

콘크리트 구속 효과를 이용한 기존 파이프랙 노출형 주각부의 연성 보강 효과에 대한 실험적 연구

박정철¹ · 오상훈^{2*}

¹석사과정, 부산대학교, 건축공학과, ²교수, 부산대학교, 건축공학과

Evaluation of Ductility Reinforcement Effects for Existing Pipe-Racks with Exposed Column Bases Using Concrete Confinement

Park, Jeong Cheol¹, Oh, Sang Hoon^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Architecture Engineering, Pusan University, Busan, 46241, Korea

²Professor, Dept. of Architecture Engineering, Pusan University, Busan, 46241, Korea

Abstract – This study proposes a seismic reinforcement detail utilizing concrete confinement effects to enhance the ductility of pipe-rack column bases, specifically focusing on constructability and economic efficiency for easy application to existing structures. Experimental results demonstrated that the reinforced specimens exhibited superior ductility compared to the unreinforced specimen, with the P-GFD specimen showing the most significant seismic performance. The reinforced specimens showed an increase in initial stiffness by approximately 12–23 % and yield moment by 5–10 % compared to the control. Furthermore, the ductility factor and cumulative plastic deformation ratio improved by 28 % and 46 %, respectively. These improvements result from the confinement pressure maintaining load-carrying capacity until the ultimate state, thereby securing structural ductility and effectively suppressing concrete damage even at the limit state.

Keywords – Pipe-rack, Exposed column base, Ductility reinforcement, Damage prevention, Energy dissipation capacity

1. 서론

파이프랙(Pipe-rack)은 석유화학 플랜트 및 산업시설에서 주요 설비를 지지하는 핵심 구조물로, 지진 발생 시의 구조적 안전성은 시설의 운영 연속성 및 기능 유지와 직결된다. 파이프랙은 일반적으로 고중량 설비가 상부에 집중되어 지진 시 큰 관성력이 유발되는 반면, 구조 시스템의 단순성으로 인해 하중 전달 경로가 제한적이며, 특정 부재의 손상 시 하중을 재분배하여 에너지 소산을 유도하기 위한 구조적 조치가 미흡한 편이다. 특히 층수가 낮고 횡방향 저항 시스템이 단순한 파

이프랙의 특성상, 주각부의 회전 강성과 변형 능력은 구조물 전체의 거동 및 손상 분포를 결정짓는 핵심 요소로 작용한다. 이로 인해 지진 하중은 구조물의 최하단부인 주각부에 집중될 수 있으며, 이러한 국부적인 응력 집중은 주각부의 손상을 유발하여 설비 가동 중단 및 막대한 경제적 손실로 이어질 수 있으므로, 하중을 최종적으로 지반에 전달하는 주각부의 파괴 메커니즘을 명확히 규명해야 한다.

현장에서는 시공성 및 유지관리의 용이성을 위해 대부분 노출형 주각부(Exposed Column Base) 상세를 채택하고 있다^[1]. 노출형 주각부는 강재 기둥, 베이스플레이트, 앵커볼트 및 콘크리트 기초로 구성되며, 하중은 앵커볼트 인장, 베이스플레이트 휨 및 콘크리트 지압이 복합적으로 작용하는 메커니즘을 통해 기초로 전달된다^{[2],[3]}. 이러한 특성으로 인해 노출형 주각부는 설계 시 가정되는 이상적인 고정단 거동과 달리 일정 수준의 회전을 허용하는 반강접 거동을 나타낸다^[4]. 그럼에도 불구하고 기존 내진 성능 평가는 주각부를 완전 고정으로

Note.-Discussion open until December 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 10, 2026; revised on April 8, 2026; approved on April 9, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-7608 Fax. +82-51-514-2230

E-mail. osh@pusan.ac.kr

가정하는 경우가 많아, 실제 노출형 주각부에서 발생하는 회전 변형과 응력 집중을 과소평가하게 된다. 이러한 설계 가정은 지진 시 주각부에 가해지는 요구 성능을 실제보다 낮게 산정하게 만들며, 이에 따라 예기치 못한 취성 파괴의 위험성을 가증시키는 원인이 된다.

현장 표준 상세는 제한된 페데스탈 단면 내에 다수의 앵커볼트를 밀집 배치하며, 특히 휨 저항 효율을 높이기 위해 이를 단면 최외측에 배치한다(Fig. 1). 이러한 배치는 앵커볼트 및 베이스플레이트 연단과 콘크리트 측면 사이의 실질적인 피복 두께를 얇게 형성시키는 구조적 한계를 가진다.

지진 시 주각부에 회전 모멘트가 가해지면, 베이스플레이트 하부와 앵커볼트에서 발생하는 응력은 단면 끝단의 취약한 피복 영역에 집중된다. 이로 인해 내부 횡철근의 구속 범위 밖에 위치한 피복 콘크리트가 탈락하는 박리(Spalling) 현상이 발생하게 된다. 이 현상은 단순히 콘크리트 표면이 떨어져 나가는 것에 그치지 않고, 기둥의 하중을 기초로 전달하는 베이스플레이트와 앵커 주변의 지지력을 실질적으로 상실시킨다. 특히 모든 하중이 집중되어 기초로 전이되는 유효 통로인 주각부의 역할적 역할을 고려할 때, 이러한 지압 지지력 상실은 기둥과 기초 사이의 구조적 연속성을 단절시키는 결과로 이어진다. 결과적으로 주각부 피복 콘크리트의 탈락만으로도 하중을 지지하는 유효 단면이 급격히 감소하며, 이는 전체 구조물이 설계 의도와 다르게 급격히 내력을 잃는 조기 취성 파괴의 결정적인 원인이 될 수 있다.

Ye *et al.*^[5]은 CFRP를 활용한 철근콘크리트 기둥의 연성 증진효과를 입증하고 설계기준을 제시한 바 있다. Lee *et al.*^[6]은 사각형 또는 직사각형 단면을 가지는 철근콘크리트 기둥에 강봉을 부착하여, 파괴 모드를 취성 파괴에서 연성 파괴로 전환시켰으며, 하중 저항 능력을 효과적으로 향상시킨 것을 확인하였다. Ishibashi and Tsukishima^[7]에서는 교각의 연성 증진에 초점을 맞춘 공법들을 검토하였다. 하지만 가동 중단이 어려운 산업현장의 특성상, 복잡한 제작 공정과 협소한 공간에서의 설치 제약은 전체 보강 공사의 경제성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 따라서 공기 단축과 가동 손실 최소화를 위해 시공성, 경제성 등의 고려가 필요하다. 이에 본 연구에서는 현장의 표준 상세를 그대로 재현한 주각부



