

# CFD 기반 디지털 트윈 시뮬레이션 모델을 활용한 원심펌프 데이터 획득 연구

박희범\*<sup>1</sup>, 황정우\*<sup>2</sup>, 허장욱\*\*

## A Study on Data Acquisition for a Centrifugal Pump using a CFD-based Digital Twin Simulation Model

Hee-Beom Park\*<sup>1</sup>, Jung-Woo Hwang\*<sup>2</sup>, and Jang-Wook Hur\*\*

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과(IITP-2026-RS-2024-00438430, 기여율 40%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2026-RS-2020-II201612, 기여율 40%)과 2026년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(지역성장 혁신LAB, 기여율 20%)의 지원을 받아 수행된 결과입니다(2026-rise-15-105)

### 요 약

본 연구는 산업용 원심펌프를 대상으로 실측 운전 데이터를 획득하고, 동일 운전 조건을 적용한 CFD 기반 디지털 트윈 시뮬레이션 모델의 결과와 비교함으로써 모델의 신뢰성을 정량적으로 검증하였다. 실험에서는 가속도 센서를 설치하여 데이터를 수집하였으며, CFD 해석에서는 해석 결과로부터 가상 진동 데이터를 추출하였다. 실측 진동 데이터와 가상 진동 데이터를 대상으로 PSD 기반 코사인 유사도와 NRMSE 지표를 이용한 유사도 분석을 수행하였으며, 회전체의 대표 특징 주파수인 BPF 대역을 고려한 가중 유사도 평가를 추가 적용하였다. 그 결과 전체 주파수 대역에서 88.7%, BPF 가중 평가에서 93.1%의 유사도를 확인하였고, 진폭 영역에서는 NRMSE가 약 7% 수준으로 나타났다. 이는 센서 설치 제약이 존재하는 산업 환경에서도 CFD 기반 가상 센서 모델을 활용하여 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있음을 보여준다.

### Abstract

This study quantitatively verified the reliability of a CFD-based digital twin simulation model for an industrial centrifugal pump by comparing measured operational data with simulation results under identical operating conditions. Vibration data were collected using an accelerometer, and virtual vibration signals were extracted from the CFD analysis. Similarity between the measured and virtual data was evaluated using PSD-based cosine similarity in the frequency domain and NRMSE in the amplitude domain. In addition, a BPF-weighted similarity analysis was applied to emphasize characteristic rotational components. The results showed an overall similarity of 88.7%, which increased to 93.1% with BPF weighting, and an NRMSE of approximately 7%. These findings demonstrate that CFD-based virtual sensing can provide reliable data even in environments where sensor installation is constrained.

### Keywords

centrifugal pump, computational fluid dynamics, data analysis, data similarity evaluation, digital twin

\* 국립금오공과대학교 기계공학과

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0008-4800-324X>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0009-0001-9984-5331>

\*\* 국립금오공과대학교 기계시스템공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4718-3540>

· Received: Jan. 26, 2026, Revised: Feb. 24, 2026, Accepted: Feb. 27, 2026

· Corresponding Author: Jang-Wook Hur

Dept. of Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

61 Daehak-ro (yangho-dong), Gumi, Gyeongbuk, [39177] Korea

Tel.: +82-54-478-7399, Email: hhjw88@kumoh.ac.kr

## 1. 서 론

산업 현장에서 냉각수 공급, 공정 유체 순환, 배수 시스템 등 다양한 설비 운전에서 사용되는 원심펌프는 필수적인 핵심 장비로 널리 적용되고 있다. 그러나 원심펌프는 장시간 운전 과정에서 압력 변동, 베어링 및 기계적 쉘의 마모 등으로 인해 성능 저하와 진동 증가가 발생할 수 있다[1].

이러한 현상이 조기에 파악되지 않으면 예기치 않은 설비 중단과 유지보수 비용 증가로 이어질 수 있어, 펌프 상태를 실시간으로 감시하는 기술의 중요성이 강조되고 있다.

