

축 방향 충격을 받는 박판 파형관의 충돌안전도 해석 및 형상 최적설계

안승호^{1*}, 정현승¹, 김진성¹, 손승완²

¹한국철도기술연구원 중대사고대응기술연구팀, ²한국철도기술연구원 시설안전팀

Crashworthiness Analysis and Shape Design Optimization of Thin-walled Corrugated Tubes under Axial Impact

Seung Ho Ahn^{1*}, Hyun Seung Jung¹, Jin Sung Kim¹, Seung Wan Son²

¹Railroad Major Accident Research Team, Korea Railroad Research Institute

²Infrastructure Safety Team, Korea Railroad Research Institute

요약 박판관은 충돌안전을 위한 에너지 흡수장치 중의 하나로서 가벼우면서도 에너지 흡수 효율이 좋아 널리 이용되어 왔다. 그러나 일반적인 박판관은 충돌 초기 피크하중(IPCF: Initial Peak Crushing Force)이 높게 유발될 뿐 아니라 반복적으로 나타나는 피크하중으로 인하여 충돌에너지 흡수장치로서의 안정성이 다소 떨어진다 단점이 있다. 충돌 초기 피크하중을 감소시키고 충돌에너지 흡수장치의 안정성을 키우기 위하여 박판 파형관이 도입되었다. 파형관의 성능은 기하 형상에 큰 영향을 받기 때문에 최적설계 기법을 적용하여 파형관의 성능을 최적화할 수 있다. 본 논문에서는 충돌안전도 해석에 기반한 형상 최적설계를 수행하기 위하여 적응 근사모델(adaptive surrogate model)을 활용한 최적설계 기법을 활용하였다. 파형의 진폭 및 파장 뿐 아니라 형상의 곡률 변화를 설계 변수로써 고려하였다. 형상 설계 매개변수화를 수행하기 위하여 몰핑(morphing) 방법을 채택하였다. 수치 예제를 통해서 적응 근사모델에 기반한 최적설계 결과와 기존 근사모델에 기반한 최적설계 결과를 비교하고 적응 근사모델에 기반한 최적설계 방법이 좀 더 효율적인 결과를 도출함을 보였다.

Abstract Thin-walled tubes have been widely used as energy absorbing devices because they are light and have high energy-absorption efficiency. However, the downside is that conventional thin-walled tubes usually exhibit an excessive initial peak crushing force (IPCF) and a large fluctuation in the load-displacement curve, and thus lack stability as energy absorbing devices. Corrugated tubes were introduced to reduce IPCF and to increase the stability of collision energy-absorbing devices. Since the performance of corrugated tubes is highly influence by geometry, design optimization methods can be utilized to optimize the performance of corrugated tubes. In this paper, we utilize shape design optimization based on an adaptive surrogate model for crashworthiness analysis. The amplitude and wavelength of the corrugation, as well as curvature changes in the features, are the design variables. A morphing methodology is adopted to perform shape design parameterization. Through numerical examples, we compare optimal design results based on the adaptive surrogate model, with optimal results based on conventional surrogate models, and we show that direct optimal design methods produce more efficient results.

Keywords : Adaptive Surrogate Model, Axial Impact, Corrugated Tubes, Crashworthiness, Energy Absorption, Morphing, Shape Design Optimization

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Seung Ho Ahn(Korea Railroad Research Team)

email: ansh0526@krri.re.kr

Received February 2, 2021

Accepted May 7, 2021

Revised March 17, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

최근, 자동차 및 열차와 같은 운송 수단의 경량화 및 고속화로 인하여 충돌안전분야의 중요성이 강조되고 있다. 박판관은 충돌안전을 위한 에너지 흡수 부재 중의 하나로써 널리 이용되어 왔다. 박판관은 가벼우면서도 에너지 흡수 효율이 좋다는 장점이 있다. 또한, 부품의 개수가 적고 제작이 용이하다. 특히, 원형관(circular tubes)는 안정적으로 순차적인 접힘 모드가 유발됨에 따라 단위 질량당 에너지 흡수율이 좋기 때문에 널리 사용되어 왔다[1-3]. 그러나 박판 원형관은 충돌 초기 피크하중이 높게 유발될 뿐 아니라 반복적으로 나타나는 피크하중으로 인하여 충돌에너지 흡수장치로서의 안정성이 다소 떨어진다. 단점이 있다. 구조물에 파형을 추가함으로써 에너지 흡수장치의 안정성을 향상시킬 수 있음이 밝혀짐에 따라 파형을 추가한 에너지 흡수장치에 대한 다양한 연구가 수행되었다[4-6]. 복잡한 형상의 파형관 제작의 한계로 연구가 제한되어 왔으나 최근 3D 프린팅을 포함한 다양한 제작 기술이 발전되고 있다[7].