Fig. 1. Typical field detail

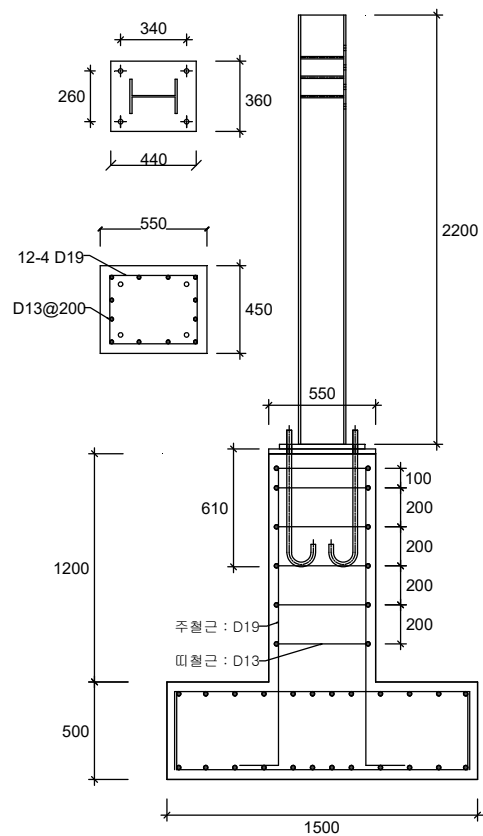


Fig. 2. Column base detail

실험체를 통해, 얇은 피복 두께에 기인한 콘크리트 박리 및 그에 따른 내력 저하 메커니즘을 실험적으로 검증하고자 한다. 또한 기존 보강 기법의 콘크리트 구속 효과 및 연성 향상 효과를 바탕으로 시공성, 경제성을 고려한 실용적인 재료 구성을 적용함으로써, 기존 보강 기법 대비 비용 효율성을 확보할 수 있는 새로운 보강 기법을 제안하고 그 효과를 평가하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

주각부 상세는 실제 파이프랙 구조물에 적용되는 설계 상세를 기준으로 구성하였다^[8]. 기둥은 SS275 강재의 H-244×175×7×11 단면을 적용하였으며, 부재 높이는 2,200 mm로 설정하였다. 페데스탈은 550×450 단면에 높이 1,200 mm로 제작하였고, 이때 사용된 콘크리트의 설계기준 압축강도(f_{ck})는 24 MPa이다. 페데스탈 내부에 배근된 철근은 SS400 강재를 사용하였으며, 베이스플레이트는 SS275 강재의 360×440×24 규격을 적용하였다. 기둥과 기초를 연결하는 앵커볼트는 SS275 강재의 J형 M24 볼트를 사용하였다. 보강 효과를 단일 변수로 설정하기 위해 무보강 실험체와 보강 실험체는 보강 여부를 제외한 주각부 상세 및 재료 조건을 동일하게 적용하여 제작하였으며, 구체적인 주각부 상세는 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 연성 내진 보강 방안

기존 연구에서는 전단 저항 및 연성 향상 효과가 보고된 Rib Bar, Rib Plate, Carbon Fiber Sheet 보강법^{[5]-[7]}을 검토하였다. 이러한 기법들은 콘크리트를 외부에서 강력하게 구속함으로써 취성 파괴를 지연시키는 효과적인 방법으로 제시된 바 있다. 그러나 대규모 산업단지에 설치된 파이프랙 구조물에 광범위하게 적용하기에는 현실적인 제약이 따른다. 특히, 설비 가동 중단이 불가능한 산업 현장의 특성상, 보강 작업으로 인한 가동 손실을 최소화하기 위해 신속하고 간편한 시공성이 요구된다. 이는 전체 보강 공사의 경제성과 직결되는 요소이므로, 시공성을 확보한 실용적인 보강 방안에 대한 고려가 필요하다. 이에 본 연구에서는 기존 보

강 기법의 콘크리트 구속 효과 및 연성 향상 효과를 바탕으로 시공성 및 경제성을 고려한 실용적인 재료 구성을 적용함으로써, 기존 보강 기법 대비 비용 효율성을 확보할 수 있는 새로운 보강 기법을 제안하고 그 효과를 평가하고자 한다. 보강재는 경제성 및 시공성 확보를 위해 기존 공법 대신 앵글, 라쳇 스트랩, GFRP, 부직포를 사용하였다. 실험체는 Table 1과 같이 보강재 구성에 따라 총 3가지로 선정하였다. 앵글은 ㄱ형강의 표준 규격으로 50×50×6을 사용하였으며, 앵글의 국부 좌굴을 방지하고자 6 mm의 필렛 용접으로 스티프너를 보강하였다. 또한 실험체의 단면 형상이 불규칙할 것을 고려하여 슬릿 홀을 수직으로 가공하고 이를 볼트로 체결함으로써 설치 작업성을 향상시키고자 하였다. 라쳇 스트랩 보강은 별도의 특수 장치를 직접 설계하거나 제작하지 않고, 시판되는 기존의 라쳇 스트랩 장비를 그대로 활용하였다. 이는 전문 장비나 숙련된 인력의 도움 없이도 주각부에 유효한 구속력을 제공할 수 있는 보강 방식으로 별도의 접착이나 고정 공정 없이 라쳇 스트랩 자체의 인장력을 활용하여 콘크리트를 구속할 수 있다. 이러한 기성 제품 활용을 통한 시공 편의성을 바탕으로 현장 작업의 효율성을 극대화하고자 하였다. 스트랩은 인장강도와 내구성이 뛰어난 고강도 폴리에스테르 재질이며, 규격은 길이는 5,000 mm, 폭 38 mm, 두께 2 mm로 이루어져 있다. 본 연구에 사용된 GFRP 보강재는 약 0.6 mm의 두께를 가지며, 스트랜드(strand)를 꼬지 않고 다발 형태로 모은 로빙(roving)을 직물 구조로 교차하여 제작한 로빙 크로스(woven roving) 형식을 적용하였다. 이는 일반적인 섬유 형태 보다 인장 강도 및 내구성이 우수할 뿐만 아니라, 재료적 특성을 활용하여 주각부의 구속력을 모든 방향으로 균일하게 배분하는 효과를 기대하였다. 부직포는 섬유가 불규칙하게 배열된 재료로서, 주각부의 콘크리트 박리 억제 효과를 검증하기 위해 선정하였으며, 단위 면적당 질량이

Table 1. Test subject

Specimen	Non-woven fabric	GFRP	Ratchet strap	Fixed device	P - G FD (FD: Fixed Device, S:Strap) (G:GFRP, N:Non-Woven Fabric) (P:Pedestal)
P	X	X	X	X	
P-NS	O	X	O	X	
P-GFD	X	O	X	O	

500 g/m²의 제품을 사용하였다. GFRP 대비 경제성이 뛰어나며, 재료의 유연성을 바탕으로 주각부 형상에 제약 없이 시공이 가능하다는 장점이 있다. 보강재들을 활용한 제작 공정은 다음과 같은 절차로 진행하였다. 우선 콘크리트 표면을 바탕 처리한 후 표면에 에폭시 수지를 균일하게 도포하였다. GFRP와 부직포는 동일한 시공 절차를 거쳐 설치되었으며, 각 보강재를 100 mm의 겹침 이음을 두어 기둥 표면을 피복하였다. 이후 동일한 과정을 반복하여 총 2개 층(Layer)을 형성함으로써 주각부의 구속 효과를 높였다. 앵글과 라쳇 스트랩의 배치에 있어서는 손상이 가장 집중될 것으로 예상되는 주각부 상부 구간을 중심으로 설치하였으며, 하부로 갈수록 설치 간격을 점진적으로 넓게 조정하였다. 라쳇 스트랩 보강 시, 충분한 구속력을 확보하기 위해 총 2개 층으로 중첩하여 보강하였다. Fig. 3에는 실험체의 평면도를 나타냈으며, Fig. 4는 실험체의 측면도를

