원자력발전소 수출 전략 수립과, 잠재 시장에서의 사업성 평가를 위한
BIM 기반 건설 공기 및 현금 흐름 (Cash Flow) 예측 모델 개발

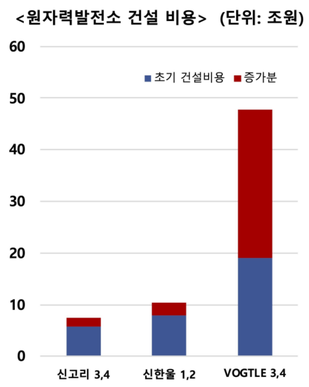
"BIM으로 원자력을 살리다" 팀

I. 제안 배경 및 목표

건설 공기 증가로 인한 건설비용 상승

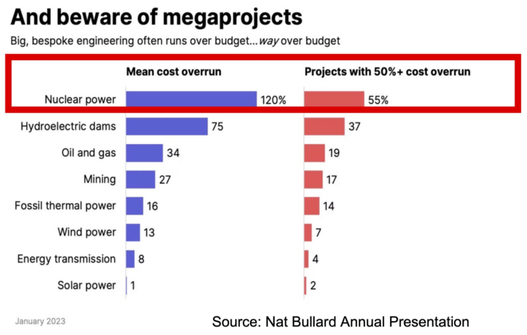
건설 공기를 잘 지키는 대한민국에 비해 건설 공기 지연이 빈번하게 일어난 미국은 건설 비용 상승 효과가 매우 큼

<원자력발전소 건설 비용> (단위: 조원)



타 에너지원 대비 높은 원자력발전의 건설 비용 리스크

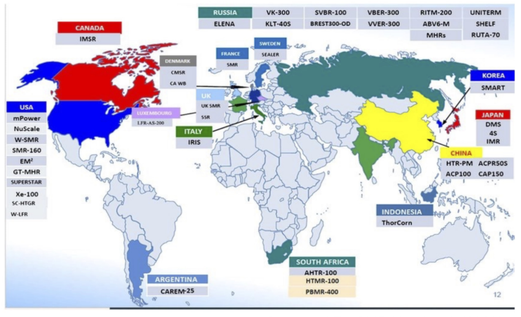
건설 비용 상승이 50% 이상 나타난 프로젝트의 비율(55%)과, 평균 건설 비용 상승(120%) 은 타 에너지원에 비해 원자력이 압도적으로 높음. 이는 원자력이 건설 공기 지연으로 인해 가격 경쟁력을 상실하고 있다고 할 수 있음.



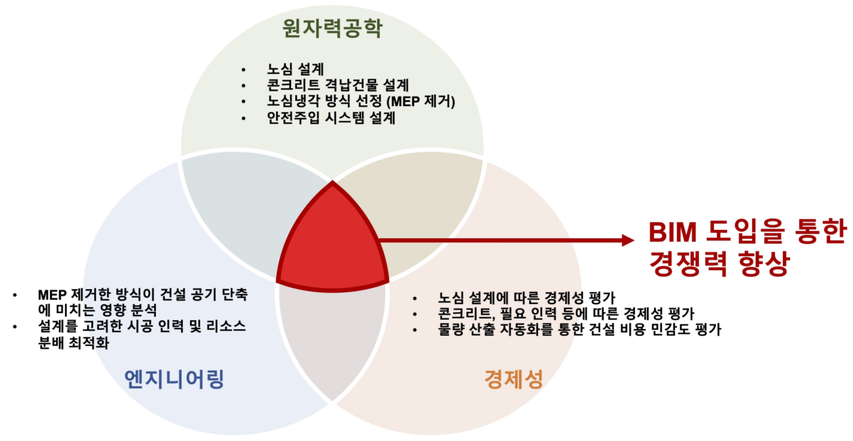
Source: Nat Bullard Annual Presentation

건설 경험이 없는 소형 모듈형 원전(SMR)에 대한 우려

설계가 정형화 되어있고, 건설 경험이 많은 대형 원전에서도 건설 공기 지연이 빈번하게 발생하는 와중에, 건설 경험도 없으며 노형 간 설계가 상이한 소형 모듈형 원전(SMR) 의 건설 공기와 비용을 예측할 수 있는가에 대한 우려가 커지고 있음.

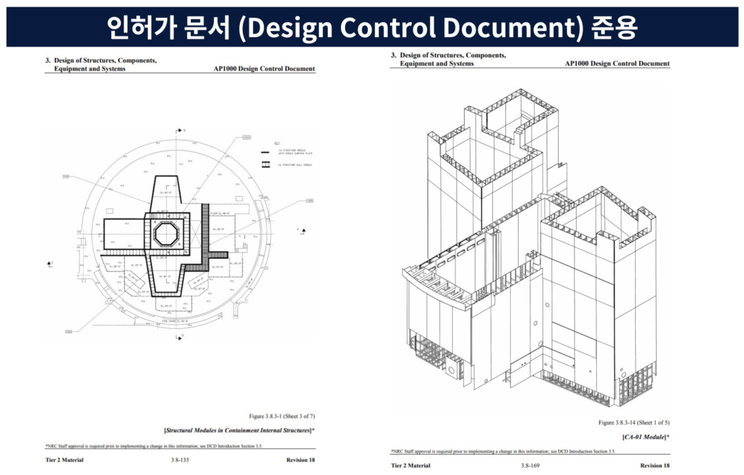


Source: IAEA SMR Handbook (2020)

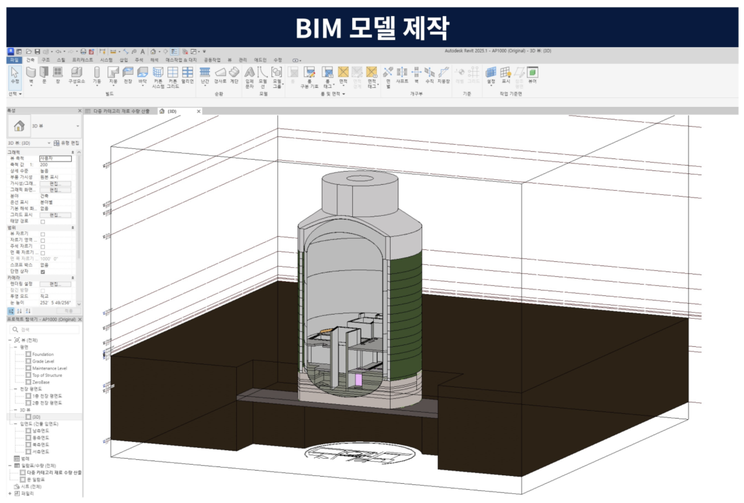


II. 3D BIM 모델 구축

인허가 문서 (Design Control Document) 준용

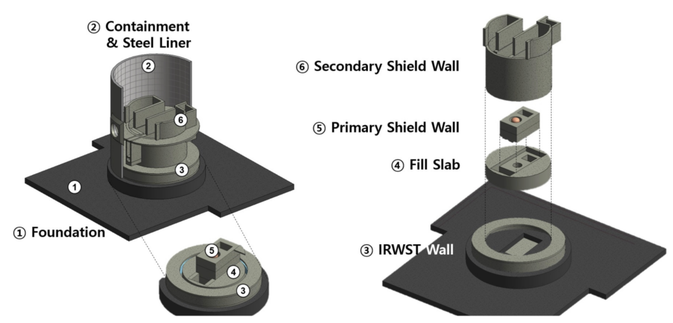


BIM 모델 제작



III. 물량 산출 및 공정표 구축

한국(APR1400)과 미국(AP1000) 원전 BIM 모델 (LOD350)

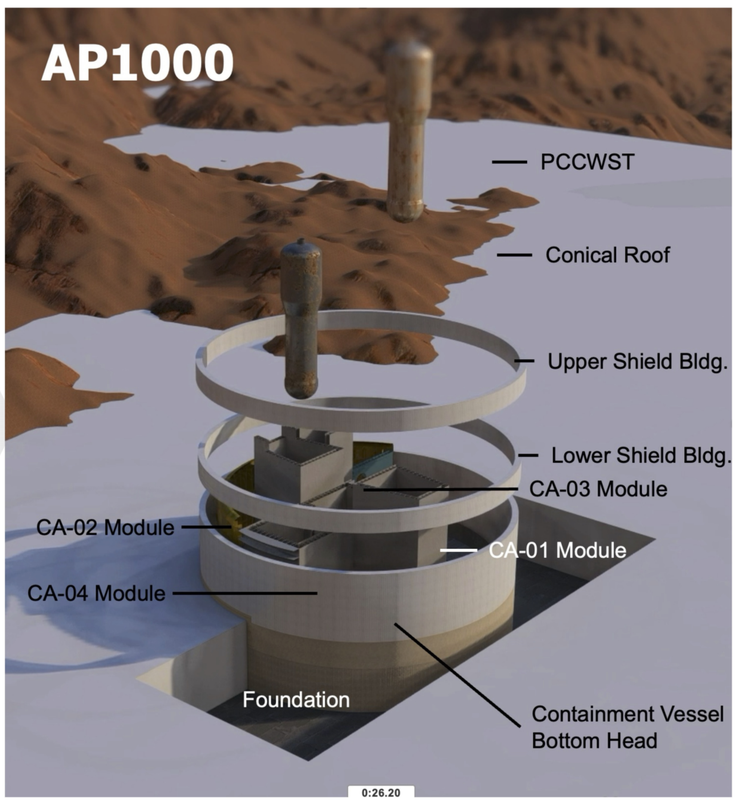


물량(콘크리트 구조물) 산출 및 공정표 구축

#	Main Structures			Volume (Cubic Yards)
①	Foundation	Lower	38146.97	56509.48
		Upper	18362.51	
②	Containment	CNT Wall	7106.94	19709.36
		CNT Wall	7018.5	
		CNT Wall 2	32.09	
		CNT Wall 2	31.68	
		CNT Dome	5520.15	
③	IRWST	IRWST Slab (97-100)	982.97	1803.97
		IRWST Wall	410.5	
		IRWST Wall	410.5	
④	Fill Slab	Fill Slab (78-100)	3517.03	5510.27
		Fill Slab (66-69)	256.94	
		Fill Slab (76-80)	118.98	
		Fill Slab (78-81)	1617.32	
⑤	Primary Shield Wall	PSW (69'-94' 3 1/2")	1577.7	3805.97
		PSW (94' 3 1/2" - 114'6")	1261.04	
		PSW (114'6" - 130')	967.23	
⑥	Secondary Shield Wall	SSW 1	1676.16	5583.32
		SSW 2	1780.29	
		SSW 3	53.12	
		SSW 4	82.9	
		SSW 5	82.32	
		SSW 6	12.89	
		SSW (SG compartment)	905.43	
		SSW (Straight 4' 1/3" thick)	608.79	
		SSW (Straight 5' thick)	381.42	
RC concrete total				92922.37
				0
SC concrete total				0

IV. 시공 시각화

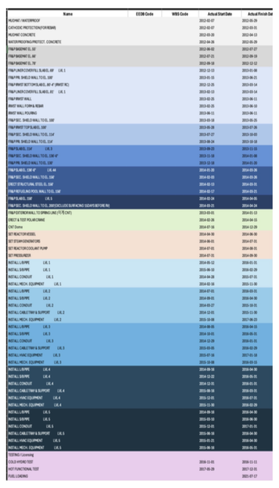
구축한 물량 및 공정표에 임의의 생산성을 적용하여 시공 시각화



V. 건설 공기 예측 코드 개발

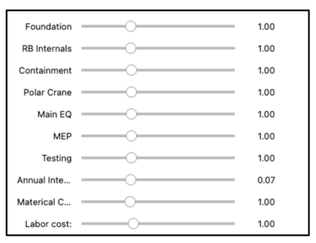
노형 선정

- 총 5개 노형 선택 가능함
- 노형 선정 이후 각 노형에 해당하는 WBS 목록화
- 다음은 APR1400의 WBS 목록임 (65개)

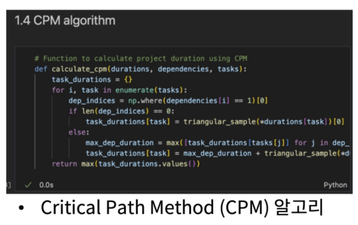


Customize Parameters

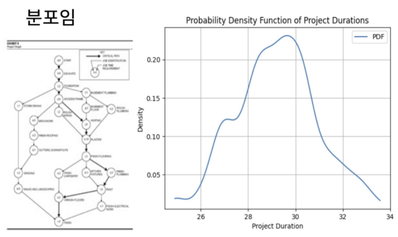
- 콘크리트 생산성
- MEP 설치 생산성
- 인허가 생산성
- 이자율 (Interest Rate~7%)
- Material Cost
- Labor cost
- **다음과 같이 파이썬 Slider 기능을 활용하여 입력값들을 조정할 수 있음**