그러나, 산업 현장에서는 센서 설치 공간 부족, 배관 구조의 복잡성 등으로 인해 필요한 데이터를 충분히 확보하기 어렵고, 실측 데이터만으로는 초기 이상 징후를 포착하거나 내부 유동 변화를 분석하기 곤란한 상황이다[2]. 특히, 데이터 기반 유지보수 체계에서는 계측 데이터의 품질과 연속성이 진단·예지 성능 및 의사결정의 신뢰도에 직접적인 영향을 미치므로, 센서 결손이나 설치 제약으로 인한 데이터 공백을 보완할 수 있는 방법이 요구된다.

최근 이러한 제약을 극복하기 위한 대안으로, 디지털 트윈(Digital twin) 연구가 산업 설비 분야에서 활발히 진행되고 있다. 디지털 트윈은 물리 시스템의 형상, 운전 조건 및 상태 정보를 기반으로 가상 공간에서 설비를 구현하고, 가상 센서를 통해 실측 센서로부터 확보하기 어려운 데이터를 생성 및 획득함으로써, 상태 모니터링, 고장 진단 및 예지 분야에 활용이 시도되고 있다[3].

실측 데이터의 부족을 보완하고 운전 상태를 정량적으로 해석할 수 있다는 장점으로 인해 회전체 설비 분야에서도 적용 사례가 증가하고 있다[4]. 그러나 기존 연구는 현장 실측 데이터와 가상 데이터 간의 정량적 신뢰성 검증이 제한적이거나, 회전체 설비의 대표 성분을 반영한 평가가 충분히 수행되지 않아 데이터 신뢰성 확보가 미흡한 실정이다[5].

따라서, 본 연구에서는 원심펌프의 형상과 운전 조건을 기반으로, 실시간 양방향 동기화가 구현된 완전한 디지털 트윈 구조를 구축하기보다는, 동일 운전 조건을 적용한 CFD(Computational Fluid

Dynamics) 기반 가상 센서 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하는 데 초점을 두었다. 이를 위해 실측 데이터와 가상 데이터 간의 주파수 영역 유사도를 평가하기 위하여 PSD(Power Spectral Density) 기반 코사인 유사도(Cosine similarity) 기법을 적용하였으며, 시간 이력 진폭 특성 비교를 위해 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error) 지표를 활용하였다. 또한 회전체의 대표 특징 주파수인 BPF(Blade Passing Frequency) 대역을 고려한 가중 유사도 평가를 추가함으로써, 운전 특성을 반영한 성분 중심의 신뢰성 검증 가능성을 제시하였다.

## II. 대상 펌프와 실험 환경 구성

### 2.1 대상 펌프 및 실험 조건

원심펌프는 펌프실 외부에 설치된 냉각탑과 배관으로 직결되어 있어 냉각탑 상단에서 떨어지는 냉각수를 수조 하부에서 다시 흡입하여 공정 설비로 순환시키는 역할을 수행하며, 본 연구에서 대상 장비로 선정된 원심펌프는 WILCO사의 PSV-1080C이고, 형상을 그림 1과 같이 나타내었다.

원심펌프의 사양은 표 1에 나타낸 바와 같이 정격 회전수 1,750 rpm, 최대 양수량 1.6 m<sup>3</sup>/min, 전양정 17 m이며, 데이터 수집은 정격 운전 조건을 기준으로 수행하였다. 실험은 현장 운전 조건을 최대한 유지한 상태에서 실시하였으며, 펌프의 회전수는 인버터 설정을 통해 정격 회전수로 설정하였다.

