

2021

인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계기술 개발 최종보고서

2021. 2. 16.

주관연구기관 / 고려대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계 기술 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 02. 16.

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (조 석 주)

주관연구기관 책임자: 윤 영 수



국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C151911-02	해당 단계 연구 기간	2020.01 ~ 2020.12	단계구분	2 / 2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계 기술 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	운 영 수	해당단계 참여연구원 수	총 : 8명 내부 : 8명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부 : 206,000천원 민간 : 0천원 정부외 : 0천원 상대국 : 0천원 계 : 206,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총 : 9명 내부 : 9명 외부 : 0명	총 연구비	정부 : 370,000천원 민간 : 0천원 정부외 : 0천원 상대국 : 0천원 계 : 370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	주 관 기 관 : 고 려 대 학 교			참여기업명 : -	
국제공동연구	상대국명 : -			상대국 연구기관명 : -	
위탁연구	연구기관명 : -			연구책임자 : -	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	< 일반 >				
	- 본 연구과제의 기술적 구성요소는 본 연구를 통해 개발되는 대피로 확보 기술, 방호성능이 향상된 대피 시설과 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술이 하나로 통합 되어 재난 시 국민 안전을 보장하는 통합 대피시스템을 구축할 수 있으며, 실용화 가 능성이 높은 개별 기술로 구성되어 있음. - 시험 및 평가 분야는 원천기술을 개발하고자 대피경로 기술을 개발하고 이를 본 과제 의 참여 기관 이외 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공할 수 있으므로 연구과 제 보안등급의 분류상 일반 과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨.				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허 (출원/ 등록)	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	6	1/1	2	-	-	1	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약	본 연구의 최종 성과물은 [인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계기술 개발]로서 가이드라인(공법·기법)의 형태로 제시하였고, 최종 성과물인 가이드라인에는 [대피시설이 설치된 시설물의 3D 형상 정보 획득 기법], [최적 대피로 및 대피시설의 위치 선정을 위한 피난 시뮬레이션 기법], [대피로 및 대피시설의 보강 기법], [엘리베이터 활용 탈출로 설계 기법]을 제시함.	보고서 면수: 209
----	---	-------------

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 최종목 : 인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계기술 개발 ○ 세부 목표 - Task1 : 대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발 - Task2 : 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피시설 (SIP)의 최적 위치 선정기술 개발 - Task3 : FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발 - Task4 : 시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발																																						
연구개발성과	○ 본 연구의 최종 성과물은 [인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설(SIP) 최적화 설계기술 개발]로서 가이드라인(공법·기법)의 형태로 제시될 계획임 ○ 최종 성과물인 가이드라인에는 ‘대피시설이 설치될 시설물의 3D 형상정보 획득 기법’, ‘최적 대피로 및 대피시설의 위치 선정을 위한 피난 시뮬레이션 기법’, ‘대피로 및 대피시설의 보강 기법’, ‘엘리베이터 활용 탈출로 설계기법’이 포함됨 < 예상되는 연구개발성과 유형 > <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구 시설·장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트 웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr> <tr> <th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr> </tbody> </table>											구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	N	Y	N	N	N	N	N
구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종																													
								생명 정보	생물 자원	정보	실물																												
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	N	Y	N	N	N	N	N																												
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구를 통해 시설물의 3D 형상정보 획득 기술력이 제고되고, 시설물의 방호성능을 향상시키는 구조적/비구조적 보강기술 개발이 기대됨 ○ 이러한 기술력 향상은 국내외 대피시설 설계 보강기술 분야의 시장을 확대하고, 수입 대체효과를 가져옴 ○ 대피시설을 포함한 방호구조물 관련 분야는 군사산업뿐 아니라 원자력발전소와 같은 특수 시설물에 적용할 수 있어 본 개발 기술의 활용 시 국내외 기술 수주 가능성을 높일 수 있음																																						
핵심어 (5개 이내)	레이저 스캐닝			대피 시뮬레이션			시설물 내 대피시설																																
Keywords	Laser Scanning			Evacuation Simulation			Shelter in Place																																

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	P. 01
2. 연구수행내용 및 성과	P. 05
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	P. 75
4. 연구개발성과의 활용계획	P. 81
붙임. 참고 문헌	P. 92
부록 1	P. 95
부록 2	P. 144

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피 시설(SIP) 최적화 설계기술 개발
세부 목표	(1차년도 : 2019.04 ~ 2019.12) ○ Task 1 : 대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발 - Tag 기법을 활용한 레이저 스캐닝 기법 개발 (2차년도 : 2020.01 ~ 2020.12) ○ Task 2 : 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발 - 국내 환경을 고려한 재난(물리적 테러) 시뮬레이션 연구 - 대피경로 분석을 통한 대피로 설계 및 시설물 내 대피시설 최적 위치 선정 - 일반 지하철 역사 활용방안 분석 및 제시 ○ Task 3 : FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발 - 시설물의 부분적 붕괴 및 비산물에 의한 피해 방지 - 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발 ○ Task 4 : 시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발 - 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술 개발 - 시설물 붕괴 시 탈출로에 대한 접근방안 마련 - 환기설비 활용 탈출로 접근성 분석

구분	연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	실험적 증명 단계
	TRL 4	☒	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	현장적용/사업화 단계

- 국내에서 수행된 방호구조물 및 대피 시설에 관한 연구는 건설 공학적 연구가 아닌 사회과학적 혹은 방호 공학적 관점에 초점을 맞추어 수행되었음. 따라서 대피시설 지정 및 운영에 대한 정책적 근거를 마련할 수는 있었으나 공학 및 기술적 연구는 많이 부족한 상황임.

- 본 연구를 통해 인간공학적 최적 대피시설 위치 선정기술, 방호성능이 향상된 구조 보강용 재료 생산 기술, 대피시설 및 대피로 보강 및 설계기술이 개발되어 실험실 수준의 성능평가가 이루어질 것으로 기대됨.

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구 시작 시	연구 종료 시	
인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피 시설(SIP) 최적화 설계 가이드 라인	공법·기법 TRL 2	공법·기법 TRL 4	- (연구 시작 시) 본 연구의 핵심성과들은 실제 현장에 적용되는 기술개발을 포함하고 있음(Task 1). 그러나 나머지 핵심성과는 공학적 연구가 미비하여 전체적인 기술성숙도를 TRL 2로 설정하는 것이 타당함 - (연구 종료 시) 본 연구의 종합적인 최종 성과물의 경우 실험실 규모의 검증 실험을 거쳐 최적 설계 가이드 라인의 형태로 제시되게 됨. 따라서 공법·기법 유형의 TRL 4의 설정이 적합함

2. 연구개발의 필요성

- 우리 주변에 당연히 존재하고 있는 대피시설이기에 그 성능 또한 당연히 보장되리라 믿고 있지만 놀랍게도 이러한 대피시설들은 어떠한 공학적 기준 없이 면적과 방송설비에 관한 기준만 충족하면 대피시설로 지정될 수 있음.
- 만약 이러한 기준으로 지정된 대피시설이 방호 기능을 충분히 발휘하지 못한다면 이는 더 큰 참사로 이어질 수 있음. 이렇듯 우리가 당연하게 생각하던 대피시설의 방호성능에 대한 창의적 의문과 문제 인식이 본 과제를 창의적이고 도전적인 연구로 연결시킴.
- 현재 국내에는 대피시설 구조 설계에 관한 아무런 기준이 존재하지 않으며, 본 연구를 통해 인간공학적 대피로 확보 및 SOC 시설물 내 대피 시설(SIP) 최적화 설계기술이 개발된다면 이는 매우 의미 있고 도전적인 연구가 될 것으로 판단됨.

(1차년도 : 2019.04 ~ 2019.12)

- Task 1 : 대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발
- Tag 기법을 활용한 레이저 스캐닝 기법 개발

(2차년도 : 2020.01 ~ 2020.12)

- Task 2 : 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발
- 국내 환경을 고려한 재난 시뮬레이션을 통해 대피경로 분석을 수행하는 것은 매우 창의적인 연구 주제임.
- 본 연구를 통해 대피시설의 최적 위치 선정이 개발된다면, 신규 대피시설의 설계단계부터 반영하여 효과적인 대피시설 및 대피시스템을 구축할 수 있음. 이러한 연구는 국내에서 최초로 수행되는 창의적 연구임.
- 최근 각광 받는 VR 기술을 활용하여 시설물 관리 매니저의 상황 대처 교육을 수행하게 됨.
- Task 3 : FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발
- 기존의 많은 연구는 구조적 성능 향상에만 초점을 맞춤. 반면, 본 기술은 실제 대피상황에서 비산물(파편)에 의한 인명 피해를 방지하는 것을 고려하고 있음.

- 따라서 대피로 및 대피시설의 부분적 붕괴 방지 및 구조 성능 유지를 위한 구조적 보강 기법을 개발할 계획임.
- Task 4 : 시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발
- 엘리베이터는 지하층에서 지상까지 연결되어있어, 적절한 활용이 이루어졌을 경우 장애인 또는 노약자들의 신속한 대피를 기대할 수 있음. 따라서 엘리베이터를 활용하여 시설물 붕괴를 대비한 탈출로 설계 가이드 라인을 제시할 계획임.

3. 연구개발 범위

- Task 1 : 대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발
- 시설물 3D 형상정보 획득을 위해 레이저 스캐닝 기법을 활용하며, 본 연구 목적에 최적화하여 Tag 기법을 활용하게 되면 데이터 획득을 위한 시간을 혁신적으로 단축할 수 있음
- Task 2 : 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발
- 국내 환경을 고려한 재난(물리적 테러) 시뮬레이션 연구
 - 인구가 밀집된 지하철 역사를 대표적 연구대상으로 하여, 물리적 테러상황 시 대피시설에 단기대피하는 상황으로 시나리오 작성 및 시뮬레이션 연구를 수행함.
- 대피경로 분석을 통한 대피로 설계 및 시설물 내 대피시설 최적 위치 선정
 - 소프트웨어를 활용한 인간 동선 분석을 통해 재난 시 최적 대피로 설계
 - 동선 분석을 기반으로 계단을 추가하여 대피 시간을 19.6% 단축 가능
- 일반 지하철 역사 활용방안 분석 및 제시
 - 대피경로에 영향을 가장 많이 미치는 공통부분에서 일반 지하철 역사에 적용할 수 있도록 기준 분석 및 제시.

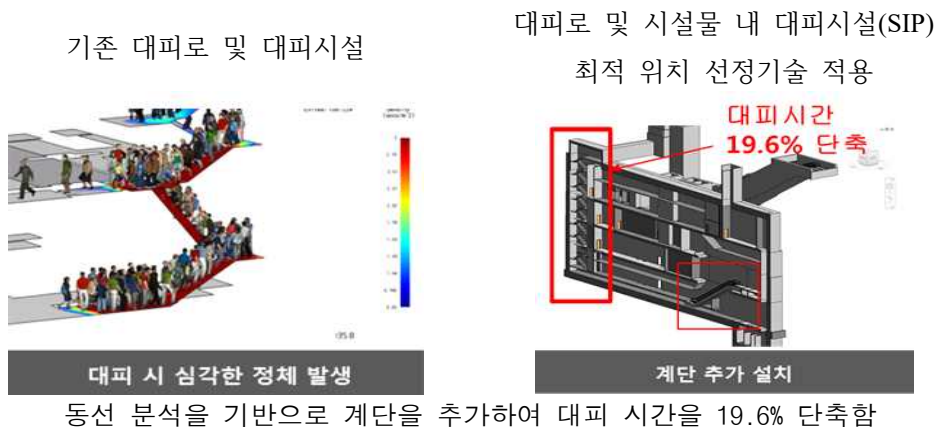


그림 1-1. 대피시설 최적 위치 선정기술 적용 예시

- 재난 발생 시 최적 대피 알고리즘 개발 및 대피 교육용 VR 콘텐츠 개발
- 재난 발생 시 시설물 관리 매니저의 상황 대처 메뉴얼 개발

SOC 시설물 특성을 고려한 대피 교육용 VR 콘텐츠 개발

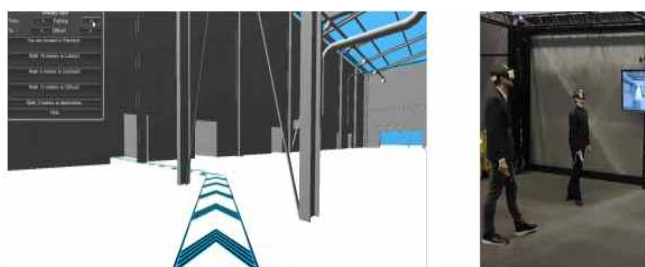


그림 1-2. VR 콘텐츠 활용 교육

■ Task 3 : FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발

○ 시설물의 부분적 붕괴 및 비산물에 의한 피해 방지

- 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발

- 대피로 및 대피시설의 부분적 붕괴 방지 및 구조 성능 유지를 위한 구조적 보강 기법 개발

: 방호성능이 향상된 구조보강용 PC 부재 개발

: FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 건식 보강 기법 개발



그림 1-3. FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 건식 보강 기법

- 대피로에 설치된 내장재, 구조부재의 파편으로 인한 피해를 막기 위한 보강 기법 개발

: FRP 시트 및 플라스틱 시트를 활용한 보강 기법 개발

: 파편 발생 방지 보강 기법 개발

Sheet 종류	GFRP	CFRP	AFRP
섬유배열	Chopped Strand(CS)	Unidirectional(UD)	Woven Roving(WR)
레진 종류	에폭시(Epoxy, EPX), 폴리에스테르(Polyester, PE)		

그림 1-4. FRP 적용 가능 섬유 및 레진

■ Task 4 : 시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발

○ 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술 개발

○ 시설물 붕괴 시 탈출로에 대한 접근방안 마련

○ 환기설비 활용 탈출로 접근성 분석



그림 1-5. 시설물 내 엘리베이터

2. 연구수행내용 및 성과

[국내외 연구 동향]

1. 국내 현황

- ‘인간공학적 대피시설’이란 대피상황에서의 인간의 행동을 분석하고 이를 대피시설 설계에 반영한 시설물 내 대피 시설(SIP)을 의미함. 시설물 내 대피 시설(SIP)은 특정 시설 또는 구조물에 종속된 형태의 대피시설로서 평상시 회의실, 체육관, 식당 등으로 다양한 활용이 가능하며, 기존 시설물의 사용도 가능한 독립형 대피시설 개념임. 시설물 내 대피 시설(SIP)은 기존 시설물의 내부에 설치된다는 점에서 시설물 외벽에 의한 보호가 가능하며, 따라서 대피시설 자체에 가해지는 외부 하중이 감소하게 됨. 또한, 시설물 내 거주자는 외부에 나갈 필요 없이 신속하고 안전하게 대피할 수 있음.

1.1 국내 대피시설 형태

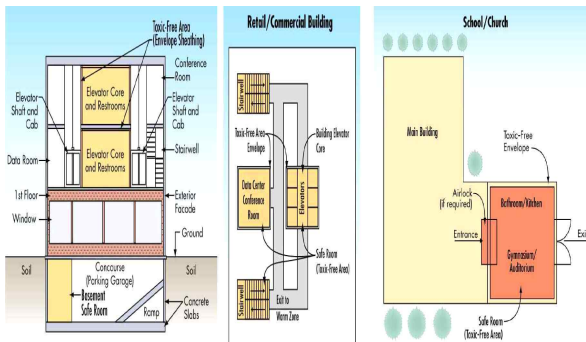


그림 2-1. 공공용 시설물 내 대피시설 개념도(FEMA, 2006)

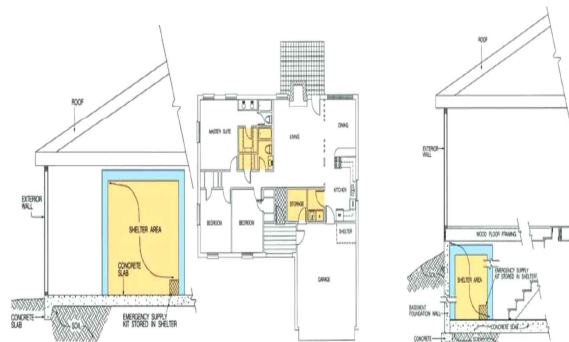


그림 2-2. 가정용 시설물 내 대피시설 개념도(FEMA, 2006)

- 대피시설은 형태에 따라 크게 유럽형과 대륙형으로 구분할 수 있음. 유럽형 대피시설은 스위스를 중심으로 집단 보호시설(CPS, Collective Protection System) 체계로 발달하였고, 대륙형 대피시설은 미국을 중심으로 시설물 내 대피 시설(SIP, Shelter In Place) 체계로 발달하였음.
- 국내의 정부 지원 대피시설 및 공공용 대피시설은 유럽의 집단 보호시설(CPS)과 거의 유사한 형태로 일정 깊이의 지하 시설에 견고한 철근 콘크리트 구조물을 구축하여 장기대피가 가능한 집단 보호 형태임.
- 그러나 최근 발생하는 재난의 종류 및 수도권에 과밀화된 인구분포 등을 고려할 때, 대피의 접근성과 효율이 확보된 시설물 내 대피 시설(SIP) 도입이 시급하다고 판단됨.

1.2 대피 시뮬레이션 선행연구 사례

- 피난 시뮬레이션과 BIM 모델을 활용한 경전철 역사 내의 “시설 내 대피시설” 위치 선정에 관한 연구 - 연구에서는 BIM 소프트웨어를 이용하여 경전철 역사를 모델링하고, 각 공간의 접근성과 수용성을 고려한 피난 시뮬레이션을 시행하여, 역사 내에 SIP의 최적 위치를 선정하는 과정을 제시하였음.

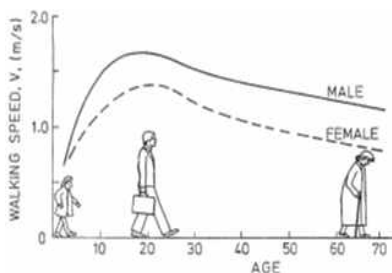


그림 2-3. 성별, 연령에 따른 보행속도 반영

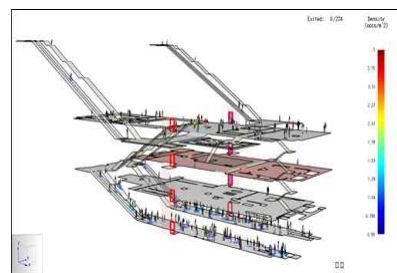


그림 2-4. 경전철 역사 모델링 및 대피 시뮬레이션

- 연구에서 제안한 과정은 직접적인 시뮬레이션을 통한 합리적인 인간 행동 분석에 기초한 것이기 때문에, 기존의 사회기반시설에 적용된다면 CBRE 상황 발생 시 더욱 안전하고 신속한 대피가 가능할 것으로 기대됨.
- 인간공학적 연구 결과를 반영하여 대피 시뮬레이션 수행.

1.3 3차원 실내공간정보 구축 선행연구 사례

- 지상 라이다를 이용한 지하철 역사의 3D 실내공간정보 구축방안 연구
- 서울 시청 지하철 역사를 대상으로 실내 고정밀 레이저 측량 및 3차원 벡터 가공기술을 활용하여 정밀 3차원 실내공간정보를 구축하였음.
- 구축된 정밀 3차원 실내모델은 1:1000 수치 지도와의 중첩분석을 통해 정확도 평가를 시행하였음.
- 본 연구 결과는 향후 실내공간정보 구축 및 실내외 공간정보 연계활용을 위한 기초 자료로 활용될 수 있음.

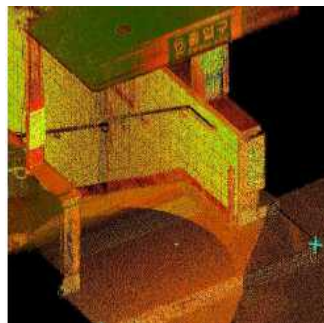
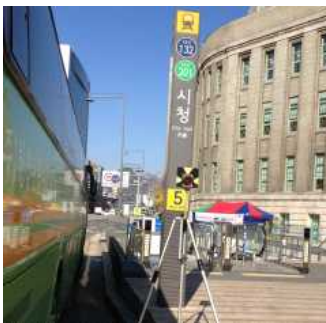


그림 2-5. 지상 라이다를 이용한 지하철 역사(서울 2호선 시청역) 3D 실내공간 구축 사례

○ 실감형 실내외 3차원 공간정보 구축 기술개발

- 3차원 실내외 공간정보 모델 개발 및 표준화: 실내외 공간정보 연계 및 서비스 제공을 위한 3차원 실내공간모델을 개발하고 국제 표준화 추진.
- 실내외 3차원 공간정보 구축 및 통합 지원 기술개발: LOD 수준별 실내공간정보 구축 기법 고도화 및 모델링 기법 정의서 제시.
- 실내외 공간정보 통합 플랫폼에 3차원 실내모델과 실내공간 Geo-Contents 엔진을 탑재하고 실내공간정보 활용 API를 제공하여 다양한 실내공간정보 서비스구현을 통해 실용화가 기대됨.



그림 2-6. 포인트 클라우드 외곽선

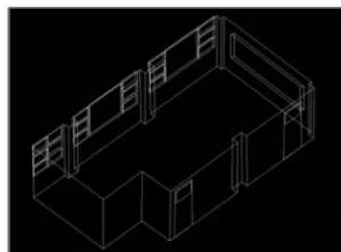


그림 2-7. 실내 와이어 프레임 모델



그림 2-8. 실내 3차원 모델

2. 국외 현황

- 미국 (FEMA 453, 2006), 미국 연방 재난 관리청(FEMA)은 2006년 화학, 생물학, 방사능 공격에 대비한 대피소 설계 가이드라인을 발표하였음.
- 화학, 생물학, 방사능 오염에 따른 등급에 따라 대피소의 종류를 분류하였음.

표 2-1. 대피소에 따른 수용인원

구분	CBR class*	수용인원	종류
지중 대피소	3	1~100	창문이 없는 지하 및 반지하 시설
단일 목적 대피소	3	1~100	창문이 없는 내부 공간
다용도 대피소	1, 2, 3	1~100	회의실, 화장실, 계단통로, 엘리베이터 통로
지역사회 대피소	1, 2, 3	100~1000	학교, 교회, 백화점, 정부청사 건물

*CBR level; 1: 화학, 생물학, 방사능 오염에 대해 고효율의 여과장치와 공기정화 장치가 요구되는 경우

CBR level; 2: 화학, 생물학, 방사능 오염에 대해 고효율의 여과장치가 요구되는 경우

CBR level; 3: 화학, 생물학, 방사능 오염에 대해 최소 효율의 여과장치가 요구되는 경우

- 영국 (LLRF, LLAP 2012), 수용인원에 따른 대피소의 종류를 구분하고 있음.
- 일반적으로 5000명 이상 수용 가능한 EEC의 경우, 단기 대피용으로 숙식이 제공되지 않음.
- 수용인원 200명 이하의 경우, 지방정부에 따라 위치가 결정되며, 식사, 위생시설, 숙박 등이 제공됨.

표 2-2. 대피 인원에 따른 대피소의 종류

인원	대피소 종류	종류	서비스
5000명 이상	Emergency Evacuation Centre (EEC)	공연장, 경기장	물, 화장실
5000명	Short Term Shelter (STS)	공연장, 나이트클럽	간단한 음식
200명 미만	(Emergency) Rest Centre (ERC)	지방정부 결정	식사, 위생시설, 숙박

3. 국내외 연구 동향



그림 2-9. 국내외 대피시설 현황

- 대피시설에 관한 연구는 각 나라 국가기관의 주도로 많은 부분이 비공개로 수행되고 있으며, 대부분의 연구가 사회과학적, 군사적 목적으로 이루어지고 있음. 따라서 세계 연구그룹의 경우, 원천기술의 개발 보다는 기존의 기술을 활용하는 데 초점을 맞추고 있음.
- 911 테러 이후 미국 연방 재난 관리청(FEMA)에서는 대피시설에 관한 연구를 지속해서 수행하고 있으며, 2015년 IS의 파리테러 이후 유럽 각국에서도 세이프 룸(Safe Room)과 같은 개인형 대피시설에 관한 시공 사례가 늘고 있음.

- 최근에는 중국, 싱가포르 등 경제력이 뒷받침되는 아시아 국가에서도 새로운 대피시설에 대한 개발 및 시공이 활발히 진행되고 있음.
- 하지만 방폭 문 개발 등, 대피시설 구축을 위한 세부 단위의 연구에 국한되어 있음.
- 국내에서도 최근 발생한 경주 지진으로 인해 대피시설 실태에 대한 경각심이 높아졌고, 최근 증가하고 있는 북한의 지속적인 도발로 인해 국방 및 방호에 관한 관심이 높아지고 있음.
하지만 국내에서 대피시설에 관한 통합적인 연구는 아직 수행된 적이 없음.
- 따라서, 본 과제는 재난 상황 중 테러 (물리적 테러) 발생 시 단기대피(24시간)하는 것으로 설정하였음. 이는 중장기적으로 대피하는 경우 식수, 화생방 장비, 침대 등 추가적 시설이 필요하며 연구 기간 및 연구비 대비 중장기적 대피를 연구하기에는 제한됨.
- 결과적으로, 본 과제에서 최초로 제안하는 “인간공학적 대피로 확보를 고려한 SOC 시설물 내 대피시설” 이 개발된다면 국내외적 상황에 맞춰 시의적절한 기술력을 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

4. 선행 과제와의 차별성 및 연계성

- 연구과제명: FRP Composite을 활용한 구조물의 내폭 성능 향상 기술개발
지원기관: 한국연구재단
 - 신청과제와 차별성: 위 선행 과제는 FRP Composite을 활용한 구조물의 내폭 성능을 향상하는 재료개발에 초점을 맞춘 과제임. 따라서 Tag 기법을 활용한 레이저 스캐닝 기법 개발, 동선 분석을 통한 최적 대피시설 및 대피로 확보기술 개발, 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발을 수행하는 본 과제와는 차이가 있음. 선행 과제를 통해 축적한 재료개발 기술과 개발재료의 내 충격, 내폭 실험 노하우는 본 과제를 수행하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단됨.
- 연구과제명: 방호방폭 등급 기준 및 성능평가 기법 개발
지원기관: 국토교통과학기술진흥원
 - 신청과제와 차별성: 위 선행 과제는 구조부재의 방호·방폭 성능을 평가하는 기법을 개발하는 과제로써 대피시설의 최적 위치 선정과 대피로 확보를 목표로 하는 본 과제와는 차별성이 있음.
구조부재의 정량적 방호·방폭 성능평가 방안은 전 세계적으로 확립되어 있지 않아 선행 연구기술 확보가 필수적임. 따라서 상기 선행 과제를 통해 개발한 구조부재의 방호·방폭 성능 평가기술은 본 제안 과제를 수행하는 데 도움이 될 것으로 판단됨.
- 연구과제명: Zero-Slump 초고성능 섬유보강 시멘트 복합체가 적용된 시설물 내 대피시설 (SIP) 개발
지원기관: 한국연구재단
 - 신청과제와 차별성: 위 선행 과제는 Zero-Slump 초고성능 섬유보강 시멘트 복합체를 개발하고 이를 이용해 시설물 내 대피 시설(SIP)을 구조적으로 보강하는 연구과제임. 따라서 1) 시설물의 3D 형상정보 수집을 위한 ‘Tag 활용 레이저 스캐닝 기법’ 개발, 2) 동선 분석을 통한 최적 대피시설 및 대피로 확보기술 개발, 3) 대피로 및 대피시설 보강 기술개발을 수행하는 본 과제와는 차이가 있음. 본 과제는 대피경로 분석을 통해 방호성능이 확보된 최적 대피로 확보기술 개발에 초점이 맞춰져 있어, 선행 연구과제와 연계 시 성과의 활용도가 상당할 것으로 기대됨.
- 연구과제명: 지하 공간 재난 상황 인지 IoT 플랫폼 및 재난대응 지능형 긴급 대피경로 유도 플랫폼
지원기관: 국토교통과학기술진흥원
 - 신청과제와 차별성: 위 선행 과제는 지하 공간(지하철)에서의 재난 상황에 대해 신속, 정확한 상황 인지 후 긴급 상황에 대한 대응 의사결정을 지원하고 최적의 대피경로를 유도할 수 있는 시스템 개발을 최종 연구목표로 하고 있음. 센서 및 카메라 모듈을 통한 실시간 의사결정 소프트웨어 개발이 주된 목적이며 대피시설의 설계 및 최적 배치와 관련된 건설 중심의 본 제안연구와는 차별성이 큰 것으로 판단됨.

5. Task 별 연구내용

- 사회기반시설(SOC 시설물)에는 다양한 유형의 시설물이 내포되어 있으며, 본 연구에서는 주로 다중이용 환승시설인 지하철 역사, 항만, 공항 등을 대상으로 하는 사회기반 시설물이며, 연구 기간 및 연구비 대비 인구유동이 밀집된 특정 시설물 중 지하철역사에 대하여 인간공학적 대피로 확보를 고려한 SIP 최적화 설계 기술 개발을 연구하기로 함. 본 연구에서의 대피 경로는 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법으로 최적 SIP 위치까지 도달하는 대피경로 분석을 의미함. 즉, 지하역사 내 기존 설치된 계단, 엘리베이터 등 통로를 의미함.

표 2-3. 연구내용

연구내용			성과점검기준				달성도 (%)
			질적 성과지표		목표치	달성치	
1차년도 (2019)	Task 1	대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	①	스캐닝 기법 속도향상	20% 향상	20% 향상	100
			②	스캐닝 데이터 기반 지하철 역사 3D 모델 개발	실측 데이터 확보	실측 데이터 확보	100
2차년도 (2020)	Task 2	재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	①	최적 대피로 설계를 통한 대피 속도향상	20% 향상	20% 향상	100
			②	시설물 내 대피시설 최적 위치 선정 가이드라인	가이드라인 제시	가이드라인 제시	100
			③	대피 알고리즘 개발 및 대피교육용 VR 콘텐츠 개발	알고리즘 및 VR 콘텐츠 개발	알고리즘 및 VR 콘텐츠 개발	100
	Task 3	FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발	①	보강 기법이 적용된 구조부재 충격저항 실험 수행	구조부재 2종 이상 실험	구조부재 2종 이상 실험	100
			②	파편 발생 방지 보강 기법 개발	미보강 대비 50% 파편 감소	미보강 대비 50% 파편 감소	100
	Task 4	시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발	①	엘리베이터 활용 탈출로 설계 가이드라인	가이드라인 제시	가이드라인 제시	100

5.1. Task 1 : 대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발

5.1.1 스캐닝 기법 속도향상 (20% 향상)

5.1.1.1 기존 레이저 스캔 기법

- 기존 레이저 스캔 기법의 3D 형상정보 획득은 기준점들만 활용함.
- 정보 인식을 위한 Target이 없거나 부족한 경우 모델링 과정에서 불필요한 정보를 분류하는데 시간이 소요됨.
- 스캔 데이터의 모델링 과정에서도 부정확 도가 크기 때문에 작업시간이 많이 소요됨.
- 또한, 대부분 SOC 시설물의 3D 모델 데이터 및 준공도 확보가 어려운 실정이며, 준공도가 있다 하더라도 시설물의 운영과정에서 변경되는 모든 사항에 대해서 적용된 모델은 거의 존재하지 않음.

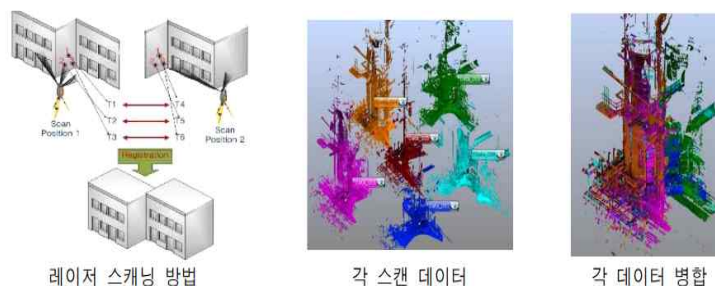


그림 2-10. 기존 레이저 스캔 기법

5.1.1.2 프로젝트 대상지의 레이저 스캐닝

- 대상지 레이저 스캐닝 시에는 먼저 스캐닝 대상지 현황을 파악하고 측량을 통해 좌표를 획득한 후 3D 스캐닝을 이용하여 포인트 클라우드 데이터를 획득함.
- 스캐닝 대상지 현황 파악 및 측량(좌표 획득)은 GNSS 수신기를 이용하여 Total-Station에 절대 좌표 연동한 후 Flat Target에 좌표를 부여하는 방식을 사용함.
- 3D 스캐닝 데이터의 Flat Target에 관측 좌표를 입력하여 절대 좌표를 부여함.
- 안암역 역사의 3D 형상 추출은 실외, 실내에 설치된 Sphere Target 및 Flat Target과 3D 스캐너와 이미지 3D 캡처 장비를 이용해 스캐닝을 진행함.
- 스캐닝 대상지 현황 파악 → 측량(좌표 획득) → 3D 스캐닝 (포인트 클라우드 데이터 획득)
- 그림 2-11과 같이 측량은 GNSS 수신기/Total-station을 이용하며, 3D 형상 추출은 3D 스캐너/이미지 3D 캡처 장비를 이용함.

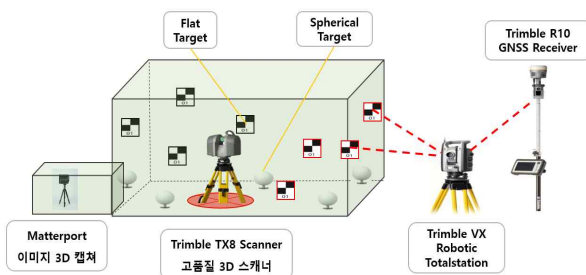


그림 2-11. 레이저 스캐닝 작업 과정



그림 2-12. 스캐닝 대상지 안암역 역사

5.1.1.3 스캐닝 대상지 설정

- 안암역 지하철 역사 사람 보행 구간 레이저 스캐닝 후 스캐닝 대상지 현황을 파악하였음.
- Target 배치, 장애물, 음영지역, 중복도 고려하여 3D 스캐닝 계획하였음.

5.1.1.4 측량 좌표 위치 설정

- 레이저 스캐닝을 이용한 역설계 대상지는 안암역으로 지정함.
- 본격적인 3D 레이저 스캐닝에 앞서 안암역의 측량 좌표를 획득하기 위해 좌표 획득 시에는 GNSS 수신기 및 Total-Station을 이용함.
- 측량 좌표는 GNSS 및 Total-Station을 이용하여 절대, 상대좌표를 획득한 뒤, 스캐닝 된 포인트 클라우드 데이터 X, Y, Z값의 좌표계와 매칭을 진행함.
- Total-Station 이용하여 Flat Target에 절대 좌표를 부여함. GNSS Receiver은 Trimble R10, Total-Station은 Trimble VX를 사용하여 절대 좌표를 확인 후 Total-Station에서 위치 정보를 획득함. 아래 표는 Total-Station에서 측량한 Flat Target 절대 좌표 정보임(GRS 80 세계좌표, 안암역 1, 3번 출입구 근처).



그림 2-13. 안암역 절대 좌표 위치

표 2-4. 안암역 절대 좌표

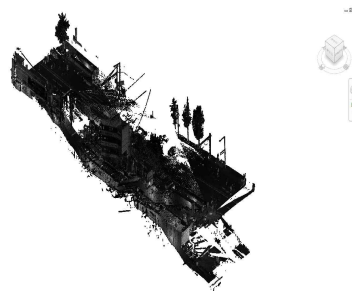
위치	X	Y	Z
T01	554073.954	202623.136	28.178
T02	554074.734	202624.565	27.584
T03	554076.323	202623.068	28.189
T04	554076.404	202625.518	29.754
T05	554090.188	202527.761	34.818
T06	554089.869	202538.013	35.145
T07	554089.845	202542.426	33.840
T08	554092.152	202542.385	33.829

5.1.1.5 역설계

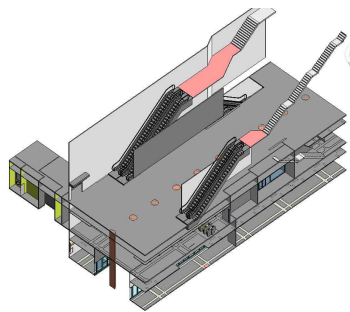
- 지하철 역사의 레이저 스캐닝을 통한 역설계 진행 시 3D 형상정보 획득 및 3D 모델링을 최적화하여 효율적으로 시설물을 관리할 수 있는 기반을 마련하고 위험 대피 시 경로 분석을 위한 가상의 3D 모델링을 작성함.
- 레이저 스캐닝을 통한 역사 3D 모델링에 대한 Work-Flow 및 작업 범위는 대상물 레이저 스캐닝, 포인트 클라우드 데이터 가공, 3D 모델링, VR 시뮬레이션 등이 있음.
- 아래 그림은 역설계 기술을 적용한 역사 3D 모델링에 대한 Work-Flow를 나타냄.
- 역설계를 통한 3D 모델링은 다음과 같은 장점이 있음.
 - 레이저 스캐닝을 통한 주요한 모델 정보를 확인할 수 있음.
 - 주요 정보에 Target을 활용한 역설계 시간 단축할 수 있음.
 - 절대 좌표를 부여하여 정확한 위치 정보를 확인할 수 있음.
 - 포인트 클라우드 데이터 기반으로 3D 모델링 진행할 수 있음.
 - 대상 구조물의 3D 레이저 스캔 데이터 모델 뷰어로 검토할 수 있음.
 - 역설계 기술 적용을 통한 3차원 DB 구축과 이와 연계한 안전진단에 적용할 수 있음.



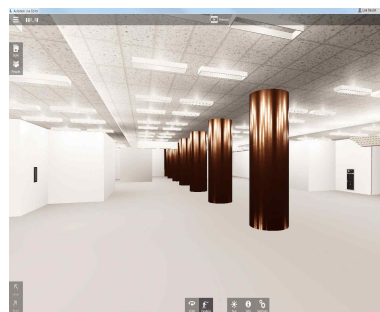
(a) Object laser scanning



(b) Point Cloud Data Processing



(c) 3D Modeling



(d) VR simulation

그림 2-14. 역설계 기술을 적용한 역사 3D 모델링에 대한 워크플로우

5.1.1.6 레이저 스캐닝을 통한 Target 설정

- 레이저 스캐닝의 원리는 대상물에 무수한 레이저빔을 발사하여 레이저 펄스가 되돌아오는 시간(Time of Flight)이나 위상차(Phase-shift)를 이용하여 그 대상물의 3차원 위치 정보(X, Y, Z) 및 RGB 색상, 반사 강도를 측정하는 것임.
- 대부분의 3D 스캐너 장비는 한곳에 고정한 후, 좌우로 360°로 회전하면서 전방위로 측정.
- 이에, 레이저 스캐너 장비는 TX8, 이미지 3D 캡처 장비는 Matterport를 사용.
- Trimble TX8은 1 단추 검색으로 간편하고, 효율적인 방식으로 Target Data의 캡처를 진행.
- Target은 절대 좌표 생성에 유리한 Flat Target과 실내·외 스캔 데이터 정합 작업에 유리한 Spherical Target을 적절히 배치하여 스캐닝함.
- 레이저 스캐닝을 진행할 때 Target에 정보를 인식할 경우 구조물 위치 정보를 추출하게 되므로 스캐닝 후 불필요한 정보들을 분류하는 데 있어 시간을 절약할 수 있는 것을 확인할 수 있음.
- 또한, 본 연구에서는 SOC 시설물의 대피경로 분석을 위한 3D 모델 및 도면 확보를 위해 주요 경로 분석을 진행하고자, 문 및 계단의 파악을 위해 스캔 Target을 중점적으로 배치함.
- Target 배치 외에 필요한 길이의 측정에는 Autodesk Recap 프로그램을 이용해 대략적인 길이를 측정함.
- 아래 그림에서는 정합 및 좌표계획을 위한 Flat Target 및 Spherical Target을 나타내고, 특정 위치(문, 계단 등) 확인을 위한 Target 정보임.



그림 2-15. 정합 및 좌표계획을 위한 Target



그림 2-16. 특정 위치 확인을 위한 Target 정보

5.1.1.7 레이저 스캐닝 데이터 정합

- 레이저 스캐너 장비로 TX8에서 추출된 포인트 클라우드 데이터 추출 및 정합을 진행함.
- 정합 및 좌표 매핑 소프트웨어는 Trimble Real-Works를 사용 후 진행함.
- 여기서, 정합은 기준이 되는 타겟을 기반으로 스캐닝 위치를 배치함.
- 만약 Target 지정이 안 되면 여러 곳에서 스캐닝했던 작업이 한곳에서 겹쳐 보이게 되므로, 여러 스테이션 위치에서 작업했던 스캐닝 데이터를 각각의 위치에 맞게 배치하였고, 3D 포인트 클라우드를 통해 데이터를 생성함.
- 더불어 정합 오차 보고서를 확인하여 정합의 정확성 정도를 확인함.
- 좌표 매핑 : GNSS 및 Total-station으로 획득한 좌표 정보 또는 설계 데이터에서 취득한 좌표 정보를 타겟에 입력하여 스캐닝 데이터 전체를 3차원 좌표 체계로 관리함.
- 다음 그림은 레이저 스캐닝 데이터 정합 전/후 포인트 클라우드 데이터로, 스캐닝 데이터 정합 전에는 스캐닝 스테이션이 하나로 뭉쳐 있으며, 정합 기능을 통해서 각 스테이션이 자리를 찾아 위치하는 것을 확인할 수 있음.
- 안암역 역사 모델링을 위해 정밀하게 측정되어야 할 주요 시뮬레이션은 레이저 스캐너를 통해 데이터 추출함.

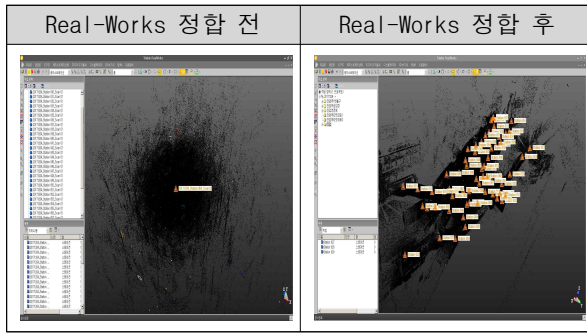


그림 2-17. 레이저 스캐닝 데이터 가공

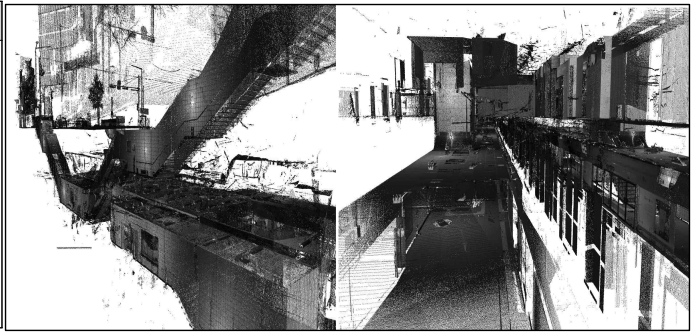


그림 2-18. 레이저 스캐닝 통한 포인트 클라우드 추출

5.1.1.8 이미지 데이터 가공

- 안암역 역사의 측량이 어려운 좁은 구역 및 사실적 이미지 확인이 필요한 구역에는 3D 캡처 장비를 통해 데이터 추출함.
- 3D 캡처 장비는 Matterport를 사용하여 포인트 클라우드 데이터를 추출 및 정합을 진행.



그림 2-19. 3D 캡처를 통한 포인트 클라우드 추출

5.1.1.9 포인트 클라우드 데이터 추출

- 포인트 클라우드 데이터를 작업 이외에 영역과 Point 수를 필요 이상으로 조밀하게 추출하면 데이터 용량은 커지게 되고 PC 성능에 따라서 데이터를 조절할 때 많은 어려움이 있음.
- 따라서 필요한 작업 영역과 적정한 포인트 클라우드 데이터 수를 지정하여 필요한 데이터만 추출함으로써 데이터 용량을 가볍게 하고 모델링 작업에서 데이터를 빠르게 구동할 수 있음.
- 아래 그림은 지하철 역사 레이저 스캐닝 외부, 내부의 포인트 클라우드 데이터 추출된 내용임.

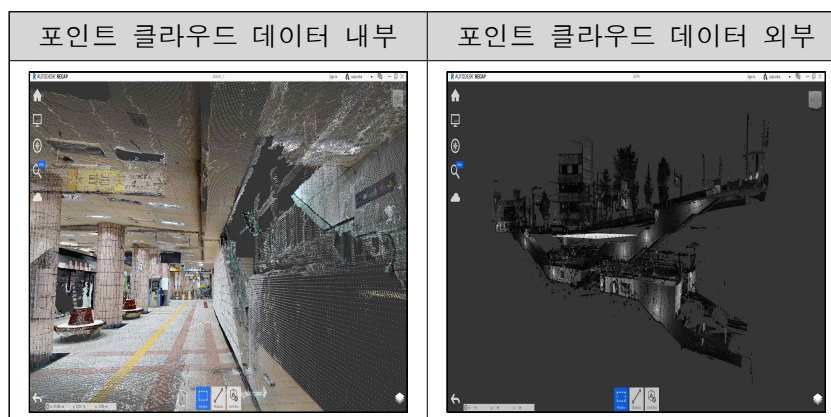
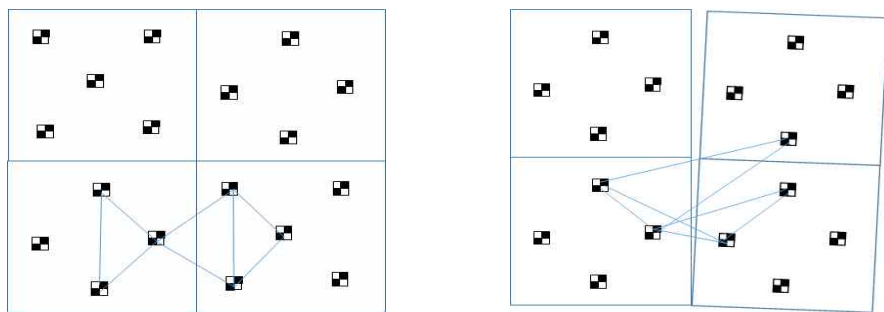


그림 2-20. 지하철 역사 레이저 스캐닝 외부/내부의 포인트 클라우드 데이터

- Autodesk Recap, Autodesk Revit을 사용하여 포인트 클라우드 데이터를 모델링 소프트웨어에서 오버랩을 진행하고 3D 모델링 작업을 진행함.
- 포인트 클라우드 데이터를 사용해 단면, 평면, 정면도를 정확히 확인하면서 모델링을 진행함.
- 이렇게 작업 된 모델 데이터는 BIM으로 활용할 수 있도록 각 객체의 속성정보를 부여하여 관리함.
- BIM 설계 데이터와 스캐닝 데이터의 2D 및 3D 분석 데이터를 통하여 안전진단 검토에서 활용할 수 있는 것을 볼 수 있음.

