최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구	
공고번호	공고-제2호	총괄연구개발 식별번호		-	
		연구개발과제번호		21CTAP-C151831-03	
국가과학기술 표준분류	EI0307	50%	EI0304	25%	EI1102	25%

총괄연구개발명	국문	건축물과 인프라 시설을 위한 내진 내풍 통합 성능기반 설계법 및 UHPC 복합구조 시스템 개발
	영문	Performance-Based Comprehensive Design Method for Wind and Earthquake Resistance of High Performance Composite Structures
연구개발과제명	국문	건축물과 인프라 시설을 위한 내진 내풍 통합 성능기반 설계법 및 UHPC 복합구조 시스템 개발
	영문	Performance-Based Comprehensive Design Method for Wind and Earthquake Resistance of High Performance Composite Structures

주관연구기관	기관명	서울대학교 산학협력단	사업자등록번호	119-82-03684
	주소	(우) 08826 서울특별시 관악구 관악로1 서울대학교 연구공원 942동 5층	법인등록번호	114371-0009224
주관연구책임자	성명	강현구	직위	교수
	연락처 직장전화	02-880-8368	휴대전화	010-9457-8904
	연락처 전자우편	tkang@snu.ac.kr	국가연구자번호	11082785
연구개발기간	전체	2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)		
	1년차	2019. 04. 05 - 2019. 12. 31(0년 9개월)		
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년 0개월)		
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 0개월)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	535,000		430,000	-	-	-	-	535,000	430,000	965,000	-
1년차	131,000		117,000	-	-	-	-	131,000	117,000	248,000	-
2년차	202,000		156,500	-	-	-	-	202,000	156,500	358,500	-
3년차	202,000		156,500	-	-	-	-	202,000	156,500	358,500	-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	Harbin Institute of Technology	Wu, Xiangguo	교수	8645186282704	wuxiangguo@hit.edu.cn	공동	대학
위탁연구기관							
연구기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	안병욱	직위	박사과정
	연락처 직장전화	02-880-8303	휴대전화	010-8588-6673
	연락처 전자우편	ahnbu419@snu.ac.kr	국가연구자번호	11866572

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 02 월 17 일

주관연구책임자 : 강 현 구 (직인)

주관연구기관의 장 : 서울대학교산학협력단장 최해천 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요 약 문 >

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="2">국토교통기술촉진연구</td><td colspan="2">총괄연구개발 식별번호</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="2">국토교통기술혁신연구</td><td colspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2">21CTAP-C151831-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술 표준분류</td><td colspan="2">EI0307 50% EI0304 25% EI1102 25%</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">총괄연구개발명</td><td colspan="6">건축물과 인프라 시설을 위한 내진 내풍 통합 성능기반 설계법 및 UHPC 복합구조 시스템 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">건축물과 인프라 시설을 위한 내진 내풍 통합 성능기반 설계법 및 UHPC 복합구조 시스템 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 965,000 천원
(정부지원연구개발비 : 535,000 천원, 기관부담연구개발비 : 430,000 천원,
지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="2">기초[ ] 응용[ ] 개발[✔]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="3">착수시점 기준( )
종료시점 목표(✔)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [✔] 자유공모 [ ]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="11">연구개발목표 및 내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">• 기후변화에 따른 슈퍼태풍에 대응하는 성능기반 내진-내풍 설계법 개발
• UHPC 복합구조를 적용한 교량 및 초고층건물 시스템 개발
• 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 검증 및 극대화 연구</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">• 기후변화에 따른 슈퍼태풍 하중 예측을 통한 다양한 재현주기 풍하중에 대한 설계 방법 개발
• 슈퍼태풍과 같은 극한의 하중에 대한 비탄성 변형을 고려한 성능기반 내풍설계 방법 개발
• 풍동실험을 통한 데이터베이스 구축
• CFD 해석을 통한 슈퍼태풍 발생 시 구조물의 거동 시뮬레이션 수행
• 슈퍼태풍에 의한 비산물/부유물 충돌 실험 및 해석 연구
• UHPC 복합구조 보의 휨/전단 극한하중 실험 및 해석 연구
• UHPC 복합구조 기둥의 휨/압축 극한하중 실험 및 해석 연구
• UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 실험 및 해석 연구
• UHPC 복합구조 패널의 내충격 실험 및 해석 연구
• UHPC를 적용한 기존 구조물의 보수·보강 방법 개발
• 성능기반설계 및 UHPC를 통한 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 극대화 연구
• 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 검증 방법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="5">• 비탄성 내풍설계 방법 개발
• 소형 풍동실험을 통한 설계 변수 연구
• 재난 방지를 위한 UHPC 복합구조 보/기둥의 거동 연구</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="5">• 구조물 중요도에 따라 다양한 재현주기 설계풍속 산정
• 거스트에 의한 공진효과 산정 시 건물의 비탄성 거동을 고려한 설계 방법 개발
• 풍하중에 의한 장시간 비탄성 반복이력거동을 반영한 구조물의 비탄성 시간이력 해석
• 초고층건물의 평면, 높이, 건물 배치 등 설계변수에 따른 풍동 실험 데이터 구축
• UHPC 복합구조 보의 휨/전단강도 예측을 위한 이론적 해석 모델 개발
• UHPC 복합구조 보의 휨/전단 실험을 통한 극한하중 거동 검증
• UHPC 복합구조 기둥의 압축 및 휨/압축 실험을 통한 극한하중 거동 검증
• 유한요소해석 프로그램을 활용한 UHPC 복합구조 보/기둥 해석 수행</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td colspan="5">• 대형풍동실험 및 CFD 해석 수행
• 초고층 건물의 비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 제시
• UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 성능 연구</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="5">• 풍동실험결과를 기반으로 CFD 해석을 수행하여, 압력계수, 거스트영향계수, 지형계</td></tr>
</table>

			수 등의 영향 분석 • 대형풍동실험을 통해 비탄성 거동에 의해 구조물에 작용하는 풍하중 변화 연구 • 다양한 초고층 건물의 슈퍼태풍 풍하중 시간이력 비선형 해석 데이터베이스 구축 • 비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 제시 • UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 실험을 통한 성능 검증 • 유한요소해석 프로그램을 활용한 UHPC 복합구조 슬래브 해석 수행
	3년차	목표	• 태풍 비산물에 대한 내충격 연구 • 인프라 시설 생애주기 신뢰성 검증 및 극대화 연구
		내용	• UHPC 패널의 충격 실험을 통한 외장재의 성능 확인 • 유한요소해석 프로그램으로 UHPC의 충격 하중 해석 수행 • 생애주기 신뢰성 검증 방법으로 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 개발 • UHPC를 활용한 교량 및 초고층건물 시스템 개발 • UHPC를 활용하여 구조적 취약부 보강을 통한 생애주기 신뢰성 극대화 연구
연구개발성과			• 구조물의 중요도에 따른 슈퍼태풍 하중 산정 방법 제시 • 비탄성 거동을 고려한 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 제시 • UHPC를 적용한 교량 및 빌딩 시스템 개발 • 중요 인프라 시설의 생애주기 극한하중 저항 성능 극대화 가이드라인 제시
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			• 기후변화에 따른 슈퍼태풍에 대한 정밀한 하중 산정으로 주요 인프라 시설의 안전성 확보 • 다양한 재현주기 하중에 대한 설계 방법 개발로 중요 인프라 시설의 재난 대응 능력 향상 • 성능기반 내풍설계를 통해 구조물의 비탄성 거동을 고려한 효율적인 설계 가능 → 새로운 설계 기법으로 해외 건설 시장 선점 및 선도 • 아직까지 국내에서의 연구가 미흡한 태풍 비산물에 대한 설계 가이드라인 개발 • UHPC를 활용하여 물량 감소, 효율적인 구조물의 공간 활용 가능 • UHPC를 활용한 교량 및 건물 등의 구조 시스템 개발로 구조물의 재해저감 능력 향상 → 국내외 건설 시장에서의 경쟁력 확보 • 자연재해에 대한 정확한 하중 산정 및 UHPC를 활용한 구조물의 재해저감 능력 향상을 통해 구조물의 생애주기에 대한 신뢰성 확보 → 국민들의 불안감 해소, 재해 발생 시 인명안전 확보, 사회적 혼란 감소
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	12	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

국문핵심어 (5개 이내)	슈퍼태풍	성능기반 내풍설계	UHPC	비산물 충격	생애주기 신뢰성
영문핵심어 (5개 이내)	Super-typhoon	Performance-Based Wind Design	UHPC	Debris Impact	Life-Cycle Reliability

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

별첨자료(참고문헌 등)

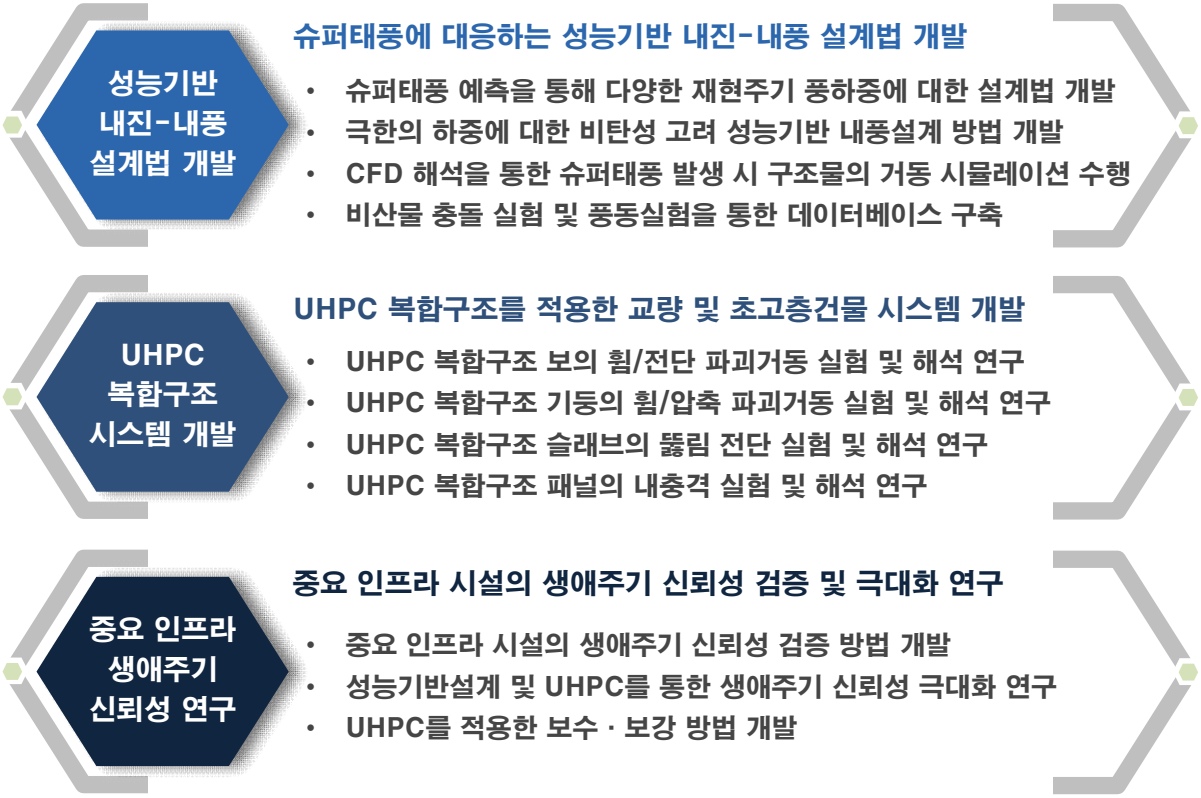
1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 기후변화에 따른 슈퍼태풍에 대응하는 성능기반 내진-내풍 설계법 개발
- 기후변화에 따른 슈퍼태풍 하중 예측을 통한 다양한 재현주기 풍하중에 대한 설계 방법 개발
- 슈퍼태풍과 같은 극한의 하중에 대한 비탄성 변형을 고려한 성능기반 내풍설계 방법 개발
- 풍동실험을 통한 데이터베이스 구축
- CFD 해석을 통한 슈퍼태풍 발생 시 구조물의 거동 시뮬레이션 수행
- 슈퍼태풍에 의한 비산물/부유물 충돌 실험 및 해석 연구

○ UHPC 복합구조를 적용한 교량 및 초고층건물 시스템 개발
- UHPC 복합구조 보의 휨/전단 극한하중 실험 및 해석 연구
- UHPC 복합구조 기둥의 휨/압축 극한하중 실험 및 해석 연구
- UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 실험 및 해석 연구
- UHPC 복합구조 패널의 내충격 실험 및 해석 연구
- UHPC를 적용한 기존 구조물의 보수·보강 방법 개발

○ 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 검증 및 극대화 연구
- 성능기반설계 및 UHPC를 통한 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 극대화 연구
- 중요 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 검증 방법 개발



2) 연구개발과제의 년차별 목표

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	비탄성 내풍설계 방법 개발	성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인	- 국내 성능기반 내진설계 상세지침 보유 - 구조물의 중요도에 따른 다양한 재현주기의 풍하중 산정 - 미국 ASCE에서 성능기반 내풍설계 지침 개발	- 비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 개발	- 성능기반 내진설계는 많은 연구를 바탕으로 설계 가이드라인 정립되었지만, 성능기반 내풍설계에 대해서는 해외에서는 태동 단계이며, 국내는 본 연구를 제외하면 거의 전무한 실정이며, 특히 구조물의 종합적인 연성능력을 고려한 내진-내풍 통합 설계는 아직 세계적으로 연구가 거의 진행되지 않은 미개척 분야	7
				- 기후변화 및 건물의 중요도를 고려하여 다양한 재현주기의 슈퍼 태풍 하중 산정 연구		3
	소형 풍동실험을 통한 설계변수 연구	풍동실험 데이터베이스 구축	- 현행 구조기준에 따른 설계를 위한 풍동실험(풍력실험, 풍압실험)이 활발히 수행	- 소형 풍동실험을 통한 설계 변수별 영향 분석	- 국내에서 풍동실험이 활발히 수행 중이지만, 기준 및 가이드라인 개발에 실험자료의 활용이 원활하지 않으므로 연구목적 데이터베이스 구축 필요	3
	재난 방지를 위한 UHPC 복합구조 보/기둥의 거동 연구	UHPC 복합구조 보 설계 기술	- UHPC 부재에 대한 휨/ 전단 거동 연구 수행 - UHPC 및 강섬유 보강 UHPC에 대한 재료 연구 수행	- UHPC 복합구조 보의 휨/전단강도 예측을 위한 이론적 해석 모델 개발	- UHPC의 구체적 설계 방안 개발을 위해 이론적 해석 모델 필요	3
				- UHPC 복합구조 보/기둥의 극한 하중 거동 실험 데이터베이스 구축		5
		UHPC 복합구조 기둥 설계 기술		- 유한요소해석 프로그램을 활용한 UHPC 복합구조 해석 데이터베이스 구축		3
2년차 (2020)	대형풍동실험 및 CFD 해석 수행	풍동실험 데이터베이스 구축	- 미국에서는 구조물의 다양한 재현주기의 풍하중을 산정하여 사용 - 국내에서는 단일화된 100년 재현주기 풍하중 사용	- 대형풍동실험을 통한 비탄성 거동 데이터베이스 구축	- 다양한 재현주기에 대한 풍하중 산정을 위한 연구적 데이터베이스 구축 필요	8
				- CFD 해석 데이터베이스 구축	- AIJ 등의 해외 기준에서는 CFD를 적극활용하는 것에 반해 국내에서는 CFD에 대한 지침 및 기준이 부족	

	초고층 건물의 비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 제시	비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인	- 미국 ASCE에서 성능기반 내풍설계 지침 출간	- CFD 해석 가이드라인 개발	- CFD 활용도 향상을 위한 해석가이드라인 필요	4
		성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 개발	- ASCE에서 성능기반 내풍설계에 대한 지침이 개발되었지만, 성능기반 내진설계와의 통합 연구가 부족	- 인프라 시설 성능기반 설계 지침(안)	- 국내 성능기반 내풍설계 지침이 부재	6.5
				- 구조설계 시 물량 감소 검증	- 성능기반 설계 도입 시 물량감소 가능성에 대한 데이터 부족	
	UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 성능 연구	UHPC 복합구조 슬래브 설계 기술	- UHPC 복합구조에 대한 연구 부족	- UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림-전단 실험 데이터베이스 구축	- UHPC 슬래브의 성능 실험데이터 부족	7
				- 유한요소 해석 프로그램을 활용한 UHPC 복합구조 슬래브의 해석 데이터베이스 구축	- UHPC 도입 시 유한요소해석 방법에 대한 데이터 부족	
3년차 (2021)	성능기반 설계 보급화를 위한 소형 풍력적분 실험법 개발	소형 풍력적분 실험법 개발	- 국내·외에서 풍동실험 방법은 대표적으로 풍력실험, 풍압실험이 사용 - 풍하중에 의한 구조물-유체 상호작용을 분석할 수 있는 공력진동 시험 개발	- 성능기반 내진-내풍 통합 설계 보급화를 위한 소형 풍력적분 실험방법 개발	- 풍동실험 방법의 다각화 필요	3.5
				- 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 개발	- 성능기반 내진설계와 내풍설계의 호응을 위한 통합 가이드라인 필요	
	태풍 비산물에 대한 내충격 연구	UHPC 복합구조 외장재패널 설계 기술	- UHPC 복합구조 및 장기거동 대한 연구 부족 - UHPC 부재에 대한 휨, 전단 거동 연구 수행 - UHPC 패널의 고속충격 내충격 성능 연구 수행	- 태풍 비산물 충돌에 대한 내충격 실험	- UHPC 패널에 대한 태풍 풍속 비산물 충격 실험 데이터 부족	4
				- 실험을 통한 UHPC 패널의 내충격 성능 검증		
				- UHPC 복합구조를 활용한 교량 및 초고층 시스템 개발	- UHPC의 활용도 재고를 위한 구조시스템 개발 필요	
	인프라 시설 생애주기 신뢰성 검증 및 극대화 연구	장시간 풍하중에 의한 피로파괴 설계법	- 장시간 풍하중에 의한 피로파괴 연구 부족	- 장시간 풍하중에 의한 피로파괴 실험	- 국내의 장시간의 풍하중에 대한 구조부재의 피로파괴 성능에 대한 실험 부족	4

		UHPC를 활용한 생애주기 극한하중 저항 성능 극대화 방법 개발	- 미국은 1950년대부터 국방부를 중심으로 생애주기 비용 연구가 진행되어 왔으며, 현장적용을 위한 지침, 소프트웨어 보유 - 인프라 시설의 생애주기 신뢰성 연구는 교량에 집중	- 생애주기 극한하중 저항 성능 평가 방법으로 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 개발	- 구조물의 생애주기를 고려한 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 필요	6
				- UHPC를 활용한 구조적 취약부 보강으로 극한하중 저항 성능 극대화	- UHPC를 활용한 구조 보강 방안 필요	

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 연구개발 추진 전략 및 방법

- 슈퍼태풍 하중 산정 및 성능기반 내진-내풍설계 가이드라인 개발
  - 기후변화에 따른 국내외 슈퍼태풍 관측 데이터 및 구조물 손상 데이터 수집
  - 수집된 관측 데이터를 기반으로 통계적 해석을 통한 재현주기별 슈퍼태풍의 하중 산정 연구
  - 거스트영향계수 산정 시 공진에 의한 비탄성 거동을 고려하여, 다양한 구조 시스템에 대해 초기 탄성설계를 위한 내풍설계용 반응수정계수(R_w) 산정
  - 국내외 풍공학, 성능기반설계 관련 분야의 전문가와 실무진들로 구성된 자문단을 활용하여, 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 개발
    → 한국지진공학회, 한국풍공학회, 한국콘크리트학회, 대한건축학회, American Concrete Institute (ACI), American Society of Civil Engineers (ASCE), 일리노이 주립대(Prof. Franklin Lombardo), Harbin Institute of Technology (Prof. Anxin Guo), 플로리아대학교 (Profs. Forrest Masters & Trey Hamilton) 등

- 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 수정 · 보완
  - 1, 2차 연도 연구를 통해 성능기반 내진-내풍 통합 설계를 위한 절차와 방법(다양한 재현주기의 성능목표 산정, 지진하중과 풍하중을 연계한 비탄성 거동 도입 초기설계법, 풍동실험을 통한 풍하중 산정, 시간이력 풍하중 재생법, 비선형 시간이력 풍하중 해석 등)에 대한 가이드라인을 성공적으로 개발.
  - 2차 연도 대형풍동실험을 통한 초고층건물에 작용하는 풍하중 저감 연구를 통해 가이드라인 보완
  - 소형 풍력적분 실험장치 구축 및 추가 풍동실험 수행을 통해 성능기반 내진-내풍 통합 설계법의 보급화를 위한 기존 풍동실험보다 편리한 풍하중 산정 방법 연구
  - 국내외 풍공학, 성능기반설계 관련 분야의 전문가와 실무진들로 구성된 자문단을 활용하여, 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 수정 · 보완
    → 한국지진공학회, 한국풍공학회, 한국콘크리트학회, 대한건축학회, American Concrete Institute (ACI), American Society of Civil Engineers (ASCE), 일리노이 주립대(Prof. Franklin Lombardo), Harbin Institute of Technology (Prof. Anxin Guo), 플로리아대학교 (Profs. Forrest Masters & Trey Hamilton) 등

- 실험적 연구방법
  - 주관연구기관(서울대학교)은 서울대학교 또는 국내 풍동실험실(전북대학교, 한양대학교)에서 소형 풍동실험을 통해 다양한 평면, 높이, 건물 배치 등 설계변수에 따른 구조물에 작용하는 슈퍼태풍 하중 실험 데이터 수집
  - 국제공동연구기관(Harbin Institute of Technology)에서 보유 중인 대형 풍동실험실 혹은 국내 대형 풍동실험실(전북대학교, 한양대학교)에서 풍동실험을 통해 슈퍼태풍에 의해 발생하는 구조물의 비탄성 거동에 따른 주기 변화를 고려한 풍동실험 수행
  - CFD 해석을 통해 산정된 태풍 비산물 충돌 하중으로 UHPC 패널의 내충격 실험 수행
  - 일반 RC 보와 UHPC 복합구조 보의 길이 및 전단 철근비에 따른 휨/전단 극한하중 거동 비교 실험 수행
  - 전단 철근비 및 축력비에 따른 UHPC 기둥의 휨/압축 극한하중 거동 비교 실험 수행
  - UHPC 복합구조 슬래브의 UHPC 및 RC 강도, 철근비, UHPC 두께에 따른 뚫림 전단 성능 실험 수행
  - 풍하중의 수직분포를 산정할 수 있는 소형 풍력적분 실험을 통해 기존 고가의 풍압실험을 대체할 수 있는 편리한 실험 방법 개발
  - 1,2차 연도 실험결과를 기반으로 소형 풍력적분 실험 결과의 보정 방법에 대한 연구 수행
  - 장시간 풍하중에 의한 피로파괴 실험을 통해 이력거동 데이터 구축
  - CFD 해석을 통해 산정된 태풍 비산물 충돌 하중, 태풍 및 홍수에 따른 부유물 충돌/압력 하중으로 UHPC 패널의 내충격/내압 실험 수행

- 해석적 연구방법
  - 연구팀이 보유한 방대한 비선형 해석 데이터베이스를 기반으로 정확한 비탄성 구조물 모델링 수행
  - 풍동실험 결과 기반 CFD 해석을 통한 압력계수, 거스트영향계수, 지형계수 등 연구

- 구조물의 비탄성 거동에 따른 풍하중의 변화를 고려할 수 있는 유체-구조물 상호 작용해석 (Fluid-Structure Interaction Analysis) 수행
- CFD 해석을 활용하여 슈퍼태풍에 의한 풍속과 유선에 기반한 비산물 중량에 따른 충돌 속도 예측을 통해 내충격 실험 하중 산정
- UHPC 복합구조 보의 Strut-Tie 모델을 통한 이론적 해석 및 유한요소해석
- 실험 결과를 바탕으로 UHPC 복합구조 기둥의 소성힌지 포락곡선 해석, 준정적 하중 부재 거동 해석, 설계 방법 연구
- 준정적 하중에 의한 UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 유한요소해석
- 비산물/부유물에 의한 UHPC 패널의 내충격 동적해석
- 방향에 따른 하중 상관성을 고려한 시간이력 풍하중 재생 방법 연구
- 비산물/부유물에 의한 UHPC 패널의 내충격/내압 동적해석

○ 연구개발 추진체계



그림 1. 연구개발 추진체계

○ 연구개발 추진 일정

1차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비(천원)	책임자(소속기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	구조물 중요도에 따른 다양한 재현주기 설계풍속 산정				■	■	■	■	■					10,000	강현구 (서울대학교)
2	건물의 비탄성 거동을 고려한 설계 방법 개발							■	■	■	■	■		11,000	
3	장시간 비탄성 반복이력거동 시간이력해석									■	■	■	■	20,000	
4	초고층건물의 설계변수에 따른 소형 풍동실험체 설계 및 제작							■	■	■				40,000	
5	고층건물의 소형 풍동실험									■	■	■	■	50,000	
6	UHPC 복합구조 보의 강도의 이론적 해석 모델 개발				■	■	■	■	■					14,000	Wu Xiangguo (Harbin Institute of Technology)
7	UHPC 복합구조 보의 휨/전단 실험							■	■	■	■	■	■	39,000	
8	UHPC 복합구조 기둥의 휨/압축 실험							■	■	■	■	■	■	39,000	
9	UHPC 복합구조의 유한요소해석									■	■	■	■	25,000	

2차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비(천원)	책임자(소속기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	대형 풍동실험실 비탄성 거동 실험체 계획 및 제작	■	■	■	■									70,000	강현구 (서울대학교)
2	비탄성을 고려한 풍동실험 수행			■	■	■	■							60,000	
3	풍동실험 결과 기반 CFD 해석					■	■	■	■	■	■	■		34,000	
4	슈퍼태풍 풍하중 시간이력 비선형 해석					■	■	■	■	■	■	■	■	34,000	
5	비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 제시							■	■	■	■	■	■	34,000	
6	UHPC 복합구조 슬래브 실험체 설계 및 제작	■	■	■										56,500	Wu Xiangguo (Harbin Institute of Technology)
7	UHPC 복합구조 슬래브 뚫림 전단 실험			■	■	■	■	■	■					40,000	
8	UHPC 복합구조 슬래브 유한요소해석							■	■	■	■	■	■	30,000	

3차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비(천원)	책임자(소속기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	풍하중 피로파괴 수평부재 실험체 설계 및 제작	■	■	■	■	■								60,000	강현구 (서울대학교)
2	풍하중 피로파괴 성능실험			■	■	■	■	■	■	■	■			60,000	
3	소형 풍력적분 풍동실험 개발	■	■	■	■	■	■	■	■					60,000	
4	성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 수정·보완					■	■	■	■	■	■	■	■	22,000	
5	UHPC 패널의 내충격 실험체 설계 및 제작	■	■	■	■									56,500	Wu Xiangguo (Harbin Institute of Technology)
6	UHPC 패널의 내충격 성능실험			■	■	■	■							70,000	
7	UHPC 패널의 충격하중 유한요소 해석 수행					■	■	■	■					10,000	
8	UHPC를 활용한 생애주기 극한하중 저항 성능 극대화 연구				■	■	■	■	■	■	■	■	■	20,000	

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

1차년도 주관연구기관(서울대학교) 연구성과

• 구조물 중요도에 따라 다양한 재현주기 설계풍속 산정

국내외 지진하중, 풍하중 기준 비교를 통하여 성능기반 내진 내풍 통합설계를 위한 통일된 재현기간 재정립. 지진하중과 풍하중의 재현가간 개념이 동일한 미국 설계기준 ASCE 7-16과의 비교 분석을 통해 국내 풍하중의 실질적인 재현기간 추정.

표 1. KBC 2016과 ASCE 7-16의 풍하중 재현주기 (강현구 외 2인, 2019)

	Risk category	Return period, T	Importance factor, I_w	Load factor	Converted load factor
KBC 2016	Super high-rise	100-year	1.05	1.3	1.43
	S, I		1		1.30
	II		0.95		1.17
	III		0.9		1.05
	Risk category	Return period, T	Return period conversion	K_d	Converted load factor
ASCE 7-16	IV	3,000-year	1.74	0.85	1.48
	III	1,700-year	1.60		1.36
	II	700-year	1.40		1.19
	I	300-year	1.22		1.03

ASCE에서 2019년 출판한 성능기반 내풍설계 지침에서는 처음으로 성능기반 내풍설계를 도입하면서, 구조물의 비탄성 거동을 허용하였음. ASCE7-16을 기반으로 재현기간 700~3,000년 풍하중에 대해 일부 비탄성 거동을 허용함으로써 고층건물의 연성능력을 높이고자 하는 설계 방법이 제시되었음. 이에 따라 국내 설계기준과 ASCE 7-16의 풍하중 비교 분석을 통해 성능기반 내풍설계를 도입하기 위한 발판을 마련함.

• 가스트에 의한 공진효과 산정 시 건물의 비탄성 거동을 고려한 설계 방법 개발

ASCE의 성능기반 내풍설계 지침에서는 극한 풍하중에 대해 일부 비탄성 거동을 허용하고 있지만, 내진설계와 달리 초기설계에서 비탄성 거동을 예측하여 설계하는 방법에 대한 구체적인 설명이 없음. 일부 연구에서는 초기설계 단계에서 풍하중을 줄여서 설계를 수행하는 방법을 제시하였지만, 어느 정도를 줄여서 설계해야 안전한 설계가 되는지에 대한 연구가 부족하였음. 이에 따라 이 연구에서는 풍하중에서의 공진성분에도 지진하중에서 사용하는 반응수정계수 R_w를 도입한 설계 방법 개발하였음.

풍하중은 지진하중과 달리 평균 성분과 비공진 성분이 존재하기 때문에 하중 전체에 대해 하중을 줄이는 계수인 반응수정계수를 그대로 적용할 수 없음. 이에 따라 예상되는 공진 성분만을 줄이는 내풍설계용 반응수정계수 R_W를 적용하여 하중을 줄여 설계하는 방법을 제안하였으며, 지진하중과의 관계와 예상되는 하중 시나리오를 바탕으로 안전한 설계가 되기 위한 R_W 값의 범위를 제안하였음.

$$\text{일반적인 설계 풍하중: } P = \overline{P} + \sqrt{P_B^2 + P_R^2}$$

$$\text{비탄성 도입을 위한 설계 풍하중: } P = \overline{P} + \sqrt{P_B^2 + (P_R/R_W)^2}$$

여기서, $\overline{P}$는 풍하중의 평균 성분, P_B는 풍하중의 비공진 성분, P_R은 풍하중의 공진 성분임.

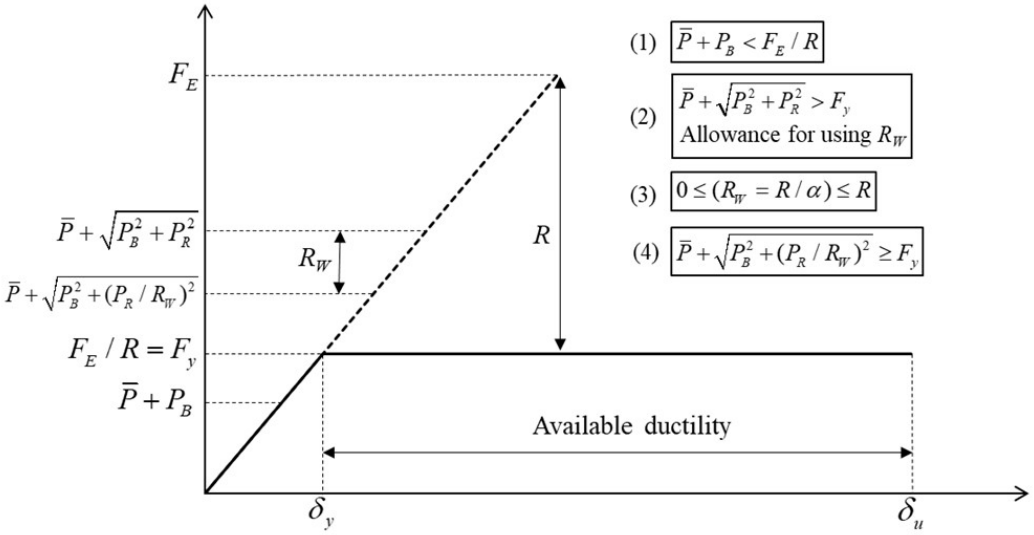


그림 2. 비탄성을 고려한 내풍 설계법

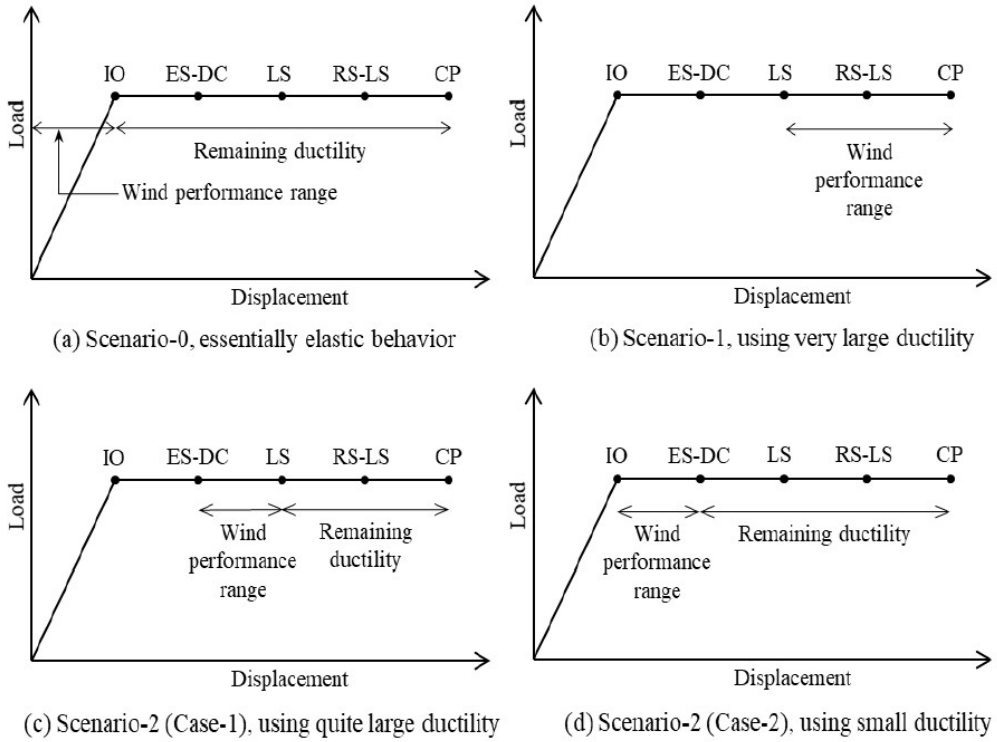


그림 3. 지진하중 및 극한풍하중 설계 시나리오

• 풍하중에 의한 장시간 비탄성 반복이력거동을 반영한 구조물의 비탄성 시간이력 해석

비탄성 풍하중 해석을 위해서는 시간이력 풍하중이 필요하며, 일반적으로 풍동실험을 통해 시간이력 풍하중을 산정할 수 있음. 하지만 풍동실험의 비용과 소요시간을 고려하면 설계 변경이 잦은 초기 설계 단계에서 이를 활용하기 어려움. 이에 따라 실무 적용성을 높이기 위해 비선형 시간이력 해석을 위한 풍하중 생성 방법 연구 수행. 설계기준에서는 각 방향별 풍하중의 Power Spectral Density (PSD) 함수를 제시하고 있으며, 이를 활용하여 시간이력 풍하중을 재생할 수 있음.