파형관의 성능을 최적화시키기 위하여 최적설계를 활용한 다양한 연구가 수행되었다. 파형관의 너비, 두께, 진폭, 파장이 설계 변수로서 주로 고려 되었으며 다양한 충돌안전도 기준(crashworthiness criteria)이 목적함수와 제약조건으로 고려되었다. 충돌안전도 문제를 풀기 위한 기존의 최적설계 방식은 주로 실험계획법에 기반하여 근사모형을 구성한 후 구성된 근사모형에 기반하여 최적설계를 수행하였다[8-10]. 이와 같은 기존의 연구는 해석 시간이 많이 소요되는 충돌해석 시뮬레이션의 최적설계에 효율적이지만 근본적으로 근사모형의 정확도에 최적설계의 정확도가 의존적이라는 한계가 있다. 이와 같은 한계를 극복하고자 반복적으로 해석을 수행하여 근사모형을 업데이트해 나가는 적응근사모형 기법이 개발되었다[11]. 적응근사모형에 기반한 최적설계 방법은 최적설계 과정 중에 업데이트된 기하형상을 반영하여 반복적으로 시뮬레이션을 수행해야 한다. 따라서 설계 매개변수화를 통해서 자동으로 요소망의 재구성이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 이러한 설계 매개변수화를 수행하기 위하여 물핀 방법을 채택하였다. 적응근사모형에 기반한 최적설계 방법의 효율성을 확인하기 위하여, 적응근사모형에 기반한 최적설계와 기존의 근사모형에 기반한 최적설계를 각각 수행하고 그 결과를 비교하였다.

2. 충돌안전도 기준 및 모델의 정의

2.1 충돌안전도 기준

흡수에너지(EA: Energy Absorption)는 에너지 흡수 장치의 변형을 통해서 흡수한 총 에너지를 의미한다. Eq. (1)로 나타낼 수 있다.

$$EA = \int_0^d F(x)dx \quad (1)$$

Where, $F(x)$ denotes axial impact force, d denotes effective deformation distance

단위 질량당 흡수에너지(SEA: Specific Energy Absorption)는 단위 질량당 EA이며, Eq. (2)로 나타낼 수 있다.

$$SEA = EA/m \quad (2)$$

Where, m denotes whole mass of energy absorbing devices

평균 충돌 하중(MCF: Mean Crushing Force)은 에너지 흡수장치의 변형 과정에서 유발된 충돌 하중의 평균값이며, Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = EA/d \quad (3)$$

Where, P_m denotes mean crushing force

박판관 형태의 에너지 흡수장치는 충돌 초기에 변형이 크게 유발되기 직전에 최대 충돌 하중이 유발되며 이를 IPCF로 정의한다.

피크하중의 반복 편차(ULC: Undulation of Load carrying capacity)는 에너지 흡수의 안정성을 나타내는 지표로서 Eq. (4)와 같이 표현된다.

$$ULC = \frac{\int_0^d |F(x) - P_m| dx}{EA} \quad (4)$$

2.2 파형관 형상의 정의

Fig. 1은 파형관의 형상을 나타낸다. 파형의 형상은 사인파 형태를 기반으로 하여 Eq. (5)와 같이 정의한다.

$$y = \frac{D}{2} + A \sin^K \left(\frac{\pi z}{B} \right) \quad (W \leq z \leq L - W) \quad (5)$$

Where, A denotes amplitude of corrugation, B denotes wavelength of corrugation, L denotes length of tube, K denotes curvature of corrugation

파형관의 길이는 모든 예제에서 150 mm로 일정하고, B 는 $(L-2W)/16$ 이다. 곡률 분포에 변화를 주기 위하여

사인 함수에 K 계수 항을 추가하여 파형의 곡률 분포에 변화를 준다. Fig. 2는 K 값의 변화에 따른 파형관의 형상 변화이다. K가 1보다 커질수록 보폭한 형상을 갖게 되며 K가 1보다 작아질수록 홈형관(grooved tubes) 형상과 유사해진다.