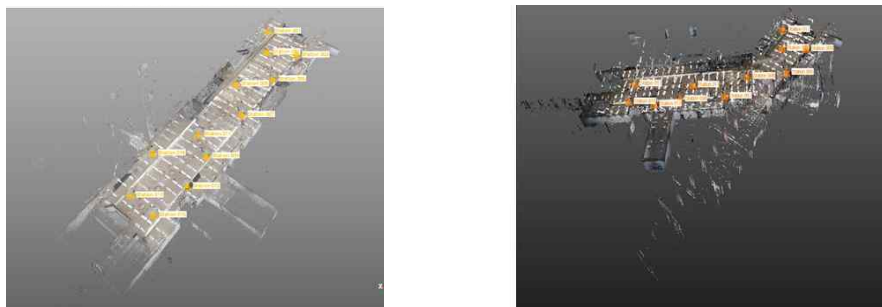
5.1.1.10 Target 배치가 정합도에 미치는 영향

- 스캐닝을 진행할 시에는 Target을 15cm 간격으로 배치하고 삼각망 형태를 지정.
- 삼각망 형태로 Target을 중첩되지 않게 배치하여 정확한 정합을 위한 위치를 지정.
- 이때 거리는 같지 않더라도 삼각형의 형태를 유지하도록 함.
- 아래 그림은 중첩되지 않은 삼각망 형태와 중첩되는 삼각망 형태를 나타냄. 이를 통해 중첩되는 삼각망 형태는 Target 인식 오류로 자동 정합에 실패하는 것을 볼 수 있음.



(a) Non-Overlapping Triangle Shapes (b) Overlapping Triangle Shapes
그림 2-21. Triangle Net Shape

- 다음 그림은 Target 설치 시 삼각망 형태에 따른 정합 효과를 나타냄.



(a) Non-Overlapping Triangle Shapes (b) Overlapping Triangle Shapes
그림 2-22. Matching Effect According to Triangle Network Shape

5.1.1.11 문 계단의 Target 배치 및 길이 측정

- 재실자의 대피 분석에서 중요한 부분인 문과 계단 등은 특정 위치를 확인하기 위하여 Target을 적절히 배치함.
- 계단에 Target을 설치할 시에는 Flat Target의 중심 포인트와 계단의 수평면이 일치하게 배치하여 더 정확한 길잇값을 측정함.
- 그 외에 필요한 길이의 측정에는 Autodesk Recap 프로그램의 Distance 기능을 사용한 거리 측정을 통해 대략적인 길이를 확인할 수 있음.
- 계단과 문의 대략적인 수치는 그림 2-23을 통해 알 수 있음.

- 아래 그림은 Autodesk Revit에서 Autodesk Recap Data를 로드 후 계단 부분의 단면을 설정한 후 길이를 기재한 것임.
- 똑같은 방법으로 그림 2-25는 문의 입면에 길이를 기재한 뒤, 문의 단면에 길이를 기재한 작업임.
- 길이의 오차범위는 1~5mm임을 알 수 있음.

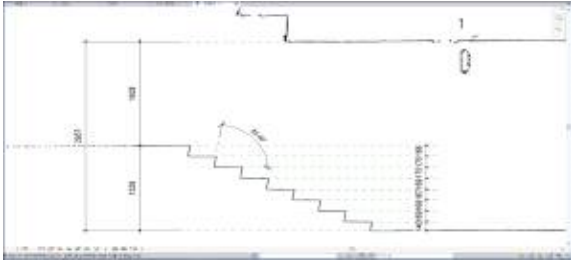
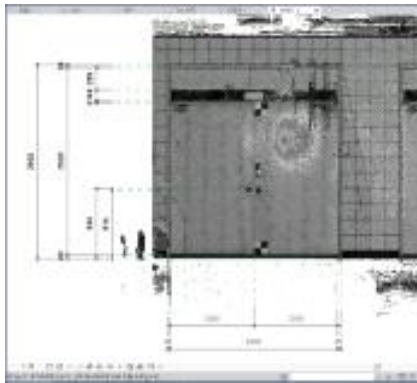


그림 2-23. Revit을 통한 계단 단면



(a) Recap Length of Staircase (b) Recap Length of Door
그림 2-24. 특정 위치의 모델링정보



(a) Door Elevation in Revit

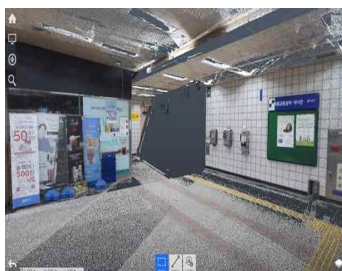
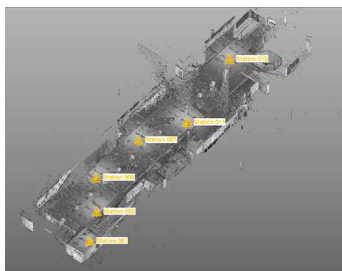


(B) Door Section in Revit

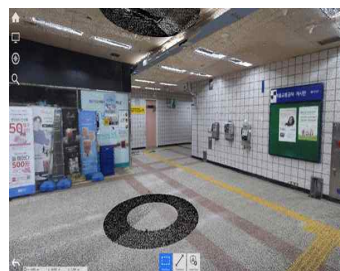
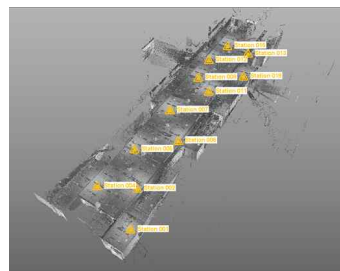
그림 2-25. Revit을 통한 door 모델링

5.1.1.12 Target 개수에 따른 스캐닝 Quality 비교 이미지

- 앞선 Target 개수에 따라 발생한 스캐닝의 오차는 모델링 과정에서 정확도를 떨어뜨리고 작업시간을 길게 만듦. 여기에, 불필요한 정보 분류의 시간 절약과 구조물 위치 정보의 추출을 위해 배치한 Target의 개수가 스캐닝 Quality와 모델링 시간에 영향을 줄 수 있다는 판단하에 이를 확인하고자 측정 실험을 진행함.



(a) 6 Target



(b) 12 Target

그림 2-26. Target 개수에 따른 quality 비교

- 측정 장소는 안암역 지하 2층 대합실이며, 6 Target과 12 Target을 설치하여 두 차례 스캐닝을 진행하였음.
- 6 Target과 12 Target의 역설계는 모두 오차범위가 1~3mm 이내인 Trimble TX8 장비를 사용하였음.
- 60 Point Scan을 진행하였는데, 작업 Level은 이동시간을 제외하고, 평균 20분 정도로 소요됨.
- Target 개수에 따른 Quality 비교를 하는 이유는 비중점 이미지 및 사각지대 부분을 확인하기 위함이며 두 가지 변수를 통해 얻어낸 이미지는 그림 2-26을 통해 비교하여 Target의 개수를 통해 발생하는 오차 값을 확인할 수 있음.

표 2-5. Target Basement 2nd Floor Modeling Time (6 Target)

모델링 항목	소요시간	비고
그리드 및 레벨 작성	30분	공통사항
Scan Data import 및 좌표 설정	20분	
바닥	2시간	
벽	6시간 30분	
기둥	30분	
천장	1시간 30분	
계단	2시간 30분	
문/창	1시간	
등기구	40분	라이브러리 작성
시설물(개찰구, 가구, 기타)	3시간 30분	
총 모델링 시간	19시간	

표 2-6. Target Basement 2nd Floor modeling Time (12 Target)

모델링 항목	소요시간	비고
그리드 및 레벨 작성	30분	공통사항
Scan Data import 및 좌표 설정	20분	
바닥	1시간 30분	
벽	5시간 30분	
기둥	20분	
천장	1시간	
계단	2시간	
문/창	40분	
등기구	30분	라이브러리 작성
시설물(개찰구, 가구, 기타)	3시간	
총 모델링 시간	15시간	

5.1.2 지하철 역사 3D 형상정보 데이터 (실측 데이터 확보)

5.1.2.1 포인트 클라우드를 통한 3D 모델링

- 표를 통해 6 Target의 경우에는 모델링 작업 과정에서 오차와 사각지대의 발생으로 12 Target 보다 총 모델링 시간이 약 26 ~ 27% 증가함을 알 수 있음.
- Target을 부착해 모델 정보를 Tag 한다면 기존 레이저 스캔 기법보다 역 설계과정에서 작업시간을 단축할 수 있고 작업속도를 26 ~27% 향상할 수 있음을 알 수 있음.

- Autodesk Recap과 Autodesk Revit 프로그램을 사용하여 포인트 클라우드 데이터를 모델링 소프트웨어에서 오버랩하고 3D 모델링 작업을 진행하였음.
- 포인트 클라우드 데이터로, 단면, 평면, 입면도를 정확히 확인하면서 모델링을 진행하였음.
- 작업 된 모델 데이터는 BIM으로 활용할 수 있도록 각 개체에 속성정보를 부여하였음.
- 이는 시설물의 안전진단 등으로 활용해 관리 할 수 있음.
- 아래 그림은 Autodesk Revit을 활용한 3D 모델링과 포인트 클라우드 데이터를 오버랩하여 모델링 한 과정을 나타냄.

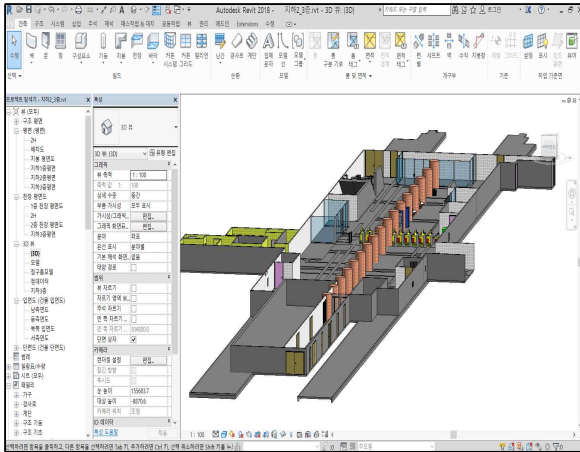


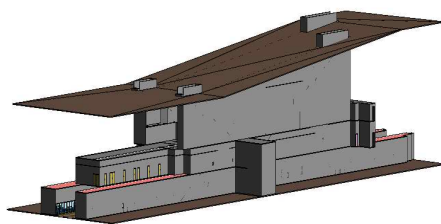
그림 2-27. Autodesk Revit 활용한 3D 모델링



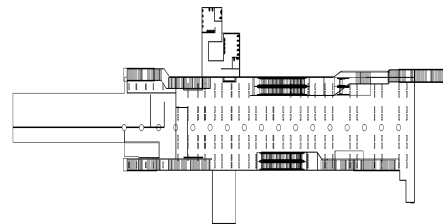
그림 2-28. 포인트 클라우드 데이터 오버랩 모델링

5.1.2.2 BIM 모델 구축

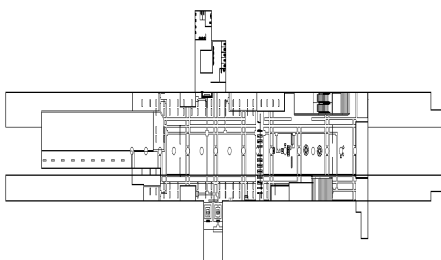
- 3D 스캔 데이터에서 Point Cloud Data를 활용하여 역설계를 통해 BIM 모델링을 진행하여, 안암역 역사 3D 모델을 완성하였음.
- 역사 공간에 벽, 기둥, 천장, 바닥, 문, 계단 등의 객체를 구분하여 모델링 진행하였음.
- 이는 3D 데이터를 통해 모델링을 더욱 효율적으로 관리하여 시설물을 관리하는 데 도움을 주는 것을 확인할 수 있음.
- 역사에 대한 BIM 모델 데이터의 각 평면도와 단면도는 그림 2-29와 2-30과 같이 나타낼 수 있음.



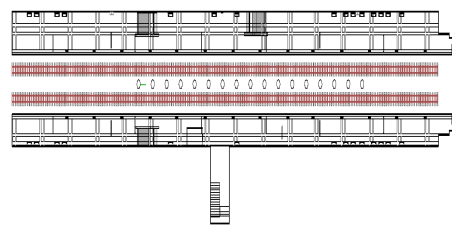
(a) 3D 모델뷰



(b) 지하 1층 평면도



(c) 지하 2층 평면도



(d) 지하 3층 평면도

그림 2-29. 안암역 역사 BIM 모델링 평면도 및 단면도

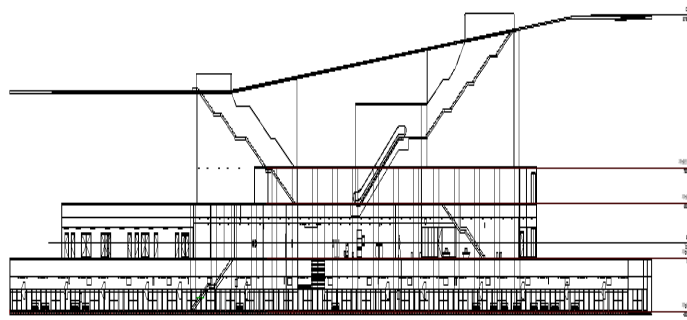


그림 2-30. 안암역 역사 BIM 모델링 평면도 및 단면도

5.1.2.3 VR 대피 시뮬레이션

- 대피 시뮬레이션은 건물의 재실자들이 실제로 재난 상황에 직면했을 때 가장 효과적이겠지만 실질적으로 이는 불가능함.
- 따라서 보통 대피 시뮬레이션에는 인간 행동방식을 모방한 컴퓨터 프로그램들을 사용하는 것이 일반적임.
- 하지만 이 또한 실제 사람들의 재난 상황 시 대피 행태를 고려할 수 있지는 못함.
- 모델링 데이터에는 재난 대피 시뮬레이션을 고려하고자 앞선 스캐닝 Target 배치로 안암역 역사의 계단 높이와 폭을 측정하여 반영하였음.
- VR(Virtual Reality)은 일반적으로 가상세계와 실시간으로 자유롭게 현황을 알 수 있는 환경을 말함.
- 이런 VR은 BIM 모델링 데이터와 연계해 실제와 가까운 가상현실을 사람들이 체험할 수 있게 함.

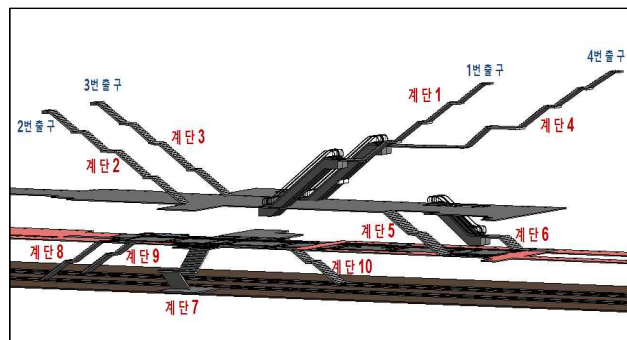
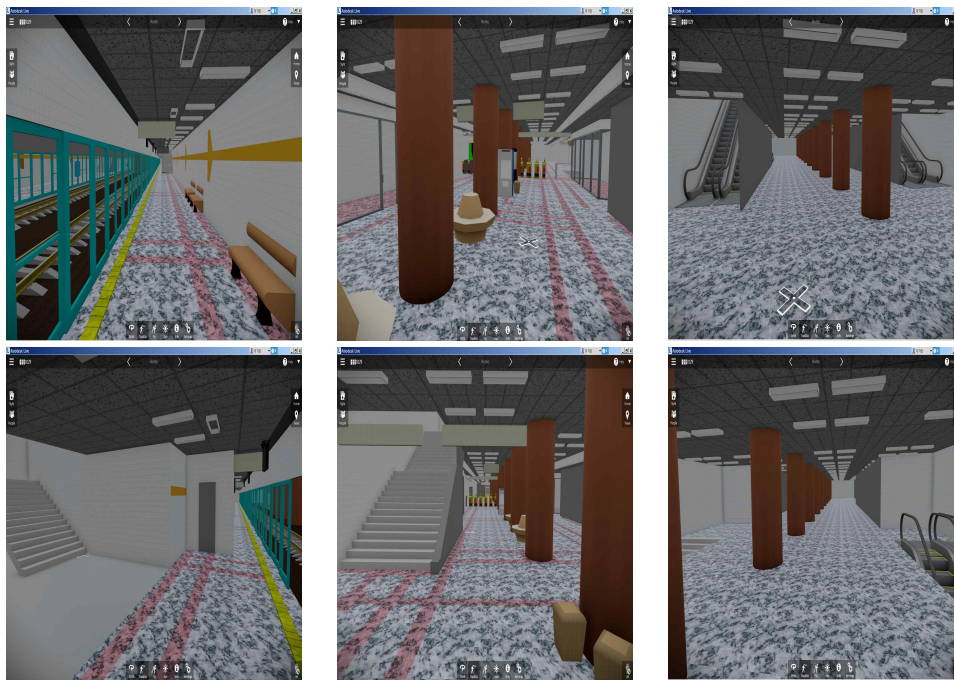


그림 2-31. 안암역 지하철 역사 계단 구조

5.1.2.4 Autodesk Revit Live Data 프로그램으로 재난 대피상황을 가정한 VR과의 연계

- 재난 대피상황을 잘 고려한 BIM 모델링 데이터가 있다면 VR과 연계해 사람들이 직접 가상현실을 체험할 수 있으며 재난 대피상황 시의 재실자들의 행태 연구에도 큰 도움을 줄 것으로 예상함.
- 또한, 이러한 가상현실 체험은 사람들이 시설물을 이용할 때 재난 상황 발생 시 안전하게 대피할 수 있도록 도움을 주는 교육의 목적으로도 활용될 수 있음.
- 안암역 역사의 역설계 과정을 통해 얻은 BIM 모델링 데이터를 Autodesk Revit Live Data 프로그램을 활용하여 재난 대피상황을 가정한 VR을 진행하였음.
- 시뮬레이션의 중요한 변수 중 사람들의 보행속도에 영향을 주는 것은 시설물의 계단 높이와 폭임.
- 따라서, 재난 대피 시뮬레이션에 계단 높이와 폭을 변수로 설정하여 이를 반영함.
- 측정 장소는 안암역으로, 지하 1층부터 지상을 연결하는 계단의 경우 4개의 출구가 있으며 각 출구 계단마다 계단 구간이 4개의 계단으로 나누어져 있는 것을 확인할 수 있음.
- 지하 2층에서 지하 1층을 연결하는 계단은 보문사 방향과 고려대역 방향으로 나누어져 있으며, 지하 3층 플랫폼에서 지하 2층을 연결하는 계단의 경우에는 방향별로 1개 내지, 2개의 구역으로 나누어져 있는 것을 볼 수 있음.



(a) 지하 3층 (b) 지하 2층 (c) 지하 1층

그림 2-32 안암역 역사 Autodesk Live VR Data

표 2-7. Staircases in Anam Station Riser and Tread

Location	Riser		Tread
지하 1층~1번 출구 계단	1계 단참	166	320
	2계 단참	166	320
	3계 단참	166	320
	4계 단참	166	320
지하 1층~2번 출구 계단	1계 단참	157	320
	2계 단참	168	320
	3계 단참	173	340
	4계 단참	168	340
지하 1층~3번 출구 계단	1계 단참	157	320
	2계 단참	168	320
	3계 단참	173	340
	4계 단참	168	340
지하 1층~4번 출구 계단	1계 단참	143	335
	2계 단참	157	335
	3계 단참	171	335
	4계 단참	175	300
지하2층(보문사방향)~지하1층		166	325
지하2층(고려대방향)~지하1층		172	325
지하3층(보문사방향 앞쪽)~지하2층		166	330
지하3층(보문사방향 뒷쪽)~지하2층		166	335
지하3층(고려대방향 앞쪽)~지하2층		166	335
지하3층(고려대방향 뒷쪽)~지하2층		166	335

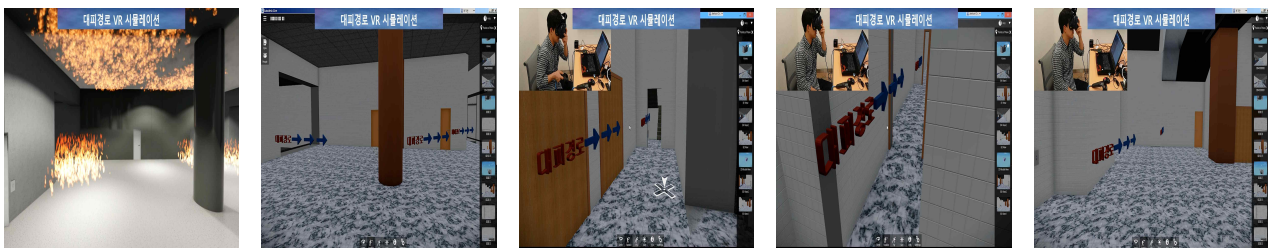
5.1.2.5 VR Revit live data 프로그램 활용

○ 또한, Revit Live Data로 PC에서 마우스 및 키보드 조작을 통하여 안암역 역사에 대한 모델링을 검토함. Autodesk Live를 통하여 지하 3층 승강장에서 지하 1층까지 VR Data를 나타냄.

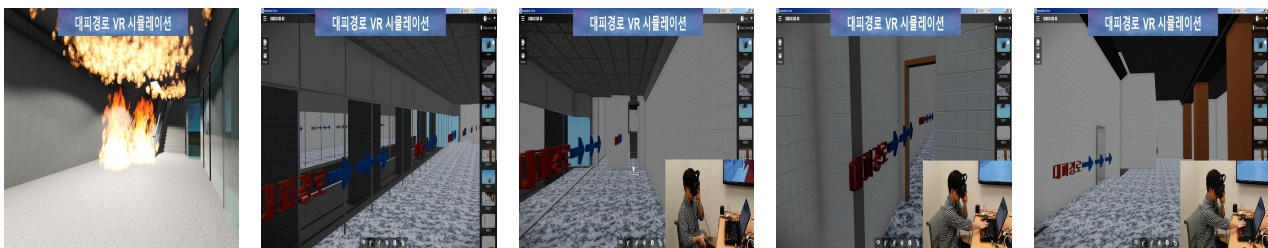
- Revit에서는 프로젝트 내 세 가지 유형의 요소(모델 요소, 기준 요소 및 뷰별 요소)를 사용함.
- Revit의 요소 패밀리로 참조됨.
- 패밀리는 요소의 형상 정의와 요소에서 사용되는 매개변수를 포함하고, 요소의 각 인스턴스는 패밀리
에 의해 정의되고 제어함.
- Autodesk Revit을 활용하여 3D 모델링을 나타냄. 3D 모델링과 VR을 연계한 다차원 기술을 적용할 수
있음. 본 프로젝트에서 VR 연계는 Autodesk Revit Live Data로 산출하였음.
- 첫 번째 지하 1층에서 지하 2층으로 대피경로 시뮬레이션, 두 번째는 지하 4층에서 지하 3층으로 대
피경로 시뮬레이션임.
- VR 장비로는 HTC VIVE, Oculus Rift 사용하여 PC와 마우스 및 키보드 조작을 통해 재난 대피 시뮬레
이션을 진행함.

5.1.2.6 BIM 모델링과 VR의 연계 및 시뮬레이션

- Autodesk Live 통한 VR 대피경로 시뮬레이션 2가지 옵션으로 나타냄.
- 대피 시뮬레이션은 크게 2가지 경로로 첫 번째 지하 1층에서 지하 2층으로의 대피경로 시뮬레이션,
두 번째 지하 2층에서 지하 3층으로의 대피경로 시뮬레이션임.
- 역 설계과정을 진행하여 BIM 모델링 데이터를 연계해 VR기기를 활용한 대피 시뮬레이션 적용을 통해
차후 실제 재실자들의 대피 형태 분석 연구와 시설물에서 재난 대피 시뮬레이션 교육용 VR 콘텐츠로
의 개발의 가능성을 확인할 수 있음.
- 따라서 안암역 역사의 역설계 실험을 통해 도면의 확보가 어려운 SOC 시설물을 레이저 스캐닝을 통해
동선 주요 요소인 계단과 문에 치수 데이터를 BIM 모델에 반영한다면 재실자의 대피 동선 분석에도
효과적으로 사용될 것이라 기대됨.



(a) 지하 1층-지하 2층



(b) 지하 2층-지하 3층

그림 2-33. 대피경로 VR 시뮬레이션

5.2. Task 2 : 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발

5.2.1 최적 대피로 설계를 통한 대피 속도향상 (20% 향상)

- 국내의 경우 지하철에 적용하기 위한 피난대피소는 별도로 규정되어 있지 않으며, 일반 건축물의 유사시설에 대한 시설기준만 있음. 비상시에 대피를 위한 시설 및 공간은 비상 대피 시설과 피난안전구역으로 나누어져 있음. 이 중에서 비상 대피시설은 민방위 상황에서 외부 위협으로 보호하기 위한 대피시설을 말함.
- 일반적인 지하철 역사의 승강장은 평균 지하 깊이 10m 이상, 역무를 보는 공간의 평균 지하 깊이 7.6m 이상의 깊은 곳에 있음. 이는 지하철 역사는 물리적 테러와 같은 재난 상황 발생 시 시민들을 보호할 수 있다는 것을 의미함. 여기서, 지하철은 대피시설로서 기본적으로 갖추어야 할 식수, 위생 설비와 같은 기본 시설을 완비하고 있음.
- 그러나 실제 대피 시뮬레이션의 기초 데이터가 충분하지 않아서 지하철 역사에서의 대피경로와 최적 SIP 위치 선정에 어려움이 있음. 따라서 지하철 역사의 일정 구획을 SIP으로 선정하거나 이동식 형태의 임시대피 시설을 구축하여 운영해야 함. 물리적 테러와 같은 재난 상황 발생 시 지하철 역사는 기본적인 방호능력을 갖추고 있어, SIP으로 활용한다면 특정 공간을 대피시설로 새롭게 구축하는 것보다 경제적인 설계가 가능하며 대피시설의 역할을 충분히 할 수 있음.
- 재난 상황 발생 시 재실자들의 빠른 대피는 최적 대피로 설계를 나타내는 지표이며, 시설물 내부에서 병목현상이 발생했을 때 얼마나 빨리 피난자들이 정체 구간을 통과할 수 있는지가 대피 효율성을 좌우함. 대피경로는 계단, 엘리베이터, 에스컬레이터 등을 활용하며, 재실자의 연령 및 특성을 반영해야 함. 하지만 이에 대한 실제 실험을 구현하기는 어려운 실정이므로, 본 연구에서는 보행자의 특성을 반영할 수 있는 Pathfinder 프로그램을 통해 실제 상황과 유사한 조건에서 시뮬레이션하였음. 여기서 Pathfinder는 기존의 3D 형상정보 설계프로그램과의 연계가 가능하여, 일반 지하철 역사의 도면을 통해 3D 모델링과 대피 시뮬레이션이 가능함.

표 2-8. 국외 지하철 임시대피 거주공간 사례

국가	특징
중국	- 2008년 지하궤도교통 방공설계규범을 제정 - 지하철역 건설 시 평소 지하철 역사의 기능뿐 아니라 전시대비 기능을 충족하도록 출입구, 응급 대피 인원수에 따른 대피면적, 방공통풍 시스템, 급배수, 조명 등에 관해 규정함 - 지하철 임시대피 거주공간 활용 시 : 응급 대피 인원수는 역사의 대피면적에 따라 구분 - 1인당 대피면적은 4~6m² - 각 방공구간에는 전시 이용자 출입구가 2개 이상, 1개 이상의 직접 지상과 연결되는 전시 주요 출입구 필요 - 플랫폼 층에는 식수 저장(응급 이용자 대피를 위해 3일의 저장시간, 전시 대피를 위해 2주간의 저장시간 지정)
영국	- 2차 세계대전 당시 지하철역 방공호로 사용됨 - 피난 공간, 화장실 등의 부족 - 간이침대, 간이 화장실, 의약품 등 정부 주도하에 제공 - 역 입구에 폭격에 강한 형태로 보호됨
독일	- 지멘스담역 : 핵병기 상정한 피난 시설로 건설됨 - 사용 시, 긴급 용 출입구를 개방하며 일반적으로는 출입구를 폐쇄 - 수용 가능 인원 : 4,332명 - 피난 기간 : 2주 - 식수, 공기정화, 화장실, 진료실, 취침실 등 외 생활 물품 제공

5.2.1.1 나이별 인구 비중 분석

- 인구가 밀집된 지하철 역사에서 물리적 테러와 같은 재난 상황을 고려하여 시나리오 작성 및 시뮬레이션 연구를 수행함. SIP 위치 선정을 위해 가장 중요한 변수 중 하나는 시설물을 이용하는 대피 인원 산정임.
- 본 연구에서는 안암역을 선정하여 연령 및 성별에 따라 시나리오를 구성하고 시뮬레이션함. 그림 2-34, 2-35는 연령 및 성별에 따른 인구 구성이며, 이를 활용하여 시뮬레이션 인구산정에 반영함.
- 인구 주택 총 조사 통계청 자료이며 나이, 성별, 보행속도로 분류함. 지하철 역사 내 인원도 통계청 자료를 활용하여 나이, 성별에 따라 대피 인원을 설정하여 시뮬레이션에 반영함. 본 연구에서는 안암역을 선정하여 연령 및 성별에 따라 시나리오를 구성하고 이에 관한 시뮬레이션 연구를 수행하였음.
- 인구 주택 총 조사에 따르면 여성 인구가 남성 인구보다 다소 높게 나타나, 여성 100명당 남성의 수는 99.7 정도로 나타나 있음. 15~64세에 속하는 인구는 2017년 기준 약 72.5%였지만, 2018년에는 이보다 약간 줄어든 72.2%를 차지하고 있음. 40~50대 인구가 약 31.2%로 가장 높게 나타났고 60대 이상 또는 10대 이하의 인구가 적은 항아리형 인구 피라미드 구조를 나타내고 있음. 65세 이상의 인구 또한 2017년 기준 전체 인구대비 약 14.2%였지만, 2018년에는 이보다 다소 상승한 14.8%임. 노년 인구는 매해 증가하는 추세이며, 이는 시뮬레이션 결과에 영향을 끼침.

(단위: 세, 천 명, %)

나 이	2017년 ^(A)		2018년 ^(B)		증감(B-A)	
	구성비		구성비		증감률	
계	49,943	100.0	49,978	100.0	35	0.1
0-4	2,076	4.2	1,968	3.9	-108	-5.2
5-9	2,288	4.6	2,261	4.5	-27	-1.2
10-14	2,268	4.5	2,251	4.5	-17	-0.8
15-19	2,892	5.8	2,735	5.5	-156	-5.4
20-24	3,366	6.7	3,290	6.6	-66	-2.0
25-29	3,164	6.3	3,259	6.5	95	3.0
30-34	3,216	6.4	3,081	6.2	-135	-4.2
35-39	3,904	7.8	3,915	7.8	11	0.3
40-44	3,916	7.8	3,776	7.6	-140	-3.6
45-49	4,404	8.8	4,362	8.7	-42	-1.0
50-54	4,001	8.0	4,071	8.1	71	1.8
55-59	4,167	8.3	4,212	8.4	45	1.1
60-64	3,175	6.4	3,401	6.8	226	7.1
65-69	2,282	4.6	2,335	4.7	53	2.3
70-74	1,745	3.5	1,817	3.6	72	4.1
75-79	1,537	3.1	1,579	3.2	42	2.7
80-84	940	1.9	1,002	2.0	62	6.6
85세 이상	611	1.2	660	1.3	50	8.1
0-14세	6,632	13.3	6,480	13.0	-152	-2.3
15-64세	36,196	72.5	36,104	72.2	-92	-0.3
65세 이상	7,115	14.2	7,394	14.8	279	3.9
평균연령	41.4	-	42.0	-	0.6	-
중위연령	42.4	-	43.1	-	0.7	-

그림 2-34. 연령별 내국인 인구

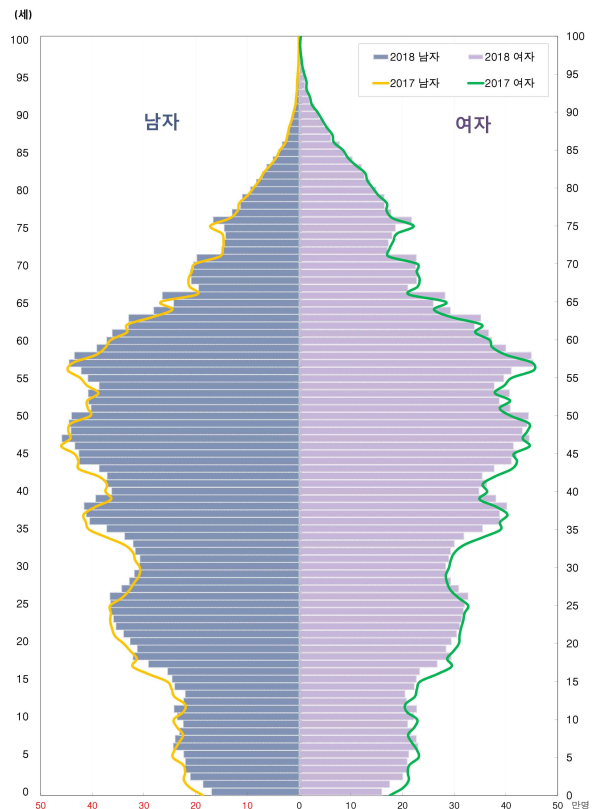


그림 2-35. 성별 인구 피라미드

5.2.1.2 시뮬레이션 인원 및 SIP 면적 산정

- 승하차 인원은 서울지하철 교통공사에서 제공하고 있는 ‘서울시 지하철 호선별 역별 승하차 인원 정보’ 값을 이용하였고, 승하차 인원이 가장 많은 시간(2019년 5월)을 기준으로 인원을 산정하였음.
- 안암역 승하차 인원을 확인한 결과 승차 인원은 4,479명/시간, 하차 인원은 3,718명/시간으로 나타남. 해당 인원을 분당 인원으로 환산하여 승차 인원 74.65명/분, 하차 인원 61.97명/분으로 시뮬레이션에 적용하였음.
- 승차 시 지상에서 플랫폼까지 대피자들이 이동할 경우 시뮬레이션 결과 최대 219.9초 소요됨.
- 하차 시 플랫폼에서 지상까지 대피자들이 이동할 경우 시뮬레이션 결과 최대 272.3초 소요됨.

- 승차 인원은 하차 인원보다 더 많고, 승차 인원은 최대 5~6분을 기다려야 전철에 탑승할 수 있음.
- 최대 인원 산정 시 승차 인원이 역 안에 대기하는 동안 하차 인원과 동시에 머무는 시간은 272.3초 (4.54분)으로 시뮬레이션 인원 산정에 중요한 변수가 됨.
- 272.3초는 Pathfinder 시뮬레이션을 통해 계산되었으며, 이 시간을 승하차 인구에 곱하여 전체 시뮬레이션 인원을 산정에 중요한 변수가 됨.
- 최악의 상황을 가정하여 계산된 결과값을 적용하면 시뮬레이션에 필요한 인원은 총 625명임.

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(지상, B3)
Version: 2019.1.0508
Mode: Steering
Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):
Min: 0.1 "00001"
Max: 219.9 "00382"
Average: 15.3
StdDev: 34.5

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		
all behaviors	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Completion Times by Profile (s):

Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	50	0.1	"00002" 112.1	"00380" 16.9	33.5		
Female 30-39	23	0.1	"00009" 84.3	"00371" 9.9	25.6		
Female 40-49	25	0.1	"00005" 92.4	"00367" 13.7	29.5		
Female 50-59	25	0.1	"00007" 96.8	"00379" 15.1	32.6		
Female 60-69	15	0.1	"00012" 103.5	"00360" 12.5	32.0		
Female 70-79	7	0.1	"00026" 103.1	"00362" 14.8	36.1		
Female 80-89	1	219.9	"00382" 219.9	"00382" 219.9	0.0		
Male 20-29	52	0.1	"00001" 99.4	"00381" 16.1	32.7		
Male 30-39	18	0.1	"00010" 90.4	"00372" 13.6	30.4		
Male 40-49	25	0.1	"00006" 88.1	"00354" 12.7	26.5		
Male 50-59	23	0.1	"00008" 83.7	"00370" 10.1	26.0		
Male 60-69	15	0.1	"00011" 88.0	"00347" 11.1	28.2		
Male 70-79	6	0.1	"00025" 90.1	"00361" 15.1	33.6		
Male 80-89	1	180.8	"00383" 180.8	"00383" 180.8	0.0		
all profiles	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Travel Distances for All Occupants (m):
Min: 0.0 "00061"
Max: 158.6 "00382"
Average: 21.8
StdDev: 41.8

(a) 지상에서 플랫폼까지 시뮬레이션 결과

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(B3, 지상)
Version: 2019.1.0508
Mode: Steering
Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):
Min: 27.8 "00354"
Max: 272.3 "00139"
Average: 181.6
StdDev: 65.7

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		
all behaviors	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Completion Times by Profile (s):

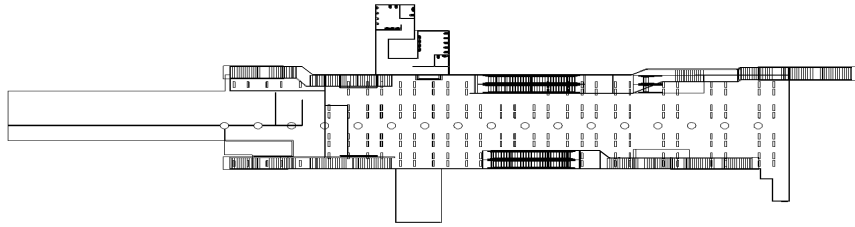
Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	51	35.7	"00374" 260.0	"00190" 177.0	69.8		
Female 30-39	23	50.4	"00371" 261.0	"00114" 187.6	60.6		
Female 40-49	25	37.6	"00367" 249.0	"00110" 172.5	60.3		
Female 50-59	25	43.1	"00379" 265.6	"00195" 190.3	62.2		
Female 60-69	15	50.4	"00360" 265.2	"00129" 206.4	66.3		
Female 70-79	7	54.6	"00362" 263.6	"00131" 224.1	69.5		
Female 80-89	1	272.3	"00139" 272.3	"00139" 272.3	0.0		
Male 20-29	51	31.1	"00339" 261.7	"00132" 174.1	67.0		
Male 30-39	19	29.6	"00372" 263.0	"00127" 169.5	66.4		
Male 40-49	25	27.8	"00354" 243.5	"00220" 173.4	63.3		
Male 50-59	23	45.0	"00370" 266.4	"00139" 178.8	61.3		
Male 60-69	15	67.1	"00359" 256.4	"00128" 193.5	59.1		
Male 70-79	7	80.6	"00361" 257.1	"00213" 199.9	54.8		
all profiles	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Travel Distances for All Occupants (m):
Min: 26.7 "00354"
Max: 239.2 "00228"
Average: 163.6
StdDev: 52.4

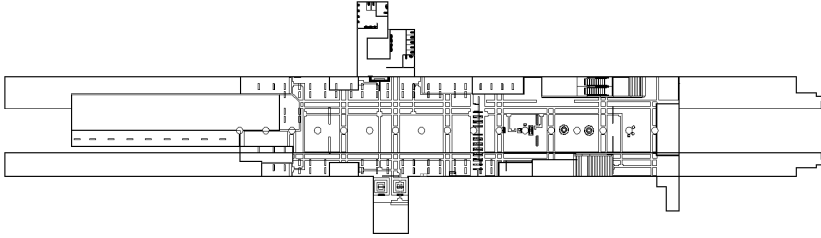
(b) 플랫폼에서 지상까지 시뮬레이션 결과

그림 2-36. 시뮬레이션 결과

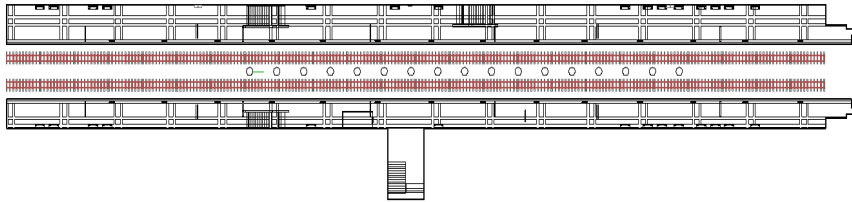
- Shelter는 주변 위험 요소로부터 완벽히 보호 가능한 곳이며, 60m²의 방송 청취가 가능한 공간을 만족해야 하므로, 안암역의 경우 SIP 위치를 그림 2-38에서 지하 1층과 2층으로 정하였음.
- 두 층의 유효면적은 지하 2층 및 1층은 각각 1,945m², 433m²임.
- 지하 3층은 지하철 도어가 유리로 구성되어 있으므로, 재난 발생 시 파편으로 인한 2차 피해가 예상되므로, 본 연구에서는 대피시설의 수용력을 고려하여 지하 1층 및 지하 2층을 SIP으로 지정하였음.
- FEMA 453에 따르면, 대피자들의 Shelter 재실 시간이 24시간을 넘는지 아닌지에 따라 수용 가능 인원이 달라짐.
- SIP 내 재실 시간이 24시간 이상일 경우, 1인용 침대를 사용할 경우 5.6m²/person이며, 2층 침대를 사용할 경우 2.8m²/person이 필요함
- 반면 재실 시간 24시간 미만 시 수면이 필요 없게 되므로 1.86m²/person으로 규정하고 있고, 재실자들의 수용력이 보다 향상됨.
- 본 연구에서는 SIP의 수용력을 고려하여 수면이 필요 없는 24시간 미만을 기준으로 인원을 산정함.
- 수면이 불필요한 24시간 이내로 필요 면적을 산출할 경우 각 SIP의 수용 가능 인구는 표 2-9와 같음.



(a) B1 plan

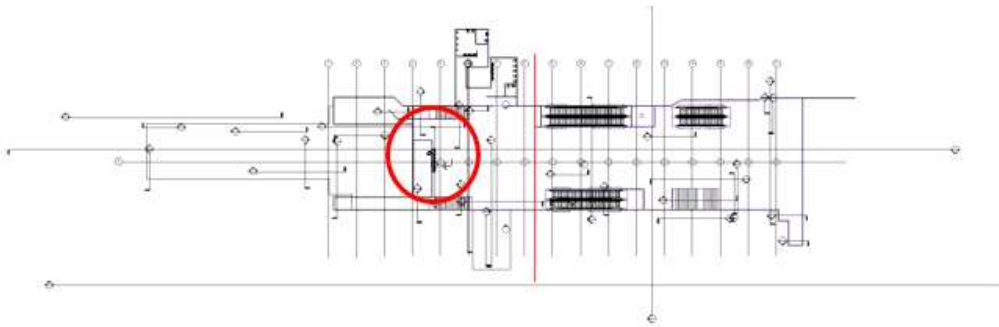


(b) B2 plan

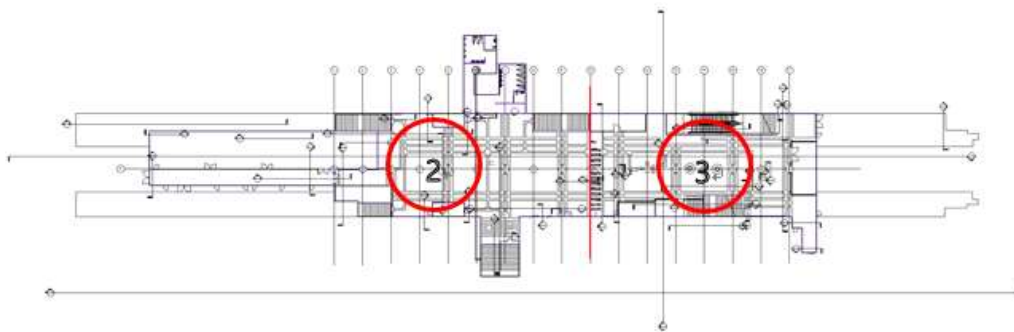


(c) B3 plan

그림 2-37. 안암역 지하 단면



(a) 지하 1층 SIP



(b) 지하 2층 SIP

그림 2-38. 지하 1, 2층 SIP

표 2-9. SIP 면적 및 수용 가능 인원

	1	2	3
면적 (m ²)	433	1176	769
수용 가능 인원 (명)	433/1.86 = 232.7	1176/1.86 = 635.25	769/1.86 = 413.4

표 2-10. 안암역 계단 폭, 높이

위치	계단 높이 (mm)		계단 폭 (mm)
B1F ~ Exit 1 계단	1 Landing	166	320
	2 Landing	166	320
	3 Landing	166	320
	4 Landing	166	320
B1F ~ Exit 2 계단	1 Landing	157	320
	2 Landing	168	320
	3 Landing	173	340
	4 Landing	168	340
B1F ~ Exit 3 계단	1 Landing	157	320
	2 Landing	168	320
	3 Landing	173	340
	4 Landing	168	340
B1F ~ Exit 4 계단	1 Landing	143	335
	2 Landing	157	335
	3 Landing	171	335
	4 Landing	175	300
B2F(Bomunsa Direction ~ B1F)		166	325
B2F(Korea University Direction ~ B1F)		172	325
B3F(Bomunsa Direction) ~ B2F		166	330
B3F(Back of Bomunsa Direction) ~ B2F		166	335
B3F(Front of Korea University Direction) ~ B2F		166	335
B3F(Back of Korea University Direction) ~ B2F		166	335

5.2.1.3 대피 시뮬레이터 설정

○ 계단 모델링

- 레이저 스캐닝을 통한 역설계로 데이터를 취합하여, 안암역 역사의 도면을 획득하였음. 모델링 데이터는 Autodesk Revit 프로그램을 사용하였으며, 포인트 클라우드 소프트웨어에서 오버랩하고 3D 모델링 작업을 진행하였음. 여기서 만들어진 모델링을 Pathfinder 프로그램에 입력하여, 역사 공간에 엘리베이터, 문, 계단 등을 구분하여 모델링을 진행하였음.
- Pathfinder의 경우 DXF 파일은 물론 DWG와 파일과의 호환성이 우수하다는 장점이 있음.
- 표 2-10은 모델링에 적용된 안암역 계단의 폭 및 높이를 나타내고 있음.

