

비침습 배관 진동 기반 암모니아 회수라인 종료 전이 검출 및 이상 회수 판정

전시영*[†] · 신효동** · 문서정*

*R&D, 서운산 에이아이 주식회사
17604 경기 안성시 미양면 양변길 193
**R&D, Coretech Co

17604 경기 안성시 미양면 양변길 193
(2026년 5월 12일 접수, 2026년 6월 18일 수정본 접수, 2026년 7월 2일 채택)

Non-Invasive Pipe Vibration-Based Detection of End-of-Recovery Transition and Abnormal Recovery in Ammonia Recovery Lines

Sayeong Jun*[†], Hyodong Shin** and Seojung Moon*

*R&D, Seounsai AI Co., Ltd., 193 Yangbyeon-gil, Miyang-myeon, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17604, Korea

**R&D, Coretech Co., Ltd., 193 Yangbyeon-gil, Miyang-myeon, Anseong-si, Gyeonggi-do, 17604, Korea
(Received 12 May 2026; Received in revised form 18 June 2026; Accepted 2 July 2026)

요 약

고순도 암모니아 회수 공정에서는 시창(sight glass) 관찰에 의존하므로 정상 회수와 종료 직전 기액 혼재 전이를 정량적으로 구분하기 어렵고, 체결부 부분 막힘에 의한 이상 회수도 즉시 식별하기 어렵다. 본 연구는 회수 배관 외벽에 부착한 비침습 디지털 진동 센서와 다단계 규칙 기반 상태기를 이용하여 회수 상태를 실시간 판정한다. 회수 개시 과도응답으로 세션별 기준 진폭을 설정한 뒤, 정규화 블록 통계량과 포락선 기반 활성 특성, 장시간 감쇠 추세를 결합하여 종료 전이와 이상 회수를 검출한다. 총 60세션(운전 상태별 각 20세션)의 후향 평가에서 정상 회수와 이상 회수 판정 일치율 100%, 종료 전이 검출률 85%(17/20), 전체 판정 일치율 95%(57/60)를 보였다. 제안 시스템은 작업자의 시창 모니터링 부담을 줄이고 회수 종료 판단의 일관성을 높인다.

Abstract – In high-purity ammonia recovery, sight glass inspection makes it difficult to distinguish normal recovery from the liquid–gas transition near end-of-recovery, and intermittent partial blockage at vent fittings cannot be identified visually. This study proposes a real-time monitoring method using a non-invasive digital vibration sensor on the outer pipe wall and a multi-stage rule-based state machine. A session-specific reference amplitude is set from the onset transient; normalized block statistics, envelope-based activity, and long-term decay tracking then detect end-of-recovery transition and abnormal recovery. A retrospective evaluation on 60 sessions (20 per state) showed 100% agreement for normal and abnormal recovery, 85% (17/20) transition detection, and 95% (57/60) overall agreement. The system reduces operator dependence on sight glass monitoring and improves end-of-recovery judgment consistency.

Key words: Non-invasive vibration sensor, Ammonia recovery, End-of-recovery transition, Abnormal recovery detection, Rule-based state machine

1. 서 론

암모니아(NH_3)는 반도체 제조 공정에서 사용되는 대표적 고순도 특수 가스 중 하나로, 실란(SiH_4)과 함께 질화규소(SiN_x) 박막의 화학기상증착(CVD)에 질소 전구체로 이용된다[1-2]. 동시에 독성 및

가연성 물질로서 TLV-TWA 25 ppm, IDLH 300 ppm 수준의 허용 노출 한계가 설정되어 있어[3], 회수 공정 중 누출이나 이상 상태가 발생할 경우 작업자 안전과 환경에 즉각적인 위험을 초래할 수 있다.

본 연구 대상 고순도 액상 암모니아 실린더의 회수 공정은 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째, 액상 암모니아는 상온에서 약 8.5 bar (absolute)의 포화 증기압을 가지므로, 운반·보관용 실린더는 통상 5 bar(gauge) 내외의 가압 액상 상태로 유지된다. 둘째, 사용 후 잔류 액상은 회수 탱크(저장 트레일러 또는 벌크 컨테이너)로 이송하며, 다음 충전 공정에서 실린더 헤드스페이스의 압력을 신속히 회복시키기 위해 거의 완전 회수를 목표로 운전한다. 셋째, 액상 회수가

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wjstkdud4040@naver.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

끝나는 즉시 잔여 헤드스페이스 압력을 유지하기 위해 회수 밸브를 신속히 차단해야 한다. 만일 종료 시점을 놓쳐 실린더 내부 압력이 완전히 소실되면, 다음 충전 시 실린더 가압부터 다시 시작해야 하므로 충전 사이클 시간이 증가할 수 있다.

실제 현장에서는 회수 종료 시점을 시창(sight glass)을 통한 작업자의 육안 관찰에 의존하므로 다음과 같은 두 가지 한계가 존재한다. 첫째, 정상 액상 회수 구간과 종료 직전 기상 성분이 증가하는 기액 혼재 종료 전이(liquid-gas transition) 구간을 정량적으로 구분하기 어려워 작업자의 장시간 시창 대기가 필요하다. 둘째, 체결부 또는 배출부의 부분 막힘으로 인해 유동이 불연속적으로 발생하는 이상 회수 상태는 시창에서 정상 액상 흐름과 시각적으로 유사하게 보일 수 있어 즉시 판정이 어렵다.

기액 2상 유동이 배관 구조물에 유발하는 진동(flow-induced vibration, FIV)과 그 해석 가능성은 다양한 연구에서 보고되어 왔다[4-10]. 또한 배관 외벽 진동, 분포형 음향(DAS), 가속도계 기반 비침습 신호를 이용하여 배관 유동을 모니터링하려는 연구도 보고되었다[11-15]. 데이터 기반 및 신호 기반 고장 검출 기법은 기계·공정 상태 모니터링에서 폭넓게 활용되어 왔다[16,17]. 그러나 기존 연구들은 주로 수계 배관, 원유·천연가스 송유관, 또는 범용 공정을 대상으로 하며, 암모니아와 같은 고순도 특수 가스 실린더 회수 공정에서 좁고 급격한 기액 전이를 실시간으로 판정하고 이상 회수를 함께 검출하는 현장 적용 사례는 보고된 바 없다. 산업 안전 측면에서도 암모니아 누출 사고 사례는 지속적으로 보고되고 있어[18,19], 회수 종료 시점과 이상 상태를 비침습 방식으로 실시간 검출하는 시스템의 필요성이 크다.

이에 본 연구에서는 비침습 배관 외벽 진동 신호와 다단계 규칙 기반 상태기를 결합하여, 세션별 적응형 기준 진폭 설정과 포락선 기반 상 판정을 통해 정상 회수, 종료 전이, 이상 회수를 실시간으로 자동 판정하는 현장형 모니터링 방법을 제시한다. 60세션(운전 상태별 각 20세션)의 후향 평가를 통해 제안 방법의 현장 적용 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

배관 내 기액 유동은 압력 변동, 상분율 변화, 유체-구조 상호작용에 의해 배관벽 진동을 유발한다[4-8]. 액상 우세 구간에서는 연속적인 질량 유동과 벽면 응력 전달이 유지되므로 비교적 지속적이고 조밀한 진동 활성 패턴이 나타난다. 반면 기상 성분이 증가하면 유효 전달 하중이 감소하고 비활성 구간이 길어져 포락선 수준과 이벤트 밀도가 함께 낮아진다. 따라서 회수 종료 직전의 종료 전이 구간은 포락선의 점진적 감쇠와 활성 밀도의 저하로 해석할 수 있다.

고순도 암모니아 회수 공정은 회수 개시 시 배관 내부가 약 5 bar(gauge)의 액상 상태로 유지되다가, 잔량 감소에 따라 슬러그 유동(slug flow)을 거쳐 기상으로 전환되는 특성을 가지며[9,10], 이 전이 구간의 폭이 좁고 급격하다는 점에서 일반적인 수계 배관 유동 연구와 차별화된 공정 조건을 갖는다. 따라서 범용 임계값 기반 접근보다 세션별 기준 진폭을 동적으로 설정하는 적응형 방법이 요구된다.

한편, 체결부 또는 배출부의 부분 막힘은 정상 회수나 종료 전이와 구별되는 다른 성격의 진동 신호를 만든다. 2상 유동의 불연속적 재개는 간헐적 충격 성분(slug impact)을 동반할 수 있음이 기존 연

구에서 보고되어 왔으며[4-6], 본 연구의 현장 관찰에서도 평균 에너지는 낮지만 간헐적 스파이크가 반복되는 양상이 확인되었다. 이 때문에 회수 상태 판정에는 절대 진폭 하나보다 정규화된 블록 통계량, 피크 발생 특성, 포락선의 지속성, 장시간 감쇠 추세를 함께 해석하는 접근이 필요하다. 본 연구의 상태기는 이러한 세 가지 물리적 과정(정상 회수, 종료 전이, 이상 회수)이 시간영역 진동 특성에서 서로 다른 패턴을 보인다는 점에 근거하여 설계되었다.

