

20CTAP
-C152000
-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

20CTAP-C152000-02

BIM
설계환경
기반의
개방형
CFD
전처리
자동화
기술
개발

최
종
보
고
서

2021

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발 최종보고서

2021.01.20.

주관연구기관 / 광운대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)미래환경플랜건축사사무소

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발' (연구개발 기간 : 2019.04.15.
~ 2020.12.31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021. 01. 20.

주관연구기관명 : 광운대학교 산학협력단 (대표자) 유 정 호 (인)



공동연구기관명 : (주)미래환경플랜건축사사무소 (대표자) 김 영 진



주관연구기관책임자: 최 창 호

공동연구기관책임자: 박 창 영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C 152000-02	해당 단계 연구 기간	2019.04.15.~ 2020.12.31	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발			
연구책임자	최창호	해당단계 참여연구원 수	총: 13 명 내부: 13 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 370,000천원 민간: 123,340천원 계: 493,340천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 15 명 내부: 15 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 123,340천원 계: 493,340천원
연구기관명 및 소속 부서명	광운대학교 산학협력단			참여기업명 (주)미래환경플랜건축사사무소	
국제공동연구	-			-	
위탁연구	-			-	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반 등급 (국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4에 의거함)
----------------------	---

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	RPMS-2021-0191061852 RPMS-2021-0191061851 RPMS-2021-0091061863 RPMS-2021-0091061849 RPMS-2021-0091061850	10-2019-0173105 10-2020-0168072 10-2020-0183412				C-2019-034119 C-2021-000107					

국가과학기술중합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

○ 본 연구의 최종목표는 사용자 경험에 의존하여 부적절하게 설계되던 기존의 CFD 전처리 과정(경계 조건 설정, CFD 모델의 격자 설계)을 자동화하여 BIM-CFD 데이터 연동 표준화와 개방형 CFD 활용 고도화가 가능한 BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발임.

○ 연구의 최종목표를 달성하기 위한 핵심성과는 다음과 같음.

- 1) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
- 2) 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발
- 3) BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
- 4) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

○ 연구개발을 통한 달성한 기술적 성과는 다음과 같음.

- 건축물 CFD 분석을 위한 작업시간 기존 설계 방식 대비 77.7% 절감
- BIM 데이터 CFD 매칭 정확도 오차율 0%
- 기존 상용 CFD 소프트웨어 분석 결과 대비 오차율 3.9% 이하

보고서 면수

125쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구의 최종목표는 사용자 경험에 의존하여 부적절하게 설계되던 기존의 CFD 전처리 과정(경계 조건 설정, CFD 모델의 격자 설계)을 자동화하여 BIM-CFD 데이터 연동 표준화와 개방형 CFD 활용 고도화가 가능한 BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발임. 연구 개발 내용은 다음과 같음. 1) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발 - 불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법론 도출 - 형상정보 단순화 알고리즘 구축 - 형상정보 단순화 알고리즘의 적합성 검증 2) 건축물 맞춤형 최적 격자 자동 생성 알고리즘 개발 - 격자독립성 검정 기반의 최적 격자 크기 도출 기술 개발 - 격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발 - 최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발 3) BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발 - CFD 모델 입력 요구정보 정의 - BIM 형상·속성정보 추출 - BIM 추출 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축 4) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 - 개발 알고리즘 통합 - BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 및 정확도 검증																						
연구개발성과	본 연구과제의 개발성과는 다음과 같음. - 건축물 CFD 분석을 위한 작업시간 기존 설계 방식 대비 77.7% 절감 - BIM 데이터 CFD 매칭 정확도 오차율 0% - 기존 상용 CFD 소프트웨어 분석 결과 대비 오차율 3.9% 이하 <정량적 연구개발성과> <table><tr><td>구분</td><td>국내 특허 출원</td><td>국내 특허 등록</td><td>국외 논문</td><td>국내 논문</td><td>성과홍보</td><td>SW 등록</td><td>국내 학술 발표</td><td>대외 수상</td></tr><tr><td>성과 건수</td><td>3</td><td>-</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>					구분	국내 특허 출원	국내 특허 등록	국외 논문	국내 논문	성과홍보	SW 등록	국내 학술 발표	대외 수상	성과 건수	3	-	2	3	1	2	2	1
구분	국내 특허 출원	국내 특허 등록	국외 논문	국내 논문	성과홍보	SW 등록	국내 학술 발표	대외 수상															
성과 건수	3	-	2	3	1	2	2	1															
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 연구의 최종성과물은 BIM 모델의 형상·속성정보를 CFD 모델에 매칭하고, CFD 모델의 전처리 과정을 자동화하는 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈임. 이를 통해 CFD 모델의 전처리 과정을 자동화하여 인력 및 자원 투입의 효율화가 가능하여 최소한의 시간과 비용으로 최적 설계안을 도출 가능함. 이와 함께 BIM-CFD 데이터 연동 표준화 및 개방형 CFD 활용 고도화로 관련 국가 R&D 사업의 기초 참고 자료로 활용 가능함. 또한, 본 연구는 BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술을 세계 최초로 개발하며, 새로운 기술 시장 개척으로 건축 분야 시장의 활성화와 건축 R&D의 다양화를 이끌어 낼 수 있음.																						
국문핵심어 (5개 이내)	빌딩정보모델링	전산유체역학	전처리	자동화	개방형																		
영문핵심어 (5개 이내)	Building Information Model	Computational Fluid Dynamics	Pre processing	Automation	Open Source																		

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
1-1 연구개발 개요	5
1-2 연구 배경 및 필요성	6
1-3 연구 목적 및 범위	8
2. 연구수행내용 및 성과	13
2-1 연구 추진전략·방법 및 추진체계	13
2-1-1 연구개발 추진전략·방법	13
2-1-2 연구개발 추진체계	19
2-1-3 연구개발 추진일정	20
2-2 1차 연도 연구수행내용 및 성과	23
2-2-1 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발	24
2-2-2 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발	40
2-3 2차 연도 연구수행내용 및 성과	59
2-3-1 BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발	60
2-3-2 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	86
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	112
3-1 연구 성과목표	112
3-1-1 연구개발 추진전략·방법	112
3-1-2 연구개발 추진체계	114
3-2 목표 달성여부	116
3-2-1 연구개발 추진전략·방법	115
3-2-2 연구개발 추진체계	116
3-2-3 연구개발 추진일정	118
3-3 목표 미달성 원인(사유) 및 차후대책	118
4. 연구개발성과의 활용 계획	119
4-1 연구개발성과의 활용 방안	119
4-2 기대효과	120
4-3 기업화 추진 방향	121
붙임. 참고 문헌	122

별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 개요

○ 본 연구의 최종목표는 사용자 경험에 의존하여 설계되던 CFD 전처리 과정(형상 단순화, 격자 최적화, 경계 조건 설정)을 자동화하여 BIM-CFD 데이터 연동 표준화와 개방형 CFD 활용 고도화가 가능한 **BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발**임.

○ 본 연구개발의 세부 목표는 다음과 같음.

- BIM-CFD 기술의 형상 모델링 효율화를 위한 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
- 개방형 CFD 모델의 효율화를 위한 건축물 맞춤형 최적 격자 자동생성 알고리즘 개발
- BIM과 CFD의 완전 연계를 위한 BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
- CFD 분석의 효율화를 위한 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

○ 본 연구개발의 정량적 목표는 다음과 같음

- 건축물 CFD 분석을 위한 작업시간 기존 설계 방식 대비 70% 절감
- BIM 데이터 CFD 매칭 정확도 오차율 5% 이내
- 기존 상용 CFD 소프트웨어 분석 결과 대비 오차율 5% 이내



그림 1. 연구개발 개요

1-2. 연구개발 배경 및 필요성

○ 건축 분야에서 전산유체역학(CFD) 활용 증가

- 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 유체가 가지는 압력, 속도, 온도 등의 물리량을 계산하고 흐름 특성을 분석 및 예측하는 수치해석 방법임.
- 건축 분야에서 CFD는 건축물 설계 시 반드시 고려가 필요한 연돌 효과 분석, 실내 공조 효율성 분석, 바람길 분석, 환기 평가, 풍압 분석, 화재 및 피난 분석 등 건축물에서 발생하는 공기와 관련된 모든 역학적인 문제 분석에 사용되고 있음.
- 특히 삶의 질에 대한 국민적 관심이 높아지면서 실내공기질, 실내 환경의 쾌적성, 도시 건축물의 미기후 등에 대한 CFD 분석이 점차 요구되고 있음.
- 이러한 시대적 요구에 따라 건축물의 공기환경 개선 및 에너지성능 개선과 관련된 국가 정책들이 활발하게 시행 중이며, 건축 분야 CFD 관련 국가 연구 또한 2002년 3건에서 2018년 13건으로 지속적으로 증가하고 있음.

○ BIM 설계의 확대 및 BIM 연계 CFD 기술의 개발

- BIM(Building Information Model)은 건축물의 기획, 설계, 시공, 유지관리의 모든 단계에 필요한 물리적 형상, 속성 및 관련 정보를 통합관리하는 기술 및 프로세스임.
- 2016년 조달청의 BIM 도서 작성 의무화와 국토교통부의 BIM 확대 정책이 시행되면서 BIM 모델 설계가 점점 증가하고 있음.
- 기존 건축 분야 CFD 분석은 분석 대상의 도면을 파악하고 이를 기반으로 형상 모델 설계, 격자 설계, 환경 조건 설정의 전처리 단계와 및 분석의 과정으로 진행됨.
- BIM 모델은 건축물의 형상과 속성정보를 포함하고 있어 이를 CFD 모델과 연계할 경우 분석 과정에 있어서 중복 작업을 줄일 수 있고 부적절한 CFD 모델 설계로 인한 오차를 차단할 수 있음. 이에, BIM 설계 데이터를 CFD 모델 설계에 연계하기 위한 기술이 개발되기 시작함.

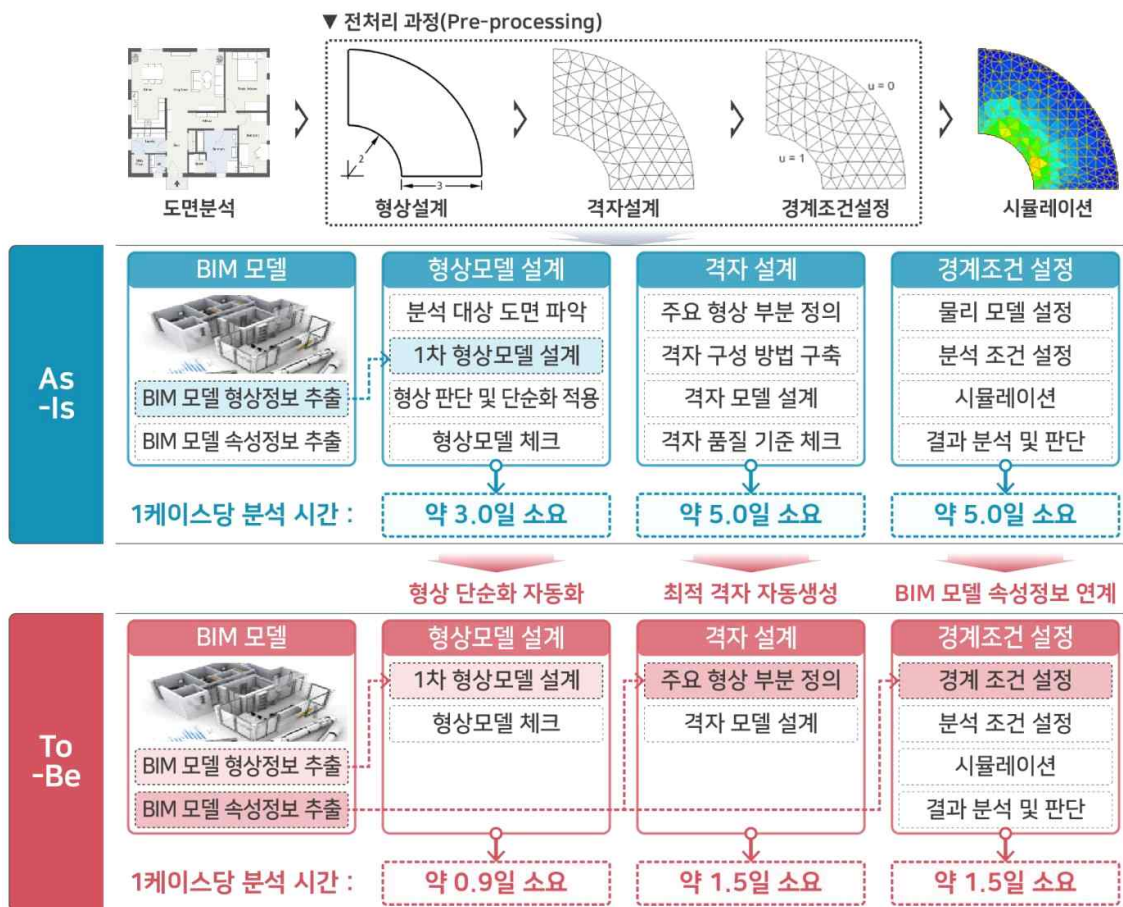
○ BIM 모델과 CFD를 연계한 기존 기술들의 한계점

- BIM과 CFD를 연계하는 연구 개발은 국내에서는 전무한 실정이며, 주로 국외에서 연구가 진행되고 있음. 그러나, BIM 모델이 형상정보 외에 속성정보를 포함하고 있음에도 속성정보 매칭 기술의 부재로 현재까지는 전처리 과정 중 CFD 형상모델 설계만 자동화하고 있음.
- 속성정보를 입력하는 경계 조건 설정 단계 또한 CFD 해석 결과에 직접적인 영향을 주는 중요한 과정임에도 BIM 포맷의 데이터와 CFD 포맷 데이터 변환 기술과 매칭 기술개발의 어려움으로 아직 연구 개발이 이루어지고 있지 않음.
- 경계 조건 설정은 분석 대상에 따라 형상모델 설계에 필요한 작업 시간보다 더 많은 시간이 요구되기도 하며, 분석 결과에 직접적인 영향을 주기 때문에 정확한 설정이 필요함. 그러나 수많은 경계 조건을 CFD 모델에 입력하는 과정에서 다양한 오류가 발생할 수 있으며, 이로

인하여 결과의 신뢰성 저하나 재연산에 따른 시뮬레이션 기간의 증가 등의 문제가 발생함.

○ BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발의 필요성

- 기존 CFD 소프트웨어들은 전처리 과정에 복잡한 과정과 설계방법 등이 요구되고 설계 순서에 따라 결과가 다르게 도출되는 문제가 있음. 또한, 전처리 과정에 대한 정확한 가이드라인이 존재하지 않아 사용자의 경험에 의존하는 문제가 있음.
- 이러한 경험 의존성 문제로 인하여 사용자에게 따라 CFD 분석 결과가 상이하게 나타날 수 있으며 이는 CFD 분석 결과의 신뢰성 저하를 야기함.
- 건축분야의 CFD 분석은 국내 기술의 부재로 외산 기술에 의존성이 높고, 외산 기술들의 시장 독점으로 높은 라이선스 비용을 지불해야하는 실정임. 또한, 저작권 문제로 인하여 CFD 기술을 융합한 신기술 창출에 한계가 있어 기술의 확장성이 저하되는 문제가 있음.
- 따라서 사용자 경험에 의존하는 문제점을 해결하여 CFD 분석의 효율성 및 신뢰성 확보가 가능하고 확장성이 높은 BIM 통합 개방형 CFD 시뮬레이션 전처리 자동화 기술 개발이 필요함.



BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술을 통한
인력 및 자원 투입 최소 70% 절감

그림 2. 본 연구개발 기술의 필요성

1-3. 연구 개발의 목표 및 범위

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	본 연구의 최종목표는 사용자 경험에 의존하여 부적절하게 설계되던 기존의 CFD 전처리 과정(경계 조건 설정, CFD 모델의 격자 설계)을 자동화하여 BIM-CFD 데이터 연동 표준화와 개방형 CFD 활용 고도화가 가능한 BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발 임.
세부 목표	1) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발 - 불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법론 도출 - 형상정보 단순화 알고리즘 구축 - 형상정보 단순화 알고리즘의 적합성 검증 2) 분석 대상 건축물 맞춤형 최적 격자 자동 생성 알고리즘 개발 - 격자독립성 검증 기반의 최적 격자 크기 도출 기술 개발 - 격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발 - 최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발 3) BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발 - CFD 모델 입력 요구정보 정의 - BIM 형상·속성정보 추출 - BIM 추출 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축 4) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 - 개발 알고리즘 통합 - BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 및 정확도 검증

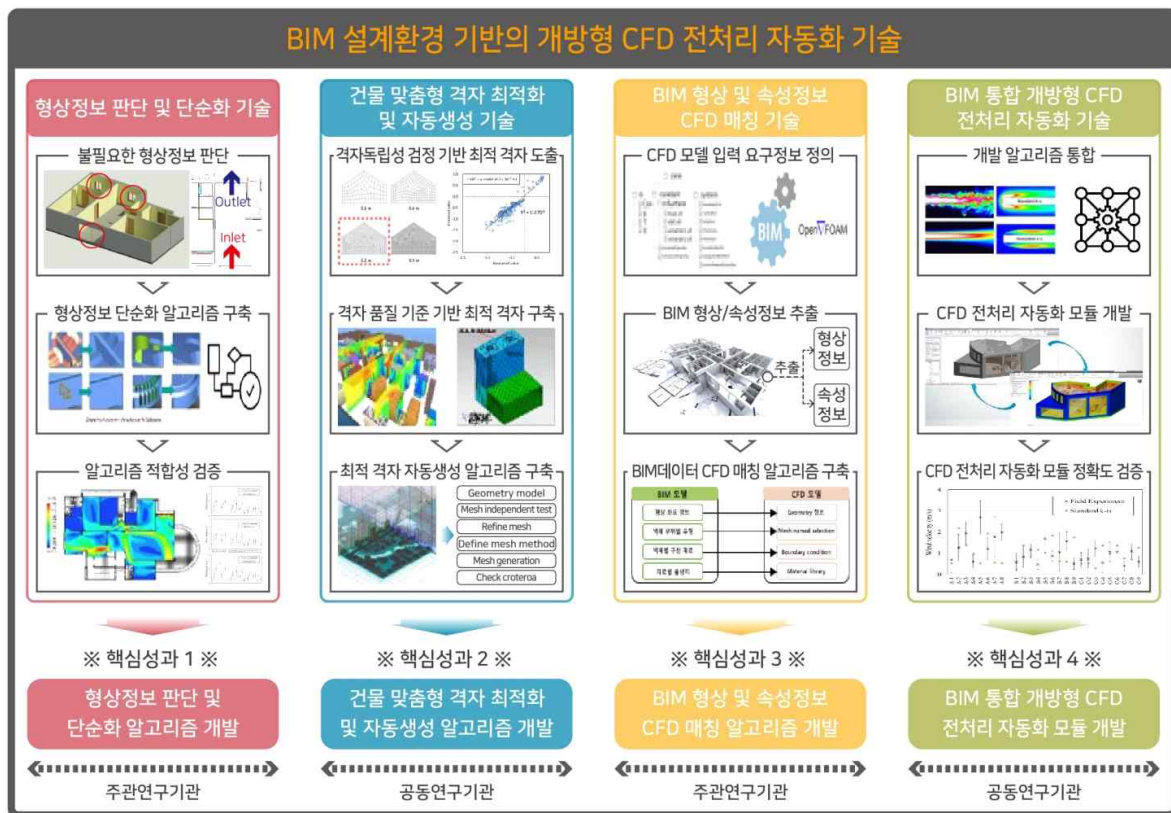


그림 3. 연구개발의 범위

1-3-1. 1차 연도

(1) 개발 목표

- 주관연구기관(광운대학교 산학협력단) : 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
- 공동연구기관(㈜미래환경플랜건축사사무소) : 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발

표 1. 1차 연도 연구개발 목표

구분	기관명	개발목표
주관	광운대학교 산학협력단	■ 핵심성과1) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발 • 1-1) 불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법론 도출 • 1-2) 형상정보 단순화 알고리즘 구축 • 1-3) 형상정보 단순화 알고리즘의 적합성 검증
공동	(주)미래환경플랜 건축사사무소	■ 핵심성과2) 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발 • 2-1) 격자독립성 검정 기반의 최적 격자 크기 도출 기술 개발 • 2-2) 격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발 • 2-3) 최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발

(2) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(광운대학교 산학협력단)

표 2. 1차 연도 주관연구기관 개발 내용 및 범위 (핵심성과 1)

핵심성과명	세부성과명	개발 내용
형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발	불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법론 도출	• 건축 BIM의 형상 특성 분석 • 기류나 온열 환경이 CFD 분석에 미치는 영향 분석을 통한 주요 유입 및 유출구 판단 • 주요 기류 경로 계산을 통한 불필요한 형상정보 정의 • 불필요한 형상정보 판단 알고리즘 개발
	형상정보 단순화 알고리즘 구축	• 건축 BIM 내에서 불필요한 형상의 특성 도출 • 형상의 특성에 따른 단순화 방법론 문헌연구 • 건축 BIM의 불필요한 형상의 특성에 적합한 단순화 방법론 선정 • BIM 형상정보 단순화 알고리즘 개발
	형상정보 단순화 알고리즘의 적합성 검증	• CFD 시뮬레이션을 통한 형상 단순화 알고리즘 적용에 따른 기류, 온열 환경 분석 결과 비교 • CFD 시뮬레이션 결과에 영향을 주지 않는 범위(오차 5% 내외)에서 형상을 단순화하도록 알고리즘 개선

○ 공동연구기관((주)미래환경플랜건축사사무소)

표 3. 1차 연도 공동연구기관 개발 내용 및 범위 (핵심성과 2)

핵심성과명	세부성과명	개발 내용
건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발	격자독립성 검정 기반의 최적 격자 크기 도출 기술 개발	• OpenFOAM의 격자 생성 스크립트 구조 파악 • BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 시스템에 적합한 격자 생성 스크립트 구조 구축 • 분석 대상에 적합한 격자독립성 검정 기준 수립 • 격자독립성 검정을 자동으로 수행하는 알고리즘 개발 • 격자독립성 검정 결과에 따른 최적 격자 크기 도출
	격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발	• 격자독립성 검정으로 도출한 최적 격자 크기를 기반으로 Hexahedral mesh 기반의 격자망 구축 방법론 개발 • 해석 대상 Zone 구분 및 Zone 별 격자 구성 방법론 개발 • Aspect ratio, Orthogonal quality 등 격자 품질 지표 선정 • 격자 품질 지표 비교를 통한 최적 방법론 도출
	최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발	• 격자독립성 검정 알고리즘 및 최적 격자 구성 방법론 통합한 격자 자동생성 알고리즘 구축 • 최적 격자 자동생성 스크립트 구축 • 최적 격자 자동생성 알고리즘 정확도 검증

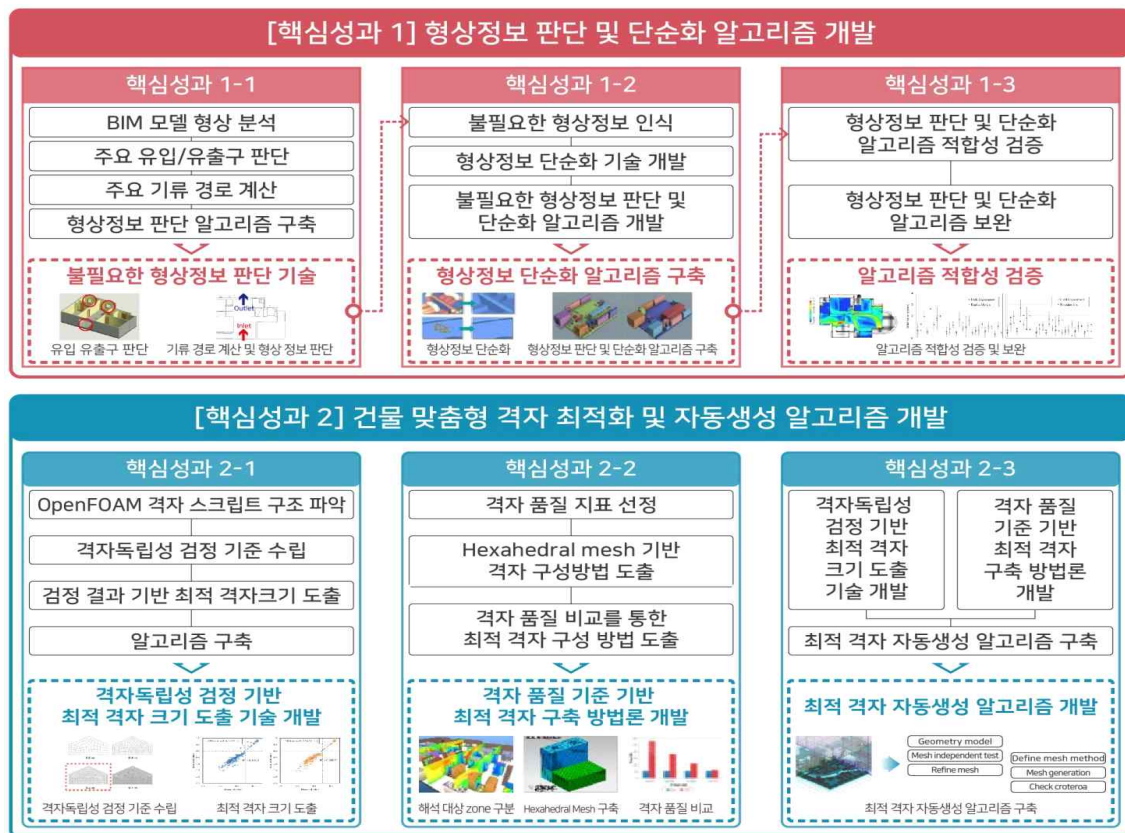


그림 4. 1차 연도 연구목표를 달성하기 위한 연구 프로세스

1-3-2. 2차 연도

(1) 개발 목표

- 주관연구기관(광운대학교 산학협력단) : BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
- 공동연구기관(㈜미래환경플랜건축사사무소) : BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

표 4. 2차 연도 연구개발 목표

구분	기관명	개발목표
주관	광운대학교 산학협력단	■ 핵심성과3) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발 • 3-1) CFD 모델 입력 요구정보 정의 • 3-2) BIM 형상·속성정보 추출 • 3-3) BIM 추출 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축
공동	(주)미래환경플랜 건축사사무소	■ 핵심성과4) 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발 • 4-1) 개발 알고리즘 통합 • 4-2) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 • 4-3) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 정확도 검증

(2) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(광운대학교 산학협력단)

표 5. 2차 연도 주관연구기관 개발 내용 및 범위 (핵심성과 3)

핵심성과명	세부성과명	개발 내용
BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발	CFD 모델 입력 요구정보 정의	• OpenFOAM 기반 CFD 모델의 주요 기능 분석 • OpenFOAM 기반 CFD 모델의 주요 기능에 따른 입력 요구정보 파악 • 건축 BIM 포함 정보 분석 • CFD 입력 요구정보 중 BIM 모델에서 추출 및 적용 가능한 요구정보 정의
	BIM 형상·속성 정보 추출	• 개방형 BIM(IFC) 정보 저장 구조 분석 • CFD 연계를 위한 BIM 형상정보 추출 방법론 정의 • 속성정보 추출을 위한 BIM 모델 구성부 유형 정의 • BIM 모델 구성재료 및 물성치 추출 방법론 구축 • BIM 모델의 형상·속성정보를 추출하는 알고리즘 개발
	BIM 추출 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축	• 추출된 BIM 형상정보 데이터를 변환하여 CFD 모델 형상정보 데이터에 매칭 • BIM 모델 및 CFD 모델의 부위별 wall type 매칭 • 부위별 구성재료 및 물성치 데이터 변환 및 매칭 • 자동매칭 알고리즘의 매칭 정확도 평가 및 검증

○ 공동연구기관((주)미래환경플랜건축사사무소)

표 6. 2차 연도 공동연구기관 개발 내용 및 범위 (핵심성과 4)

핵심성과명	세부성과명	개발 내용
BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	개발 알고리즘 통합	- 주요 개발 알고리즘의 통합 - 알고리즘을 통해 결정되는 형상 설계, 격자 설계, 경계 조건 설정 외 요소에 대한 OpenFOAM 스크립트 구축
	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	BIM 데이터를 기반으로 개방형 CFD 모델의 전처리 과정을 자동화하는 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 구축
	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 정확도 검증	CFD 상용소프트웨어를 이용하여 분석한 결과와 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈을 이용하여 분석한 결과의 비교 및 이를 반영한 모듈 개선



그림 5. 2차 연도 연구목표를 달성하기 위한 연구 프로세스

2. 연구수행내용 및 성과

2-1. 연구 추진 전략 · 방법 및 추진체계

2-1-1. 연구 추진 전략 · 방법

(1) 연구개발 추진전략

○ 학계 · 산업계와 연계를 통한 기술 정보 수집

- 주관기관의 연구책임자는 현재 건축 분야와 관련된 다양한 국내 학회에 참가하고 있으며, 학술발표 등을 통해 지속적으로 기술 교류를 수행하고 있음. 또한, 일본건축학회, 일본공기조화위생공학회 등에도 참가하여 국외의 선진 기술들을 수집하고 있음. 공동연구기관은 친환경 인증 및 컨설팅 업무를 통해 건축 분야의 다양한 기업들과 기술적 교류를 지속적으로 수행 중임. 이를 통해 국내 · 외에서 연구개발 기술과 관련된 최신 기술 정보를 수집할 전략임.

○ 전문가 네트워크 구성을 통한 개발 기술의 고도화

- 주관기관과 공동기관이 지속적으로 교류하고 있는 학계 및 산업계의 BIM과 CFD 관련 전문가들로 구성된 전문가 네트워크를 구성하여 개발 기술의 고도화를 위한 자문을 얻을 예정임.
- BIM 데이터 CFD 매칭, 개방형 CFD 구조 설계, CFD 모델 격자 최적화 등 기존 학계에서 아직 연구되지 않은 기술들에 대하여 BIM, CFD 전문가들과의 개발 방향을 논의할 예정임.
- 개방형 BIM 전처리 자동화 모듈의 향후 성공적인 사업화를 위하여 산업계에 관련 전문가들과 프로그램 개발 방향 및 기능에 대한 논의를 진행할 예정임.

○ 연구개발 기술의 성능 검증

- 국내 · 외 기술 현황 및 발전 속도에 근거하여 개발 기술의 위치 및 향후 발전 방향을 반영한 개발 기술의 성능 검증을 표 7과 같이 4단계로 설정함.
- 검증 1단계 과정을 통하여 관련 국내 · 외 최신 연구 및 기술 동향을 파악함. 이와 함께 개방형 CFD, BIM-CFD 매칭, 격자 최적화 기술 분야의 향후 발전 방향에 대한 분석을 수행함.
- 검증 2단계 과정에서는 CFD가 건축 분야에 주로 활용되는 실내 기류 분석, 실외 기류 분석을 대상으로 검증을 위한 케이스를 선정함.
- 검증 3단계에서는 주요 상용 CFD SW와의 비교 검증을 통해 개발 기술의 정확성과 신속성을 평가함. 주요 상용 CFD SW 대비 분석 오차율, 동일 해석 조건에 대한 CFD 분석 전과정 작업시간 등을 평가함.
- 검증 4단계에서는 공인 인증시험 평가를 통해 성능 검증 과정의 객관성 확보함.

표 7. 연구 최종성과 검증 계획

단계	주요 검증 계획	상세 내용
1단계	개발 기술의 위치 및 관련 분야의 향후 발전 방향 파악	• 개방형 CFD 및 전처리 자동화 기술과 관련된 국내·외 연구 및 기술의 최신 동향 조사 및 분석 • 개발 기술 관련 분야의 향후 발전 방향 분석 • 기술 동향 및 향후 발전을 고려한 개발 기술의 주요 성능 및 연구 과제의 최종성과 검증 계획 수립
2단계	개발 기술의 검증을 위한 주요 대상 선정	• 개발 기술 및 연구 최종성과 검증을 위한 적정 대상 선정 • CFD 분석이 활용되는 주요 건축 분야를 고려하여, 실내 기류, 실외 기류 분석 대상으로 검증을 위한 케이스를 선정함.
3단계	정확성, 신속성을 고려한 개발 기술의 주요 성능 검증	• 본 연구는 전처리 과정의 자동화 기술의 개발을 통하여 CFD 분석 과정의 신속성을 향상하는 것이 주요 목표임. • 신속성 향상과 함께 기존 상용 CFD SW와의 분석 오차율을 최소화 하여 정확성을 확보하고자 함.
4단계	국가공인 인증시험을 통한 개발 기술 검증의 객관성 확보	• 공인 인증시험 평가로 개발 기술의 성능 검증 및 연구 최종성과 검증의 객관성을 확보함. • 공인 인증시험 평가 대상 성능은 단순화에 의한 분석 정확도, 데이터 매칭의 정확도, CFD 분석 정확도의 3개 항목임.

표 8. 연구 추진전략 및 방법

추진전략	연구 방법
기술 정보 수집	■ 학계·산업계와 연계를 통한 기술 정보 수집 • 주관연구기관을 통하여 국내외의 개발 기술과 관련된 최신기술들을 수집하고 BIM, CFD 학계 전문가들과 기술적 교류를 수행 • 참여기관을 통하여 산업계에서 개발 기술과 관련된 주요 요구 사항이나 기술 정보를 수집하고 해당 실무 분야 전문가들과 기술적 교류를 수행 • 학계·산업계와 지속적인 기술 교류를 통해 개발 기술과 관련된 기술 정보를 수집
전문가 네트워크 구성	■ 전문가 네트워크 구성을 통한 개발 기술의 고도화 • 학계·산업계의 건축, BIM, CFD 전문가들로 구성된 네트워크를 구축하여 개발 기술의 고도화를 위한 논의를 진행 • CFD 모델 격자 최적화 과정에 대하여 각 과정의 우선순위 결정 방법 논의 • 개발 기술의 활용성 제고를 위한 추가 개발 기술 논의
개발 기술 성능 검증	■ 상용 소프트웨어 해석 결과와 비교를 통한 개발 기술의 성능 검증 • 실제 컨설팅 사례를 대상으로 상용 소프트웨어와 개발 기술의 해석 결과를 비교 • 이를 통한 개발 기술의 정확성 및 오류 사항 검토

(2) 연구개발 추진방법



그림 6. 연구개발 수행 절차

가. 주관연구기관: 광운대학교 산학협력단

① (1차 연도) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발

○ 선행 연구 조사를 통한 형상정보 판단 및 단순화 기초 자료 확보

- 기존 국내 및 국외에서 사용되고 있는 형상 단순화 기법에 관한 선행연구 조사를 수행함. 조사된 단순화 기술들을 분석하여 연구개발 기술에 적합한 단순화 방법을 도출함.
- 형상 단순화 방법 도출을 위해 형상 인식(Feature Recognition), 특징형상 변환(Feature Conversion), 메쉬 단순화(Mesh Simplification) 등의 다양한 컴퓨터 공학 분야에서 수행된 관련 연구들을 분석함.

○ 주요 기류 영향 평가를 통한 불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법 선정

- 불필요한 형상정보 판단을 위하여 건축물의 주요 유입구와 유출구에 의해서 발생하는 기류

경로를 CFD를 통해 분석하고 이를 패턴화함.

- 기류에 영향을 주지 않는 형상정보의 특징을 도출하고 이를 단순화 대상으로 지정함. 단순화 방법은 선행 연구에서 적용된 방법 중 기류 영향이 가장 적은 방법을 선정하여 적용함.

○ 형상정보 판단 · 단순화 알고리즘 개발 및 적합성 검증

- 불필요한 형상 정보를 판단하고 이를 단순화하여 분석 대상의 BIM 모델을 수정하는 알고리즘을 개발함. 개발된 알고리즘 적용 유무에 따른 기류 분석 결과를 비교하여 개발 알고리즘의 적합성을 검증하고 개선함.
- CFD 시뮬레이션 결과에 영향을 주지 않는 범위는 형상 단순화 전과 후의 오차가 5% 내외로 정의하며, 해당 오차 범위를 초과할 경우 알고리즘 개선을 수행함.

② (2차 연도) BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발

○ OpenFOAM CFD 구조 및 IFC 구조 분석을 통한 CFD 모델 입력 요구정보 정의

- 본 연구의 최종 개발 소프트웨어는 개방형 CFD 분석 도구인 OpenFOAM을 기반으로 개발하며, 이를 위하여 OpenFOAM의 구조와 주요 입력정보를 분석함.
- 입력 정보인 BIM 모델 또한 개방형 BIM 포맷인 IFC를 기반으로 최종 소프트웨어를 개발하며, 이를 위하여 IFC의 구조를 분석함.
- IFC 구조 및 OpenFOAM 구조 분석을 통해, CFD 모델 생성에 필요한 주요 입력 요구정보를 파악하고 이 중에서 BIM과 CFD가 연계할 수 있는 데이터 종류를 도출함.

○ CFD 매칭을 위한 BIM 형상 및 속성정보 추출 방법 개발

- BIM은 건물의 설계 · 운영 정보를 담기 위한 시스템으로, OpenFOAM과 같은 기존 CFD 프로그램과 파일 포맷이 연동되지 않으며 포함된 데이터 객체에 대한 정의가 상이함. 이를 고려하여 BIM의 정보교환 형식인 IFC로부터 형상 · 속성 정보를 추출하는 방법을 개발함. IFC는 객체 지향적인 구조를 지닌 표준 파일 포맷임. 설계 방식, 소프트웨어 또는 소프트웨어의 개발사와 상관없이 표준 문법에 따라 건물 정보를 저장함.
- IFC에서 형상정보는 글로벌 좌표계와 로컬 좌표계의 조합으로 표현되어 있음. 이에 형상정보의 연계를 위하여 IFC 파일을 분석하여 대상 건축물이 가지는 모든 vertex에 대한 좌표를 추출하는 방법을 개발함.
- 추출한 좌표를 기반으로 1차 연도에 개발한 형상 단순화 알고리즘을 적용하여 형상을 단순화함. 또한, CFD 해석 시 부피를 가지는 벽을 기본적으로 면으로 가정하기 때문에 안목치수를 기준으로 좌표를 추출함.
- IFC 파일의 IFCMATERIAL 엔티티에 포함된 각 부재의 종류를 OpenFOAM의 입력 형식에 맞게 정의한 후 이를 추출하고, 물성치 또한 개방형 CFD 모델의 입력 요구정보에 맞게 데이터를 정의한 후 추출함.

○ BIM 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축

- 데이터 구조 및 정의가 다른 IFC 파일과 OpenFOAM 구조를 연계하기 위하여 BIM 추출 데이터를 CFD 모델에 입력하는 매칭 알고리즘을 구축함.
- BIM 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축을 위해 각 파일이 포함하는 정보의 정의를 일치시키고, 일치하지 않는 경우 변환하여 매칭하는 과정을 수행함.

나. 공동연구기관: (주)미래환경플랜건축사사무소

① (1차 연도) 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발

○ 격자독립성 검정을 기반으로 하는 최적 격자 크기 도출 기술 개발

- CFD 모델 격자 설계 기법의 하나인 격자독립성 검정(Mesh independent test)을 이용하여 분석 대상의 최적 격자 크기를 도출하는 알고리즘을 개발함.
- 효율적인 격자독립성 검정 수행을 위하여 분석 대상의 크기를 고려한 격자 크기 범위를 정의함. 격자 크기 범위 내에서 격자독립성 검정을 수행함. 기초적인 유동 분석을 위한 물리 모델, 난류 모델, 경계 조건 등을 정의하고 이를 이용하여 검정을 수행함.
- 격자 크기 범위 설정, CFD 모델 설계, CFD를 이용한 유동 분석, 최적 격자 크기 도출의 과정을 알고리즘으로 개발함.

○ 격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발

- 최적 격자 크기를 바탕으로 격자 품질 기준을 만족하는 격자 구성 방법을 도출하는 알고리즘을 개발함. 격자 품질 기준은 Aspect ratio, Orthogonal quality 등을 이용함.
- 격자 형상은 Hexahedral mesh를 선정하여 격자망을 구성하며, 이를 위하여 해석 영역의 Zone을 분할하는 로직을 개발함. Hexahedral mesh로 구성이 불가능한 형상에 대해서는 Tetra mesh를 이용하여 격자망을 구성함.
- 해석 영역 Zone 구분, Hexahedral 격자망 구성, 격자 구성에 따른 품질 기준 검증 등의 과정을 알고리즘으로 개발함.

○ 최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발

- 격자독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘과 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘을 통합하여 모듈 개발함. 해당 모듈을 최종 개발 소프트웨어에 탑재함.

② (2차년도) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

○ 개발 알고리즘의 통합 및 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

- 주관기관 및 공동연구기관의 1, 2차 연도 연구결과로 개발된 알고리즘을 통합하여 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈을 개발함.
- 건물 설계 정보와 별도로 분석자가 설정해야 하는 CFD 모델 설계 요소 (난류모델, 중력, 기

체 속성 등)은 보편적으로 사용되는 데이터를 기본값으로 지정했으며, 동시에 사용자가 임의로 설정할 수 있는 UI/UX를 설계하고 적용함.

- 활용성과 유지보수의 용이성을 보장하기 위해 객체지향적 방법으로 개발함. 개발 프로그램은 BIM 모델 해석, 형상 단순화, BIM-CFD 매칭, CFD 모델 출력, UI 모듈로 구성됨. 프로그램의 유지보수, 혹은 후속 연구를 위해 UI 모듈을 제외한 각 모듈의 클래스, 함수 객체를 독립적으로 이용할 수 있음.
- 개발 모듈은 OpenFOAM의 CFD 구조를 활용하기 때문에 상용 소프트웨어에서 분석이 가능한 공기유동, 기체 확산, 온열환경, 풍압, 소음 등 기체 공기역학과 관련된 모든 현상을 분석할 수 있음. 단, 본 연구 기간에서는 우선적으로 공기유동과 온열환경에 대한 분석 기능을 개발하고 성능을 검증함.

○ 상용 소프트웨어의 해석 결과 비교 검증을 통한 개발 모듈 정확도 검증

- 연구개발 최종성과물인 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈의 적합성과 정확도를 검증하기 위하여 상용 소프트웨어를 이용하여 분석한 결과와 비교 검증을 수행함. 이를 통해 개발 기술의 개선점을 도출하고 개선을 수행함.

2-1-2. 연구개발 추진체계

- BIM 및 BIM 연계 연구 전문가/학계: 광운대학교 산학협력단 (주관연구기관)
- 최창호 교수 연구진은 BIM 및 BIM을 연계한 신기술 개발 관련 전문 연구진으로, BIM과 관련된 다수의 연구 과제를 수행하였으며 이와 관련된 학술발표, 논문 실적으로 연구 능력이 검증됨.
 - BIM을 기반으로 하는 신기술 개발 경험이 풍부한 전문가를 연구인력으로 투입함으로써, 국내·외로 아직 수행되지 않은 BIM과 CFD의 심화 연계를 수행함.
- 건축물 공기역학 평가 전문/산업계/수요처: (주)미래환경플랜건축사사무소 (공동연구기관)
- 건물 친환경 인증 및 종합 컨설팅 전문기관으로, CFD를 이용하여 실내 공기질, 온열 환경, 소음 평가 등 공기역학과 관련된 건축물 환경 영향 평가 용역을 다수 수행함.
 - 또한, BIM 정보를 활용한 실내 공기질 평가와 관련된 국가연구 과제를 성공적으로 수행하여 BIM과 CFD 연계에 대한 지식과 경험이 있음.

