

파형관의 충돌안전도 해석 및 최적설계의 실험적 검증

안승호*, 정현승, 김진성, 황준혁
한국철도기술연구원 철도중대사고연구실

Crashworthiness analysis of corrugated tubes and experimental validation of its optimal design

Seung Ho Ahn*, Hyun Seung Jung, Jin Sung Kim, Jun Hyeok Hwang
Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 파형관은 초기 피크하중이 낮아 충돌에너지 흡수장치의 안정성이 높기 때문에 에너지 흡수장치 분야에서 널리 사용되고 있다. 파형관의 성능은 기하 형상에 의존성이 있기 때문에 최적설계 기법을 활용하여 파형관의 성능을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 충돌안전도 해석에 기반한 형상 최적설계를 수행하고 그 결과를 실험적으로 검증하였다. 파형관의 직경 및 두께, 파형의 진폭 및 파장을 설계 변수로써 고려하였다. 피크하중(PCF: Peak Crush Force)을 제약조건으로 하며 에너지 흡수(EA: Energy Absorption)를 최대화하는 최적설계 문제를 구성하였다. 금속 3D 프린팅 기법을 활용하여 316L 강재로 파형관을 제작하고, 정적 및 동적 압축 시험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 유사함을 보임으로써 개발된 최적 설계 기법의 신뢰성을 확인하였다. 또한, 정적 및 동적 압축 시험의 비교를 통해서, 충돌 속도에 따라 충돌 거동이 달라짐을 확인하였다.

Abstract Corrugated tubes are widely used in energy-absorbing devices because the initial peak load is low, and the stability of the device is high. Since the performance of corrugated tubes depends on the shape, the performance can be improved by applying an optimal design technique. In this study, shape design optimization based on crashworthiness analysis was performed, and the results were verified experimentally. The diameter and thickness of a corrugated tube and the amplitude and wavelength of the waveform were considered as design variables. An optimal design problem that maximizes energy absorption was constructed with peak crush force as a constraint. Using a metal 3D printing technique, a corrugated tube was manufactured from 316L steel, and static and dynamic compression tests were performed. The reliability of the developed optimal design technique was confirmed by showing that the simulation results and the experimental results were similar. In addition, through a comparison of static and dynamic compression tests, it was confirmed that the crash behavior varies depending on the impact speed.

Keywords : Crash Analysis, Crashworthiness, Corrugated Tube, Experimental Validation, Optimization

1. 서론

최근 자동차, 기차 등 교통수단의 경량화 및 속도 증가로 인해 충돌안전도에 대한 고려가 중요해 지고 있다.

박판관은 내충격성을 위한 에너지 흡수 장치로 널리 사용되고 있다. 가볍고 에너지 흡수 효율이 좋으며, 부품 수가 적고 제조가 쉽다는 장점이 있다. 박판관의 특성을 확인하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 특히, 박판 원형

본 논문은 한국철도기술연구원 “인체 상해지 기반 철도 충돌안전 핵심기술 개발(PK2303G2)”의 지원으로 수행되었습니다.

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

email: ansh0526@krii.re.kr

Received January 25, 2023

Accepted March 3, 2023

Revised February 24, 2023

Published March 31, 2023

관은 단위 질량당 에너지 흡수율이 우수하고 안정적으로 점진적 폴딩 모드를 생성하기 때문에 널리 사용되었다 [1]. 그러나 박판 원형관은 PCF가 높을 뿐만 아니라 반복되는 피크하중으로 인해 충돌에너지 흡수체로서의 안정성이 다소 떨어지는 문제가 있다. 박판관 구조물에 파형이 추가될 경우 에너지 흡수 성능을 향상시킬 수 있다는 사실이 밝혀져 파형관에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. Chen[2]은 파형의 형태에 따른 변형 모드를 체계적으로 분류하고 모드 분류 차트를 얻었다. 그들은 MCF(Mean Crush Force)과 CFE(Crush Force Efficiency)에 대한 파형의 형상 매개변수의 영향을 분석했다. Hao[3]는 사인파 파형관에 대한 축 방향 충격 문제의 변형 모드를 분석했다. 그들은 동적 점진적 좌굴 문제에 대한 해석적 솔루션을 도출했으며 MCF와 파형 형상이 관련되어 있음을 보였다.