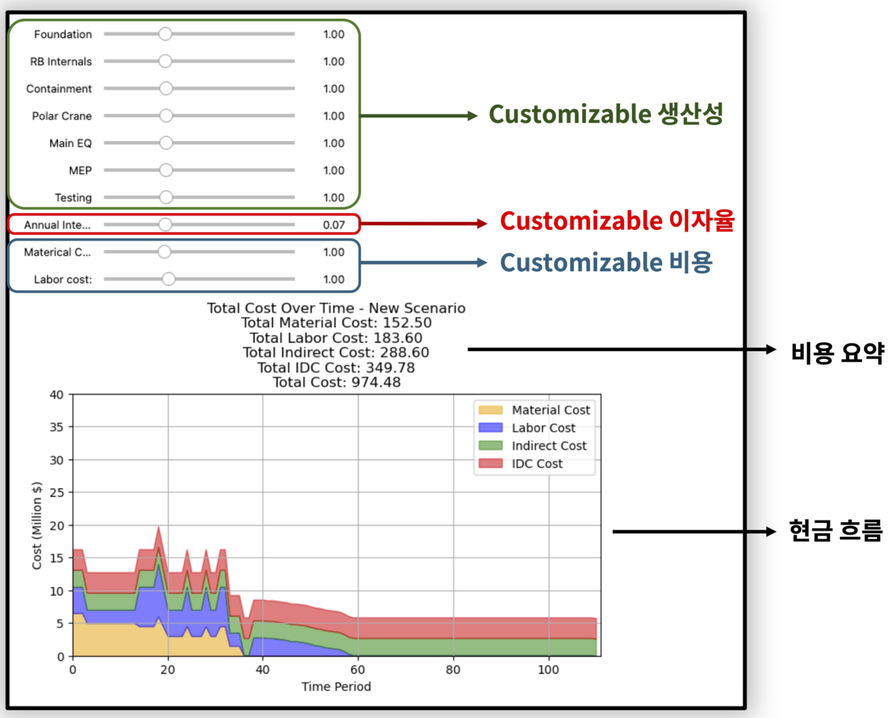
건설 공기 추정



- Critical Path Method (CPM) 알고리즘을 활용하여 생산성에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션 진행 후, 건설 공기 분포를 출력함
- WBS 간 연결 상태는 0과 1로 이루어진 종속행렬을 입력받아 연결 그래프를 구성함.
- 다음은 연결 그래프와 계산된 건설 공기 분포임



VI. 현금 흐름 예측 코드 개발



BIM으로 원자력을 살리다:

원자력발전소 수출 전략 수립 및 잠재 시장 및 사업성 평가를 위한 BIM 기반 건설 공기 및 현금 흐름(Cash Flow) 예측 모델 개발

2024 엔지니어링산업경진대회 BIM 부문

곽승민, 김수현

Seoul National University
Department of Nuclear Engineering

Contents

- **Introduction** (원자력발전 산업에 BIM 도입이 필요한 이유)
- **3D BIM model** (한국과 미국 원자력발전소 3D BIM 모델 제작)
- **4D & 5D BIM model** (Work Breakdown Structure 와 Cost Breakdown Structure 추가를 통한 확장)
- **Modeling construction Schedule and Cash Flow** (코드 기반 건설 공기 및 현금 흐름 예측 모델 개발)
- **Exploring potential market and construction strategy** (모델을 활용한 사업성 평가 및 시장 탐색)

Introduction:

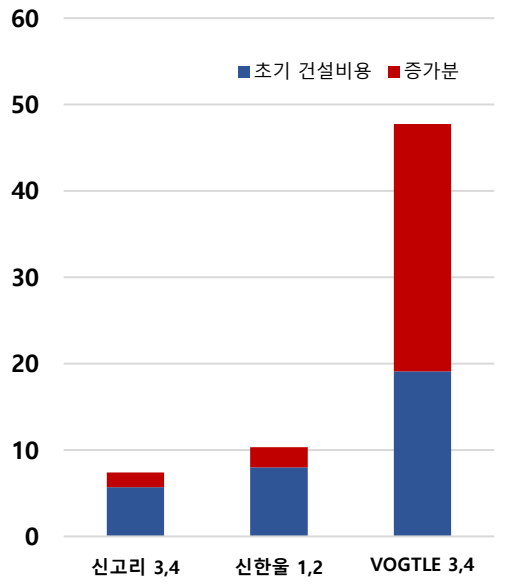
원자력발전 산업에 BIM이 필요한 이유

원자력발전소의 가격 경쟁력 상실의 가장 큰 원인은 건설 공기 지연임

건설 공기 증가로 인한 건설비용 상승

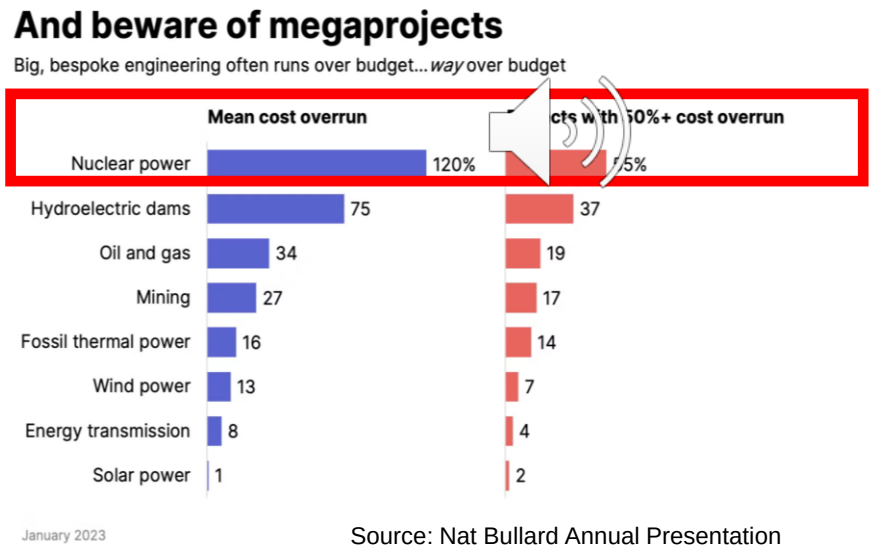
건설 공기를 잘 지키는 대한민국에 비해 건설 공기 지연이 빈번하게 일어난 미국은 건설 비용 상승 효과가 매우 큼

<원자력발전소 건설 비용> (단위: 조원)



타 에너지원 대비 높은 원자력발전의 건설 비용 리스크

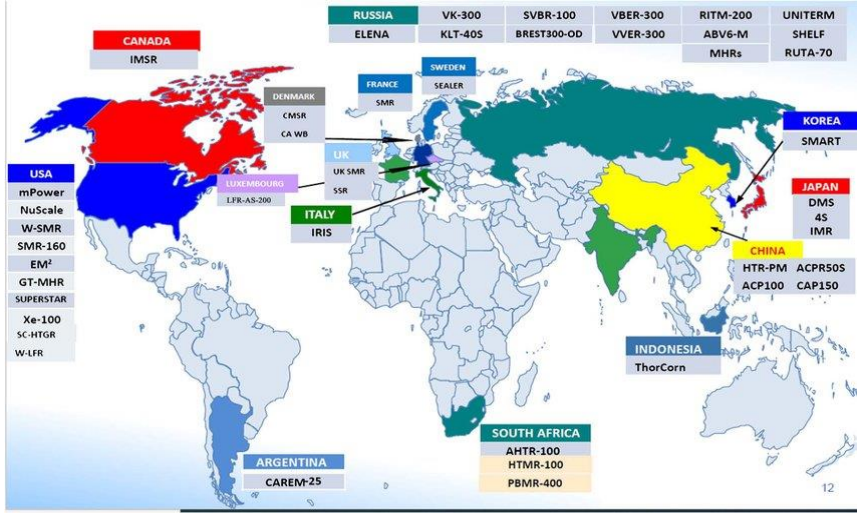
건설 비용 상승이 50% 이상 나타난 프로젝트의 비율(55%)과, 평균 건설 비용 상승(120%) 은 타 에너지원에 비해 원자력이 압도적으로 높음. 이는 원자력이 건설 공기 지연으로 인해 가격 경쟁력을 상실하고 있다고 할 수 있음.



Source: Nat Bullard Annual Presentation

건설 경험이 없는 소형 모듈형 원전(SMR)에 대한 우려

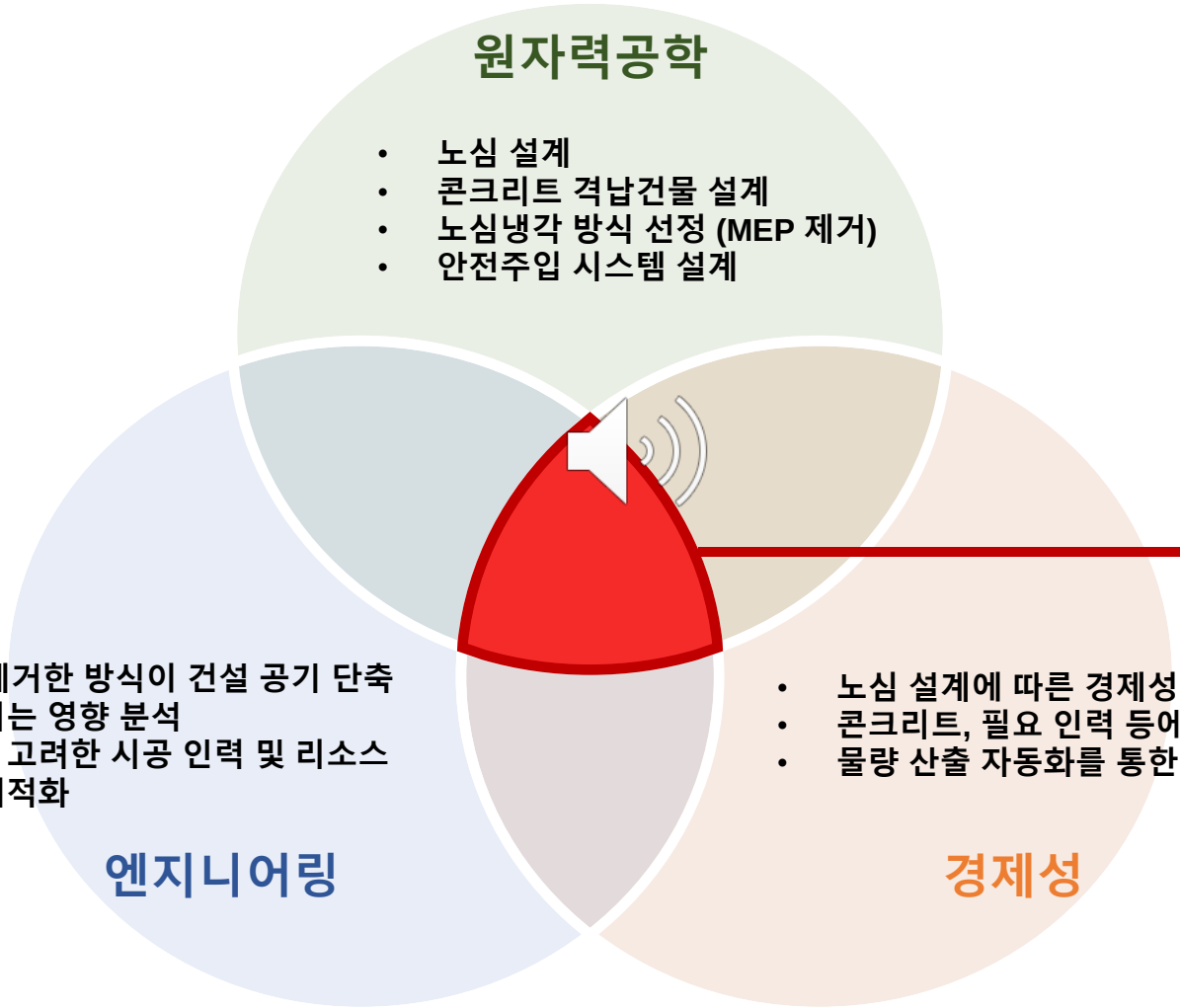
설계가 정형화 되어있고, 건설 경험이 많은 대형 원전에서도 건설 공기 지연이 빈번하게 발생하는 와중에, 건설 경험도 없으며 노형 간 설계가 상이한 소형 모듈형 원전(SMR) 의 건설 공기와 비용을 예측할 수 있는가에 대한 우려가 커지고 있음.