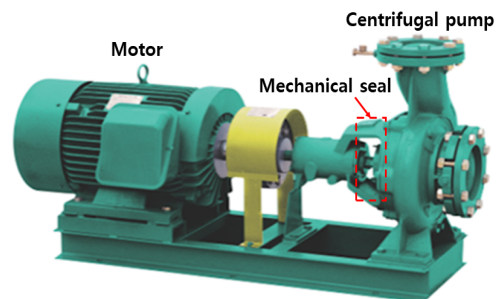


그림 1. 원심펌프 형상(모델 PSV-1080C)  
Fig. 1. Shape of centrifugal pump(model PSV-1080C)

표 1. 적용 파라미터  
Table 1. Applied parameters

Type	Values
Model number	SV4C1413U4/PSV-1080C
Rotation number	1750 rpm
Pumping amount	1.6 m <sup>3</sup> /min
Head	17 m

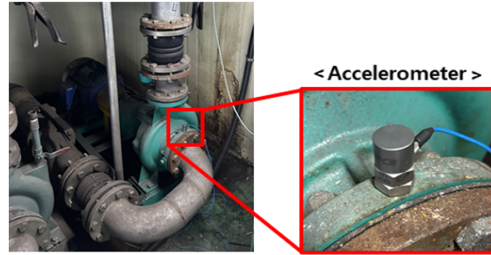


그림 3. 진동 센서 부착  
Fig. 3. Vibration sensor attachment

## 2.2 실험 환경 구성

산업 현장에서 원심펌프의 정비 이력을 살펴보면, 물 누수로 인한 기계적 씰 교체 작업이 반복적으로 수행된 것을 확인할 수 있다[6]. 이는 그림 2와 같이 기계적 씰의 부식과 균열 등으로 인해 밀봉 성능이 저하되고, 그 결과 누수가 발생한 것으로 볼 수 있다.



그림 2. 기계적 씰 부식과 균열  
Fig. 2. Mechanical seals corrosion and crack

기계적 씰 밀봉 성능 저하로 인해 발생하는 진동 데이터를 수집하기 위해 그림 3과 같이 실험 환경을 구성하였으며, 가속도 센서는 기계적 씰의 누설 및 밀봉 성능 저하와 연계된 진동 변화를 관찰하기 위해 기계적 씰이 위치한 케이싱 상부에 부착하였다[7]. 사용된 진동 센서의 주요 사양을 표 2에 나타내었으며, 원심펌프의 진동 데이터 획득을 위한 시스템 구성을 그림 4와 같이 표시하였다. 진동 데이터는 DAQ(Data Acquisition)를 통해 그림 5와 같이 2,000 Hz의 샘플링 주파수로 수집하였으며, 센서는 제조사 사양 기준 감도 오차(±5%) 및 DAQ로 인한 측정 불확실성이 존재하므로, 유사도 비교 시 센서 오차가 지표에 미치는 영향을 함께 검토하였다. 수집된 데이터는 시간 정보와 함께 CSV(Comma Separated Values) 형식으로 저장하여 가상 데이터와의 유사도 분석에 활용하였다.

표 2. 진동 센서 규격  
Table 2. Specifications of vibration sensor

Type	Values
Sensitivity	(±5%) 10.19 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Frequency range	1 to 4,000 Hz
Operating temperature	-54 to 121 °C
Overload limit	±98,100 m/s <sup>2</sup> pk
Excitation current	2 to 20 mA
Weight	27 g