3. 실험 및 방법

3-1. 시스템 구성 및 데이터 취득

실험은 실제 고순도 암모니아 회수라인에서 수행하였다. 대상 실린더는 용량 50 kg급이며, 회수 배관은 외경 6 mm, 스테인리스 재질(SUS316L)로 구성되어 있다. 회수 운전 중 배관 내부 초기 압력은 회수 개시 시점 기준 약 5 bar(gauge) 수준이며, 회수 완료 시점에서는 1 bar 이하로 감소한다. Fig. 1은 제안한 암모니아 회수라인 상태 모니터링 시스템의 전체 구성을 나타낸다. 진동 신호는 회수 배관 외벽 측면에 에폭시 접착제로 고정 부착한 V2S200D 기반 디지털 진동 센서로 취득하였다[20]. 본 센서는 단일 비트 펄스 밀도 변조(Pulse Density Modulation, PDM) 출력을 제공하며, 이를 마이크로컨트롤러 유닛(Microcontroller Unit, MCU)에 내장된 I²S (Inter-IC Sound) 인터페이스를 통해 16 kHz, 16-bit mono 펄스 부호 변조(Pulse Code Modulation, PCM) 신호로 변환하여 수집하였다. 임베디드 제어기는 ESP32-S3 기반의 Heltec 모듈(MCU)을 사용하였으며 [21], 데이터 수집과 동시에 실시간 상태 판정 및 원시 PCM 데이터의 SD(Secure Digital) 카드 저장을 수행한다. 작업자 인터페이스는 START/STOP 버튼, LCD(Liquid Crystal Display), LED(Light Emitting Diode), 부저로 구성하였다. 측정 세션은 START 버튼 입력과 함께 시작되며, 원시 PCM 데이터는 프레임 단위로 SD 카드에 저장된다. 라벨은 시창 관찰, 작업 기록, 회수 완료 여부, 이상 대응 이력을 종합하여 부여하였다. 본 연구에서는 서론에서 기술한 세 가지 운전 상태, 즉 정상 회수(Liquid), 종료 전이(Liquid-Gas), 이상 회수(Abnormal)를 판정 대상으로 삼았다.

3-2. 상태 판정 알고리즘 개요

제안 알고리즘은 (1) 회수 개시 검출 및 세션별 기준 진폭 설정, (2) 블록 통계 기반 정상/이상 회수 판정, (3) 포락선 기반 액·기상 판정, (4) 장시간 감쇠 추적에 의한 종료 전이 검출의 네 단계로 구성된다. 추가로 두 가지 보조 판정 상태(GAS_QUIET, OFF_TANK)를 포함한다. 전체 판정 흐름은 Fig. 2에 도시하였다. 본 알고리즘은 표본 인덱스 n (16 kHz), 4초 블록 인덱스 k , 1초 윈도우 인덱스 m 의 세 가지 시간척도 인덱스를 사용한다.

3-2-1. 회수 개시 검출 및 기준 진폭 설정

입력 디지털 진동 신호를 $s[n]$ 이라 할 때, 시점 n 에서의 순간 절대 진폭(instantaneous absolute magnitude) $x[n]$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$x[n] = |s[n]|, n = 0, 1, 2, \dots$$

$x[n]$ 의 단위는 ADC counts이며 $s[n]$ 의 부호를 제거한 양의 표본 열이다.

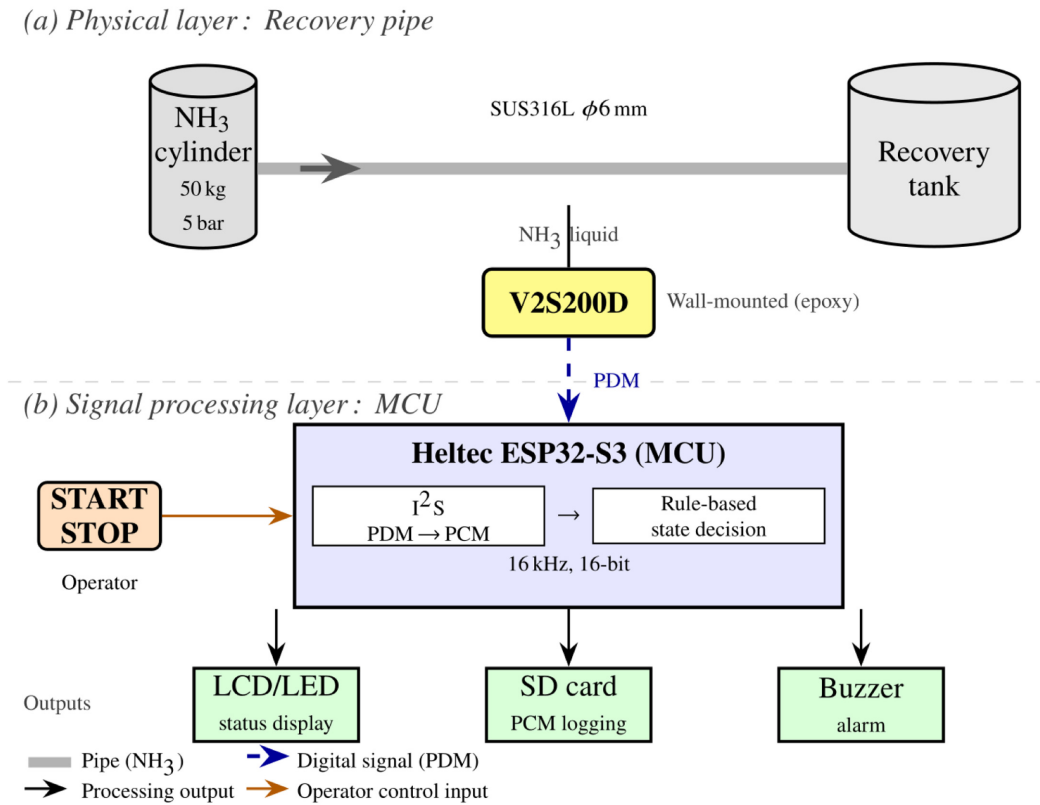


Fig. 1. Configuration of the ammonia recovery-line status monitoring system. (a) Physical layer: the residual liquid in the NH₃ cylinder is transferred to the recovery tank through a SUS316L $\phi 6$ mm pipe, and a V2S200D vibration sensor is bonded to the outer wall of the pipe with epoxy. (b) Signal-processing layer: the sensor's PDM signal is converted to 16 kHz, 16-bit PCM through the I²S interface of the MCU (Heltec ESP32-S3) and fed to the rule-based state-decision algorithm; the decision results are output simultaneously to the LCD/LED display, the buzzer alarm, and SD-card logging. The operator controls each session with the START/STOP button.

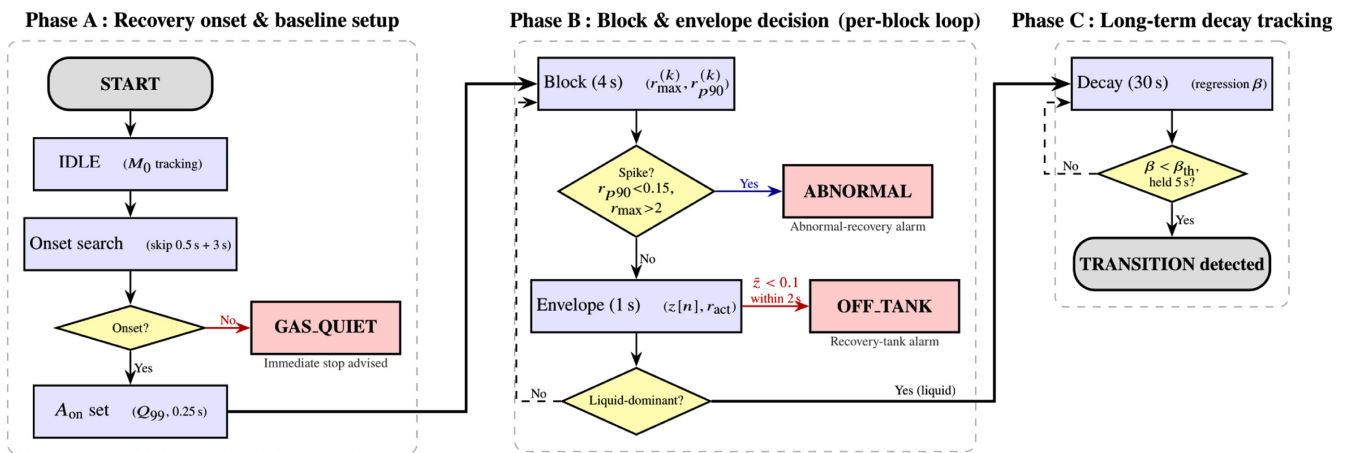


Fig. 2. Overall decision flowchart of the proposed multi-stage rule-based state machine. It is organized into three phases along the time scale — Phase A (recovery onset and baseline setup, executed once): from START, through IDLE (M_0 tracking), the session-specific baseline amplitude A_{on} is set when an onset is detected. If no onset is detected, GAS_QUIET immediately recommends termination (only this no-onset path is drawn in the diagram). Besides this path, GAS_QUIET is also assigned when every block after onset remains low-activity ($r_{max}^{(k)} < 0.5 \wedge r_{p90}^{(k)} < 0.15$) according to the session-level final decision (Section 3.2.6). Phase B (per-block loop): the process proceeds as Block ($r_{max}^{(k)}, r_{p90}^{(k)}, 4$ s) → Spike test → Envelope ($z[n], 1$ s) → liquid-dominant test; an ABNORMAL alarm is raised on a detected spike, an OFF_TANK alarm on abrupt envelope collapse, and the next block is processed when gas is dominant. Phase C (long-term decay tracking): for the 1-s mean envelope of a signal confirmed as liquid-dominant, the 30 s regression slope β is tracked, and TRANSITION (end-of-recovery transition) is declared when $\beta < \beta_{th}$ persists for at least 5 s. Black solid lines: normal transitions between stages; blue solid line: per-block ABNORMAL branch; red solid line: auxiliary decision paths (GAS_QUIET·OFF_TANK); black dashed line: the loop returning to the next block/window.

