

## 배관 체계 자율 복구 알고리즘 비교, 분석 및 고찰

양대원\* · 이정훈\*\* · 신윤희\*\*\*†

# Examination on Autonomous Recovery Algorithm of Piping System

Dae Won Yang\* · Jeung-hoon Lee\*\* · Yun-Ho Shin\*\*\*†

### †Corresponding Author

Yun-Ho Shin

Tel : +82-43-261-2461

E-mail : shinyh77@cbnu.ac.kr

Received : March 12, 2021

Revised : July 1, 2021

Accepted : August 6, 2021

**Abstract** : Piping systems comprising pumps and valves are essential in the power plant, oil, and defense industry. Their purpose includes a stable supply of the working fluid or ensuring the target system's safe operation. However, piping system accidents due to leakage of toxic substances, explosions, and natural disasters are prevalent. In addition, with the limited maintenance personnel, it becomes difficult to detect, isolate, and reconfigure the damage of the piping system and recover the unaffected area. An autonomous recovery piping system can play a vital role under such circumstances. The autonomous recovery algorithms for the piping system can be divided into low-pressure control algorithms, hydraulic resistance control algorithms, and flow inventory control algorithms. All three methods include autonomous opening/closing logic to isolate damaged areas and recover the unaffected area of piping systems. However, because each algorithm has its strength and weakness, appropriate application considering the overall design, vital components, and operating conditions is crucial. In this regard, preliminary research on algorithm's working principle, its design procedures, and expected damage scenarios should be accomplished. This study examines the characteristics of algorithms, the design procedure, and working logic. Advantages and disadvantages are also analyzed through simulation results for a simplified piping system.

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : autonomous piping system, autonomous recovery algorithm, rupture detection and isolation, damage control

## 1. 서론

발전소, 대형 플랜트, 방산 설비를 포함하는 대부분의 주요 산업 군에서는 냉각, 소화, 방수 등을 목적으로 펌프 및 밸브를 이용하여 일정 압력 이상을 유지하는 배관 설비가 필수적으로 설계·도입된다<sup>1,2)</sup>. 그러나 배관 체계 노후화, 부주의, 테러 위협 등에 따른 누출, 폭발에 의한 사건·사고가 지속적으로 발생 및 예상되고 있으며, 이는 심각한 경제적 손실, 인명피해 및 환경문제를 초래할 수 있다<sup>3,6)</sup>. 이러한 사고의 피해를 최소화하기 위해 배관 체계를 이루는 부품들의 고장 신호의 특성 분석, 누출 감지 시스템 설계 및 누출 시 화학물질 이송을 위한 예비 탱크를 설계하는 등 신속한

상황 감지 및 사고 대응을 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다<sup>5-8)</sup>. 그러나 플랜트 및 관련 기기들이 대형화·고도화되어 감에 따라 배관 체계의 복잡도 및 규모가 커지고 있고, 제한된 유지 보수 인력이 손상을 탐지, 차단 및 재가동하는데 어려움이 가중되고 있으며<sup>9)</sup>, 이는 배관 체계 자율 복구체계에 대한 개발 필요성을 증가시키고 있다.

자율 배관 복구체계는 손상 제어가 가능한 위치에 설치된 밸브를 이용하여 해당 지점에서 획득 가능한 정보를 활용하여 시스템의 손상된 지점을 탐지하고 작업자의 개입 없이 손상 구역을 최소화하여 차단하고 배관을 복구하는 시스템이다<sup>10-12)</sup>. 기존에 제안된 자율 복구체계는 손상 탐지 및 복구 방법에 따라 순차 분리

\*충북대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

\*\*창원대학교 기계공학부 교수 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

\*\*\*충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

형 제어 알고리즘(Low pressure control algorithm), 단독 판단형 제어 알고리즘(Hydraulic resistance control algorithm), 통신형 제어 알고리즘(Flow inventory control algorithm) 등으로 구분할 수 있다<sup>10-13)</sup>. 국외의 선행 연구들은 배관 체계 자율 복구 알고리즘에 대한 이론 개발 및 구현에 초점을 맞추어 연구가 진행되었기에 각 알고리즘의 장단점 및 설계 방법, 구현의 용이성 등에 대한 비교·분석·고찰에 대한 연구가 비중 있게 수행되지 않았으며, 국내에서는 해당 연구가 수행된 사례가 없다. 기존의 배관 체계 자율 복구 알고리즘은 그 특성에 따라 장단점이 존재하기 때문에 대상 설비의 규모 및 배관 설계(안)를 고려하여 이에 적합한 알고리즘을 선정하여 적용해야 하며, 한계점을 고려하여 설계를 진행하기 위하여 각 알고리즘의 특징을 비교/분석하는 과정이 충분히 선행되어야 한다. 즉, 배관 체계 자율 복구 알고리즘의 적용에 앞서 작동 원리, 설계 방법, 적용 용이성, 손상 시나리오 별 복구 성능 등에 대한 비교·분석을 통해 장·단점을 고찰하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존에 제안된 대표적인 배관 체계 자율 복구 알고리즘들에 대한 기본 이론을 바탕으로 각 알고리즘의 작동 원리와 손상 탐지 및 복구 과정을 비교·설명하고, 설계 절차, 적용의 용이성, 제어 이론의 장단점 등을 제시하고자 한다. 또한, 단순 배관 체계에 대한 1차원 유동해석 모형을 이용하여 제어기를 포함하는 모사 실험을 통해 각 알고리즘의 특징을 비교, 분석하고자 한다. 즉, 단순화된 배관 체계를 대상으로 각 알고리즘에 대한 설계 절차를 적용하는 과정을 기술하고, 발생 가능한 손상 시나리오에 대한 모사 실험 결과로부터 각 알고리즘의 장단점을 제시하고자 한다.

## 2. 배관 체계 자율 복구 알고리즘 검토 및 설계

본 장에서는 세 가지 배관 체계 자율 복구 알고리즘의 이론 및 작동 방식을 단순화된 배관 계를 이용하여 설명하고, 각 알고리즘의 설계 절차를 제안한다.

### 2.1 순차 분리형 제어 알고리즘 (Low Pressure Control Algorithm)

순차 분리형 제어 알고리즘은 배관 계의 밸브 압력 값을 기준으로 이분법적 사고를 이용하여 손상 위치를 탐지한다. 배관 계를 양분할 수 있는 위치의 밸브를 우선적으로 차단하고, 양분된 구역상의 압력 정보를 활용하여 손상 구역을 좁혀가는 방식으로 손상 구역을 최소화하여 배관 계를 복구한다. 즉, Fig. 1과 같이 양

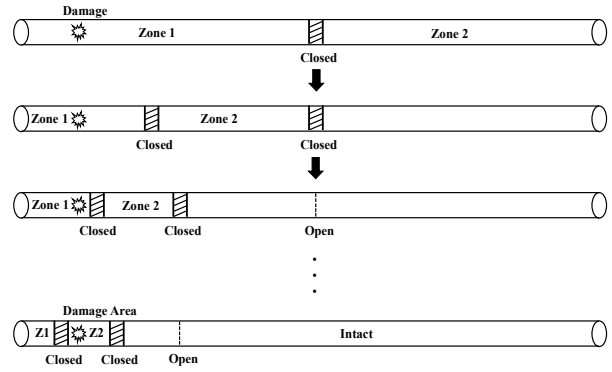


Fig. 1. Low pressure control algorithm.