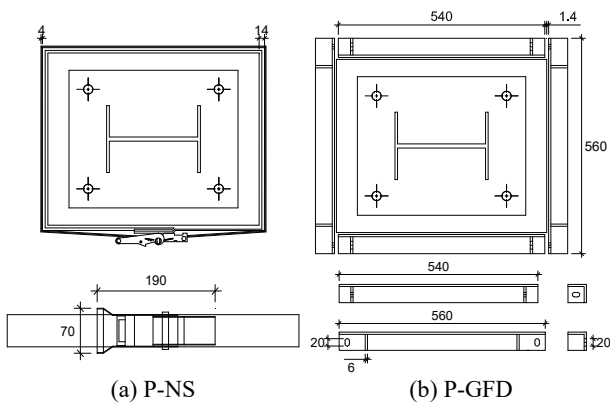


Fig. 3. Reinforcement details (plan view)

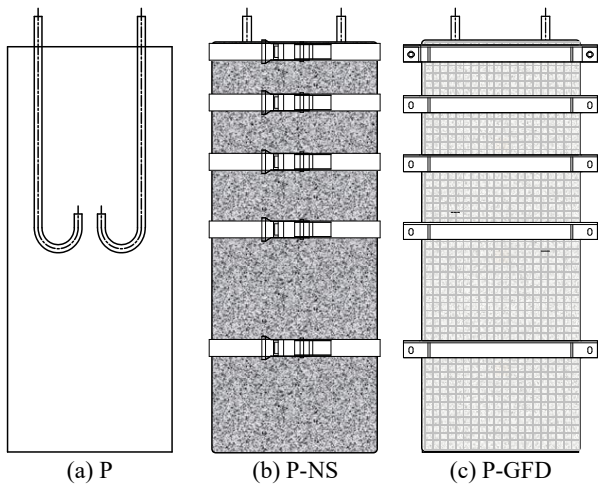


Fig. 4. Reinforcement details (side view)

나타낸다. 본 연구에서 제안하는 보강 부재는 외부 환경에 노출되는 시공 특성을 고려하여, 내식성 향상을 위하여 에폭시 수지 도포를 적용할 수 있다. 이는 강재 표면에 보호막을 형성함으로써, 수분 및 염화물 등 외부 부식 인자의 침투를 효과적으로 억제할 수 있으며, 결과적으로 보강 시스템의 장기적인 내구성을 확보하는데 기여할 것으로 판단된다.

2.3 실험 세팅 및 계측 계획

Fig. 5에는 실험체 설치도를 나타내었다. 본 실험에서는 최대용량 1,000 kN의 3축 회전 가능한 액추에이터(Actuator)를 사용하여 실험체의 가력 지점과 동일한 높이(1,906 mm)에 설치하였으며, 변위제어를 통해 실험을 수행하였다. 실험체 세팅 시 기둥 부재의 횡좌굴로 인한 조기 파괴를 방지하기 위해 비지지 길이 이내에 횡방향 좌굴 방지 지그를 설치하였다. 가력 프로토콜은 FEMA 350의 접합부 가력 프로토콜^[9]을 참고하여 정적 실험을 수행하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 실

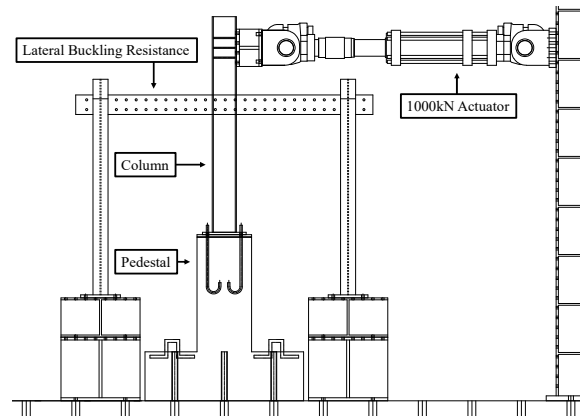


Fig. 5. Specimen setup

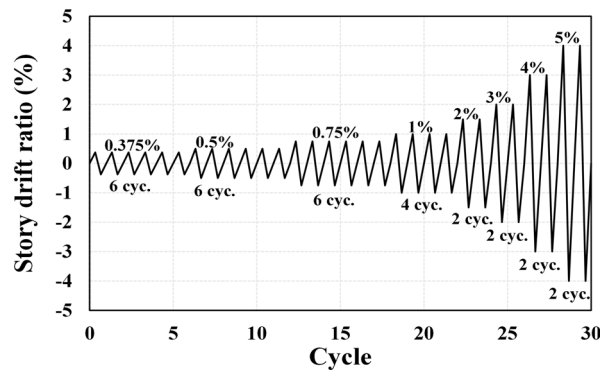


Fig. 6. Loading protocol

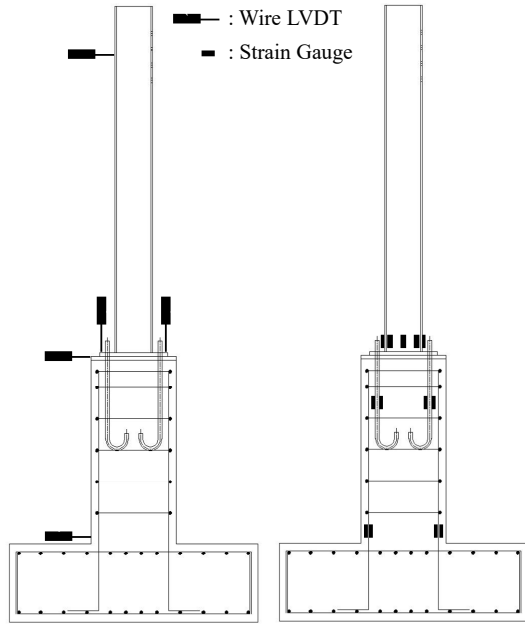


Fig. 7. Instrumentation layout

험 종료 시점은 최대 하중 도달 이후 내력이 최대치의 80 % 이하로 저하되거나, 실험체의 파괴로 인해 내력 유지가 불가능한 시점에서 종료 시점을 설정하였다. Fig. 7에는 계측장치 설치도를 나타내었다. 변위 측정을 위하여 총 5개소에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 기둥 부재의 수평 변위를 측정하기 위해 가력 지점의 반대편 기둥 플랜지에 1개소 배치하였으며, 베이스플레이트의 거동을 확인하기 위해 2개소에 설치하였다. 또한 실험체의 슬립 여부를 검토하고자 주각부 상부와 하부에 각각 1개소 배치하였다.