IDLE 구간에서는 매 시점마다 직전 1 s 구간의 $x[n]$ 중앙값을 계산하여 배경 잡음 기준값 M_0 로 정의하였다. 중앙값을 사용한 이유는, 회수 전 구간의 대표적 진동 수준을 반영하면서도 전기적 잡음 등으로 인해 간헐적으로 발생할 수 있는 스파이크의 영향을 평균값보다 덜 받기 때문이다.

START 이후에는 버튼 조작에 따른 접촉 잡음을 배제하기 위해 초기 0.5 s 구간은 분석에서 제외하고, 이후 3.0 s 동안 회수 개시 onset를 탐색한다. 본 연구에서는 onset 시점 n_{on} 을 다음과 같이 정의하였다: 0.5 s 이후 구간에서, 50 ms 슬라이딩 윈도우의 $x[n]$ 중앙값이 $K \cdot M_0$ ($K=8$)을 처음 초과하고 직후 50 ms 이상 이 조건을 유지하는 시점. 배수 K 는 다음 관측에 근거하여 $K=8$ 로 설정하였다. 현장 측정에서 IDLE 구간 M_0 는 전기·기계적 배경 잡음으로 ADC counts 단위 수십 수준에 머무르는 반면, 회수 개시 시 진동은 수백~수천 counts 수준으로 한 자릿수 이상 큰 값이 된다. 이 차이로 인해 $K=8$ 은 잡음의 통계적 변동에 대한 충분한 마진을 확보한다. 만일 3.0 s 내에 이러한 조건이 충족되지 않으면 회수 개시가 없는 것으로 판정하여 즉시 GAS_QUIET로 분류한다. 이 정의는 단발성 스파이크나 접촉음과 같은 짧은 펄스를 회수 개시로 오인하지 않도록 한다.

회수 개시가 확인되면, onset 직후 0.25 s 구간의 $x[n]$ 표본 집합의 99 백분위 값을 세션별 기준 진폭 A_{on} 으로 설정한다.

$$A_{on} = Q_{99}(\{x[n] | n_{on} \leq n < n_{on} + N_{0.25}\})$$

여기서 $N_{0.25} = [0.25/f_s]$ 는 0.25 s에 해당하는 표본 수이며, $f_s = 16$ kHz에서 $N_{0.25} = 4,000$ 샘플이다. A_{on} 의 단위는 ADC counts이며, 세션마다 달라질 수 있는 초기 충격 수준을 보정하고 이후 모든 블록 특성량을 동일한 스케일에서 비교하기 위한 정규화 기준으로 사용한다.

3-2-2. 블록 통계 기반 정상/이상 회수 판정

이 단계에서는 정상 회수와 이상 회수를 블록 단위 통계량으로 구분한다. onset 이후 신호를 길이 $L = 4f_s$ (4 s, 64,000 샘플) 블록으로 분할하고, k 번째 블록의 절대 진폭 표본 집합을 $\mathcal{B}_k$ 로 정의한다.

$$\mathcal{B}_k = \{x[n] | n_k \leq n < n_k + L\}$$

각 블록의 정규화 최대 진폭 $r_{\max}^{(k)}$ 와 정규화 90 백분위 진폭 $r_{p90}^{(k)}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$r_{\max}^{(k)} = \frac{\max(\mathcal{B}_k)}{A_{on}}$$

$$r_{p90}^{(k)} = \frac{Q_{90}(\mathcal{B}_k)}{A_{on}}$$

$r_{\max}^{(k)}$ 는 블록 내 단일 최대 충격의 강도를 반영하고, $r_{p90}^{(k)}$ 는 블록 내 진폭 분포의 전체 수준을 반영한다. 평균 진폭이나 RMS 같은 단일 지표는 (i) 큰 단발성 충격이 평균을 끌어올려 진동이 지속적인 정상 회수와 단발 스파이크형 이상 회수를 구분하지 못하고, (ii) 분포의 꼬리 정보를 잃기 때문에 분포가 평탄한 저활성 상태와 분포가 좁고 큰 스파이크가 동반된 상태를 동일 평균값으로 묶어버리는 한계가 있다. 반면 $r_{p90}^{(k)}$ 는 단발 스파이크의 영향을 받지 않는 분포의 대표값이고, $r_{\max}^{(k)}$ 는 극단치 자체를 보존하므로, 두 지표를 함께 사용하면 지속성과 충격성을 독립적으로 평가할 수 있다.

이러한 해석을 바탕으로 본 연구에서는 $r_{p90}^{(k)}$ 의 두 임계값 $\text{low} = 0.5$, $\text{high} = 2.0$ 을 정상 회수 후보 구간의 1차 필터로 사용하였다. low 보다 작으면 블록 전반의 활성 수준이 onset 기준의 절반 이하로 떨어진 것이고, high 보다 크면 정상 회수에서 거의 관측되지 않는 과도한 분포 수준에 해당한다. 따라서 블록 가 정상 회수 후보로 유지되기 위한 기본 조건은 다음과 같다.

$$0.5 \leq r_{p90}^{(k)} \leq 2.0$$

식 (6)을 만족하지 않는 블록이 곧바로 비정상적으로 분류되는 것은 아니다. $r_{p90}^{(k)}$ 가 low 미만으로 떨어진 블록은 회수 활성이 저하된 구간(잠재적 종료 전이)으로 간주하여, 블록 단계가 단독으로 상태를 단정하지 않고 후속 포락선 기반 액·기상 판정(3.2.3절)과 장시간 감쇠 추적(3.2.4절)으로 전달한다. 즉 블록 단계는 상호 배타적인 3 분류기가 아니라, Fig. 2의 흐름과 같이 (i) 스파이크형 이상(식 (7)) 검출과 (ii) 이상이 아닌 블록에 대한 후속 포락선 판정으로 이어지는 순차 필터로 동작한다.

또한 부분 막힘에 의한 이상 회수 블록은 “낮은 분포 + 큰 단발 충격” 패턴을 보이므로, 스파이크형 이상 회수 판정은 다음과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{1}_{ABN}^{(k)} = \mathbf{1}[(r_{p90}^{(k)} < 0.15) \wedge (r_{\max}^{(k)} > 2.0)]$$

여기서 $\mathbf{1}[\cdot]$ 는 대괄호 안 조건이 성립하면 1, 아니면 0을 반환하는 지시함수이며, $\mathbf{1}_{ABN}^{(k)} = 1$ 인 블록을 이상 회수(ABNORMAL)로 판정한다. 이 임계값들의 구체적인 결정 근거는 3.3절에 별도로 기술한다.

3-2-3. 포락선 기반 액·기상 판정

블록 단계에서 “정상 회수 후보”로 분류된 신호에 대해, 현재 회수 매질이 액상 우세 상태인지 기상 우세 상태(잔류 액상이 실질적으로 소진된 종료 직전 상태)인지를 추가로 구분한다. 이 단계가 별도로 필요한 이유는 다음과 같다. 블록 단계는 단기적(수 초 단위) 통계량으로 “간헐 스파이크의 존재 여부”를 판정하므로, 스파이크 없이 부드럽게 감쇠하는 정상적 종료 전이는 “정상 회수”로 분류된다. 따라서 정상 회수 신호 내부에서 액상 우세와 기상 우세를 다시 구분하는 추가 단계가 필요하다.

이를 위해 절대 진폭 $x[n]$ 에 시정수 $\tau = 0.05s$ 의 지수 이동 평균(Exponential Moving Average, EMA)을 적용하여 포락선 $e[n]$ 을 생성한다.

$$e[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha)e[n-1], \alpha = \frac{1}{\tau f_s}$$

EMA를 사용한 이유는 (i) 고정 길이 이동평균보다 지연이 작아 임베디드 실시간 처리에 적합하고, (ii) 단발 스파이크를 평활화하면서도 수십 ms 단위의 활성 변화를 보존하여 액상 흐름의 “밀도”를 반영하기에 유리하기 때문이다.