분화된 구역에서 압력이 복구되지 않는 구역을 손상이 위치하는 구역으로 분류하고 이를 기준으로 다시 양분하는 방식으로 손상 위치를 탐지한다.

Fig. 1에 도시한 순차 분리형 제어 알고리즘의 작동 원리를 4개의 자율 제어 밸브가 포함된 배관 계를 이용하여 설명하면 Fig. 2와 같다.

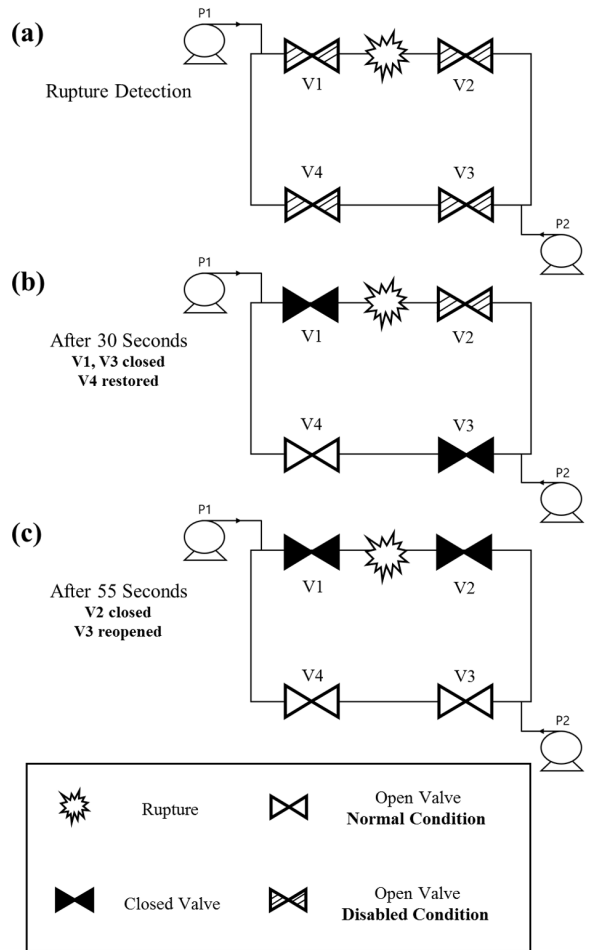


Fig. 2. Operation procedure of low pressure control algorithm.

**Table 1.** Priority design example for LPC algorithm

Priority	Closing valve candidates	Delay time
Priority #1	Valve #1, Valve #3	30 sec
Priority #2	Valve #2, Valve #4	55 sec

순차 분리형 제어 알고리즘은 밸브 구동부 개폐 속도를 반영하여 폐쇄 우선순위 및 작동 지연시간을 설계한다. 밸브의 작동 시간을 1차 개폐 타이밍으로 선정하면, 밸브 작동으로 인한 배관 압력 변화 시점을 고려하여 후순위 밸브군의 작동 타이밍을 설계한다. Fig. 2는 밸브 #1과 #2 사이에 손상이 발생한 상황에서 순차 분리형 제어 알고리즘을 이용하여 손상을 탐지 및 복구하는 과정을 도시하였으며, 밸브 작동 시간을 30초로 가정한 알고리즘 설계 예시는 Table 1과 같다. 우선순위가 최상단인 밸브들은 밸브 개폐 시간을 반영하여 설계하였으며, 후순위 밸브들은 배관 압력 변화 시점을 고려하여 설계하였다.

제어기 기본 이론 및 제안된 설계 절차로부터 순차 분리형 제어 알고리즘의 작동 순서를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배관 손상 여부 탐지 (Fig. 2a)
- 2) 순차적인 차단 대상 밸브 후보군 분류 (Table 1)
- 2) 폐쇄 우선순위 기반 배관 계 양분을 위한 밸브 #1, #3 차단 (Fig. 2b)
- 3) 순차적인 차단 대상 밸브 후보군 재분류 (Table 1)
- 4) 폐쇄 우선순위 기반 밸브 #2 차단 (Fig. 2c)
- 5) 손상 구역을 최소화한 배관계 복구

차단 우선순위가 높은 밸브 #1과 #3이 폐쇄됨에 따라 밸브 #4의 압력이 정상상태로 복구되므로 손상 구역 최소화를 위한 차단 대상 밸브 후보군에서 제외되고, 다음 순위 밸브 후보군 중 압력이 복구되지 않은 밸브 #2만 차단된다. 손상 위치에 가장 가까운 밸브 #1과 #2가 차단되어 배관 계가 손상을 최소화하면서 복구되었으므로 손상 부위를 제외한 배관 전체의 압력이 복구되어 밸브 #3은 다시 열리게 되어 배관계 복구가 완료된다.

**2.2 단독 판단형 제어 알고리즘 (Hydraulic Resistance Control Algorithm)**

단독 판단형 제어 알고리즘은 식 (1)로 정의되는 유체저항(Hydraulic resistance)을 활용하여 손상 위치를 추정하고 제어한다<sup>10,12)</sup>.

$$R_H = \frac{P_D}{Q^2} \tag{1}$$

where  $R_H$  = hydraulic resistance,  $Pa/gpm^2$

$P_D$  = down stream pressure,  $Pa$

$Q$  = flow rate,  $gpm$

유체 저항은 해당 지점에서의 압력과 유량을 이용하여 이를 무차원화하는 식으로 정의되나, 일반적으로 배관 유량을 예측하는 것은 설치가 어렵고 예측 불확도가 높다. 이에 유체저항에 기반하여 단독으로 손상 위치를 판단하는 제어 알고리즘은 밸브의 입·출구의 압력을 측정하고 식 (2)로 정의되는 베르누이 식을 이용하여 해당 지점의 유량을 간접적으로 추정하는 방식으로 구현된다<sup>10)</sup>.

$$P_A + \rho gh_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = P_B + \rho gh_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 \tag{2}$$

where  $P$  = pipeline pressure,  $Pa$

$v$  = fluid velocity,  $m/s$

$\rho$  = density,  $kg/m^3$   $h$  = height,  $m$

$g$  = acceleration due to gravity,  $9.81m/s^2$

배관 상의 밸브 위치에서 예측되는 압력을 이용하여 배관 손상 여부를 우선적으로 판단하고, 간접적으로 추정된 유량을 이용하여 수원과 손상 지점 사이 경로에 해당 밸브가 위치하고 있는지 여부를 판단한다. 손상 경로 상에 밸브 위치 여부는 유동 시뮬레이션 혹은 실측 등을 통해 손상 배관으로 흐르는 유량(압력차)를 추정하고 이를 활용하여 기준값을 설계한다. 손상 경로 상에 위치하는 밸브 개폐 우선순위는 각 펌프에서 밸브까지의 거리를 시계방향(CW)과 반시계 방향(CCW)으로 계산한 후에 각 방향별 최단거리를 산정하여 수원에 해당하는 펌프로부터 가정 멀리 위치한 밸브에 차단 우선순위를 부여하는 방식으로 설계한다. 즉, 유량의 방향에 따라 시계방향과 반시계 방향으로 수원으로부터 가장 거리가 먼 밸브부터 설계된 시간 지연에 따라 밸브를 차단하면서 손상 구역을 최소화하는 조합을 도출하여 배관을 복구하도록 설계한다.

