Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.37, No.5, pp.271-280, October, 2025

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2025.37.5.271

파이프랙 구조물의 모듈간 접합상세에 따른 접합부 거동 해석적 평가

권예윤[1] · 강성훈[2] · 황진하[3] · 신동현[4*]
[1]석사과정, 부산대학교, 건축공학과, [2]박사과정, 부산대학교, 건축공학과,
[3]공학박사, 선임연구원, 한국생활환경시험연구원 광주전남센터, [4]조교수, 부산대학교, 건축공학과

Analytical Evaluation on Connection Behaviors of Piperack Structures Depending on Module-to-Module Connection Details

Kwon, Ye-Yun[1], Kang, Seong-Hun[2], Hwang, Jin-Ha[3], Shin, Dong-Hyeon[4*]
[1]Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea
[2]Ph.D. Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea
[3]Ph.D. Senior Researcher, Gwangju & Jeonnam Center of Korea Comformity Laboratories, Yeosu, 59631, Korea
[4]Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract – The piperack structures are required to resist both pipe self-weight and external loads, and their design loads can be categorized according to site conditions, piping systems, and dimensional properties. For this reason, off-site construction method can be applied to the piperack structures considering easy assembly and dis-assembly. The main purpose of this study is to suggest details of piperack module-to-module connections, and to evaluate connection behaviors using finite element analysis. The finite element analysis results present that the initial stiffness and moment capacity of suggested modularized details at least 15 % larger than those of the existing piperack connection detail.

Keywords – Piperack structures, Module-to-Module connection, Connection behavior, Finite element analysis

1. 서 론

국내 지진 발생 빈도 증가 및 지진피해 사례 발생에 따라 주요 시설물의 내진 성능을 점검하고 개선할 필요성이 제기되었으며, 특히, 기계, 소재 등을 생산하는 산업시설물의 안전성 확보에 대한 인식이 높아지고 있다[1]. 산업시설물 중 대표적인 파이프랙(Piperack)은 배관을 지지하는 구조체로써 외부 하중인 바람과 지진 등으로부터 영향을 받으며 동시에 배관을 타고 흐르는 유체의 특성에 따라 추가적인 하중의 영향을 받을 수 있으므로 적절한 수준의 횡력 저항 성능을 보유해야 한다. 이와 같은 파이프랙은 일부 공정에서 지진 등의 재해로 인해 비정상적인 정지 또는 사고가 발생하게 된다면, 해당 공정을 포함하여 산업시설물 전체의 생산활동을 저해할 수 있어 막대한 경제적 손실로 이어질 수 있다. 하지만 산업시설물 중 파이프랙의 운전 중 내진 성능 확보와 관련된 연구는 타 시설물에 비하여 상대적으로 미비하다고 볼 수 있다[1]. Kang *et al.*[2]에서는 국내 파이프랙에서 보편적으로 사용되는 확장형 엔드플레이트 보-기둥 접합부에 대한 성능실험을 수행하여 접합부 거동 메커니즘을 파악하였으며, Seol and Oh[3]에서는 하중속도가 패널 항복형 확장단부판 보-기둥 접합부가 적용된 파이프랙 구조물 구조성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. Go and Kim[4]의 연구에서는 다양한 내진설계 변수 및 요구조건에 따라 설계된 파이프랙에 대한 비선형 정적해석을 수행하여 붕괴 메커니즘을 파악하고 내진 성능을 평가하였다.

국내 산업단지에서 기존에 적용되어있는 노후 파이프랙은 내진설계가 충분히 수행되지 않는 등 구조적 안전성이 높지 않아 국가적으로 구조안전성을 검토하고 내진 보강을 추진하고 있다[5]. 산업단지에 신규로 설치

Note.-Discussion open until April 30, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 10, 2025; revised on August 28, 2025; approved on September 1, 2025.

*Corresponding author.
Tel. +82-51-510-2447 Fax. +82-51-514-2230
E-mail. shindh@pusan.ac.kr

되는 파이프랙의 경우에는 일반적인 강구조물과 차별되는 동적특성을 고려하여 내진 성능을 확보하도록 하는 구조설계가 필요하며, 설계 결과에 적합한 상세를 확보할 필요가 있다[2]. 또한 산업단지의 사용 목적이 달라짐에 따라 파이프랙이 지지하는 배관의 추가 배치 등이 발생할 수 있으며, 이에 따라 수행되는 증·개설 작업과정에서 구조전문가의 확인이 미비한 경우도 있어 이에 대한 대비가 필요하다. 파이프랙 구조물은 지지하는 배관의 특성상 고온, 고압의 가스 또는 화학물질이 운반되는 경우가 다수이므로 해당 구조물의 신규 설치 및 증·개설 시에 용접 작업이 수행되며 화재 및 폭발의 위험 요소가 있어 무용접형의 시공방식 확보 또한 중요한 요인이라 볼 수 있다.

따라서 현장에서의 설치작업을 최소화하고 열악한 설치조건에서 발생할 수 있는 구조적 결함을 최소화하기 위해서는 보다 안정적인 조건에서 파이프랙을 생산하고 이를 운반하여 조립하는 유형의 공장생산형 모듈화가 필요하다. 파이프랙은 슬래브 등이 설치되지 않고 배관만을 적재하기 때문에 구조물이 위치한 부지의 지반 등 환경적 조건과 배관의 유형과 내부에 흐르는 유체의 종류에 따라 작용하는 하중을 범주화할 수 있다. 이에 설치하고자 하는 파이프랙 구조물의 규모와 범주화된 하중의 특성을 고려하여 파이프랙을 모듈화하고 구조 상세를 정립하기에 비교적 용이하다.

본 연구에서는 국내 산업단지에서의 활용성을 고려하여 파이프랙 구조물의 규모와 범주화된 하중의 특성에 따라 해당 구조물을 모듈화하기 위한 상세를 제시하고자 하며, 현장 작업의 용이성을 높이기 위해 무용접으로 조립이 가능한 모듈 간 접합부를 도출하였다. 도출된 모듈 간 접합부 상세에 대하여 구조적 성능을 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 접합부의 구조 거동에 영향을 미치는 요인을 선정하여 변수해석을 수행하였다. 최종적으로 변수해석 결과를 토대로 파이프랙 모듈간 접합부에서의 요구 구조성능을 발휘하기 위한 모듈화를 위한 구조 상세를 제시하였다.

