

## 초 임계 압력 보일러에 적용되는 압력조절밸브의 셰이크다운 탄성 한계 해석 및 규명

조락균<sup>a\*</sup>Elastic Shakedown Analysis of Pressure-Reducing Valve of  
Supercritical Boiler System Under Cyclic Thermomechanical LoadingsNak-Kyun Cho<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Manufacturing Systems and Design Engineering,  
Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech)

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 29 November 2020  
Revised 2 December 2020  
Accepted 8 December 2020

## Keywords:

Cyclic plasticity  
Elastic shakedown  
Pressure reducing valve  
The linear matching method

## ABSTRACT

This study presents the shakedown limit boundaries of a pressure-reducing valve (PRV) subjected to complex cyclic thermomechanical loadings using the linear matching method (LMM). The thermomechanical loadings are composed of three cyclic bending moments (in-plane, out-of-plane, and torsional), two cyclic internal pressures (high and low), and cyclic thermal loads (temperature gradients). The analysis results reveal that the PRV has a shakedown limit boundary that is identical to the plastic collapse limit. Comprehensive numerical parametric studies were also conducted to assess the effects of individual cyclic bending moments on the cyclic plastic behavior of the PRV, and the results showed that the in-plane cyclic bending moment significantly impacted the structural integrity of the PRV compared to other bending moments.

## 1. 서론

가압경수로원전(PWR)의 주 증기 시스템에 적용되는 압력조절밸브(PRV)는 보일러 시스템의 시동 운전(start-up) 및 섯다운(shutdown) 중에 시동 용기(start-up vessel)로 공급되는 초 임계 압력(supercritical pressure)상태의 증기 온도와 압력을 낮추어 시동 용기(start-up vessel)로 공급하는 역할을 하며, 보일러 시스템이 정격으로 운전 중일 때는 압력조절밸브는 닫힌 채로 작동하지 않게 된다.

압력조절밸브가 작동 중일 때 발생하는 열 하중, 내부 압력, 그리고 압력조절밸브와 연결된 파이프에 발생하는 시스템 모멘트는 압력조절밸브의 구조 건전성을 저하시킨다. 이러한 초 임계 압력 보일러 시스템의 압력조절밸브 및 주변 파이프에 발생한 균열 문제

는 다른 문헌들을 통해 보고되고 있다<sup>[1,2]</sup>.

고온에 노출되는 구조물의 건전성은 ASME NH, R5 procedure와 같은 설계 지침을 따라 평가하도록 되어있으나 평가 결과가 보수적이며, 일반적으로 시스템의 운전 중에 발생하는 하중 범위를 넘는 경우에 대하여 구조건전성에 대한 상세한 평가 지침을 제시하지 않는다. 이런 점들을 보완하고자 다양한 direct cyclic 해석 방법이 개발되었다. 이 연구에서는 현재까지 소개된 direct cyclic 해석 방법 중 정확도와 신뢰성이 높은 선형매칭기법(linear matching method)을 사용해 구조물의 반복소성거동을 평가하였다<sup>[3,4]</sup>.

본 연구에서는 보일러 시스템의 시동 운전 중 압력조절밸브에 작용하는 3가지 시스템 모멘트 하중(면내, 면외, 비틀림), 내부 압력, 그리고 열 하중 등을 반복하중으로 설정하여 유한요소해석 모델을 생성하였고, 유한요소해석 소프트웨어 ABAQUS에 UMAT으

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-7278

E-mail address: nkcho@seoultech.ac.kr (Nak-Kyun Cho).

로 개발한 선형매칭기법을 적용하여 반복소성해석(cyclic plastic analysis)을 수행하였다. 해석된 결과는 post-processing을 통해 셰이크다운 탄성 한계(elastic shakedown limit)를 계산하였으며, 소성 붕괴 한계(plastic collapse limit)와 비교 분석하였다. 또한 시스템 모멘트 하중이 압력조절밸브의 반복소성거동에 주는 영향을 평가하기 위하여 개별 시스템 모멘트에 대한 셰이크다운 탄성 한계를 도출하여 그 결과를 비교 분석하였다.