단독 판단형 제어 알고리즘의 작동 원리 및 설계 예시를 4개의 자율 제어 밸브가 포함된 배관 계를 이용하여 설명하면 Fig. 3과 같다. 밸브 #1과 #2 사이에 손상이 발생한 상황에서 단독 판단형 제어 알고리즘을 이용한 손상 탐지 및 복구 과정을 도시하였으며, 밸브의 위치 및 구동부의 차단 시간을 고려한 폐쇄 우선순위 및 작동 지연시간 설계 예시는 Table 2와 같다.

Table 2. Closing timing design example for HRC algorithm

Valve	Pump 1[sec]		Pump 2[sec]		Total[sec]	
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW
Valve 1	1 [40]	4 [10]	3 [20]	2 [30]	1 [40]	2 [30]
Valve 2	2 [30]	3 [20]	4 [10]	1 [40]	2 [30]	1 [40]
Valve 3	3 [20]	2 [30]	1 [40]	4 [10]	1 [40]	2 [30]
Valve 4	4 [10]	1 [40]	2 [30]	3 [20]	2 [30]	1 [40]

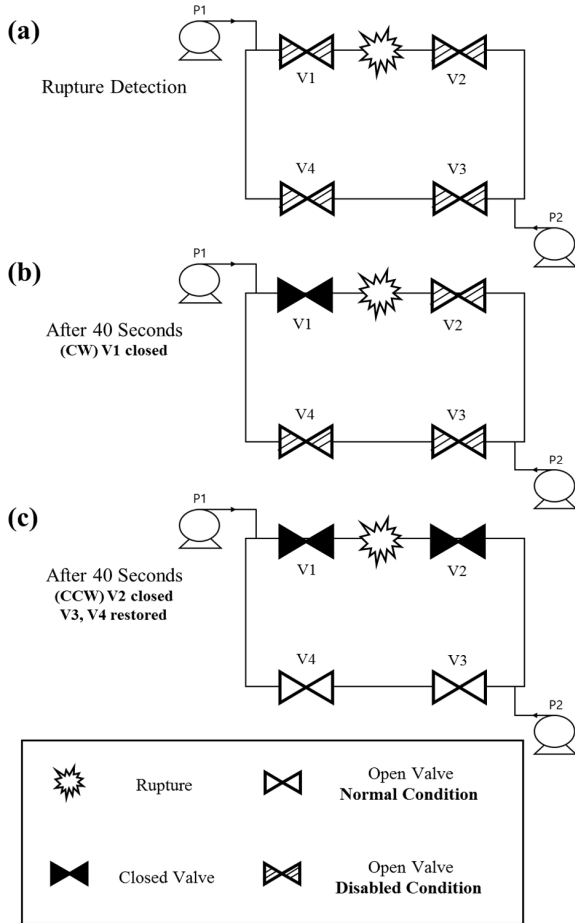


Fig. 3. Operation procedure of hydraulic resistance control algorithm.

제어기 기본 이론 및 제안된 설계 절차로부터 단독 판단형 제어 알고리즘의 작동 순서를 설계 기준과 함께 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배관 손상 여부 탐지(Fig. 3(a))
- 2) 유량(압력차) 기준 손상 경로 상의 밸브 분류 (식 3)

$$Q \propto \sqrt{P_I - P_O} = \sqrt{\Delta P} \quad (3)$$

$$\Delta P_{rupture} > \Delta P_{Criteria}$$

$$\therefore \Delta P_{v1}, \Delta P_{v2} > \Delta P_{Criteria} > \Delta P_{v3}, \Delta P_{v4}$$

- 3) 폐쇄 우선순위 기반 밸브 #1 차단(Fig. 3(b))
- 4) 폐쇄 우선순위 기반 밸브 #2 차단(Fig. 3(c))
- 5) 손상 구역을 최소화한 배관계 복구

Table 2에 기술한 밸브 작동 지연시간 설계(안)를 기반으로 손상 부위에 인접한 밸브 #1과 #2가 순차적으로 차단된다. 이는 손상 경로 상에 수원(펌프)과 가장 거리가 먼 밸브가 먼저 차단되는 방식이며, 수원과의 거리를 판단할 때 유량의 방향 정보를 함께 이용하여 지연시간을 결정한다.

### 2.3 통신형 제어 알고리즘 (Flow Inventory Control Algorithm)

통신형 제어 알고리즘은 자율 제어 밸브 사이의 구간을 세그먼트(Segment)로 정의하고 정상 상태에서 세그먼트의 입·출구단을 통과하는 질량 유량이 일정하다는 질량 보존 법칙을 활용하여 손상 위치를 탐지한다<sup>10,12)</sup>. 즉, 단위 세그먼트를 기준으로 경계부에 위치하는 자율 제어 밸브 간의 통신을 통해 질량 유량의 보존 여부를 식 (4)와 같이 확인한다.

$$\sum \rho_I A_I U_I = \sum \rho_O A_O U_O \quad (4)$$

통신형 제어 알고리즘은 밸브들을 그룹화하는 세그먼트 정의부터 설계를 진행한다. 이는 배관 내 자율 차

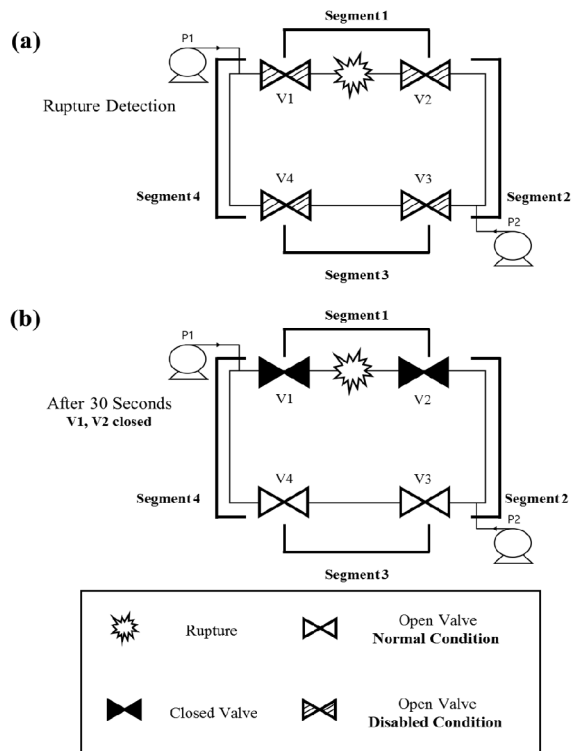


Fig. 4. Operation procedure of flow inventory control algorithm.

단 밸브의 배치 설계와 함께 수행되어야 하며, 배치된 밸브들의 유량의 합은 항상 '0'이 되어야 한다. 다만, 유량을 대변하는 계측 압력 센서의 노이즈, 제어기, 변환기 등의 잡음 수준을 고려하여 0이 아닌 일정 수준 이상의 값이 되도록 설계한다. 통신형 제어 알고리즘은 세그먼트 내부 밸브 간 통신을 통해 손상 여부를 관찰하기 때문에 배관계의 복잡도와 상관없이 설계 절차가 단순하다.