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{2S(f_i)\triangle f}\, cos\,(2\pi f_i t + \theta_i)$$

여기서, $S(f)$는 풍하중의 PSD 함수, f는 주파수, θ는 랜덤 위상각임.

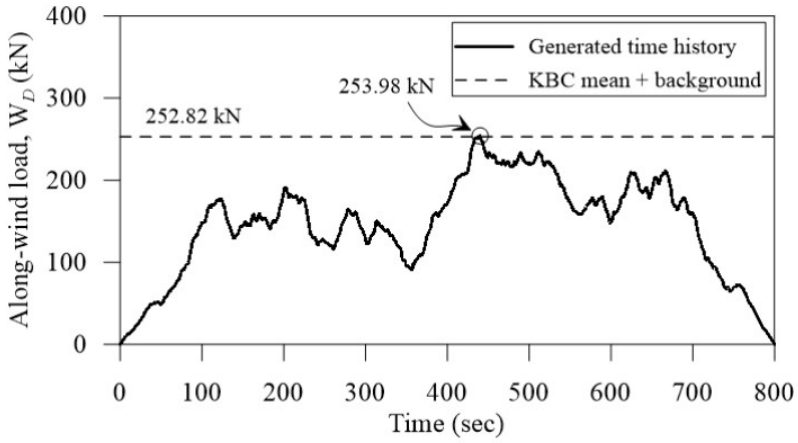
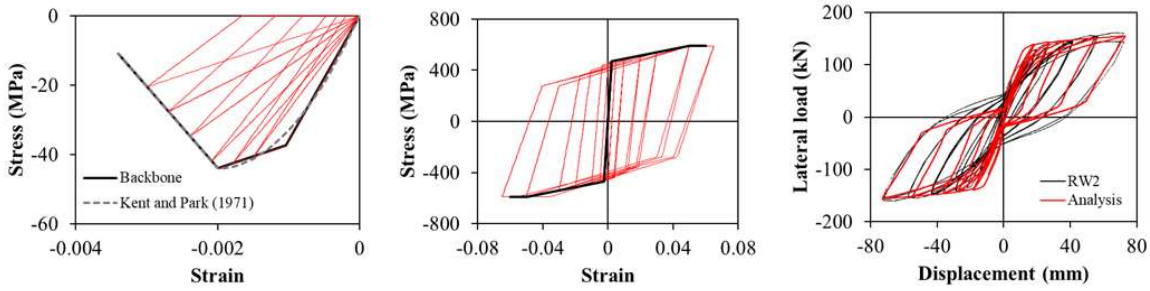


그림 4. 파워스펙트럼밀도 함수를 이용한 시간이력 풍하중 재생

비탄성 풍하중 해석을 위해서는 비선형 해석 모델이 필요하며, 시간이력 해석을 위해서는 각 부재의 포락곡선 및 이력거동 모델이 필요함. 미국 성능기반 내진설계 지침인 ASCE 41-17, 대한건축학회의 공동주택 성능기반 내진설계 지침 등에서 각 부재들에 대한 비탄성 포락곡선을 산정하기 위한 가이드라인을 제시하고 있지만, 시간이력 해석을 위한 이력거동 모델을 제시하고 있지 않음. 이에 따라 이 연구에서는 고층건물에서 주로 사용되는 벽체, 보, 연결보 등 주요 부재에 대한 이력거동 모델을 개발하였음.

벽체와 같은 수직부재는 Fiber 요소로 분할하여 재료모델에 대한 이력거동 모델을 적용함으로써 최종적으로 벽체 전체의 거동을 모사하는 방법이 이상적이며, 보의 경우 양단 모멘트 소성힌지 모델을 적용하는 것이 이상적임. 연결보의 경우 형상비(길이/깊이)에 따라 전단지배 또는 휨지배가 되어 파괴양상이 달라지기 때문에 이를 고려하여 형상비 2미만인 경우 중앙 집중 전단힌지를 적용하고, 형상비가 2이상인 경우 양단 모멘트힌지를 적용하는 것이 바람직함.

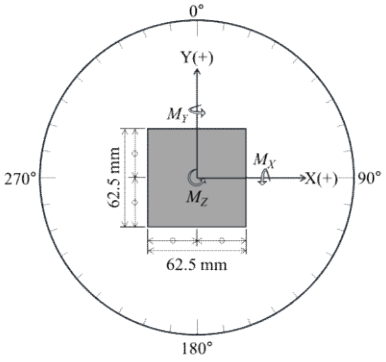


(a) Concrete (b) Rebar (c) Shear wall

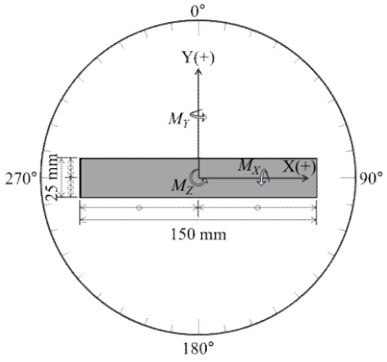
그림 5. 구조물의 비탄성 이력거동 모델 개발

- 초고층건물의 평면, 높이, 건물 배치 등 설계변수에 따른 풍동 실험 데이터 구축

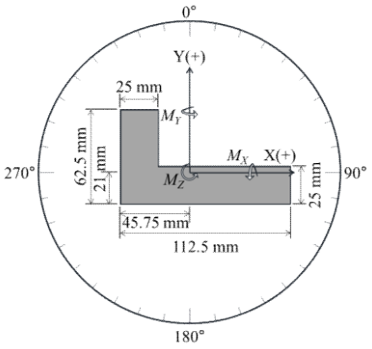
구조물에 작용하는 풍하중을 산정하기 위해서는 풍동실험을 수행하여, PSD 함수를 산정하고 이로부터 비공진, 공진 성분을 산정함. 국내외 설계기준에서는 변장비(D/B) 0.2~5.0 사이의 직사각형 건물에 대해서만 풍하중 PSD를 제시하고 있으며, 이 외의 건물에 대해서는 풍동실험을 통해 산정하도록 하고 있음. 국내 고층건물들은 주로 공동주택이며, 판산형 건물(변장비가 높은 직사각형, L자형)과 타워형 건물(정사각형, Y자형, T자형)이 주로 시공되기 때문에 설계기준을 그대로 적용하기 어려움. 국내 건물들의 대표적인 평면에 대해 풍동실험을 수행하여 데이터를 구축하여 향후 연구 및 실무 적용을 돕고자 건물의 평면형태(정사각형, 직사각형, L자형, Y자형, T자형)와 건물의 높이(형상비 3, 4, 5)에 따른 실험체 제작 및 실험 수행.



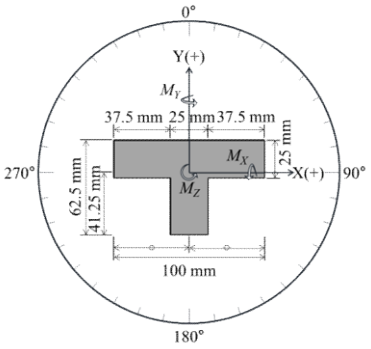
(a) 정사각형 모델



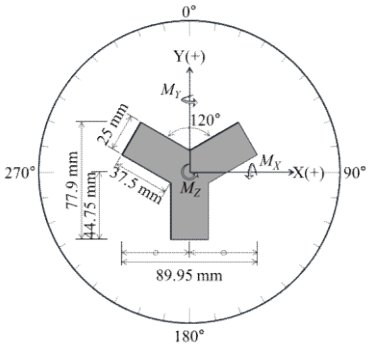
(b) 직사각형 모델



(c) L자형 모델



(d) T자형 모델



(e) Y자형 모델

그림 6. 풍동실험을 위한 실험체 평면 형상 및 방위각 설정

표 2. 풍동실험 설정

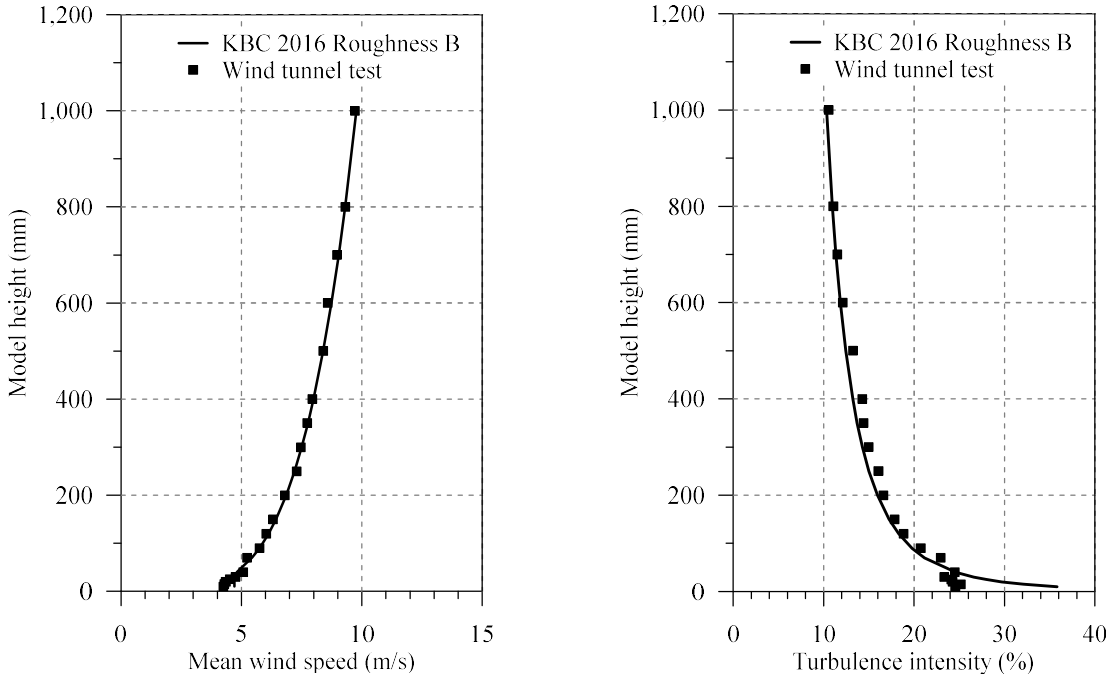
기본풍속	38m/s(부산, 국내 주요 20개 도시 중 최댓값)
지표면조도구분	B (도시)
실험체 길이 Scale	1/400
시간 Scale	1/60
풍속 Scale	1/6.67
샘플링 주파수	1,200Hz
1회 측정 시간	10초 (10분/60)
반복 횟수	10회 (총 100초)
방위각 간격	10°
지형계수	K_{zt} = 1.0
주변 지형 설정	단독 건물
대표길이	$L_R = \sqrt{A}$

표 3. 풍동실험 풍속 설정

평면 형상	IDs	Height (mm)	형상비	목표 설계풍속, $V_{H,Design}$ (m/s)	풍동 계측 설계풍속, $V_{H,Test}$ (m/s)
Square	S3	188	3	44.23	6.595
	S4	250	4	47.10	7.029
	S5	313	5	49.48	7.363
Flat	F3	184	3	44.03	7.006
	F4	245	4	46.89	7.248
	F5	306	5	49.24	7.560
L-shape	L3	184	3	44.03	7.006
	L4	245	4	46.89	7.248
	L5	306	5	49.24	7.560
T-shape	T3	176	3	43.60	6.412
	T4	235	4	46.46	7.121
	T5	293	5	48.77	7.548
Y-shape	Y3	167	3	43.10	6.768
	Y4	222	4	45.88	7.234
	Y5	278	5	48.21	7.554



그림 7. 풍동실험실 전경(조도블럭)



