

# 플랜트 기자재 수충격 진동재현을 위한 진동측정에 관한 연구

오정수\*, 조승현

한국기계전기전자시험연구원 기계금속센터

## A Study of Measuring Vibration for Reproducing Waterhammer of Plant Equipment

Jung-Soo OH\*, Sueng-Hyun Cho

Division of Machinery Testing Center, Korea Testing Certification

**요약** 본 연구에서는 플랜트 기자재 중 수충격에 취약한 밸브를 대상으로 수충격에 의한 진단결과를 나타내었다. 수충격에 의한 진동 상태를 살펴보기 위하여 진단환경 등을 고려하여 진동측정 센서로 가속도계를 선정했다. 플랜트 기자재의 작동환경을 진단하기 위해 실제 플랜트 송배수 라인의 밸브를 대상으로 수충격 발생 시 발생한 진동데이터를 취득했으며 현장데이터 분석결과 최대 진동변위 P-P 값은 21.40 mm로 나타나 수충격에 인한 밸브 자체 및 파이프 연결구조 및 지지대 안정성에 적지 않은 영향을 미칠 것이라 파악되었다. 또한 현장데이터를 중 일부 데이터를 HIL 시뮬레이터의 작동 데이터로 적용·비교함으로써 수 mm 레벨의 현장데이터의 진동재현성을 확인할 수 있었다. 한편, 이번 진단사례를 통해 향후 높은 수준의 진동측정을 위해서는 충격 측정범위가 높은 센서의 도입이 필요할 것으로 사료되며 보다 정확한 진동재현을 위해 플랜트 기자재의 구속조건 등을 분석하여 다축 피로·내구 안정성 시험과 가속 수명예측 등에 활용할 예정이다.

**Abstract** In this study, among the various types of plant equipment, valves, which are susceptible to water hammer, were selected as the diagnosis target. In order to effectively measure the vibration, an accelerometer was adapted for use in this difficult environment. The results showed that the maximum peak-to-peak vibration displacement caused by the action of water hammer on the valve was 21.40 mm, which would affect the structural stability of the valve and pipe. Meanwhile, the measured data was applied to the HIL simulator to verify the reproduction of the vibration. In the future, field data will be applied to the HIL simulator for the purpose of assessing the fatigue, durability and expected residual life of the plant equipment

**Keywords** : HILS Vibration Reproducing, Plant Equipment, Safety Diagnosis, Valve, Waterhammer

### 1. 서론

기존의 플랜트 기자재의 안전 진단의 경우, 현장에서 수집한 데이터를 분석하고 단순 DB화하여 유지·보수 시에 기초데이터로 활용하는 정도로 진행되어 주기적인 교체로 설비 및 기자재의 안전성을 유지하고 있는 실정이다. 이에 따라 기자재의 가용도가 떨어지고 교체 비용

이 발생하여 플랜트 설비의 유지보수에 있어 효율이 떨어진다.

최근, HILS(hardware-in-the-loop simulation)기법의 도입은 시험대상의 실제 작동환경을 동적 모사함으로써 시험대상의 실제 안전성 및 잔존수명예측 등 신뢰성 향상을 위해 도입된 기법으로 기존의 자동차 및 항공우주 산업을 넘어 제조 산업 전 분야로 확대되고 있는 추세이

본 논문은 2016 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 (no. 16CTAP-C117188-01) 및 2016 플랜트연구사업 (no. 17IFIP-B089065-04)의 지원으로 수행되었음

\*Corresponding Author : Jung-Soo Oh(Korera Testing Certification)

Tel: +82-31-470-1617 email: ojs82@ktc.re.kr

Received October 19, 2017

Revised (1st October 30, 2017, 2nd November 2, 2017)

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

다. [1]

그러나, 국내·외적으로 배관 및 밸브, 관이음쇠 등의 플랜트 기자재 제조 분야에서는 HILS 기법을 도입한 안전성 평가가 아직 보고된 사례가 없다.

이에 본 연구는 플랜트 기자재의 정확한 잔존수명 예측을 위해 실제 플랜트 기자재의 작동환경을 진단하고 측정결과를 도출하여 향후 HIL 시뮬레이션의 작동 데이터로 활용할 목적으로 진단사례와 진단 결과를 소개한다.