○ Pathfinder 프로그램 선정

- 본 연구에서 사용할 시뮬레이션 프로그램으로는 Thunderhead Engineering에서 개발한 Pathfinder를 선정하였음.
- Pathfinder는 Steering Mode, SFPE Mode 2가지 보행자 Behavior Mode를 제공하는데, 첫 번째 Steering Mode는 보행자들이 다른 보행자들과 상호작용하는 알고리즘으로 가능한 한 인간의 행동과 움직임을 모방하려는 상태임.
- 두 번째 SFPE Mode는 Engineering Guide to Human Behavior in Fire (SFPE, 2003)에서 정의된 가정 및 계산된 수치를 사용함.
- 즉, SFPE Mode에서는 보행자는 서로 회피하려고 시도하지 않고 보행자들끼리 서로 투과되어 보이지만, 문의 흐름 제한이나 밀도에 따른 보행속도 제어는 가능함.
- Pathfinder 프로그램을 통해 REST(Required Safety Egress Time, 최소 대피 요구 시간)를 산정하여 이를 ASET(Available Safety Egress Time, 허용 가능 대피 시간)과 비교하여 대상 건축물의 대피 안전성능의 평가지표를 제시할 수 있음.

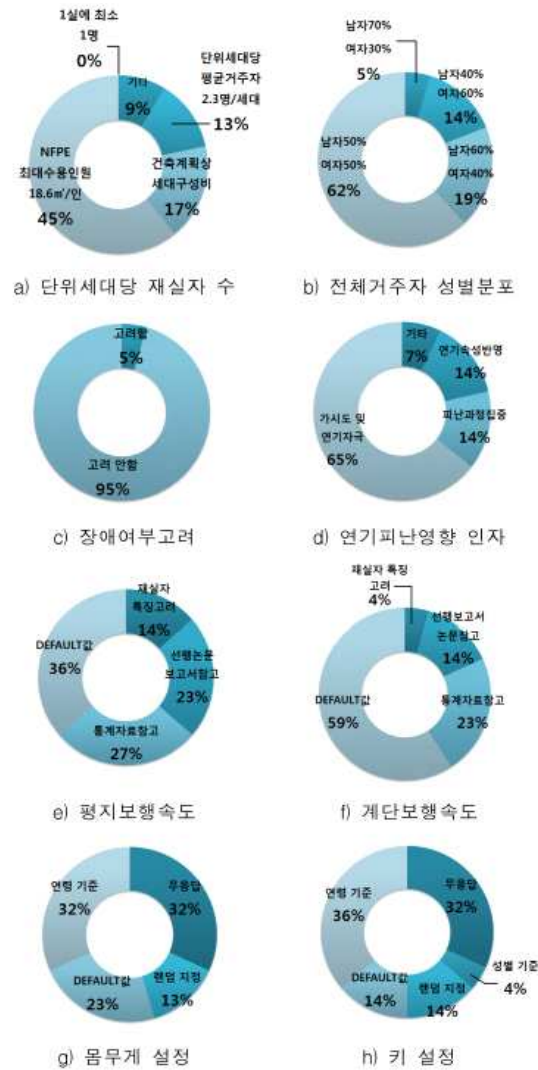


그림 2-39. 재실자 설정 요소의 설문결과

○ 대피 시뮬레이션 과정

- 본 대피 시뮬레이션의 과정은 다음과 같음.

- 재실자의 특성 분석
- 테러 등 재난 상황 설정
- 출구 및 대피경로 설정
- 대피 Modeling 결과 반영
- 재실자에 대한 인명 안전성 확보 여부 판단

- 시뮬레이션 사용자들의 재실자 설정 경향을 조사하기 위해 시뮬레이션 사용 경험이 있는 사용자들을 바탕으로 설문 조사하였음.

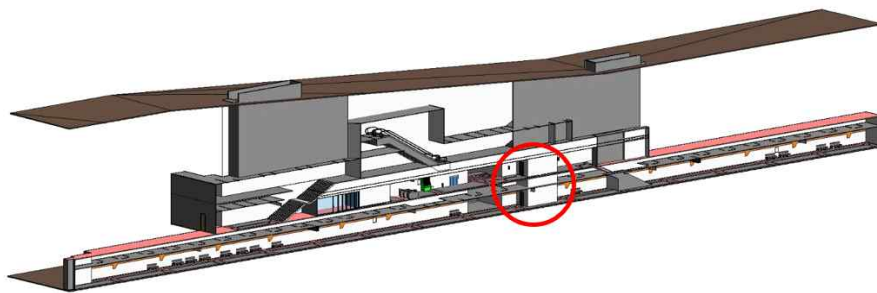
- 평가항목은 다음과 같음

- 단위 가구당 재실자 수
- 성별 분포
- 장애 여부 고려
- 연기에 의한 영향 고려
- 평지 보행속도
- 계단 보행속도
- 몸무게 설정
- 키 설정

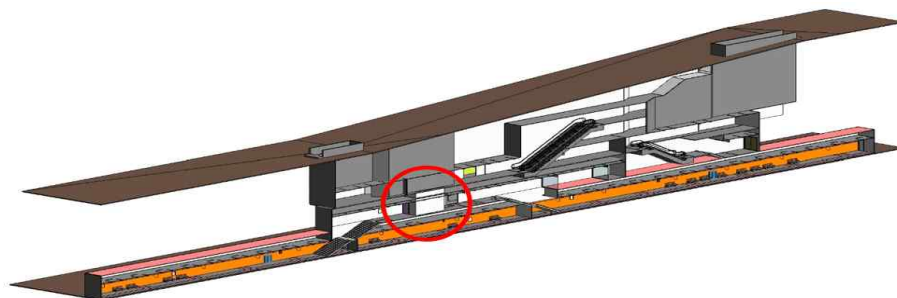
- 단위 가구당 재실자 수의 경우 NFPA에서 제시한 최대 수용인원을 참고하는 것이 가장 높은 비율(45%)을 차지하였으며, 건축 계획상 세대 구성비(17%), 단위 가구당 평균 거주자(13%)가 그 뒤를 이음.
- 전체 거주자 성별 분포로는 남자 50%, 여자 50% 비율(62%)로 가정하는 사용자가 가장 많았으며 그 뒤로 남자 60%, 여자 40% (19%)를 차지함.
- 장애 여부는 고려 안 함(95%)이 매우 높게 나타났으며 이를 통해 시뮬레이션 설정 시 대부분 사용자가 재실자의 장애 여부를 고려하지 않는 것을 알 수 있음.
- 연기 대피 인자의 경우 가시도 및 연기 자극(65%)이 가장 높게 나타났으며 대피 과정에만 집중하며 (14%), 연기속성 반영(14%)이 그 뒤를 이음.
- 평지 보행속도는 시뮬레이션에서 제시된 기본값인 DEFAULT 값 설정(36%)이 가장 높게 나타났으며 통계자료 참고(27%)가 그 뒤를 이음.
- 계단 보행속도 또한 DEFAULT 값 설정(59%)이 가장 높게 나타났으며, 통계자료를 참고하는 것(23%)이 두 번째로 나타났음.
- 다음 몸무게 설정에서는 나이를 기준(32%)으로 하여 설정하는 것이 가장 높게 나타났으며 키 설정 또한 나이를 기준(36%)으로 하는 것이 가장 높게 나타남.

○ 엘리베이터 대수 산정

- 본 연구에서 사용된 안암역 역사에 승강기는 그림 2-40과 같이 총 3대로 구성되어 있으며, 일반 승객 또는 장애인용으로 2대의 승강기, 장애인 전용 승강기 1대로 구성되어 있음.



(a) 3D 측면- 엘리베이터 1호기



(b) 3D 측면- 엘리베이터 2호기

그림 2-40. 지하 2층 및 3층 엘리베이터 위치

- 엘리베이터의 규격은 다음과 같다.
- 출입문 규격(W x H) : 900 x 2100 (mm)
- 카 내부 규격(A x B) : (유효면적) 1100 x 1350 이상 (mm)
- 폭 : 2000 (mm)
- 깊이 : 2200 (mm)
- 속도 : 0.5m/s
- 15인승, 1000kg 이내

표 2-11. 안암역 엘리베이터 위치

시설	운행구간	위치	사용 여부
MRL 엘리베이터 1호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 2호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 3호기	F1-B2	1번 출구	사용 가능

○ 대피 요소별 이동 속도 산정

- CBRE 상황에서 에스컬레이터는 계단만큼 폭이 넓지 않아서 많은 수의 인원을 수용하지는 못하지만, 노약자나 어린이, 임산부 등 빨리 건지 못하는 분들에게는 굉장히 중요한 운송 수단이라고 할 수 있음.
- 건축설계 대사전의 설계편에 따르면 에스컬레이터의 속도는 통상 국제적으로 0.5m/s, 최대 0.75m/s로 정의하고 있고 경사 각도가 30도를 넘는 경우는 내림 방향에서 최대 0.5m/s로 제한을 두고 있음.
- 지하철 주요설계기준(설비 분야)을 보면, 대피 요소별 이동 속도는 표 2-12와 같이 정의하고 있으며 시뮬레이션에 적용된 재실자의 보행속도는 표 2-13과 같음.
- 일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자를 위한 시설로 일반적인 엘리베이터보다 속도가 현저히 느림.
- 화재, 지진 등 재난 발생 시 엘리베이터는 사용하지 않는 것이 원칙이지만 본 연구에서 검토하고 있는 CBRE(Cheical Biological Radiological and Explosive) 및 특히 테러상황 발생 시 빠른 대피를 요구하는 상황에서 엘리베이터 사용을 검토할 필요가 있다고 판단됨.

표 2-12. 대피 요소별 이동 속도

대피 요소	대피 속도
수평 이동 요소(승강장, 대합실, 통로)	60m/분 (1.00m/s)
수직 이동 요소 (계단, 정지된 E/S)	15m/분 (0.25m/s)
작동 중인 E/S	36m/분 (0.60m/s)

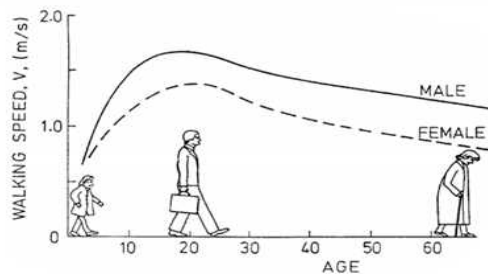


그림 2-41. 연령별 보행속도

표 2-13. 연령별 비율 및 보행속도

나 이	남		여	
	비율 (%)	보행속도 (m/s)	비율 (%)	보행속도(m/s)
20~29	16.583	1.358	16.433	1.341
30~39	7.443	1.433	7.465	1.337
40~49	8.541	1.434	8.567	1.390
50~59	8.042	1.433	8.066	1.313
60~69	4.945	1.339	4.960	1.241
70~79	3.907	1.262	3.106	1.132
80~99	1.349	0.968	1.353	0.943
합 계	50.0(%)	-	50.0(%)	-

○ 탑승 인원 결정

- 본 연구에 지정된 시뮬레이션 인원 625명을 역내에 고르게 배치해야 하는데 하차 인원 281명은 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 골고루 분포하고 승차 인원 339명은 승차 시간을 고려하면 대부분 플랫폼이 위치한 지하 3층에 위치할 확률이 높으므로, 이를 고려하여 양쪽 플랫폼에 대피 인원을 배치하였음.
- 승무원 5명의 경우 1명은 지하 1층 나머지 4명은 지하 2층과 3층에 배치하였음. 승차 및 하차 인원 배치 시 나이와 성별을 그림 2-34, 2-35를 참고하여 배치함.
- 위의 인원에 따라 대피자 배치 시 지하 1층에는 197명, 지하 2층에는 115명, 지하 3층에는 318명임. 인구 분석 결과에 따르면, 노약자(80세 이상) 인구는 전체 인구대비 약 3%를 차지하였고, 한국의 장애인 인구는 약 250만 명이고, 한국 보건 사회 연구원에 따르면 장애인 인구수는 전체 인구수에서 약 13.8%를 지정하고 있음.
- 장애인 인구 중 약 8.9%는 보행 시 많은 도움이 필요하여 본 연구에서는 전체 인구의 13.8%에서 8.9%를 곱한 0.0123%를 전체 장애인 인구로 산정하였음.
- 승무원 5명을 제외한 승하차 시뮬레이션 인구 620명 중 약 8명을 휠체어를 통해서 SIP으로 이동하고, 승차 인원 배치와 같은 비율로 지하 3층에는 5명, 지하 1층에 나머지 3명을 배치하였고, 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 이동하는 것으로 시뮬레이션을 진행하였음.
- 본 연구에서 사용되는 안암역 1호기의 내부면적(A)을 표 2-14에 대입 시 최소 정격하중을 산출할 수 있음. 이를 바탕으로 1회 왕복 시 가능 인원을 선정하였으며, 엘리베이터를 이용한 대피 소요시간을 추정하였음.
- 여기서 승강기는 노약자 및 80세 이상의 노약자가 먼저 탑승하게 배치하는데, 산정된 시뮬레이션 인원 에 따라 배치하였음. 안암역에 운영되고 있는 3대의 엘리베이터 중 1대는 지하 2층에서 지하 1층을 거치지 않고 지상으로 바로 이동함.
- 나머지 2대는 지하 3층에서 지하 2층으로 이동하는 것으로 설계되어 있음. 또한, 엘리베이터는 8인 이상으로 설계되고, 앞서 구한 정격하중으로 탑승 인원 산출 시 1회 운행 시 약 10명의 인원이 1회당 대피한다고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였음.

표 2-14. 내부면적에 따른 정격하중

내부면적이 4.65m ² (50 ft ²) 미만일 경우	내부면적이 4.65m ² (50 ft ²) 이상일 경우
<i>(SI Units)</i> $W = 35A^2 + 325A$	<i>(SI Units)</i> $W = 2.45A^2 + 610A - 620$
<i>(Imperial Units)</i> $W = 0.667A^2 + 66.7A$	<i>(Imperial Units)</i> $W = 0.0467A^2 + 125A - 1,367$

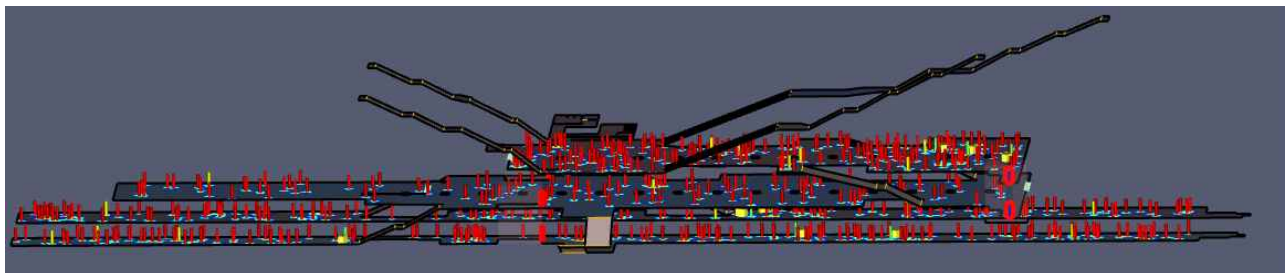


그림 2-42. 안암역 보행자 배치도

○ 대피 전략

- 현재 지하철에서의 대피 방법은 최초 CBRE 상황에서 대피 장소로 이동하는 방법에 따라 다르게 수립해야 함.
- 대피 방법은 다음의 2종류로 분류됨.
- 우선 단계적 부분 대피 방법은 1개 층을 대피 장소(Shelter In Place, SIP)로 규정하여 해당 층으로 재실자들이 모여서 대피하도록 하는 대피 전략을 수립하는 것임. 여기서 1개 층만 SIP으로 지정하여 대피 시 정체 현상으로 대피 시간이 더 많이 소요되는 단점이 있음.
- 다음으로는 전체 동시 대피 전략은 재난 상황 발생 시 2개 층으로 SIP을 분산 배치하여 재난 상황 발생 시 재실자들이 자신으로부터 가까운 보호구역으로 모이는 전략으로 재난 발생 시 재실자의 대피 이동 거리를 최소화하여 대피 시간을 감소하는데 효율적임.
- 대피용 엘리베이터의 목적은 고령 또는 거동이 불편한 재실자들이 직접 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 안전하게 이동하기 위함임.

5.2.1.4 피난 시나리오 설정

- 연구의 목적은 실제 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하여 각각의 시나리오에 따른 예상 소요시간을 산출하고자 함.
- 시나리오는 대피 SIP과 엘리베이터 사용 여부, 엘리베이터의 속도로 하였음.
- 시나리오 A : 계단 + 엘리베이터 속도(0.5m/s), SIP(지하 2층)
- 시나리오 B : 계단 + 엘리베이터 속도(1.0m/s), SIP(지하 2층)
- 시나리오 C : 계단 + 엘리베이터 속도(0.5m/s), SIP(지하 1층 + 지하 2층)
- 시나리오 D : 계단 + 엘리베이터 속도(1.0m/s), SIP(지하 1층 + 지하 2층)

5.2.1.5 시나리오 시뮬레이션 결과

○ 시나리오 A

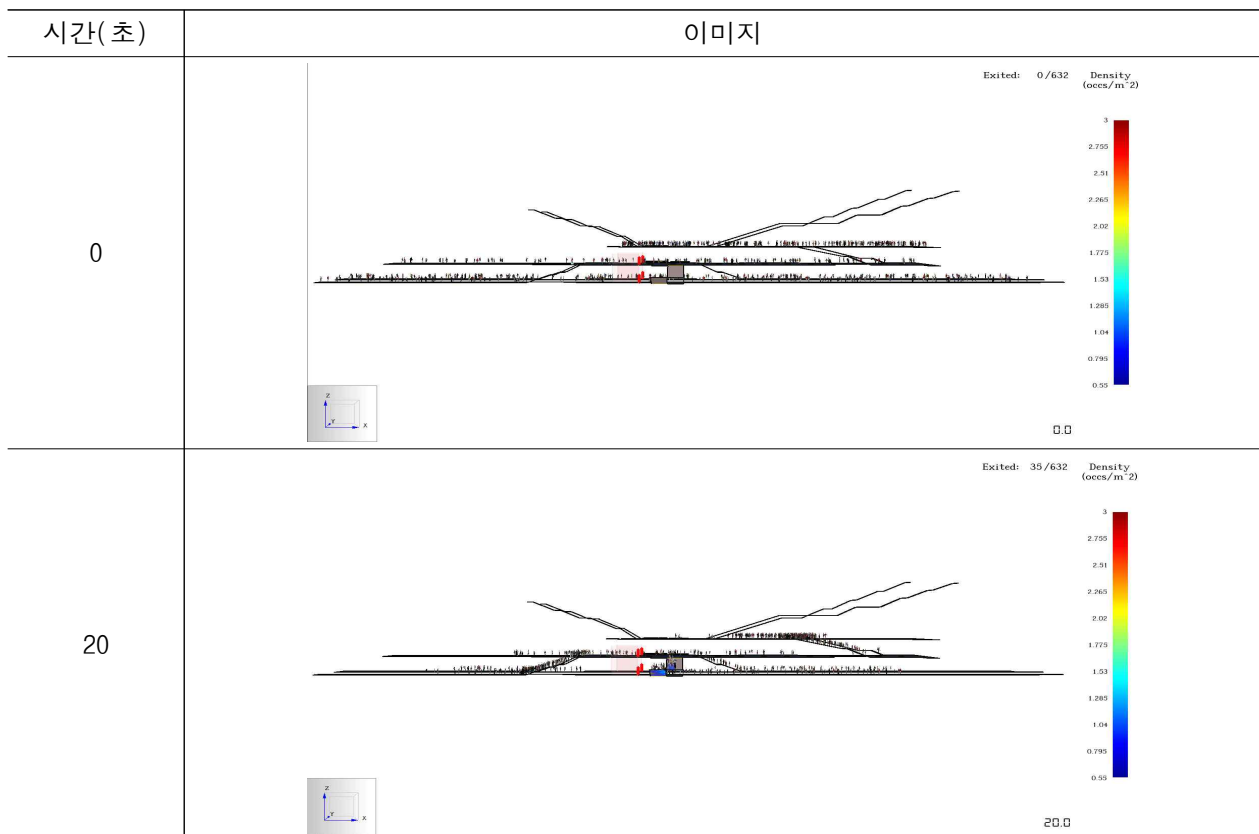


그림 2-43. 시나리오 A의 시뮬레이션 결과

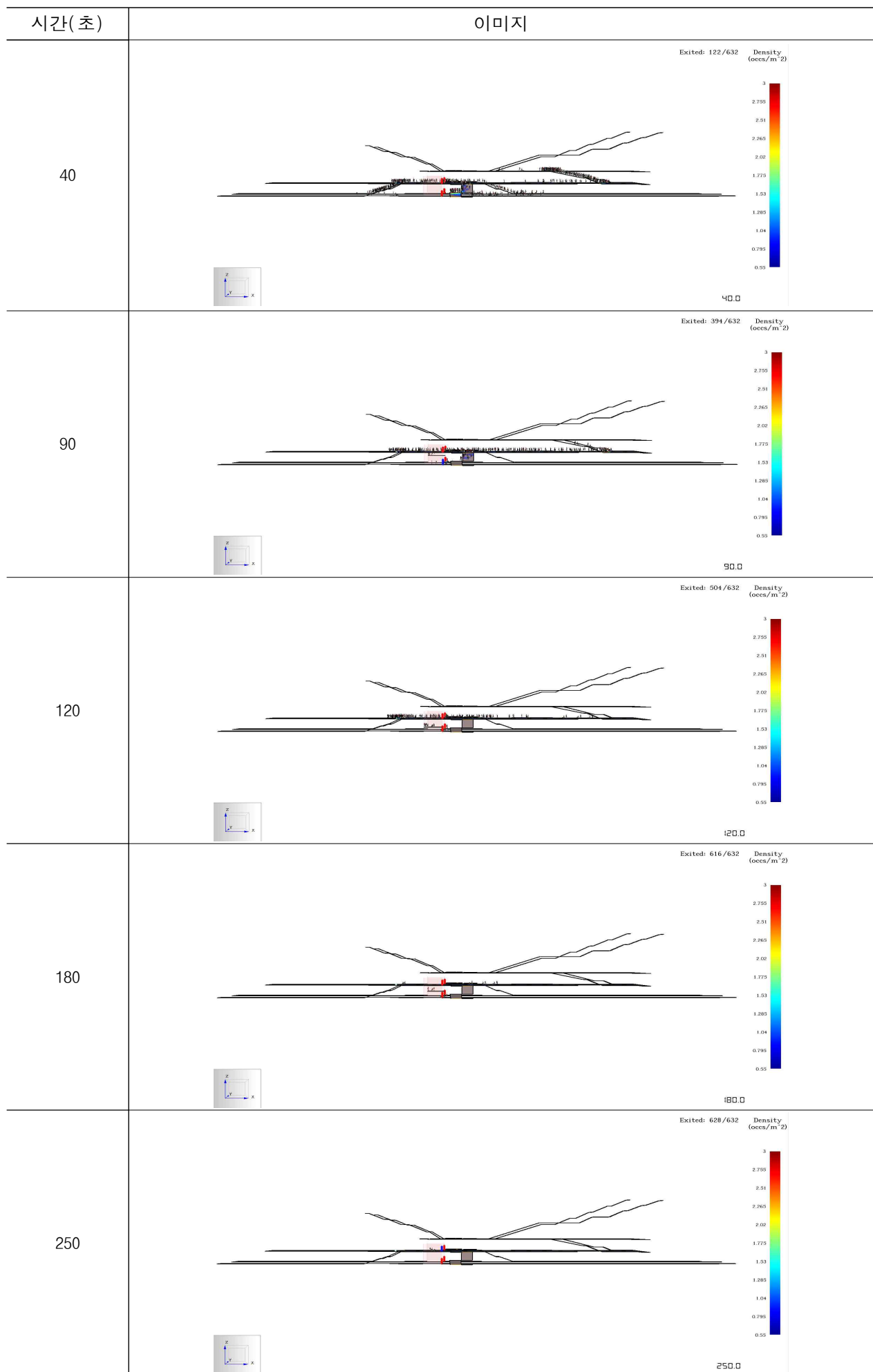


그림 2-43. 시나리오 A의 시뮬레이션 결과

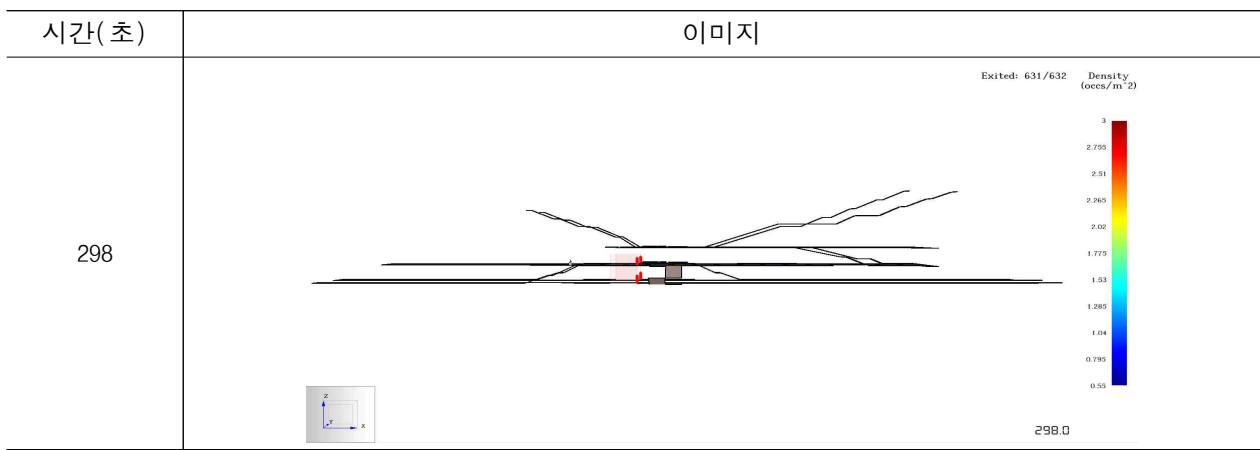


그림 2-43. 시나리오 A의 시뮬레이션 결과

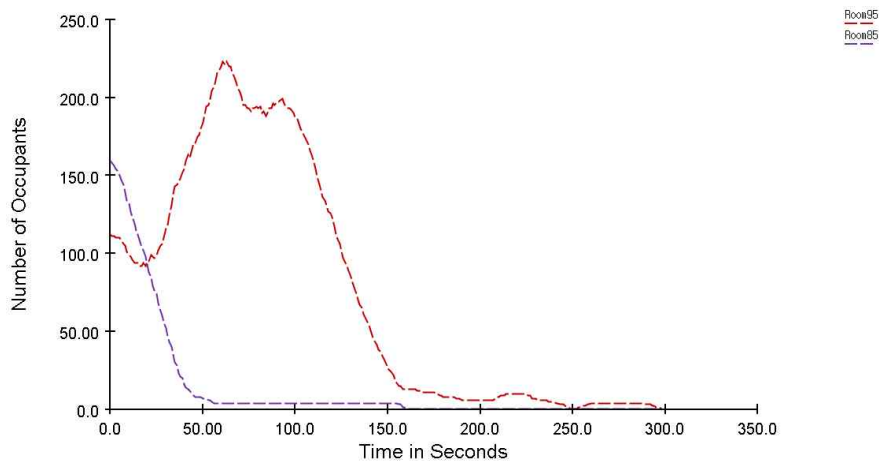


그림 2-44. 시나리오 A의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***			
Simulation:	SIP(B2) ELE-0.5		
Version:	2020.1.0219		
Mode:	Steering		
Total Occupants:	625		
Completion Times for All Occupants (s):			
Min:	1.0	"00260"	
Max:	298.0	"00002"	
Average:	79.6		
StdDev:	45.0		
Travel Distances for All Occupants (m):			
Min:	0.6	"00260"	
Max:	156.1	"00143"	
Average:	76.0		
StdDev:	36.1		

그림 2-45. 시나리오 A에 따른 시뮬레이션 결과

- 시나리오 A는 지하 2층을 SIP으로 지정하여 지하 3층 및 지하 1층의 인원이 엘리베이터와 계단을 이용하는 것으로 하였음. 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였음.
- 전체 결과를 확인하면, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 298초이고, 평균 79.6초가 소요되었음.
- 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 76.0m로 나타났음.

○ 시나리오 B

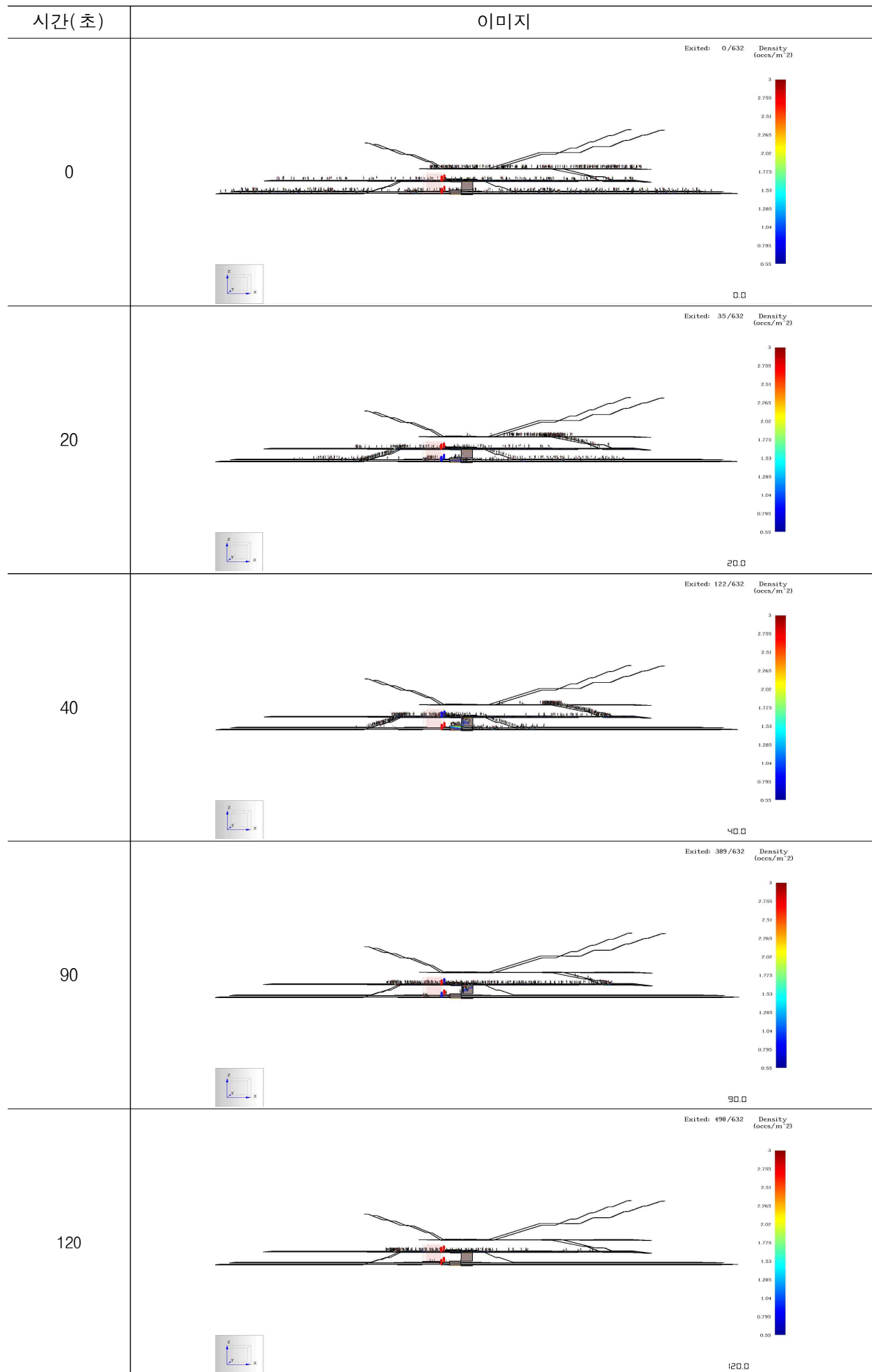


그림 2-46. 시나리오 B의 시뮬레이션 결과

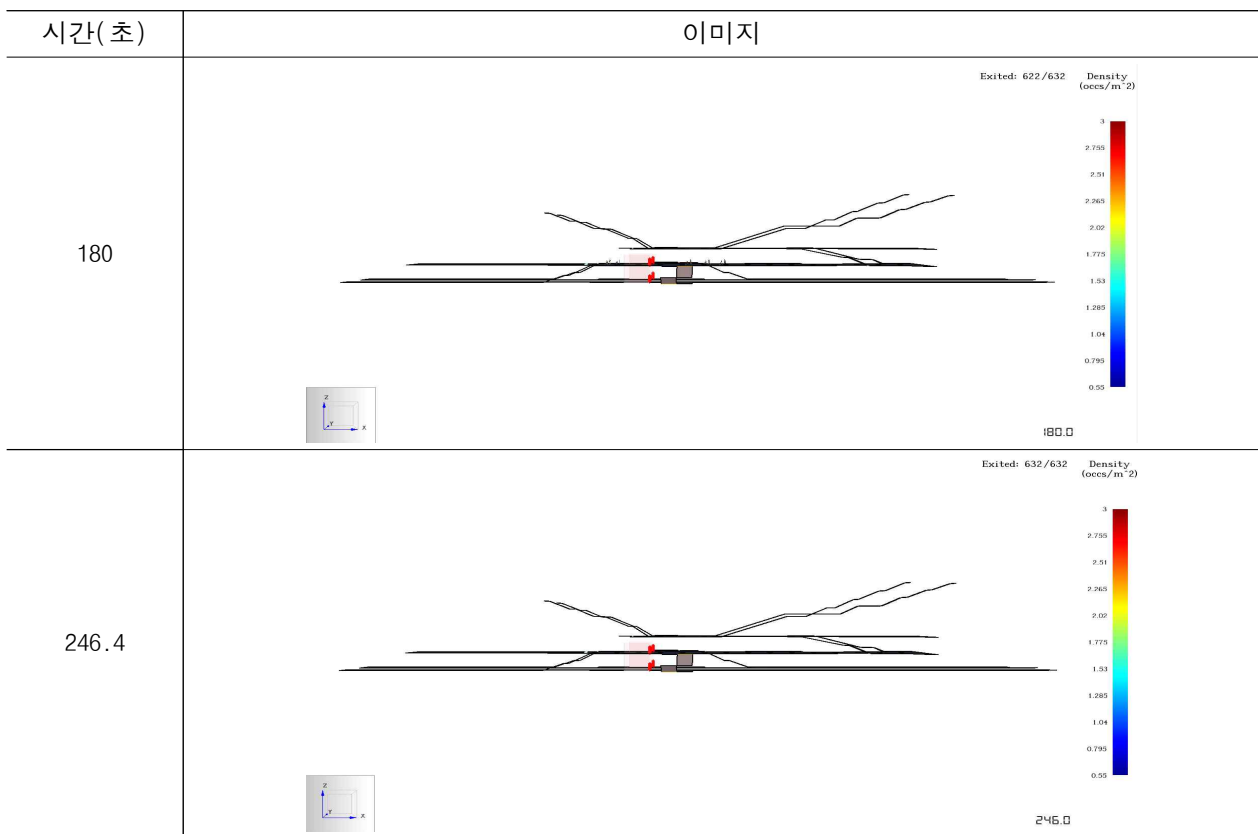


그림 2-46. 시나리오 B의 시뮬레이션 결과

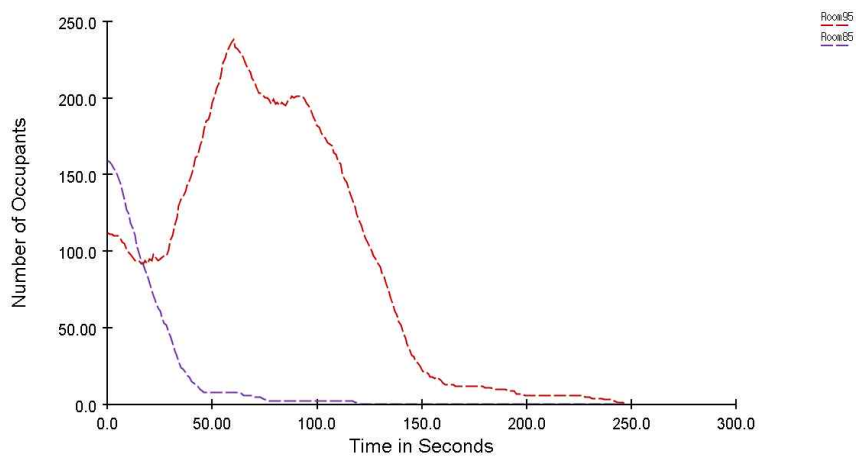


그림 2-47. 시나리오 B의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***			
Simulation:	SIP(B2) ELE-1		
Version:	2020.1.0219		
Mode:	Steering		
Total Occupants:	625		
Completion Times for All Occupants (s):			
Min:	1.0	"00260"	
Max:	246.4	"00011"	
Average:	78.0		
StdDev:	41.6		
Travel Distances for All Occupants (m):			
Min:	0.6	"00260"	
Max:	140.4	"00145"	
Average:	75.2		
StdDev:	36.2		

그림 2-48. 시나리오 B에 따른 시뮬레이션 결과

- 시나리오 B 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 246.4초이고, 평균 78.0초가 소요됨. 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 140.4m, 평균 이동 거리는 75.2m로 나타났다.
- 엘리베이터 속도의 향상에 따라 최대 대피 시간은 시나리오 A 대비 17.31% 줄어든 것을 알 수 있음.
- 이를 통해, 엘리베이터의 속도를 건축설계 기준 및 지하철 내 엘리베이터 설치인 1.0m/s 속도로 대피를 고려한다면 CBRE 상황 발생 시 빠른 대피가 가능할 것으로 판단됨.

○ 시나리오 C

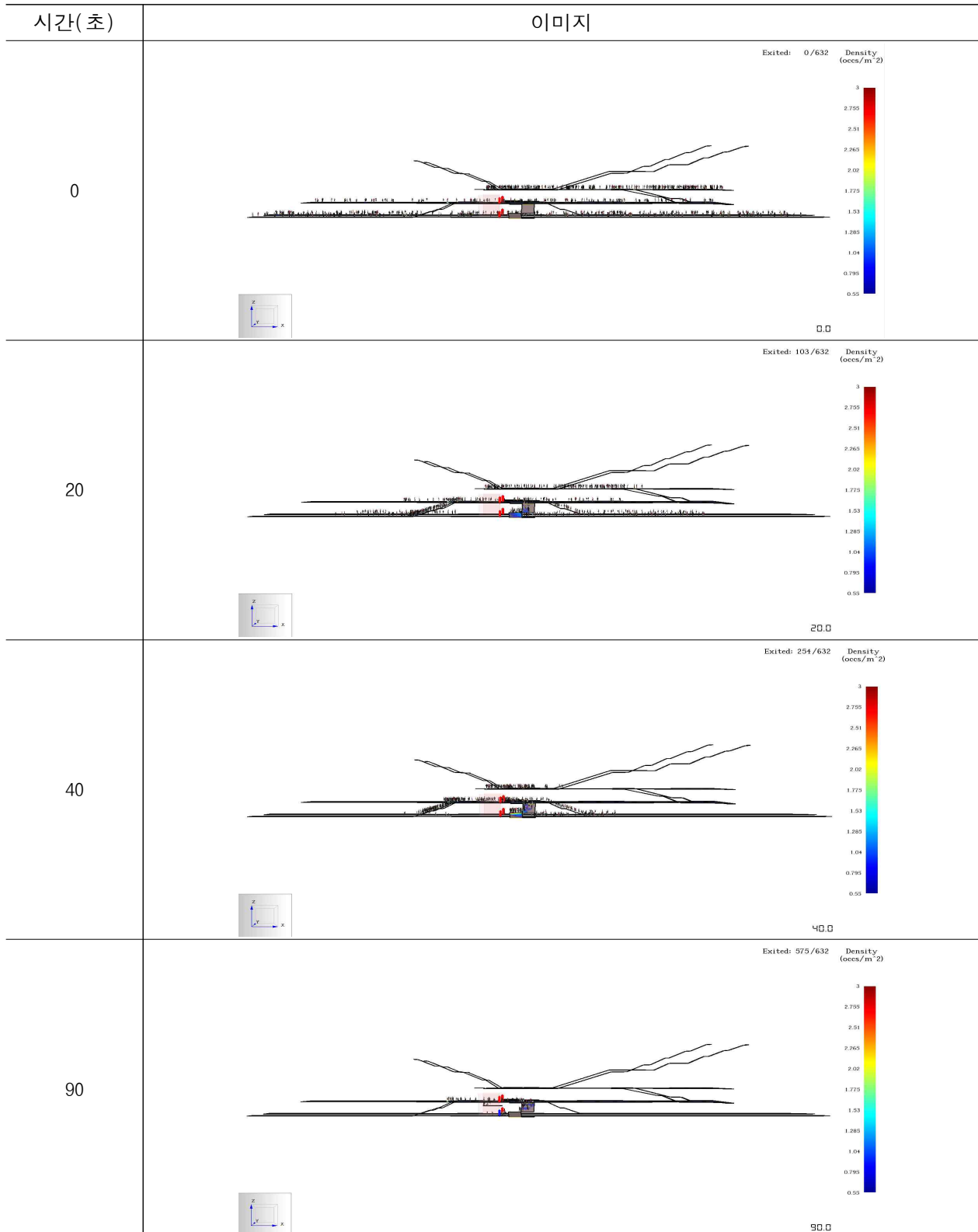


그림 2-49. 시나리오 C의 시뮬레이션 결과

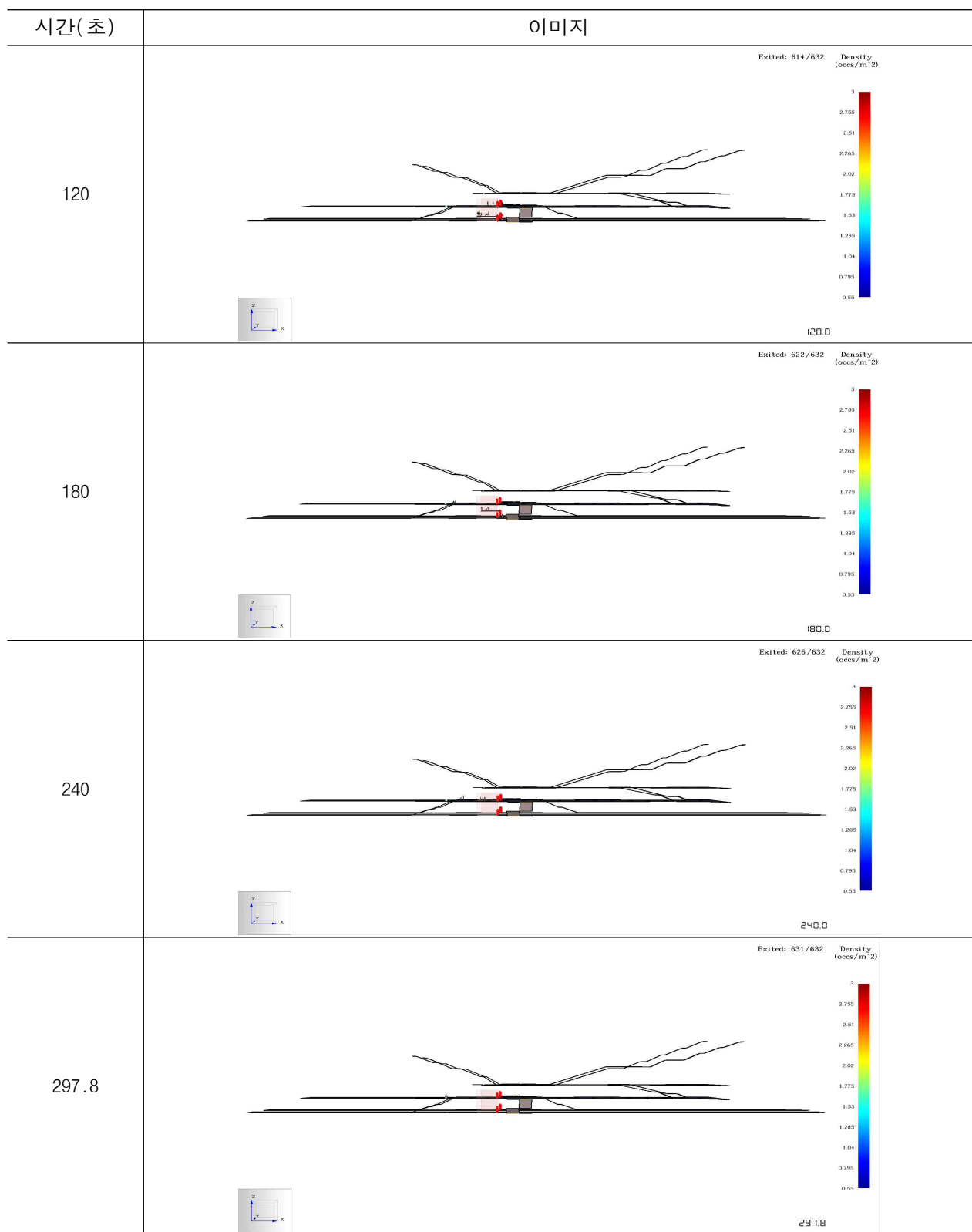


그림 2-49. 시나리오 C의 시뮬레이션 결과

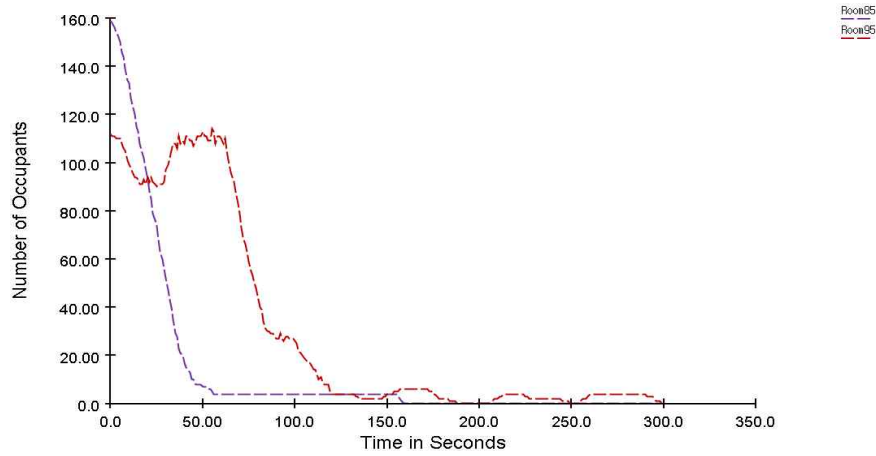


그림 2-50. 시나리오 C의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***			
Simulation:	SIP(B2,B1) ELE-0.5		
Version:	2020.1.0219		
Mode:	Steering		
Total Occupants:	625		
Completion Times for All Occupants (s):			
Min:	1.0	"00260"	
Max:	297.8	"00002"	
Average:	50.0		
StdDev:	34.8		
Travel Distances for All Occupants (m):			
Min:	0.6	"00260"	
Max:	156.1	"00498"	
Average:	50.5		
StdDev:	27.5		

그림 2-51. 시나리오 C에 따른 시뮬레이션 결과

- 시나리오 C 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 297.8초이고, 평균 50초가 소요되었음. 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 50.5m로 나타났음.
- SIP을 지하 1층과 지하 2층을 모두 사용할 경우 평균 대피 시간은 약 50초로 기존 시나리오 A 대비 약 37.19% 대피 시간이 줄어들었음.
- SIP의 접근성 향상으로 인해, 재실자들의 평균 대피 시간은 줄어들었음.
- 최대 대피 시간은 기존 시나리오 A의 최대 대피 시간 297.8초와 거의 차이가 없음을 알 수 있음.
- 이를 통해, SIP의 위치를 2개 층으로 지정할 시 기존 대비 평균적으로는 빠른 대피가 가능하지만, 노약자 또는 장애인을 고려한 최대 대피 시간의 단축이 필요하다고 판단됨.