통신형 제어 알고리즘의 작동 원리를 4개의 자율 제어 밸브가 포함된 배관 계를 이용하여 설명하면 Fig. 4와 같으며, 알고리즘의 작동 순서를 요약하면 다음과 같다.

제어기 기본 이론 및 제안된 설계 절차로부터 통신형 제어 알고리즘의 작동 순서를 설계 기준과 함께 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배관 손상 여부 탐지(Fig. 4(a))
- 2) 단위 세그먼트 유량(압력차)의 차이 기준 손상 위치 탐지(식 5, 6)

$$\begin{aligned}
 Seg_1 &= \sqrt{\Delta P_{v1} - \Delta P_{v2}} \\
 Seg_2 &= \sqrt{\Delta P_{v2} - \Delta P_{v3}} \\
 Seg_3 &= \sqrt{\Delta P_{v3} - \Delta P_{v4}} \\
 Seg_4 &= \sqrt{\Delta P_{v4} - \Delta P_{v1}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$Seg_1 > \sqrt{\Delta P_{criteria}} > Seg_2, Seg_3, Seg_4 \tag{6}$$

- 3) 손상 세그먼트 경계부 밸브 차단
  - 4) 손상 구역을 최소화한 배관계 복구
- 밸브 #1과 #2를 경계부로 하는 세그먼트에 손상이 발생한 상황에서 통신형 제어 알고리즘이 손상을 탐지 및 복구하는데, 밸브 유량을 계산한 후 밸브 간 통신을 통해 유량 차이를 계산하고 유량의 차이가 기준 값을 초과하는 세그먼트를 손상 구역이라고 판단하여 Fig. 4(b)와 같이 밸브 #1, #2를 차단하고 배관 체계를 복구한다.

### 3. 모사 실험 기반 배관 자율 복구 알고리즘 구현 및 고찰

본 장에서는 2장에서 기술한 자율 손상 복구 알고리즘을 구현하여 그 장단점을 비교·분석하고자 한다. 이를 위하여 단순 배관 체계 모사 실험 모델을 제안하고 각 알고리즘을 모사 실험 모델에 적용하여 사고 대응 결과를 분석하고자 한다. 모사 실험을 위한 유동해

석 모델링, 해석 및 제어기 구현은 공학용 소프트웨어(Matlab Simulink & Simscape, MathWorks 2020b)를 이용하였다.

#### 3.1 배관 체계 모사 실험 모형 구현

모사 실험을 위한 1D 유동해석 모델은 Fig. 5(a)와 같은 단순 배관계를 이용하였으며, 관련 세부 사양은 Table 3에 기술하였다. 자율 복구 알고리즘을 적용하기 위한 자율제어 밸브는 가변 오리피스형 밸브 바디에 30초의 작동 시간을 요구하는 모터 구동부를 포함하고, 밸브 전, 후단에 알고리즘 구현에 필요한 압력 값 측정을 위한 센서부로 구성되어 있으며, 이를 공학용 소프트웨어(Matlab Simulink & Simscape) 상에서 Fig. 5(b)와 같이 모델링 하였다. 단순 배관계에서 모사 실험 시 손상 조건은 정상 배관에 대해 기설계된 위치에서 500초경에 발생하도록 설정하였으며, 향후 배관계 실험 장치 구현 시 지속적인 수원 확보 등을 위하여 손상은 확장 배관을 이용하여 배관 저항을 낮추는 방향으로 모델링 하였으며 순환형 배관계로 구성하였다. 모사 실험을 위한 배관계에 모델링 결과는 Fig 5(c)와 같다.

Table 3. Specification on simplified piping system

Component	Parameter	Setting	
Layout	Size	2 m×1 m	
Pipe	Inner diameter	100 mm	
	Laminar friction constant (Darcy friction factor)	64	
	Roughness	0.046 mm	
	Pipe wall type	Rigid	
	Elbow	Inner diameter	100 mm
		Expansion	Inner small diameter
Inner large diameter			250 mm
Valve	Vertical diameter	260 mm	
	Opening time	3 sec	
	Flow discharge coefficient	0.7	
	Valve type	Orifice type on/off valve	
	Actuator type	Motor driven Type : 30 sec for fully valve open	
	Inner diameter	100 mm	
Pump	Pump type	Centrifugal type	
	Impeller	Flow rate	0.2 m <sup>3</sup> /min
		Rotational speed	2950 rpm
		Outer diameter	166 mm
Reservoir	Fluid volume	1000 m <sup>3</sup>	

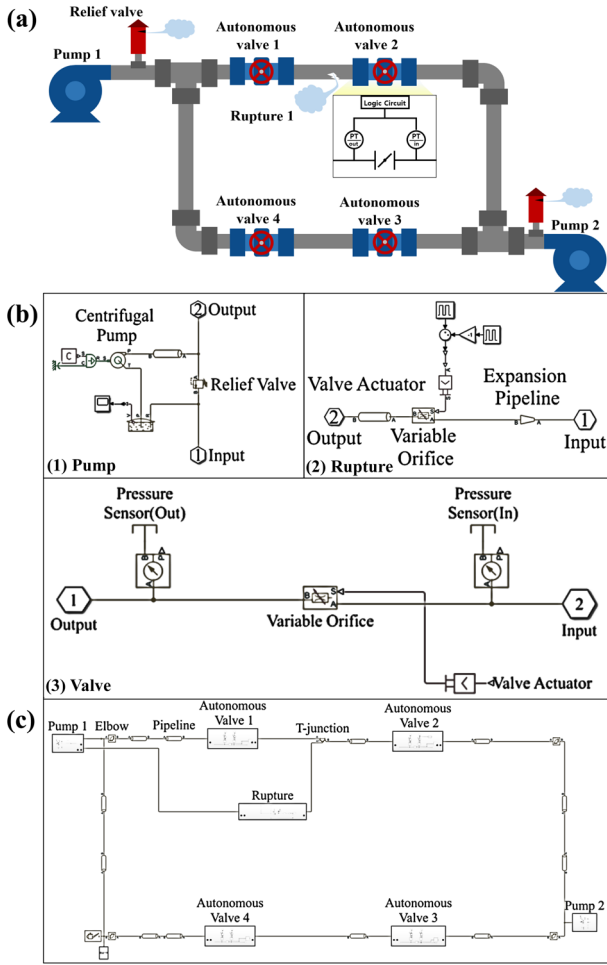


Fig. 5. Piping system model (a) schematic simulation model, (b) details of simulation model and (c) simulation model.

### 3.2 자율 복구 알고리즘 성능 고찰

알고리즘의 적용 용이성, 손상 시나리오 별 복구 성능에 대한 비교·분석을 통해 장·단점을 고찰하기 위하여 발생 가능한 손상 시나리오 3가지에 대해 모사 실험을 수행하였으며, 각 알고리즘의 손상 탐지 및 제어 방법에 따른 손상 복구 시간 차이를 비교·분석하였다.

#### 1) 작동 펌프 수

작동 펌프 수에 따른 알고리즘의 손상 복구 성능 분석을 위하여 펌프 1기가 작동하는 경우와 이중화 설계를 통한 펌프 2기가 작동하는 경우를 고려하였다.

#### 2) 손상 개소

단수/복수 손상에 따른 알고리즘의 성능 분석을 위하여 대상 배관계에 단수 및 복수 손상을 가정하여 알고리즘의 성능을 분석하였다.