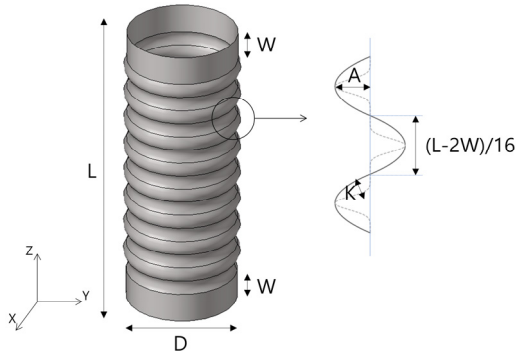


Fig. 1. The geometry of corrugated tubes

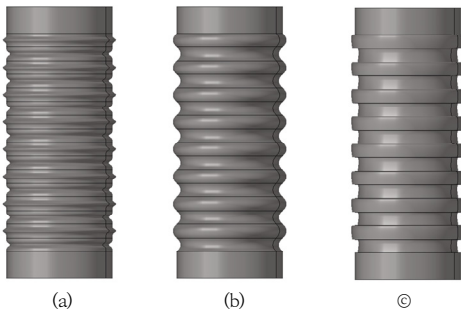


Fig. 2. The geometry of corrugated tubes with various K
(a) K=10.0 (b) K=1.0 (c) K=0.1

3. 유한요소 모델링 및 검증

Fig. 3은 축 방향 충격을 받는 박판 파형관의 유한요소 모델이다. 파형관의 하단은 고정되어 있으며 상단은 10 m/s로 움직이는 강체면에 의해서 충돌한다. 상용 유한요소 해석 솔버인 LS-DYNA가 사용되었다. 4 절점 quadrilateral Belytschko-Tsay 쉘 요소를 사용하여 요소망을 구성하였다. 감쇠 적분이 사용되었으며 두께 방향으로 5개의 적분점이 사용되었다. LS-DYNA의 *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 접촉 조건을 사용하였다. 마찰계수는 0.3을 적용하였다. 사용된 재료는 SPRC40C high strength steel이다[12]. 탄성계수 210GPa이고 항복강도는 302.2MPa, 극한강도는

425.2MPa, 포아송비는 0.3, 멱지수 $n=0.21$ 이다. 변형률 속도를 반영하기 위하여 Cowper-Symonds 모델을 사용하였으며 계수 C 는 $42322s^{-1}$ 이고 n 은 4.4이다. LS-DYNA의 *MATPIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 키워드를 사용하여 물성치를 반영하였다. 강체면의 진진 거리는 50 mm로 하였다. 유한요소 모델의 요소의 크기는 0.75 mm이다.

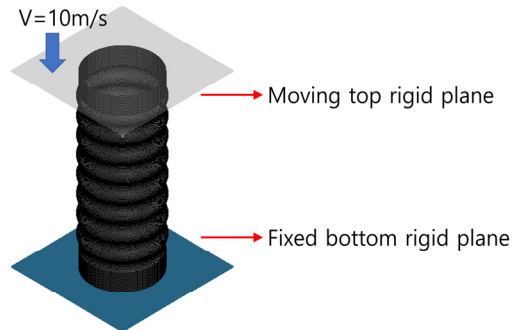


Fig. 3. Finite element model of a corrugated tube

유한요소 모델을 검증하기 위하여 유한요소 모델을 통하여 획득한 해를 원형관의 분석해(Analytic Solution)와 비교하였다. FEA 검증 모델의 L 은 150 mm, D 는 55 mm, t 는 1~4.5 mm로 하였다. V 는 10 m/s이다. 요소망의 크기는 0.75 mm이다. Fig. 4는 MCF의 유한요소 해석해와 여러 저자들이 제시한 분석해[1-3]의 비교이다. [3]에서 제시된 분석해와의 오차가 0.4%로 가장 좋으며 실제와 유사한 S 형상의 Superfolding 요소를 고려함에 따라 정확도가 향상 되었다고 추측할 수 있다. 전반적으로 LS-DYNA를 활용한 유한요소 모델 해석이 신뢰할 만한 해를 제시함을 알 수 있다.