최적화 기법을 적용하여 파형관의 성능을 최적화하려는 여러 연구가 있었다. Wu[4]는 사인파 파형관에 대한 최적설계를 수행했다. 다중 목적함수로서 SEA(Specific Energy Absorption)와 PCF를 설정하였고, 설계변수로는 박판관의 두께와 직경의 두 가지 형상변수를 설정하였다. Deng[5]은 사인파 단면을 가진 원주형 파형 튜브에 대해 최적화를 수행했다. 다중 목적함수로서 SEA와 PCF를 설정하였고, 설계변수로는 두 가지 형상 파라미터와 두께를 설정하였다. Ma[6]는 다중 셀 파형 튜브에 대해 최적화를 수행했다. 다중 목적함수로서 SEA와 PCF를 설정하였고, 설계변수로는 튜브 두께와 내측 리브의 두 가지 형상변수를 설정하였다. Ahn[7,8]은 파형관의 최적설계를 수행함에 있어 ASMO(Adaptive Surrogate Model based Optimization) 기법의 효율성을 보였다. 또한, EA를 최대화 하는 최적설계 문제를 해결하여 CFE가 최대화된 형상을 제시하였으나, 그 결과를 실험적으로 검증하지 않았다.

파형관의 실험적 검증을 위해서는 파형관의 제작이 필수적이다. 여러 연구자들은 파형관의 복잡한 형상으로 인하여 3D 프린팅 기법을 활용하여 이를 제작하였다. Alkhatib[9]는 AlSi10Mg 알루미늄 합금 분말을 사용하여 금속 3D 프린팅 기법을 이용하여 파형관을 제작하였다. Yang[10]은 타원체 덩플이 있는 새로운 유형의 에너지 흡수장치에 대한 연구를 수행하였다. 3D 프린팅 기법을 이용하여 황동 재질로 시제를 제작하고 준정적해석을 수행하여 시뮬레이션 결과를 검증하였다.

본 연구에서는 PCF를 제약조건으로 가지며 EA를 최대화하는 최적설계 문제를 구성한다. 형상 최적화된 파

형관을 3D 프린팅 기법을 활용하여 316L 강재로 제작하고 압축 시험을 수행한다. 시뮬레이션과 시험 결과를 비교 함으로써 최적설계 해에 대한 신뢰성을 검증한다.

2. 파형관의 정의 및 유한요소 모델

2.1 파형관 형상의 정의

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

$$y = \frac{D}{2} + A \sin\left(\frac{\pi z}{W}\right) \quad (0 \leq z \leq L) \quad (1)$$

Where, D denotes diameter of corrugated tube, A denotes amplitude of corrugation, W denotes wavelength of corrugation, L denotes length of corrugated tube

D , t , A , W 는 파형관의 형상을 변경시키기 위한 설계 변수이다. L 은 모든 예제에서 150 mm로 일정하다.