(a) 풍속 고도분포 (b) 난류 강도

그림 8. 풍동실험 기류 설정

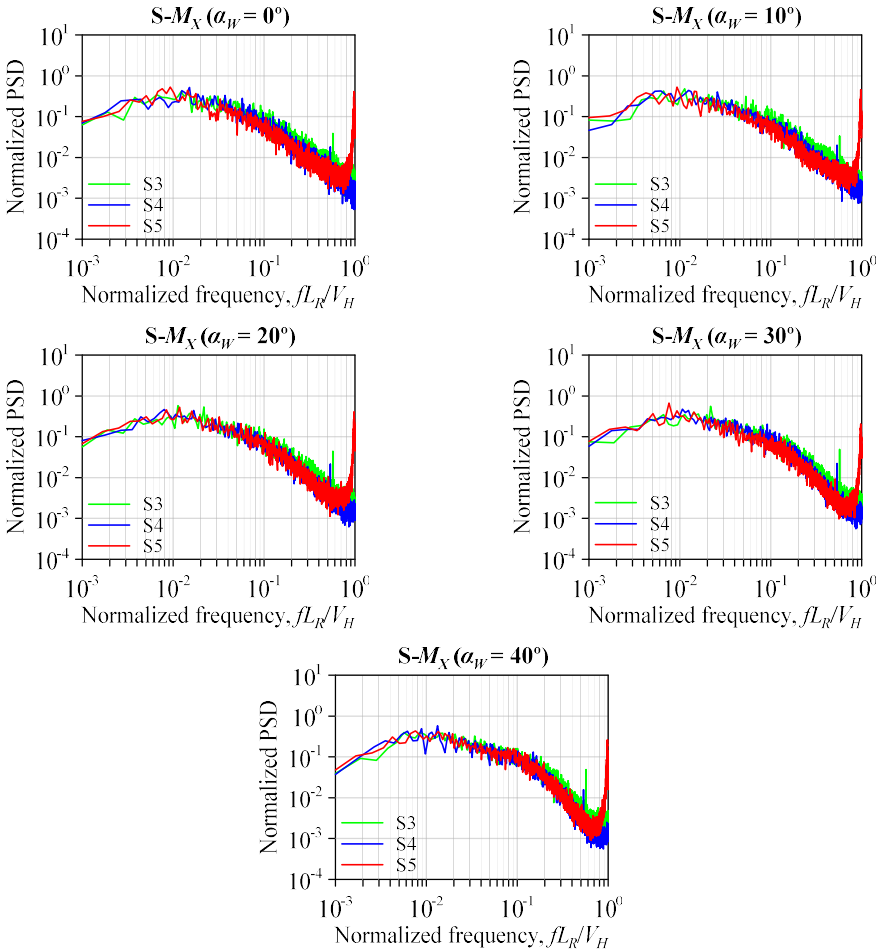


그림 9. 정사각형 모델 X방향 전도모멘트 PSD 함수

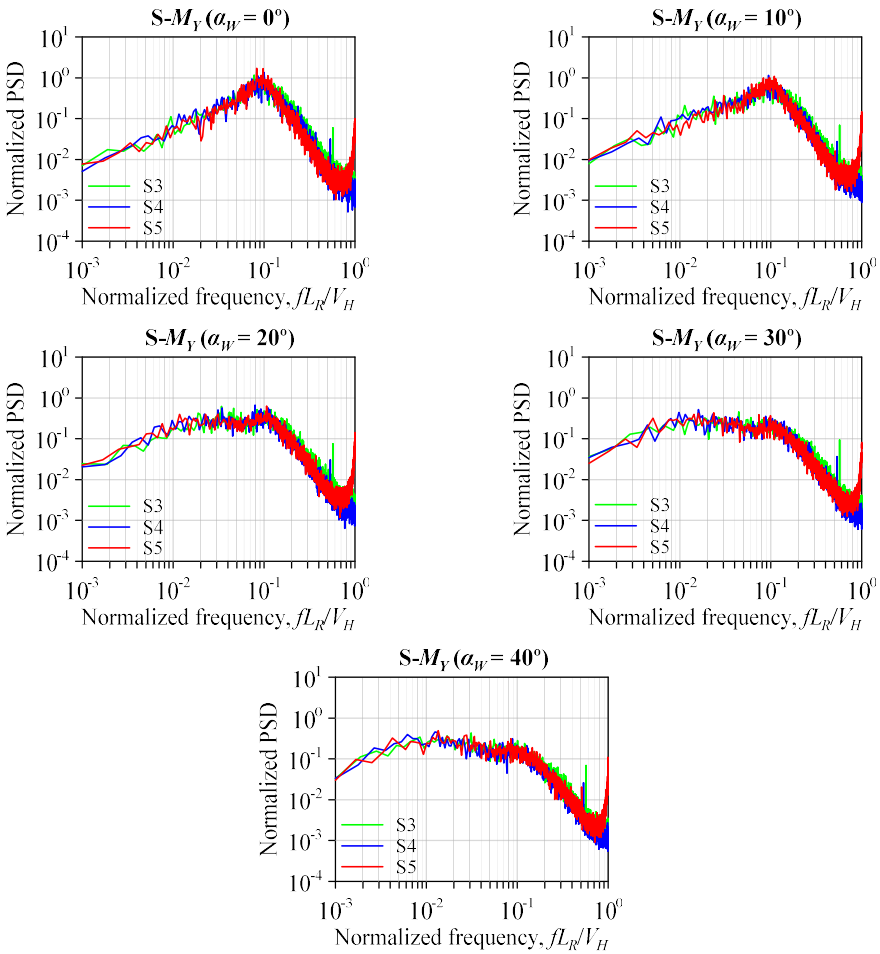


그림 10. 정사각형 모델 Y방향 전도모멘트 PSD 함수

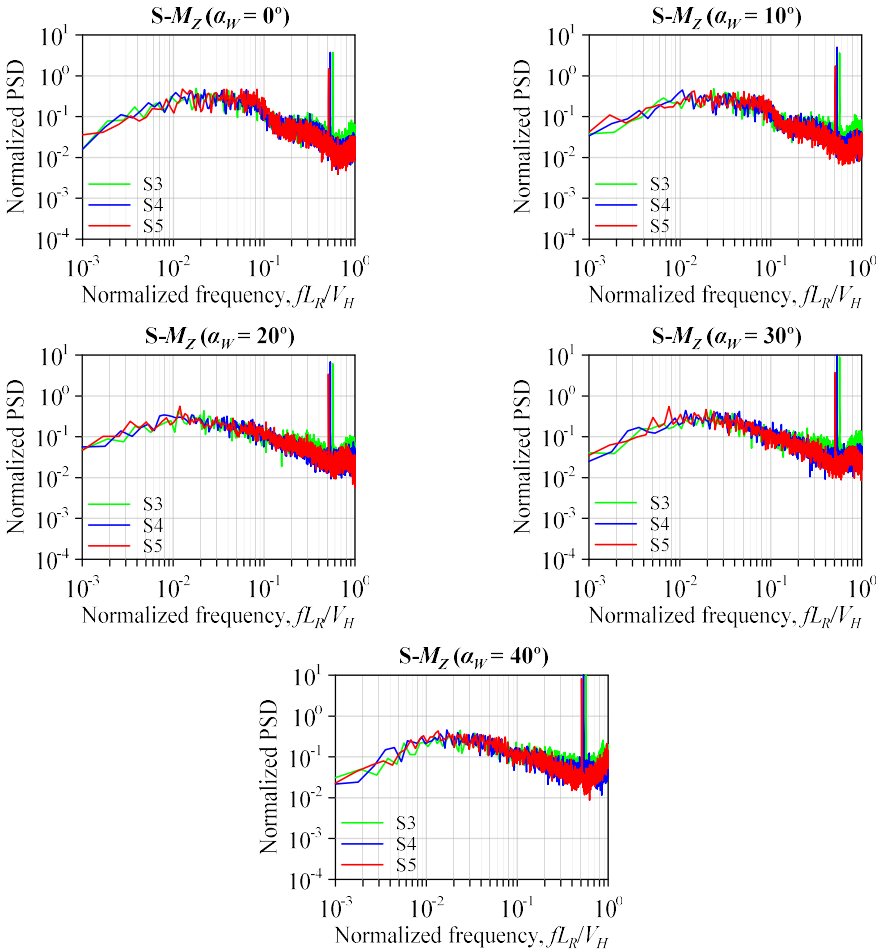


그림 11. 정사각형 모델 Z방향 비틀림모멘트 PSD 함수

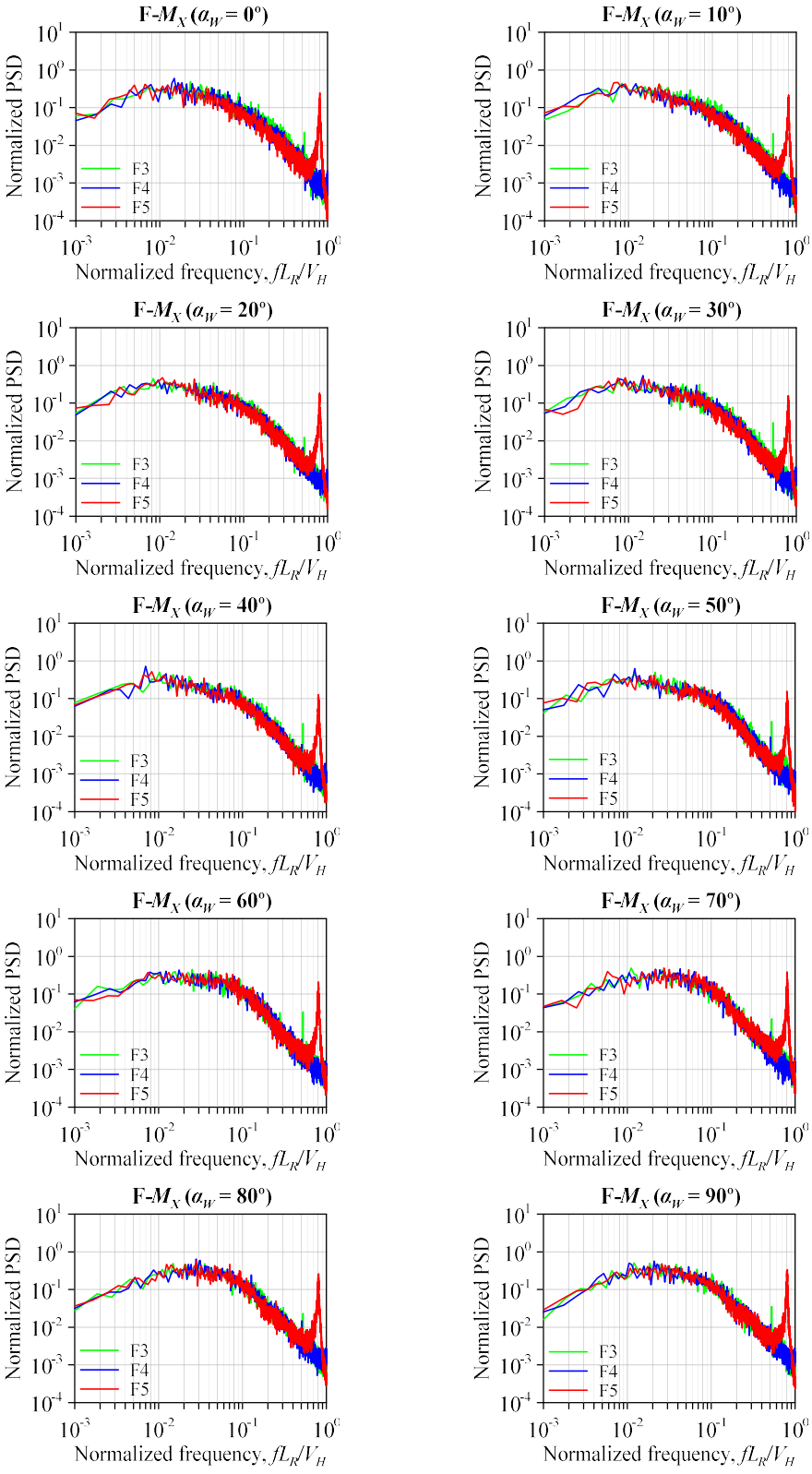


그림 12. 직사각형 모델 X방향 전도모멘트 PSD 함수

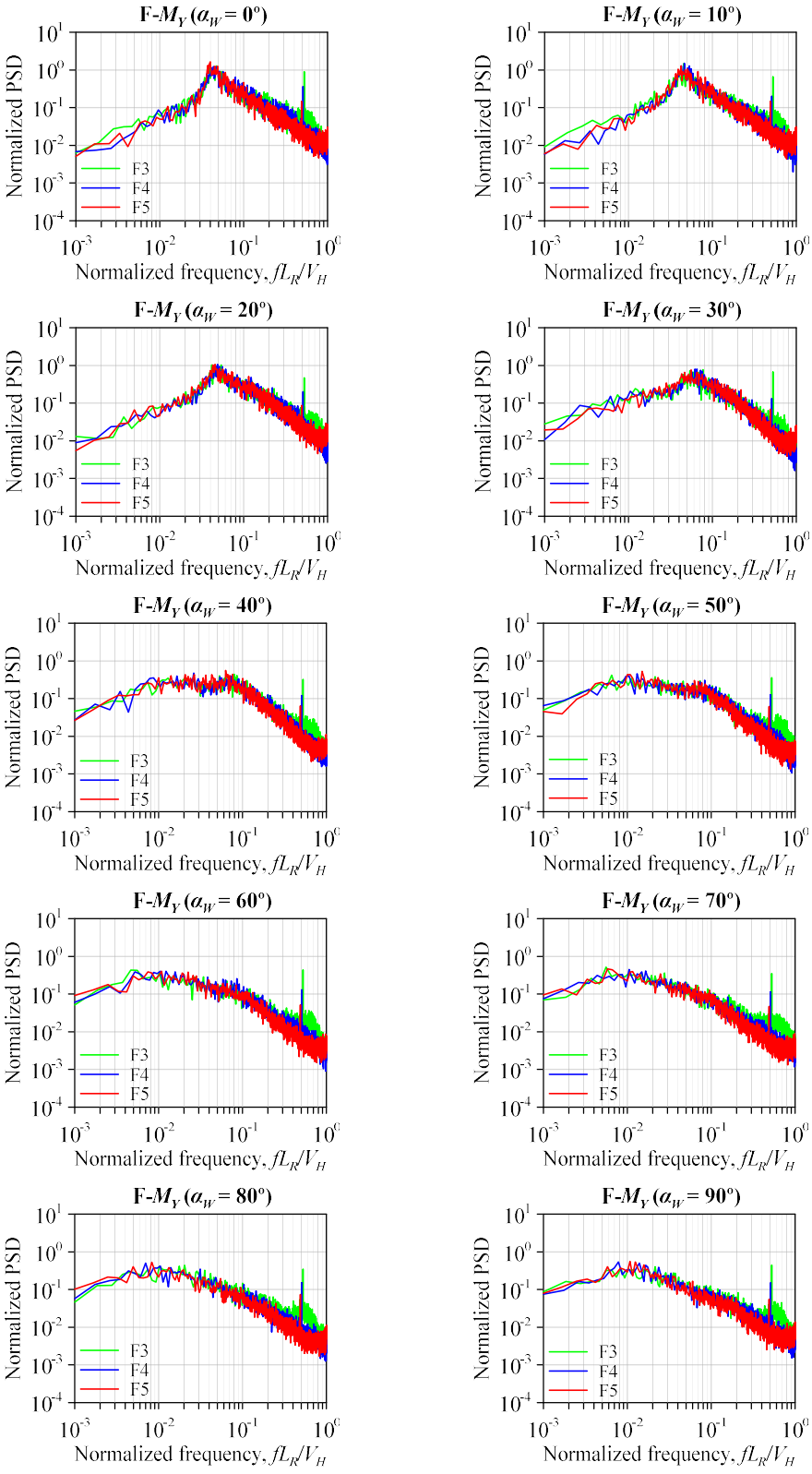


그림 13. 직사각형 모델 Y방향 전도모멘트 PSD 함수

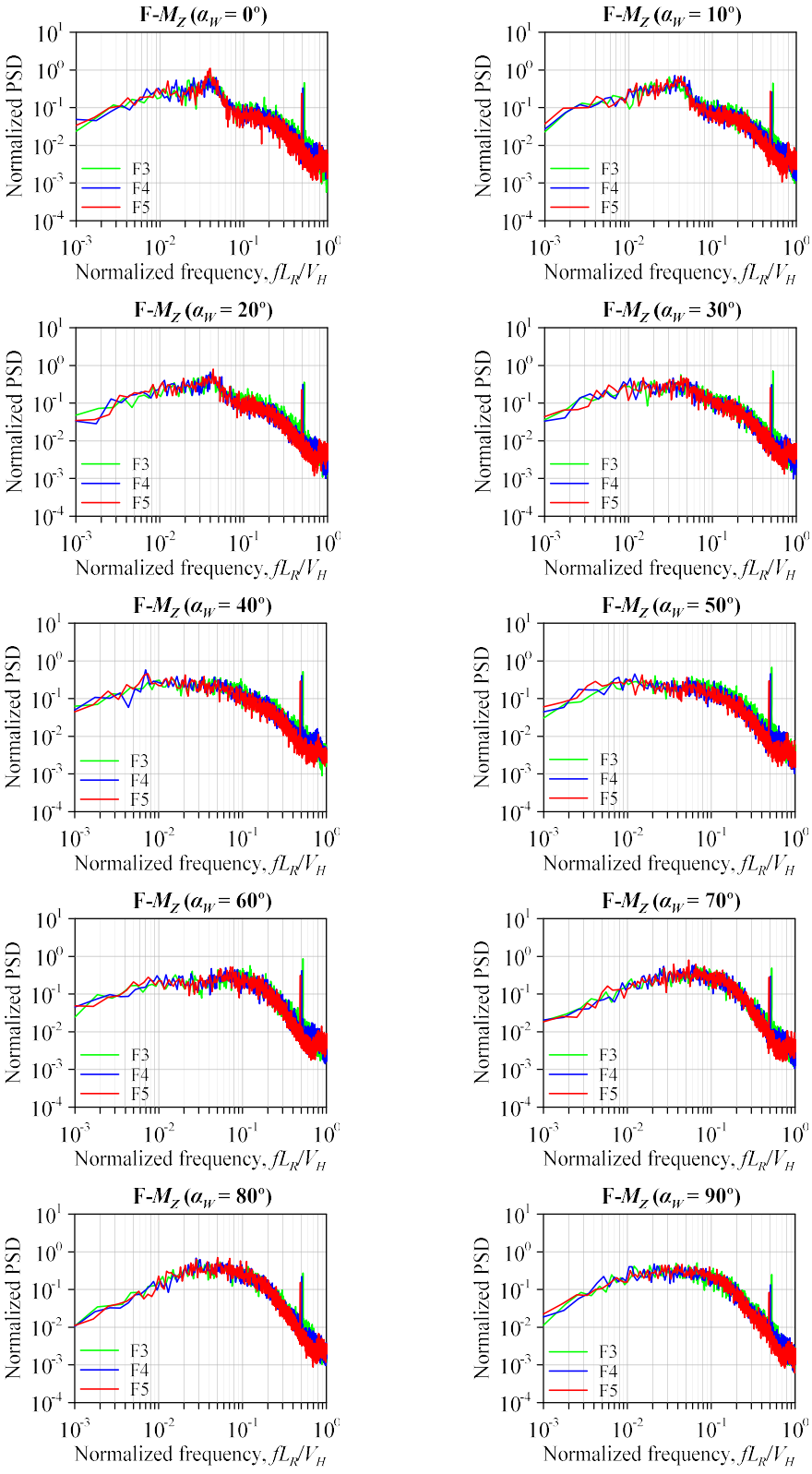


그림 14. 직사각형 모델 Z방향 비틀림모멘트 PSD 함수

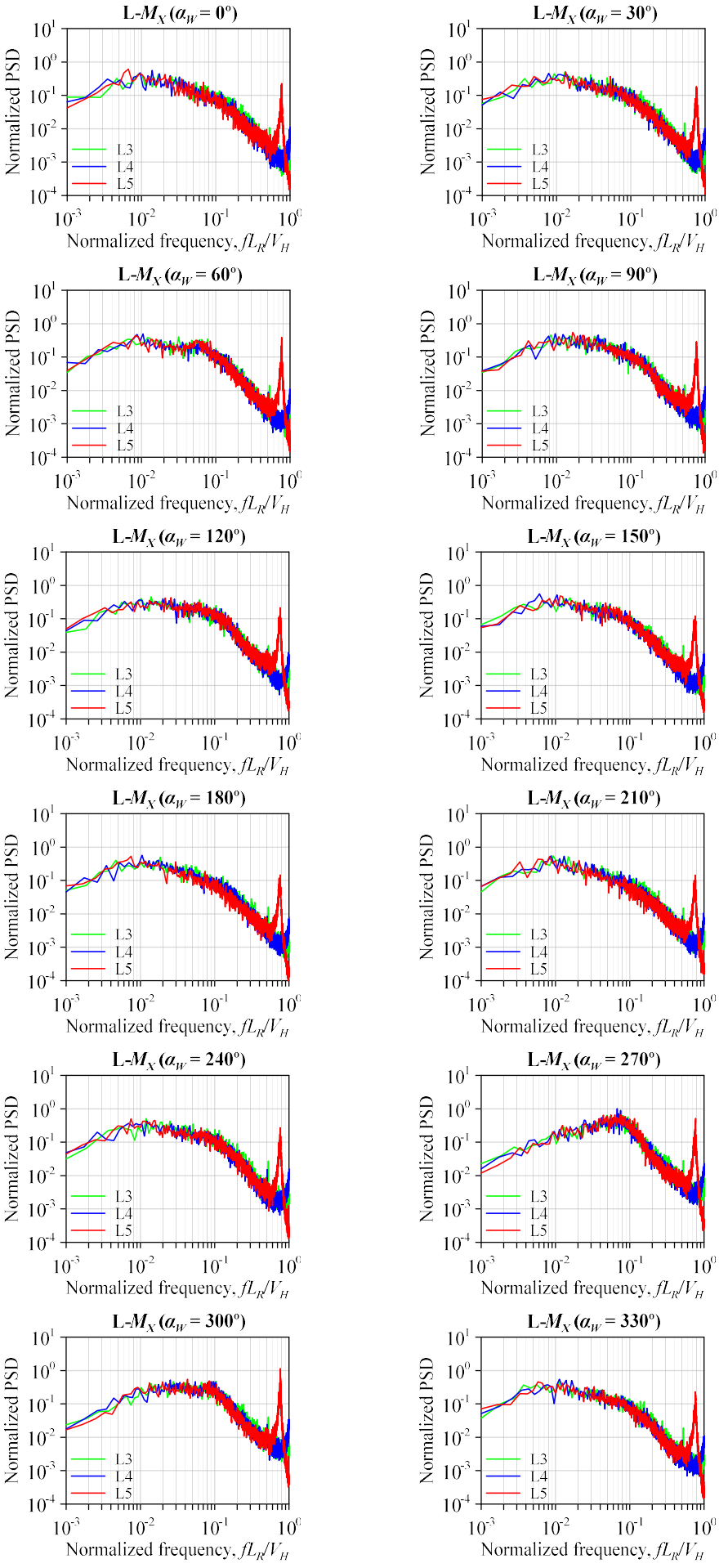


그림 15. L자형 모델 X방향 전도모멘트 PSD 함수

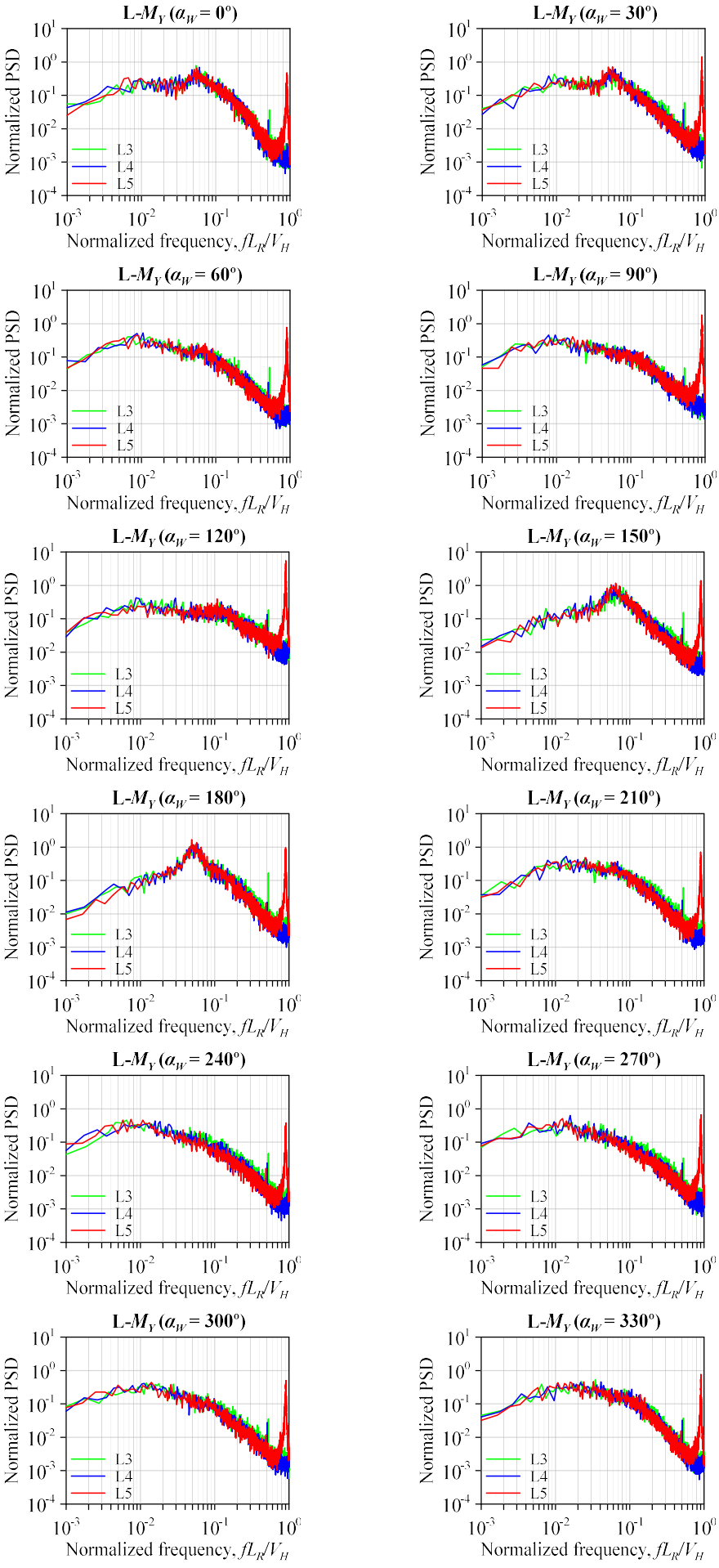


그림 16. L자형 모델 Y방향 전도모멘트 PSD 함수

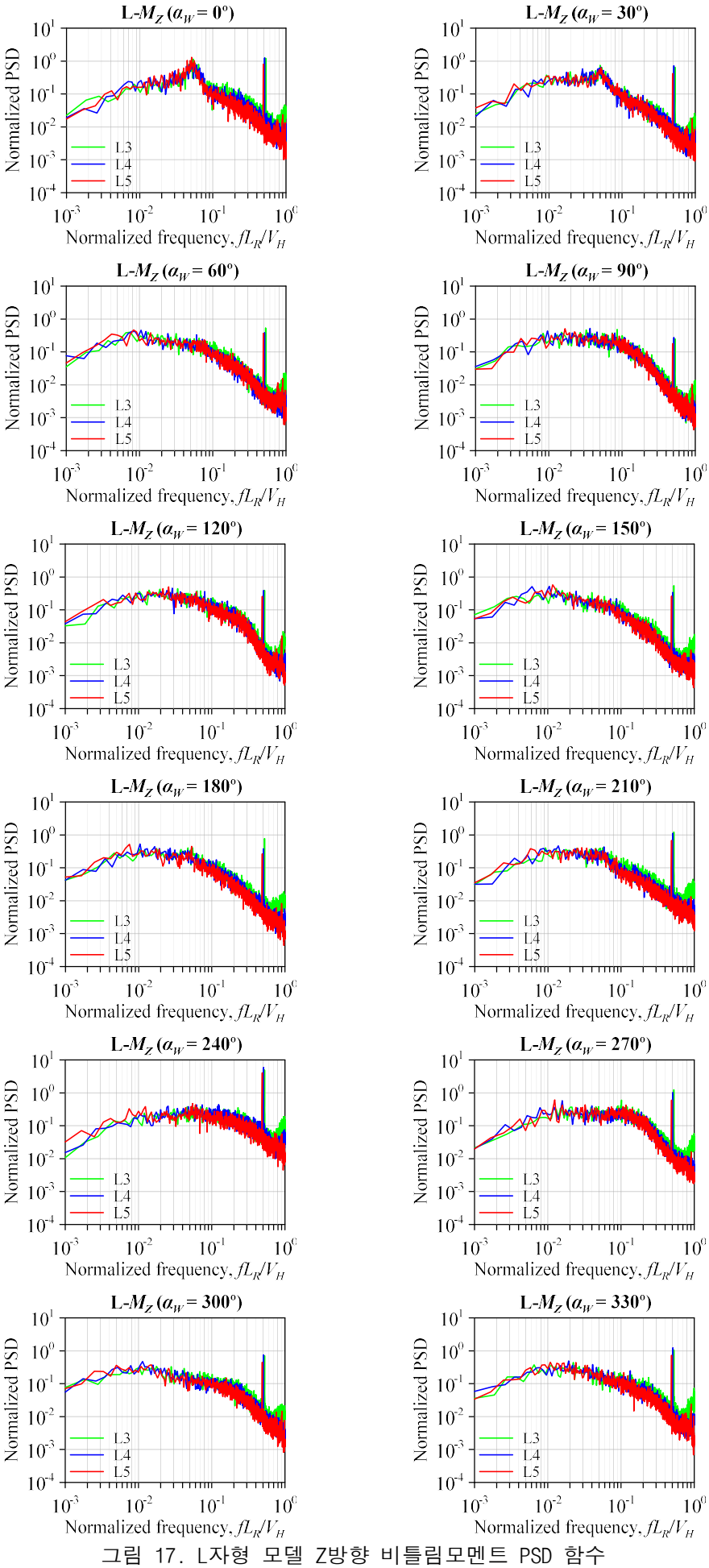


그림 17. L자형 모델 Z방향 비틀림모멘트 PSD 함수

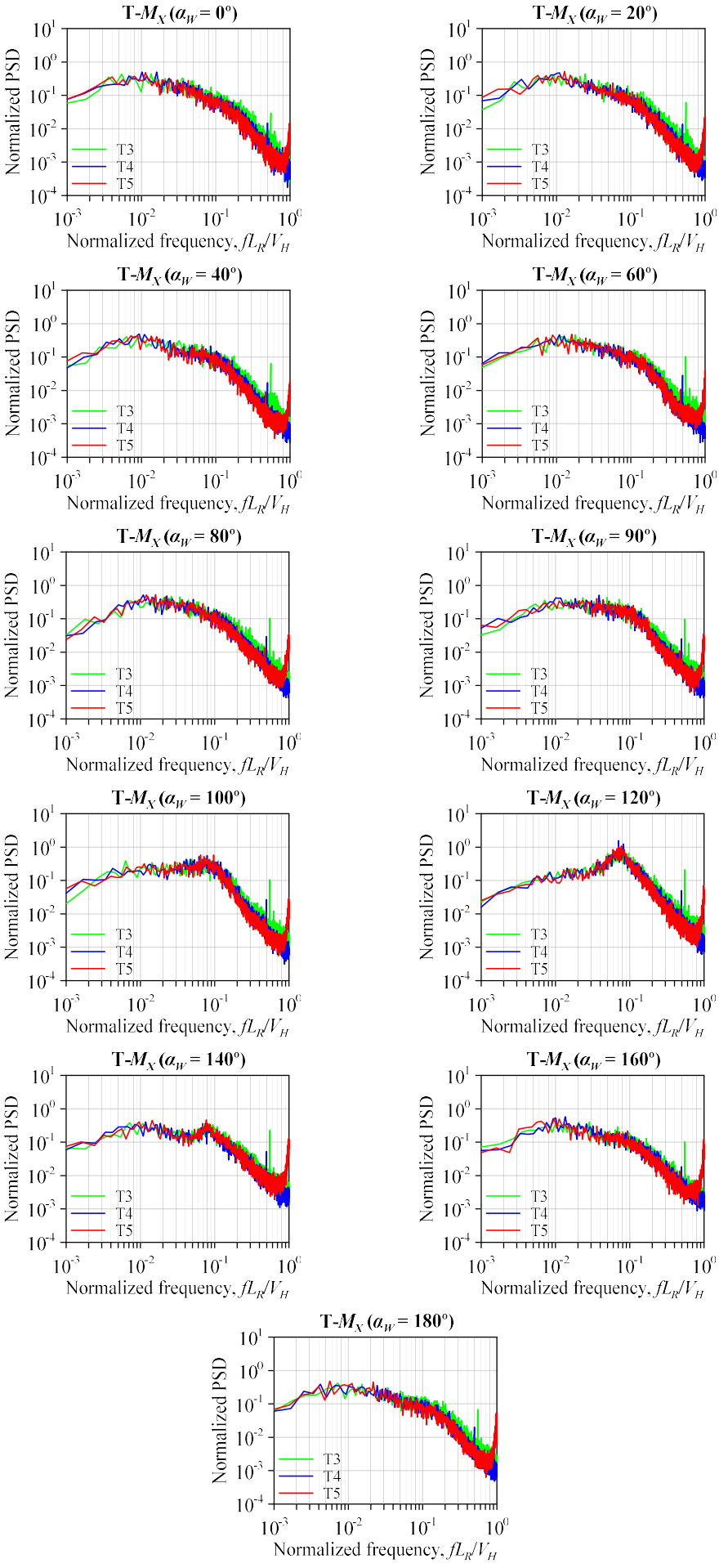


그림 18. T자형 모델 X방향 전도모멘트 PSD 함수

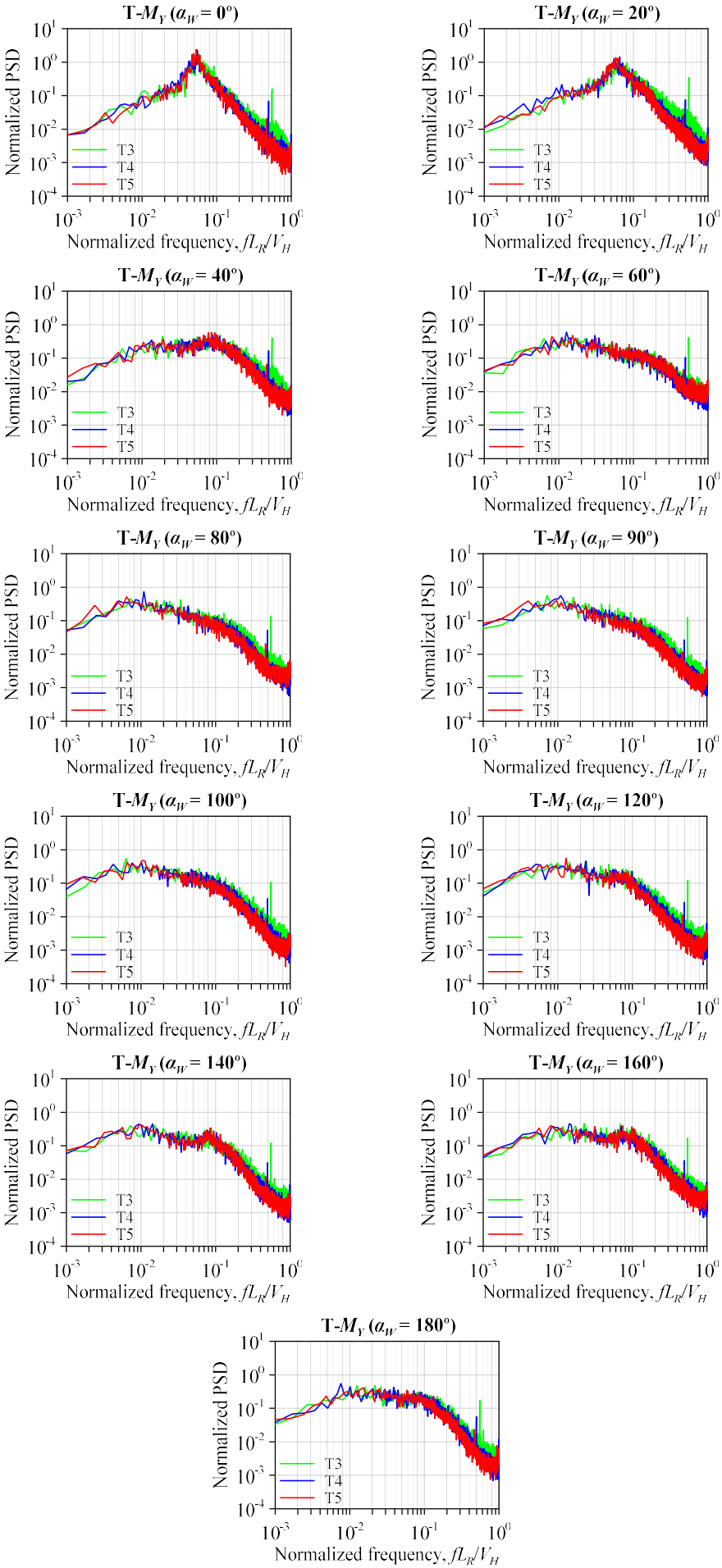


그림 19. T자형 모델 Y방향 전도모멘트 PSD 함수

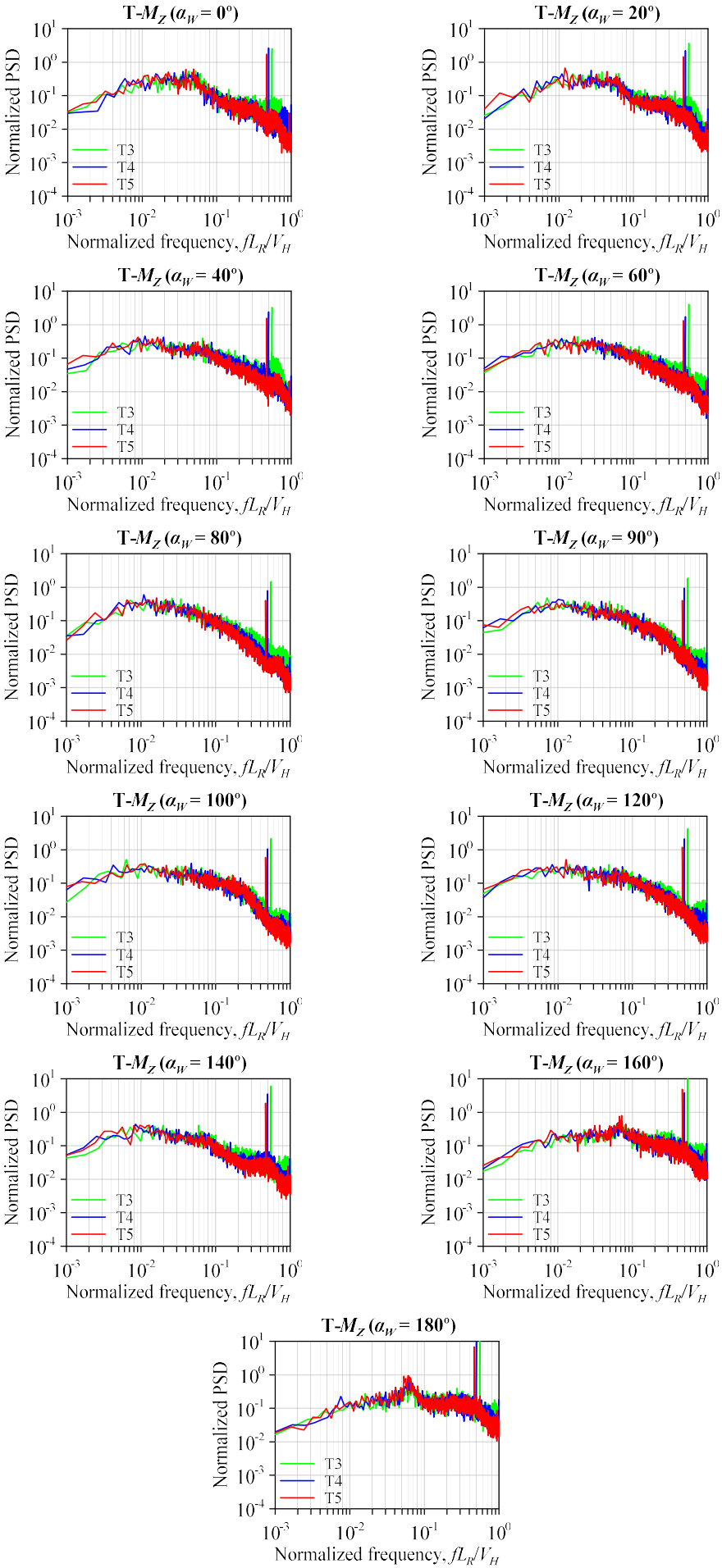


그림 20. T자형 모델 Z방향 비틀림모멘트 PSD 함수

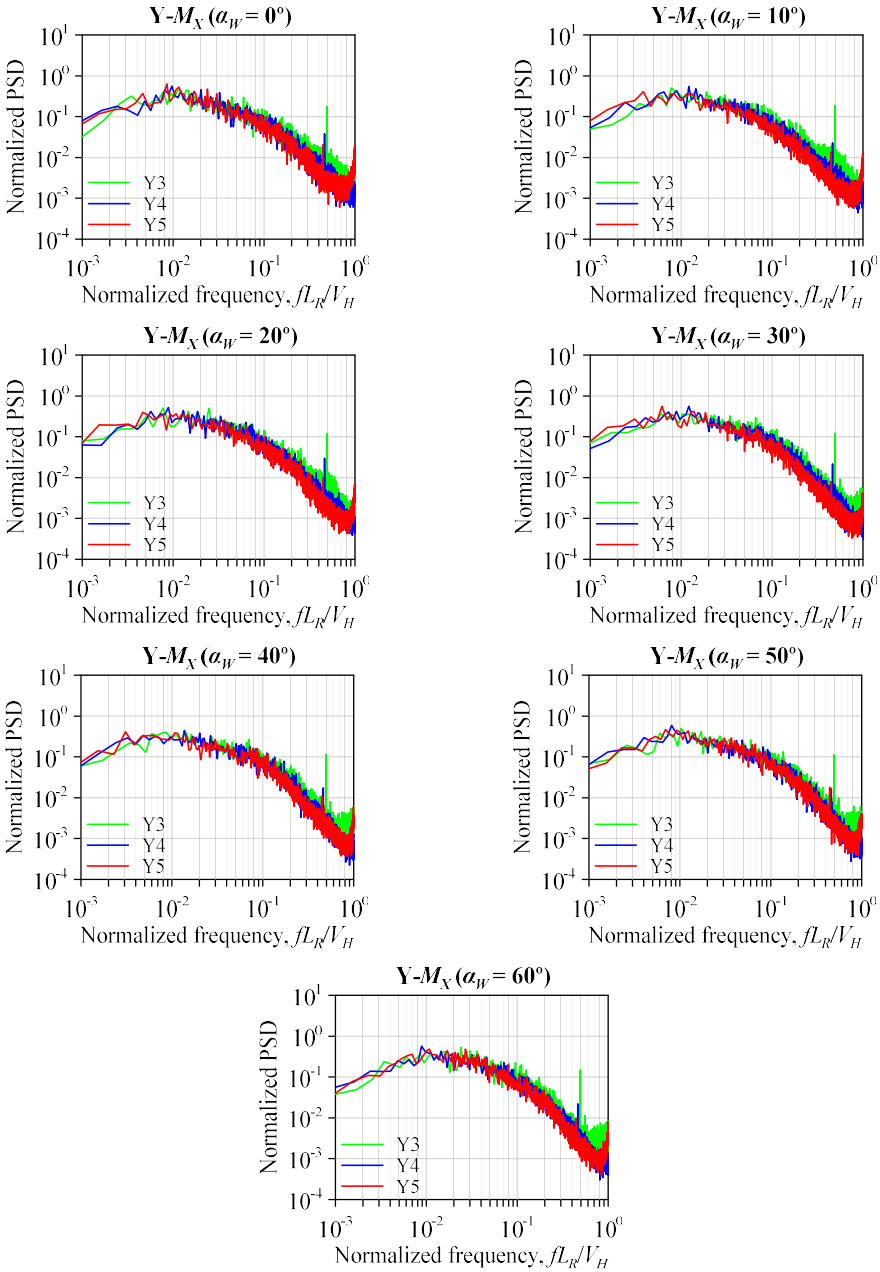


그림 21. Y자형 모델 X방향 전도모멘트 PSD 함수

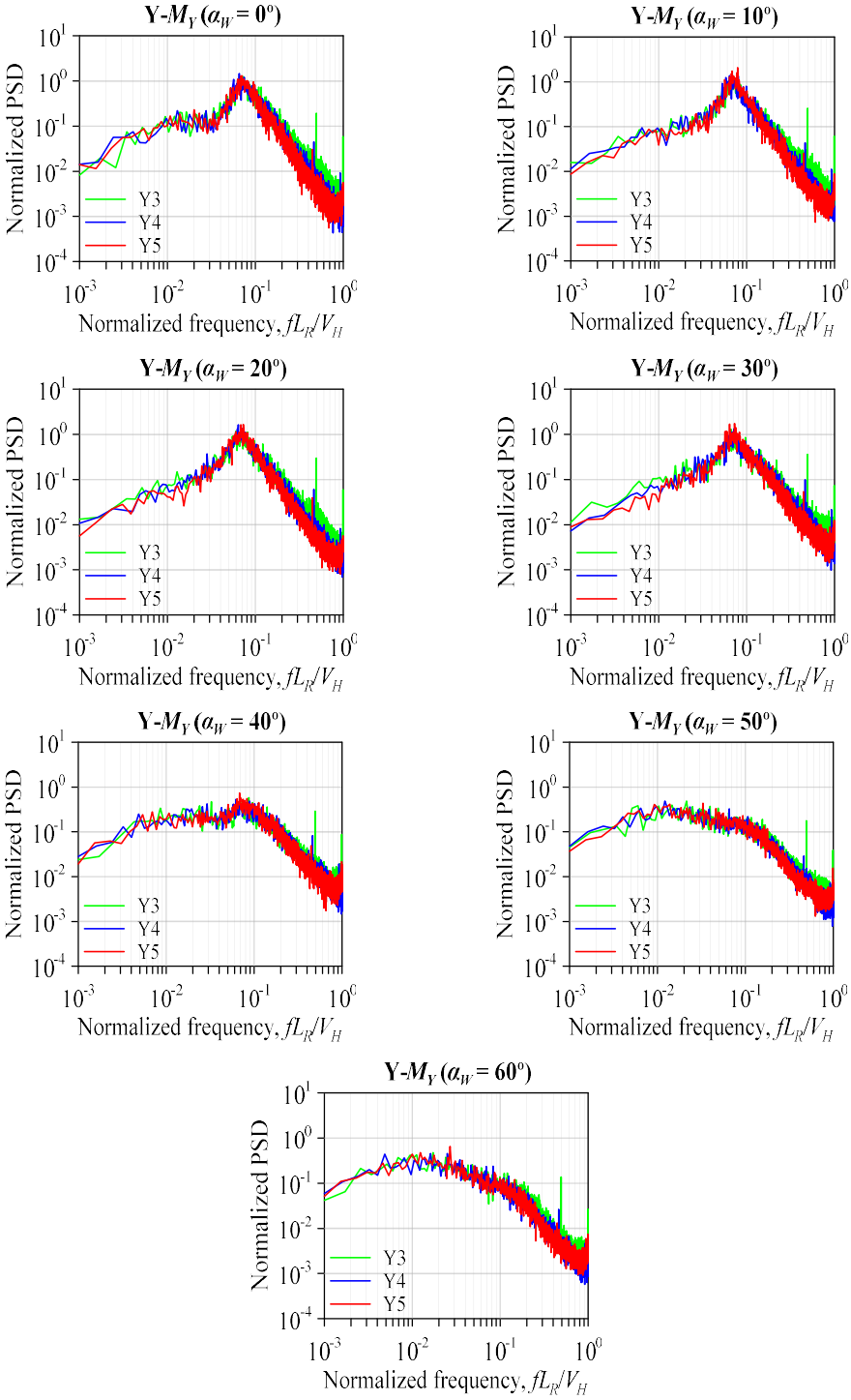


그림 22. Y자형 모델 Y방향 전도모멘트 PSD 함수

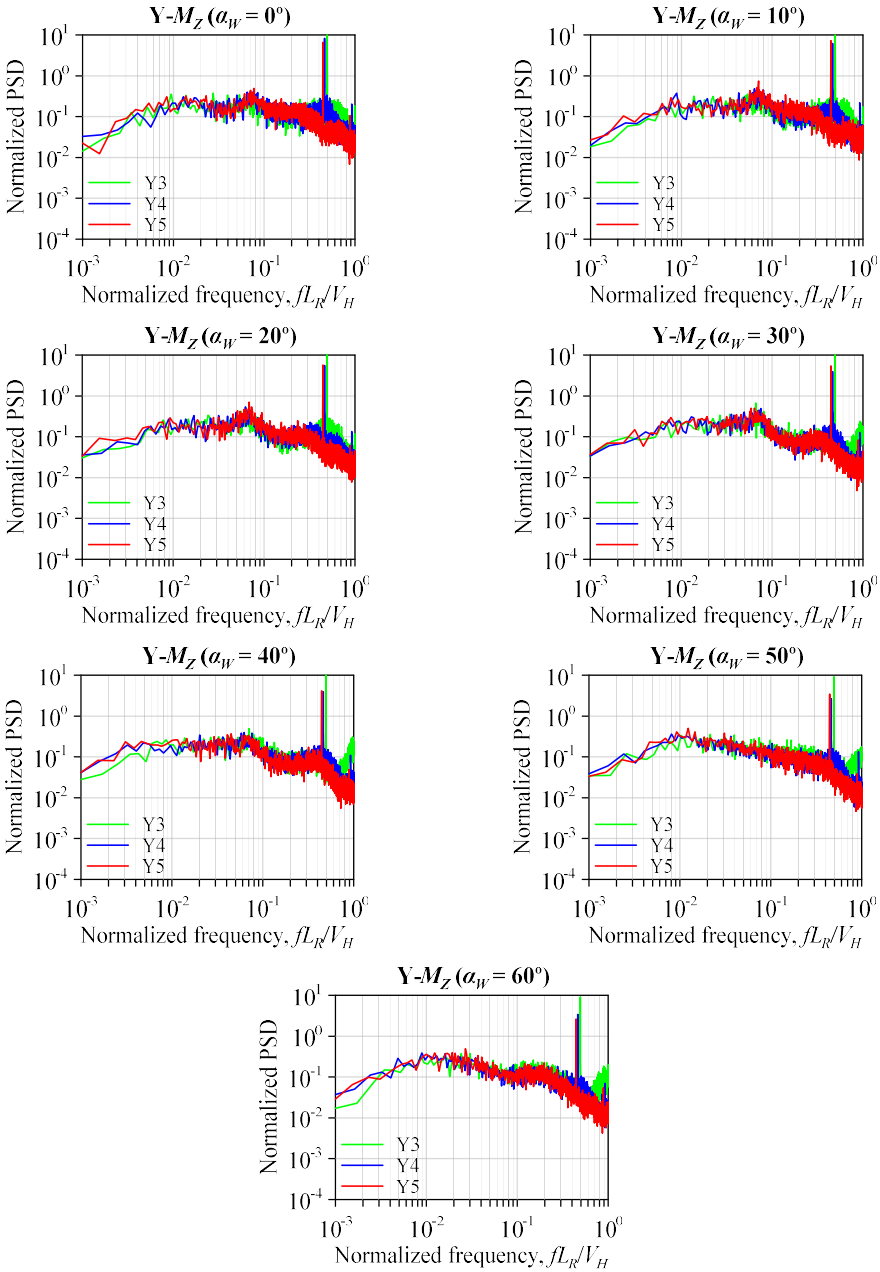
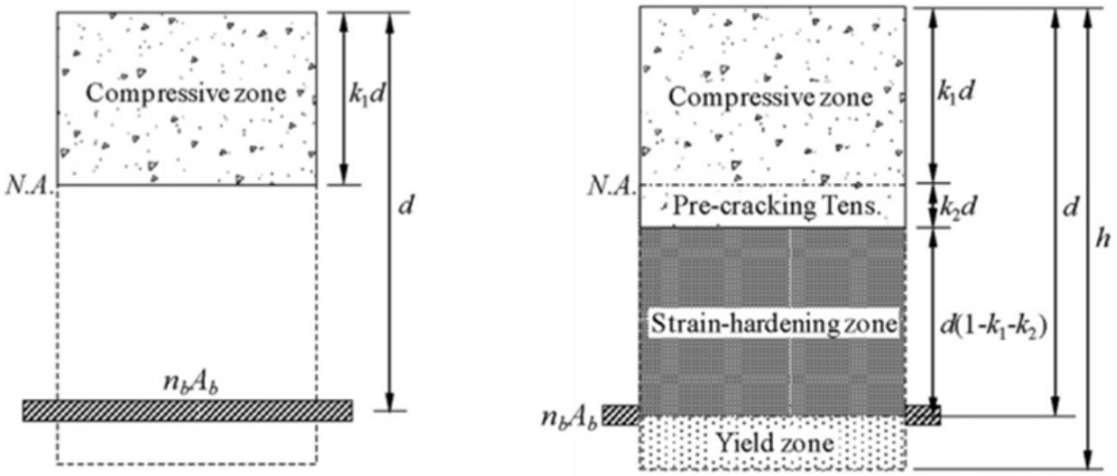


그림 23. Y자형 모델 Z방향 비틀림모멘트 PSD 함수

• UHPC 복합구조 보의 휨/전단강도 예측을 위한 이론적 해석 모델 개발
→ UHPC 복합구조 보의 단면해석 모델 개발을 통해 이론적인 단면 2차 모멘트 산정식 개발

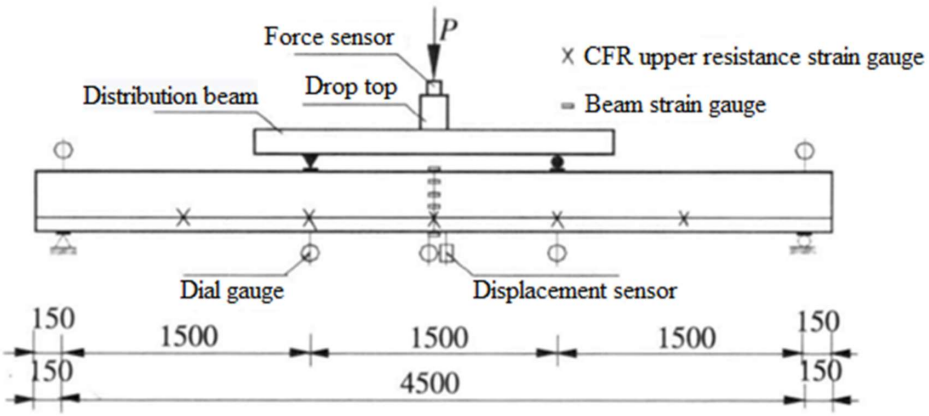


(a) 일반 RC 보 단면 (b) UHPC 보 단면

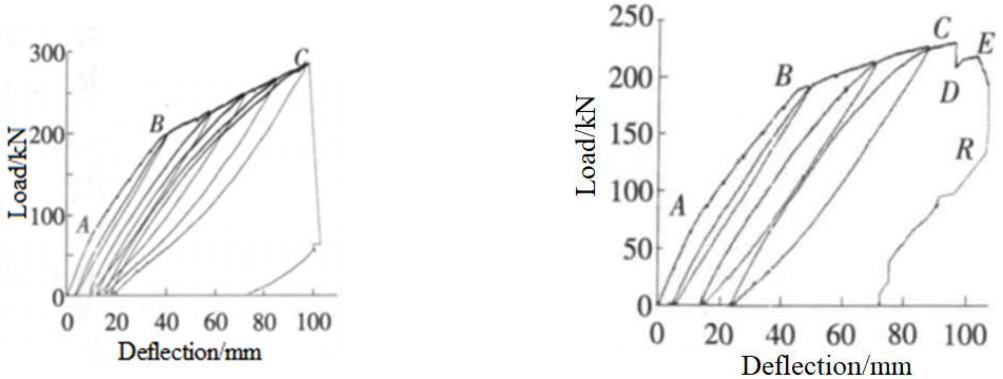
그림 22. UHPC 보의 단면 해석 모델

균열 단면 2차 모멘트 산정식: $I_{cr,h}=\frac{1}{3}b(k_1d)^3+n_h\frac{1}{3}b(d_e)^3+n_bA_b(d-k_1d)^2$

• UHPC 복합구조 보의 휨/전단 실험을 통한 극한하중 거동 검증
→ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) 텐던을 적용한 일반 보와 UHPC 복합구조 보의 이력거동 실험 수행. 일반 보의 경우 극한강도 도달 후 빠르게 파괴되는 취성적인 거동을 보였으며, UHPC를 적용한 보는 압축 Zone에서 콘크리트가 압축파괴된 후에도 충분한 내력을 보유하여 이상적인 거동을 보였음.