## 2. 진단환경 및 진단대상 선정

배관 내 이송유체의 갑작스러운 개폐나 펌프의 기동전·후로 배관 및 펌프, 밸브류의 파손의 주원인으로는 수충격(waterhammer)을 들 수 있다.

근래에는 에어챔버와 같은 수충격 완화장치 등을 설치함으로써 과도충격을 완화하고 있으나 설치공간 제약과 높은 설치비용으로 인하여 노후화된 플랜트 설비 환경에서는 적용이 용이하지 않기 때문에 많은 현장에서는 고장진단 후 기자재 부품을 교체·수리 하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 수충격 노출 가능성이 높은 배관 기자재 중 밸브를 선정하였다.

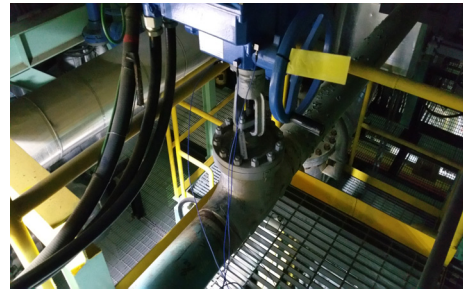
### 2.1 계측 시스템 선정

배관계통의 과도응답 및 파손원인 규명 연구사례들을 살펴보면 진동측정 시 가속도계(accelerometer)를 사용한 경우가 많다. [2-4]

대다수 비접촉식 변위센서의 경우, 분해능은 높으나 측정범위가 작고 별도의 설치 지그를 사용해야 하며 대다수의 배관 및 기자재의 표면은 산화방지용 코팅막이 두껍게 형성되어있어 측정 시 표면의 산화 방지막을 제거하고 표면 상태를 매끄럽게 처리해야 하는 번거로움이 있다.

또한 비접촉식 레이저 측정의 경우, 서브마이크론 수준의 고정밀도 측정은 가능하나 온·습도 및 풍향, 바다 진동에 매우 취약하여 노이즈를 수반하거나 측정값을 보정해야하는 단점이 있어 Fig. 1 과 같이 불완전한 환경에서는 사용하기에는 적합하지 않다.[5,6]

따라서 본 연구에서는 설치공간의 제약과 측정값의 신뢰도를 고려하여 가속도계를 선정하였고 측정된 가속도값을 두 번 적분함으로써 진동 변위 데이터를 유도하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. Examples of diagnosis environment  
(a) High temperature and high vibration  
(b) high humidity and low temperature

### 2.2 측정 시스템 셋업 및 검증

현장에서 초기 측정 시, 수충격의 정도를 가늠하기는 어려우나 우선 본 연구에서는 최대  $\pm 50$  g 이내로 가정하여 PCB사의 가속도계 333B30과 333B40 모델을 측정에 사용하였다. 또한 실시간·고속 데이터 샘플링과 데이터 트리거링(Triggering)을 위해 LabVIEW사의 DAQ, NI 9234 모델과 전용 S/W를 사용하였다.

Table. 1에 사용된 가속도계의 제원을 나타내었다. Fig. 2는 실제 액추에이터를  $\pm 3$ mm 사인파 상·하 구동 시 가속도계를 통한 측정·환산된 변위값이 실제 액추에이터의 위치센서와의 비교실험 셋업으로 가속도계를 이용한 측정이 잘 이뤄졌음을 Fig.3에 나타내었다.

Table 1. Specification of accelerometers

Specification	333B30	333B40
Sensitivity (mV/g)	100	500
Measurement Range (g)	$\pm 50$	$\pm 10$
Temperature Range (°C)	-18 ~ 66	
Frequency Range (Hz)	0.5 ~ 3,000	
Resonant Frequency (Hz)	> 3,000	
Non-Linearity (%)	< 1	
Sensing Element	Ceramic	
Note	g = m/s <sup>2</sup>	

한편, Fig. 2의 액추에이터는 MTS 사의 고분해능 위치센서 LVDT (분해능, 1  $\mu\text{m}$ )를 장착한 장비로 이송 분해능은  $\pm 0.01 \text{ mm}$  이다.