부재별 변형을 검토하기 위하여 총 25개의 변형률 게이지를 부착하였다. 기둥 플랜지에 등 간격으로 3개소(총 6개), 웨브에 3개소 설치하였으며, 앵커볼트에 2개소(총 8개), 철근에 2개소(총 8개) 배치하였다.

3. 실험 결과

3.1 재료시험 결과

주각부에 적용된 재료는 실제 파이프랙 구조물에 사용되는 설계 상세를 기반으로 선정하였으며, Table 2에는 강재의 재료시험 결과값을 나타내었으며, Table 3에는 콘크리트 재료시험 결과값을 정리하였다. 실험체에 사용된 강재는 두께별로 각 3개소 절취하여 인장 시험을 수행하였다. 재료시험 결과 기둥과 앵커볼트, 앵글은 모두 KS D 3503 (일반 구조용 압연강재)^[10]에서 규정하는 항복강도 기준치를 평균 13 %가량 상회하여 관련 규정을 만족하였다. 철근의 경우 KS D 3504 (철근 콘크리트용 봉강)^[11]에서 규정하는 항복강도 기준치를 평균 22.5 % 상회하여 관련 규정을 만족하였다. 반면, 콘크리트의 확인된 압축강도는 설계기준 압축강도(24 MPa) 대비 약 9.6 %가량 하회하는 결과를 보였다.

본 연구에서 사용된 보강재(라쳇 스트랩, 에폭시 수지, GFRP, 부직포)는 기성 제품의 특성상 품질의 균질성이 확보되어 있으므로, 별도의 추가 재료시험 없이 제조사에서 제시한 기계적 특성을 사용하였다. 보강재의 기계적 특성은 Table 4-Table 7에 나타냈다.

Table 3. Results of concrete material test

Specimen	Design criterion strength f_{ck} (MPa)	E (MPa)	Compressive strength (MPa)
Concrete	24.00	24925.51	21.70

Table 2. Results of steel material test

Specimen		Steel grade	Strength (MPa)		E (MPa)	Elo (%)
			Yield	Ultimate		
Column	Flange (11t)	SS275	324.64	460.60	208221.17	27.70
	Web (7t)		327.21	455.14	205579.67	25.70
Anchor Bolt	M24		281.47	462.92	211714.25	24.10
Angle (6t)			310.58	446.57	202685.58	27.13
Rebar	D19	SS400	514.30	701.50	220088.00	20.53
	D13		466.98	673.21	219756.50	20.96

Table 4. Mechanical properties of GFRP

Type	GFRP
Tensile strength (N/mm ²)	206–343
Tensile modulus (N/mm ²)	10,297–30,989
Elo. (%)	1.6–2.0
Compressive strength (N/mm ²)	206–382
Flexural strength (N/mm ²)	314–520
Flexural modulus (N/mm ²)	13,729–27,459

Table 5. Mechanical properties of epoxy resin

Type	Epoxy resin
Flexural strength (N/mm ²)	100–110
Compressive strength (N/mm ²)	90–100
Impact strength (KJ/m ²)	7–9
Hardness	70–73
Heat deflection temperature (°C)	60–70

Table 6. Mechanical properties of ratchet strap

Type	Ratchet strap
Tensile strength	20 kN

Table 7. Mechanical properties of non-woven fabric

Type		Non-woven fabric
Breaking strength (N)	Length	1088.20
	Width	1224.30
Breaking Elo. (%)	Length	121.00
	Width	127.50

3.2 모멘트-변형각 관계

각 실험체에 대한 모멘트-변형각 관계는 Fig. 8에 나타내었다. 베이스플레이트, 앵커볼트 항복의 이론적 모멘트 강도를 함께 표시하였다. P-NS, P-GFD 실험체는 GFRP와 부직포와 같은 보강재로 피복되어, 균열의 진전 양상을 직접 확인하는데 한계가 있었다. 무보강 실험체 P는 0.015 rad에서 슬립을 확인하였으며, 이는 모르타르 균열 및 콘크리트 휨균열이 원인이라 판단된다. 0.03 rad 이후 가력 절차에서는 내력은 일부 증가하였으나, 유의미한 증가는 확인되지 않았다. 이는 적용된 모멘트가 앵커볼트의 이론적 항복모멘트를 초과한 것이 원인으로 판단된다. 0.07 rad 정방향(+)에서 내력 저하가 시작되는 것을 확인하였으며, 0.08 rad 정·부방향

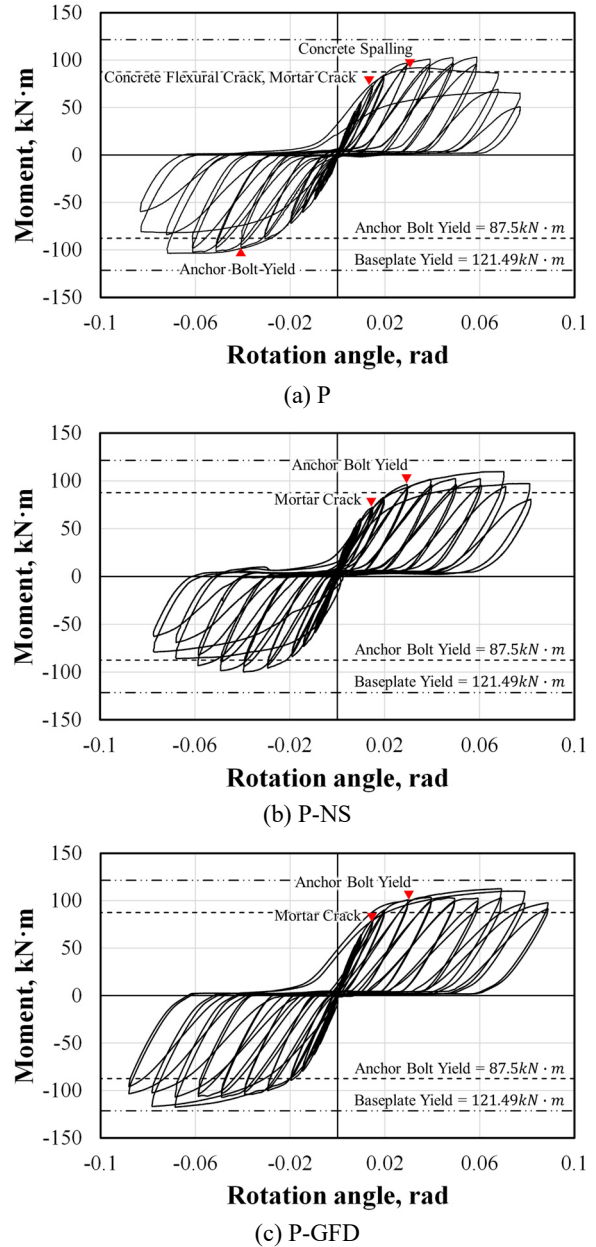


Fig. 8. Moment-rotation angle results of specimens

모두 내력이 최대 내력 대비 80 % 이하로 저하되어 실험을 종료하였다. 이는 주각부의 얇은 콘크리트 피복 두께로 인해 발생한 콘크리트 박리가 앵커볼트 주변의 측면 구속력을 상실시키고, 베이스플레이트 하부의 유효 지압 면적을 급격히 감소시킨 결과로 판단된다. 주각부를 부직포와 라쳇 스트랩으로 보강한 실험체 P-NS는 0.015 rad에서 슬립과 모르타르 균열을 확인하였으며, 0.03 rad 이후 가력 절차에서는 내력은 일부 증가하였으나, 유의미한 증가는 확인되지 않았다. P-NS 실험