2. 파이프랙 유형 분석

파이프랙은 산업단지의 각종 파이프라인을 지지하기 위한 구조물로서 일정한 간격으로 동일한 형상이 반복되는 것이 일반적이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 파이프랙은 주로 철골조로 구성되며 공작물로 간주되어 건축 구조 기준의 강구조 설계(KDS 14 31 00)[6]에 준하여 설계된다. 파이프랙이 지지하고 있는 배관은 내용물에 따라 고압가스, 액화석유가스, 도시가스 등의 적용을 받아 가스시설 및 지상 가스 배관 내진 설계 기준(KGS GC203)[7]에서 요구하는 내진 성능을 확보하도록 하고 있다. 배관으로 인해 파이프랙에 전달되는 설계 하중은 배관 하중(Pipe load)과 배관 내부 내용물로 인한 마찰력(Friction load)으로 구분할 수 있다. 일반적인 설계과정에서 배관 하중은 고정하중으로 분류하며 2 kN/m의 분포하중을 적용하고 직경 30 cm 이상의 파이프의 경우에는 배관에 물이 가득 차 있는 것을 가정

Fig. 1. Typical configuration of piperack structures

Table 1. Summary of typically installation details of piperack structures

No. of story	Column section (mm)	Height of floors (mm)					Beam sections (mm)		Span (mm)	
		1	2	3	4	5≤	Short Dir.	Long Dir.	Short Dir.	Long Dir.
1	H-150×150×7×10	1950	-	-	-	-	H-194×150×6×9	H-200×100×5.5×8	5500	6000
2	H-200×200×8×12	1500	1500	-	-	-	H-200×200×8×12	H-200×200×8×12	2700	6000
3	H-244×175×7×11	1500	1500	1500	-	-	H-244×175×7×11	H-244×175×7×11	5000	6000
4	H-250×250×9×14	1650	1500	1500	1500	-	H-294×200×8×12	H-200×100×5.5×8	5000	6000
5	H-244×175×7×11	1000	1500	1500	1500	1500	H-244×175×7×11	H-200×100×5.5×8	5000	6000
6	H-200×200×8×12	1000	1500	1500	1500	1500	H-244×175×7×11	H-200×100×5.5×8	3000	6000
6 <	H-244×175×7×11	500	1200	1350	1200	1200	H-244×175×7×11	H-194×150×6×9	5000	6000

하여 배관 위치에 집중 하중으로 적용한다. 마찰력은 배관의 운전 혹은 정지 시 배관과 배관을 지지하는 보의 마찰에 의해서 발생하는 배관 방향 수평하중으로 배관 하중의 10 %로 고려한다[8].

이와 같은 설계하중을 고려하여 파이프랙은 배관의 길이 방향으로 철골 가새 골조가 횡력 저항시스템으로 일정한 간격으로 적용되며, 배관 길이의 수직 방향으로는 모멘트 골조가 횡력 저항시스템으로 적용되는 것이 일반적이다. 국내에서는 국가산업단지에 적용된 파이프랙의 안전성을 검토하기 위해 다수의 현장 조사가 수행되었다. Son *et al.*[9]에서는 국가산업단지의 파이프랙 구조점검을 통해 구성 부재 및 접합부 특성과 안전성 확보 현황 등을 조사하였으며, Kang and Oh[10]에서는 이와 같은 현장 실측 결과를 활용하여 파이프랙 구조물에 대한 성능 평가 실험을 수행하였다. 기존 문헌에서 조사한 파이프랙 구조물의 현장 조사 결과를 파이프랙의 단수와 구성 부재에 따라 정리하면 Table 1에서 보는 바와 같다. 파이프랙 구조물은 구조물의 수직 방향으로 적층되는 단수에 따라서 부재 구성 및 층고, 경간의 차이가 있었으며, 층고는 0.5–2 m, 경간은 배관 방향으로 약 6 m, 배관 방향에 수직으로 약 2.7–5.5 m의 분포를 나타내었다. 기둥 부재는 H-150×150×7×10에서 H-250×250×9×14의 단면이 보 부재는 H-194×150×6×9에서 H-294×200×8×12의 단면이 적용되었다. 파이프랙 구조물의 층고, 경간, 부재에서 나타나는 일정한 규격을 고려하여 파이프랙 모듈을 모듈화 상세를 제시하고자 하며, 대표 파이프랙 상세로 조사 결과를 반영하여 파이프랙 구조물의 층고 1.5 m, 배관 방향 경간 6 m, 배관 방향에 수직 방향 경간 5 m을 기본 규격으로 설정하였다. 또한 기둥 부재는 H-244×175×7×11 단면, 배관 방향 보 부재는 H-200×100×5.5×8, 배관 방향에 수직 방향 보 부재는 H-244×175×7×11 단면을 파이프랙 구조물의 대표 상세로 고려하였다.

3. 파이프랙 모듈간 접합 상세

3.1 기존 파이프랙 보-기둥 접합 상세

기존의 파이프랙 구조물은 현장에서 단기간에 시공되는 것이 일반적이며, 파이프랙이 일정 구간에 대해

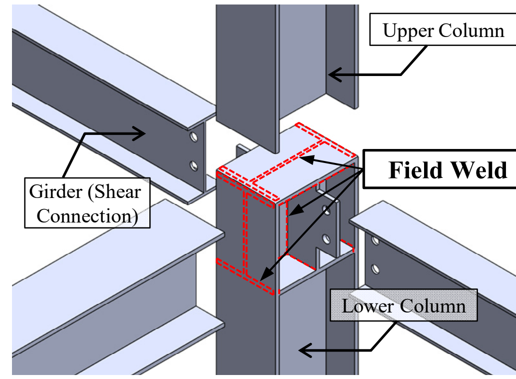


Fig. 2. Connection details of existing piperack structures

설치 완료된 후에도 증축 또는 개축되는 사례가 빈번하다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 파이프 방향으로는 기둥이 약축 방향으로 배치되며 기둥 웨브에 핀플레이트가 용접되어 현장 반입된다. 해당 방향으로의 보 부재는 회전축을 중심으로 보 웨브에 전단력을 부담할 수 있을 만큼의 볼트를 체결하여 전단 접합을 형성한다. 반면 파이프의 수직 방향으로는 보 부재를 기둥에 용접하여 모멘트 접합을 형성한다. 이와 같은 상세를 가지는 기존 파이프랙 구조물은 설치를 위해 현장에서 용접 작업이 수행되는 경우도 있으며, 현장 용접을 수행할 시 파이프라인 시설물의 특성상 단기간에 작업이 수행되어야 하는 시간적 제약과 작업 요건이 갖추어지기 어렵다는 장소적 제약으로 인해 태그 용접이 수행되는 등 용접 작업의 품질이 떨어질 우려가 있다. 또한 용접 작업 시 발생하는 비산 불티의 특성과 유증기 및 화학물질이 상존하는 산업단지의 특성을 함께 고려하면 용접 작업 시 폭발 및 화재 사고는 발생 유형이 다양하며 가능성 또한 매우 높다.