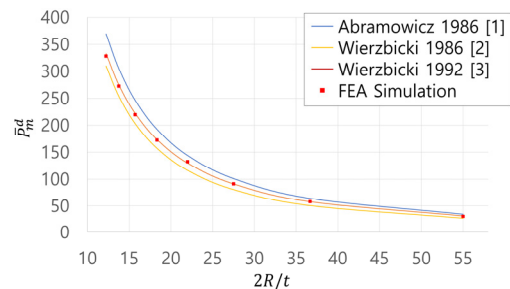


Fig. 4. Comparison of mean crushing force between analytic and FEA solution

4. 적응근사모델에 기반한 형상 최적화

4.1 몰핑방법에 기반한 설계 매개변수화

적응 근사모델에 기반한 형상 최적설계를 수행하기 위해서는 적절한 형상 설계 매개변수화가 필수적이다. 적절한 형상 설계 매개변수화가 없을 경우 요소망의 품질이 나빠짐에 따라 해석 결과의 신뢰성이 떨어진다. 본 연구에서는 HyperWorks에서 제공하는 몰핑 기능을 이용하여 형상 설계 매개변수화를 수행하였다. 먼저, 초기형상 및 상한값 및 하한값에 대응되는 형상을 설계한다. Fig. 5에서 t 의 아래 첨자가 0인 것이 초기형상, -1인 것이 하한값에 대응되는 형상, +1인 것이 상한값에 대응되는 형상이다. 초기형상에 대하여 요소망을 구성한 후 상한값 및 하한값에 대응되는 형상의 요소망에 몰핑 시킨다. 이를 선형적으로 보간 하여 형상의 변화를 매개변수화 할 수 있다. 선형 보간에 의한 오차를 최소화하기 위하여 Fig. 5(c)와 같이 구간을 몇 개로 분할하여 선형적인 몰핑의 합으로 비선형적인 몰핑을 근사적으로 표현하였다.

4.2 적응 근사모델 기법

본 연구에서는 적응 근사모델에 기반한 최적설계 기법을 사용한다. 통상적인 반응표면법의 경우 계산 시간 측면에서 이점이 있으나 구성한 반응표면이 정확하지 않을 경우 해의 정확도에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하고자 ARSM(Adaptive Response Surface Method)이 제안되었다. 초기에 구성된 반응표면을 최적설계 과정에서 결과 값을 반영하여 지속적으로 업데이트하여 반응표면의 정확도를 개선하는 것이다. 그러나 여전히 순차적인 해석에 의하여 효율성이 떨어지고 전역해를 구하는데 한계가 있다. 이러한 ARSM의 한계를 극복한 방법이 GRSM(Global Response Surface Method) 방법이다 [13]. 첫 번째 Iteration에서 몇 개의 해석값을 이용해서 반응표면을 구성하고, 해당 반응표면 위에서 최적설계 문제의 해를 얻는다. 얻어진 최적점에서 해석을 수행하고 해석 값을 반영하여 반응표면을 업데이트한다. 이와 동시에 전역해를 탐색하기 위하여 특정 포인트에서 해석을 수행하여 얻어진 값을 이용하여 반응표면을 업데이트한다. GRSM 방법은 ARSM 방법과 비교하여 전역해를 찾는 데 이점이 있을 뿐 아니라 설계 변수가 많을 때 더욱 효율적이다.

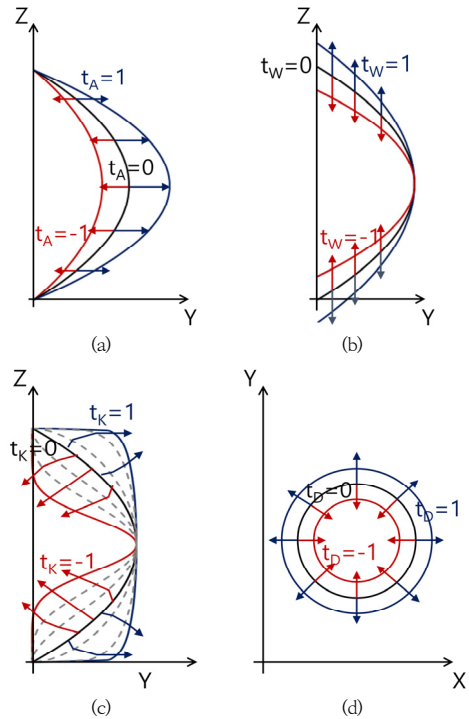


Fig. 5. Shape design parameterization using morphing
(a) Parameter A (b) Parameter W (c) Parameter K
(d) Parameter D

4.3 최적설계 절차

Fig. 6은 본 연구에서 제시된 최적설계 절차의 순서도이다. 먼저, 최적설계를 위한 모델을 정의한다. 몰핑 기능을 이용하여 형상 설계 변수를 얻는다. 이후, HyperStudy에서 최적설계를 하기 위한 형태의 파일을 생성한다. 앞서 정의된 요소망을 기반으로 LS-DYNA를 활용한 충돌 안전도 해석을 위한 인풋 파일을 정의한다. 이어서, HyperStudy에서 설계 변수와 경계 조건을 정의하고 목적함수와 제약조건을 정의한다. 이어 GRSM 최적설계에서 사용될 매개변수를 정의한 후 GRSM 최적설계를 수행한다.