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술 개발	주관연구책임자 (최창호)외 총 12명

기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	—	—
중견기업	—	—
중소기업	1	7
대 학	1	6
국공립(연)	—	—
출 연 (연)	—	—
기 타	—	—

주관연구기관
광운대학교 산학협력단
참여연구원
주관연구책임자 (최창호)외 4명
담당기술개발내용
- BIM 모델에서 CFD 분석결과에 영향을 주지 않는 형상정보를 판단하고 이를 자동으로 단순화하는 기술 개발 (핵심성과 1) - BIM의 형상 및 속성정보를 개방형 CFD 모델의 입력 변수로 변환 및 매칭하는 기술 개발 (핵심성과 3)

공동연구기관
(주)미래환경플랜건축사사무소
참여연구원
공동연구책임자 (박창영)외 6명
담당기술개발내용
- 분석의 효율성 및 정확성을 고려하여 분석 대상에 적합한 CFD 모델의 격자망을 자동으로 생성하는 기술 개발 (핵심성과 2) - 주요 개발 알고리즘을 통합하여 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 (핵심성과 4)

2-1-3. 연구개발 추진일정

1차 연도																
일련 번호	핵심 성과명	추진 내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	(1) 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발	건축물 형상에 따른 주요 기류 영향 평가													20,000	주관 기관
2		불필요한 형상정보 판단 알고리즘 개발													13,000	
3		형상정보 단순화 방법 선정													9,000	
4		형상정보 단순화 알고리즘 구축													13,000	
5		형상정보 단순화 알고리즘 적합성 검증 및 개선													11,000	
6	(2) 건축물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발	OpenFOAM 격자 스크립트 구조 파악													6,000	공동 기관
7		격자 독립성 검정 기준 및 방법 정의													6,000	
8		격자독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 기술 개발													30,000	
9		Hexahedral mesh 구축을 위한 Zone 구분 방법 정의													30,000	
10		격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘 개발													28,000	
11		최적 격자 자동생성 알고리즘 구축 및 보완													53,000	

2차 연도																
일련 번호	핵심 성과명	추진 내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	(3) BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발	CFD 모델 입력 요구정보 정의													12,000	주관 기관
2		BIM 형상·속성정보 추출 알고리즘 구축													20,000	
3		형상정보 매칭 방법 정의													16,000	
4		구성재료 및 물성치 매칭 방법 정의													20,000	
5		BIM 형상·속성정보 CFD 매칭 알고리즘 구축													25,000	
6		BIM 형상·속성정보 CFD 매칭 알고리즘 정확도 검증 및 개선													5,000	
7	(4) BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	기타 설계 요소 정의													18,000	공동 기관
8		기타 설계 요소 구축 스크립트 개발													35,000	
9		주요 개발 알고리즘 통합													11,000	
10		BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발													71,000	
11		BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 정확도 검증 및 보완													42,000	

2-2. 1차 연도 연구수행내용 및 성과

구분 (연도/ 단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차연도 (2019)	형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발	불필요한 형상정보 판단 및 단순화 방법론 도출	• 건축 BIM의 형상 특성 분석 • 기류나 온열 환경이 CFD 분석에 미치는 영향 분석을 통한 주요 유입 및 유출구 판단 • 주요 기류 경로 계산을 통한 불필요한 형상정보 정의 • 불필요한 형상정보 판단 알고리즘 개발	• Convex Hull 알고리즘을 활용한 형상정보 판단 알고리즘과 단순화 방법론을 구축함. • 연구 수행 결과, 알고리즘의 오차율은 0%로 평가됨.
		형상정보 단순화 알고리즘 구축	• 건축 BIM 정보 중 불필요한 형상의 특성 도출 • 형상의 특성에 따른 단순화 방법론 문헌연구 • 건축 BIM의 불필요한 형상의 특성에 적합한 단순화 방법론 선정 • BIM 형상정보 단순화 알고리즘 개발	• 단순화 순서 정의, 생략 표면 정의, 불리언 연산 등을 통해 단순화 알고리즘을 구축함. • 연구 수행결과, 기존 작업 대비 작업시간이 74.8% 절감되는 것으로 도출됨.
		형상정보 단순화 알고리즘의 적합성 검증	• CFD 시뮬레이션을 통한 형상 단순화 알고리즘 적용에 따른 기류, 온열 환경 분석 결과 비교 • CFD 시뮬레이션 결과에 영향을 주지 않는 범위에서 형상을 단순화하도록 알고리즘 개선	• 형상 단순화 알고리즘을 보완하고 적합성 검증을 수행함. • 연구결과, 모든 모델의 오차율이 4.8% 이하로 도출됨.
	건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발	격자독립성 검정 기반의 최적 격자 크기 도출 기술 개발	• OpenFOAM의 격자 생성 스크립트 구조 파악 • BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 시스템에 적합한 격자 생성 스크립트 구조 구축 • 분석 대상에 적합한 격자독립성 검정 기준 수립 • 격자독립성 검정을 자동으로 수행하는 알고리즘 개발 • 격자독립성 검정 결과에 따른 최적 격자 크기 도출	• 격자 해상도 개념을 활용한 독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘을 구축함. • 연구 수행결과, 기존 작업 대비 작업시간이 41.6% 절감되는 것으로 도출됨.
		격자 품질 기준 기반의 최적 격자 구축 방법론 개발	• 격자독립성 검정으로 도출한 최적 격자 크기를 기반으로 Hexahedral mesh 기반의 격자망 구축 방법론 개발 • 해석 대상 Zone 구분 및 Zone 별 격자 구성 방법론 개발 • Aspect ratio, Orthogonal quality 등 품질 지표 선정 • 격자 품질 지표 비교를 통한 최적 방법론 도출	• 주요 품질 기준을 정의 및 해당 지표를 충족 가능한 육면체 기반의 격자 생성 알고리즘을 구축함. • 연구 수행결과, 기존 작업 대비 작업시간이 80.7% 절감되는 것으로 도출됨.
		최적 격자 자동생성 모듈 구축 기술 개발	• 격자독립성 검정 알고리즘 및 최적 격자 구성 방법론 통합한 격자 자동생성 알고리즘 구축 • 최적 격자 자동생성 스크립트 구축 • 최적 격자 자동생성 알고리즘 정확도 검증	• 독립성 검정 기반, 품질 기준 기반 알고리즘을 통합하여 최적 격자 자동생성 알고리즘을 구축함 • 연구 수행결과, 기존 작업 대비 작업시간이 46.7% 절감되는 것으로 도출됨. • 통합 알고리즘을 기반으로 최적 격자 자동 생성 모듈을 개발하였으며, 이를 통해 기존 대비 작업시간이 81.9% 절감되는 것으로 도출됨.

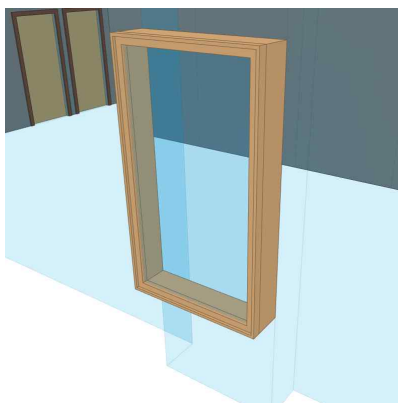
2-2-1. 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발

(1) 연구수행 내용 및 결과

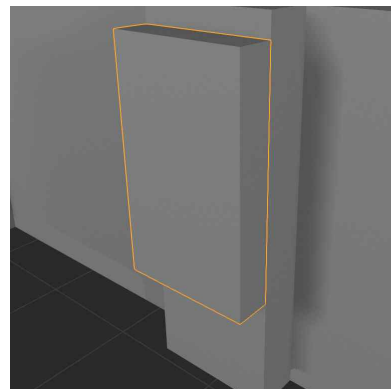
핵심성과 1	형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
단위성과 1-1	불필요한 형상정보 판단 기술 개발

○ BIM 모델 주요 유입·유출구 판단 기술 개발 (성과점검기준표 [중빙 1] 참조)

- CFD를 통한 실내 공기 환경 분석을 위해서는 기류를 형성하는 요소인 공기의 유입구와 유출구의 정보를 모델에 입력해야 함. 실내 기류를 구성하는 요소는 문과 창문을 통한 자연 환기와 공조 설비에 의한 인공적인 기류가 있음. 본 연구에서는 공조 설비를 통한 강제 환기에 비해 유량이 크며 주된 환기 방법에 해당하는 자연 환기의 해석을 목표로 함. 이를 고려하여 문과 창문을 실내 공기역학적 환경 해석의 주요 유입구 및 유출구로 선정함.
- CFD 모델 설계의 자동화 및 표준화를 위해 BIM으로부터 건물 형상정보의 추출 및 단순화 알고리즘을 구현함. BIM의 표준 정보 교환 형식인 IFC (Industry Foundation Classes)로부터 건물 속성 정보를 추출함. 실내 CFD 해석 영역의 대부분을 차지하는 내부 공간의 형상을 IFC의 공간 속성 (IfcSpace)으로부터 추출함.
- 모델의 공기 유입·유출구 정보를 설계하기 위해 IFC로부터 문과 창문을 표현하는 속성인 IfcOpeningElement의 정보를 추출함. 일차적인 형상정보의 단순화를 위해 창문의 프레임 등 세부 속성은 추출하지 않았으며, 문과 창문의 형상을 직육면체와 같은 다면체 형태로 표현 함 (그림 7).
- 문과 창문을 표현하는 IFC의 IfcOpeningElement 속성의 형상정보를 추출함. 추출 시 일차적인 형상 단순화를 위해 프레임 등의 세부 속성은 추출하지 않았으며, 문과 창문의 형상을 직육면체와 같은 다면체로 표현함.



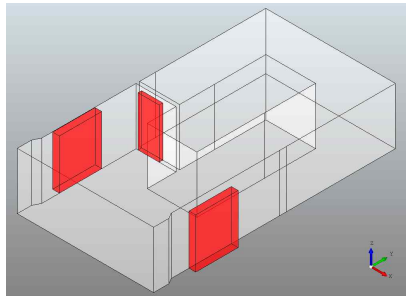
(a) BIM 형상 표현



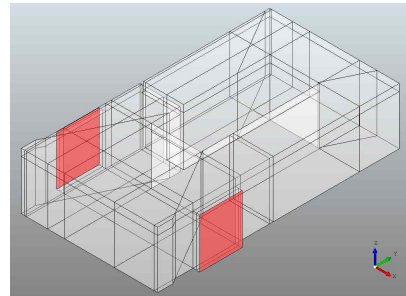
(b) 형상 추출 결과

그림 7. 건물 모델의 단순화된 주요 유입·유출구 형상정보 추출 결과

- 공개 라이브러리로부터 연구 결과의 시험을 위한 BIM 모델을 선정함. 문 혹은 창문이 존재하는 개별 공간을 대상으로 유입·유출구 판단 알고리즘을 시험함. 시험 모델 (Autodesk Academic)의 공간 속성정보를 대상으로 방법론의 정확도를 평가함. 문 혹은 창문이 존재하는 공간 20개를 대상으로 시험을 진행한 결과 오차율 0%를 달성함.



(a) 공간 표면 (흰색)과 opening 표면 (붉은색) 추출 결과



(b) opening 표면 분류 결과

그림 8. CFD 분석을 위한 건물 모델의 표면 분류

○ 유입·유출구에 의한 주요 기류 경로 계산 (성과점검기준표 [중빙 2] 참조)

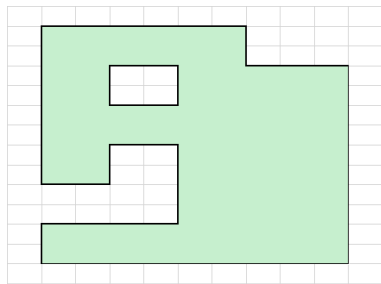
- CFD 모델의 해석을 위해서는 문과 창문의 3차원 형상 중 하나의 표면을 경계조건으로 설정해야 함. 다면체 형태의 문과 창문 형상의 면 (face) 중 해석 공간과 가장 거리가 먼 면을 유출·유입 경계조건 (opening)으로 분류함. 나머지 면 중 접하는 형상이 두 개인 면을 문·창문과 공간의 경계, 즉 내부 면 (interior face)로, 나머지 면을 벽면으로 분류함. 그림 8은 주요 유입·유출구의 표면 분류 결과 예시임. 시험 모델의 공간 중 형상정보 단순화의 대상이며 문 혹은 창문이 존재하는 공간을 20개 선정하여 알고리즘의 정확도를 평가하였으며, 시험 결과 모든 모델의 문과 창문에 대해 주요 기류 경로를 계산하기 위한 표면을 오류 없이 추출함.
- 주요 경로 해석을 위한 CFD 모델의 설계와 해석은 오픈 소스 CFD 소프트웨어인 OpenFOAM을 이용함. 모델의 격자는 직각 혹은 평행한 표면이 대부분인 건물 모델의 특성을 고려하여 육면체 격자 (Hexahedral mesh)로 설계함. 육면체 격자는 사면체 등 타 격자에 비해 수치연산의 오차가 낮으며, 높은 품질과 적은 수의 격자를 기대할 수 있음. 실내 기류에 대한 형상정보 단순화의 영향을 평가하기 위해 모델의 문 중 하나로 일정한 유속의 기류가 유입되는 조건을 가정하고 수치 해석을 시행함. 시험 결과 실내 형상 추출 및 유입·유출구 판단 알고리즘을 실내 기류 환경의 분석에 충분히 적용 가능한 것으로 평가됨. CFD 분석 결과의 예시는 단위성과 1-3의 결과에 서술함.

○ 불필요한 형상정보 판단 알고리즘 구축 (성과점검기준표 [중빙 3] 참조)

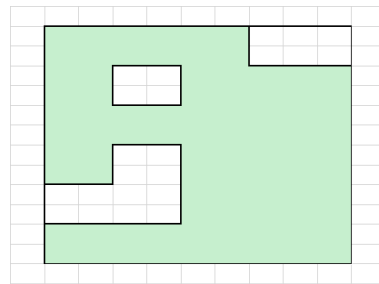
- CFD 분석을 위한 건물 모델의 불필요한 형상정보를 공간 내부 구조와 표면의 두 가지 유형으로 분류하여 판단 및 단순화 알고리즘을 개발함. 내부 구조의 경우 기둥과 같이 모델 외부와

접하는 면이 한정되는 3차원 형상을 대상으로 함. 생략 대상 표면의 선정 과정은 표면 단순화 알고리즘과 동시에 시행되며, 구체적인 방법론은 단위성과 1-2에 서술함.

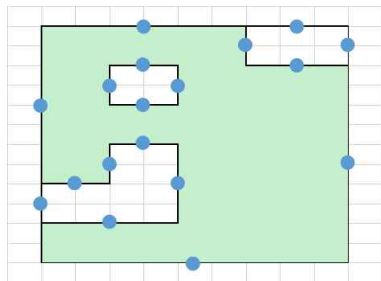
- 내부 구조물 판단 알고리즘은 그림 9와 같음. 내부 구조의 형상을 추출하기 위해 대상 모델을 둘러싸는 버퍼 공간에서 공간 형상을 제외 (boolean cut)하여 후보 공간을 추출함. 후보 공간의 표면 중심점 집합의 convex hull (볼록 껍질) 분석을 통하여 후보 공간 중 내부 구조물 형상을 분류함. 추출된 내부 구조물 형상 중 부피가 분석자가 설정한 생략 기준치 이하인 형상을 불필요한 형상정보로 판단함.
- 시험 모델의 공간 속성 중 내부에 원형 기둥이 있는 20개의 공간을 대상으로 평가한 알고리즘의 오차율은 0%로, 모든 기둥의 속성 정보를 분류하였음. 그림 10은 알고리즘 시험 결과 중 일부이며, 붉은색으로 표시된 형상이 내부 구조로 판단된 형상임.



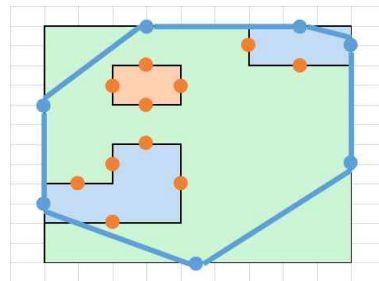
(a) 원본 건물 내부 형상



(b) Bounding box 형성 및 Boolean cut 시행



(c) 모든 면의 중심 좌표 추출



(d) Convex hull 알고리즘 시행 및 내부 구조물 판단

그림 9. 불필요한 형상정보 판단 알고리즘 적용 단계별 형상정보

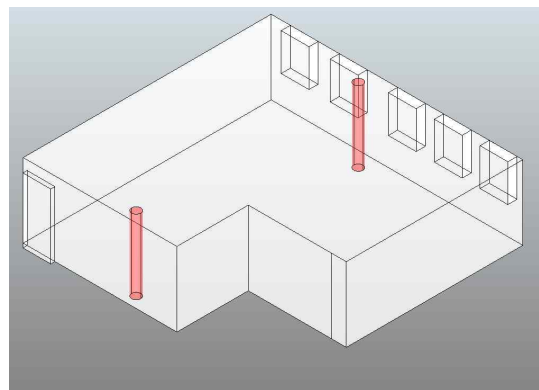
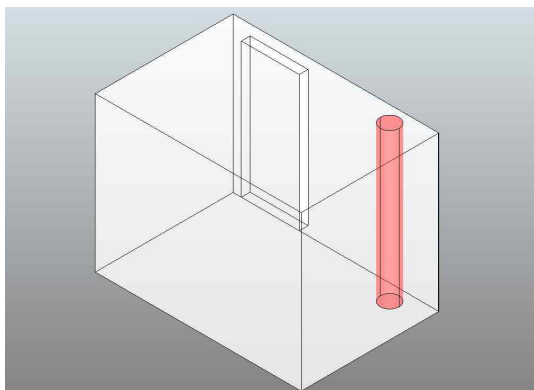
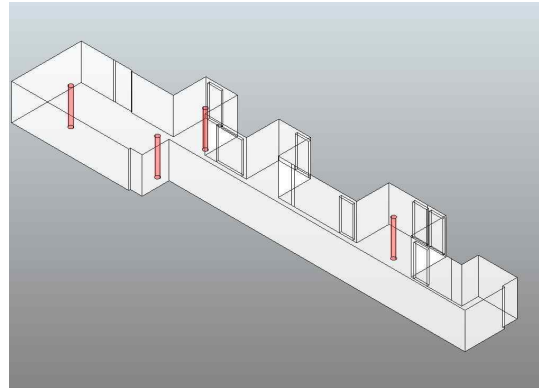
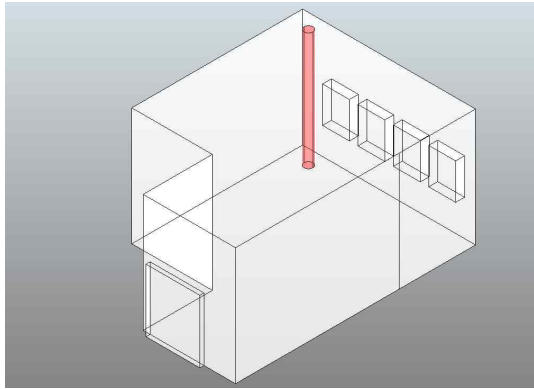


그림 10. 내부 구조물 판단 알고리즘의 결과 예시

핵심성과 1	형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
단위성과 1-2	형상정보 단순화 알고리즘 구축

○ 형상정보 단순화 알고리즘 구축 (성과점검기준표 [중빙 4], [중빙 5] 참조)

- 본 연구의 형상정보 단순화 대상 중 내부 구조의 생략 알고리즘은 형상의 불리언 (boolean) 연산으로 비교적 간단하게 구현할 수 있음. 반면 표면 생략 알고리즘의 경우 모델을 구성하는 표면의 개수가 많으며 생략을 위해 전체 형상의 변환이 필요하므로 형상 판단 및 처리의 비용이 큼. 이를 고려하여 불필요한 표면의 판단과 생략을 동시에 시행하는 알고리즘을 구축함.
- 전체 형상정보 단순화 알고리즘은 단순화 기준 설정, 내부 구조물 생략, 모델의 표면 격자 형성, 표면 생략의 순서로 이루어지며, 순서도는 다음 그림 11과 같음. 개발 알고리즘은 크게 convex hull 알고리즘을 통한 내부 구조물의 판단 및 생략 알고리즘과 세부적인 면의 통합을 통한 표면 단순화 알고리즘으로 구성됨.

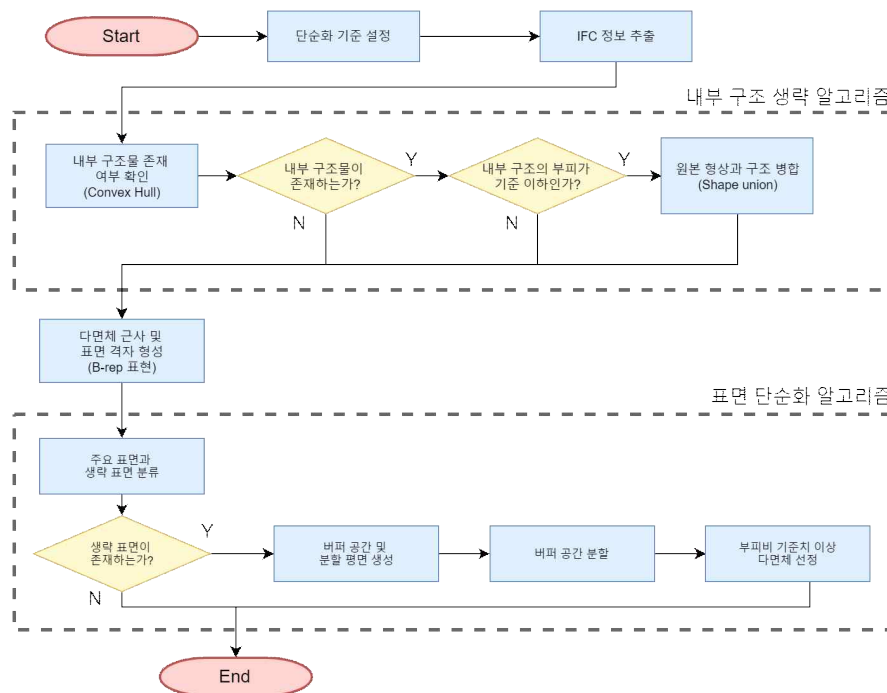
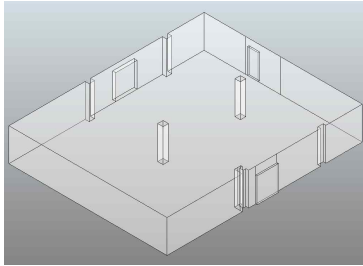


그림 11. 건물 형상정보 단순화 알고리즘의 순서도

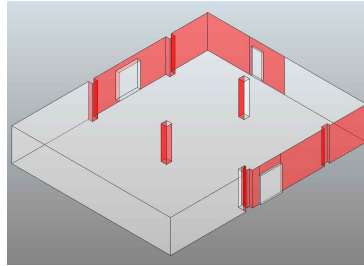
- 표면 단순화 알고리즘은 세부적인 표면이 주요 표면에 통합되는 방법으로 구현됨. 면적이 큰 표면을 모델의 전체적인 형상을 결정하는 주요 표면으로 판단함. 동일한 면적의 표면의 경우 대상과 평행한 다른 면의 면적이 넓은 면을 주요 표면으로 판단하여 단순화된 모델이 직육면체 형상으로 변환되게 함.
- 모델을 둘러싸는 버퍼 공간을 주요 표면을 연장한 평면으로 분할 한 후, 원본 모델과 유사한 다면체를 형성하여 단순화된 모델을 추출함. 그림 12는 표면 생략의 단계에 따른 형상정보의

변화 과정임.

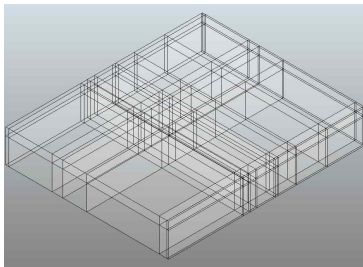
- 형상정보의 단순화 정도는 내부 구조 생략 알고리즘과 표면 생략 알고리즘의 단계에서 각각 제어할 수 있음. 내부 구조 생략 알고리즘의 경우 생략할 내부 구조의 부피 한계를 사용자가 지정할 수 있음. 표면 생략 알고리즘은 주요 표면과 통합되는 표면의 거리 및 각도 한계를 통해 단순화의 정도를 제어할 수 있음.



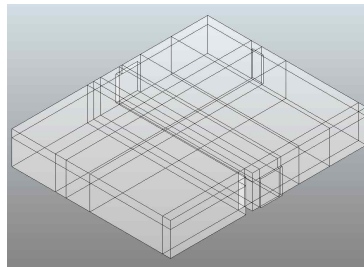
(a) 원본 실내 모델 형상



(b) 주요(흰색) 및 생략(붉은색) 표면 분류

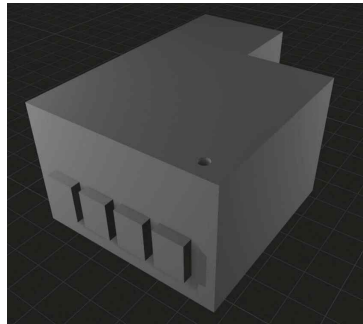


(c) 버퍼 공간의 분할 결과

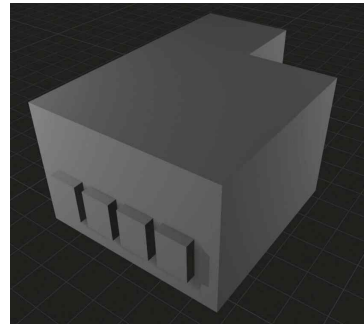


(d) 형상 단순화 결과

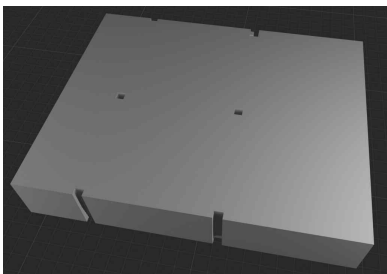
그림 12. 표면 생략 과정 예시



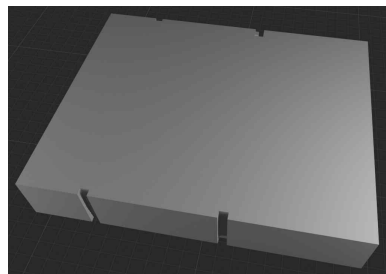
(a) Academic 123 원본 형상



(b) Academic 123 내부 구조 생략 결과



(c) Clinic 2D05 원본 형상

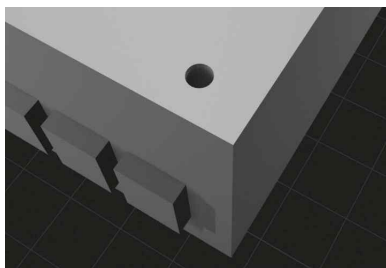


(d) Clinic 2D05 내부 구조 생략 결과

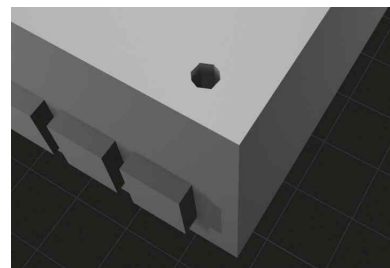
그림 13. Academic 123 모델과 Clinic 2D05 모델의 내부 구조 생략 결과

○ 형상정보 단순화 알고리즘 적용 결과 (성과점검기준표 [중빙 5] 참조)

- 본 연구의 시험 대상 중 내부 구조를 포함한 모델은 두 개로, 각각 원형 기둥 한 개와 사각기둥 두 개가 포함됨. 그림 13은 각 모델의 내부 구조 생략 결과로, 기둥이 모두 생략됨.
- 표면 단순화 알고리즘은 단순화 결과에 지배적인 영향을 끼치는 표면 통합의 거리 기준이 모델 특성 길이의 0.1, 1.0, 10.0배인 조건에서 시험함. 곡면의 형상정보를 단순화하기 위해 표면 통합의 각도 한계는 30° 로 설정함.
- 그림 14는 Academic 123 모델의 표면 생략 알고리즘 시행 결과임. 표면 생략의 길이 기준 0.1로 단순화한 결과 정이십사각형 기둥으로 근사 표현되었던 원기둥이 육각기둥으로 단순화되었음. 거리 기준이 기둥의 지름과 기둥과 벽면 간 거리를 초과하면 기둥 형상이 모두 생략됨. 그림 15는 Clinic 1E24 모델의 표면 생략 거리 기준에 따른 형상 변화임. 거리 기준이 증가함에 따라 벽면의 복잡한 형상이 점진적으로 평면으로 변환됨.

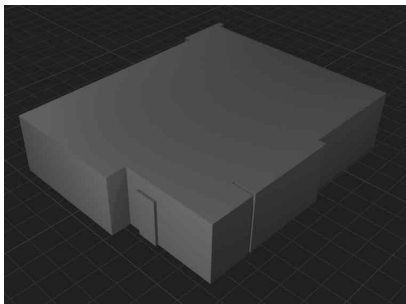


(a) 원본 모델

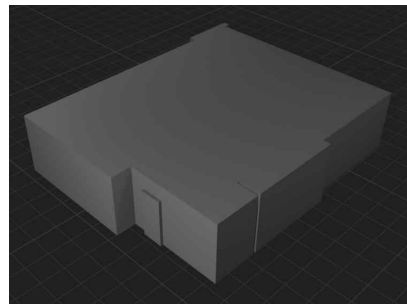


(b) 표면 생략 모델 (길이 기준 0.1)

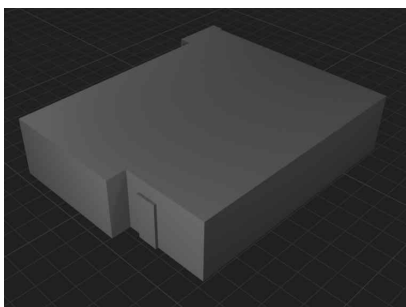
그림 14. Academic 123 모델의 원형 기둥 단순화 결과



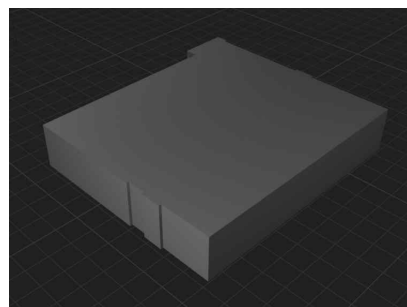
(a) 원본 모델



(b) 표면 생략 거리 기준 0.1



(c) 표면 생략 거리 기준 1.0



(d) 표면 생략 거리 기준 10.0

그림 15. Clinic 1E24 모델의 단순화 기준에 따른 형상정보 단순화 결과

- CFD 모델의 형상 설계를 위해 본 연구에서 개발한 형상정보 추출, 단순화, CFD 형식으로의 변환 알고리즘의 시간을 측정함. 측정 결과, Conference B147 모델은 평균 303.0초, 나머지 모델은 평균 11.9초가 소요됨. 원본 모델의 표면 개수가 적을수록, 표면 생략 거리 기준이 클수록 변환 시간이 짧은 경향이 관측됨.
- 실무자 의견에 따라 종래의 실내 CFD 모델의 형상 설계에 소요되는 최소 시간을 30분으로 가정한 결과 형상 단순화 알고리즘을 통해 작업시간을 최소 74.8% (Conference B147, 거리 기준 0.1)에서 최대 99.7% (Clinic 1E24, 거리 기준 10.0) 단축하여 1, 2차년도 성능지표를 충족함.

핵심성과 1	형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 개발
단위성과 1-3	형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 적합성 검증

○ 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 적합성 검증 (성과점검기준표 [증빙 6] 참조)

- 건물 실내 모델의 형상정보 단순화 정도에 따라 CFD 해석 결과의 차이를 분석하여 형상정보 단순화 알고리즘의 적합성을 평가함. 시험을 위한 CFD 모델의 설계 방법은 단위성과 1-1과 같음. 형상 단순화 알고리즘의 적용 결과는 주로 표면 단순화 알고리즘의 변수인 표면 생략의 거리 기준에 좌우됨. 모델 간 비교를 위하여 표면 생략 거리 기준은 대상 모델의 유체역학적 특성을 대표하는 특성 길이로 표준화하여 적용함.
- 그림 16은 표면 단순화 알고리즘의 적용에 따른 Clinic 1E24 모델의 내부 유동장 변화임. 원본 모델의 경우 벽면이 평행하지 않은 면들로 구성되어 있으며, 상단에 내벽이 존재함. 전체적으로 시계방향의 유동이 형성되고 있으나, 내벽에 의해 오른쪽 위에 반시계방향의 와류가 존재함. 반면 거리 기준 10.0으로 단순화한 모델의 경우 직육면체에 가까운 형상을 띄고 있음. 모델 전체 영역에 더욱 단순한 시계방향의 유동장이 형성됨.

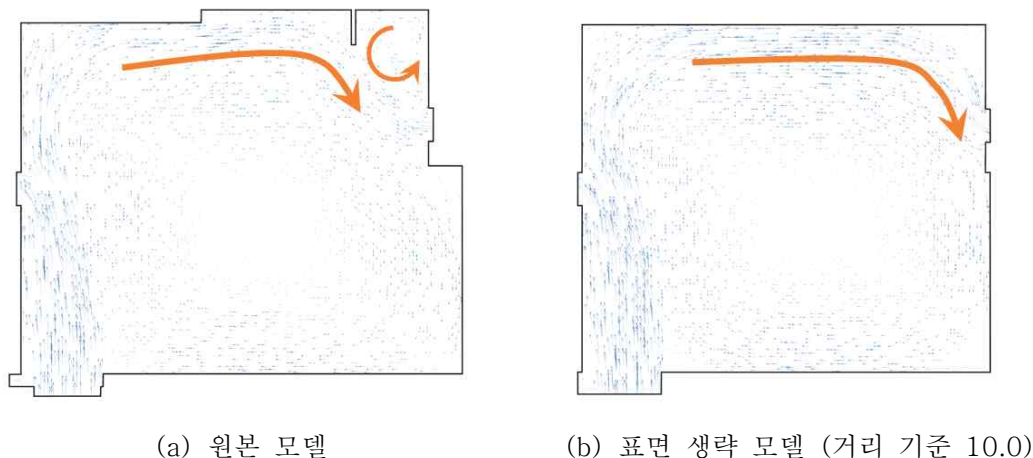


그림 16. 형상정보 단순화에 따른 Clinic 1E24 모델의 내부 기류 해석 결과

- 표 9는 표면 생략의 거리에 따라 단순화된 모델의 유동장과 원본 모델의 유동장을 비교한 결과임. 모든 모델에서 표면 생략의 거리가 증가함에 따라 오차가 증가하는 경향이 관측되었음. Academic 123 모델을 제외한 모든 모델에서 본 연구의 최종 개발 목표치인 오차 7% 이하의 단순화 조건이 존재함.
- Academic 123 모델의 경우 다수의 표면으로 구성된 원기둥이 공기의 유출구 인근에 있기 때문에 CFD 분석 결과에 대한 표면 단순화의 영향이 큰 것으로 분석됨. 표면 생략의 거리 기준과 각도 기준을 세분화한 시험을 통해 원형 형상의 최적 표면 생략 기준을 도출할 수 있을 것으로 기대됨.

표 9. 표면 생략의 거리 기준별 유속의 MAE (unit: m/s) 및 상대오차

표면 생략 거리 기준	Academic 123		Clinic 2D05		Clinic 1E24		Conference B147	
	MAE	상대오차	MAE	상대오차	MAE	상대오차	MAE	상대오차
0.1	2.06e-02	6.2%	1.59e-04	0.3%	7.74e-04	0.2%	2.44e-04	0.3%
0.5	1.77e-02	5.3%	5.11e-04	0.9%	2.98e-02	8.1%	1.59e-03	4.3%
1.0	8.56e-02	25.7%	1.50e-03	2.7%	4.64e-02	12.6%	3.95e-03	2.2%
5.0	1.90e-02	5.7%	2.09e-03	3.8%	4.56e-02	14.3%	2.08e-03	12.0%
10.0	2.10e-02	6.3%	1.36e-02	24.7%	5.28e-02	26.7%	9.97e-03	21.1%

- 내부 구조물 생략 알고리즘의 적용 결과는 내부에 원기둥이 존재하는 Academic 123 모델을 대상으로 평가함. 표 10은 내부 원기둥을 제거한 Academic 123 모델의 표면 생략 거리 기준에 따른 CFD 해석 결과임. 거리 기준 10.0의 경우 5.6%로 가장 큰 오차가 발생하였음. 과도한 표면 통합의 허용 거리 기준으로 인해 실내 모델의 벽면이 문과 창문의 표면에 통합된 결과로 분석됨.
- 거리 기준 10.0을 제외한 나머지 모델의 형상은 동일하였으며, 상대오차는 모두 1.2%로 본 연구의 목표를 충족함. 복잡한 표면을 지닌 원기둥이 제외됨에 따라 수치 해석을 위한 격자의 품질이 개선되었기 때문으로 분석됨. 모든 테스트 모델에 대해 1차년도 성능지표인 오차 7% 미만 조건을 충족하는 형상 단순화 조건이 존재함.

표 10. 기둥을 생략한 Academic 123 모델의 표면 생략 거리 기준별 유속 변화

표면 생략 거리 기준	결정계수	MAE (m/s)	상대오차
0.1	0.9982	4.00e-03	1.2%
0.5	0.9982	4.05e-03	1.2%
1.0	0.9982	4.09e-03	1.2%
5.0	0.9982	4.19e-03	1.2%
10.0	0.9878	1.88e-02	5.6%

○ 형상정보 판단 및 단순화 알고리즘 보완 (성과점검기준표 [증빙 7] 참조)

- 개발한 형상 단순화 알고리즘의 시험 결과, 표면 생략 알고리즘의 시행 부분에서 메모리 점유율과 연산 부하가 극심한 것으로 평가됨. 이를 보완하고 형상 변환의 수치적 오류를 개선하기 위해, 버퍼 공간의 생성과 분할 프로세스를 보완함.
- 유사 표면 판단 알고리즘을 거쳐 선정된 주요 표면은 버퍼 공간을 분할하는데 적용됨. 분할된 버퍼 공간의 조각 다면체 (solid)는 단순화된 형상을 구성하는 기반이 됨. 기존 알고리즘은 원본 형상을 둘러싸는 최소 크기의 직육면체, 즉 Bounding box로 구성하였음. 그러나 Bounding box의 생성 시 그림 17와 같은 문제가 발생할 수 있음.
- 그림 17의 원본 형상 (첫째 줄의 녹색 형상)의 표면 분류 결과, 최상단의 표면이 생략 대상 표면으로 평가됨 (점선). 그러나 버퍼 공간을 Bounding box로 설정한 경우, 생략 대상 표면

이 버퍼 공간의 표면에 포함되기 때문에 제거될 수 없음 (그림 17(a)). 이를 개선하기 위해선 버퍼 공간을 Bounding box를 포함하는 입체 (solid)로 생성해야 함 (그림 17(b)). 따라서 Bounding box와 중심이 동일하며 각 차원 방향으로 길이가 2배인 입체로 버퍼 공간을 형성하도록 알고리즘을 수정함.

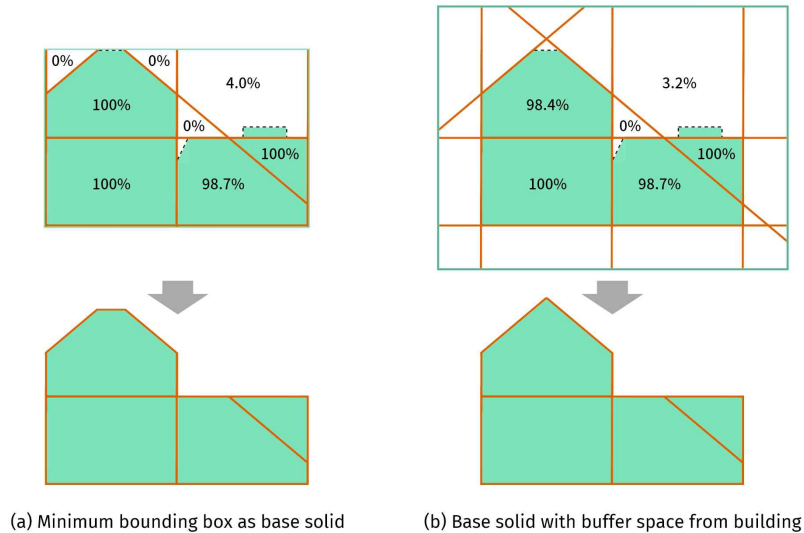


그림 17. 버퍼 공간의 크기에 따른 형상 단순화 결과

- 표면 생략 알고리즘에서 가장 많은 연산 부하를 차지하는 단계는 버퍼 공간을 주요 표면으로 분할하는 과정이었음. 알고리즘의 시험 결과, 주요 표면이 약 20개를 초과하는 경우 형상을 분할하는 수치 연산 과정에서 프로세서의 메모리를 과도하게 소모하고 실행 시간이 급증하는 현상이 발생함. 연산 효율을 개선하기 위해, 변경된 알고리즘은 주요 표면의 개수가 20개를 초과하는 경우 버퍼 공간을 주요 표면의 목록에 따라 순차적으로 분할함. 이를 통해 프로세서에 과도한 부하를 유발한 병목 현상을 제거하고 알고리즘의 실행 속도를 개선함.
- 또한, 버퍼 공간의 분할과 선택된 입체의 통합 과정에서 수치적 오류의 발생을 예방하기 위해, 형상 단순화의 최종 단계로서 CAD 데이터의 오류 보정 알고리즘 단계를 추가함.
- 개선된 표면 생략 알고리즘의 오차를 평가하기 위해 알고리즘의 적용 여부에 따른 CFD 분석 결과를 비교함. 검증 대상은 단순화 알고리즘의 적합성 검증 대상과 동일함. 표 11은 단순화된 모델의 CFD 시뮬레이션 오차를 평가한 결과임. 표면 생략의 거리 기준은 형상 변환의 오류를 유발하지 않는 적정 변환 기준으로 평가된 0.5로 설정함 (박관용 et al., 2019).
- **평가 결과 모든 시험 모델의 단순화에 따른 상대 오차가 5% 미만으로 평가됨.** 오류 보정 알고리즘을 추가함으로써 형상 변환의 오류(CFD 연산의 오차 원인)가 감소한 것으로 판단됨.

표 11. 단순화된 모델의 CFD 시뮬레이션 오차 평가 결과

Academic 123	Clinic 2D05	Clinic 1E24	Conference B147
4.8%	1.0%	3.1%	2.4%

(2) 연구개발 성과

(가) 기술적 성과

① 기술 수준 및 기술 개발 성과

○ 건물 모델의 환경 평가 요소 자동 인식 알고리즘 개발 (성과점검기준표 [중병 1, 3])

- 자연환기를 하는 실내 환경의 평가에 필수적인 주요 유입·유출구를 판단하는 기술을 개발함.
- CFD 해석 시 과도한 연산 부하와 수치 오차를 경감하기 위해 일정 부피 이하의 내부 구조물을 생략해야 함. 이러한 불필요한 형상정보를 건물의 기하학적 정보를 기반으로 자동 인식하는 기술을 개발함.
- 공개 라이브러리로부터 획득한 BIM 모델을 대상으로 시험한 결과, 유입·유출구, 불필요한 형상정보 판단 알고리즘 모두 오차율 0%를 달성.

○ 자동 형상 단순화 알고리즘을 통해 CFD 모델 설계 시간 74.8% 이상 절감 (성과점검기준표 [중병 5])

- 단위성과 1-2의 형상정보 단순화 알고리즘을 통해 BIM 형상정보의 전처리 방법을 제안함.
- 본 연구에서 개발한 형상정보 단순화 알고리즘을 통해 객관적인 기준에 따라 자동 형상 전처리를 가능.
- 실내 CFD 모델의 형상 설계·전처리에는 최소 30분이 소요됨. 알고리즘 실행 시간 평가 결과, 형상 단순화 알고리즘을 통해 설계·전처리 시간을 74.8%-99.7% 절감할 수 있음.