체는 모멘트-회전각 관계가 P 실험체와 유사하였으나, 0.05 rad 부방향(-)에서 내력 저하가 시작되는 것을 확인하였으며, 0.07 rad 정방향(+)에서는 내력 저하 시점이 상대적으로 지연된 것으로 확인되었다. 0.08 rad 부방향(-)에서 최대 내력 대비 80 % 이하로 감소하여 실험을 종료하였다. 실험체에서 나타난 정·부방향 거동 편차는 시공 오차와 보강재의 비대칭적 밀착 상태에 따른 구속력의 불균형이 원인으로 판단된다. 주각부를 유리섬유와 앵글로 보강한 실험체 P-GFD는 0.02 rad에서 슬립과 모르타르 균열을 확인하였다. 이는 앞선 두 실험체에 비해 슬립 발생 시점이 지연된 것으로, 보강법에 의해 콘크리트가 구속되어 초기 균열을 억제하고 콘크리트 강성을 유지했기 때문으로 분석된다. P-GFD 실험체 또한 모멘트-회전각 관계가 P 실험체와 유사하였으나, 내력 저하 시점이 상대적으로 지연되어 0.08 rad 정·부방향 모두 일부 내력 저하가 관찰되었으나 유의미한 수

준은 아니었으며, 0.09 rad 부방향(-)에서 최대 내력 대비 80 % 이하로 감소하여 실험을 종료하였다. 이는 보강법이 콘크리트 피복을 물리적으로 구속함으로써, 콘크리트 박리를 억제하고 주각부의 구조적 연속성을 유지한 것으로 판단된다.

4. 실험 결과 분석

4.1 실험체 손상상태

Fig. 9에는 각 실험체의 최종 손상 상태를 나타내었다. 보강 실험체인 P-NS와 P-GFD는 보강재로 인하여 가력 중 균열 진전 양상을 육안으로 직접 확인하는 데 한계가 있었으며, 이에 따라 실험 종료 후 보강재를 해체하여 내부 손상 상태를 분석하였다. 해체 조사 결과