5. 파형관의 형상 최적설계

5.1 적응 근사모델에 기반한 형상 최적설계

본 연구에서의 최적설계 문제는 IPCF와 ULC 제약조건을 가지며 SEA를 최대화하는 것이다. IPCF의 제약조건은 70 kN으로 하였으며 ULC 제약조건은 0.16로 하였

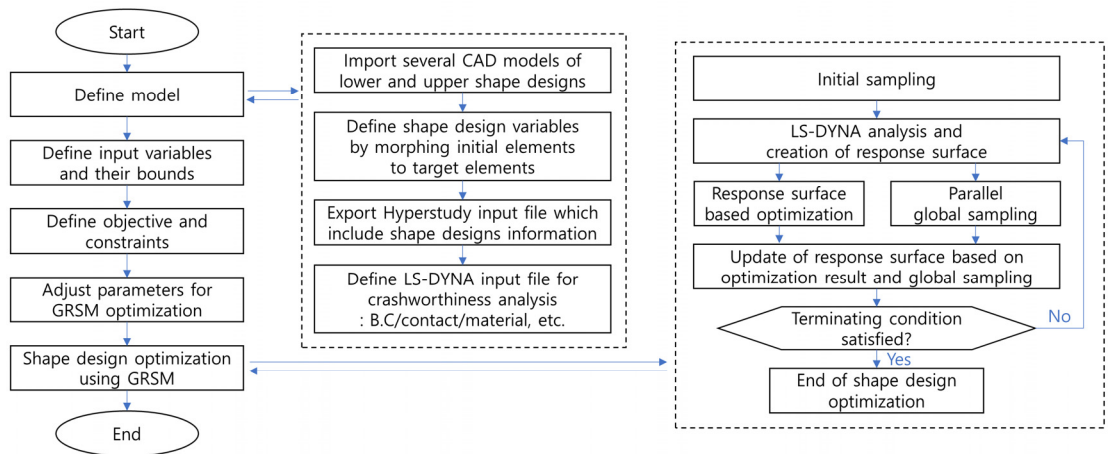


Fig. 6. Flowchart for performing shape design optimization using adaptive surrogate model

다. 설계변수는 총 5개로써 형상 설계변수 4개와 치수 설계변수 1개이다. 본 최적설계 문제는 Eq. (6)-(13)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Maximize } SEA, \quad (6)$$

$$\text{subject to } IPCF \leq 70(kN), \quad (7)$$

$$ULC \leq 0.16, \quad (8)$$

$$40(mm) \leq D \leq 70(mm), \quad (9)$$

$$0.5(mm) \leq t \leq 2.5(mm), \quad (10)$$

$$0.4(mm) \leq A \leq 2.4(mm), \quad (11)$$

$$10 \leq W \leq 20(mm), \quad (12)$$

$$0.1 \leq K \leq 8.0. \quad (13)$$

최적해를 얻기 위하여 GRSM 방법을 사용하였다. GRSM의 총 해석 숫자는 50으로 하였다. 초기 샘플링 지점의 숫자는 7이다. 랜덤 시드는 1개로 하였으며 Iteration 마다 해석 숫자는 2개로 하였다. 총 23번의 Iteration을 반복한다. 초기형상에서의 설계변수는 각각 t 는 1.5 mm, R 은 1.4 mm, W 는 15 mm, K 는 1.0, D 는 55 mm이며, 최적화된 형상에서의 설계변수는 각각

