Journal of Korean Society of Steel Construction

Vol.36, No.5, pp.289-300, October, 2024

Check for updates ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054 DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2024.36.5.289

철골 모듈러 건축물의 모듈 간 접합부 유형에 따른 지진취약도

김보성 $^{1} \cdot 0$ 상섭 $^{2} \cdot 2$ 근영 $^{3} \cdot 신동현^{4*}$

¹석사과정, 부산대학교, 건축공학과, ²공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원, ³공학박사, 수석연구원, 한국건설기술연구원, ⁴조교수, 부산대학교, 건축공학과

Seismic Fragility of Classified Inter-module Connection Applicable to Steel Modular Structures

Kim, Bo-Seong¹, Lee, Sang Sup², Oh, Keunyeong³, Shin, Dong-Hyeon^{4*}

¹Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea
 ²Ph.D. Research fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea
 ³Ph.D. Senior researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea
 ⁴Assitant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - Inter-module connections have an important role to obtain load transferring mechanism of steel modular structures. The main purpose of this study is to develop seismic fragility functions of inter-module connections applied on the steel modular structures. To do this, test specimens were collected and types of inter-module connections were classified to consider connecting locations and structural characteristics. Based on test results, seismic fragility functions of inter-module connections were evaluated whether they have reasonable structural performance applicable to steel moment resisting frame prescribed on current seismic design code.

Keywords - Steel modular structure, Seismic fragility, Inter-module connection, Performance objective, Damage state

1.서론

모듈러 건축물(Modular structures)은 공장에서 구조 부재 및 내·외장재가 포함되어 생산된 단위 모듈을 현 장으로 운반하여 적층 및 일체화시키는 일종의 공업화 시스템이다. 이와 같은 모듈러 건축물을 구성하는 단위 모듈은 철골조에 기반한 구조체이며, 하중을 전달하는 방식에 따라 폐쇄형 모듈(Close-sided module)과 개방 형 모듈(Open-sided module)로 구분될 수 있다^[1]. 폐쇄 형 모듈은 가새, 패널 등의 구조부재를 모듈의 측면에 설치하여 횡력저항성능을 확보하는 방식이며, 개방형

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction *Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2447 Fax. +82-51-514-2230 E-mail. shindh@pusan.ac.kr 모듈은 철골 모멘트골조와 같이 보, 기둥 부재 및 접합 부를 통해 하중에 저항하는 방식으로 앞선 경우와 비교 하여 현장에서 보다 일반적으로 적용되고 있다^[2].

일반적으로 개방형 모듈을 활용한 모듈러 건축물의 설계 및 평가는 철골 모멘트골조와 유사한 횡력전달 메 커니즘을 가질 것으로 판단하여 관행적으로 현행 내진 설계기준에서 제시하는 철골 보통모멘트골조에 부합하 는 방법을 따르고 있다^[3]. 하지만 개방형 모듈을 활용한 모듈러 건축물은 주요 구조부재로 각형 강관 또는 ㄷ형 강 등을 사용하며, 각 모듈의 적층과정에서 인접한 모듈 의 구조부재가 중첩되어 이중 단면이 형성되는 등 일반 적인 철골 모멘트골조와는 차이점을 나타낸다^{[4],[5]}. 또 한 모듈러 건축물은 시공성을 높이기 위하여 모듈 간 접합에 다양한 접합 상세를 적용하고 있어 접합 상세에 따라 상이한 구조 거동이 나타날 수 있기에 해당 특성 을 고려한 설계 및 평가방법이 요구된다.

모듈 간 접합은 보 플랜지에 볼트를 체결하여 적층방 향으로 접합하는 상세가 일반적이며^{[6],[7]}, 기둥 내부 삽입

Note.-Discussion open until April 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 1, 2024; revised September 30, 2024; approved on September 30, 2024.

형 장치(Plug-in-device)를 활용함으로써 기둥 부재에서 모듈 간 접합이 이루어져 구조부재 및 마감재의 손상을 최소화하기 위한 상세들도 제시되고 있다^{[8],[9]}. 일반적인 볼트 체결형 접합방식의 시공성을 개선하기 위한 모듈 간 접합방식들이 제시되고 있으며, 별도의 전단저항 장 치의 사용 없이 단위 모듈의 기둥 부재 내부를 관통하는 긴장재에 긴장력을 작용시켜 모듈 간에 결속력을 획득하 는 포스트텐셔닝 공법이 대표적이다^{[10],[11]}. 또한 볼트체 결이나 긴장력 작용과 같은 적층 후 과정에서 모듈 간의 결속력을 획득하는 시공방법을 개선하고자 적층과 동시 에 상하부 모듈이 결속되는 자가 체결장치(Self-Locking device)를 확용한 상세도 제시되었다^{[12],[13]}.

모듈러 건축물에 관한 다수의 연구가 모듈 간 접합부 에 중점을 두고 있는 이유는 모듈 간 접합부를 포함한 보-기둥 접합부는 하중을 전달 및 분배하는 중요한 구 조 요소이며 해당 접합부의 강성 및 강도 특성이 구조 시스템의 안전성에 주요한 영향을 미치기 때문이다^[14]. 현행 내진설계기준에서는 철골 모멘트골조의 유형에 따라 접합부의 요구성능을 제시하고 있기 때문에 종래 의 방법에 따라 모듈러 건축물을 내진설계하기 위해서 는 접합부를 강접합으로 이상화하여 구조해석모델을 작성한 후 내진성능을 평가하는 사양적 설계를 따르게 된다. 하지만 종래의 절차로는 모듈러 건축물을 구성하 는 접합부의 특징을 제대로 반영하기 어려우며 시스템 수준에서도 정확한 내진성능을 평가하기 어려울 것으 로 판단된다. 따라서 모듈러 건축물의 다양한 접합부 상세를 유형화하고 유형에 따른 적합한 목표 내진성능 을 설정하며, 손상 평가를 기반으로 정의된 취약도 함 수(Fragility function)를 활용하여 요구하중에 의한 손 상이 목표 성능을 넘지 않도록 정량적으로 평가하는 성 능기반설계를 적용하는 것이 합리적인 모듈러 건축물 설계를 위하여 요구된다.