3.2 파이프랙 모듈간 접합 상세

파이프랙이 설치되는 산업단지 현장에서의 안전성 확보를 위해서는 현장 작업이 최소화된 모듈화 공법의 적용이 필요하며, 본 연구에서는 앞선 장에서 분석한 파이프랙 구조물 대표 규격을 바탕으로 파이프랙을 모듈화하였다. 또한 모듈화된 파이프랙 구조물 간의 접합 상세를 제시하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 기존 파이프랙의 보 및 기둥 부재는 H형강을 사용하여 구성된 것에 반해 모듈화 파이프랙에서는 모듈과 모듈이 구조부재가 중첩되는 영역이 발생하므로 본 연구에서는 기

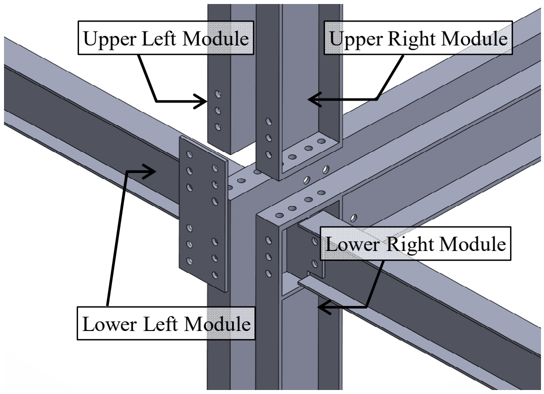
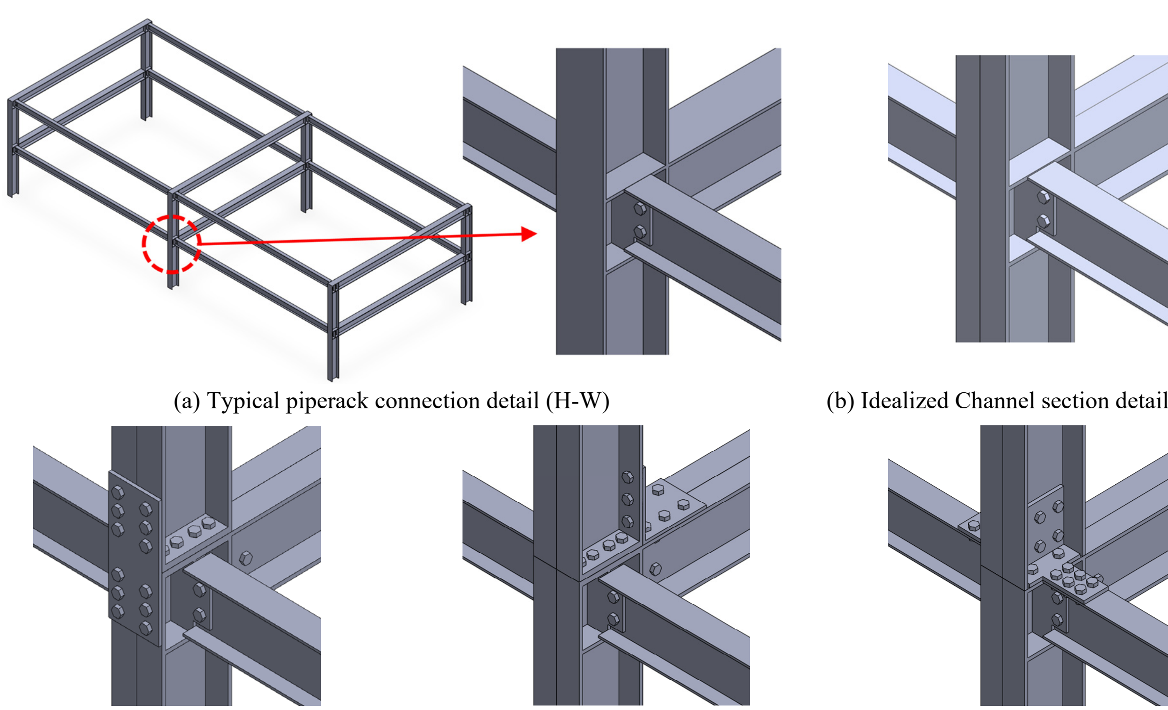


Fig. 3. Concept of modularized piperack structures

존 파이프랙의 H형강 부재와 동등 이상의 단면 성능을 C형강(Channel)을 중첩하여 구성하였다. 기존 파이프랙 기둥 부재에 적용된 H-244×175×7×11의 단면 특성인 단면적 56.24 cm^2, 단면 2차 모멘트 6,120 cm^4과 비교하여 모듈화 파이프랙 기둥부재인 C-250×90×9×13이 중첩될 경우 단면적 88.14 cm^2, 단면 2차 모멘트 8,360 cm^4으로 일반적인 형강을 사용하여 구성할 수 있는 단면 중 가장 유사한 단면 특성을 확보할 수 있도록 하였다.

Fig. 4에서는 본 연구에서 제시하는 파이프랙 모듈간의 접합 상세를 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서는 기존 파이프랙 접합부의 상세를 나타내고 있고 Fig. 4(b)에서는 C형강 단면의 모듈을 전체적으로 용접하여 이상화된 접합 상세를 나타내고 있으며, Fig. 4(c)–Fig. 4(e)는 파이프랙 모듈의 접합부 상세를 나타내고 있다. 모듈화 파이프랙은 공통으로 4개의 기둥과 각각 2개의 약축 및 강축 방향 상부 보로 구성되어 있다. Fig. 4(c)에서 제시된 상세는 파이프랙 모듈의 수직 방향 적층 시에 기둥 부재에 형성되는 수직 접합부를 구성하기 위해 상부 모듈 기둥의 하단부와 하부 모듈 기둥의 상단부에 25 mm 두께의 엔드플레이트를 위치시키고 M20 볼트 8개를 체결하여 구성된다. 파이프랙 모듈이 배관 길이 방향인 수평 방향으로 연속되어 형성되는 수평 접합부를 구성하기 위해 기둥 강축 방향으로 접합된 보의 웨브에서 M20 볼트 4개를 체결하여 구성하였으며, 모듈간 하중 전달 과정에서 부족한 접합부 내력 향상을 위해 기둥 강축 방향의 외측면에 두께 11 mm, 폭 180 mm, 높이 435 mm의 강재 플레이트를 상하부 모듈 간의 연결 철물로 설치한다. Fig. 4(d)의 상세는 Fig. 4(c)에서 제시한 상세와 동일한 수직 및 수평 방향 접합 상세를 가지나 모듈 간 하중 전달 과정에서 부족한 접합부 내력