○ 시나리오 D

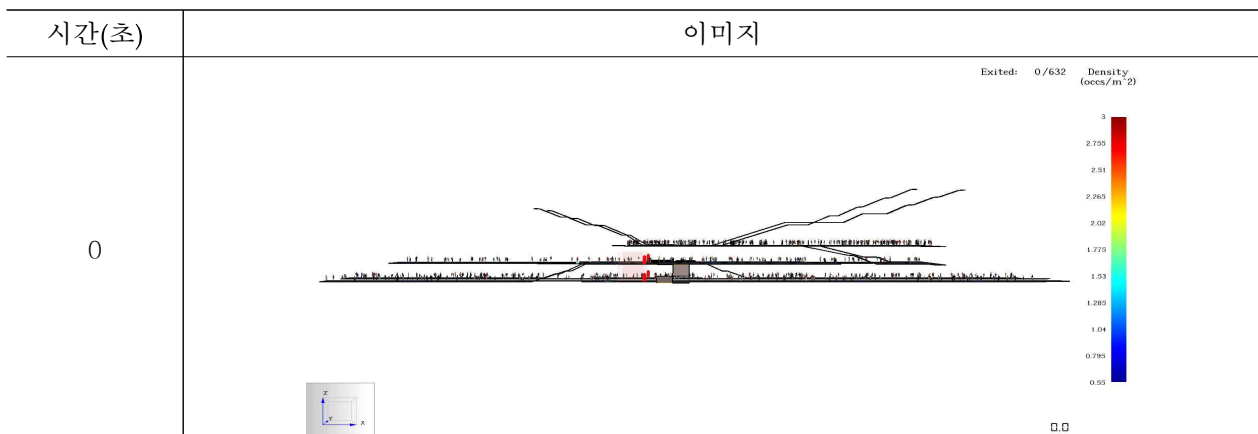


그림 2-52. 시나리오 D의 시뮬레이션 결과

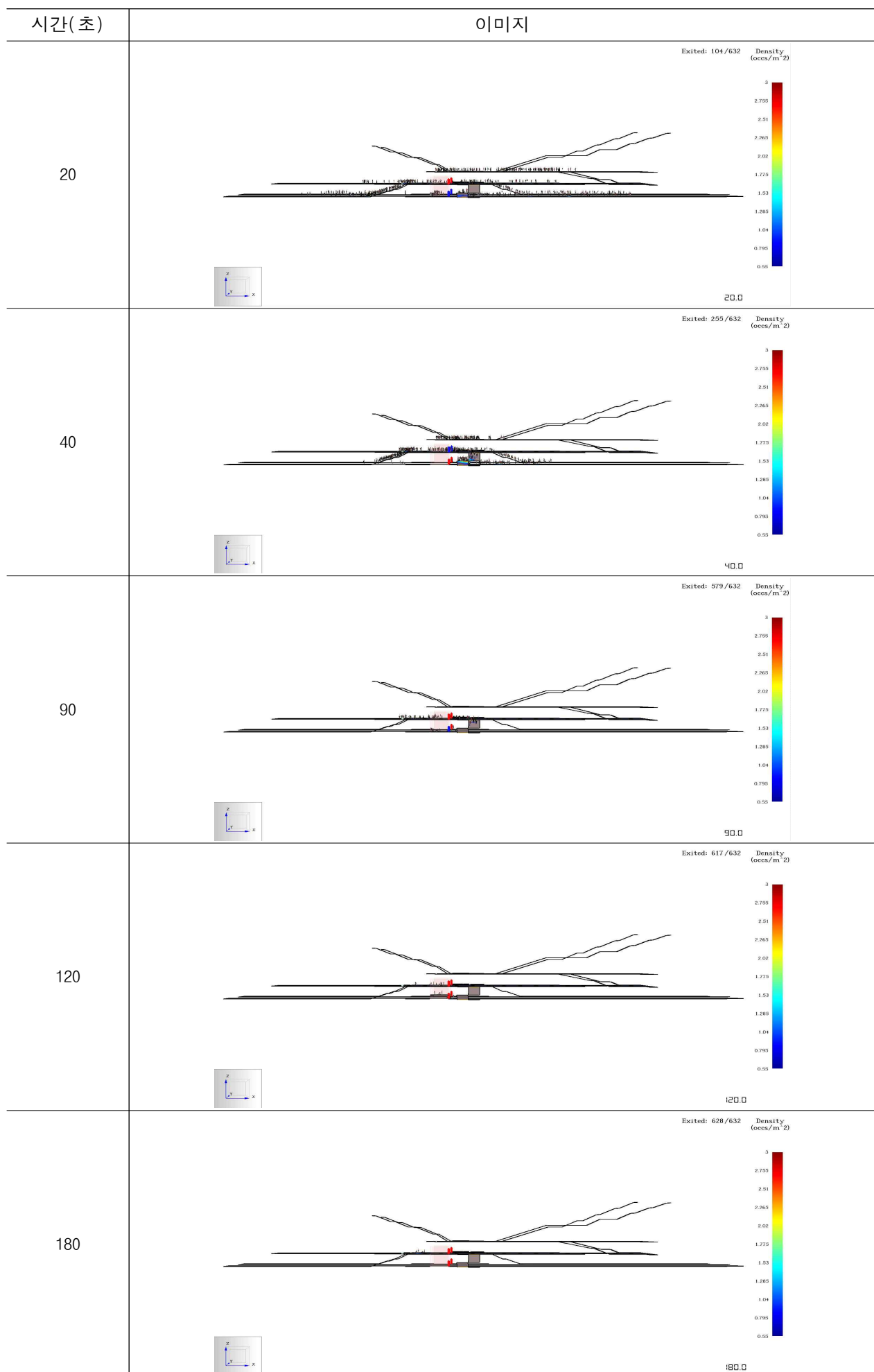


그림 2-52. 시나리오 D의 시뮬레이션 결과

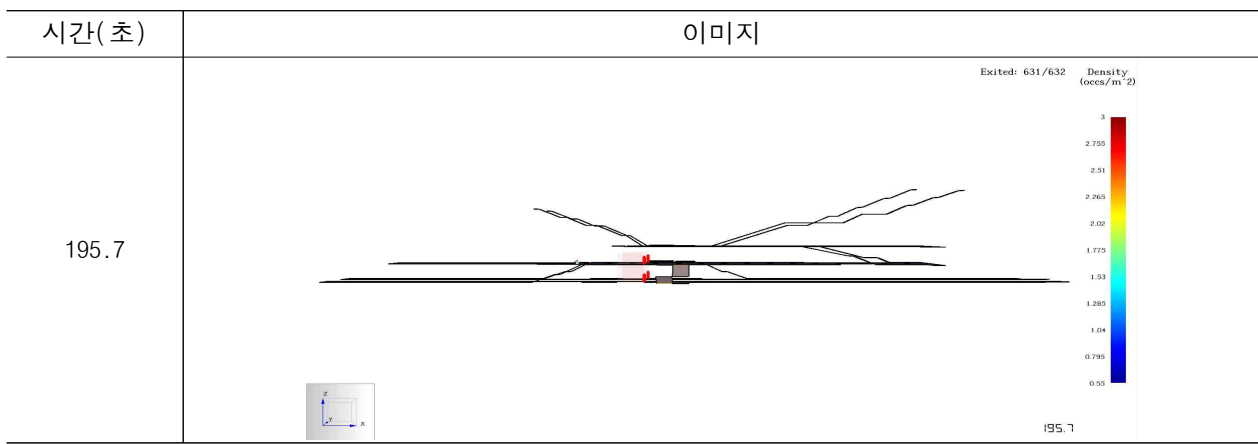


그림 2-52. 시나리오 D의 시뮬레이션 결과

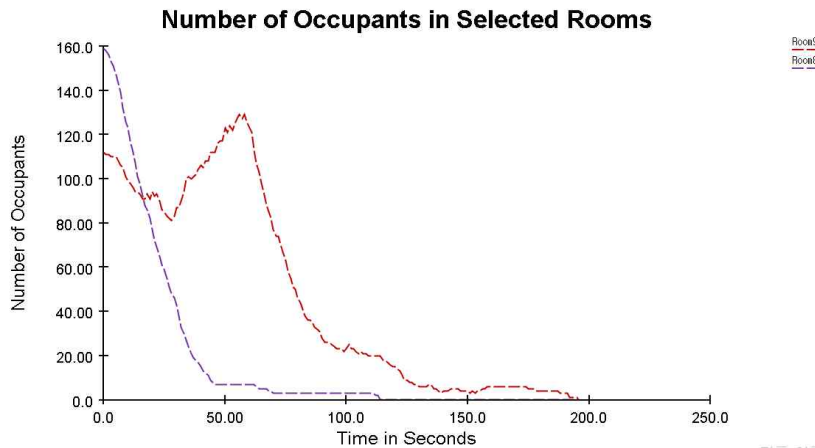


그림 2-53. 시나리오 D의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***			
Simulation:	SIP(B2,B1) ELE-1		
Version:	2020.1.0219		
Mode:	Steering		
Total Occupants:	625		
Completion Times for All Occupants (s):			
Min:	1.0	"00260"	
Max:	195.7	"00003"	
Average:	48.9		
StdDev:	29.7		
Travel Distances for All Occupants (m):			
Min:	0.0	"00447"	
Max:	132.6	"00484"	
Average:	49.7		
StdDev:	27.2		

그림 2-54. 시나리오 D에 따른 시뮬레이션 결과

- 시나리오 D 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 195.7초이고, 평균 48.9초가 소요되었음. 최대 이동 거리가 132.6m, 평균 이동 거리는 49.7m로 나타났음.
- 시나리오 D는 시나리오 C와 대비 엘리베이터의 속도가 향상되고, 시나리오 B에 대비 SIP의 접근성이 향상되었음. 시나리오 D는 시나리오 A, B, C 대비 평균 대피 시간이 약 38%, 37%, 2.2% 줄어들었고, 최대 대피 시간은 약 34%, 20.57%, 34.28% 줄어들었음.
- 이를 통해, SIP을 지하 1층과 지하 2층 모두 사용하면서 동시에 엘리베이터의 설계속도를 향상할 시 평균 및 최대 대피 시간이 모두 감소할 뿐만 아니라, 대피 시 정체 현상을 줄여 안전한 대피가 가능할 것으로 판단됨.

○ 시나리오 결과 비교

- 위의 상황은 소요시간 비교를 위하여, 같은 조건에서 보행자를 무작위로 배치하였으며, 산정된 휠체어 인원수를 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 배치하였음.
- 시뮬레이션 결과 엘리베이터 속도 여부에 상관없이 평균 대피 시간은 모두 유사하게 나타난 것을 알 수 있음. 하지만, 총 대피 시간은 시나리오 A, B, C, D는 각각 298초 (4.96분), 246.4초 (4.10분), 297.8초 (4.96분), 195.7초 (3.26분) 소요되었음. SIP 위치를 2곳 사용과 엘리베이터의 속도를 변경한 시나리오 D의 최대 대피 시간은 시나리오 A, 시나리오 B에 대비 각각 34.28%, 20.57% 향상되었음.
- 국토교통부 고시의 지하철 역사의 피난 한계 시간 지침에서 마지막 피난자가 승강장을 탈출하는데 4분, 안전지대로 대피하는 데까지의 시간을 6분으로 제안하고 있음.
- 시나리오 D에 따른 설계 시 위의 2가지 규정을 모두 만족하게 함.
- 이를 통해 평균 대피 시간은 엘리베이터의 속도 여부보다는 대피로의 배치 또는 계단을 통한 대피가 지배적이지만, 재난 발생 시 노약자 또는 장애인의 신속한 대피를 고려한다면 엘리베이터의 속도가 1.0m/s 이상 설계하여야 대피 시간 단축 효과가 우수한 것을 알 수 있음.
- 따라서 본 연구에서는 CBRE 상황 시 지하철 역사에서 대피 계획 시 엘리베이터를 활용하는 것과 엘리베이터의 운행속도를 건축설계 대사전예에 제시하고 있는 1.0m/s로 활용하는 것을 제안함.
- 엘리베이터 이용 대수 및 SIP 위치 선정에 따른 대피자 전원이 SIP으로 이동하는데 소요된 시간은 아래 표 2-15과 같음.

표 2-15. 시나리오에 따른 대피 시간

시나리오	평균 대피 시간 (초)	최대 대피 시간 (초)
계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 2층)	79.6	298.0
계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 2층)	78.0	246.4
계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	50.0	297.8
계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	48.9	195.7

5.2.2 시설물 내 대피시설 최적 위치 선정 가이드라인 (가이드라인 개발)

- 현재, 공공시설의 대피시설물은 방호성능도 중요하지만 설치되는 위치도 중요함. 이용자가 위급한 상황에서 신속하게 대피할 수 있고 모든 대피자들을 수용할 수 있는 위치에 있어야 함. Shelter는 대피자를 얼마나 많이 수용할 수 있는지에 대한 “수용력”도 중요한 인자지만, 최소한의 시간으로 정해진 모든 인원을 수용할 수 있는 위치에 선정되어야 함. 본 연구에서는 공공시설물의 대피시설에서 가장 적합한 위치의 대피 시설과 크기에 대해서 검토하고 현 대피시설의 개선할 점에 관해서 연구해 보기로 함.

○ SIP 위치 선정

- SIP 위치 선정은 시뮬레이션 과정에서 가장 중요한 요소 중 하나임.
- FEMA(Federal Emergency Management Agency, 미국 연방 재난관리청) Risk Management Series 중 Design Guidance for Shelters and Safe Rooms에서는 Shelter의 위치 선정 시 가장 중요한 것 중 하나는 얼마나 많은 사람을 수용할 수 있는 “수용력(Capacity)” 임.
- SIP 선정은 시설물 내에서 단순히 면적을 통해 산출되는 것이 아닌, 공간 구획 물 등을 제외한 실질적인 면적을 통해서 계산되었음.
- Shelter까지의 경로는 쉽게 접근 가능해야 하며 경로마다 표시도 명확해야 함.

- Shelter는 주변 위험 요소로부터 완벽히 보호 가능한 곳이면서, 60m² 의 방송 청취가 가능한 공간을 만족해야 함.
- SIP으로 지정된 지하 2층 및 1층의 유효면적으로 각각 1,945m² , 433m² 임.
- 지하 3층은 지하철 도어가 유리로 구성되어 있어, 재난 발생 시 파편으로 인한 2차 피해가 예상됨. 따라서, 본 연구에서는 지하 1층 및 지하 2층을 SIP으로 지정하였음.
- FEMA 453에 따르면, 대피자들의 Shelter 재실 시간이 24시간을 넘는지 안 넘는지에 따라 수용 가능 인원이 달라짐.
- SIP 내 재실 시간이 24시간 이상일 경우, 1인용 침대를 사용할 경우 5.6m²/person이며, 2층 침대를 사용할 경우 2.8m²/person이 필요함.
- 반면 재실 시간 24시간 미만 시 수면이 필요 없게 되므로 1인당 필요 면적은 이보다 훨씬 적은 1.86m² /person으로 규정하고 있고, 대피공간의 수용력이 보다 향상됨.
- 계산상으로 수면이 불필요한 24시간 이내로 필요 면적을 산출할 경우 지하 1층의 1구역과 지하 2층의 2, 3구역의 수용인원은 각각 232.79명, 1045.69명으로 총 1278.48명이 머물 수 있음.
- 수면이 필요한 24시간 이상의 경우, 2층 침대를 사용한다면 하더라도 지하 1층은 154.64명, 지하 2층은 694.64명이 수용 가능하여 총 849.28명을 수용할 수 있음.
- 비상 상황 시 외부에서 발생한 테러로부터 실내 대피자들의 안전을 보장하기 위해 SIP은 최대 인원을 수용할 수 있으며 외부로부터 닫힌 공간이어야 함. 지하 2층에서 개찰구를 기준으로 외부와 차단되는 방호장치를 설치한다면 2번 구역만으로도 본 역사의 최대 인원인 625명을 수용할 수 있으므로, 3구역을 제외한 1과 2구역을 SIP으로 지정하였음.

○ 최적 대피로 분석

- 시설물 내 최적 위치는 테러로부터 완벽하게 보호될 뿐만 아니라, SIP 경로까지 최소한의 시간으로 도달할 수 있는 위치로 선정되어야 함.
- SIP을 지하 2층과 지하 1층을 동시에 활용할 경우, SIP을 지하 2층으로만 구성되어 있을 때보다 평균 대피 시간은 약 29.6초 줄어들어 약 37% 이상 대피 시간이 단축되었음.
- 시설물 내의 최적 SIP은 지하 1층의 1번 구역과 지하 2층의 2번 구역을 동시에 활용할 경우, 대피 소요시간이 20% 이상 줄어드는 것을 알 수 있음.
- SIP을 지하 1층 1번 구역과 지하 2층의 2번 구역을 동시에 활용할 경우, 지하철 내 모든 대피 인원인 625명을 모두 수용할 수 있을 뿐만 아니라, 최소 대피 시간으로 재실자들이 모두 대피할 수 있는 것을 확인하였음. 지하 1층의 1번 구역과 지하 2층의 2번 구역은 이를 모두 만족할 수 있는 SIP임.

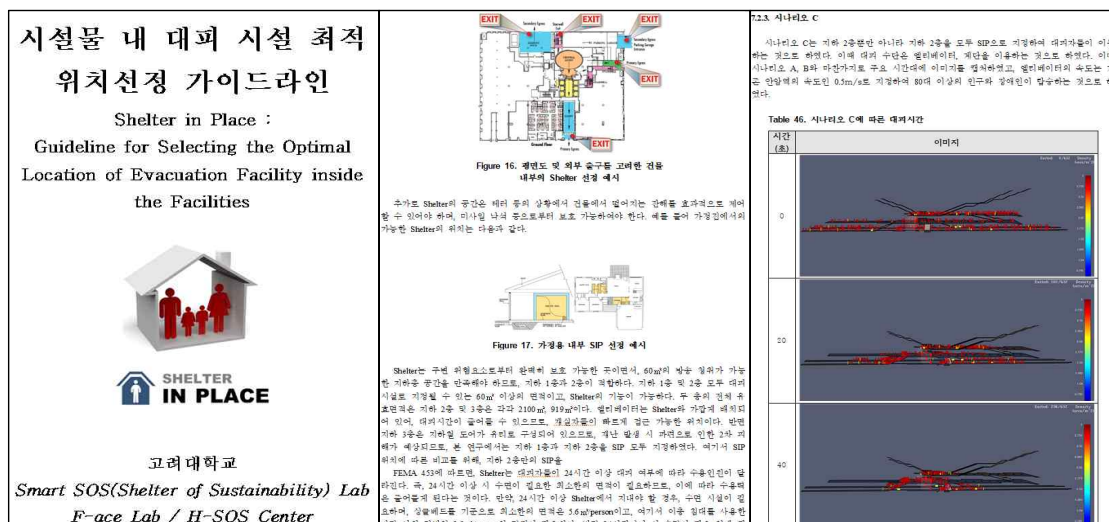


그림 2-55 최적 위치 선정 가이드라인

5.2.3 대피 알고리즘 개발 및 대피교육용 VR 콘텐츠 개발 (VR 제작)

- 대피 시뮬레이션은 건물의 재실자들이 실제로 재난 상황에 직면했을 때 연구하는 것이 가장 효과적이지만, 이는 실질적으로 불가능함. 따라서 보통 대피 시뮬레이션에는 인간 행동방식을 모방한 컴퓨터 프로그램들을 사용하는 것이 일반적임. 하지만 이 또한 재난 상황 시 실제 사람들의 대피 행태를 정확하게 구현할 수 없음.
- 대피 알고리즘
 - 대피 시뮬레이터에 알고리즘을 적용하여 최적에 가까운 대피 시간 및 경로를 제공할 수 있음. 설정한 대피 인원수, 시설물 내 대피경로를 모형화하여 최적의 대피경로를 제시하였음.
 - 대피자가 위치한 구역에서 지정된 장소까지 가장 가까운 거리를 습득하여, 시나리오에 따른 대피경로의 결과를 비교하였음.
 - 좁은 구역을 통과할 때는 정체 현상이 쉽게 발생하므로, 이에 장애인 또는 노약자는 엘리베이터를 통한 대피경로를 입력하였음. 인간의 행동 분석은 일반적으로 가깝고 최단 거리에 있는 경로를 통해 대피하므로, 이를 대피할 시 반영하였음.
 - 이동구간에 병목현상을 제어하는 것이 최적 대피의 핵심임. 산출된 대피경로는 추후, 대피 및 재난 상황에 따른 효율적인 대피경로를 제시할 수 있음.
- 대피교육용 VR 콘텐츠 제작
 - Virtual Reality (VR)은 일반적으로 가상세계 현황을 실시간으로 자유롭게 알 수 있는 환경을 의미함. VR은 BIM 모델링 데이터와 연계해 실제와 가까운 가상현실을 간접적으로 체험할 수 있게 함.
 - 재난 대피 시뮬레이션에 관한 연구에 따르면 시뮬레이션의 중요한 변수 중 하나는 계단 높이와 폭임. 스캐닝 Target 배치를 통해 획득한 지하철의 계단 높이와 폭을 VR 제작과정에 반영하였음.
 - 가공된 BIM 모델링 데이터를 Autodesk Revit Live Data와 연계해 VR 장비인 HTC VIVE, Oculus Rift를 활용하였음.
 - 대피 과정은 PC와 마우스 및 키보드 조작을 통해 재난 상황에 따른 대피 시뮬레이션을 진행하였음.
 - 대피 시뮬레이션의 경로는 크게 2가지로, 첫 번째 경로는 지하 1층에서 지하 2층으로의 대피 시뮬레이션, 두 번째 경로는 지하 3층에서 지하 2층으로의 대피경로임.
 - 대피 VR 영상은 교육용으로 사용되어 재실자들의 행태를 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 시설물 내 재난 상황 발생 시 참고자료로 활용될 수 있음.



(a) 대피 모델링

그림 2-56. 안암역 지하 및 전체 단면



(b) 대피경로 표시



(c) 계단 대피경로



(d) 에스컬레이터 대피경로

그림 2-56. 안암역 지하 및 전체 단면

5.3. Task 3 : FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발

5.3.1 보강 기법이 적용된 구조부재 충격저항 실험

5.3.1.1 보 부재 실험 변수 및 시험체 상세

- 설계 기준강도 45MPa인 일반 콘크리트 매트릭스를 사용함. 보의 치수는 125×250×2438mm이고 정 하중 시험과 충격하중 시험은 모두 3점 재하 방법을 채택함.
- 기존의 FRP를 통한 보강 기법 현황분석 및 기존에 수행한 실험결과 등을 바탕으로 구조부재의 보강성능을 평가하였음.
- 보강 부재의 구조적 성능검증을 위해 일반 콘크리트 부재에 탄소섬유 시트 및 고성능 시멘트 복합체 /120MPa-NSHSDC를 적용한 보 부재의 정하중 실험을 수행하였으며, 예측된 결과를 선행연구 결과와 비교하여 보강방법에 따른 구조 성능을 평가하였음.

표 2-16. 일반강도 콘크리트의 배합

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
43	47	165	380	818	921

표 2-17. NSHSDC 배합설계

Type	w/b	Unit Weight					Fiber		SP
		Water	Cement	Silica Fume	Silica Filer	Silica Sand	SF*	PE**	
							(%)		
NSHSDC	17.2	0.215	1.00	0.25	0.30	1.10	1.0	0.5	3.0

* NSHSDC = no-slump high-strength, high-ductility concrete; w/b = water to binder ratio;

SF = steel fiber; PE = polyethylene fiber; SP = superplasticizer.

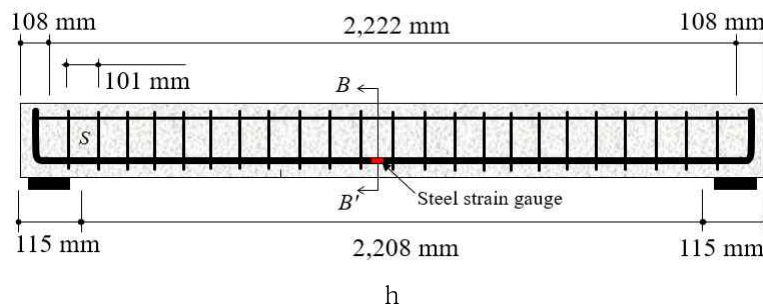
표 2-18. 사용된 섬유의 물성

Type of fiber	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio (Lf/df)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Steel fiber	0.2	19.5	97.5	7.80	2,650	200
Polyethylene fiber	31 μm	12.0	387	0.97	2,900	100

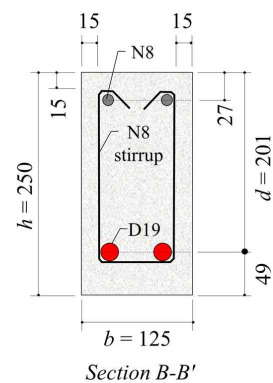
표 2-19. 실험 변수

Variable	Details	Notation
Normal Concrete	Normal Concrete with Shear Reinforcement	NCS
CFS	Top and Bottom Retrofitted with CFS	CFTB
	Bottom and Side Retrofitted with CFS	CFBS
	All Retrofitted with CFS	CFTBS
NSHSDC	Bottom Reinforced with NSHSDC	NSCB
	Top and Bottom Reinforced with NSHSDC	NSCTB

* CFS = carbon-fiber-sheet



(a) 부재 상세



(b) 부재의 단면

그림 2-57. 보 시험체 상세

5.3.1.2 시험체 set-up

○ 정하중 시험

- UTM의 하중 재하 용량은 500kN이고, 재하 속도는 0.2mm/s임.
- 액추에이터에 로드 셀을 설치하여 재하 하중을 측정하였음.
- 보 중앙에 두 개의 LVDT를 설치하여 부재의 변위를 측정함.

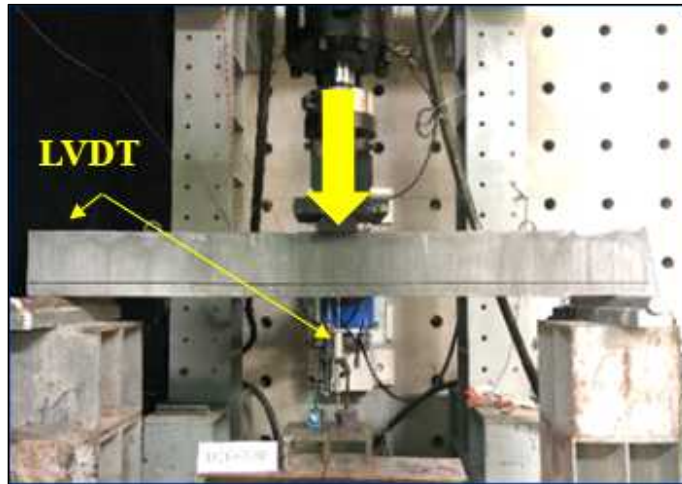


그림 2-58. 정하중 시험체 setup

○ Drop-weight 충격하중 실험

- Drop hammer의 관성력을 무시하기 위해 지점 부에 두 개의 로드 셀을 설치하였고, 이로부터 지점 반력을 얻을 수 있음.
- 부재 중앙부의 처짐을 측정하기 위하여 측정 용량 100mm의 포텐시오미터 (potentiometer)를 에폭시를 이용하여 보의 중앙부 하단에 부착함.
- 부재 중앙 하단에 레이저 타입의 Linear Variable Differential Test (LVDT)를 설치하여, 충격하중에 따른 실시간 변위를 계측할 수 있음.
- 각 단계의 낙하 중량은 300kg, 낙하 높이(충돌속도)도 2000mm로 같이 설정하여 실험을 수행함.

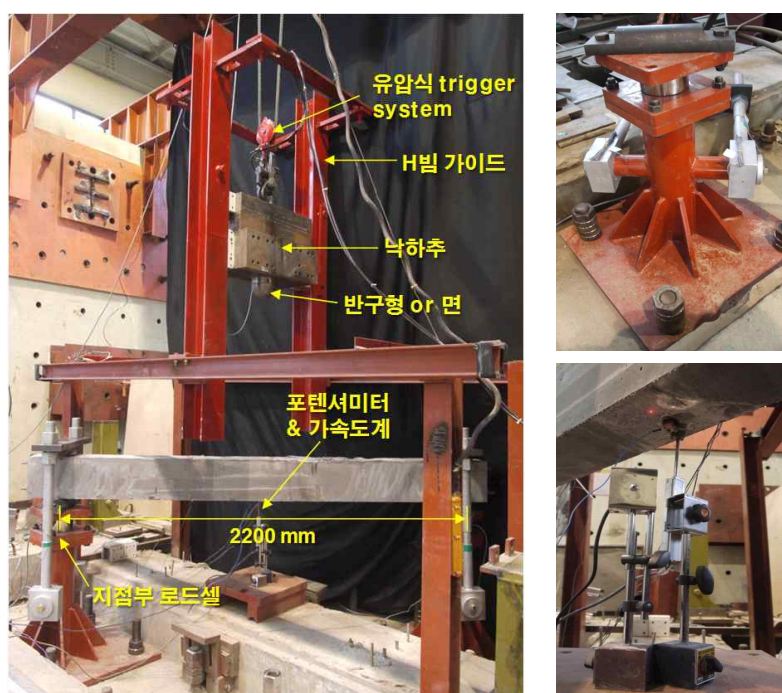


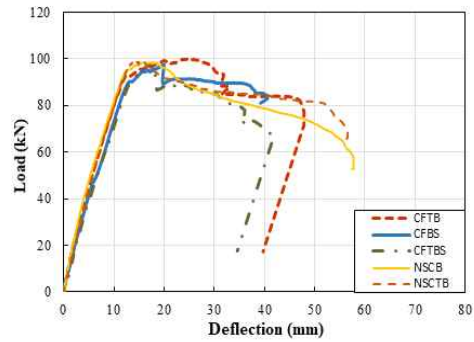
그림 2-59. 내 충격 성능평가 시험장비

5.3.1.3 보 구조 실험결과

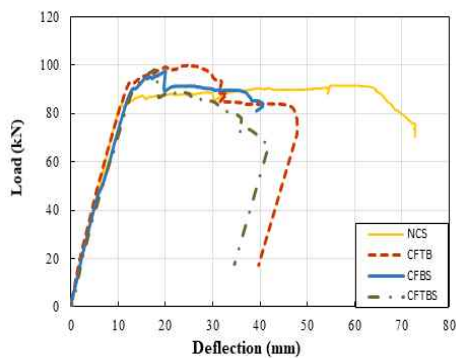
(1) 보 구조부재 정하중 시험

○ 하중 및 처짐

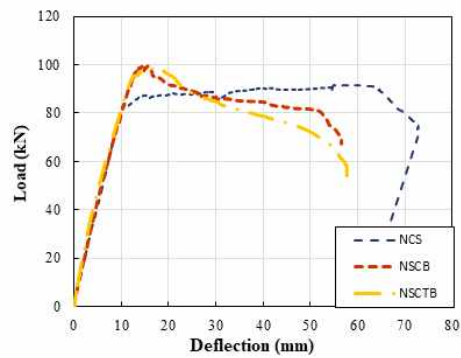
- 정하중 실험결과 균열 하중의 경우 NC 및 NCS 부재에서 각각 11.81kN, 12.88kN이 발생하였음.
- 보강을 진행함에 따라 균열 하중 또한 증가하는 경향을 보였고, 이는 보강량 증가에 따른 부재의 초기 강성 증진으로 판단됨.
- 최대하중의 경우 보강을 진행한 부재는 모두 97kN ~ 100kN로 유사한 것으로 나타남. 이는 보강 전 대비 약 10% 정도 최대하중이 상승한 것을 확인할 수 있음.



(a) CFS & NSHSDC series



(b) CFRP series



(c) NSHSDC series

그림 2-60. 휨 부재의 보강 기법에 따른 정하중 시험결과

표 2-20. 정하중 시험결과 요약

Specimen	Maximum load (kN)	Maximum deflection (mm)	1 st crack load (kN)	Dissipated energy (kJ)
NCS	91.58	55.08	12.88	5.73
CFTB	100.08	24.95	14.40	4.10
CFBS	97.67	19.65	14.83	3.12
CFTBS	98.16	18.03	14.88	3.11
NSCB	98.43	16.39	13.83	4.40
NSCTB	99.38	14.61	18.14	4.48

- 최대하중 시 발생하는 부재의 최대 처짐은 CFTB, CFBS, CFTBS 부재에서 각각 24.95mm, 19.65mm, 18.03mm로 보강 면이 늘어남에 따라 처짐이 줄어드는 경향을 보임. 이는 탄소섬유 시트의 보강면적 증가에 따라 최대하중까지 부재의 강성이 증진된 것으로 판단됨.

- NSHSDC로 보강된 부재도 NCS 부재 대비 약 8%의 최대하중이 증진된 것을 확인할 수 있음. 최대하중 작용 시 부재에 발생한 처짐은 NSCB 및 NSCTB 부재에서 각각 16.39mm, 14.31mm가 발생하였음.
- NSCTB 부재는 기준 보(NCS) 대비 약 75% 최대 처짐이 감소하였고, FRP로 보강한 부재들(CFTB, CFBS, CFTBS) 대비 약 41% 줄어들었음.
- NSHSDC로 보강된 NSCB 및 NSCTB 부재는 NSHSDC에 포함된 하이브리드 섬유유의 가교역할로 인해 최대하중 이후에 부재에 큰 처짐이 발생함.

○ 보강방법에 따른 영향

- CFS 보강 부재는 보강방법에 따라 CFTB, CFBS, CFTBS로 분류하였음. CFTB 및 CFTBS 부재는 최대하중 이후, CFS의 파단 및 압축부 콘크리트의 압축파괴가 일어났음.
- CFBS 부재는 CFTB 부재 대비 콘크리트의 압축파괴는 적게 발생하였지만, 인장부의 CFS 보강 겹수의 증가에 따른 CFS의 조기 탈락이 발생하였음. 즉, 콘크리트 부재 내부에 휨 균열이 발생하여 CFS와 콘크리트의 박리(Delamination)가 나타났다는 것임.
- 한편, NSHSDC로 보강한 부재는 보강방법에 따라 NSCB 및 NSCTB 부재로 분류하였음. NSCB 부재는 인장부에 다수의 휨 균열이 진행된 후, 콘크리트 압축파괴가 일어났음. 이는 직선형 강섬유가 가교역할을 하여, 최초 균열 발생 이후 콘크리트 인장부에 다수의 균열이 추가로 생성되었기 때문임.
- 반면 NSCTB 부재는 상부 NSHSDC 보강면의 영향으로 NSCB 부재 대비 콘크리트 압축파괴가 현저히 줄어들었음.

○ 연성 및 에너지 소산 능력 비교

- Ductility Index(연성지수)는 최대하중 이후 부재의 하중 저항능력을 평가하는 데 사용되며, 다음의 식으로 부재의 연성을 평가하였고, 에너지 소산 능력은 표 2-20에 나타나 있음.

$$Ductility\ Index = \frac{\phi_p}{\phi_y} \quad (1)$$

$$Ductility\ Index = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2)$$

- 여기서 ϕ_p 는 각각 최대하중 작용 시 구조 부재에 발생하는 처짐을, ϕ_u 는 최대하중 이후에 구조 부재에 발생하는 최대 처짐을 의미하며 구조 부재의 연성능력을 나타내는 지표임. 또한, ϕ_y 는 항복 하중 시 발생하는 구조 부재의 처짐을 나타낸 것임.
- 연성지수의 평가에는 식(1)과 식(2)의 기준이 있지만, 콘크리트 부재는 최대하중 이후에도 부재의 변형이 계속 발생한 후 실험체가 파괴된다는 점에서 식(2)을 기준으로 구조부재의 연성을 평가하였음.
- 에너지 소산 능력은 하중-처짐 곡선에서 구조물에 발생한 최대 처짐 지점을 기준으로 하여, 그 점에서 수직으로 내린 구간까지의 넓이로 구하였음.
- CFTB, CFBS, CFTBS 부재의 연성지수는 각각 3.72, 3.08, 3.02이고, 에너지 소산 능력은 각각 4.10, 3.12, 3.11임.
- CFS로 보강한 부재는 보강면적이 넓어짐에 따라 연성지수 및 에너지 소산 능력이 감소하는 경향을 보임. 특히 CFTB 부재는 CFTBS 부재 대비 연성지수 및 에너지 소산 능력이 약 18%, 31%가 감소한 것을 알 수 있음. 이는 CFS의 U형 보강에 따라 콘크리트 부재에 발생한 처짐은 줄어들었으나, 보강재의 강성이 커짐에 따라 CFS의 최대 저항능력이 발현되기 전에 콘크리트 부재에 작용하는 인장 응력이 콘크리트의 인장 한계를 넘은 것으로 판단됨.
- 반면 NSCB 및 NSCTB 부재의 연성지수는 각각 4.60, 4.72이고 에너지 소산 능력은 각각 4.40, 4.48임. 최대하중 이후 NSHSDC로 보강한 부재는 CFS로 보강한 부재보다 연성지수 및 에너지 소산 능력이 더 높은 것을 알 수 있음.

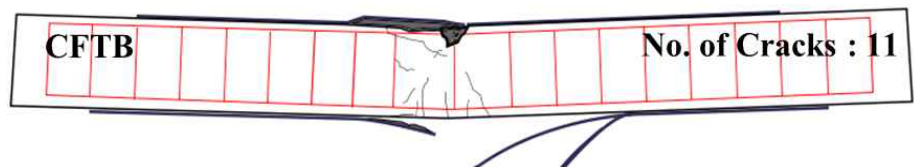
○ 파괴모드 및 균열

- CFS로 보강한 보의 파괴모드는 콘크리트, 철근, CFS 및 에폭시 등에 의해 영향을 받음.

- CFS로 보강된 콘크리트의 파괴모드로 휨 파괴, 콘크리트 압축파괴, 전단파괴, CFS의 부착 파괴, 콘크리트 피복탈락 등이 발생하였음. 반면에 NCS 부재는 휨 파괴가, CFTB 부재는 CFS와 콘크리트가 함께 탈락하는 계면 부착 파괴가 발생하였음.
- 전반적으로 CFS를 부착한 부재는 최대하중 이후 급격한 내력 저하로 인해, 균열발생량이 NSHSDC로 보강한 부재보다 더 적게 나타남. 특히, CFBS 및 CFTBS 부재는 CFS의 부착으로 균열을 거의 확인할 수 없었음.
- 이는 최대하중 이후 콘크리트 내부에 휨 균열이 발생함에 따라 추가적인 균열이 발생하지 않고 급격히 하중이 감소한 것으로 판단됨.
- NSHSDC로 보강된 부재는 CFS로 보강한 부재 대비 인장부에 다수의 균열이 발생하였고, 균열 폭이 더 좁게 나타남. NSCB 부재는 하중 재하면의 콘크리트 압축파괴가 발생하였음. NSCTB 부재는 상부 보강면의 영향으로, NSCB 부재 대비 콘크리트 압축파괴가 줄어든 것을 확인할 수 있음.

표 2-21. 균열 개수와 파괴 모드

Specimen	Number of cracks	Failure mode
NCS	22	Flexural Failure
CFTB	11	Carbon Fiber Sheet Rupture
CFBS	-	Carbon Fiber Sheet Delamination
CFTBS	-	Carbon Fiber Sheet Delamination
NSCB	37	Flexural Failure
NSCTB	61	Flexural Failure



(a) 탄소섬유 시트로 2면 보강된 부재



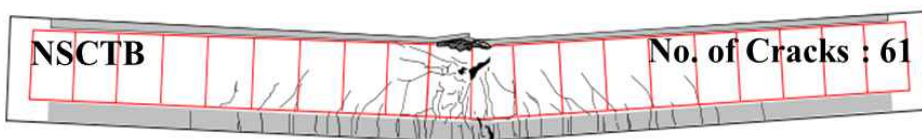
(b) 탄소섬유 시트로 3면 보강된 부재



(c) 탄소섬유 시트로 4면 보강된 부재



(d) 섬유보강 시멘트 복합체로 하부 보강된 보 부재



(e) 섬유보강 시멘트 복합체로 상부, 하부 보강된 보 부재

그림 2-61. 보 시험체 파괴모드

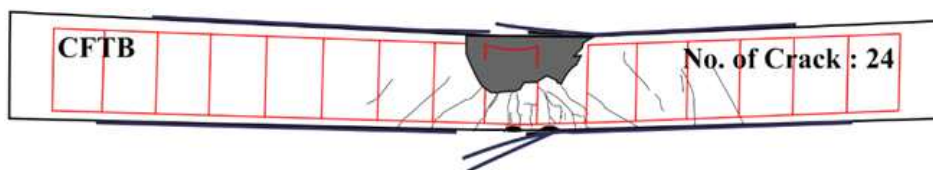
(2) 보 구조부재 충격 시험

○ 반력 하중 및 처짐

- 부재의 충격 저항성을 평가하기 위해, 내 충격 성능평가지표 중 최대/잔류 처짐, 균열 양상 및 파괴 모드의 지표가 사용됨.
- 최대 변위는 부재 배면 중앙부에서의 발생한 처짐을 사용했으며, NCS와 같이 부재의 파괴로 인한 과도한 변위가 발생하는 경우, 부재에 최대하중이 작용하는 순간을 파괴 시점으로 하여 최대 변위를 정의함.
- 탄소섬유 시트로 4면 보강된 부재는 탄소섬유 시트로 2면 보강된 부재 대비 최대 처짐은 약 46.54%, 잔류 처짐은 약 24.87% 줄어들었음.
- 동일 보강면에 대한 비교 시 NSCTB는 CFTB 대비 최대 및 잔류 처짐이 다소 감소하였음.
- NSCB는 큰 처짐 및 심각한 부착 파괴가 발생하여, 1면 보강으로는 부재의 내 충격 저항성능이 불리하다고 판단됨.
- 정하중 시험결과와는 다르게 충격 실험에서는 보강면이 늘어남에 따라 최대 및 잔류 처짐이 감소하는 것을 알 수 있음. 그러나 보강하지 않은 NCS는 심한 파괴가 발생하여 최대 및 잔류 처짐을 측정할 수 없었고, NSCB에서는 NSHSDC의 부착 파괴로 잔류 처짐을 측정할 수 없었음.
- NSCB는 가장 큰 최대 처짐을 보였고, 인장부에 NSHSDC의 부착파괴가 발생하여 잔류 처짐을 확인할 수 없었지만, NSCTB는 NSHSDC의 강섬유 및 PE 섬유가 가교역할을 하여 최대 처짐이 NSCB 대비 약 60% 줄어들었음.

표 2-22. 충격하중 실험결과 요약

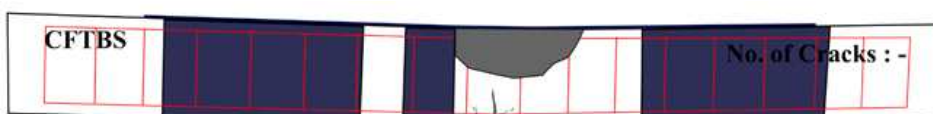
Specimen	Number of drops	Maximum deflection (mm)	Residual deflection (mm)
NCS	1	—	—
CFTB	1	71.76	33.46
CFBS	1	44.66	33.03
CFTBS	1	38.36	25.14
NSCB	1	92.19	—
NSCTB	1	44.33	31.46



(a) 탄소섬유 시트로 2면 보강된 부재



(b) 탄소섬유 시트로 3면 보강된 부재



(c) 탄소섬유 시트로 4면 보강된 부재

그림 2-62. 보 시험체 파괴모드



(d) 고성능 섬유보강 시멘트 복합체로 하부 보강된 보 부재

(e) 고성능 섬유보강 시멘트 복합체로 상부, 하부 보강된 보 부재

그림 2-62. 보 시험체 파괴모드

표 2-23. 지점회전각과 UFC-3-340-02의 damage level

Specimen	Support rotation (°)	Damage level
NCS	-	-
CFTB	3.70	Moderate
CFBS	2.30	Moderate
CFTBS	1.98	Light
NSCB	4.74	Moderate
NSCTB	2.28	Moderate

○ 파괴모드 및 균열

- 충격 및 폭발에 의한 콘크리트의 국부손상은 crater, spall, 그리고 breach 이렇게 세 가지로 구분할 수 있음.
- crater는 충격하중을 받는 면의 콘크리트가 국부적으로 파쇄되어 움푹 파이는 현상이며, spall은 폭발 하중을 받은 시험체의 배면이 인장응력에 의해 파괴되는 현상임. 또한 breach는 crater와 spall의 깊이가 깊어 콘크리트 시험체를 관통하는 현상이며 상대적으로 슬래브 부재에서 주로 나타남.
- 보에서는 폭발 하중과 같은 집중된 충격하중을 받게 되면 주로 shear plug가 발생함. 이는 하중 재하 지점을 중심으로 사다리꼴 모양으로 발생한 전단 균열을 말하며, 이는 부재의 전단 강도와 관계없이 발생하며 정하중 재하 시와 다른 파괴 양상을 보인다는 점에서 국부손상에 대한 평가 시 이에 대한 검토가 필요함.
- NSC 부재 및 NSCB에서는 심각한 상부의 균열과 하부의 스캐빙이 발생하였음.
- 1면 및 2면 보강 시 부재의 심각한 균열이 발생한다는 점에서 보강면을 넓히는 것의 중요성을 확인할 수 있음.
- NSCB는 NSHSDC의 부착 파괴가 발생하였을 뿐만 아니라, 상부의 심각한 파손 면적을 보였음.
- 상, 하부 모두 NSHSDC로 보강한, NSCTB는 부재의 국부적 파괴가 거의 없을 뿐 아니라 충격하중에 대한 저항성능이 우수한 것을 확인할 수 있음. NSHSDC를 상부, 하부 동시에 보강 시 우수한 충격저항 성능을 기대할 수 있음.