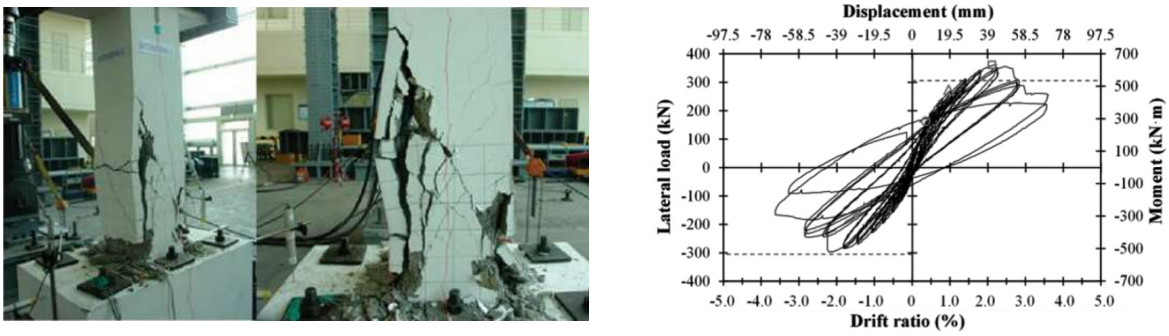
(a) 보 실험계획



(b) CFRP 텐던 적용 일반 보의 이력거동 (c) CFRP 텐던 적용 UHPC 보의 이력거동

그림 23. UHPC 복합구조 보의 실험

• UHPC 복합구조 기둥의 압축 및 휨/압축 실험을 통한 극한하중 거동 검증
→ 기둥의 극한하중 이력거동의 실험적 검증



(a) 기둥 실험체 (b) 이력거동 실험 결과

그림 24. 기둥의 극한하중 이력거동 실험

• 유한요소해석 프로그램을 활용한 UHPC 복합구조 보/기둥 해석 수행
→ 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA를 활용한 보/기둥 해석 수행

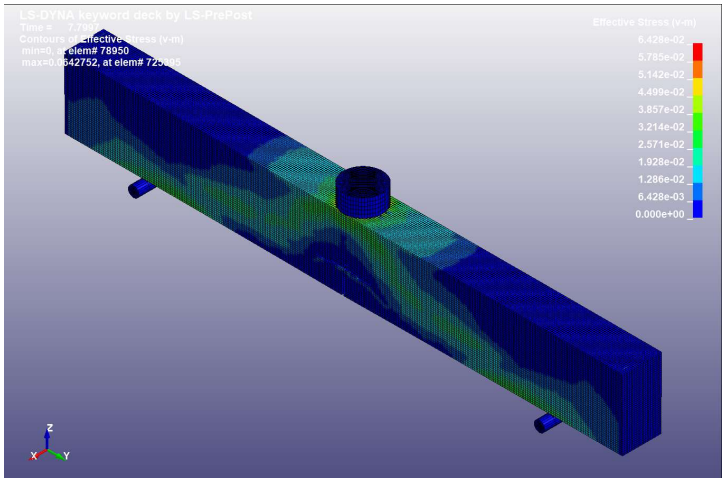


그림 25. UHPC 보의 유한요소 해석

- 풍동실험 기반 CFD 해석

풍동실험 데이터를 기반으로 다양한 평면 형태에 대한 전산유체해석(CFD 해석) 기법 중 하나인 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) 모델을 이용하여 해석 수행.

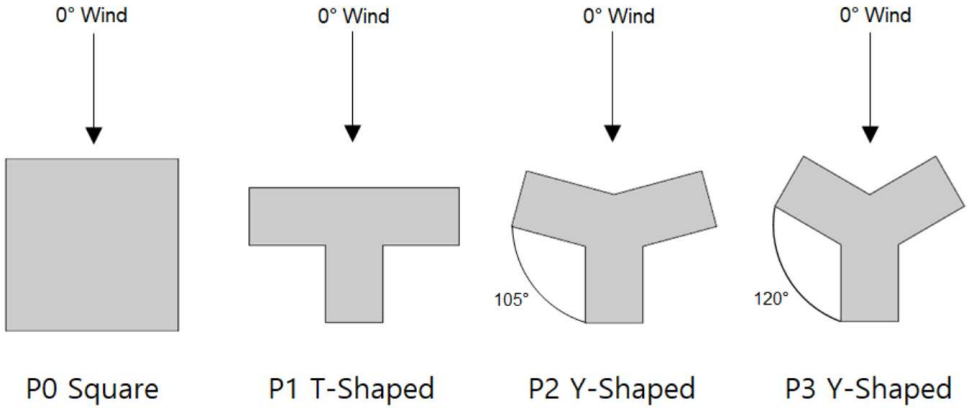
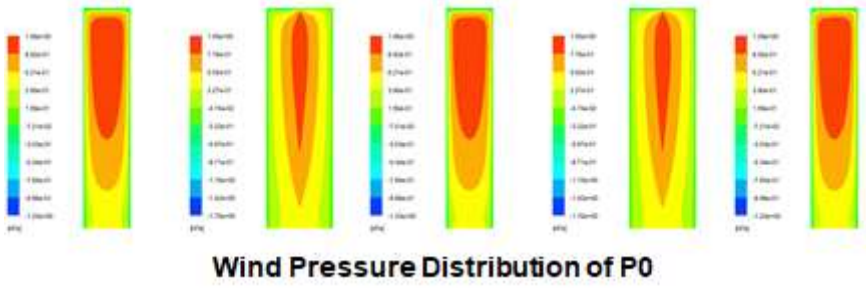
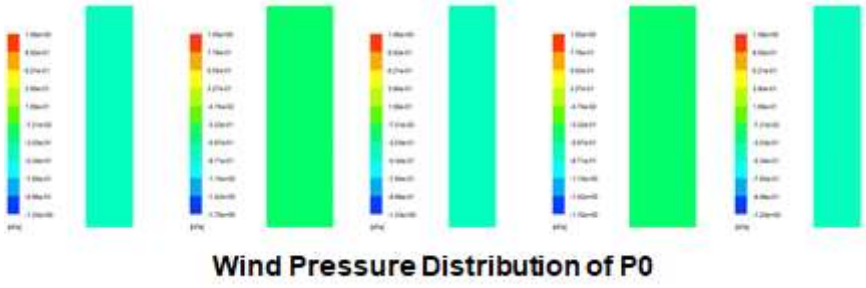


그림 26. 다양한 평면 건물의 CFD 해석 모델



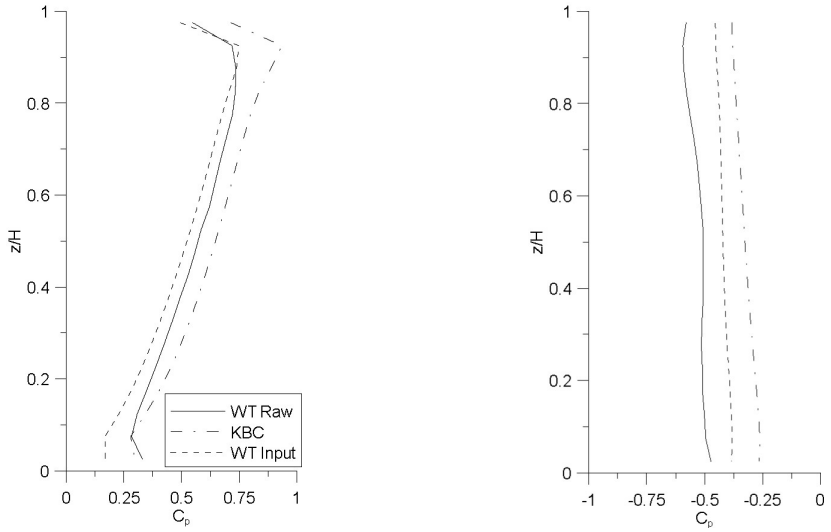
(a) 풍상면 풍압 분포



(b) 풍하면 풍압 분포

그림 27. CFD 해석에 의한 풍압 분포

- CFD 해석 결과와 풍동실험 결과를 비교 분석하면서 경험식이 많은 RANS 기법을 적용하기 위한 많은 입력 계수들의 값을 찾는 연구 수행. CFD 해석을 통해 비교적 정확한 풍압 분포를 얻을 수 있음을 확인하였고, 매번 풍동실험을 통해 확인하기 힘들 경우 CFD 해석을 통해 풍하중을 산정할 수 있을 것으로 기대.



(a) 풍상면 풍압 분포 (b) 풍하면 풍압 분포

그림 28. 풍동실험 및 CFD 해석에 따른 풍압 분포 비교 분석

• 슈퍼태풍을 고려한 초고층 건물의 대형 풍동실험

기후변화로 인해 슈퍼태풍의 빈도가 빈번해지면서 초고층 건물의 내풍설계가 중요해지고 있으며, 초고층 건물에 작용하는 풍하중을 저감하기 위한 평면과 입면에 대한 실험적 연구 수행. 사각형 평면을 갖는 건물의 코너 형상에 따른 풍력실험과 초고층 건물에 작용하는 풍하중을 줄이기 위한 Setback이 적용된 초고층 건물의 풍압실험을 대형 풍동실험실에서 수행.



(a) 기본형 (Case 1) (b) 모서리 절단 (Case 2) (b) 모서리 절단 (Case 3)

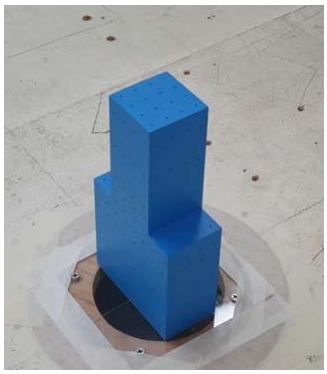
그림 29. 모서리 형상에 따른 풍력실험체



그림 30. 고속 풍동 실험설비



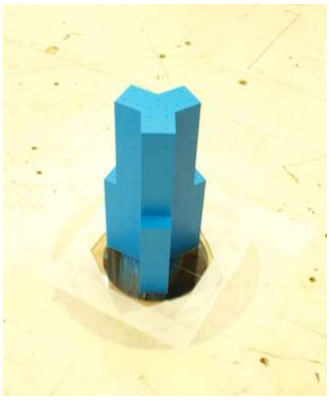
(a) 직사각형 모형



(b) 직사각형 Setback 모형



(c) Y자형 모형



(d) Y자형 Setback 모형

그림 31. 초고층 건물의 입면 형상에 따른 풍압실험체

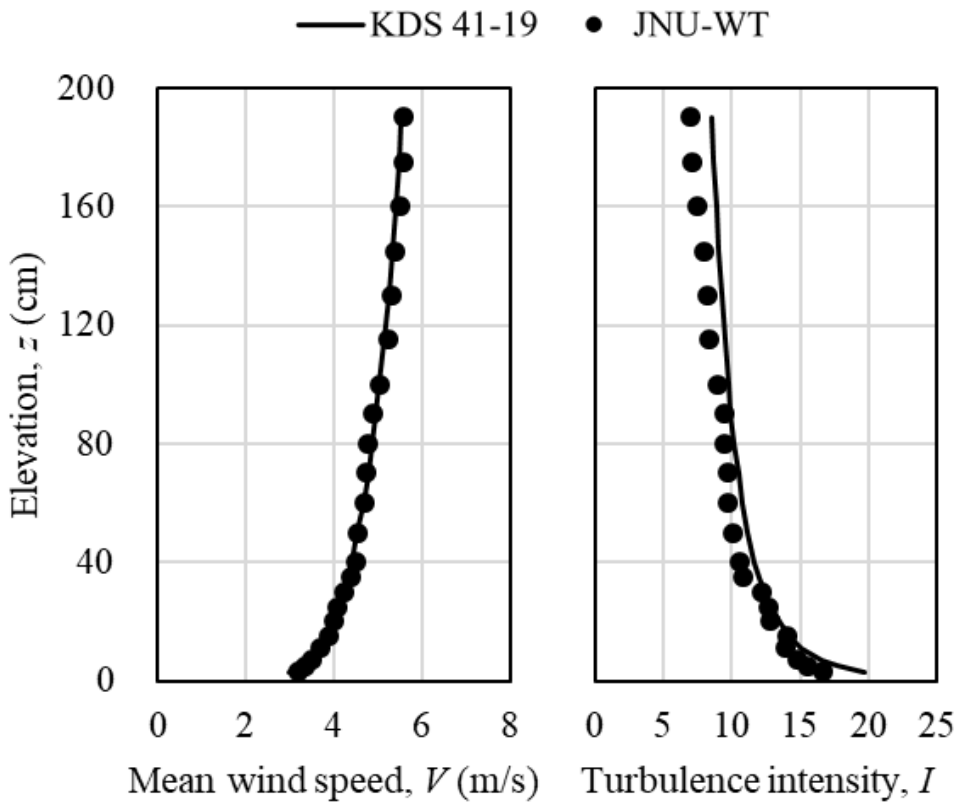


그림 32. 평균 풍속 및 난류 강도 수직 분포

풍동실험에 앞서, 그림 32와 같이 풍동의 실험부 내의 평균 풍속과 난류강도의 수직분포를 KDS 41-19에서 제시하는 평균 풍속과 난류 강도의 이론식과 유사할 수 있도록 환경 세팅.

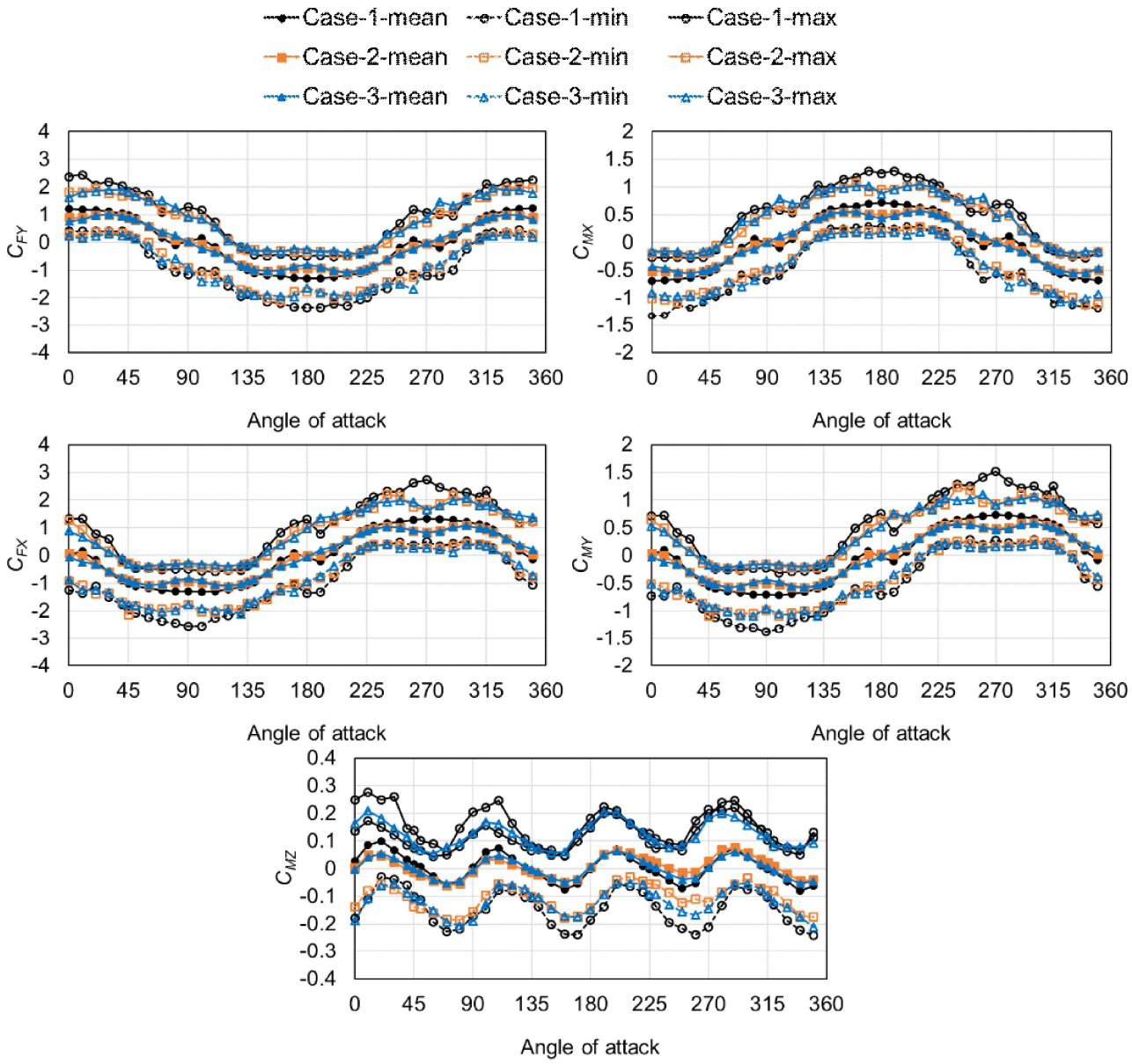


그림 33. 방위각에 따른 풍력계수 비교

풍력 실험결과로 도출된 축소모형의 밑면전단력에 대한 풍력계수(C_{FX}, C_{FY}), 전도모멘트에 대한 풍력계수(C_{MX}, C_{MY}), 그리고 밑면 비틀림모멘트에 대한 풍력계수(C_{MZ})의 최대/최소값을 방위각에 따라 계산.
또한 풍력실험을 통해 산출된 밑면전단력, 전도모멘트, 비틀림모멘트의 시간이력 데이터를 바탕으로 Power Spectral Density(PSD)를 계산하고, 건물 형상에 따른 비교를 위하여, PSD를 정규화하여 Normalized Power Spectral Density(nPSD)로 변환하여 비교 (그림 34~39).

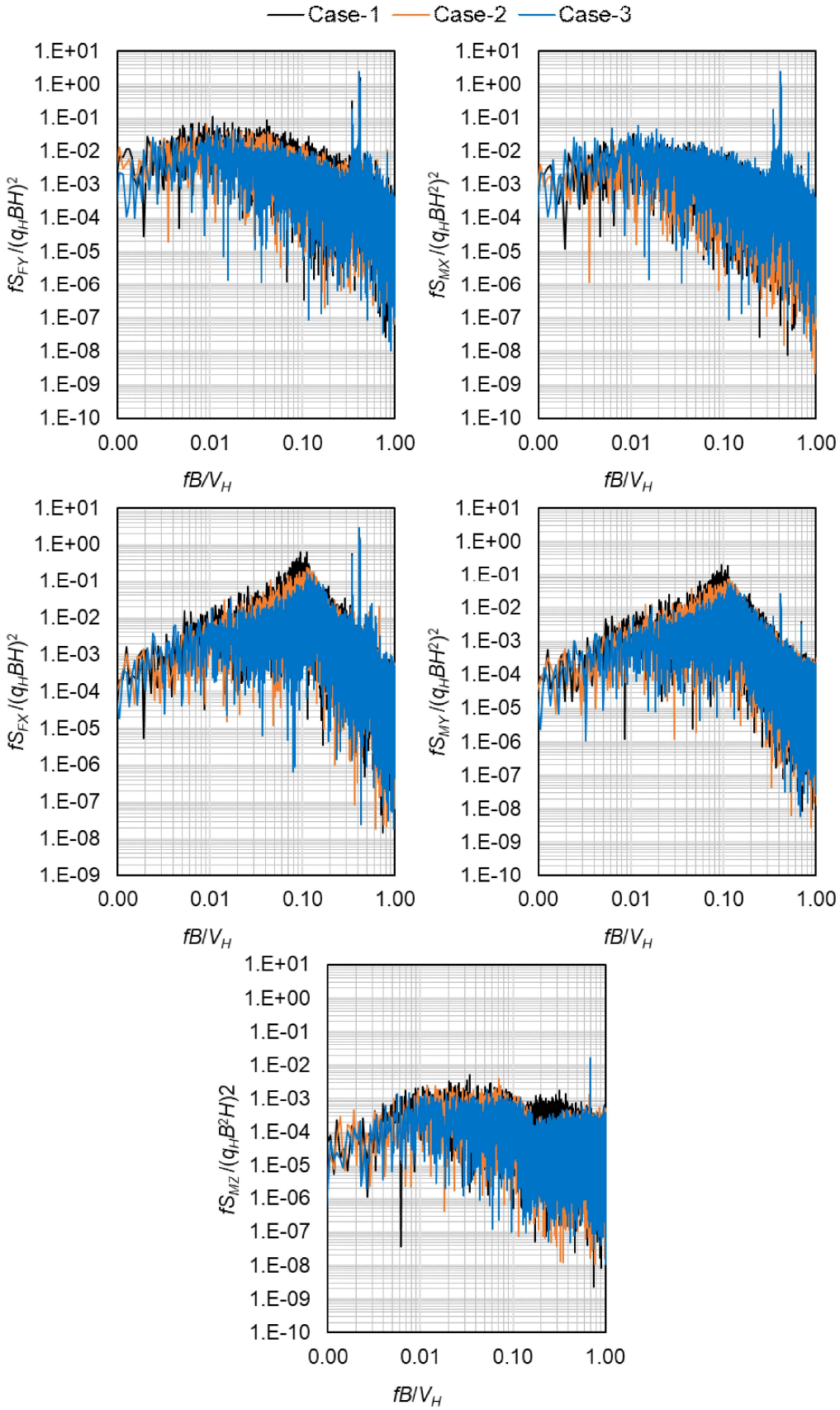


그림 34. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 0°)

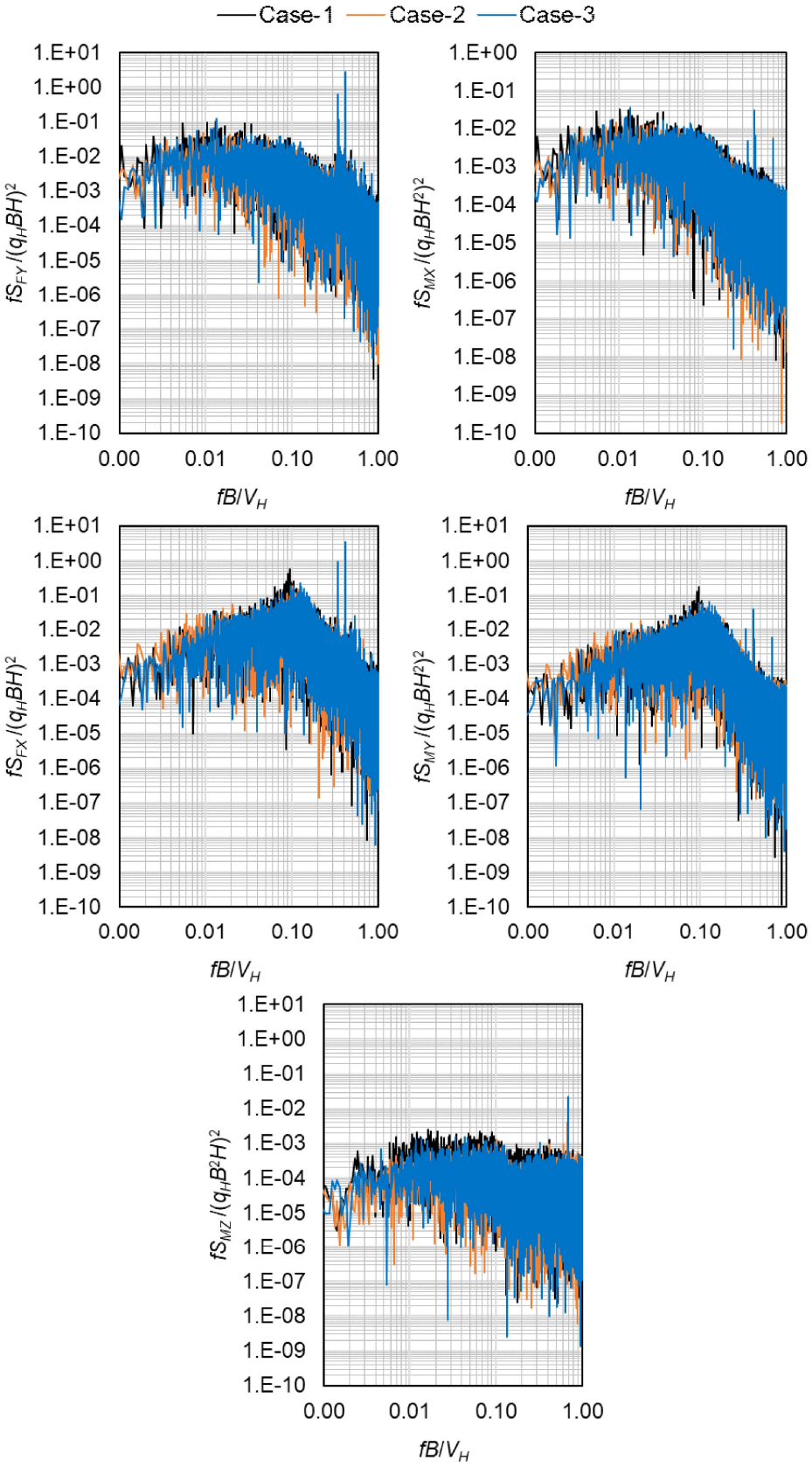


그림 35. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 10°)

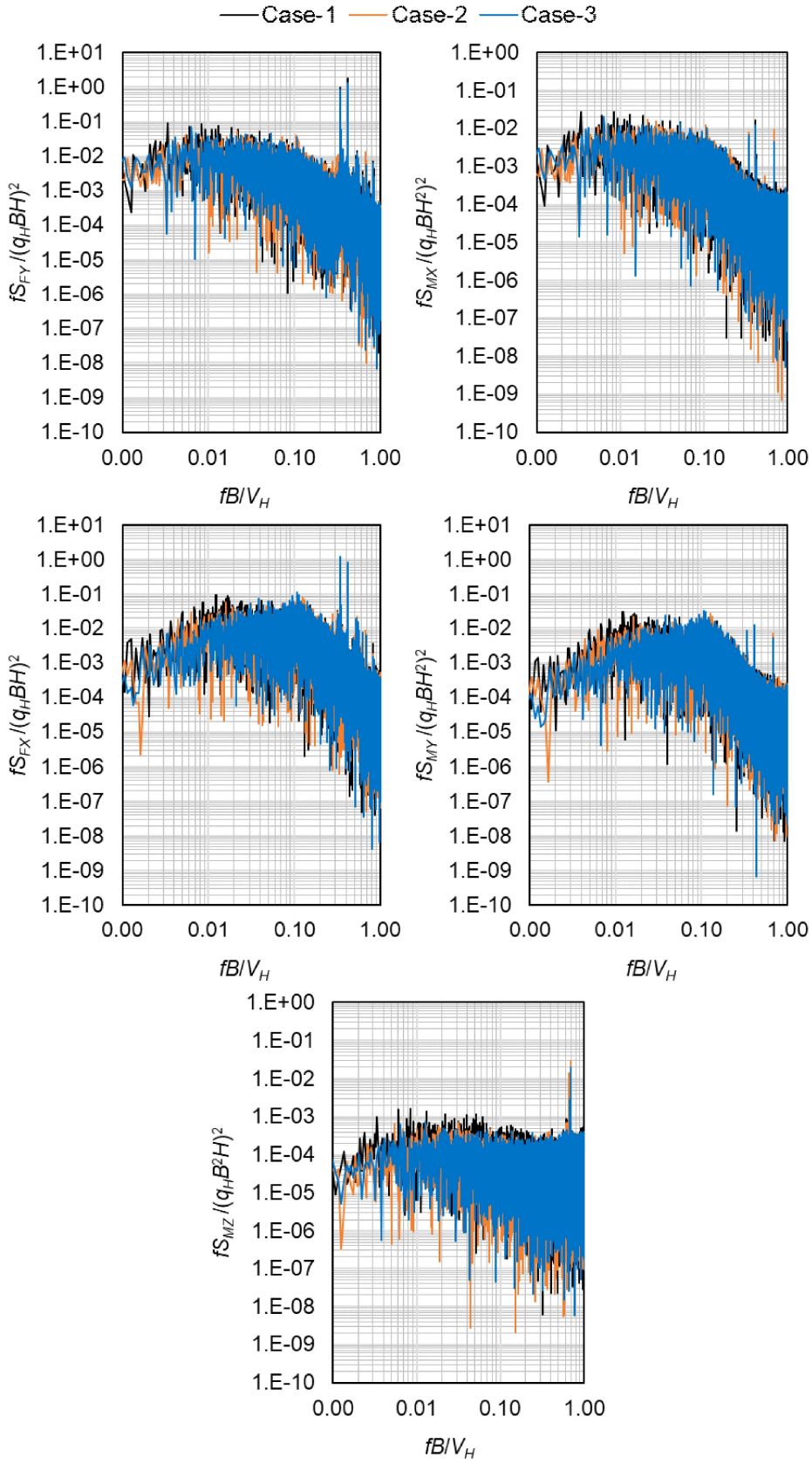


그림 36. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 20°)