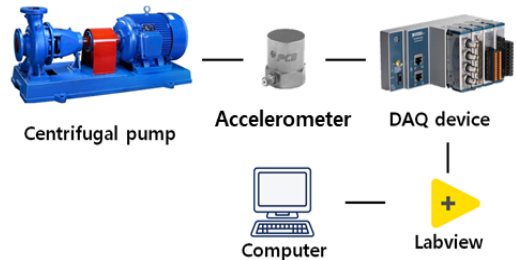


그림 4. 진동 데이터 획득 체계  
Fig. 4. Vibration data acquisition system

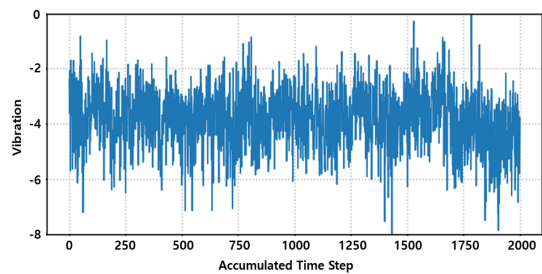


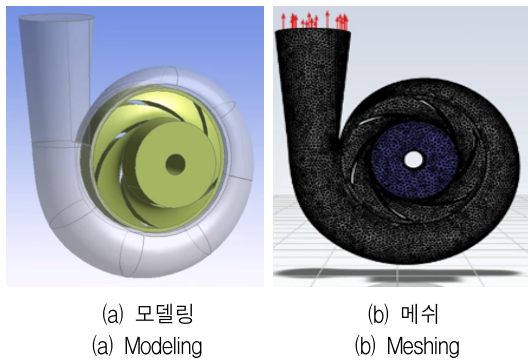
그림 5. 실측 진동 데이터 수집  
Fig. 5. Measured vibration data collection

## III. 디지털 트윈 시뮬레이션 모델 구축

### 3.1 모델링 및 해석 조건

디지털 트윈 구축을 위해 대상 원심펌프 (PSV-1080C)의 3차원 형상을 CATIA 도구로 그림 6(a)와 같이 모델링하였다. 임펠러 블레이드 수는 6개로 구성하였으며, 펌프의 도면과 사양을 참조하여 흡입관, 임펠러, 볼루트, 토출관 형상을 구현하였다.

생성된 모델은 ANSYS CFD 도구를 이용하여 그림 6(b)와 같이 메쉬를 구성하였으며, 비정형 사면체 격자로 420,000개의 노드와 1,430,000개의 요소로 되어 있다. 임펠러 주변과 볼루트 내벽처럼 속도와 압력 변화가 큰 영역은 상대적으로 조밀하게 메쉬가 분포되도록 설정하였고, 격자 간 BPF 피크 주파수 차이는 1% 이내, PSD 코사인 유사도 차이는 1~2% 이내로 나타나 격자 독립성을 확인하였다[8].



(a) 모델링 (a) Modeling (b) 메쉬 (b) Meshing

그림 6. 펌프 모델링과 메쉬  
Fig. 6. Modeling and meshing of pump

작동 유체는 물을 사용하였으며, 밀도와 점성계수는 상온에서의 상수 값으로 가정하였다. 또한, 회전체 임펠러와 고정부 볼루트를 각각 회전 좌표계와 고정 좌표계로 정의하고, 두 영역 사이에는 회전-고정 인터페이스를 설정하여 임펠러 회전에 따른 상대 유동을 모사하였다. 난류 모델은 회전 기계에 널리 사용되는 SST  $k-\omega$  모델을 적용하여 임펠러 출구 및 볼루트 내의 유체 흐름을 고려하였다[9].

경계조건으로 흡입부에는 정압 조건을 적용하였고, 토출부에는 펌프 양수량으로부터 식 (1)을 이용해 산정한 질량유량  $\dot{m}$ 을 반영하였다. 해석은 비정상 조건에서 수행되었으며, 시간 간격은 임펠러 1회전 동안 충분한 시간 간격을 확보할 수 있도록 0.00019초로 설정하였다. 이때, 시간 간격을 감소시켜도 BPF 피크 위치는 유지되었고, PSD 코사인 유사도

변화는 1% 이내로 나타나 시간 간격에 대한 안정성을 확인하였다.

$$\dot{m} = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 1.6 \frac{m^3}{min} \times \frac{min}{s} \quad (1)$$

$\dot{m}$  : mass flow,  $Q$  : pumping amount

RMS(Root Mean Square Error) 기준 잔차가 0.0001 이하가 되도록 수렴 기준을 설정하였으며[10], 벽면 경계는 모두 No-slip 조건을 적용하였다. 또한, 벽면 거칠기는 제작사 사양과 현장 배관 상태를 고려하여 균일한 값으로 설정하였으며, 질량유량 및 흡입 정압을  $\pm 5\%$  범위에서 변화시킨 경우, BPF 대역의 피크 위치가 유지되는 경향을 보였다. 이는 본 연구의 주파수 성분 기반 유사도 비교가 경계조건 오차에 대해 상대적으로 강건함을 시사한다.