본 연구에서는 모듈러 건축물의 성능기반설계를 수 행하기 위해 모듈러 건축물의 횡력저항성능에 가장 주 요한 역할을 한다고 볼 수 있는 모듈 간 접합부를 대상 으로 취약도 함수를 도출하고자 한다. 이를 위하여 모 듈러 건축물 모듈 간 접합부 관련 실험연구를 조사하고 유형화하였으며, 실험적으로 확인한 손상 정보를 바탕 으로 건축물 횡력저항성능을 평가함에 있어 주요 지표 로 고려되는 층간변위비를 기반으로 취약도 함수를 통 계적으로 도출하고자 한다. 또한 취약도 함수 도출을 위해 모듈 간 접합부의 손상상태 기준을 정립하고 현행 내진설계기준의 철골 모멘트골조에 부합하는 횡력저 항성능을 보유하기 위한 유형화된 모듈 간 접합부의 성 능 확보 여부를 취약도 함수를 활용하여 평가하였다.

2. 모듈 간 접합부 유형화

모듈러 건축물의 모듈 간 접합부에 대한 취약도 함수 를 도출하기 위하여 실험적으로 손상상태를 평가한 기 존 연구의 실험결과를 분석하였다. 15건의 기존문헌에 서 총 54개의 모듈 간 접합부 실험체를 분석하였으며, Table 1에서는 관련된 상세를 정리하고 있다. 지진하중 작용 시에 반복되는 변형 발생으로 인한 강도 및 강성 저하를 보수적으로 반영하기 위해 반복가력을 실시한 실험결과를 수집하였다. 실험체는 골조 대상이 아닌 접 합부 자체에 대한 실험을 목적으로 하며, 가력 프로토 콜은 성능평가 목적에 따라 유사 또는 일부 차이가 있 다. 수집된 자료를 바탕으로 모듈 간 접합 방식에 따라 분류를 진행하였으며, 강성 및 강도와 같은 보유 성능 에 따른 분류를 수행하였다.

2.1 모듈 간 접합 방식에 따른 분류

모듈러 건축물의 구조성능과 관련하여 구조부재의 형상과 재료적 특성 등 다양한 요인이 영향을 미치며 이 중에서 모듈 간 접합 방식이 가장 주요한 영향을 나타낸 다고 볼 수 있다. Table 1에서 정리하고 있는 모듈 간 접 합부 상세는 크게 두 가지 유형으로 분류할 수 있으며, 모듈 간 접합부가 형성되는 위치에 따라 1)보 연결형 모 듈간 접합부(Beam-to-Beam connection, BTB), 2)기둥 연결형 모듈간 접합부(Column-to-Column connection, CTC)로 구분된다. Fig. 1에서는 접합 방식 유형에 따른 대표적인 모듈 간 접합부 상세를 정리하고 있다. 보 연 결형 모듈간 접합부는 보 플랜지에서 직접 볼트 체결하 여 접합부를 구성하거나 인접한 보의 웨브에 연결철물 을 활용하여 볼트 체결 후 접합부를 구성하는 상세가 일반적이다. 기둥 연결형 모듈간 접합부는 하중 전달 과정에서 중요한 역할을 수행하는 기둥부재의 연속성 을 확보하기 위해 다양한 상세를 적용하고 있으며, 추