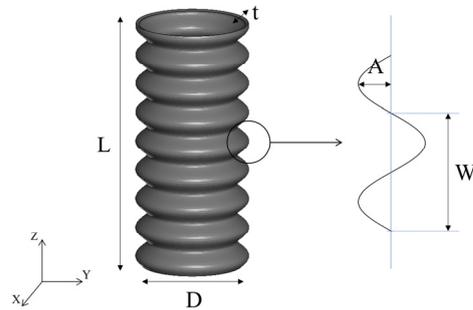


Fig. 1. The geometry of corrugated tube

2.2 유한요소 모델

Fig. 2는 파형관의 유한요소 모델이다. 파형관의 하단은 고정 경계조건으로 가정 하였으며 상단은 2 m/s로 이동하는 강체면에 의해서 충돌한다. 변형률 속도에 의한 영향력은 본 논문에서 고려하지 않았다. 정하중 시험에서 실제 충돌 속도는 10 mm/min에 불과하지만 2 m/s 이하의 속도에서는 시뮬레이션 결과가 거의 차이가 없기 때문에 해석의 효율성을 위하여 충돌 속도를 2 m/s로 설정하였다. LS-DYNA 상용 유한요소 해석 솔버를 활용하였다. 요소망을 구성하기 위하여 quadrilateral Belytschko-Tsay 쉘 요소를 사용하였다. 감쇠 적분을 적용하였으며 두께 방향으로 5개의 적분점을 적용하였다.

*AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 접촉 조건을 적용하였으며, 0.3의 마찰계수를 사용하였다. 강체면의 전진 거리는 75mm로 하여 충돌안전도 기준을 계산하였다. 유한요소 모델의 요소 크기는 0.75 mm이다.

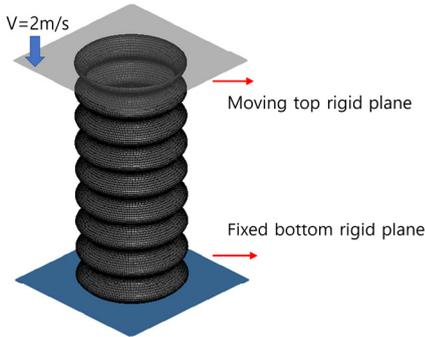


Fig. 2. Finite element model of a corrugated tube

2.3 재료 물성치

본 연구에서는 파형관의 복잡한 형상으로 인하여 제작이 쉽지 않기 때문에 3D 금속 프린팅 기법을 활용하여 시제를 제작하였다. 사용된 재료는 금속 3D 프린팅에 널리 활용되는 316L 강재이며 재료시험을 통하여 물성치를 획득하였다. 3D 프린팅 기법은 적층 방향에 따라 물성치가 달라지기 때문에 적층 방향을 달리하여 제작된 2개의 시편을 통하여 물성치를 획득하고 그 평균값을 물성치로 취하였다. 항복응력은 379 Mpa, 극한응력은 611 Mpa, 극한응력에서의 변형률 값은 0.29, 탄성계수는 187 Gpa이다. 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 3과 같다. 본 연구에서 재료의 동적 물성치는 고려하지 않았다.

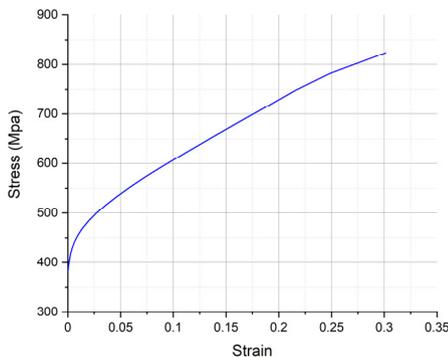


Fig. 3. True stress-strain curve of 316L steel

3. 파형관의 최적설계

본 연구에서의 최적설계 문제는 PCF를 제약조건으로 가지며 EA를 최대화하는 것이다. PCF를 제약조건으로 하여 EA를 최대화 할 경우 에너지 효율이 극대화된 파형관을 획득할 수 있다[8]. PCF를 40 kN 및 80kN으로 다르게 하여 두 개의 최적설계 문제를 구성하였다. 설계변수는 PCF 및 EA 값에 크게 영향을 주는 파형관의 두께 및 직경, 파형의 파장 및 진폭 총 4가지로 설정하였다. 본 최적설계 문제는 Eq. (2)-(7)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Maximize } EA, \tag{2}$$