### 3.2 가상 센서 설정 및 데이터 수집

디지털 트윈 환경에서 그림 7과 같이 진동에 대한 시간 이력 데이터를 수집하였다. 기계적 쉘 부식 및 균열과 같은 결함은 진동 신호에서 특정 변화가 뚜렷하게 나타나므로, 유사도 평가는 진동 데이터를 중심으로 수행하였다. 가상 센서는 실측 센서 위치와의 대응성을 고려하여 정의하였으며, 비정상 해석 결과를 후처리하여 동일한 유사도 지표에 적용할 수 있도록 데이터 처리 절차를 구성하였다. 가상 진동 신호는 임펠러 표면에서 계산된 비정상 압력 및 전단응력 분포를 기반으로 산출한 유체력 및 모멘트의 시간 이력으로 정의하였다.

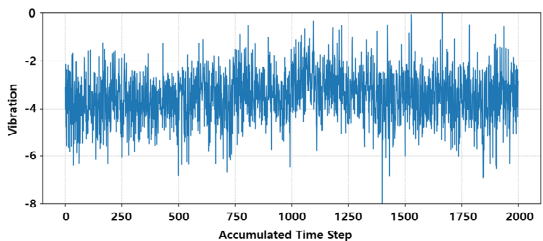


그림 7. 가상 진동 데이터 수집  
Fig. 7. Virtual vibration data collection

## IV. 데이터 신뢰성 검증 및 고찰

본 연구에서 비교 대상이 되는 두 신호는 생성 경로가 상이하다. 가상 신호는 유동 해석으로부터 도출된 유체 하중의 시간 변화를 반영한 것이며, 실측 신호는 해당 하중이 구조계를 통해 전달된 이후의 가속도 응답이다. 원심펌프의 진동은 내부 유동의 압력 변동이 구조물에 동적 하중으로 작용하고, 이 하중이 축-베어링-케이싱을 거쳐 외부로 전달되는 과정에서 형성된다. 따라서 두 신호는 물리량의 형태는 다르지만 동일한 유동 기인 현상에 근거하며, 특히 지배적인 주파수 성분 측면에서는 공통적인 특성을 공유한다. 본 연구에서는 절대 진폭의 직접 비교보다는 스펙트럼 형상과 특징 주파수 대역의 일치성을 중심으로 분석함으로써, 구조 전달 과정에서 발생할 수 있는 진폭 차이의 영향을 최소화하였다. 이러한 접근은 회전체 설비의 유동-구조 연성 해석 연구에서도 활용된 바 있으며[11], 물리적 대응성을 고려한 비교 방법으로 해석할 수 있다.

디지털 트윈 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 실측 진동 데이터와 가상 진동 데이터를 대상으로 주파수 영역과 진폭 영역에서 유사도를 비교하였다. 주파수 영역에서는 각 신호의 PSD를 산출하고, PSD 기반 코사인 유사도는 식 (2)를 이용하여 분석하였다[12]. 실측 PSD와 CFD PSD를 비교한 결과를 그림 8과 같이 나타내었으며, 주파수 영역 유사도는 88.7 %로 계산되어 전반적인 PSD 분포 경향은 유사하나, 일부 대역에서 차이가 존재함을 확인하였다.

$$S = \frac{\sum_{k=1}^N P_m(f_k) P_c(f_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N P_m(f_k)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^N P_c(f_k)^2}} \quad (2)$$

$S$  : similarity,  $P_m(f_k)$  : actual PSD,  
 $P_c(f_k)$  : virtual PSD,  $f_k$  : frequency bins