(a) Typical piperack connection detail (H-W)

(b) Idealized Channel section detail (C-W)

(c) Modularized piperack connection detail type 1 (C-B-SA-I)

(d) Modularized piperack connection detail type 2 (C-B-SA-L)

(e) Modularized piperack connection detail type 3 (C-B-WA-L)

Fig. 4. Suggested connection details of modularized piperack structures

향상을 위해 기둥 강축 방향 외측면에 설치되는 강재 플레이트 상세를 기둥 강축 방향 내측면으로 변경한 상세이다. 내측면에서 상부 모듈 기둥과 하부 모듈 기둥 강축 방향 보가 등변ㄱ형상 모양의 철물로 연결되며, 165×160×180 mm 규격에 두께 11 mm가 사용된다. Fig. 4(e)의 상세는 상부 모듈과 하부 모듈의 수직 방향 적층 시 형성되는 수직 접합부를 ㄱ형강 모양의 철물로 기둥의 약축 방향의 양측면에서 상부 기둥의 웨브와 파이프 방향 보의 상부 플랜지에 볼트 체결하여 구성한다.

4. 파이프랙 모듈간 접합부 성능평가

파이프랙 구조물의 모듈 간 접합 상세에 따른 접합부의 거동을 분석하고자 앞선 장에서 제시한 모듈화 파이프랙 접합부 상세를 적용한 해석적 성능 평가를 수행하였다. 성능 평가의 수행을 위한 해석모델의 정보를 Table 2에 정리하였으며, 모듈화 파이프랙의 형태는 Fig. 4와 같다. 해석 모델의 단면 성능을 비교하기 위하여 H형강과 C형강의 단면 특성을 기반으로 강기둥-약보 비[6]를 산정하였으며, 패널존 전단강도와 보 전단강도 간의 비[6]를 함께 정리하여 Table 2에 제시하였다. 보-기둥 접합부의 해석을 진행하기 위하여 T형 보-기둥 접합부의 형태로 하여, 기둥은 1,500 mm, 기둥 중심으로부터 보 단부까지의 거리는 1,860 mm로 Fig. 5와 같은 상세를 가지는 접합부를 모델링하였다. 해석모델 H-W, C-W, C-B-SA-I, C-B-SA-L의 경우 기둥의 약축 방향으로 접합된 보를 Fig. 5(a)–(b)와 같이 생략하여 Fig. 5(a)–(b)와 같이 의도하였으며 해석모델 C-B-WA-L의 경우 연결철물 부착 시 기둥의 약축 방향으로 접합되는 보가 필요하므로 Fig. 5(c)와 같이 모델링하였다. 해석모델명은 Fig. 4에서 정리한 상세 명과 동일하며, H-W 해석모델은 대표 파이프랙 상세의 형상이고 C-W 해석모델은 모듈화 파이프랙 상세를 적용하였지만, 별도의 연결철물 없이 모듈 간의 완전 일체

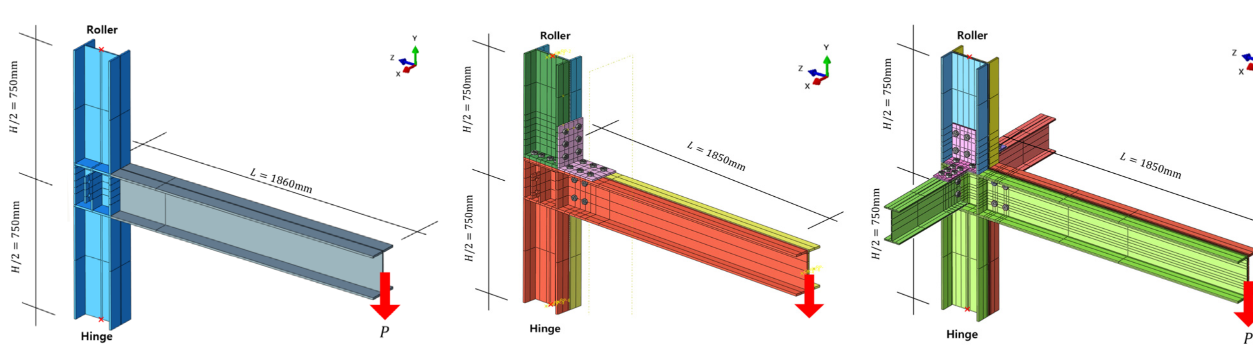
Table 2. Details of parametric models for finite element analysis

Model	Column (mm)	Height (mm)	Beam (mm)		Span (mm)		Connector (mm)	SC/WB ratio ($\Sigma M_{pc}/\Sigma M_{pb}$)	SS ratio
			Short Dir.	Long Dir.	Short Dir.	Long Dir.			
H-W	H-244×175×7×11	1500	H-244×175×7×11	H-200×100×5.5×8	1860	-	-	1.65	0.44
C-W	C-250×90×9×13, 2EA	1500	C-250×90×9×13, 2EA	H-200×100×5.5×8	1860	-	-	1.65	0.94
C-B-SA-I	C-250×90×9×13, 2EA	1500	C-250×90×9×13, 2EA	H-200×100×5.5×8	1860	-	11		1.2
C-B-SA-L	C-250×90×9×13, 2EA	1500	C-250×90×9×13, 2EA	H-200×100×5.5×8	1860	-	11		0.94
C-B-WA-L	C-250×90×9×13, 2EA	1500	C-250×90×9×13, 2EA	H-200×100×5.5×8	1860	500	10		0.94

※ "H", "C", "W", "B", "SA", "WA", "I", and "L" denote H-shaped steel, C-shaped steel, welded connection, bolted connection, strong axis of the column, weak axis of the column, I-shaped connector, and L-shaped connector, respectively. The axis direction refers to the orientation of the column section to which the connector is attached.

※ M_{pc}: Plastic moment capacity of columns, M_{pb}: Plastic moment capacity of beams

※ SC/WB: Strong Column – Weak Beam ratio, SS: Shear Strength ratio



(a) Prototype piperack modeling (b) Modularized piperack modeling 1 (C-B-SA-L) (c) Modularized piperack modeling 2 (C-B-WA-L)

Fig. 5. Loading and boundary conditions of analytical models

됨을 가정한 상세로 모듈화 상세가 보유할 수 있는 이상적인 구조거동을 모사하기 위해서 고려되었다.