2장에서는 선형매칭기법과 생성한 유한요소모델에 대하여 간략히 소개할 것이다. 3장에서는 선형 해석 및 반복소성해석의 결과를 소개하고 구조전전성에 영향을 주는 인자들을 발굴하여 제시할 것이다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결론에 대하여 언급할 것이다.

## 2. 선형매칭기법 및 유한요소모델

### 2.1 선형매칭기법

선형매칭기법은 셰이크다운, 라체팅과 같은 구조물의 반복소성 거동을 해석하기 위해 개발된 direct cyclic해석 방법이다<sup>[5,6]</sup>. 영국 고온구조전전성 평가지침 R5 procedures에서도 선형매칭 기법을 통해 도출된 반복소성거동 해석 결과의 정확성을 인정하고 있다. 본 연구에서 사용된 선형매칭기법은 탄성-완전소성 (elastic-perfectly plastic) 모델을 사용하여 복잡한 반복하중조건에 노출된 구조물의 셰이크다운 탄성 한계 및 소성 붕괴 한계를 계산한다<sup>[7,8]</sup>. 현재까지 확장 개발된 선형매칭기법은 셰이크다운 탄성 한계, 소성 한계, 라체팅 한계 및 크리프-피로 상호작용을 고려한 반복소성거동을 해석 가능하다. 셰이크다운 탄성 한계를 계산하기 위한 수식은 이미 다른 문헌들을 통해 소개되었으므로 이 논문에서는 생략하기로 한다<sup>[9]</sup>.

### 2.2 유한요소모델

반복소성거동 해석에 사용된 압력조절밸브의 치수와 단면은 Table 1과 Fig. 1과 같다.

ABAQUS 6.14를 사용하여 3D 모델과 유한요소해석 모델을 생성하였으며, 선형매칭기법은 UMAT 서브루틴으로 생성하여 반복소성해석에 사용하였다. 압력조절밸브의 재질은 type 316 스테인레스강으로 만들어졌으며, 유한요소모델에 적용된 온도 의존적 재료의 물성은 Table 2와 같다. 탄성-완전소성 모델을 사용하여 압력조절밸브의 반복소성거동을 나타냈으며, 온도 의존적 재료 물성을 적용하여 반복소성해석 결과의 신뢰성을 높였다.

압력조절밸브의 유한요소모델은 C3D8R 육면체요소를 사용하여 생성하였으며, 격자민감도테스트를 수행하여 C3D20R 육면체 요소와 등가 응력값의 차이가 2% 이내임을 확인하였다. 해석에 적용된 열-기계 하중은 Fig. 2와 같다. 면내, 면외, 비틀림 모멘트

Table 1 Dimension of the pressure-reducing valve [mm]

	Inner radius	Outer radius	r/t ratio
Flange pipe	158.2	91.9	2.2
Branch pipe	96	60	1.9
Warming pipe	40	25	2.2
Main pipe	100	74	3.4

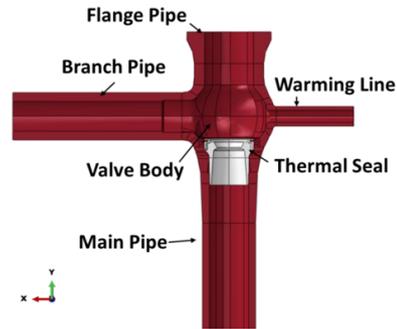
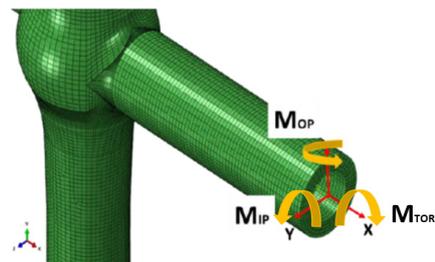