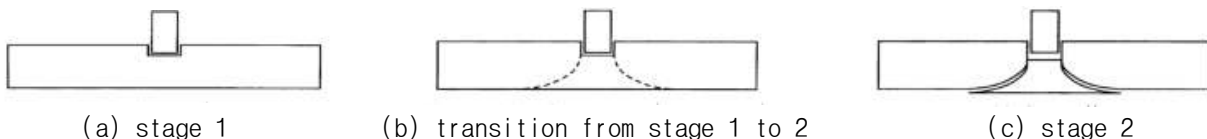


그림 2-63. Shear-plug failure

표 2-24. 구조부재 내충격·방폭 성능평가 지표

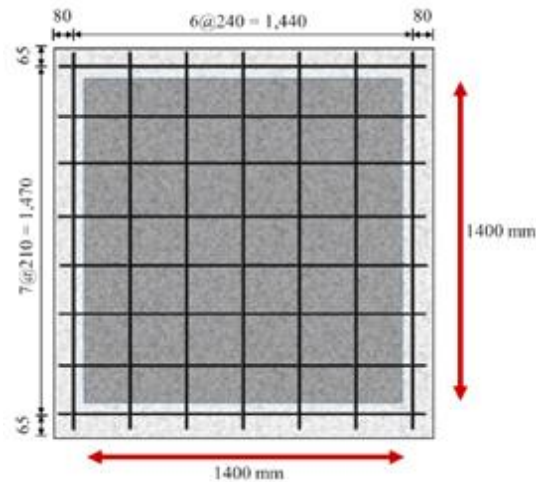
구조부재	예비 성능평가 지표
보(Beam)/기둥(Column)	• 최대/잔류 처짐(지점회전각) • 최대/잔류 철근변형률 • 국부손상(스캐빙/스폴링) 깊이 • 잔류강도 및 잔류연성비
슬래브(Slab)/내력벽(Wall)	• 최대/잔류 처짐(지점회전각) • 최대/잔류 철근변형률 • 국부손상(스캐빙/스폴링) 면적 및 중량 손실률 • 잔류강도 및 잔류연성비

5.3.1.4 판부재의 충격 실험결과

(1) 시험체 상세 set-up

○ 실험 변수 및 시험체 상세

- 탄소섬유 시트, Sprayed FRP 및 NSHSDC의 보강에 따라 일반강도 콘크리트(보 구조부재에 사용한 콘크리트 배합 동일)판 부재의 실험 변수를 계획함.



(a) 부재 상세

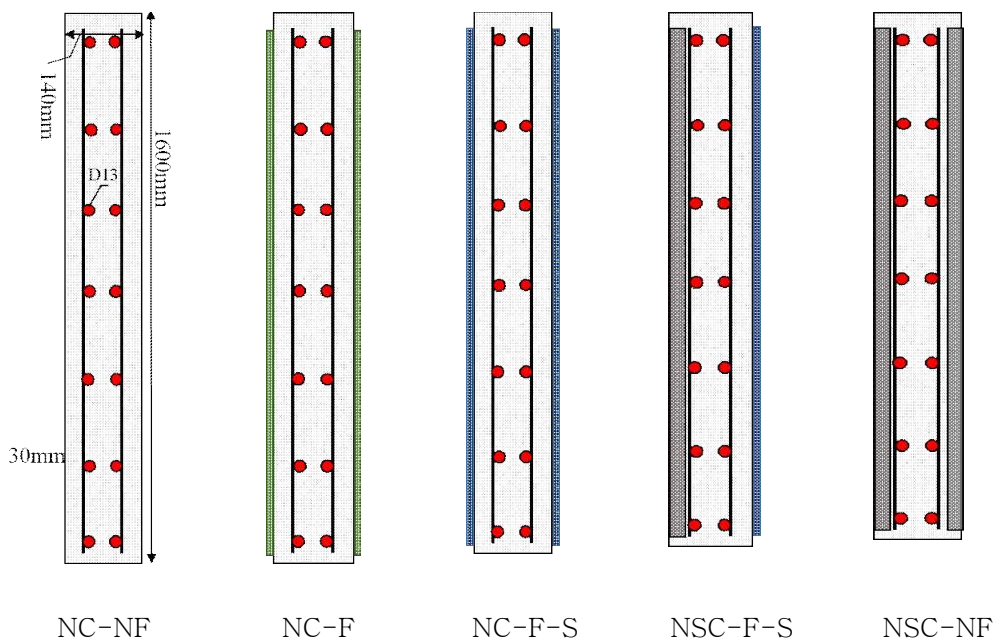


그림 2-64. 판 부재의 부재 상세

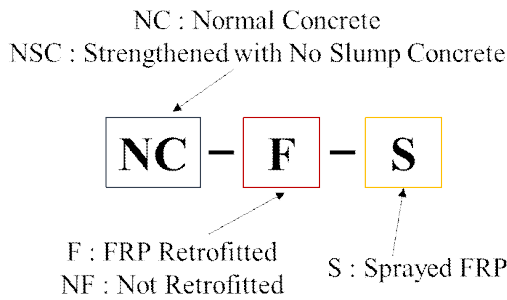


그림 2-65. 실험체 표기법

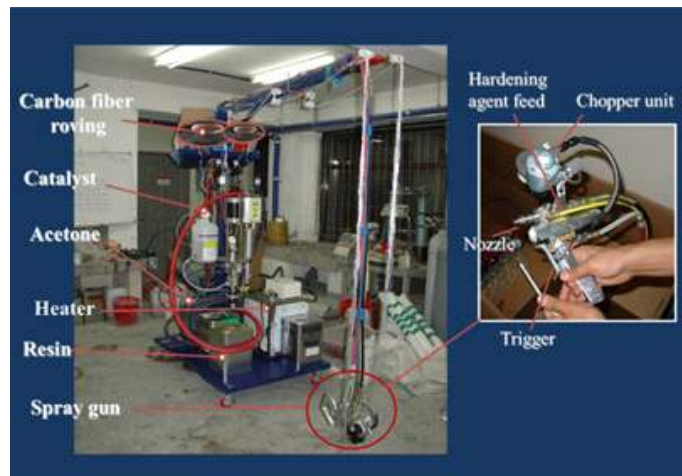


그림 2-66. Spraying FRP 장비

- 탄소섬유 시트

- 제작된 보의 표면처리를 위해 그라인딩을 하여 평평하게 하였음.
- 에폭시 프라이머 주제와 경화제를 2:1 비율로 넣고, 2~3분간 균일하게 섞은 뒤, 보강 부분에 고르게 바르고 10시간 이상 경화시킴.
- 이후 탄소섬유 시트를 길이 방향으로 먼저 부착 후 이후 길이 반대 방향으로 부착하였음.

- Sprayed FRP

- 제작된 콘크리트에 잘린 탄소섬유 로빙 및 비닐에스테르를 분사하였음.
- 탄소섬유 로빙 및 레진은 공기 중에서 결합하여, 제작된 콘크리트에 부착하였음.
- 탄소섬유 시트의 강도를 고려하여, 보강 두께를 6mm로 지정하였음.
- 사용된 탄소섬유 및 레진의 물리적 특성은 표 2-25에 나타내었음.

- 고성능 시멘트 복합체(NSHSDC)

- 제작된 콘크리트의 상면 및 하면을 각각 20mm씩 제거한 후, NSHSDC를 타설하였음.
- NSHSDC에는 강섬유 및 PE 섬유가 시멘트 부피대비 각각 1.0%, 0.5%가 혼입되었음.

표 2-25. 사용된 섬유 및 레진의 물리적 특성

Series	Carbon fiber		Resin	
	Sheet	Roving	Epoxy	Vinyl ester
Tensile strength (MPa)	4900	4200	90	8.8
Elastic modulus (GPa)	230	240	30	7.3
Ultimate strain (%)	2.1	1.8	8.0	4.5
Thickness (mm)	0.167	3	-	-

○ 판 부재의 Drop-weight 충격하중 실험 set-up

- 시험체 중앙에 Potentiometer, 레이저 타입의 Linear Variable Differential Variable (LVDT)를 설치하여 부재의 중앙 변위를 측정함. 속도계는 가이드 레일에 부착하여, 자유낙하에 따른 낙하추의 속도를 측정하였음. 자유낙하에 의한 낙하추의 최대 속도는 약 6.3m/s임. 충격 텅에는 가력 용량 2000kN의 로드 셀을 설치하여, 가해진 충격하중을 계측하였음.

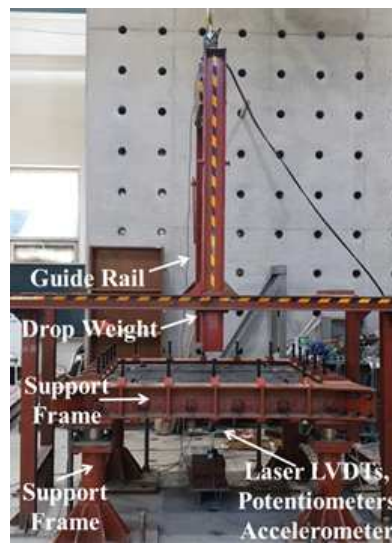


그림 2-67. 판 부재 충격 실험 set-up

- 4개의 지점에는 가력 용량 500kN의 로드 셀을 설치하여, 각 지점에서의 반력 하중을 측정하였음. 각 지점은 강봉을 통해 고정하여 지점의 리바운드를 방지하였음. 낙하추는 유압잭을 통해 올린 후, 자유 낙하를 하여 충격하중을 가력하였음. 각 단계의 낙하 중량은 300kg, 낙하 높이(충돌속도)는 2000mm로 동일하게 설정하여 실험을 수행함.
- 예비 실험결과를 통해, 일정 낙하 높이 이하의 충격에서는 시험체의 탄성변형만이 발생함을 확인하였으며, 따라서 영구변형(첫 균열 및 잔류 처짐)이 발생하는 높이 이상의 하중으로 실험을 수행하였음.
- 충격 실험의 종료 시점은 배면부의 편칭 발생 및 균열 발생, 큰 처짐을 수반한 휨 파괴 발생 또는 충격하중 및 반력 하중의 현저한 감소를 기준으로 하였음.

(2) 충격 실험결과

○ 반력 하중 및 처짐

- NC-NF 시험체는 1회 타격에서 급격한 파괴가 발생함으로써, 잔류 처짐을 측정하지 못하였고, Sprayed FRP로 보강한 변수들은 2회 타격에서 실험이 종료되었으며, 탄소섬유 시트 및 고성능복합체 보강 변수는 3회의 타격에서 실험이 종료됨.
- 중앙부 처짐만을 고려하였을 때, 1회 타격 시에는 모든 부재에서 유사한 최대 및 잔류 처짐이 발생하였음. NC-F 부재는 1회 타격과 2회 타격 시 증진된 초기강성으로 인해 가장 적은 최대 처짐 및 잔류 처짐이 발생하였지만, NC-F는 최종 타격 시에는 큰 잔류 처짐이 발생하였음.

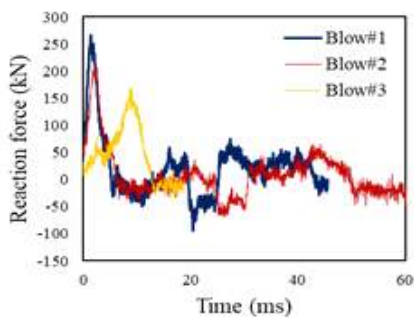
표 2-26. 타격 횟수에 따른 충격 및 반력 하중

Test Specimen	Blow No.	Impact properties		Cum. Imparted Energy	Max. Reaction Force
		H (mm)	F_i (kN)	E_i (kJ)	F_r (kN)
NC-NF	1	2000	410.10	5.89	-
NSC-NF	1		636.88	5.89	266.63
	2		450.13	11.78	216.97
	3		281.52	17.67	170.35
NSC-F-S	1		587.50	5.89	206.84
	2		298.40	11.78	217.14
NC-F-S	1		637.58	5.89	187.16
	2		369.29	11.78	212.64
NC-F	1		611.97	5.89	186.36
	2		320.96	11.78	225.52
	3		282.16	17.67	176.20

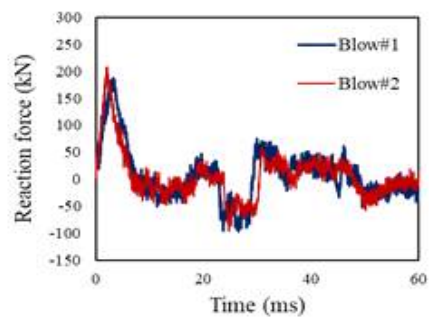
표 2-27. 타격 횟수에 따른 최대 및 잔류 처짐

Test members	Blow No.	Mid-span displacement		
		Maximum displacement (mm)	Residual Displacement (mm)	Ratio of $\Delta_{max}/\Delta_{res}$
NC-NF	1	23.47	-	-
NSC-NF	1	18.77	6.39	2.937
	2	27.65	14.07	1.965
	3	20.12	4.92	4.089
NSC-F-S	1	18.89	6.24	3.027
	2	67.29	67.24	1.001
NC-F-S	1	17.91	6.57	2.726
	2	51.96	37.6	1.382
NC-F	1	17.31	5.92	2.924
	2	23.80	10.15	2.345
	3	19.33	19.29	1.002

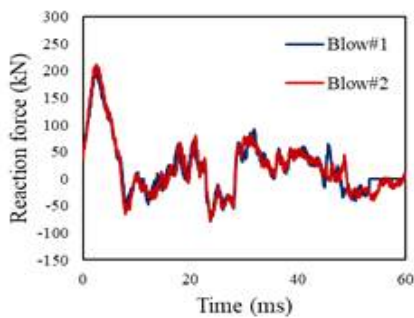
- 반복타격을 가할 시 부재에 발생하는 최대 및 잔류 처짐은 NSHSDC로 상하부 보강한 NSC-NF에서 가장 우수한 처짐 제어를 보였음. 상하부를 모두 NSHSDC로 보강할 경우 가장 높은 하중 및 적은 처짐을 기대할 수 있음. 이는 NSHSDC에 포함된 강섬유 및 PE 섬유가 거시균열 및 미세 균열을 효과적으로 제어하며 충격에너지를 부재 전체에 고르게 분산시켰기 때문으로 판단됨.
- 시험체 압축면에 탄소섬유시트 및 Sprayed FRP 보강한 변수들에 비해 NSHSDC로 보강하는 변수에서 높은 충격하중을 나타냈고, NSC-NF는 반력 하중이 약 266 kN로 측정되었으며, 이는 FRP 및 Sprayed FRP로 보강한 부재 대비 약 28~43% 큰 값을 보임.



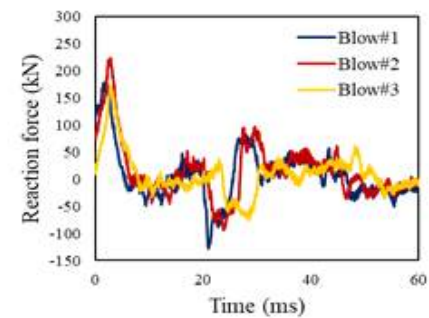
(a) NSC-NF



(b) NSC-F-S



(c) NC-F-S



(d) NC-F

그림 2-68. 타격 횟수에 따른 예측된 반력 하중

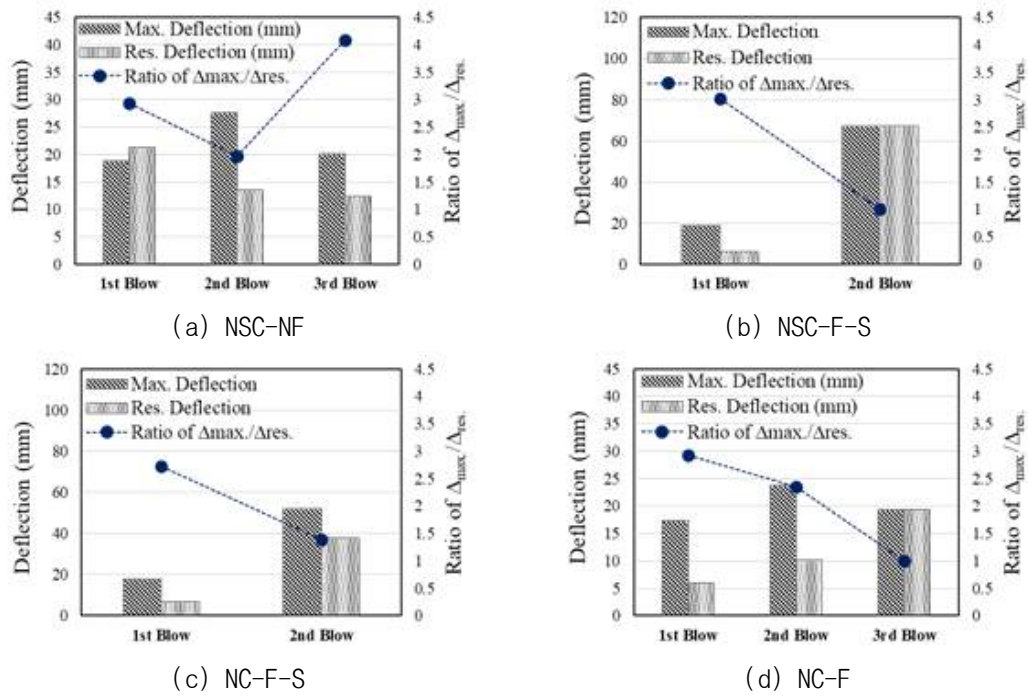


그림 2-69. 타격 횟수에 따른 계측된 처짐 및 연성비

○ 최대하중과 에너지 소산 능력의 관계

- 충격에너지가 가해지면, 부재에는 변형이 발생하면서 충격에너지를 분산시킴.
- 부재의 인장 응력 한계를 넘지 않는 충격에너지가 가해질 시에는 부재에 발생하는 처짐은 에너지 소산 능력과의 상관관계를 보임.
- 최대반력 하중은 NSC-NF 부재에서 가장 높게 측정되었음. 이에 1회 타격 시 에너지 소산 능력 또한 NSC-NF 부재에서 가장 크게 측정되었고, 반력 하중과 에너지 소산 능력과의 상관관계를 보임.
- NSHSDC가 보강된 콘크리트는 섬유유 가교역할로 인하여 균열의 진전을 억제하고, 응력을 재분배시킴. 따라서 균열의 개수는 가장 많이 보이지만, 부재에 심각한 손상은 확인할 수 없었음. 이는 NSHSDC로 보강된 부재의 충격 저항성능 향상을 의미하며 그림 2-70을 통해 알 수 있음.
- 흡수 에너지는 충격하중이 가해지는 동안 부재가 흡수한 총 에너지의 양으로 최대하중이 가해지는 지점에서 부재가 급작스럽게 파괴될 때의 에너지와 같은 값임. 이 값은 재료의 인성, 연성을 나타내고 있음.

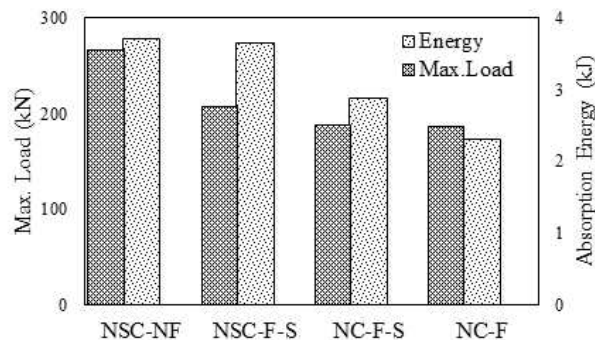


그림 2-70. 1회 타격 시의 최대 반력하중과 에너지 소산 능력의 상관관계

○ 지점회전각

- 미국 UFC(Unified Facilities Criteria)에 명시된 지점회전각 Damage level에 따라, 최종 타격 종료 시점에서 섬유보강 시멘트 복합체로 상하면을 보강한 부재에서는 Light damage가 나타났다고 판단하는 반면, 탄소섬유 시트 및 Sprayed FRP로 보강된 부재에서는 Moderate damage가 나타난다고 볼 수 있음.

- 이는 NSHSDC로 상, 하부 보강된 RC 부재에서 더 우수한 충격저항 성능을 보임을 증명함. NSC-NF는 최종 타격 시의 지점회전각은 모두 2° 이하를 나타내고 있음.
- 이는 강섬유 및 PE 섬유를 가교역할로 인해 부재의 연성이 증가한 것으로 판단됨. 탄소섬유 시트로 양면 보강한 NC-F는 탄소섬유 시트의 높은 강성으로 인해 2회 타격까지는 적은 지점회전각을 보였지만, 3회 타격에서는 NSC-NF 대비 더 큰 지점회전각을 보였음.
- NSHSDC로 상, 하부를 보강할 경우 최종 타격 시 가장 작은 지점회전각을 기대할 수 있음.

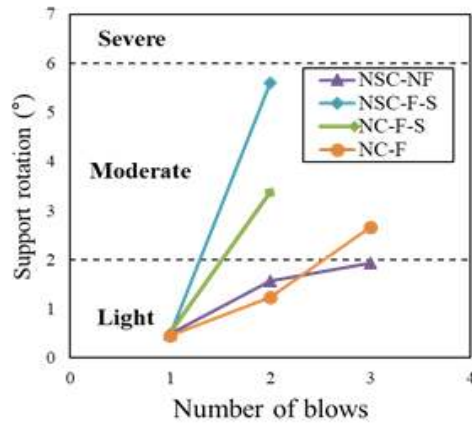


그림 2-71. 타격 횟수에 따른 부재의 지점회전각

표 2-28. 충격하중에 의한 구조체 파괴모드의 분류 (T. Sugano et al., 1993)

파괴모드	특징	파괴 형상
Penetration	전면부에 크레이터(crater), 후면부에 방사형 미세 전단 콘(cone) 형태 균열 발생	
Just Scabbing	후면부에 소수의 콘크리트 파편 분출, 전단 콘 균열 발생	
Scabbing	후면부에 콘크리트 파편 분출, 작은 구멍(opening) 발생	
Just Perforation	천공 직전의 단계, 보강재 파괴, 후면부에 큰 구멍 발생, 시험체 내부에 탄도가 갇힘	
Perforation	천공, 전단파괴, 탄도 잔류속도 측정 가능	

○ 파괴 및 균열

- 충격하중에 의한 구조물의 파괴모드는 표 2-28과 같이 크게 5개로 분류하고 있음.
- 구조체에 작용하는 충격하중이 콘크리트의 인장 한계를 넘을 시 구조체에 파괴가 발생하며, 이때의 발생 가능한 파괴 특징과 파괴 형상을 표 2-28에 제시하였음.
- FRP 및 Sprayed FRP로 보강한 부재는 반복적인 타격 시, 취성적인 배면 파괴가 발생하였음. 특히 Sprayed FRP로 보강한 부재는 배면부의 인장철근이 심하게 노출되었을 뿐만 아니라 넓은 파손 면적을 보임. 이는 계면 응력의 집중에 따른 취성적인 파괴가 발생하였기 때문임.
- NSHSDC로 상하 보강된 부재는 3회 타격에도 불구하고, 부재의 파괴는 발생하지 않았음. 이는 인장부에 보강된 길이가 긴 강섬유가 거시균열을 제어하고, 길이가 짧은 PE 섬유가 부재에 발생한 충격에너지 재분배하여, 부재에 다수의 균열이 발생하였을 뿐 부재가 파괴로 이어지지 않은 것으로 판단됨.
- 보 부재와 마찬가지로 상부, 하부를 모두 NSHSDC로 보강 시 가장 우수한 충격저항 성능을 기대할 수 있음.

5.3.2 파편 발생 방지 보강 기법 확보(중량 손실을 50% 이상 감소)

○ 보 부재의 중량 손실률

- 충격하중을 받은 철근 콘크리트 구조물은 비산물에 의한 파편이 발생함. 파편은 2차 피해로 이어져, 인적 피해를 일으킴.
- 무 보강 보 부재에는 중량 손실이 전체 중량대비 6.36%인 약 12.6kg이 발생함. 탄소섬유 시트로 보강한 CFTB, CFBS, CFTBS는 중량 손실률이 각각 2.5kg, 1.8kg, 1.5kg이 발생함.
- 탄소섬유 시트의 보강면이 넓어짐에 따라 중량 손실이 줄어드는 경향을 확인할 수 있음.



(a) NC-F



(b) NC-F-S



(c) NSC-F-S



(d) NSC-NF

그림 2-72. 충격하중을 받은 판 부재의 배면부 파괴

- 보강된 콘크리트 부재의 중량 손실률은 NSCB에서 약 16kg이 발생함. 구조부재의 밑면만 보강할 경우, 부착파괴로 인해 오히려 손실 무게가 더 크게 나타남. 구조부재의 상면, 하면을 NSHSDC로 보강할 경우, 손실 무게는 0.1kg 정도로 매우 미미한 수준임.
- 이는 미보강 대비 중량 손실률 50% 이상의 목표치를 초과 달성하였을 뿐만 아니라, 중량 손실이 거의 발생하지 않아 비산물에 의한 피해가 거의 발생하지 않을 거라 판단됨.

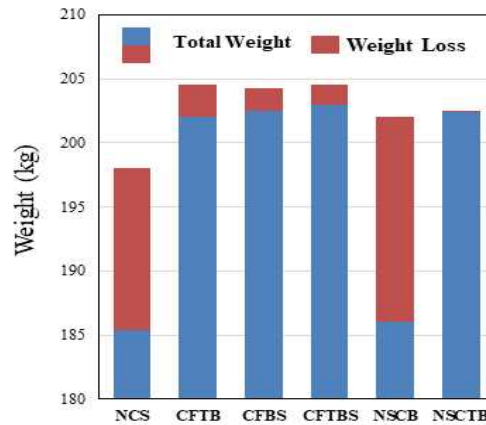
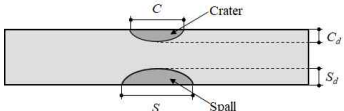
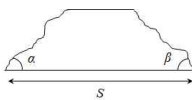


그림 2-73. 보 부재의 중량 손실률

표 2-29. 충격하중을 받은 부재의 파괴면적 및 중량 손실률

Specimens	Local damage			Shear-plug			Weight	
								
	C (cm)	C_d (cm)	S_d (cm)	S (cm)	Degree (°)		Total weight (kg)	Weight loss (kg)
	NCS	–	–	–	–	–	–	185.4
CFTB	35	15	3	9	49	45	202.0	1.9
CFBS	34	8	–	–	–	–	202.5	1.8
CFTBS	25	5	–	–	–	–	203.0	1.5
NSCB	63	22	7	42	59	34	186.0	14.0
NSCTB	25	3	–	–	–	–	202.5	–

* C = diameter of crater, C_d = depth of crater, S_d = depth of spall, S = length of shear plug.

○ 판 부재의 중량 손실률

- 구조부재 중에서 상, 하부를 NSHSDC로 보강한 NSC-NF는 3회 타격에도 불구하고 기존 대비 0.11%인 1kg 만의 중량 손실률을 보였음.
- Sprayed FRP로 상하부를 보강한 NC-F-S 및 Sprayed FRP로 하부를 보강한 NSC-F-S는 하면의 계면 응력 집중으로, 취성적인 파괴가 발생하였을 뿐만 아니라, 각기 25kg, 17kg의 중량이 손실되었음.
- 탄소섬유 시트로 상하부를 보강한 NC-F 또한 17kg의 중량 손실률이 발생하였음.
- 구조부재의 상, 하부를 NSHSDC로 보강할 경우 가장 적은 중량 손실을 기대할 수 있으며, 비산물에 의한 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단됨.
- 미보강 부재는 1회 타격 시, 배면부에 심한 균열이 발생하여 중량 손실률은 측정하지 못하였지만, 보 부재의 실험결과로부터 높은 중량 손실률을 예측할 수 있음.

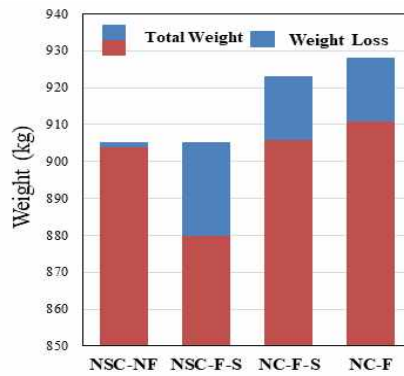


그림 2-74. 판 부재의 중량 손실률

- 콘크리트 구조부재의 상하부를 NSHSDC로 보강할 시, 보 부재와 판 부재 모두 비산물이 거의 발생하지 않았음. 이는 기존의 충격하중을 받는 콘크리트의 비산물 대비 50%를 훨씬 넘어서 파편이 거의 발생하지 않은 것으로, 목표 성능을 충분히 만족하였음. 본 연구의 보강기법에 따른 구조물을 보강할 경우, 비산물에 의한 피해가 거의 발생하지 않을 것으로 판단됨.

5.4. Task 4 : 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술 개발 (가이드라인 제시)

- 최근 지하 공간이 넓어짐에 따라 SIP까지의 안전한 대피경로가 요구되고 있음. 9.11 테러 당시 재실자의 약 12% 정도가 엘리베이터를 통해 대피하였고, NFPA 및 IBC Code에서도 대피용 엘리베이터의 내용이 수록됨. 따라서, 본 연구에서는 물리적 테러상황으로 설정하고 엘리베이터를 이용하여 대피시설로 대피하는 것으로 수행함.
- 엘리베이터를 코어 공간을 통한 대피 시 엘리베이터 코어 공간의 비상용 사다리 또는 계단을 통해 외부로 대피할 수 있지만, 외부 테러 발생 시 지하 공간을 SIP으로 활용하여야 하며 장애인 또는 노약자는 비상용 코어를 통한 대피가 불가능함.
- 엘리베이터 코어를 통한 대피가 가능할 때도 외부의 테러로 인한 콘크리트 비산물에 취약하며 이는 큰 인명 피해로 이어질 수 있음. 더구나 본 연구에서 다루고 있는 지하철 역사와 같은 SOC 시설물은 저층으로 엘리베이터 코어의 활용이 강조되지 않고, 또한 외부전문가들의 견해도 코어를 활용하기보다는 엘리베이터 자체를 활용하는 것이 타당하다는 의견을 수렴하였음.
- 또한, 엘리베이터 코어를 활용하게 되면 엘리베이터를 사용할 수 없게 되며, 그 결과 휠체어 및 이동약자의 대피 시간은 증가하게 됨.
- 고령화 사회로 진입됨에 따라, 노인 인구의 비율이 증가하고 있으며 수직 이동 수단으로 엘리베이터 코어를 활용한 공간보다는 엘리베이터를 통한 대피가 바람직함.
- 따라서, 엘리베이터 코어로의 직접 접근이 아닌 엘리베이터를 통한 보조 대피 수단이 바람직하다고 판단됨.
- 이에 미국 등 선진국에서는 엘리베이터를 하나의 대피 수단으로 인정하고, 계단과 엘리베이터를 이용한 대피 방법을 제시하려는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 아직 원칙적으로 엘리베이터를 이용한 대피를 금지하고 있으며, 대피용 엘리베이터의 도입 기준 역시 부족한 실정임. 추가로, 노약자의 경우 대피상황 시 수직 방향의 이동이 힘들며 정체 현상을 일으키게 됨.
- 현재, 국내에서는 재난 상황 발생 시 승객의 안전을 위한 승강기에 대한 법규 및 기준은 제정되어있지만, 대부분 엘리베이터는 대피용으로 사용되지 않고 있음. 또한, 현재까지 개발된 대부분의 대피시뮬레이션은 주로 계단을 이용하는 데 초점을 맞추고 있음. 고령화 사회로 진행됨에 따라 노령인구 및 거동이 불편한 인구가 증가함에 따라 재난 발생 시 엘리베이터를 활용한 대피의 필요성은 지속해서 증가하고 있음.

표 2-30. 설치연도 및 종류에 따른 엘리베이터 보유현황

설치연도	합계 (대)	승객용 (대)	장애인용 (대)	소방 구조용 (대)	휠체어 리프트 (대)	대피용 (대)	기타 (대)
15	38,224	18,279	7,925	8,526	234	7	3,253
16	45,120	21,311	10,112	9,343	248	19	4,087
17	48,789	19,255	12,997	12,057	315	23	4,142
18	50,497	16,891	14,462	14,786	362	36	3,960
19	44,603	14,967	14,929	10,071	548	74	4,014
20	10,455	5,028	3,304	721	197	0	1,205
전체	726,795	273,033	188,892	155,576	4,073	161	105,060
비율(%)	100.0	37.6	26.0	21.4	0.6	0.1	14.3

- 정부 산하의 승강기 검사기관인 한국 승강기 안전 공단의 통계자료(표 2-30)에 의하면 현재 국내에 설치된 엘리베이터 설치 대수는 2020년 6월 중순 기준 약 726,795대였으며, 최근 5년 동안 엘리베이터 설치가 증가하고 있음. 이러한 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피시설에 엘리베이터를 통한 대피로의 대책의 수립이 시급한 상황임.
- 현재 대피시설은 물리적 테러 발생 시 엘리베이터를 활용하지 않아, 대피 시간 증가 및 대피경로의 정체 현상이 심각한 상황임. 따라서 대피용 엘리베이터의 설치를 통해 노약자, 어린이, 임산부, 장애인의 대피에 활용되어야 함. 추가로 일반적으로 지하철 역사에서 엘리베이터는 일반인들을 위한 용도가 아닌 장애인이나 노약자, 임산부들을 위한 용도로 사용하므로 속도가 일반 엘리베이터에 비해 느리게 설계되고 있음.
- 따라서 본 연구에서는 시나리오별 엘리베이터 활용 여부 및 엘리베이터 속도에 따른 시뮬레이션을 진행하고자 함. 전체 인원 중 노약자, 임산부, 장애인들을 전체 인구 통계치를 기준으로 산정하고, 대피 시 엘리베이터를 이용하는 것으로 가정함.

5.4.1 피난 시나리오 설정

- 연구의 목적은 실제 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하여 각각의 시나리오에 따른 예상 소요시간을 산출하고자 함
- 시나리오는 엘리베이터 사용 여부, 엘리베이터의 속도로 하였음
 - 시나리오 A : 계단 + 엘리베이터 속도 X
 - 시나리오 B : 계단 + 엘리베이터 속도(0.5m/s)
 - 시나리오 C : 계단 + 엘리베이터 속도(1.0m/s)

5.4.2 엘리베이터의 대피 프로세스

- 일반적으로 엘리베이터는 초기 속도는 증가하다가 이후 속도가 일정해지며, 이후 속도가 줄어듦.
- 감속 과정과 가속 과정은 구체적으로 전이 가속도 및 전이 감속도 구간을 거침.
- 전이 구간 이후, 엘리베이터는 등속운동을 함.
- 전이 구간의 비율은 엘리베이터의 이동 거리가 클수록 그 정도가 줄어듦.
- 전이 감속 구간 이후, 엘리베이터의 문이 닫히는 개폐 시간이 발생함.

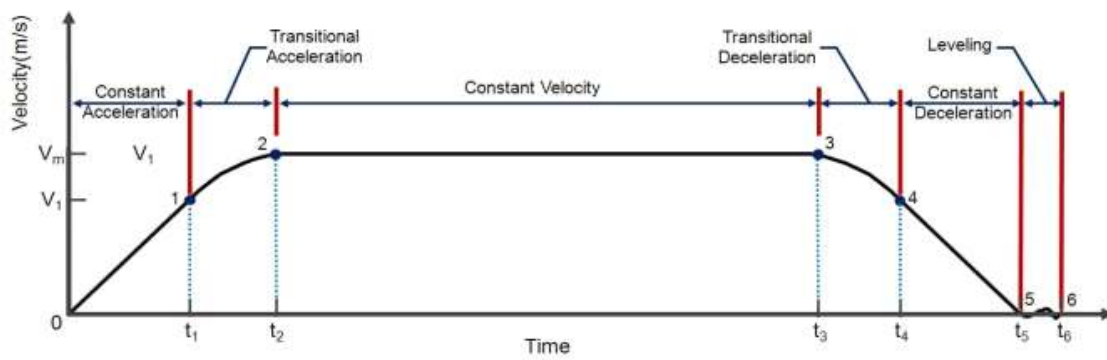


그림 2-75. 엘리베이터를 통한 대피 프로세스

5.4.3 국가별 기준에 따른 예상 대피 시간 비교

- 연구의 목적은 실제 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하여 각각의 시나리오에 따른 예상 소요시간을 산출하고자 함.
- 시나리오는 엘리베이터 사용 여부, 엘리베이터의 속도로 하였음.

5.4.3.1 시나리오 A : 계단 + 엘리베이터 속도 X

- 중국 : GB50157(2013)_CFDOM (Code for Design of Metro)

$$T = 1 + \frac{Q_1 + Q_2}{0.9[A_1(N-1) + A_2B]} \leq 6 \text{ 분}$$

- Q_1 : 열차 내 승객
- Q_2 : 승강장 내 승객
- A_1 : 자동 에스컬레이터의 처리 수용량
- A_2 : 계단의 처리 수용량
- 1 : 반응 시간, 지하철 내의 비상경보 장치, 방송 시스템에 대한 반응 시간은 고정
- N : 에스컬레이터 개수
- B : 계단의 총 폭

-B3에서 B2로 이동

$$T = 1 + \frac{321}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 11.7 \right]} = 1.944 \text{ 분}$$

- B1에서 B2로 이동

$$T = 1 + \frac{199}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 3.8 \right]} = 1.88 \text{ 분}$$

$$\therefore T = 1.944 \text{ 분}$$

- 미국 : NFPA 130 (2014)

$$T_{total} = T + W_P + \sum_{i=1}^N W_N$$

표 2-31. B3에서 B2로 이동 시 대피 요소

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	11700	0.0555	649
에스컬레이터 (0)	0	0.0555	0

표 2-32. B3에서 B2로 이동 시 거리 및 대피 속도

이동시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
승강장 T1 (일반인)	83.2	37.7	2.210
승강장 T1 (노약자)	83.2	30.0	2.773
B3->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B3->B2 (노약자)	4.64	11.6	0.400

- F_p (승강장 대피 시간) = $321 \div 649 = 0.495$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.495 - 2.773 = 0.00$ 분
- 총 대피 시간 = $T + W_p = 2.773 + 0.4 + 0.00 = 3.173$ 분

표 2-33. B1에서 B2로 이동 시 대피 요소

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	3800	0.0555	210
에스컬레이터 (0)	3530	0.0555	195

표 2-34. B1에서 B2로 이동 시 거리 및 대피 속도

이동시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
B1 내의 이동시간 (일반인)	36.7	37.7	0.973
B1 내의 이동시간 (장애인)	36.7	30.0	1.223
B1->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B1->B2 (장애인)	4.64	11.6	0.400
B2 내의 이동 시간(일반인) / 개찰구 이전	31.6	37.7	0.838
B2 내의 이동 시간(장애인) / 개찰구 이전	31.6	30.0	1.053
B2 내의 이동(일반인) / 개찰구 이후	17.2	37.7	0.456
B2 내의 이동(장애인) / 개찰구 이후	17.2	30.0	0.573

- F_p (승강장 대피시간) = $199 \div (210+195) = 0.491$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.491 - 1.223 = 0.00$ 분
- F_{fb} (개찰구 유동 시간) = $255 \div 400 = 0.638$ 분
- W_{fb} (개찰구의 대기시간) = $F_{fb} - F_p = 0.638 - 0.491 = 0.147$ 분
- 총 대피 시간 = $T + W_p = 1.223 + 0.4 + 1.053 + 0.573 = 3.396$ 분

$$T_{total} = \sum t_i + T_{i-\max}$$

- B3에서 B2로 이동 시 대피 소요시간

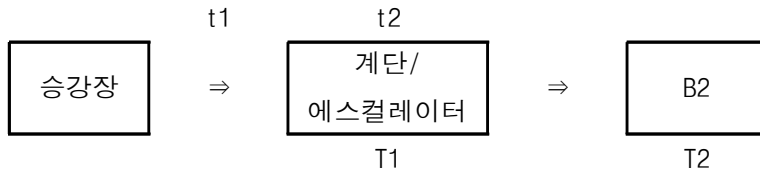


표 2-35. B3에서 B2로 이동 시 대피 소요시간

대피경로	t1 (초)	T1 (초)	t2 (초)	T2 (초)	필요 시간 (초)
A	132.8	20.5	26.1	20.5	199.9
B	90.0	20.5	26.1	20.5	157.1
C	90.0	25.6	26.1	25.6	167.3
D	166.4	18.9	45.5	18.9	249.7

- B1에서 B2로 이동 시 대피 소요시간

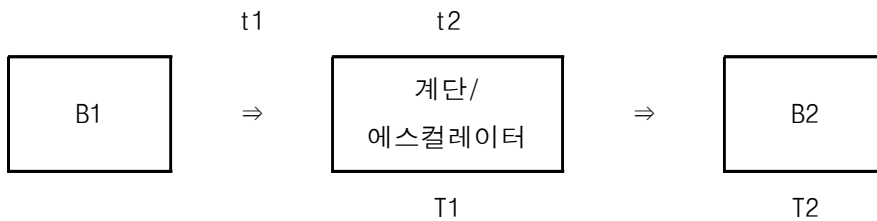


표 2-36. B1에서 B2로 이동 시 대피 소요시간

대피경로	t1 (초)	T1 (초)	t2 (초)	T2 (초)	t3 (초)	T3 (초)	t4 (초)	필요 시간 (초)
A	73.4	21.6	31.8	21.6	63.2	35.4	34.4	281.4
B	72.4	20.2	25.8	20.2	51.0			259.4

∴ SIP 위치가 B2일 때의 대피 시간은 약 281.4초 (4.69분) 소요

5.4.3.2 시나리오 B : 계단 + 엘리베이터 속도(0.5m/s)

○ 일반적으로 많은 수의 대피자들이 좁은 공간을 통과해야 하는 병목 구간에서는 정체 현상이 발생하기 쉬움. 따라서 본 연구에서는 Specific Flow(F)를 사용하여 보행속도를 산출하였음.

- 탑승시간(t_i):

$$t_i = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4\text{초} + (10 - 4)\text{초} = 10\text{초}$$

- 하차 시간(t_u)

$$t_u = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4\text{초} + 0.6(10 - 4)\text{초} = 7.6\text{초}$$

- 대기시간(t_s)

$$\begin{aligned} t_s &= (t_i + t_u + 2t_d)(1 + \mu) \\ &= (10\text{초} + 7.6\text{초} + 2 \times 4.6\text{초})(1 + 0.15) = 30.82\text{초} \end{aligned}$$

- 편도이동시간(t_5)

$$v_1 = 0.6 \times 0.5 = 0.3\text{m/s}$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \left(\frac{V_1}{a}\right) \\ &= \left(\frac{0.3}{0.3}\right) = 1.0\text{초} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(\frac{V_1^2}{2*a}\right) \\ &= \left(\frac{0.3^2}{2*0.3}\right) = 0.15\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_2 &= \left(\frac{V_m^2 - V_1^2}{2*V_1*a}\right) \\ &= \left(\frac{0.5^2 - 0.3^2}{2*0.3*0.3}\right) + 1.0 = 1.889\text{초} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= \left(\frac{1}{3a}\right)\left(\frac{V_m^3}{V_1} - V_1^2\right) + S_1 \\ &= \left(\frac{1}{3*0.3}\right)\left(\frac{0.5^3}{0.3} - (0.3)^2\right) + 0.15 = 0.513\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_5 &= 2t_2 + \frac{S_T - 2S_2}{v_m} \\ &= 2 \times 1.889 + \frac{4.64 - 2*0.513}{0.5} = 11.006\text{초} \end{aligned}$$

- 전체 승강기의 소요시간(t_T)

$$\begin{aligned} t_T &= t_5 + t_k \\ &= 11.006 + 0.5 = 11.506\text{초} \end{aligned}$$

- 왕복 이동시간(t_r)

$$\begin{aligned} t_r &= 2t_T + t_s \\ &= 2 \times 11.506\text{초} + 30.82 = 53.832\text{초} \end{aligned}$$

- 이를 통해 지하 3층에서 대피자가 엘리베이터에 탑승한 후 지하 2층에서 대피자가 엘리베이터에서 다시 하차하고, 지하 3층으로 이동한 1회 대피 소요시간은 약 53.832초 임.

5.4.3.3 시나리오 C : 계단 + 엘리베이터 속도(1.0m/s)

- 본 연구에서 선정된 안암역 내의 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 운행되고 있음.
- 건축설계 대사전 및 지하철 내의 엘리베이터 설계에 따르면 엘리베이터의 속도는 45m/분 ~ 60m/분, 즉 1.0m/s까지 지정될 수 있음.
- 따라서 엘리베이터와 계단을 복합 활용 시 엘리베이터의 속도를 1.0m/s로 계산하여 예상 대피 시간을 계산할 수 있음.
- 다음의 식은 엘리베이터의 속도를 1.0m/s로 지정함에 따라, 계산된 예상 대피 시간임.