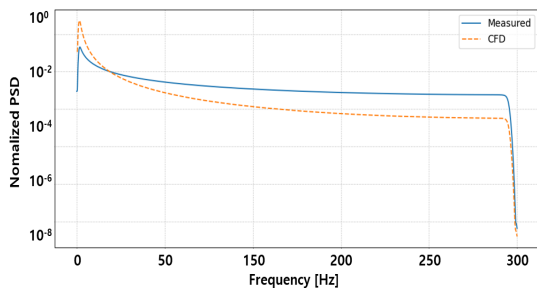


그림 8. 주파수 영역 유사도 비교  
 Fig. 8. Similarity comparison in the frequency domain

진폭 영역에서는 실측 데이터와 CFD 데이터의 시간 이력을 직접 비교하여 파형 수준의 일치성을 확인하였다. 동일 시간 구간에서 두 데이터를 중첩하여 그림 9와 같이 나타내었으며, 파형의 주기성 및 진폭 변화 경향이 전반적으로 유사함을 확인할 수 있다. 비교 결과를 정량적으로 파악하기 위해 식 (3)을 통해 NRMSE를 산출하였으며, 약 7%로 계산되었다. 이는 일반적으로 모델 적합도가 우수한 것으로 평가되는 10% 이하 기준을 만족함을 알 수 있다[13][14].

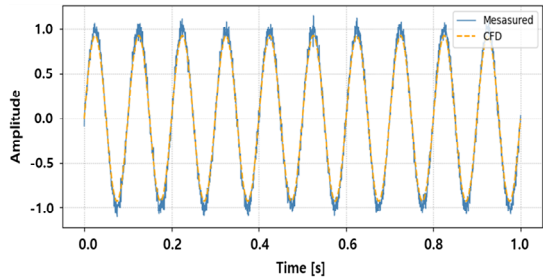


그림 9. 진폭 영역 유사도 비교  
 Fig. 9. Similarity comparison in the amplitude domain

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_m(n) - x_c(n))^2}}{x_{m,max} - x_{m,min}} \times 100\% \quad (3)$$

$x_m(n)$  : actual data,  $x_c(n)$  : virtual data

한편, 전체 대역 PSD 유사도는 스펙트럼 전 구간을 동일 가중치로 평가하기 때문에 원심펌프 운전 특성을 대표하는 특징 성분의 재현성이 상대적으로 과소평가될 수 있다. 이에 따라 원심펌프와 같은 회전체에서 유동-회전체 상호작용을 대표하는 BPF를 고려하며, BPF는 임펠러 블레이드가 고정자 기준점을 통과할 때 발생하는 주기 성분으로, 식 (4)와 같이 표시할 수 있다. 이때, BPF는 블레이드 수 6개와 회전수 1750 rpm을 통해 175 Hz로 계산되며, BPF 대역에 가중치 함수  $w(f_k)$ 를 부여한 식 (5)를 통해 PSD 코사인 유사도 분석 결과를 그림 10과 같이 나타내었다[15].

$$f_{BPF} = Z \times \frac{rpm}{60} \quad (4)$$

$f_{BPF}$  : blade passing frequency,  $Z$  : number of blades

$$S_w = \frac{\sum_{k=1}^N w(f_k) P_m(f_k) P_c(f_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N w(f_k) P_m(f_k)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^N w(f_k) P_c(f_k)^2}} \quad (5)$$

$S_w$  : weighted similarity,  $w(f_k)$  : weight function

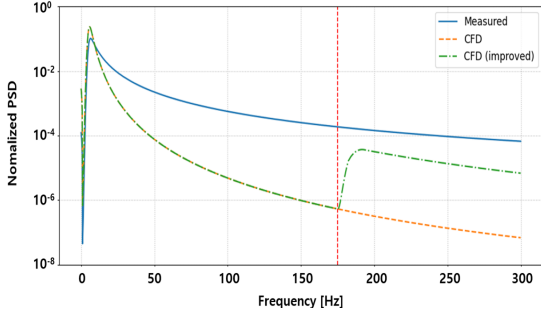


그림 10. 진폭 영역 비교

Fig. 10. Improvement of similarity in the frequency domain

BPF 성분이 포함된 대역을 강조하도록 가중치를 적용한 경우 유사도가 93.1%로 향상되었으며, 이는 일반적으로 회전체 진동의 경우 “특징 주파수 대역 정합 >0.9”이면 구조적 재현 성공으로 평가하기 때문에 원심펌프 운전 특성을 대표하는 성분 대역에서 실측 데이터와 가상 데이터의 스펙트럼 일치도가 높음을 의미한다[16].