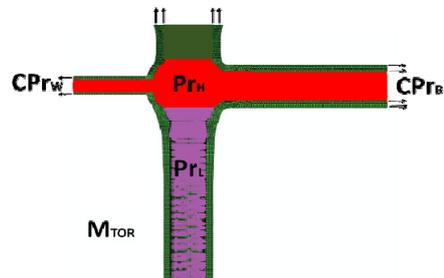
Fig. 1 Cross sectional model of the pressure-reducing valve<sup>[10]</sup>

Table 2 Temperature dependent mechanical properties of Type 316 stainless steel<sup>[11]</sup>

Temp. [°C]	E [MPa]	$\nu$	$\sigma_y$ [MPa]
20	198298	0.29	179.48
300	177270	0.29	106.36
400	169760	0.29	97.52
500	162250	0.29	92.51
550	158495	0.29	90.42



(a) Applied bending moments



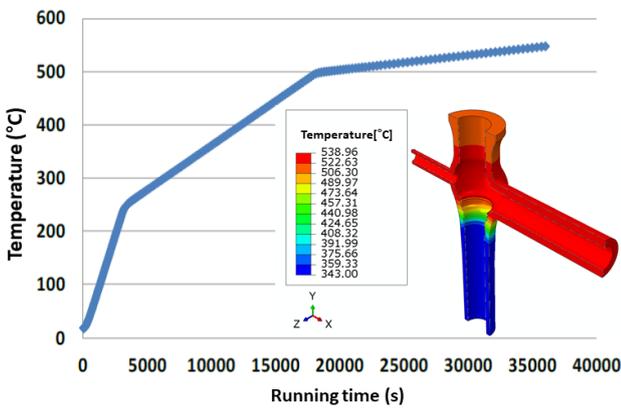
(b) Applied internal pressures and axial pressures

Fig. 2 Mechanical loadings applied to the pressure-reducing valve<sup>[10]</sup>

가 branch pipe 전단에 작용하고, 고압 및 저압으로 구분된 증기압이 밸브 내부에 작용한다. 파이프 끝 단이 모두 막힌 조건으로 가정

**Table 3 Mechanical loadings applied to the pressure-reducing valve**

Loading	Pressure [MPa]	Loading	Moments [Nmm]
Pr <sub>H</sub>	19.10	Pr <sub>H</sub>	$8.06 \times 10^7$
Pr <sub>L</sub>	5.31	Pr <sub>L</sub>	$8.06 \times 10^7$
CPr <sub>F</sub>	3.31	CPr <sub>F</sub>	$8.52 \times 10^7$
CPr <sub>B</sub>	12.24		
CPr <sub>W</sub>	12.24		



**Fig. 3 Temperature gradient of the pressure-reducing valve for start-up period 36000 seconds**

하여(end-cap condition) 내부압력으로 인하여 파이프 끝 단면에 축 하중을 적용하였다.

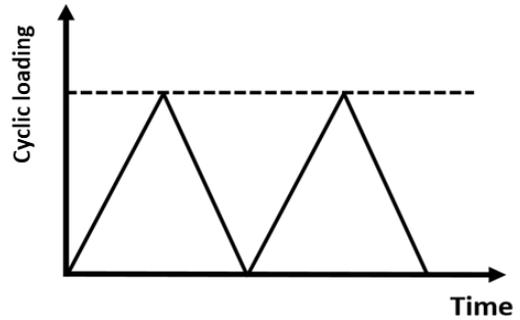
굽힘, 비틀림 모멘트와 축 하중은 아래 식 (1), (2), (3)을 사용하여 최대허용하중을 계산하였으며, 고압 및 저압의 증기 압력 값은 실제 가압경수로 원자로 보일러 시스템에서 측정된 압력 값을 사용하였다. 유한요소모델에 적용된 하중 값은 Table 3과 같다.