$$\text{subject to } PCF \leq 40(kN) \text{ or } 80(kN), \tag{3}$$

$$1.5(mm) \leq t \leq 4.0(mm), \tag{4}$$

$$0.5(mm) \leq A \leq 5.5(mm), \tag{5}$$

$$10 \leq W \leq 30(mm), \tag{6}$$

$$40(mm) \leq D \leq 70(mm), \tag{7}$$

최적설계 알고리즘은 GRSM 방법을 사용하였다[11]. 최적설계 결과로 얻어진 설계변수는 Table 1과 같으며, 충돌안전도 기준 값은 Table 2와 같다. EA를 최대화 함에 따라 0.95 이상의 매우 높은 CFE 값이 얻어졌음을 알 수 있다. CFE는 MCF를 PCF로 나눈 값으로 정의되며, CFE가 클수록 하중-변위 곡선의 변동값이 적기 때문에 에너지 효율이 높은 것을 의미한다.

Table 1. Optimization results of design variables

PCF≤	t(mm)	A(mm)	W(mm)	D(mm)
40kN	2.0	3.6	18.4	63.2
80kN	3.0	3.4	21.8	53.5

Table 2. Optimization results of crashworthiness criteria

PCF≤	EA(kJ)	MCF(kN)	PCF(kN)	CFE
40kN	2.86	38.15	40.16	0.95
80kN	5.77	76.95	80.32	0.96

4. 최적설계의 실험적 검증

4.1 파형관의 제작 및 시험 방법

최적설계를 통하여 얻어진 결과의 신뢰성을 검증하기

위하여 파형관을 제작하고 압축시험을 수행하였다. 파형관은 기계 가공을 통하여 제작하기 쉽지 않기 때문에 3D 금속 프린팅 기법을 이용하여 316L 강재로 제작하였다. 316L 강재는 강성이 높고 연성이 크기 때문에 파단이 잘 일어나지 않아 충돌에너지 흡수장치로서 활용하기에 적합하다. Fig. 4는 3D 금속 프린팅을 통해서 제작된 파형관이다. 고정지지 경계조건과 일치시키기 위하여 파형관의 상하단에 플레이트를 부착하였다.



Fig. 4. Corrugated tubes manufactured using 3D printing

본 연구에서는 인장압축기를 이용한 정적시험과 낙하충격기를 이용한 동적시험을 동시에 수행하고 그 결과를 비교하였다. 정적시험기의 압축속도는 10 mm/min이며 동적시험기의 낙하속도는 5 m/s이다.

4.2 정적시험과 시뮬레이션 결과의 비교

최적설계 결과를 검증하기 위하여 제작된 시제를 정적 압축시험을 수행하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. Fig. 5는 실험과 시뮬레이션의 하중-변위 곡선의 비교이다. 실험과 시뮬레이션 곡선이 유사하며, 충돌안전도 기준 계산을 위한 전진거리로 설정한 75mm까지 PCF 제약조건으로 설정한 값과 유사하게 힘이 유지됨을 알 수 있다. Table 3는 실험과 시뮬레이션의 충돌안전도 기준 값의 비교를 보여준다. CFE 값은 거의 유사함을 알 수 있으며 EA, MCF, PCF 또한 7% 이내의 오차로 실험과 시뮬레이션의 재현성이 좋음을 알 수 있다. Fig. 6와 Fig. 7은 실험과 시뮬레이션의 변형 형상을 각각 비교한 것으로서 전반적인 변형 형상이 유사하며 대칭적인 형태의 폴딩이 유발됨을 알 수 있다.