4.1 유한요소 해석모델 구성

본 연구에서는 모듈화 파이프랙 접합부의 성능을 해석적으로 평가하기 위하여 ABAQUS/CAE[11]를 통한 유한요소해석을 수행하였다. 실대형 파이프랙 구조물의 접합부 상세와 동일한 부재 및 스팬으로 구성된 3차원 해석모델을 구성하였으며, General/Static 해석방법을 활용하여 해석을 실시하였다. 대표 파이프랙 상세인 H-W 모델과 이상화된 전용접형 모듈화 상세인 C-W 모델은 모두 용접으로 접합되어 보-기둥 접합부의 형상을 일체화된 하나의 Solid element로 설정하였다. 모듈형 파이프랙 접합부의 경우, 볼트, 너트 및 연결철물을 포함하여 모듈 구성 단위별 Element를 조합하여 해석모델을 구성하였다. 모듈간 접촉면에 대해서 Interaction에서 General Contact 기능을 활용하여 모든 접촉 영역에서 마찰이 작용하도록 설정하였다. 마찰계수는 철골조립 조건을 반영하기 위하여 Tangential Behavior의 Penalty Coefficient 값을 0.5로 설정하였다. 또한, 부재면 사이의 관통을 방지하기 위해 Normal Behavior의 Hard Contact조건을 적용하였다. 조립된 모듈화 파이프랙 기둥의 단면이 좌우로 나누어져 있으므로, 각 C형강 단부의 단면 중심에 참조점을 생성하여 단면을 해당점에 Coupling Contact로 구속하여 단면의 거동을 대표할 수 있도록 하였다. 또한 각 기둥 상·하부의 중심의 새로운 참조점에 좌우 단면을 구속하여 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 상하부를 일단 힌지, 타단 롤러로 적용하였다. 가력면 전체를 가력점에 구속하여 변위 제어를 통해 가력하였다. 볼트의 경우, 볼트와 너트가 일체화된 요소로 구성한 후 Bolt Load를 통해 가해지는 축력을 볼트가 충분히 발휘할 수 있도록 하였다.

해석 단계는 경계조건 및 마찰계수 등의 contact 효과가 고려되는 초기 단계, 볼트 축력 적용 단계 및 변위 가력 단계로 하여 나누어 실험 컨디션과 동일하게 해석이 진행되도록 단계별로 나누어 해석을 수행하였다. 초기 단계와 변위 가력 단계 모두 안정적인 결과 도출을 위하여 Newton-Raphson 방식의 반복 해법을 사용하는 General/Static 해석방법을 적용하였다. 가력 변위는 기둥 중심으로부터 보 단부까지의 거리 1860 mm의 4 %까지 점진 가력하였다.

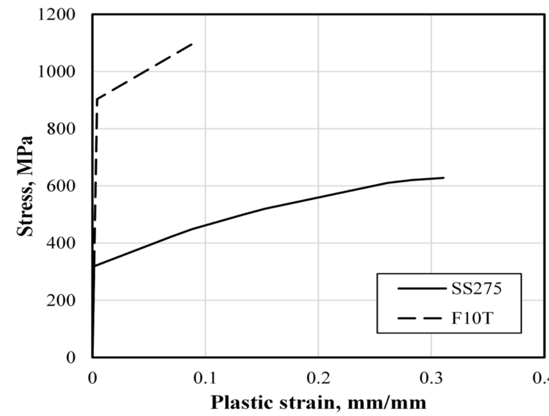


Fig. 6. Stress-strain relationship of the material

Kang *et al.*[2]에서 제시한 재료 모델링 방법을 활용하여 플레이트 및 보, 기둥 부재는 SS275 강재의 성질을 적용하였으며 M20 볼트는 F10T 재질로 지정하였기에 축력은 표준 볼트 장력 180 kN으로 설정하였다. 해석모델에는 3차원 육면체 요소인 C3D8R을 적용하였으며 모든 강재는 탄성계수 210,000 N/mm^2, 포아송비 0.3을 적용하였으며 볼트 및 부재의 응력-변형률 관계는 Fig. 6에서 나타내었다. 이때 각 요소의 변형에 따른 응력 변화를 반영하기 위하여 응력과 변형률의 관계를 식 (1)과 식 (2)와 같이 진응력(True stress)과 진변형률(True strain)로 변환하여 입력하였다.

$$\sigma_t = \sigma_n(1+\varepsilon_n) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{\ln}^{pl} = \ln(1+\varepsilon_n) - \frac{\sigma_t}{E} \tag{2}$$

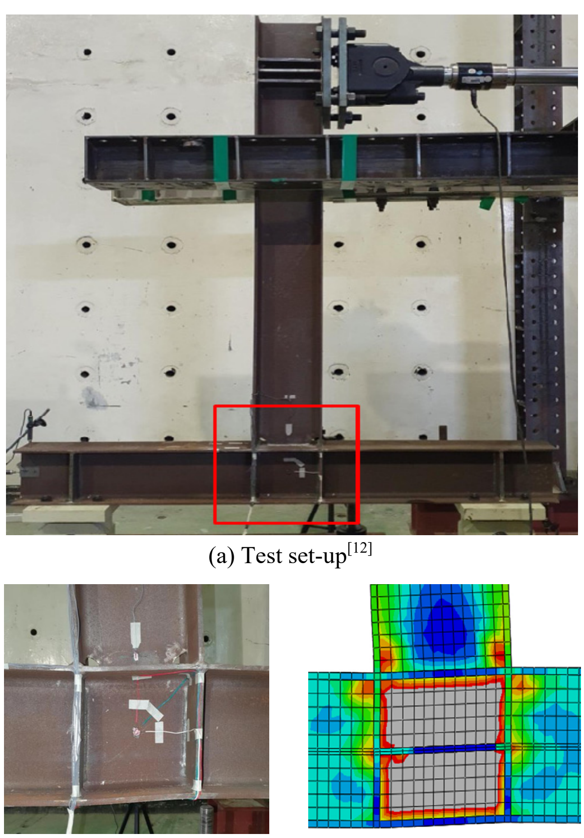
여기서, σ_t는 진응력, σ_n는 공칭응력, $\varepsilon_{\ln}^{pl}$는 진소성변형률, ε_n 는 공칭변형률, E는 강재의 탄성계수이다.

기둥 및 보의 접합부 부근에서 응력의 집중이 발생할 것으로 예상되는 부분은 패널존을 형성하는 삽입 플레이트의 외면으로부터 거리 300 mm의 범위로 가정하고 해당 부분의 Mesh 크기는 30 mm로 설정하였다. 접합부 부근에 부착되는 연결철물 또한 접합부 영역과 Mesh의 크기를 동일하게 30 mm로 나누었으며, 볼트의 경우 크기를 고려하여 Mesh 크기를 5 mm로 설정하였다. 해석모델에서 접합부 부근이 아닌 영역은 상대적으

로 큰 80 mm로 Mesh를 구성하여 유한요소해석 시간을 효율적으로 단축하고자 하였다.