○ CFD 시뮬레이션의 오차 5% 미만 달성 (성과점검기준표 [중병 6, 7])

- 개발한 형상 단순화 알고리즘의 적용 여부에 따라 CFD 시뮬레이션을 시행하고 오차를 평가함.
- 불필요한 형상정보로 평가된 공간 내부의 기둥과 세부 표면은 실내 기류에 유의한 영향을 미치지 않음.
- CFD 시뮬레이션 결과 단순화된 모델과 원본 모델의 공기 유속 간 결정계수는 0.947 이상, 상대오차는 4.8% 이하로 평가됨.

○ (2차 연도 개선) 형상 단순화 작업시간 83.1% 절감 (성과점검기준표 [중병 30])

- 2차 연도 단위성과 4-2의 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발을 통해 형상 최적화(단순화)에 소요되는 작업시간을 대폭 절감함.
- 기존 상용 CFD SW를 이용하여 BIM 파일로부터 CFD 시뮬레이션에 최적화된 형상 모델 설계에 필요한 총 작업시간과 본 연구개발 기술을 이용할 때의 작업시간을 측정하여 절감률을

평가함.

- 작업시간 측정을 위한 건축물 대상은 그림 25와 같이 2가지 건축물 BIM 모델을 이용함. 파일럿 테스트를 통해 실무진별로 작업시간을 측정하여 절감률을 산정함.
- Case 별로 최적격자 구축에 소요된 작업시간 절감률은 아래 표 12와 같음. Case 1, 2 모두 70% 이상의 작업시간 절감이 되었으며, 평균 83.1%의 작업시간이 절감됨.
- 따라서, 본 연구개발 모듈은 기존 상용 SW를 이용하는 방법 대비 평균 약 83.1%의 작업시간이 절감 가능한 것으로 평가됨. 따라서, 주요성능지표 목표치(형상 단순화 작업시간 기존 대비 70% 절감)를 달성함.

표 12. 연구개발 모듈의 형상 단순화 작업시간 절감률 평가

작업	실무진별 작업시간 절감률 (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Case 1	92.6	94.2	93.9	94.9	95.1	91.2	92.1	94.5
Case 2	73.8	72.8	74.1	73.0	70.4	72.6	72.2	72.5
평균	83.1%							

○ (2차 연도) 단순화에 의한 분석 정확도 오차 1.0% 이하 (성과점검기준표 [증빙 33])

- TTA 공인 인증시험을 통해 개발 모듈의 단순화에 의한 분석 정확도 성능을 평가함. 형상 단순화 전후의 시뮬레이션 오차율을 평가함.
- TTA 공인 인증시험 결과, 단순화에 의한 분석 정확도는 평균 오차율 0.4%, 최대 오차율 1.0%로 도출됨. 따라서 최대 오차 1.0% 이하로 단순화에 의한 분석 정확도가 평가됨.
- 따라서, 주요성능지표 목표치 오차 5% 이하를 달성함.

② 연구 실적물

○ KCI 논문 1편 (성과증빙 보고서 [증빙 34])

– 형상 단순화 알고리즘과 관련하여 KCI 저널에 논문 게재 1건을 달성함.



실내 CFD 해석을 위한 건물 형상 단순화 알고리즘 개발

박관용¹ · 김창민¹ · 최창호² · 박창영^{1*}

¹미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소, ²광운대학교 건축공학과

Development of 3D Building Simplification Method for Computational Fluid Dynamics Analysis

Park, Gwan-Yong¹ · Kim, Chang-Min¹ · Choi, Chang-Ho² · Park, Chang-Young^{1*}

¹Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan Architects, Seoul, Korea

²Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

*Corresponding author: Park, Chang-Young, Tel: +82-2-972-5645, E-mail: cypark@mirplan.co.kr

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis had been generalized for indoor environmental evaluation. Simplification of target model's geographical information is crucial for numerical simulation as it determines the accuracy and cost of the analysis. Previous studies on building simplification are not suited for numerical simulation as they were aimed for visualization. Geography simplification method was developed by excluding minor faces. The applicability of the method on CFD analysis was evaluated considering number of meshes and air speed error. The complexity and computational cost of the CFD model were reduced as simplified. The error of airflow was controlled from 0.001 to 0.099 m/s by the threshold of simplification. Despite the possibility of error on curved surface or non-convex region, the simplification algorithm was expected to be effective in practical numerical simulation.

주요어 : 빌딩 정보 모델링, 수치해석, 전산유체역학, 형상 단순화

Keywords : Building Information Modeling, Numerical Analysis, Computational Fluid Dynamics, 3D Geography Simplification

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2019 October, 13(5): 417-429
<https://doi.org/10.22696/jkiebs.20190036>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: October 7, 2019
Revised: October 29, 2019
Accepted: October 29, 2019

© 2019 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

현대인의 실내 생활 시간이 증가함에 따라 채실자의 쾌적도, 오염물질의 이송, 에너지 효율을 결정하는 실내 공기 환경의 중요성이 강조되고 있다. 실내 공기 환경의 제어를 위하여 공조 시스템의 설계를 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통한 기류의 해석이 일반화되었다(Nielsen, 2015). CFD는 유체의 거동과 관련된 물리 및 화학적 문제의 수치해석 방법으로, 건물 실내 기류 해석에 가장 활용도와 정확도가 높은 도구로 평가된다(Zhao et al., 2018).

CFD 해석을 위해선 대상 모델의 형상 및 격자 설계가 선행되어야 한다. 형상이 복잡한 영역의 CFD 해석을 위해선 세밀한 격자 설계가 필요하나, 이는 곧 격자의 개수와 수치 연산 비

후기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152000-01).

References

1. Baig, S.U., Rahman, A.A. (2013). A three-step strategy for generalization of 3D building models based on CityGML specifications. *GeoJournal*, 78(6), 1013-1020.
2. Chen, Q., Srebric, J. (2002). A Procedure for Verification, Validation, and Reporting of Indoor Environment CFD Analyses. *HVAC&R Research*, 8(2), 201-216. <https://doi.org/10.1080/10789669.2002.10391437>.
3. Chen, Y.-C., Lin, B.-Y., Lin, C.-H. (2017). Consistent Roof Geometry Encoding for 3D Building Model Retrieval Using Airborne LiDAR Point Clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), 269. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090269>.
4. Hefny, M.M., Ooka, R. (2009). CFD analysis of pollutant dispersion around buildings: Effect of cell geometry. *Building and Environment*, 44(8), 1699-1706. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.010>.
5. Ito, K., Inthavong, K., Kurabuchi, T., Ueda, T., Endo, T., Omori, T., Ono, H., Kato, S., Sakai, K., Suwa, Y., Matsumoto, H., Yoshino, H., Zhang, W., Tu, J. (2015). CFD benchmark tests for indoor environmental problems: Part 1 isothermal/non-isothermal flow in 2D and 3D room model. *International Journal of Architectural Engineering Technology*, 2(1), 1-22.
6. Kada, M. (2006). 3D building generalization based on half-space modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(2), 58-64.
7. Li, X., Yan, Y., Tu, J. (2015). The simplification of computer simulated persons (CSPs) in CFD models of occupied indoor spaces. *Building and Environment*, 93, 155-164.
8. Nielsen, P.V. (2015). Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*, 91, 78-90.
9. Russo, J.S., Khalifa, H.E. (2010). CFD assessment of intake fraction in the indoor environment. *Building and Environment*, 45(9), 1968-1975.
10. Sørensen, D.N., Nielsen, P.V. (2003). Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air*, 13(1), 2-17.
11. Srebric, J., Vukovic, V., He, G., Yang, X. (2008). CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments. *Building and Environment*, 43(3), 294-303.
12. Yan, Y., Li, X., Yang, L., Tu, J. (2016). Evaluation of manikin simplification methods for CFD simulations in occupied indoor environments. *Energy and Buildings*, 127, 611-626.

○ SW 등록 1건

- 형상 단순화 알고리즘을 구현한 모듈에 대하여 SW 등록 1건을 달성함.

제	C-2019-034119	호
---	---------------	---



저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	BIM(건물정보모델링) 형상 추출 및 단순화 소프트웨어
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	광운대학교 산학협력단 서울특별시 노원구 광운로
4. 생년월일(법인등록번호)	260171-0004099
5. 창작연월일	2019년11월14일
6. 공표연월일	2019년11월14일
7. 등록연월일	2019년11월19일
8. 등록사항	저작자 : 광운대학교 산학협력단, 창작 : 2019.11.14, 공표 : 2019.11.14

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2019년 11월 20일

한국저작권위원회



(나) 경제적 성과

① 생산성 향상

○ 형상 전처리 작업시간 74.8% 절감을 통한 건물 CFD 분석의 생산성 향상

- 기존의 CFD 모델의 형상 설계, 전처리 과정은 분석자가 직접 수행해야 했음. 시뮬레이션과 격자 품질 기준에 따라 형상 전처리, 격자 설계, 시뮬레이션을 반복해야 함.
- 반면 본 연구에서 개발한 형상의 추출과 전처리 알고리즘을 적용하면 형상 전처리 시간을 약 75% 가량 절감할 수 있음. 또한, 형상 전처리 전과정이 자동화되어 작업 효율을 획기적으로 개선되고 이를 통해 건물 CFD 분석의 생산성이 증대됨.
- 건물 CFD 시뮬레이션의 생산성 향상을 통해 건축 환경평가·컨설팅 산업을 활성화할 수 있을 것으로 기대됨.

② 관련 산업 기여

○ 건물 공기 환경평가의 전문화

- CFD 모델의 시뮬레이션을 위해선 복잡한 원본 형상의 단순화 과정을 통해 연산 부하와 수치 오류 가능성을 낮춰야 함. 기존 CFD 모델의 형상 단순화는 통일된 기준 없이 분석자의 자의적 기준으로 행해짐. 이로 인해 건물 CFD 시뮬레이션의 정확도가 분석자의 개인적 경험과 실력에 좌우됨.
- 본 연구의 개발기술은 형상의 부피, 각도, 거리와 같은 정량적 기준을 통해 단순화할 요소를 구분함. 객관적이고 일관적인 알고리즘을 통해 인적 오류 가능성을 최소화하고 CFD 분석 과정을 전문화할 수 있음.
- 또한, 개발기술은 거리, 부피 기준을 통해 형상 단순화의 정도를 제어 가능함. 이를 통해 가용 연산 자원, 목표 정확도, 형상의 특성 등 환경 조건을 고려한 최적 단순화 조건을 분석할 수 있음.

2-2-2. 건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발

(1) 연구수행 내용 및 결과

핵심성과 2	건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발
단위성과 2-1	격자독립성 검증 기반 최적 격자 크기 도출 기술 개발

○ OpenFOAM 격자 스크립트 구조 파악 (성과점검기준표 [증빙 8] 참조)

- 개방형 전산유체역학 분석 도구인 OpenFOAM을 활용한 격자 자동생성 기술 개발을 위하여 OpenFOAM에서 사용 가능한 격자 생성 스크립트의 종류와 특징을 우선적으로 파악함.
- 주요 격자 생성 스크립트는 blockMesh, snappyHexMesh, cfMesh 이며, 각 스크립트의 장, 단점을 분석한 결과는 아래 표 13과 같음.
- 3가지 주요 격자 생성 스크립트 중, 육면체 기반의 격자를 간단한 설정과 빠른 속도로 생성 가능하고 자동화 알고리즘 개발이 용이한 cfMesh를 본 연구의 격자 생성 도구로 선정함.

표 13. OpenFOAM 주요 격자 생성 스크립트 분석

생성 도구	장점	단점
blockMesh	• 격자 생성의 원리 및 방법이 간단함. • 축, 선분별로 격자의 확장률을 지정 가능.	• 격자 설계를 위한 형상정보를 사용자가 수기로 직접 입력해야 함. • 다른 도구와 달리 형상 파일을 활용하지 못하여 반드시 형상정보 추출 과정이 요구됨. • 복잡한 형상의 경우 격자 생성이 어려움.
snappyHexMesh	• 복잡한 형상의 격자 설계가 용이함. • castellate 단계 이후 보존할 격자의 방향을 설정 가능하여 외부 격자의 제거 여부를 선택 가능함.	• 다른 도구와 달리 배경 격자 설계를 필수로 요구하고, 격자 설계를 위한 설정 조건이 다른 도구에 비해 복잡함. • 형상마다 수기 작업이 필요한 격자 설정을 새롭게 정의해야 하므로 자동화 알고리즘 구축에 부적절함.
cfMesh	• 육면체 기반 격자를 기본적으로 구성하며, 다른 도구에 비해 격자 품질이 높음. • 다른 도구에 비해 설정 조건이 간편하며, 복잡한 형상도 격자 생성이 쉬움. • snappyHexMesh 보다 격자 생성 속도가 빠름.	• 외부 기류 분석 시 snappyHexMesh와 달리 외부 영역을 고려한 형상 설계를 요구함. • 적합한 격자 생성 조건을 설정하지 않은 경우, 주요 경계의 형상을 왜곡함.

○ 격자독립성 검증 기준 수립 (성과점검기준표 [증빙 9] 참조)

- 해석 영역을 격자로 구성하여 물리적 현상을 해석하는 전산유체역학에서 해석의 정확성과 경제성을 높이기 위해 적정 격자를 설계하는 것이 가장 중요함.

- 적정 격자를 설계하는 방법으로 격자 품질을 고려한 설계방법과 적정 격자 수를 고려한 설계방법이 있으며, 적정 격자 수와 격자 품질을 모두 충족한 격자 설계가 요구됨. 적정 격자 수를 고려한 격자 설계방법 도출은 본 단위성과 2-1에서 수행하였으며, 격자 품질을 고려한 격자 설계방법 도출은 단위성과 2-2에서 수행함.
- 해석 조건에 적합한 적정 격자 수를 결정하기 위해서는 설계된 격자 수에 따른 해석 결과의 경향 및 정확성 차이를 판단하는 격자독립성 검정을 수행해야 함.
- 격자 독립성 검정은 분석 대상에 대하여 독립성 검정을 수행할 격자 크기 범위를 우선 설정하며, 범위 내의 최소 격자 크기로 설계한 모델의 시뮬레이션 결과와 다른 크기로 설계한 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하여 최적 격자 크기를 선정함.
- 한편, 최적 격자 크기를 결정하는 지표는 보편적으로 최소 격자 크기 모델의 시뮬레이션 결과와 경향성을 판단하는 R^2 와 해석 결과 오차율을 사용하나, 그 기준은 사용자별로 상이하게 적용함.
- 이에 본 연구에서는 최적 격자 크기를 선정하기 위한 검정 기준으로 상대 오차율은 본 연구의 주요 성능지표에서 요구하는 최소 오차율인 5% 이하를 검정 기준으로 설정하였으며, R^2 는 0.95 이상을 적정 기준으로 설정함.

○ 검정 결과 기반 최적 격자 크기 도출 및 알고리즘 구축 (성과점검기준표 [중빙 10], [중빙 11] 참조)

- 격자독립성 검정 기반의 최적 격자 크기 도출 알고리즘을 구축하기 앞서서, 독립성 검정 대상 격자 범위를 설정함. 격자 범위 또한 기존 연구에서는 사용자가 임의로 선택한 범위 내에서 격자 독립성 검정을 수행하기 때문에 같은 형상임에도 다른 최적 격자가 도출될 수 있으며, 이로 인하여 적정 격자 크기의 정확성에 대한 신뢰성이 저하됨.
- 이에 본 연구에서는 적정 격자 크기 도출을 위한 격자 범위를 NUREG-1824에서 화재 시뮬레이션에 적합한 격자 크기로 제시하고 있는 격자 해상도 개념을 적용함.
- NUREG-1824의 격자 해상도 계산식을 건축물 전산유체역학 분석에 적합하게 변경하여 아래와 같이 해상도를 산정함.

$$R = \frac{L}{\max(\delta x, \delta y, \delta z)} \quad (1)$$

여기서, R 은 격자 해상도

L 은 건축물 특성길이 (m)

$\max(\delta x, \delta y, \delta z)$ 는 미소격자의 크기 (m)

- NUREG-1824에서는 격자 해상도 계산에 있어서 화재 특성길이를 사용하는 대신, 본 연구에서 제안하는 계산식에는 유체인 기체의 거동을 분석하기 위해 사용되는 특성길이 개념을 적용하여 건축물 기류 분석에 적합한 격자 해상도를 도출함.

$$L = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (2)$$

여기서, L 은 특성길이 (m)

a 는 대상 공간의 장변 (m)

b 는 대상 공간의 단변 (m)

- NUREG-1824에서는 시뮬레이션에 적합한 격자 해상도 범위로 4~16을 제시하고 있음.
- 한편, 김성찬 등 (2008) 연구에서 격자 해상도가 16보다 큰 조건에서도 격자 독립성이 확인되었으며, 해상도 범위 20~25에서도 격자의 독립성을 확보함과 동시에 다양한 조건변화에 대한 수치해석 과정에 적합한 것으로 도출됨.
- 이에 본 연구에서는 적정 격자 해상도 범위를 4~25로 설정하여 독립성 검정을 수행함.
- 격자 해상도 정의와 함께 전산유체역학 해석 결과에 중요한 인자인 난류 에너지, 난류 소멸률의 난류 파라미터를 입력 조건에 최적화된 값으로 자동 설정하는 알고리즘을 구현함.
- 이를 위하여 각 파라미터 계산식을 알고리즘화하였으며, 격자 독립성 검정을 자동으로 수행하여도 연산에 오류가 발생하지 않도록 설정하였음.
- 최종적으로, 격자 독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘을 그림 18과 같이 구축함. 적정 크기를 도출하기 위한 검정 기준은 성과점검기준표 [중빙 9]에서 도출한 기준을 적용하였음.

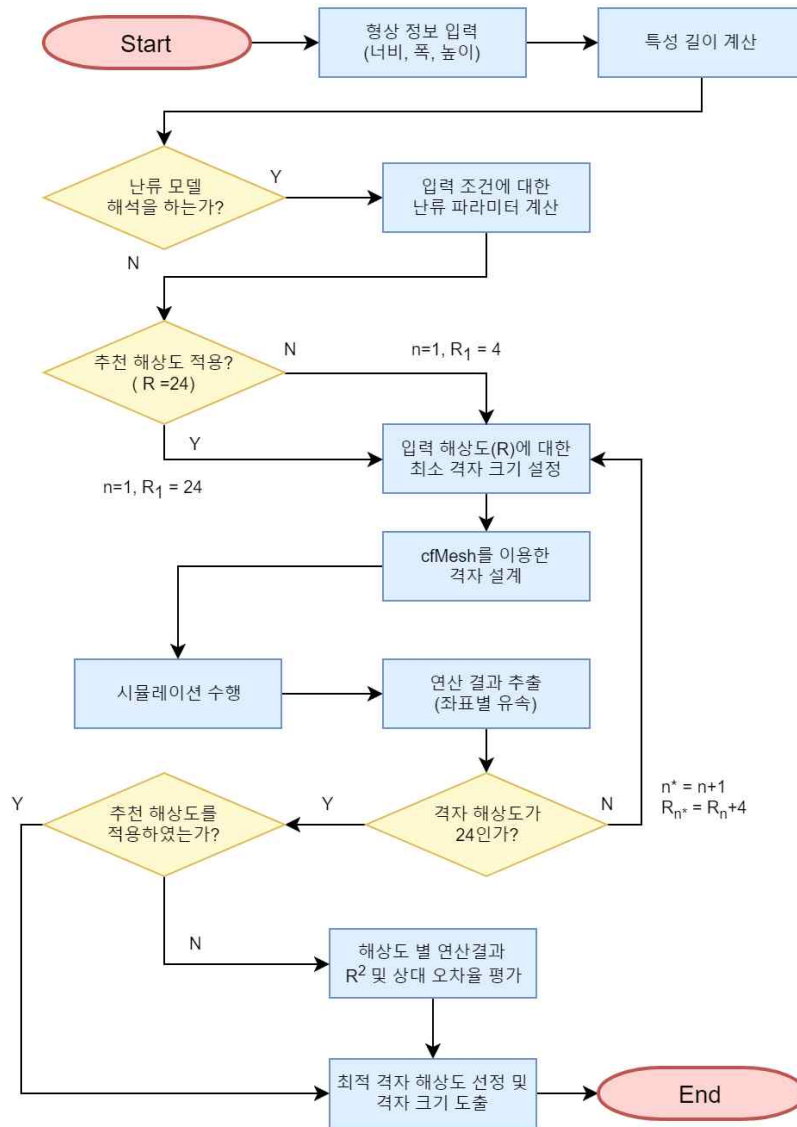
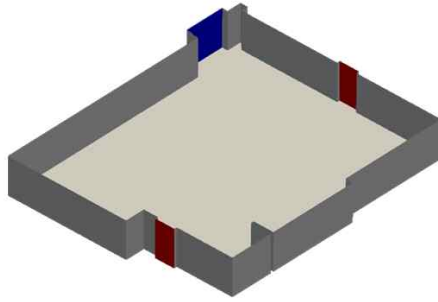
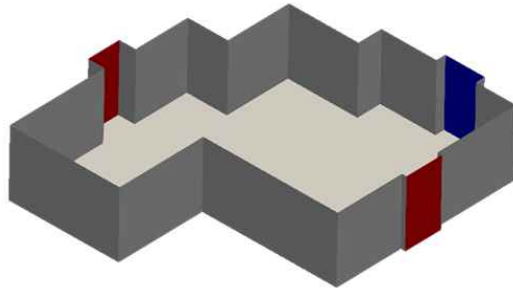


그림 18. 격자 독립성 검정 기반 최적 격자 크기 자동 도출 알고리즘 구축

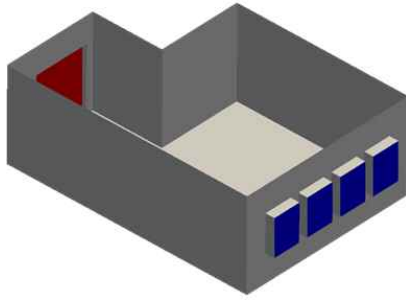
- 알고리즘의 적합성을 평가하고, 적정 격자 해상도 크기를 도출하기 위하여 알고리즘 테스트를 수행하였음. 그림 19와 같은 3가지 건축물 형상, 3가지 난류 모델(Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$)에 대하여 평가를 수행하였으며, 격자 해상도는 총 6가지를 적용하였음.
- 알고리즘 테스트의 평가방식은 각 형상을 대상으로 3가지 난류 모델별로 6가지 격자 해상도 조건으로 시뮬레이션을 수행하고, 각 난류 모델별로 도출된 적정 격자 해상도를 분석하였음. 이와 동시에 연산에 소요된 시간을 기록하여 기존 작업시간 대비 시간 절감률을 평가하고자 하였음.
- 알고리즘 테스트 결과는 표 14와 같음. 본 연구에서 개발한 격자 독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘을 적용하는 경우, **최소 39.4% 이상, 평균 42.7% 작업시간 절감**이 가능한 것으로 평가됨. 따라서, 질적 성과지표 목표치(기존 대비 작업시간 30% 절감)를 달성함.



(a) shape 1 ($L=0.94$)



(b) shape 2 ($L=0.85$)



(c) shape 3 ($L=0.93$)

그림 19. 알고리즘 테스트를 위한 분석 형상
(빨간 영역은 유출구, 파란 영역은 유입구로 설정함)

표 14. 격자독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘의 작업시간 절감률 평가 결과

분석 형상	난류 모델	기존 방법 작업시간	본 연구 기술 작업시간	작업시간 절감률
Shape 1	Standard $k-\epsilon$	56,060	31,758	43.3%
	RNG $k-\epsilon$	61,840	32,127	48.0%
	Realizable $k-\epsilon$	62,605	32,892	47.5%
Shape 2	Standard $k-\epsilon$	17,605	10,672	39.4%
	RNG $k-\epsilon$	17,486	10,288	41.2%
	Realizable $k-\epsilon$	18,178	10,876	40.2%
Shape 3	Standard $k-\epsilon$	28,327	16,627	41.3%
	RNG $k-\epsilon$	28,627	16,698	41.7%
	Realizable $k-\epsilon$	29,623	17,296	41.6%
평균 작업시간 절감률				42.7%

핵심성과 2	건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발
단위성과 2-2	격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 기술 개발

○ 격자 품질 지표 선정 (성과점검기준표 [중빙 12] 참조)

- 해석 영역을 격자로 구성하여 물리적 현상을 해석하는 전산유체역학에서 해석의 정확성과 경제성을 높이기 위해 적정 격자를 설계하는 것이 가장 중요함.
- 본 연구의 단위성과 2-1은 격자 설계의 경제성을 확보하는 알고리즘을 구축하였으며, 본 단위성과 2-2에서는 격자 설계의 품질을 확보하는 알고리즘을 구축하고자 함.
- 격자 품질과 관련된 국내·외 연구 자료와 문헌 자료 등을 분석하여 보편적으로 적용되고 있는 격자 품질 지표의 종류와 기준을 정리하였음.
- 한편, 개방형 전산유체역학 도구인 OpenFOAM은 기존 상용 분석 도구와 품질 지표의 정의와 계산 방식이 다소 차이가 있음. 따라서 기존 상용 도구를 대상으로 제시된 기준을 적용하기 어려우므로, OpenFOAM에 적용 가능한 품질 지표와 기준을 정리함.
- 문헌 자료를 분석하여 수립한 격자 품질 지표의 종류 및 기준은 표 15와 같음.
- 표 15의 지표 종류 및 기준은 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구성 알고리즘에서 설계된 격자의 품질을 판단하는 기준으로 적용하였음.

표 15. 격자 품질 지표 및 적정 기준 선정 결과

품질 지표	지표 설명	적정 기준
Orthogonality	한 격자의 중심점에서 인접 격자의 중심점에 향하는 벡터를 가지는 면의 정규화된 내적 값	70 이하
Skewness	한 격자의 중심점에서 인접 격자의 중심점까지의 거리를 두 격자의 교차점까지의 거리로 나눈 값	4 이하
Aspect ratio	인접 격자에 대한 격자의 확장률	35 이하

○ Hexahedral mesh 기반 격자 구성 방법 도출 (성과점검기준표 [중빙 13] 참조)

- 일반적으로, 격자 품질을 고려한 격자 설계를 위해서는 육면체 격자(Hexahedral mesh) 기반의 격자 구성 방법 도출이 필요함.
- 한편, 본 연구는 성과점검기준표 [중빙 8]에서 본 연구수행을 위한 격자 구성 스크립트를 cfMesh로 설정하였음. cfMesh의 경우, 기본적으로 육면체 격자를 우선으로 연산 영역 격자계를 구성하기 때문에 자동으로 hexahedral mesh 기반의 격자계를 구성할 수 있음.
- 단, 격자 스크립트 세부 설정에 따라 격자 형상이 일그러지는 문제가 발생하거나 격자 구성이 진행되지 않는 문제가 있음. 본 연구에서는 이러한 문제점이 발생하지 않도록 cfMesh의 스크립트를 정의하였으며, 이를 통하여 격자 품질을 고려한 hexahedral mesh 기반의 격자 구성 방법을 도출함.

- 본 연구에서 도출한 Hexahedral mesh 기반의 격자계를 구성하는 시간과 기존 상용 분석 도구를 사용하였을 때 요구되는 작업시간을 비교하여 작업시간의 절감률을 표 16과 같이 평가하였음.
- 작업시간 절감률 평가를 위한 형상은 그림 19의 3가지 형상으로 선정하였으며, 격자 크기는 단위 성과 2-1을 통해 도출된 적정 격자 크기인 24를 기준으로 격자를 형성하였음.
- **작업시간 절감률을 평가한 결과, 최소 74.8% 이상, 평균 80.5% 작업시간 절감이 가능한 것으로 평가됨.** 따라서, 본 성과의 질적 성과지표 목표치 (작업시간 절감률 30%)를 달성함.
- 본 연구에서 개발한 격자 생성 스크립트의 경우, 분석 대상의 형상 파일(obj)에 별도의 후처리 과정을 하지 않아도 바로 hexahedral mesh 기반의 격자계 구성이 가능함.
- 반면, 기존 상용 분석 도구의 경우 형상 파일 자체를 바로 입력하는 경우, 격자계 형성이 매우 어려우며 특히 형상이 복잡해지는 경우 반드시 영역을 분할하는 추가 작업이 요구됨.
- 분석 형상을 분할하는 추가적인 작업 또한 많은 작업시간을 요구하는 작업이므로 이러한 작업이 필요하지 않은 본 연구 방법의 작업시간 절감률이 더 높아질 것으로 판단됨.

표 16. Hexahedral mesh 기반 격자 구축 시 작업시간 절감률

	Shape 1	Shape 2	Shape 3
기존 작업시간	149초	217초	135초
본 연구 작업시간	35초	28초	34초
작업시간 절감률	79.5%	87.1%	74.8%

○ 격자 품질 비교를 통한 최적 격자 구성 방법 도출 및 알고리즘 구축 (성과점검기준표 [중빙 14], [중빙 15] 참조)

- 성과점검기준표 [중빙 13]에서 도출한 Hexahedral mesh 기반 격자 구성 방법으로 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구성 알고리즘을 그림 20과 같이 구축함.
- 본 연구에서 개발한 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘의 작업시간 절감률을 평가하기 위하여 파일럿 테스트를 수행함.
- 파일럿 테스트는 그림 21과 같은 4가지 건축물 형상에 대하여 기존 상용 소프트웨어를 사용하여 격자를 설계하는 작업의 소요시간과 알고리즘을 이용한 방법의 작업시간을 측정함.
- 작업시간은 각 형상 파일에서 격자 설계까지 소요시간을 의미하며, 기존 방법의 경우 obj 파일의 형상 파일을 상용 도구에 적합한 형태로 가공하는 형상 전처리 작업시간 또한 포함하였음.

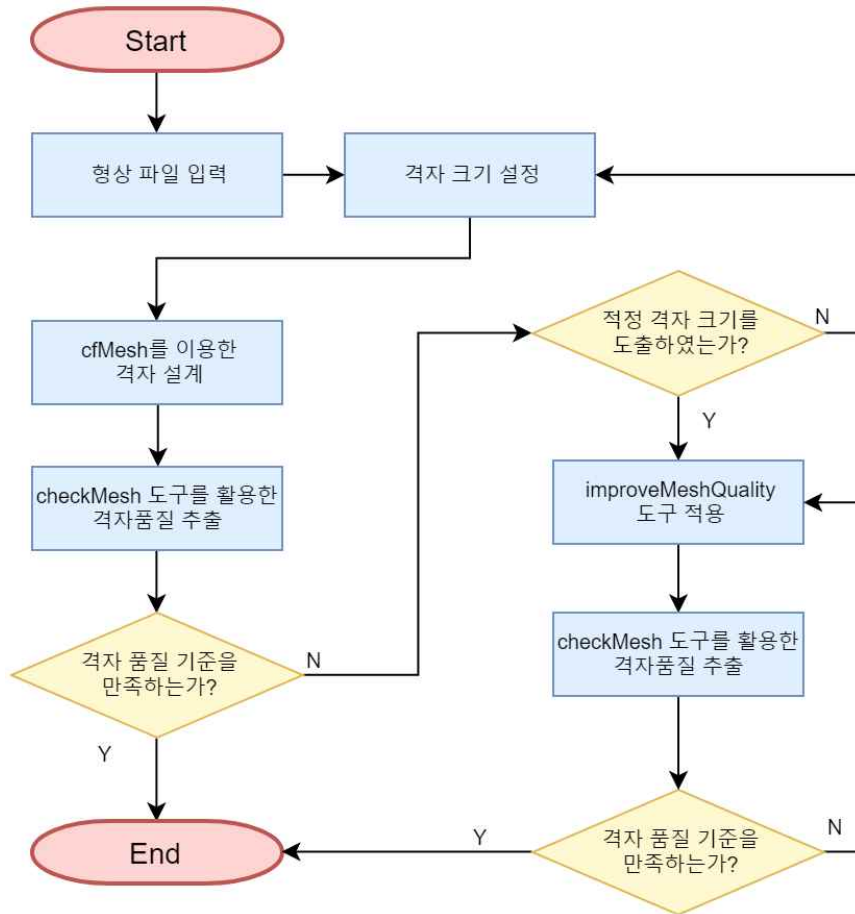


그림 20. 격자 품질 기준 기반 최적 격자 생성 알고리즘 구축

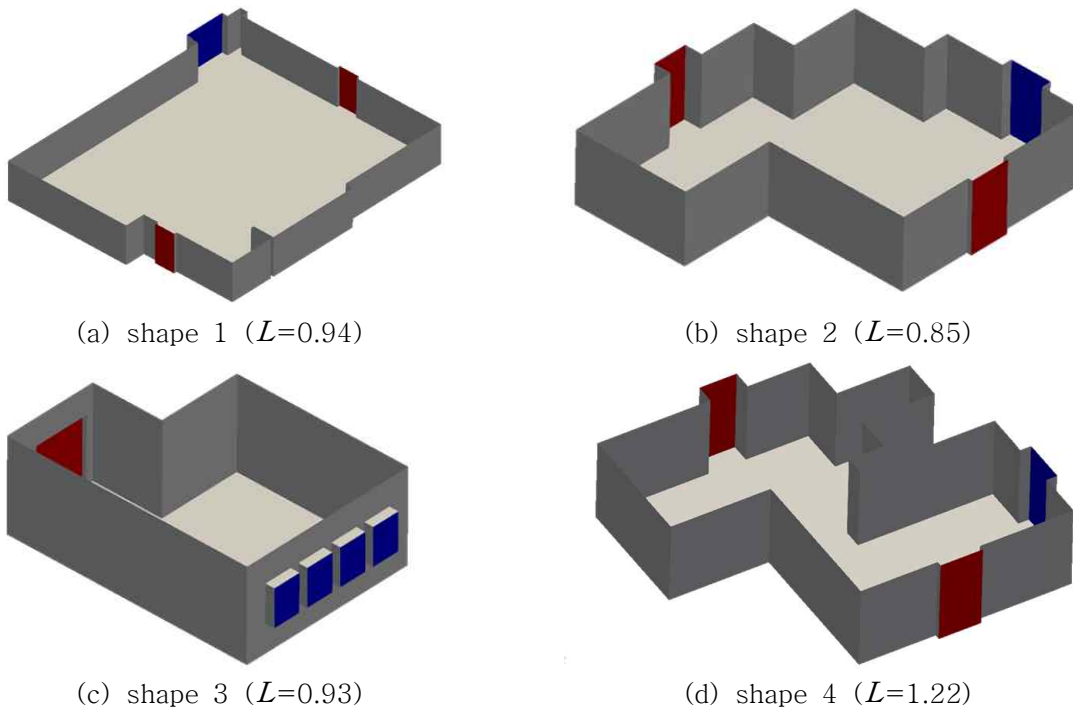


그림 21. 작업시간 절감률 평가를 위한 격자 설계 대상

- 작업시간 측정을 위하여 친환경 컨설팅 업체에서 건축물 전산유체역학 분석 작업을 수행하는 실무진을 대상으로 파일럿 테스트를 수행함. 실무자 별로 소요된 작업시간을 바탕으로 본 연구에서 개발한 알고리즘의 작업시간 절감률을 평가한 결과는 표 17과 같음.
- 파일럿 테스트 결과, 본 연구에서 개발한 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘의 작업시간 절감률은 최소 79.4% 이상, 평균 80.7%로 도출되었음.
- 본 단위성과 2-2-④의 질적 성과지표 목표는 기존 대비 작업시간 30% 절감이며, 본 연구의 알고리즘은 이보다 약 2.7배 높은 절감률을 도출하여 목표를 달성하였음.

표 17. 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘의 작업시간 절감률 평가

형상	Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4
기존 방법 평균 작업시간	636.2초	800.8초	641.6초	724.8초
알고리즘 평균 작업시간	115.8초	157.4초	132.2초	137.22초
평균 작업시간 절감률	81.8%	80.3%	79.4%	81.1%

핵심성과 2	건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동생성 알고리즘 개발
단위성과 2-3	최적 격자 자동 생성 알고리즘 구축

○ 격자 구축 알고리즘 통합 (성과점검기준표 [증빙 16] 참조)

- 성과점검기준표 [증빙 10]에서 설계한 격자독립성 검정 기반 최적 격자 크기 도출 알고리즘과 성과점검기준표 [증빙 14]에서 설계한 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 알고리즘을 통합하여 그림 22와 같은 최적 격자 자동생성 알고리즘을 구축함.

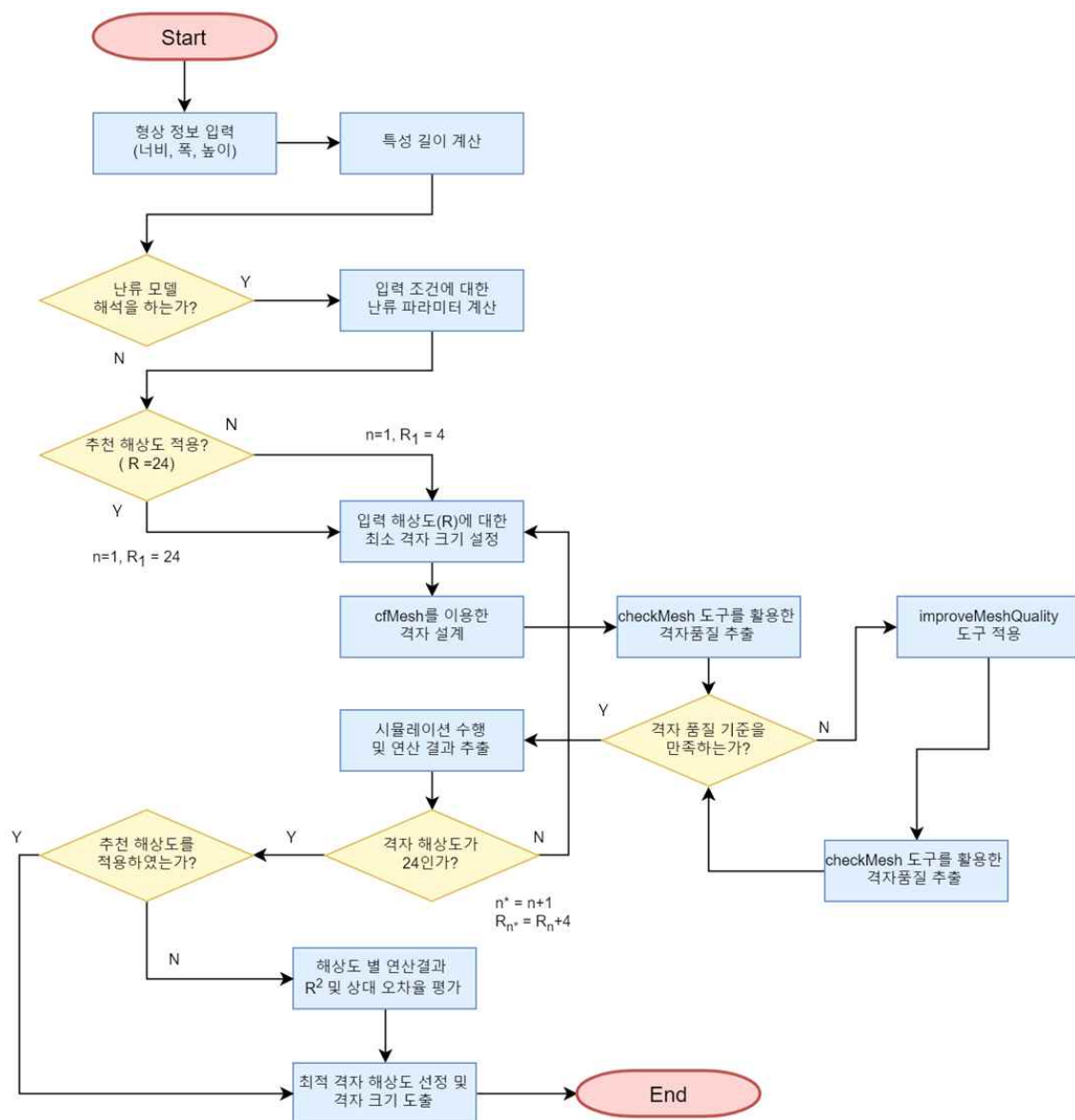


그림 22. 최적 격자 자동생성 알고리즘 구축 결과

- 본 연구에서 개발한 최적 격자 자동생성 알고리즘의 격자 자동생성에 대한 작업시간 절감률을 평가하기 위하여 파일럿 테스트를 수행함.

- 파일럿 테스트는 그림 19와 같은 3가지 건축물 형상에 대하여 최적 격자를 설계하는 작업시간을 측정하였음. 기존 상용 SW를 이용하는 방법과 본 연구 개발기술을 이용하는 방법에 대하여 작업시간을 비교 분석함.
- 작업시간은 각 형상 파일에서 최적 격자 설계까지 소요시간을 의미함. 따라서, 형상 파일에서 부터 적정 격자 크기와 품질을 모두 만족하는 격자 설계에 필요한 작업시간을 측정함.
- 난류 모델에 대한 영향을 확인하기 위하여, 3가지 난류 모델(Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$)에 대한 테스트를 수행하였음.
- 기존 방법의 경우 obj 파일의 형상 파일을 상용 도구에 적합한 형태로 가공하는 형상 전처리 작업시간 또한 포함하였음.
- 작업시간 측정을 위하여 친환경 컨설팅 업체에서 건축물 전산유체역학 분석 작업을 수행하는 실무진을 대상으로 파일럿 테스트를 수행함.
- 실무자 별로 소요된 작업시간을 바탕으로 본 연구에서 최종적으로 개발한 최적 격자 자동생성 알고리즘의 격자 생성 작업시간 절감률을 평가한 결과는 그림 23과 같음.
- 본 연구에서 개발한 최적 격자 자동생성 알고리즘을 적용하면, 최소 46.7%의 작업시간 절감이 가능한 것으로 도출됨. 따라서, 본 단위성과 2-3-① 질적 성과 목표 및 1차년도 공동연구 기관의 주요성능지표 목표치(격자 생성 시간 기존 대비 30% 절감)를 달성함.

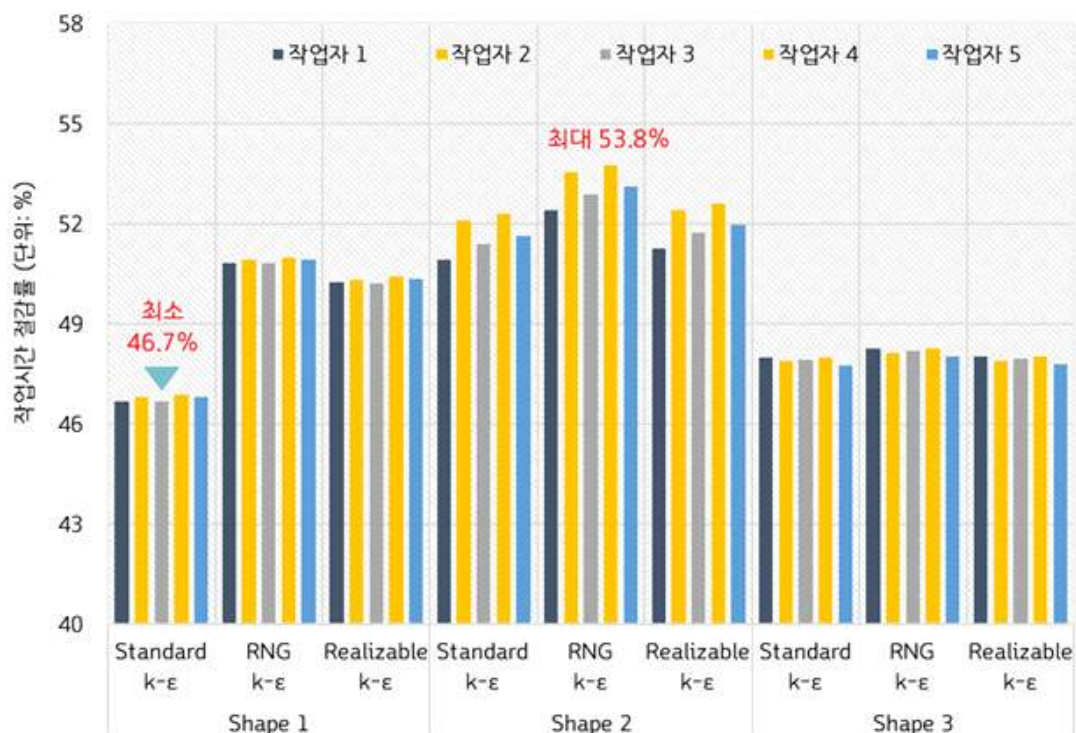


그림 23. 최적 격자 생성에 대한 본 연구 개발기술의 작업시간 절감률 평가

○ 격자 구축 알고리즘 통합 (성과점검기준표 [중빙 16] 참조)

- 성과점검기준표 [중빙 16]에서 구현한 최적 격자 구축 알고리즘을 기반으로 하여 2차 연도 연구 결과를 반영하여 그림 24와 같이 BIM 기반 최적 격자 자동생성 모듈을 개발함.
- BIM 파일의 형상을 분석하여 특성길이를 계산하고, 특성길이에 맞는 적정 격자 해상도를 선정함. 특성길이별 적정 해상도는 표 18과 같이 Lee et al. (2020) 연구결과를 이용함.
- 적정 해상도에 대응되는 최소 격자 크기를 산정한 후 이를 기반으로 cfMesh를 이용한 육면체 격자를 설계하여 최적 격자 설계를 완료함.