NI-	C	Elsen harm	Calling harm	Calumn	T	C4: ff.		Cture an eth	E /E	Class	D-f
<u>NO.</u>	Specimen	Floor beam	D 150 150 0	D 150 150 0	Туре	Stiffness	$\frac{K_i/K_R}{0.070}$	Strength	F_i/F_{FS}	Class	Kei
<u> </u>	QSCI	B-250x150x8	B-150x150x8	B-150x150x8	DTD	Semi	0.079	Partial	0.596	2	5.43
2	QSC2	B-150x150x8	B-150x150x8	B-150x150x8	BIR	Semi	0.141	Full	1.30	1	[[4]
	QSC3	B-250x150x8	B-150x150x8	B-150x150x8		Semi	0.080	Partial	0.953	2	
4	QSI	C-200x70x8	C-200x70x8	B-150x150x10		Semi	0.055	Partial	0.649	2	
_5	QS2	C-200x70x8	C-200x70x8	B-150x150x10	BIB	Semi	0.069	Partial	0.723	2	[6]
6	QS3	C-200x70x8	C-200x70x8	B-150x150x10		Semi	0.067	Partial	0.726	2	
	QSI	B-250x150x5	B-150x150x8	B-150x150x8		Semi	0.067	Partial	0.563	2	
	QS2	B-250x150x5	B-150x150x8	B-150x150x8	втв	Semi	0.062	Partial	0.826	2	[8]
9	QS3	B-250x150x5	B-150x150x8	B-150x150x8		Semi	0.104	Full	1.096	1	[[~]
10	QS4	B-250x150x5	B-150x150x8	B-150x150x8		Semi	0.091	Partial	0.970	2	
11	EMS1	C-200x150x10	C-200x150x10	B-200x200x12		Semi	0.152	Full	1.250	1	
12	EMS2	C-200x150x10	C-200x150x10	B-200x200x12	BTB	Semi	0.143	Full	1.132	1	[15]
13	EMS3	C-200x150x10	C-200x150x10	B-200x200x12	DID	Semi	0.140	Full	1.088	1	
14	EMS4	C-200x150x10	C-200x150x10	B-200x200x12		Semi	.130	Partial	0.939	2	
15	QS1	H-125x125x6.5x9	H-125x125x6.5x9	B-150x150x7.5		Semi	0.181	Full	1.470	1	
16	QS2	H-125x125x6.5x9	H-125x125x6.5x9	B-150x150x7.5	DTD	Semi	0.203	Full	1.675	1	[16]
17	QS3	H-125x125x6.5x9	H-125x125x6.5x9	B-150x150x7.5	DID	Semi	0.178	Full	1.212	1	
18	QS4	H-125x125x6.5x9	H-125x125x6.5x9	B-150x150x7.5		Semi	0.113	Partial	0.714	2	
19	ES_2(1)	B-250x150x9	B-150x100x6	B-250x150x12		Semi	0.212	Partial	0.717	2	
20	ID_4(2)	B-250x150x9	B-150x100x6	B-250x150x12		Semi	0.202	Partial	0.789	2	
21	ID 8(2)	B-250x150x9	B-150x100x6	B-250x150x12	BTB	Semi	0.228	Partial	0.811	2	[9]
22	IS 4(3)	B-250x150x9	B-150x100x6	B-250x150x12		Semi	0.067	Partial	0.346	2	
23	Is 8(3)	B-250x150x9	B-150x100x6	B-250x150x12		Semi	0.087	Partial	0.340	2	1
24	K-SS	C-200x75x6	C-200x75x6	B-125x125x9		Semi	0.152	Full	1.066	1	
25	K-SC	C-200x75x6	C-200x75x6	B-125x125x9	BIB	Semi	0.179	Full	1.093	1	[[7]
26	IC OB F	C-250x100x4	C-150x100x4	B-200x100x6		Semi	0.052	Partial	0.591	4	
2.7	IC OB B	C-250x100x4	C-150x100x4	B-200x100x6	CTC	Semi	0.113	Full	1.018	3	[18]
28	081	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.159	Partial	0.844	4	
29	082	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.154	Partial	0.725	4	
30	083	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10	CTC	Semi	0.178	Full	1.032	3	[7]
31	084	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.169	Partial	0.931	4	
32	<u></u> TS_2	B-200x200x8	$B_{-200x180x6}$	$B_{-200x200x10}$		Semi	0.159	Partial	0.931	- -	
32	TS-2 TS-3	$B_{-200x180x8}$	$B_{-200x180x6}$	$B_{-200x200x10}$		Semi	0.158	Partial	0.977		
30	TS 4	B 200x180x8	B-200x180x0	$B = 200 \times 200 \times 10$		Semi	0.158	Dortial	0.944	4	
25	15-4 TS 5	D 200x180x8	D-200x180x0	B-200x200x10	CTC	Semi	0.158	Faitiai En11	1 1 1 9	2	[12]
- 35	TS 6	D-200x100x0	D-200x100x0	D-200x200x10		Semi	0.150	Full Eull	1.110	2	
27	15-0 TS 7	H-200x180x0x10	$\Pi - 200x 180x 0x 8$	B-200x200x10		Semi	0.157	Full Eull	1.145	2	
20		$H = 200 \times 180 \times 6 \times 10$	$H = 200 \times 180 \times 6 \times 8$	B-200x200x10 $P_200x200x10$		Somi	0.157	Full Full	1.002	2	
20	T 2	II 104:150:6:0	$H = 200 \times 100 \times 000 \times 1000 \times 10000 \times 100000000$	D-200x200x10		Semi	0.137	Full Eull	1.209	2	
	1-2 T 2	H-194X150X6X9	H-150x150x/x10	B-200x200x8	CTC	Semi	0.162	Full Eull	1.332	2	F1 21
40	1-3 T.4	H-194X150X6X9	H-150X150X/X10	B-200x200x8		Semi	0.102	Full E 11	1.202	3	[13]
41	I-4	B-200x150x6	B-150x150x/	B-200x200x8		Semi	0.181	Full	1.245	3	
42	JI	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.136	Partial	0.708	4	
43	J2	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10	CTC	Semi	0.169	Full	1.072	3	[19]
44	J3	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.192	Partial	0.951	4	L ' J
45	J4	B-200x200x8	B-200x200x6	B-200x200x10		Semi	0.181	Partial	0.951	4	
_46	H-1	H-200x180x6x10	H-200x180x6x8	B-200x200x10		Semi	0.114	Partial	0.757	4	
_47	H-2	H-200x180x6x10	H-200x180x6x8	B-200x200x10	CTC	Semi	0.123	Partial	0.688	4	[20]
48	H-3	H-200x180x6x10	H-200x180x6x8	B-200x200x10		Semi	0.115	Partial	0.511	4	
49	H-4	H-200x180x6x10	H-200x180x6x8	B-200x200x10		Semi	0.139	Partial	0.772	4	
_50	RCHB	H-250x100x6x9	H-150x100x6x9	B-200x100x9		Semi	0.071	Partial	0.822	4	
51	BCHB1	H-250x100x8x10	H-200x100x8x10	B-200x100x9	CTC	Semi	0.070	Full	1.012	3	[10]
52	BHCB2	H-250x100x8x10	H-200x100x8x10	B-200x100x9		Semi	0.080	Full	1.138	3	
53	EX-S-175PT	H-200x100x5.5x8	H-148x100x6x9	H-200-200-8-12	CTC	Semi	0.220	Full	1.768	3	[11]
54	EX-S-260PT	H-200x100x5.5x8	H-148x100x6x9	H-200-200-8-12		Semi	0.222	Full	1.535	3	

Table 1. Summary of information related to test specimens including inter-module connection

* K_i: Stiffness of inter-module connections, K_R: Criteria to be classified in the rigid stiffness, F_i: Strength of inter-module connections, F_{FS}: Criteria to be classified in the fully strength



Fig. 1. Various construction details of Inter-module connections

	Criteria				
Classification	Stiffness (kN·m/rad)	Strength (kN·m)			
Rigid (Full strength)	$K \ge \frac{25EI}{L}$	$M_{j} \ge M_{pb}$			
Semi-rigid (Partial strength)	$\frac{EI}{2L} \leq \mathbf{K} \leq \frac{25EI}{L}$	$0.2 M_{pb} \leq M_j \leq M_{pb}$			
Pinned (Simple)	$\mathbf{K} \leq \frac{EI}{2L}$	$M_{j} \leq 0.2 M_{pb}$			

Table 2.	Classification	of beam-column	ioints i	1 Eurocode3 ^[22]

가적인 연결철물의 삽입으로 연결부를 보강하거나 긴 장력을 활용해 모듈간 일체성을 확보하는 방법, 그리고 자가체결형 장치를 적용해서 시공성을 높인 상세로 구 성되다.

2.2 모듈 간 접합부 보유성능에 따른 분류

모듈러 건축물의 구조성능에 있어 모듈 간 접합부의 강성 및 강도 특성이 주요한 영향을 미치며, 본 연구에 서는 유로코드에서 제시되고 있는 강구조물 접합부 분 류 기준에 따라 모듈 간 접합부 보유성능에 따른 분류 를 수행하였다^[22]. Table 1에서 정리하고 있는 실험체별 강도 및 강성은 각각 최대강도와 초기탄성강성으로 정 리하였다. 해당 기준에서는 접합부에 대해서 Table 2에 서 정리하는 바와 같이 강성 및 강도에 대한 분류 기준 을 제시하고 있다. 강성에 따라서 강접합(Rigid), 부분 강접합(Semi-Rigid), 핀 접합(Pinned)으로 분류하며 강 도에 따라 전강도접합(Fully strength), 부분강도접합 (Partially strength), 단순접합(Simple)으로 분류한다. 앞서 수집한 54개 실험체의 천장보, 바닥보, 기둥 부재 에 대한 재료 특성과 단면정보를 활용하여 Table 2의 분류기준에 따라 모듈 간 접합부의 보유성능을 분석하 였으며, 해당 결과를 Table 1에 함께 정리하고 있다. 모 듈 간 접합부의 강성 보유성능과 관련하여 수집된 54개 의 실험체는 모두 부분 강접합으로 분류되었으며, 강도 보유성능에 대해서는 단순접합으로 분류된 경우는 없 이 전강도 또는 부분강도접합으로 분류되었다. 이상의 내용을 토대로 모듈 간 접합부는 다음과 같이 총 4가지 로 유형화할 수 있다.