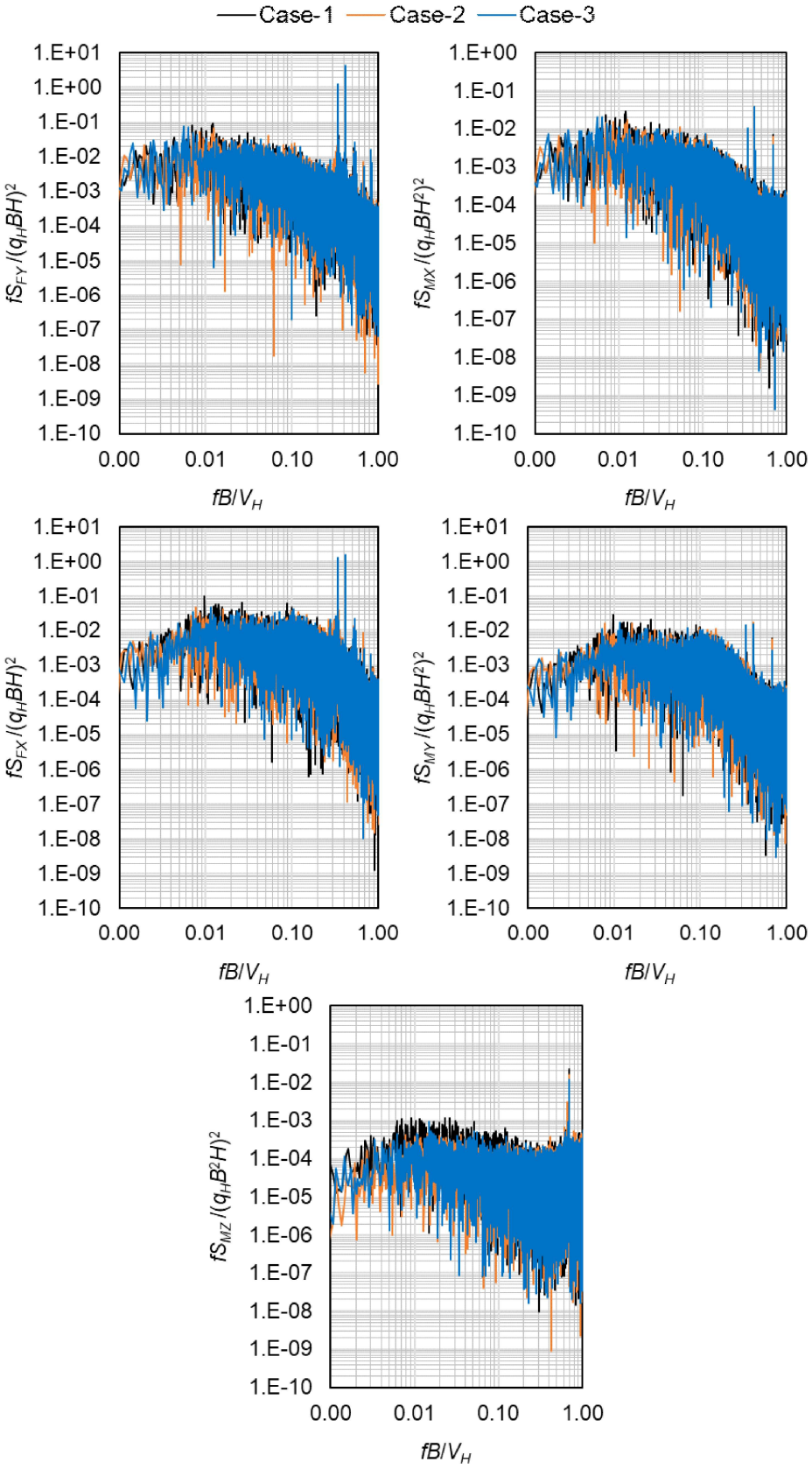


그림 37. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 30°)

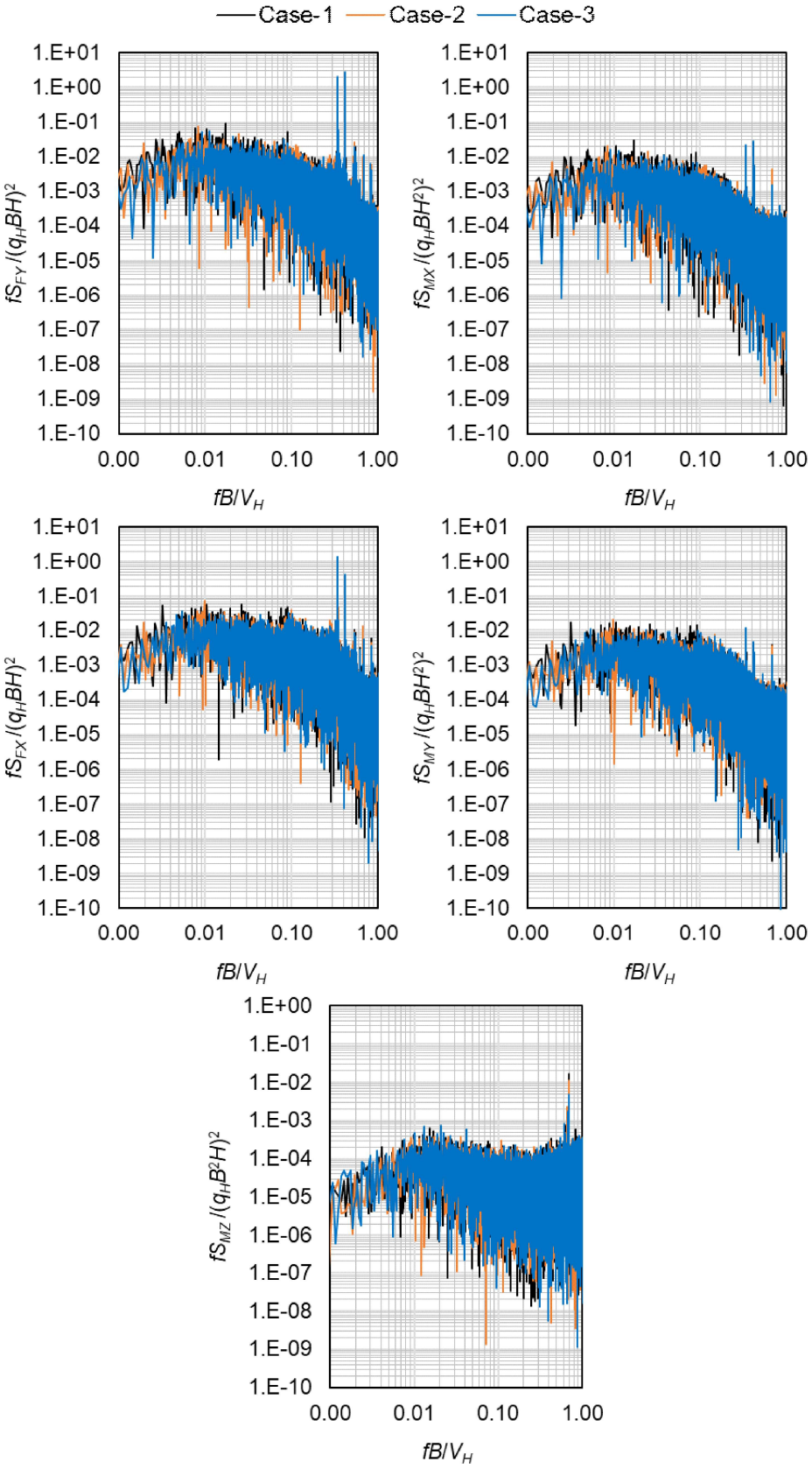


그림 38. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 40°)

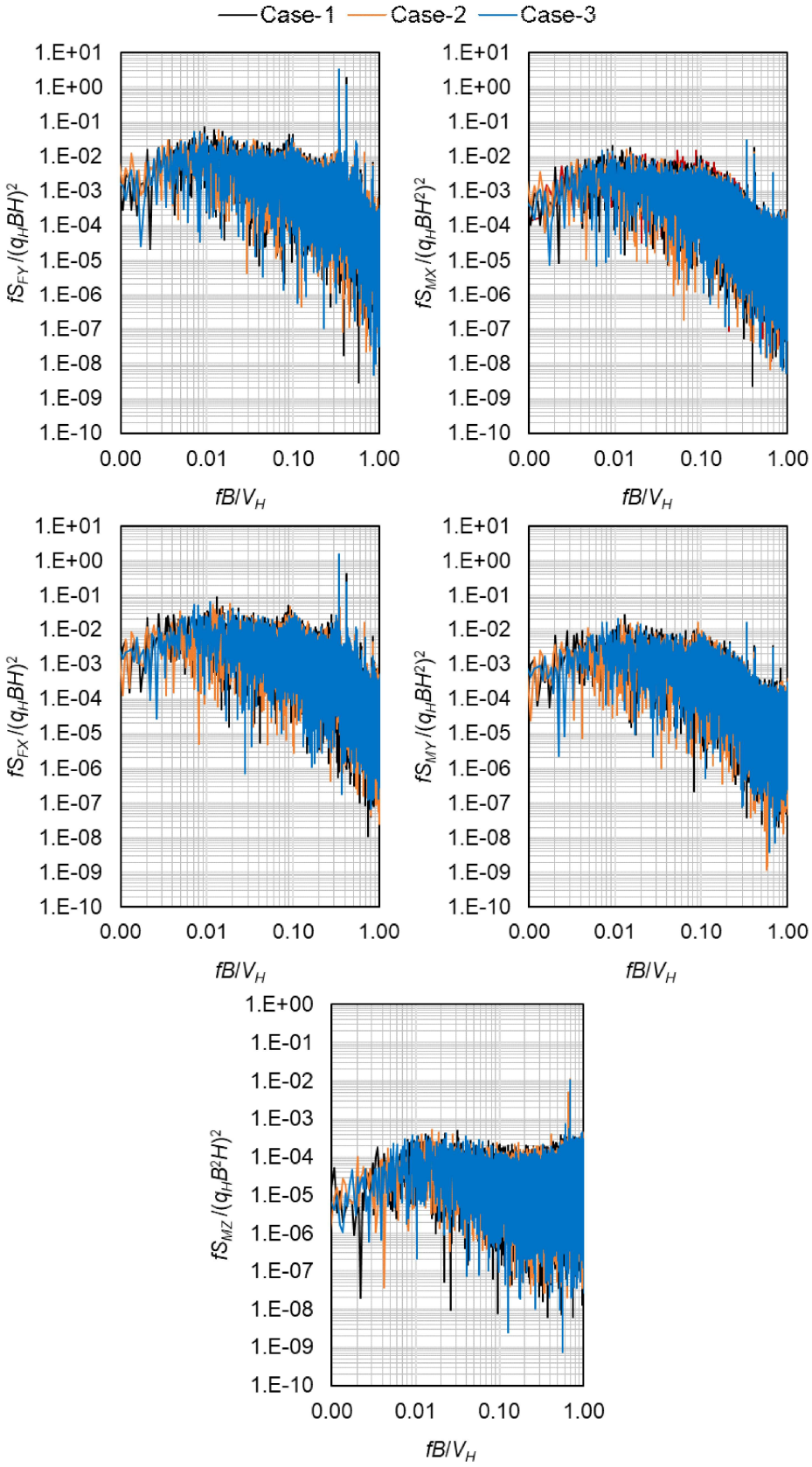


그림 39. 평면 형상에 따른 Normalized PSD 비교 (방위각 45°)

풍력실험과 달리, 풍압실험은 축소모형에 작용하는 풍압의 수직 및 수평적 분포를 측정할 수 있기 때문에, 풍력실험에서 측정할 수 없었던 풍력계수의 수직 분포를 산정할 수 있음. 아래 그림 40~42는 그림 31에 나타난 4가지 풍압실험 모형을 대상으로 다양한 방위각에 대한 풍압실험 후 측정된 풍압 시간이력 데이터를 바탕으로 계산된 풍력계수의 수직분포를 보여준다.

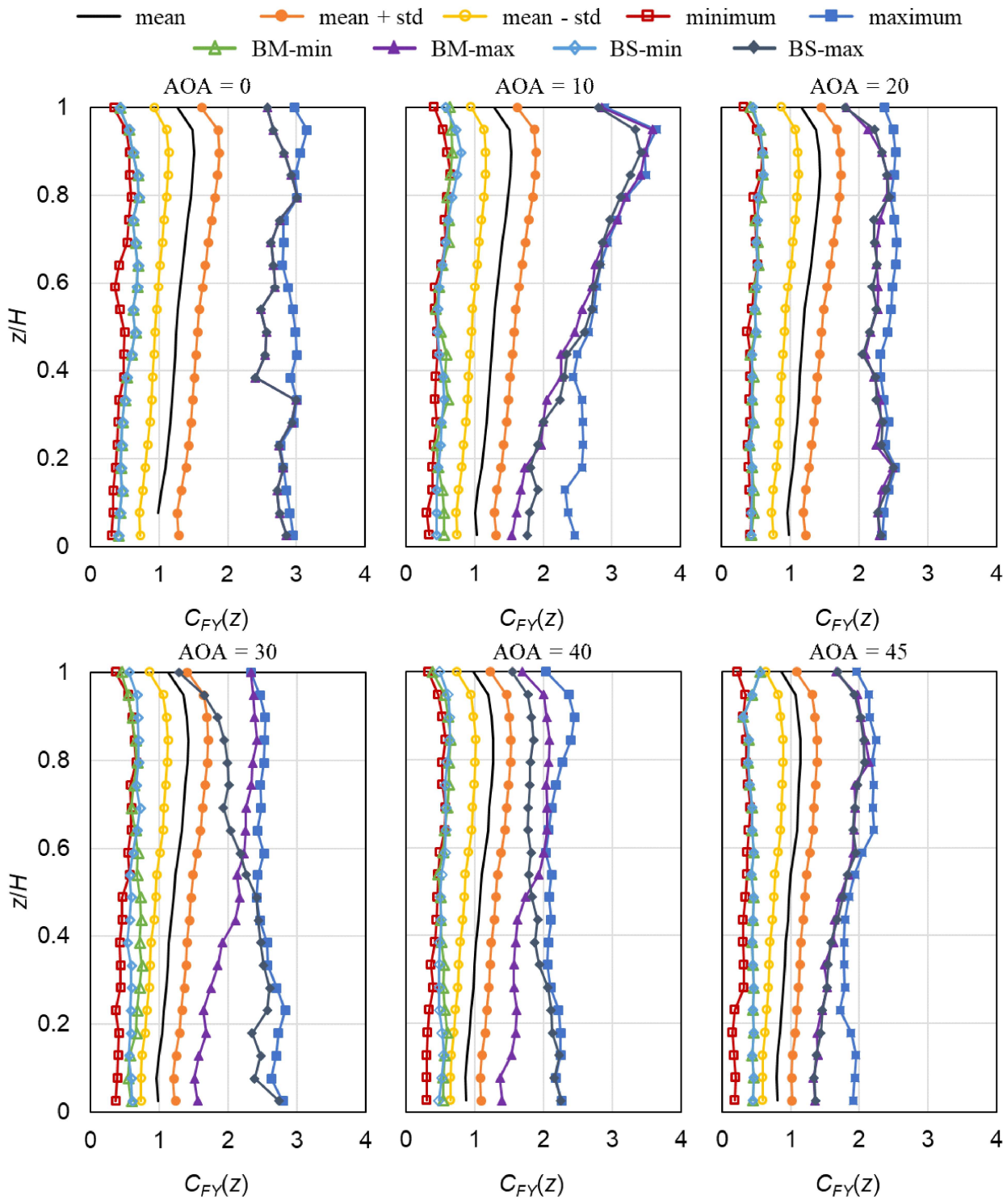


그림 40. 다양한 방위각에 따른 풍압 수직 분포 (Y 방향)

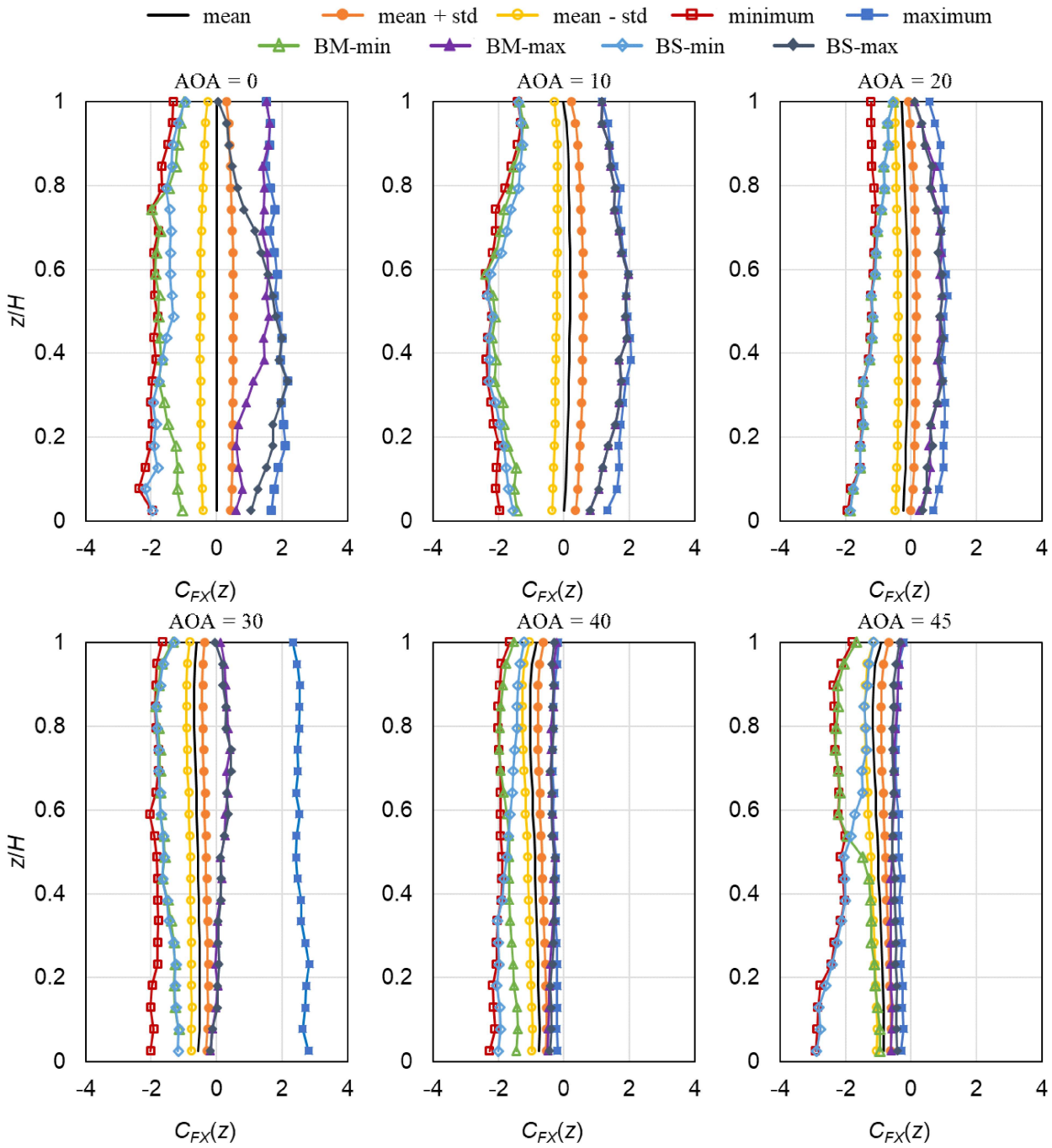


그림 41. 다양한 방위각에 따른 풍압 수직 분포 (X 방향)

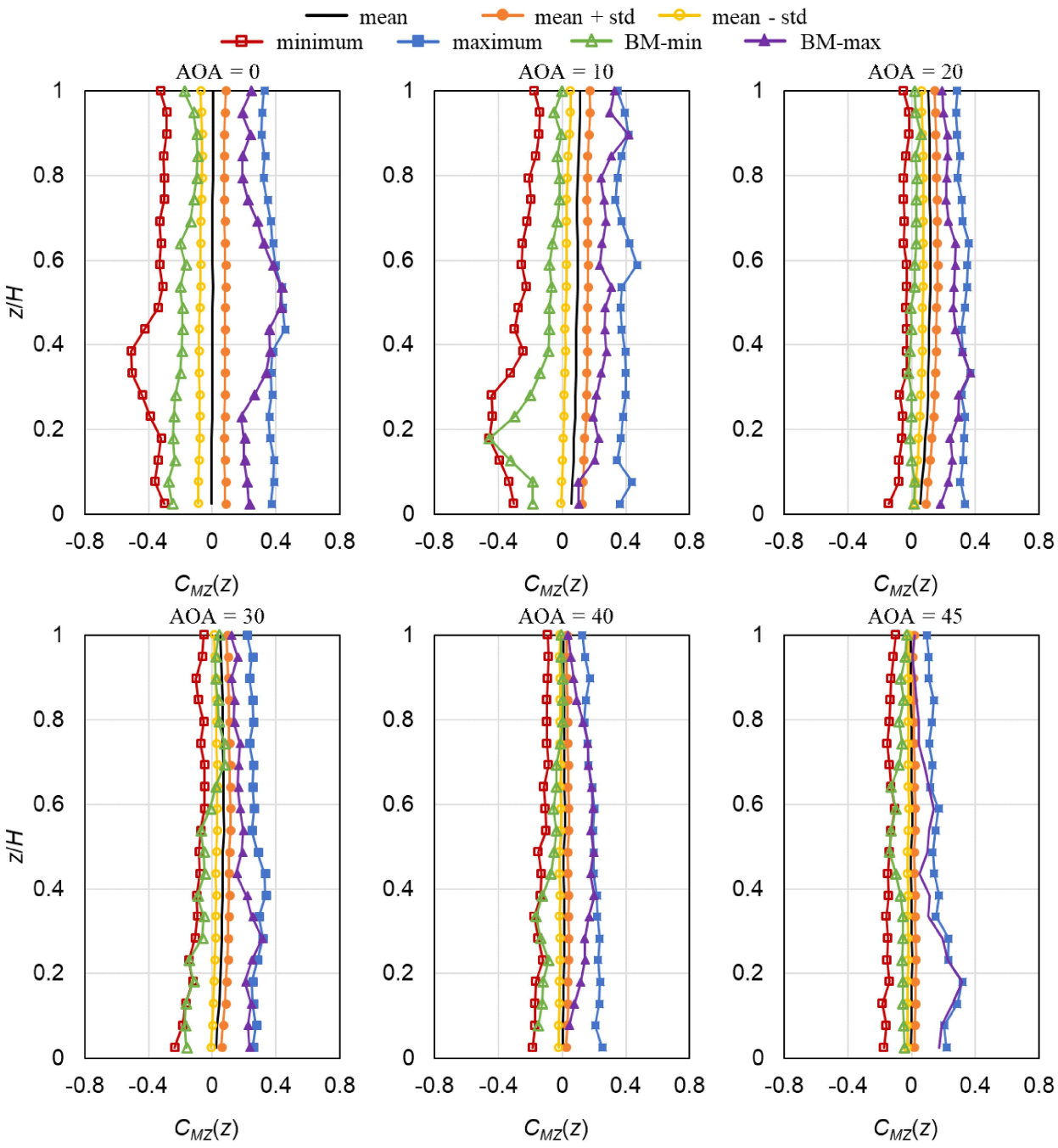


그림 42. 다양한 방위각에 따른 풍압 수직 분포 (Z 방향 비틀림)

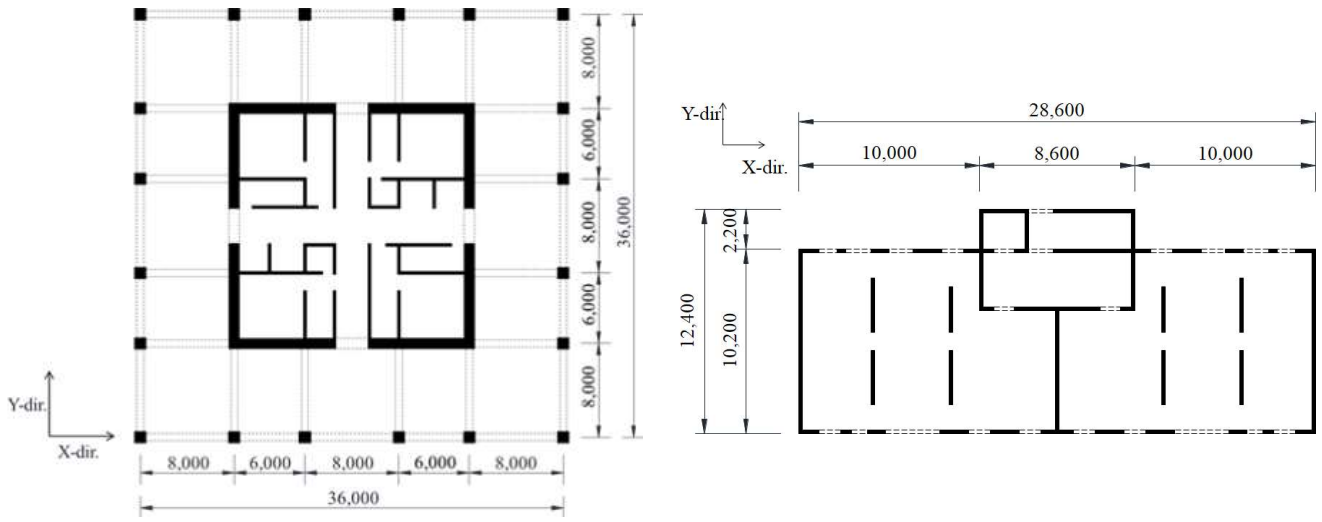
• 초고층 건물의 비탄성 내풍해석 데이터 구축

다양한 평면형상과 구조시스템의 건물에 대한 비탄성 내풍해석을 수행. 초기 설계하중 변화에 따른 비탄성 거동 수준의 평가, 극한 풍하중 작용 시 건물의 손상 위치(소성힌지의 분포)와 손상 수준(소성힌지의 소성회전각)에 대한 데이터 구축.

표 4. 건물 설계 정보

구조시스템	보통전단벽 건물골조 시스템		
건물 높이	180 m (층높이 4m × 45층)		
콘크리트	공칭강도, f’c	40MPa	
	탄성계수, Ec	30,008MPa	
철근(SD500)	항복강도, fy	500MPa	
	탄성계수, Es	200,000MPa	
구조 부재 정보			
코어 벽체 (두께)	메인 코어 벽체	900mm	
	내부 벽체	250mm	
연결보 (폭 × 깊이)	900mm ×900 mm		
기둥 (정사각형)	1~24층	1,000mm × 1,000mm	
	25~45층	800mm × 800mm	
보 (폭 × 깊이)	600mm × 800mm		
슬래브 (두께)	210mm		
유효강성			
코어 벽체	1~6층	면내강성: 1.0EA, 0.35EI_g, 0.5GA 면외강성: 0.25EI_g	
	7~45층	면내강성: 1.0EA, 0.7EI_g, 1.0GA 면외강성: 0.25EI_g	
기둥	1.0EA, 0.7EI_g, 1.0GA		
보	1.0EA, 0.35EI_g, 1.0GA		
슬래브	면내강성: rigid diaphragm (강막) 면외강성: 0.1EI_g		
고유주기	X-dir.	Y-dir.	RZ-dir.
	4.431 sec.	4.456 sec.	2.879 sec.

EA: 전단면 축강성, EI_g: 전단면 휨강성, GA: 전단면 전단강성

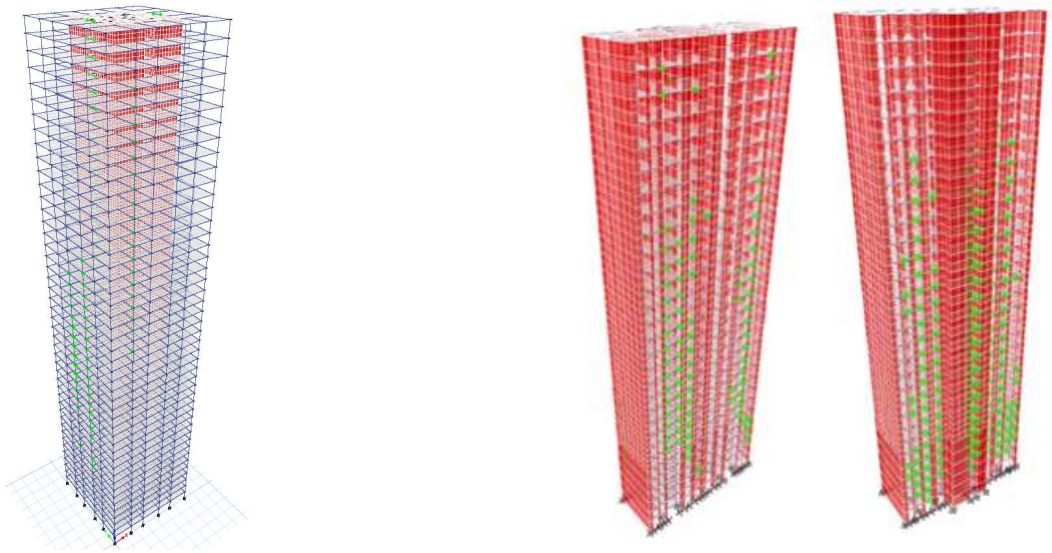


(a) 건물골조 (b) 전단벽식 구조

그림 43. 건물 평면 및 구조시스템

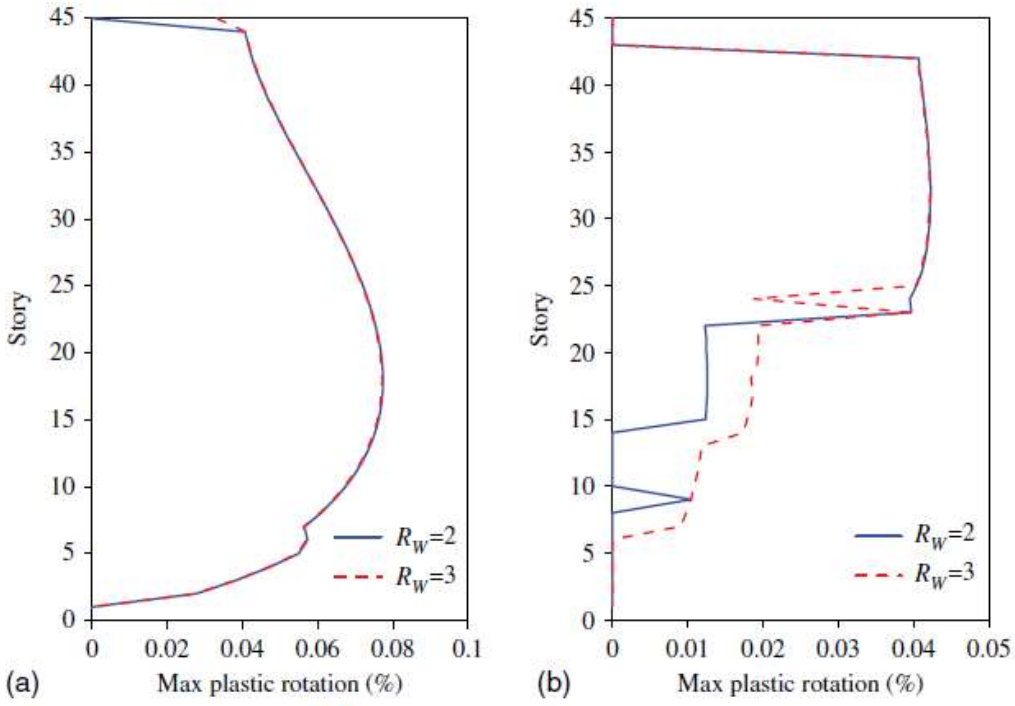
건물골조 형식은 소성힌지가 주로 연결보에서 발생하였으며, 일부 보에서도 소성힌지가 발생. 모든 구조 형식에서 발생한 연결보의 소성회전각은 0.1% 미만으로 내진설계에서 사용하는 기준인 0.5%에 비하면 매우 작은 손상 수준으로 안전성이 충분히 확보될 수 있음을 확인.

전단벽식 구조와 건물골조 모두 연결보의 소성회전각은 건물 높이의 1/3~1/2 정도에서 가장 크게 나타났으며, 건물골조의 보는 주로 건물 높이의 1/2 이상의 위치에서 소성회전각이 크게 나타남.



(a) 건물골조 (b) 전단벽식 구조

그림 44. 골조형식과 평면 형태에 따른 소성힌지(녹색점) 분포



(a) RC 연결보 (b) RC 보

그림 45. 건물골조 시스템 건물에서 초기설계 시 R_W에 따른 소성힌지 분포

• 비탄성 성능기반 내풍설계 가이드라인 제시

1차 연도에서 수행한 성능기반 내풍설계 연구 결과를 바탕으로 풍하중 공진저감계수 R_W를 이용한 초기 설계 방법, 내진-내풍 설계를 연계한 시나리오 설정, 비탄성 내풍설계 시 고려해야 할 사항(피로파괴, 풍방향 풍하중의 평균성분에 의한 비탄성 거동 누적 등)을 정리하여 성능기반 내풍설계 가이드라인을 제시하였고, SCI급 국제저널인 Wind and Structures에 게재.

풍하중과 지진하중에 대해 통합된 설계를 위해 성능기반 내풍설계와 성능기반 내진설계의 연계하여 정의하고 이를 기반으로 성능기반 내진설계를 위한 다양한 성능목표를 제시.