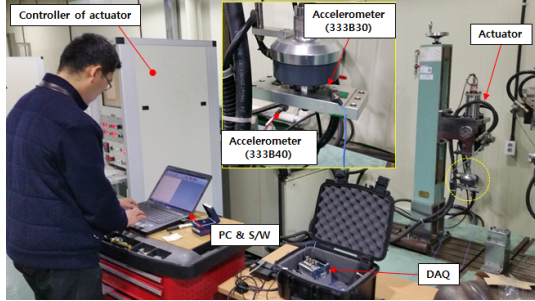


Fig. 2. Setup for verification of displacement from accelerometer

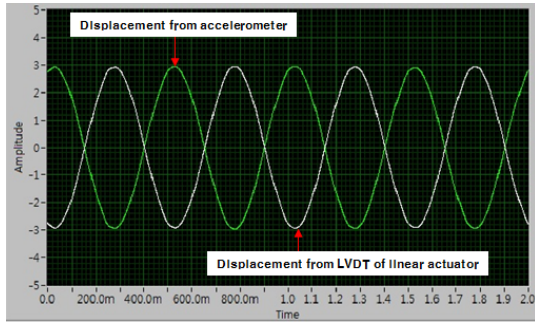


Fig. 3. Displacement comparison between accelerometer and LVDT

### 2.3 기초시험

실제 수충격의 영향으로 밸브 부품류의 수리가 잦은 송수배관계를 대상으로 수충격에 의한 진동영향을 진단하고자 Fig. 4와 같이 측정 셋업을 구성하였다.

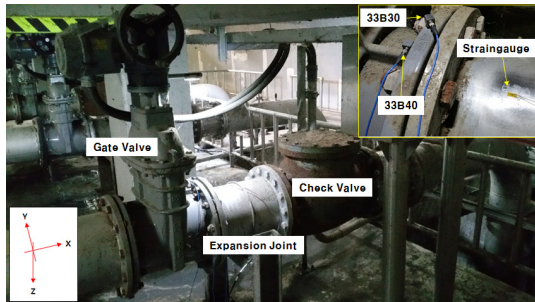
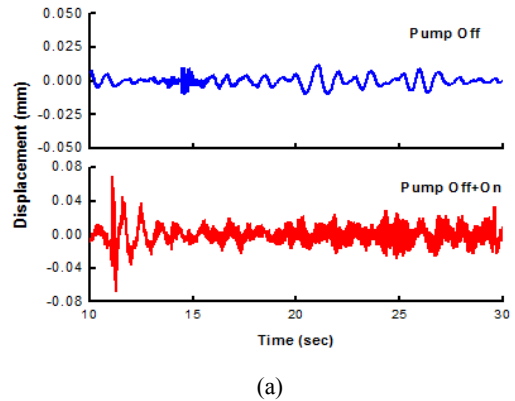


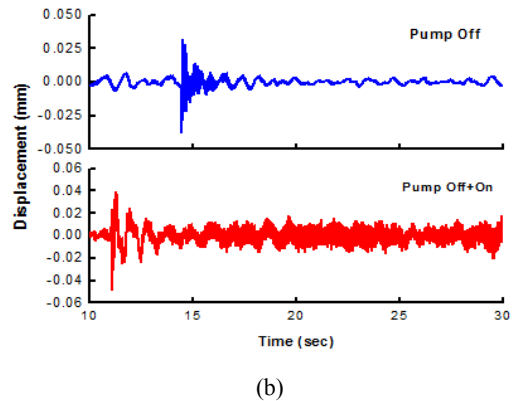
Fig. 4. Basic experiment for waterhammer diagnosis in the pipeline

진단대상은 환경시설 배수계통 12인치 게이트 밸브로 배관과 플랜지 체결구조로 연결되었다. 작동유체는 물이며 밸브 몸체의 재질은 GCD 450, 설계압력은 최대 30  $\text{kg/cm}^2$ , 설계온도는 최대 100  $^{\circ}\text{C}$ 로 수충격에 의한 주요 고장모드는 밸브 내부의 개폐 디스크(disk) 파손으로 알려져 있다.