$$M_o = \frac{4}{3} \sigma_y (R_o^3 - R_i^3) \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2)$$

$$T = \tau_{max} \cdot \frac{J}{r_{mean}} \quad (3)$$

밸브에 작용하는 열 하중은 보일러 시스템 시동 운전열을 열전달 해석으로 구현하였으며 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다. 시작 온도는 섭씨 20도였으며, 시동 운전 10시간 이후 최고 온도는 branch 파이프에 발생하며 섭씨 540도이다. 크리프 변형이 발생 가능한 고온에서 압력조절밸브가 작동되는 환경이나, 시동 운전시간이 10시간으로 보일러 운전시간 대비 상대적으로 매우 작다. 따라서 크리프 변형이 밸브의 구조 건전성에 미치는 영향은 본 논문에서는 다루지 않는다. 이 장에서 기술하는 열, 시스템 모멘트, 압력



**Fig. 4 Cyclic loading waveform<sup>[10]</sup>**

하중은 Fig. 4에 표현된 반복하중조건으로 유한요소모델에 적용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 선형해석결과

2장에서 정의한 하중 조건을 적용하여 압력조절밸브의 선형 거동을 해석하였으며, 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 압력 하중과 열 하중이 작용하는 경우 최대등가응력은 밸브 내부의 가랑이(crotch corner)부위에 발생하며, 압력 하중이 열 하중보다 응력 발생에 많은 영향을 준다. 모멘트 하중만 작용하는 경우에는 branch pipe의 용접부의 상부 및 하부에 최대등가응력이 발생한다. 모든 하중이 작용하는 경우에는 branch pipe의 용접부의 하부에서만 최대등가응력이 발생한다.

유럽내 원자력 발전소 보일러시스템에서 보고된 압력조절밸브의 균열이 발생한 위치는 선형해석결과와 동일하게 branch 파이프 용접부의 하부에서 발생하였다. Fig. 5(d)에서 보여준 최대등가응력은 457.5 MPa이며 최대 온도 섭씨 550도의 항복 응력 값 90.4 MPa와 최소 온도 섭씨 20도의 항복 응력 값 179.5 MPa의 합의 범위를 넘으므로 상세한 반복소성거동 평가가 요구된다.

#### 3.2 셰이크다운 탄성 한계 해석결과

압력조절밸브의 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계를 계산하기 위하여 선형매칭기법을 사용해 반복소성해석을 수행하였다. Fig. 6은 압력조절밸브에 모든 하중이 작용했을 때 선형매칭기법으로 계산한 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계이다. X축과 Y축은 Table 3에 계산된 하중 값으로 정규화된 값이다. 결과로부터 주목할 점은 압력조절밸브의 셰이크다운 탄성 한계는 일반적인 브리선도(bree-diagram)<sup>[12]</sup>와 달리 소성 붕괴 한계와 일치한다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 발생된 응력에서 1차응력(primary stress) 지배적이기 때문이며 다른 참고문헌을 통해 확인이 가능하다. Fig. 6에서 정규화된 압력과 열 하중이 1.0을 넘는