이 포락선을 onset 이후 기준 구간 $[n_{on} + 1f_s, n_{on} + 3f_s]$ (1 s–3 s)에서 계산한 $e[n]$ 의 중앙값 E_0 로 정규화한다.

$$z[n] = \frac{e[n]}{E_0 + \epsilon}$$

여기서 ϵ 은 0 나눗셈 방지용 작은 양수이다. 기준 구간을 onset

직후가 아닌 1 s 이후로 설정한 이유는 onset 직후의 과도 응답을 배제하고 정상상태(steady-state) 액상 회수 수준만을 기준으로 삼기 위함이다.

정규화 포락선 $z[n]$ 으로부터 1초 윈도우 단위로 활성 비율, 이벤트 밀도, 피크 밀도, 점유율 등의 특성량을 계산하여 액상 우세와 기상 우세를 구분한다. 활성 비율 r_{act} 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{act} = \frac{\#\{n \in W : z[n] > \theta_{act}\}}{|W|}, \theta_{act} = 0.3$$

여기서 W 는 평가 윈도우(1 s)이며 $\#\{\cdot\}$ 은 조건을 만족하는 표본의 수이다. 액상 중심 상태에서는 r_{act} 가 비교적 지속적으로 유지되고 이벤트가 조밀하게 분포하는 반면, 가스 중심 상태에서는 전체 활성 수준과 이벤트 밀도가 함께 감소하는 경향이 나타난다.

3-2-4. 장시간 감쇠 추적 기반 종료 전이 검출

액상 우세 상태로 확인된 정상 회수 신호에 대해, 1초 평균 포락선의 장시간 감쇠를 추적하여 종료 전이를 검출한다. 먼저 정규화 포락선 $z[n]$ 을 1초 윈도우 단위로 평균하여 1초 평균 포락선 $\bar{z}[m]$ 을 정의한다.

$$\bar{z}[m] = \frac{1}{|W|} \sum_{n \in W_m} z[n]$$

여기서 W_m 는 m 번째 1초 윈도우이며 $|W|=f_s$ 이다. 최근 30 s 구간의 $\bar{z}[m]$ 에 대해 최소제곱 선형 회귀로 감쇠 기울기 β 를 추정하였다.

$$\bar{z}[m] = \beta t_m + b + \eta_m, \Delta t_m = 1s$$

여기서 t_m 는 1초 단위 평가 시간, b 는 회귀 절편, η_m 은 잔차이다. 종료 전이는 다음 조건이 5 s 이상 지속될 때 판정하였다.

$$\beta < \beta_{th}, \beta_{th} = -0.005 \text{ s}^{-1}$$

이는 30 s 당 약 15% 감소에 해당한다. 5초 지속 조건은 일시적 유동 흔들림에 의한 가짜 검출을 억제하는 hysteresis로 작용하며, 종료 전이 평균 지속 길이(약 40~50 s, Table 3 참조)에 비해 충분히 작아 검출 지연을 제한하는 수준으로 설계되었다. 블록 기반 이상 회수 판정(단기, 4 s), 포락선 기반 액·기상 판정(중기, 1 s 단위), 장시간 감쇠 추적(장기, 30 s 단위)의 세 단계를 서로 다른 시간 척도에서 순차 적용함으로써 부분 막힘과 정상 종료 전이를 독립적으로 구분하고 조기 오판정 가능성을 최소화하였다. 한편 종료 전이는 포락선 진폭이 완전히 소실되기 전, 감쇠 추세가 임계를 넘는 시점에 검출된다. 따라서 검출 시점의 블록은 대체로 정상 회수 후보 범위(식 (6)) 안에 있으며, 후술하는 Table 1의 종료 전이 구간 $r_{p90}^{(k)}$ 중앙값(0.46)은 검출 이후 구간까지 포함한 전이 전체의 집계값으로 검출 시점의 값보다 낮다.

3-2-5. 보조 판정 상태: GAS_QUIET 및 OFF_TANK

본 시스템은 위 4단계에 더해 두 가지 보조 판정 상태를 정의한다. 가스 조용 상태(GAS_QUIET)는 회수 개시 자체가 관측되지 않거나, 개시 후에도 모든 블록에서 $r_{max}^{(k)} < 0.5$, $r_{p90}^{(k)} < 0.15$ 가 동시에 유지되는 경우로, 회수 대상 실린더 내 액상이 이미 거의 비어

Table 1. Distribution of $r_{p90}^{(k)}$ and $r_{max}^{(k)}$ for 4-s blocks by operating state (median, interquartile range IQR)

Operating state	$r_{p90}^{(k)}$ (median, IQR)	$r_{max}^{(k)}$ (median, IQR)
Normal recovery (Liquid)	1.04 [0.79, 1.32]	1.62 [1.31, 2.05]
End-of-recovery transition (Liquid-Gas)	0.46 [0.31, 0.62]	0.88 [0.62, 1.18]
Abnormal recovery (Abnormal)	0.11 [0.06, 0.18]	2.72 [1.85, 4.30]

유의미한 회수가 발생하지 않는 상태에 해당한다. 작업자가 START를 눌렀으나 회수할 액상이 없는 상황에 대응하며, 시스템은 즉시 종료를 권고하여 불필요한 대기를 방지한다. 회수 탱크 충전 상태(OFF_TANK)는 정상 회수 진행 중 1초 평균 정규화 포락선 $\bar{z}$ 가 2 s 이내에 이하(기준 E_0 의 10% 수준)로 급격히 소실되는 경우로, 회수 측 탱크가 포화되어 배압이 상승하여 유동이 차단된 상황(back-pressure shutoff)을 나타낸다. 이 경우 정상적 종료 전이의 점진적 감쇠와 구별되는 “계단형 차단”으로 검출되며, 시스템은 즉시 경보를 발생시켜 회수 라인 압력 상승에 따른 안전 사고를 방지한다. “OFF_TANK”라는 명칭은 *recovery tank is OFF for receiving*(회수 탱크가 더 이상 회수를 받지 못함)을 의미한다.

3-2-6. 세션 단위 최종 판정

앞선 단계들은 실시간으로 블록·윈도우 단위로 순차 평가되며, 한 세션의 최종 운전 상태는 다음 우선순위 규칙으로 결정한다. (1) 회수 개시가 검출되지 않거나 개시 후 모든 블록에서 GAS_QUIET 조건이 유지되면 GAS_QUIET(유의미한 회수 없음)로 분류하여 즉시 종료를 권고한다. (2) 그 외의 세션에서 식 (7)의 ABNORMAL 조건을 만족하는 블록이 한 개 이상 발생하면 이상 회수로 판정한다. (3) ABNORMAL 경보가 없고 식 (13)의 종료 전이 조건이 충족되면 종료 전이로 판정한다. (4) 위 어느 경보도 발생하지 않고 액상 우세 활성이 세션 종료까지 유지되면 정상 회수로 판정한다. OFF_TANK는 정상 회수 진행 중 배압 차단이 검출될 때 발생하는 독립 안전 경보로, 위 분류와 병렬로 작동한다. 4장의 60세션 평가는 정상 회수·이상 회수·종료 전이의 세 분류에 대한 판정 일치율로 보고한다.

3-3. 임계값 결정 근거 및 분포 해석

3.2.2~3.2.4절에서 사용한 주요 임계값($low = 0.5$, $high = 2.0$; $r_{p90}^{(k)} < 0.15$, $r_{max}^{(k)} > 2.0$; $\beta_{th} = -0.005/s$)은 4장에서 기술하는 60세션 데이터셋의 4초 블록 통계 분포를 분석하여 설정하였다. Table 1은 운전 상태별로 집계한 블록 통계 분포의 요약이다. 따라서 본 연구의 성능 평가는 독립 외부 검증이라기보다 동일 현장 데이터에 대한 후향적 가능성 평가로 해석하는 것이 타당하다. Fig. 3은 이 분포를 시각화한 것이다. 정상 회수와 이상 회수의 $r_{p90}^{(k)}$ 분포는 제한적으로만 중첩되며, 두 분포 사이의 “갭” 영역인 약 0.2~0.7 구간에 종료 전이 분포가 걸쳐 있다. $low = 0.5$ 는 정상 회수 분포의 25 백분위(약 0.79) 하방이면서 종료 전이 분포의 중앙값(0.46) 상방에 위치한다. 따라서 low 는 “블록 단독으로 정상/비정상을 단언”하기보다는 후속 단계(포락선 기반 액·기상 판정, 장시간 감쇠 추적)와 결합하여 사용되는 1차 필터로 기능한다. $high = 2.0$ 은 정상 회수의 상위 꼬리와 충격성 과도 신호를 구분하기 위한 보조 경계로 사용하였다. 이상 회수의 “저분포 + 큰 충격” 패턴은 두 비율의 비 $r_{max}^{(k)}/r_{p90}^{(k)}$ 로 더 명확히 드러난다. 정상 회수에서는 이 비가 중앙값 약 1.6에 머