X축 및 Z축 방향으로 가속도계를 부착하였고 밸브에 작용 하는 수충격에 의한 변형을 살펴보기 위해 밸브에 인접한 배관표면에 X축 방향으로 1축형 스트레인게이지 (HBM, LY4) 를 부착하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Results of waterhammer at valve  
(a) Results of x-axis (b) Results of z-axis

Fig. 5에 펌프의 기동 전·후의 진동을 측정결과를 나타내었다. 첫 번째 수충격은 측정 시작부터 펌프의 기동을 정지한 이후 14초만 발생되었다. Fig. 5 (a)와 (b)의 상단에 X축 및 Z축의 수충격의 결과를 나타내었다. 이때 변위 값 P-P(Peak to Peak)은 0.07 mm(Z축)를 보였

으나 X축의 영향은 미미한 수준을 보였다.

또한 Fig. 5 (a)와 (b)의 하단의 결과는 측정시간으로부터 정지상태의 펌프를 기동 후 12초에 발생한 두 번째 수충격 결과로 이때의 변위 값 P-P(Peak to Peak)은 0.15 mm(X축), 0.08 mm (Z축) 수준을 보였다.

한편, 수충격 전·후로 스트레인 게이지의 변형을 변화는 보이지 않았기에 밸브의 거동을 수충격에 의한 자유진동으로 해석하기도 무리가 없을 것으로 사료된다.

### 3. 수충격 측정 및 진단

Fig. 6은 화력발전 급수계통용 밸브의 수충격 진단 및 측정을 위한 셋업을 나타낸다. 진단 대상은 6인치 글로브 밸브로 배관과 용접으로 연결·지지되었으며 작동유체는 고온의 물, 재질은 A216-WCB, 설계압력은 최대 50 kg/cm<sup>2</sup>, 설계온도는 최대 250 °C 이다.

주요 고장모드는 수충격 시 밸브 몸체의 크랙이나 내부 개폐 디스크의 파손으로 알려져 있다.

측정 전 배관 및 밸브의 표면온도가 84 ~ 90 °C 수준으로 측정되어 본 연구에서는 열적 영향을 최소화 하고자 배관 표면에 열전도율이 비교적 낮은 아크릴 소재의 지그를 고온용 접착제를 이용하여 부착하였다.

또한 본래 측정 위치인 측정값의 증폭과 센서로의 온도영향을 최소화하기 위해 배관 표면 상단으로부터 약 30 mm 높여 설정하였다. 이때 센싱부의 측정 온도는 40 ~ 42 °C 수준으로 Table. 1의 센서의 작동온도 범위를 확인 할 수 있었다.

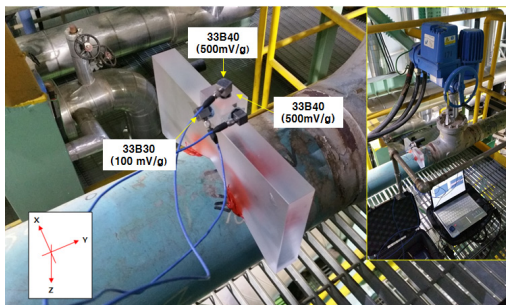


Fig. 6. Setup for waterhammer in the power plant pipeline

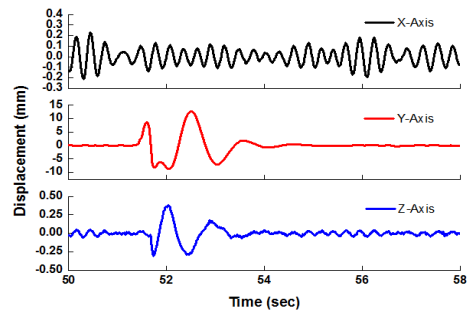
밸브의 수충격에 의한 영향을 측정하기 위해 지그 상단에 X, Y 및 Z 축 방향으로 가속도계를 설치하고 측정

시간 60초 중 수충격이 발생된 전·후 구간을 선별하여 Fig. 7에 나타내었다.