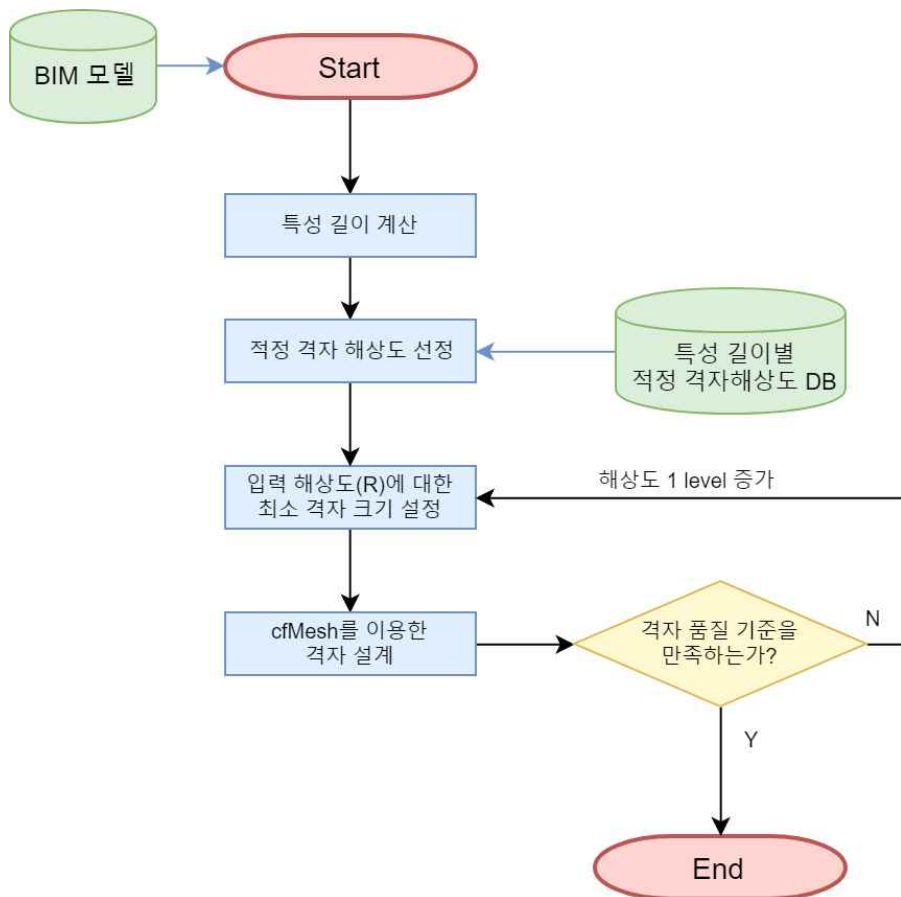


그림 24. 최적 격자 자동생성 모듈 구축 결과

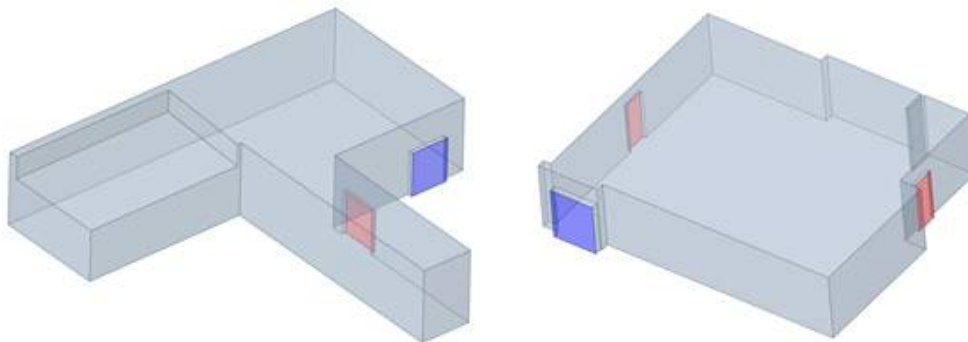
표 18. 특성길이별 적정 격자 해상도

	0.5 이하	0.5 이상 0.7 미만	0.7 이상
최적 격자 해상도	8	16	24

- 개발 모듈의 최적 격자 생성 작업시간 절감율을 평가하기 위하여 친환경 컨설팅 업체에서 건축물 전산유체역학 분석 작업을 수행하는 실무진을 대상으로 파일럿 테스트를 수행하였음.
- 작업시간 측정은 건축물 BIM 모델로부터 최적 격자 CFD 모델 설계에 소요되는 시간으로 정

의함. 작업시간 측정을 위해 기존 상용 CFD SW로 ANSYS를 사용함.

– 작업시간 측정을 위한 건축물 대상은 다음 그림 25와 같음.



(a) Case 1

(b) Case 2

그림 25 작업시간 측정을 위한 대상 시설 선정

– 파일럿 테스트 결과는 표 19와 같으며, 최적 격자 자동생성 모듈은 평균적으로 약 81.9%의 작업시간 절감이 가능한 것으로 도출됨. 따라서 단위성과의 질적 성과목표인 기존 대비 작업 시간 절감 70%를 달성함.

– 이를 통해 본 연구의 주요 성능지표 목표인 격자 생성 작업시간 70% 절감을 달성함.

표 19. 연구개발 모듈의 작업시간 절감률 평가

작업	실무진별 작업시간 절감률 (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Case 1	74.9	76.9	74.5	75.7	76.2	72.3	75.1	73.0
Case 2	88.7	89.0	88.4	89.9	89.0	89.4	89.1	88.4
평균	81.9%							

(2) 연구개발 성과

(가) 기술적 성과

① 기술 수준 및 기술 개발 성과

○ 최적 격자 크기 도출 작업시간 42.7% 절감 (성과점검기준표 [중빙 10] 참조)

- 단위성과 2-1의 검정 결과 기반 최적 격자 크기 도출 및 알고리즘 구축을 통해 CFD 모델에 적합한 최적 격자 크기를 도출하는 작업시간을 절감함.
- 기존 격자 독립성 검정 평가 방법과 본 연구에서 제안한 격자 해상도 기반 격자 독립성 평가 방법이 최적 격자 크기를 도출하는데 필요한 작업시간을 비교함.
- 그림 19와 같은 3가지 건축물 대상에 3가지 난류 모델을 적용하여 최적 격자 크기 도출 작업 시간을 측정함. 격자 크기 후보군은 케이스별로 6개를 적용함.
- 작업 시간 측정 결과는 표 14와 같음. 본 연구에서 제안한 격자 해상도 기반 격자 독립성 평가 방법은 기존 방법 대비 평균 42.7%의 작업시간 절감이 가능함. 따라서, 본 성과의 질적 성과지표 목표치(기존 대비 작업시간 30% 절감)를 달성함.

○ Hexahedral mesh 기반 격자 구성 작업시간 80.5% 절감 (성과점검기준표 [중빙 13])

- 단위성과 2-2의 Hexahedral mesh 기반 격자 구성 방법 도출을 통해 육면체 기반 격자 구축에 필요한 작업시간을 절감함.
- 동일한 대상과 격자 크기에 대해 기존 상용 CFD SW의 육면체 기반 격자 생성시간과 본 연구 개발 기술을 통한 육면체 기반 격자 생성시간을 평가함.
- 그림 19의 3가지 형상으로 선정하였으며, 격자 크기는 단위 성과 2-1을 통해 도출된 적정 격자 크기인 24를 기준으로 격자를 형성하였음.
- 작업시간 절감률을 평가한 결과는 표 16과 같으며 평균 80.5%의 작업시간 절감률을 달성함. 따라서, 본 성과의 질적 성과지표 목표치 (작업시간 절감률 30%)를 달성함.

○ 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 작업시간 80.7% 절감 (성과점검기준표 [중빙 14])

- 단위성과 2-2의 격자 품질 비교를 통한 최적 격자 구성 방법 도출 및 알고리즘 구축을 통해 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축에 필요한 작업시간을 절감함.
- 기존 상용 CFD SW를 이용하여 격자 품질 기준을 충족하는 격자를 생성하는 작업시간과 본 연구 개발 기술을 이용한 작업시간을 비교함.
- 작업 시간 평가는 그림 21과 같이 4가지 건축물 대상을 선정하였으며, 형상 파일에서부터 격자 모델 생성까지 필요한 작업시간을 평가함.
- 작업시간 절감률을 평가한 결과는 표 17과 같으며 평균 80.7%의 작업시간 절감률을 달성함. 따라서, 본 성과의 질적 성과지표 목표치 (작업시간 절감률 30%)를 달성함.

○ **최적 격자 구축 작업시간 49.9% 절감 (성과점검기준표 [중빙 16] 참조)**

- 단위성과 2-3의 격자 품질 기준 기반 최적 격자 구축 기술 개발을 통해 CFD 모델에 최적화된 격자 구축에 소요되는 작업시간을 절감함.
- 기존 상용 CFD SW를 이용하여 BIM 파일로부터 최적 격자 생성에 필요한 총 작업시간과 본 연구개발 기술을 이용할 때의 작업시간을 측정하여 절감률을 평가함.
- 파일럿 테스트는 그림 19와 같은 3가지 건축물 형상에 대하여 최적 격자를 설계하는 작업시간을 측정함. 형상 파일에서부터 격자 독립성 검정을 통해 적정 격자 크기를 도출하되 해당 과정에 품질 기준을 고려한 격자 설계를 진행하여 적정 격자 크기와 품질을 모두 만족하는 격자 설계에 필요한 작업시간을 측정함.
- 난류 모델에 대한 영향을 확인하기 위하여, 3가지 난류 모델(Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$)에 대한 테스트를 수행하였음.
- 작업시간 절감률을 평가한 결과는 그림 23과 같음. 본 연구 개발 기술은 기존 방법 대 평균 약 49.9%의 작업시간이 절감 가능한 것으로 평가됨. 따라서, 본 단위성과 2-3-① 질적 성과목표 및 1차 연도 공동연구기관의 주요성능지표 목표치(격자 생성 시간 기존 대비 30% 절감)를 달성함.
- 해당 성과와 관련하여 2차 연도에는 기술 보완을 통해 최종 주요성능지표 목표치인 70%를 달성할 예정임.

○ **(2차 연도 개선) 최적 격자 구축 작업시간 81.9% 절감 (성과점검기준표 [중빙 17], [중빙 30])**

- 1차 연도에는 단위성과 2-3의 연구를 통해 기존 대비 49.9%의 최적 격자 구축 작업시간 절감을 달성함. 2차 연도에는 최적 격자 구축 기술을 개선하여 작업시간 절감률을 높임.
- 2차 연도 단위성과 4-2의 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발을 통해 최적 격자 구축에 필요한 작업시간을 대폭 절감함.
- 기존 상용 CFD SW를 이용하여 BIM 파일로부터 최적 격자 생성에 필요한 총 작업시간과 본 연구개발 기술을 이용할 때의 작업시간을 측정하여 절감률을 평가함.
- 작업시간 측정을 위한 건축물 대상은 그림 25와 같이 2가지 건축물 BIM 모델을 이용함. 파일럿 테스트를 통해 실무진별로 작업시간을 측정하여 절감률을 산정함.
- Case 별로 최적격자 구축에 소요된 작업시간 절감률은 표 19와 같음. Case 1, 2 모두 70% 이상의 작업시간 절감이 되었으며, 평균 81.9%의 작업시간이 절감됨.
- 따라서, 본 연구개발 모듈은 기존 상용 SW를 이용하는 방법 대비 평균 약 81.9%의 작업시간이 절감 가능한 것으로 평가됨. 따라서, 질적 성과목표 및 주요성능지표 목표치(격자 생성 시간 기존 대비 70% 절감)를 달성함.

② 연구 실적물

○ KCI 논문 1편 (성과증빙 보고서 [증빙 36] 참조)

- 특성길이 계산을 위해 BIM 모델 요구정보 추출 기술을 개발하였음. 이 기술과 관련하여 KCI 저널에 논문 게재 1건을 달성함.



외피 평균 열관류율 계산을 위한 BIM 기반 형별 성능관계내역 추출과 외피전개도 작성 프로그램 개발

김창민¹ · 김준영¹ · 박창영¹ · 유동철² · 최창호^{3*}

¹(주)미래환경플랜건축사사무소 건축친환경기술연구소, ²광운대학교 일반대학원 건축공학과
³광운대학교 건축공학과

Development of BIM-based Program for Extracting Thermal Performance Details and Planar Figures to Calculate the Average U-value

Kim, Chang-Min¹ · Kim, Jun-Young¹ · Park, Chang-Young¹ · Yoo, Dong-Chul² · Choi, Chang-Ho^{3*}

¹Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

²Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kwangwoon University, Seoul, Korea

³Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

*Corresponding author: Choi, Chang-Ho, Tel: +82-2-942-3824, E-mail: choi1967@kw.ac.kr

ABSTRACT

The average U-value of the building envelope is one of the main indicators of the energy performance of buildings. According to Korean standards, documentation about the thermal performance by materials and a planar figure of the envelope are required to verify the average thermal transmittance. These two documents are prepared manually based on two-dimensional drawings, which require much time to prepare and may contain errors. In this study, we propose a method using BIM to prepare the thermal performance by materials and the planar figure of the envelope. For this purpose, we proposed a BIM-based process to calculate the average U-value. This study also proposed a new method for assigning type symbols and a method for correcting the width of the outer. The proposed method was developed as a program, and we performed pilot tests on two difference BIM cases to verify the program. The results showed that the results obtained by manual work and the program were consistent, except for errors caused by rounding. By reducing repetitive work through the method proposed in this study, we expect to improve the credibility of the certification process while reducing the time required to prepare documents for certification.

주요어 : 빌딩정보모델링, 평균 열관류율, 건물 외피, 에너지 성능, 외피전개도

Keywords: Building Information Modeling, Average U-value, Building envelope, Energy performance, Planar figure

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2019 October, 13(5): 347-357
<https://doi.org/10.22696/jkiebs.20190030>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: September 3, 2019
Revised: September 30, 2019
Accepted: October 4, 2019

© 2019 Korean Institute of Architectural
Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

건물의 에너지 성능을 나타내는 대표적인 지표 중 하나는 외피의 평균 열관류율이다. 외피의 평균 열관류율은 외피를 구성하는 외벽, 창, 문 등의 형별에 따른 열관류율과 면적으로 제

후기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152000-01).

References

1. Ahn, K., Kim, Y., Park, C., Kim, I. (2012). Development of interface for BIM based building energy simulation. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 28(5), 283-292.
2. Hong, S., Jang, H., An, H., Kang, H., Choi, C. (2016). A study on the framework of building information modeling for energy-saving design criteria of building. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 10(1), 75-82.
3. Ilhan, B., Yaman, H. (2016). Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions. *Automation in Construction*, 70, 26-37.
4. Kim, C., Kim, Y., Hong, J., Choi, C., Lee, H. (2017a). A study on IFC-BIM based automated information extraction method for evaluation of low-energy green home : Focused on Architectural BIM. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 11(2), 91-99.
5. Kim, I., Choi, J., Kim, H. (2013). Proposition and application of mapping system for input data between open BIM data and Building energy simulation software. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 29(4), 3-12.
6. Kim, I., Kim, M., Choi, J. (2015). Improvement of open BIM-based building permission process using EPI(Energy Performance Index). *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 16(6), 124-135.
7. Kim, J., Kim, C., Park, C., Park, Y., Choi, C. (2018). Develop an IFC-based algorithm to extract required information from planar figure of envelope for building energy performance assessment. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 12(3), 277-289.
8. Kim, J., Kim, C., Park, C., Yoo, D., Park, Y., Choi, C. (2017b). Developing an automated algorithm for determining building envelope based on BIM to assess energy performance of buildings. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 11(4), 342-353.
9. Lee, S., Kim, K., Yu, J. (2015). Ontological inference of work item based on BIM data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(3), 538-549.
10. Lee, Y., Cho, W. (2013). A study on the development of the technology of evaluating the performance of energy. *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 13(1), 29-37.
11. Moon, H., Kim, S. (2012). Development of a BIM based energy performance evaluation method for buildings with a twisted shape in early design stage. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 28(7), 289-296.

○ 국내 특허출원 1건 (성과중빙 보고서 [중빙 34] 참조)

- 최적 격자 생성 기술과 관련하여 국내 특허출원 1건을 달성함.

관 인 생 략
출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2019.12.23
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(INP19181)
출 원 번 호 10-2019-0173105 (접수번호 1-1-2019-1329488-10)
출 원 인 명 칭 (주)미래환경플랜건축사사무소(1-2012-066169-4)
대 리 인 성 명 정창수(9-2003-000251-1)
발 명 자 성 명 박창영 김창민 이민형 박관용 장항인
발 명의 명 칭 건축물 맞춤형 전산유체역학 모델 최적 격자 설계 시스템 및 최적 격자 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

(나) 경제적 성과

① 개발 기술을 통한 생산성 향상

○ 최적 격자 생성 시간 49.9% 절감으로 생산성 대폭 향상

- CFD 분석에 있어서 격자 모델은 시뮬레이션 해석을 위한 가장 중요한 대상이면서, 전체 해석 시간에 가장 큰 영향을 미치는 요인임. 따라서 시뮬레이션 해석의 정확성을 확보하면서 경제적인 시뮬레이션 가능한 최적 격자 생성이 요구됨.
- 최적 격자 생성은 격자 품질과 적정 격자 크기를 모두 고려한 격자 설계가 필요하여 많은 시행착오와 그로 인한 상당한 작업시간이 소요됨. 이는 CFD 분석의 생산성을 저하하는 주요 원인 중 하나임.
- 본 연구개발 기술은 알고리즘을 통해 분석하고자 하는 BIM 모델에 최적화된 격자 크기를 자동으로 선정하고 이에 대한 육면체 격자계를 형성하여 최적 격자를 설계함. 이를 통해 기존 대비 최적 격자 생성 시간을 49.9% 절감함.
- 작업시간 절감을 통해 전체적인 건설 분야 CFD 분석의 생산성이 대폭 향상 가능함.

② 고용 창출

○ 건설 CFD 활성화를 통한 관련 분야 고용 창출 효과

- 건설 분야 CFD 분석의 생산성 향상은 건설 분야 CFD 분석 시장의 활성화를 이끌 것으로 예상함. 따라서 해당 시장 분야의 활성화로 관련 직종 종사자의 수도 증가할 것으로 판단됨.
- 특히, 실내 공기질, 실내 환경의 쾌적성, 환기, 바람길 등 공기와 관련된 건축 환경에 대한 사회적 관심이 증가하고 있고 이로 인한 관련 연구, 용역의 수도 증가하고 있음. 따라서 이러한 사회적 흐름과 맞물려 향후 지속적인 고용 창출 효과가 기대됨.

③ 관련 산업 기여도

○ 건설 CFD 분석 시장 활성화

- CFD를 이용한 건축물 환경평가는 다양한 환경에 대한 문제 파악과 대책 마련이 가능한 장점으로 지속적으로 활용이 되고 있으나 평가에 상당한 작업시간과 전문적인 지식이 필요하다는 점이 활성화에 대한 장애 요인임.
- 본 연구개발 기술은 최적 격자 생성 시간을 절감하여 기존 건설 CFD 분석의 막대한 작업시간을 대폭 절감 가능할 것으로 평가됨. 이를 통해 관련 시장 활성화에 기여할 것으로 판단됨.
- 건설 CFD 분석 이외에도 CFD 분석이 적용 가능한 모든 산업 분야에 최적 격자 생성 기술이 적용 가능하므로 전반적인 CFD 산업 시장의 활성화를 유도할 수 있음.

2-3. 2차 연도 연구수행내용 및 성과

구분 (연도/ 단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차연도 (2020)	BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발	CFD 모델 입력 요구정보 정의	- 지원 대상 CFD 해석자 선정 및 입력 요구정보 분석 - BIM으로부터 추출 가능한 속성정보와 형상정보, 형상 표현 방식 선정 - 각 CFD 모델의 요구 정보에 대응되는 BIM 데이터 객체 선정	- 전열·난류 해석이 가능한 기본 해석자 선정 - 재료 정보와 공간 형상을 추출할 IFC 객체 분석
		BIM 형상 및 속성정보 추출	- 분석 대상 공간의 경계를 형성하는 객체를 인식하고 형상 정보를 추출하는 알고리즘 개발 - CFD 해석의 설정, 해석자별 추출할 BIM 모델 구성 정의 - BIM의 벽, 슬라브 객체로부터 재료 속성정보를 추출하는 알고리즘 개발	- D2 shape distribution을 통해 평가한 형상 정보 추출의 오차율 0.35% 달성 - 속성 정보 추출 오차 0.9% (IFC 표준을 따른 속성정보의 오차 0%)
		BIM 추출 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축	- 경계조건 설정을 위한 모델 경계면 명명법 정의 - 모델의 내외부면, 벽, 개구부 분류·매칭 알고리즘 설계 - 건축 재료의 열성능, 표면조도 라이브러리 구축 - 문자열 매칭을 통한 속성정보 매칭 알고리즘 설계	- 형상·속성정보 매칭 알고리즘 모두 오차율 0%로 평가 - 자동 전처리, 추출한 CFD 케이스 모두 시뮬레이션 성공
	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	개발 알고리즘 통합	- 알고리즘을 통해 결정되는 형상 설계, 격자 설계, 경계 조건 설정 외 요소(기타 설계요소)에 대한 정의 - 주요 개발 알고리즘의 통합	- 형상 모델, 격자 모델, 경계 조건 이외에 CFD 분석에 필요한 기타 설계요소를 정의함. - 주요 개발 알고리즘을 통합하여 전처리 자동화 알고리즘을 구현함.
		BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	- 기타 설계요소 스크립트 구축 - BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발	- 기타 설계요소를 출력하기 위한 스크립트를 구축함. - 전처리 자동화 알고리즘과 기타 설계요소 스크립트를 통합하여 전처리 자동화 모듈을 개발함. 연구 수행결과, 기존 작업 대비 작업시간이 77.7%로 절감되는 것으로 도출됨.
		BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 정확도 검증	- 기존 상용 CFD SW를 이용한 분석 결과에 대한 본 연구 개발 모듈의 정확도 검증 - 개발 모듈의 시뮬레이션 해석 허용오차 만족도 검토	- 기존 상용 CFD SW에 대한 상대 오차율을 평가하여 개발 모듈의 정확성을 검증함. - 연구 수행결과, 기존 상용 CFD SW와의 해석 결과 오차율은 4.5% 이하로 도출됨. - 오차율(허용 오차)에 대한 만족도 평가 결과, 만족도가 약 88.3점으로 도출됨.

2-3-1. BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발

(1) 연구수행 내용 및 결과

핵심성과 3	BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
단위성과 3-1	CFD 모델 입력 요구정보 확인

○ OpenFOAM 주요 입력 요구정보 파악 (성과점검기준표 [중빙 18] 참조)

- OpenFOAM 시뮬레이션을 위해선 수치 연산을 담당하는 해석자 (solver), 대상 영역의 환경을 입력해야 함. 입력하는 환경 변수와 적합한 해석자의 종류는 해석하는 환경에 따라 다름. 건축물 내외의 환경은 일반적으로 표준온도압력 (온도 25℃, 기압 1×10^5 Pa) 혹은 상온 · 상압 환경과 유사한 조건임. 건물의 상온 · 상압 공기환경을 해석하기 적합한 OpenFOAM 해석자를 표 20과 같이 선정함.

표 20. 상온 · 상압 환경 해석을 위한 OpenFOAM 해석자

해석자 (solver)	압축 해석	시간 해석	열 전달 해석
SF (simpleFoam)	비압축 유동 해석	정상상태 해석	미해석
BBSF (buoyant BoussinesqSimpleFoam)	비압축 유동 해석	정상상태 해석	Boussinesq 근사 열 해석
BSF (buoyantSimpleFoam)	압축 유동 해석	정상상태 해석	유체 열 해석

- 실내 환기 조건, 바람길 분석 등 유동장의 분석만을 목적으로 하는 경우 SF 해석자를 선택하고 연산 자원을 절감할 수 있음. 반면 쾌적도 분석 등 열전달 현상에 대한 분석을 위해선 온도에 따른 유체의 밀도 변화와 부력 (buoyant force)의 해석이 필요함. BBSF는 Boussinesq 가정을 통해 관성의 영향을 무시하고 부력을 근사 해석하는 반면, BSF는 강한 기류가 형성되는 환경에서 부력을 고려한 유동장을 더욱 정밀하게 해석할 수 있음. 본 연구에서 개발하는 CFD 전처리 알고리즘은 BSF를 기본 해석자로 설정하였으며, 추가로 열전달 · 부력 해석 여부 등 해석 조건에 따라 SF와 BBSF를 지원함.
- BSF 해석자를 통한 시뮬레이션에 필요한 물리적 특성 변수의 목록은 표 21과 같음. 변수 중 유체와 난류 영역의 변수는 공기 환경에 관한 값으로, 건물 특성과 상관없이 분석자가 설정해야 함. 고체 영역의 온도는 구조체 온도의 초깃값을 의미하며, 마찬가지로 해석 조건에 따라 분석자가 설정함. 반면 비열 (C_p)과 열전도율 (κ)은 건물 재료의 특성에 좌우되기 때문에, BIM 설계정보로부터 추출 가능함.

표 21. 건물 환경 해석을 위한 CFD 모델 입력 정보

영역	입력 변수		영역	입력 변수	
	변수	단위		변수	단위
유체 (Fluid)	p	Pa	난류 (Turbulence)	ρ	kg/m^3
	p_{rgh}	Pa		μ	$Pa \cdot s$
	U	m/s	열전달 (Heat transfer)	C_p	$J/(kg \cdot K)$
	T	K		κ	$W/(m \cdot K)$
고체 (Solid)	T	K			

- OpenFOAM의 형상정보는 STL 파일, 혹은 Wavefront社의 obj 파일의 형태로 형상 정보를 입력할 수 있음. STL 파일은 표면의 종류를 구분하지 않기 때문에, 단일 파일을 통해 경계조건과 물성치 구분 등의 정보를 포함하지 못함. 반면 obj 형식은 표면을 이루는 구성요소 (face, vertex, texture 등)를 객체(object) 단위로 구분함. 따라서 벽과 창문 등의 사물과 물성치에 따른 형상을 구분하고 경계조건을 설정할 수 있음. 이를 고려해 본 연구에서 개발하는 CFD 전처리 모듈은 obj 파일을 통해 형상정보를 저장함.

○ BIM 모델에서 추출 가능한 데이터 파악 (성과점검기준표 [중방 19] 참조)

- BIM의 파일 형식인 IFC (Industry Foundation Classes)는 ISO 인증을 보유한 표준 형식이며, 건물 설계 소프트웨어와 독립적으로 건물 정보를 저장함. 따라서 개발 기술의 범용적인 사용성을 위해 IFC로부터 건물 정보를 해석하는 기술을 개발함. IFC는 엔티티 (entity)로 불리는 객체를 단위로 한 객체지향적인 구조를 통해 데이터를 저장함. 각 객체는 색인번호가 부여되는 텍스트 정보이며, 색인을 통해 다른 객체를 참조함. 그림 26은 개구부 (IfcOpeningElement)와 건물 구성 요소의 특성 (IfcPropertySet) 정보를 담은 엔티티 객체의 예시임.

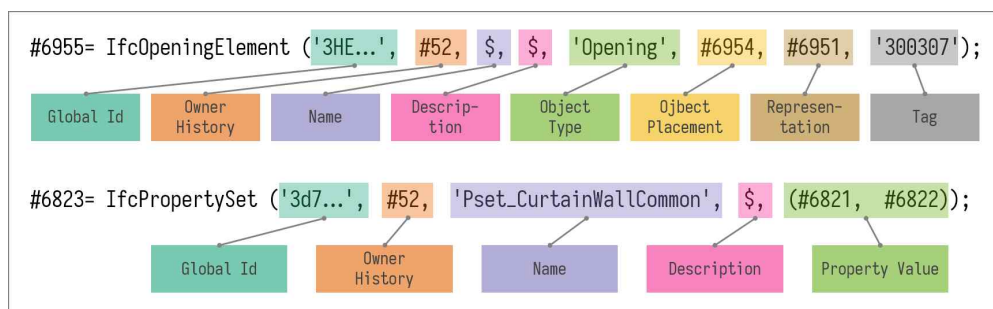


그림 26. IFC의 엔티티 저장 형식 예시

- IFC는 건물 구성 요소별 표준 엔티티와 추가 속성정보 (Property Set 혹은 Pset) 객체를 통해 형상 및 속성정보를 제공함. 건물 환경 해석 시 고려해야 하는 주요 건물 구성 요소인 벽체, 피복, 개구부, 재료의 정보를 포함하는 주요 객체는 표 22와 같음.

표 22. BIM으로부터 추출 가능한 건물 환경 해석 인자

구성 요소	IFC 객체	주요 포함 정보
벽체	IfcWall	재료 (IfcMaterialLayerSetUsage)형상정보 (IfcShapeRepresentation)
개구부	IfcOpeningElement	형상정보 (IfcShapeRepresentation), 객체 연결 정보 (IfcRelVoidsElement)
창문	IfcWindow	형상 · 창문 유형 (IfcShapeRepresentation, IfcWindowType)
재료	IfcMaterialLayerSet	구성 재료층 (IfcMaterialLayer), 총 두께 (TotalThickness)
	IfcMaterialLayer	재료 종류 (IfcMaterial), 재료층 두께 (IfcNonNegativeLengthMeasure)
	IfcMaterial	재료 이름, 설명, 종류 (IfcLabel)
	Pset_MaterialThermal	비열 (SpecificHeatCapacity), 열전도율 (ThermalConductivity)

- 벽체와 함께 실내 공간의 경계를 구성하는 슬라브 (IfcSlab 객체)는 벽체 (IfcWall 객체)와 유사한 구성으로 표현됨. 공기 교환이 이루어질 수 있는 개구부의 형상 정보는 IfcOpeningElement 객체에 저장되며, 형상 외 개별 개구부의 정보는 IfcWindow (창문), IfcDoor (문) 객체에 저장됨. IfcDoor 객체의 포함 정보 및 구조는 IfcWindow와 유사함.
- CFD 해석 시 필요한 물성치 정보는 건축 재료의 종류 (IfcMaterial) 및 속성정보 (Pset)로부터 추출 가능함. IFC 표준에 의해 건축 재료 (IfcMaterial)의 이름은 의무적으로 입력해야 함. 반면, Pset 속성 정보의 기입은 선택사항이며, 많은 BIM 모델이 Pset 정보를 제공하지 않음. 따라서 일반적으로 적용 가능한 CFD 전처리 모듈의 개발을 위해선 건축 재료의 이름을 통해 물성치를 추측하는 기능이 필요함.

○ BIM-CFD 간 매칭 가능한 데이터 정의 (성과점검기준표 [중빙 20] 참조)

- 표 23은 건물 환경해석 모델의 BIM-CFD 간 매칭 가능한 물성치를 분석한 결과임. 건물 내부의 공기와 구조물의 초기 물성치 (기압, 유속, 온도 등)는 해석하는 환경과 문제에 좌우되며 분석자가 직접 입력해야 함. 난류 해석을 위한 공기의 초기 밀도와 점성은 표준해수면조건의 상수로 설정 가능함.
- 반면 벽과 같은 고체 (solid) 구조물의 열전달 변수와 조도 정보는 구성 재료의 종류에 의해 결정됨. 따라서 BIM 모델에 필수적으로 입력되는 재료의 이름과 건축재료 데이터베이스의 매칭을 통해 열성능과 조도의 추측치를 입력할 수 있음.
- CFD 모델의 경계조건 설정을 위해, 형상정보의 저장 형식은 표면별로 정보를 저장하는 obj 파일 적합함. 그림 27은 obj 파일 형식을 통한 실내 공간의 모델과 표면 구분의 예시임. 벽체 표면은 회색으로, 개구부에 해당하는 문은 푸른색과 붉은색으로 표시됨. 건물 모델에 1차 연도 개발 결과인 형상 단순화를 적용할 시 형상이 변형되기 때문에, 표면과 원본 형상의 구조물 간 거리를 바탕으로 표면 종류를 매칭하는 작업이 필요함.

표 23. BIM-CFD 간 매칭 가능한 물성치 변수

영역	변수		
	CFD 입력 변수	데이터 형태	IFC 정보
유체 (Fluid)	초기 기압, 유속, 온도	실수 (Pa , m/s , K)	-
고체 (Solid)	초기 온도	실수 (K)	
난류 (Turbulence)	밀도	실수 (kg/m^3)	(상수 $1.225\ kg/m^3$)
	동점성	실수 ($Pa \cdot s$)	(상수 $1.789 \times 10^{-5}\ Pa \cdot s$)
열전달 (Heat transfer)	비열	실수 ($J/(kg \cdot K)$)	IfcMaterial 재료 이름을 통해 매칭
	열전도율	실수 ($W/(m \cdot K)$)	

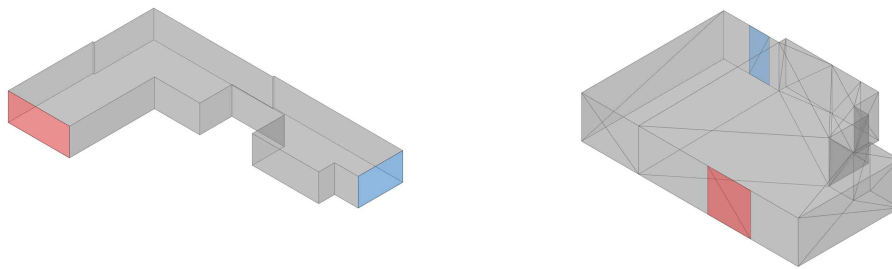


그림 27. Wavefront obj 형식 건물 모델의 표면 구분 예시

- 표면 종류의 매칭 대상은 대상 BIM 모델에서 공간의 경계를 형성하는 객체들임. 그림 28과 같이 벽 (Wall), 슬라브 (Slab), 개구부 (Opening)의 표면을 통해 공간의 경계면을 정의할 수 있음. 따라서 BIM-CFD 간 형상 정보의 연동을 위해선 IfcWall, IfcSlab, IfcOpeningElement 객체의 좌표와 3차원 모델 정보의 추출이 요구됨.

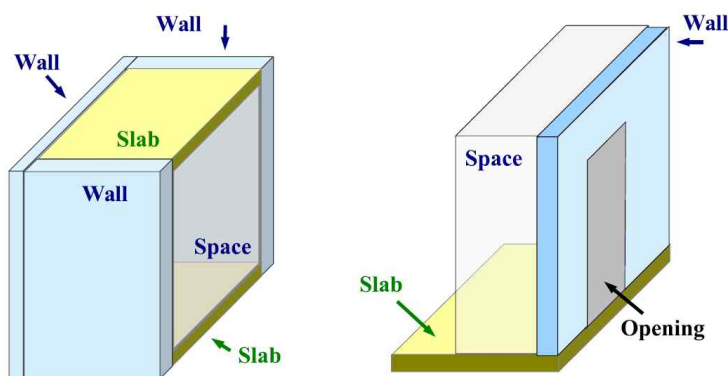


그림 28. BIM 모델 내부 공간 (Space)의 경계를 형성하는 객체의 종류

핵심성과 3	BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
단위성과 3-2	BIM 형상 및 속성정보 추출

○ BIM 형상정보 추출 (성과점검기준표 [중빙 21] 참조)

- CFD 모델의 경계조건 설정을 위해선 대상 공간과 공간의 경계를 형성하는 객체의 정보를 모두 추출해야 함. IFC의 문법을 고려하여 대상 공간을 둘러싸는 객체를 추출하는 알고리즘을 그림 29(a)와 같이 구현함. 경계 객체는 대상 공간을 둘러싸는 벽 (IfcWall)과 슬라브 (IfcSlab)만을 포함함. 따라서 추출한 각 벽에 위치한 개구부 (IfcOpeningElement) 객체를 추출하는 알고리즘을 추가로 설계하고 구현함 (그림 29(b)).

```

1 def get_bounded_by(space: IfcEntity):
2     if not space.is_a('IfcSpace'):
3         raise ValueError('Need IfcSpace, not {}'.format(space.is_a()))
4
5     try:
6         boundaries = [x.RelatedBuildingElement for x in space.BoundedBy]
7     except AttributeError:
8         boundaries = None
9
10    return boundaries

```

(a) 경계 객체 형상정보 추출

```

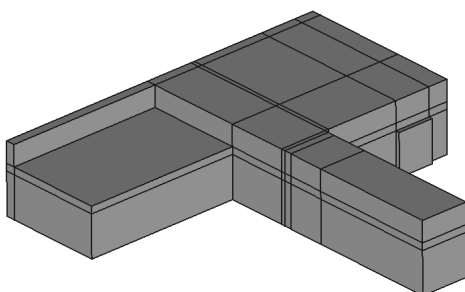
1 def get_openings(self, wall: IfcEntity):
2     assert any([wall.is_a(x) for x in self._ifc_types_wall])
3
4     shapes = []
5     for opening in wall.HasOpenings:
6         try:
7             shape = self.create_geometry(opening.RelatedOpeningElement)
8             shapes.append(shape)
9         except RuntimeError:
10            self._logger.warning('Opening 추출 실패: %s\n%s',
11                                self.file_path,
12                                opening.RelatedOpeningElement,
13                                exc_info=True)
14
15    return shapes

```

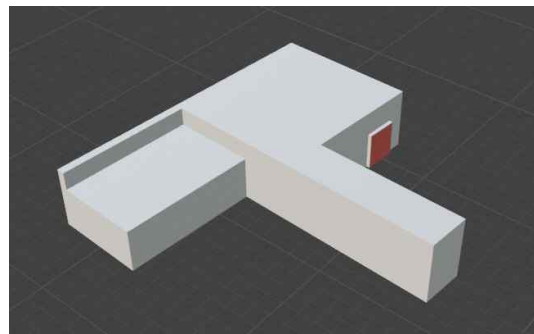
(b) 개구부 형상정보 추출

그림 29. BIM 형상정보 추출 알고리즘

- 그림 30은 BIM 모델로부터 형상정보를 추출하고 생성한 3D 모델의 예시임. 그림 30(a)는 CAD 소프트웨어를 통해, 그림 30(b)는 개발 모듈을 통해 추출한 대상 공간의 형상임. 개발 알고리즘은 대상 모델의 모든 벽 (그림 30(b)의 흰색 표면)과 개구부 표면 (그림 30(b)의 붉은색 표면)의 기하학적 위치 관계를 유지하며 형상정보를 추출함.



(a) CAD 소프트웨어



(b) 개발 알고리즘

그림 30. 추출 방법별 공간 형상 정보 추출 결과

- 개발 알고리즘의 정량적인 정확도 평가를 위해, 건물 형상정보의 D2 형상분포와 Bhattacharyya 계수를 산정함. D2 형상분포는 형상의 표면에서 임의로 추출한 두 점의 거리의 분포와 같음. D2 형상분포는 회전, 스케일 등의 변형과 무관하게 형상 특성을 나타냄. Bhattacharyya 계수는 분포 간 유사도를 의미하는 지표로, 0에서 1 사이 값을 가짐. 즉, 두 D2 형상분포 간 Bhattacharyya 계수는 대상 형상의 일치율을 나타냄.
- 표 24의 BIM 모델로부터 추출한 공간을 대상으로 BIM 형상정보 추출 알고리즘의 정확도를 평가하였음. 기존의 CAD 소프트웨어를 통해 추출한 대상 공간의 형상 정보를 원본 형상으로 간주하였으며, 개발 알고리즘을 통해 추출한 형상과 D2 형상분포의 Bhattacharyya 계수를 산정함.
- 각 BIM 모델에서 5개씩 공간을 선정하고 형상 정보를 추출한 결과, 평균 Bhattacharyya 계수는 0.9965로 산정됨. 따라서 본 연구에서 개발한 BIM 형상정보 추출 알고리즘의 오차율은 0.35%로 평가됨.

표 24. 시험 대상 BIM 모델

데이터베이스	BIM 모델	설명
DURAARK	Academic Advanced	교육용 단독주택 모델
	DDB Kingo	전원주택
	Haus30	독일 Munich에 위치한 저택
NIBS	Medical Clinic	미국 남서부에 위치한 종합병원 건물
	Duplex Apartment	아파트 모델
	Office Building	두 층 규모 사무용 건물
UA	OTC Conference Center	미국 보스턴에 위치한 컨퍼런스 센터 건물
	West Riverside Hospital Parking Garage	연구 목적의 주차장 모델

○ BIM 모델 구성 유형 정의 (성과점검기준표 [중빙 22] 참조)

- CFD 모델은 해석 목적과 환경에 따라 입력해야 하는 변수와 해석자 (solver)가 달라짐. 따라서 BIM 속성정보의 추출과 매칭에 앞서 CFD 해석 목적에 따른 모델의 구성 유형을 정의해야 함 (표 25). CFD 모델의 형상 설계에는 기본적으로 대상 공간 (IfcSpace 객체)의 형상정보가 필요함. 추출한 형상정보에 단순화 알고리즘을 적용하기 위해선 부피 기준과 거리 기준을 설정해야 함. 이때 해석 대상의 규모와 복잡도를 고려하여 부피 기준은 공간 형상의 부피에, 거리 기준은 형상의 특성길이에 비례하여 설정 가능함.
- 격자 설계는 CFD 시뮬레이션의 수치적 정확도와 연산 부하를 결정하는 단계임. 설계된 격자의 품질과 연산 부하에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 격자의 해상도이며, 형상 단순화와 마찬가지로 특성길이를 고려하여 설정 가능함.
- 3차원 형상의 특성길이 (L_C)는 부피 (V)와 표면적 (S)의 비율임 ($L_C = V/S$). 분석 대상의 부피 (V)는 공간 (IfcSpace 객체)의 형상정보로부터, 표면적 (S)은 경계를 형성하는 벽 (If

cWall), 슬라브 (IfcSlab), 개구부 (IfcOpeningElement)의 형상정보로부터 추출할 수 있음.

표 25. CFD 해석 설정별 요구 데이터

구분	CFD 해석 설정	BIM 모델 데이터
형상 설계	형상 단순화 거리 · 부피 기준	공간 형상 데이터, 특성길이
	외부 영역 크기	형상 Bounding Box
	개구부 형상 보존 및 부피 추출 여부	개구부 형상 데이터
격자 설계	격자 크기 · 해상도, 경계층 격자	공간 형상 데이터, 형상 특성길이
	내부 면 (face) 적용	-
경계 조건	열 성능 정보	재료별 열성능 특성
	표면 조도 정보	재료별 표면 조도 특성

- 경계조건은 CFD의 해석자에 따라 달리 구성함 (표 26). 지원하는 해석자 중 BSF만이 벽 경계 (wall boundary condition)의 열전달을 해석 가능함. 열전달 해석을 위해선 벽 또는 슬라브의 재료층 구성 정보 (IfcMaterialLayer)를 추출해야 함. 재료층 정보는 벽 또는 슬라브 객체로부터 IfcRelAssociatesMaterial과 IfcMaterialLayerSetUsage 객체를 거쳐 참조됨.