- 탑승시간(t_i):

$$t_i = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4 + 1 \times (10 - 4) = 10 \text{ 초}$$

- 하차 시간(t_u)

$$t_u = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4 + 0.6 \times (10 - 4) = 7.6 \text{ 초}$$

- 대기시간(t_s)

$$t_s = (t_i + t_u + 2t_d)(1 + \mu) = (10 + 6.4 + 2 \times 4.6)(1 + 0.15) = 29.44 \text{ 초}$$

- 편도이동시간(t_5)

$$v_1 = \frac{0.6}{1} = 0.6 \text{ m/s}$$

$$t_1 = \frac{v_1}{a} = \frac{0.6}{0.4}$$

$$S_1 = \frac{(v_1)^2}{2a} = \frac{(0.6)^2}{2 \times 0.4} = 0.45 \text{ m}$$

$$t_2 = \frac{(v_m)^2 - (v_1)^2}{2v_1a} + t_1 = \frac{1^2 - (0.6)^2}{2 \times 0.6 \times 0.4} + 1.5 = 2.83 \text{ 초}$$

$$S_2 = \frac{1}{3a} \left(\frac{v_m^3}{v_1} - v_1^2 \right) + S_1 = \frac{1}{3 \times 0.4} \left(\frac{1^3}{0.6} - 0.6^2 \right) + 0.45 = 1.538 \text{ m}$$

$$t_5 = 2t_2 + \frac{S_T - 2S_2}{V_m} = 2 \times 2.833 + \frac{4.64 - 2 \times 1.539}{1} = 7.228 \text{ 초}$$

- 전체 승강기의 소요시간(t_T)

$$t_T = t_5 + t_k = 7.228 + 0.5 = 7.728 \text{ 초}$$

- 왕복 이동시간(t_r)

$$t_r = 2t_T + t_s = 2 \times 7.728 + 29.44 = 44.896 \text{ 초}$$

∴ 따라서 승강기의 한 번 왕복 시간은 $v = 1\text{m/s}$, $a = 0.6\text{m/s}^2$ 기준, 대략 44.896초가 소요됨

○ 중국 : GB50157(2013)_CFDOM(Code for Design of Metro)

- B3에서 B2로 이동

$$T = 1 + \frac{321}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 11.7 \right]} = 1.49 \text{ 분}$$

- B1에서 B2로 이동

$$T = 1 + \frac{199}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 3.8 \right]} = 1.94 \text{ 분}$$

∴ T = 1.94 분

○ 미국 : NFPA 130 (2014)

- B3에서 B2로 이동

표 2-37. 미국 Code에 따른 B3에서 B2로의 단위 수용량

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	11700	0.0555	649
에스컬레이터 (0)	0	0.0555	0

표 2-38. 미국 Code에 따른 B3에서 B2로의 대피 시간

이동 동선	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
승강장 T1 (일반인)	83.2	37.7	2.210
승강장 T1 (장애인)	83.2	30.0	2.773
B3->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B3->B2 (장애인)	4.64	11.6	0.400

$$F_p \text{ (승강장 대피시간)} = 321 \div 649 = 0.495 \text{ 분}$$

$$W_p \text{ (승강장 출구 대기시간)} = F_p - T_1 = 0.495 - 2.773 = 0.00 \text{ 분}$$

$$\text{총 대피시간} = T + W_p = 2.773 + 0.4 + 0.00 = 3.173 \text{ 분}$$

- B1에서 B2로 이동

표 2-39. 미국 Code에 따른 B1에서 B2로 이동 단위 수용량

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	3800	0.0555	210
에스컬레이터 (0)	3530	0.0555	195
자동 개찰구	단위 수용량 = 50명/분		400

표 2-40. 미국 Code에 따른 B1에서 B2로 이동 대피시간

이동시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
B1 내의 이동 (일반인)	36.7	37.7	0.973
B1 내의 이동 (장애인)	36.7	30.0	1.223
B1→B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B1→B2 (장애인)	4.64	11.6	0.4
B2 내의 이동(일반인) : 개찰구 전	31.6	37.7	0.838
B2 내의 이동(장애인) : 개찰구 전	31.6	30.0	1.053
B2 내의 이동(일반인) : 개찰구 이후	17.2	37.7	0.456
B2 내의 이동(장애인) : 개찰구 이후	17.2	30.0	0.573

- F_p (승강장 대피시간) = $199 \div (210+195) = 0.491$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.491 - 1.223 = 0.00$ 분
- F_{fb} (개찰구 유동 시간) = $255 \div 400 = 0.638$ 분
- W_{fb} (개찰구의 대기시간) = $F_{fb} - F_p = 0.638 - 0.491 = 0.147$ 분
- 총 대피시간 = $T + W_p = 1.223 + 0.4 + 1.053 + 0.573 + 0.147 = 3.396$ 분

∴ $T = 3.396$ 분

○ 일본 “JIS Railway standards”

- B3에서 B2로 이동

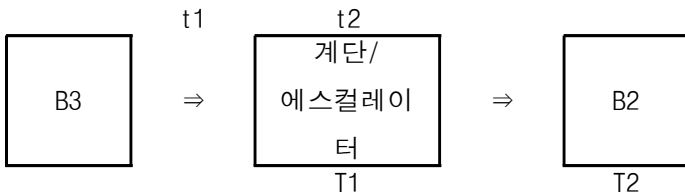


표 2-41. 일본 Code에 따른 B3에서 B2로 이동 경로별 대피시간

대피경로	t1 (초)	T1 (초)	t2 (초)	T2 (초)	필요 시간 (초)
A	66.3	19.2	21.3	19.2	126.0
B	45.0	19.5	21.3	19.5	105.3
C	45.0	24.0	21.3	24.0	114.3
D	83.2	17.7	28.2	17.7	146.8

- B1에서 B2로 이동

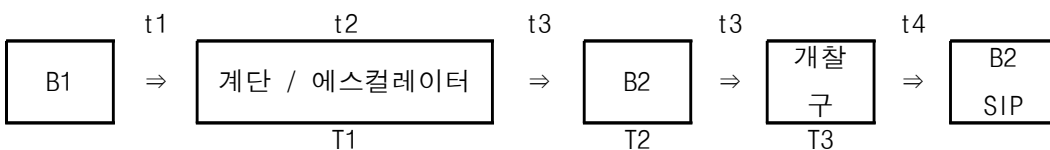


표 2-42. 일본 Code에 따른 B1에서 B2로 이동 경로별 대피시간

대피경로	t1 (초)	T1 (초)	t2 (초)	T2 (초)	t3 (초)	T3 (초)	t4 (초)	필요 시간 (초)
A	73.4	21.6	31.8	21.6	63.2	35.4	34.4	281.4
B	72.4	20.2	25.8	20.2	51.0			259.4

∴ $T = 4.69$ 분

○ 시뮬레이션: 시나리오 A (계단 + 엘리베이터 속도 X)

- 시나리오 A의 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 313.9초이고, 평균 79.7초가 소요되었음. 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 146.0m, 평균 이동 거리는 75.5m로 나타났음. 휠체어를 통한 이동은 대피 초기에 정체 현상을 만들어 전체적인 대피 시간을 증가하게 함. 이때, 최대 대피 시간은 313.9초로 이에 엘리베이터를 통한 대피가 필요하다고 판단됨.

○ 시뮬레이션: 시나리오 B (계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s)

- 시나리오 B의 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 298.0초이고, 평균 79.6초가 소요되었음. 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 76.0m로 나타났음. 엘리베이터의 낮은 이동 속도에도 불구하고 최대 대피 시간은 시나리오 A 대비 약 5.13% 정도 최대 대피 시간은 줄었음.

○ 시뮬레이션: 시나리오 C (계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s)

- 시나리오 C의 시뮬레이션 결과, 최소 대피 시간은 1초, 최대 대피 시간은 246.4초이고, 평균 78.0초가 소요되었음. 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 140.4m, 평균 이동 거리는 75.2m로 나타났음. 엘리베이터의 향상된 이동 속도로 최대 대피 시간은 시나리오 A, 시나리오 B에 대비 각각 21.50%, 17.26% 줄어들었음. 엘리베이터의 속도를 건축설계 기준 및 지하철 내 엘리베이터 설치인 1.0m/s 속도로 고려하여 대피를 고려한다면 CBRE 상황 발생 시 빠른 대피가 가능할 것으로 판단됨.

5.4.3.4 계산 결과 비교

- 중국 코드는 대피 시 층과 층 사이의 대피 시간만을 고려하며, 이에 따라 층 안에서의 대피 시간을 계산하는 데에는 한계가 있는 것으로 판단됨.
- 일본 코드는 대피경로에 따른 계산 방법이 더 자세히 제시되어 있다는 점에서 예상 대피 시간이 다소 큰 값을 보였음.
- 여기에 미국과 일본 코드는 엘리베이터를 통한 이동보다 계단을 통한 시간이 더 지배적이므로, 총 대피 시간에는 계단을 통한 대피 시간이 반영된 것을 확인할 수 있음.

표 2-43. 국가별 설계 코드에 따른 대피 시간 비교

국가	계단 (분)	계단 + 엘리베이터 속도 0.5m/s (분)	계단 + 엘리베이터 속도 1.0m/s (분)
중국	1.94	3.080	2.885
미국	3.396	3.396	3.396
일본	4.69	4.690	4.690

- 시나리오 C는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하여 지하 2층의 SIP으로 대피하는 것으로 하였음.
- 엘리베이터의 속도는 1.0m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였음.
- 엘리베이터 이용 대수에 따른 대피자 전원이 SIP으로 이동하는데 소요된 시간은 표 2-44와 같음. 위의 상황은 소요시간 비교를 위하여, 같은 조건에서 보행자를 무작위로 배치하였으며, 산정된 휠체어 인원수를 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 배치하였음.
- 시뮬레이션 결과 엘리베이터 유무 및 속도 여부에 상관없이 평균 대피 시간은 모두 유사하게 나타났음.
- 시나리오 C에서 최대 대피 거리가 140.4m를 이동하였고, 시나리오 A, 시나리오 B에서는 최대 대피 거리는 각각 146.0m, 156.1m 이동하여, 시나리오 C 대비 약 9% 이상 이동 거리가 먼 것을 알 수 있음. 이는 시나리오 C의 대피경로가 시나리오 A, B 대비 효율적인 것을 알 수 있음.
- 엘리베이터의 유무 및 속도 여부에 따른 시나리오 A, B, C의 최대 대피 시간은 각각 313.9초 (5.23분), 298.0초 (4.96분), 246.4초 (4.10분) 소요되었음. 시나리오 C는 시나리오 A와 시나리오 B 대비 최대 대피 시간이 각각 21.50%, 17.28% 감소하였음.
- 표 2-45에 따르면, 국내 규정 ‘도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)’과 미국 규정 ‘NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System’에서는 역사 내 화재, 지진, 테러 등 재난 상황 발생 시 플랫폼에 있는 재실자들은 4분 이내에 플랫폼 밖으로 대피하도록 규정하고 있으며, 역사 내 가장 먼 출발지점에서 역 밖 및 대피시설까지 6분 이내로 대피하도록 규정함.
- 본 연구에서 진행한 시나리오 A, B, C의 경우 대피시설까지 대피 시간은 모두 6분 이내로 만족하고 있으나, 상기 두 규정에서는 포괄적인 재난 및 대피 시간을 정의한 단점이 있음.
- 하지만, 대피시설에 관한 미국 규정 중 물리적 테러와 같은 재난 상황에서 대피시설에 관한 규정 ‘FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters’에서는 대피시설까지 5분 이내로 대피하도록 규정함. 따라서 계단만 사용하여 대피한 시나리오 A의 경우 5분을 초과함. 반면에 계단과 엘리베이터를 함께 사용하여 대피한 시나리오 B, C만 이 기준을 만족함. 이어 재난 상황 발생 시 엘리베이터 사용이 필요함을 알 수 있음.
- 결과적으로, 물리적 테러 발생 시 역사 내 대피시설로 대피할 때 엘리베이터를 사용하면 대피 시간을 감소할 수 있으며, 국내와 미국의 대피 시간에 관한 규정에 모두 만족함.
- 위 결과를 토대로 재난 발생 시 노약자 또는 장애인은 엘리베이터를 활용하여 대피하는 것이 안전하다고 판단되며, 엘리베이터 속도를 1.0m/s 이상으로 설계하여 대피하는 것이 효과적임.
- 따라서 본 연구에서는 CBRE 상황 시 지하철 역사에서 대피 시 엘리베이터를 활용하는 것과 엘리베이터의 운행속도를 건축설계 대사전에 제시하고 있는 1.0m/s로 활용하는 것을 제안함.

표 2-44. 시나리오에 따른 대피 시간

시나리오		평균 대피 시간 (초)	최대 대피 시간 (초)
A	계단 + 엘리베이터 X	79.7	313.9
B	계단 + 엘리베이터 0.5m/s	79.6	298.0
C	계단 + 엘리베이터 1.0m/s	78.0	246.4

표 2-45. 국내외 재난 발생 시 대피 시간에 관한 규정

국가	구분	출발지	도착지	ASET (피난 요구시간)	재난 종류
한국	도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	역 밖 출구	6.0 분	
미국	NFPA 130	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	안전한 구역까지	6.0 분	
미국	FEMA 453	-	대피시설	5 분	화재, 지진, 테러 등
일본	Handbook of Tsunami Evacuation Planning	-	대피시설	3-5 분	지진

※ NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems

※ FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters

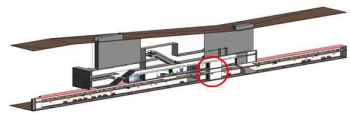
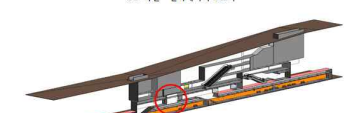
지하철 내 엘리베이터를 활용한 탈출로 기술 가이드라인 Shelter in Place : Evacuation Technology Guidelines Using Elevators inside the Subway  SHELTER IN PLACE 고려대학교 Smart SOS(Shelter of Sustainability) Lab F-face Lab / H-SOS Center	목 차 1. 서 론 4 1.1. 연구 배경 4 1.2. 국내외 연구 동향 6 1.3. 연구 목적 8 2. 대피상황 발생 시 고려요소 9 2.1. 인간 대피 행동 9 2.2. 대피의 기본 원칙 9 2.3. 평면 계획상 대피 계획에서의 주의점 10 2.4. 재질과 특성에 따른 연구 분석 10 3. 국내외 엘리베이터 활용 대피 선행연구 12 3.1. 국내 엘리베이터 활용 대피 선행연구 12 3.2. 국외 엘리베이터 활용 대피 선행연구 12 4. 국내외 엘리베이터 설계기준 16 4.1. 국내 엘리베이터 설계기준 16 4.2. 국외 엘리베이터 설계기준 19 5. 지하철 내 엘리베이터 활용 : 안암역 30 5.1. 연평별 인구 비중 분석 30 5.2. 시뮬레이션 인원 산정 31 5.3. SIP 위치 선정 33 5.4. 안암역 모델링 36 5.5. 시뮬레이션 프로그램 40	 3D 측면-엘리베이터 1호기  3D 측면-엘리베이터 2호기 Figure 22. 지하 2층 엘리베이터 위치 및 지하 3층 엘리베이터 위치 5.7 대피 요소별 속도 산정 CBSRE 상황에서 에스컬레이터는 계단만큼 폭이 넓기 때문에 많은 수의 인원을 수용하기 는 못하지만, 노란자나 어린이, 임산부 등 발이 걸리 못하는 동물에게는 평상시 구조한 손잡 구간이라고 할 수 있다. 에스컬레이터의 속도는 통상 규정적으로 0.5m/s, 최대 0.75m/s로 정해지고 있고 경사 각도가 30도를 넘는 경우는 대피 상황에서 사용이 불가하다. 건축물의 대사일, 화재(화재)로 계단을 두고 있다. 지하철 주요설계기준(설비 분야)을 보면, 승강기 위치 지침기준을 Table 23과 같이 정하고 있다. 일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자를 위한 시설로 일반적인 엘리베 이터보다 폭이 넓고, 화재, 지진 등 재난 발생 시 엘리베이터는 사용하지 않는 것이 원칙이지만 본 연구에서 검토하고 있는 CBSRE(Cheongju Biological Radiological and Explosive)의 경우 대피상황 발생 시 빠른 이동을 요구하는 상황 시 엘리베이터의 사용을 결
---	---	---

그림 2-76. 엘리베이터를 활용한 탈출로 설계 가이드라인

5.4.4 환기설비 활용 탈출로 접근성 분석

5.4.4.1 환기시설 활용 대피로에 관한 적용 사례

- 환기는 대상 공간의 공기정화, 산소 공급, 습기 및 유독가스의 제거를 통하여 대상 공간의 공기 질을 사용 목적에 적합하도록 유지하는 것을 목적으로 하고 있음. 환기에 대한 설계기준은 건축물, 터널과 같은 교통시설, 공동구, 기계실, 통신실 등의 환기시설 설계에 다음과 같이 적용하고 있음.
 - 1) 대상 공간의 필요 환기량은 이용공간의 이용과 환기 목적을 고려하여 산정함.
 - 2) 환기는 이용공간의 환기 목적 및 사용조건에 따라 복수의 이용공간 또는 구간별 배기로 고려함.
 - 3) 기계실, 전기실, 엘리베이터 기계실, 통신실 등 열 제거는 환기에 의한 것으로 하지만, 환기로서 힘든 경우에는 냉방설비를 설치하는 것이 좋음. 냉방설비로 하는 경우 실내 온도는 30℃ 이하로 설정함.
 - 4) 덕트 경로는 가장 합리적이고 경제적인 경로가 되도록 함.
 - 5) 천장 내부, 샤프트 등에는 덕트 설치에 필요한 공간을 확보함.
 - 6) 거주공간의 환기설비 계획 시에는 실의 특성을 고려해야 함.
- 환기 시스템은 하나 혹은 그 이상의 급기와 배기팬, 덕트 및 제어장치가 조합되어 구성됨. 실내압력을 임의로 조절할 수 있는 강제 급기, 강제 배기 시스템은 오염물질을 균일하게 발생하는 공간에 적용함.
- 그러나 오염물질이 불규칙하게 발생하는 공간은 오염물질을 적극적으로 배출하기 위해 강제 배기, 자연 급기 시스템을 적용하고 이러한 공간에 인접한 공간은 그 공간의 환기 성능을 양호하게 유지하기 위해 가압기능을 보유한 강제 급기, 강제 배기 시스템 혹은 자연 배기 시스템을 권장함.
- 배기관관의 설계기준은 NFPA 5000: Building Construction and Safety Code에서 조정된 공간에 창문 또는 다른 개구부로부터 3050mm 떨어진 위치에서 설치 가능하며, 배기관 끝에서 아래로 610mm 미만이어야 하며, 지붕 표면 위로 최소 305mm 떨어진 위치에서 종단하여 건물 바닥까지 확장되어야 함.
- 서로 접하거나 인접한 건물의 창문 또는 다른 개구부에서부터 최소 3050mm에서 종단되어야 함. 만일 여러 개의 배기관이 설치되는 경우 통기관은 지붕 위에서 종단되는 단일 배관과 연결되거나 각각의 통기관은 지붕 위에서 종단되어야 함.
- NFPA 80: Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives에서는 360mm x 510mm 시트들로 형성된 주석 덮개 문은 76.2mm 직경의 환기구 구멍을 뚫어야 하는 것으로 명시되어 있음. 이때 주석 덮개 문의 허용 오차는 문이 닫힌 상태에서 문과 벽 사이 9.53mm를 초과해서는 안 됨. 덕트의 직경과 폭은 종류, 크기, 덕트판의 접합 방법에 따라 아래 표 2-46과 같이 구분됨.

표 2-46. 환기 시스템 내 구성요소의 최소 두께 및 최대 폭 규정(NFPA 80)

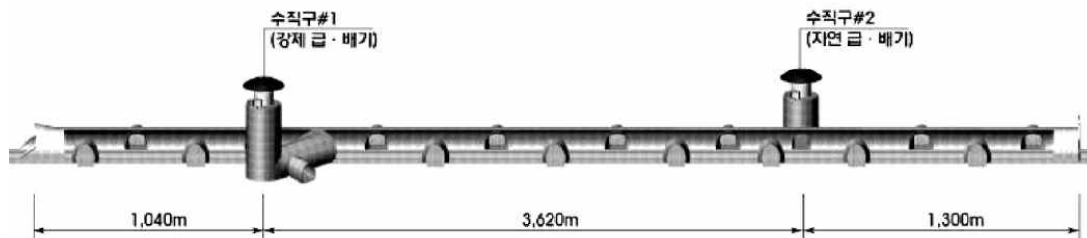
Type of connection	Air Duct Diameter or Maximum Width	Minimum Sleeve Thickness	
	mm	in.	mm
Breakway	305	0.018	0.4572
	330-762	0.024	0.6096
	787-1372	0.030	0.762
	1397-2134	0.036	0.9144
	2159 or more	0.047	1.1938
Rigid	610 round	0.060	1.524
	610 max	0.060	1.524
	Height 914 max, Width	-	-
	Over 610 high and 914 wide	0.075	1.905

- 판과 덕트 사이의 접합은 강접합 또는 분리 접합으로 구분됨. 분리 접합의 종류는 댐퍼 제조자의 설치 지침에 따라야 함. 마지막으로 NFPA 90A: Standard for the Installation of Air-Conditioning and Ventilating Systems에서 요구하는 유사한 특징의 모든 방화 댐퍼, 연기 댐퍼, 천장 댐퍼 및 방화 수단의 위치와 배치는 공기 덕트 시스템의 도면에 표시되어야 하며, 다음 표 2-47에서 NFPA 80과 같이 덕트의 직경과 최대 직경을 나타냄.
- 여기서, 덕트 설치 시 모든 면의 평균 허용 오차는 25.4mm를 초과하면 안 됨. NFPA 80 및 NFPA 90A 규정의 최대 배기관 크기를 살펴보면, 테러상황 발생 시 사람들의 대피 경로로써 환기시설을 활용할 수 있을 것으로 기대됨.

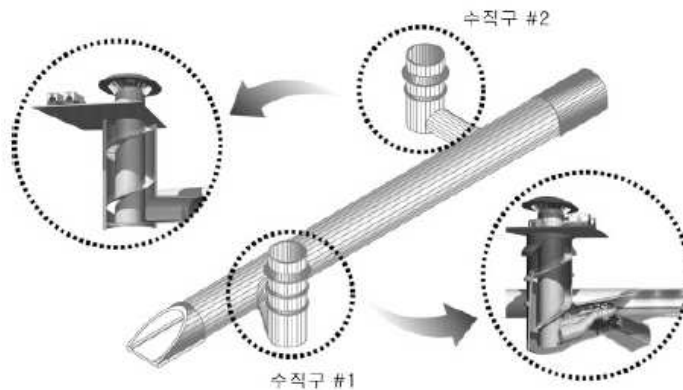
표 2-47. 환기 시스템 내 구성요소의 최소 두께 및 최대 폭 규정(NFPA 90A)

Air Duct Diameter or Maximum Width	Minimum Sleeve Thickness	
	in.	mm.
305	0.018	0.4572
330-762	0.024	0.6096
787-1372	0.030	0.762
1397-2134	0.036	0.9144
2159 or more	0.047	1.1938

- 관련 선행연구로써 손관호는 턴키(Turnkey) 방식으로 건설된 장동터널(보성-임성리 제2공구)에 대한 사례분석을 시행함. 장동터널은 터널 내 사고에 의한 인명 피해를 최소화하기 위해 대피 시나리오를 작성하여 구난활동이 신속하게 이루어질 수 있도록 계획을 수립함. 장동 터널은 연장이 약 5 km 이상이며, 장동 터널의 방재 방식은 터널에 수직구를 설치 및 이를 대피로로 활용하여 방재의 효율성을 증대시키는 것임.



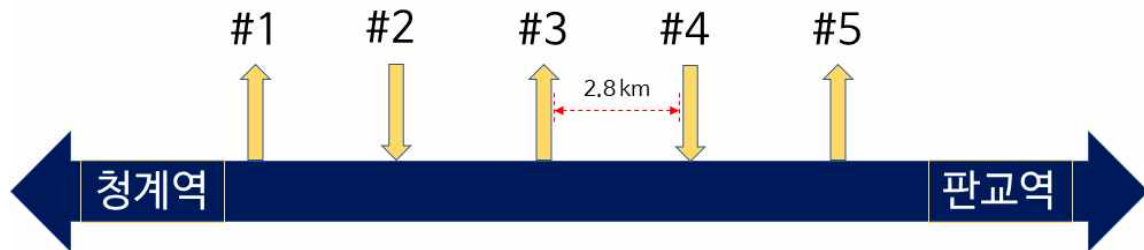
(a) 환기 설계



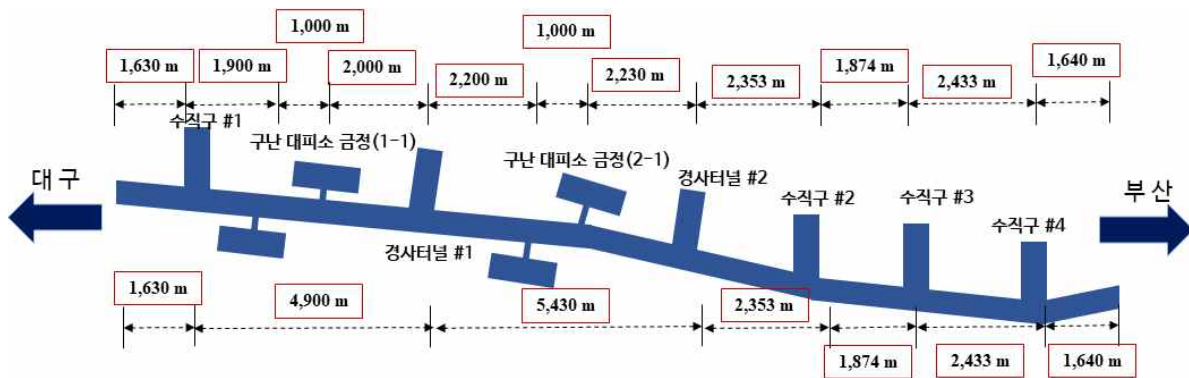
(b) 방재 설계

그림 2-77. 장동터널의 상세설계

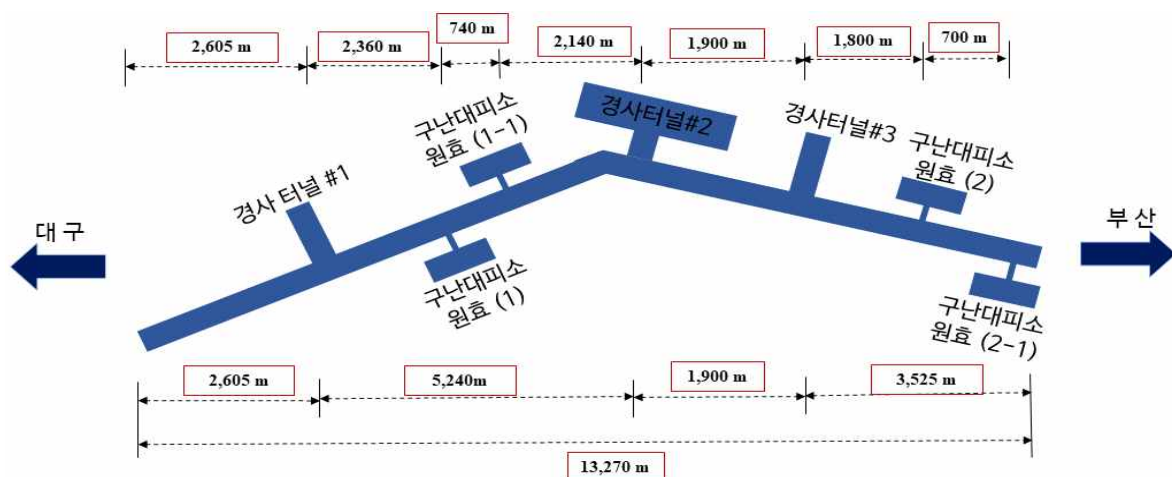
- 관련 선행연구로써 오세준 등은 장대 철도 터널에 적용된 대피로 및 환기구의 정량적 위험도 분석 (Quantitative risk analysis, QRA)을 수행함. 이 연구에서는 철도 터널 내 대피로 및 환기구를 병행하여 설치하는 것을 권장하였으며, 국내의 신분당선과 경부고속철도의 원효터널, 금정터널을 분석사례로 활용함.
- 신분당선 내 청계역부터 판교역까지의 거리는 실제 8km로 설계되어 있으며, 환기구의 최대 간격은 약 2.8km로 설정되어 있음. 또한, 원효터널과 금정터널은 길이가 각각 13.270km, 20.260km이며, 모두 2.5km 이내에 환기구가 존재함.



(a) 신분당선



(b) 원효터널



(c) 금정터널

그림 2-78. 국내 철도 터널의 환기구 배치

- 이 연구에서 정량적 위험도 분석을 수행한 결과, 환기구 및 대피로의 최대 간격은 2.9km까지 가능한 것으로 보고하고 있으며, 이는 재난 상황 발생 시 대피자들이 이동할 수 있는 거리이므로 국내 철도 터널에 대피로로써 설치된 환기구는 재난 발생 시 활용이 가능할 것으로 판단됨.
- 하지만, 지하 공간에 테러가 발생하면 빛의 확보가 곤란하여 지상으로 향하는 대피로의 선택이 곤란하며, 외기와 연결된 입구가 폐쇄되어 외부에서의 구조 활동에 제약을 받게 됨. 또한, 폐쇄된 구조에 의해 공기가 밀폐되어 지하 공간 내의 불특정 다수가 유독가스에 의한 질식 가능성이 크며, 마지막으로 지하 공간은 지상 공간보다 이동 통로가 협소하며, 테러 발생 시 방향 감각을 소실할 가능성이 큼.
- 아래의 표는 지하 공간에서 테러가 발생할 시 나타나는 현상이며, 이를 종합하면 실제 테러가 발생하면 지상으로 대피하기보다는 시설물 내 대피시설로 대피 방향을 설정하는 것이 바람직함.

표 2-48. 테러 발생 시 지하 공간에서 나타나는 특성

특성	위험 요소
빛의 확보	-정전 시 시야 확보 곤란 -대피로의 선택 곤란 -지하 공간의 폐쇄로 인한 심리적 장애
입구 폐쇄	-외부에서의 구조 활동 제약 -폐쇄성에 의한 공포감 형성 -질식 가능성 증가
내부 구조	-통로가 협소하여 방향 감각 소실 -보행 밀도가 높으면 혼잡 예상

- 시설물 내 대피시설로 이동하기 위한 대피 방법으로써 대피용 엘리베이터를 활용하는 데에는 어려움이 존재함. 이는 대부분의 기존 시설물 내에는 대피용 엘리베이터가 존재하지 않으며, 테러에 대한 대피용 엘리베이터를 추가로 설치하는 것은 부지확보, 예산 등 많은 제약이 따르기 때문임.
- 그러나 국내의 철도 터널에서는 환기구와 대피로를 병행하여 설치하였으며, 이에 대한 안전성은 보고가 되어있는 실정임. 하지만, 이를 실제로 국내 지하철 역사에 적용한 사례는 존재하지 않으며, 이를 지하철 역사에 적용하기 위해서는 엘리베이터의 안전성 확보 및 이에 관한 다양한 연구가 지속해서 수행되어야 함.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 연구목표

1.1 핵심성과별 단계 성과 목표 및 평가 방법

핵심성과 1		
정의	대피 경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	
목적	대피시설에 필요한 주요 요소들(문, 계단, 엘리베이터)을 레이저 스캐닝 시 Tag기술을 활용 최적화 기법 개발	
성능목표	(기존기술 수준) - 기준점들만 활용하여 레이저 스캐닝할 경우 구조물의 모든 정보들이 점 그룹으로 정보들이 추출되므로 스캐닝 후 불필요한 더미 정보들을 분류하는 데 더 많은 시간이 소요됨 (개발기술 수준) - 대피시설에 필요한 주요 요소들의 정보들 위주로 Tagging한 후 스캐닝하므로 정확한 정보 추출이 가능하고, 스캐닝 이후에 불필요한 분류 작업을 최소화할 수 있음	
소요기간	' 19.04.01 ~ ' 19.12.31 (9개월, 1년차)	
평가의 착안점 및 기준	- 보고서: 기존 스캐닝 기법 대비 20% 속도향상 - 레이저 스캐닝 데이터: 스캐닝 데이터 기반으로 작성된 지하철 역사 3D 모델	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	국내논문 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2		
정의	재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	
목적	대피시설의 최적의 대피경로 분석 및 대응방안 수립	
성능목표	(기존기술 수준) 기존 대피시설의 경우 대피경로 분석이 이루어지지 않아 대피 시 특정 구간에서 정체 현상이 발생하여 대피시설까지의 제대로 된 이동이 불가능한 상황 발생 - 대피시설의 수용력이나 이동경로의 표시 등도 합리적으로 수립되어 있지 않아 재난 상황에서의 적합한 대처가 불가능하고 위급상황 시 SOC시설 담당하고 있는 담당자와 시민들의 대응방안에 대한 제대로 된 실행절차가 수립되어 있지 않음 (개발기술 수준) - 지하철 역사내 대피시설의 최적의 대피 경로를 분석하고 최적 설계(안)을 도출 - 역사 내 사용자들의 대피교육을 위한 대피경로를 고려한 VR 콘텐츠 제작	
소요기간	' 20.01.01 ~ ' 20.12.31 (12개월, 2년차)	
평가의 착안점 및 기준	- 보고서: 최적 대피로 설계를 통한 대피 속도 20% 향상 - 가이드라인: 시설물 내 대피시설 최적 위치 선정 가이드라인 - VR 콘텐츠: 대피 알고리즘 개발 및 대피교육용 VR 콘텐츠 개발	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E) : 1건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3		
정의	FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발	
목적	시설물의 부분적 붕괴 및 비산물에 의한 피해 방지 안전한 대피가 가능하도록 방호성능이 향상된 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발	
성능목표	(기존기술 수준) - 대부분의 대피시설은 특별한 구조 설계기준 없이 60m ² 이상의 방송청취가 가능한 지하층의 공간이면 대피시설로 지정될 수 있음. 따라서 유사시 국민을 보호해야 할 대피시설은 행정적 지원과 보호의 기능을 할 수는 있으나 물리적 위협으로부터의 보호 기능은 보장하지 못하고 있음 군사적 목적으로 구조부재의 두께 증가를 통해 방호 성능을 향상시킴 광고물, 조명시설, 내장재에 대한 특별한 규정이 없어, 재난 발생 시 파편에 의한 인명 피해가 예상됨 (개발기술 수준) 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발 대피로 및 대피시설의 부분적 붕괴 방지 및 구조성능 유지를 위한 구조적 보강 기법 개발 파편발생 방지 보강기법을 확보하여 기존 대피 50% 파편발생 방지	
소요기간	' 20.01.01 ~' 20.12.31 (12개월, 2년차)	
평가의 착안점 및 기준	- 보고서: 보강기법이 적용된 구조부재 충격저항 실험 수행 - 특허출원: 파편 발생 방지 보강 기술확보	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건, 등록 : 1건
	논문	SCI(E) : 2건, 국내논문 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 4		
정의	시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보 기술 개발	
목적	시설물 붕괴 시 안전한 탈출로 확보 탈출로까지의 접근 방안 마련	
성능목표	(기존기술 수준) 구조물 붕괴에 대비한 탈출로 확보기술 부재 일부 개인용 방공호에서 소규모 탈출로 기술 적용 (개발기술 수준) 지하부터 지상까지 연결되어있는 엘리베이터를 활용하여 시설물 붕괴를 대비한 탈출로 설계 가이드라인을 제시	
소요기간	’ 20.01.01 ~’ 20.12.31 (12개월, 2년차)	
평가의 착안점 및 기준	- 가이드라인: 엘리베이터 활용 탈출로 설계(안) 가이드라인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E) : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

2. 목표 달성여부

구분		1차년도	2차년도	계	비고
국외논문 게재	SCI	-	4	4	1편 심사 중
	비SCI	-	-	-	
	계	-	4	4	
국내논문 게재	SCI	-	-	-	
	비SCI	1	1	2	
	계	1	1	2	
특허출원	국내	-	1	1	
	국외	-	-	-	
	계	-	1	1	
특허등록	국내	-	1	1	
	국외	-	-	-	
	계	-	1	1	
인력양성	석사	1	3	4	
	박사	1	-	1	
	계	2	3	5	
기술이전	계약건수	-	-	-	
	계약액	-	-	-	
	징수액	-	-	-	
국제 표준화	기고서 제출	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	
국내 표준화	기고서 제출	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		-	-	
	연구시설·장비		-	-	
	기술요약정보		-	-	
	생명 자원	생명정보	-	-	
		생물자원	-	-	
		신품종	-	-	
	소프트웨어		-	1	
	화학물		-	-	
기타	시제품		-	-	
	성과 홍보		-	-	
	일자리 창출		-	-	

○ 1차년도(2019.04~2019.12)

핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물	성과점검기준				달성도 (%)
			질적 성과지표		목표치	달성치	
Task 1	대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	대피경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	①	기존 기술대비 스캐닝 속도	20% 향상	20% 향상	100
			②	지하철 역사 3D 형상정보 데이터	실측 데이터 확보	실측 데이터 확보	100

핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물	성과점검기준			달성도 (%)	
			질적 성과지표		목표치		달성치
Task 2	재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	①	최적 대피로 설계를 통한 대피 속도 향상	20% 향상	20% 향상	100
			②	시설물 내 대피 시설 최적 위치선정 가이드라인	가이드라인 개발	가이드라인 개발	100
			③	대피 알고리즘 개발 및 대피교육용 VR 콘텐츠 개발	알고리즘 및 VR 콘텐츠 개발	알고리즘 및 VR 콘텐츠 개발	100
Task 3	FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피 시설 보강기법 개발	FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피 시설 보강기법 개발	①	보강기법이 적용된 구조 부재 충격저항 실험 수행	구조부재 2종 이상 실험	구조부재 2종 이상 실험	100
			②	파편 발생 방지 보강기술 개발	미보강 대비 50% 파편 감소	미보강 대비 50% 파편 감소	100
Task 4	시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보 기술개발	시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보 기술개발	①	엘리베이터 활용 탈출로 설계 가이드라인	가이드라인 제시	가이드라인 제시	100

2.1 년차별 평가의 착안범 및 기준

구분	년도	세부연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
1차년도	2019	대피 경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득	스캐닝 기법 속도향상	20% 향상	10				
		레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	스캐닝 데이터 기반 지하철 역사 3D 모델 개발	실측 데이터 확보	10				

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
2차년도	2020	재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	최적 대피로 설계	20% 향상	10				
			시설물 내 대피시설 최적 위치 선정 가이드라인	가이드라인 개발	20				
			대피교육용 VR 컨텐츠 개발	알고리즘 및 VR 컨텐츠 개발	15				
		FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발	보강 구조부재 충격저항 실험	구조부재 2종 이상 실험	10				
			파편 발생 방지 보강기법 개발	미보강 대비 50% 파편 감소	15				
		시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보 기술 개발	엘리베이터 활용 탈출로 설계(안) 가이드라인	가이드라인 제시	10				

2.2 관련 분야 기여도

2.2.1 기술적 측면

○ 3D 형상정보 획득 기술 수준 향상으로 기술력 제고

- 대피 경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발을 통해 기존 시설물의 형상 스캐닝 속도를 20% 향상함으로 형상정보 수집 기술력의 제고.
- 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설의 최적 위치 선정기술 개발을 통해 최적 대피 경로를 설계함으로 기존 대비 20% 이상 대피 속도 향상 기술 확보.

○ 대피 시설 및 대피로 방호성능 확보 및 평가기술 개발

- 대피 시설 최적 설계 가이드라인 개발을 통해 시설물 내 대피시설물의 시공 및 설계 표준화, 이로 인한 건설 기술력 증대가 기대됨.

2.2.2 경제적 · 산업적 측면

○ 최적 설계 가이드라인 제시를 통한 경제성 향상

- 대피 시설의 설계 시에 정립된 평가 기준을 활용함으로써, 과다 · 과소 설계를 예방할 수 있으며 경제적인 설계가 가능.
- 비상상황에 대비한 설계가 가능하여 국민들의 피해를 최소화하며, 복구에 필요한 예산 절감 가능.
- 표준화된 가이드라인 제시로 인해 개발 기술의 실용 가능성 증가 및 국제 기술 규격 분야에 공헌할 수 있음.
- 시설물 내 대피 시설의 최적화된 보강성능 확보를 통해 부가적인 내구성 향상이 기대되며 유지보수 등의 추가비용 절감이 예상됨.

○ 기술 선진국으로부터 수입 대체 효과 및 후발 국가에 수출 기대

- 시설물 내 대피시설 설계 및 보강기법은 미국과 유럽을 중심으로 한 선진국이 세계 시장을 주도. 한편 보안기술에 해당되어 우방국으로부터 수입되고 있음. 본 기술개발을 통해 기술 수입 대체 효과를 기대할 수 있음.

2.2.3 사회적 측면

○ 국민의 인식전환

- 시설물 내 대피 시설 및 대피로 성능 향상을 통하여 테러 대비책 강화, 인적, 물적 피해의 최소화가 가능. 이를 통한 국민의 불안요소 감소.
- 시설물 내 대피 시설 시공에 있어 구조 부재 크기의 증가 없이 방호성능을 향상시키는 기법 개발을 통해 보강기법 적용에 대한 건설업계 거부감 해소.

○ SOC 시설물에 방호성능이 확보된 대피 시설 구축

- 미비되었던 대피 시설의 방호성능에 대한 검토와 안전 인식 환기 및 경각심 고취.
- 성능이 우수한 보강 재료를 사용함으로써, 기타 대형사고의 발생 시 추가 피해를 감소시킴.

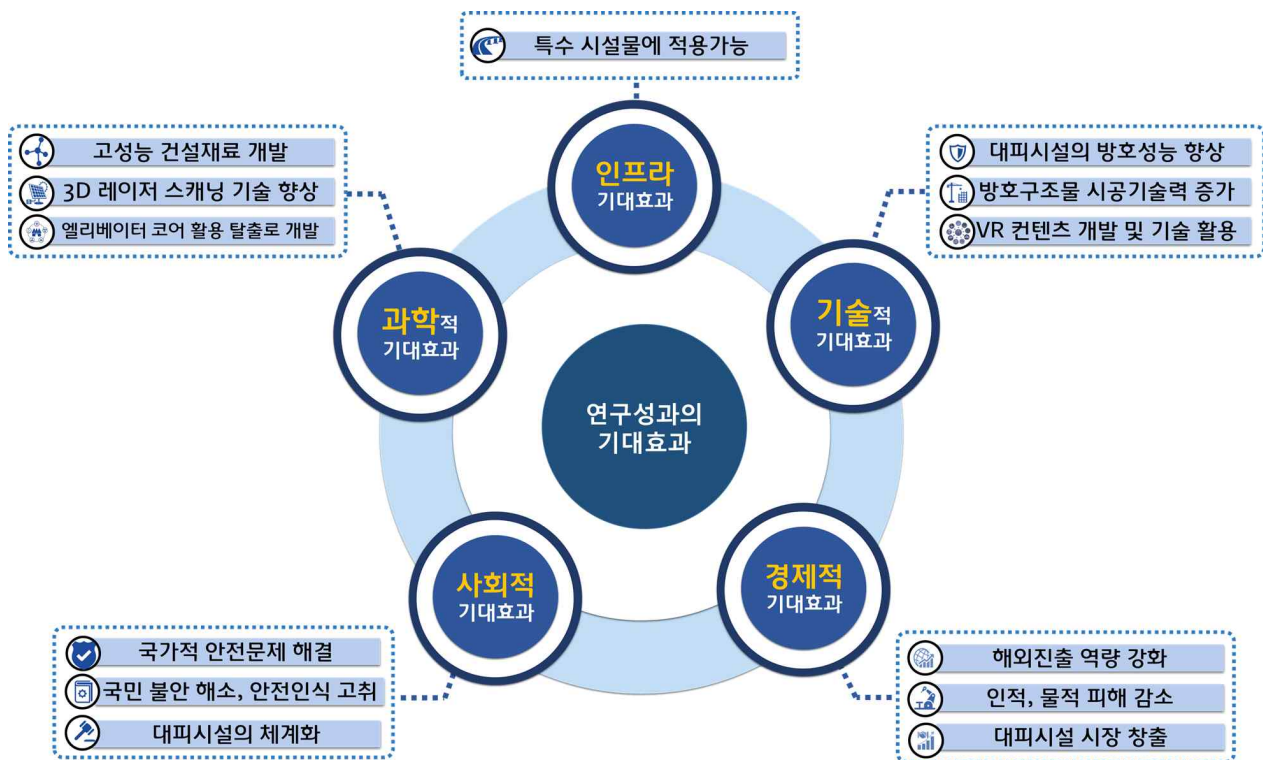


그림 3-1. 관련 분야 기여도 및 기대효과

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

○ 논문 1건 심사 중

- 현재 심사 중인 SCI급 논문 1편은 가장 먼저 준비되어 심사의뢰 제출하였으나, 처음 세 번의 각기 다른 SCI급 국제 저널에서 특수한 분야의 연구 테마로 인해 심사를 할 수 있는 리뷰어가 없어 불가피하게 철회를 해달라는 요청이와서, 현재 네 번째 저널에 제출되어 심사 중인 관계로 목표 달성이 늦어지게 되었음.

4. 연구개발성과의 활용계획

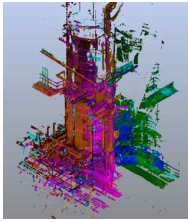
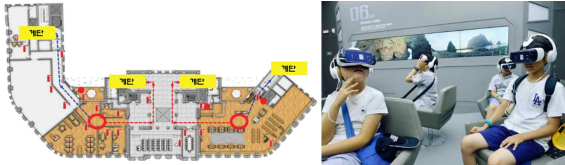
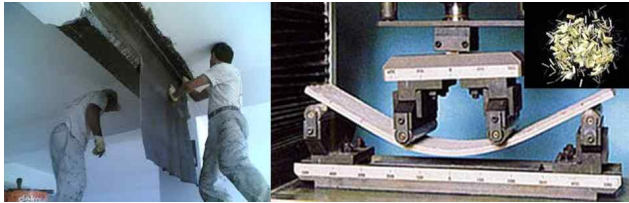
1. 연구성과물 활용방안

- 본 과제는 기초원천 기술개발에 초점을 맞추되 개발된 기술이 최종적으로는 실용화될 수 있도록 실용화를 고려하여 연구를 수행함.
- 1차 연도에서 개발한 3D 레이저 스캐닝 기법을 활용하여 재난 발생 시 최적 대피경로 및 대피시설의 설치 위치를 선정하는 연구를 수행함.
- 대피로 및 대피시설에 대하여 각종 재난(물리적 테러 등)에 따른 부분적 붕괴, 비산물에 의한 예상 피해 상황을 평가하고, 이에 대하여 FRP, 고성능 시멘트 복합체를 활용하여 대피로 및 대피시설의 보강 기법을 적용함.