Source: IAEA SMR Handbook (2020)

즉, 원자력공학과 엔지니어링을 모두 고려하는 의사 결정 역량이 원자력 산업계에 요구되고 있음

원자력발전 산업에 BIM 도입이 필요한 이유



BIM 도입을 통한 경쟁력 향상

3D BIM model

한국과 미국 원자력발전소 BIM 모델 제작

한국과 미국의 대표 원자력발전소 노형을 선정하였음

APR1400 (대한민국)

- APR1400은 ㈜한국수력원자력의 주력 가압경수로 노형임
- 2017년 11월, 유럽 수출형 노형(EU-APR)의 표준설계가 유럽사용자요건 (European Utility Requirement: EUR) 인증을 받았음
- 2019년 8월, 미국원자력규제위원회 (U.S. NRC)의 표준설계인증을 취득함
- 2024년 7월 기준, 전 세계 총합 12개 호기가 건설 또는 운영중임

AP1000 (미국 Westinghouse)

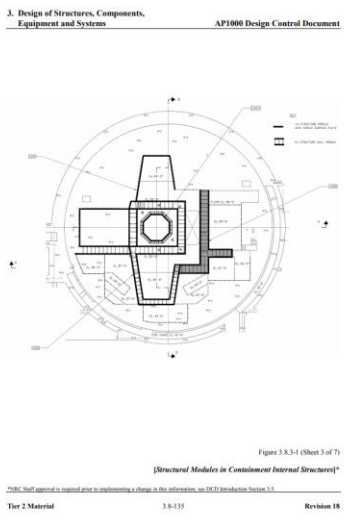
- AP1000은 미국 Westinghouse 社에서 개발한 가압경수로 노형으로 계통과 구조의 단순화를 통해 경제성 향상을 표방한 노형임
- 건설 공기 단축과 경제성 향상을 위해 모듈러 공법, SC 콘크리트 도입 등 IAEA에서 소개한 건설 분야 혁신 기술들이 적용되었음
- 2024년 7월 기준, 전 세계 총합 6개 호기가 건설 또는 운영중이며, 2기는 미국 4기는 중국에 위치함

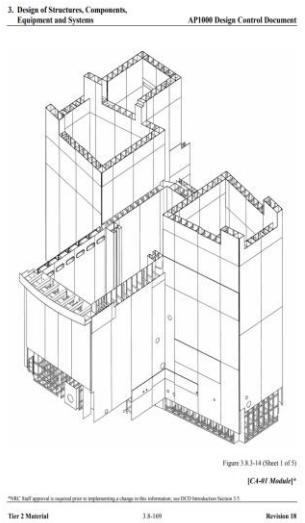
규제기관의 인허가 문서에 기반하여 BIM모델을 제작하였음

미국 원자력규제위원회(U.S. NRC)는 LOD300~LOD400 수준의 구조물 관련 제원을 공개하고 있음

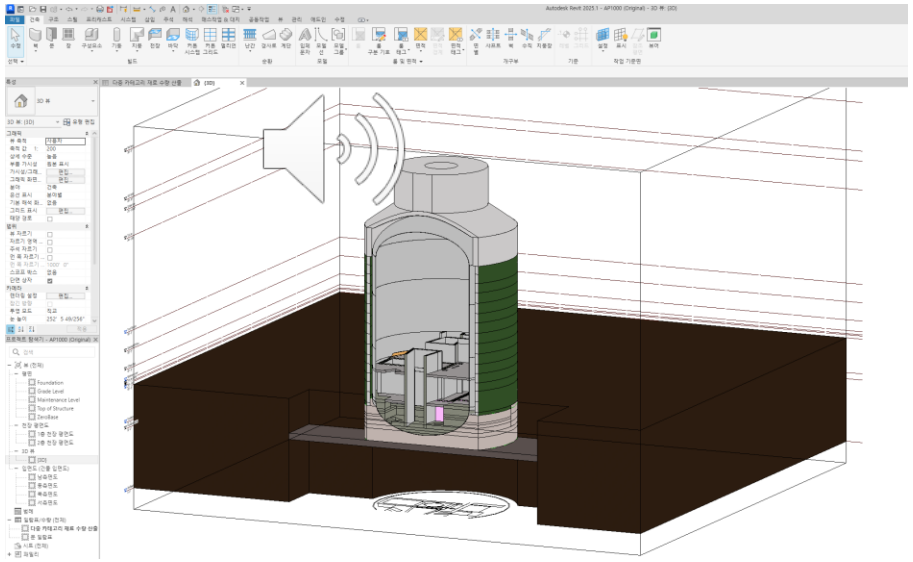
1) 인허가 문서에 따라 모델을 만들고 2) 실제 보고된 수치 (콘크리트 부피 등)와 비교하는 과정을 거쳐 정확성을 확보함

인허가 문서 (Design Control Document) 준용





BIM 모델 제작



검증

BIM 모델

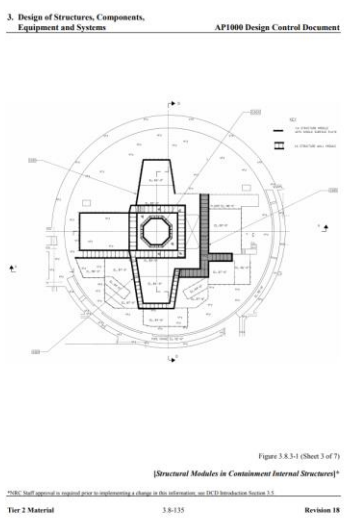
현장

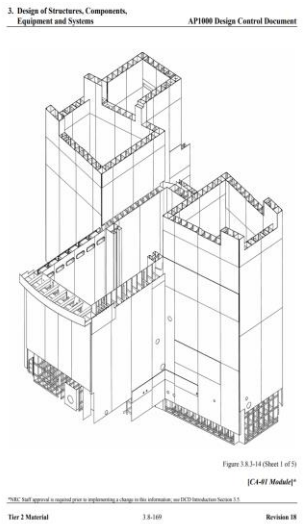
규제기관의 인허가 문서에 기반하여 BIM모델을 제작하였음

미국 원자력규제위원회(U.S. NRC)는 LOD300~LOD400 수준의 구조물 관련 제원을 공개하고 있음

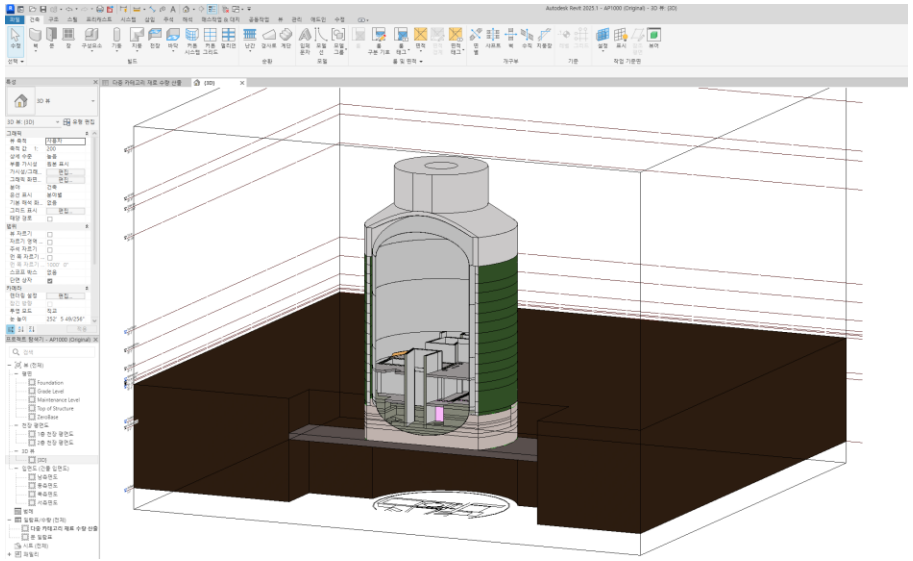
1) 인허가 문서에 따라 모델을 만들고 2) 실제 보고된 수치 (콘크리트 부피 등)와 비교하는 과정을 거쳐 정확성을 확보함

인허가 문서 (Design Control Document) 준용





BIM 모델 제작



검증

BIM 모델

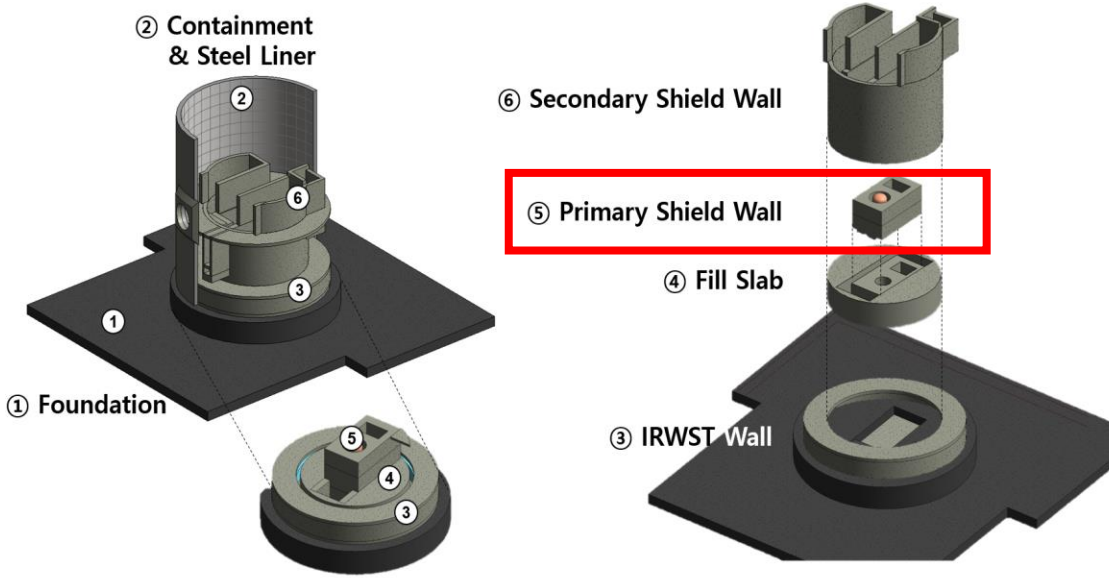
현장

인허가 문서 준용 과정

APR1400 DCD TIER 1

Table 2.2.1-1 (2 of 32)

Wall or Section Description	Column Lines	Floor Elevation or Elevation Range	Concrete Thickness	Applicable Radiation Shielding Wall (Yes/No)
Containment Internal Structure				
Primary Shield Wall	Not Applicable	From 69'-0" to 94'-3 1/2"	12'-10 3/4"(East), 9'-8 5/8"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 94'-3 1/2" to 114'-6"	9'-1"(East), 6'-9"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 114'-6" to 130'-0"	6'-9"(North/South), 6'-7"(East/West)	
Secondary Shield Wall	Not Applicable	From 100'-0" to 156'-0"	4'-0"	Yes
Fill Slab	Not Applicable	From 66'-0" to 69'-0" From 78'-0 to 81'-0" From 78'-0 to 100'-0" From 76-0 to 80'-0"	3'-0" 3'-0" 22'-0" 4'-0"	No
IRWST Wall	Not Applicable	From 81'-0" to 97'-0"	3'-0"	No
IRWST Slab	Not Applicable	From 97'-0" to 100'-0"	3'-0"	No
Refueling Pool Wall	E-W direction	From 130'-0"to 156'-0"	6'-2"	Yes
	N-S direction	From 130'-0" to 156'-0"	5'-0"(West), 6'-0"(East)	Yes
Refueling Pool Slab	Not Applicable	From 126'-0" to 130'-0" From 107'-6" to 114'-6"	4'-0" 7'-0"	No No
Hold-up Volume Tank Wall	Not Applicable	From 80'-0" to 100'-0"	6'-2"(North/South)	No

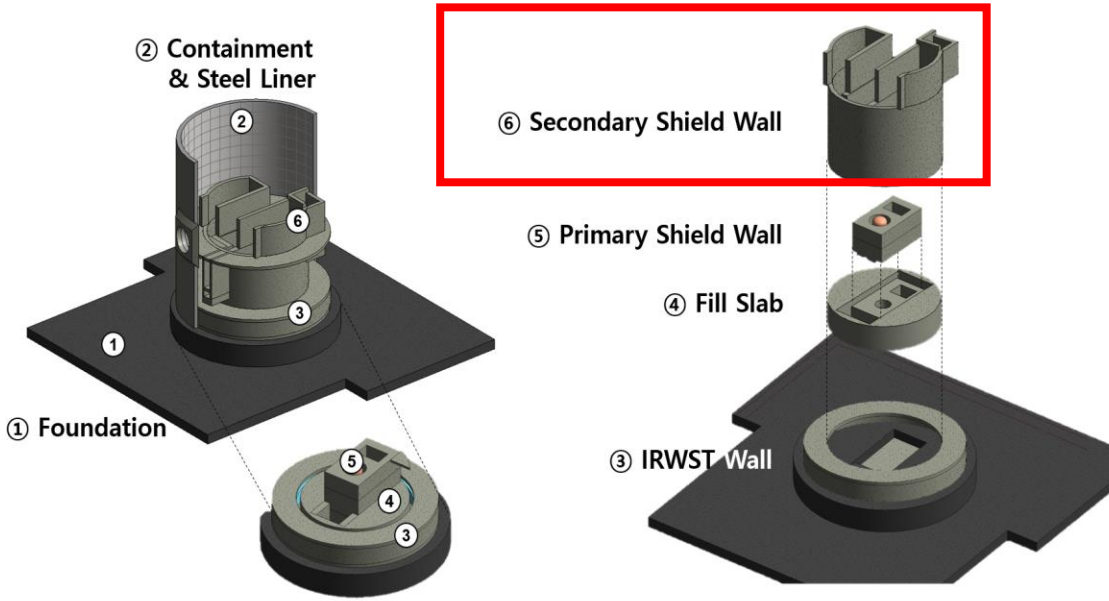


인허가 문서 준용 과정

APR1400 DCD TIER 1

Table 2.2.1-1 (2 of 32)