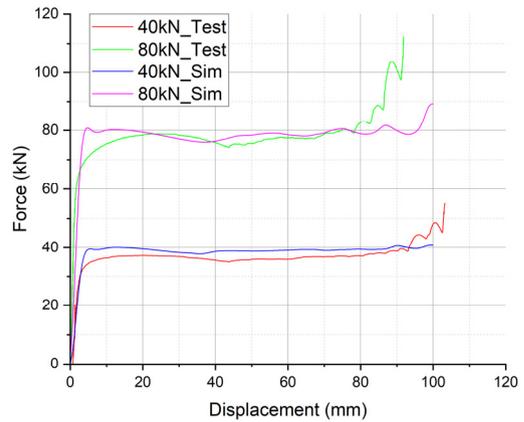


Fig. 5. Comparison of static test and simulation FD curves

Table 3. Comparison of crashworthiness criteria

	EA(kJ)	MCF(kN)	PCF(kN)	CFE
40kN_Test	2.66	35.5	37.3	0.95
80kN_Test	5.69	75.6	80.6	0.94
40kN_Sim	2.86	38.0	40.0	0.95
80kN_Sim	5.79	76.8	80.8	0.95

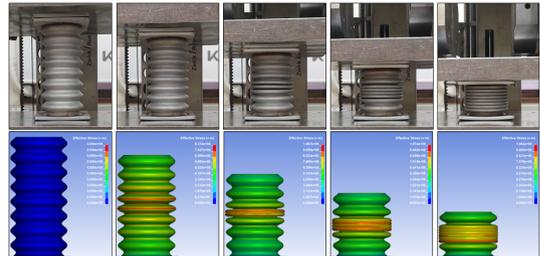


Fig. 6. Deformation shape with PCF ≤ 40kN constraint

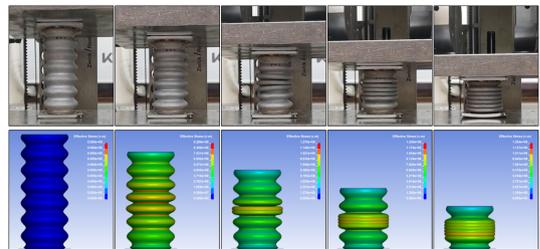


Fig. 7. Deformation shape with PCF ≤ 80kN constraint

4.3 정적실험 및 동적실험의 비교

정적실험을 수행한 시제와 동일한 시제를 이용하여 동적실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 80kN PCF 제약조건을 갖는 모델을 대상으로 하였다. Fig. 8는 낙하 시험기에 파형관이 장착된 모습이다. 600kg의 질량체가 5m/s로 낙하하는 경우를 가정하였다.

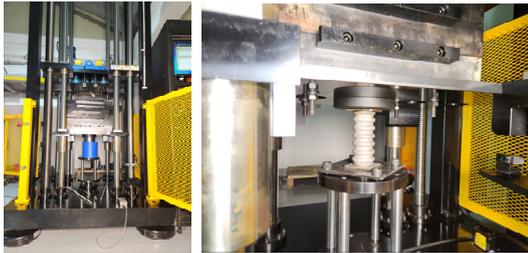


Fig. 8. Drop tester with corrugated tube

Fig. 9는 정적시험과 동적시험의 하중-변위 곡선의 비교이다. 동적시험을 수행한 경우 정적시험에 비하여 평균적인 힘이 20kN 가량 증가했음을 알 수 있다. 특히, 초반에 힘의 피크치가 다소 크게 관측되는데 이는 316L 강재의 동적 물성치의 특성에서 기인한다. 항복응력이 극한응력에 비하여 변형률 속도에 의한 증가폭이 더 크기 때문이다. Fig. 10은 정적시험과 동적시험의 변형 형상 비교이며 변형 형상은 개략적으로 유사함을 알 수 있다. 추후, 재료의 동적물성치 특성에 대한 추가 연구를 수행하여 동적 하중이 가해질 때 CFE가 감소한 형태의 하중-변위 곡선을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