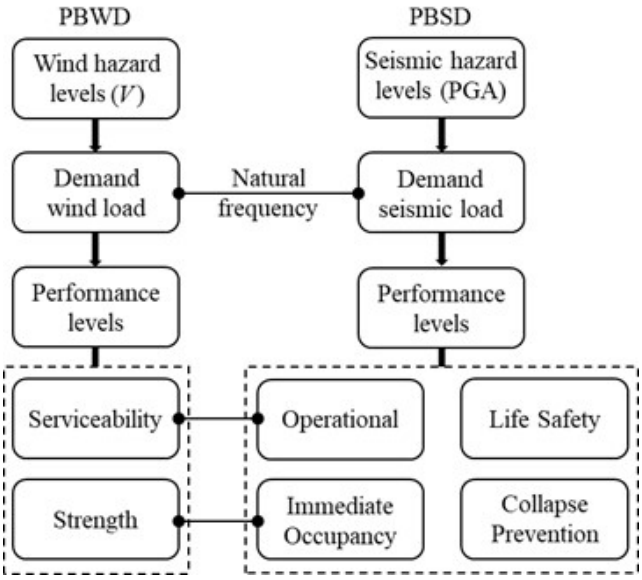


그림 46. 성능기반 내풍설계와 내진설계의 연계

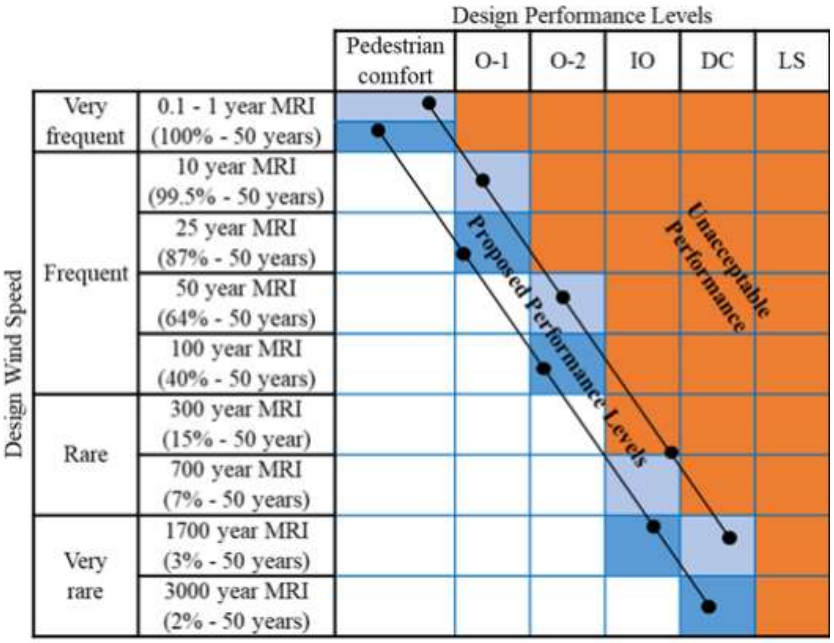


그림 47. 성능기반 내풍설계를 위한 성능목표 제시

고층건물에서 설계 풍하중이 설계 지진하중보다 크게 되면서 수평부재가 과설계되어 구조물이 과도한 항복강도를 가지게 되고 연성능력은 저하함. 성능기반 내진-내풍 통합설계를 위해 풍하중 공진저감계수 R_W를 도입함에 따라 지진하중 작용 시 연성능력을 충분히 확보하고 내풍설계에 대해서도 안전한 것을 확인함.

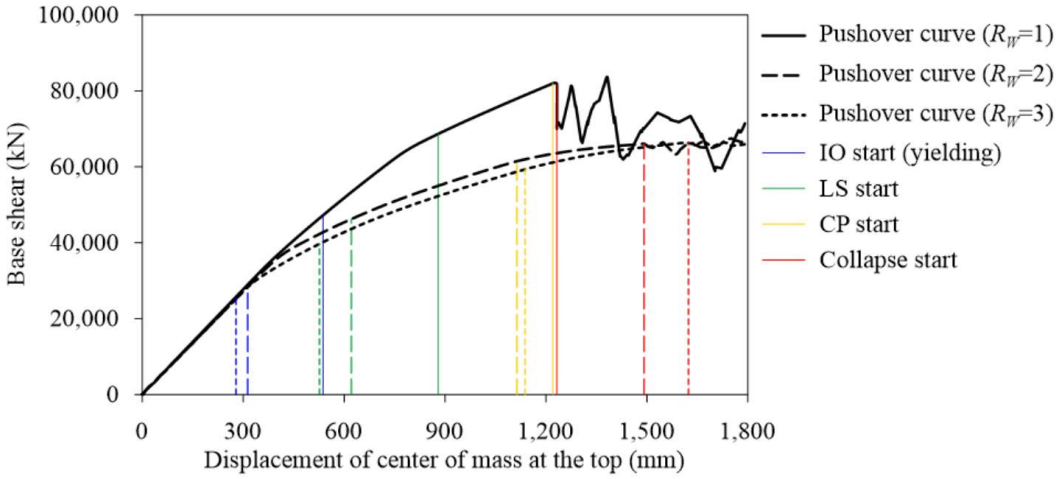


그림 48. 풍하중 공진저감계수 R_W에 따른 구조물의 연성능력 향상

표 5. 풍하중 공진저감계수 R_W에 따른 구조물의 초과강도계수 및 연성계수

	Overstrength factor, Ω (strength at collapse start /yield strength)	Ductility, μ (displacement at collapse start /yield displacement)
KBC 2016 (building frame system)	2.5	5 ($\mu = R_E$ for tall buildings)
R_W= 1	1.73	2.29
R_W= 2	2.33	4.76
R_W= 3	2.63	5.83

- UHPC 복합구조 슬래브 개발

슬래브는 얇은 두께로 인해 모멘트 강도가 크지 않으며 특히 수직부재와의 접합부에서 뚫림 전단에 매우 취약한 부재임. 국내에서는 효율적인 층고 활용을 위해 무량판 구조가 많이 활용되고 있으며, 뚫림 전단을 보강하기 위해 UHPC 복합구조 슬래브 개발.

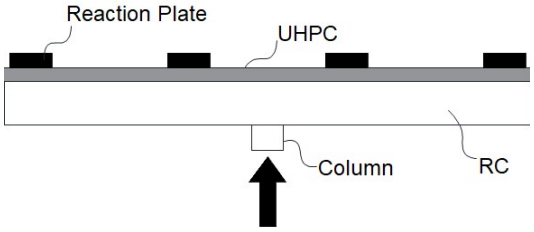


그림 49. 뚫림 전단 보강을 위한 UHPC 복합구조 슬래브

RC에 의한 전단강도 기여와 UHPC에 의한 전단강도 기여를 고려한 UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단강도(V_P)를 산정하기 위한 이론식 개발.

$$V_P = V_{RC} + V_{UHPC}$$

$$V_{RC} = V_c + V_s = \frac{f'_{ct}}{2\sqrt{K_{c1}K_{c2}}}\left(4ah_0 + \pi\tan\alpha_c h_0^2\right) + f_{cy}\rho_c(4a + 2\pi R_c)h_0\sin\theta$$

$$V_{UHPC} = \frac{f'_{ut}}{2\sqrt{K_{c1}K_{c2}}}\left(4ah_u + 2\pi\tan\alpha_c h_c h_u + \pi\tan\alpha_u h_u^2\right) + f_{uy}\rho_u(4a + 2\pi R_c + 2\pi R_u)h_u\sin\theta$$

$$\tan\alpha_c = \frac{K_{c1} - K_{c2}}{2\sqrt{K_{c1}K_{c2}}}$$

$$K_{c1} = 1 - \frac{b\mu_c}{m_c(1+b)}$$

$$K_{c2} = \frac{b\mu_c + 1}{m_c(1+b)}$$

$$m_c = \frac{f'_{cc}}{f'_{ct}}$$

$$R_c = \frac{h_0\tan\alpha_c}{1 + \tan\alpha_c\tan\theta}$$

$$\tan\alpha_u = \frac{K_{u1} - K_{u2}}{2\sqrt{K_{u1}K_{u2}}}$$

$$K_{u1} = 1 - \frac{b\mu_u}{m_u(1+b)}$$

$$K_{u2} = \frac{b\mu_u + 1}{m_u(1+b)}$$

$$m_u = \frac{f'_{uc}}{f'_{ut}}$$

$$R_u = \frac{h_u\tan\alpha_u}{1 + \tan\alpha_u\tan\theta}$$

• UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 성능 연구

UHPC 복합구조 슬래브의 실험과 유한요소해석을 통한 뚫림 전단 성능 검증. 앞서 제시된 것처럼 RC 슬래브 상단에 UHPC를 배치할 경우, 기존의 일반 RC 슬래브에 비해 뚫림 전단강도가 크게 향상되는 것을 확인하였음. UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단강도는 UHPC의 두께와 콘크리트 또는 UHPC의 강도에 따라 증가하며, UHPC 두께에 따른 뚫림 전단강도 증가는 일정 수준의 두께 이상에서는 그 효과가 점차 줄어듦. 철근비에 따른 뚫림 전단강도 증가 효과는 거의 없는 것을 확인함.

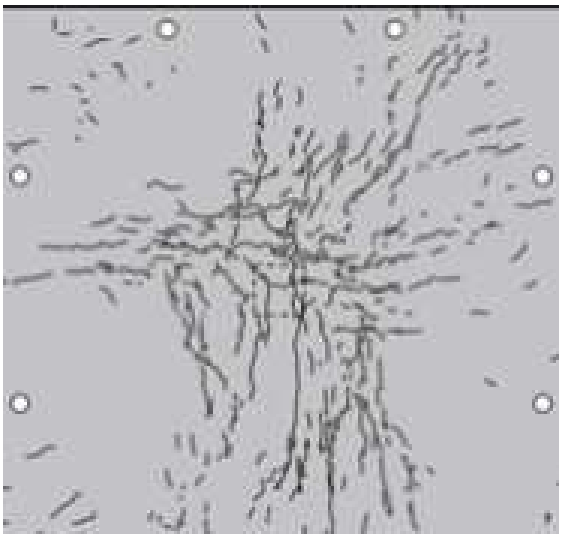
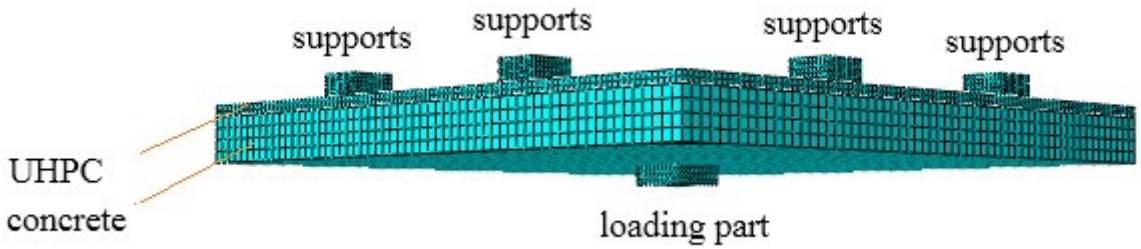
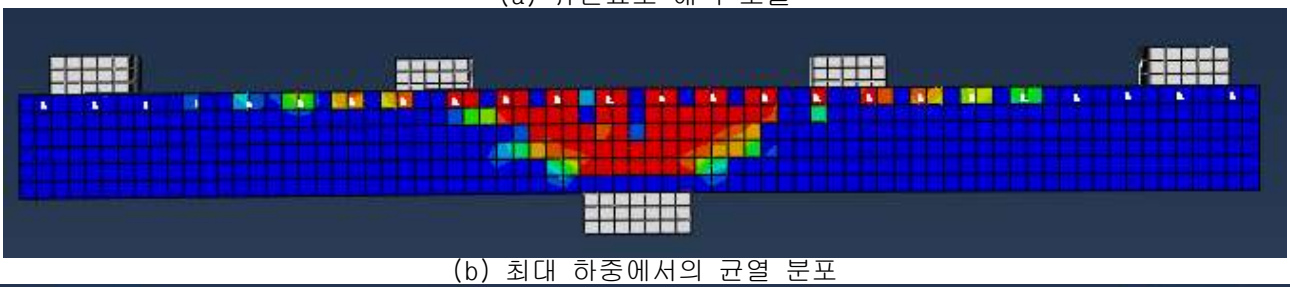


그림 50. UHPC 복합구조 슬래브의 균열 패턴



(a) 유한요소 해석 모델



(b) 최대 하중에서의 균열 분포



(c) 극한 상태에서의 균열 분포

그림 51. UHPC 복합구조 슬래브의 유한요소해석

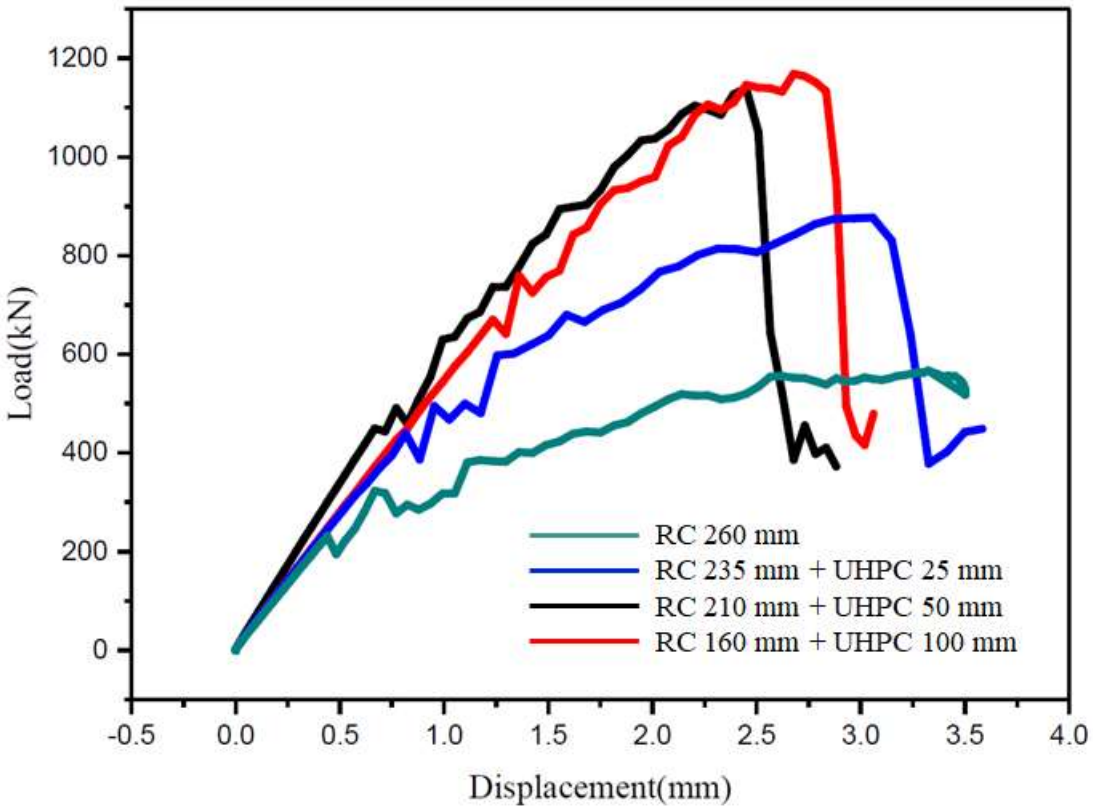


그림 52. UHPC 두께에 따른 뚫림 전단강도 비교

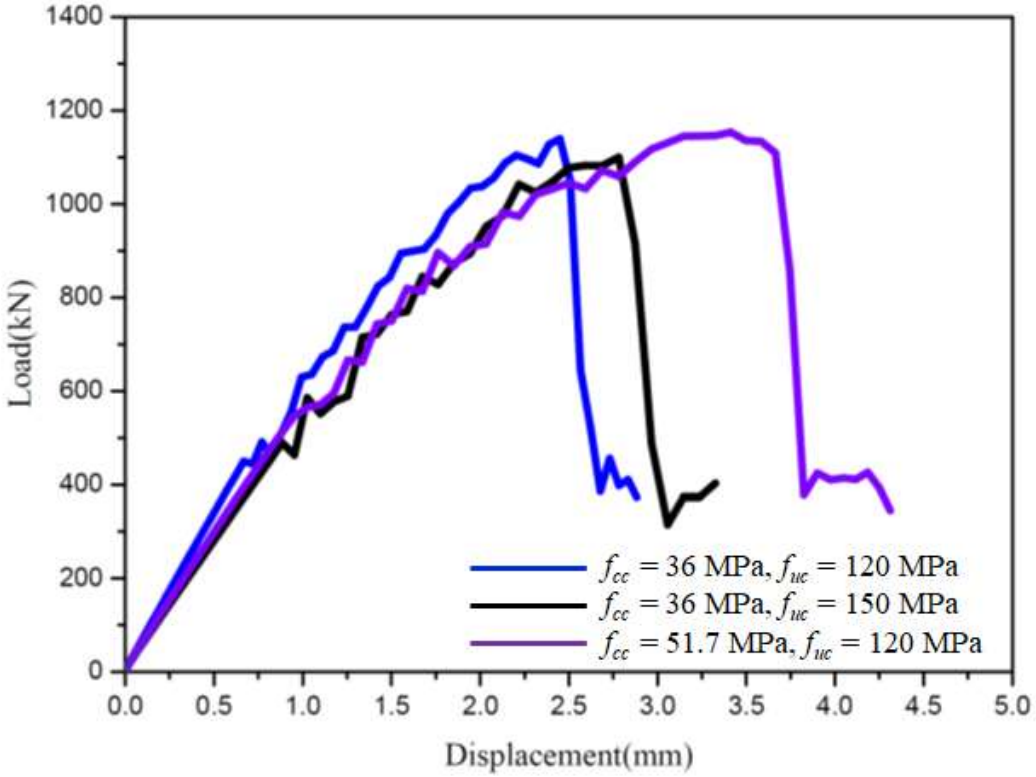


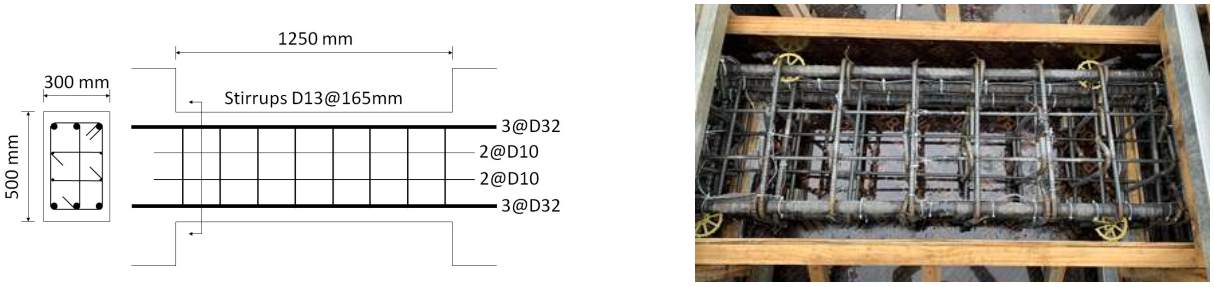
그림 53. 콘크리트와 UHPC 강도에 따른 뚫림 전단강도 비교

- 풍하중 피로파괴 성능 실험 연구

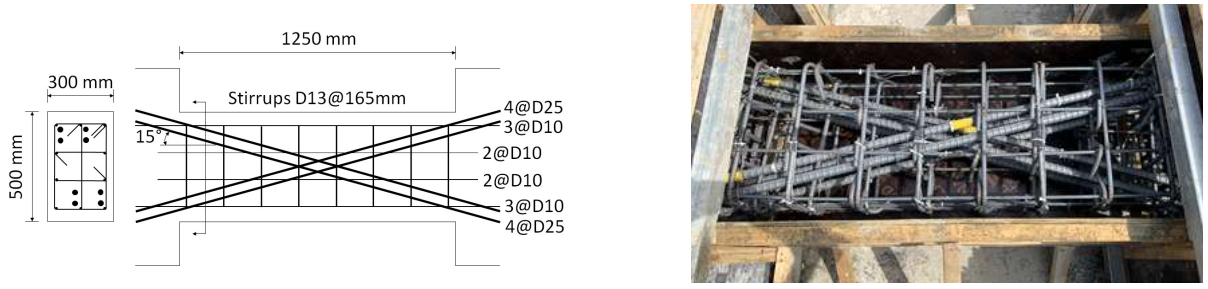
성능기반 내풍설계 도입을 위한 수평부재의 피로파괴 성능 실험 연구를 진행. 고층건물에 성능기반 내풍설계를 적용 시 수직부재(벽체 혹은 기둥)보다는 수평부재(연결보 및 보)에서 소성힌지가 발생. 지진하중과 달리 풍하중은 하중의 작용시간이 평균 10분 이상으로 길기 때문에 지진에 비해 비탄성 거동의 크기는 작지만 하중의 반복 가력횟수가 상대적으로 더 많기 때문에 피로파괴(fatigue failure)의 우려가 있음. 특히 연결보는 고층건물의 횡력저항력에 큰 기여를 하는 부재로, 풍하중에 의한 피로파괴에 대한 대비가 필수적임. 연결보에 대한 지진 반복 가력 실험은 다수 수행되었지만, 풍하중 수준의 반복횟수를 적용한 연결보 실험에 대한 연구는 부족하기 때문에 실험적 검증을 수행. 대각보강근을 포함하는 다양한 철근 상세를 갖는 총 8개의 연결보 실험체를 제작하여, 지진하중과 풍하중 각각에 대한 반복하중 가력 실험을 수행



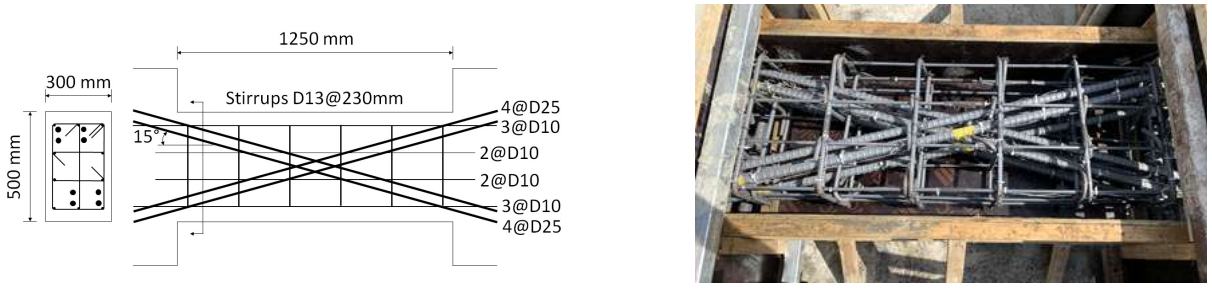
(a) L100 Series (-S & -W)



(b) L67 Series (-S & -W)



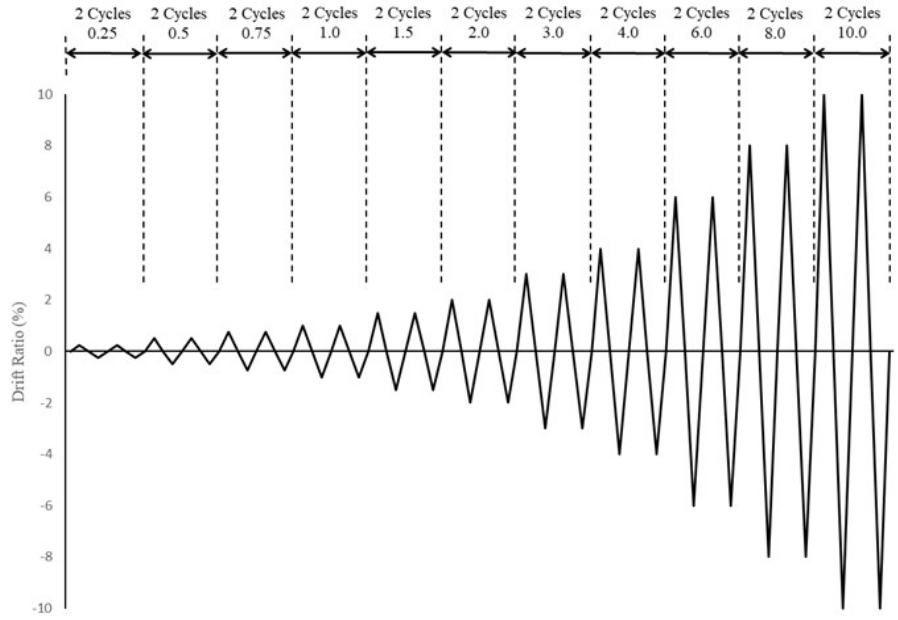
(c) D67 Series (-S & -W)



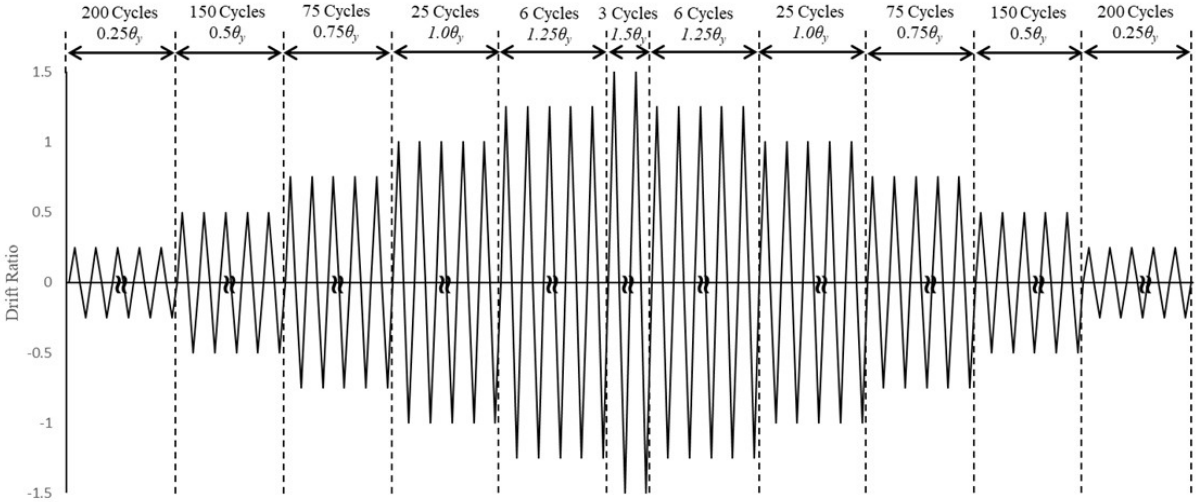
(d) D50 Series (-S & -W)

그림 54. 연결보 피로파괴 성능 검증 실험체

동일한 철근 상세를 갖는 연결보에 대해서 지진하중과 풍하중 두 가지 하중 패턴에 따른 연결보의 이력거동 양상과 반복횟수에 따른 연결보의 피로파괴 성능을 비교 검증함. 지진하중은 변위가력 크기가 지속적으로 증가하는 형태의 프로토콜로 가력했으며, 풍하중은 연결보의 항복점을 기준으로 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 그리고 150% 수준으로 반복가력을 수행함.



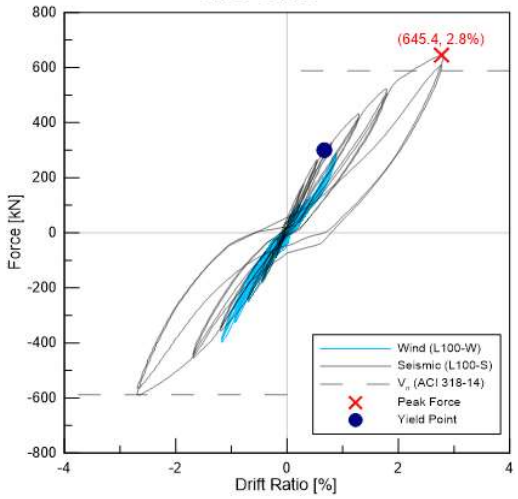
(a) 지진하중



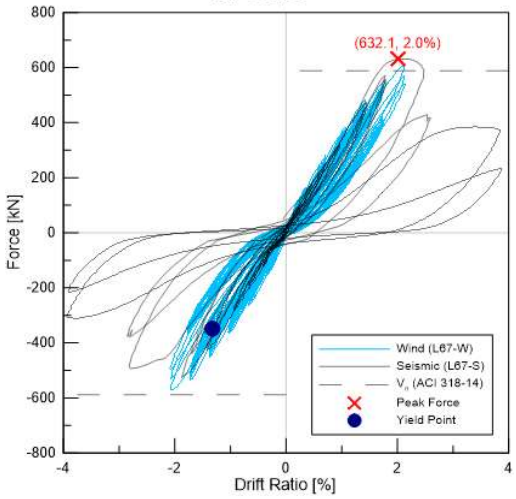
(b) 풍하중

그림 55. 하중 프로토콜

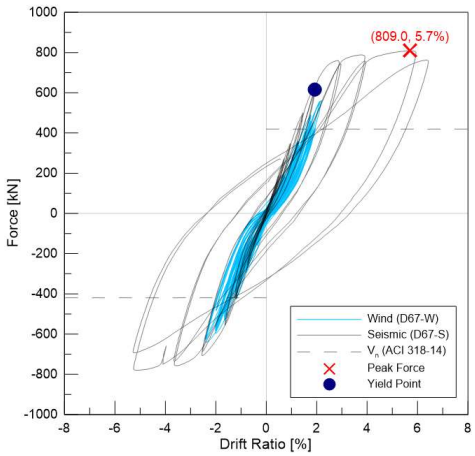
실험결과 대각보강된 연결보는 핀칭현상(Pinching effect)가 발생하지 않기 때문에 비대각상세 연결보보다 더 높은 전단 강도, 한계 변형량, 에너지 소산 정도를 나타냈음. 풍하중과 지진하중에 대한 연결보의 강성을 비교한 결과, 풍하중이 작용한 경우가 지진하중이 작용한 경우에 비해 더 높은 강성을 보였음. 이를 통해 성능기반 내풍설계 도입 시, 소성변형이 가장 많이 발생할 것으로 예상되는 연결보에 대한 비탄성 모델링이 가능할 것이라는 점을 확인.



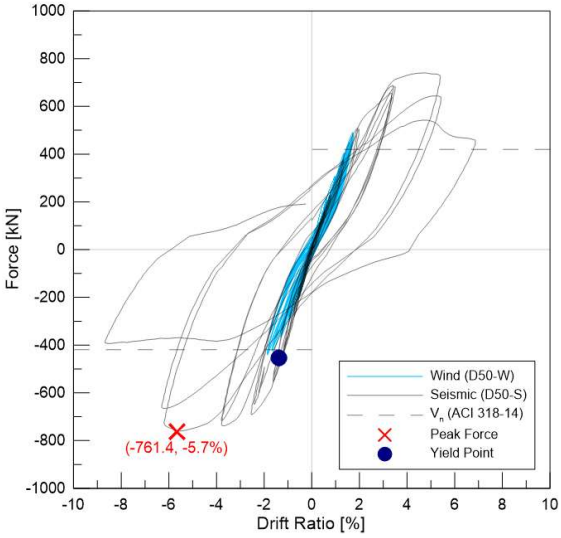
(a) L100 시리즈



(b) L67 시리즈

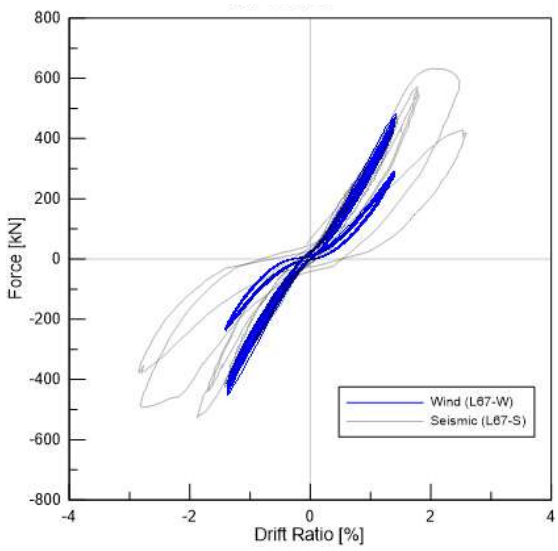


(c) D67 시리즈

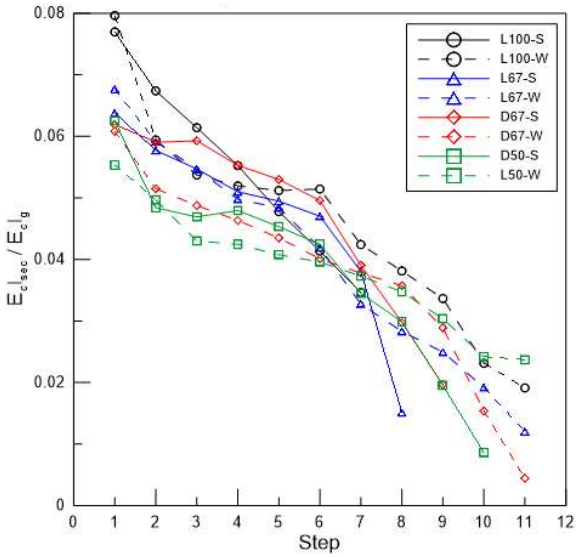


(d) D50 시리즈

그림 56. 연결보 반복하중 가력시험 이력거동 곡선 결과



(a) L67 시리즈 (q = 1.0%)



(b) 평균 할선강성

그림 57. 지진하중과 풍하중에 따른 연결보 강성 비교 결과

• 소형 풍력적분 풍동실험 개발

풍력적분 풍동실험 방식(HFFI)는 다른 풍하중 측정 방식(풍력실험, 풍압실험)과 차별되는 방식으로, 기존의 두 방식의 단점을 보완할 수 있는 풍동실험 방식임. 풍압실험과 같이 각 벽체에 작용하는 압력을 측정하는 대신, 벽체에 작용하는 공기력을 직접 반력으로 측정하는 개념. 풍력적분 풍동실험 방식은 내부지지대, 로드셀, 연결장치, 외벽 세그먼트, 실링으로 구성됨. 풍력적분 풍동실험 방식은 건축 및 토목 분야, 밀폐형이나 부분개방형 건물(트러스 구조의 송전탑 제외), 냉각탑 등을 HFFI 방식으로 구성할 수 있음.

