $A_3B_1C_3D_3$ 임을 알 수 있다.

Table 6은 최적설계조합조건으로부터 수행한 유한요소해석 결과와 이로부터 제안된 인자 수준의 S/N비 및 최적 설계 파라미터를 나타내고 있다.

Fig.6은 최적 설계조합조건으로 유한요소해석을 수행하여 예측된 볼라드의 유효응력을 나타낸다. 충격 시 상부관의 하단부위에서 최대 응력이 발생하는 것을 볼 수 있으며 이때 응력값은 168.65MPa이고 안전계수는 1.23이므로 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다.

Table 6 S/N ratio of the proposed factor levels using FE-simulation

| Design parameters | | | | Effective stress (MPa) | S/N |
|-------------------|------------------------|--------------|----------------------|------------------------|--------|
| Thickness(mm) | Height of Stage 2 (mm) | Diameter(mm) | Over-all height (mm) | | |
| 5 | 340 | 165 | 1,000 | 168.65 | -44.54 |

그런데 Table 5의 S/N비에 대한 분산분석표를 보면 유의수준 5%에서 A, C는 유의하고 B는 유의하지 않다. 여기서 영향도가 가장 낮은 D를 오차항으로 보았다. 따라서 제어인자 A, C가 볼라드 설계를 위한 유효응력에 영향을 주지만, B와 D는 영향을 주지 않는다고 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하고 유한요소 구조강도해석을 통해 상하이동식의 자동 볼라드에 영향을 미치는 최적 설계 파라미터를 분석하였으며 이로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 외부 하중에 발생하는 유효응력을 목적함수로 하고 설계 파라미터로서 볼라드 두께, 상부관 2단 높이, 볼라드 직경 및 전체 높이를 선정하였으며 직교배열표를 작성하고 시뮬레이션별 유한요소해석을 통해 외부하중에 대한 구조적 안정성을 예측하였다.
- 2) 다구찌 방법의 S/N비를 이용하여 설계 파라미터가 미치는 영향을 분석한 결과, 제어인자인 볼라드 두께와 직경이 유의인자로 고려되어야 하며 2단 높이와 전체 높이는 유의하지 않음을 알 수 있었다. 또한 볼라드의 최대 유효응력에 가장 큰 영향을 주는 것은 볼라드 직경이며 다음으로 볼라드 두께인 것을 알 수 있었다.
- 3) 설계 파라미터의 최적조합조건은 볼라드 두께는 5mm, 2단 높이는 340mm, 볼라드 직경

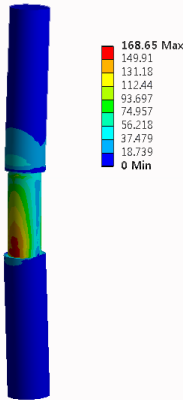


Fig. 6 Distribution of effective stress

그래서 S/N를 크게 하는 조건이 좋은 조건이므로 A와 C는 3수준으로 선택하고 B와 D는 유의하지 않으므로 B는 높이가 낮은 1수준을 선택하고 D는 전체 높이가 큰 3수준을 선택한다. 따라서 이

은 165mm 그리고 전체높이는 1,000mm임을 알 수 있었다.

이러한 설계방법은 다양한 블라드의 구조적 안정성을 가지는 설계 시 도움을 줄 것으로 기대하며, 최적 설계 조합을 결정할 때 쉽게 적용할 수 있을 것이다.

Reference

1. S. H. Park, 2010, "A Study on the Development of a Bollard Design for Pedestrian Environments", Journal of Korean Society of Design Science, Vol. 23, No. 6, pp. 23-28.
2. S. C. Choi and G. H. Kim, 2012, "A Study on the Design of bollards Applying the Principles of Universal Design", Korea Society of Basic Design & Art, Vol. 13, No. 1, pp. 523-531.
3. T. J. Park, B. G. Jung, and K. M. Lee, 2011, "A Study on the Fundamental Performance of Electric-driven Bollard", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 13. No. 4, pp. 169-173.
4. H. S. Byun, 2015, "Development of a multistage bollard with up and down movement", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 15-21.
5. K. W. Nam, H. S. Gwon and C. S. Son, 2010, "Optimization of Design of Safety Block by Structural Analysis", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 71-76.
6. W. K. Nam, S. H. Ham and S. H. Oh, 2011, "Structural Analysis for Silk Hat type of the Harmonic Drive for Precision Robot", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 61-66.
7. B. K. Choi, J. H. Lee, J. M. Lee, J. M. Ha, D. S. Gu and W. C. Kim, 2013, "Structural Analysis of 800T on Hot Stamping Press", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 97-103.