4.2 해석모델의 적합성 검토

본 연구에서 수립된 유한요소해석 모델의 적합성을 검증하기 위하여 대표 상세 접합부인 H-W 모델의 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다[12]. Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 해석조건과 동일한 실험체 설치 및 가력 방법을 적용하였으며, 변형 형상에 있어 기둥 웨브의 전단변형이 크게 발생하는 약패널존 거동이 동일하게 확인되었다. Fig. 8에서 비교한 하중-변위 관계에서 보는 바와 같이 강성 측면에서 비교하였을 때 초기 강성의 오차율은 4.67 % 정도 수준으로 나타났다. 또한 강도적인 측면에서는 1 % 가력 시 실험 결과는 94.68 kNm, 해석 결과는 107.15 kNm, 2 % 가력 시의 실험 결과는 125.92 kNm, 해석 결과 132.70 kNm, 3 % 가력 시의 실험 결과는 141.64 kNm, 해석 결과는 147.57 kNm이다. 종국상태로 판단한 4% 가력 시의 실험 결과는 152.31


(a) Test set-up[12]

(b) Test result (c) Analysis result

Fig. 7. Deformed shapes of H-W (at 4 % drift ratio)

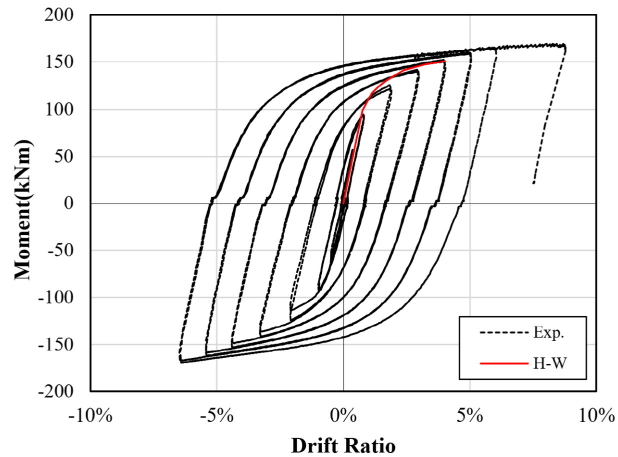


Fig. 8. Comparison between the analysis and test results

kNm, 해석 결과 158.66 kNm으로 최대 12% 차이 이내로 실험에서 나타난 접합부의 거동을 해석적으로 잘 모사하는 것으로 판단된다.

4.3 유한요소해석결과

3.2절에서 제시하는 Table 2의 해석 변수들을 바탕으로 대표 파이프랙 규격에 대한 모듈형 접합부 변수해석을 진행하였다. Fig. 9에서는 가력 변위비에 따른 응력 분포를 비교하여 나타내고 있다. Fig. 10에서는 각 해석 모델의 하중-변위비 관계를 나타내고 있으며, Table 3에서는 해석 결과 확인된 구조 물성치를 상대적으로 비교하여 나타내고 있다. 기존 파이프랙 H-W의 해석 결과, 초기 탄성 강성은 3,484.96 kN/m, 항복강도는 99.28 kNm로 평가되었다. 변위비 1 %부터 패널존이 항복하기 시작하여 초기 강성이 감소하였으며, 변위비 증가에 따라 패널존의 전단변형이 집중되는 약패널존 거동을 나타내었다. 이때 보와 기둥 부재에서는 전단면 항복이 발생하지 않았다.

C형강 단면의 완전한 합성을 가정한 C-W 해석 모델의 경우, H-W에 비하여 약 1.57배 항복강도가 상승하였으며 탄성 강성 또한 4,709.51 kN/m으로 1.24배 상승하였다. 해당 모델은 변위비 1 %에서 패널존의 항복이 선행되었으며 변위비 2 %에서는 보의 항복이 함께 관찰되었다. 변위비 4 %에서 보 플랜지의 소성화에 따른 국부 좌굴의 영향으로 강성 저감이 두드러지게 관찰되었다. H-W 해석모델과 비교하여 단면의 폭과 높이는 유사하나, 좌우 C형강의 완전 합성 거동을 통해 기둥