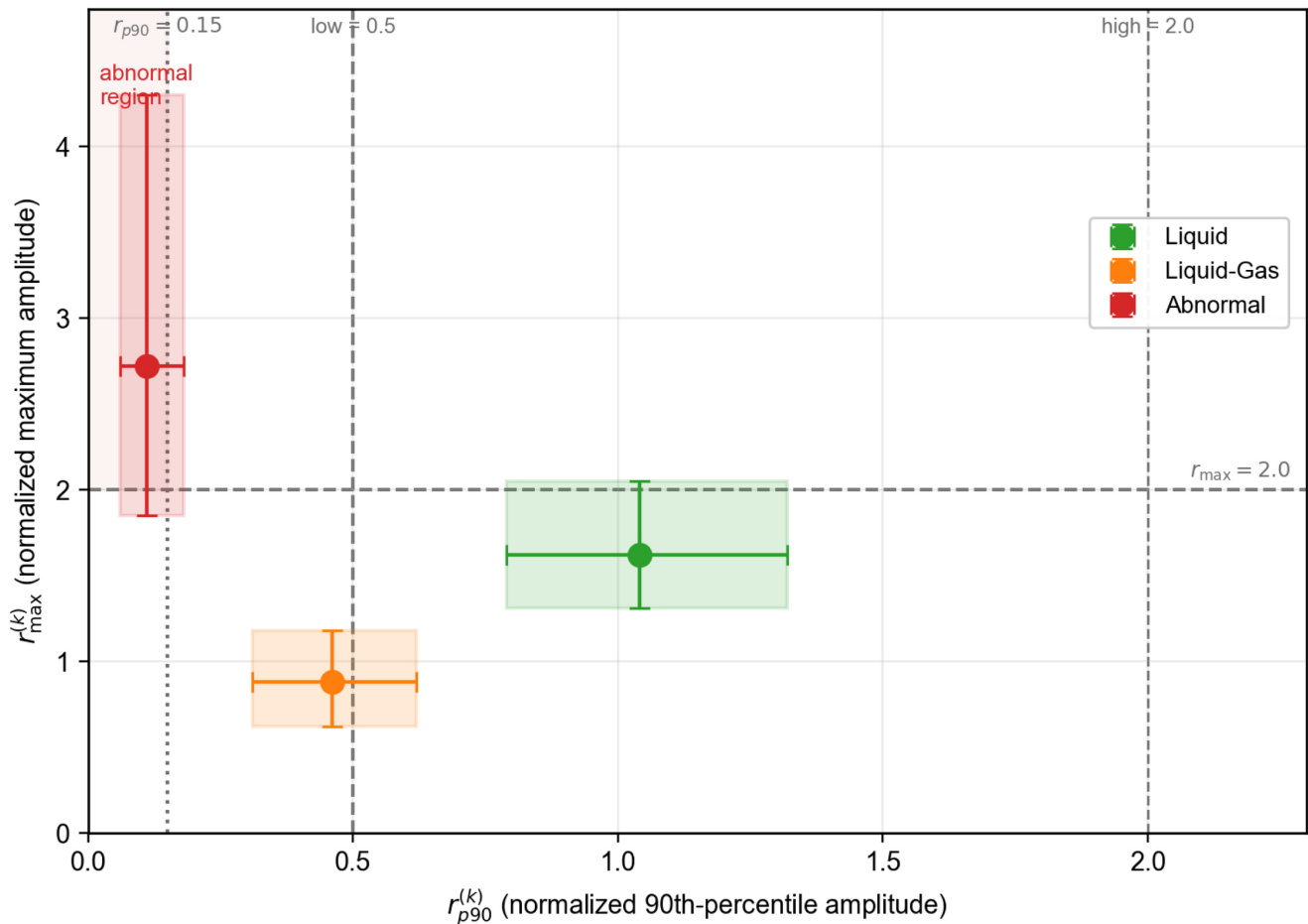


Fig. 3. Distribution of the 4-s block statistics for each operating state (medians and IQRs, based on Table 1), plotted on the $r_{p90}^{(k)}$ - $r_{max}^{(k)}$ plane. Markers denote the per-state medians, while error bars and shaded boxes denote the interquartile range (IQR); the gray lines are the decision thresholds (low = 0.5, high = 2.0; spike criteria $r_{p90}^{(k)} < 0.15$ and $r_{max}^{(k)} > 2.0$). Normal recovery lies in the 0.5–2.0 band, abnormal recovery in the low-distribution/high-impact region (upper-left shading), and end-of-recovery transition in the gap between them, showing that combining the two indices separates the three states. This figure visualizes the summary statistics (medians and IQRs) of Table 1 rather than a scatter plot of individual block samples.

무는 반면, 이상 회수에서는 중앙값 약 25로 한 자릿수 이상 차이가 난다. 이로부터 식 (7)의 동시 조건이 부분 막힘 특유의 “간헐 충격” 신호를 포착하는 데 적합함을 확인하였다.

$\beta_{th} = -0.005/s$ 는 종료 전이 세션의 감쇠 기울기 분포(중앙값 $-0.012/s$, 5 백분위 $-0.006/s$)와 정상 회수 세션의 분포(중앙값 $-0.0003/s$)를 분리하는 위치에 설정하였다. 본 임계값들의 단위 변화 범위 민감도 분석에서 종료 전이 검출률은 80~90%, 정상/이상 회수 판정 일치율은 95~100%로 유지되어, 본 결정값이 결정 경계 근방에서 견고함을 확인하였다.

4. 결과 및 해석

4.1. 데이터셋 구성 및 라벨링

실제 고순도 암모니아 회수 현장에서 취득한 총 60세션의 진동 데이터를 사용하여 제안 방법의 유효성을 후향적으로 평가하였다. 세션은 운전 상태별로 정상 회수(Liquid) 20세션, 이상 회수(Abnormal) 20세션, 종료 전이(Liquid-Gas) 20세션으로 균형 있게 구성하였다. 모든 세션은 50 kg급 실린더와 동일한 회수 배관(외경

6 mm, SUS316L)에서 측정되었으며, 회수 개시 시 초기 배관 내부 압력은 약 5 bar(gauge)로 유지되었다. 세션 길이는 운전 조건에 따라 약 80–300 s 범위로 분포하였다.

각 세션의 *ground truth* 라벨은 (i) 시창(sight glass)을 통한 작업자 육안 관찰 기록, (ii) 작업 일지상의 회수 완료 및 이상 대응 이력, (iii) 회수 탱크 측 중량 변화 기록을 종합하여 부여하였다. 본 연구에서 운전 상태별 세션 정의는 다음과 같다. 정상 회수 세션은 분석 구간 전체에서 시창상 액상 유동만 지속적으로 관찰되고 기액 혼재 종료 전이가 포함되지 않은 liquid-only 세션을 의미한다. 이는 공정상 회수가 항상 잔량 소진까지 진행되었다는 의미가 아니라, 알고리즘 평가를 위해 액상 우세 기준 상태로 분리한 세션이다. 종료 전이 세션은 액상 회수가 진행되다가 잔류 액상이 소진되어 시창에서 기액 혼재 상태가 관찰된 종료 직전 구간을 포함하는 세션이며, 시간축 상에서 정상 회수 → 종료 전이의 두 상태가 모두 관측된다. 이상 회수 세션은 체결부 또는 배출구 부분 막힘이 확인되어 작업자가 중단 또는 재개 조치를 취한 세션이다. 따라서 Fig. 4이 보여주는 “정상 회수에서 종료 전이로 이어지는 예시”는 종료 전이 세션 1건의 시간 경과에 따른 상태 변화이며, 서로 다른 세션 2건을