- 유형1: 부분강접-전강도를 가지는 보 연결형 접합부,
- 유형2: 부분강접-부분강도를 가지는 보 연결형 접합부,
- 유형3: 부분강접-전강도를 가지는 기둥 연결형 접합부,
- 유형4: 부분강접-부분강도를 가지는 기둥 연결형 접합부

수집된 모든 실험체에 대한 분류결과를 Table 1에 정리하였으며, Fig. 2에서는 4가지 접합부 유형에 대한 강성과 강도 측면의 분포를 나타내고 있다.

3. 모듈 간 접합부 유형에 따른 지진취약도 함수

3.1 모듈 간 접합부 손상상태

모듈 간 접합부 유형에 따른 지진취약도 함수를 작성 하기 위해서는 접합부에서 발생하는 손상상태를 정량 적 또는 정성적으로 정의할 지표가 필요하며 이와 더불





어 손상상태에 대응되는 성능 수준에 대한 정의가 요구 된다. 철골 모듈러 건축물과 유사한 재료 및 단면 성질을 가진다고 볼 수 있는 철골 모멘트골조의 손상상태 및 성 능수준을 다루고 있는 FEMA 356^[23]과 FEMA 351^[24]의 내용을 참고하여 모듈 간 접합부 손상상태를 정의하기 위한 기준을 Table 3에서와 같이 정리하였다. 손상상태는 미미한 손상(Slight Damage, SD), 약한 손상(Moderate Damage, MD), 중간 손상(Extensive Damage, ED), 심 각한 손상(Complete Damage, CD)의 4가지로 구분하 였다. 손상상태 및 성능수준을 구분하는 기준을 모듈러 건축물의 층간변위비로 판단하여 실험을 통해 도출된 실험체의 모멘트-층간변위비 곡선의 주요 변곡점으로 정량적으로 설정하였으며, 4가지 손상상태는 각각 초 기 강성을 벗어나는 시점, 항복강도 시점, 최대강도 시 점, 파괴 시점의 층간변위비로 판단하였다. 또한 Table 3에 정리된 손상이 발생한 시점의 층간변위비를 정성 적인 판단기준으로 설정하여 두 판단기준 중 보수적인 값으로 손상상태를 판단하였다.

3.2 지진취약도 함수 도출 방법

성능기반내진설계는 설계대상 건축물의 성능을 복 구비용(Replacement), 인명피해규모(Casualty rate), 운 영정지기간(Downtime) 등과 같이 건물에 예상되는 내 진성능을 확률론적으로 추정하기 위한 절차이며, 지진 취약도 함수(Seismic fragility curve)는 성능기반내진설 계 과정 중 손상분석 단계에서 활용된다. 손상분석 단 계에서는 구조해석을 통해 도출되는 공학적 요구 매개 변수(Engineering Demand Parameter, EDP)를 입력값

Damage State	Quantitative Damage State	Qualitative Damage State	Structural Performance level
Slight Damage	Point where initial stiffness is first changed	Minor deformation, No fracture, Minor local buckling, Peeling of paint	-
Moderate Damage	Yielding strength point	Micro crack on welds, Local buckling of some beam elements, yielding of some beam elements	Immediate Occupancy
Extensive Damage	Maximum strength point	Weld fracture, Hinge form, Lateral deformation of beam elements, Local buckling at panel zone	Life Safety
Complete Damage	Ultimate strength point (80% of maximum strength)	Many fractures at moment connections, Extensive buckling, Complete fracture of welds or elements	Collapse Prevention

 Table 3. Definition of damage states and corresponding structural performance levels



Fig. 3. PDFs curve and histograms of class 1 inter-module connections

으로 취약도 함수를 활용하여 해당 손상상태가 발생할 초과확률을 계산한다.

지진취약도 함수는 구성요소, 부재 또는 시스템이 특정 손상상태를 초과할 확률을 제시하는 통계적 분포 이며, 입력값에 대한 대수정규분포의 누적분포함수 (Cumulative distribution function, CDF)로 다음과 같이 수학적으로 정의할 수 있다.

$$F_i(\delta) = \mathbf{\Phi}\left[\frac{\ln\left(\delta/\theta_i\right)}{\beta_i}\right] \tag{1}$$

여기서, *F_i*(δ)는 입력값 δ에 대한 함수로 특정 손상상태 i에서 구성요소가 손상될 조건부 확률을 나타내며 Φ는 표준정규누적분포함수, θ_i는 손상상태 i에서 확률 분포 의 중앙값, β_i는 손상상태 i에서 요구량에 대한 분산을 의미하며, 실험결과의 손상이 발생한 층간변위비의 분 포로부터 다음 식에서와 같이 중앙값, θ과 분산, β이 도출되었다.

$$\theta = e^{\left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\ln d_{i}\right)} \tag{2}$$

$$\beta = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2} \tag{3}$$

$$\beta_r = \sqrt{\left(\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M} (\ln(d_i/\theta))^2\right)}$$
(4)

여기서, M은 실험체의 개수, d_i는 특정 손상상태에서 i 번째 실험체에 해당 손상이 발생하게 되는 층간변위비 이다. 취약도 함수의 분산값을 계산하기 위해서는 제한 된 실험 데이터에 근거하기에 실험 데이터가 무작위 변 동성을 적절하게 반영할 수 있을 정도의 표본을 가지는 지를 나타내는 값, β,와 실험이 실제의 하중과 설치조 건을 적절히 반영할 수 있는지를 나타내는 값, β "을 고 려할 필요가 있다. β,와 β,라는 불확실성을 고려하여 β값은 식 (3)과 같이 계산한다. FEMA P-58에서는 실 험체 설치 및 가력방법에 따른 실험결과의 불확싱성을 정량화할 수 있는 지표, β μ를 제시하고 있으며, 실험조 건이 비교적 다양하면 0.1의 값을 적용하고 실험조건이 제한적이면 0.25의 값을 사용하여 변동가능성을 반영 하도록 하고 있다. 본 연구에서는 비교적 다양한 실험 조건 및 실험체 상세를 수집하였기에 0.1의 값으로 고 려하였다^[25].