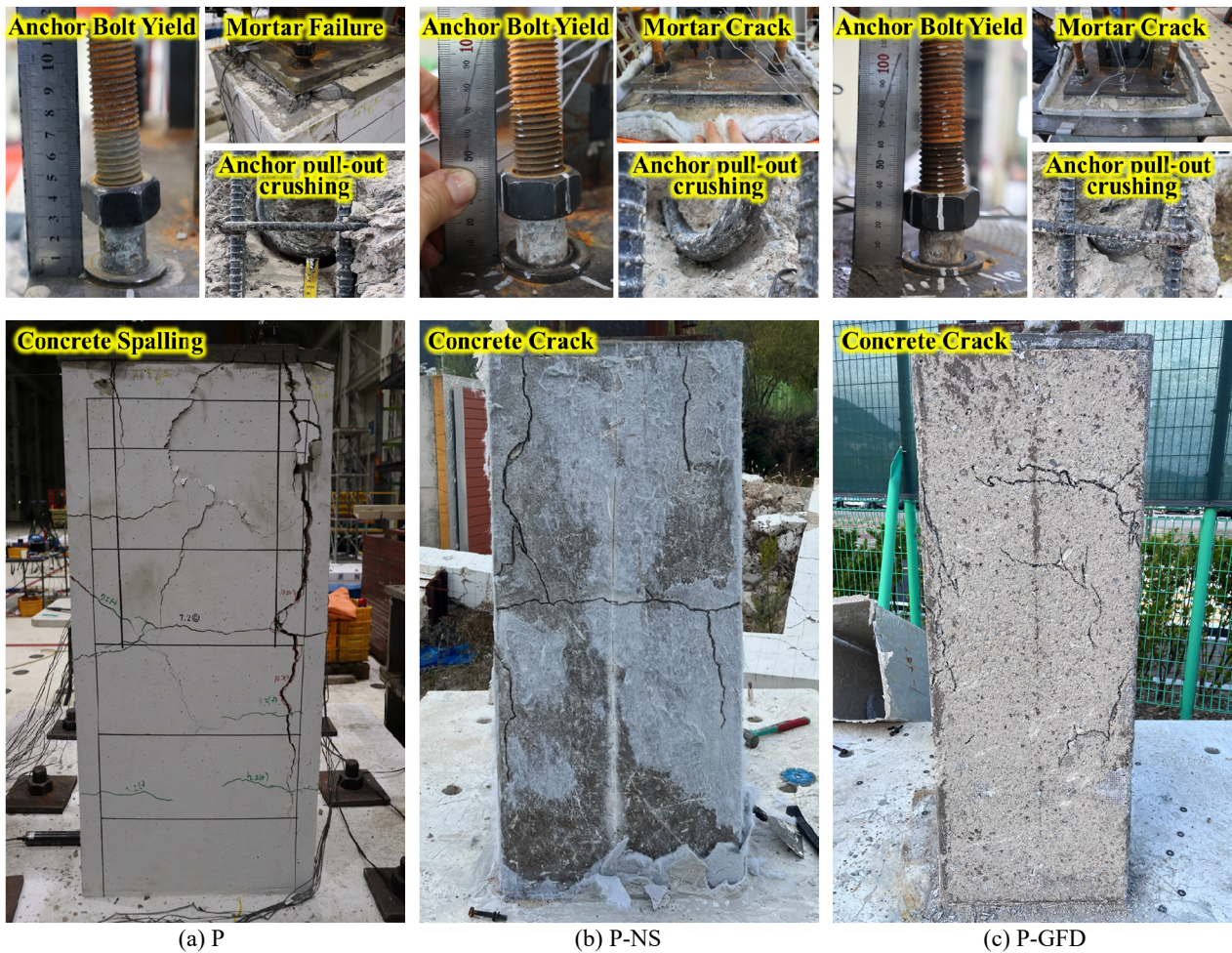


Fig. 9. Failure surface after disassembly

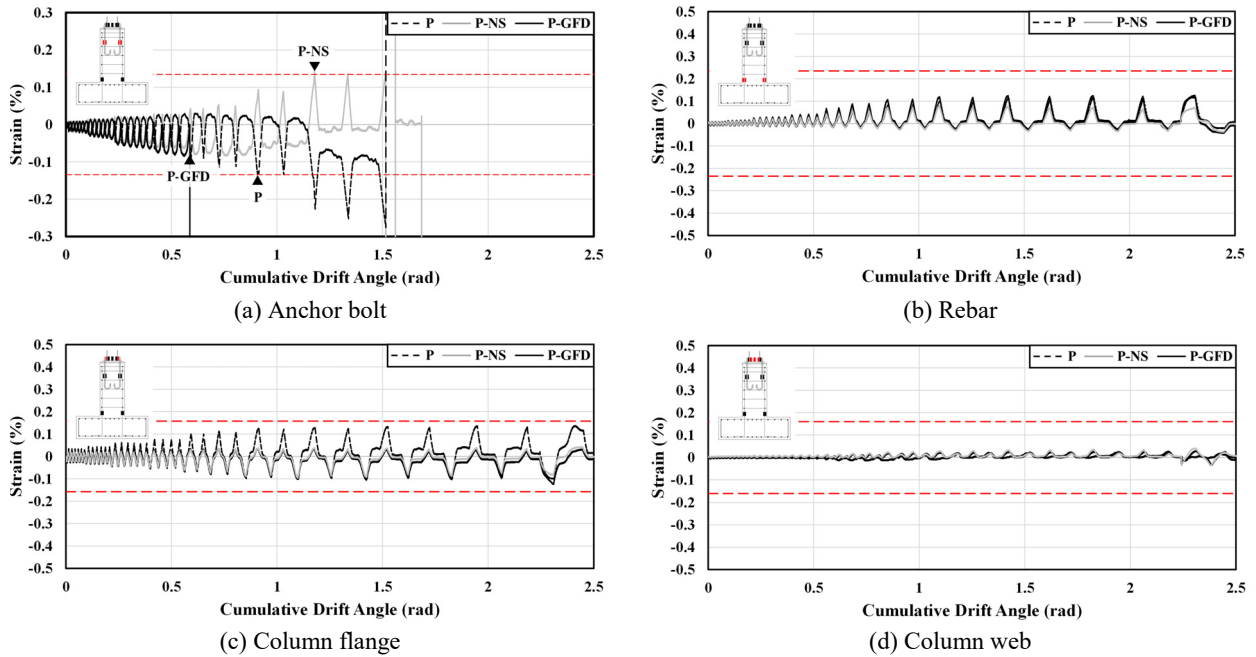


Fig. 10. Strain results

모든 실험체에서 앵커볼트 인장 변형, 콘크리트 균열 및 박리, 앵커볼트 정착부의 국부 압괴(Anchor pull-out crushing), 모르타르 균열 및 파괴를 관찰하였다. 이는 앵커볼트 인장 변형으로 인해 유격이 발생하고, 이에 따른 베이스플레이트의 회전 거동이 콘크리트 상부에 지압 응력을 집중시킨 결과로 판단된다. 특히, 피복 두께가 상대적으로 얇은 경우, 이러한 응력 집중은 콘크리트 박리를 가속화하는 원인으로 판단된다. 무보강 실험체 P에서 얇은 피복 두께로 인하여 발생한 콘크리트 박리 현상이 관찰되었지만, P-GFD에서는 동일 조건에서 콘크리트 박리 현상이 현저히 억제된 것으로 확인되었다. P-NS의 경우 무보강 실험체와 비교하여 전반적인 손상 정도는 감소하였으나, P-GFD에 비하여 콘크리트 탈락 억제 효과는 차이를 보인 것으로 나타났다. 이는 보강재의 재료적 특성 및 콘크리트와의 부착 성능 차이가 원인으로 판단된다. P-GFD 실험체에 사용된 GFRP는 에폭시 수지와와의 함침성이 우수하여 콘크리트 표면에 긴밀하게 밀착되어 일체화된 구속 면을 형성함으로써, 가력 중 발생하는 콘크리트의 팽창과 탈락을 효과적으로 억제하였다. 반면, P-NS 실험체에 사용된 부직포는 재료 자체의 물리적 특성상 GFRP 수준의 밀착성 확보에 한계가 있었던 것으로 판단된다. 따라서 보강법의 구속 효과는 콘크리트의 탈락을 억제하고 주

각부의 구조적 일체성을 유지하는데 기여한 것으로 판단된다.

4.2 부재별 변형률

Fig. 10에는 부재별 변형률 게이지 결과를 비교하여 나타냈다. 분석 결과, 모든 실험체에서 기둥 및 기타 부재는 탄성 상태를 유지한 반면, 앵커볼트만 항복 변형률에 도달한 것으로 확인되었다. 이는 보강 여부와 관계없이 앵커볼트 항복이 지배되었음을 의미한다. 이와 같이 소성 거동이 앵커볼트에 집중되면서 전체 거동은 앵커볼트의 인장 변형 및 유격에 의한 슬립(slip) 거동에 의해 지배된 것으로 판단된다.

4.3 초기강성 및 항복모멘트

실험에서 도출된 하중-변위 관계는 반복이력곡선의 형태로 나타나기 때문에, 초기 강성 및 항복지점을 명확히 평가하기 위해 일방향 단조 가력 곡선으로 정리가 필요하다. 이에 Fig. 11과 같은 방법으로 이력 곡선을 골격부(Skeleton part), 바우싱거부(Bauschinger part), 제하부(Unloading part)로 분해하였다^[12]. 항복점 산정에는 Fig. 12에 제시된 General Yield Point Method^[13]를 사용하였다.

각 실험체의 주요 구조성능 지표는 Table 8에 정리하였다. Fig. 14에 항복모멘트비(M_{Test}/M_{Test-P})를 비교하여 나타내었다. 보강법에 의한 콘크리트 구속 효과로 초기 강성은 무보강 실험체 대비 약 12-23 %, 항복모멘트는 약 5-10 % 수준으로 확인되었다. 수치상의 증가는 확인되었으나, 강성 및 내력 보강 효과는 제한적인 수준으로 판단된다. 이는 변형률 게이지 분석에서 확인된 바와 같이 앵커볼트의 항복이 지배되었기 때문으로 분석된다. 주각부의 하중 저항 메커니즘이 앵커볼트의

인장 변형 및 유격에 의한 슬립(slip) 거동에 의해 지배됨에 따라 앵커볼트에서 소성 변형이 집중되었다. 이로 인하여 실험체 간 유사한 이력 형상을 보였으며, 보강법에 의한 내력 증진 효과 또한 제한적인 것으로 판단된다. 반면, 항복 변형각은 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 초기 강성이 증가함에 따라 동일 하중 수준에서 요구되는 변위가 상대적으로 감소하였기 때문으로 판단된다.