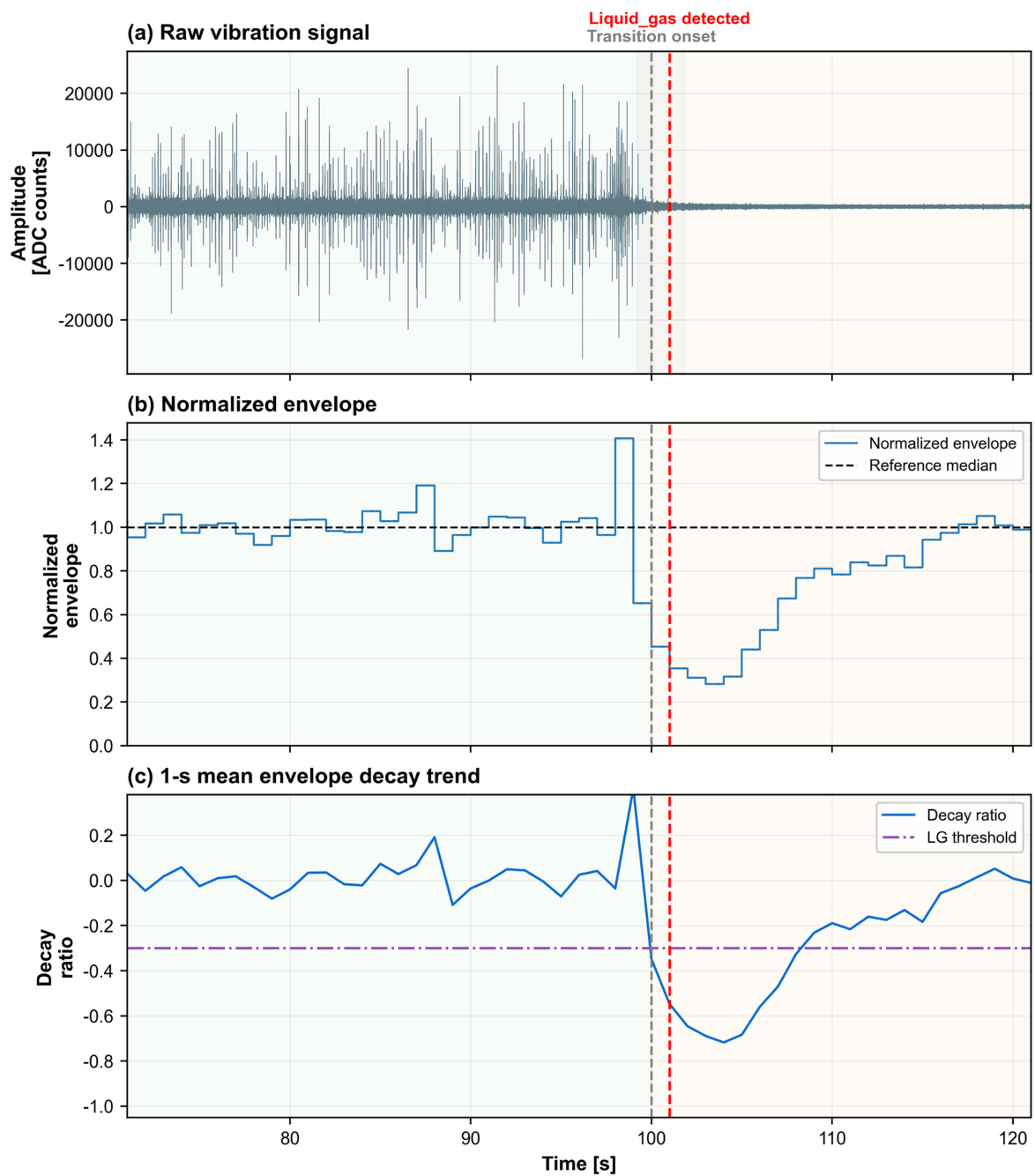


Fig. 4. Representative example of a single end-of-recovery transition session progressing from normal recovery to a liquid–gas transition state (total session time about 180 s). (a) Raw vibration waveform (x-axis: time [s], y-axis: amplitude [ADC counts]), (b) normalized envelope $z[n]$ (dimensionless, relative to the reference value E_0), (c) 1-s mean-envelope decay trend (dimensionless). The gray dashed line marks the operator-referenced start of the end-of-recovery transition, the red dotted line the algorithm's detection of the liquid–gas state, and the purple dash-dotted line the LG decision threshold.

Table 2. Summary of per-session decision results by operating state			
Operating state	N	Activity ratio	Decision agreement
Normal recovery (Liquid)	20	0.72 ± 0.09	20/20 (100%)
Abnormal recovery (Abnormal)	20	0.21 ± 0.07	20/20 (100%)
End-of-recovery transition (Liquid-Gas)	20	0.38 ± 0.12	17/20 (85%)
Overall	60	—	57/60 (95%)

합성한 것이 아니다. 제안 알고리즘은 이 라벨을 참조하지 않고 독립적으로 동작하며, 본 절 이후의 분류 성능 평가는 알고리즘 출력과 ground truth 라벨의 일치도를 기준으로 한다.

4.2. 판정 결과 요약

Table 2은 수집된 전체 세션(총 60세션, 운전 상태별 각 20세션)에 대한 상태 판정 결과를 정리한 것이다. 본 표의 활성 비율(activity ratio)은 식 (10)로 정의된 r_{act} 를 세션 평균한 값이다. 정상 회수(Liquid) 세션에서는 활성 비율이 0.65 이상으로 지속 유지되었으며, 이상 회수(Abnormal) 세션에서는 활성 비율이 낮고 스파이크 패턴이 반복되었다. 종료 전이(Liquid-Gas) 세션에서는 감쇠 기울기가 음의 값으로 지속되어 알고리즘이 전이를 검출하였으며, 미검출 3건은 회수 속도가 매우 느린 세션에서 감쇠 기울기가 판정 임계값에 미달하여 발생하였다(자세한 분석은 4.5절 참조). 참고로, 동일 데이터셋에 대해 단일 지표 기반 단순 분류기를 비교 적용하였다. 이 비교

분류기는 각 4초 블록의 정규화 평균 진폭이 단일 임계값 $0.7(A_{on}$ 대비)을 초과하면 정상 회수, 0.2 미만이면 이상 회수로 분류하는 규칙으로 정의하였으며, 두 임계값은 본 연구의 60세션 분포에서 일치율을 최대화하도록 선택하였다. 그 결과 정상/이상 회수 분류 일치율은 78%(47/60) 수준에 그쳤으며, 오분류 사례의 대부분은 “단발 스파이크가 평균을 끌어올린 이상 회수 블록”과 “초기 활성이 약했던 정상 회수 블록”이었다. 이는 3.2.2절에서 기술한 바와 같이 평균 진폭이 “지속성”과 “충격성”을 동시에 표현하지 못하기 때문이며, $r_{p90}^{(k)}$ 와 $r_{max}^{(k)}$ 를 함께 해석하는 본 접근의 유효성을 뒷받침한다.

4.3. 정상 회수와 종료 전이 사례

Fig. 4는 정상 회수에서 종료 전이로 이어지는 종료 전이 세션 1건의 대표 예시이다. 회수 초반의 정상 회수 구간은 높은 포락선 활성과 안정적인 블록 통계량을 보였다. 이는 액상 중심 유동이 연속적인 기계적 응답을 제공했기 때문으로 해석된다. 즉, 정상 회수는