지진취약도 함수를 도출하는 과정에서 데이터의 유 효성을 검토하기 위해 수집한 실험 데이터 중 불확실한 값을 제거하는 과정을 진행하였으며, Peirce's criterion 을 활용하여 다음 식과 같이 데이터를 검토하였다.

$$R = \frac{|\ln(d) - \ln(\theta)|}{\beta} \tag{5}$$

$$\left|\ln(d_i) - \ln(\theta)\right| > \left|\ln(d) - \ln(\theta)\right|_{\max} \tag{6}$$

여기서, *R*은 데이터가 불확실하다고 판단할 수 있는 값 의 최대 기준값이며 중앙값에서 데이터가 얼마나 벗어 나 있는지를 의미한다. Peirce's criterion에서 불확실하 다고 판단되는 데이터의 개수, D와 실험체의 개수, M에 따라 기준값, *R*을 정의하고 있으며 D를 1에서부터 하 나씩 증가시키며 식 (5)에 *R*과 β를 대입함으로써 $|\ln(d) - \ln(\theta)|_{max}$ 를 계산한다. 특정 손상상태가 발생 하는 요구량, *d*_i에 대해 $|\ln(d_i) - \ln(\theta)|$ 을 계산한 후 식 (6)의 조건을 만족하면 해당 데이터를 제거하도록 한다. 3.3 모듈 간 접합부 유형에 따른 지진취약도 함수 도출

앞선 절에서 정리한 지진취약도 함수 도출방법에 따 라 Fig. 3에서 부분강접-전강도를 가지는 보 연결형 접 합부, 구분1에서 예시적으로 나타낸 바와 같이 모든 접 합부 유형에 대하여 확률밀도함수와 히스토그램을 작성 하였으며, 이를 토대로 취약도 함수를 정의하기 위한 중 앙값, θ 과 분산, β_r 을 Table 4에서 보는 바와 같이 결정 하였다. Table 4에는 도출한 지진취약도 함수가 가정한 대수정규분포를 적합하게 이루고 있는지 검정하기 위한 유효성 검정결과를 함께 나타내고 있다. 여기서, H=0이 면 귀무가설이 채택되며, H=1이면 귀무가설이 기각됨 을 나타낸다. p는 유의확률을 나타낸다. Lilliefors 검정 방법을 활용하였으며, 해당 방법은 이론적 누적분포함 수인 손상데이터를 활용해 도출한 취약도 함수가 식 (7) 을 토대로 계산되는 경험적 누적분포함수(Empirical distiribution function, EDP)를 어느 수준으로 추종하는 지를 검정한다^[25].

$$S_M(d) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} H(d_i - d)$$
(7)

여기서, H는 d_i - d 양(+)의 값을 가지면 1, 0이면 0.5, 음 (-)의 값을 가지면 0을 사용한다. 순차적으로 이론적 누 적분포함수와 경험적 누적분포함수 차이의 최댓값, D를 식 (8)과 같이 계산하고 유의수준에 따라 결정되는 D_{critical}값과 비교하여 작으면 귀무가설, H를 채택하여 로그정규분포를 따른다고 판단한다. FEMA-P-58에서 언급하고 있는 5%에 유의수준에서 취약도 함수의 적합 성을 검정하며 이에 따른 D_{critical}의 값은 식 (9)를 통해 계산된다.

$$D = \max_{x} \left| F_{i}(d) - S_{M}(d) \right| \tag{8}$$

$$D_{critical} = 0.895/(M^{0.5} - 0.01 + 0.85M^{-0.5})$$
(9)

Fig. 4에는 최종적으로 도출된 모듈 간 접합부 유형 에 따른 지진취약도 함수를 정리하고 있다. Table 4에 서 정리한 바와 같이 대부분의 지진취약도 함수에 대해 서 Lilliefors 검증을 만족하는 결과가 나타났으며, 해당 검정을 만족하지 못하는 것으로 판단된 부분강접-전강

TIL AD	• .•	c		1 0 .	C	***.	C .	•
Table /L Dot	armination	ot nore	matara	dotinit	na traa	111177	tunot	1010
	CHIIIIIauon	UI Dale	anneurs	ucinin	ie nae	IIIIv	Tunci	JOIE
					0 0	, ,		

Class 1: Beam-to-Beam, Semi-Rigid, Full-Strength						
Damage	θ	β_r	D	D _{critical}	Н	р
SD	0.0089	0.1858	0.1535	0.2740	0	0.7637
MD	0.0187	0.2638	0.2154	0.2622	0	0.2065
ED	0.0368	0.1183	0.2095	0.2620	0	0.2496
CD	0.0504	0.1677	0.2234	0.2867	0	0.2637
Class	2: Beam-	to-Beam	, Semi-R	igid, Par	tial-Stren	ngth
Damage	θ	β_r	D	D _{critical}	Н	р
SD	0.0138	0.4386	0.1608	0.2258	0	0.3995
MD	0.0222	0.2577	0.1181	0.2151	0	0.8288
ED	0.0408	0.1572	0.1151	0.2255	0	0.8890
CD	0.0502	0.1523	0.1679	0.2173	0	0.2936
Class 3	: Colum	n-to-Colu	ımn, Sen	ni-Rigid,	Full-Stre	ength
Damage	θ	β_r	D	D _{critical}	Н	р
SD	0.0136	0.4200	0.1922	0.2281	0	0.1924
MD	0.0243	0.3194	0.2668	0.2211	1	0.0030
ED	0.0532	0.2305	0.2081	0.2268	0	0.0960
CD	0.0718	0.1740	0.1605	0.2347	0	0.4638
Class 4:	Column-	to-Colur	nn, Semi	-Rigid, P	artial-St	rength
Damage	θ	β_r	D	D _{critical}	Н	р
SD	0.0132	0.4439	0.1677	0.2173	0	0.2971
MD	0.0194	0.2718	0.2161	0.2214	0	0.0600
ED	0.0351	0.1890	0.2107	0.2157	0	0.0620
CD	0.0516	0.2430	0.1880	0.2186	0	0.1600

도를 가지는 기둥 연결형 접합부, 구분3의 MD 손상상 태의 경우에도 산출된 *D*값이 *D_{critical}*을 약간 상회하는 수치이며, 다른 분포특성보다도 대수정규분포 특성을 가장 잘 따르는 것으로 판단되어 취약도 함수의 도출결 과가 유효하다고 판단하였다.