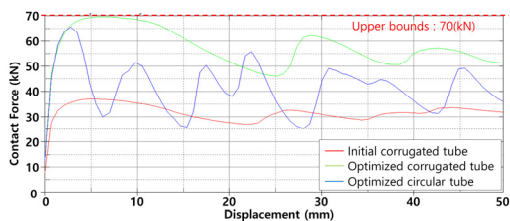
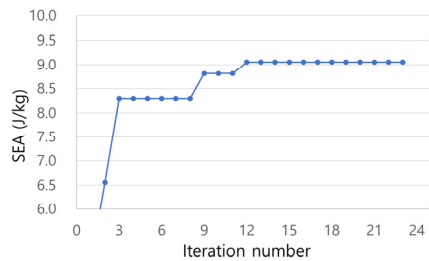
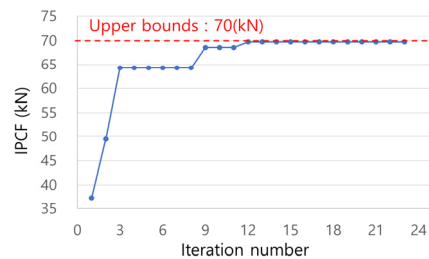


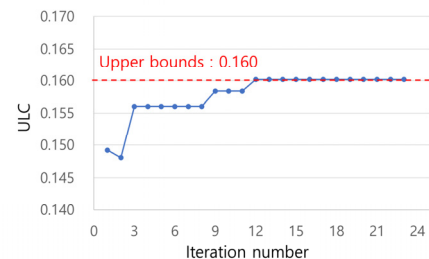
Fig. 7. Force-displacement diagrams of corrugated and circular tubes



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Shape design optimization history of output response
(a) SEA (b) IPCF (c) ULC

t 는 2.00 mm, R 은 0.91 mm, W 는 7.21 mm, K 는 5.63, D 는 40 mm이다. Fig. 7은 파형관의 하중-변위 선도이다. 최적화된 형상은 초기형상과 비교하여 주어진 제약조건을 만족시키면서 더 많은 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있다. 비교 목적으로 SEA를 최대화하며 IPCF(70 kN인 제약조건을 갖는 원형관의 최적설계 문제를 구성하였다. 설계 변수는 D 와 t 이고 경계조건은 Eq. (9)~(10)과 동일하게 하였다. 파형관은 원형관과 비교하여 IPCF가 감소하고 ULC 또한 상당히 개선되지만 EA가 줄어드는 것이 단점으로 알려져 있다. 그러나 동등한 수준의 IPCF를 제약조건으로 최적해를 얻는 경우 ULC가 작기 때문에 파형관이 원형관과 비교하여 오히려 더 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있다. Fig. 8는 23번의 Iteration 동안 응답함수의 변화이다. 최적설계를 통해서 SEA는 4.88 J/g에서 9.06 J/g으로 86% 증가 하였으며, IPCF와 ULC는 모두 제약조건 값을 만족시켰다.

5.2 기존 근사모델에 기반한 형상 최적설계

기존 근사모델에 기반한 형상 최적설계를 수행하기 위해서는 실험계획법을 이용하여 근사모델을 구성하기 위한 설계점(Sample Points)을 선택해야 한다. 본 예제에서는 MELS(Modified Extensible Lattice Sequence) 방법을 사용하였다. 설계점의 숫자는 30개, 50개, 70개, 100개를 선택하여 총 4개의 모델을 구성하여 그 차이를 비교하였다. 근사모델의 채택은 HyperStudy에서 제공하는 FAST(Fit Automatically Selected by Training) 방법을 사용하였다. 구성된 근사모델의 정확도를 검증하기 위해서 결정계수(R-square) 값을 비교하였다. Table. 1은 설계점의 변화에 따른 결정계수 값이다. 설계점이 100개인 경우에 SEA는 3% 이내의 오차를 보이며, IPCF는 1%의 이내의 오차를 보인다. ULC는 비선형성이 강해서 결정계수가 낮게 나타났다.

Table 1. Comparison of R-square values at different sample points

Sample points	30	50	70	100
SEA	0.945	0.964	0.969	0.979
IPCF	0.987	0.986	0.988	0.991
ULC	0.657	0.745	0.773	0.842

최적설계 알고리즘은 GA(Genetic Algorithm)를 사용하였다. 최대 Iteration의 숫자는 50으로 하였으며 모집단(population)은 95로 하였다. Table. 2는 설계점의

숫자에 따른 최적설계 결과이다. 최적설계를 통해 얻어진 SEA, IPCF, ULC 값과 해당 지점에서 실제 유한요소해석을 수행한 결과의 일치도를 비교하였다. SEA 및 IPCF는 설계점의 수가 증가함에 따라 오차가 점차 감소함을 알 수 있다. ULC는 비선형성이 높아서 오차가 컸다.