Wall or Section Description	Column Lines	Floor Elevation or Elevation Range	Concrete Thickness	Applicable Radiation Shielding Wall (Yes/No)
Containment Internal Structure				
Primary Shield Wall	Not Applicable	From 69'-0" to 94'-3 1/2"	12'-10 3/4"(East), 9'-8 5/8"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 94'-3 1/2" to 114'-6"	9'-1"(East), 6'-9"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 114'-6" to 130'-0"	6'-9"(North/South), 6'-7"(East/West)	Yes
Secondary Shield Wall	Not Applicable	From 100'-0" to 156'-0"	4'-0"	Yes
Fill Slab	Not Applicable	From 66'-0" to 69'-0" From 78'-0 to 81'-0" From 78'-0 to 100'-0" From 76-0 to 80'-0"	3'-0" 3'-0" 22'-0" 4'-0"	No
IRWST Wall	Not Applicable	From 81'-0" to 97'-0"	3'-0"	No
IRWST Slab	Not Applicable	From 97'-0" to 100'-0"	3'-0"	No
Refueling Pool Wall	E-W direction	From 130'-0"to 156'-0"	6'-2"	Yes
	N-S direction	From 130'-0" to 156'-0"	5'-0"(West), 6'-0"(East)	Yes
Refueling Pool Slab	Not Applicable	From 126'-0" to 130'-0" From 107'-6" to 114'-6"	4'-0" 7'-0"	No No
Hold-up Volume Tank Wall	Not Applicable	From 80'-0" to 100'-0"	6'-2"(North/South)	No

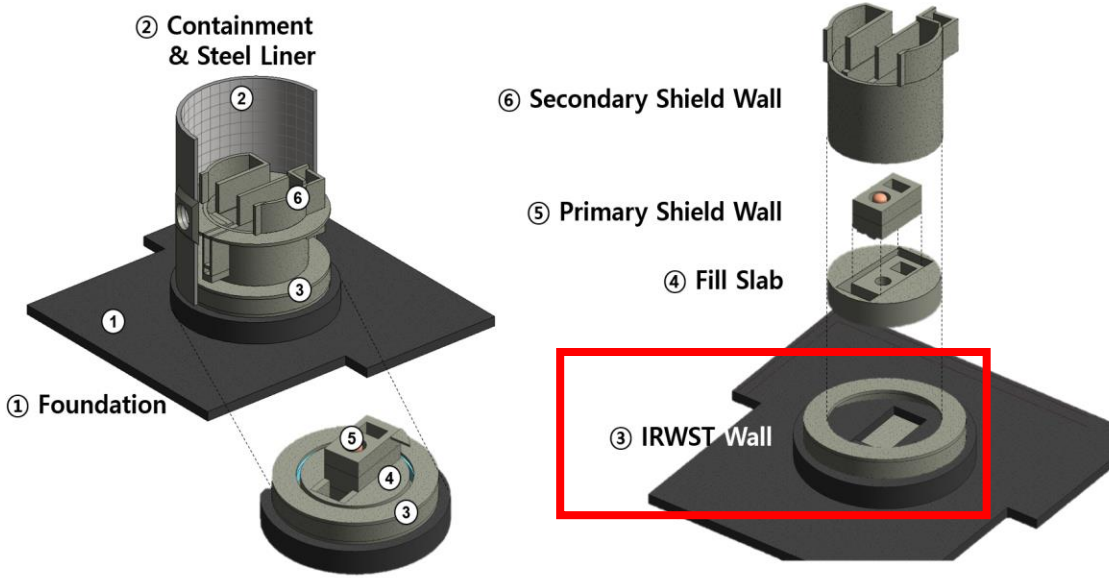


인허가 문서 준용 과정

APR1400 DCD TIER 1

Table 2.2.1-1 (2 of 32)

Wall or Section Description	Column Lines	Floor Elevation or Elevation Range	Concrete Thickness	Applicable Radiation Shielding Wall (Yes/No)
Containment Internal Structure				
Primary Shield Wall	Not Applicable	From 69'-0" to 94'-3 1/2"	12'-10 3/4"(East), 9'-8 5/8"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 94'-3 1/2" to 114'-6"	9'-1"(East), 6'-9"(North/South), 6'-7"(West)	Yes
		From 114'-6" to 130'-0"	6'-9"(North/South), 6'-7"(East/West)	Yes
Secondary Shield Wall	Not Applicable	From 100'-0" to 156'-0"	4'-0"	Yes
Fill Slab	Not Applicable	From 66'-0" to 69'-0" From 78'-0 to 81'-0" From 78'-0 to 100'-0" From 76-0 to 80'-0"	3'-0" 3'-0" 22'-0" 4'-0"	No
IRWST Wall	Not Applicable	From 81'-0" to 97'-0"	3'-0"	No
IRWST Slab	Not Applicable	From 97'-0" to 100'-0"	3'-0"	No
Refueling Pool Wall	E-W direction	From 130'-0"to 156'-0"	6'-2"	Yes
	N-S direction	From 130'-0" to 156'-0"	5'-0"(West), 6'-0"(East)	Yes
Refueling Pool Slab	Not Applicable	From 126'-0" to 130'-0" From 107'-6" to 114'-6"	4'-0" 7'-0"	No No
Hold-up Volume Tank Wall	Not Applicable	From 80'-0" to 100'-0"	6'-2"(North/South)	No

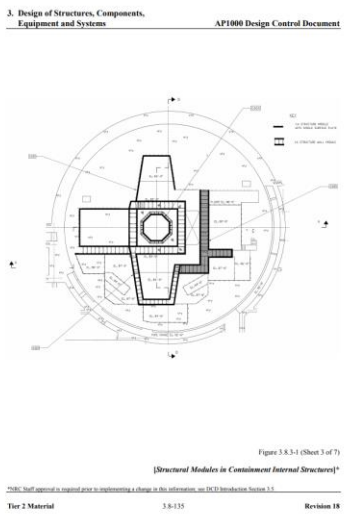


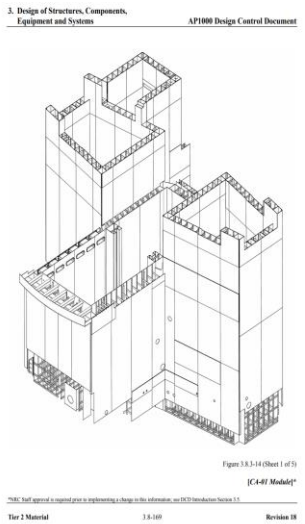
규제기관의 인허가 문서에 기반하여 BIM모델을 제작하였음

미국 원자력규제위원회(U.S. NRC)는 LOD300~LOD400 수준의 구조물 관련 제원을 공개하고 있음

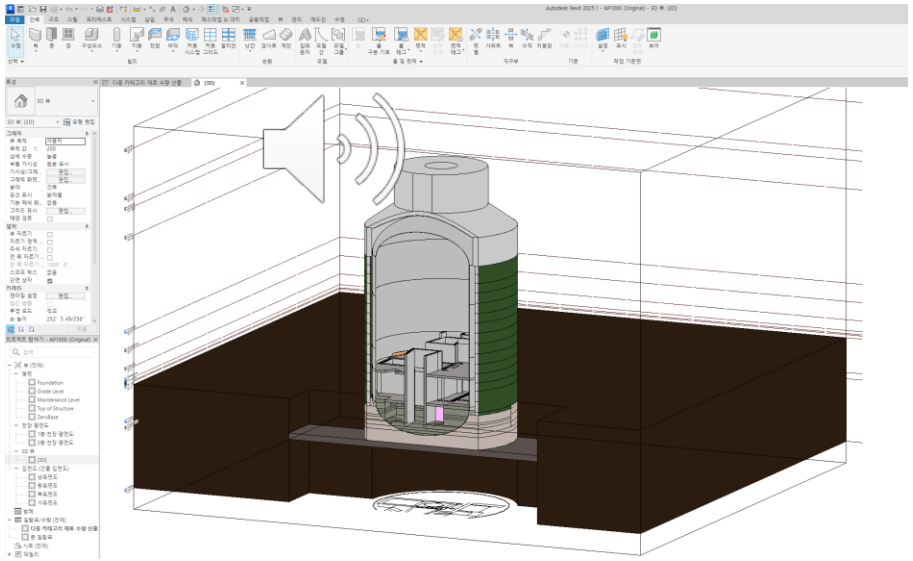
1) 인허가 문서에 따라 모델을 만들고 2) 실제 보고된 수치 (콘크리트 부피 등)와 비교하는 과정을 거쳐 정확성을 확보함

인허가 문서 (Design Control Document) 준용





BIM 모델 제작



검증

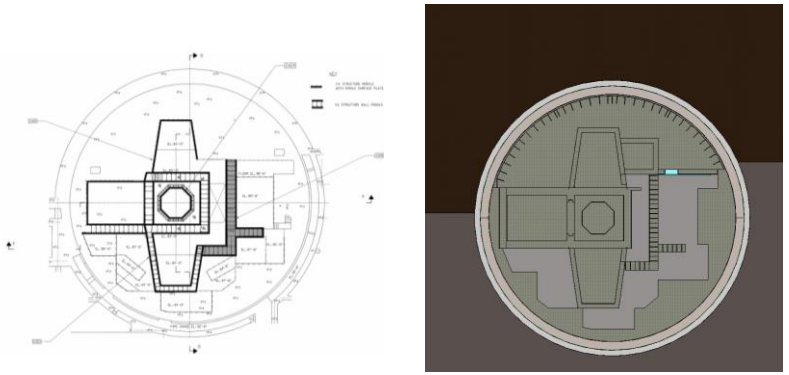
BIM 모델

현장

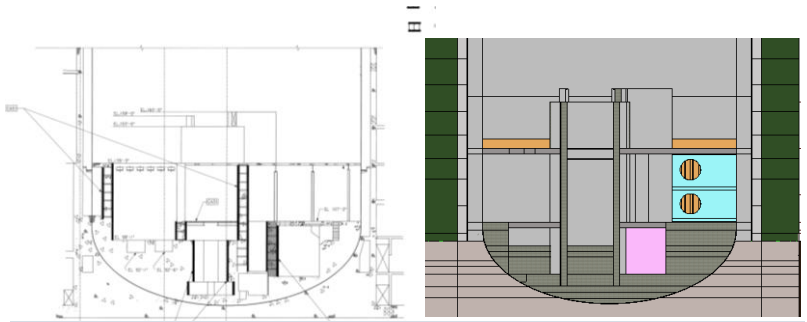
검증을 통해 제작한 BIM 모델이 상당한 수준의 정확성을 갖춤을 확인함

평면도 비교, 현장과 비교, 그리고 물량 산출 후 콘크리트 부피를 보고된 값과 비교하였음

평면도 및 단면도 비교



- EL 107'2" 지점에서 평면도 비교



- 단면도 비교

콘크리트 물량 산출 결과

[표 3.9] BIM을 활용한 AP1000 주요 콘크리트(모듈) 구조물 체적 연산 (RC=21396.83CY, SC=1577.35CY)

번호	주요 구조물		체적 (Cubic Yards)
①	Under CV	Foundation	7290.5
		Under-CV Concrete	10211.76
③	Conical Roof		1931.26
④	PCCWST (Passive Core Cooling Water Storage Tank)		1069.05
	RC 콘크리트 총계		21396.83
②	SC Shield Bldg.	SC Concrete Modules	11879.82
⑩	Big-6 Modules	CA-01	2218.43
		CA-03	88.55
		CA-04	1096.15
		CA-05	294.4
⑪	Maintenance		236.44
⑫	Operation		657.82
	SC 콘크리트 총계		1577.35

- Revit으로 제작한 BIM 모델의 콘크리트 물량산출 결과임

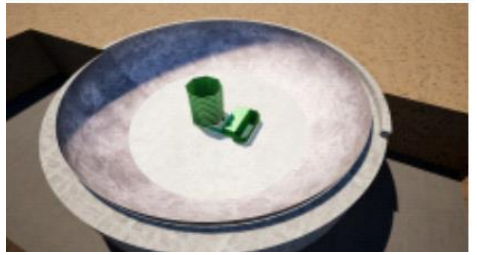
[표 3.11] AP1000 BIM 모델과 실제 콘크리트 타설량 비교

작업 위치	BIM (REVIT) 추산 타설량 (Cubic Yards)	Monthly Report (Cubic Yards)	상대 오차 (%)
Foundation	298.05	330	−9.68%
Below RPV Cavity (66'6"−71'6")	7290.50	7000	4.15%