4. 모듈 간 접합부 유형에 따른 성능수준 검토

4.1 모듈 간 접합부 요구 성능수준

성능기반내진설계는 지진력저항시스템에 대한 설계 계수를 적용하기 어려운 구조물과 다양한 성능수준을 만족하고자 하는 구조물의 내진설계에 적용한다. 성능 기반내진설계 과정 중 손상분석 단계에서는 지진취약 도 함수를 활용하여 특정한 층간변위비에서 특정한 손



Fig. 4. Seismic fragility functions for classified inter-module connections

Table 5. Anticipated reliability (maximum probability of failure) for earthquake^[27]

Seismic performance	Risk Category I and II	Risk Category III	Risk Category IV
Total or partial structural	10% conditioned on the	6% conditioned on the	3% conditioned on the
collapse	occurrence of Maximum	occurrence of Maximum	occurrence of Maximum
(Collapse prevention)	Considered Earthquake shaking	Considered Earthquake shaking	Considered Earthquake shaking
Failure that could result in	25% conditioned on the	15% conditioned on the	10% conditioned on the
endangerment of individual lives	occurrence of Maximum	occurrence of Maximum	occurrence of Maximum
(Life safety)	Considered Earthquake shaking	Considered Earthquake shaking	Considered Earthquake shaking

상상태를 초과할 확률을 계산하여 성능목표의 달성여 부를 판단한다. 본 연구에서는 앞서 도출한 지진취약도 함수를 활용하여 현행 내진설계기준의 철골 모멘트골 조에 부합하는 횡력저항성능을 보유하기 위한 유형화 된 모듈 간 접합부의 성능 확보 여부를 취약도 함수를 활용하여 평가하였다. 이를 위해서는 내진설계 과정에 서 만족해야 하는 다중 성능목표의 설정과 이에 대한 만족여부를 판단하기 위한 공학적 요구 매개변수인 층 간변위비의 기준 설정이 요구된다.

내진설계 과정에서 만족해야하는 다중 성능목표는 구조물이 기본적으로 낮은 위험도의 지진에 대하여 기 능을 유지하고, 높은 지진위험도의 지진에 대해서는 붕 괴를 방지함으로써 인명의 안전을 확보해야 한다는 국 내내진설계기준의 내진설계 원칙에 따라 인명안전 (Life Safety, LS)과 붕괴방지(Collapse Prevention, CP) 를 고려하였다. 인명안전 성능목표를 검토하기 위한 층 간변위비 기준은 KDS 41 17 00에서 건축물의 중요도 에 따라 구분된 허용층간변위비로 설정하였다^[26]. 건축 물의 중요도에 따라 중요도(특), 중요도(1), 중요도(2) 및 (3)일 때 대응되는 허용층간변위비는 각각 1.0, 1.5, 2.0%이다. 붕괴방지 성능목표를 검토하기 위한 층간변 위비 기준은 KDS 14 31 60에서 강구조물 내진설계를 위해 철골 모멘트골조 유형별로 요구되는 비탄성 변형 을 포함한 층간변위각으로 설정하였다^[27]. 성능 목표의 확률론적 만족 여부를 판단하기 위하여 Table 5에서 보 는 바와 같이 국내내진설계기준과 유사한 구성을 가지 고 있는 ASCE 7^[28]에서 제시하고 있는 성능목표에 따 른 최대 초과확률을 활용하였다.

4.2 성능수준 검토

국내내진설계기준의 중요도(1)과 중요도(2) 및 (3)은 각각 ASCE 7에서 제시하는 Risk Category III과 I 및 II 에 부합하므로 분류된 모듈 간 접합부 4가지 유형에 대 하여 중간 및 특수모멘트골조에 부합하는 성능의 만족 여부를 건축물의 중요도별 성능목표의 달성여부로 판 단하였다. Fig. 5에서는 모듈 간 접합부 유형별 지진취 약도 함수를 활용하여 성능목표를 검토하기 위한 손상 상태의 초과확률, P_{f} 을 계산하는 과정에 대해서 정리하 고 있다. Table 5에서 정리한 성능목표에 대한 최대 초 과확률, $P_{f,max}$ 은 파괴확률로 정의하며, 이는 손상상태













Fig. 5. Calculations of probability of failure according to the classified inter-module connections