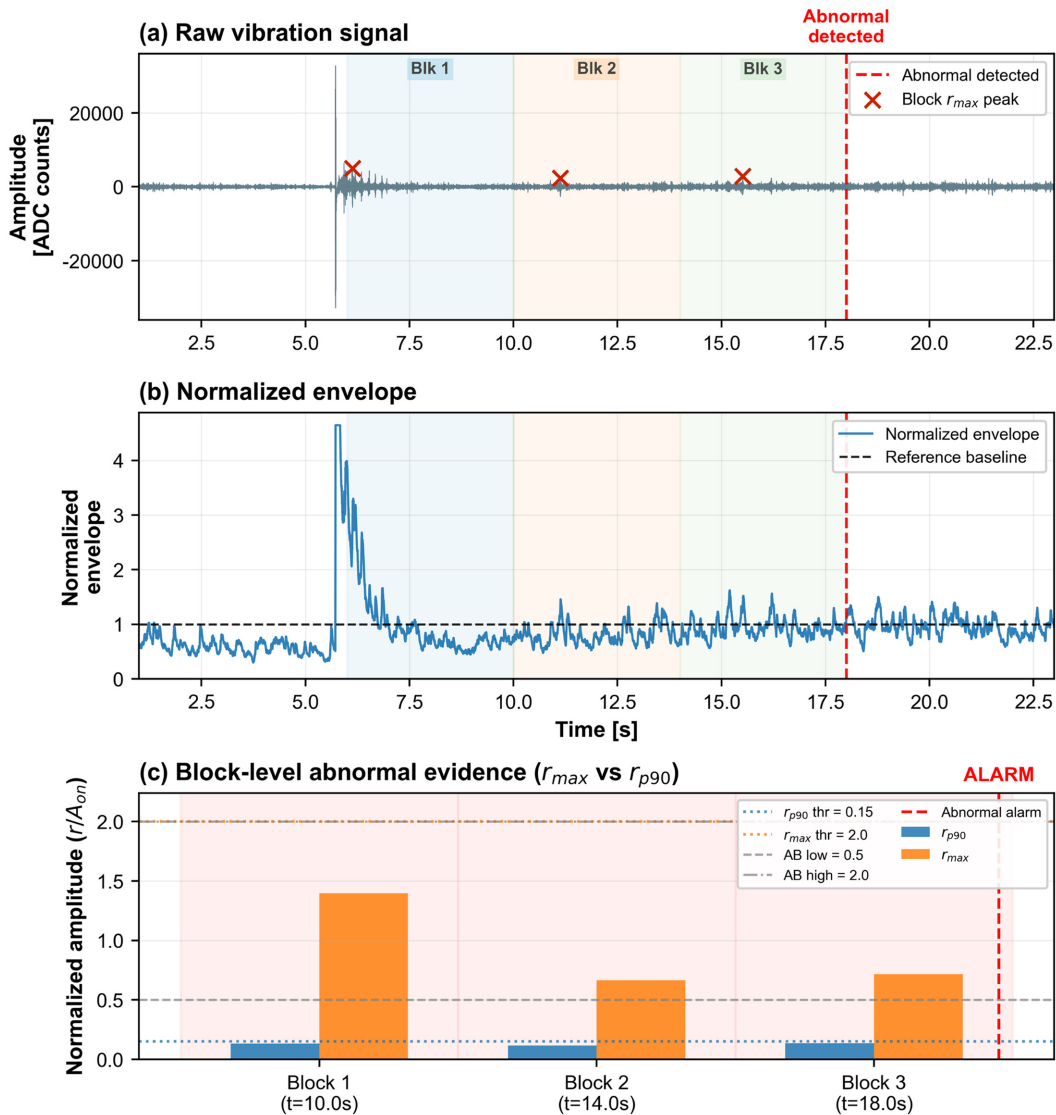


Fig. 5. Representative example of abnormal recovery due to partial clogging. (a) Raw vibration waveform (x-axis: time [s], y-axis: amplitude [ADC counts]), (b) normalized envelope $z[n]$ (dimensionless), (c) per-4-s-block $r_{p90}^{(k)}$ and $r_{max}^{(k)}$ (dimensionless); the red vertical line marks when the abnormal-recovery alarm is raised. In abnormal recovery, low overall energy ($r_{p90}^{(k)} < 0.15$) together with intermittent spikes ($r_{max}^{(k)} > 2.0$), or an unstable sustained pattern at low-to-mid activity levels, is observed.

단순히 진폭이 큰 상태가 아니라 지속성과 밀도를 함께 갖는 활성 패턴이다. 세션 후반의 종료 전이 구간에서는 1초 평균 포락선이 점진적으로 감소하고, 이벤트 밀도와 활성 비율도 함께 낮아졌다. 이는 액상 흐름이 약화되고 기상 성분이 증가하면서 구조 진동의 전달이 줄어든 결과이다. 제안 구조는 초기 오관정 없이 종료 전이를 검출하였다.

4.4. 이상 회수 사례

Fig. 5의 이상 회수 사례에서는 낮은 전체 에너지 위에 간헐적 스파이크가 반복되거나, 저-중간 수준의 불안정한 활성 패턴이 지속된다. 이는 체결부 또는 배출부의 부분 막힘과 같이 유동의 연속성이 무너진 상황과 잘 대응한다. 따라서 이상 회수 판정에는 평균 진폭보다 블록별 최대값과 분위값의 관계, 피크 개수, 스파이크 억제 규칙이 더 효과적이다.

(b) 포락선의 변동 양상이 Fig. 4(b)에 비해 시각적으로 더 고주파적으로 보이는 것은 이상 회수 상태의 신호 특성 때문이다. 정상 회수에서는 액상의 연속 유동에 의해 포락선이 비교적 큰 시정수로 부드럽게 변동하는 반면, 이상 회수에서는 막힘에 의한 불연속 재개 충격이 짧은 간격으로 반복되어 포락선에 더 빠른 진폭 변동이 나타난다. 시각화 시간 축 스케일은 두 그림에서 동일하며, 따라서 본 차이는 표시 스케일이 아닌 물리 신호 특성의 차이를 반영한다.

(c) 패턴의 막대그래프는 4초 블록별 $r_{p90}^{(k)}$ 및 $r_{max}^{(k)}$ 이며, 적색 세로선은 알고리즘이 이상 회수 경보를 발생시킨 블록의 시작 시점을 표시한다. 본 예시 세션의 블록 1-3은 $r_{p90}^{(k)} < 0.15$ 이지만 $r_{max}^{(k)} < 2$ 이어서 식 (7)의 동시 조건을 만족하지 않아 이 단계에서는 경보가 발생하지 않았다(낮은 분포가 지속되는 “저활성” 구간). 이후 블록에서 $r_{max}^{(k)} > 2$ 의 스파이크가 추가되어 식 (7)의 두 조건이 동시에 충족되는 시점에 이상 회수 경보가 발생하였다.

4.5. 종료 전이 미검출 사례 분석

종료 전이 20세션 중 3세션에서 알고리즘이 전이를 검출하지 못하였다. Table 3는 검출된 17세션과 미검출 3세션의 정량 비교이다. 미검출 세션은 (i) 회수 속도(세션 평균 질량 유량)가 검출 세션 대비 평균 약 35% 수준으로 매우 낮았고, (ii) 그 결과 1초 평균 포락선의 감쇠 기울기 β 가 검출 임계 $\beta_{th} = -0.005/s$ 를 충족하지 못한 $-0.0028 \pm 0.0003/s$ 수준이었으며, (iii) 종료 전이 구간 평균 활성 비율도 0.48로 검출 세션의 0.34에 비해 오히려 높게 유지되었다. 즉, 회수 흐름이 매우 느려 종료 전이가 “완만한 감쇠”로 길게 퍼진 결과, 본 알고리즘의 시간 척도(30 s 윈도우)에서는 통계적으로 유의한 감쇠로 인식되지 않은 것이다. 미검출 사례에 대한 개선 방향으로 (i) 감쇠 기울기 추정 윈도우를 적응적으로 확장(예: 60~120 s)하여 느린 감쇠를 더 긴 시간 척도에서 평가하는 다중 척도 추정, (ii) 절대 감쇠 기울기 대신 무차원 감쇠 비율($\bar{z}[m]$ 의 상대 감소율)을 보조

Table 3. Quantitative comparison of detected (17) and undetected (3) end-of-recovery transition sessions

Metric	Detected (N=17)	Undetected (N=3)
Mean recovery flow-rate ratio ^a		0.35±0.05
Decay slope β (/s)	-0.012±0.004	-0.0028±0.0003
End-of-recovery transition activity ratio	0.34±0.10	0.48±0.06
Transition-interval length (s)	42±14	110±22

^aNormalized so that the mean flow rate of detected sessions equals 1.00.

지표로 사용, (iii) 회수 탱크 측 중량 변화율을 보조 입력으로 결합하는 다중 센서 융합을 검토할 계획이다.

4-6. 공정 적용성

제안 시스템의 실무적 기여는 본 데이터셋에서의 분류 일치율 자체보다 작업자의 시창 모니터링 부담을 줄이고 종료 시점 판단의 일관성을 높이는 데 있다. 작업자가 시창 앞에서 장시간 대기하지 않고도 종료 전이와 이상 회수를 경보로 인지할 수 있어, 다수의 회수라인을 병렬로 관리하는 운영 효율이 향상될 것으로 기대된다. 또한 ground truth 라벨 작성 과정에서 종료 전이 세션 20건을 숙련 작업자 3명이 독립적으로 라벨링한 결과, 작업자 간 “정상 회수 종료 시점” 판정 편차는 평균 s 수준으로 관측되었다. 본 알고리즘은 동일 신호에 대해 결정론적 출력을 제공하므로 이러한 작업자 간 편차에 비해 종료 시점 판단의 재현성이 향상된다. 결과적으로 본 시스템은 시창 관찰 중심의 운전을 보완하는 보조 의사결정 수단으로 기능한다.

5. 한계점 및 향후 연구

본 연구의 한계와 향후 연구 방향을 다음과 같이 정리한다.

5-1. 데이터셋 및 적용 범위의 한계

본 연구의 향후 평가는 단일 실린더 용량(50 kg), 단일 배관 사양(외경 6 mm, SUS316L), 단일 유체(고순도 액상 암모니아), 60세션의 데이터에 한정된다. 다른 실린더 용량(10 kg부터 1 ton급까지), 다른 배관 직경(외경 3 mm~12 mm 범위), 그리고 더 큰 규모의 데이터셋(목표 300세션 이상)에 대한 확장 검증이 필요하다. 또한 본 연구의 임계값은 평가에 사용한 동일 60세션의 분포로 설정되었으므로(3.3절), 성능 수치는 독립 외부 검증이 아닌 후향적 가능성 평가로 해석해야 한다. 향후에는 leave-one-session-out 교차검증이나 별도로 취득한 독립 데이터셋을 이용한 train/test 분리 평가로 일반화 성능을 정량화할 필요가 있다.

5-2. 다른 특수 가스로의 일반화

본 방법론은 “액상 우세 회수에서 기상 우세 종료로 전이되는 가압 액상 가스”라는 공통 물리 구조에 의존하므로, 상온 또는 저온 가압 조건에서 액상으로 저장·회수되는 다른 특수 가스 회수 공정으로의 확장이 원리적으로 가능하다. 예를 들어 BCl(끓는점 12.6 °C, 반도체용 도핑 가스), 무수 HCl(가압 액화 시 약 40 bar), DCS(SiHCl, 끓는점 8.3 °C) 등은 액상 보관·회수 운전이 가능하여 동일 분류 체계를 적용할 수 있다. 다만 가스 종류와 운전 압력에 따라 (i) 세션별 기준 진폭 A_{on} 의 절대 수준과 onset 검출의 K계수, (ii) r_{p90}/r_{max} 임계값(low/high, 스파이크 임계), (iii) 감쇠 기울기 임계 β_{th} 는 가스별로 재교정이 필요하다. 반면 정규화 절차(세션별 A_{on} , E_0 기반 정규화), 다중 시간 척도(블록/포락선/장시간) 분리 구조, EMA 시정수 선택 기준 등 알고리즘의 구조적 골격은 그대로 유지될 수 있을 것으로 예상된다.