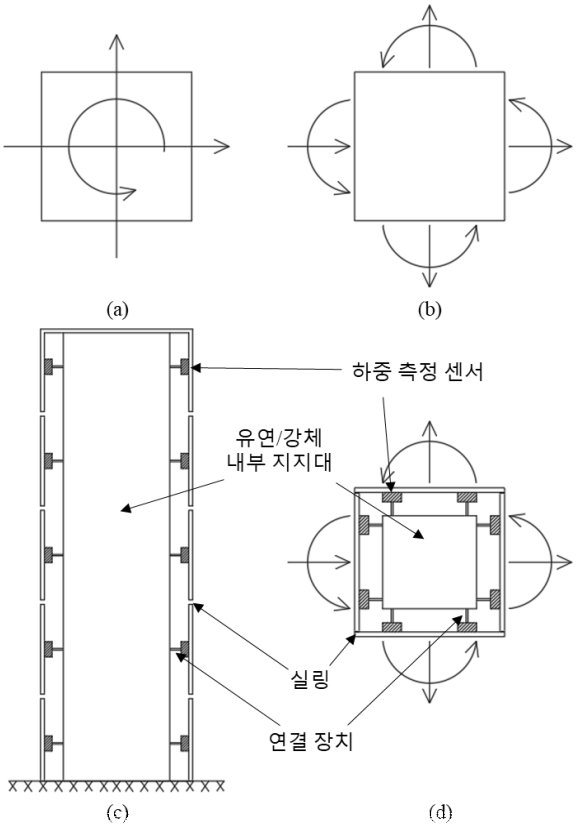


그림 58. 풍력적분 풍동실험 모형

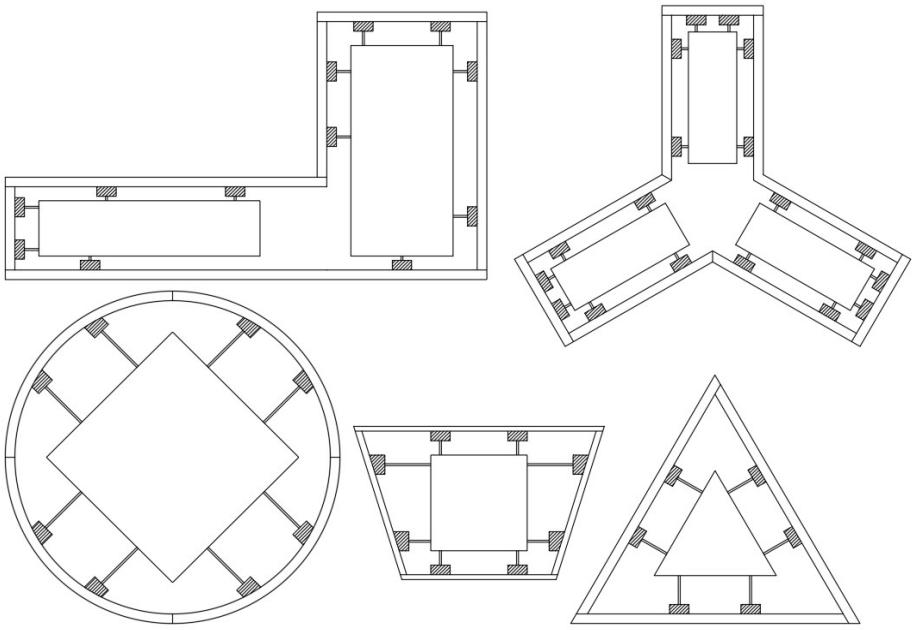


그림 59. 다양한 평면 형태의 HFFI 구조모형

기존 풍동실험 방식 중 하나인 풍력실험 방식(HFFB)는 풍하중에 의한 반력을 모형의 밑면에서만 측정가능하지만, HFFI는 임의의 높이에 작용하는 하중을 직접적으로 측정 가능. 또한 공기역학적 풍동실험은 실험 후 결과의 후처리를 위한 수치해석이 필요하기 때문에 높이에 따른 풍하중의 연직 분포를 구하는 것이 매우 중요하지만, HFFB는 실험결과를 바탕으로 풍하중의 분포를 구할 수 없는데 반해, HFFI는 충분한 수의 로드셀이 사용되면 실험결과에서 직접적으로 하중의 분포를 도출할 수 있음. 개발된 풍력적분 풍동실험 방법의 효용성을 검증하기 위하여 동일한 외형을 갖는 모형에 대해 풍압실험과 풍력적분 풍동실험을 수행하여 결과 상호 비교 수행. 풍력적분 풍동실험 방식의 경우 모형 내부에 지지대가 필요하며, 벽체 세그먼트는 각각 서로 분리되어있어야 하므로 3D 프린팅을 통해 모형을 제작함.

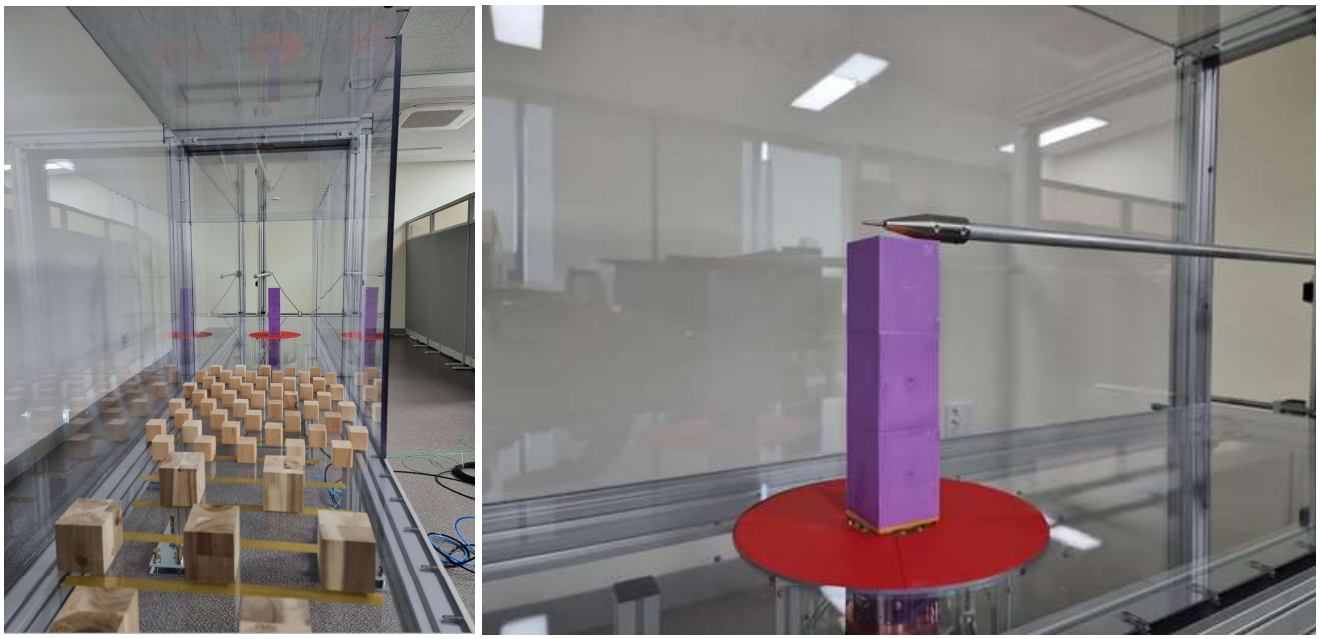
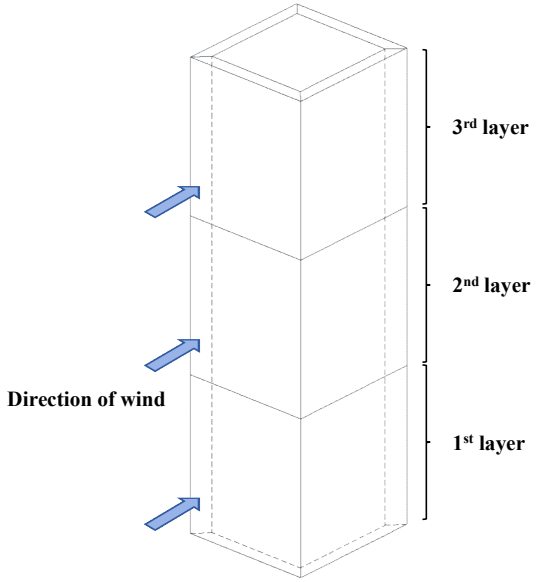
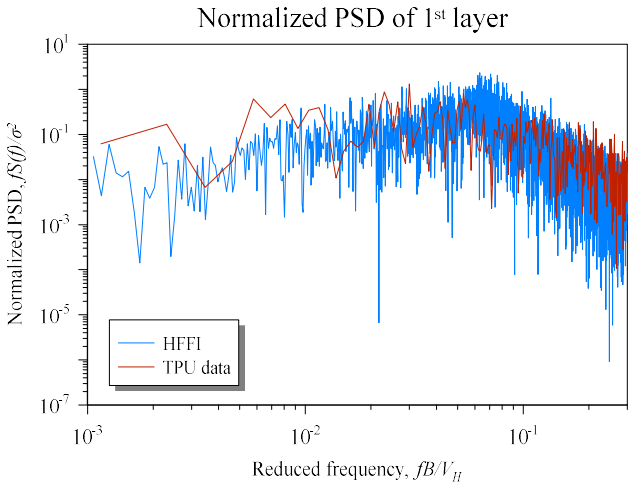


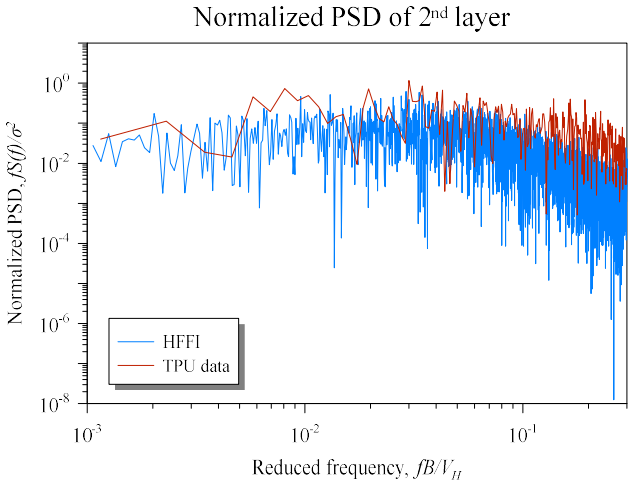
그림 60. 풍력적분 실험 세팅



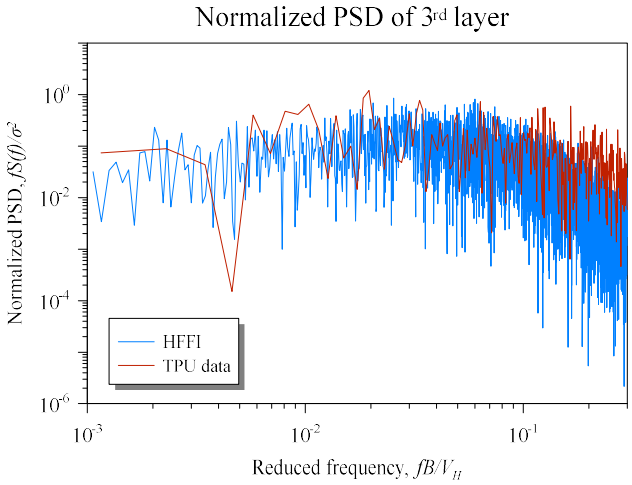
(a) 풍력적분 실험 모형 Layout



(b) Normalized PSD at 1st layer



(c) Normalized PSD at 2nd layer



(d) Normalized PSD at 3rd layer

그림 61. 풍력적분 풍동실험 결과

TPU(Tokyo polytechnic University) Aerodynamic Database에서 제공하는 동일한 형상비(4:1:1)를 갖는 모형에 대한 풍압실험 데이터를 활용하여, 풍력적분 풍동실험 모형의 프로토타입 실증실험을 수행함. 두 모형이 정확히 같은 환경과 실험 조건을 공유하지 않기 때문에, 직접비교를 위하여 실험모형의 높이방향으로 3등분 된 패널에 작용하는 풍방향 풍하중의 정규화PSD(Normalized PSD)를 비교하였음. 그 결과 그림 33과 같이 유효한 진동수 범위에 대해서 유사한 PSD 경향성을 보이는 것을 확인함.

• 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 수정 · 보완

기존 1차 연도에서 성능기반 내풍설계를 위해 제시하였던 ASCE 7-16과 국내 KBC 2016의 풍하중의 재현기간 비교에서 국내 설계기준이 2022년 개정 예정(KDS 41:2022)이므로 이에 맞춰 재산정하였음. 또한 추가로 사용성 설계수준에 대한 다양한 재현기간 및 환산하중 계수를 비교하였음. 국제 설계기준들 중 영향력이 높은 미국 설계기준인 ASCE 7-16과의 등가의 하중환산 재현기간을 제시함으로써 국제 설계 프로젝트에서의 활용성을 높임. 또한 ASCE의 성능기반 내풍설계 가이드라인에서 제시하는 비탄성 내풍설계를 위한 재현기간 700~1700년에 대응되는 국내 하중 수준을 파악할 수 있고, 향후 KDS 41:2022에서는 중요도를 고려한 재현기간 500~900년에 대해 비탄성 설계를 허용할 예정. 이에 맞춰 국내 설계기준에 따른 성능기반 내풍설계 재현기간 및 성능 목표를 제시.

표 6. KDS 41:2022와 ASCE 7-16의 500년 재현주기 풍하중에 대한 환산 비교

	Risk category	Return period, T	Importance factor, I_w	K_D	Converted load factor
KDS 41:2022 (Draft)	Super high-rise	500-year	1.05	1.0	1.10
	S, I		1		1.00
	II		0.95		0.90
	III		0.9		0.81
	Risk category	Return period, T	Return period conversion	K_d	Converted load factor
ASCE 7-16	IV	3,000-year	1.31	0.85	1.11
	III	1,700-year	1.21		1.03
	II	700-year	1.06		0.90
	I	300-year	0.92		0.78

표 7. KDS 41:2022와 ASCE 7-16의 사용성 설계 풍하중 재현기간에 대한 환산 비교

ASCE 7-16			KDS 41:2021		
Return period	V_T/V_{500}	Converted load factor	Return period (Corresponding)	V_T/V_{500}	Converted load factor
-	-	-	1	0.50	0.25
10	0.68	0.40	10	0.66*	0.44
25	0.76	0.49	15	0.70*	0.49
50	0.81	0.56	30	0.76*	0.57
100	0.87	0.64	50	0.80	0.64

*Calculated from the following conversion equation for 500-year return period wind speed in KDS 41:2021.

$V_T/V_{500} = 0.465 + 0.086\ln(T)$

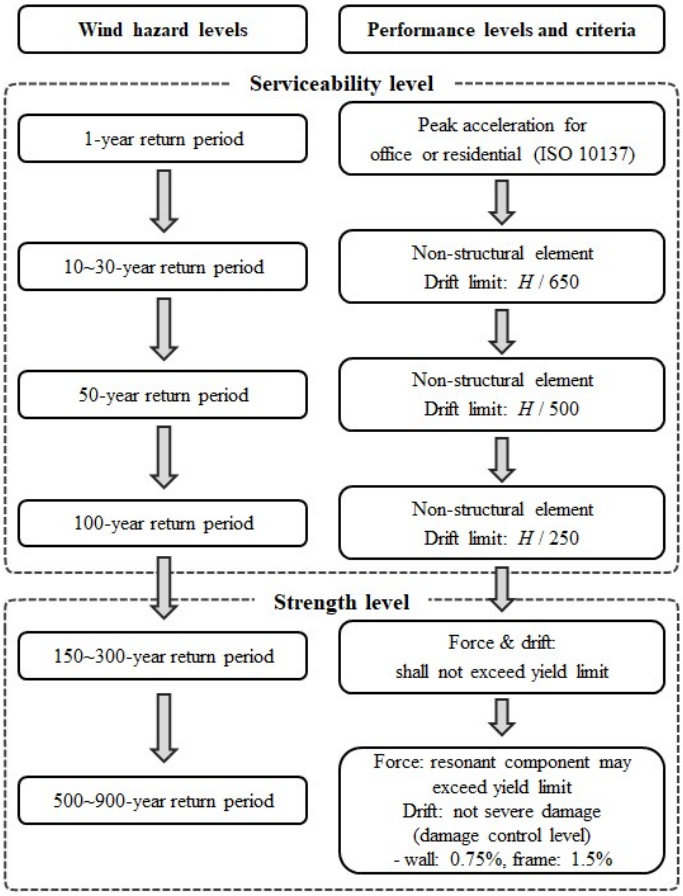


그림 62. KDS 41:2022에 따른 성능기반 내풍설계 재현기간 및 성능목표

성능기반 내진-내풍 통합설계를 위해서는 성능기반 내진설계에서 차용하고 있는 성능평가 기준과 상응하는 성능기반 내풍설계의 성능평가 기준을 수립해야함. 3차 연도에서는 성능기반 내진-내풍 통합설계 가이드라인 수립을 위하여 성능기반 내풍설계에 대한 성능 평가 기준에 관한 연구를 수행하고, 성능기반 내진설계와 상응할 수 있는 부재별 성능기준을 제시함.

표 8. 성능기반 내풍설계를 위한 허용기준

Controlled by flexure			
Conditions		Acceptance criteria (plastic rotation)	
Detailing	Applied shear force ratio[a]	Immediate occupancy	Damage control
Seismic	≤0.25	1%	1.75%
	≥0.5	0.5%	1.25%
Non-seismic	≤0.25	0.6%	1.3%
	≥0.5	0.5%	0.75%
Diagonally reinforced	-	0.6%	1.8%

Controlled by shear			
Conditions		Acceptance criteria (chord rotation)	
Detailing	Applied shear force ratio[a]	Immediate occupancy	Damage control
Seismic	≤0.25	0.6%	1.3%
	≥0.5	0.5%	1.05%
Non-seismic	≤0.25	0.6%	0.8%
	≥0.5	0.4%	0.55%

[a]Applied shear force ratio is calculated by $V/\sqrt{f_{ck}}t_w l_w$ (AIK, 2019). V is shear force from nonlinear analysis. Linear interpolation between values shall be permitted.

Non-seismic section and controlled by flexure			
Conditions		Acceptance criteria (plastic rotation)	
Longitudinal reinforcement[a]	Applied shear force ratio[b]	Immediate occupancy	Damage control
≤0	≤0.25	0.5%	1.25%
	≥0.5	0.15%	0.575%
≥0.5	≤0.25	0.5%	0.75%
	≥0.5	0.15%	0.325%

Seismic section and controlled by flexure			
Conditions		Acceptance criteria (plastic rotation)	
Longitudinal reinforcement[a]	Applied shear force ratio[b]	Immediate occupancy	Damage control
≤0	≤0.25	1%	1.75%
	≥0.5	0.5%	1.25%
≥0.5	≤0.25	0.5%	1.25%
	≥0.5	0.5%	1%

Controlled by shear		
Conditions	Acceptance criteria (plastic rotation)	
Stirrup spacing	Immediate occupancy	Damage control
$\leq d/2$	0.15%	0.575%
$>d/2$	0.15%	0.325%

[a]Longitudinal reinforcement ratio is calculated by $(\rho-\rho')/\rho_{bal}$ (AIK, 2019)[19].

[b]Applied shear force ratio is calculated by $V/\sqrt{f_{ck}}t_w l_w$ (AIK, 2019). V is shear force from nonlinear analysis. Linear interpolation between values shall be permitted.

또한 기존 1차 연도에서 수행했던 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 중 풍하중 PSD 기반 시간이력 풍하중 재생에 대한 추가적인 연구를 통해 시간이형 풍하중 재생을 수정 · 보완함. 초기 연구에서는 건축구조기준에서 제시하는 풍방향 PSD를 기반으로 풍방향 시간이력 하중을 단독으로 생성하였음. 실제로 고층건물의 경우 풍방향 풍하중에 비해 풍직각방향에 의해 큰 영향을 받고, 비틀림 풍하중의 영향도 무시할 수 없음. 또한 풍방향 풍하중, 풍직각방향 풍하중, 비틀림 풍하중 세 요소는 상호 독립적이지 않고 높은 상관관계를 갖고 있으며, 일반적으로 풍방향 풍하중은 풍직각방향 풍하중 및 비틀림 풍하중과 상관관계가 낮지만 여전히 상관관계가 전무한 것은 아니며, 풍직각방향 풍하중과 비틀림 풍하중은 서로 높은 상관관계를 가짐. 따라서 시간이력 재생 시 세 성분의 상관관계를 고려한 시간이력 재생 방법의 개발이 중요함. 3차 연도에서는 각 1,2차 연도에서 수행된 풍동실험 데이터베이스를 바탕으로 각 풍방향간의 상관계수를 분석하고, 풍방향간의 상관계수를 고려한 시간이력 풍하중 재생 방법론을 개발함.

기본 시간이력 재생식: $X(t)=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{2S(f_i)\triangle f}\,cos(2\pi f_i t+\theta_i)$

풍방향 풍압 PSD: $S_p(f)=(\rho C_D^* A V_H)^2 S_v(f)|\chi(f)|^2$

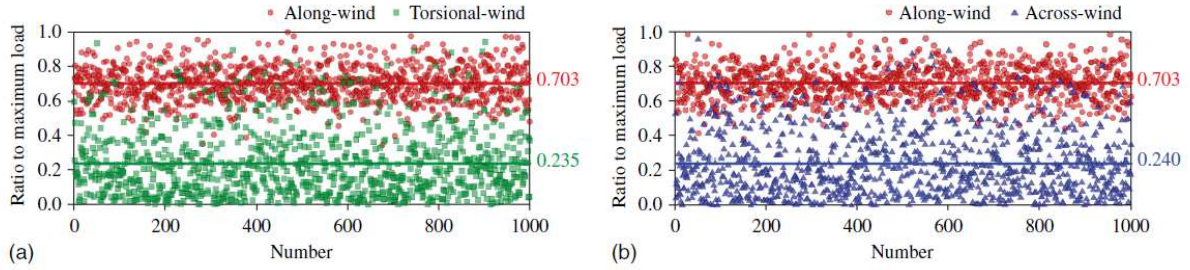
풍방향 풍하중 산정식: $F_D(z,t)=X_p(z,t)+\frac{1}{2}\rho V_H^2 C_D(z)A$

풍직각방향 풍하중 산정식: $F_L(z,t)=\frac{2h_i}{H^2}X_L(t)$

비틀림방향 풍하중 산정식: $M_T(z,t)=\frac{h_i}{H}X_T(t)$

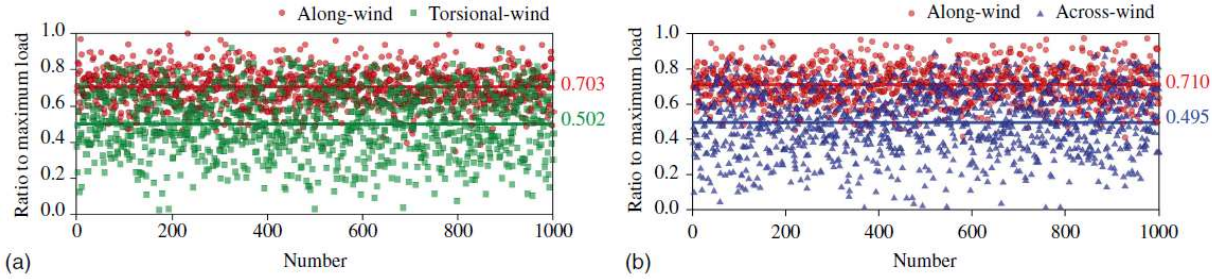
풍직각-비틀림 상관성을 고려한 위상각 산정식: $\theta_{torsion}=\theta_{across}+\cos^{-1}(\kappa)$

여기서, $S(f)$는 각 방향별 하중의 PSD 함수(풍방향 풍하중 PSD는 풍속 PSD로부터 산정, 풍직각 및 비틀림 풍하중 PSD는 풍동실험으로부터 산정), f는 주파수, θ는 랜덤 위상각(0~2π), ρ는 공기밀도, C_D^*는 변동풍력계수, C_D는 평균풍력계수, A는 유효수압면적, V_h는 설계풍속, S_v는 풍속의 PSD 함수(국내 기준은 Karman 풍속 PSD 사용), $|\chi(f)|^2$는 공력 어드미턴스 함수, z는 지상으로부터의 높이, h는 층높이, H는 건물높이, κ는 풍직각-비틀림 풍하중의 상관성을 고려한 하중계수임.



(a) 풍직각방향이 최대인 순간 (b) 비틀림 풍하중이 최대인 순간

그림 63. 풍직각-비틀림 풍하중의 상관성을 고려하지 않고 재생한 시간이력 하중들에서 한 방향 풍하중이 최대인 순간에서의 다른 방향 하중의 최대값에 대한 비율



(a) 풍직각방향이 최대인 순간 (b) 비틀림 풍하중이 최대인 순간

그림 64. 풍직각-비틀림 풍하중의 상관성을 고려하여 재생한 시간이력 하중들에서 한 방향 풍하중이 최대인 순간에서의 다른 방향 하중의 최대값에 대한 비율

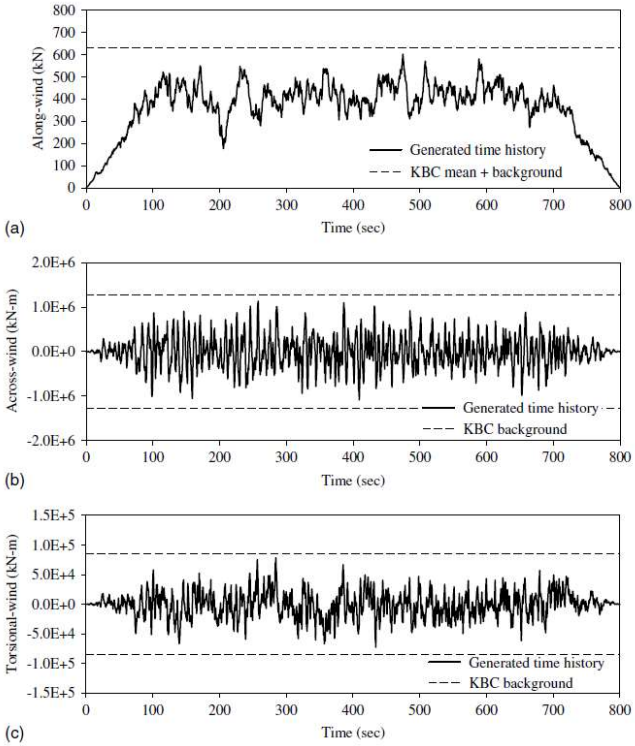


그림 65. 상관성을 고려한 풍하중의 세 방향성분의 시간이력 풍하중 재생 결과

• UHPC 패널의 내충격 성능 실험 연구

UHPC를 사용한 건축물 파사드(Facade)용 외장재 패널의 내충격 성능 실험을 수행. 외장재 패널로 사용하기 위해 UHPC에 색상을 첨가한 Colored UHPC의 내충격 성능을 실험을 통해 검증했으며,다른 외장재료와의 성능 비교를 위하여 일반 콘크리트 패널, 화강암 패널을 동일한 실험 조건에서 내충격 성능 실험을 수행 후 상호 비교하였음. UHPC에 색을 첨가한 Colored UHPC와 일반 UHPC와의 구조역학적 성능은 유사하게 나타났음.

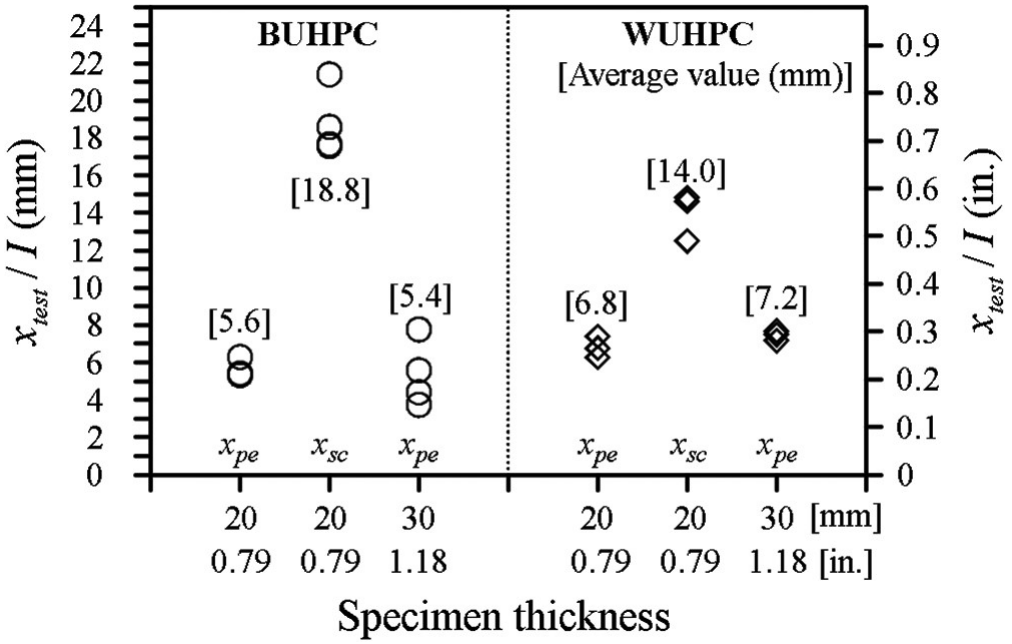
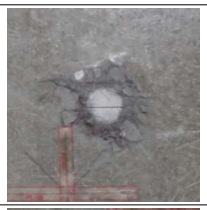
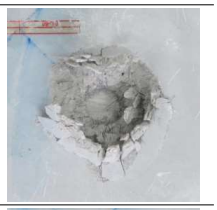
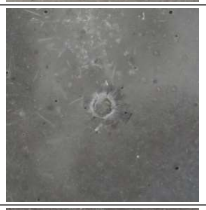
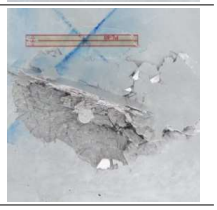
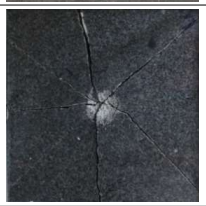


그림 66. Colored UHPC와 일반 UHPC 비교

UHPC와 화강암 패널에 대한 고속 비상체 충돌 실험을 수행한 결과, UHPC 패널이 화강암 패널에 비하여 더 우수한 내충격 성능을 발휘하는 것으로 나타남. 특히 화강암의 경우 취성적 파괴가 발생하여 여러 조각으로 흩어지는 반면, UHPC는 강섬유의 효과로 취성적 파괴 양상이 나타나지 않았고 손상된 영역의 범위가 현저히 낮았음. 따라서 UHPC 패널은 고속 비상체에 의한 충격 후에도 파괴 잔해가 거의 발생하지 않기 때문에 잔해에 의한 2차 피해를 방지할 수 있음을 확인.

표 9. 패널 종류에 따른 고속 비상체 충돌 실험 결과 사진

Specimen	Front	Rear	Specimen	Front	Rear
BUHPC-10-1			WUHPC-10-1		
BUHPC-20-1			WUHPC-20-1		
BUHPC-30-1		No damaged	WUHPC-30-1		No damaged
GH-G Granite			MK-G Granite		

UHPC 패널의 두께에 따른 Spalling 양상에 대해서도 비교 분석을 진행하였음. Spalling은 충돌하중에 의해 손실되는 면적과 큰 관련이 있으며, UHPC의 두께가 변화에 따라 패널 배면의 손실 면적 변화가 발생했음. 따라서 UHPC 패널의 두께가 Spalling 형태를 결정짓는 중요한 요인임을 확인.