- 시설물 붕괴를 대비하여 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술을 개발하여, 재난 발생 시 대피부터 재난 종료 시 최종 탈출까지를 고려한 통합대피시스템 구축에 활용할 수 있음.
- 일반적인 지하철 역사에 활용 가능한 3D 레이저 스캐닝을 이용하여 기존 시설물의 형상정보를 획득하여 데이터베이스를 구축하여 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설의 최적 위치 선정 기술 개발에 활용하고자 함.
- 제작된 VR을 활용하여 국민의 안전의식을 도모할 수 있을 뿐만 아니라 시설물 내 대피를 위한 안전교육 자료로 활용할 뿐만 아니라, 공공용 시설물 내 대피를 위한 데이터베이스로 활용될 수 있음.
- 개발한 핵심 성과물인 파편 발생 방지를 위한 보강기법은 기존의 대피 구조물 및 방호시설 보강을 위한 핵심 기술로 활용하며, 이에 대한 공학적 근거를 마련할 수 있는 시험평가법과 지침으로 활용하고자 함.
- 개발한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발로 재난 발생 시 대피부터 재난 종료 시 최종 탈출까지를 고려한 통합 대피시스템 구축에 활용하고자 함

- 타 시설물로 연계 확대할 수 있음 (추가 연구를 통해 보완되어야 할 사항)
- 대피 시설 및 대피로 방호성능 확보 및 평가기술 개발을 통해 시설물 내 대피시설물의 시공 및 설계 표준화, 이로 인한 건설 기술력 증대가 기대됨.
- 타 시설물에 방호성능이 확보된 대피 시설 구축 및 미비되었던 대피 시설의 방호성능에 대한 검토와 보강기술 적용.
- 현재의 연구가 단기 대피용이므로 향후 중장기 대피를 위한 교통라우팅 최적화와 에너지 및 환경위생 등이 고려된 SIP 그리드 등의 구축에 활용 전망.
- 그러나 본 연구에서는 단기적(24시 이내) 대피 및 단순 재난(물리적 테러)의 연구 한계가 내포되어 있음. 건설재료, 설계 및 시공기술, 설비 및 에너지 기술 등이 융·복합적으로 장기간 대피 및 다양한 재난에 관한 집단 연구가 진행되어야 함.
- 즉 최적 시설물 내 대피시설의 위치 선정뿐만 아니라, GIS 정보와 실시간 교통정보처리 기술을 통해 빅데이터로 활용될 수 있으며 AI 기술과의 접목으로 효과적인 재난 대응 실시간 긴급 대피 통합 기술 개발이 필요하며, 대피로 및 대피시설의 내폭 구조적 저항성능 설계기준 확립, 환기 및 정수 시설 및 방안 정립이 필요함.

2. 핵심성과물별 활용계획

핵심성과물	활용방안
대피 경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발	 (지하철 3D 형상정보 획득 가상도) - 기존 기술대비 스캐닝 속도 20% 향상 - 시설물의 3D 형상정보 데이터베이스 구축 - 최적 대피 경로 및 대피 시설 선정 데이터로 활용
재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발	 (SIP 최적 위치선정 및 교육 가상도) - 최적 대피로 설계를 통한 대피 속도 20% 향상 - 시설물 내 대피 시설 최적 위치선정 가이드라인 제시 - 최적 대피 알고리즘 및 교육용 VR 콘텐츠 개발을 통해 안전교육 자료로 활용
FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 개발	 (FRP 및 고성능 시멘트 복합체 활용 가상도) - 대피로 및 대피 시설 종류에 따른 보강 성능 지표 제시 - 구조부재 비산물 피해 방지 보강기법 개발 - 구조부재 요소별 방호성능 개선
시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발	 (엘리베이터 활용 탈출로 활용 기술) - 재난 발생 시 엘리베이터를 탈출로로 활용 가능 - 통합 대피시스템 구축 활용 가능

3. 핵심성과물별 활용형태

- 대피 경로 분석을 위한 시설물 3D 형상정보 획득 레이저 스캐닝 최적화 기법 개발
 - 3D 레이저 스캐닝을 이용하여 기존 시설물의 형상정보를 획득하여 데이터베이스를 구축하여, 다양한 목적으로 활용 가능.
 - 기존 3D 레이저 스캐닝 대비 스캐닝 속도가 20% 향상된 데이터 처리 속도를 바탕으로 개발 기술을 실용화할 수 있음.
- 재난 시뮬레이션 기반 대피로 및 시설물 내 대피 시설(SIP)의 최적 위치 선정기술 개발
 - 국내 환경을 고려한 재난(물리적 테러) 시뮬레이션 연구를 통한 시설물 내 대피 시설 최적 위치선정 가이드라인을 제시함.
 - 최적 대피 알고리즘 및 교육용 VR 콘텐츠를 개발함으로써 국민의 안전의식 향상을 모색할 수 있음.
- FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피 시설 보강기법 개발
 - 개발된 보강기법을 대피 시설 이외의 다양한 특수목적 구조물에 적용할 수 있음. 예를 들어 원자력발전소, 가스저장 시설과 같은 내충격 및 방폭 성능이 요구되는 구조물에 활용할 수 있음.
 - 파편 발생을 방지하는 보강기법은 특허 출원 및 등록을 통해 기술을 이전하여 상용화할 수 있음.
 - 대피 시설을 구축하고 보강하는 기술개발을 통해 공공용 대피 시설뿐 아니라 개인용 대피 시설 혹은 군사 목적의 시설물 시공에 활용할 수 있음.
- 시설물 붕괴를 대비한 엘리베이터 활용 탈출로 확보기술 개발
 - 본 연구를 통해 개발되는 최적 대피로 설계 및 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술의 융합으로 재난 발생 시 국민 안전을 보장하는 통합 대피시스템으로 활용될 수 있으므로, 실용화 가능성이 높은 개별 기술이라 판단됨.

4. 국내외 과학기술 수집정보

- 시설물 내 대피시설 관련 지침
 - 국내 임시 대피 시설 지침에는 대피 관련 법령 및 지침에 따라 대피계획을 정부 또는 지자체별로 다양하게 수립되어왔음. 하지만 아직 국내에는 전문적인 임시대피 시설 관련 법령이 따로 없을 뿐만 아니라, 응급 대피공간에서 갖추어야 할 최소한의 항목만 제공하고 있을 뿐 구체적인 세부지침은 없으므로 상황으로 본 연구개발을 통해 시설물 내(SIP)에 대한 보다 구체적인 규정이 만들어진다면, 보다 안전한 재난 상황의 극복을 기대할 수 있음.
 - FEMA(Federal Emergency Management Agency, 미국 연방 재난관리청)에서는 재난 상황 발생 시, 주거의 종류에 따라 재실자를 보호하는 방안에 관해 기준을 제시하고 있음. 용도에 따라, 거주하고 있는 위치에 따라 Shelter를 안내하고 있으며, 지역 특성에 따른 추가적인 위협의 영향도 고려하고 있음.
 - 시나리오별 기존 기준과 BIM 모델링과 비교분석을 수행하고자 중국 GB50157(2013)_CFDOM (Code for Design of Metro), 일본 JIS Railway standards, 미국 NFPA 130 (2014)의 기준을 수집하여 비교분석을 수행함.
- 시설물 내 대피시설의 최적위치 선정을 위한 BIM 모델 활용
 - BIM 모델이 구축된 공공시설물에 대해서 대피 시설의 방호성능을 평가하기 이전에 대피 시설의 위치와 접근성, 수용 용량, 공공시설을 이용하는 사용자들의 동선 등을 고려한 전반적인 분석을 평가할 수 있음.

- 즉, 평상시에는 공공시설의 용도로 이용을 하지만 CBRE(Chemical, Biological, Radiological and Explosive) 상황에서는 대피 시설(SIP, Shelter In Place)의 역할을 수행 할 수 있게 설계 단계 혹은 공용 중인 단계에서도 시설물의 구조적/시설적인 문제점 등을 파악 후 보강/보완에 대한 대책을 수립 하고 최적의 SIP 위치 및 동선 확보를 위한 개선점들을 제시하였음.
- 모델은 건축 시설물과 토목 시설물의 성격을 공통적으로 가지고 있는 지하 경전철 역사를 샘플 모델로 사용하였으며 모델링에 사용된 도구는 Autodesk Revit을 활용함.

○ FRP 및 고성능 시멘트 복합체를 활용한 대피로 및 대피시설 보강 기법 관련 지침

- TM 5-1300(Department of the Army, 1990), Security Engineering Manual(US Army, TM 5-853, 1988 and 1994), Tri-Service Manual TM 5-1300(Department of Army, 1990), Army Technical Manual 5-855-1(Department of Army, 1986), ASCE Manual 42(1985), ASCE Guidelines for Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities(1997), ASCE Structural Design for Physical Security(1999), DoD and GSA Criteria: United Facilities Criteria(4-010-01 and 4-023-03, 2003 and 2005)와 GSA(2003), DoE Manual 33: TM 5-1300, FEMA Guidelines(2003) 등 기준들을 참고하여 본 연구 구조실험 변수설정을 수행하였음.

5. 연구개발성과의 보안등급

- 본 연구과제의 기술적 구성요소는 본 연구를 통해 개발되는 대피로 확보기술, 방호성능이 향상된 대 피 시설, 엘리베이터를 활용한 탈출로 확보기술이 하나로 통합되어 재난 시 국민 안전을 보장하는 통 합 대피시스템을 구축할 수 있으며, 실용화 가능성이 큰 개별 기술로 구성되어 있으므로 보안등급의 분류상 일반 과제로 분류하는 것이 합당하다고 판단됨.
- 재료개발 분야와 시험 및 평가 분야는 원천기술을 개발하고는 대피경로기술을 개발하였고 이를 본 과 제의 참여 기관 이외 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공할 수 있으므로 연구과제 보안등급의 분류상 일반 과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨.
- 또한, 이 분야의 연구개발에 필요한 3D 형상정보를 획득하는 데는 막대한 비용이 필요함. 특히, 3D 레이저 스캐닝에 필요한 장비는 임대 비용이 많이 필요함. 따라서 본 연구 사업에 투입되는 연구비용 을 효율적으로 집행하기 위해 정부 기관의 적극적 협조 및 공공용 시설물 내의 관련 부처의 협조 받 는 것을 전제로 연구과제를 제안함.
- 시설물의 방호성능 평가를 위한 충격 실험과정에서 부분적으로 국가 보안 사항으로 분류될 수 있으므 로, 전문기관과 국방시설본부 등으로부터 협조 요청을 받는 것을 전제로 연구과제를 제안하며, 제공 받은 협조 요청에 대하여 보안 유지할 것을 제안함.

6. 연구개과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	지하철 역사 대피시설 최적화 설계를 위한 BIM 모델링 및 VR 시뮬레이션	고려대	교신	한국방재학 회논문집	-	2019.12	단독	비SCI
2	논문	탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 콘크리트로 보강한 콘크리트 보의 구조성능 평가	고려대	교신	한국방재학 회논문집	-	2020.08	단독	비SCI
3	논문	Strategic use of steel fibers and stirrups on enhancing impact resistance of ultra-high- performance fiber-reinforced concrete beams	고려대	교신	Cement and Concrete Composites	6.257	2020.03	단독	SCI
4	논문	Bond Strength and Flexural Capacity of Normal Concrete Beams Strengthened with No-Slump High-Strength, High-Ductility Concrete	고려대	교신	Materials	3.057	2020.09	단독	SCI(E)
5	논문	Effect of Strengthening Methods on Two-Way Slab under Low-Velocity Impact Loading	고려대	교신	Materials	3.057	2020.12	단독	SCI(E)
6	논문	Effect of Design Code and Evacuation Information on Strategic Location of Shelter in Place (SIP) in Light Rail Station	고려대	교신	Journal of Asian Architectur e and Building Engineering	0.384	심사 중	단독	SCI(E)
7	특허	다양한 콘크리트 계면 부착 강도 측정장치	고려대	발명자	대한민국	-	2020.09	중복	등록번호 10-215 6753
8	특허	내충격성 보강용 콘크리트 조성물 및 콘크리트 부재 보강 구조	고려대	발명자	대한민국	-	심사 중	단독	출원번호 10-2020-0 023671 등록 심사 중

7. 기타 사항

○ 논문 1: 지하철 역사 대피시설 최적화 설계를 위한 BIM 모델링 및 VR 시뮬레이션

J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 19, No. 1 (Dec. 2019), pp.139-147
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.139

ISSN 1738-2624(Print)
ISSN 2287-4728(Online)
www.kosham.or.kr

사실발명자

지하철 역사 대피시설 최적화 설계를 위한 BIM 모델링 및 VR 시뮬레이션

BIM Modeling and VR Simulation for Optimal Design of Subway-Station Evacuation Facility

조리해*, 김영휘**, 유성***, 윤영수****
Zhao, Lihai*, Kim, Younghui**, Yu, Sung***, and Yoon, Youngsoo****

Abstract

Most of the current public facilities focus on their utility and functionality. Therefore, they do not consider the evacuation of occupants in the event of a disaster. For this reason, research on evacuation methods and evacuation-time minimization is required. Therefore, accurate modelling of public facilities is important. This study presents a process of conducting virtual 3D modeling to evaluate the path during disaster by applying the Building Information Model for reverse engineering using laser scanning. We used the Artec Scanner as a sample. In addition, the method of developing a virtual reality (VR) simulation for evacuation education is presented by applying a technology linked to VR. If the 3D modeling method and educational VR simulation methodology presented in this paper are applied to existing public facilities, we expect that people will be able to evacuate more quickly and safely in case of emergencies.

Key words: BIM, VR, Simulation, Laser Scanning, 3D Modeling, Evacuation in Facilities

요 지

현재 공공시설 대부분은 효율성과 기능성에만 중점을 두고 있어 재난상황 발생 시, 재산자들의 대피에 관해서는 고려가 되지 않고 있다. 이러한 현상으로 대피 방법이나 대피 시간 단축에 대한 연구가 필요하며, 이를 위해 공공시설물들을 정확히 모델링하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 안압측을 사레로 들어 레이저 스캐닝을 이용한 역설계 기술에 BIM을 이용하여 재난 상황에서의 대피 시 경로 분석을 위한 가상의 3D 모델링을 진행하는 과정을 제시하였다. 또한, VR과 연계한 기술을 적용하여 대피 교육용 VR 시뮬레이션을 제작 개발해 제시하였다. 본 연구에서 제시한 3D 모델링 방법과 교육용 VR 시뮬레이션의 제작 개발에 관한 공공시설물에 적용된다면 비상상황 발생 시, 재산자들의 더욱 신속하고 안전한 대피가 가능할 것으로 기대된다.

핵심어: BIM, VR, 시뮬레이션, 레이저 스캐닝, 3D 모델링, 시설물 내 대피

1. 서 론

고시에 따르면 지하시설물에 23,386개의 공공시설이 대피 시설물로 지정되어 운영되고 있다. 그러나 공공용, 민간용 대피시설은 인명피해예방법시행규칙 제15조에 따라 60년

*정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 박사과정(E-mail: whlgm0114@korea.ac.kr)
Member, Master's Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
**정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 박사과정(E-mail: yoonyoungsoo@korea.ac.kr)
Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
***고려대학교 건축사학부공학부 박사과정(E-mail: nungjoo@korea.ac.kr)
Member's Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 교수(E-mail: yooys@korea.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

- 339 -

○ 논문 2: 탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 콘크리트로 보강한 콘크리트 보의 구조성능 평가

J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 20, No. 4 (Aug. 2020), pp.185-193
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.4.185

ISSN 1738-2624(Print)
ISSN 2287-4728(Online)
www.kosham.or.kr

사실발명자

탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 콘크리트로 보강한 콘크리트 보의 구조성능 평가

Evaluation of Structural Performance of Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets and No-Slump Concrete

유선재*, 원천봉**, 홍세희***, 윤영수****
Yoo, Sunjae*, Yuan, Tianfeng**, Hong, Sehee***, and Yoon, Youngsoo****

Abstract

In this study, the compression and tensile sections of existing concrete beams were reinforced with carbon fiber sheet (CFS) and no-sump high-strength, ductility concrete (NSHSDC) to evaluate the structural response of the reinforced concrete. From the experimental test results, the CFS showed a low energy dissipation ability when reinforced at both the compression and tension sections. However, the NSHSDC reinforcement exhibited high energy dissipation and the lowest deflection under maximum load at both the compression and tension sections. The NSHSDC without reinforcement in the compression section, and concrete reinforced with CFS, exhibited lower load resistance and concrete compression failure. Furthermore, a linear relationship between the compression reinforcement and structural performance was observed, which demonstrated the high load resistance and excellent structural performance of the member reinforced with NSHSDC at both the compressive and tensile sections.

Key words: Carbon Fiber Sheet, No Slump Concrete, Reinforcement, Load Resistance, Ductility

요 지

본 연구에서는 콘크리트의 압축부 및 인장부 보강에 따른 구조적 거동을 평가하기 위하여 탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 보강한 콘크리트 보를 제작하였다. 실험결과, 탄소섬유 시트를 콘크리트의 압축부 및 인장부에 모두 보강한 부재에서 낮은 에너지 소산 능력을 보였다. 그러나 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 압축부 및 인장부에 모두 보강한 부재는 최대하중 작용 시 가장 적은 처짐을 보였으며, 높은 에너지 소산 능력을 보였다. 탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 압축부를 보강하지 않은 시 최대하중 시 높은 처짐 및 에너지 소산 능력을 보였다. 최종적으로 콘크리트 압축부 보강과 구조성능 사이의 선형관계를 확인하였으며, 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 압축부 및 인장부 모두 보강한 부재에서 우수한 하중 저항 및 구조성능을 보였다.

핵심어: 탄소섬유 시트, 노 슬럼프 콘크리트, 보강, 하중 저항능력, 연성

*정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 석사과정(E-mail: redboss@korea.ac.kr)
Member, Master's Course, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
**정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 박사 후 연구원(E-mail: yuantiang@korea.ac.kr)
Member, Postdoctoral Researcher, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
***정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 박사과정(E-mail: hongseehi@korea.ac.kr)
Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사학부공학부 교수(E-mail: yooys@korea.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

- 185 -

은 크게 두 가지 경로로, 첫 번째는 지하 1층에서 지하 2층으로의 대피경로 시뮬레이션, 두 번째는 지하 2층에서 지하 3층으로의 대피 경로 시뮬레이션이다. 시뮬레이션 사진은 Fig. 18과 같다.



Fig. 18. Simulation for Evacuation Route in VR.

BIM 모델링 데이터를 이용해 VR기기를 활용한 대피 시뮬레이션 작업을 통해 화재 재산자들의 대피행태 분석 연구와 시설물 내 재난 대피 시뮬레이션 교육용 VR 콘텐츠로 개발 가능성을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 안전의 혁신에 대한 레이저 스캐닝을 진행 하고 역설계 방법을 통해 역사물 모델링하는 방법을 제시하였으며 BIM 소프트웨어를 이용하여 VR과 연계한 다차원 기술을 적용하여 교육용 VR 시뮬레이션 제작 가능성도 제시하였다. 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 3D 레이저 스캐닝을 이용하여 기존 시설물의 형상정보에 대한 데이터베이스를 구축할 수 있고 BIM 소프트웨어를 이용한 VR 시뮬레이션 제작에 활용할 수 있는 데이터를 제공할 수 있다.
- (2) 레이저 스캐닝으로 얻어진 데이터를 활용하여 3D 모델링 작업의 오류를 줄이고, 프로그램 간의 연동으로, 동적인 작업 및 역설계가 가능해진다. 이로 인해 SOC 시설물의 기존 자료의 손실, 유지, 관리 등에 효과적으로 대응할 수 있다.
- (3) 본 연구에서는 6 Target과 12 Target의 비교에서 Target의 위치와 수량을 통해 발생하는 스캐닝 Quality의

346 한국방재학회지, 제20권 7호 2019년 12월

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 하중 저항능력을 높이고, 초기 압축파괴를 방지하고자 CFS 및 NSHSDC로 콘크리트를 보강한 후, 하중을 가한 후 처짐 및 에너지 소산 능력을 평가하였다. 또한, 보강 방법에 따른 파괴 모드를 비교하여, 구조부재의 성능을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다양한 보강 방법에 따른 하중 저항 능력, 콘크리트 부재의 최대하중은 모두 유사하게 나타났다. 또한, 보강면이 늘어남에 따라 최대하중 작용 시 처짐이 줄어드는 경향이 나타났다. 하지만 CFS로 보강한 부재는 CFS의 보강 길이가 증가함에 따라, 최대하중 이후 CFS의 초기 박리가 발생하여 급격히 하중 저항능력이 줄어들었다.
- (2) 보강 방법에 따른 영향은 비교한 경우, 압축부 및 인장부를 CFS 및 NSHSDC로 보강한 부재에서 콘크리트 압축파괴가 현저히 줄어든 것으로 확인되었다.
- (3) 연성성능 및 에너지 소산 능력은 NSHSDC로 보강한 부재가 CFS로 보강한 부재보다 더 큰 값을 나타냈다. 이는 NSHSDC로 보강한 부재가 최대하중 이후 강성을 유지할 수 있었으며, 콘크리트의 초기 압축파괴를 방지할 수 있었기 때문이다.
- (4) CFS 및 NSHSDC로 보강한 부재의 파괴 모드 및 균열 발생을 비교한 결과, NSHSDC로 보강한 부재에서 균열 개수가 증가하고, 균열 발생 면적이 더 넓은 것을 확인할 수 있다. 이는 CFS로 보강한 부재에서 최대하중 증가 급격히 상하하가 종료되었기 때문이다.

이상을 종합하여 볼 때, NSHSDC로 콘크리트 압축부 및 인장부에 모두 보강한 경우, 우수한 하중 저항능력 및 처짐 제어를 기대할 수 있으며, 콘크리트의 초기 압축파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업의 연구비지원(과제번호: 19CTAP-C152893-01-000000)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

ACI 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute, pp. 351-354.

192 한국방재학회지, 제20권 4호 2020년 4월

자이를 확인하였다. 6 Target 스캐닝에서는 약 20-30% 정도의 사각지대가 발생했다. 또한, 데이터 정합과정에서 사각지대로 인해 발생하는 인식의 오류가 나타났다. 이는 Target 배치에 따른 모델링 작업의 정확도와 시간에도 영향을 미쳤으며, 6 Target 스캐닝은 모델링 시간에서도 12 Target보다 약 26%-27% 작업시간이 늘어난 것을 확인할 수 있다.

(4) 본 연구의 레이저 스캐닝을 통한 역설계의 과정은 3D 모델링과 VR 시뮬레이션 등을 활용하여 SOC시설물의 관리에 유용할 것이며 또한 재산자들의 재난 상황 발생 시 신속한 대피에 관한 연구와 교육용 VR 콘텐츠 개발에 통해 신속하고 안전한 대피가 가능해질 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업의 연구비지원(과제번호: 19CTAP-C152893-01-000000)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Hwang, Y.J., Koo, W.Y., Hwang, Y.K., and Yoon, H.J. (2011). *A development of fire evacuation simulation: system based 3D modeling*. *Fire Science and Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 156-167.

Kim, Y.H., Lee, J.Y., Yuan, T.F., and Yoon, Y.S. (2018). *A study on selecting the best location of 'Shelter in Place' in light rail station using agent simulation and BIM model*. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 251-260.

Kuligowski, E.D., Peacock, R.D., Renske, P.A., Wiers, E., Hagwood, C.R., Overholt, K.J., et al. (2015). *Movement on stairs during building evacuation*. NIST Technical Note 1839, National Institute of Standards and Technology.

Lochhead, I.M., and Hadley, N. (2019). *Modeling evacuation in a virtual space: Linking three-dimensional data capture, simulation, analysis, and visualization workflows for risk assessment and communication*. *Information Visualization*, Vol. 18, No. 1, pp. 173-192.

Martinez-Ares, M.D., Lopez-Alonso, M., and Martinez-Rojas, M. (2018). *Building information modeling and safety management: A systematic review*. *Safety Science*, Vol. 101, pp. 11-18.

Paik, H.J., Panya, D.S., Goo, H.M., Kim, T.H., and Seo,

○ 논문 3: Strategic use of steel fibers and stirrups on enhancing impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams



1. Introduction

Demand for improving the structural performance of infrastructure subjected to extreme loads, such as impact and blast, has increased because of an increase in man-made threats, e.g. nuclear power plant accidents, chemical plant explosions, and terrorism. In this context, various studies have been conducted to develop cement-based construction materials, which have enhanced impact and blast resistance, compared with ordinary concrete. As a part of such efforts, ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPRC) with micro steel fibers was developed and attracted attention from many researchers for enhancing the impact and blast resistance of structures [1] because of its very high mechanical properties (compressive strength > 150 MPa, tensile strength > 2 MPa, fracture energy > 20 J/m²) [2]. In recent years, dynamic material properties of UHPFRCC have been studied after basic research results on UHPFRCC under static loading condition were accumulated [3–5]. Rung et al. [3] evaluated the dynamic compressive behavior of UHPFRCC with various steel fiber contents and reported that the impact resistance was increased by using more fibers and that the

3.3.3. Crack and failure patterns

Fig. 14 illustrates the final crack profiles of the impact test specimens. The identical specimens exhibited similar failure modes regardless of the loading types, compared with static test specimens in Fig. 5. All the specimens failed in a flexure-critical mode except specimen UH-0.0, whereas the specimen without fibers and stirrups, UH-0.0, failed in a shear-critical mode. Notably, all test specimens under impact loading conditions exhibited multiple flexural cracks, and the cracks were steeply propagated into the compression zone, except in the case of specimen UH-0.0. As for static test specimens, the crack inclination was less steep. Moreover, the number of cracks in the impact test specimens was significantly smaller than in the static test specimens. This is because the velocity of crack propagation is higher than the load transfer velocity, and shortened cracks are obtained under high loading rate [47]. In addition, this can be a potential explanation of the decreased ductility index in UHPFRCC beams under impact load.

- 4. Conclusions**
- This study investigated the effects of steel fiber and stirrups on the structural behavior of UHPFRCC beams under static and impact loading conditions. From the above discussions, the following conclusions are drawn:
- Under static loading conditions, the fiber content influences the post-cracking behavior of UHPFRCC beams: including flexural strength, flexural rigidity, and toughness. Even a low inclusion of steel fiber, e.g., 0.5 vol%, was effective in improving the post-cracking behavior with the formation of multiple cracks. In addition, transverse reinforcement was effective in increasing the ductility index.
 - The results of the impact test, measured under different test conditions, can be normalized by the proposed procedure in this study. Comparison between any test data can be made after the normalization process, which is able to exclude the inertial effect of specimen and attached devices. In addition, the equivalent blast load can be derived from the measured impact force according to D'Ambrasio's dynamic equilibrium principle.
 - The energy dissipating capacity of UHPFRCC beams under impact loading conditions can be obtained by sequential impact tests. The energy dissipating capacity, which is able to represent the impact resistance of the specimen, is calculated by integrating the force-displacement curves, which are composed of true loading force and displacement-time data without time lag. It is reasonable to evaluate the impact resistance with an energy term, i.e., energy dissipating capacity, because the measured impact energy is a constant value, while the impact force varies depending on material properties of the specimen and impact conditions.
 - The addition of steel fibers and stirrups results in enhanced impact resistance of UHPFRCC beams in terms of reduced maximum and residual displacements, and energy dissipating capacity. In addition, all the test specimens under impact loading conditions exhibited multiple flexural cracks, and the cracks were steeply propagated into the compression zone, except in the case of specimen UH-0.0. Moreover, a smaller number of cracks was observed in impact test specimens compared with the static test specimens. This is because the velocity of crack propagation is higher than load transfer velocity, and shortened cracks are obtained under high loading rates.

Declaration of competing interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

This research was supported by a grant (19CTAP-C151911-01) from Technology Advancement Research Program (TARP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

○ 논문 4: Bond Strength and Flexural Capacity of Normal Concrete Beams Strengthened with No-Slump High-Strength, High-Ductility Concrete



Abstract This study investigates the flexural behavior of normal-strength concrete (NSC) beams that were strengthened with no-slump, high-strength, high-ductility concrete (NSHSDC). A set of slant shear tests was performed to investigate the initial performance of the NSC substrate strengthened with NSHSDC. Slant shear tests considered two types of roughness of interface and five angles of the interface between NSC and NSHSDC. The test results showed that except for specimens with a 75° interface angle, the specimens with high roughness were confirmed to the properties (14–21 MPa for 28 days) of the ACI Committee 546 recommendation. For flexural strength tests, NSC beams strengthened with a NSHSDC jacket on the top and bottom sides, three sides, and four sides resulted in strength increments of about 8%, 29%, and 40%, respectively, compared to the beams without NSHSDC jacket. Therefore, the use of NSHSDC is an effective method to improve the performance of NSC beams and is recommended for strengthening reinforced concrete members.

Keywords: no-slump, high-strength, high-ductility concrete; normal-strength concrete beams; roughness; interfacial shear strength; flexural strengthening

1. Introduction

Reinforced concrete is the most widely applied material for construction. Its multifunctionality, economy, and ability to be formed and finished in various shapes make it a very appropriate construction material. However, due to human errors, material advantages or changes in environmental criteria, a lot of structures need repairs and strengthening over their design service life. Strengthening of reinforced concrete structures has become very important not only for deteriorated reinforced concrete structures, but achieved much better under service. Previous research studies have used various types of concrete to strengthen reinforced concrete members, such as shotcrete jacketing, laminate jacketing, epoxy bonding, etc. [1–3]. However, all these methods have problems with bond strength of concrete to concrete, durability, ductility, and installation problems.

Materials 2020, 13, 4218

13 of 16

(3) Specimens B-3f and B-4f exhibited similar behavior to B-SR, except that the ductility of B-3f decreased rapidly with more stress up to the failure of the beam structure. B-4f occurred flexure failure similar to minimum shear reinforcement concrete (B-SR). Additionally, the test beam strengthened from three sides slightly increased in stiffness.

Author Contributions: Conceptualization, T.-F.Y. and Y.-S.Y.; methodology, H.-O.S.; validation, T.-F.Y., H.-O.S. and Y.-S.Y.; investigation, T.-F.Y. and S.-H.H.; data curation, T.-F.Y. and S.-H.H.; writing—original draft preparation, T.-F.Y.; writing—review and editing, T.-F.Y.; visualization, T.-F.Y.; supervision, Y.-S.Y.; funding acquisition, Y.-S.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by a grant (19CTAP-C151911-01) from Technology Advancement Research Program (TARP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

Acknowledgments: This research was supported by a grant (19CTAP-C151911-01) from Technology Advancement Research Program (TARP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Souza, R.H.F.; Appleton, J. Flexural behavior of strengthened reinforced concrete beams. *Mater. Struct.* **1997**, *30*, 154–159. [\[CrossRef\]](#)
- Tanasian, H.M. Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra-high performance fiber reinforced concrete laminates. *Eng. Struct.* **2017**, *151*, 337–348. [\[CrossRef\]](#)
- Al-Ota, M.A.; Isa, M.N.; Baloch, M.H.; Rahman, M.K. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *134*, 279–296. [\[CrossRef\]](#)
- Carborell Munoz, M.A.; Harris, D.K.; Ahlborn, T.M.; Froster, D.C. Bond performance between ultra-high performance concrete and normal-strength concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **2015**, *26*, 04014031. [\[CrossRef\]](#)
- Lamproukoulas, A.P.; Paschalis, S.A.; Tsoulou, O.T.; Delbos, S.E. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRC). *Eng. Struct.* **2016**, *106*, 370–384. [\[CrossRef\]](#)
- Hussien, L.; Amleh, L. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete normal strength concrete or high strength concrete composite member. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *93*, 1105–1116. [\[CrossRef\]](#)
- Chafan, E.; Costa, H.; Julio, E.; Portugal, A.; Duraes, L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra-high performance concrete. *Mater. Des.* **2014**, *59*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
- Yu, R.; Spiess, P.; Brouwers, H.J.H. Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete with efficient cement and mineral admixtures uses. *Constr. Compos.* **2015**, *55*, 383–394. [\[CrossRef\]](#)
- Shen, P.; Lu, L.; He, Y.J.; Rao, M.J.; Fu, Z.D.; Wang, F.Z.; Hu, S.G. Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam cured ultra-high performance concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *162*, 512–522. [\[CrossRef\]](#)
- Habib, K.; Denarié, E.; Brühwiler, H. Experimental investigation of composite ultra-high performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members. *ACI Struct. J.* **2007**, *106*, 10–20.
- Mohammed, F.; Abu Bakr, B.H.; Buerger, N.M. Torsional improvement of reinforced concrete beams using ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC) jackets-experimental study. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *106*, 533–542. [\[CrossRef\]](#)
- Yuan, T.F.; Lee, J.Y.; Min, K.H.; Yoon, Y.S. Experimental investigation on mechanical properties of hybrid steel and polyethylene fiber reinforced no-slump high strength concrete. *Inter. J. Polym. Sci.* **2019**, *29*, 1–11. [\[CrossRef\]](#)
- Yuan, T.F.; Lee, J.Y.; Yoon, Y.S. Enhancing the tensile capacity of no-slump high-strength high-ductility concrete. *Constr. Compos.* **2020**, *106*, 104558. [\[CrossRef\]](#)
- Choi, J.I.; Koh, K.T.; Lee, B.Y. Tensile behavior of ultra-high performance concrete according to combination of fibers. *J. Korea Inst. Struct. Mater. Inpro.* **2015**, *19*, 49–56. [\[CrossRef\]](#)
- Park, S.H.; Kim, D.J.; Ryu, G.S.; Koh, T. Tensile behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Constr. Compos.* **2012**, *34*, 172–184. [\[CrossRef\]](#)
- Li, C.C.; Wang, S.X.; Wu, C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.* **2001**, *98*, 483–492.




Article

Effect of Strengthening Methods on Two-Way Slab under Low-Velocity Impact Loading

Sun-Jae Yoo, Tian-Feng Yuan, Se-Hee Hong and Young-Soo Yoon *

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-Ro, Seongbuk-Gu, Seoul 02841, Korea; edl050@korea.ac.kr (S.-J.Y.); yuantianfeng@korea.ac.kr (T.-F.Y.); bestshhong@korea.ac.kr (S.-H.H.)

* Correspondence: ysoo@korea.ac.kr; Tel.: +82-2-3290-3320

Received: 3 November 2020; Accepted: 7 December 2020; Published: 8 December 2020

Materials 2020, 13, 5603

14 of 16

Abstract: In this study, the performance of reinforced concrete slabs strengthened using four methods was investigated under impact loads transferred from the top side to bottom side. The top and bottom sides of test slabs were strengthened by no-slump high-strength, high-ductility concrete (NSHSDC), fiber-reinforced-polymer (FRP) sheet, and sprayed FRP, respectively. The test results indicated that the test specimens strengthened with FRP series showed a 4% increase in reaction force and a decrease in deflection by more than 20% compared to the non-strengthened specimens. However, the specimen enhanced by the NSHSDC jacket at both the top and bottom sides exhibited the highest reaction force and energy dissipation as well as the above measurements because it contains two types of fibers in the NSHSDC. In addition, the weight loss rate was improved by approximately 0.12% for the NSHSDC specimen, which was the lowest among the specimens when measuring the weight before and after the impact load. Therefore, a linear relationship between the top and bottom strengthening of the NSHSDC and the impact resistance was confirmed, concluding that the NSHSDC is effective for impact resistance when the top and bottom sides are strengthened. The results of the analysis of the existing research show that the NSHSDC is considered to have high impact resistance, even though it has lower resistance than the steel fiber reinforced concrete and ultra-high-performance-concrete, it can be expected to further studies on strengthening of NSHSDC.

Keywords: strengthening methods; fiber reinforced polymer; no-slump; high-strength; ductility concrete; low-velocity impact load; two-way slab

exposed the tensile reinforcement. The sprayed FRP may have caused brittle fracture due to the stress concentration at the tensile section.

(4) The NSC-NF showed a weight loss ratio of about 1 kg on the final blow, which is only about 0.12% of the total weight. However, the weight loss rate of the test specimen strengthened with FRP on the bottom side is approximately 2–3% of the total weight. This is due to the high ductility of the specimen as a bridging effect of steel fiber and PE fiber. Thus, the measured weight loss of the NSC-NF was smaller than that of the FRP series.

(5) Compared with the previous studies, NSC-NF showed best impact resistance in the test specimens applying the strengthening techniques, but it showed disadvantage in load and deflection SFRC concrete and UHPC. However, it can be expected to further research studies on the applicability of the NSHSDC in that it can be manufactured with the thin layer while strengthening the existing concrete.

Author Contributions: Conceptualization, S.-J.Y.; T.-F.Y. and Y.-S.Y.; methodology, S.-H.H.; experiment, S.-J.Y.; S.-H.H. and T.-F.Y.; validation, S.-J.Y. and S.-H.H. and Y.-S.Y.; investigation, Y.-S.Y.; data curation, S.-J.Y.; writing—original draft preparation, S.-J.Y.; writing—review and editing, S.-J.Y.; visualization, T.-F.Y. and S.-H.H.; supervision, T.-F.Y. and Y.-S.Y.; project administration, Y.-S.Y.; funding acquisition, Y.-S.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by a grant (19CTAP-C15191-01) from Technology Advancement Research Program (TARF) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Thabet, A.; Haldane, D. Three-dimensional simulation of nonlinear response of reinforced concrete members subjected to impact loading. *Struct. J.* **2000**, *97*, 689–702.
- Fujikake, K.; Li, B.; Soenit, S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. *J. Struct. Eng.* **2009**, *97*, 938–950. [\[CrossRef\]](#)
- Tomas, R.J.; Sorensen, A.D. Review of Strain Rate Effects for UHPC in Tension. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *153*, 846–856. [\[CrossRef\]](#)
- Hrynuk, T.D.; Vecchio, F.J. Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Impact Load. *ACI Struct. J.* **2014**, *111*, 1213–1224. [\[CrossRef\]](#)
- Fonet, G.; Limam, O. Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *20*, 2025–2030. [\[CrossRef\]](#)
- Bhatti, A.Q.; Kishi, N.; Tan, K.H. Impact resistant behaviour of RC slab strengthened with FRP sheet. *Mater. Struct.* **2011**, *44*, 1855–1864. [\[CrossRef\]](#)
- Yoo, D.Y.; Yoon, Y.S. Influence of steel fibers and fiber-reinforced polymers on the impact resistance of one-way concrete slabs. *J. Compos. Mater.* **2014**, *48*, 695–706. [\[CrossRef\]](#)
- Radnic, J.; Matesan, D.; Grgic, N.; Balovic, G. Impact testing of RC slabs strengthened with CFRP strips. *Compos. Struct.* **2015**, *121*, 90–103. [\[CrossRef\]](#)
- Wang, W.; Choue, N. Experimental and theoretical studies of flax FRP strengthened coconut fibre reinforced concrete slabs under impact loadings. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *171*, 546–557. [\[CrossRef\]](#)
- Yilmaz, T.; Kirac, N.; Anil, O.; Erdem, R.T.; Sezer, C. Low-velocity impact behaviour of two way RC slab strengthening with CFRP strips. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *186*, 1046–1063. [\[CrossRef\]](#)
- Elmagar, A.B.; Atefy, H.M.; Baraghi, A.T.; Mahmoud, M.H. Experimental and numerical investigations on the impact resistance of SHCC-strengthened RC slabs subjected to drop weight loading. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *229*. [\[CrossRef\]](#)
- Yang, J.Q.; Smith, S.T.; Wang, Z.; Lim, Y.Y. Numerical simulation of FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *172*, 735–750. [\[CrossRef\]](#)
- Soltani, H.; Khaloo, A.; Sadraei, H. Dynamic performance enhancement of RC slabs by steel fibers vs. externally bonded GFRP sheets under impact loading. *Eng. Struct.* **2020**, *213*, 110539. [\[CrossRef\]](#)

Materials 2020, 13, 5603; doi:10.3390/ma13245603

www.mdpi.com/journal/materials

2020, 9, 15.

ScholarOne Manuscripts

Journal of Asian Architecture and Building Engineering

Home

Author

Review

Submission Confirmation

Print

Thank you for your submission

Submitted to
Journal of Asian Architecture and Building Engineering

Manuscript ID
JAABE2009362AP

Title
Effect of Design Code and Evacuation Information on Strategic Location of Shelter in Place (SIP) in Light Rail Station

Authors
Kim, Young-Hwi
Yuan, Tian-Feng
Yoo, Sun-Jae
Yoon, Young Soo

Date Submitted
15-Sep-2020

Author Dashboard

Journal of Asian Architecture and Building Engineering



Effect of Design Code and Evacuation Information on Strategic Location of Shelter in Place (SIP) in Light Rail Station

Journal:	Journal of Asian Architecture and Building Engineering
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Architectural Planning and Design
Keywords (up to 5):	Evacuation Simulation, Evacuation Information, Building Information Modeling, Egress Simulation, Shelter in Place
Categories:	AP: Safety and Security Design < Architectural Planning and Design, AP: Architectural Planning and Design < Architectural Planning and Design

SCHOLARONE[®]
Manuscripts

○ 특허 (출원) : 내충격성 보강용 콘크리트 조성물 및 콘크리트 부재 보강 구조

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2020.02.26
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호 10-2020-0023671 (접수번호 1-1-2020-0203751-04)
출 원 인 명 칭 고려대학교 산학협력단(2-2004-017068-0)
대 리 인 성 명 특허법인 제나(9-2014-100001-2)
발 명 자 성 명 윤영수 원천봉 유선재
발 명 의 명 칭 내충격성 보강용 콘크리트 조성물 및 콘크리트 부재 보강 구조

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(기공코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 경정 신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 검색 > 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 인정받으려는 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 [전자특허출원서(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 제133조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

○ 특허 (등록) : 다양한 콘크리트 계면 부착 강도 측정장치



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허	제 10-2156753 호
Patent Number	
출원번호	제 10-2019-0053933 호
Application Number	
출원일	2019년 05월 08일
Filing Date	
등록일	2020년 09월 10일
Registration Date	

발명의명칭 Title of the Invention
다양한 콘크리트 계면 부착 강도 측정 장치

특허권자 Patentee
고려대학교 산학협력단(114471-*****)
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



특허청
Korean Intellectual Property Office

2020년 09월 10일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

김 용 래



QR코드로 현재기준
등록사항을 확인하세요

시설물 내 대피 시설 최적 위치선정 가이드라인

Shelter in Place :
Guideline for Selecting the Optimal
Location of Evacuation Facility inside
the Facilities



고려대학교
Smart SOS(Shelter of Sustainability) Lab
F-face Lab / H-SOS Center



Figure 16. 평면도 및 외부 출구들 고려한 건물 내부의 Shelter 선정 예시

후자로 Shelter의 공간은 여러 등의 상황에서 건물에서 떨어지는 잔해를 효과적으로 제거할 수 있어야 하며, 미사일 낙하 등으로부터 보호 가능하여야 한다. 예를 들어 가정집에서의 가능한 Shelter의 위치는 다음과 같다.



Figure 17. 가정용 내부 SIP 선정 예시

Shelter는 주변 위험요소로부터 완벽히 보호 가능한 구이면서, 60㎡의 방충 설치가 가능한 지하용 공간을 만족해야 하므로, 지하 1층과 2층이 적합하다. 지하 1층 및 2층 모두 대피 시설로 지정될 수 있는 60㎡ 이상의 면적이 있고, Shelter의 기능이 가능하다. 두 층의 전체 유효면적은 지하 2층 및 3층은 각각 2100㎡, 919㎡이다. 엘리베이터는 Shelter와 가깝게 배치되어 있어, 대피시간이 줄어들 수 있으므로, 시설장소가 확보된 건물 가능한 위치이다. 반면 지하 3층은 지하실 도어가 유리로 구성되어 있으므로, 재난 발생 시 파편으로 인한 2차 피해가 예상되므로, 본 연구에서는 지하 1층과 지하 2층을 SIP 모두 지정하였다. 여기서 SIP 위치에 따른 비교를 위해, 지하 2층만의 SIP을

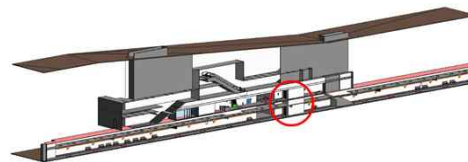
FEMA 453에 따르면, Shelter는 대피자들이 24시간 이상 대피 여부에 따라 수용인원이 달라진다. 즉, 24시간 이상 시 수면이 필요한 최소한의 면적이 필요하므로, 이에 따라 수용력은 줄어들게 된다는 것이다. 만약 24시간 이상 Shelter에서 지내야 할 경우, 수면 시설이 필요하며, 상물베드를 기준으로 최소한의 면적은 5.6㎡/person이고, 여기서 이중 침대를 사용하면 다른 이의 절반인 2.8㎡/person의 면적이 필요하다. 반면 24시간미만 시 수면이 필요 없게 되

지하철 내 엘리베이터를 활용한 탈출로 기술 가이드라인

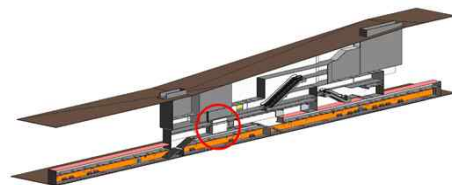
Shelter in Place :
Evacuation Technology Guidelines Using
Elevators inside the Subway



고려대학교
Smart SOS(Shelter of Sustainability) Lab
F-face Lab / H-SOS Center



3D 측면 - 엘리베이터 1호기



3D 측면 - 엘리베이터 2호기

Figure 22. 지하 2층 엘리베이터 위치 및 지하 3층 엘리베이터 위치

5.7 대피 요소별 속도 산정

CBRE 상황에서 에스컬레이터는 계단만큼 폭이 넓지 않아서 많은 수의 인원을 수용하지는 못하지만, 노약자나 어린이, 임신부 등 빨리 걸기 못하는 분들에게는 굉장히 중요한 운송 수단이라고 할 수 있다. 에스컬레이터의 속도는 통상 국제적으로 ~0.5m/s, 최대 0.75m/s로 정의하고 있고 경사 각도가 30도를 넘는 경우는 대립 방향에서 최대 30m/s(출처: 건축설계대사전: 설계편)로 제한을 두고 있다. 지하철 주요설계기준(설비 분야)을 보면, 승강기 편의 시설기준을 Table 23과 같이 정의하고 있다.