- 보고서에 기재된 값과 매우 유사한 값을 가짐
- 즉, BIM 모델은 상당한 수준의 정확성을 확보하였음

현장 사진과 비교

BIM 모델

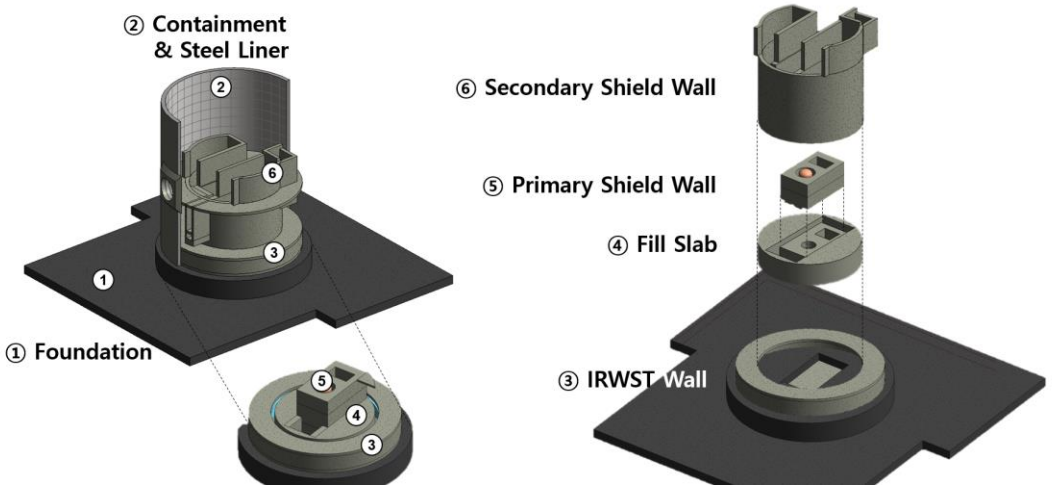


현장

- CA-04 모듈 설치 현장 사진과 BIM 모델 간 높은 정확도를 확인할 수 있음

3D BIM 모델과 콘크리트 물량산출 결과

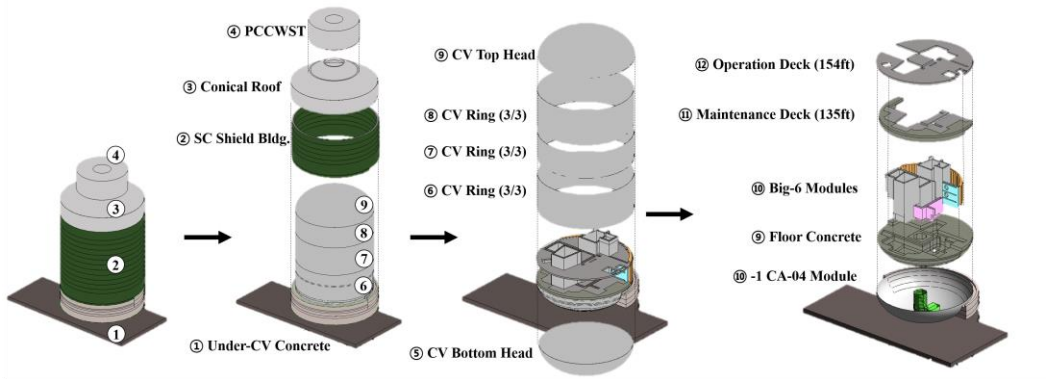
APR1400 (대한민국) BIM 모델



[표 3.8] BIM을 활용한 APR1400 주요 콘크리트 구조물 체적 연산 (RC = 92922.37CY, SC = 0CY)

번호	주요 콘크리트 구조물		체적 (Cubic Yards)	총계 (Cubic Yards)
①	Foundation	Lower	38146.97	56509.48
		Upper	18362.51	
②	Containment	CNT Wall	7106.94	19709.36
		CNT Wall	7018.5	
		CNT Wall 2	32.09	
		CNT Wall 2	31.68	
		CNT Dome	5520.15	
③	IRWST	IRWST Slab (97-100)	982.97	1803.97
		IRWST Wall	410.5	
		IRWST Wall	410.5	
④	Fill Slab	Fill Slab (78-100)	3517.03	5510.27
		Fill Slab (66-69)	256.94	
		Fill Slab (76-80)	118.98	
		Fill Slab (78-81)	1617.32	
⑤	Primary Shield Wall	PSW (69'-94' 3 1/2")	1577.7	3805.97
		PSW (94' 3 1/2" - 114'6")	1261.04	
		PSW (114'6" - 130')	967.23	
⑥	Secondary Shield Wall	SSW 1	1676.16	5583.32
		SSW 2	1780.29	
		SSW 3	53.12	
		SSW 4	82.9	
		SSW 5	82.32	
		SSW 6	12.89	
		SSW (SG compartment)	905.43	
		SSW (Straight 4' 1/3" thick)	608.79	
		SSW (Straight 5' thick)	381.42	
			RC 콘크리트 총계	92922.37
	해당사항 없음 (APR1400은 SC 콘크리트 사용하지 않음)			0
			SC 콘크리트 총계	0

AP1000 (미국) BIM 모델



[표 3.9] BIM을 활용한 AP1000 주요 콘크리트(모듈) 구조물 체적 연산 (RC=21396.83CY, SC=1577.35CY)

번호	주요 구조물		체적 (Cubic Yards)
①	Under CV	Foundation	7290.5
		Under-CV Concrete	10211.76
③	Conical Roof		1931.26
④	PCCWST (Passive Core Cooling Water Storage Tank)		1069.05
	RC 콘크리트 총계		21396.83
②	SC Shield Bldg.	SC Concrete Modules	11879.82
⑩	Big-6 Modules	CA-01	2218.43
		CA-03	88.55
		CA-04	1096.15
		CA-05	294.4
⑪	Maintenance Deck		236.44
⑫	Operation Deck		657.82
	SC 콘크리트 총계		1577.35

누가, 어디에, 얼만큼 빠르게?

4D & 5D BIM model

Work Breakdown Structure & Cost Breakdown Structure 추가를 통한 확장

4D BIM 모델: Work Breakdown Structure(WBS) 추가

한국 데이터는 ㈜한국수력원자력과의 업무협약을 통해서 제공받았음

미국 데이터는 Georgia Power Co. 에서 발행하는 Semi-Annual Report와 Monthly Report를 참고하였음

AP1000 (미국) 건설 과정 및 WBS 구축

데이터 수집

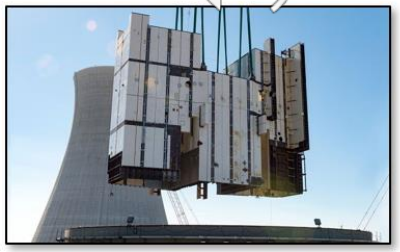
유틸리티 회사가 정기적으로 발행하는 건설 현황 보고서 등으로부터 건설 데이터 수집
(Vogtle Construction Monitoring report, Monthly construction report 등 참고)

데이터 분류

규제기관에서 사용하는 분류 체계를 준용하며 수집한 건설 데이터 분류
(U.S. NRC 제공 Design Control Document 등 인허가 문서 참고)

상세 데이터 보강

신뢰할 수 있는 기타 자료로부터 상세 사항 보강
(특허, 언론 보도자료 등)



APR1400 (대한민국) 상세 WBS는 (주)한국수력원자력과의 비밀유지협약으로 인해 공개 불가

Received confidential construction records from Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP)

4D BIM 모델: Work Breakdown Structure(WBS) 추가

한국 데이터는 ㈜한국수력원자력과의 업무협약을 통해서 제공받았음

미국 데이터는 Georgia Power Co. 에서 발행하는 Semi-Annual Report와 Monthly Report를 참고하였음

AP1000 (미국) 건설 과정 및 WBS 구축

Public Disclosure

D. Construction:

Unit 3 Nuclear Island

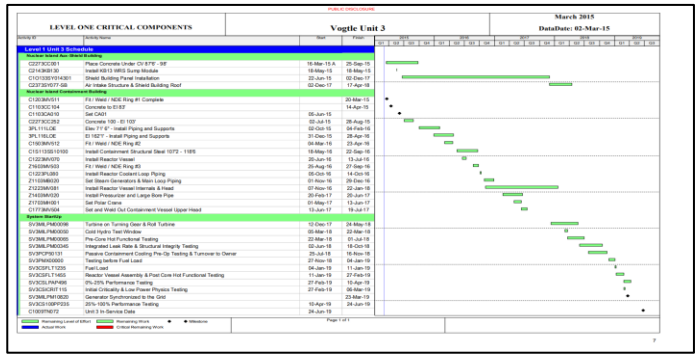
- Significant progress continued during the Reporting Period.
  - Installed approximately 390 tons of rebar.
  - Placed approximately 2,519 cubic yards of concrete.
  - Installed approximately 4,044 linear feet of large bore pipe and pipe supports.
- Set sub-module CA02-05 inside containment and completed welding.
- Placed concrete inside CA01 Steam Generator B compartment walls to elevation 152 feet 10.5 inches.
- Installed and welded out the east side and west side reactor coolant loop piping inside containment.
- Installed rebar and placed concrete to elevation 105 feet 2 inches on the south and east side of containment.
- Placed concrete inside the CA05 module from elevation 87 feet 6 inches to 105 feet 2 inches inside containment.
- Installed rebar and placed concrete in the refueling cavity to elevation 95 feet.
- Installed rebar and placed concrete to elevation 98 feet 6 inches in the north end of containment.
- Set wall module CB26 for the Chemical and Volume Control ("CVS") room wall in the north end of containment.
- Set floor module CA32 at elevation 105 feet 2 inches in the north end of containment.
- Installed actuators on the Normal Residual Heat Removal System ("RNS") valves in room 11208 at elevation 94 feet on the east side of containment.
- Installed KQ10 Reactor Coolant Module in room 11104 at elevation 71 feet 6 inches inside containment.

Photo 2 – Setting of Unit 3 Steam Generator

110

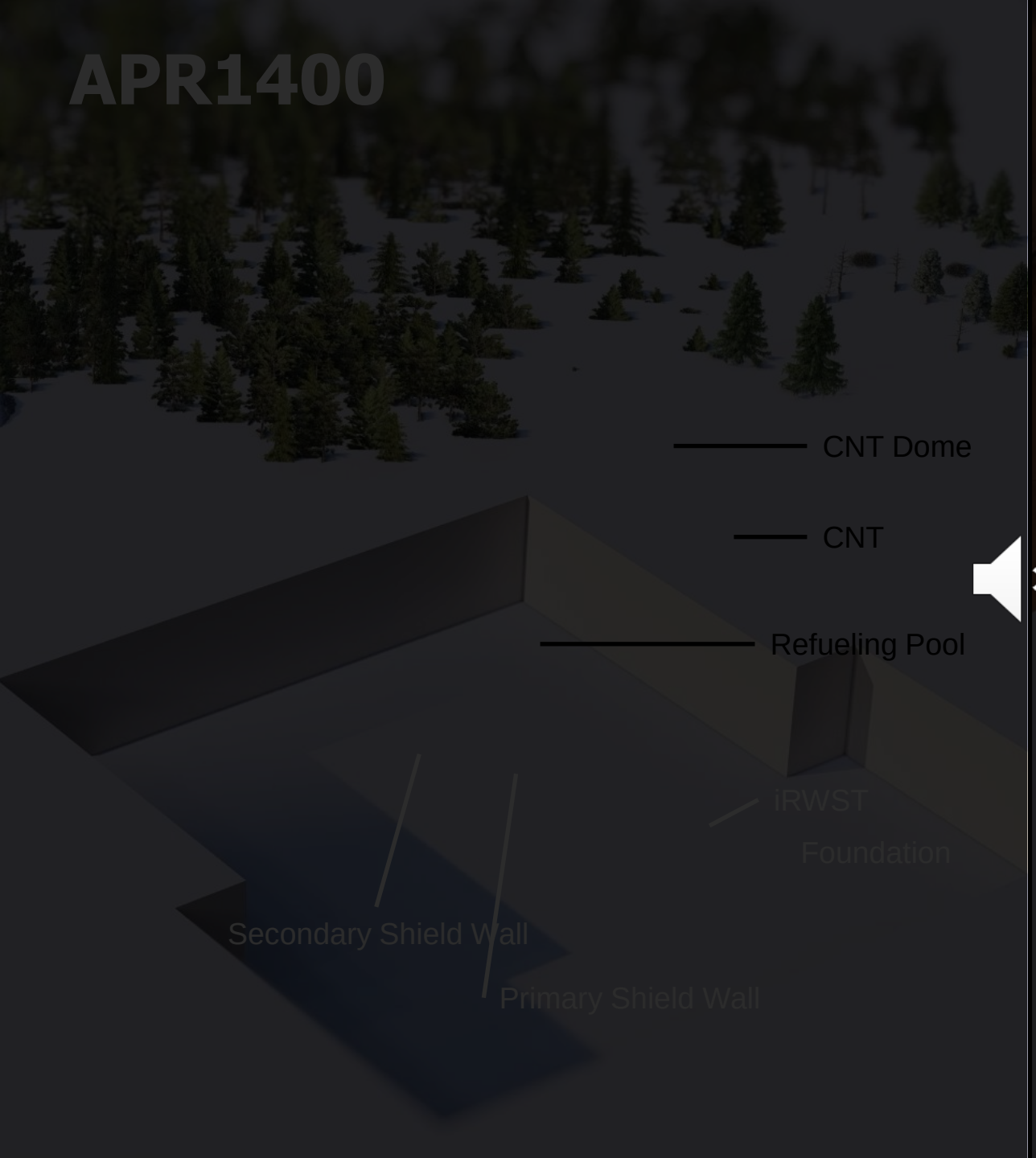
- Installed rebar and placed concrete in the refueling cavity to elevation 95 feet.
- Installed rebar and placed concrete to elevation 98 feet 6 inches in the north end of containment.