4.4 최대모멘트

반복가력실험에 의한 정방향(+), 부방향(-)의 모멘트-변형각 곡선을 Fig. 13과 같이 포락곡선으로 나타내었으며, 실험체 강도와 연성도 등을 평가하였다. Fig. 14에 실험체별 최대 모멘트 비(M_{Test}/M_{Test-P})를 비교하여 나타내었다. 실험체 별 최대 모멘트비는 무보강 실험체 대비 보강 실험체 P-NS는 1 %, P-GFD는 11 % 정도로 나타나, 강도의 증가 효과는 있으나, 그 효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

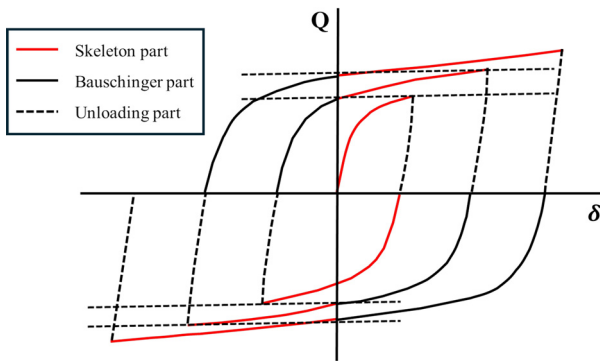


Fig. 11. Hysteresis curve extraction method

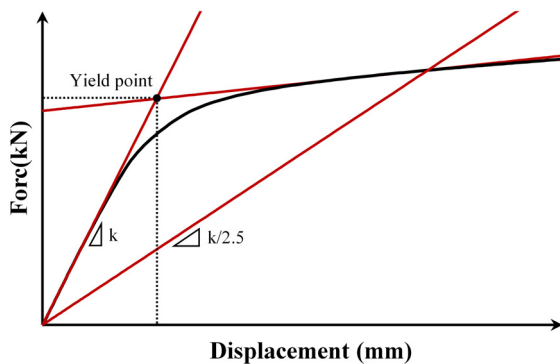


Fig. 12. General yield point method

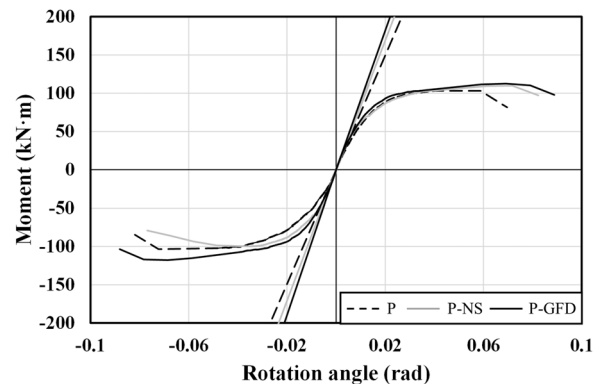


Fig. 13. Envelope curve

Table 8. Summary of experiment results

Specimen		k (kN/mm)	θ_y (rad)	M_y (kN·m)	θ_u (rad)	M_u (kN·m)
P	(+)	2.0	0.01238	90.15	0.06963	103.23
	(-)	1.89	-0.01123	-76.24	-0.0833	-103.53
P-NS	(+)	2.18	0.01102	86.72	0.08233	109.75
	(-)	2.19	-0.01112	-88.63	-0.07685	-99.97
P-GFD	(+)	2.33	0.01086	91.87	0.08883	112.68
	(-)	2.45	-0.01028	-91.49	-0.08809	-117.77

* k : initial elastic stiffness, θ_y : yield rotation angle of specimen, M_y : yield moment of specimen, θ_u : ultimate rotation 80 % of the maximum moment, M_u : maximum moment

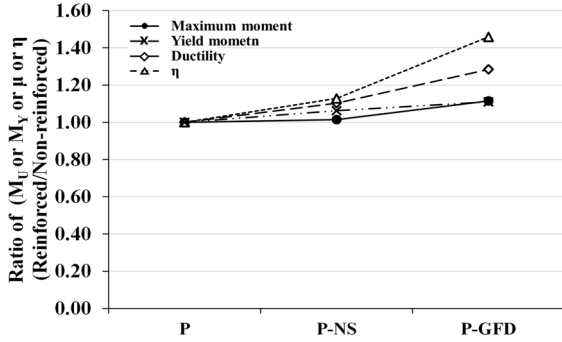


Fig. 14. Comparison of experimental results

4.5 연성도

Fig. 14에 연성도(δ_u/δ_y)의 비(μ_{Test}/μ_{Test-P})를 비교하여 나타내었다. 연성도의 최대 변위는 최대내력의 80%에 해당하는 변위를 기준으로 평가하였다. 연성도 비교 결과, 무보강 실험체 대비 보강 실험체 P-NS는 10%, P-GFD는 28% 향상된 것을 확인하였다. P-NS의 경우 정방향(+)에서는 개선된 거동을 보였으나, 부방향(-)에서의 상대적으로 빠른 내력 저하가 P-NS 실험체의 전체평균 연성도 산정에 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면, P-GFD는 정·부방향 모두에서 고른 내력 유지 능력을 보여 주각부의 연성 증진에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

4.6 누적소성변형배율

Fig. 14에 누적소성변형배율을 비교하여 나타내었다. 누적소성변형배율을 분석하기 위하여 각 실험체의 하중-변위 이력곡선을 Fig. 11과 같이 분해하여 각 그래프 면적의 합으로 총 누적 소성 변형 에너지(W_p)를 산정하였다. 산정된 누적 에너지를 탄성 변형 에너지($Q_y\delta_y$)로 무차원화한 누적소성변형배율(η)을 에너지 흡수 능력 및 변형 능력 평가 지표로 활용하였다. 이는 누적소성변형배율의 수치가 클수록 상대적인 에너지 흡수 능력이 증가한다는 것을 의미한다. 이에 대한 식 (1)~식 (3)을 나타내었다.

$$s\eta = \frac{sW_p}{Q_y\delta_y} \tag{1}$$

$$B\eta = \frac{B W_p}{Q_y\delta_y} \tag{2}$$

Table 9. Energy dissipation capacity of specimens

Specimen	$Q_y\delta_y$	W_p	η	Ratio (reinforced/non-reinforced)
P	970.4	46992.4	48.4	1
P-NS		52945.6	54.6	1.12
P-GFD		68507.6	70.6	1.46

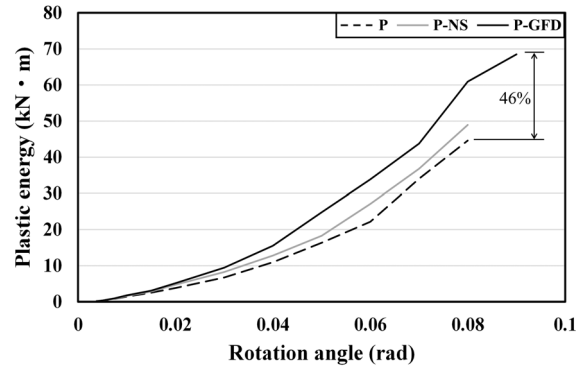


Fig. 15. Energy dissipation capacity

$$\eta = s\eta + B\eta = \frac{W_p}{Q_y\delta_y} \tag{3}$$

- 여기서, W_p : 총 누적소성변형 에너지
- sW_p : 골격곡선부 누적소성변형 에너지
- BW_p : 바우싱거부 누적소성변형 에너지
- Q_y : 항복 하중
- δ_y : 항복 변형

Table 9에 식 (1)~식 (3)으로 종국 상태까지 평가한 누적소성변형에너지 및 누적소성변형배율을 나타내었다. 누적소성변형배율(η) 분석 결과, P 실험체는 48.4, P-NS 실험체는 54.6, P-GFD 실험체는 70.6으로 나타났다. 무보강 실험체 대비 P-NS는 12%, P-GFD는 46% 증가하였다. Fig. 15에는 변형각 증가에 따른 누적 에너지 소산량을 나타내었다. P-GFD 실험체의 에너지 소산 능력이 가장 우수하게 나타났다.