표 26. 해석자별 경계조건 구성

해석자 (solver)	속성정보 구성	
	열 성능 정보	표면 조도 정보
SF (simpleFoam)	-	IfcRelAssociatesMaterial IfcMaterialLayerSetUsage IfcMaterial
BBSF (buoyantBousinessq SimpleFoam)	-	
BSF (buoyantSimpleFoam)	IfcRelAssociatesMaterial IfcMaterialLayerSetUsage IfcMaterialLayer	

- 표면 조도 정보는 유체의 난류성에 영향을 주는 동점성 (kinetic viscosity) 물리량의 설정에 반영됨. 본 연구의 개발 기술이 지원하는 세 개의 해석자는 모두 난류 해석을 지원하며, 따라서 표면 조도 정보를 추출 · 적용 가능함. 표면 조도를 추출하기 위한 BIM 모델 정보의 구성은 열 성능 정보와 동일한 경로를 통해 추출함. 열 성능은 벽 또는 슬라브를 구성하는 모든 재료에 의해 결정되기 때문에 재료층 (IfcMaterialLayer)의 정보가 필요한 반면, 표면 조도는 가장 바깥에 위치한 재료 (IfcMaterial)의 종류만을 해석하면 됨.

○ BIM 속성정보 추출 (성과점검기준표 [중병 23] 참조)

- 건물 CFD 모델은 해석 영역의 경계, 즉 벽과 슬라브에 대한 경계조건을 입력받음. 실내 열적

환경의 정밀한 해석을 위해선 경계면의 전열 해석이 요구되며, 다시 말해 벽과 슬라브를 구성하는 재료층의 종류와 두께 정보가 필요함. BIM 모델의 벽 객체 (IfcWall) 또는 슬라브 객체 (IfcSlab)는 그림 31의 구조와 같이 구성층의 정보를 참조함. 벽 또는 슬라브로부터 IfcRelAssociatesMaterial, IfcMaterialLayerSetUsage 객체를 거쳐 재료 층 정보 (IfcMaterialLayerSet 또는 IfcMaterialLayer)에 접근 가능함. IfcMaterialLayer는 단일 재료로 구성된 층의 정보를 담는 객체이며, 재료의 이름과 층의 두께를 추출 가능함.

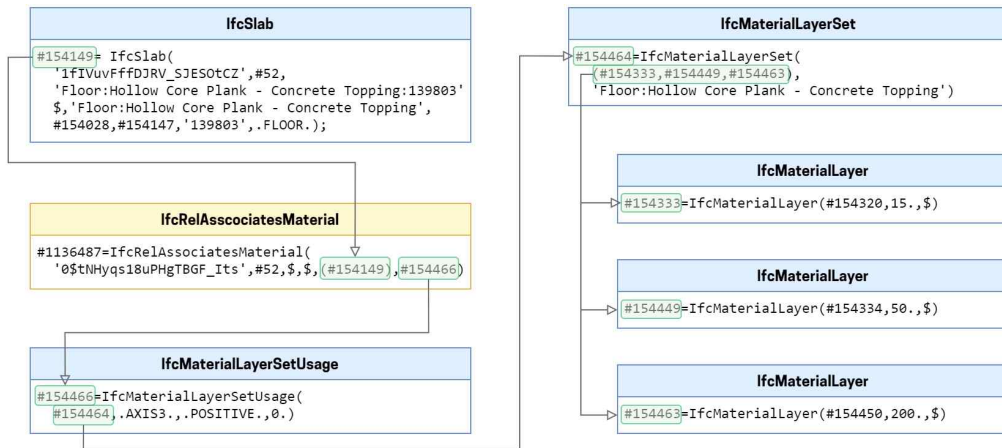


그림 31. 벽, 슬라브 객체와 재료층 객체 간 참조 관계

- 그림 31의 IFC 자료구조를 해석하기 위한 속성정보 추출 알고리즘은 그림 32과 같음. 대상 객체의 'HasAssociations' 속성 과 'RelatingMaterial' 속성을 통해 IfcMaterialLayerSetUsage 객체에 접근하며, 마지막으로 'ForLayerSet' 또는 'MaterialLayers' 속성을 통해 재료층 정보를 참조함. 대상 객체를 구성하는 개별 재료층에 대해 재료의 이름 ('Material.Name' 속성), 층의 두께 (LayerThickness) 속성을 추출하고 그 목록을 알고리즘의 결과로 반환함 (line 20~21).
- 표 24의 BIM 모델을 대상으로 속성정보 추출 알고리즘의 정확도를 평가함. 대상 모델에 포함된 모든 벽 (IfcWall)과 슬라브 (IfcSlab) 객체를 대상으로 재료층의 정보를 추출하였으며, IFC에 기록된 재료층의 이름과 비교하여 추출 성공률을 평가함.
- 표 27은 모델 및 객체별 속성정보의 추출 성공률을 평가한 결과임. Medical Clinic 모델과 Office Building 모델의 경우 슬라브 객체를 포함하지 않았음. 모든 모델과 벽, 슬라브 객체를 대상으로 산정한 성공률은 99.10%로 산정되었으며, 따라서 목표했던 추출 오차 1% 이하 정확도를 달성함.

```

1 @staticmethod
2 def _layers_info(entity: IfcEntity):
3     association = [
4         x for x in entity.HasAssociations if x.is_a('IfcRelAssociatesMaterial')
5     ]
6     assert len(association) < 2
7
8     if len(association) == 0:
9         return None
10
11     try:
12         relating_material = association[0].RelatingMaterial
13         if hasattr(relating_material, 'MaterialLayers'):
14             layer = relating_material.MaterialLayers
15         else:
16             layer = relating_material.ForLayerSet.MaterialLayers
17     except AttributeError:
18         return None
19
20     layers_info = [(x.Material.Name, x.LayerThickness / 1000.0) for x in layer]
21     return layers_info

```

그림 32. BIM 속성정보 추출 알고리즘

표 27. BIM 모델의 속성정보 추출 성공률

데이터베이스	BIM 모델	속성정보 추출 성공률	
		벽 (IfcWall)	슬라브 (IfcSlab)
DURAARK	Academic Advanced	100%	100%
	DDB Kingo	100%	100%
	Haus30	94%	100%
NIBS	Medical Clinic	100%	—
	Duplex Apartment	100%	95%
	Office Building	100%	—
UA	OTC Conference Center	99%	100%
	West Riverside Hospital Parking Garage	100%	92%

핵심성과 3	BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘 개발
단위성과 3-3	BIM 추출 및 데이터 CFD 매칭 알고리즘 구축

○ 형상 데이터 매칭 (성과점검기준표 [중방 24] 참조)

- obj 파일의 표면 이름은 공백 없는 로마자 문자의 조합으로 한정되기 때문에 BIM 모델에 지정된 벽과 슬라브의 이름이 적용 불가능할 수 있음. 이를 고려하여, 본 연구에서는 해석 형상 표면의 이름을 지정하기 위한 규칙을 만들었으며, 규칙에 따라 생성된 표면과 BIM 모델의 형상데이터를 매칭하기 위한 알고리즘을 설계하고 평가함.
- CFD 경계조건 설정을 위해 형상 표면의 명명 규칙을 표 28과 같이 설정함. 그림 33은 명명 규칙을 통해 BIM으로부터 추출한 형상 정보의 표면 이름을 결정한 예시임. BIM 모델의 벽과 슬라브 객체는 CFD 해석 모델의 벽 (solid wall) 경계조건으로 해석 가능함. 이를 고려하여 이름 형식의 접두어를 공통적으로 'Surface_'로 지정함. 반면 공기의 유출입 경계조건을 설정하는 개구부의 표면은 'Opening_' 접두사를 지정함.

표 28. CFD 해석을 위한 형상 표면의 명명 규칙

객체 종류	이름 형식	변수
벽 (IfcWall)	Surface_F {floor} W {index}	{floor}: 객체가 속하는 층의 번호 {index}: 해당 층, 공간 내 객체의 번호 (x, y, z 좌표 오름차순)
슬라브 (IfcSlab)	Surface_F {floor} S {index}	
개구부 (IfcOpeningElement)	Opening_ {index}	

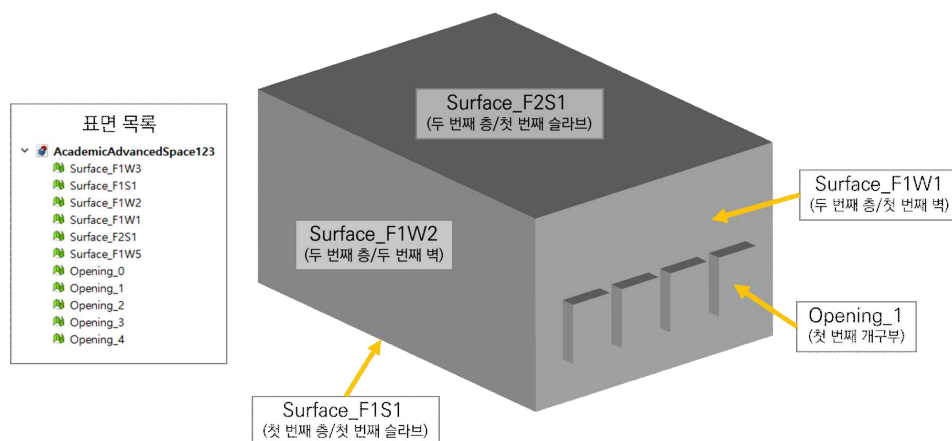


그림 33. CFD 해석을 위한 형상 표면의 명명 예시

- 형상 단순화 알고리즘과 전처리를 거친 형상은 공간 내부에 면 (face)이 생성됨. 내부 표면은 CFD 해석 시 경계조건을 적용하지 않는 'empty face'로 지정해야 함. 이를 위해 형상데이터

의 표면을 내외부 면으로 분류하는 알고리즘을 설계함. 이후 외부 표면으로 분류된 면의 좌표를 BIM 모델의 객체와 비교하고 매칭하는 알고리즘을 설계함.

- 전처리를 완료한 형상 정보는 다면체 형상 (solid)의 복합체로 표현됨. 형상의 외부 표면 (surface)을 구성하는 면은 하나의 solid에 속하지만, 내부 면 (interior face)은 두 개의 solid의 경계를 형성함. 이를 고려하여 표면을 분류하는 알고리즘을 구현함 (그림 34). 형상에 포함된 면 중 경계를 형성하는 solid의 개수가 두 개인 면은 내부 면 (interior face)로 (line 9~12), 하나인 면은 표면 (surface)로 분류함 (line 14~17).
- 그림 34(c)는 형상 표면 중 개구부의 표면을 분류하고 IFC 정보와 매칭하는 알고리즘임. IF C에 저장된 개구부 (IfcOpeningElement)의 형상은 부피가 존재하는 3차원 형상인 반면, CF D 해석의 경계조건은 하나의 면 (face)에 적용함. 따라서 전처리를 거친 형상 표면 중 IfcOpeningElement의 형상과 가장 가까운 표면을 매칭하는 알고리즘을 구현함.

```

1 def classify_compound(self):
2     # 일하는 solid가 2개인 면은 interior, 1개인 면은 surface로 분리
3     face_solid = defaultdict(list)
4
5     for solid in TopologyExplorer(self._compound).solids():
6         for face in TopologyExplorer(solid).faces():
7             face_solid[face.HashCode(int(self._hash_upper))].append(solid)
8
9     self._obj_interior = [
10         f for f, i in zip(self._comp_faces, self._comp_ids)
11         if len(face_solid[i]) > 1
12     ]
13
14     self._obj_surface = [
15         f for f, i in zip(self._comp_faces, self._comp_ids)
16         if len(face_solid[i]) == 1
17     ]

```

(a) 내외부 면 분류

```

1 def classify_walls(self, tol=1e-4):
2     # 각 surface에 대해 가장 가까운 wall의 번호 계산
3     center_gp = [center_of_mass(x) for x in self._obj_surface]
4     center_vertex = [BRepBuilderAPI_MakeVertex(x).Vertex() for x in center_gp]
5     dist = np.array([
6         [shapes.distance(c, w, tol) for w in self._walls] for c in center_vertex
7     ])
8     closest = np.argmin(dist, axis=1)
9
10    # 규칙에 따라 표면 이름 지정
11    if self._wall_names is None:
12        length = len(str(int(np.max(closest))))
13        names = ['{:0{}d}'.format(x, length) for x in closest]
14    else:
15        names = [self._wall_names[x] for x in closest]
16
17    # 결과 저장
18    self._obj_surface = tuple((x, y) for x, y in zip(names, self._obj_surface))

```

(b) 벽 표면 매칭

```

1 def classify_opening(self, tol=1e-4):
2     for faces in self._op_faces:
3         # 공간과 거리가 떨어져 있는 face (= inlet / outlet) 판단
4         dist = [shapes.distance(face, self._space, tol) for face in faces]
5         self._obj_opening.extend([f for f, d in zip(faces, dist) if d > tol])
6
7     # surface 중 opening face 제거
8     _, op_norm, _, op_center, _ = face_info(self._obj_opening)
9     _, sur_norm, _, sur_center, _ = face_info(self._obj_surface)
10
11    # 표면(벽) 중 opening에 해당하는 면 추출
12    surface_opening_mask = is_same_face(op_faces=self._obj_opening,
13                                         op_norm=op_norm,
14                                         op_center=op_center,
15                                         sur_norm=sur_norm,
16                                         sur_center=sur_center,
17                                         tol=tol)
18
19    # IFC 객체와 거리 계산
20    distsq = np.square(op_center.reshape([-1, 1, 3]) - sur_center)
21    # 가장 가까운 표면을 opening 표면으로 지정
22    srf_closest_opening = np.argmax(np.sum(distsq, axis=2), axis=0)
23    srf_opening_idx = np.argwhere(np.any(surface_opening_mask, axis=0))
24
25    # 결과 저장
26    self._obj_opening = [(srf_closest_opening[i], f)
27                          for i, f in enumerate(self._obj_surface)
28                          if i in srf_opening_idx]
29    self._obj_surface = [
30        f for i, f in enumerate(self._obj_surface) if i not in srf_opening_idx]

```

(c) 개구부 매칭

그림 34. 형상 정보 매칭 알고리즘

- 대상 모델의 표면에서 개구부 표면을 제외하고 남은 면은 모두 벽 (wall boundary condition)에 해당함. 벽 표면을 IFC의 벽 객체 (IfcWall)와 매칭하는 알고리즘은 그림 34(b)와 같이 구현함. 개구부 표면 매칭과 동일하게 표면과 IFC 객체 간 모든 조합의 거리를 산정한 후, 표면과 거리가 가장 가까운 IFC 객체를 매칭함. 매칭된 표면은 명명 규칙에 따라 obj 파일의 표면 이름이 지정됨.

- 형상정보 매칭의 결과는 경계조건 설정 (그림 35(a))과 obj 형상 파일 (그림 35(b))로 저장

됨. 각 결과물에 본 연구에서 정한 규칙에 따른 표면의 이름 (e.g. "Surface_F02W1")이 기록되며, 경계조건 설정 파일에는 BIM 모델에 명시된 원본 벽의 이름이 함께 기입됨 (e.g. "Basic Wall:Interior - Sound 7 3/4" Partition:129517").

- 형상 매칭 알고리즘의 정확도를 표 24의 BIM 모델을 대상으로 평가함. BIM 모델별로 5개의 공간을 대상으로 선정하고, 출력된 파일의 형상 정보를 원본 BIM 파일의 조회 결과와 비교하여 매칭 정확도를 평가함. 검사 결과 모든 시험 대상 모델의 경계를 이루는 벽과 슬라브의 형상 정보를 성공적으로 매칭함.

```
Surface_F02W1
{
  // Surface name: "Basic Wall:Interior - Sound 7 3/4" Partition:129517"
  // Surface type: "IfcWallStandardCase"
  // Global id: "2iuY6U4dH4W3urc0e0nMph"
  // Storey: "B1 BASEMENT"

  // Material names:
  // Material 1: "Finishes - Interior - Gypsum Wall Board"
  // Material 2: "Metal - Furring"
  // Material 3: "Finishes - Interior - Gypsum Wall Board"
  // Material 4: "Metal - Stud Layer"
  // Material 5: "Finishes - Interior - Gypsum Wall Board"
  // Material 6: "Metal - Furring"
  // Material 7: "Finishes - Interior - Gypsum Wall Board"

  // Matched material names:
  // Material 1: "Gypsum Board- 1/2 in."
  // Material 2: "brass muntz metal"
  // Material 3: "Gypsum Board- 1/2 in."
  // Material 4: "Metals, lead"
  // Material 5: "Gypsum Board- 1/2 in."
  // Material 6: "brass muntz metal"
  // Material 7: "Gypsum Board- 1/2 in."

  type          fixedValue;
  value          uniform 293.15;
}
```

(a) 경계조건 (온도)

```
436 g Surface_F02W1
437 usemtl None
438 s off
439 f 169//18 170//18 171//18
440 f 172//18 169//18 171//18
441 f 173//18 174//18 170//18
442 f 169//18 173//18 170//18
443 f 171//18 175//18 176//18
444 f 171//18 170//18 175//18
445 f 174//18 177//18 175//18
446 f 170//18 174//18 175//18
447 o Surface_F02W5
448 v 23.498180 55.422798 -2.413000
449 v 23.498180 55.422798 -4.495800
450 v 15.700370 55.422798 -4.495800
451 v 15.700370 55.422798 -2.413000
452 v 23.498180 55.422798 -2.057400
453 v 15.700370 55.422798 -2.057400
454 v 25.908001 55.422798 -2.413000
455 v 25.908001 55.422798 -4.495800
456 v 25.908001 55.422798 -2.057400
457 v 26.104851 55.422798 -2.413000
458 v 26.104851 55.422798 -4.495800
459 v 26.104851 55.422798 -2.057400
460 v 29.827320 55.422798 -2.413000
461 v 29.827320 55.422798 -4.495800
462 v 29.827320 55.422798 -2.057400
463 v 31.656120 55.422798 -2.413000
```

(b) 형상정보

그림 35. 형상 매칭 결과 예시

○ 속성 데이터 매칭 (성과점검기준표 [중방 25] 참조)

- BIM에 저장된 건축재료의 속성정보로부터 CFD 모델의 경계조건을 자동으로 추출하기 위해 속성정보와 물성치 데이터베이스 매칭 알고리즘을 개발함. BIM을 통한 설계 표준에 따르면 건축 재료의 이름은 필수적으로 입력해야 하나, 재료의 속성정보는 비필수 입력 항목임. 따라서 재료의 속성정보가 입력되지 않은 건물 모델의 CFD 모델 설계를 보조하기 위해, 건축재료의 열성능과 표면조도 데이터베이스를 구축함.
- 조사 대상 데이터는 매칭을 위한 재료의 이름, 각 재료의 밀도, 비열, 열전도율, 표면 조도임. 각 물성치의 단위는 CFD 전처리의 편의성을 위해 OpenFOAM의 입력 단위로 변환함. 재료별 물성치 자료는 오픈소스 라이브러리인 ht, fluid와 유체역학 관련 문헌으로부터 조사함. 표 29, 30은 구축한 데이터베이스의 일부임.

표 29. 재료별 열성능 라이브러리 일부

재료명	밀도 (kg/m^3)	비열 (J/kgK)	열전도율 (W/mK)
Metals, stainless steel	7900	460	17.0
Metals, iron, cast	7500	450	50.0
Plastics, polycarbonates	1200	1200	0.2
Rubber, natural	910	1100	0.13

표 30. 재료별 조도 라이브러리 일부

재료	조도 (m)	재료	조도 (m)
Brass	0.00000152	Wood stave	0.000183
Lead	0.00000152	Rough wood stave	0.000914
Glass	0.00000152	Concrete	0.000305

- 건축재료의 이름은 문자열 (string)으로 저장됨. 문자열 간 유사도를 평가하기 위해 리벤슈타인 거리 (Levenshtein distance)를 적용함. 리벤슈타인 거리는 한 문자열을 다른 문자열과 동일하게 수정하기 위한 최소 편집 (문자 삽입, 삭제, 변경) 횟수를 의미함.
- 그림 36은 재료의 열성능 속성정보를 매칭하는 알고리즘임. 입력된 재료명과 라이브러리에 존재하는 모든 재료명의 리벤슈타인 거리를 산정하고, 가장 거리가 짧은 재료명 (nearest_name 변수)를 찾음 (line 20~22).
- 속성 매칭의 정확도를 평가하기 위해 표 24의 BIM 모델을 대상으로 재료 데이터베이스와 속성정보 알고리즘을 시험함. 대상 BIM 모델에 저장된 178개의 모든 재료 정보 (IfcMaterial 객체)에 속성 정보 매칭 알고리즘을 적용함. 표 31은 개별 재료의 매칭 결과 예시임 (열성능 및 조도 정보는 생략). 시험 결과 개발한 알고리즘은 모든 재료 정보를 오류 없이 매칭했으며, 따라서 속성정보의 매칭 오차는 0%로 평가됨. 매치된 재료명의 유사도는 평균 0.876, 최소 0.48임.

```

1 def thermal_properties(self, material_name: str, threshold):
2     """이름이 가장 유사한 재료의 열적 특성 반환
3     Parameters
4     -----
5     material_name: str
6         재료 이름
7
8     Returns
9     -----
10    tuple: tuple containing:
11        properties: dict,
12            {'rho': density [kg/m^3],
13             'Cp': specific heat [J/kgK],
14             'k': conductivity [W/mK]}
15        english_name: str, 영어 재료명 (입력값이 영어인 경우 동일)
16        nearest_name: str, DB와 매칭된 재료명
17    """
18    eng_name, score = self.to_english_material(material_name)
19    nearest_name, score = extractOne(query=eng_name,
20                                    choices=self._names,
21                                    scorer=self._scorer)
22    if score < threshold:
23        res = None
24    else:
25        series = self._db.loc[self._db['Name'] == nearest_name, :].squeeze()
26
27        prop = {
28            'rho': series['Density {kg/m3}'],
29            'Cp': series['Specific Heat {J/kg-K}'],
30            'k': series['Conductivity {W/m-K}']
31        }
32        res = prop, eng_name, nearest_name
33    return res

```

그림 36. 열성능 속성 매칭 알고리즘

표 31. 속성정보 매칭 결과 예시

BIM 모델	재료 이름		유사도
	IFC 객체	재료 DB	
Academic Advanced	Carpet (1)	Carpet- 1/2 in.	1.00
Academic Advanced	Concrete - Cast In Situ	concrete cinder	0.70
Academic Advanced	Concrete - Cast-in-Place Concrete	concrete cinder	0.70
Medical Clinic	Plasterboard	Gypsum / Plaster Board	0.71
Medical Clinic	Wood - Sheathing - plywood	Plywood	1.00

○ 알고리즘 구축 (성과점검기준표 [중빙 26] 참조)

- 앞서 개발한 BIM의 형상·속성정보 추출 및 매칭 알고리즘을 통합하고 CFD 전처리 알고리즘을 설계함. 그림 37은 CFD 전처리 알고리즘의 순차 다이어그램 (Sequence diagram)임.
- IfcConverter 클래스는 IFC 파일을 해석하고 다른 알고리즘을 제어하는 메인 클래스임. IFC로부터 대상 공간과 그 경계를 구성하는 벽, 슬라브, 개구부의 형상 정보를 추출한 후, simplify 함수를 통해 내부 부피 생략 알고리즘 (merge_inner_volume)과 표면 통합 알고리즘 (merge_minor_face)을 순차적으로 실행함.
- 전처리를 거친 형상정보의 매칭 알고리즘은 obj 파일의 저장과 함께 시행됨 (ObjConverter 클래스). 형상정보의 내외부 면 분류 (classify_compound), 개구부 형상 매칭 (classify_opening), 벽 형상 매칭 (classify_walls) 알고리즘을 거쳐 obj 파일을 저장함.
- obj 파일을 저장한 경우, CFD 케이스 파일을 생성하는 OpenFoamCase 클래스와 속성 정보를 매칭하는 MaterialMatch 클래스의 인스턴스가 생성됨. IfcConverter로부터 CFD 해석의 설정 (options)를 입력받은 OpenFoamCase 인스턴스는 MaterialMatch로부터 경계조건 정보 (thermal properties, friction)을 전달받음. 마지막으로 CFD의 케이스 파일을 저장한 뒤 (foam_file.save) 전처리 알고리즘이 종료됨.

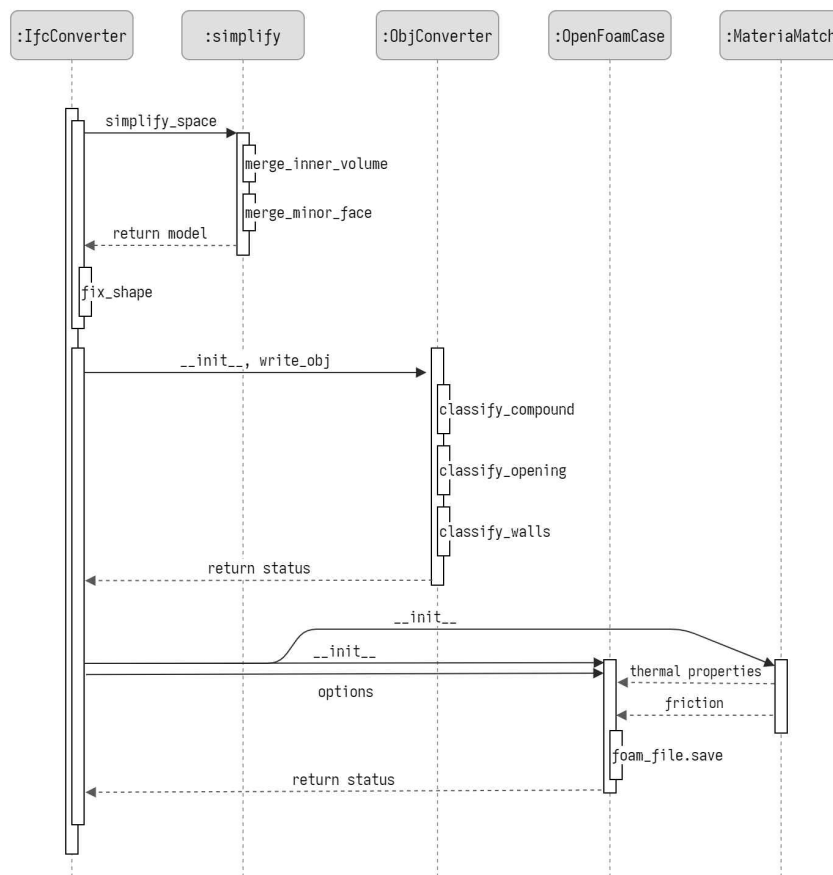


그림 37. CFD 전처리 알고리즘의 순차 다이어그램

- 구현된 CFD 전처리 알고리즘을 실행하면 그림 38과 같은 OpenFOAM 시뮬레이션 케이스 폴더 구조가 생성됨. '0' 폴더는 속성정보 매칭을 통해 생성한 초기 경계조건 파일을 담고 있음. 'geometry.obj' 파일과 'geometry' 폴더는 BIM으로부터 추출·매칭한 형상 정보임. 상수 조건 ('constant' 폴더)은 해석자의 종류에 따라 자동 설정되며, 수치해석 설정 ('system' 폴더)은 해석자의 설정에 따라 결정됨.
- CFD 전처리 알고리즘을 형상 매칭 알고리즘의 평가 대상과 동일한 40개의 공간을 대상으로 평가함. 모든 모델을 대상으로 CFD 모델 추출 및 전처리 (그림 39(a)), 격자 설계 (그림 39(b)), CFD 연산 (그림 39(c))을 시행하였음. 모든 평가 대상 모델에 대해 모두 전처리와 연산 과정이 정상적으로 실행되었으며 실행 결과에 오차가 없는 것으로 평가됨.

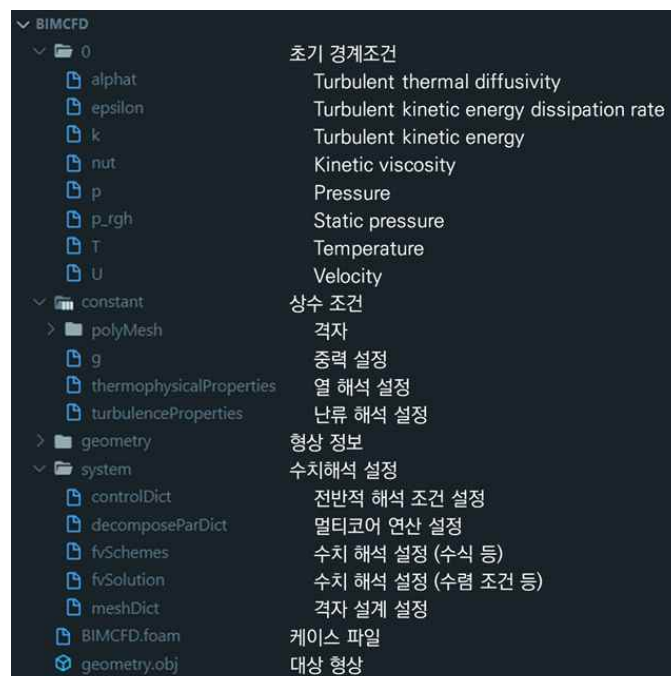


그림 38. 전처리 알고리즘을 통한 CFD 모델 구성 예시

```

명령 프롬프트 - run
INFO: GL: Shading version <b'4.60 NVIDIA'>
INFO: GL: Texture max size <$2768>
INFO: GL: Texture max units <32>
INFO: Window: auto add sdl2 input provider
INFO: blender path: "C:\Program Files\Blender Foundation\Blender\blender.exe"
INFO: 다음 옵션에 기본값 적용: ['flag_energy', 'max_cell_size', 'boundary_layers']
INFO: Project BIMCFD is saved to D:\test\BIMCFD

```

(a) CFD 모델 추출 로그

```

17 Non-orthogonality check OK.
18 Face pyramids OK.
19 Max skewness = 2.2786 OK.
20 Coupled point location match (average 0) OK.
21
22 Mesh OK.
23
24 End

```

(b) 격자 설계 로그

```

명령 프롬프트
gy@DESKTOP-P250OG9: ~
ExecutionTime = 10.24 s ClockTime = 11 s

Time = 5

DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 0.673511, Final residual = 0.00223661, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 0.575203, Final residual = 0.0019853, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for Uz, Initial residual = 0.700358, Final residual = 0.00449949, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 0.0302269, Final residual = 0.000255351, No Iterations 3
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.776037, Final residual = 0.00739513, No Iterations 5
time step continuity errors : sum local = 0.0320273, global = 0.000235022, cumulative = 0.000353396
rho min/max : 1.12341 1.18678
DILUPBiCGStab: Solving for epsilon, Initial residual = 0.0496111, Final residual = 9.54599e-05, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for k, Initial residual = 0.0396532, Final residual = 0.000306515, No Iterations 2
ExecutionTime = 12.35 s ClockTime = 13 s

```

(c) CFD 시뮬레이션 화면

그림 39. CFD 모델 전처리 및 연산 결과

(2) 연구개발 성과

(가) 기술적 성과

① 기술 수준 및 기술 개발 성과

○ 오차 0.35% 수준의 BIM 형상정보 추출 기술 개발 (성과점검기준표 [중빙 21])

- BIM 모델은 자체 규약인 IFC 형식으로 저장되며, 건축 설계에 특화된 일부 프로그램 외에는 직접 지원하지 않음. 본 연구를 통해 CFD 시뮬레이션을 위한 전처리 프로세스를 포함한 형상 정보 추출 기술을 개발하였음. 기존 CAD 소프트웨어를 통한 수동 추출 결과와 비교했을 때 오차는 0.35%의 정확도를 달성함.
- 개발 기술은 CFD 시뮬레이션뿐만 아니라 에너지, 구조해석 등 건물을 대상으로 한 타 수치해석 시스템에도 적용 가능할 것으로 기대됨.

○ 데이터베이스 매칭을 통한 BIM 속성정보 추출 기술 개발 (성과점검기준표 [중빙 23, 25])

- BIM의 속성정보 해석을 위해 건축 재료의 열적 성능과 조도 데이터베이스를 구축하고 BIM 정보와 매칭하는 기술을 개발함. 건물 CFD 해석을 위해선 개별 경계면 (벽, 천장, 바닥, 창문, 문)의 경계 유형과 물성치를 수동으로 입력해야 함. 각 경계면에 대한 자료 조사, 설정의 반복은 생산성 저하를 유발할 뿐만 아니라 오류가 빈번하게 발생하는 작업이기도 함.
- 개발 기술의 시험 결과, BIM 모델에 저장된 모든 재료의 정보를 오류 없이 추출하고 데이터베이스와 매칭함.

○ 건물 CFD 모델의 자동 전처리 모듈 개발 (성과점검기준표 [중빙 22, 26])

- 개발한 형상정보 단순화·추출·매칭, 속성정보의 추출·매칭 알고리즘을 통합한 건물 CFD 모델의 전처리 모듈을 개발함.
- CFD 전처리 모듈은 형상 설계, 격자 설계, 경계 조건 등 다양한 설계 조건의 설정을 지원하기 위한 사용자 옵션을 지원함.
- 생성된 CFD 모델의 격자 설계와 시뮬레이션을 시행한 결과, 40개 모든 모델에서 오류가 발생하지 않아 개발 모듈과 생성된 모델의 무결성이 확인됨.

○ 데이터 매칭 정확도 오차 0% 달성 (성과점검기준표 [중빙 33])

- TTA 공인 인증시험을 통해 개발 모듈의 데이터 매칭의 정확도 성능을 평가함. BIM 모델의 재료 정보가 CFD 모델에 매칭되는 정확도를 평가함.
- TTA 공인 인증시험 결과, 데이터 매칭의 정확도는 오차 0%로 도출됨. (40건에 대하여 평가하였으며, 모두 정상적으로 매칭됨). 따라서 오차 0%로 데이터 매칭의 정확도가 평가됨.
- 따라서, 데이터 매칭의 정확도 항목의 주요성능지표 목표치인 오차 5% 이하를 달성함.

② 연구 실적물

○ 국내 특허출원 1건 (성과점검기준표 보고서 [중빙 38])

- BIM 모델 형상 단순화 방법에 대한 국내 특허출원 1건을 달성함.

관 인 생 력 출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2020.12.04
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(INP20183)
출 원 번 호 10-2020-0168072 (접수번호 1-1-2020-1313450-92)
(DAS접근코드 E2E6)
출 원 인 명 칭 광문대학교 산학협력단(2-2004-010265-4)
대 리 인 성 명 정창수(9-2003-000251-1)
발 명 자 성 명 최철호 박관용 서우석 유채훈
발 명 의 명 칭 건물 정보 모델의 건물 형상 단순화 시스템 및 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 설명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출 기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허-실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>
※ 우선권 인정기간 : 특허-실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특허교환가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. DAS접근코드는 이 특허출원을 기초로 외국에 특허출원을 할 경우 파리조약 제4조D(1)에 따른 우선권 주장 증명서류를 세계지식재산기구의 전자적 접근 서비스(DAS, Digital Access Service)를 통해 전자적 전달을 신청할 때 필요합니다.
9. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

○ SCI(E) 논문 1편 (성과점검기준표 보고서 [중빙 40])

– 형상 단순화 기술과 관련하여 SCI(E) 저널에 논문 게재 1건을 달성함



Article

Building Geometry Simplification for Improving Mesh Quality of Numerical Analysis Model

Gwanyong Park ¹, Changmin Kim ¹, Minhyung Lee ¹ and Changho Choi ^{2,*}

¹ Institution of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul 01905, Korea; beskep42@gmail.com (G.P.); kcm@mrplan.co.kr (C.K.); star4union@gmail.com (M.L.)

² Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

* Correspondence: choi1967@kw.ac.kr; Tel.: +82-2-972-5645

Received: 30 June 2020; Accepted: 1 August 2020; Published: 5 August 2020

Abstract: Numerical analysis, especially the finite volume method (FVM), is one of the primary approaches employed when evaluating a building environment. A complicated geometry can degrade the mesh quality, leading to numerical diffusions and errors. Thus, this study develops and evaluates an automatic building geometry simplification method based on integrating similar surfaces for the geometry of an indoor space. A regression model showed that the complexity of the simplified geometry and its similarity to the original geometry decreased linearly with the threshold of the method. The mesh quality was significantly improved by the simplification. In particular, the maximum skewness decreased exponentially with the threshold of the method. It is expected that the simplification method and regression model presented in this study can be used to quantitatively control the mesh quality.

Keywords: automation; building model; geometry simplification; finite volume method; mesh quality; model design

1. Introduction

The finite volume method (FVM) is commonly used to perform numerical analysis in many fields, including fluid dynamics, owing to its advantages in flux calculations in terms of precision [1]. In the construction field, FVM is used for environmental analyses using computational fluid dynamics (CFD), fire safety analysis [2], and some cases of heat, air, and moisture (HAM) analysis [3,4]. In particular, CFD is widely used in the analysis of aerodynamic environments, e.g., indoor ventilation and micro-environments around occupants [5].

FVM is a method that discretizes and analyzes partial differential equations in the form of algebraic equations. For the computation of algebraic equations, there is a need to divide the target model into finite volumes (“cells”), i.e., to design the mesh. During the mesh design process, a discretization error can occur, and the size of the error is affected by the geometry of the finite volume. Discretization errors not only reduce the accuracy of the simulation, but also cause numerical diffusion, which interferes with the convergence of the simulation. The accuracy and stability of the numerical analysis are quantitatively evaluated using a mesh quality that is calculated based on the geometry of cells [6,7]. The mesh quality of an FVM model is typically evaluated according to the non-orthogonality and skewness. Non-orthogonal cells and skewed cells that are generated near complex surfaces are the main sources of numerical errors. In particular, analyses of buoyancy-driven environments, such as those with natural ventilation, are significantly affected by the mesh quality [8,9].

As the fine features and complexity of the geometry adversely affect the mesh design, a geometry simplification is commonly used as a preprocessing step to improve the mesh quality of

7. Conclusions

This study proposed an automatic simplification methodology of building geometries to improve the accuracy and stability of the FVM model, and analyzed changes in geometry and mesh quality by simplification. The geometry simplification method proposed in this study integrates similar faces through angle and a distance threshold, and removes insignificant faces from the surfaces composing the building model. To evaluate the applicability of the simplification method, the geometries of the building models obtained from the public BIM library were simplified under various conditions.

To evaluate the extent of the shape changes from the simplification method, the similarity between the original and simplified geometry was evaluated using the D2 shape distribution and Bhattacharyya coefficient. In addition, the complexity of the building model and hexahedron meshing were evaluated using the ITC. As a result, the similarity of simplified geometry to the original model and the complexity decreased in proportion to the distance threshold. Therefore, it was determined that the degree of geometry changes could be controlled linearly using the threshold of the simplification method. The mesh quality of the building model was evaluated using the maximum non-orthogonality, skewness, and the hexahedron cell ratio as each affects the accuracy and stability of FVM analysis. The mesh quality metrics showed a significant change based on the distance threshold from the geometry simplification and the complexity of the original geometry. All three mesh quality metrics improved with geometry simplification. In particular, the maximum skewness showed an exponential decrease.

To evaluate the priority of the faces to be removed among the building surfaces, an index for evaluating the similarity between the normal vector of a target face and other faces was proposed in this study. The proposed algorithm guarantees identical results with the same input as the results achieved by evaluating the priority order of entire faces with the index. Furthermore, the hexahedral meshing complexity of the geometry is expected to be reduced as Cartesian angles are formed. The experimental results showed that the mesh quality of an FVM model can be quantitatively controlled using the geometry simplification method proposed in this study. In particular, through the linear regression model, it is possible to estimate the mesh quality from the geometrical properties of the original model and the size of the mesh to be designed, as well as to evaluate the required threshold for simplification. However, considering the low adjusted R^2 of the regression model, it is believed that there may be a cause of error that has not been considered in this study. In practice, it is expected that the mesh quality can be further improved by applying multiple simplification thresholds and/or traditional preprocessing methods, such as the blocking of geometries.

This study evaluated the applicability of a geometry simplification method in terms of the geometry changes and the improvement of the mesh quality. However, considering that differences may occur in the analysis results as the geometry changes, further studies are needed to evaluate the effects of geometry simplification methods on individual FVM analysis results, such as those for CFD, fire dynamics simulations, and thermal simulations. Based on these studies, it is expected that an appropriate geometry simplification threshold can be presented while considering the relationship between the error caused by the geometry change and the effect of improving the mesh quality.

Author Contributions: Conceptualization, C.K. and M.L.; methodology, G.P., C.K. and M.L.; software, G.P.; validation, G.P., C.K. and M.L.; formal analysis, G.P.; investigation, G.P., M.L.; resources, G.P.; data curation, G.P.; writing—original draft preparation, G.P.; writing—review and editing, G.P. and C.K.; visualization, G.P.; supervision, C.K. and C.C.; project administration, C.K. and C.C.; funding acquisition, C.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 20CTAP-C152000-02). The present research has been conducted by the Research Grant of Kwangju University in 2019.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

○ KCI 논문 1편 (성과점검기준표 보고서 [증빙 43])

- 형상 특성 지표를 이용한 CFD 모델의 격자 품질 예측과 관련하여 KCI 저널에 논문 게재 1건을 달성함.



형상 특성 지표를 활용한 건물 CFD 모델의 격자 품질 예측

이민형¹ · 김창민² · 박관용³ · 이선우⁴ · 최창호^{5*}

¹미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소 선임연구원,

²미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소 책임연구원,

³미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소 연구원,

⁴Texas A&M 대학교 건설과학과 연구원,

⁵광운대학교 건축공학과 교수

Grid Quality Prediction for CFD Model of Buildings using Geometry Characteristic Index

Lee, Min-Hyung¹ · Kim, Chang-Min² · Park, Gwan-Yong³ · Lee, Sun-Woo⁴ · Choi, Chang-Ho^{5*}

¹Junior Researcher, Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

²Senior Researcher, Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

³Researcher, Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

⁴Researcher, Department of Construction Science, College of Architecture, Texas A&M University, TX, U.S.

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

*Corresponding author: Choi, Chang-Ho, Tel: +82-2-942-3924, E-mail: choi1967@kw.ac.kr

ABSTRACT

In this study, a model for predicting the grid quality of a building CFD model was developed using geometry characteristic index. Inverse topology count, surface area to volume ratio, and shape complexity were used as geometry characteristic index for the prediction of grid quality. Through the case study, geometry characteristic indices were calculated for a total of 37 shapes. The grid quality of each model was extracted. In the case of the inverse topology count, there was a high correlation with the maximum non-orthogonality. Multiple linear regression analysis was performed using the case study results, and a grid quality prediction model was developed through this. Two prediction models were derived for each grid quality, and both were evaluated as statistically significant. In the case of shape complexity, it was not derived as a significant factor in the grid quality prediction model. The adjusted R^2 of the prediction model for the maximum non-orthogonality, and maximum skewness was derived as 0.738, and 0.806, respectively.

주요어 : 격자 품질, 격자, 형상 특성 지표, 다중회귀분석, 전산유체역학

Keywords : Grid quality, Grid, Geometry characteristic index, Multiple regression analysis, Computational fluid dynamics

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 December, 14(6): 577-588
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200049>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: October 30, 2020

Revised: November 9, 2020

Accepted: November 9, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 포함한 수치 해석 기법에서는 분석 대상 공간을 유한개의 격자로 분할하는 과정이 중요하다. 분할된 격자를 기반으로 유체의 흐름 특성을 표현한 Navier-Stokes 방정식을 수치해석하기 때문에, 격자의 품질이 전체 해석

결론

고품질의 격자 모델을 설계하기 위한 복잡한 과정과 시행착오를 줄이기 위해 본 연구에서는 형상 특성 지표를 활용하여 건물 CFD 모델의 격자 품질 예측 모델을 개발하였다. 격자 품질에 영향을 주는 예측 인자를 선정하고자 하였으며, *ITC*, *SAV*, *SC*의 3가지 형상 특성 지표를 선정하였다. 케이스 스터디를 통해 특성 지표가 격자 품질에 미치는 영향을 파악하고 다중 선형회귀분석을 통해 예측 모델을 개발하였다.