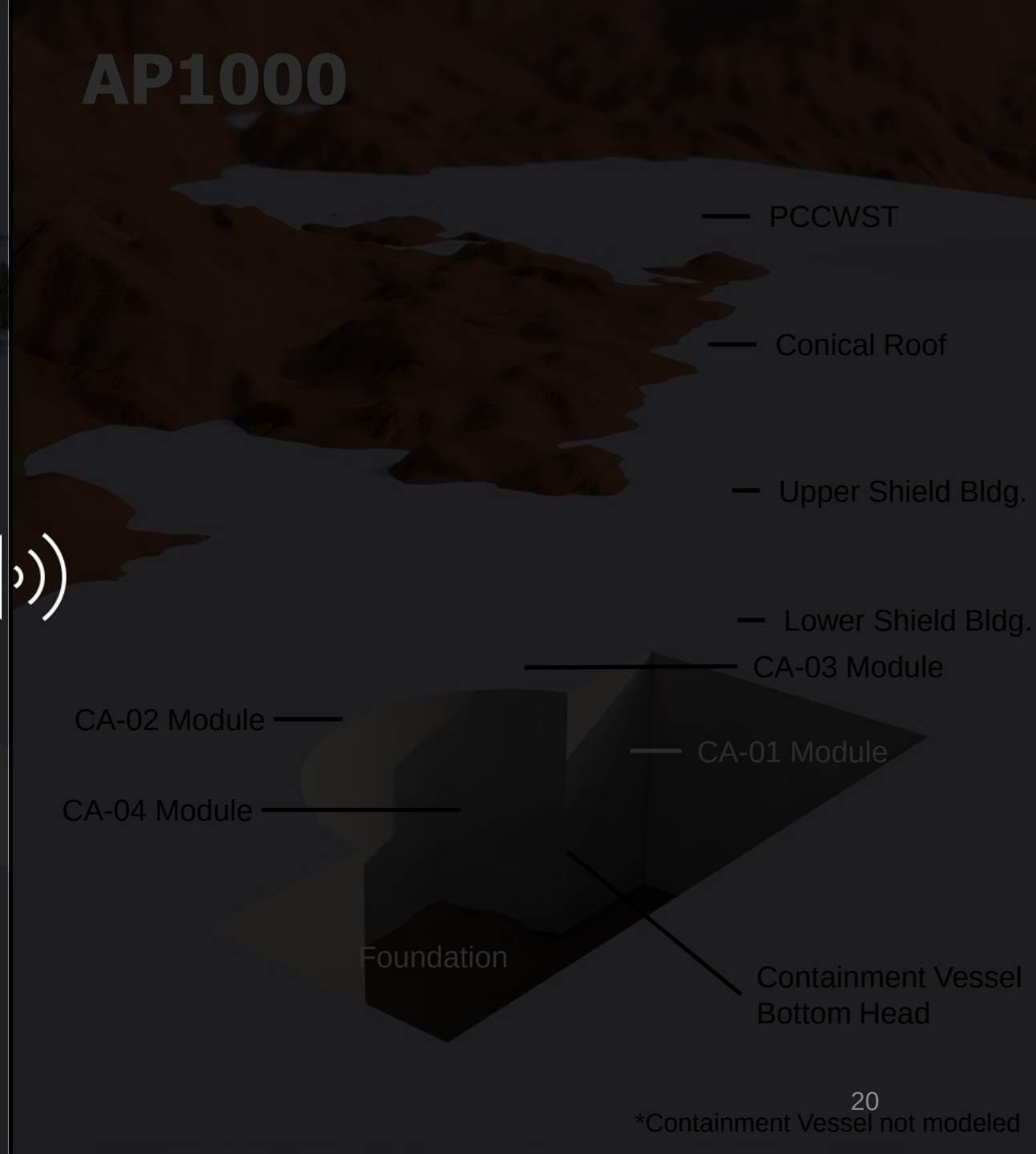
- Set floor module CA32 at elevation 105 feet 2 inches in the north end of containment.



APR1400 (대한민국) 상세 WBS는 (주)한국수력원자력과의 비밀유지협약으로 인해 공개 불가

Received confidential construction records from Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP)





*Containment Vessel not modeled

5D BIM 모델: Cost Breakdown Structure (CBS)추가

OECD NEA에서는 원자력발전소 건설 비용의 상세 항목들을 공개하고 있음 (EEDB Cost Database). 해당 데이터베이스를 제작한 BIM 모델에 합쳐서 BIM 모델을 통해 건설 비용을 예측할 수 있게 하였음

OECD NEA EEDB Database

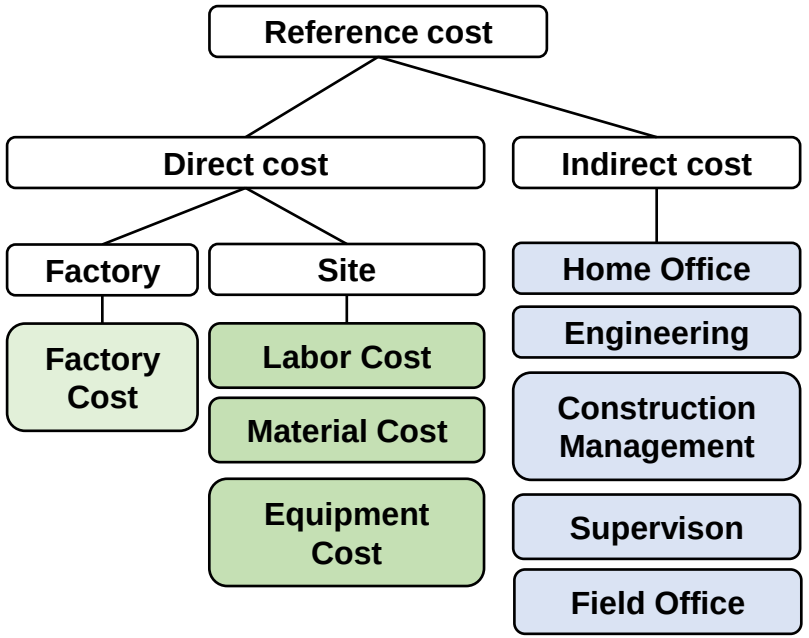
PLANT CODE 184 | COST BASIS 01/87

UNITED ENGINEERS & CONSTRUCTORS INC.
EEDB-IX BASE COSTS (BEST EXPERIENCE BASIS)
1144 MWE PRESSURIZED WATER REACTOR

PAGE 3
11/02/87

ACCT NO.	ACCOUNT DESCRIPTION	FACTORY QUANTITY	FACTORY COSTS	SITE QUANTITY	SITE LABOR HRS	SITE LABOR COST	SITE MATERIAL COST	TOTAL COSTS
211.162	PIPING				5000 MH	119,806	815,250	935,056
211.16	YARD DRAINAGE STORM SEWERS				18800 MH	450,469	992,718	1,443,187
211.17	ROADWAY + YARD LIGHTING			110 FX	16500 MH	400,670	32[illegible]400	
211.19	SETTLING BASINS							
211.191	EARTH EXCAVATION			13000 CY	1300 MH	26,901	24,870	
211.192	ROCK EXCAVATION							
211.193	BACKFILL							
211.194	PUMPING							
211.195	FORMWORK			450 SF	315 MH	6,336	900	
211.196	REINF. STEEL			8 TN	208 MH	4,845	5,480	
211.197	CONCRETE			170 CY	408 MH	7,442	8,118	
211.198	SHEET PILING			170 TN	1700 MH	39,202	115,600	
211.199	RIP-RAP (12 IN. THICK)			14 CY	21 MH	377	210	
211.19	SETTLING BASINS				3952 MH	85,103	154,878	239,981
211.1	GENERAL YARDWORK		284,275		163759 MH	3,467,484	2,919,834	6,671,593
211.4	RAILROADS							
211.41	CUT + FILL			20960 CY	2096 MH	43,372	37,099	
211.42	GRADING			46500 SY	2325 MH	47,762	30,225	
211.43	TRACK (BALLAST, TIES, RAIL			31440 LF	78600 MH	1,398,946	1,282,752	
211.45	SWITCHES+BUMPERS							
211.451	TURNOUTS (NO. 8)			6 EA	1200 MH	21,358	51,462	

Cost Breakdown Structure 반영



Direct Cost 4종류와

Indirect Cost 5종류를

BIM 모델에 적용하였음

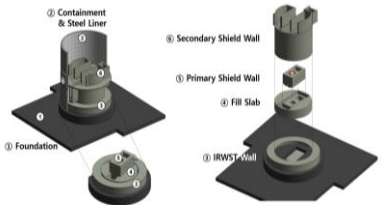
Modeling construction Schedule and Cash flow

코드 기반 건설 공기 및 현금 흐름 예측 모델 개발

Workflow: BIM 모델 구축부터 사업성 평가 및 시장 탐색까지

1. 과거 원전 건설 현장을 BIM으로 재구성해보자

3D BIM



RVT GRAPHISOFT Archicad®

4D BIM

Navisworks SYNCHRO™

5D BIM

Navisworks SYNCHRO™

2. 가상 건설 시나리오 생성 모델 개발

물량 산출

Work Breakdown Structure (WBS)

생산성

총 건설 비용 (cost)

Cost Breakdown Structure (CBS)

노형 선정

Customize Parameters

건설 공기 추정

Cash Flow 추정

1. 건설 공기 및 리스크 예측 모델
2. 건설 비용
3. 현금 흐름 및 자금조달체계 모델

3. 자체 개발 모델 기반 사업성 평가 및 시장 탐색

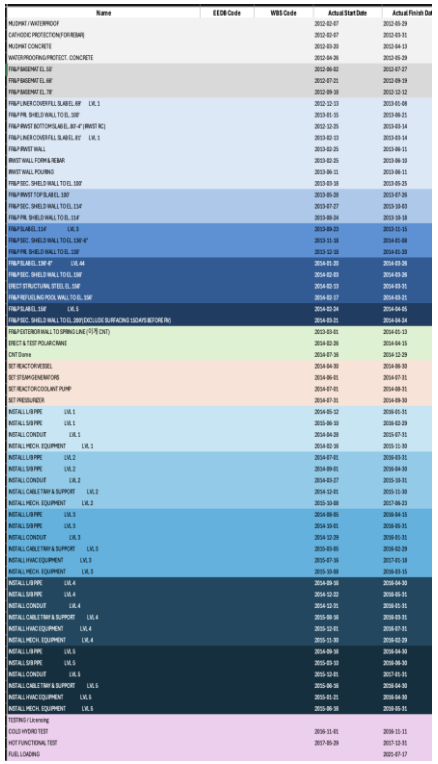
- ✓ **공법을 바꾸면** 건설 공기와 비용은 어떻게 바뀔 것인가?
- ✓ 다음 원전은 **어느 국가에 수출**하면 유리한가?
- ✓ **아직 건설 경험이 없는** 수많은 소형 모듈형 원전 (SMR) 설계 중에서 어떤 설계가 가장 건설 친화적인가?

1. 한국의 원자력 수출 전략 수립
2. 한국 원자력 공법 최적화
3. 선진화된 자금조달체계 개발

가상 건설 시나리오 생성 모델 작동 원리

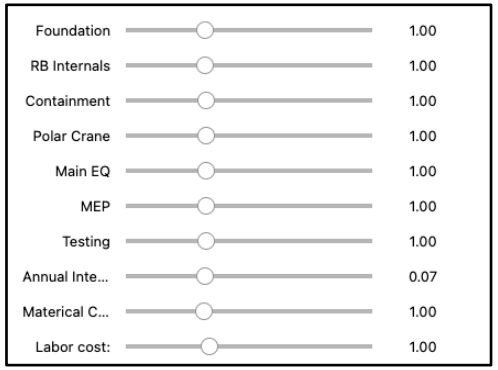
노형 선정

- 총 5개 노형 선택 가능함
- 노형 선정 이후 각 노형에 해당하는 WBS 목록화
- 다음은 APR1400의 WBS 목록임 (65개)

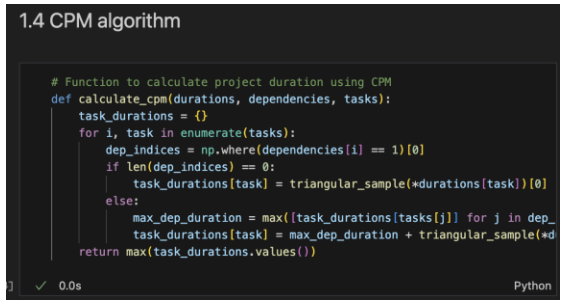


Customize Parameters

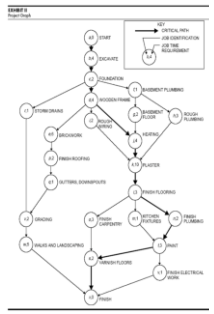
- 콘크리트 생산성
- MEP 설치 생산성
- 인허가 생산성
- 이자율 (Interest Rate~7%)
- Material Cost
- Labor cost
- **다음과 같이 파이썬 Slider 기능을 활용하여 입력값들을 조정할 수 있음**

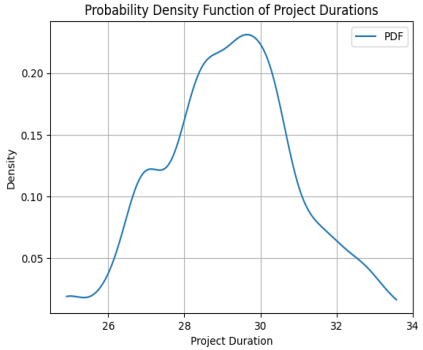


건설 공기 추정

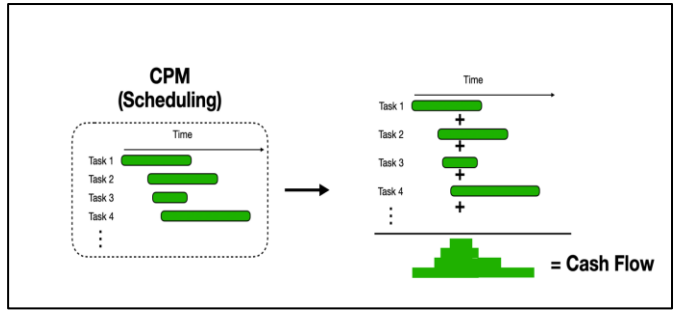


- Critical Path Method (CPM) 알고리즘을 활용하여 생산성에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션 진행 후, 건설 공기 분포를 출력함
- WBS 간 연결 상태는 0과 1로 이루어진 종속행렬을 입력받아 연결 그래프를 구성함.
- 다음은 연결 그래프와 계산된 건설 공기 분포임