#### 3) 통신형 여부

통신 여부에 따른 복구 알고리즘 성능을 분석하기 위하여 통신 단절 시 알고리즘의 작동 여부를 확인하였다.

### 3.2.1 작동 펌프 수에 따른 손상 복구 성능 고찰

작동 펌프 수에 따른 알고리즘의 손상 복구 성능 분석을 위하여 펌프 1기가 작동하는 경우와 이중화 설계를 통한 펌프 2기가 작동하는 경우를 고려하였다.

#### 1) 순차 분리형 제어 알고리즘

펌프가 1기만 작동할 때 순차 분리형 제어 알고리즘(LPC)은 설계 로직에 따라 자율 제어 밸브 1과 3이 우선적으로 차단되고 이후 밸브 2가 펌프로부터 유량을 공급받지 못하기 때문에 순차적인 차단 대상 밸브 후보군 재분류 시 후보군에서 제외되어 Fig. 6(a)와 같이 밸브 2 측은 손상을 복구하지 못한다.

#### 2) 단독 판단형 제어 알고리즘

이중화 설계가 되지 않은 경우 단독 판단형 제어 알고리즘(HRC)의 지연시간 설계는 Table 2로부터 1기의 펌프가 제외됨에 따라 Table 4와 같이 설계 변경되며, 밸브 4기에서의 압력은 Fig. 6(b)와 같다.

본 알고리즘은 펌프 1기 작동에 대해서도 각 밸브로부터 측정된 압력 값의 차를 이용하여 손상 경로 상의 밸브를 충실히 분류하여 Fig. 6(b)와 같이 손상을 제어 및 복구한다. 이는 Fig. 7(a)와 같이 설계 시 적용한 기준 압력차에 의해 가능하지만, 작동 펌프 수 증가 혹은 배관 설계 변경 시 손상 경우의 수 등을 모두 고려하여 기준 압력차를 설계해야 그 성능을 보장할 수 있다.

#### 3) 통신형 제어 알고리즘

통신형 제어 알고리즘 또한 펌프 1기 작동 시 각 세그먼트로부터 계산된 유량의 합을 대변하는 압력차의 합을 이용하여 손상 경로 상의 밸브를 분류하고, Fig. 6(c)와 같이 손상 배관 구역을 격리하고 작동 가능한 구간을 복구한다. 이는 질량보존의 법칙에 기반한 압력차의 합을 이용하여 손상 세그먼트를 분류하기 때문에 단독 판단형 제어 알고리즘 대비 강건한 특성을 가진다. 즉, 손상 판단 기준 값은 이상적으로 '0'으로 설계되며, 손상 시 유량 및 사고 시나리오 등을 고려하여 설정한 손상 판단 기준 압력차는 작동 펌프 수 등에 관

Table 4. Closing timing re-design example for HRC algorithm as pump #1 operation

Valve	Pump 1[sec]		Pump 2[sec]		Total[sec]	
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW
Valve 1	1 [40]	4 [10]	-	-	1 [40]	4 [10]
Valve 2	2 [30]	3 [20]	-	-	2 [30]	3 [20]
Valve 3	3 [20]	2 [30]	-	-	3 [20]	2 [30]
Valve 4	4 [10]	1 [40]	-	-	4 [10]	1 [40]

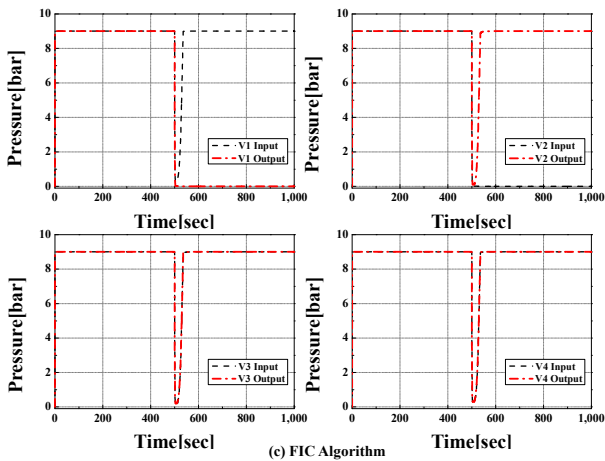
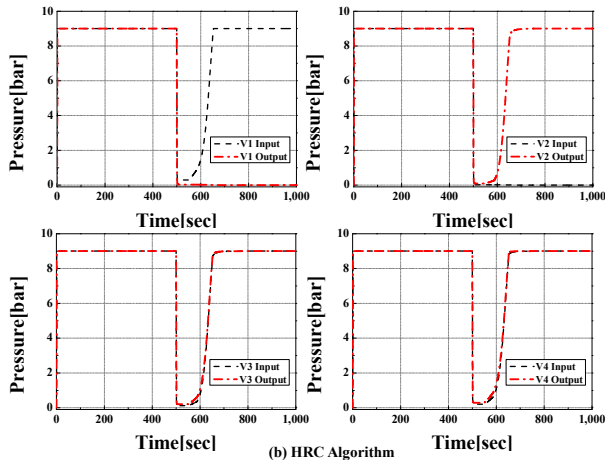
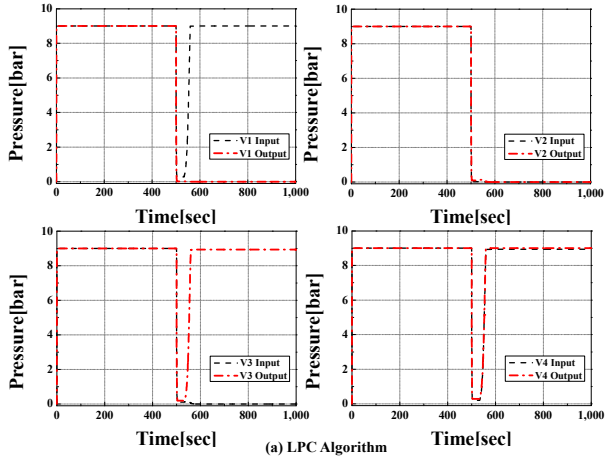


Fig. 6. Pressure data of autonomous valves for pump #1 operation using (a) LPC algorithm, (b) HRC algorithm and (c) FIC algorithm.

계없이 배관 복구가 이루어진다. Fig. 7(b)는 세그먼트 기반 손상 판단 기준값 설정 예시와 손상에 따른 각 세그먼트 별 유량의 합을 모사 실험을 통해 계산한 결과를 도시하였다.

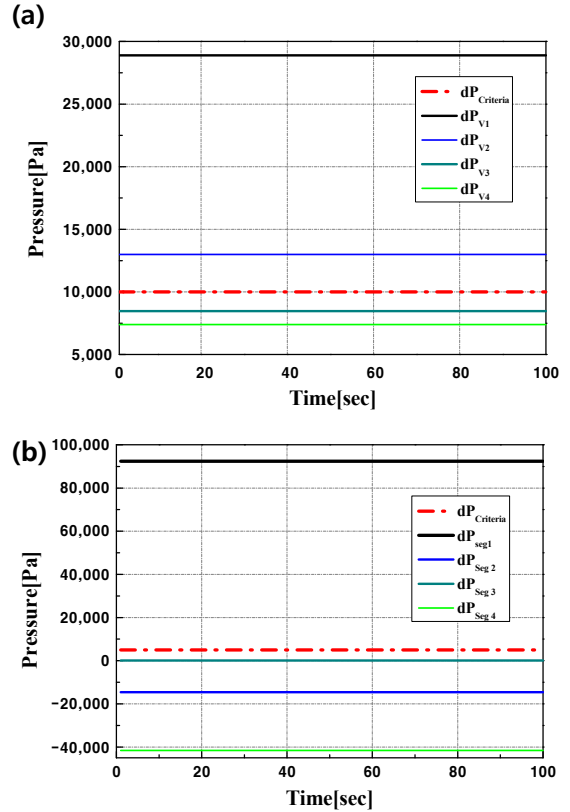


Fig. 7. Design criteria and computed results for considered rupture scenario using (a) HRC algorithm and (b) FIC algorithm.