5-3. 알고리즘 측면

규칙 기반 상태기는 해석 가능성과 임베디드 실시간 처리에 유리하나, 임계값을 운전 조건에 따라 자동 보정하지 못하는 한계가 있

다. 향후 (i) 소규모 라벨 데이터로 임계값을 운전 조건별로 적응적으로 학습하는 준지도 보정, (ii) 다중 센서 융합(배관 외벽 진동 + 회수 탱크 중량 + 압력) 기반 강건성 향상, (iii) 미검출 사례에서 관찰된 “완만한 종료 전이”에 대응하기 위한 다중 시간 척도 감쇠 추적을 추가로 연구할 계획이다.

6. 결 론

본 연구는 암모니아 회수라인에서 배관 외벽 진동을 이용하여 종료 전이와 이상 회수를 판정하는 비침습 실시간 모니터링 방법을 제안하였다. 제안 방법은 회수 개시 과도응답 기반 세션별 기준 진폭 설정, 블록 기반 통계 지표, 포락선 기반 액·기상 판정, 장시간 감쇠 추적을 결합한 다단계 규칙 기반 상태기에 기반한다. 정상 회수는 지속적 활성 패턴으로, 종료 전이는 점진적 감쇠로, 이상 회수는 저에너지 배경 위의 간헐적 스파이크로 식별되었다. 총 60세션(운전 상태별 각 20세션)의 후향 평가에서 정상 회수 및 이상 회수 판정 일치율 100%, 종료 전이 검출 성공률 85%(17/20), 전체 판정 일치율 95%(57/60)를 보였다. 본 방법은 시장 관찰 중심의 운전을 보완하여 작업자의 모니터링 부담을 줄이고 회수 종료 판단의 일관성을 높이는 실용적 수단으로 기능한다. 향후 데이터 확대와 다른 특수 가스 회수 공정으로의 일반화 검증이 진행될 예정이다.

감 사

본 연구는 코아텍 주식회사 기업연구소의 지원으로 수행되었습니다. 연구 수행에 도움을 주신 코아텍 주식회사 기업연구소께 감사드립니다.

Nomenclature

A_{on}	: 99th-percentile absolute amplitude over the 0.25 s window immediately after onset (session-specific baseline amplitude), ADC counts
b	: Intercept of the 1-s mean-envelope regression
$\mathcal{B}_k$	: Set of absolute-amplitude samples of the k -th block
E_0	: Envelope $e[n]$ median over the 1 s^{-3} reference window after onset, ADC counts
$e[n]$	: Envelope value at sample n (exponential moving average)
f_s	: Sampling frequency, 16 kHz
K	: Onset-decision multiplier (recovery starts when $K \cdot M_0$ is exceeded), $K = 8$
k	: Block index (4 s block)
L	: Block length (number of samples, corresponding to 4 s, $L = 4f_s$)
M_0	: Median absolute amplitude over the IDLE interval (background-noise baseline), ADC counts
m	: 1-s window index (1 s)
$N_{0.25}$	: Number of samples corresponding to 0.25 s, $[0.25f_s]$
n	: Sample index ($f_s = 16\text{ kHz}$)
n_{on}	: Sample index at onset
$Q_p(\cdot)$	: The p -th percentile operator of a set

r_{act}	: Activity ratio, Eq. (10) (dimensionless)
$r_{max}^{(k)}$	: Normalized maximum amplitude of the k -th block (dimensionless)
$r_{p90}^{(k)}$	: Normalized 90th-percentile amplitude of the k -th block (dimensionless)
$s[n]$	: Input vibration signal at sample n
W	: Activity-ratio evaluation window (1 s)
$x[n]$	: Instantaneous absolute amplitude at sample n , $x[n] = s[n] $, ADC counts
$z[n]$	: Normalized envelope at sample n , Eq. (9) (dimensionless)
$\bar{z}[m]$	: Mean normalized envelope of the m -th 1-s window, Eq. (11) (dimensionless)

Greek symbols

α	: EMA weight, $\alpha = 1/(\tau f_s)$
β	: Long-term decay slope of the 1-s mean envelope (1/s)
β_{th}	: Decay-slope threshold for end-of-recovery transition detection, $-0.005/\text{s}$
ϵ	: Small positive constant to avoid division by zero
η_m	: Residual of the 1-s mean-envelope regression
τ	: Time constant of the envelope exponential moving average, 0.05 s
θ_{act}	: Activity-ratio decision threshold, 0.3

References

- 99 U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *EIIP Volume II, Chapter 6: Methods for Estimating Air Emissions from Semiconductor Manufacturing*, U.S. EPA, available at <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/ii06.pdf>(accessed 2026).
- Zhang, G., Hui, B., Xu, Z., Zhou, B., Sundén, B. and Cao, Z., “A Review of Calibration Standards, Devices and Methods for Gas Flow in Semiconductor Manufacturing Processes,” *Flow Meas. Instrum.*, **101**, 102753(2025).
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Ammonia*, Centers for Disease Control and Prevention, available at <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0028.html> (accessed 2026).
- Miwa, S. and Hibiki, T., “State-of-the-art in Plant Component Flow-induced Vibration (FIV),” *Exp. Comput. Multiph. Flow*, **2**, 1-12(2020).
- Khan, U., Pao, W. and Sallih, N., “A Review: Factors Affecting Internal Two-phase Flow-induced Vibrations,” *Appl. Sci.*, **12**(17), 8406(2022).
- Liu, G., Hao, Z., Wang, Y. and Ren, W., “Research on the Dynamic Responses of Simply Supported Horizontal Pipes Conveying Gas-liquid Two-phase Slug Flow,” *Processes*, **9**(1), 83(2021).
- Su, H., Qu, Y., Wang, G. and Peng, Z., “Investigation on Two-phase Flow-induced Vibrations of a Piping Structure with an Elbow,” *Appl. Math. Mech. (Engl. Ed.)*, **43**(11), 1657-1674(2022).
- Ishii, M. and Hibiki, T., “Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow,” 2nd ed., Springer, New York(2011).
- Taitel, Y. and Dukler, A. E., “A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow,”

- AIChE J.*, **22**(1), 47-55(1976).
10. Bratland, O., "Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance," 1st ed., Self-published online textbook(2010).
 11. Shang, Y., Wang, C., Zhang, Y., Zhao, W., Ni, J. and Peng, G., "Non-intrusive Pipeline Flow Detection Based on Distributed Fiber Turbulent Vibration Sensing," *Sensors*, **22**(11), 4044(2022).
 12. Ali, S., Jin, G. and Fan, Y., "Characterization of Gas-liquid Two-phase Slug Flow Using Distributed Acoustic Sensing in Horizontal Pipes," *Sensors*, **24**(11), 3402(2024).
 13. Lu, H., Iseley, T., Behbahani, S. and Fu, L., "Leakage Detection Techniques for Oil and Gas Pipelines: State-of-the-art," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, **98**, 103249(2020).
 14. Xu, C., Gong, P., Xie, J., Shi, H., Chen, G. and Song, G., "An Acoustic Emission Based Multi-level Approach to Buried Gas Pipeline Leakage Localization," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **44**, 397-404(2016).
 15. Li, L., Yang, K., Bian, X., Liu, Q., Yang, Y. and Ma, F., "A Gas Leakage Localization Method Based on a Virtual Ultrasonic Sensor Array," *Sensors*, **19**(14), 3152(2019).
 16. Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N. and Nandi, A. K., "Applications of Machine Learning to Machine Fault Diagnosis: A Review and Roadmap," *Mech. Syst. Signal Process.*, **138**, 106587(2020).
 17. Dai, X. and Gao, Z., "From Model, Signal to Knowledge: A Data-driven Perspective of Fault Detection and Diagnosis," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, **9**(4), 2226-2238(2013).
 18. Kletz, T. A. and Amyotte, P., "What Went Wrong? Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided," 6th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford(2019).
 19. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), *Hazardous Ammonia Release at Cuisine Solutions, Inc. Facility*, Investigation Report, Sterling, VA, July 31, 2024, released September 25, 2025, available at <https://www.csb.gov/cuisine-solutions-ammonia-release-/>(accessed 2026).
 20. Syntiant, *V2S200D Multimode Digital Vibration Sensor Datasheet Rev B-1*, Syntiant Corp.(2024). Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/1651/V2S200D-3598207.pdf>
 21. Espressif Systems, *ESP32-S3 Series Datasheet v2.2*, Espressif Systems (2026). Available: https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf

Authors

Sayeong Jun: Researcher, Seounsai AI Co., Ltd., wjstkdud4040@naver.com

Hyodong Shin: Researcher, Coretech Co., shd@coretech21c.co.kr

Seojung Moon: Researcher, Seounsai AI Co., Ltd., moonsj2001@gmail.com