이와 같이, BPF 대역을 반영한 평가에서 PSD 코사인 유사도가 향상되고, 진폭 영역에서 NRMSE가 7% 수준으로 산출된 결과는 특징 성분을 반영한 유사도 평가가 디지털 트윈 모델의 신뢰성 검증에 유효함을 보여준다.

## V. 결 론

산업 현장에서 운용 중인 원심펌프를 대상으로 CFD 기반 디지털 트윈 개념을 적용한 시뮬레이션 모델을 구축하고, 실측 진동 데이터와의 가상 진동 데이터 간 유사도 분석을 통해 디지털 트윈 모델의 신뢰성을 정량적으로 검증하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 실측 진동 센서와 디지털 트윈 가상 센서를 이용하여 진동 데이터를 수집하고, 샘플링 주파수 차이를 고려한 리샘플링 및 전처리 등을 통해

비교 가능한 데이터 셋 구축이 가능하다.

둘째, 주파수 영역에서는 PSD 기반 코사인 유사도가 전체 주파수 대역에서 88.7%이고, 진폭 영역에서는 NRMSE가 약 7% 수준으로 실측 및 가상 데이터의 일치 경향을 확인하였다.

셋째, 원심펌프의 대표 특징 성분인 BPF 대역의 가중치를 고려한 PSD 코사인 유사도가 88.7%에서 93.1%로 향상되었으며, 이는 특징 주파수 성분을 반영한 평가가 디지털 트윈 모델의 신뢰성 검증에 효과적임을 보여준다.

향후 연구에서는 운전 조건 변화와 베어링 마모와 같은 고장 시나리오를 다양화하여 실측-가상 융합 데이터셋을 확장하고, 확보된 융합 데이터를 기반으로 잔존수명예측을 위한 고장예지 알고리즘을 적용하여 유지보수 의사결정 지원 시스템(알람, 정비 시점, 우선순위 등)으로 연계되는 디지털 트윈 기반 CBM+ 통합 구조를 구현할 계획이다.

## References

- [1] C. Deshpande, R. Farooqi, and M. Patton, "Carbon Footprint Reduction in Acid Gas Recovery System Through Design, Development and Deployment of a 2000HP Hydraulic Turbocharger", Proc. Asia Turbomachinery & Pump Symposium (AIPS), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 4-9, May 2022. <https://hdl.handle.net/1969.1/197042>.
- [2] M. Waszak, T. Moen, and A. Stasik, "Data Quality Issues for Vibration Sensors: A Case Study in Ferrosilicon Production", Proc. 2nd International Workshop on Software Engineering and AI for Data Quality in Cyber-Physical Systems/Internet of Things, Singapore, pp. 22-23, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1145/3549037.3561273>.
- [3] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective", IEEE Access, Vol. 8, pp. 21980-22012, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
- [4] H. B. Park and J. W. Hur, "Centrifugal Pump