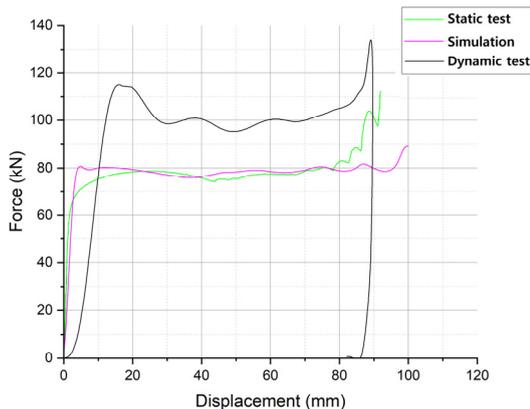


Fig. 9. Comparison of static and dynamic test FD curves

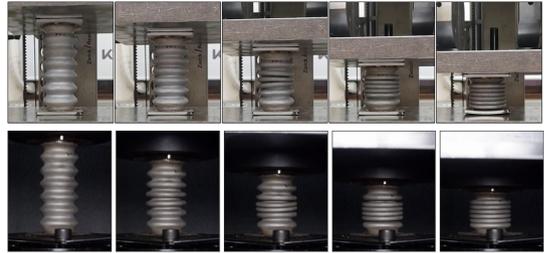


Fig. 10. Deformation shape of static and dynamic test

5. 결론

본 연구에서는 파형관의 충돌안전도 해석 및 형상 최적설계를 수행하고 그 결과를 실험적으로 검증하였다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) PCF를 제약 조건으로 갖고 EA를 최대화 하는 최적설계 문제를 해결하여 CFE가 최대화된 최적 형상을 획득 하였다. 설계 변수는 파형관의 직경 및 두께, 파형의 진폭 및 파장으로 하였다.
- (2) 금속 3D 프린팅 기법을 활용하여 316L 강재로 파형관을 제작하고 정적 및 동적 압축시험을 수행하였다.
- (3) 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 유사하게 도출됨을 보임으로써 개발된 최적 설계기법의 신뢰성을 확인하였다.
- (4) 정적 및 동적 압축 시험의 비교를 통해서, 충돌 속도에 따라 충돌 거동이 달라짐을 확인하였다.

References

- [1] Nia, Ali Alavi, and Jamal Haddad Hamedani. "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries." *Thin-Walled Structures*, Vol.48, No.12, pp.946-954, Aug. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003>
- [2] Chen, D. H., and S. Ozaki. "Numerical study of axially crushed cylindrical tubes with corrugated surface." *Thin-Walled Structures*, Vol.47, No.11 pp.1387-1396, Apr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.12.008>
- [3] 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.ijmecsci.2017.03.033>

- [4] 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>
- [5] 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.ijmecsci.2018.03.001>
- [6] 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>
- [7] S. H. Ahn, et al. "Crashworthiness analysis and shape design optimization of thin-walled corrugated tubes under axial impact." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.22, No.5, pp.128-135, May 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.5.128>
- [8] S. H. Ahn, et al. "Crashworthiness analysis and shape design optimization of corrugated tubes for railway application." *International Journal of Crashworthiness*, pp.1-12, May 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1080/13588265.2022.2083748>
- [9] 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>
- [10] Yang, Kai, et al. "Design of dimpled tubular structures for energy absorption." *Thin-Walled Structures*, Vol.112, pp.31-40, Jan. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.003>
- [11] 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 (공학박사)
- 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]



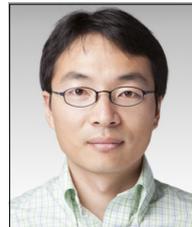
- 2003년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 KRRI스쿨 교통시스템공학과 전공책임교수

<관심분야>

철도차량 충돌안전, 최적설계

김 진 성(Jin Sung Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

철도차량 충돌안전

황 준 혁(Jun Hyeok Hwang)

[정회원]



- 2017년 2월 : 수원대학교 물리학과 (학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 KRRI 스쿨 로보틱스 및 가상공학 (석박사 통합과정 재학)

<관심분야>

철도차량 충돌안전, 유한 요소 해석