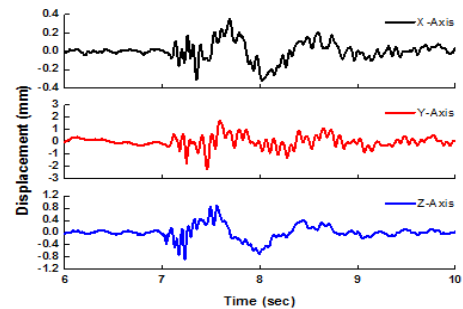
Fig. 7의 (a)는 펌프의 기동 정지 후 초기 측정 시점으로부터 약 51초 후에 발생한 1차 수충격에 의한 영향을 나타내며 Fig. 7의 (b)는 1차 수충격 이후 재 발생한 2차 수충격에 의한 결과로 재측정 시점으로부터 약 7초 후에 발생되었으며 수충격에 의한 진동 발생량을 Fig. 7의 (a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 7의 (a) 결과를 살펴보면 Y축 방향으로 충격이 2회에 걸쳐 나타났으며 이 때 변환된 변위의 P-P 값은 약 21.40 mm로 수충격에 매우 취약한 결과를 보였으며 Z축의 경우 변위의 P-P 값은 약 0.68 mm 수준으로 나타났다. 또한 Fig. 7의 (b)의 결과를 살펴보면 Y축 방향으로 변위의 P-P 값 3.9 mm를, Z축 방향으로 변위의 P-P 값은 약 1.7 mm 수준을 보였다.

한편, X축 및 Z축 방향으로의 측정결과가 수충격에 의한 영향이 작은 것은 Fig. 8와 같이 X축 방향으로 배관의 클램프 고정과 Z축 방향으로의 행거 지지구조로 인한 영향으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 7. Displacements after 1st waterhammer  
(a) Displacements after 1st waterhammer  
(b) Displacements after 2nd waterhammer



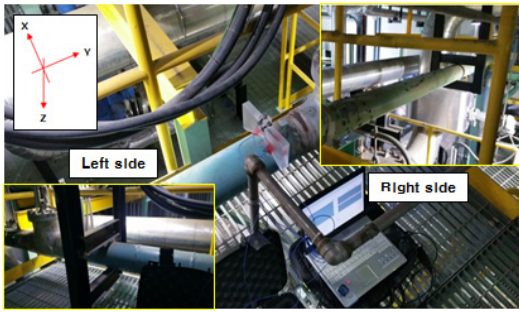


Fig. 8. Support structure of Valve and Pipe in the Fig.6

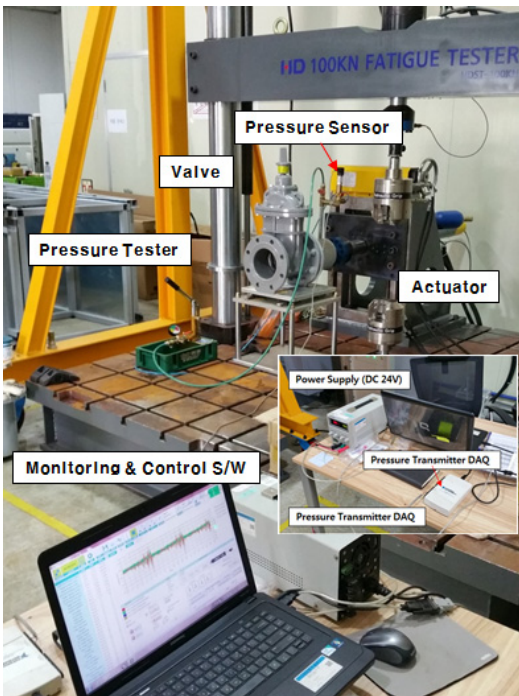


Fig. 9. HIL simulator for vibration reproducing

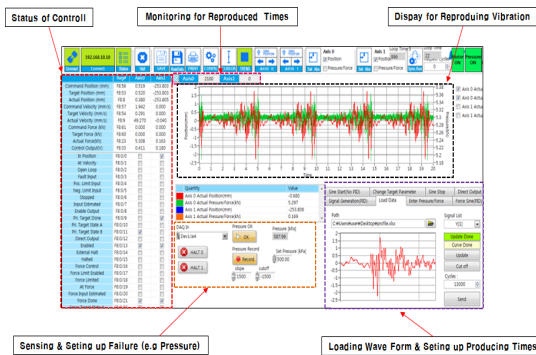


Fig. 10. Composition of software for HIL simulator

Fig.9와 Fig.10에 본 연구에서 구축 중인 진동재현 HIL 시뮬레이터와 시뮬레이터 구동 전용 소프트웨어의 구성을 나타내었다.