예측 모델 개발을 위하여 37개의 대상 시설에 대하여 케이스 스터디를 수행하였다. 이와 함께 형상 특성 지표별로 격자 품질에 미치는 영향을 분석하였으며, *ITC*의 경우 최대 non-orthogonality와 높은 상관성이 확인되었다. 케이스 스터디 결과를 활용하여 다중선형회귀분석을 실시하였고 이를 통해 격자 품질 예측 모델을 개발하였다. 격자 품질별로 예측 모델을 도출하였으며 모두 통계적으로 유의한 것으로 평가되었다. 최대 non-orthogonality에 대한 예측 모델의 adjusted R^2 은 0.738, 최대 skewness에 대한 예측 모델의 adjusted R^2 은 0.806으로 도출되었다. *ITC*와 *SAV*는 품질 지표 예측식에 모두 유의한 인자로 도출되었으나, *SC*의 경우 품질 예측에 유의한 인자로 도출되지 않았다.

본 연구에서는 기존 사례가 없는 격자 품질 예측 모델 개발하였으며, 연구 결과 형상 특성 지표를 이용한 예측 결정력이 품질 지표별로 각각 73.8%, 80.6%로 도출되었다. 이를 통해 특성 지표를 통한 격자 품질 지표 예측 가능성을 확인할 수 있었다. 또한, *SC*를 제외한 두 지표는 예측 모델에 모두 유의한 인자로 도출되어 품질 예측에 적합하다는 것을 확인하였다. 한편 본 연구에서는 개방형 CFD 분석 도구인 OpenFOAM을 통해 육면체 격자계에 대한 품질 예측을 수행하였다. 그러나 복잡도가 높은 건축물 형상에 대해서는 육면체 격자 설계가 불가능하여 사면체, 프리즘 격자 등이 적용되어야 할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 위와 같은 다양한 격자 형상에 대한 품질 예측도 수행할 예정이다. 이와 함께 향후 연구에서는 케이스 및 인자 추가, 기계 학습 등을 이용하여 예측 모델의 결정력을 향상시키고 검증을 진행하여 예측 모델을 신뢰성을 확보할 예정이다.

후기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C152000-02).

References

1. Ali, Z., Tyacke, J., Watson, R., Tucker, P.G., Shahpar, S. (2019). Efficient preprocessing of complex geometries for CFD simulations. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 33(3), 98-114.

○ 국내학술발표 1건 추가 달성 (성과점검기준표 보고서 [증빙 46])

- 형상 단순화 기술을 통한 격자 품질 개선 주제로 국내 학술발표 1건을 추가 달성함.

발표논문(포스터)

형상 단순화를 통한 건물 수치해석 모델의 격자 품질 개선 효과 분석

박관용* 서우석** 유채훈** 최창호**

*(주)미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소, **광운대학교 건축공학과

Effects of Geometry Simplification on Mesh Quality Improvement of Building Numerical Model

Park, Gwanyong* Seo, Wooseok** Yu, Chaehun** Choi, Changho**

*Institution of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

**Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

Abstract

The finite volume method(FVM) is a numerical analysis method widely used in the construction area. As the complex geometry causes a numerical error of the FVM model, automated building geometry simplification methods had been proposed. However, the effect of simplification on mesh quality, which indicates the numerical accuracy of the model, has not been evaluated. This study aimed to analyze the change in mesh quality of the building model according to the degree of simplification. The regression model showed that the mesh quality of the models improved significantly with the degree of simplification.

주요어 : 격자 품질, 모델 설계, 수치해석, 형상 단순화

Keywords : Mesh quality, Model design, Numerical analysis, Geometry simplification

1. 서론

수치해석 기법, 특히 유한체적법의 일종인 전산유체역학은 실내의 공조 환경, 화재 안정성 분석 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 유한체적 모델의 해석을 위해선 대상 형상의 격자를 설계해야 하며, 이때 복잡한 형상은 격자의 품질을 악화시키고 수치 오차를 유발한다. 이를 방지하기 위해 과거 건물 형상의 자동화된 단순화 방법이 제안된 바 있으나(Picperet et al., 2018; 박관용 외, 2019), 격자 품질에 대한 일반적 영향은 평가되지 않았다. 본 연구에서는 건물 형상의 단순화에 따른 격자 품질의 개선 효과를 정량적으로 분석하였다.

2. 형상 단순화 및 격자 품질 평가 방법

본 연구에서는 박관용 외(2019)가 제안한 건물의 형상 단순화 알고리즘을 이용하였다. 대상 건물 모델의 벽은 주요 표면(Major face)과 생략 대상 표면(Minor face)로 분류되며, 주요 표면과 개구부 표면(Opening face)을 통해 단순화된 모델이 구성된다(Figure 1). 단순화의 정도는 표면 분류의 거리 기준(d)을 통해 제어된다. 모델의 규모에 독립적인 단순화 기준 설정을 위해 거리 기준을 형상의 특성길이(L_c)로 표준화하여 적용했다. 공개 라이브러리로부터 획득한 40개의 건물 형상을 대상으로 6단계의 형상 단순화(L_c 의 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0배)를 적용하였으며, 원본 모델과 각 단순화된 모델을 대상으로 0.5, 1.0, 2.0 m 크기의 육면체 격자를 설계하였다. 격자의 품질은 모델의 수렴 안정성과 수치 오차에 지배적 영향을 미치는 최대 non-orthogonality(θ)와 skewness(ϵ) 지표를 통해 평가하였다. 두 지표 모두 낮을수록 격자의 품질이 높음을 의미하며, 전산유체역학 소프트웨어인 OpenFOAM에서 권장하는 기준은 $\theta < 70^\circ$, $\epsilon < 4.0$ 이다(Gullberg, 2017).

Corresponding Author

성명 : 최창호, 광운대학교 교수, 공학박사

전화 : +82-2-972-5645

E-mail : choi1967@kw.ac.kr

(사)한국건축친환경설비학회 · (사)한국그린빌딩협의회 235

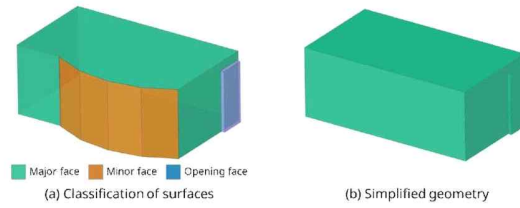


Figure 1. Simplification process of building geometry

3. 격자 품질 개선 효과 평가 결과

Figure 2는 표준화된 형상 단순화의 거리별 평균 격자 품질 지표의 변화 추이이다. **Skewness** 지표의 경우 왜도가 큰 분포를 고려하여 로그 변환한 값을 도시하였다. 두 격자 품질 지표 모두 단순화 정도에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 원본 모델의 평균 θ 은 67.0° , ϵ 은 38.8로 산정되었으나, $d=5L_C$ 조건으로 단순화 시 각각 17.1%, 85.1% 감소하였다. 격자 크기(s_m)와 단순화 기준(d/L_C)을 독립변수로 설정한 회귀분석 결과, 단순화에 의한 격자 품질의 유의한 개선 효과가 관찰되었다 (모든 모델 및 변수 $p\text{-value} < 0.05$).

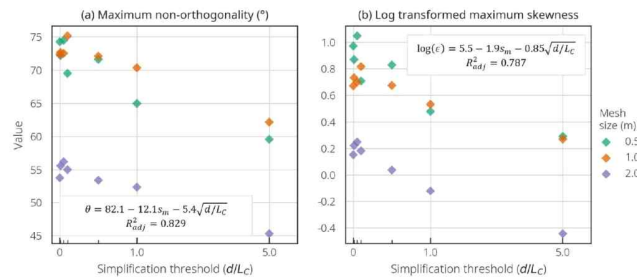


Figure 2. Mesh quality according to simplification threshold and mesh size

4. 결 론

본 연구는 건물 모델의 단순화 정도에 유한체적법 해석 모델의 격자 품질 개선 효과를 정량적으로 분석하였다. 회귀분석 결과 형상 단순화 정도의 제곱근에 따라 최대 non-orthogonality 지표는 선형적으로, 최대 skewness 지표는 지수적으로 감소하였다. 본 연구의 회귀모델로부터 건물 모델의 적정 단순화 정보를 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(20CTAP-C152000-02).

참 고 문 헌

- Gullberg, R. (2017). Computational Fluid Dynamics in OpenFOAM.
- Pieperit, R., Deininger, M., Kada, M., Pries, M., & Voß, U. (2018). A Sweep-plane Algorithm For The Simplification Of 3D Building Models In The Application Scenario Of Wind Simulations. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W10, 151 - 156.
- 박관용, 김창민, 최창호, & 박창영. (2019). 실내 CFD 해석을 위한 건물 형상 단순화 알고리즘 개발. 한국건축환경설비학회 논문집, 13(5), 417 - 429.

(나) 경제적 성과

① 생산성 향상

○ 건축 설계 정보의 활용 방안 제시

- CAD와 BIM을 통해 건물의 설계·운영 과정의 정보화가 진행됨에도 불구하고 CFD, 에너지 시뮬레이션과 같은 건물 환경 평가 도구와의 데이터 연동 기술은 범용화되지 않음.
- 개발한 알고리즘은 형상, 표면 정보, 재료, 물성치 등 추출하는 데이터별로 모듈화되어 구성됨. 따라서 본 연구에서 연동 대상으로 선택한 OpenFOAM뿐만 아니라 에너지, 구조, 열·습기 해석 등을 위한 시뮬레이션 프로그램에도 적용 가능할 것으로 기대됨.

○ CFD 분석의 정확도 개선을 통한 불필요한 비용 감소

- 시뮬레이션을 통한 환경평가 과정 중 중 모델의 설계는 가장 많은 인적 자원이 필요함. 수치적 연산 과정, 결과 평가 등의 과정은 컴퓨터를 통해 자동화될 수 있으나, 모델의 설계, 즉 해석 환경의 정의는 분석자가 직접 수행해야 함. 이 과정에서 발생할 수 있는 인적 오류는 평가 결과의 부정확성과 반복 작업의 원인이 되기도 함.
- 본 연구를 통해 개발한 기술은 기존에 정의된 해석 환경 (건물의 설계정보)를 해석하여 CFD 모델을 생성함. 개발 기술은 오차 1% 미만의 정확도로 건물의 형상과 속성 정보를 추출하고 매칭하는 것으로 평가되었음. 개발 기술을 통해 건물 환경평가의 정확도를 개선하고 관련 업무의 불필요한 비용을 절감할 수 있음.

② 관련 산업 기여

○ 건축물 친환경 평가의 접근성 개선

- 건축·도시 설계 과정에서 CFD 시뮬레이션을 통해 실내외 환경에 대한 영향이 평가됨. CFD 모델의 설계를 위해선 대상 건물의 설계 보와 더불어 일반적인 건축과 공기역학 분야의 지식이 필요함. 따라서 CFD 환경평가는 설계자, 친환경 컨설턴트, 시뮬레이션 기술자 등 다수의 전문인력이 요구됨.
- 본 연구에서 개발한 전처리 알고리즘은 BIM과 CFD 모델의 설계정보를 연동하여 CFD 시뮬레이션을 위한 학습 곡선을 낮춤. 이를 통해 건물의 환경평가를 위한 비용을 낮추고 관련 산업을 활성화할 것으로 기대됨.

2-3-2. BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

(1) 연구수행 내용 및 결과

핵심성과 4	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발
단위성과 4-1	개발 알고리즘 통합

○ 기타 설계요소 정의 (성과점검기준표 [중빙 27] 참조)

- 주요 개발 알고리즘(형상 단순화, 격자 최적화, BIM 속성 매칭 등)을 제외하고 전처리 자동화 및 시뮬레이션에 필수적인 설계요소를 정의하고자 함. 기타 설계요소는 난류 모델, 중력항, 기체 속성, 난류 운동 에너지, 난류 소산율로 정의함.
- (난류모델) Reynolds Average Navier-Stokes Simulation(RANS) 난류 모델 중 Standard $k-\epsilon$ 은 CFD 분야에 있어서 가장 활용도가 높음 (Gao et al., 2017). 또한 건축 환경 분야를 포함한 다양한 기류 분석에 있어서 Standard $k-\epsilon$ 모델의 정확성이 검증되어 있음 (Godderidge et al., 2006; Mishra et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 대표 난류 모델로 적용함.
- (중력항) 지구상의 모든 물체는 중력의 영향을 항상 받고 있으며 중력이 작용하는 연직 아래 방향으로 유체의 흐름이 발생함. 기체인 공기 역시 밀도와 질량을 가지고 있으므로 중력에 영향을 받게 되며, 밀도가 다른 두 기체가 혼합하는 경우에는 중력의 영향이 크게 작용함(Kato and Sano, 1971; Antonia and Chabers, 1980; Cornelis et al., 1992; Janssen, 1992; Longo and Losada et al, 2012). 따라서 중력항을 설정하여 모델에 반영함.
- (기체속성) 기체는 유체 속도와 음속의 상대 비율인 마하 수에 따라 비압축성 유동을 하는 구간과 압축성 유동을 하는 구간이 설정됨. 마하 수 0.3 이하의 유동에 대해서는 비압축성 유체로 판단하며 이때 마하 수가 0.3인 유체의 속도는 약 367 km/hr임. 건축 분야의 공기 환경 분석은 이보다 낮은 풍속에 대해서 분석을 수행하므로 기체의 속성을 비압축성 유체로 정의할 수 있음.
- (해석 solver) 본 연구에서는 비압축성 유동 특성을 가지는 기류를 분석하므로 비압축성 유동 해석 solver를 우선적으로 고려함. 이와 함께 추가로 온도(열)에 대한 해석을 지원하기 위하여 열 해석이 가능한 solver를 추가함. 최종적인 지원 solver는 표 32와 같음.

표 32. 모듈 지원 solver에 대한 설명

Solver	특징
buoyantBousinessqSimpleFoam	비압축성 유체의 부력, 난류 유동 해석을 위한 정상 상태 해석 solver
buoyantSimpleFoam	압축성 유체의 부력, 난류 유동 해석을 위한 정상 상태 해석 solver
simpleFoam	뉴턴 유체의 비압축성 난류 유동 해석을 위한 정상 상태 해석 solver

– (난류 운동 에너지, 난류 소산율) 대표 난류 모델로 선정된 Standard $k-\epsilon$ 모델은 난류 운동 에너지인 k 와 난류 소산율인 ϵ 에 대한 스크립트를 구축해야 함. 특히, k 와 ϵ 의 초기값에 solver의 안정성이 크게 영향을 받으므로 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 해석 조건에 맞는 난류 운동 에너지와 난류 소산율을 설정함. 초기 난류 강도는 10%로 적용하였으며, 난류 소산율은 특성 길이를 이용하여 산정함.

$$k = 1.5(UI)^2 \quad (3)$$

여기서, k 는 난류 운동 에너지

U 는 초기 풍속 (m/s)

I 는 초기 난류 강도 (%)

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5} A}{V} \quad (4)$$

여기서, C_μ 는 매개변수 (0.09)

k 는 난류 운동 에너지 (m^2/s^2)

V 는 건물의 체적 (m^3)

A 는 건물의 단면적 (m^2)

○ 주요 개발 알고리즘 통합 (성과점검기준표 [중빙 28] 참조)

- 본 연구에서 개발한 주요 개발 알고리즘에 대하여 그림 40과 같이 통합을 하였으며, 전처리 자동화를 위한 알고리즘 작동 순서를 정의함. 통합한 주요 개발 알고리즘에 BIM 파일을 입력하면, 최종적으로 전처리 과정이 완료된 CFD 모델이 출력됨.
- 출력되는 결과는 1) 단순화된 형상 파일 (obj) 2) 최적화된 격자 파일 (polyMesh) 3) 초기 값 설정 파일 4) CFD 모델 계수 설정 파일임.

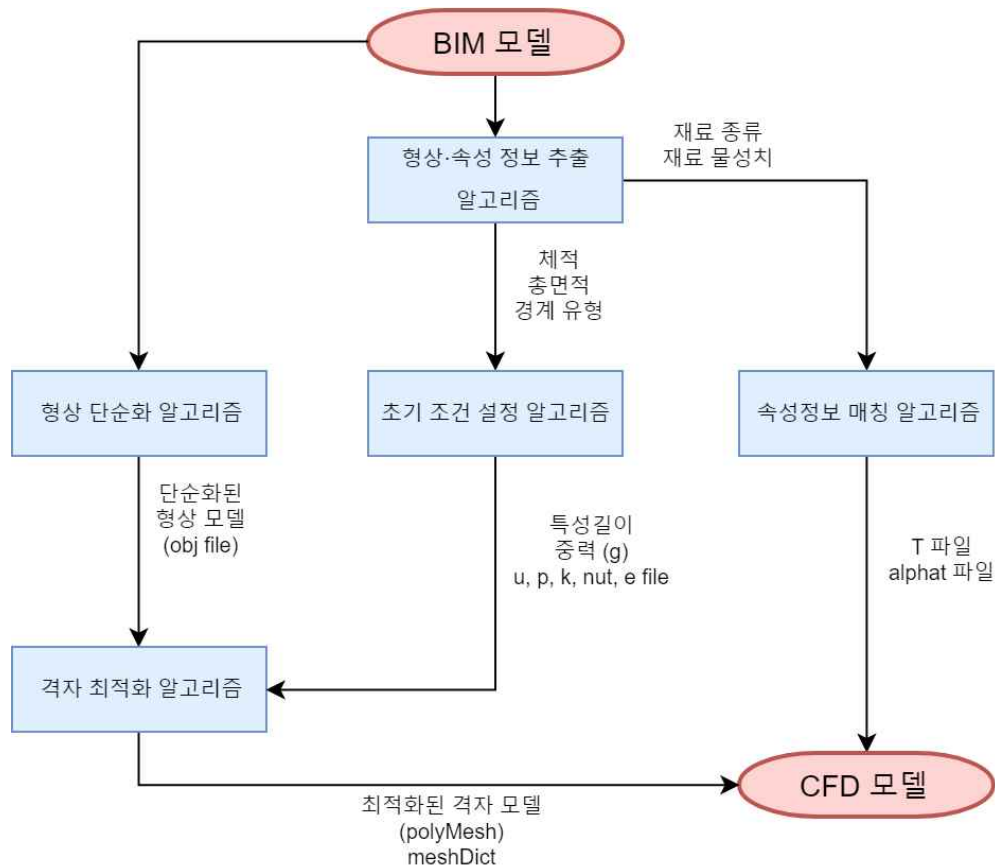


그림 40. 주요 개발 알고리즘 통합

핵심성과 4	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발
단위성과 4-2	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발

○ 기타 설계요소 스크립트 구축 (성과점검기준표 [중빙 29] 참조)

- 전처리 자동화 모듈을 개발하기 위해서는 주요 알고리즘 외에 연산에 필요한 기타 설계요소에 대한 스크립트가 필요함. 기타 설계요소는 난류 모델, 중력, solver, 난류 운동 에너지, 난류 소산율로 정의하였으며 이에 대한 스크립트를 구축함.
- 설계된 스크립트를 전처리 자동화 모듈 알고리즘에 반영하여 격자 최적화 알고리즘에 요구되는 시뮬레이션의 기초 자료로 활용하며 추가적으로 사용자의 CFD 시뮬레이션의 기초가 되는 초기 설정 자료로 출력됨.
- 기타 설계요소 스크립트 종류와 출력되는 위치에 대한 정보는 표 33과 같음.

표 33. 기타 설계요소 스크립트 기능 및 출력 위치

종류	기능	출력 위치
turbulenceProperties	난류 모델 및 세부 설정	Case/constant
g	중력 설정	Case/constant
k	난류 운동 에너지에 관한 설정	Case/0
epsilon	난류 소산율에 관한 설정	Case/0
ControlDict	해석 solver 종류 및 연산 방법에 관한 설정	Case/system
fvSchemes	CFD 이산화 방법에 관한 설정	Case/system
fvSolution	해석 solver에 관한 상세 설정	Case/system

- **(난류모델)** 난류 모델에 대한 설정은 Case 폴더의 constant 폴더에서 설정함. 설정에 대한 스크립트는 turbulenceProperties 라는 파일에 저장됨. 본 연구에서는 대표 난류 모델을 Standard $k-\epsilon$ 모델로 설정함. 따라서 해당 난류 모델에 대한 스크립트를 turbulenceProperties에 작성함.
- **(중력항)** 중력에 대한 설정을 위해 Case 폴더의 constant 폴더 내 g 파일에 스크립트를 작성함. 중력에 대한 설정은 중력 가속도의 크기와 방향에 대한 설정이 필요하며, 중력 가속도의 크기의 경우 9.81 m/s^2 로 고정값임.
- **(해석 solver)** Solver에 관한 설정은 Case 폴더 내 system 폴더에 설정되며, 모듈에서 사용자가 선택한 solver의 종류가 입력되도록 함. 사용자가 지정된 solver의 종류는 system 폴더 내 연산 설정과 관련된 스크립트인 controlDict에 입력되어 CFD 모델에 적용함.
- 이 외에도 solver의 해석 방법, 이산화 방법에 등의 설정 스크립트인 fvSchemes,와 fvSoluti

on 파일을 함께 출력함.

- (난류 운동 에너지, 난류 소산율) 난류 운동 에너지와 난류 운동 에너지 소멸률에 관한 설정은 Case 폴더의 0 폴더에서 지정함. 각각 식 (3)과 식 (4)에서 산정된 값을 초기값으로 지정하며, 경계면 종류(inlet, outlet, wall)에 맞는 설정이 들어가도록 스크립트를 구축함.

○ BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발 (성과점검기준표 [중빙 30] 참조)

- 주요 알고리즘과 기타 설계요소 스크립트 구축 기능을 결합하여 BIM 기반 CFD 전처리 자동화 모듈을 개발함.
- BIM-CFD 전처리 자동화 모듈은 입력된 BIM 모델에 대하여 CFD 시뮬레이션을 위한 전처리 과정 자동화를 수행하고 최종적으로 CFD 해석 케이스를 출력하는 기능을 수행함. BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈은 그림 41과 같은 인터페이스로 구성되어 있음.

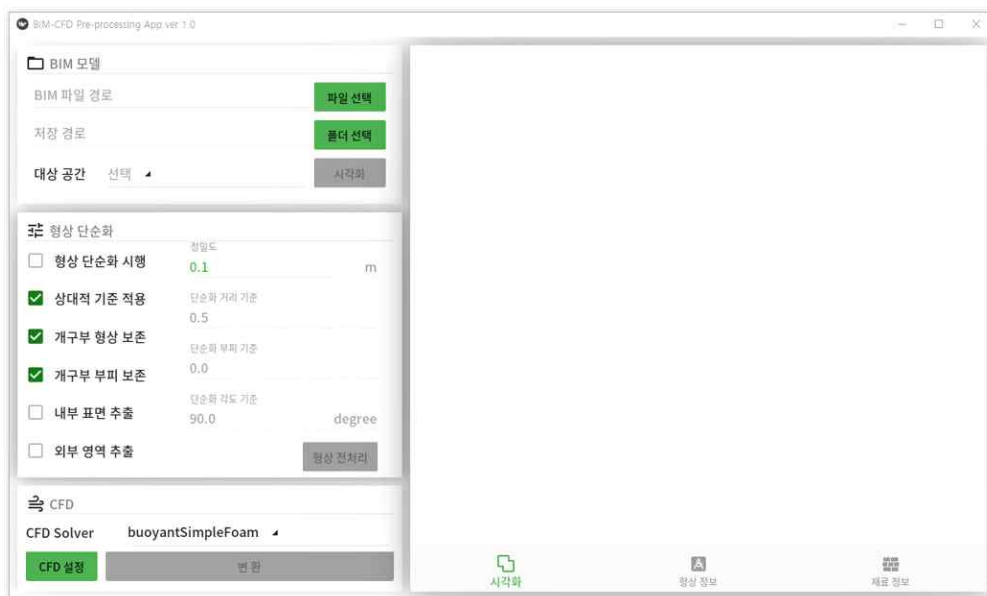


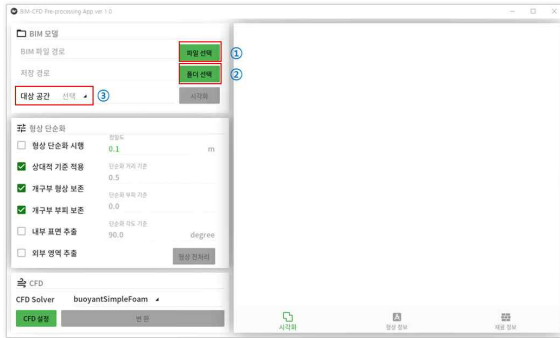
그림 41. BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 메인 화면

- 개발 모듈은 크게 BIM 파일 입력 및 대상 공간 설정, 형상 단순화 설정 및 실행, CFD 설정 및 CFD 모델 변환의 3단계로 구성됨. 단계별 기능은 표 34와 같음.

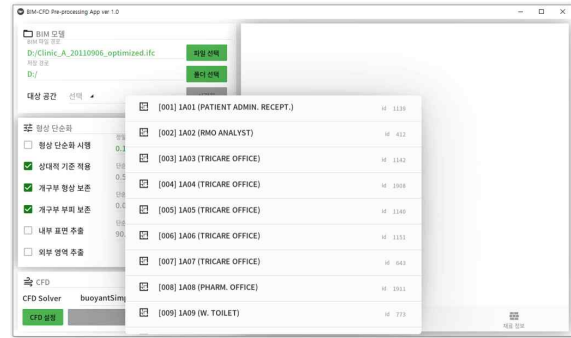
표 34. 모듈 지원 solver에 대한 설명

단계	주요 기능
BIM 파일 입력 및 대상 공간 설정	해석 대상 IFC 파일을 모듈에 입력하고 CFD 모델로 변환하고자 하는 공간을 선택
형상 단순화 설정 및 실행	알고리즘을 통해 형상을 단순화(최적화)를 할지를 정하고, 단순화에 대한 옵션을 지정하여 형상을 최적화
CFD 설정 및 CFD 모델 변환	해석 solver를 지정하고 격자 생성 방법과 크기를 지정할 수 있음. 최종적으로 CFD 모델 변환을 실행

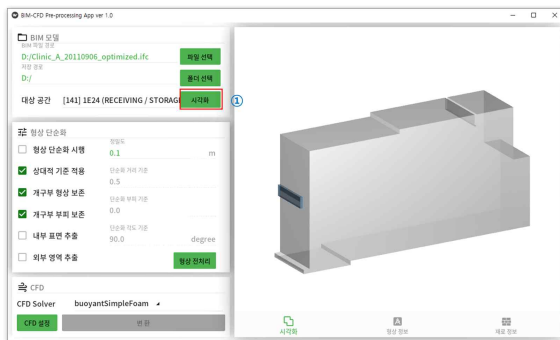
- 개발 모듈은 그림 42와 같은 순서로 입력된 BIM 모델을 CFD 모델로 변환함. 최종적으로 OpenFOAM에서 분석이 가능한 CFD 케이스 폴더를 생성함.



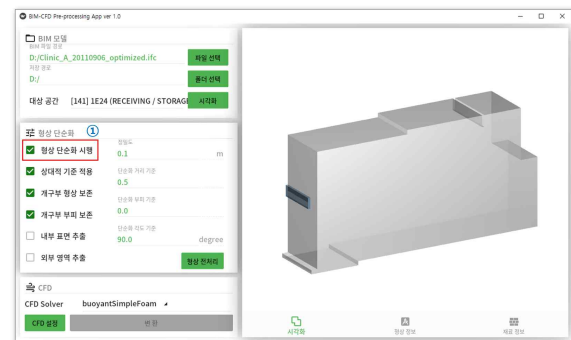
(1) BIM 파일 선택



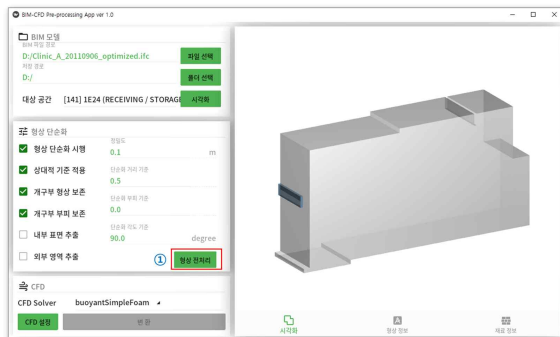
(2) 분석 대상 공간 선택



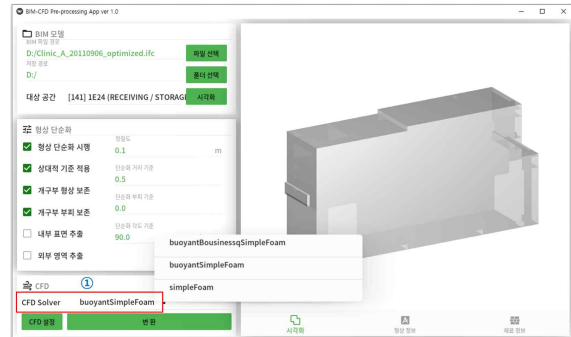
(3) 분석 대상 시각화



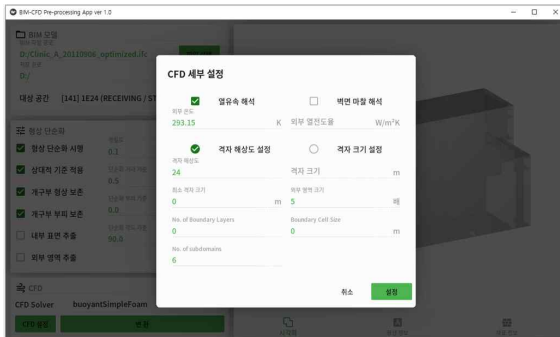
(4) 형상 단순화 시행 옵션 설정



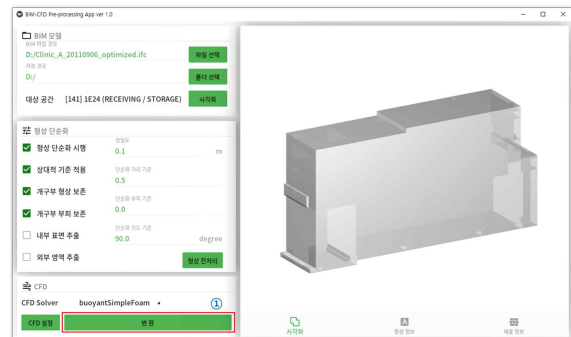
(5) 형상 전처리 실행



(6) CFD 해석 solver 설정



(7) CFD 격자 생성 방법 및 세부 설정



(8) CFD 모델 변환

그림 42. BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 작동 순서

- 개발 모듈의 작업시간 절감율을 평가하기 위해 실무진을 대상으로 파일럿 테스트를 수행하였음. 작업시간은 BIM 모델에서 CFD 모델 생성과 분석을 위한 프로세싱 시간을 측정함.
- 작업시간 절감율 평가를 위해 기존 상용 CFD SW로 시장 점유율이 가장 높은 ANSYS를 사용함. ANSYS와 본 연구개발 모듈을 활용하여 동일한 건축물 대상에 대하여 최적 CFD 모델 설계에 필요한 작업시간을 측정함.
- 작업시간 측정을 위한 건축물 대상은 다음 그림 43과 같음.

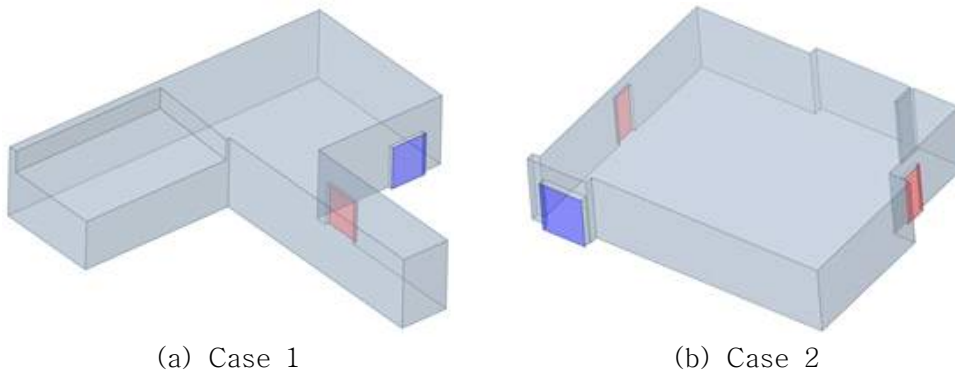


그림 43. 작업 시간 측정을 위한 대상 시설 선정

- 기존 SW 설계 방법은 분석 대상의 BIM 모델에서 형상 모델만 OBJ 파일로 추출하여 입력함. 입력된 OBJ 파일을 이용하여 CFD 모델을 설계함. 격자 설계 및 CFD 모델 경계 조건은 동일하게 지정하여 작업 시간을 측정함.
- 파일럿 테스트를 통해 작업시간을 측정한 결과는 그림 44와 그림 45와 같음. Case 1과 Case 2 모두 연구개발 모듈을 사용하는 조건이 기존 상용 CFD SW(ANSYS)를 사용한 조건보다 월등히 적은 작업시간이 소요되는 것으로 나타남.

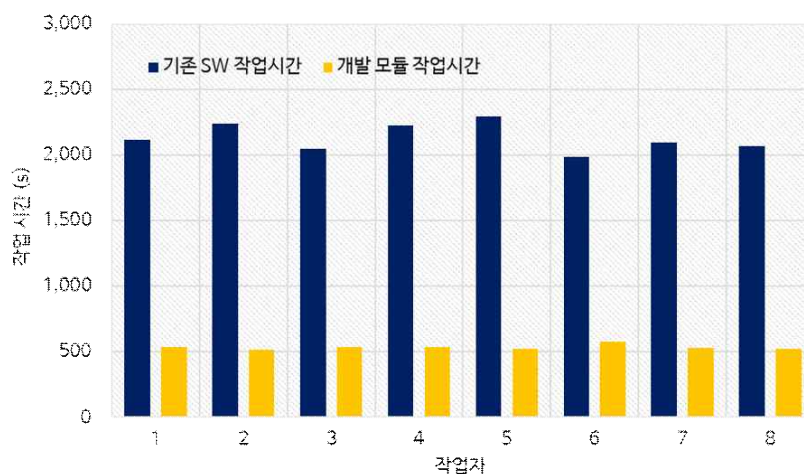


그림 44. Case 1 작업시간 비교

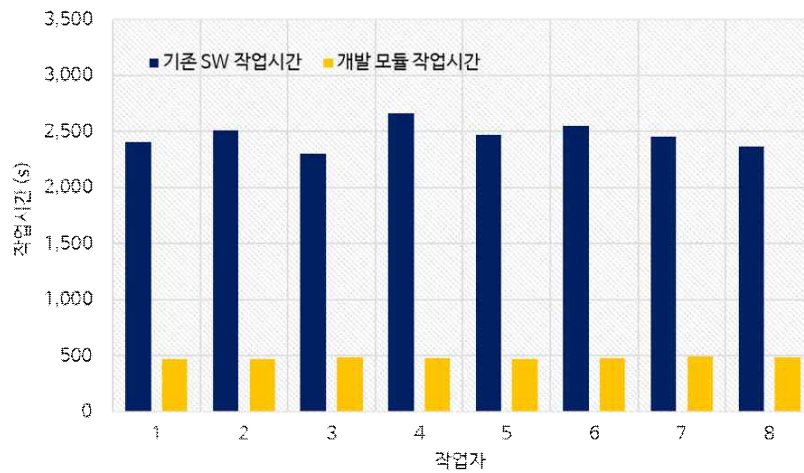


그림 45. Case 2 작업시간 비교

- Case 별 작업시간 절감률을 평가한 결과는 그림 46, 그림 47과 같음. Case 1의 경우 75%의 작업시간 절감이 가능했으며, Case 2의 경우 80.5%의 작업시간 절감이 가능하였음.
- 본 연구개발 모듈을 통해 기존 상용 CFD SW 대비 평균 약 77.7%의 작업시간 절감이 가능한 것으로 나타남. 따라서 질적 성과목표인 기존 대비 작업시간 70% 절감을 충분히 달성함.

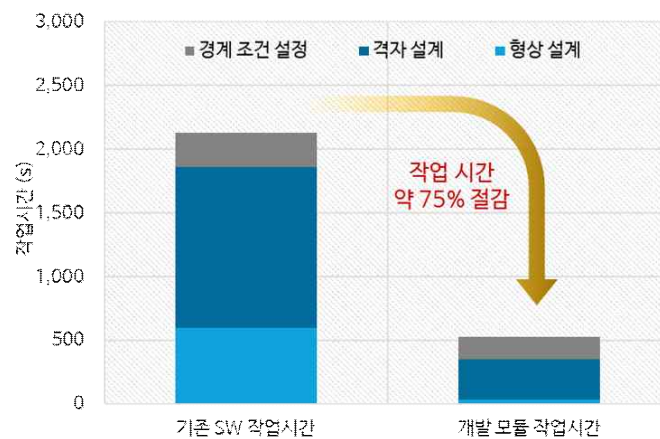


그림 46. Case 1 작업시간 절감률 평가 결과

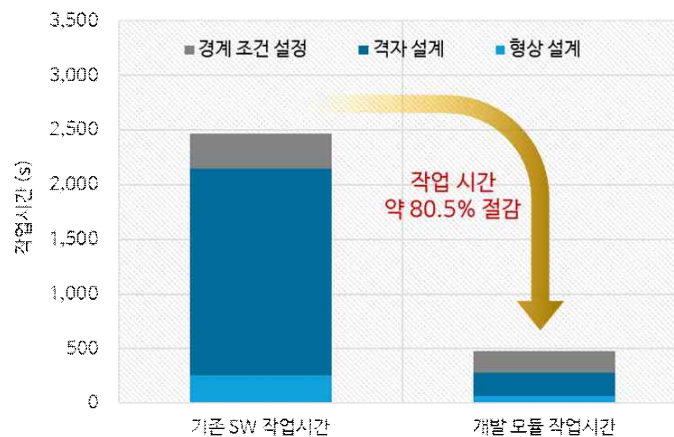


그림 47. Case 2 작업시간 절감률 평가 결과

핵심성과 4	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발
단위성과 4-3	BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 정확도 검증

○ 기존 상용 SW를 이용한 분석 결과와 정확도 검증 (성과점검기준표 [중빙 31] 참조)

- 정확도 검증을 위하여 기존 상용 CFD SW와의 비교를 수행함. 기존 상용 CFD SW는 CFD SW 중 시장 점유율이 가장 높은 ANSYS를 대상으로 함. 동일한 대상에 동일한 연산 조건을 적용하여 CFD 모델링 및 시뮬레이션한 결과를 비교함. 연구개발 모듈을 활용한 CFD 분석은 open-source CFD 소프트웨어인 OpenFOAM을 활용함.
- 현실적인 모델을 대상으로 검증을 수행하기 위하여 표 35와 같은 공개 BIM 라이브러리를 활용함. 공개 BIM 라이브러리에 속한 공간 중 기둥, 돌출부, 틈 등 복잡한 형상을 포함하고 있는 공간을 선정하여 검증을 수행함.

표 35. 시험 대상 공개 BIM 라이브러리

데이터베이스	BIM 모델	설명
DURAARK (DURAARK Database, 2015)	Academic Advanced	교육용 단독주택 모델
	DDB Kingo	전원주택
	Haus30	독일 Munich에 위치한 저택
NIBS (East, n.d.)	Medical Clinic	미국 남서부에 위치한 종합병원 건물
	Duplex Apartment	아파트 모델
	Office Building	두 층 규모 사무용 건물
UA (Dimyadi & Dimalen, 2010)	OTC Conference Center	미국 보스턴의 컨퍼런스 센터 건물
	West Riverside Hospital Parking Garage	Autodesk Inc.가 연구 목적으로 제공하는 주차장 모델

- 다양한 건축물에 대한 검증을 수행하기 위하여 층고, 바닥면적, 부피 등이 서로 다른 4개 시설을 검증 대상으로 선정함. 대상 시설은 아래 그림 48과 같이 4개 시설로 개발 모듈의 형상 및 격자 최적화 기능에 대한 평가를 위하여 단순화 과정이 필요한 건축물 형상을 선정함.
- 대상 공간의 평균 유속 및 온도에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하여 정확도 검증을 수행함. 이와 함께 전처리 자동화 모듈을 사용한 CFD 모델의 격자 품질 개선 효과를 평가함.
- 검증을 위한 격자 설계 조건, 연산 설정은 모두 동일하게 적용함.
- 각 분석 대상 CFD 모델의 격자 수와 격자 품질을 함께 비교하여 최적화 기능의 영향을 함께 분석함. 격자 품질 지표는 보편적으로 CFD 연구에서 활용되는 지표인 skewness와 non-orthogonality를 사용함 (Fabritius and Tabor, 2016).
- 시뮬레이션 결과 정확성 평가는 ANSYS 시뮬레이션 결과에 대한 상대 오차율로 분석함.

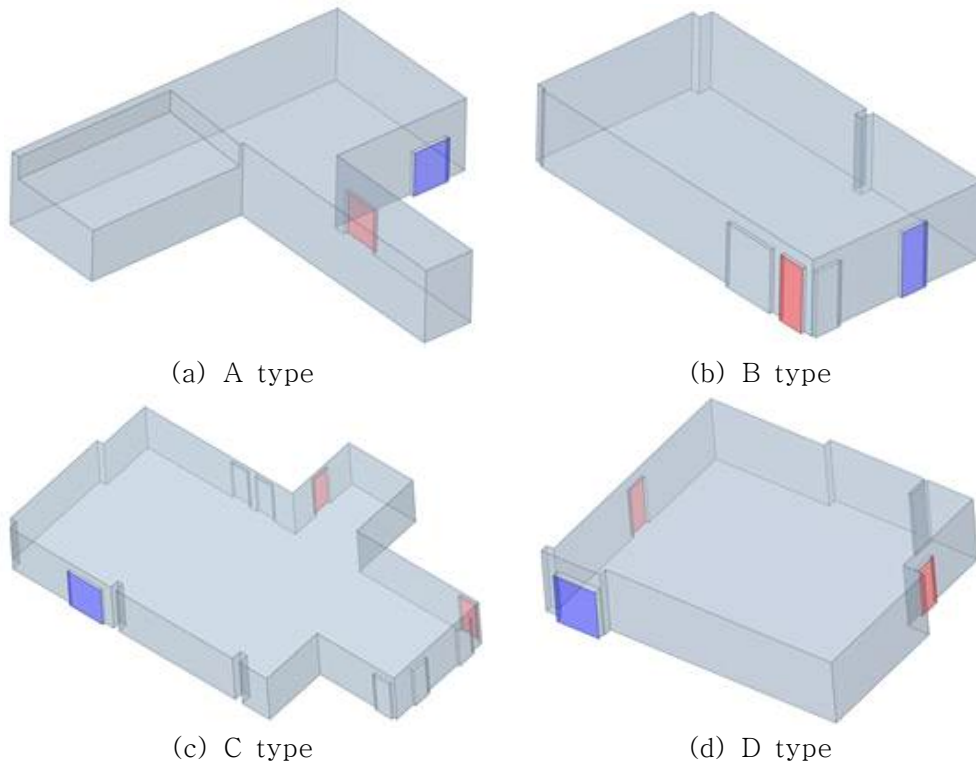


그림 48. 검증 대상 시설

- 최적화에 따른 총 격자 수와 격자 품질의 개선 결과는 표 36과 같음. 형상 최적화 방법에 따라 격자 수는 증가 또는 감소하나 변동의 폭이 크지 않았으며 maximum non-orthogonality는 최적화에 의한 개선 효과가 명확하게 나타남.
- A type의 경우 최적화 적용에 따라 **maximum non-orthogonality가 20.78% 개선됨**. C type 또한 maximum non-orthogonality가 6.52% 개선이 되었으며 D type은 1.78% 개선됨.
- Skewness의 경우 개선 효과가 거의 발생하지 않았으며, 격자의 maximum aspect ratio는 D type에서 15.32% 개선되는 것으로 나타남.
- 따라서 개발 모듈의 최적화 기능은 격자 품질(maximum non-orthogonality)에 대한 개선이 가능한 것을 검증하였음.