#### 4) 알고리즘 특성에 따른 손상 복구 시간 비교

단독 판단형과 통신형 제어 알고리즘은 펌프 1기만 작동하는 배관계에서도 손상을 제어 및 복구하였지만 두 알고리즘의 복구 시간은 각각 125초, 36초로 약 90초의 차이를 보였다(Fig. 6(b), 6(c)).

단독 판단형은 손상 경로상의 밸브 중 밸브 1이 손상 발생 시점인 500초에 손상 기준값을 초과하였지만, 밸브 2는 밸브 1이 작동한 후인 555초에 손상 기준 값을 초과한다(Fig. 8). 즉, 손상 발생 75초 시점에 해당

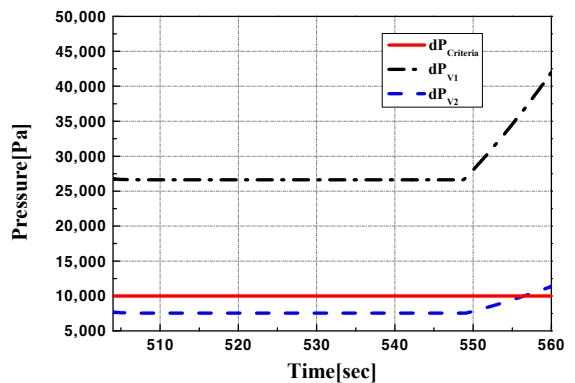


Fig. 8. Pressure difference according to HRC algorithm.

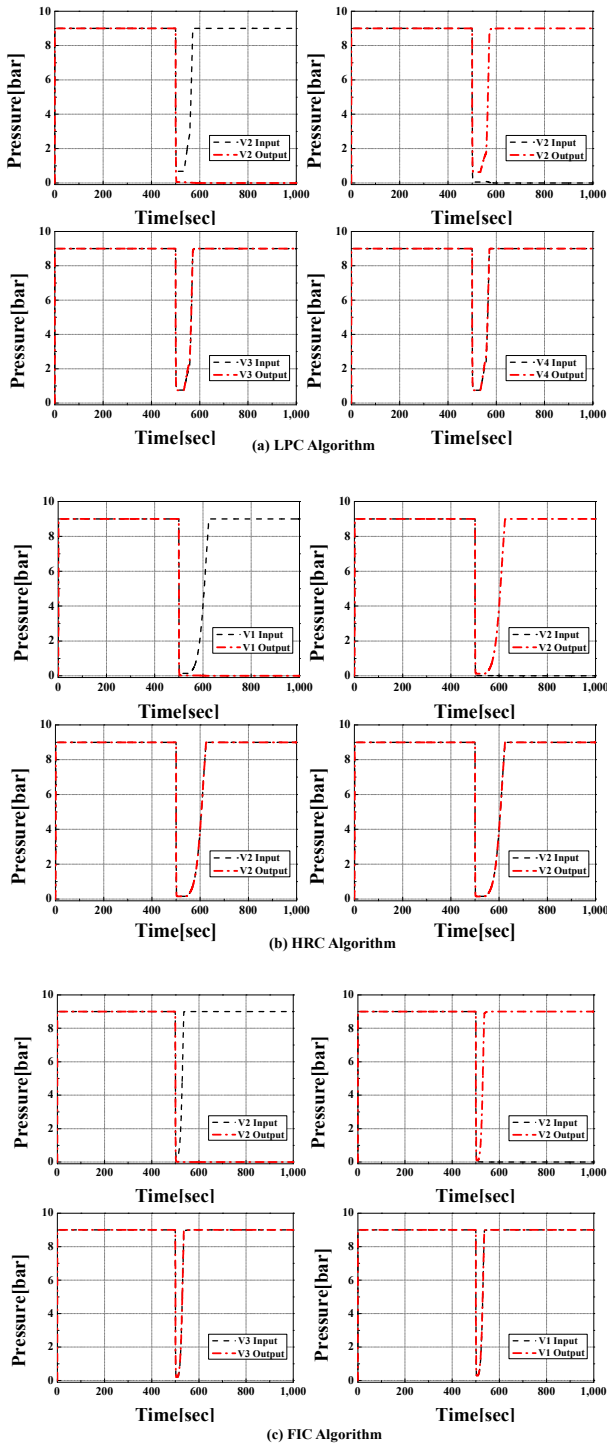


Fig. 9. Pressure data of autonomous valves for pump #1 & #2 operation using (a) LPC algorithm, (b) HRC algorithm and (c) FIC algorithm.

밸브가 손상 부위의 밸브로 인지하여 손상 발생 후 125초 만에 배관계가 완전히 복구된다. 그에 반해 통신형 제어 알고리즘은 손상 발생 직후 유량의 차를 통하여 손상 세그먼트 경계부의 밸브를 바로 차단하기 때

문에 밸브 구동부의 작동 시간을 포함하여 36초 후에 손상 부위를 최소화하여 차단하고 작동 가능한 배관계를 복구한다.

이중화 설계를 기반으로 2기 펌프 작동을 고려하는 경우, 고려한 알고리즘 모두 손상 복구 능력이 확보됨을 Fig. 9(a)-(c)를 통해 확인할 수 있으며, 손상 복구에 소요되는 시간은 각각 90초, 128초, 78초이다. 순차 분리형 제어 알고리즘의 복구 속도가 단독 판단형 제어 알고리즘의 복구 속도와 비교할 때 큰 차이가 없어 보이지만, 2장에 기술한 알고리즘 작동 원리로부터 배관 계가 복잡해짐에 따라 밸브 차단 경우의 수가 증가하므로 복구 속도가 동시에 증가한다. 반면, 통신형 제어 알고리즘은 세그먼트 기준 설계 결과를 활용하므로 펌프 개소수 등에 관련 없이 손상 복구 성능 확보가 가능하다.

### 3.2.2 손상 개소 수에 따른 손상 복구 성능 고찰

손상 개소 수에 따른 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 복수 손상을 고려하여 Fig. 10과 같이 2기의 펌프 작동 상황에서 2개소의 손상 상황을 고려하였다. 모사 실험으로부터 자율 제어 밸브 입출력 단에서의 압력은 Fig. 11과 같다.