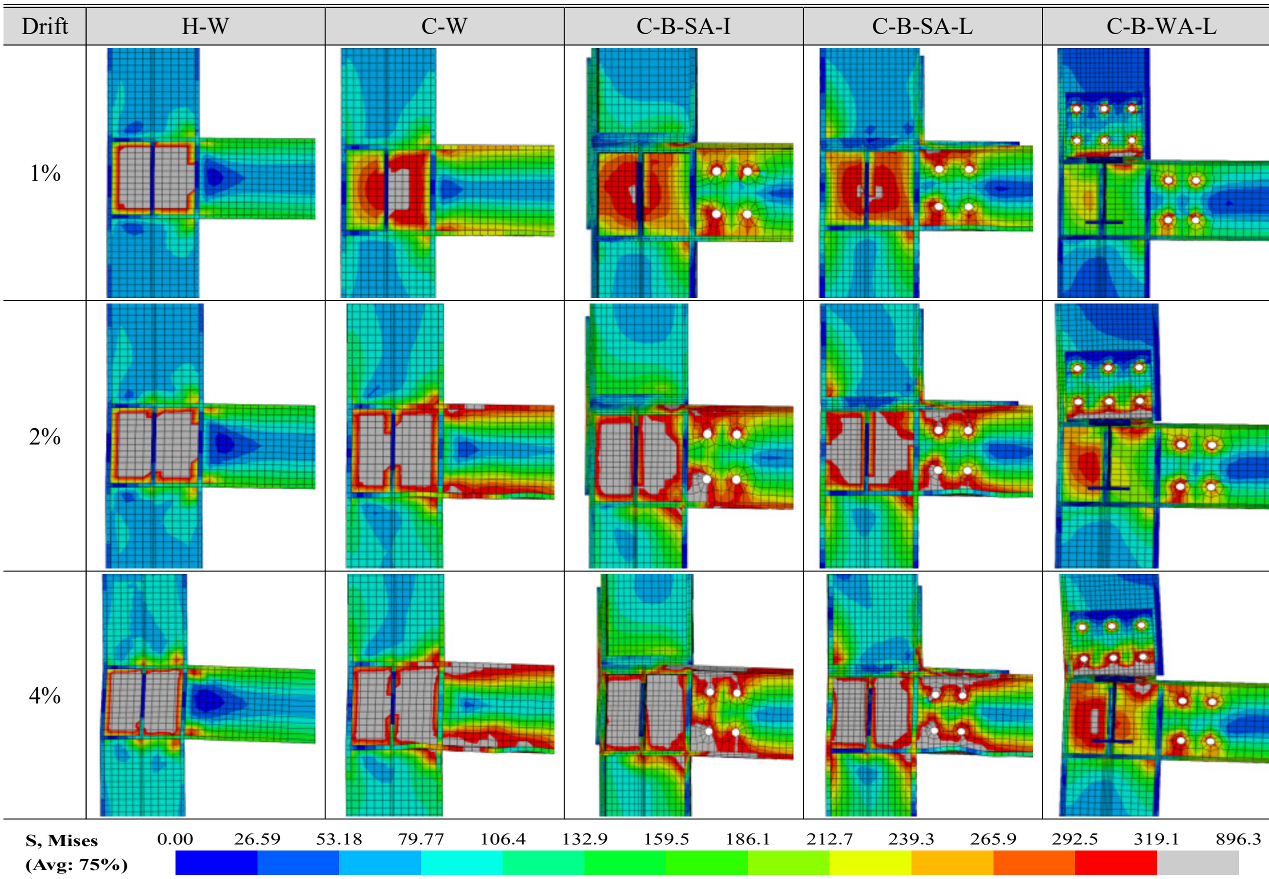


Fig. 9. Von-Mises stress distributions of analytical models

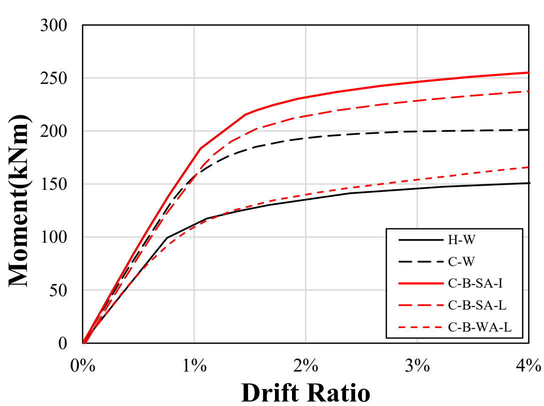


Fig. 10. Comparison of the load-displacement relations

웨브의 두께가 증가하게 되며 이에 따른 패널존의 강도 상승분이 반영된 결과로 판단된다.

기둥의 강축 방향에 일자형 플레이트를 덧대어 보강한 C-B-SA-I 해석모델의 경우, 변위비 1 % 이후 탄성 영역을 벗어났으며 변위비 2 %에서 상하부 기둥 모듈을 연결하는 볼트에 작용하는 응력이 볼트의 설계인장강도를 초과하는 현상이 관찰되었으며, 따라서 볼트의 파단이 발생할 수 있으므로 접합부가 충분한 강도 및 연성을 발휘하기에 부적합하다고 판단된다. C-B-SA-I 모델에서도 패널존의 항복 후 접합부 부근 보의 항복에 따라 강성이 감소하는 것으로 관찰되었다. 해당 모델의 초기 탄성 강성은 5,293.44 kN/m, 항복강도는 183.43 kNm로 나타났다.

모듈 외부에 플레이트를 덧대어 보강하는 상세의 경우, 시공 시 체인블럭 등의 외부 장비를 통하여 연결철물을 공중에 띄운 채로 체결 작업을 수행해야 하기에 시공성 및 안전성 측면의 제한사항이 발생할 수 있다. 이에 따라 하부 기둥의 보 모듈에 ㄱ형 연결철물을 얹혀 상부 기둥 모듈과 내측면에서 볼트 체결로 보강할 수 있는 형태인 C-B-SA-L 모델을 구성하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 확인된 강성 및 강도는 4,723.25 kN/m, 167.60 kNm로 완전한 접합을 가정한 C-W 해석모델과 강성은 유사하며, 강도는 상승하는 것으로 나타났으나, C-B-SA-I 모델과 비교해서는 강성 및 강도가 낮게 나타났다. 변위비 1 %에서 패널존의 전단변형에

Table 3. Comparison of structural properties obtained from finite element analysis

Property	H-W	C-W	C-B-SA-I	C-B-SA-L	C-B-WA-L
K, kNm/rad	13104.4 (1.00)	16292.9 (1.24)	17304.5 (1.32)	15235.0 (1.16)	12448.8 (0.95)
M_y, kNm	99.3 (1.00)	133.87 (1.35)	183.4 (1.85)	167.6 (1.69)	98.9 (1.00)
M_{max}, kNm	151.0 (1.00)	201.0 (1.33)	255.1 (1.69)	237.4 (1.57)	165.7 (1.10)

Where, K is the initial stiffness, M_y is the yield moment capacity, M_{max} is the maximum moment capacity
( ) is the ratio of structural properties of analysis models to H-W model

의하여 소성 거동을 보이기 시작했으며, C-B-SA-I 모델보다 증가된 변위비 3 %에서 볼트에 작용하는 응력이 설계 인장강도를 초과하는 수준으로 나타났다. 즉, 상부 및 하부모듈을 외측면에서 일자형 플레이트로 보강하는 것보다 상부 모듈의 기둥과 하부모듈의 보를 내측면에서 ㄱ형 연결철물로 보강하는 것이 접합부의 체결에 있어 볼트의 응력 집중을 분산하고 안정적인 연성을 확보하기에 유리하게 작용한다고 볼 수 있다.