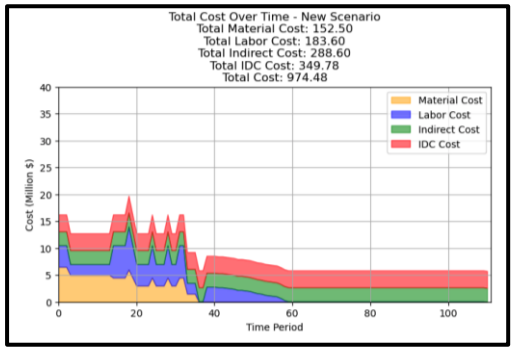




Cash Flow 추정



- Critical Path Method 로부터 구한 건설 일정에 Cost Breakdown Structure를 적용하여 비용을 산출함.
- 이때, Indirect Cost 는 건설 공기에 비례하고, Interest 원금은 총 Capital Cost의 80%로 가정하였음
- 다음은 Cash Flow Simulation 결과임



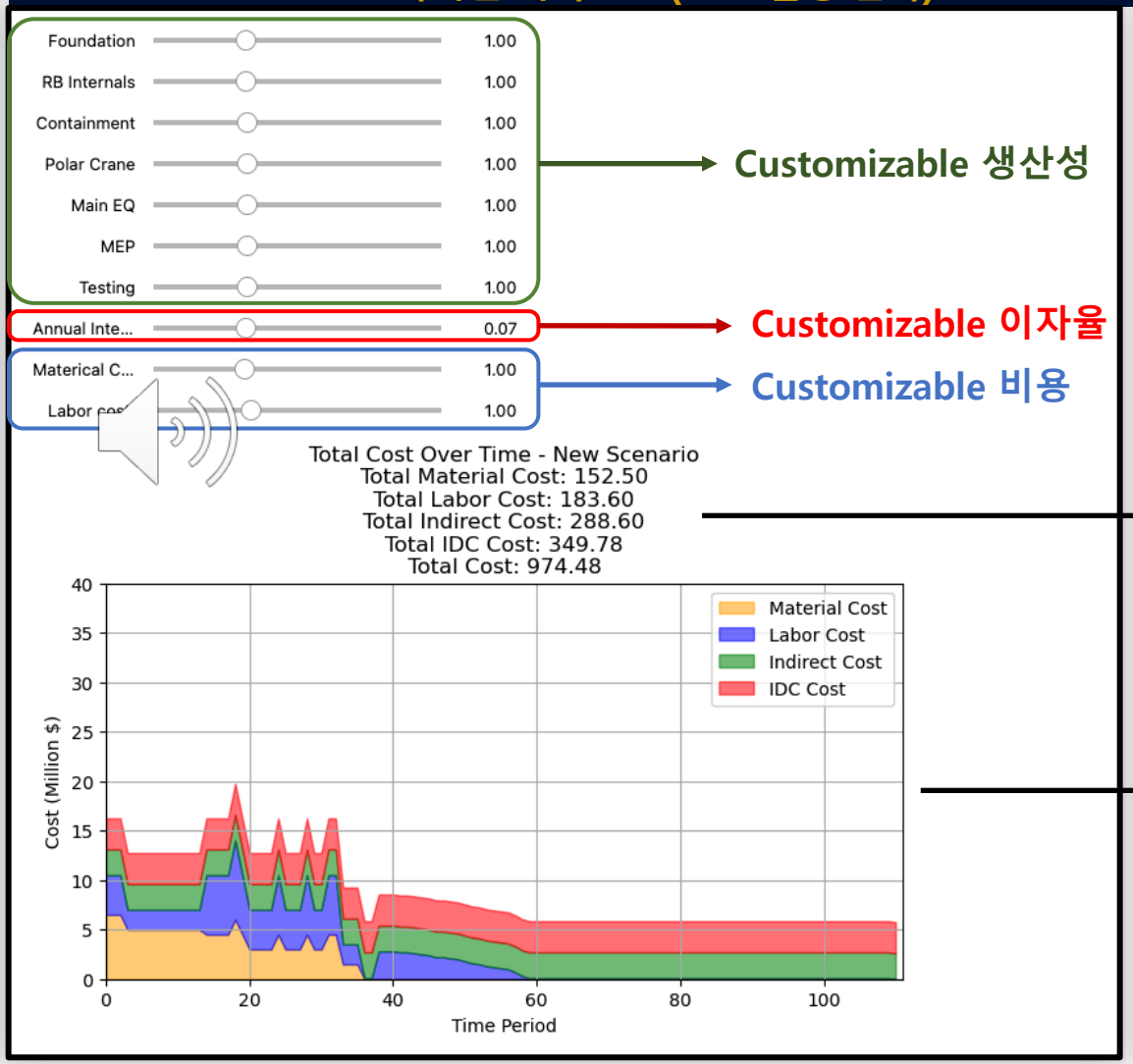
가상 건설 시나리오 생성 모델

코드

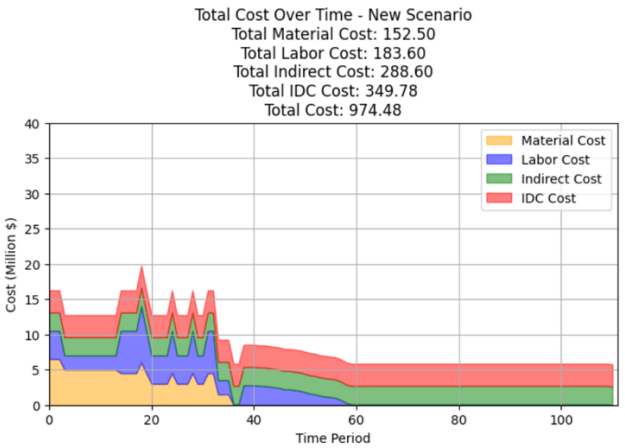
3. CPM + Cash Flow

```python
import pandas as pd
import numpy as np
import ipywidgets as widgets
from ipywidgets import interact, fixed
import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt

# 액셀 파일 경로
file_path = '/Users/seungminkwak/Library/Mobile Documents/com~apple~CloudDocs/Desktop/Desktop - Seung's Mac Studio/lee lab/0. Weekely Report/2024.07.01/APR1400 Event.xlsx'  # 실제 파일 경로로 변경하세요
# 대학만 경우 주소
dependency_matrix_file_path = '/Users/seungminkwak/Desktop/Desktop - Seung's Mac Studio/lee lab/0. Weekely Report/2024.07.01/DEPEND.xlsx'  # 실제 파일 경로로 변경하세요
# 노트북인 경우 주소
#dependency_matrix_file_path = '/Users/seungminkwak/Library/Mobile Documents/com~apple~CloudDocs/Desktop/Desktop - Seung's Mac Studio/lee lab/0. Weekely Report/2024.07.01/DEPEND.xlsx'  # 실제 파일 경로로 변경하세요

# 읽고자 하는 시트 이름
sheet_name = 'Real Events'

# 액셀 파일을 읽어 특정 시트를 DataFrame으로 불러오기
df = pd.read_excel(file_path, sheet_name=sheet_name, header=None)

# 6번 열을 숫자 형식으로 변환
df[6] = pd.to_numeric(df[6], errors='coerce')

# 종속성 행렬 읽기
df_dependencies = pd.read_excel(dependency_matrix_file_path, header=None)
dependencies = df_dependencies.to_numpy()

# Task 이름 리스트 (1행부터 시작)
task_count = len(df) - 1

# 슬라이더 정의
slider1 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.05, description='Foundation', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider2 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.05, description='RB Internals', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider3 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.1, description='Containment', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider4 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.1, description='Polar Crane', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider5 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.1, description='Main EQ', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider6 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.1, description='MEP', layout=widgets.Layout(width='400px'))
slider7 = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3.0, step=0.1, description='Testing', layout=widgets.Layout(width='400px'))
interest_slider = widgets.FloatSlider(value=0.07, min=0.01, max=0.2, step=0.01, description='Annual Interest Rate:', layout=widgets.Layout(width='400px'))
MaterialCost_slider = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.1, max=3, step=0.01, description='Materical Cost:', layout=widgets.Layout(width='400px'))
LaborCost_slider = widgets.FloatSlider(value=1, min=0.01, max=3, step=0.01, description='Labor cost:', layout=widgets.Layout(width='400px'))


# 0번 행 제거
df = df.drop(index=0)

# 새로운 DataFrame 생성
df_new = df[[0, 5, 6]].copy()
df_new.columns = ['Task Name', 'New Scenario', 'Base Scenario']

# Critical Path Method 계산 함수
def calculate_cpm(df_tasks, durations):
```

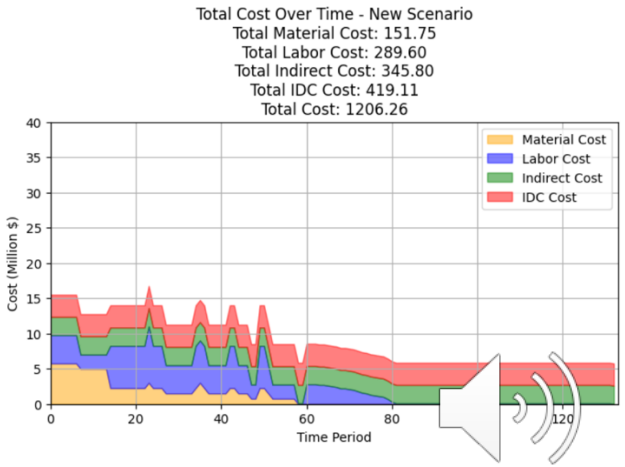
파이썬 대시보드 (코드 실행 결과)



모델 시연 1: 격납건물 및 내부 콘크리트 생산성이 2배 줄어든 경우



< 기본 시나리오>

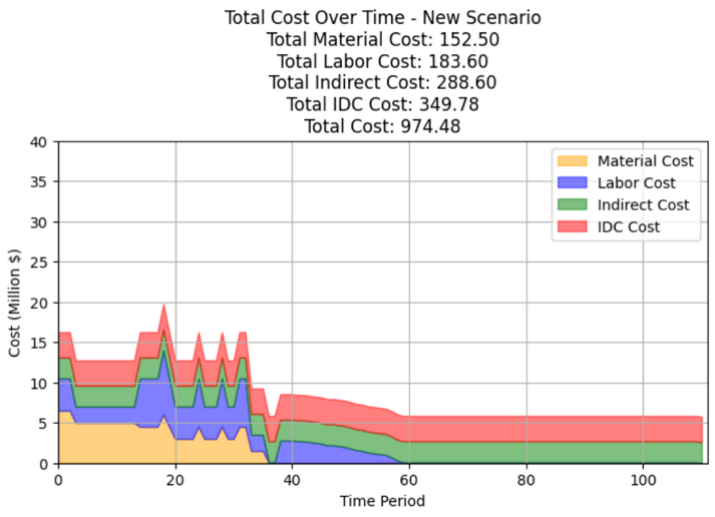


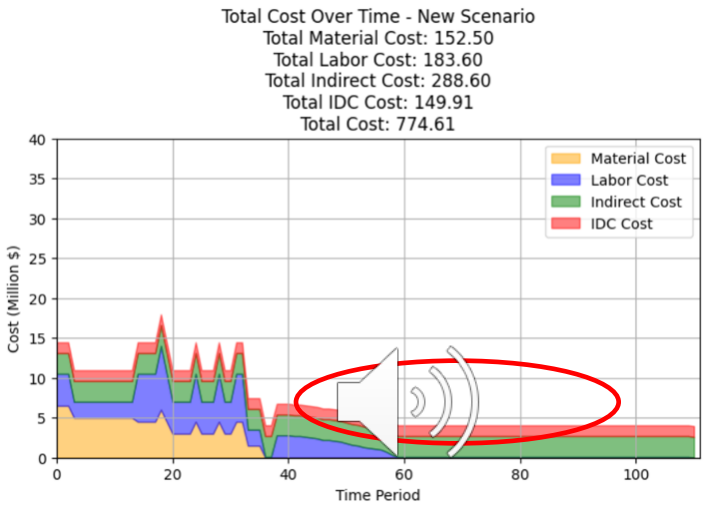
<변경된 시나리오>

	기본 시나리오 (million $)	변경된 시나리오(million $)	증감
Material cost	152.50	151.75	**-0.5%** (반올림 오차)
Labor cost	183.60	289.60	**+57.7%**
Indirect cost	288.60	345.80	**+19.8%**
IDC Cost	349.78	419.11	**+19.8%**
Total	974.48	1206.26	**+19.2%**

- **Material Cost**: 총액은 변화 없음. (자명함. 단, 낮은 생산성으로 인해 지급 시점이 뒤로 밀렸음)
- **Labor Cost**: 작업량은 동일하지만 생산성이 낮아졌기때문에 길어진 작업 기간만큼 증가함.
- **Indirect Cost**: Material cost와 Labor Cost 합의 절반으로 정의했으므로 Labor Cost가 증가함에 따라 Indirect Cost 도 증가함.
- **IDC Cost**: 건설 비용 총액 (Material + Labor + Indirect) 가 증가했으므로 이자 역시 총액에 따라서 함께 증가함.