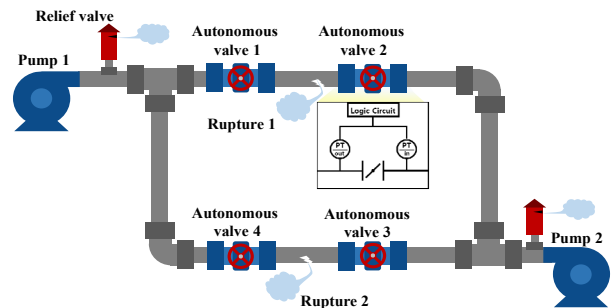


Fig. 10. Simulation conditions for multi-location pipe rupture scenario.

#### 1) 순차 분리형 제어 알고리즘

순차 분리형 제어 알고리즘이 복수 손상에 대해서도 손상 복구가 가능함을 Fig. 11(a)과 같이 모사 실험을 통해 확인하였다. 그러나 알고리즘 특성상 이분법적 사고를 이용하여 경우의 수로 손상 부위를 복구하기 때문에 정확한 손상 지점을 탐지할 수 없고 밸브의 수가 증가하게 되면 손상 위치 탐지에 오랜 시간이 소요되거나 손상되지 않는 부분까지 차단될 가능성이 있다.

#### 2) 단독 판단형 제어 알고리즘

단독 판단형 제어 알고리즘은 복수 손상 시 유량이 분산되기 때문에 손상 경로 상에 위치한 밸브들을 분류할 수 없다. 즉, 손상 위치를 탐지하지 못하기 때문



에 Fig. 11(b)와 같이 폐쇄 우선순위 등의 설계에 따른 손상 복구 알고리즘이 작동되지 않는다.

3) 통신형 제어 알고리즘

통신형 제어 알고리즘은 밸브와 밸브 사이를 한 구

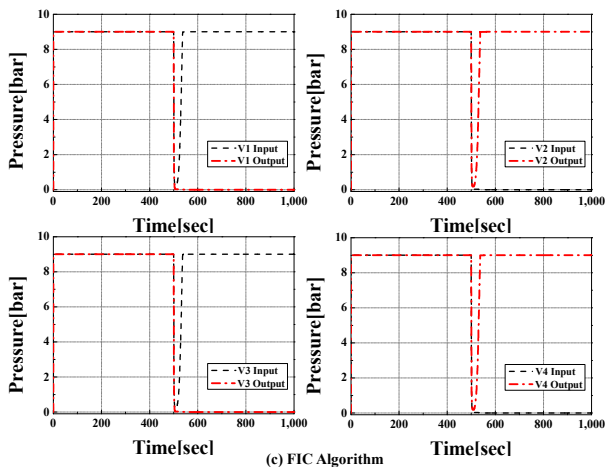
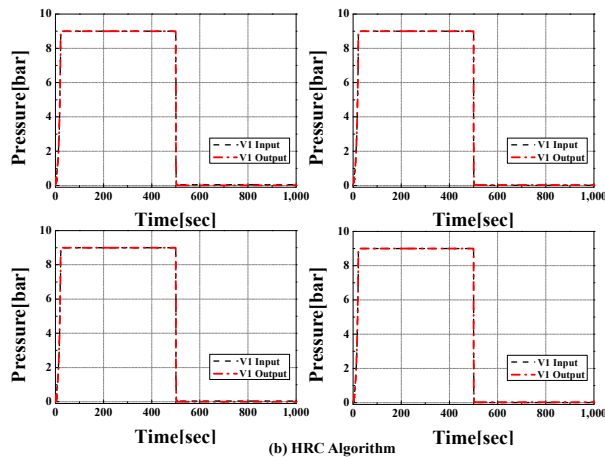
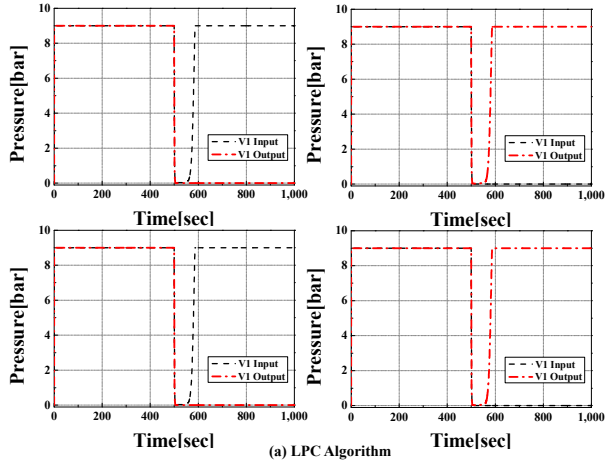


Fig. 11. Pressure data of autonomous valve for multi-location pipe rupture scenario using (a) LPC algorithm, (b) HRC algorithm and (c) FIC algorithm.

역으로 구분하여 통제하기 때문에 복수 손상 시에도 정해진 손상 탐지 및 차단 절차에 따라 배관계가 Fig. 11(c)와 같이 복구됨을 관찰할 수 있다.

4) 알고리즘 특성에 따른 손상 복구 시간 비교

순차 분리형 제어 알고리즘은 이분법적 사고를 이용하여 각 차단마다 기설계된 30초와 55초의 지연시간을 가지고 배관계를 복구하기 때문에 약 89초 후에 손상이 복구되었다. 통신형 제어 알고리즘은 세그먼트 기반의 손상 복구 알고리즘이 작동되므로 단일 손상 시 나리오와 동일하게 37초 후에 배관계가 복구되었으며, 단독 판단형은 복수 손상 시 손상 위치를 탐지하지 못함에 따라 배관 압력이 복구되지 못함을 확인하였다.

3.2.3 손상 복구 알고리즘 성능 비교 및 고찰

모사 실험 결과를 통해 도출한 각 알고리즘의 특징을 요약하면 Table 5와 같다. 순차 분리형 제어 알고리즘은 통신에 의존하지 않는 독립적인 제어 알고리즘이지만 수원의 위치 및 수량에 영향을 받으며 손상 지점을 탐지하는 방식이 아닌 기설계된 밸브 그룹 순차 개폐를 이용하여 손상을 복구하기 때문에 배관 손상 복구 시간이 다른 알고리즘에 비해 길게 소요된다. 단독 판단형 제어 알고리즘은 통신에 의존하지 않는 독립적인 제어 알고리즘이며 수원의 위치나 수에도 상대적으로 영향을 덜 받는다. 그러나 복수 손상을 탐지 및 제어하기 어렵고 폐쇄 지연시간을 이용하여 순차적으로 밸브가 폐쇄되기 때문에 통신형 제어 알고리즘보다 복구에 소요되는 시간이 길다. 마지막으로 통신형 제어 알고리즘은 펌프 수에 영향을 받지 않고 복구까지 걸리는 시간도 타 알고리즘에 비해 가장 짧다. 하지만 통신 의존도가 높아 통신이 단절되었을 때 Fig. 12처럼 손상을 제어 및 복구할 수 없다는 한계점이 존재한다.

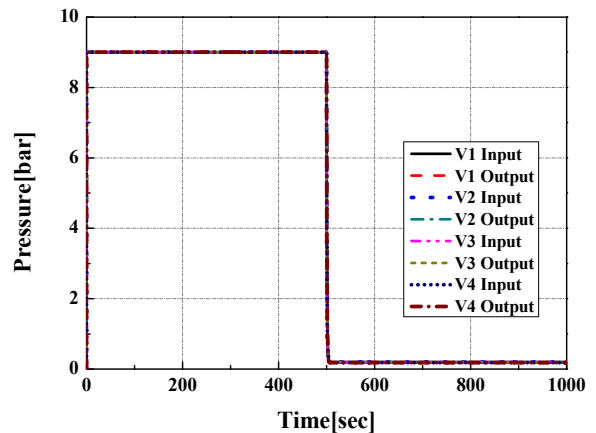


Fig. 12. Pressure data of autonomous valve for third examination using FIC algorithm.