파이프랙은 앞선 장에서 언급한 것과 같이 파이프라인과 수직 방향, 즉 기둥의 강축 방향 보 상부에 파이프라인이 설치되는 구조를 가지게 되어 하부모듈의 보 플랜지 상부에 연결철물이 설치되는 경우 파이프라인을 지지하는 파이프슈와 같은 지지철물과 간섭이 발생할 수 있다. 이에 따라 기둥의 약축 방향으로 연결 철물을 형성하여 상부 및 하부모듈을 체결하는 상세인 C-B-WA-L 해석모델을 고안하여 해석을 수행하였다. 해당 모델의 강성은 4,041.73 kN/m, 강도는 98.90 kNm로 고려된 해석모델 중 가장 낮은 성능을 보였다. 변위비 1 %에서 약축 방향으로 설치된 ㄱ자형 연결철물에 변형이 발생하였으며, 대표 파이프랙 접합부 상세인 H-W 해석 결과와 유사한 강성 및 강도가 나타났다. 이후에도 연결철물의 변형과, 그에 따른 볼트 설계 인장강도 초과 응력 발생 및 상부 기둥 모듈의 들림 현상에 의하여 강도 및 강성이 감소되는 현상이 관찰되었으며, 상부 및 하부모듈에서는 항복이 발생하지 않았다. 따라서 C-B-WA-L 해석 모듈과 같은 형태의 약축 방향 체결 모듈을 활용하기 위해서는 플레이트의 두께를 보강하고 일부 볼트의 강도 및 직경의 증가가 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 파이프랙 구조물이 설치되는 산업단지의 특성에 따라, 용접에 따른 위험성을 감소시키면서 모듈화를 통한 시공성 및 확장성이 개선된 모듈형 파이프랙 접합부를 제안하고자 하였다. 이를 위하여 기존 파이프랙 구조물의 유형을 분석하여 대표 파이프랙 부재 및 단면 상세를 정리하였으며, 단면 및 부재 접합 상세의 모듈화 방안을 제안하고 해석적으로 구조 거동을 평가하였다. 이에 따른 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) C형강 단면의 완전 합성을 가정한 C-W 해석모델의 해석 결과는 기존 H형강 단면으로 구성된 대표 파이프랙 용접형 접합부 H-W의 해석 결과보다 항복강도는 1.57배, 초기 강성은 1.24배 높게 나타났으며, 이는 단면의 높이와 폭은 유사하면서 기둥 웨브의 두께 증가에 따른 것으로 확인된다. 이에 따라 개별 C형 단면이 일체화된 거동을 발휘할 수 있도록 설계한다면, 접합부를 안전성, 시공성 및 확장성이 개선되도록 모듈화할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 약축 방향으로 연결 플레이트를 체결하였을 때, 플레이트의 변형과 그에 따른 볼트의 파단이 예상되며, 기존 H형강 단면 접합부와 유사한 수준의 강도 및 강성만을 발휘하며 C-W 해석모델만큼의 접합부 성능을 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 따라 해당 상세를 통한 모듈형 파이프랙 접합부를 형성하는 것은 효과적이지 않으며, 연결 플레이트의 두께 증가 및 체결되는 볼트의 강도나 직경을 증가시키는 등의 추가적인 해석 결과를 필요로 한다.

(3) 상하부 모듈의 강축 방향으로 연결 플레이트를 통해 체결되는 C-B-SA-I 및 C-B-SA-L 해석모델의 경우 기존 H형강 단면의 접합부보다 높은 구조성능을 나타내면서, C-W 해석모델과 동등 이상의 거동을 나타낸다. 다만 I형 플레이트로 체결

된 접합부의 경우 ㄱ자형 연결철물을 활용하는 접합부보다 작은 변위에서 볼트의 파단이 예상되므로 상대적으로 불안정한 거동을 나타내어, ㄱ자형 연결철물을 활용한 모듈화가 효과적일 것으로 사료된다.

(4) 본 연구는 기존 실험 결과와의 비교를 통한 해석 모델의 타당성 검토를 바탕으로 수행한 유한요소 해석 기반의 평가이며, 해석 결과를 통해 파이프랙 접합부의 모듈화 가능 상세를 제시하고 있다. 향후 추가적인 실험 검증을 통하여 파이프랙 모듈화 상세를 평가하여 실질적인 설치 방법 및 거동 특성을 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 재단법인전남테크노파크가 주관하는 뿌리산업 선도기업 육성산업(과제번호 선도기업R&D-24-02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] Kim, J., Hong, K.-J., and Hwang, J.-H. (2023) Limit States and Corresponding Seismic Fragility of a Pipe Rack for Maintaining Operation, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.27, No.6, pp.283–291 (in Korean).

[2] Kang, S.H., Woo, J.H., Lee, H.D., Lee, W.G., and Shin, K.J. (2022) An Experimental Study on Seismic Performance of Pipe-Rack Using Extended End-Plate Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.5, pp.269–277 (in Korean).

[3] Seol, Y.-H., and Oh, S.-H. (2023) Effect of Load Speed on Seismic Performance of Panel Yielding Extended Endplate Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.5, pp.283–292 (in Korean).

[4] Go, H., and Kim, H.-J. (2024) Probabilistic Seismic Performance of Pipeline Supporting CBFs According to Seismic Design Parameters and Requirements, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.4, pp.229–241 (in Korean).

[5] Lee, J.S., Lee, H.D., Kang, S.H., Shin, K.J., Oh, S.H. and Yoon, B.I. (2023) Assessment of the Current Status and Connection Behavior of the Yeosu Pipe Rack Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.3, pp.41–46 (in Korean).

[6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2024) *Korean Design Standard for Steel Structures*, KDS 14 31 00: 2024 (in Korean).

[7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2018) *Seismic Design Code for Gas Facilities and Above-Ground Gas Piping*, KGS GC203: 2018 (in Korean).

[8] Kim, Y.H., Oh, S.H., Kim, Y.J., and Yang, J.W. (2024) Seismic Performance Evaluation of Pipe Rack Structures in Yeosu Industrial Complex, *Proceedings of the 35th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.205–206 (in Korean).

[9] Son, H.S., Mun, J.S., Hwang, J.H., and Ahn, T.S. (2022) A Survey on the Safety by Pipe-Rack Inspection of The National Industrial Complex, *Proceedings of the 33th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.193–194. (in Korean).

[10] Kang, K.C., and Oh, S.H. (2024) A Real-Scale Shaking Table Test to Evaluate the Effectiveness of Pipe Rack Reinforcement Plan, *Journal of Korean Society of Steel Constructions*, KSSC, pp.203–204. (in Korean).

[11] Dassault System Simulia. (2014) ABAQUS 6.14: *Abaqus Analysis User's Manual*, DSS, USA.

[12] Kang, S.H. (2023) *Strength Evaluation of Beam-Column Connection for Pipe-rack Structures According to Reinforcement Type*. Master's Thesis, Kyungpook National University (in Korean).

요 약 : 파이프랙 구조물은 배관의 자중과 외부 하중에 대해 저항하여야 하며, 설계 하중은 현장 조건, 배관 시스템 및 치수적 특성에 따라 구분될 수 있다. 이에 따라 파이프랙 구조물에는 조립 및 해체가 용이한 모듈러 시공법의 적용이 가능하다. 본 연구는 파이프랙 모듈 간 접합 상세를 제안하고, 유한요소해석을 통해 해당 접합부의 거동을 평가하였다. 해석 결과, 제안된 모듈러 접합 상세의 초기 강성과 모멘트 내력은 기존 파이프랙 접합 상세에 비해 최소 15 % 이상 큰 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 파이프랙 구조물, 모듈 간 접합, 접합부 거동, 유한요소 해석