표 36. 최적화 기능에 따른 격자 품질 개선 효과

	Reduction rate (%)			
	Total grid number	Maximum non-orthogonality	Maximum skewness	Maximum aspect ratio
A type	0.16	20.78	0.00	0.00
B type	-0.18	0.00	0.00	0.00
C type	-1.20	6.52	0.00	0.00
D type	0.00	1.78	0.00	15.32

- 격자 품질 개선 효과와 함께 기존 상용 CFD SW 대비 정확도를 평가하기 위한 유속, 온도 검증을 수행함. 높이별 단면 및 전체 평균 유속 오차율은 하단의 표 37과 같음. 일부 조건에서는 4% 이상의 오차율이 나타나긴 했으나, 모든 조건에서 평균 유속 오차율은 5% 이하로 도출되어 개발 모듈의 정확성을 검증함.

표 37. 평균 유속에 대한 상대 오차율 산정 결과

	Surface average error at each height (%)				Volume average error (%)
	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	
A type	0.39	1.79	1.97	0.82	0.02
B type	0.27	0.73	2.03	0.73	1.25
C type	2.42	3.63	3.39	3.15	0.42
D type	4.50	3.15	3.58	2.78	3.89

- 높이별 단면 및 전체 평균 온도 오차율은 하단의 표 38과 같음. 유속 검증과 유사하게 일부 조건에서는 4% 이상의 오차율이 나타나긴 했으나, 모든 조건에서 평균 온도 오차율은 질적 성과목표인 오차율 5% 이하로 도출됨.
- 최종적으로, 유속과 온도 오차율 모두 5% 이하이며, 기존 상용 SW 대비 시뮬레이션 해석 결과 오차율은 최대 4.5%, 평균 1.9%로 평가됨. 따라서 질적 성과목표인 오차율 5% 이하를 달성하였으며, 개발 기술이 신뢰성 있는 CFD 시뮬레이션 결과를 도출한다고 판단함.

표 38. 평균 온도에 대한 상대 오차율 산정 결과

	Surface average error at each height (%)				Volume average error (%)
	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	
A type	3.06	2.64	2.51	2.45	2.62
B type	4.01	0.54	3.02	0.29	1.25
C type	0.51	0.52	0.51	0.50	1.28
D type	2.73	2.22	1.79	1.16	2.12

- 개발 모듈의 정확도에 대해서는 한국정보통신기술협회의 확인 및 검증(Verification & Validation) 시험을 통해 공인 평가를 받아 신뢰성을 확보함 (성과점검기준표 [증빙 33] 참조).

○ 개발 모듈의 시뮬레이션 해석 허용오차 만족도 검토 (성과점검기준표 [증빙 32] 참조)

- 성과점검기준표 [증빙 31]에서 수행한 상용 CFD SW와 검증 결과를 바탕으로 개발 모듈의 정확성에 대한 만족도 조사를 수행함.
- 상용 CFD SW인 ANSYS와의 상대 오차율을 허용오차로 정의하고 허용오차에 대한 만족도를 평가함. 만족도 평가는 리커트 5점 척도 (1점: 매우 불만족~5점: 매우 만족)로 측정함.
- 표 37과 표 38의 상대 오차율을 허용오차로 정의하였으며, 이에 대한 실무진의 만족도를 평가함. 만족도는 평가를 위하여 리커트 5점 척도를 100점으로 변환하였음.
- 15명의 실무진 중 9명의 실무진은 5점, 5명의 실무진은 4점으로 평가하였으며, 1명의 실무진은 3점으로 평가함. 평가 결과를 100점으로 환산하여 평균을 낸 결과, **만족도는 88.3점으로 도출됨. 따라서 질적 성과목표인 만족도 80점을 달성함.**

(2) 연구개발 성과

(가) 기술적 성과

① 기술 수준 및 기술 개발 성과

○ BIM 기반 최적 CFD 모델 설계 작업시간 77.7% 절감 (성과점검기준표 [중빙 30])

- 단위성과 4-2의 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈 개발을 통해 BIM 모델을 최적 CFD 모델로 변환하는 작업시간을 대폭 절감함.
- 작업시간은 BIM 모델에서 CFD 모델 생성과 분석을 위한 프로세싱 시간을 측정함. 작업시간 절감을 평가를 위해 기존 상용 CFD SW로 ANSYS를 사용하였으며 동일한 건축물 대상에 대하여 최적 CFD 모델 설계에 필요한 작업시간을 측정하였음.
- 작업시간 측정을 위한 건축물 대상은 그림 43과 같이 2가지 건축물 BIM 모델을 이용함.
- 기존 SW 설계 방법은 분석 대상의 BIM 모델에서 형상 모델만 OBJ 파일로 추출하여 입력함. 입력된 OBJ 파일을 이용하여 CFD 모델을 설계함. 격자 설계 및 CFD 모델 경계 조건은 동일하게 지정하여 작업시간을 측정함.
- 파일럿 테스트를 통해 작업시간을 측정한 결과는 그림 44와 그림 45 이며, Case 별 작업시간 절감률을 평가한 결과는 그림 46과 그림 47과 같음. Case 1의 경우 75%의 작업시간 절감이 가능했으며, Case 2의 경우 80.5%의 작업시간 절감이 가능하였음.
- 따라서, 본 연구개발 모듈을 통해 기존 상용 CFD SW 대비 평균 약 77.7%의 작업시간 절감이 가능한 것으로 나타남. 따라서 본 연구의 질적 성과목표 및 주요성능지표 목표치인 기존 대비 작업시간 70% 절감을 충분히 달성함.

○ 기존 상용 SW 대비 시뮬레이션 해석 결과 오차율 4.5% 이하 (성과점검기준표 [중빙 31])

- 단위성과 4-3의 기존 상용 SW를 이용한 분석 결과와 정확도 검증을 통해 개발 모듈의 시뮬레이션 정확도를 평가함. 정확도 평가는 동일 대상에 대하여 기존 상용 CFD SW의 해석 결과에 대한 상대 오차율로 평가함.
- 그림 48과 같이 총 4가지 대상에 대하여 검증을 수행함. 동일 격자 생성 조건, 연산 조건을 지정하여 CFD 모델을 설계함. 상용 CFD SW는 ANSYS를 이용 하였으며, 연구개발 모듈의 시뮬레이션은 개방형 CFD 분석 도구인 OpenFOAM을 통해 분석함.
- 상대 오차율은 평균 유속과 온도에 대해서 산정함. 총 4가지 단면 높이별 오차율과 전체 부피에 대한 오차율을 산정함. 유속 및 온도 오차율 산정 결과는 각각 표 37과 표 38과 같음.
- 유속과 온도 오차율 모두 5% 이하로 도출되었으며, 최대 4.5%, 평균 1.9%의 오차율로 평가됨. 따라서 질적 성과목표 및 주요성능지표 목표치인 오차율 5% 이하를 달성함.

○ 개발 모듈의 시뮬레이션 해석 허용오차 만족도 88점 달성 (성과점검기준표 [중빙 32])

- 단위성과 4-3의 개발 모듈의 시뮬레이션 해석 허용오차 만족도 검토를 통해 개발 모듈의 정확도에 대한 만족도를 평가함.
- 개발 모듈은 기존 상용 CFD SW와 동일 대상에 대한 시뮬레이션 결과의 상대 오차율이 약 1.9%로 도출됨. 이를 허용오차로 지정하고 이에 대한 실무진 만족도를 평가함.
- 만족도 측정은 실무진 설문조사를 통해 수행함. 리커트 5점 척도를 적용하여 만족도를 평가 받았으며 이를 100점 환산하여 최종 점수를 변환함.
- **허용 오차에 대한 만족도는 평균 약 88.3점으로 도출되어, 본 연구의 성과목표인 만족도 80점 이상을 달성함.**

○ CFD 분석 정확도 오차 3.9% 이하 (성과점검기준표 [중병 33])

- TTA 공인 인증시험을 통해 개발 모듈의 기존 상용 CFD SW 대비 CFD 분석 정확도 성능을 평가함. 동일 대상에 대하여 상용 CFD SW를 이용한 시뮬레이션 결과와 본 연구개발 모듈을 이용한 시뮬레이션 결과의 오차율을 평가함.
- TTA 공인 인증시험 결과, CFD 분석 정확도는 평균 오차율 1.1%, 최대 오차율 3.9%로 도출됨. 따라서 최대 오차 3.9% 이하로 CFD 분석 정확도가 평가됨.
- 따라서, 기존 상용 CFD SW에 대한 CFD 분석 정확도 항목의 주요성능지표 목표치인 오차 5% 이하를 달성함.

② 연구 실적물

○ 국내 특허출원 1건 추가 달성 (성과점검기준표 보고서 [중빙 39])

- BIM 기반 최적 CFD 모델 생성 방법에 대한 국내 특허출원 1건을 추가 달성함.

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2020.12.24
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(INP20194)
출 원 번 호 10-2020-0183412 (접수번호 1-1-2020-1410975-47)
(DAS접근코드 3B42)
출 원 인 명 칭 (주)미래환경플랜건축사사무소(1-2012-066169-4)
대 리 인 성 명 정창수(9-2003-000251-1)
발 명 자 성 명 박창영 김창민 이민형 박관용 장항인
발 명 의 명 칭 BIM을 이용한 CFD 모델 설계 시스템 및 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출 기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련 법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. DAS접근코드는 이 특허출원을 기초로 외국에 특허출원을 할 경우 파리조약 제4조D(1)에 따른 우선권 주장 증명서류를 세계지식재산기구의 전자적 접근 서비스(DAS, Digital Access Service)를 통해 전자적 송달을 신청할 때 필요합니다.
9. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

○ SCI(E) 논문 1편 (성과증빙 보고서 [증빙 41])

- 격자 해상도 기반 최적 격자 생성 기술과 관련하여 SCI(E) 저널에 논문 게재 1건을 달성함.

Hindawi
Advances in Civil Engineering
Volume 2020, Article ID 8827936, 11 pages
<https://doi.org/10.1155/2020/8827936>



Research Article

Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution

Minhyung Lee, Gwanyong Park, Changyoung Park, and Changmin Kim

Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul 01905, Republic of Korea

Correspondence should be addressed to Changmin Kim; kcm@mrplan.co.kr

Received 8 July 2020; Revised 7 October 2020; Accepted 8 December 2020; Published 24 December 2020

Academic Editor: Weerachart Tangchirapat

Copyright © 2020 Minhyung Lee et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Computational fluid dynamics (CFD) is being used in various research fields on the building environment. Target space of the CFD model is divided into a finite number of grids for numerical analysis. Therefore, an optimal grid design is required to obtain accurate results. The grid independence test is generally performed to design an optimal grid. However, given that there is no standardized procedure for grid independence test, most depend on the researcher's experience and knowledge. In the conventional method, the subjective judgment of the researcher affected the selection of the grid conditions and the criteria for the optimal grid. It can lead to a decrease in the reliability of the simulation results by poor grid design. This study proposed a grid independence test method that applies the grid resolution to improve the conventional method. The grid resolution was calculated by applying the characteristic length. $CV(RMSE)$ and R^2 were applied as the criteria for optimal grid. A case study was conducted to evaluate the adequacy of the proposed method. As the characteristic length increased, the optimal grid resolution increased. In particular, for a characteristic length of 0.7 or more, the optimal grid resolution was evaluated as 24. The grid convergence index (GCI) was calculated to verify the suitability of the proposed method. As a result, all of the optimal grid resolution derived from the proposed method was evaluated as the optimal condition.

1. Introduction

Computational fluid dynamics (CFD) is a fast, economic method used to analyze the flow of fluids based on numerical analysis. As a useful tool for complementing experiment and theoretical methods, CFD has a higher productivity and efficiency than conventional analysis methods and provides more various and more accurate results [1]. Owing to these advantages, CFD is being used in various research fields in the building environment, including ventilation, thermal environment, pollutant dispersion, and wind paths in cities [2, 3]. To predict the actual phenomena using CFD, a grid design that divides the target space into a finite number of grids is needed first [4]. Given that CFD obtains the approximate solution of the Navier-Stokes equation based on the divided grids, the accuracy of the approximate solution depends on the grid quality. Furthermore, this also has a prominent effect on the accuracy of the entire simulation results because it is affected by the approximate solution of

each grid [5]. Therefore, the optimal grid design is indispensable in the improvement of the accuracy of the CFD analysis.

Optimal grid designing requires the consideration of the shape type, quality, and number of grids. In particular, the number of grids is a factor that influences the total computational cost and accuracy of simulation analysis results. Coarse grids create a significant spatial discretization error, thereby reducing the accuracy of analysis results. In contrast, too much fine grids may sharply increase the round-off error beyond the truncation error, thereby reducing the accuracy of analysis results [6]. Therefore, it is crucial to select an optimal number of grids [7]. To find the optimal grid number, many CFD studies conducted grid independence test. The grid independence test is a process used to find the optimal grid condition that has the smallest number of grids without generating a difference in the numerical results based on the evaluation of various grid conditions. The grid independence test is being adopted in various studies using

A case study was conducted based on the application of the method proposed in this study. For this case study, five targets of different characteristic lengths were selected, and the independence tests were conducted. As the characteristic length increased, the optimal grid resolution also increased. In particular, the optimal grid resolution was evaluated to be equal to 24 in the cases of types C, D, and E, with a characteristic length of 0.7 or higher. This confirmed that a resolution equal to 24 can be applied as the optimal grid resolution for targets with characteristic lengths of 0.7 or higher. The optimal grid resolution derived from the case study was included in the acceptable resolution range of 4–25 based on the findings of a previous study. This confirmed the suitability of the grid resolution calculation method and the grid independence test process. Furthermore, the GCI was calculated to verify the suitability of the proposed method in comparison with the conventional method.

The objectivity of the grid design is most important in CFD analyses and can be improved using the proposed method in this study. The CFD grid design depended on the researcher's experience and knowledge; however, this could be improved based on the proposed method. The conventional independence test based on the number of grids could not attain the optimal grid standard that is generally applicable to the CFD model. On the contrary, it will be possible to improve this with the proposed method using the optimal grid resolution. The case study results showed different optimal resolutions according to the characteristic length. Specifically, a resolution of 24 was evaluated as the optimal resolution condition for targets with 0.7 or higher characteristic lengths. It is believed that if sufficient data can be obtained in the future, the optimal grid resolution could be presented based on the characteristic length.

The primary goal of this study was to verify the modified grid independence test method, which is applicable to building a CFD model via simulation. Therefore, field experiment or scaled model experiment was not conducted in this study. Field experiment will be performed in future studies, along with simulations to enhance the accuracy of the proposed method and the reliability of an optimal grid resolution derived thereby. Additionally, the effect of boundary layer mesh will be analyzed to improve the proposed grid independence test method in future studies.

Data Availability

The data used to support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This work was supported by the Kodrea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAITA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 20CTAP-C152000-02).

References

- [1] H. Wang and Z. Zhai, "Analyzing grid independency and numerical viscosity of computational fluid dynamics for indoor environment applications," *Building and Environment*, vol. 52, pp. 107–118, 2012.
- [2] S. Kato, "Review of airflow and transport analysis in building using CFD and network model," *Japan Architectural Review*, vol. 1, no. 3, pp. 299–309, 2018.
- [3] S. Zhang, A. Ding, X. Zou et al., "Simulation analysis of a ventilation system in a smart broiler chamber based on computational fluid dynamics," *Atmosphere*, vol. 10, no. 6, p. 315, 2019.
- [4] R. Zhang, Y. Zhang, K. P. Lam, and D. H. Archer, "A prototype mesh generation tool for CFD simulations in architecture domain," *Building and Environment*, vol. 45, no. 10, pp. 2253–2262, 2010.
- [5] J. F. Shepherd and C. R. Johnson, "Hexahedral mesh generation constraints," *Engineering with Computers*, vol. 24, no. 3, pp. 195–213, 2008.
- [6] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2018.
- [7] R. Duan, W. Liu, L. Xu et al., "Mesh type and number for the CFD simulations of air distribution in an aircraft cabin," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 67, no. 6, pp. 489–506, 2015.
- [8] F. Stern, R. Wilson, and J. Shao, "Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 50, no. 11, pp. 1335–1355, 2006.
- [9] P. J. Roache, "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 29, no. 1, pp. 123–160, 1997.
- [10] B. Wang, B. Zhao, and C. Chen, "A simplified methodology for the prediction of mean air velocity and particle concentration in isolation rooms with downward ventilation systems," *Building and Environment*, vol. 45, no. 8, pp. 1847–1853, 2010.
- [11] U. N. R. Commission, *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Fire Dynamics Simulator (FDS)*(NUREG-1824, Vol. 7, US NRC, Rockville, MA, USA, 2007.
- [12] Q. Chen and J. Srebric, "A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses," *HVAC&R Research*, vol. 8, no. 2, pp. 201–216, 2002.
- [13] C. S. Fernandes, R. P. Dias, J. M. Nóbrega, and J. M. Maia, "Laminar flow in chevron-type plate heat exchangers: CFD analysis of tortuosity, shape factor and friction factor," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 46, no. 9, pp. 825–833, 2007.
- [14] Y. Ji, M. J. Cook, and V. Hanby, "CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium," *Building and Environment*, vol. 42, no. 3, pp. 1158–1172, 2007.
- [15] T. Ren, Z. Wang, and G. Cooper, "CFD modelling of ventilation and dust flow behaviour above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 41, pp. 241–254, 2014.
- [16] H. Li, L. Rong, and G. Zhang, "Reliability of turbulence models and mesh types for CFD simulations of a mechanically ventilated pig house containing animals," *Biosystems Engineering*, vol. 161, pp. 37–52, 2017.

○ SCI(E) 논문 1편 투고완료 (성과증빙 보고서 [증빙 42])

- BIM 기반 최적 CFD 모델 자동생성과 관련하여 SCI(E) 저널에 논문 1건을 투고하였으며, 현재 심사가 진행 중임.

Manuscript ID	appls-ci-1068039
Status	Under review
Article type	Article
Title	Development of Building CFD Model Design Process Based on BIM
Journal	<i>Applied Sciences</i>
Section	Civil Engineering
Special Issue	Applications of Computational Fluid Dynamics to the Built Environment
Abstract	The design process of optimized Building CFD model based on BIM was proposed in this study. The proposed method consists of a five-step processes: BIM data extraction, geometry simplification, grid optimization, attribute data matching, and finally, exporting a CFD case folder for OpenFOAM. Validation was performed to evaluate the improvement of the grid model and accuracy of the proposed method. The number of grids increased or decreased according to the optimization method, but did not change significantly. On the other hand, the maximum non-orthogonality was improved by up to 20.78% according to the optimization function. Therefore, it was sufficiently effective in improving the grid quality. The accuracy of the proposed method was evaluated by relative error rate with the ANSYS simulation result. The error rates for flow and temperature were evaluated. The relative error rate was derived to be less than 5% under all conditions. Therefore, the accuracy of the proposed method was verified.
Keywords	computational fluid dynamics; building information modeling; geometry simplification; grid optimization; model design

Author Information

Submitting Author	Minhyung Lee
Corresponding Authors	Hyangin Jang, Changmin Kim
Author #1	Minhyung Lee
E-Mail	lmh@mrplan.co.kr
Author #2	Gwanyong Park
E-Mail	gypark@mrplan.co.kr
Author #3	Hyangin Jang
E-Mail	hijang@mrplan.co.kr
Author #4	Changmin Kim
E-Mail	kcm@mrplan.co.kr

Manuscript Information

Received Date	23 December 2020
Page Count	17

APC information

Journal APC:	1,800.00 CHF
Total Payment Amount:	1,800.00 CHF

Funding

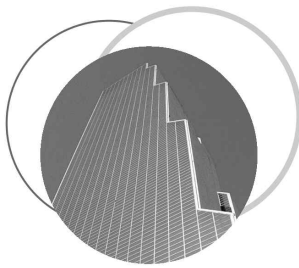
Funding information	Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Grant 20CTAP-C152000-02, Ministry of Science and ICT, South Korea: No. 2020R1C1C1011268
---------------------	---

○ 성과홍보 1건 (성과증빙 보고서 [증빙 44])

- 연구개발 기술과 관련하여 한국건축친환경설비학회 학회지 2020년 10월호에 칼럼을 작성하여 성과홍보 1건을 달성함.

특 집

건축환경설비 분야의 디지털 트윈 기술 사례



디지털 트윈 실현을 위한 BIM 기술 활용 사례



최 창 호

▶소속 : 광운대학교 건축공학과
▶직위 : 교수
▶전공분야 : 건축공학
▶이메일 : choi1967@kw.ac.kr



이 민 형

▶소속 : ㈜미래환경플랜건축사사무소
▶직위 : 선임연구원
▶전공분야 : 지역시스템공학
▶이메일 : lmh@mrplan.co.kr



이 용 하

▶소속 : ㈜미래환경플랜건축사사무소
▶직위 : 연구원
▶전공분야 : 건축학
▶이메일 : yhlee@mrplan.co.kr

1. 서론

디지털 트윈은 현실 세계의 물리적인 사물, 공간, 시스템을 가상 세계로 구축한 것을 의미한다. 즉, 현실 세계의 물리적인 객체를 디지털화 하여 구축한 복제본, 생애주기 전반에 걸쳐 대상 현상이 어떻게 작동하고 구현되는지를 설명하는 가상의 모델과 같다. 따라서 디지털 트윈을 통해 실제 현상을 가상의 모델과 연동하여 현실에서 발생할 수 있는 상황을 예측하거나 다양한 조건에 대한 시뮬레이션을 통해 최적 운영 조건 등을 확인할 수 있다. 이로 인하여 다양한 산업 분야에서 디지털 트윈을 실현하고자 하는 움직임이 활발하게 일어나고 있다.

디지털 트윈이 가장 잘 실현된 산업

분야는 제조 분야의 스마트 팩토리(Smart Factory)이다. CPS, 로봇틱스, 3D 프린팅, 사물인터넷, 인공지능 등 주요 4차 산업혁명 기술들을 융합하여 공장자동화 수준을 초월하는 유연한 생산체계를 스마트 팩토리 시스템을 통해 구현하고 있다. 실제 현장에서 실시간 데이터를 수집하여 빅데이터를 구축하고, 이를 입력값으로 하는 시뮬레이션을 통해 최적의 운영조건을 분석한다. 그리고 이를 현장에 적용하는 방식으로 디지털 트윈 시스템이 구현되고 있다. 미국, 유럽, 일본 등에서는 스마트 팩토리의 성공적인 도입을 위하여 다양한 기술 개발이 이루어지고 있으며, 국내에서도 일부 기업들이 스마트 팩토리 구현을 위한 기술 개발을 진행 중에 있다.

디지털 트윈이 성공적으로 실현되고 다양한 플랫폼과 솔루션 제품이 개발되는 제조 분야와 달리 건설 분야에서는 디지털 트윈 실현을 위한 다양한 시도가 현재 진행 중인 상태이다. 건설 분야의 경우 타 분야와 달리 디지털 트윈으로 구축해야 하는 대상 공간 자체가 매우 광범위하다. 이로 인하여 수집과 분석이 필요한 데이터의 양도 방대하여 타 분야 대비 디지털 트윈 구현에 어려움이 있다.

최근 국토교통부는 '건설 생산성 혁신 및 안정성 강화를 위한 스마트 건설기술 로드맵'을 발표하여 건설 기술의 디지털화, 스마트화를 추진하고 있으며 이와 관련하여 빌딩정보모델(BIM)을 이용한 다양한 스마트 건설 기술들이 개발 진행 중이다. BIM은 실

최적 격자 생성 기술을 구현한다. 최종적으로 사용자가 입력한 건축물의 특성값을 분석하고 이 특성값에 대응되는 최적의 해상도를 격자 크기로 cartesianMesh를 실행하여 육면체 기반의 최적 격자 모델을 생성한다.

BIM 모델에는 형상정보를 포함하여 벽면의 명칭, 재료, 열관류율 등 CFD 모델 설계에 활용할 수 있는 정보들이 포함되어 있다. 그러나 BIM 모델의 구조와 CFD 모델의 입력 구조가 다르기 때문에 이를 직접적으로 활용하려면 추출 및 변환하는 과정이 필수적이다. BIM 데이터 CFD 매칭 기술은 BIM의 표준 정보 교환 방식인 IFC에서 CFD 모델에 필요한 요구정보를 추출하여 이를 CFD 모델의 입력 형식으로 변환하고 매칭하는 기능을 수행한다. 기술의 확장성을 고려하여 BIM 파일과 CFD 모델 모두 개방형 기술을 대상으로 매칭을 수행한다(BIM-IFC, CFD-OpenFoam).

IFC는 건물 구성 요소별로 표준 엔티티와 추가 속성정보(Property Set 혹은 Pset) 객체를 통해 형상 및 속성정보를 제공한다. 형상정보의 경우 단순화 기술을 통해 CFD 분석에 최적화되어 CFD 모델로 설계한다. CFD 해석 시 필요한 물성치의 경우 재료의 이름(IfcMaterial) 및 속성 정보(Pset_MaterialThermal 등)로부터 추출한다. 특히 열 해석 시 중요한 재료의 비열, 열전도율은 각각 IFC 파일에서 Pset_MaterialThermal 데이터의 SpecificHeatCapacity, Thermal-Conductivity 속성 정보를 추출하여 매칭한다. OpenFoam의 입력 스크립트 구문에 맞추어 IFC 파일에 요구정보를 추출 및 변환한다. 최종적으로 분석 대상 경로에 OpenFoam CFD 모델의 초기조건 설정 정의인 0 폴더를 추출한다.

4. 결론

4차 산업혁명 시대에서 디지털 트윈은 다양한 산업분야에서 가장 핵심적인 기술로 부상하였으며, 건설 분야에서도 디지털 트윈 구축이 진행 중이다. 디지털 트윈은 가상 공간에 실제 대상의 구현한다는 점에서 BIM과 상응하는 부분이 존재하며, 최근에는 BIM을 기반으로 건설 디지털 트윈 모델을 구현하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 대부분 스마트 건설 및 시공 분야에 활발히 적용되고 있으며, 이에 반해 운영 및 유지관리 분야는 현재 공간정보 수집 및 연계기술, 화재·재난 관리 기술 등 아직 기초 연구단계에 머물러있거나 한정된 분야에 적용되고 있다. 디지털 트윈의 중요성 증대에 따라 그에 따른 여러 기반 기술 특히 BIM 활용 기술에 관한 수요 또한 증가하고 있다.

본 고에서는 건축물 운영 및 유지관리, 인증평가 자동화 기술 및 시뮬레이션 고도화 분야의 디지털 트윈 모델 실험을 위한 기초 기술로 다양한 BIM 활용 기술을 소개하였다.

현재 건설 디지털 트윈에 핵심적인 구성요소인 BIM 데이터를 활용하여 법규, 에너지 성능, 녹색건축인증, LEED 인증 등과 같은 인허가 및 인증 업무 자동화가 가능하고, 시뮬레이션 고도화를 위한 BIM 활용 형상 단순화 및 변환, 최적 격자 자동 생성, BIM 데이터 CFD 매칭 등의 기능 구현이 가능하다.

이상 살펴본 바와 같이 여러 분야에서 BIM 데이터의 연계를 위한 기반 기술의 구축과 활용을 통해 디지털 트윈 구현에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

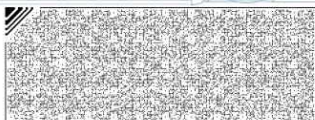
본 기고는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 20CTAP-C152000-02).

참고문헌

1. 박관용, 김창민, 최창호, 박창영, “실내 CFD 해석을 위한 건물 형상 단순화 알고리즘 개발” 한국건축환경설비학회 논문집 제13권 5호: pp.417-429, 2019
2. 박소현, 한지수, 최림, 조찬원, “디지털 트윈 구현을 위한 BIM 프레임워크 활용 방안” 한국 CDE학회 논문집 제24권 4호: pp.361-372, 2019
3. 이민형, 김창민, 박관용, 최창호, 박창영, “실내 기류 분석을 위한 전산유체역학 모델의 격자 독립성 검증 제안” 한국건축환경설비학회 논문집 제14권 2호: pp.183-194, 2020
4. 한국건설기술연구원, “도시/건설 분야 디지털 트윈 기술 기획 연구”, 2018
5. 한국건설산업연구원, “미래 건설산업의 디지털 건설기술 활용 전략”, 2019
6. 한국산업기술평가관리원, “디지털 트윈 기술 발전방향” KEIT PD 이슈리포트 2018-9호, 2018
7. Deloitte University Press, “Industry 4.0 and the digital twin”, 2017
8. The Institution of Engineering and Technology, “Digital twins for the built environment”, 2019
9. Jungsik Choi, Inhan Kim, “A Methodology of Building Code Checking System for Building Permission based on openBIM”, 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2017

○ SW 등록 1건 (성과증빙 보고서 [증빙 45])

- BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈에 대한 SW 등록 1건을 달성함.

제 C-2021-000107 호	
	
저작권 등록증	
1. 저작물의 제호(명칭)	BIM(건물정보모델링) 정보 추출 및 CFD(전산유체역학) 전처리 소프트웨어
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 미래환경플랜건축사사무소 서울특별시 노원구 월계로
4. 생년월일(법인등록번호)	110111-3703190
5. 창작연월일	2020년12월23일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2021년01월04일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 미래환경플랜건축사사무소, 창작 : 2020.12.23
「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.	
※ 업무상 창작에 참여한 자	박창영(800226), 김창민(841101), 이민형(930319), 박관용(930922), 장항인(760412)
2021년 01월 12일	
한국저작권위원회	
	
	
	
	

○ 국내학술발표 1건 추가 달성 (성과증빙 보고서 [증빙 47])

- BIM 기반 CFD 모델 자동 설계 기술 개발 주제로 국내 학술발표 1건을 추가 달성함.

발표논문(포스터)

BIM 기반 CFD 모델 자동 설계 기술 개발

이민형* 김창민* 박관용* 박창영*

*(주)미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소

Development of Automated CFD Modeling Technology based on BIM

Lee, Minhyung* Kim, Changmin* Park, Gwanyong* Park, Changyoung*

*Institution of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea

Abstract

This study propose a technology that automatically generates an optimized CFD model by coupling BIM and CFD. The CFD model was automatically created using the geometry and attribute data included in the BIM. In addition, geometry simplification and grid optimization techniques were applied to enable the creation of an optimized CFD model. The optimized shape, grid model, and boundary condition file are output to the case folder of OpenFOAM. To evaluate the accuracy, validation was conducted by comparing the analysis results of the proposed technology with the results using commercial CFD SW for the same target and condition. As a result, all average relative error rates were derived to be less than 5%, and the accuracy was verified.

주요어 : 전산유체역학, 빌딩정보모델링, 형상 단순화, 격자 최적화, 모델 설계

Keywords : Computational fluid dynamics, Building information modeling, Geometry simplification, Grid optimization, Model design

1. 서론

기술의 다양화 및 활성화로 빌딩정보모델링(BIM)은 건축 분야에서 핵심적인 모델링 기술로 부상하고 있다 (Porter et al., 2018). BIM은 건축물에 관한 형상정보, 속성정보를 포함하고 있으며 이를 전산유체역학(CFD)과 같은 시뮬레이션에 연계하는 경우 모델링에 필요한 작업과 시간을 절감할 수 있다. 그러나 현재까지 BIM과 CFD를 연계하는 기술은 형상정보 공유에 국한되어 있으며, BIM 속성정보 연계 및 CFD 최적화 관련 연구는 미진한 상황이다. 본 연구에서는 BIM을 CFD에 연계하여 최적화된 CFD 모델을 자동 생성하는 기술을 개발하였다.

2. BIM 기반 CFD 모델링 자동화 기술 개발

본 연구에서 개발한 기술은 Figure 1과 같이 BIM을 이용하여 최적화된 형상 및 격자 모델을 설계하고 경계 조건을 입력하여 CFD 시뮬레이션 케이스를 추출한다. CFD 모델링에 필요한 요구정보를 정의하였으며, 형상정보와 속성정보 두 항목으로 분류하여 추출한다. 형상정보의 경우 CFD 형상 모델 설계와 격자 모델 설계에 활용하며, 속성정보는 CFD 경계조건 설정에 활용한다. 한편, CFD와 BIM의 매칭을 위해 본 연구는 개방형 BIM 포맷인 IFC 파일에서 추출한 정보를 개방형 CFD SW인 OpenFOAM의 입력 구조로 변환한다.

BIM의 형상정보는 작은 스케일의 특성을 모두 포함하고 있어 이를 그대로 CFD 모델에 적용 시, 격자 품질의 저하로 인한 수렴성 악화, 격자 수 증가로 인한 연산 시간의 증가 등의 문제가 있다. 따라서 Park et al., (2020)의 형상 단순화 알고리즘을 적용하여 입력된 형상을 CFD 분석에 적합한 형태로 변환한다. 최적화된 격자 설계를 위해 이민형 외 (2020)에서 제안한 특성길이별 최적 격자 해상도를 적용하였다. 이를 통해 입력된 형상에 최적화된 격자 크기를 자동으로 탐색하여 육면체 격자 기반의 격자 모델을 구성한다. 따라서 입력된 BIM에 대하여 최적화된 형상 모델과 격자 모델을 자동으로 설계한다.

CFD 경계 조건 입력을 위하여 BIM에 포함된 각 벽면의 명칭과 위치(천장, 바닥, 벽 등) 그리고 열관류율 등의

Corresponding Author

성명 : 박창영, (주)미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소 부소장

전화 : +82-2-972-5645

E-mail : cypark@mrplan.co.kr

(사)한국건축친환경설비학회 · (사)한국그린빌딩협의회 241

물성치를 추출한다. 추출된 각 속성정보를 OpenFOAM의 입력 구조에 맞게 변환 및 입력하여 설정 스크립트 파일을 출력한다. 최종적으로 최적화된 형상 및 격자 모델 그리고 속성정보 파일은 OpenFOAM의 케이스 폴더로 출력되며 OpenFOAM을 통해 CFD 분석이 가능하다.

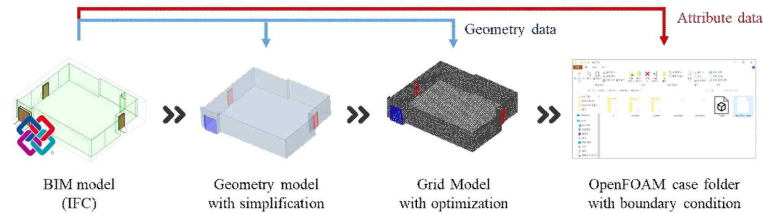


Figure 1 Overall process of automated CFD modeling technology based on BIM

3. 개발 기술 검증

개발 기술의 정확성을 평가하기 위하여 검증을 수행하였다. 검증은 동일한 대상에 대해 상용 SW(Ansys)를 이용하여 모델링 및 연산한 결과와 개발 기술을 통해 추출한 케이스를 OpenFOAM으로 연산한 결과를 비교하여 상용 SW 결과와의 오차율을 평가하였다. 정상 해석을 통해 시설 내 온도와 유속을 분석하였으며, 검증 결과 Figure 2와 같이 단면 높이별 오차율과 전체 부피 평균 오차율이 모두 5% 이하로 도출되어 정확성을 검증하였다.

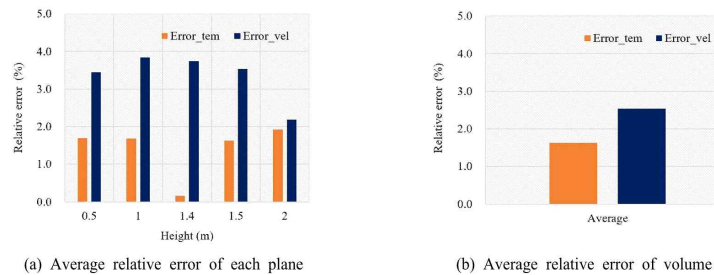


Figure 2 Average relative error compared with commercial CFD SW

4. 결 론

본 연구는 BIM과 CFD를 연계하여 최적화된 CFD 모델을 자동 생성하는 기술을 개발하였다. BIM 데이터를 추출 및 매칭하여 CFD 모델을 생성하였으며, 형상 단순화, 격자 최적화 기술을 통해 CFD 분석에 최적화된 모델을 설계하도록 하였다. 상용 CFD SW와 검증 결과, 상대 오차율이 5% 이하로 개발 기술의 정확성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 20CTAP-C152000-02)

참 고 문 헌

1. Park, G., Kim, C., Lee, M., Choi, C. (2020). Building Geometry Simplification for Improving Mesh Quality of Numerical Analysis Model. Applied Sciences, 10(16), 5425.
2. Porter, S., Tan, T., Wang, X., Pareek, V. (2018). LODOS-Going from BIM to CFD via CAD and model abstraction. Automation in Construction, 94, 85-92.
3. 이민형, 김창민, 박관용, 최창호, 박창영. (2020). 실내 기류 분석을 위한 전산유체역학 모델의 격자 독립성 검증 제안. 한국건축환경설비학회논문집, 14(2), 183-194.

○ 대외포상 1건 추가 달성 (성과증빙 보고서 [증빙 48])

- 연구개발 기술 학술발표에 대한 우수 포스터 발표상을 수상하여 대외포상 1건을 추가 달성함.

우 수 포 스 터 발 표 상

소 속 : (주)미래환경플랜건축사사무소
발표자명 : 이민형, 김창민, 박관용, 박창영
제 목 : BIM기반 CFD모델 자동 설계 기술
개발

귀하는 본 학회의 2020년도 추계학술발표대회
에서 위와 같은 논문을 발표하여 그 우수성을
인정받았기에 이 상장을 드립니다.

2020년 11월 20일

사단 한국건축친환경설비학회
법인 회 장 최 안 섭



(나) 경제적 성과

① 개발 기술을 통한 생산성 향상

○ BIM 기반 최적 CFD 모델 생성 작업시간 77.7% 절감으로 생산성 대폭 향상

- CFD 분석은 눈에 보이지 않는 공기에 대한 분석과 다양한 환경 조건에 대한 평가가 가능하다는 점에서 다양한 분야에 활용되고 있음.
- CFD 분석을 위해 가장 중요한 단계는 전처리 단계로 해석 대상과 조건에 최적화된 CFD 모델을 설계하는 과정임. CFD 모델 설계는 크게 형상 설계, 격자 설계, 경계조건 설정으로 구분 가능함.
- 형상 모델, 격자 모델 그리고 경계조건 모두 해석 결과에 큰 영향을 미치는 요인으로 최적화된 설계가 요구됨. 기존에는 이를 위해 수많은 시행착오 과정이 필요하여 많은 작업시간이 소요되는 한계가 있음. 이는 CFD 분석의 생산성을 저하시키는 주요 원인 중 하나임.
- 본 연구개발 기술 및 모듈을 통해 BIM 모델을 최적화된 CFD 모델로 변환하는 데 소요되는 작업시간을 기존 대비 77.7%의 작업시간 절감이 가능함. 분석 시간이 대폭 절감됨에 따라 CFD 분석의 생산성이 대폭 향상 될 것으로 기대됨.

② 고용 창출

○ 건설 CFD 활성화를 통한 관련 분야 고용 창출 효과

- 연구개발 기술을 통해 건설 CFD 분석의 생산성 증가와 CFD 분석에 필요한 비용(라이선스 임대료 등) 절감이 가능함. 따라서 관련 시장 활성화를 기대할 수 있음.
- 관련 시장 활성화를 통해 전반적인 CFD 분석의 수요가 증가할 것이며 이를 통해 BIM/CFD 분석 기술자에 대한 수요도 증가할 것으로 기대됨.
- 공기 환경의 중요성이 대두됨에 따라 이에 대한 분석 및 개선에 대한 수요가 점점 증가하고 있음. 이를 위해서는 CFD 분석이 반드시 요구됨. 따라서 이러한 사회적 흐름과 맞물려 향후 지속적인 고용 창출 효과가 기대됨.

③ 관련 산업 기여도

○ 라이선스 제약이 없는 개방형 기술 개발 및 원천기술 확보

- 기존 상용 CFD SW는 라이선스의 제약이 있어 다양한 연구 활용에 한계가 있음. 또한, 라이선스 사용 비용도 높아 CFD 사용의 진입장벽으로 작용함.
- 본 연구는 라이선스 제약이 없는 개방형 기술을 사용하여 BIM 기반 최적 CFD 모델 자동 모듈을 개발함. 이와 함께 모듈과 연계한 CFD 기술을 개방형 CFD 분석 도구인 OpenFOAM로

지정하여 라이선스 제약과 비용 없이 CFD 분석이 가능하도록 함.

- BIM을 CFD 모델에 최적화하고 변환하는 기술은 국내, 국외로 아직 개발이 이루어지지 않았으며, BIM-CFD 연계를 위한 기초적인 연구만 진행되고 있음. 본 연구는 이러한 BIM-CFD 연계를 고도화하여 BIM 기반 최적 CFD 모델 생성이라는 원천기술을 확보함.

○ 건설 CFD 분석 시장 활성화

- 본 연구를 통해 최종적으로 기존 건축물 CFD 모델 설계에 필요한 작업시간을 77.7% 절감하였으며 이를 통해 CFD 분석의 생산성을 대폭 향상할 수 있음.
- 또한, 본 연구개발 기술은 라이선스 사용에 제약이 없는 개방형 기술을 활용하여 기존 상용 SW에서 요구하는 막대한 라이선스 사용 비용을 대폭 절감할 수 있음.
- 따라서 건설 CFD 분석의 생산성 향상과 관련 라이선스 비용 절감 등으로 건설 CFD 분석에 관한 수요가 대폭 증가할 것으로 예측하며 이를 통해 관련 시장 활성화에 기여할 것으로 판단됨.
- BIM 파일 이외의 다양한 형상 파일에도 본 연구의 최적 CFD 모델 변환 기술이 적용 가능함. 이를 통해 건설 분야 이외의 CFD를 사용하는 다양한 산업 분야의 생산성 향상을 기대할 수 있음.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표

3-1-1. 주요 성능지표 정의 및 달성 목표

- 개발 기술의 평가 항목은 핵심성과 4개에 대하여 아래 표 39와 같은 주요 성능지표를 선정함.
- 기초원천 기술의 최초 개발로 해당 기술과 관련한 기술력을 보유한 국내 및 국외 연구진·기업은 존재하지 않음. 따라서 개발 전 성능수준을 없음으로 설정함.
- 시간과 관련된 주요 성능지표의 개발 목표치는 기존 상용 소프트웨어 사용 대비 작업시간 70% 절감을 목표로 설정하였으며, 주관 및 공동기관 자체 평가로 성능 평가를 수행함.
- 정확성과 관련된 주요 성능지표의 개발 목표치는 오차율 5% 이하로 설정함. 1차 연도에는 자체 평가를 통해 성능을 평가하며, 2차년도에는 공인시험 평가(TTA 검증)를 통해 해당 성능지표를 평가함.