Table 2. Comparison of surrogate model based optimization results at different sample points

Sample points		30	50	70	100
SEA	Surrogate	8.36	8.57	9.14	9.15
	FEA	8.93	8.42	8.64	8.92
	Error (%)	6.39	1.81	5.79	2.52
IPCF	Surrogate	70.31	70.26	70.29	70.22
	FEA	73.95	67.15	71.70	70.71
	Error (%)	4.91	4.63	1.97	0.69
ULC	Surrogate	0.159	0.161	0.160	0.161
	FEA	0.142	0.143	0.160	0.140
	Error (%)	12.05	12.36	0.15	14.76

5.3 최적설계 결과의 비교

Fig. 9는 적응 근사모델에 기반한 최적설계와 기존 근사모델에 기반한 최적설계를 통해서 얻어진 최적화된 형상에서의 설계변수의 값이다. t , A , D 는 개략적으로 유사했으며 W 와 K 의 차이가 크게 나타났다. Table. 4는 적응 근사모델에 기반한 최적설계와 기존 근사모델에 기반한 최적설계를 통해서 얻어진 최적화된 형상에서의 응답함수 값의 비교이다. 기존 근사모델의 경우 실제 유한요소 해석 값과 비교하였다. 적응 근사모델에 기반한 최적설계에서는 50번의 유한요소 해석을 수행하였다. 설계점이 30개인 경우 얻어진 최적설계 결과는 IPCF 제약조건을 위반한다. 설계점이 50개 이상인 경우 대체적으로 유효한 설계가 얻어졌으며 설계점이 증가함에 따라 더 개선된 SEA 값이 얻어졌다. 설계점이 100개인 경우 적응근사기법과의 SEA의 차이는 1% 수준에 불과했으나 유한요소 해석 숫자는 2배로 훨씬 비효율적이다. 적응근사기법의 경우 유한요소 해석 숫자가 23번인 시점(Iteration=11)에서 8.82 J/g의 SEA에 도달하였으며 최적설계를 계속 수행할 경우 유한요소 해석 숫자가 99번인 시점(Iteration=47)에서 9.17 J/g까지 목적함수의 값이 점차적으로 증가하였다. 본 예제를 통해서 기존 근사모델에 기반한 최적설계에 비하여 적응 근사모델에 기반한 최적설계 방법의 효율성이 더 높음을 알 수 있다.

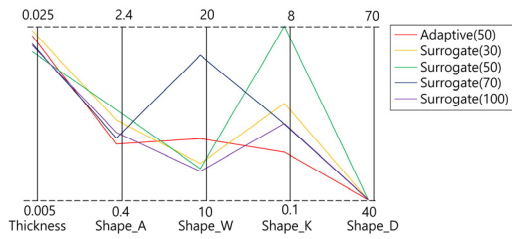


Fig. 9. Comparison of optimization results : Design variables

Table 3. Comparison of optimization results : Output responses

	Adaptive	Conventional Surrogate Model			
Sample Points	50	30	50	70	100
SEA(J/g)	9.05	8.93	8.42	8.64	8.92
IPCF(kN)	69.75	73.95	67.14	71.70	70.71
ULC	0.161	0.142	0.143	0.160	0.140

6. 결론

본 연구에서는 축 방향 충격을 받는 박판 파형관의 충돌안전도 해석 및 형상 최적설계를 수행하였다. 파형의 진폭 및 파장 뿐 아니라 형상의 곡률 변화를 설계 변수로써 고려하였으며, 물핑 방법을 이용하여 형상 설계 매개변수화를 수행하였다. 기존 근사모델에 기반한 최적설계 기법의 한계를 극복하기 위하여 적응근사모델에 기반한 최적설계를 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 형상 설계 매개변수화를 위하여 물핑 기능을 이용하였다. 초기형상과 타겟형상의 차이를 선형적으로 보간함으로써 형상 설계변수를 매개변수화하였다. 형상 변경의 궤적이 비선형적일 경우 구간을 몇 개로 분할하여 연속적인 선형 물핑의 합으로 비선형 물핑을 근사적으로 표현하였다.
- (2) 최적설계의 목적함수는 SEA를 최대화 하는 것으로 설정하였으며 IPCF와 ULC 2개의 제약조건을 고려하였다. 설계 변수로써 관의 두께, 직경 및 파형의 진폭, 파장 뿐 아니라 곡률 변화를 고려하여 좀 더 일반적인 형태의 파형관의 형상 최적설계를 수행하였다. 파형관의 최적설계 결과는 원형관의 최적설계 결과와 비교하여 동등한 수준의 IPCF 제약 조건 하에 ULC 값은 더 작고 더 많은 에너

지를 흡수하였다.