한국강구조학회 논문집 제36권 제5호(통권 제192호) 2024년 10월 297

중 심각한 손상(Complete damage)은 붕괴 방지 (Collapse prevention), 중간 손상(Modertae damage)은

Class 1: Beam-to-Beam, Semi-Rigid, Full-Strength							
Importance level	Δ_a fo	or assuring performance level	P _f , %	P _{f,max} , %	Check P _f <p<sub>f,max</p<sub>		
	LS	0.015 (for IMF, SMF)	0	15	OK		
(1)	CD	0.02(for IMF)	0	(OK		
	CP	0.04(for SMF)	5.3	0	OK		
	LS	0.02 (for IMF, SMF)	0	25	OK		
(2), (3)	CD	0.02(for IMF)	0	10	OK		
	CP	0.04(for SMF)	5.3	10	OK		
Class 2	: Bea	m-to-Beam, Semi-Rigic	l, Parti	al-Stre	ngth		
Importance Δ_a for assuring performance P_f , $P_{f,max}$,Chelevellevel%% $P_f < P_f$							
	LS	0.015 (for IMF, SMF)	0	15	OK		
(1)	CD	0.02(for IMF)	0	(OK		
	CP	0.04(for SMF)	11.4	0	NG		
	LS	0.02 (for IMF, SMF)	0	25	OK		
(2), (3)	CD	0.02(for IMF)	0	25	OK		
	CP	0.04(for SMF)	11.4	10	NG		
Class 3: Column-to-Column, Semi-Rigid, Full-Strength							
Class 3:	Colu	mn-to-Column, Semi-R	igid, F	ull-Str	ength		
Class 3: Importance level	Colui Δ_a fo	mn-to-Column, Semi-R r assuring performance level	igid, F P _f , %	Full-Str P _{f,max} , %	ength Check P _f <p<sub>f,max</p<sub>		
Class 3: Importance level	Colun Δ_a for LS	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF)	igid, F P _f , % 0	Full-Str P _{f,max} , % 15	ength Check P _f <p<sub>f,max OK</p<sub>		
Class 3: Importance level	Colun Δ_a for LS	mn-to-Column, Semi-R r assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF)	igid, F P _f , % 0 0	Full-Str P _{f,max} , %	ength Check P _f <p<sub>f,max OK OK</p<sub>		
Class 3: Importance level (1)	Colun Δ_a for LS CP	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6	ength Check P _f <p<sub>f,max OK OK OK</p<sub>		
Class 3: Importance level (1)	Colun Δ_a for LS CP LS	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25	ength Check P _f <p<sub>f,max OK OK OK</p<sub>		
Class 3: Importance level (1) (2), (3)	Colun Δ_a fc LS CP LS	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25	ength Check P _f <p<sub>f,max OK OK OK OK</p<sub>		
Class 3: Importance level (1) (2), (3)	Colundary Δ_a for LS CP LS CP	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 10	ength Check P _f <p<sub>f,max OK OK OK OK OK</p<sub>		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: 0	Colundary Δ_a for LS CP LS CP	mn-to-Column, Semi-R r assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 - 10 - 10	ength Check Pf <pf,max OK OK OK OK OK OK CK</pf,max 		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: 0 Importance level	Colun Δ_a for LS CP LS CP Colum Δ_a for	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 gid, Pa %	$\begin{array}{c} Full-Str\\ P_{f,max}, & \%\\ \hline 15\\ \hline 6\\ \hline 25\\ \hline 10\\ \hline rtial-Si\\ \%\\ \end{array}$	ength Check $P_f < P_{f,max}$ OK OK OK OK OK CK trength Check $P_f < P_{f,max}$		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: 0 Importance level	Colun Δ_a for LS CP LS CP Colum Δ_a for LS	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 10 rtial-Si P _{f,max} , % 15	ength Check $P_f < P_{f,max}$ OK OK OK OK OK trength Check $P_f < P_{f,max}$ OK		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: 0 Importance level (1)	Colum Δ_a for LS CP LS CP Colum Δ_a for LS CR	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.04(for SMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 gid, Pa % 0 0 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 10 rrtial-Str % 15	ength Check $P_f < P_{f,max}$ OK OK OK OK OK trength Check $P_f < P_{f,max}$ OK OK		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: (Importance level (1)	Colum Δ_a for LS CP LS CP Colum Δ_a for LS CP	mn-to-Column, Semi-R r assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 19.5	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 10 rtial-St % 15 6 25 10 rtial-St % 15 6 6	ength Check Pf <pf,max OK OK OK OK OK Check Pf<pf,max OK OK NG</pf,max </pf,max 		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: 0 Importance level (1)	Colun Δ_a fc LS CP COlumn Δ_a fc LS CP LS LS	mn-to-Column, Semi-R or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.02(for IMF) 0.02(for IMF, SMF) 0.04(for SMF) 0.04(for SMF) n-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF, SMF) 0.02 (for IMF, SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 19.5 0.8	Pull-Str Pf,max, % 15 6 25 10 rrtial-Si Pf,max, % 15 6 25 10 rrtial-Si % 15 6 25 25	ength Check Pf <pf,max OK OK OK OK OK trength Check Pf<pf,max OK OK OK OK</pf,max </pf,max 		
Class 3: Importance level (1) (2), (3) Class 4: (Importance level (1) (2), (3)	Colum Δ_a for LS CP LS CP Colum $\overline{\Delta_a}$ for LS CP LS CP LS	mn-to-Column, Semi-R r assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF) 0.04(for SMF) m-to-Column, Semi-Rig or assuring performance level 0.015 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF, SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02 (for IMF, SMF) 0.02(for IMF, SMF)	igid, F P _f , % 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 19.5 0.8 0	Full-Str P _{f,max} , % 15 6 25 10 rtial-Si % 15 6 25 10 rtial-Si 6 25 10 rtial-Si 6 25 10	ength Check Pf <pf,max OK OK OK OK Check Pf<pf,max OK OK OK OK OK</pf,max </pf,max 		

 Table 6. Evaluation of performance levels of classified intermodule connections

 $\ll \Delta_a$: Allowable story drift ratio, P_f: Probability of failure obtained from fragility curve, P_{f,max}: Maximum probability of failure prescribed in the seismic design code

5. 결론

본 연구에서는 철골 모듈러 건축물의 모듈 간 접합부 의 유형을 분류하고 취약도 함수를 도출하고자 하였다. 또한 모듈 간 접합부 유형별로 현행 내진설계기준의 철 골 모멘트골조에 부합하는 성능 확보 여부를 취약도 함 수를 통해 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모듈 간 접합부의 유형을 분류하기 위하여 54개 의 실험결과를 수집하였으며, 접합부가 형성되 는 위치, 강도 및 강성특성에 따라 부분강접-전강 도를 가지는 보 연결형, 부분강접-부분강도를 가 지는 보 연결형, 부분강접-전강도를 가지는 기둥 연결형, 부분강접-부분강도를 가지는 기둥 연결 형 접합부로 구분하였다.
- (2) 모듈 간 접합부의 유형별로 수집된 실험결과를 통계분석하여 지진취약도 함수를 도출하였으며, Lilliefors검정을 통해 로그정규분포를 이루고 있 는 것을 확인하였다.
- (3) 모듈 간 접합부의 유형 중 부분강접-전강도를 가 지는 보 연결형 및 부분강접-전강도를 가지는 기 등 연결형 접합부는 건축물의 중요도에 상관없이 중간 및 특수모멘트골조에 부합하는 성능 발휘에 적합하다.
- (4) 모듈 간 접합부의 유형 중 부분강접-부분강도를
 가지는 보 연결형 및 부분강접-부분강도를 가지
 는 기둥 연결형 접합부는 중간모멘트골조의 요

구층간변위각은 만족하나, 강구조물 내진설계에 서 중간모멘트골조의 요구사항으로 제시하고 있 는 보의 공칭소성모멘트의 80 % 이상의 성능을 발휘하지 못하기에 결론적으로 중간 및 특수모 멘트골조에 적용하기에는 부족한 성능을 보유한 다고 평가되었다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으 로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육 성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