Table 5. Summary on simulation results of autonomous piping system recovery algorithm

1-D fluid analysis and simulation conditions					
Algorithm	Component	1 Pump, 1 Rupture	2 Pump, 1 Rupture	2 Pump, 2 Rupture	Communication dependence of algorithm
LPC algorithm	Performance	Unrecoverable	Recoverable	Recoverable	Independence
	Recovery time		90 sec	80 sec	
HRC algorithm	Performance	Recoverable	Recoverable	Unrecoverable	
	Recovery time	125 sec	124 sec		
FIC algorithm	Performance	Recoverable	Recoverable	Recoverable	Dependence
	Recovery time	36 sec	37 sec	37 sec	

#### 4. 결론

본 논문에서는 배관 체계 안전성 향상을 위하여 기존에 개발된 자동/자율 복구체계 작동 알고리즘 및 설계 절차를 검토하고 자율제어 밸브 4개로 구성되어 있는 배관계를 모사 실험을 통해 각 알고리즘들의 성능을 비교 및 분석하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

첫 번째, 순차 분리형 제어 알고리즘은 각 밸브가 독립성을 띠고 있지만 펌프(수원)의 위치 및 수량 등에 영향을 받는다. 그리고 이분법적 사고를 이용하여 경우의 수로 손상 부위를 복구하기 때문에 정확한 손상 지점을 탐지할 수 없고 밸브의 수가 증가하게 되면 손상 위치 탐지에 오랜 시간이 소요되거나 손상되지 않는 부분까지 차단될 수 있다.

두 번째, 단독 판단형 제어 알고리즘은 각 밸브가 독립성을 띠고 있으며 펌프의 수량에 영향을 받지 않는다. 그러나 배관계의 수원 및 밸브의 위치, 수량 등의 변화에 따라 지연시간 및 기준 압력차를 재설정해야 한다. 또한 복수 손상 발생 시 유량 분산에 따른 손상 경로 상에 위치한 밸브들을 분류할 수 없기 때문에 복수 손상을 제어하기가 어렵다.

세 번째, 통신형 제어 알고리즘은 펌프 위치, 수량 및 손상 개소에 영향을 받지 않으며 타 알고리즘들에 비해 손상 복구 성능에서 1분 이상 단축된다. 그러나 밸브 간 통신 의존도가 높기 때문에 통신 단절 시 손상 복구가 어려우며, 통신을 위한 추가적인 하드웨어 설계가 필수적이다.

본 연구에서 기술한 해석 결과는 실제 배관계 사양을 고려하여 실제 펌프의 성능곡선 및 종류, 실제 배관의 관경, 두께 및 거칠기, 양산 중인 버티플라이형 밸브 특성 등을 활용하여 배관계를 모델링하고 해석을 수행한 결과이며 각 알고리즘의 특성을 쉽게 설명할 수 있도록 배관계를 최대한 단순화시켰다. 본 연구에서 제시한 설계 방법을 실제 배관계 설계에 적용할 경우 배관의 복잡도 이외에는 고려할 사항이 없기에 배

관 체계 자율 복구 알고리즘 설계를 위한 기초자료로 본 연구가 활용 될 수 있다고 판단된다. 즉, 배관계를 구성하는 주요 요소들을 포함하여 실제 양산되는 구성품 정보들을 이용하여 해석을 수행하였기에, 복잡도가 증가되는 실제 배관계 적용 시 해석 결과의 유효성을 판단하기 위한 자료로 활용 가능할 것으로 보인다.

**Acknowledgement:** This research was supported by Chungbuk National University, Korea National University Development Project (2020).

#### References

- 1) R. A. Silva, C. M. Buiatti, S. L. Cruz and J. A. F. R. Pereira, "Pressure Wave Behaviour And Leak Detection In Pipelines", Computers&Chemical Engineering, Vol. 20, Supplement 1, pp. S491-496, 1996.
- 2) L. Boaz, S. Kaijage and R. Sinde, "An Overview of Pipeline Leak Detection and Location Systems", Proceedings of the 2nd Pan African International Conference on Science, Computing and Telecommunications, pp. 133-137, 2014.
- 3) R. Jafari, S. Razvarz and A. Gegov, "Deep Learning for Pipeline Damage Detection : an Overview of the Concepts and a Survey of the State-of-the-Art", 2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS), pp. 178-182, 2020.
- 4) M. Shinozuka, P. H. Chou, S. H. Kim, H. R. Kim and L. Fei, "Non-invasive Acceleration-based Methodology for Damage Detection and Assessment of Water Distribution System", Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 5, pp. 545-550, 2010.
- 5) H. O. Song and C. J. Lee, "A study on the Temporary Storage Facility for Mitigating the Leakage Accident", J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, pp. 1-5, 2020.
- 6) H. Y. Kim and S. H. Jung, "Investigation on Damage Effect Distance for High Pressure underground Flammable Gas

- Pipelines”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, pp. 33-38, 2018.
- 7) R. H. Jeoung and B. K. Lee, “Fault Detection Signal for Mechanical Seal of Centrifugal Pump”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 27, pp. 20-27, 2012.
  - 8) C. S. Shin, Y. J. An and G. S. Byun, “A Study on the Improvement of Water-Leakage Detection Reliability in Local Heating System”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 14, pp. 66-72, 1999.
  - 9) A A Belsky et al., “Electrotechnical Complex for Autonomous Power Supply of Oil Leakage Detection Systems and Stop Valves Drive Control Systems for Pipelines in Arctic Region”, J. Phys.: Conf. Ser., 1753 012062, 2020.
  - 10) NRL-USN, “Evaluation of Reflexive Valve Logic for a Shipboard Firemain”, 2000.
  - 11) NRL-USN, “Development of DC-ARM Reflexive Smart Valve”, 2001.
  - 12) NRL-USN, “Evaluation of Firemain Architectures and Supporting Reflexive Technology”, 1999.
  - 13) Y. H. Shin, B. C. Jung, S. H. Lee and S. J. Moon, “Development of Damage Management Technology on Rupture of Piping System by Smart Valve”, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, pp. 319, 2018.
  - 14) NRL-USN, “DC-ARM Organizational Procedures and Manning for Smart Controller”, 2001.
  - 15) NRL-USN, “Damage Control Automation for Reduced Manning (DC-ARM) Supervisory Control System Software Summary Final Report”, 2002.
  - 16) NRL-USN, “The Evaluation of the Autonomic Fire Suppression System Concept of Operations and PDA Cooling Effectiveness”, 2003.
  - 17) S. Rahman, N. Ghadiali, D. Paul and G. Wilkowski, “Probabilistic Pipe Fracture Evaluations for Leak-Rate-Detection Applications”, US-Nuclear Regulatory Commission, 1995.
  - 18) C. Sandberg, J. Holmes, K. Mccoy and Heinrich Koppitsch, “The Application of a Continuous Leak Detection System to Pipelines and Associated Equipment”, in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 5, pp. 906-909, 1989.