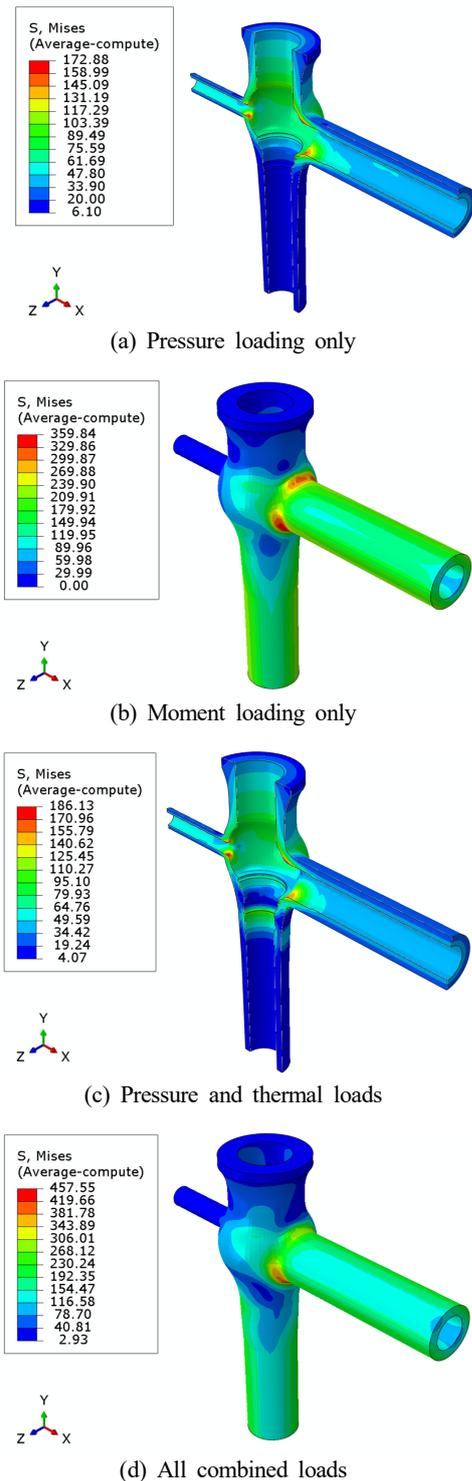


Fig. 5 Equivalent stress [MPa] contours from linear analysis<sup>[10]</sup>

이유는 유한요소모델에 적용된 압력 하중이 항복 응력 값을 대입하여 계산된 극한 압력을 적용하지 않고 실제 운전조건 중에 측정되는 내부압력을 적용하였기 때문이다.

생성된 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계 범위를 검증하기 위하여 Fig. 6에 표시된 A점과 B점 하중 조합에 대하여 단계

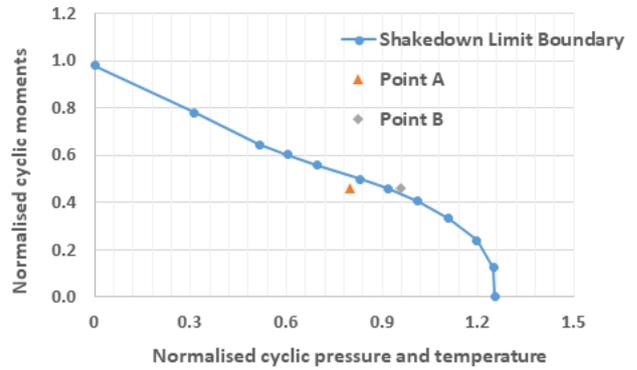


Fig. 6 Plastic collapse limit and elastic shakedown limit boundaries of the pressure-reducing valve<sup>[10]</sup>

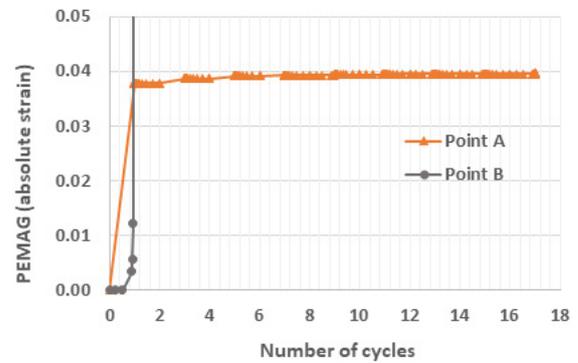


Fig. 7 Plastic strain increment of two cyclic loading points A and B shown in Fig. 6