위 시뮬레이터는 다축 가진이 가능하여 X, Y 및 Z 축, 3축 동시 가진이 가능하고 변위 및 하중제한을 설정할 수 있다. 또한 시뮬레이터 전용 소프트웨어는 임의의 진동파형 입력뿐 아니라 진동 구동의 횡수 설정과 재현 상태 모니터링이 가능하도록 구성하였다.

또한 시뮬레이터 구동 시 시료에 작용하는 압력 및 하중의 변화 등을 장비 및 시료에 장착된 센서의 이상신호를 검출하여 시료의 이상·파손 등 고장 검출이 가능하다.

한편, 진동재현 검증을 위해 Fig. 7의 (b), Y축 데이터를 시뮬레이터에 적용하여 현장에서 취득한 데이터와의 추종성을 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 추종오차는 0.01 mm 수준으로 수 mm 레벨의 진동재현을 구현함에 무리가 없음을 확인하였다.

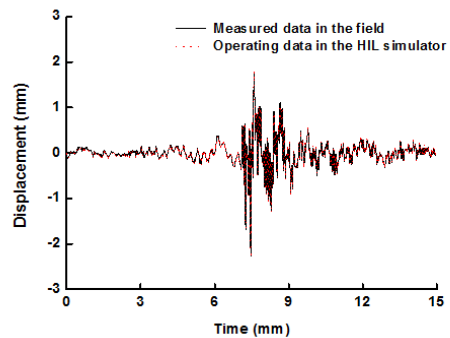


Fig. 11. Comparison between measured data and operating data

#### 4. 결론

본 연구에서는 수충격에 취약한 밸브의 수충격 진단 결과를 소개하였다. 설치가 용이하고 사용제한이 비교적 적은 가속도계를 사용하여 측정신호를 이용하여 변위 데이터를 취득함으로써 수충격에 의한 진동 영향을 진단할 수 있었다.

본 논문에서 다룬 수충격에 의한 최대 진동변위는 21.40 mm 수준으로 진단결과 플랜트 기자재 외 연결·지지 구조물의 구조안정성에 적지 않은 영향이 미칠 것으로 사료되며 보다 큰 수충격 측정을 위해서는 측정범위가 넓은 센서류 도입이 필요할 것이다.

향후, 본 연구는 플랜트 기자재의 구속조건 등을 진단·분석하여 취득한 수충격 데이터를 HIL 시뮬레이터의 작동 데이터로 활용하여 플랜트 기자재의 다축 피로·내구 안정성 시험과 가속 수명예측 등에 활용할 예정이다

## References

- [1] C. H. Park, W. S. Yoon, K. S. Chang, "A Study on the Development of Experiment Method for ACC Using Powertrain HILS", The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 7, no. 6, pp. 165-173, 1999.
- [2] Y. C. Bae, Y. S. Lee and Y. H. Kim, "Countermeasure on High Vibration of Branch Pipe with Pressure Pulsation Transmitted from Main Steam Header, Transactions", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering", vol. 15, no. 8, pp. 988-995, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2005.15.8.988>
- [3] Y. H. Kim, "Examination on High Vibration and Branch Vent Pipe's Failure of Complex Piping System Suppling Condensate-water in Power Site", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Annual Autumn Conference, pp. 380-384, 2010.
- [4] J. S. Suh, "A Study on the Measurement of the Pipeline Displacement Using Accelrometers", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 24, no. 6, pp. 476-482, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.6.476>
- [5] Y. S. Choi, K. M. Jeong, "Study on the Correction of Laser Range Fider Measurement Error", Korea Society for Precision Engineering, Annual Spring Conference, pp. 433-434, 2011.
- [6] Hewlett Packard Co., "Laser Measurement System User's Guide, Manual Part no. 00528-90010," 1984.

## 오 정 수(Jung-Soo Oh)

[정회원]



- 2012년 8월 : 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2009년 3월 ~ 2012년 5월 : 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

정밀측정, 초정밀기계시스템, 기계요소부품, 에너지

## 조 승 현(Sueng-Hyun Cho)

[정회원]



- 2014년 2월 : 국민대학교 자동차공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

기계재료, 자동차, 에너지, 친환경