참고문헌(References)

- Hong, S.-G., Cho, B.-H., Chung, K.-S., and Moon, J.-H. (2011) Behavior of Framed Modular Building System with Double Skin Steel Panels, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.6, pp.936-946.
- [2] Lawson, R.M., Ogden, R.G., and Bergin, R. (2012) Application of Modular Construction in High-Rise Buildings, *Journal of Architectural Engineering*, ASCE, Vol.18, No.2, pp.148-154.
- [3] Choi, K.-S., Lee, H.-C., and Kim, H.-J. (2016) Influence of Analytical Models on the Seismic Response of Modular Structures, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KISM, Vol.20, No.2, pp.74-85 (in Korean).
- [4] Chen, Z., Liu, J., and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.147, pp.625-638.
- [5] Yang, C., Chen, H., Wen, H., Wang, Q., Zhang, B., and Ou, J. (2024) Experimental Study on Seismic Performance of Internal Cruciform Joints of Grouting Sleeve Connection for Modular Integrated Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.301, 117325.
- [6] Zhai, S.-Y., Lyu, Y.-F., Cao, K., Li, G.-Q., Wang, W.-Y., and Chen, C. (2022) Experimental Study on Bolted-Cover Plate Corner Connections for Column-Supported Modular Steel Buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.189, 107060.

- [7] Deng, E.-F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X.-M., Lou, N., and Chen, Y. (2018) Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.167, pp.407-419.
- [8] Chen, Z., Liu, J., Yu, Y., Zhou, C., and Yan, R. (2017) Experimental Study of an Innovative Modular Steel Building Connection, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.139, pp.69-82.
- [9] Oh, K., Kim, S.-H., Shin, K.-J., Yoon, B.-I., and Lee, K. (2020) Structural Performance Evaluation of Modular Connection Using Specially Fabricated Blocks, *Journal* of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.32, No.4, pp.257-267 (in Korean).
- [10] Jung, D.-I., Cho, B.H., Lee, D.Y., Lee, J.S., and Jung, C.W. (2021) Experimental Evaluation on Seismic Performance of Exterior Connection in Modular Building System with Steel Strand, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.315-326 (in Korean).
- [11] Jung, D.-I., Cho, B.H., Lee, J.S., Lee, D.Y., and Lee, K.W. (2022) Experimental Evaluation on Seismic Performance of Exterior Connection in Modular Building System with AJ Connector, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.1, pp.13-24 (in Korean).
- [12] Dai, X.-M., Zong, L., Ding, Y., and Li, Z.-X. (2019) Experimental Study on Seismic Behavior of a Novel Plug-In Self-Lock Joint for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.181, pp.143-164.
- [13] Chen, Z., Wang, J., Liu, J., and Khan, K. (2021) Seismic Behavior and Moment Transfer Capacity of an Innovative Self-Locking Inter-Module Connection for Modular Steel Building, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.245, 112978.
- [14] Krawinkler, H. (1978) Shear in Beam-Column Joints in Seismic Design of Steel Frames, *Engineering Journal*, AISC, Vol.15, No.3, pp.82-91.
- [15] Yang, C., Chen, H., and Ou, J. (2023) Experimental Study on Seismic Performance of Modular Steel Construction Beam-to-Beam Combined Side Column Joint with Blind Bolted Connection, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.184, 110431.
- [16] Li, T., Li, Y., Mushi, W., Huang, Z., and Wang, X. (2024)
 Experimental Study of the Static and Hysteretic
 Performance of Grouted Steel Beam-Column

Inter-Connections for Modular Integrated Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.305, 117735.

- [17] Lee, S.S, Bae, K.W., and Park, K.S. (2016) Comparison of Behavior of Connections between Modular Units according to Shape of Connector Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.467-476 (in Korean).
- [18] Cho, B.-H., Lee, J.-S., Kim, H., and Kim, D.-J. (2019) Structural Performance of a New Blind-Bolted Frame Modular Beam-Column Connection under Lateral Loading, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.9, No.9, 1929.
- [19] Deng, E.-F., Zong, L., Ding, Y., and Luo, Y.-B. (2018) Seismic Behavior and Design of Cruciform Bolted Module-to-Module Connection with Various Reinforcing Details, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.133, pp.106-119.
- [20] Shi, F.-W., and Li, Y.-M. (2023) Innovative Inner Sleeve Composite Bolted Connections for Modular Steel Constructions: Experimental and Numerical Studies, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.64, 105624.
- [21] Ma, R., Xia, J., Chang, H., Xu, B., and Zhang, L. (2021) Experimental and Numerical Investigation of Mechanical Properties on Novel Modular Connections with Superimposed Beams, *Engineering Structures*,

Elsevier, Vol.232, 111858.

- [22] European Committee for Standardization (2005) Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of Joints, EN 1993-1-8:2005, CEN, Belgium.
- [23] American Society of Civil Engineers (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, USA, pp.1-14.
- [24] SAC Joint Venture (2000) Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings, FEMA-351, Federal Emergency Management Agency, USA, pp.B-3-B-4.
- [25] Applied Technology Council (2018) Seismic Performance Assessment of Buildings, FEMA P-58, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [26] Architectural Institute of Korea (2022) Seismic Building Design Code, KDS 41 17 00 : 2022, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [27] Korean Society of Steel Construction (2017) Seismic Design Code for Steel Structure, KDS 14 31 60 : 2017, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [28] American Society of Civil Engineers (2010) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, ASCE, USA.

요 약: 철골 모듈러 건축물에 있어 모듈 간 접합부는 하중의 전달 및 분배에 있어 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 모듈러 건 축물의 성능기반설계를 수행하기 위해 모듈 간 접합부를 대상으로 취약도 함수를 도출하고자 한다. 이를 위하여 모듈러 건축물 모듈 간 접합부 관련 실험자료를 조사하였으며 유형화를 수행하였다. 실험적으로 확인한 손상 정보를 활용하여 층간변위비를 기반으로 취약도 함수를 통계적으로 도출하였다. 또한 현행 내진설계기준의 철골 모멘트골조에 부합하는 횡력저항성능을 보유하기 위한 유형화된 모듈 간 접합부의 성능 확보 여부를 취약도 함수를 활용하여 평가하였다.

핵심용어 : 모듈러 건축물, 지진취약도 함수, 모듈 간 접합부, 성능 목표, 손상 상태