5. 결론

본 연구는 노출형 주각부를 갖는 기존 파이프랙 구조물에서 반복하중 시 발생하는 손상 집중 및 취성적 파

파괴를 억제하기 위하여, 콘크리트 구속 효과를 활용한 연성 내진 보강 상세를 제안하였다. 제안된 보강법 평가를 위하여 반복 가력시험을 수행하였으며, 실험체의 이력 거동, 손상 억제 효과 및 에너지 소산 능력을 분석하여 다음 결론을 도출하였다.

- (1) 무보강 실험체는 얇은 피복 두께로 인해 조기에 콘크리트 박리가 발생하였고, 이로 인한 내력저하가 확인되었다. 반면, 유리섬유와 앵글로 보강한 P-GFD 실험체는 보강재의 구속 효과로 콘크리트 탈락을 억제하여 주각부의 구조적 일체성을 종국 상태까지 유지하였다.
- (2) 보강법에 의한 강도 증진 효과는 보강법에 의한 콘크리트 구속으로 초기 강성은 무보강 대비 약 12~23 %, 항복 모멘트는 5~10 % 수준으로 제한적인 것으로 확인되었다. 이는 주각부의 하중 저항 메커니즘이 주로 앵커볼트의 인장 변형에 지배되기 때문으로 판단된다.
- (3) 연성도 비교 결과, 무보강 실험체 대비 P-GFD 실험체의 연성도는 28 %, P-NS 실험체는 10 % 향상되었다. 이는 보강법이 최대 내력 도달 이후 피복 콘크리트의 취성파괴를 지연시켜 변형 능력을 확보했음을 의미한다.
- (4) 누적소성변형배율 분석 결과, P-NS와 P-GFD는 무보강 대비 각각 12 %, 46 % 정도 우수한 에너지 소산 능력을 보였다. 특히, P-GFD 실험체는 GFRP와 앵글에 의한 구속 효과로 콘크리트 탈락과 내력 저하가 효과적으로 지연되었으며, 그 결과 주각부의 에너지 소산 능력 향상에 가장 우수한 효과를 나타낸 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면, P-NS 실험체는 시공성 및 경제성을 우선으로 한 보강 방식으로, 콘크리트 박리 억제에는 기여하였으나, 보강재의 비대칭적 밀착에 따른 구속력의 불균형으로 인해 연성 증진 효과는 다소 제한적인 것으로 판단된다. 반면, P-GFD 실험체는 우수한 시공 효율을 유지함과 동시에 균일한 구속력을 바탕으로 가장 우수한 연성 능력을 확보하여, 본 연구에서 제안한 보강 상세 중 가장 우수한 내진 성능을 확보한 것으로 분석된다. 또한, 콘크리트의 탈락 및 박리가 주된

파괴모드로 나타나는 주각부의 경우에는 제안하는 보강법의 보강효과가 더 높게 나타날 것으로 기대된다. 따라서 이러한 주각부의 다양한 파괴모드를 고려한 추가적인 실험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2026-25506237).

참고문헌(References)

- [1] Kim, Y.J., Choi, K.Y., Kim, Y.H., and Yang, J.W. (2022) Seismic Performance Evaluation Plan for Structural Safety of Pipe-racks, *Proceedings of the 33th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.167-168 (in Korean).
- [2] Kim, J.B. (2000) *A Study on the Analysis of Moment-Rotation Behavior in Steel Column Bases*, Master's Thesis, Busans National University (in Korean).
- [3] Lee, S.H., Park, Y.C., and Oh, B.H. (2005) Experimental Study on Flexural Capacity of Column Base Plate Made of Cast Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.1, pp.93-102 (in Korean).
- [4] Yao, C. (2016) Shear Behavior of Exposed Column Base Connections, *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, Vol.21, No.2, pp.357-371 (in Korean).
- [5] Ye, L.P., Zhang, K., and Feng, P. (2003) Experimental Study on Seismic Strengthening of RC Columns with Wrapped CFRP Sheets, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.17, No.6-7, pp.499-506.
- [6] Lee, D.M., Lee, S.C., Shin, D.H., and Oh, C.K. (2023) Seismic Capacity Evaluation of Rectangular RC Columns Strengthened with Steel Bars, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.36, No.5, pp.283-293.
- [7] Ishibashi, T., and Tsukishima, D. (2009) Seismic Damage of and Seismic Rehabilitation Techniques for Railway Reinforced Concrete Structures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, JCI, Vol.7, No.3, pp.287-296.
- [8] Woo, J.H., Shin, K.J., Lee, H.D., and Park, H.I. (2023) Behavior Analysis of Pipe Rack Column Base Plate

- Connection, *Proceedings of the 34th Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, pp.167-168 (in Korean).
- [9] SAC Joint Venture. (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [10] Korean Agency for Technology and Standards. (2018) *Rolled Steels for General Structure*, KS D 3503:2018, KATS (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards. (2021) *Steel Bars for Concrete Reinforcement*, KS D 3504:2021, KATS (in Korean).
- [12] Kato, B., Akiyama, H., and Yamanouchi, Y. (1973) Predictable Properties of Material under Incremental Cyclic Loading, *Proceedings of IABSE Symposiums*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Portugal, pp.119-124.
- [13] Takamatsu, T., and Tamai, H. (2005) Non-Slip-Type Restoring Force Characteristics of an Exposed-Type Column Base, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.61, No.7, pp.942-961.

요 약: 본 연구는 파이프랙 주각부의 연성 향상을 위해 콘크리트 구속 효과를 활용한 보강 상세를 제안하였으며, 특히 기존 구조물에 적용이 용이하도록 시공성과 경제성을 고려한 보강법을 제시하였다. 실험 결과, 보강 실험체는 무보강 실험체 대비 우수한 연성 능력을 나타냈으며, 특히 P-GFD 실험체가 가장 뛰어난 내진 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 보강 실험체는 무보강 대비 초기강성이 약 12-23%, 항복모멘트가 약 5-10% 증가하였다. 또한 연성도는 28%, 누적소성변형배율은 약 46% 향상된 것으로 나타났다. 이는 보강법의 구속력이 종국 상태까지 내력을 유지시켜 부재의 연성을 확보한 결과이며, 특히 한계 상태에서도 콘크리트의 손상이 억제된 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 파이프랙, 노출형 주각부, 연성증가형, 손상 억제, 에너지소산량