표 39. 주요 성능지표 달성 목표

평가 항목 (주요성능 Spec)		단위	전체 항목에서 차지하는 비중 (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업	연구 개발 전 국내수준	개발 목표치		평가 방법	
				성능수준	성능 수준	1차 연도 (2019년)	2차 연도 (2020년)	1차 연도	2차 연도
형상정보 판단 및 단순화 알고리즘	1. 형상 단순화 작업시간	%	10	없음	없음	기존 과정 대비 30% 절감	기존 과정 대비 70% 절감	자체평가	자체 평가
	2. 단순화에 의한 분석 정확도	%	20	없음	없음	오차 7% 이하	오차 5% 이하	자체평가	공인 시험성적 (확인)서
건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동화 알고리즘	3. 격자 생성 시간	%	15	없음	없음	기존 과정 대비 30% 절감	기존 과정 대비 70% 절감	자체 평가	자체 평가
BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘	4. 데이터 매칭의 정확도	%	20	없음	없음	—	오차 5% 이하	—	공인 시험성적 (확인)서
BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈	5. CFD 모델 설계 및 분석 시간	%	15	없음	없음	—	기존 과정 대비 70% 절감	—	자체 평가
	6. CFD 분석 정확도	%	20	없음	없음	—	오차 5% 이하	—	공인 시험성적 (확인)서

표 40. 주요 성능지표 정의

평가 항목 (주요성능 Spec ¹⁾)		성능 지표 정의	성능목표치 근거	평가방법 및 환경
형상정보 판단 및 단순화 알고리즘	1. 형상 단순화 작업시간	건축물 형상을 CFD 분석에 용이하게 단순화(삭제/병합/축소) 하는 작업에 필요한 시간	관련 국내 및 국외 기술이 부재함. 따라서 기존 상용 소프트웨어 대비 50% 절감을 목표로 설정함	개발 기술을 이용한 작업시간과 기존 상용소프트웨어의 작업시간을 비교
	2. 단순화에 의한 분석 정확도	형상을 단순화한 건축물 CFD 모델 평균 유속 / 단순화하지 않은 건축물 CFD 모델 평균 유속	형상 단순화는 기본적으로 전체 기류 분석에 영향을 주지 않는 범위에서 이루어져야 하므로 단순화 적용 유무에 따른 분석 결과의 차이가 발생하지 않아야 함.	단순화 미적용 건축물 CFD 모델의 평균 유속 값과 단순화 적용 건축물 CFD 모델의 평균 유속 값의 비율
건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동화 알고리즘	3. 격자 생성 시간	자동으로 분석 대상에 적합한 CFD 모델 격자망 구성에 필요한 프로세싱 시간	관련 국내 및 국외 기술이 부재함. 따라서 기존 상용 소프트웨어 대비 50% 절감을 목표로 설정함	개발 기술을 이용한 격자 생성에 필요한 작업시간과 기존 상용소프트웨어를 이용한 격자 생성 작업시간을 비교
BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘	4. 데이터 매칭의 정확도	부적합 데이터 매칭 개수 / 전체 데이터 매칭 개수	BIM 모델의 형상 및 속성정보를 CFD 모델에 정확하게 연계하기 위해서는 개별 데이터들이 CFD 모델에 정확하게 매칭이 되어야 함	BIM 형상 및 속성정보 데이터 중에서 매칭 데이터 군의 전체 개수에 대한 부적합 매칭 데이터군의 비율
BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈	5. CFD 모델 설계 및 분석 시간	개발 기술을 이용하여 분석 대상 건축물의 BIM 모델로부터 CFD 모델의 생성 및 분석에 필요한 프로세싱 시간	관련 국내 및 국외 기술이 부재함. 따라서 기존 상용 소프트웨어 대비 50% 절감을 목표로 설정함	개발 기술을 이용한 작업시간과 기존 상용 소프트웨어를 이용한 작업시간을 비교
	6. CFD 분석 정확도	개발 기술을 이용하여 분석한 CFD 모델의 주요 지점별 유속 값 / 동일 대상에 대하여 기존 상용 소프트웨어를 이용하여 분석한 CFD 모델의 주요 지점별 유속 값	개발 기술의 실용화를 위해서는 해당 기술을 이용하여 분석한 결과와 기존에 범용적으로 사용되는 상용 소프트웨어를 이용하여 분석한 결과와 차이가 발생하지 않아야 함.	동일 대상에 대하여 개발 기술을 이용하여 분석한 CFD 분석 결과 (주요 지점별 유속 값)와 상용 소프트웨어를 이용하여 분석한 결과의 비율

※ 본 개발기술의 각 주요 성능지표 중 정확도와 관련된 2, 4, 6 지표는 한국정보통신기술협회
TTA (Telecommunications Technology Association)의 소프트웨어 확인 및
검증시험(Verification & Validation)을 통하여 이루어질 것임

3-1-2. 정량적 연구성과 목표

○ 본 연구 개발기술의 성과로 달성하고자 하는 정량적 연구성과는 국내 특허출원 2건, 국내 특허등록 70점, 국외논문 게재 3건, 국내논문 게재 3건, 성과홍보 1건, S/W 등록 2건임.

- **국내 특허출원**: 1차 연도 핵심성과 1, 2와 2차 연도 핵심성과 3, 4에 대하여 국내 특허출원을 진행하여 총 2건의 출원을 목표로 설정함.
- **국내 특허 등록**: 2차 연도 핵심성과 4와 관련하여 국내 특허 등록을 진행할 예정이며, SMART 점수 기준 70점을 연구성과 목표로 설정함.
- **국외 논문 게재**: 각 핵심성과의 개발 기술에 대하여 국외논문 3건 게재를 목표로 함.
- **국내 논문 게재**: 각 핵심성과의 개발 기술에 대하여 국내논문 3건 게재를 목표로 함.
- **성과 홍보**: 최종 연구개발 성과물에 대한 성과홍보 1건을 목표로 함.
- **S/W 등록**: 연구개발 기술에 대하여 2건의 S/W 등록을 목표로 설정함.

표 41. 정량적 연구 성과

성과지표	단위	가중치	실적 및 목표치			측정산식	성과목표 검증방법
			구분	2019	2020		
국내특허	건	0.3	출원	1	1	—	특허 출원증
	점		등록	—	70	o등록특허 : 1개 o(SMART점수합) ÷ 등록특허 수 * https://smart.kipa.org/ 참조	SMART3 평가보고서
국제특허	건	—	출원	—	—	—	—
	점		등록	—	—	—	—
국외논문 게재	건	0.2	SCI	—	3	—	논문 게재 확인서
	건		비SCI	—	—	—	—
국내논문 게재	건	0.2	SCI	—	—	—	—
	건		비SCI	2	1	—	논문 게재 확인서
기술이전	건	—	—	—	—	—	—
기술료	백만원	—	—	—	—	—	—
성과홍보	건	0.1	—	—	1	—	브로셔 or 동영상 공유
시제품	건	—	—	—	—	—	—
S/W등록	건	0.2	—	1	1	—	S/W 등록증
합계		1.0					

3-2. 목표 달성여부

3-2-2. 주요 성능지표 달성도 평가

- 연구개발 기술의 주요 성능지표 달성도는 표 42와 같음.
- **형상 단순화 작업시간, 격자 생성 시간, CFD 모델 설계 및 분석 시간**은 연구기관 자체평가를 통해 성능지표를 평가함. 3개 성능지표의 절감률이 각각 83.1%, 81.9%, 77.7%로 모두 개발 목표치인 70%를 달성함. (성과점검기준표 [증빙 30] 참조).
- **단순화에 의한 분석 정확도, 데이터 매칭의 정확도, CFD 분석 정확도**는 TTA 공인 인증시험을 통해 성능지표를 평가함. (성과점검기준표 [증빙 33] 참조)
- TTA 공인 인증시험을 통해 단순화에 의한 분석 정확도는 평균 오차율 0.4%, 최대 오차율 1.0%, 데이터 매칭의 정확도는 오차율 0%, CFD 분석 정확도는 평균 오차율 1.1%, 최대 오차율 3.9%로 모두 개발 목표치인 오차율 5% 이하를 달성함.
- 연구계획에 수립한 주요 성능지표를 모두 달성하여 연구개발 기술의 우수성을 입증함.

표 42. 주요 성능지표 달성도

평가 항목 (주요성능 Spec)		단위	전체 항목에서 차지하는 비중 (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업	연구 개발 전 국내수준	목표 및 달성도		평가 방법
				성능수준	성능 수준	목표치	달성치	
형상정보 판단 및 단순화 알고리즘	1. 형상 단순화 작업시간	%	10	없음	없음	기존 과정 대비 70% 절감	기존 과정 대비 83.1% 절감	자체평가
	2. 단순화에 의한 분석 정확도	%	20	없음	없음	오차 5% 이하	오차 1.0% 이하	공인 시험성적 (확인)서
건물 맞춤형 격자 최적화 및 자동화 알고리즘	3. 격자 생성 시간	%	15	없음	없음	기존 과정 대비 70% 절감	기존 과정 대비 81.9% 절감	자체평가
BIM 형상 및 속성정보 CFD 매칭 알고리즘	4. 데이터 매칭의 정확도	%	20	없음	없음	오차 5% 이하	오차 0% 이하	공인 시험성적 (확인)서
BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈	5. CFD 모델 설계 및 분석 시간	%	15	없음	없음	기존 과정 대비 70% 절감	기존 과정 대비 77.7% 절감	자체평가
	6. CFD 분석 정확도	%	20	없음	없음	오차 5% 이하	오차 3.9% 이하	공인 시험성적 (확인)서

3-2-2. 정량적 연구성과 목표 달성도 평가

- 본 연구 개발기술의 정량적 연구 성과 달성도는 표 43과 같음.
- 본 연구 개발기술의 성과로 국내 특허 출원 3건, 국외논문 게재 3편, 국내논문 게재 3편, 성과 홍보 1건, S/W 등록 2건, 국내학술발표 2건, 대외수상 1건을 달성함. (총 12건의 성과 달성 목표에 비해 3건 많은 총 15건의 정량적 연구성과 달성)
- 정량적 연구성과 목표 중 미달성된 국내 특허등록 1건(70점)은 현재 각각 심사 중인 상태임. 향후 심사 의견을 충실히 대응하여 정상적으로 정량적 성과목표를 달성할 예정임.
- 국내 특허출원 1건, 국내학술발표 2건, 대외수상 1건은 연구계획에 계상하지 않은 추가 달성 실적으로, 개발기술의 우수성을 입증함.

표 43. 정량적 연구 성과 달성도

성과지표		목표 및 달성도		비고	성과점검기준표
		목표	달성		
국내특허	출원	2건	3건	2건 정상 달성 및 1건 추가달성	증빙 34, 증빙 38, 증빙 39
	등록	1건 (70점)	-	특허 심사 진행 중 (2019.12.23. 출원)	-
국외논문 게재	SCI	3건	3건	3건 정상달성 (1건의 논문은 2021년 1월 29일에 정상 게재 달성함)	증빙 40, 증빙 41, 증빙 42
국내논문 게재	비SCI	3건	3건	3건 정상달성	증빙 35, 증빙 36, 증빙 44
성과홍보		1건	1건	1건 정상달성	증빙 44
S/W등록		2건	2건	2건 정상달성	증빙 37, 증빙 45
국내학술발표		0건	2건	2건 추가달성	증빙 46, 증빙 48
대외수상		0건	1건	1건 추가달성	증빙 48
계		12건	14건		

3-2-3. 관련 분야 기여도 평가

○ 국외 우수 저널 논문 게재를 통한 국내 건설 CFD 기술의 우수성 홍보

- 주관기관 공동기관은 연구결과를 공학 분야 SCI(E) 저널 중 Q2, Q3에 해당하는 저널에 논문을 3건 게재하여 개발 기술의 우수성을 입증함.
- 국내, 국외 모두 개발이 이루어지지 않은 BIM 기반 CFD 전처리 자동화 기술 및 최적 CFD 모델 설계 기술에 대한 논문을 게재하여 해당 기술에 대한 선점을 완료함. 이와 함께 국내 건설 CFD 기술에 대한 우수성을 홍보함.

○ 개방형 CFD 전처리 기술 및 관련 원천기술 확보

- 기존 상용 CFD SW는 라이선스의 제약이 있어 다양한 연구의 활용에 한계가 있고 기술의 독과점으로 인해 라이선스 비용이 매우 높음. 본 연구는 개방형 기술을 사용하여 BIM 기반 최적 CFD 모델 자동 모듈을 개발하였으며 모듈과 OpenFOAM과 연계하여 라이선스 제약과 비용 없이 CFD 분석이 가능하도록 함. 이를 통해 기존 외산 SW 중심의 국내 CFD 분석 시장의 개선이 가능함.
- BIM을 CFD 모델에 최적화하고 변환하는 기술은 국내, 국외로 아직 개발이 이루어지지 않은 원천기술임. 본 연구는 이러한 BIM-CFD 연계를 고도화하여 BIM 기반 최적 CFD 모델 생성이라는 원천기술을 확보함. 따라서 기존 기술보다 월등히 높은 수준의 BIM-CFD 연계 기술을 확보하였음.
- 현재는 보편적인 CFD 분석이 가능한 3개의 해석 Solver를 지원하고 있음. 향후 사업화/상용화 단계에서는 다양한 Solver를 추가로 지원하는 것을 고려하고 있으며 이를 통해 개발 기술의 활용성을 높이고자 함.

○ 건축물 공기 환경평가의 전문화 및 친환경 평가의 접근성 개선

- 본 연구의 개발 기술은 형상의 부피, 각도, 거리와 같은 정량적 기준을 통해 단순화할 요소를 구분함. 객관적이고 일관적인 알고리즘을 통해 인적 오류 가능성을 최소화하고 CFD 분석 과정을 전문화할 수 있음.
- 건축·도시 설계 과정에서 CFD 시뮬레이션을 통해 실내외 환경에 대한 영향이 평가됨. CFD 모델의 설계를 위해선 대상 건물의 설계정보와 더불어 일반적인 건축과 공기역학 분야의 지식이 필요함. 따라서 CFD 환경평가는 설계자, 친환경 컨설턴트, 시뮬레이션 기술자 등 다수의 전문인력이 요구됨.
- 본 연구에서 개발한 전처리 알고리즘은 BIM과 CFD 모델의 설계정보를 연동하여 CFD 시뮬레이션을 위한 학습 곡선을 낮춤. 이를 통해 건물의 환경평가를 위한 비용을 낮추고 관련 산업을 활성화할 것으로 기대됨.

○ 건설 CFD 분석 시장 활성화

- 따라서 건설 CFD 분석의 생산성 증가와 관련 라이선스 비용 절감 등으로 건설 CFD 분석에 관한 수요가 대폭 증가할 것이며 이를 통해 관련 시장 활성화에 기여할 것으로 판단됨.
- BIM 파일 이외의 다양한 형상 파일에도 본 연구의 최적 CFD 모델 변환 기술이 적용 가능함. 이를 통해 건설 분야 이외의 CFD를 사용하는 다양한 산업 분야의 생산성 향상을 기대할 수 있음.

3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책

- 정량적 연구 성과 중 국내 특허등록 1건이 현재 미달성 상태임.
- 국내 특허등록에 대한 특허 심사가 현재 계속 진행 중임. 해당 특허는 2019년 12월 23일에 출원 신청하였으나, 아직 심사가 진행 중임.
- 이와 관련하여 확인한 결과, 1~2월 안에 특허등록에 대한 1차 심사가 완료될 것으로 파악되며 이에 대응하여 빠른 시일 내에 특허등록 실적을 달성할 예정임.

특허보관함 출원(심사), 등록, 심판, PCT 각 업무별 사건정보를 조회할 수 있습니다. 도움말

출원(심사) 정보 < 이전

> 기본정보

※ 해당 출원번호는 공개되지 않은 출원건입니다.

출원번호	10-2019-0173105	출원일자	2019.12.23
우선심사청구	N		

> 이력정보

총 4건 | 페이지당 10 | go 엑셀다운로드

접수/발송번호	접수/발송일자	서류명	처리상태	To-Do	기한정보	등기번호
1-1-2019-1329488-10	2019.12.23	[특허출원]특허출원서	수리			
1-5-2019-0208961-15	2019.12.31	보정요구서(1-1-2019-1329488-10)	발송처리완료			
1-1-2020-0000635-55	2020.01.02	[출원서 등 보정]보정서	수리			
9-1-9999-9999999-89	2020.06.09	선행기술조사위원회	수리			

1

> 출원진행단계

출원진행단계

```

graph LR
    A[출원서 접수  
출원서류접수 및  
수수료 납부 단계] --> B[방식심사  
제출된 서류 및  
수수료 확인]
    B --> C[실체(내용)심사  
대기중]
    C --> D[실체심사  
의견제출 통지서  
등 발송]
    D --> E[의견서(보정서)  
접수]
    E --> F[등록/거절 결정  
등록 또는  
등록거절 결정서 발송  
(심사단계종료)]
    
```

그림 49. 특허등록 심사 진행 현황

- 향후 심사 의견을 충실히 대응하여 정상적으로 정량적 성과목표를 달성할 예정임.

4. 연구개발성과의 활용 계획

4-1. 연구개발성과의 활용 방안

○ 실무 분야에서의 활용방안

- 건축물에 발생하는 공기역학적 문제점을 개발기술을 이용하여 즉각적으로 파악하고, 다양한 시뮬레이션을 통한 최적의 해결방안 도출이 가능하므로 건축물 유지관리에 활용 가능함.
- 기존건축물의 성능 개선을 위한 리모델링 사업 진행 시, 사업에 따른 내외부 공기역학적 평가가 신속하고 정확하게 이루어지므로 기존건축물 그린리모델링 의사결정 지표로 활용 가능함.
- 개방형 BIM 포맷인 표준 IFC 코드를 BIM 입력 형식으로 지정하여 기존 건축물 설계 작업에서 사용되고 있는 다양한 BIM 소프트웨어들과 연계가 자유로우며, 이를 통해 기존 BIM 사용자가 설계단계에서 쉽게 개발기술을 활용할 수 있음.
- 신축 건축물의 실내공기질 및 온열 환경 평가를 위한 분석 도구로 활용
- 친환경 건축물 컨설팅 업무 및 친환경 인증 업무에 활용

○ 정책 분야에서의 활용방안

- 건축물의 공기역학적 평가의 효율성, 신속성, 경제성 확보로 활성화 도모 및 정부기관의 건축물 공기역학 관련 새로운 정책 제언의 기초 자료로 활용
- BIM-CFD 데이터 연동 표준화로 BIM 확대 정책에 부합하는 R&D 정책 추진의 자료로 활용

○ 연구 분야에서의 활용방안

- BIM을 활용하는 새로운 융합기술 개척에 기초 자료로 활용 및 협업을 통한 기술 고도화 도모
- 개방형 CFD 활용 고도화로 개방형 CFD 시뮬레이션을 이용한 R&D 개발의 기초 자료로 활용
- BIM 및 CFD를 활용하는 관련 연구기관과의 기술 교류를 통한 기술 향상
- 형상 단순화 작업이 필요한 시뮬레이션 기술들의 단순화 알고리즘 개발에 기초 자료로 활용
- 관련 국내외 학회 논문발표 등을 통한 기술 향상 도모 (논문 게재, 학술발표, 심포지움 등)
- 가상현실·증강현실 기술과 결합하여 화재 피난, 리모델링 사업효과 체험 등 다양하게 활용이 가능한 3차원 공기역학 시뮬레이터 개발의 기초 기술로 활용



그림 50. 연구 개발 성과 활용 방안

4-2. 기대효과

○ 기술적 측면

- 본 연구 개발기술을 통해 기존에 많은 작업시간이 요구되던 CFD 모델의 전처리 과정을 자동화하여 인력 및 자원 투입의 효율화가 가능함.
- CFD 모델 전처리 과정에서 사용자 경험에 의존함에 따라 발생하던 해석 오차를 본 개발성과물을 통해 상쇄하여 신뢰성 높은 시뮬레이션 결과의 제공이 가능함.
- BIM 형상·속성정보를 매칭하여 CFD 전처리 과정을 자동화하는 기초원천 기술의 최초 확보로 BIM 기반 CFD 시뮬레이션 기술의 국산화 및 기술 선점이 가능함.
- CFD 분석의 효율화로 다양한 분야에서 업무 편리성과 효율성 확보가 가능함.
- 자동화 기술을 통한 설계 변경에 대한 즉각적인 평가가 가능함.
- CFD 분석의 효율화 및 자동화로 다양한 환경에서의 공기 유동 분석 결과의 빅데이터 구축 가능 및 이를 활용한 새로운 신기술 개척이 가능함.

○ 사회적 측면

- 본 연구의 BIM 통합 개방형 CFD 전처리 자동화 모듈을 통해 설계단계에서부터 실내공기질을 포함한 기류, 온열 환경 평가가 용이해지므로, 기존 대비 최소한의 시간과 비용으로 최적 설계안 도출이 가능함. 이를 통해, 국민 삶의 질 향상에 기여함.
- BIM 모델이 존재하는 기존건축물의 공기역학 평가 과정이 간소화되고 업무의 효율성이 증가함. 이를 통해 기존 대비 적은 시간과 비용으로 건축물 공기 환경 개선사업을 수행할 수 있음.
- BIM과 CFD 연계 기술의 개발을 통한 BIM 기반 지능형 설계 확산 기반 조성 가능함.
- 건축물의 공기역학적 분석 자동화를 통해 새로운 건축 시스템 도입에 대한 실패확률이 감소함.

○ 경제적·산업적 측면

- BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술을 세계 최초로 개발하며, 새로운 기술 시장 개척으로 건축 분야 시장의 활성화와 건축 R&D의 다양화를 이끌 수 있음.
- 빅데이터 기반 건축물 공기환경 컨설팅 온/오프라인 서비스 시장 창출 가능함.
- 빅데이터 기반 건축물 맞춤형 컨설팅 인력 및 전문가 양성 가능함.
- 외산 소프트웨어 중심의 기존 CFD 분석 시장 재편 가능함.



그림 51. 개발기술의 기대성과 및 파급효과

4-3. 기업화 추진 방향

4-3-1. 국내·외 관련 시장 분석

○ 국외 건설 분야 CFD 시장 규모

- 기술 시장 전문 조사 업체인 Technavio에 의하면 세계 CFD 시장은 2022년까지 약 8.9억 달러 규모로 성장할 것을 예측함. 또한, 해당 기간 연평균 성장률은 9% 이상으로 예측함.
- 2016년 Cambashi 사의 조사에 의하면 전체 CAE 시장 중 건축 분야가 포함된 AEC (Architecture, Engineering, Construction)/Civil 분야는 전체 시장의 9%에 해당하는 것으로 조사됨. 따라서 전체 CFD 시장 중 9%를 건축 분야 CFD가 점유한다고 설정함.
- 이를 바탕으로 국외 건설 분야 CFD 시장의 전망을 예측한 결과, 2018년 624억 원 규모의 시장에서 2022년에는 약 881억 원 규모의 시장으로 성장할 것으로 예측됨. 시장 성장률은 CFD 성장률인 연평균 성장률 9%를 적용함.

○ 국내 건설 분야 CFD 시장 규모

- 국내 CFD 시장의 현황 및 전망 관련 자료는 전무한 실정으로, 국외 자료를 기반으로 국내 건설 분야 CFD 시장을 예측함.
- ETRI는 2012년 기준 국내 건설 IT 시장은 세계 건설 IT 시장의 약 16.4%에 해당한다고 발표함. 본 연구에서는 이를 활용하여 세계 건설 분야 CFD 시장의 16.4%를 국내 건설 분야 CFD 시장의 규모로 설정함. 따라서 국내 건설 분야 CFD 시장은 2022년에는 약 144억 원으로 성장할 것으로 예측됨.

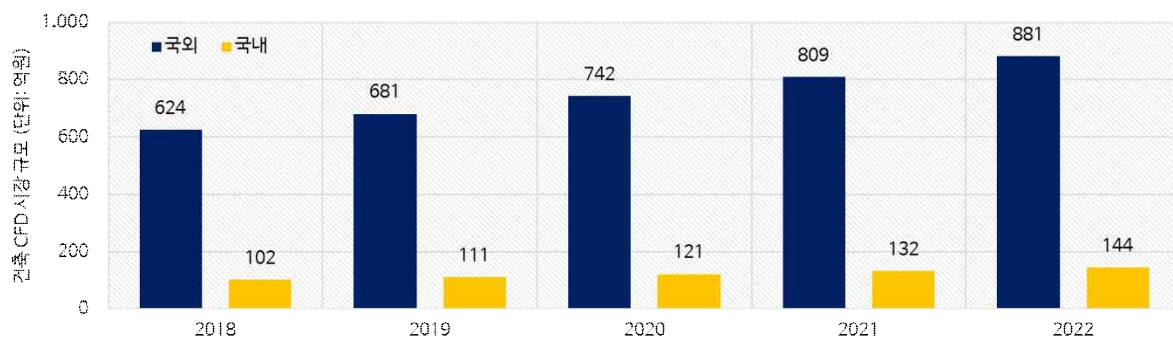


그림 52. 건설 분야 CFD 시장 국내외 시장 규모 전망

표 44. 국내·외 시장규모 전망

(단위 : 억원)

구 분	현재의 시장규모(2021년)	예상 시장규모(2022년)
세계 시장규모	809	881
국내 시장규모	132	144
산출 근거	ETRI, 건설IT융합분과 발표자료 (2008) Global CFD Market 2018-2022 (Technavio) 2016 CAE software revenues by application segment (Cambashi)	

4-3-2. 국내 · 외 경쟁사 분석

○ 국내외 주요시장 경쟁사 선정

- 시장 조사 전문기관인 MarketWatch의 조사 결과에 따르면 전체 CFD 시장의 42.64%를 ANSYS 사 (Fluent)가 점유하고 있으며, 다음으로 Siemens 사 (STAR-CCM+)가 7.86%를 점유하는 것으로 조사됨. 추가로, CAD, BIM 관련 SW를 공급하고 있는 Autodesk사에서 Autodesk CFD를 개발하여 건축 CFD 분석에 유용한 기능을 제공하고 있음. 따라서 국외 시장의 경우 주요 경쟁사는 ANSYS, STAR-CCM+, Autodesk CFD로 선정함
- 국내의 경우, 공공기관 CFD SW 구매 건을 조사하여 시장 점유율을 평가함. 나라장터 홈페이지에서 CFD SW 구매 건을 분석하여 점유율을 산정하였음. ANSYS 사의 제품이 전체 61%를 점유하고 있으며 다음으로 STAR-CCM+이 23%를 점유함. 따라서, 국내시장의 주요 경쟁사 또한 국외 시장과 동일한 ANSYS, STAR-CCM+로 선정함.

○ 주요 경쟁사 판매가격 및 판매액 조사

- 주요 경쟁사 제품의 판매가격과 판매액은 국내시장을 기준으로 조사하였음, 주요 경쟁사 제품에 대하여 SW 라이선스 1 copy에 대한 가격 조사함. 연 판매액은 2019년 정부기관에서 계약한 CFD SW 구매 건을 기준으로 작성하였음 CFD SW 공공 구매 건 조사는 나라장터 홈페이지를 이용하여 분석함. 이에 관한 결과는 그림 53과 같음.
- 연 판매액의 경우 공공기관 거래에 관한 결과로 실제 교육기관(대학), 기업 간의 거래를 포함하면 판매액의 이보다 월등히 높을 것으로 예상함.

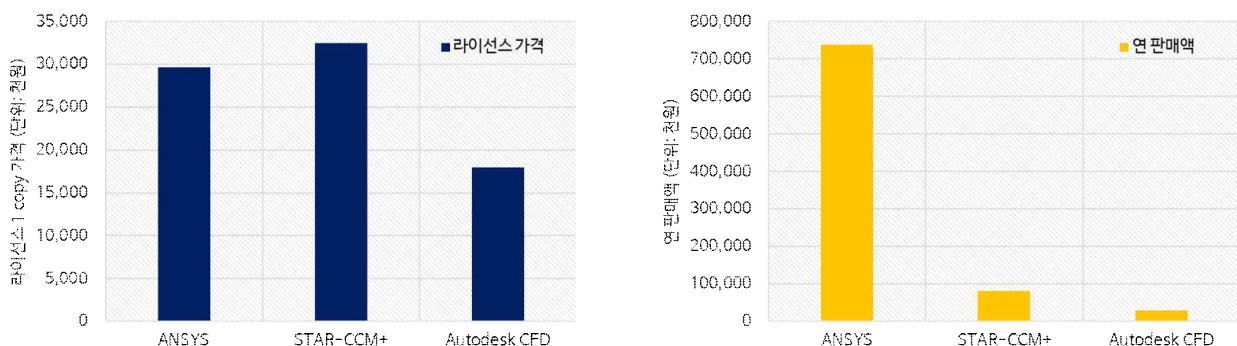


그림 53. 주요 경쟁사 제품 조사 결과

표 45. 국내 · 외 주요시장 경쟁사

경쟁사명	제품명	판매가격 (천원)	연 판매액 (천원)
ANSYS	Fluent	29,700	738,620
Siemens	STAR-CCM+	32,500	81,700
Autodesk	Autodesk CFD	18,000	29,920

4-3-3. 기업화 추진 계획

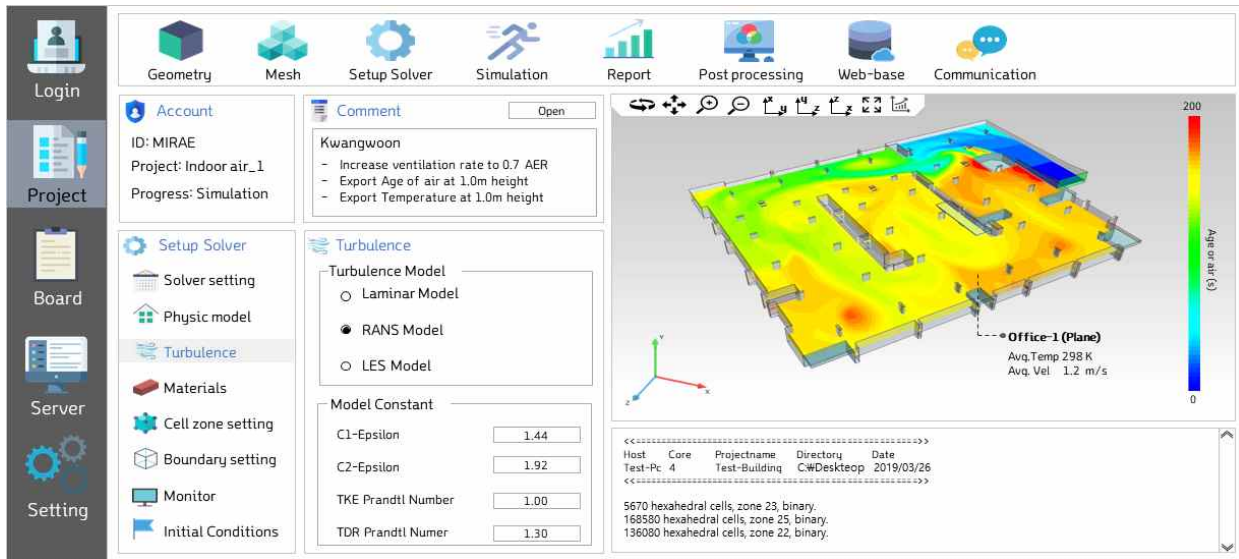


그림 54. 개발 기술의 상용화를 위한 CFD 분석 플랫폼 개발안

- 본 연구는 BIM 설계환경 기반의 개방형 CFD 전처리 자동화 기술을 세계 최초로 개발했으며, 이를 바탕으로 건축 특화 CFD 분석 프로그램을 개발할 예정임.
- 본 연구를 통해 BIM 설계정보의 해석과 실내외 CFD 모델의 전처리를 위한 기초 기술을 개발함. 개발 기술의 상용화를 위해 풍환경 프로파일 자동 설정 등 CFD 분석에 도움이 되는 보조 기능 등을 추가할 계획임.
- 또한, 건물 환경평가의 진입장벽을 낮추고 CFD 분석 과정을 단순화하기 위해 시뮬레이션 결과의 분석 기능을 중점적으로 보완할 예정임. 임의의 지점·물리량의 데이터 추출과 비교 분석 기능을 통해 모델의 검증과 결과 해석을 지원하는 것이 목표임.
- 기존 CFD 소프트웨어는 항공·기계 분야를 대상으로 개발되며, 건축 분야에 활용 가능한 기능이 제한적임. 개발 기술을 적용한 CFD 분석 플랫폼은 친환경 건축 분야에서 기술적 우위를 점할 것으로 예상됨.
- 개발 예정인 CFD 분석 프로그램은 건축사, 설계자 등을 대상으로 한 건물 환경평가 서비스 (Software as a Service)로 제공할 계획임. 동시에 환경컨설턴트, 시뮬레이션 기술자를 대상으로 CFD 분석 플랫폼 (Platform as a Service)으로서 사업화 예정.
- 개발 기술의 판로 확보를 위해 주관연구기관의 학회 홍보와 컨퍼런스 참가, 공동연구기관의 기존 영업망을 통해 개발 기술을 홍보할 예정.

4-3-4. 사업화 계획

○ 사업화를 위한 계획 수립

- 제품 생산을 위한 계획은 총 4단계로 원천기술 확보 1단계, 기술 고도화 2단계, 사업화 제품 개발 3단계, 제품 서비스 4단계로 구분함.
- 1단계는 원천기술 확보 단계로 본 과제의 연구수행을 통해 성공적으로 기술을 확보함.
- 2단계에서는 BIM 기반 CFD 모델 자동생성 기술의 고도화와 사업 제품을 위한 초기 플랫폼을 구현하고자 함. 3단계에서는 사업화 플랫폼을 구현하여 시제품을 제작하고, 전문가 테스트를 수행하여 최종 사업화 제품 개발함.
- 4단계는 제품 양산 및 서비스 단계로 제품의 안정적 제공 및 사업화를 위한 TF팀 구성과 전담인력 배치를 수행할 계획임.

○ 제품 판매를 위한 판로 개척

- 연구개발 제품의 1차 소비자는 건설업체, 친환경 컨설팅 업체, 정부기관의 CFD 실무자로 정의함. 이와 함께 2차 소비자는 관련 학계 전문가, 개인 사용자들로 정의 가능함.
- 국내의 경우, 공동연구기관의 기존 영업망을 이용하여 건축 친환경 컨설팅 분야의 기업들을 대상으로 기술홍보 및 판매를 추진할 계획임.
- 국외의 경우, Webinar를 통한 다양한 관련 기업, 학계, 개인 사용자 홍보와 함께 미국 그린빌딩위원회의 Platinum 등급 회원사들을 대상으로 개발 제품 판로를 확보하고자 함.



그림 55. Web을 통한 해외 B to C 사업 강화 전략 개념도

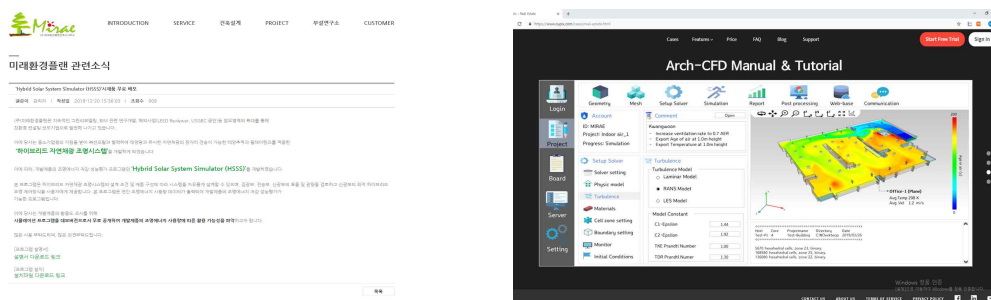


그림 56. (좌) 웹 페이지를 통한 기술 홍보 (우) 홈페이지를 통한 사례 공유

붙임. 참고문헌

1. 김성찬, & 이성혁. (2008). 케이블 화재의 화염전파 해석을 위한 FDS 모델의 격자민감도 평가. 한국안전학회지, 23(4), 30–35.
2. 박관용, 김창민, 최창호, & 박창영. (2019). 실내 CFD 해석을 위한 건물 형상 단순화 알고리즘 개발. 한국건축환경설비학회 논문집, 13(5), 417–429.
3. 이민형, 김창민, 박관용, 최창호, & 박창영. (2020). 실내 기류 분석을 위한 전산유체역학 모델의 격자 독립성 검정 제안. 한국건축환경설비학회 논문집, 14(2), 183–194.
4. 이현수, 오광진, & 박수경. (2009). 장애인 스포츠클럽 지원사업 마케팅 믹스 4Cs 의 중요도-만족도 분석. 한국특수체육학회지, 17(3), 41–60.
5. ASHRAE Standard Committee. (2013). ASHRAE handbook: Fundamentals 2013.
6. Barber, C. B., Dobkin, D. P., Dobkin, D. P., & Huhdanpaa, H. (1996). The quickhull algorithm for convex hulls. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 22(4), 469–483.
7. buildingSMART. (n.d.). IfcSlab. Industry Foundation Classes (IFC). Retrieved January 6, 2021, from <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/FINAL/HTML/ifcsharedbldgelements/lexical/ifcslab.htm>
8. Caleb, B. (2016). fluids: Fluid dynamics component of Chemical Engineering Design Library (ChEDL). <https://github.com/CalebBell/fluids>
9. Caleb, B. (2016). ht: Heat transfer component of Chemical Engineering Design Library (ChEDL). <https://github.com/CalebBell/ht>
10. Cheng, H.-C., Lo, C.-H., Chu, C.-H., & Kim, Y. S. (2011). Shape similarity measurement for 3D mechanical part using D2 shape distribution and negative feature decomposition. Computers in Industry, 62(3), 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.09.001>
11. DIN EN. (2000). 12524: 2000–07 Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften-Tabellierte Bemessungswerte. Berlin: Beuth-Verlag.
12. Dimyadi, J., & Dimalen, D. (2010). Open IFC Model Repository. <http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz/>
13. DURAARK Project. (2015). Academic_Autodesk. Retrieved from <http://duraark.eu/data-repository/#ifc>
14. East, E. W. (n.d.). Common Building Information Model Files and Tools. National Institute of Building Sciences. Retrieved April 27, 2020, from https://www.nibs.org/page/bsa_commonbimfiles
15. Farshad, F. F., & Rieke, H. H. (2006). Surface Roughness Design Values for Modern Pipes. SPE-89040-PA, 21(03), 212–215.
16. Fabritius, B., & Tabor, G. (2016). Improving the quality of finite volume meshes through genetic optimisation. Engineering with Computers, 32(3), 425–440.
17. Fluent (2011). 14.0 User's Manual. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.

18. Franke, J. (2006, July). Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In The fourth international symposium on computational wind engineering, Yokohama, Japan (pp. 529–532).
19. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B. (2010). The Best Practise Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: an outcome of COST 732. In The fifth international symposium on computational wind engineering (pp. 1–10).
20. Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, K. H., & Carissimo, B. (2011). The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. *International Journal of Environment and Pollution*, 44(1–4), 419–427.
21. Galvín, S., Reggio, M., & Guibault, F. (2011). Assessment study of $K-\epsilon$ turbulence models and near-wall modeling for steady state swirling flow analysis in draft tube using fluent. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 459–478.
22. Gao, F., Wang, H., & Wang, H. (2017). Comparison of different turbulence models in simulating unsteady flow. *Procedia Engineering*, 205, 3970–3977.
23. Gesellschaft, V. (2010). VDI Heat Atlas. Springer Berlin Heidelberg. <https://books.google.co.kr/books?id=0t-HrUf1aHEC>
24. Godderidge, B., Tan, M., Turnock, S. R., & Earl, C. (2006). A verification and validation study of the application of computational fluid dynamics to the modelling of lateral sloshing.
25. Greenshields, C. J. (2015). OpenFOAM user guide. OpenFOAM Foundation Ltd, version, 3 (1), 47.
26. Gullberg, R. (2017). Computational Fluid Dynamics in OpenFOAM.
27. Hefny, M. M., & Ooka, R. (2009). CFD analysis of pollutant dispersion around buildings: Effect of cell geometry. *Building and Environment*, 44(8), 1699–1706. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.010>
28. Hellsten, A. (2004). New two-equation turbulence model for aerodynamics applications. Helsinki University of Technology.
29. Idel' chik, I. E., Ginevskii, A. S., Malyavskaya, G., & Begell House (Firm). (2007). Handbook of hydraulic resistance. /z-wcorg/. http://www.begellhouse.com/ebook_platform/077c82a56f53712a/5877598576b05c67.html
30. Jackson, A. (2012). A comprehensive tour of snappyHexMesh. In 7th OpenFOAM Workshop Lecture, Darmstadt.
31. Jasak, H. (1996). Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows.
32. Kada, M. (2006). 3D building generalization based on half-space modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(2), 58–64.
33. Khare, A., Singh, A., & Nokam, K. (2009). Best practices in grid generation for CFD applications using HyperMesh. In ATC: HyperWorks Technology Conference 2009 (pp. 1–10).

34. Kim, R., Lee, I., & Kwon, K. (2017). Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164, 235–256. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008>
35. Krijnen, T. (2011). IfcOpenShell. <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell>.
36. Manual:Traditional modeling, the CSG way—FreeCAD Documentation. (n.d.). Retrieved October 8, 2019, from https://www.freecadweb.org/wiki/Manual:Traditional_modeling,_the_CSG_way
37. Mishra, P., & Aharwal, K. R. (2018, September). A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage. In *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng* (Vol. 402, pp. 012145–012153).
38. National Institute of Building Sciences. (2012). Medical Clinic. Retrieved from https://www.nibs.org/page/bsa_commonbimfiles
39. Lee, M., Park, G., Park, C., & Kim, C. (2020). Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/8827936>
40. Lilis, G. N., Giannakis, G. I., & Rovas, D. V. (2017). Automatic generation of second-level space boundary topology from IFC geometry inputs. *Automation in Construction*, 76, 108–124.
41. Longo, S., & Losada, M. A. (2012). Turbulent structure of air flow over wind-induced gravity waves. *Experiments in fluids*, 53(2), 369–390.
42. OpenCASCADE. (n.d.). Open CASCADE Technology: BRepMesh_IncrementalMesh Class Reference. Retrieved October 8, 2019, from https://www.opencascade.com/doc/occt-6.9.0/refman/html/class_b_rep_mesh_incremental_mesh.html
43. Park, G., Lee, I., Yeo, U., Ha, T., Kim, R., & Lee, S. (2018). Ventilation rate formula for mechanically ventilated broiler houses considering aerodynamics and ventilation operating conditions. *Biosystems Engineering*, 175, 82–95.
44. Park, G., Kim, C., Lee, M., & Choi, C. (2020). Building Geometry Simplification for Improving Mesh Quality of Numerical Analysis Model. *Applied Sciences*, 10(16), 5425. <https://doi.org/10.3390/app10165425>
45. Paviot, T., & Feringa, J. (2018). PythonOCC. 3D CAD/CAE/PLM development framework for the Python programming language ...; <https://github.com/tpaviot/pythonocc>.
46. Sally, M. H., & Lindeman, A. (2016). Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications, NUREG-1824. Electric Power Research Institute and US Nuclear Regulatory Commission, Washington.
47. Shepherd, J. F., & Johnson, C. R. (2008). Hexahedral mesh generation constraints. *Engineering with Computers*, 24(3), 195–213.
48. seatgeek. (2021). Seatgeek/fuzzywuzzy [Python]. SeatGeek. <https://github.com/seatgeek/fuzzywuzzy> (Original work published 2011)

49. The University of Auckland. (2016, January 24). Open IFC Model Repository. Retrieved October 14, 2019, from <http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz/>
50. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761.
51. Van Duin, C. A., & Janssen, P. A. (1992). An analytic model of the generation of surface gravity waves by turbulent air flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 236, 197–215.
52. White, D. R., Saigal, S., & Owen, S. J. (2005). Meshing complexity: predicting meshing difficulty for single part CAD models. *Engineering with Computers*, 21(1), 76–90.
53. Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 95(9–11), 1551–1578.
54. Zhu, J., Wang, X., Chen, M., Wu, P., & Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: IFC geometry transformation to shapefile using enhanced open-source approach. *Automation in Construction*, 106, 102859.

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.