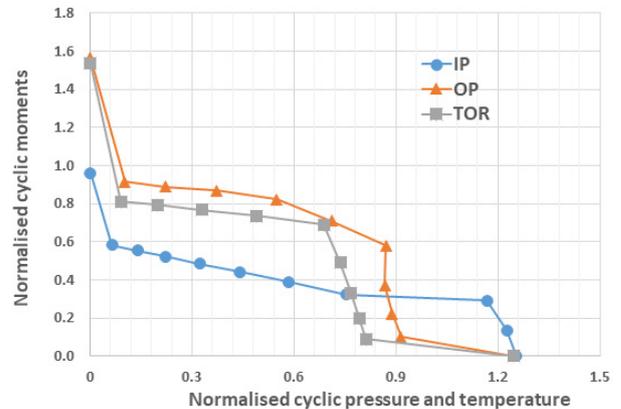


Fig. 8 Elastic shakedown limit boundaries of the pressure-reducing valve against individual moment load (IP: In-Plane, OP: Out-of-Plane, TOR: Torsional)

해석(step-by-step analysis)을 수행하였다. 해석결과는 Fig. 7과 같으며, 하중 사이클이 지속되는 과정에서 하중 조합 A는 추가적인 소성변형이 발생하지 않는 탄성셰이크다운 거동을 보여주며, 하중 조합 B는 첫 번째 하중 사이클에서 소성 파괴가 일어나는 것이 확인된다. 따라서 선형매칭기법을 통해 계산된 반복소성거동의 유효성과 신뢰성이 검증되었다.

모멘트 하중이 압력조절밸브의 반복소성거동에 주는 영향을 확인하기 위하여 면내, 면외, 비틀림 모멘트 각각에 대한 셰이크다운 탄성 한계를 계산하였으며, 해석결과는 Fig. 8과 같다.

면외 모멘트 하중과 비틀림 모멘트 하중은 유사한 형태의 셰이크다운 탄성 한계를 나타낸다. 비틀림 모멘트 하중이 적용된 탄성 한계의 크기가 면외 모멘트가 적용된 셰이크다운 탄성 한계보다 작으므로, 비틀림 모멘트 하중이 압력조절밸브의 구조건전성에 조금 더 부정적인 영향을 준다.

면내 모멘트 하중이 적용된 셰이크다운 탄성 한계의 경우 다른 두 모멘트 하중이 생성한 생성된 셰이크다운 탄성 한계보다 크기가 월등히 작으므로 압력조절밸브의 구조건전성에 가장 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 그러나 정규화된 반복 모멘트 하중 값이 30% 이하인 경우에는 비틀림 모멘트 하중이 구조건전성에 가장 큰 영향을 준다.

Fig. 6에 보여준 모든 시스템 모멘트가 적용된 셰이크다운 탄성 한계는 면내 모멘트 하중만 작용하는 셰이크다운 탄성 한계와 형태는 유사하나 탄성 한계의 크기는 더 크다. 그 이유는 면외 모멘트 및 비틀림 모멘트 하중이 면내 모멘트 하중이 생성하는 셰이크다운 탄성 한계의 크기를 키워주기 때문이다.

#### 4. 결론

가압경수로원자로 보일러시스템에 적용되는 압력조절밸브가 주기적인 열-기계 하중을 받을 때 발생하는 반복소성거동을 선형매칭기법을 사용해 규명하였다. 해석결과로부터 주목할 점은 밸브에 작용하는 열-기계 하중조건하에서는 발생하는 등가 응력의 성분은 1차응력이 지배적인 것으로 확인된다. 따라서 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계가 동일함을 확인하였다.

개별 모멘트 하중만 적용하여 반복소성거동을 평가한 결과 면내 모멘트 하중이 압력조절밸브의 구조 건전성에 가장 큰 영향을 주는 것을 확인 하였다. 압력이나 열 하중의 영향을 고려하지 않고 면외, 비틀림 모멘트 하중만 적용되는 경우 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계는 면내 하중만 작용하는 경우 대비 약 60% 정도 큰 것으로 확인된다. 그러나 정규화된 시스템 모멘트 하중이 30% 이하인 경우에는 면내 모멘트 하중만 작용하는 경우가 가장 큰 탄성 한계와 소성 붕괴 한계를 보여준다.