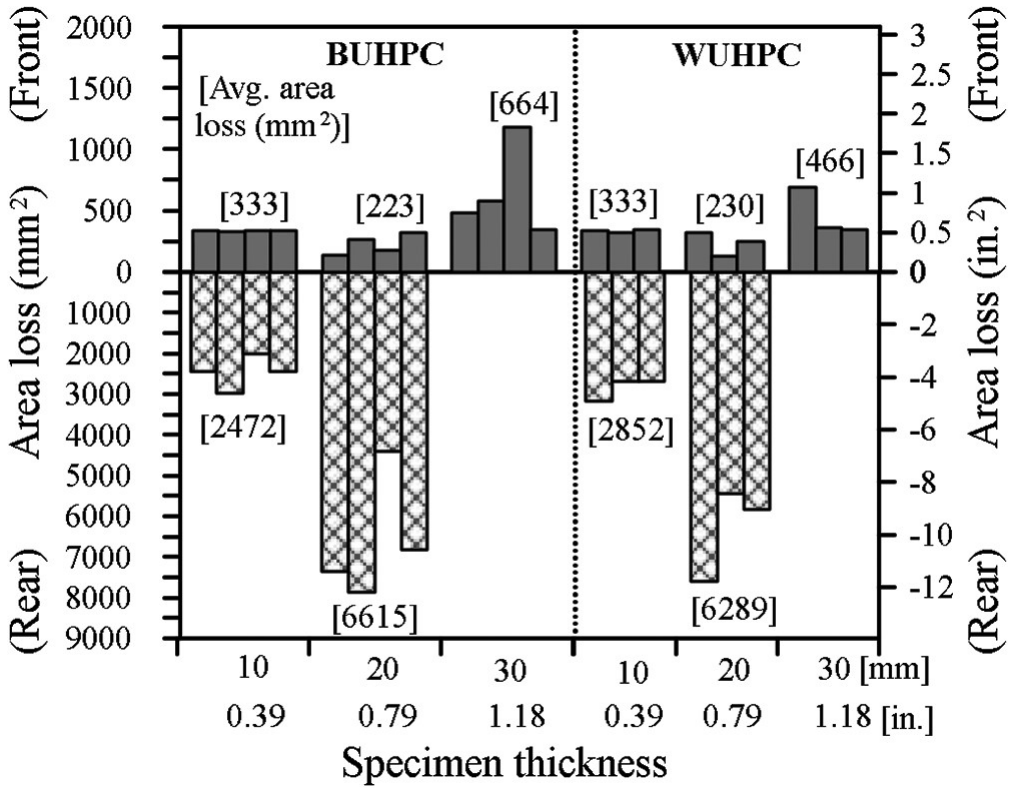
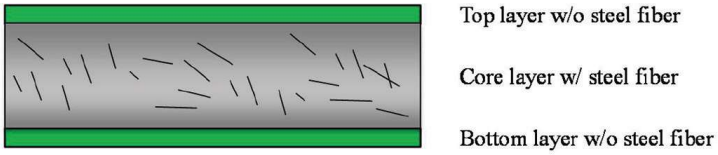
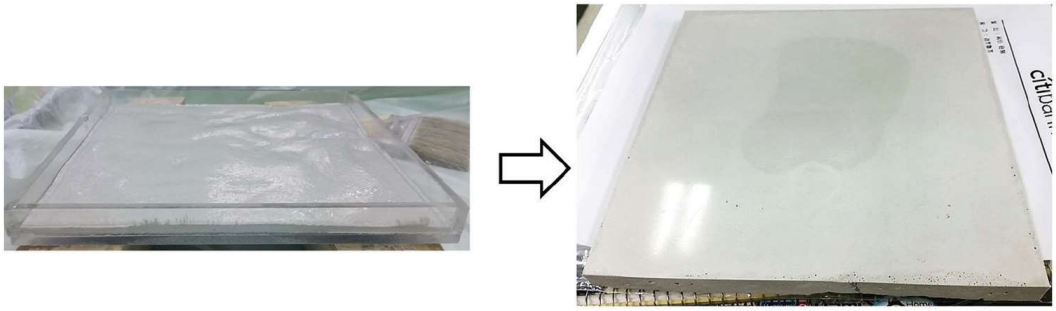


그림 67. UHPC 패널 두께에 따른 Spalling 비교

추가적으로 UHPC에 혼입되는 강섬유(Steel fiber)의 노출과 부식 방지를 위한 두 가지 방법을 제시했음. UHPC를 세 층으로 나누어 타설하고, 외부 층에는 강섬유가 함유되지 않은 UHPC를 사용하여서 외부로 강섬유가 노출되고 이로 인해 부식되는 것을 방지하는 방법과 UHPC를 아크릴 몰드(Acrylic mold)에 타설하여 양생하는 방법을 제시함. 두 방법을 비교한 결과, 아크릴 몰드를 사용하는 것에 비해서 UHPC를 세 층으로 나누어 타설하는 방법이 가장 효과적임 확인.



(a) Additional layer(s) without steel fibers



(b) Use of acrylic mold

그림 68. UHPC 강섬유의 노출과 부식 방지를 위한 제안 방법

(2) 정량적 연구개발성과

○ 국외논문 게재
- 국외논문 게재에 대한 총괄 성과 목표는 SCI와 비SCI 각각 3편씩이었으나, SCI 논문 7편을 달성하여 기존의 SCI 성과 목표 3편을 초과
- 비SCI 논문 게재 3편 대신 SCI 논문 4편 추가 달성
- 국외논문 게재 성과는 전체적으로 목표대비 초과달성

○ 국내논문 게재
- 국내논문 게재에 대한 총괄 성과 목표는 SCI와 비SCI 각각 2편과 3편으로 총 5편
- 비SCI급 국내논문 게재 성과는 목표치 3편 대비 2편 추가 달성
- SCI급 국내논문 게재 성과는 목표치 2편을 달성하지 못했지만, 국외 SCI논문을 기존 성과 목표 대비 4편 초과달성
- 국내외 전문 학술지 게재 성과는 전반적으로 초과 달성

○ 특허 출원 및 등록
- 특허 출원 성과 목표는 총 3건이며, 3개년도 간 총 4건의 특허 출원 성과 달성으로 초과 달성
- 특허 등록 성과 목표는 총 1건으로, 연구기간 동안 총 1건의 특허 등록 성과 달성

○ 학술발표 성과
- 기존 성과 목표 중 학술발표에 대한 성과는 수립되지 않았지만, 3개년의 연구기간 동안 국내외 유수의 학술대회에 참가하여 총 21편의 학술발표 성과 달성

구분		1차년도		2차년도		3차년도		계	
		성과 목표	달성 건수	성과 목표	달성 건수	성과 목표	달성 건수	성과 목표	달성 건수
국외논문 게재	SCI	1	1	1	3	1	2	3	6
	비SCI	1	0	1	0	1	0	3	0
	계	2	1	2	3	2	2	6	6
국내논문 게재	SCI	0	0	1	0	1	1	2	1
	비SCI	1	3	1	1	1	1	3	5
	계	1	3	2	1	2	2	5	6
특허출원	국내	1	1	1	1	1	2	3	4
	국외	0	0	0	0	0	0	0	0
	계	1	1	1	1	1	2	3	4
특허등록	국내	0	0	0	1	1	0	1	1
	국외	0	0	0	0	0	0	0	0
	계	0	0	0	1	1	0	1	1
인력양성	석사	0	0	3	0	3	3	6	3
	박사	0	0	3	1	1	1	4	2
	계	0	0	6	1	4	4	10	5
기술이전	계약건수	0	0	0	0	1	0	1	0
	계약액	0	0	0	0	5,000	0	5,000	0
	징수액	0	0	0	0	5,000	0	5,000	0
기타	학술발표	0	2	0	13	0	6	0	21

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Seismic Performance of Reinforced Concrete Column-Foundation Connections Using Combo-Type Mechanical Splices	ACI Structural Journal	Deukhang Lee; Thomas H.-K. Kang; Hyunjin Ju; Sung-Woo Moon; Il-Seung Yang	116	미국	American Concrete Institute	SCIE	20190901	0889-3241	100%
2	Engineering Review of ASCE 7-16 Wind-Load Provisions and Wind Effect on Tall Concrete-Frame Buildings	Journal of Structural Engineering	Hamidreza Alinejad	146(6)	미국	American Society of Civil Engineers	SCIE	20200330	0733-9445	100%
3	Behavior of UHPC-RW-RC wall panel under various temperature and humidity conditions	Advances in Concrete Constructio n	Xiangguo Wu; Thomas H.-K. Kang	9	대한민국	Techno Press	SCIE	20200425	2287-5301	100%
4	Performance based design of tall buildings for wind load and application of response modification factor	Wind and Structures	Hamidreza Alinejad; Thomas K. Kang	31	대한민국	The Wind Engineerin g Institute of Korea	SCIE	20200831	1226-6116	100%
5	Impact Performance of Thin Prefabricated Ultra-High-Performance Concrete Facade	ACI Structural Journal	Sanghee Kim; Thomas H.-K. Kang; Sung-Gul Hong	118	미국	American Concrete Institute	SCIE	20211228	0889-3241	100%
6	Performance-Based Wind Design of High-Rise Buildings Using Generated Time-History Wind Loads	Journal of Structural Engineering	Seung Yong Jeong; Hamidreza Alinejad; Thomas H.-K. Kang	147	미국	American Society of Civil Engineers	SCIE	20210901	0733-9445	100%
7	Performance-based wind design framework proposal for tall buildings	Wind and Structures	Hamidreza Alinejad; Thomas H.-K. Kang; Seung-Yong Jeong	32	대한민국	The Wind Engineerin g Institute of Korea	SCIE	20211228	1226-6116	100%
8	KBC 2016 풍하중의 산정법 이해 및 고층건물에서의 적용	한국풍공학회논문집	강현구; 정승용; 하미드레자	23	대한민국	한국풍공학회	비SCIE	20190626	1226-7872	100%
9	국내외 고층건물 설계를 위한 풍방향 풍하중 기준 비교 연구	한국풍공학회논문집	강현구; 정승용; 하미드레자	23	대한민국	한국풍공학회	비SCIE	20190923	1226-7872	100%
10	중층건물의 풍직각방향 풍하중 산정	한국풍공학회논문집	정승용;	23	대한민국	한국풍공학회	비SCIE	20190713	1226-7872	100%
11	전산유체해석을 통한 고층 건물의 풍압계수 산정	한국풍공학회논문집	김민규; 강현구	24	대한민국	한국풍공학회	비SCIE	20200927	1226-7872	100%
12	고층건물의 성능기반 설계와 비탄성 내풍설계	한국풍공학회논문집	정승용; 하미드레자; 안병욱; 강현구	25	대한민국	한국풍공학회	비SCIE	20210325	1226-7872	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019년 한국지진공학회 학술발표회	성능기반 내진설계와 코드기반 내풍설계의 부조화 문제와 해결방안	강현구	20190920	제주	대한민국
2	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	성능기반 내풍설계 도입과 관련된 제언	강현구	20191011	부산	대한민국
3	한국콘크리트학회 2020 봄 온라인 학술대회 논문집	비선형 시간이력해석을 통한 철근 콘크리트 벽식구조 건물의 내풍 성능 평가	정승용	20200625	온라인	대한민국
4	한국콘크리트학회 2020 봄 온라인 학술대회 논문집	Investigation of High-Rise Concrete Buildings with Dual Structural System under Wind Load by Considering Accidental Eccentrcity	하미드레자	20200625	온라인	대한민국
5	한국구조물진단유지관리공학회 2020년도 여름 학술발표회	풍방향 풍하중의 국내외 설계하중 비교 분석	강현구	20200707	제주	대한민국
6	한국구조물진단유지관리공학회 2020년도 여름 학술발표회	풍직각방향 및 비틀림 풍하중의 국내외 설계하중 비교 분석	강현구	20200707	제주	대한민국
7	The 2020 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM20)	Performance-based wind design of shear wall building by nonlinear time history analysis	정승용	20200826	서울	대한민국
8	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	가열시간에 따른 프리스트레스 콘크리트 슬래브의 내화 성능 평가	박시영	20201104	대구	대한민국
9	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	강체 및 중공 비상체 충돌에 대한 콘크리트 패널의 충돌저항 성능	안성룡	20201103	대구	대한민국
10	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	고층 철근콘크리트 건물의 성능기반 내풍설계를 위한 실험적 연구	안병욱	20201103	대구	대한민국
11	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	대와류모사 기법을 이용한 고층 콘크리트 건물의 풍압계수 산정	김민규	20201104	대구	대한민국
12	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	연성접합 시스템을 적용한 프리캐스트 보-기둥 접합부의 구조성능 평가	성한석	20201103	대구	대한민국
13	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	전단연결재 합성률과 콘크리트 강도에 따른 합성보의 휨 거동	신형엽	20201103	대구	대한민국
14	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	철근콘크리트 건물골조 고층건물에 작용하는 방향별 풍하중의 상관성	정승용	20201103	대구	대한민국
15	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회 논문집	포스트텐션 긴장력 컨트롤 시스템의 데이터 분석 알고리즘 및 IoT 구현에 관한 연구	박수현	20201104	대구	대한민국
16	2021년 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집	메탈라스 보강 무량판 구조의 뚫림전단성능에 대한 실험적 연구	성한석	20210513	여수	대한민국
17	2021년 한국콘크리트학회 봄 학술대회	LSTM 네트워크를 활용한 콘크리트 건물의 벽면 풍압계수 예측 연구	이상민	20210514	여수	대한민국
18	2021년 한국콘크리트학회 봄 학술대회	고층 철근콘크리트 건물의 성능기반 내풍설계를 위한 해석적 연구	안병욱	20210513	여수	대한민국
19	2021년 한국콘크리트학회 가을 학술대회	정사각형 철근콘크리트 건물의 방향별 풍하중 조합	정승용	20211104	경주	대한민국
20	The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2020/2021)	A Study on the Performance-Based Wind Design of High-Rise Concrete Building with Corner Modification	안병욱	20211127	온라인	태국
21	The 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21)	Correlation of directional wind loads on high-rise buildings with square-shaped plan	정승용	20210825	서울	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	PC 보-기둥 접합부	대한민국	서울대학교산학협력단, 김군삼	20190529	10-2019-0063371				100%	
2	특허	철근 기계식 이음구	대한민국	대림산업 주식회사, ㈜유로엔지니어링, 서울대학교산학협력단	20200206	10-2020-0014278				100%	
3	특허	벽식 라멘 PC 시스템	대한민국	서울대학교산학협력단, (주)유로엔지니어링	20210706	10-2021-0088704				100%	
4	특허	PC 슬래브용 접합구 및 이를 이용한 PC 슬래브 접합 구조	대한민국	서울대학교산학협력단, (주)유로엔지니어링	20210706	10-2021-0088705				100%	
5	특허	철근 기계식 이음구	대한민국				대림산업 주식회사, ㈜유로엔지니어링, 서울대학교산학협력단	20200730	10-2141602	100%	

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용
1	설계 기준	신규	KDS 41 12 00 : 2021 건축물 설계하중	2022년 예정	본 연구과제에서 연구 및 개발되었던 성능기반 내풍설계가 2022년 국토교통부 고시 건축구조기준 (KDS 41 12 00 : 2021)의 p. 106에 반영예정

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 기후변화에 따른 슈퍼태풍에 대응하는 성능기반 내진-내풍 설계법 개발 - 기후변화에 따른 슈퍼태풍 하중 예측을 통한 다양한 재현주기 풍하중에 대한 설계 방법 개발 - 풍동실험을 통한 데이터베이스 구축 - 성능기반 내풍설계 보급화를 위한 소형 풍력적분 풍동실험 풍하중 산정 연구 ○ UHPC 복합구조를 적용한 교량 및 초고층건물 시스템 개발 - UHPC 복합구조 보의 휨/전단 극한하중 실험 및 해석 연구 - UHPC 복합구조 기둥의 휨/압축 극한하중 실험 및 해석 연구 - UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 실험 및 해석 연구 - UHPC 복합구조 패널의 내충격 실험 및 해석 연구 ○ UHPC 복합구조를 적용한 교량 및 초고층건물 시스템 개발 - 성능기반설계 및 UHPC를 통한 중요 인프라 시설의 생애주기 극한하중 저항 성능 극대화 연구	○ 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 • 인프라 시설 설계를 위한 구조물 중요도에 따른 재현주기를 갖는 하중 산정 가이드라인 수립 • 비탄성 성능기반 내풍설계를 위한 구조물 비탄성 모델링 가이드라인 수립 • 소형 풍동 실험 수행 결과를 바탕으로 구조물 설계변수에 따른 풍하중 데이터베이스 구축 • 비탄성 성능기반 내풍설계를 위한 CFD 모델링 및 해석 가이드라인 수립 • 대형 풍동실험을 통한 비탄성 풍하중 데이터베이스 구축 • 성능기반 내진-내풍 통합 설계가이드라인 개발의 일환으로 인프라 시설 성능기반 설계 지침 개발 • 성능기반 내진-내풍 통합 설계가이드라인 개발을 위하여 구조설계 해석 결과를 바탕으로 기존 설계 대비 10% 물량 감소 검증 • 성능기반 설계 보급화를 위한 소형 풍력적분 실험법 개발 및 실증 실험 수행 ○ UHPC 복합구조 교량 및 초고층건물 시스템 개발 • UHPC 복합구조 보 설계 기술 개발을 위한 기존 UHPC 복합구조 보의 휨/전단 성능 기술 이상의 구조 성능 확보 • UHPC 복합구조 기둥 설계 기술 개발을 위한 기존 UHPC 복합구조 기둥의 휨/압축 성능 기술 이상의 구조 성능 확보 • UHPC 복합구조 슬래브 설계 기술 개발을 위한 기존 UHPC 복합구조 슬래브의 뚫림 전단 성능 기술 이상의 구조 성능 확보 • UHPC 내충격 성능 실험 수행을 통한 UHPC 복합구조 외장재 패널 설계기술 개발 및 구조 성능 향상 ○ 장시간 풍하중에 의한 저사이클 피로파괴 성능 검증 • 중요 인프라 시설을 위한 연결보 피로파괴 성능 실험 및 장시간 풍하중에 의한 피로파괴 설계 방법 개발	100%

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 성능기반 내진-내풍 통합 설계

- 성능기반 내진 설계는 2016년 건축구조기준 개정 이후 관련 연구가 급격히 증가하였고, 그에 따라 세계 각국에서 성능기반 내진설계를 위한 기준 및 가이드라인이 다수 개발됨
- 성능기반 설계의 단계로 넘어간 내진 설계와 달리, 내풍설계는 여전히 선형설계만을 차용하고 있으며 매우 보수적인 설계 방법을 적용하고 있으며, 이로 인해 성능설계가 보편화된 내진설계와 호응이 되고 있지 않은 실정
  → 최근 내풍설계에서도 성능기반 설계를 도입하려는 연구가 진행되기 시작
- 최근 미국 토목학회(ASCE)에서는 성능기반 내풍설계를 위한 가이드라인 “Prestandard for Performance-Based Wind Design”을 출판하여 성능기반 신뢰성 검증 절차 및 방법을 제시
  → 다만 여전히 초기연구 단계에 불과하며, 성능기반 설계에서 중요한 성능기준이나 모델링 방안 등 더 많은 연구가 필요한 실정
- 본 연구과제를 통하여 성능기반 내풍설계에 대한 개념적인 연구를 먼저 수행하였으며, 성능기반 내풍연구의 필요성과 적용 방안 등에 대한 연구를 담은 논문이 ASCE의 Prestandard 출판보다 앞서 Journal of structural engineering에 출판됨.
  → 성능기반 내풍설계에 대한 연구에서 선도적 위치 차지
- 또한 본 연구과제의 일환으로 내풍설계를 위한 성능목표 수립에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과로 관련 논문도 출판되었음
- 국내에서는 아직 성능기반 내풍설계에 대한 인식이 부족하여 건축구조기준에 포함되는 등, 실제적인 기준 및 가이드라인 개발이 부진하였으나, 본 연구과제의 성과로 도출된 성능기반 내풍설계의 필요성 및 모델링-해석 가이드라인 등을 바탕으로 국내에도 성능기반 내풍설계의 중요성을 인식시킴
- 그에 따라 2022년 개정예정인 국토교통부 고시 건축구조기준에서 성능기반 내풍설계가 포함될 예정으로, 이를 통해 국제적으로 성능기반 내진-내풍 설계에 대한 중요한 위치를 선점하는데 일조함.

○ UHPC 복합구조 교량 및 초고층건물 시스템 개발

- 최근 기후 변화로 인해 동아시아의 태풍 빈도 및 강도가 급격히 증가하고 있으며, 기상청 통계에 따르면 국내에 영향을 주었던 태풍의 수가 매년 증가하는 추세
- 최근 해외에서는 태풍에 비해서 국소적이지만 훨씬 강한 풍속이 발생하는 토네이도에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 강한 풍속에 의한 구조물의 직접적인 손상 외에도 강한 풍속에 의해 발생할 수 있는 비산물 충격에 대한 필요성 대두
- 기후 변화로 인한 태풍의 강도 증가와 더불어 국내에서도 태풍에 의한 비산물 위험성이 증가함에 따라서 외장재 및 구조물의 내충격 성능의 중요성 부각
- UHPC를 활용하여 태풍에 의한 비산물에 대응하기 위한 내충돌성·내충격성이 우수한 구조시스템의 개발이 필요
- UHPC에 대한 연구는 세계적으로 많이 이루어지고 있으나, 고속 비산물에 대한 내충격성에 대한 성능기준이나 설계 가이드라인이 부족한 실정
- 본 연구과제에서는 Harbin Institute of Technology와 공동연구를 진행하여, UHPC의 다양한 적용성과 구체적인 설계 가이드라인의 수립에 대한 연구를 진행
- UHPC를 활용한 슬래브의 뚫림 전단강도 예측을 위한 이론식을 개발하였으며, UHPC 복합구조 보/기둥에 대한 극한하중 성능 실험을 수행하여 이력거동 결과를 도출하는 등 UHPC를 활용한 설계에 활용될 수 있는 다양한 데이터베이스를 구축
- 고층건물이나 인프라 시설 등에 활용할 수 있는 UHPC를 활용한 외장재 패널에 대한 내충격 실험을 수행하여서, 기존의 석재(화강암) 패널 대비 내충격 성능을 실험적으로 검증하여 UHPC를 활용한 외장재 설계에 대한 실험적 데이터베이스 구축

○ 장시간 풍하중에 의한 저사이클 피로파괴 성능 검증

- 지진하중에 비해 하중 작용시간이 상대적으로 긴 풍하중의 경우, 생애주기 동안 극한 풍하중에 대한

고층건물 연결보의 풍하중 피로파괴 성능이 매우 중요함

→ 강도를 초과하지 않는 하중에도 하중 가력횟수가 많으면 피로하중 누적으로 인해 파괴수준에 도달할 수 있음

- 본 연구에서는 국제적으로도 연구 사례가 극히 드문, 연결보의 풍하중에 대한 피로파괴 성능 검증 실험을 수행하여 고층건물의 생애주기 간 풍하중에 의한 피로파괴 성능 신뢰성 향상에 대한 실험적 데이터베이스를 구축

→ 성능기반 내풍설계 및 생애주기 신뢰성 향상 연구에서 선도적 위치를 점할 수 있음

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인
- 관련분야의 전문가, 연구자, 실무자들로 구성된 자문위원을 활용하여, 실무 보급화를 위한 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 제시
- CFD 해석 데이터베이스를 구축하고 이를 기반으로 풍동실험에 의존한 설계에서 벗어나 CFD 해석을 통한 설계가 가능하도록 가이드라인 제시
- 성능기반 내진-내풍 통합 설계를 통해 구조물의 종합적인 안전성, 연성능력 확보, 시공물량 감소로 경제성 향상, 극한하중 저항 성능 향상 가능
- 현재까지 명확한 설계 방법이 정립되지 않은 성능기반 내풍설계 분야의 가이드라인을 세계 최초로 제시함으로써, 해외에 의존하던 구조물 설계 기술의 자립화, 경쟁력 향상, 높은 부가가치 창출
- 현재 국내에서는 성능기반 내풍설계 관련 산업이 거의 전무한 상황이고, 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인 보급화로 관련 분야의 전문 인력 양성으로 일자리 창출
- 연구 과제를 통해 개발된 성능기반 내진-내풍 통합 설계 가이드라인을 바탕으로, 더 구체적인 성능기반 내진-내풍 설계를 위한 모델링 및 해석 지침 개발에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단
- 성능기반 내풍설계를 통해 설계된 건물에 대한 지속적인 구조모니터링(변위, 가속도, 풍속 등)을 통해 성능기반 내풍설계의 보완을 위한 구조 측정데이터베이스 구축 필요

○ UHPC 복합 구조시스템
- UHPC는 기존 콘크리트에 비하여 매우 큰 강도를 발휘하여, 이를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이를 구조 기준에서는 구체적으로 반영하지 못하고 있음
- UHPC가 적용된 복합구조물의 실험적 검증 및 데이터베이스를 구축하여 추후 가이드인 개발 및 관련 국책연구 사업의 기초연구 데이터베이스로 활용
- UHPC를 적용한 구조시스템 개발로 UHPC를 적용한 교량 및 초고층 건물의 표준설계로 활용
- UHPC를 활용한 보수·보강 효과 데이터베이스를 구축하고, 이를 주요 인프라 시설의 보수·보강 가이드라인으로 활용

○ 장시간 풍하중에 의한 저사이클 피로파괴 성능 검증
- 본 연구를 통해 중요 시설에 발생 가능한 장기간 풍하중에 의한 저사이클 피로파괴 성능평가를 위한 가이드라인 제시
- 제시된 가이드라인을 통해 향후 국내 인프라 시설 설계를 위한 표준 지침으로 활용
- 안전한 인프라 시설 설계로 재난 시 인명 피해 방지, 사회 혼란 최소화, 시민들의 불안감 해소

< 별첨 >

별첨 자료
1. 참고문헌
2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

[1] Knutson, T. R., et al., “Tropical Cyclones and Climate Change,” Nature Geoscience, 3, 2010, pp.157-163.

[2] Mei, W., Xie, S.-P., Primeau, F., Mcwilliams, J. C., and Pasquero, C., “Northwestern Pacific Typhoon Intensity Controlled by Changes in Ocean Temperatures, Science Advances, 1(4), 2015, pp.1-8.

[3] 박준희, 전영선, 김민규,태풍 리스크 기술 개발 현황, 원자력안전규제 정보회의, 2017.

[4] Tsuboki, K., Yoshioka, M. K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., and Kitoh, A., “Future Increase of super-typhoon Intensity Associated with Climate Change,” Geophysical Research Letters, 42, 2014, pp.646-652.

[5] Jain, A., Srinivasan, M., and Hart, G. C., “Performance Based Design Extreme Wind Loads on a Tall Building,” The Structural Design of Tall Buildings, 10, 2001, pp.9-26.

[6] Petrini, F and Ciampoli, M., “Performance-Based Wind Design of Tall Buildings,” Structure and Infrastructure Engineering, 8(10), 2012, pp.954-966.

[7] Barbato, M., Petrini, F., Unnikrishnan, V. U., and Ciampoli, M., “Performance-Based Hurricane Engineering (PBHE) Framework,” Structural Safety, 45, 2013, pp.24-35.

[8] Chuang, W.-C. and Spence, S. M.J., “A Performance-Based Design Framework for the Integrated Collapse and Non-Collapse Assessment of Wind Excited Buildings,” Engineering Structures, 150, 2017, pp.746-758.

[9] El Damatty, A. A. and Elezaby, F. Y., “The Integration of Wind and Structural Engineering,” The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Material Research (ACEM18), 2018, pp.1-19.

[10] Aswegan, K., Larsen, R., Klemencic, R., Hooper J., and Hasselbauer, J., “Performance-Based Wind and Seismic Engineering: Benefits of Considering Multiple Hazards,” Proceedings, Structures Congress 2017, 2017, pp.473-484.

[11] 강수태, 박정준, 류금성, 김성욱, “시멘트 복합체의 압축 강도에 대한 강섬유 보강 효과,” 구조물진단학회지, 14(5), 2010, pp. 110-118.

[12] 강수태, 류금성, “UHPCC의 압축응력-변형률 관계에 대한 강섬유 혼입률의 영향,” 한국콘크리트학회 논문집, 23(1), 2011, pp.67-75.

[13] 김성욱, 한상묵, 강수태, 공정식, 정상은, “전단철근이 없는 직사각형 휨보강 UHPCC 보의 거동 해석,” 대한토목학회 정기학술대회, 2004, pp.623-628.

[14] 류두열, 박정준, 김성욱, 윤영수, “초고성능 시멘트 복합체의 초기 재령 구속 수축 및 인장 크리프 특성,” 한국콘크리트학회 논문집, 23(5), 2011, pp.581-590.

[15] Wu, X. G., Han, S. M., Kim, S. W., and Kang, S. T., "Shear Failure Load of SFR-UHPCC I-Beam without Stirrup Based on Limit Analysis of Concrete Plasticity," Key Engineering Materials, 324-325, 2006, pp.491~494.

[16] Wu, X. G., Zhao, X.Y., and Han, S.M., "Structural Analysis of Circular UHPCC Form for Hybrid Pier under Construction Loads," Steel and Composite Structures, 12(2), 2012, pp.167-181.

[17] Ren, G.M., Wu, H., Fang, Q., Liu, J.Z., and Gong, Z.M., "Triaxial Compressive Behavior of UHPCC and Applications in the Projectile Impact Analyses," Construction and Building Materials, 113, 2016, pp.1-14.

[18] 전홍민, 선종완, 조효남, “고속철도 강교량의 부식·피로 신뢰성 기반 생애주기비용 분석,” 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2007, pp.1126-1134.

[19] 이광민, 최은수, 조효남, 안형준, “교량의 생애주기비용 효율적인 최적 내진보강과 유지관리전략 - (I) 생애주기 지진신뢰성해석 프로그램 개발,” 대한토목학회논문집, 26(6A), 2006, pp.965-976.

[20] 이우상, 방명석, 한성호, 이진옥, “기대생애주기비용에 기초한 고속철도교량의 신뢰성-최적설계 방안,” 구조물진단학회지, 14(4), 2010, pp.102-110.

[21] 이동철, 오병관, 최세운, 박효선, “생애주기비용을 고려한 구조물의 성능기반 최적내진보강기법,” 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 31(2), 2011, pp.29-30.

[22] Ellingwood, B. R. and Lee, J. Y., “Life Cycle Performance Goals for Civil Infrastructure: Intergenerational Risk-Informed Decisions,” Structure and Infrastructure Engineering, 12(7), 2016, pp.822-829.

[23] Lagaros, N. D. and Magoula, E., “Life-Cylcle Cost Assessment of Mid and High-Rise Steel and Reinforced Concrete-Composite Mimimum Building Cost Designs,” The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013, pp.1-31.

[24] Dong, Y., “Performance Assessment and Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Structures Incorporating Life-Cycle Cost and Environmental Impacts,” Construction and Building Materials, 167, 2018, pp.414-425.

[25] Zhang, Y., Yan, K., and Cheng, T., “Reliability Analysis of High Rise Building Considering Wind Load Uncertainty,” Civil Engineering Journal, 4(3), 2018, pp.469-477.

[26] Wu, X., Chen, X.-K., Yu, S., Hong, S., and Kang, T.H.-K., “Experimental Study on Waterproofing Properties of Putty-Based Composite Rubber Strip for Underground Post-Tensioned, Precast Concrete Structures,” International Journal of Concrete Structures and Materials, 13(1), 2019.

[27] Wu, X., Xia, X., Kang, T.H.-K., Han, J., and Kim, C.-S., “Flexural Behavior of Precast Concrete Wall-Steel Shoe Composite Assemblies with Dry Connection,” Steel and Composite Structures, 29(4), pp.545-555.

[28] D. Lee, T. H.-K. Kang, H. Ju, S.-W. Moon, and I.-S. Yang, “Seismic Performance of Reinforced Concrete Column-Foundation Connections using Combo-Type Mechanical Splices,” ACI Structural Journal, 116(5), 2019, pp. 173-186.

[29] H. Alinejad, and T. H.-K. Kang, “Engineering Review of ASCE 7-16 Wind-Load Provisions and Wind Effect on Tall Concrete-Frame Buildings,” Journal of Structural Engineering, 146(6), 2020.

[30] X. Wu, S. Yu, X. Tao, B. Chen, H. Liu, M. Yang, and T. H.-K. Kang, “Behavior of UHPC-RW-RC Wall Panel under Various Temperature and Humidity Conditions,” Advances in Concrete Construction, 9(5), 2020, pp. 459-467.

[31] H. Alinejad, S. Y. Jeong, and T. H.-K. Kang, “Performance-Based Design of Tall

Buildings for Wind Load and Application of Response Modification Factor," Wind and Structures, 31(2), 2020.

[32] S. Y. Jeong, H. Alinejad, and T. H.-K. Kang, "Performance-Based Wind Design of High-Rise Buildings Using Generated Time-History Wind Loads," Journal of Structural Engineering, 147(9), 2021.

[33] H. Alinejad, T. H.-K. Kang, and S. Y. Jeong, "Performance-Based Wind Design Framework Proposal for Tall Buildings," Wind and Structures, 32(4), 2021, pp. 283-292.

[34] S. Kim, T. H.-K. Kang, and S.-G. Hong, "Impact Performance of Thin Prefabricated Ultra-High-Performance Concrete Facade," ACI Structural Journal, 118(1), 2021, pp. 167-177.

[35] 강현구, 정승용, 하미드레자, "KBC 2016 풍하중의 산정법 이해 및 고층건물에서의 적용," 한국풍공학회논문집, 23(2), 2019, pp. 83-89.

[36] 강현구, 정승용, 하미드레자, "국내외 고층건물 설계를 위한 풍방향 풍하중 기준 비교 연구," 한국풍공학회논문집, 23(3), 2019, pp. 135-142.

[37] 정승용, 강현구, "중층건물의 풍직각방향 풍하중 산정," 한국풍공학회논문집, 23(4), 2019, pp. 197-202.

[38] 김민규, 강현구, "전산유체해석을 통한 고층 건물의 풍압계수 산정," 한국풍공학회논문집, 24(3), 2020, pp. 127-133.

[39] 정승용, 하미드레자, 안병욱, 강현구, "고층건물의 성능기반 설계와 비탄성 내풍설계," 한국풍공학회논문집, 25(1), 2021, pp. 11~17.

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '건축물과 인프라 시설을 위한 내진 내풍 통합 성능기반 설계법 및 UHPC 복합구조 시스템 개발' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.