- Data Collection and Analysis Using CFD-Based Digital Twin", Proc. 2025 Fall Conference of the Korean Society of Innovative Engineering, Chuncheon, Korea: Gangwon Research Institute, pp. 1-3, Oct. 2025.
- [5] E. Chen, V. Yadav, and C. M. Godbole, "Guidance for Developing Digital-Twins for Online Condition Monitoring of Nuclear Power Plant Components", Idaho Falls, Idaho 83415, In Idaho National Laboratory, pp. 8-22, Jul. 2025. <https://www.osti.gov/servlets/purl/2589772>.
- [6] TSR Co., Ltd., "Centrifugal Pump Maintenance Records for the Pump Room (2024-2025)", internal document/maintenance database, Gumi-si, Gyeongbuk, Korea, 2025.
- [7] A. Emmanuel, M. Faragalla, M. Awwal, and Y. K. Lee, "Online Monitoring of Large Centrifugal Pumps in Nuclear Power Plants", Proc. Korea Nuclear Society Autumn Meeting, Daejeon, Korea, pp. 12-18, Oct. 2016.
- [8] A. Mansour and E. Laurien, "Numerical error analysis for three-dimensional CFD simulations in the two-room model containment THAI+: Grid convergence index, wall treatment error and scalability tests", Nuclear Engineering and Design, Vol. 326, pp. 220-233, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.11.010>.
- [9] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, Aug. 1994. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
- [10] ANSYS Inc, "ANSYS CFX-Solve Manager User's Guide", ANSYS Documentation, Example-based guidance, pp. 125-136, Jan. 2025.
- [11] H. Zhang, H. You, and H. Lu, "CFD-Rotordynamics Sequential Coupling Simulation Approach for the Flow-Induced Vibration of Rotor System in Centrifugal Pump", MDPI Applied Sciences, Vol. 10, No. 3, Art No. 1186, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10031186>.
- [12] P. Welch, "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms", IEEE Trans. Audio Electroacoust., Vol. 15, No. 2, pp. 70-73, Jun. 1967. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
- [13] T. Chai and R. R. Draxler, "Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)?—Arguments against Avoiding RMSE in the Literature", Geoscientific Model Development, Vol. 7, No. 3, pp. 1247-1250, Jun. 2014. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
- [14] H. Khoshvaght, R. R. Permal, and A. Razmjou, "A Critical Review on Selecting Performance Evaluation Metrics for Supervised Machine Learning Models in Wastewater Quality Prediction", Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 13, No. 6, Art No. 119675, Oct. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119675>.
- [15] Y. Zhang, et al., "Vibration Analysis of a High-pressure Multistage Centrifugal Pump", Scientific Reports, Vol. 12, Art No. 20293, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22605-2>.
- [16] Z. Li, X. Yao, and C. Zhang, "Vibration Signal Noise-Reduction Method of Slewing Bearings Based on the Hybrid Reinforcement Chameleon Swarm Algorithm, Variate Mode Decomposition, and Wavelet Threshold (HRCSA-VMD-WT) Integrated Model", MDPI Sensors, Vol. 24, No. 11, Art No. 3303, May 2024. <https://doi.org/10.3390/s24113344>.
- [17] A. Perisic and B. Perisic., "Digital Twins Verification and Validation Approach through the Quintuple Helix Conceptual Framework", MDPI Electronics, Vol. 13, No. 16, Art No. 3303, Aug. 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13163303>.

저자소개

박 희 범 (Hee-Beom Park)



2025년 2월 : 국립금오공과대학교  
기계시스템공학부(학사)  
2025년 3월 ~ 현재 :  
국립금오공과대학교  
기계공학과(항공기계전자융합전공)  
석사과정  
관심분야 : Machine Learning,

RAM-C, CBM+, Digital Twin

황 정 우 (Jung-Woo Hwang)



2024년 2월 : 국립금오공과대학교  
민군IT융합공학과(석사)  
2015년 9월 ~ 현재 : (주)TSR  
생산기술 담당  
2024년 3월 ~ 현재 :  
국립금오공과대학교 기계공학과  
박사과정

관심분야 : Production Engineering, AI Deep Learning,  
Rubber

허 장 욱 (Jang-Wook Hur)



1995년 9월 : 일본 동경공대  
기계물리공학과(박사)  
2006년 1월 ~ 2011년 12월 :  
방위사업청 체계종합 총괄담당  
2012년 3월 ~ 2012년 8월 : 탄약사  
기술관리처장  
2012년 9월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 기계시스템공학부 교수

관심분야 : Systems Engineering, 신뢰성공학, RAM-C,  
CBM+