모델 시연 2: 이자율을 7%에서 3%로 줄이는 경우



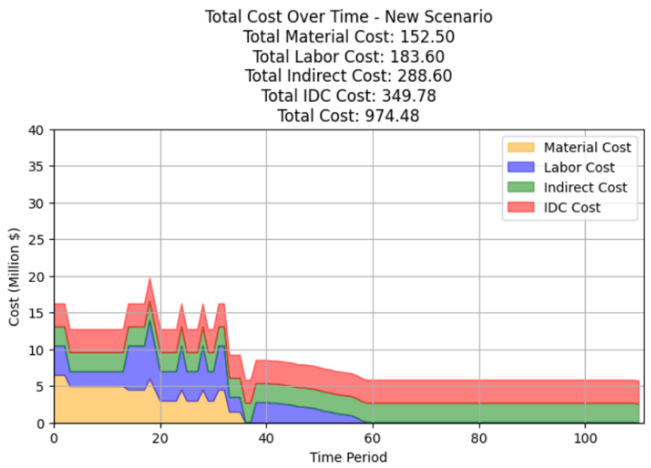


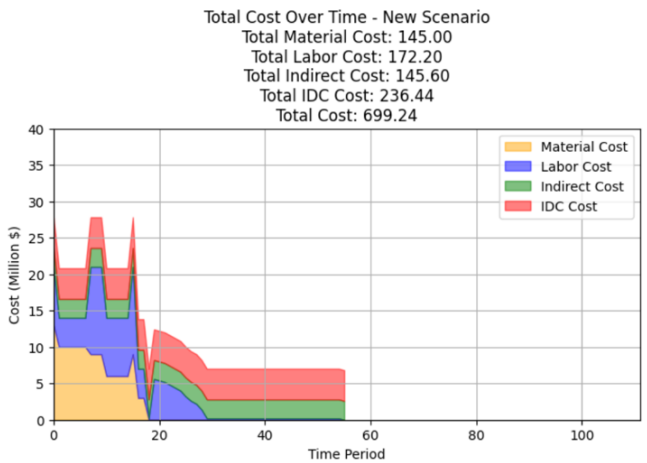
	기본 시나리오 (million $)	변경된 시나리오(million $)	증감
Material cost	152.50	152.50	**0%**
Labor cost	183.60	183.60	**0%**
Indirect cost	288.60	288.60	**0%**
IDC Cost	349.78	149.91	**-57.1%**
Total	974.48	774.61	**-20.51%**

- **Material Cost:** 변화 없음.
- **Labor Cost:** 변화 없음.
- **Indirect Cost:** 변화 없음.
- **IDC Cost**: 이자율이 감소한 만큼 감소함.

모델 시연 3: 건설 작업에 인원을 2배 투입시켜서 건설 공기를 앞당기는 경우

– 이 경우, Labor cost와 Productivity를 모두 2배씩 늘리는 방식으로 시뮬레이션 가능함.





	기본 시나리오 (million $)	변경된 시나리오(million $)	증감
Material cost	152.50	145.00	**-5.01%**
Labor cost	183.60	172.20	**-6.31%**
Indirect cost	288.60	145.60	**-49.55%**
IDC Cost	349.78	236.44	**-32.40%**
Total	974.48	699.24	**-28.24%**

– **Material Cost:** 큰 변화 없음.

– **Labor Cost:** 큰 변화 없음.

– **Indirect Cost:** 건설 공기가 감소한 만큼 총액 감소함

– **IDC Cost**: 건설 공기가 감소한 만큼 총액 감소함

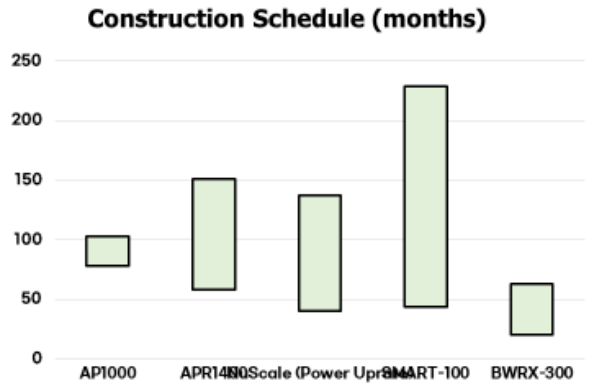
- 결론: **인원을 더 투입해서 건설 공기를 줄이면 Indirect Cost와 IDC Cost 등 Schedule-sensitive 한 지출을 큰 폭으로 줄일 수 있음.**

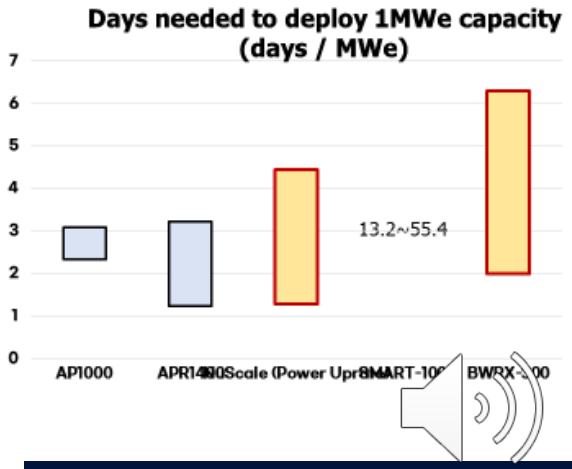
Exploring Potential market & construction strategy

자체 개발한 모델을 활용한 시장 탐색 및 원전 수출 시장에서의 전략 수립

모델 활용 1: 5개 원자로 건설 공기 비교

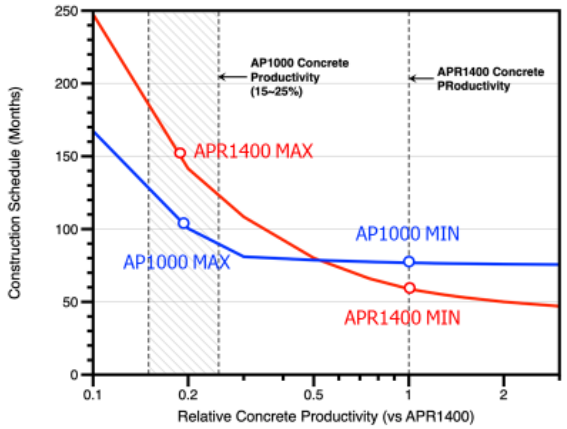
5개 원자로 건설 공기 추정 기간 비교 결과



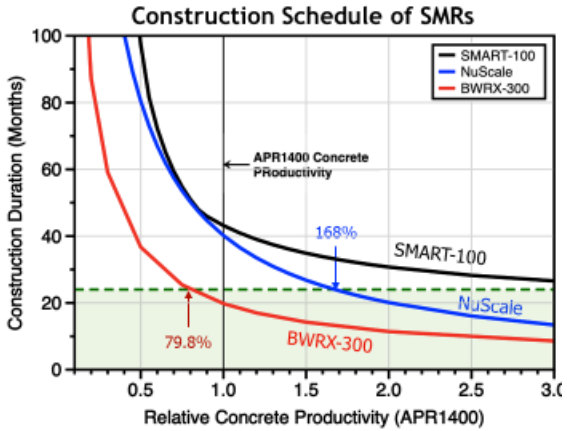


한국원자력학회 (2024) 발표

생산성 변화에 따른 대형 원전 공기 추정



소형 모듈형 원전 건설 공기 추정



미국 원자력학회 (2024) 발표

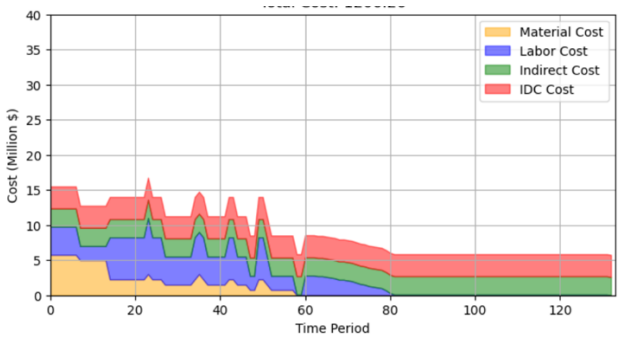
BIM을 활용하여 아직 건설 경험이 없는 SMR의 건설 친화성을 평가하는 선도적인 연구를 수행하는 중임

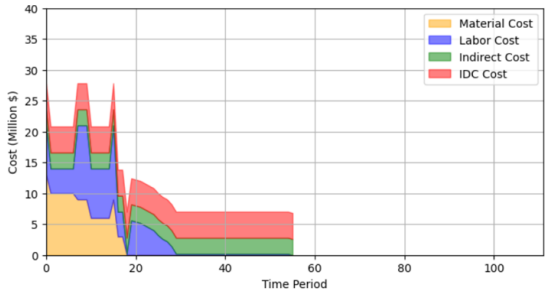
모델 활용 2: 수출 시장 탐색

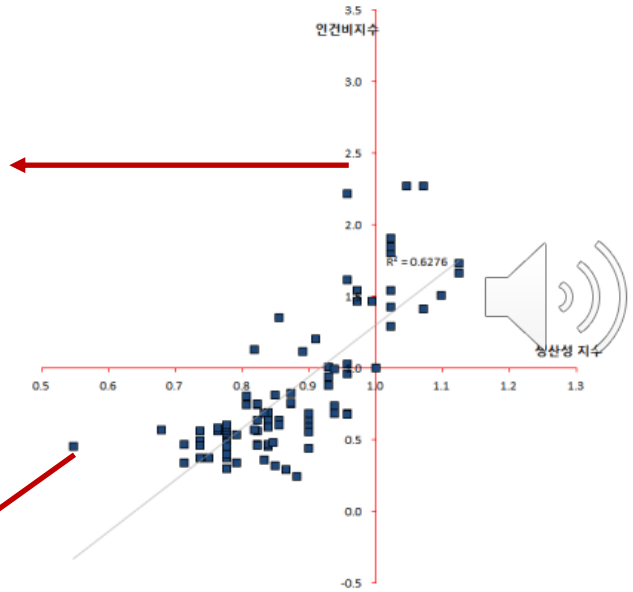
국가별 건설 인력 생산성 및 인건비 분포

〈그림 8〉 건설 기술자 생산성과 인건비 비교

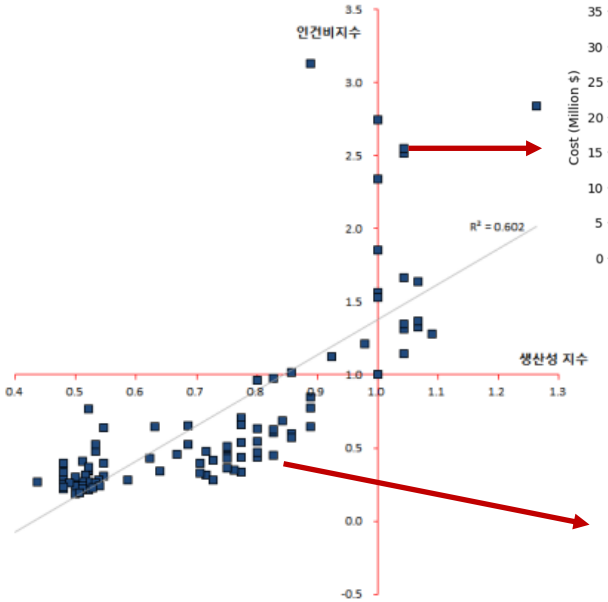
〈그림 9〉 건설 기능인력 생산성과 인건비 비교



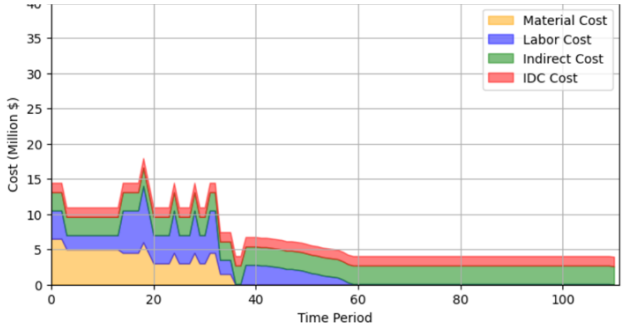


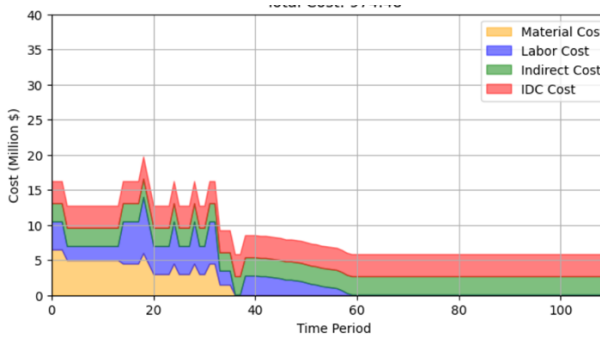


주 : 국내 건설기술자 생산성과 인건비 지수(1.00) 기준.



주 : 국내 기능인력 생산성과 인건비 지수(1.00) 기준.





출처: 국가별 건설인력 인건비 및 생산성 비교와 시사점 (2018, 김윤주)

다양한 국가에 대해 시나리오를 생성하여 최적의 시장을 모색하고자 함