- (3) 적응 근사모델에 기반한 최적설계 결과는 응답함수의 값 및 계산 시간을 고려할 때 기존 근사모델에 기반한 최적설계 결과와 비교하여 좀 더 효율적임을 확인하였다.

References

- [1] Abramowicz, Wlodzimierz, and Norman Jones. "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes." *International Journal of Impact Engineering*, Vol.4, No.4, pp.243-270, Jul. 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(86\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0734-743X(86)90017-5)
- [2] Wierzbicki, T., and S. U. Bhat. "A moving hinge solution for axisymmetric crushing of tubes." *International journal of mechanical sciences*, Vol.28, No.3, pp.135-151, Jul. 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(86\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(86)90033-0)
- [3] Wierzbicki, Tomasz, et al. "Alexander revisited-a two folding elements model of progressive crushing of tubes." *International Journal of Solids and Structures*, Vol.29, No.24, pp.3269-3288, Apr. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(92\)90040-Z](https://doi.org/10.1016/0020-7683(92)90040-Z)
- [4] Hao, Wenqian, et al. "Analytical model of thin-walled corrugated tubes with sinusoidal patterns under axial impacting." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.128, pp.1-16, Mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iimecs.2017.03.033>
- [5] Hao, Wenqian, Jiamiao Xie, and Fenghui Wang. "Theoretical prediction of the progressive buckling and energy absorption of the sinusoidal corrugated tube subjected to axial crushing." *Computers & Structures*, Vol.191, pp.12-21, May. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.001>
- [6] Alkhatib, Sami E., et al. "Deformation modes and crashworthiness energy absorption of sinusoidally corrugated tubes manufactured by direct metal laser sintering." *Engineering Structures*, Vol.201, 109838, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109838>
- [7] San Ha, Ngoc, and Guoxing Lu. "Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics." *Thin-Walled Structures*, Vol.157, 106995, Jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106995>
- [8] Wu, Shengyin, et al. "Crashworthiness analysis and optimization of sinusoidal corrugation tube." *Thin-Walled Structures*, Vol.105, pp.121-134, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.03.029>
- [9] Deng, Xiaolin, Wangyu Liu, and Lin Jin. "On the crashworthiness analysis and design of a lateral

corrugated tube with a sinusoidal cross-section." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.141, pp.330-340, Mar. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iimecsci.2018.03.001>

- [10] Ma, Wen, Zhixiang Li, and Suchao Xie. "Crashworthiness analysis of thin-walled bio-inspired multi-cell corrugated tubes under quasi-static axial loading." *Engineering Structures*, Vol.204, 110069, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110069>
- [11] Gray Wang, G., Dong, Z., and Aitchison, P., "Adaptive Response Surface Method - A Global Optimization Scheme for Approximation based Design Problems," *Engineering Optimization* Vol.33, No.6, pp.707-733, Aug. 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03052150108940940>
- [12] Zhang, Xiong, and Hoon Huh. "Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression." *Thin-Walled Structures*, Vol.47, No.12, pp.1469-1477, Jul. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.07.003>
- [13] Pajot, Joseph. "Optimal design exploration using global response surface method: rail crush." Altair Engineering, 2013.

안 승 호(Seung Ho Ahn) [정회원]



- 2009년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학학사)
- 2016년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2016년 8월 ~ 2020년 6월 : (주)한화/방산 선임연구원
- 2020년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전

정 현 승(Hyun Seung Jung) [정회원]

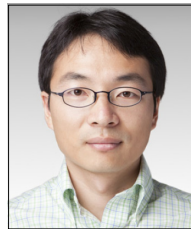


- 2003년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 KRRI스쿨 교통시스템공학과 전공책임교수

<관심분야>

철도차량 충돌안전, 최적설계

김 진 성(Jin Sung Kim) [정회원]



- 2002년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학학사)
- 2004년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 충돌안전

손 승 완(Seung Wan Son) [정회원]



- 2008년 2월 : 전북대학교 기계설계공학 (공학학사)
- 2016년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 (공학박사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임기술원

<관심분야>

철도차량경량화, 철도차량 충돌안전