이 연구를 통해 생성된 셰이크다운 탄성 한계와 소성 붕괴 한계는 현장에서 압력조절밸브의 허용 가능한 운전 하중을 결정하는데 도움을 줄 수 있다. 또한 선형매칭기법을 활용해 복잡한 반복하중 조건에 노출된 고온 구조물의 반복 소성 거동을 정확하게 평가할 수 있음을 보여준다.

#### Acknowledgement

이 연구는 ASME 2020 International Conference on Nuclear Engineering에 발표된 연구내용<sup>[10]</sup>을 바탕으로 추가적인 파라메트릭 스터디를 수행하여 작성되었습니다. 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] Khan, H., Zhang, N., Xu, W., Zhu, Z., Jiang, D., 2019, Effect of Maximum Stress Intensity Factor, Loading Mode, and Temperature on Corrosion Fatigue Cracking Behavior of Inconel 617 in Supercritical Water, *International Journal of Fatigue*, 118 22-34, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.08.035>.
- [2] Saito, N., Komai, N., Hashimoto, K., 2018, Evaluation of Stress Relaxation Cracking Susceptibility in Alloy 617 for Advanced USC Boilers, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 168 183-190, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.10.013>.
- [3] Mackenzie, D., Boyle, J., Hamilton, R., 2000, The Elastic Compensation Method for Limit and Shakedown Analysis: a Review, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 35:3 171-188, <https://doi.org/10.1243/0309324001514332>.
- [4] Seshadri, R., Fernando, C., 1992, Limit Loads of Mechanical Components and Structures Using the GLOSS R-Node Method, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 114:2 201-208, <https://doi.org/10.1115/1.2929030>.
- [5] Chen, H., Ponter, A., Ainsworth, R., 2006, The Linear Matching Method Applied to the High Temperature Life Integrity of Structures, Part 1. Assessments Involving Constant Residual Stress Fields, *International Journal of Pressure Vessels*, 83:2 123-135, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.11.005>.
- [6] Chen, H., Ponter, A., 2006, Linear Matching Method on the Evaluation of Plastic and Creep Behaviours for Bodies Subjected to Cyclic Thermal and Mechanical Loading, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 68:1 13-32, <https://doi.org/10.1002/nme.1693>.
- [7] Ma, Z., Chen, H., Liu, Y., Xuan, F., 2020, A Direct Approach to the Evaluation of Structural Shakedown Limit Considering Limited Kinematic Hardening and Non-Isothermal Effect,

- European Journal of Mechanics A/Solids, 79 103877, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103877>.
- [8] Zhu, X., Chen, H., Luan, W., 2021, On the Study of Cyclic Plasticity Behaviour of Primary Electrode Particle for Lithium-Ion Battery, European Journal of Mechanics – A/Solids, 86 104175, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104175>.
- [9] Cho, N.-K., Chen, H., 2018, Shakedown, Ratchet, and Limit Analyses of 90° Back-to-Back Pipe Bends Under Cyclic In-Plane Opening Bending and Steady Internal Pressure, European Journal of Mechanics – A/Solids, 67 231-242, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.10.002>.
- [10] Cho, N.-K., Bansal, P., Hurst, A. M., 2020, Investigating Structural Response of Pressure Reducing Valve of Supercritical Steam Generator System Under Cyclic Moments, Thermal Transient, and Pressure Loadings, International Conference on Nuclear Engineering, 4, <https://doi.org/10.1115/ICONE2020-16426>.
- [11] Spindler, M., 2019, AGR Materials Data Handbook R66, Rev. 011.
- [12] Bree, J., 1989, Plastic Deformation of a Closed Tube due to Interaction of Pressure Stresses and Cyclic Thermal Stresses, International Journal of Mechanical Sciences, 31:11 865-892, [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(89\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0020-7403(89)90030-1).



**Nak-Kyun Cho**

Assistant Professor in the Department of Manufacturing Systems and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is non-linear structural response assessment.  
E-mail: [nkcho@seoultech.ac.kr](mailto:nkcho@seoultech.ac.kr)