일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자를 위한 시설로 일반적인 엘리베이터보다 속도가 현저히 느리다. 화재, 지진 등 재난 발생 시 엘리베이터는 사용하지 않는 것이 원칙이지만 본 연구에서 검토하고 있는 CBRE(Cheical Biological Radiological and Explosive) 및 특히 대피상황 발생 시 빠른 대피를 요구하는 상황 시 엘리베이터의 사용을 결



대피 경로 표시



계단 대피 경로



SW 등록증

1. 강성훈, 홍성걸, “배합밀도 및 타설 방법이 RPC 성능에 미치는 영향.” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 707-708.
2. 강성훈, 홍성걸, “상온 양생한 초고성능 콘크리트(UHPC)의 경화 전과 후의 성능 관계.” 한국콘크리트학회논문집, Vol. 26, No. 1, 2014, pp. 23-34.
3. 김한수, 최영빈, “P-M 상관도를 이용한 축하중과 폭발하중을 동시에 받는 철근 콘크리트 기둥의 손상도 평가.” Vol. 26, No. 4, 2015, pp. 13-20
4. 국가 기술 표준원, “KS F 4009 레디믹스트 콘크리트”, 2011
5. 권정훈, 김태환, 최종균, “사례분석을 통한 지하철 테러에 대한 대책”, 한국경호경비학회지, 제 18호, pp. 01-20, 2009
6. 김학범, 장용준, “대심도 철도의 방재 대책 고찰”, Journal of Kosham, Vol. 10, No. 3, 2010
7. 한국 콘크리트 학회, “KCI-M-12-003 K-UHPC 구조설계지침”, pp. 66, 2012
8. 한국건설기술연구원, “방호, 방폭용 고성능 섬유보강시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발 최종보고서”, 2017.
9. 손관호, “철도터널의 설계사례”, Railway Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 25-31, 2004
10. 오세준, 김남영, 이항, 이호석, “대심도, 장대 철도터널의 방재 및 환기계획”, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.10, No. 4, pp. 41-51
11. 이도현, 김태성, “고성능 감수제.” 한국콘크리트학회지, Vol. 8, No. 2, 1996, pp. 20-31. 한국 콘크리트 회, “KCI-M-12-003 K-UHPC 구조설계지침”, pp. 66, 2012
12. 이도현, 김태성, “고성능 감수제.” 한국콘크리트학회지, Vol. 8, No. 2, 1996, pp. 20-31
13. ACI 349-06, “Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures,” American Concrete Institute, 2006.
14. ACI 318-14, “Building Code Requirements for Structural Concrete & Commentary,” American Concrete Institute, 2014.
15. ACI 440.2R-02, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, pp. 1-8, 2020
16. Ahn, S.H., “A study on bond strength between fiber sheet and concrete for concrete surface preparation and heating condition”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2020, Vol. 6, No. 4, pp. 201-207
17. Alsayed, S.H., Alhozaimy, A.M., “Ductility of concrete beams reinforced with FRP bars and steel fibers”, Journal of Composite Materials, 1999, Vol. 33, No. 19, pp. 1792-1806
18. ASTM C1609, “Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)”, 2012, ASTM International
19. ASTM C39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, 2010, ASTM International
20. Attari, N., Amziane, S., Chemrouk. M., “Flexural stengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybride FRP sheets”, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 37, pp. 746-757
21. Bohannon, R.W., Andrews, A.W., “Normal walking speed: a descriptive meta-analysis, Physiotherapy”, 97(3), pp. 182-189
22. Beak, J.M., Jang, S.J., “A basic study on the standardization of epoxy injection on concrete structure crack”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2006, Vol. 10, No. 1, pp. 115-122
23. Cho, B.S., Kim, S.D., “Flexural behaviors of reinforced concrete beams strengthened with fiber-steel composite plates”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 2008, Vol. 21, No. 5, pp. 483-491

-
25. CFPA-E No19:2009F, "Fire safety engineering concerning evacuation from buildings" , 2009
 26. De Larrard, F., Sedram, T, "Optimization of Ultra High Performance Concrete By the Use of a Packing Model," Cement and Concrete Research, 1994, Vol. 24, No. 6, pp. 997-1009.
 27. European Guideline, CFPA-E No 19:2009 Fire Safety Engineering Concerning Evacuation from Buildings, CFPA EUROPE
 28. FEMA, "FEMA 453, Safe Rooms and Shelters: Protecting People Against Terrorist Attacks, Washington, DC." , 2006
 29. FEMA, "Planning Considerations: Evacuation and Shelter-In-Place" , 2019
 30. Felix, C., Frank, M., Cristine, P. "Walking Patterns of Elderly in a Peruvian Public Space, Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics" , 2016, 1-619, pp. 12-17
 31. Hurley, M.J., "SFPE Hnadbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition" , 2016
 32. Hyun, E.M., Ahn, K.H., Lee, J.E., Kim, Y.S. "Improvement of Standard by Analyzing Evacuation Plans of Domestic High-rise Buildings" , KIEAE Journal, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 53-62
 33. Hwang, E.S., Lee, S.W., "A study on the effect of rehabilitation methods in aged concrete pavement using the LTPP data" , Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2007, Vol. 27, No. 3D, pp. 325-332
 34. Kang, S.T.; Choi, J.I.; Koh, K.T.; Lee, K.S.; Lee, B.Y. Hybrid Effect of Steel Fiber and Microfiber on the Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete. Comps. Struct. 2016, 245, 37-42.
 35. KARLOS, Vasilis; SOLOMOS, George. "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components." Publications Office of the European Union, 2013.
 36. KDS 31 25 20 : 2016, "환기설비 설계기준" , 2016.
 37. Kadhim. M.M.A., "Effect of CFRP sheet length on the behavior of HSC continuous beam" , Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 33-44
 38. Kim, H.S., "Experimental studies of effect of beam sizes and CFRP layers on structural behaviors of reinforced concrete beams strenghteded with CFRPs (Carbon Fiber Reinforced Polymers)" , Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2012, Vol. 28, No. 11, pp. 99-106
 40. Kim, M.H., Min, K.H., Yoo, D.Y., Yoon, Y.S., "Strengthening effect of CFRP sheets and steel fibers for enhancing the impact resistance of RC beams" , 2011, Vol. 11, No. 5, pp. 41-47
 41. Kim, S.E., Cho, H.M., Lee, H.Y., Pa가, C.W., "Flexural performance characteristics of high performance slurry infiltrated fiber reinforced cementitious composite according to fiber volume fraction" , Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2015, Vol. 19, No. 4, pp. 109-115
 42. Ko, H.B., "Bond characteristics between fiber reinforced polymer (FRP) sheet and concrete" , Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2006, Vol. 22, No. 8, pp. 69-76
 43. Kim, E.Y., Hwang, E.K., "Study on the awareness survey of the tmeporary housing space in the subway station at a time war" , Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 30. No. 5, pp. 77-84, 2014
 44. Kim, Y.W.; Yuan, T., Yoon, Y.S. "A study on Selecting the Best Location of 'Shelter In Place' in Light Rail Station using Egress Simulation and BIM Model. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation" , 2018, Vol. 18, No. 4, pp. 251-260
 45. Nakayama, H., Ishinaka, M., Naruse, H., Fujii, K., and Nakase, H "Development of processing technology of super high-strength precast concrete column." In: Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete. 2008, pp. 959-966.
 46. National Institute of Standard and Technology, Movement on Stairs During Building Evacuations, 2014
 47. NFPA 80, "Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives" , 2013
 48. NFPA 90A, "Standard for the Installation of Air-Conditioning and Ventilating Systems" , 2002
 49. NFPA 101, "Life Safety Code" , 2012
 50. NFPA 5000, "Building Construction and Safety Code" , 2015
-

-
51. Park, J.Y., Cho, H.D., Han, S.H., "Improvement of flexural capacity according to strengthening method of RC beam with CFRP plate", Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2002, Vol. 22, No. 4, pp. 895-903
 52. PARK, Namkwun; KWON, Taeil; KIM, Twehwan. "A Study on the Planning of Civil Defense Shelter and Design 2-Focused on Planning and Design of Defense Shelter the US." Journal of the Society of Disaster Information, 2014, Vol. 10, No. 3, pp. 442-451.
 53. Park, H.J., Lee, Y.J. "Study on the Shortening Effect of the Egress Travel Time Based on an Escape Scenarios by Using Shuttle Elevators for Lotte Tall Building' s Evacuation Plan, Journal of Kifse", 2018, Vol. 32, No. 6, pp. 46-54
 54. Richard, P., Cheyrezy, M., "Composition of Reactive Power Concretes," Cement and Concrete Research, 1995, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
 55. Seo, S.T., "Analytical study of behavior on structure reinforced fiber sheet", Journal of the Korean Society of Industry Convergence, 2009, Vol. 12, No. 2, pp. 107-112
 56. Seo, S.Y., Yun, H.D., Choi, K.B., "Structural capacity of RC beam retrofitted by CFS with bond loss", Journal of the Korea Concrete Institute, 2007, Vol. 19, No. 6, pp. 795-802
 57. Standard Test Method for Time of Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens; ASTM C39-14; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014; pp. 1-7.
 58. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L., "FRP: Strengthened RC structures. John Wile & Sons, Ltd", 2002
 59. Thunderhead Engineering Technical Reference Manual for Pathfinder, 2012
 60. TM5-1300/AFM 88-22/NAVFAC P-397, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, " Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC., 1990.
 61. U.S. Department of Defense, UNIFIED FACILITIES CRITERIA(UFC) " Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects," UFC 3-340-01, 1994.
 62. Yoo, D.Y.; Park, J.J.; Kim, S.W.; Yoon, Y.S. Early Age Setting, Shrinkage and Tensile Characteristics of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete. Const. Buil. Mater. 2013, 41, 427-438.
 63. Yoo, D.Y., and Yoon, Y.S. (2015). Structural Performance of Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers. Engineering Structures, Vol. 102, pp. 409-423.
 64. Yuan, T.F. (2019). Development of No-Slump High-Strength, High-Ductility Concrete for Repairs and Strengthening. Ph.D. Dissertation, Korea University.
 65. Yuan, T.F., Lee, J.Y., and Yoon, Y.S. (2020). Enhancing the Tensile Capacity of No-Slump High-Strength High Ductility Concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 106, 103458. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103458
 66. Yuan, T.F., Lee, J.Y., Min, K.H., and Yoon, Y.S. (2019). Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Steel and Polyethylene Fiber-Reinforced No-Slump High-Strength Concrete. International Journal of Polymer Science, Vol. 2019, Article ID 4737384. doi:10.1155/2019/4737384
 67. Zhao, L., Kim, Y., Yu, S., Yoon, Y. "BIM medelling and VR simulation for optimal design of subway-station evacuation facility", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation. Vol. 19, No. 7, pp. 339-347

시설물 내 대피 시설 최적 위치선정 가이드라인

Shelter in Place :

Guideline for Selecting the Optimal Location of
Evacuation Facility inside the Facilities



고려대학교

Smart SOS(Shelter of Sustainability) Lab

F-ace Lab / H-SOS Center

목 차

1. 서 론	98
1.1. 연구 배경	98
1.2. 국내외 연구 동향	99
1.3. 대피 시설의 현황	100
1.4. 연구 목적	100
2. 대피 시설의 중요성	101
2.1. 대피 시 인간의 귀소 본능	101
2.2. 피난의 기본 원칙	101
2.3. 평면 계획상 피난 계획에서의 주안점	102
2.4. 재실자 특성에 따른 연구 분석	103
3. 국내외 대피 시설 운영 현황	104
3.1. 국내 대피 시설 기준	104
3.2. 대피 시설의 형태	108
4. 지하철 피난 기준 국내외 비교	110
4.1. 국내 지하철 대피기준	110
4.2. 국외 대피기준	110
4.3. 국내외 지하철 대피기준 비교	111
4.4. 대피시간과 대피 안전구역간의 상관관계	111
5. 안암역 시뮬레이션 진행	112
5.1. 연령별 인구 비중 분석	112
5.2. 시뮬레이션 인원 산정	112
5.3. SIP 위치선정	114
5.4. 안암역 모델링	115
5.5. 시뮬레이션 프로그램	120
5.6. 엘리베이터 승하차 프로세스	122
5.7. 엘리베이터 대수 산정	123
5.8. 엘리베이터 속도 산정	123

5.9. 엘리베이터 탑승 인원 결정	124
5.10. 피난 전략.....	127
6. 위치선정에 따른 변수 비교	127
6.1. 피난 시나리오 설정	127
6.2. 시뮬레이션 결과.....	128
6.3. 시뮬레이션 결과 비교	140
7. 최적 SIP 선정을 위한 제안.....	142
※ 참고문헌	143

1. 서론

1.1 연구 배경

대한민국은 남한과 북한이 대치하고 있는 상황에서 테러에 자유로울 수 없다. 최근에는 극단주의 테러단체인 이슬람 국가(IS)가 한국을 테러 목표로 삼을 수 있다고도 보도한 바 있다. 이처럼 여러 잠재적 위협(CBRE - Chemical, Biological, Radiological and Explosive Attack)이 존재하는 국내에는 현재 백령, 대청, 소형, 연평도 등 서해 5도 및 접경지역에 정부 지원금으로 설치한 주민 대피 시설 341 개소와 민간 및 정부, 지자체, 공공단체 소유의 지하시설물에 23,386개의 공공용 지정 시설이 대피시설물로 지정되어 운영되고 있다.

Table 1. 국가별 지하철 테러 사례

날 짜	국 가	테러 사례
7 July 2005	 London, United Kingdom	London bombings
11 April 2011	 Belarus	Minsk Metro bombing
22 March 2016	 Brussels and Zaventem, Belgium	Brussels bombings
28 June 2016	 Istanbul, Turkey	Atatürk Airport attack
3 April 2017	 Saint Petersburg, Russia	Saint Petersburg Metro bombing
20 June 2017	 Brussels, Belgium	Brussels attack
15 September 2017	 London, United Kingdom	Parsons Green bombing

하지만 이러한 수치와는 달리 운영 중인 대부분의 대피 시설은 특별한 구조 설계기준 없이 60m² 이상의 방송 청취가 가능한 지하층의 공간이면 대피 시설로 지정될 수 있다. 달리 말해 유사시 국민을 보호해야 할 대피 시설은 행정적 지원과 기본적인 보호의 기능을 할 수 있겠지만 테러와 전쟁과 같은 물리적 위협으로부터의 보호 기능은 보장하지 못하고 있다. 대피 시설의 특성상 위험 상황에서 많은 인구가 집중적으로 모여 있게 되는데 이러한 상황에서 대피 시설이 충분한 대피 역할을 발휘하지 못한다면 이는 더 큰 인명피해를 발생시킬 가능성이 크다. 따라서 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피 시설에 대한 설계기준 확립이 시급한 상황이다. 공공시설의 대피시설물은 방호성능도 중요하지만 설치되는 위치도 중요하다. 이용자가 위급한 상황에서 신속하게 대피할 수 있고 모든 이용자를 수용할 수 있는 위치에 있어야 한다. 이를 위해서는 각 가정이나 건물 혹은 사회기반 시설물의 시설물 확충보다는 기존 시설물을 활용하여 상시에는 원래의 용도로 사용하나 CBRE 상황에서는 SIP(Shelter In Place)으로 기능을 할 수 있는 장소를 선정하고 관리할 필요성이 있다.

대피 시설의 특성상 재난 발생 시 많은 인구가 집중적으로 모여 있게 되는데 이러한 상황에서 대피 시설이 명확한 기준 없이 설계된다면 이는 더 큰 인명피해를 발생시킬 가능성이 크다. 따라서 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피 시설에 대한 설계기준 확립, 기존 대피 시설의 최적 대피로를 위한 대책의 수립이 시급한 상황이다.

Table 2. 초고층 빌딩 화재 건수 및 사망자 수

국가	화재 건수	사망자 수
미국	226	590
캐나다	11	26
멕시코	2	4
푸에르토리코	1	96
브라질	3	202
콜롬비아	1	4
프랑스	1	2
필리핀	1	10
일본	1	32
인도	1	1
한국	2	201

1.2 국내외 연구 동향

초창기 대피 시설에 관한 연구는 군사용 목적으로 수행됐다는 점에서 민간인을 대상으로 한 대피 시설에 적용하는 데 한계가 있으며, 연구 정보에 대한 접근 또한 쉽지 않다. 하지만 최근 빈번하게 발생하고 있는 테러로 인해 민간인 보호와 공공용 대피 시설에 관한 관심이 높아지고 있다. 특히 전쟁으로 인해 많은 민간인 피해가 발생한 이스라엘에서는 민간인 보호를 목적으로 한 시설물 내 대피 시설(SIP, Shelter In Place)하는 새로운 형태의 대피 시설 개념을 제안하였으며, 911 테러 이후 미국을 중심으로 이러한 형태의 대피 시설이 퍼지고 있다.



인도 뭄바이 테러, 2008



터키 앙카라 테러, 2015



나이지리아 아부자 테러, 2011

Figure 1. 전 세계적으로 발생한 테러 현장

대피 시설은 형태에 따라 크게 유럽형과 대륙형으로 구분할 수 있다. 유럽형 대피 시설은 스위스를 중심으로 집단 보호시설(CPS, Collective Protection System) 체계로 발달하였고, 대륙형 대피 시설은 미국을 중심으로 시설물 내 대피 시설(SIP, Shelter In Place) 체계로 발달하였다. 국내의 정부 지원 대피 시설 및 공공용 대피 시설은 유럽의 집단 보호시설(CPS)과 거의 유사한 형태로 일정 깊이의 지하시설에 견고한 철근콘크리트 구조물을 구축하여 장기대피가 가능한 집단 보호 형태이다.



Figure 2. 국내 외 SIP 현황

미국의 민방위 대피 시설은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 기존의 유럽형 대피 시설과 화생방 공격에 대한 대응할 수 있는 독립형 대피 시설이며, 둘째는 시설물 내에 위치하는 대피 시설이다. 이 중 시설물 내 대피 시설(SIP)은 특정시설 및 구조물에 종속된 형태로 별도의 설계와 구조를 가진 공간이다. 이러한 대피 시설은 회의실, 체육관, 식당 등으로 다양한 활용이 가능하며, 기존 시설물로서의 사용도 가능하다. 따라서 독립형 대피 시설보다 비용 절감 측면에서 우수하다. 또한, 시설물 내 대피 시설(SIP)은 위치선정 조건이 충족될 경우 지상과 지하를 구분하지 않고 대피공간을 형성할 수 있다. 하지만 이러한 시설물 내 대피 시설(SIP)의 많은 장점에도 불구하고 국내 도입은 미흡한 상황이며, 국내 도입을 위해서는 많은 관련 연구가 선행되어야 한다. 특히 대도시를 중심으로 많은 인구가 밀집된 국내 상황을 고려하여야 한다.

국내 민방위 대피 시설은 크게 정부 지원 대피 시설과 공공용 대피 시설로 분류할 수 있다. 정부 지원 대피 시설은 대상, 설치범위, 예산, 표준도면 등을 종합적으로 고려하여 설치 또는 선정되는 반면, 공공용 대피 시설의 경우는 특별한 규정이나 원칙 없이 다양한 시설을 대상으로 지정하게 되어있다. 하지만 국내 대피 시설에 관한 대부분의 연구는 현존하는 대피 시설의 통합관리 기술개발, 대피 시설의 생활 지원 공간 구획 기술개발 등에 초점이 맞춰져 있고, 이와 관련하여 전기시설이나 통신 시설, 소방시설, 냉난방시설, 급배수시설 등 인간의 기본적인 생존을 보장하기 위한 관리 기준만이 제시되고 있다.

1.3 대피 시설의 현황

2012년에 조사된 대피 시설의 현황은 다음과 같다. 현재 대한민국의 대피 시설은 2만 개 이상이 운영되고 있지만, 이중 공공용 대피 시설은 약 2700개 정도이며, 전체 대피 시설 중 약 12% 정도를 차지하고 있다. 여기서, 대피 단기 대피 시설과 장기대피 시설로 구분될 수 있는데, 단기 대피 시설은 재래식 무기의 공격에 따른 방호가 가능한 대피 시설이며, 장기대피 시설은 여기에 추가로 화생방의 공격 또한 방어할 수 있는 대피 시설을 의미한다.

1.4 연구 목적

현재, 국내에서는 재난 상황 발생 시 대피 장소에 관한 규정은 있지만, 최적의 대피 장소에 관한 연구는 부족한 실정이다. 최적의 대피 위치는 대피 동선에 대한 고려뿐만 아니라, 대피시간에 대한 고려가 동시에 이루어져야 한다. 대부분 대피 장소는 대피 동선에 대해 고려를 하지 않고 설정되어, 대피 시 심각한 정체 현상이 일어나게 된다. 이에 대피 경로를 고려하여 설계된 대피 장소는 정체 현상이 줄어들어, 평균 대피시간이 줄어들게 된다. 하지만 9.11 테러와 같은 사고의 경우, 전체 재실자의 약 12% 정도가 엘리베이터를 이용하여 안전한 장소로 피난한 것으로, 나타났고, 고령화 사회로 진행됨에 따라, 노령인구 및 거동이 불편한 인구가 지속해서 증가하고 있다. 이러한 상황에서, 재난 발생 시 대피 장소에 대한 고려뿐만 아니라 엘리베이터를 활용한 대피에 관한 필요성은 지속해서 증가하고 있다. 현재 대피 시설은 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하지 않아, 대피시간 증가 및 대피 경로에서 정체 현상이 심각하다. 이에 기존의 대피 경로 방식이

아닌, 피난용 승강기의 설치 및 보조적인 활용 수단으로 노약자, 어린이, 임산부, 장애인의 대피에 활용되어야 한다. 추가로, 일반적으로 지하철 역사에서 엘리베이터는 일반인들을 위한 용도가 아닌 장애인이나 노약자, 임산부들을 위한 용도로 사용하므로 속도가 일반 엘리베이터에 비해 느리게 설계된다.

따라서 본 연구에서는 시나리오별 대피로에 대한 변수를 설정 후, 시뮬레이션 프로그램을 통해 대피시간을 비교, 분석 후, 최적의 대피 장소에 대해 설정을 하였다. 여기서 시설물이란 공공용 시설물 내에서 재실자들의 원활한 대피를 위해, 지하철 역사로 대피 시설을 선정하였으며 지하 공간을 연구 범위로 한정하였다. 본 시뮬레이션에서 SIP를 지하 1층의 1구역과 지하 2층 2구역을 동시에 활용하였다. 지하 2층의 SIP 위치를 2구역만 설정한 이유는 최적 대피 위치를 알아보기로 하며 동시에 엘리베이터를 활용하여 전체 인원명 중 노약자, 임산부, 장애인들을 엘리베이터를 그룹 단위로 이동하는 것으로 가정하도록 한다.

2. 대피 시설의 중요성

2.1 대피 시 인간의 귀소 본능

인간은 본능적으로 비상시 자신의 신체를 보호하기 위하여 이전에 갔던 길이나, 늘 사용하는 경로에 의해 탈출을 도모하고자 한다. 따라서 엘리베이터까지의 탈출 경로를 알기 쉽게 표기하고, 엘리베이터 내부를 안전하게 보호되도록 유지 또는 관리하는 것이 중요하다. 테러로 인한 화재 등 위험 상황 발생 초기에는 당시 상황의 확인을 위해 소수 인원이 위험 장소로 밀집하지만, 위험 상황 발생이 심각해짐에 따라, 인간의 공포감이 급증하여 재난 발생 상황 지점과 반대 방향으로 재실자들이 움직인다. 추가로, 재난 발생 상황으로 주변이 어두워지면, 인간은 본능적으로 밝은 곳으로 대피하려고 한다. 따라서 채광이 탈출 경로는 집중적으로 밝게 하고, 이에 혼란을 유발할 수 있는 상황을 예방하여야 한다.

2.2 피난의 기본 원칙

- (1) 2방향 피난로를 확보할 것
- (2) 원시적이지만 인간의 보행에 따르는 것을 제1원칙으로 할 것
- (3) 피난 경로는 단순 명확할 것
- (4) 피난설비는 고정설비에 의하고 가반식 기구나 장비는 보조수단으로 사용할 것
- (5) Fool Proof (문자보다 색을 사용하여 직감적으로 알아볼 수 있도록 하는 것), Fail Safe (하나의 수단이 고장 등으로 실패하여도 다음의 수단에 의해 구제할 수 있도록 고려하는 것) 원칙을 중시할 것
- (6) 피난 경로를 따라 일정한 구역을 정하여 “피난 Zone”을 설정하고 안전한 피난 장소까지 유도하기 위하여 각 존의 안전성을 높일 것.

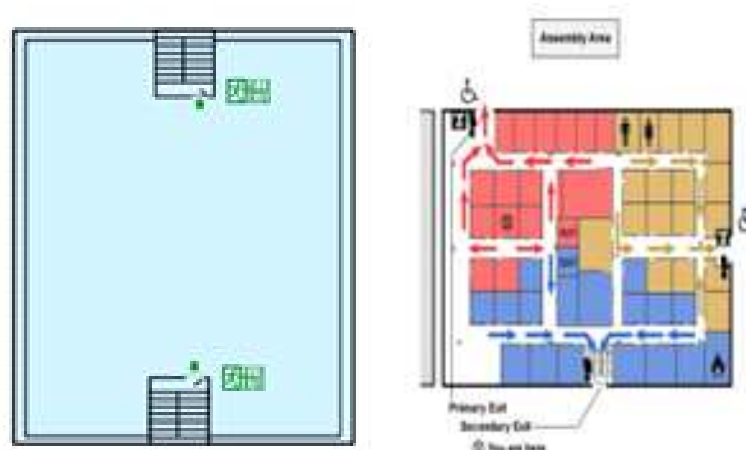


Figure 3. 2방향 피난 및 피난 경로도 예시

Table 3. 대피 경로의 선택

선택특성	내용
가까운 거리	- 가장 가까운 출구로 먼저 이동하는 특성
회귀본능	- 본능적으로 왔던 길로 되돌아서 피난하려는 특성 ex) 에스컬레이터를 통한 대피 시 에스컬레이터를 타고 돌아가려는 특성 엘리베이터를 통한 대피 시 엘리베이터를 타고 돌아가려는 특성 계단은 통한 대피 시 계단을 통해 대피하려는 특성
일상동선	- 일상에서 사용하는 계단 및 평소에 사용하는 경로를 통해 대피
향광성	- 불빛이 밝고 채광이 확보된 곳으로 대피하려는 특성
개방 공간	- 열리고 트인 공간으로 대피하려는 특성, 좁은 경로보다는 넓은 경로를 통해 대피하려고 하는 경향
최초인지	- 최초에 눈에 보이는 경로 또는 눈에 잘 보이는 계단으로 향하는 특성
직진성	- 똑바른 계단이나 통로를 통해 대피하려는 특성
이성적 안정 지향적	- 이성적으로 안전하다고 판단되는 경로를 이용
부화 뇌동성	- 많은 사람이 이동하는 대피 경로를 따라서 똑같이 이동하는 특성

2.3 평면 계획상 피난 계획에서의 주안점

- (1) 피난 계획에서 피난은 열악한 환경에서 이루어지므로 비상시 인간의 심리, 생리를 배려하고 환자, 신체적으로 또는 판단능력에 장애가 있는 사람, 유아, 고령자 등 건강한 성인과는 동등한 피난 행동을 기대할 수 없는 사람들을 배려해야 한다.
- (2) 피난의 원칙 건축물 내의 모든 부분에서 두 방향 이상의 피난 경로를 계획하는 것이 원칙이다. 어느 정도 이상의 면적이 있는 거실에서는 될 수 있는 대로 서로 떨어진 위치에 두 개 이상의 출입구를 설치하고, 복도의 끝부분은 피난계단으로 연결하여 두 방향 피난을 확보하여야 한다.

(건축법상 “거실”이란 건축물 안에서 거주, 근무, 작업, 집회, 오락, 그 밖에 이와 유사한 목적을 위하여 사용되는 방을 의미한다.)

- (3) 피난 경로 피난 경로는 단순 명쾌한 것이 좋으며 계단실까지 여러 번 꺾이는 복도, 직각 이외의 구부러진 곳, 위치를 알기 어려운 피난계단은 피해야 한다. 즉, 피난 행동은 물리적 심리적으로 어려운 상태에서 이루어지므로 연기가 가득 찬 상태에서 피난하는 것으로 가정하여 단순하고 명쾌하여야 한다.

- (4) 건물 화재 시 안정성에 관한 평가

거실의 피난 평가는 각 거실에 대해 그곳이 발화실이 된 경우의 피난 시간을 구해 허용시간과 비교 평가한다. 층 피난의 평가는 한 거실을 발화실로 하여 층 전체의 피난자 흐름을 설정한 후, 계산된 층 피난 시간과 복도 피난 시간을 각각 허용시간과 비교 평가한다. 발화 층으로 하고, 그 층에 있던 사람들 전원이 계단실 내까지 피난하는 상황을 예측하여, 이에 따라 3종류의 피난 시간을 구해 각각에 대한 허용시간과 비교하여, 건축물의 피난 안전성을 검토 평가한다.

2.4 재실자 특성에 따른 연구 분석

2.4.1 재실자 신체특성에 따른 분석

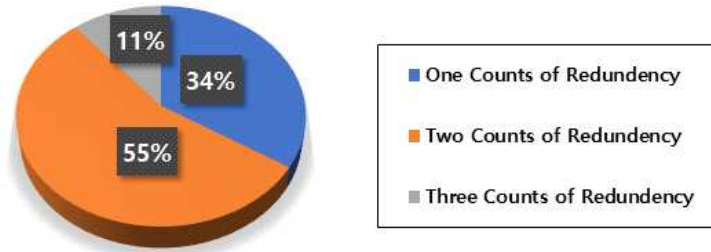


Figure 4. 재실자 신체 특성에 따른 분석

10대부터 60대 이상까지 재실자의 나이별 보행 속도 및 피난 형태의 특성을 구분한 연구는 전체 신체 특성별 연구 수행 중 가장 높은 비율인 50%를 차지하였으며, 목발 또는 휠체어 등 보조기구의 사용자 및 기타 장애인 등의 보행 속도 및 피난 형태에 관한 연구는 25%를 차지했다. 연령별 특징과 장애 유무 모두 포함된 연구 또한, 25%의 비율을 나타냈다. 그러나 이중 연령별 특성에 관한 연구는 20대 이상부터 60대까지의 연령층이 가장 많았으며 유아 및 어린이와 70대 이상의 고령자에 관한 연구는 미비한 것으로 나타났다.

Table 4. 대피 시설의 기술적 조건

구 분		내 용
공공용 대피 시설	신 규 시 설	○ 재래식 포탄 공격 방호 - 외벽 두께 : 철근콘크리트 50cm 이상 (최소 500Ib 급 포탄의 12.2m 근접폭발 방호수준) (작약 종류 Torpex 기준, TNT 보다 1.67배 위력 보유) ○ 창문, 출입문 등 개구부 수의 최소화 설계 (생활방수 이상의 기밀과 실링 필요) ○ 유리와 같은 외벽 치장 건물 제외 ○ 배관 및 덕트 등의 인입부의 기밀과 임시 기밀 설비의 장착 검토 ○ 대피공간의 규모에 맞는 용량의 송풍기(AHU)의 선택 (기본 누설비율, 양압, 환기량 등의 고려) ○ 지상층에 대한 대피공간 형성 시 건물 외벽 쪽이 아닌 안쪽으로 고려 (지상층의 경우 외부 공기 유입조건에 따른 덕트 저항값 등을 고려하여 송풍기 용량 선택) ○ 화학 물질, 생물학 작용제 및 방사능 낙진을 여과할 수 있는 필터의 선택 (화학 ASZM-TEDA 급 이상의 카본 사용 필터, 생물학/방사능 낙진 : HEPA 99.97% 이상), 또는 군사용 Canister 형태의 필터) ○ 2개 이상의 화장실 구비(일회용 간이식 가능)
	전 환 시 설	○ 기본 기술적 조건 신규시설 내용과 동일 ○ 추가 고려사항 - 외벽 두께의 고려 : 외벽의 재질과 두께에 대한 설계서 상의 확인 필요 - 공기 누설 부분에 대한 보강 : 창문, 출입문, 케이블 입·출력단, 하수구, 환기 덕트 등 - 기존 HVAC 시스템에 대한 필터 적용 가능성 및 양압 형성 능력 확인 필요 - 외부 공기 유입 경로에 따른 공기저항 및 송풍기 용량 가능 여부 확인
일반용 대피 시설		○ 1인당 1.84m³ 이상의 체적 보장 ○ 2시간 이상의 체류 제한적

2.4.2 인지적 특성에 따른 분석

인지적 특성은 재실자의 인지효과에 관한 것으로 시각적 효과와 청각적 효과로 구분되었다. 청각적 효과에는 화재 경보와 같은 음향조건으로 구분하였으며, 시각적 효과에는 안내표지판, 유도등과 같이 안내의 역할을 하는 조건과 연기 유입, 낮은 조도의 조명 등 시야를 방해하는 조건 등으로 구분되었다. 시각적 인지 조건은 전체 인지적 특성 중 63%로 높은 비율을 차지하였으며, 청각적 조건은 23%, 시청각이 모두 포함된 연구는 14%의 비율을 차지하였다. 이들 중 가장 많이 수행된 시각적 인지효과의 실험은 연기 유입에 관한 실험이 41%, 유도등, 낮은 조도의 설정 등 조명제어에 관한 실험이 53%로 나타났으며 연기 유입과 조명제어 모두 수행된 연구는 6%로 나타났다.

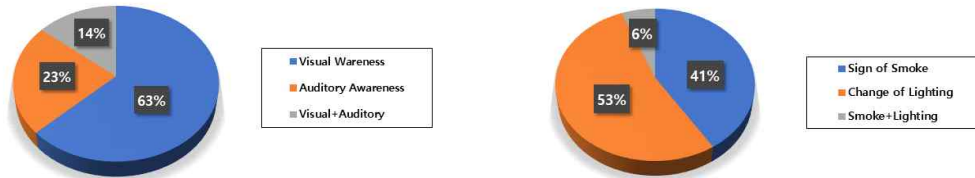


Figure 5. 2방향 피난 및 피난 경로도 예시

3. 국내외 대피 시설 운영 현황

3.1 국내 대피 시설 기준

3.1.1 건축법 시행령 제 46조

공동주택 중 아파트로서 4층 이상인 층의 각 세대가 2개 이상의 직통 계단을 사용할 수 없는 경우에는 발코니에 인접 세대와 공동으로 또는 세대별로 다음 각호의 요건을 모두 갖춘 대피공간을 하나 이상 설치하여야 한다. 이 경우 인접 세대와 공동으로 설치하는 대피공간은 인접 세대를 통하여 2개 이상의 직통 계단을 쓸 수 있는 위치에 우선 설치되어야 한다. <개정 2013. 3. 23.>

- (1) 피난 대피공간은 바깥의 공기와 접할 것
- (2) 대피공간은 실내의 다른 부분과 방화구획으로 구획될 것
- (3) 대피공간의 바닥 면적은 인접 세대와 공동으로 설치하는 경우에는 3㎡ 이상, 세대별로 설치하는 경우에는 2㎡ 이상일 것
- (4) 국토교통부 장관이 정하는 기준에 적합할 것

3.1.2 피난안전구역 설치기준

- (1) 피난안전구역에 연결되는 특별피난계단은 피난안전구역을 거쳐서 상하층으로 갈 수 있는 구조로 설치
- (2) 피난안전구역의 구조 및 설비:
 - 피난안전구역의 바로 아래층 및 위층은 건축물의 열 손실방지에 적합한 단열재를 설치할 것. 이 경우 아래층은 최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕 기준을 준용하고, 위층은 최하층에 있는 거실의 바닥 기준을 준용할 것
 - 내부 마감 재료: 불연재료
 - 건축물의 내부에서 피난안전구역으로 통하는 계단은 특별피난계단의 구조로 설치할 것
 - 비상용승강기는 피난 안전구역에서 승하차할 수 있는 구조로 설치할 것

- 피난 안전구역의 높이는 2.1m 이상일 것

3.1.3 민방위 업무 지침(행정안전부 발행, 2018)

민방위 업무 지침은 행정안전부에서 2018년에 발행된 자료로, 서해 5도 또는 일반 접경지역을 중점적으로 시설 기준 및 시설 세부 기준에 대해 제시하고 있다. 여기서, 방폭문, 화장실 등 임시 주거를 위한 세부 기준을 제시하고 있으며 세부 대피 공간의 기준에 대해 시사하고 있다.

(1) 시설 기준

- 시설면적:1인당 소요 면적 $1.43m^2$
- 필수시설: 방폭 문(방폭 밸브류), 자가 발전기, 화장실, 방송 청취시설, 급수시설, 배수시설, 기계실, 주방시설, 샤워 시설, 창고 등
- 선택시설: 공조실 및 청청각실, 가스차단문(가스 여과기가 설치될 경우) 등 대피 시설 방호성능에 필요한 설비류

(2) 시설 세부설치 기준

- 방폭 문 및 방폭 밸브 : 방호성능 입사압력 3bar
- 필수시설: 공조실 및 청정기 실, 가스 차단문(가스 여과기가 설치될 경우) 등 대피 시설 방호성능에 필요한 설비류
- 주 출입구는 폭압 최소화를 위해 ㄱ, ㄴ 자형, 방폭 문 설치
- 방폭 문의 개폐 방식은 수동식 개폐를 원칙으로 하나, 노약자도 쉽게 개폐할 수 있도록 반자동 전동식 개폐 장치를 포함하는 방폭 문도 설치 가능
- 주 출입구 및 비상 탈출구 설치 시, 노약자 장애인도 쉽게 이용할 수 있도록 경사조절 가능
- 벽체 지붕 슬래브 두께: 철근콘크리트 50cm 이상
- 대피 시설의 천장 부분이 외부와 직접 맞닿은 공간이나 지상 구조물 구축할 때는 천장의 벽체 두께를 50cm 이상으로 구축하고, 위장 효과를 위해 초목을 심을 수 있도록 60cm 이상(100cm 이하)의 흙(자갈+흙)으로 구성
- 바닥 두께: 30cm 이상
- 천장높이: 2.5m 이상
- 환풍구
- 내부의 공기 순환을 위하여 환풍기 및 환풍구를 설치하는 경우 방폭 밸브를 설치하여야 함
- 화생방 공격에 대비하여 완전 밀폐 가능한 장치를 설치하거나 역류 방지 밸브를 설치
- 전력 차단 시 수 초 이내에 자동으로 작동되도록 설치
- 자가 발전기 냉각 및 가스 배출을 위해 급기 및 배기시설을 확보하여야 하며, 외부 가스 역류 방지를 위해 발전기 작동과 연동되는 역류 방지 댐퍼 또는 밸브 설치
- 배기구 외부에는 연도용 방폭 밸브 설치
- 화장실
- 환기는 위생용 방폭 밸브를 활용하거나, 별도의 덕트를 통해 배기용 방폭 밸브가 설치된 ㄴ 지역으로 연결하여 환기
- 화생방사태에 대비하기 위해 내부 환풍기 및 환기구에 밀폐장치를 설치하거나 역류방지밸브를 설치하여야 함

(3) 방송 청취시설

- 방송 청취가 가능하도록 라디오 수신시설을 설치해야 하며, 이동통신사 중계기도 설치 가능
- 라디오 수신시설 등은 전원차단에 대비, 비상 전원과 연결 또는 축전지를 사용하는 비상시에도 작동할 수 있도록 구성

(4) 급수시설

- 서해 5도는 대피 시설 내 식수할 수 있는 관정시설을 설치하거나, 상수도 연결 시에는 수용인원 대비 최소 3일 사용량(1인 1일 25L 기준)을 보관할 수 있는 급수 탱크 (저수) 구비
- 접경지역은 물을 공급할 수 있는 장치를 설치하거나, 별도의 음용이 가능한 물을 비치하여야 함

(5) 배수시설

- 배수시설은 외부에서 오염된 공기가 유입되지 않도록 배수 트랩 등 설치, 오수 저장 탱크는 급수 탱크 의 150% 정도의 용량으로 설치

(6) 공조시설

- 공조시설을 설치할 때는 공조기의 외부 기기 및 흡 배기구에 방폭 밸브 및 역류 방지 밸브를 설치하여 야 함
- 공조시설의 덕트 및 댐퍼는 배기만으로 작동할 수 있도록 구성되어야 하며, 흡기 부분에는 흡기 여과 필터를 설치할 수 있도록 덕트를 구성하여야 함

(7) 창고

- 대피 시설 내 필수 비치 비품 등을 보관하기 위해 잠금장치가 있는 창고를 설치하되, 비품들을 적재할 수 있는 앵글 등 비치
- 창고 내 비치품목을 습기 등으로부터 보호하기 위해 배수시설 등과 격실로 구분되어 있어야 함

Table 5. 방폭 문 및 방폭 밸브 설치 현황

구분	설치 위치	설치 수량	
방폭 문	주 출입구	1~199명	100 x 185cm 이상
		200~599명	180 x 210cm 이상
		400명 추가 시 200명용 1개씩 추가 예) 600~999명 : 180 x 210cm 이상 1개 추가	
	비상 탈출로 ※ 주 출입구와 반대 또는 대각선	1~199명	60 x 80cm 이상
		600명 추가 시마다 1개 추가 예) 200~799명 : 60 x 80cm 이상 1개 추가	
방폭 밸브	환기구(흡/배기구)	공기 흐름이 있는 곳에 흡·배기량 및 공기 흐름 고려하여 설치	

※ 1bar : 500파운드 일반 폭탄이 10m에서 폭발 시 방호 가능한 문

3.1.4 비상용승강기 대수 산정 (높이 31m를 넘는 각층 바닥 면적 기준)

Table 6. 피난용 엘리베이터 설치 법규

최대 바닥 면적	설치 대수
1,500m ²	1대 이상
1,500m ² 초과	1대에 1,500m ² 를 넘는 3,000m ² 이내마다 1개씩 가산한 대수 이상

- (1) 승용 승강기를 비상용승강기의 구조로 하는 경우 대수에 인정함
- (2) 2대 이상 설치하는 경우, 소화에 유효한 간격을 두고 설치할 것

- (3) 10층 이상인 공동주택의 경우에는 승용 승강기를 비상용승강기의 구조로 함.
(주택건설기준 등에 관한 규정 제15조 2항)

3.1.5 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 [국토교통부령 제665호]

제25조(지하층의 구조) ①법 제53조에 따라 건축물에 설치하는 지하층의 구조 및 설비는 다음 각호의 기준에 적합하여야 한다. <개정 2003.1.6, 2005.7.22, 2006.6.29, 2010.4.7, 2010. 12. 30.>

- (1) 거실의 바닥 면적이 50㎡ 이상인 층에는 직통 계단 외에 피난층 또는 지상으로 통하는 비상 탈출구 및 환기통을 설치할 것. 다만, 직통 계단이 2개소 이상 설치된 경우는 그러하지 아니하다.

1의 제2종 근린생활시설 중 공연장·단란주점·당구장·노래연습장, 문화 및 집회 시설 중 음식점·공연장, 수련 시설 중 생활권 수련 시설·자연권 수련 시설, 숙박 시설 중 여관·여인숙, 위락 시설 중 단란주점·유흥주점 또는 「다중이용업소의 안전관리에 관한 특별법 시행령」 제2조에 따른 다중이용업의 용도에 쓰이는 층으로서 그 층의 거실의 바닥 면적의 합계가 50㎡ 이상인 건축물에는 직통 계단을 2개소 이상 설치할 것

- (2) 바닥 면적이 1천 제곱미터 이상인 층에는 피난층 또는 지상으로 통하는 직통 계단을 영 제46조의 규정에 따른 방화구획으로 구획되는 부분마다 1개소 이상 설치하되, 이를 피난계단 또는 특별피난계단의 구조로 할 것

- (3) 거실의 바닥 면적의 합계가 1천 제곱미터 이상인 층에는 환기설비를 설치할 것

- (4) 지하층의 바닥 면적이 300㎡ 이상인 층에는 식수 공급을 위한 급수전을 1개소 이상 설치할 것

②제1항 제1호에 따른 지하층의 비상 탈출구는 다음 각호의 기준에 적합하여야 한다. 다만, 주택의 경우에는 그러하지 아니하다. <개정 2000.6.3., 2010. 4. 7.>

- (1) 비상 탈출구의 유효너비는 0.75m 이상으로 하고, 유효높이는 1.5m 이상으로 할 것

- (2) 비상 탈출구의 문은 피난 방향으로 열리도록 하고, 실내에서 항상 열 수 있는 구조로 하여야 하며, 내부 및 외부에는 비상 탈출구의 표시를 할 것

- (3) 비상 탈출구는 출입구로부터 3m 이상 떨어진 곳에 설치할 것

- (4) 지하층의 바닥으로부터 비상 탈출구의 아랫부분까지의 높이가 1.2m 이상이 될 때는 벽체에 발판의 너비가 20cm 이상인 사다리를 설치할 것

- (5) 비상 탈출구는 피난층 또는 지상으로 통하는 복도나 직통 계단에 직접 접하거나 통로 등으로 연결될 수 있도록 설치하여야 하며, 피난층 또는 지상으로 통하는 복도나 직통 계단까지 이르는 피난 통로의 유효너비는 0.75m 이상으로 하고, 피난 통로의 실내에 접하는 부분의 마감과 그 바탕은 불연재료로 할 것

- (6) 비상 탈출구의 진입 부분 및 피난 통로에는 통행에 지장이 있는 물건을 방치하거나 시설물을 설치하지 아니할 것

- (7) 비상 탈출구의 유도등과 피난 통로의 비상조명등의 설치는 소방법령이 정하는 바에 의할 것

3.2 대피 시설의 형태

Table 7. 대피 시설의 현황 (FEMA, 2006)

독립형 대피 시설	건물 내 대피 시설
- 잠재적인 파편의 위협으로부터 떨어져 있어야 함 - 구조적, 기계적인 부분이 타 건축물과 분리되어야 함 - 기존 건물의 설계와 통합되지 않으며, 차별화되어 있음 - 화생방 및 폭발물의 보호를 위한 대피 시설은 내부 거주공간의 실내장식이 간단하여, 공공용인 대체로 수백 명을 지원할 수 있음. 통상 12명에서 최대 수백 명 이상의 다수의 사람이 대피 시설에서 보호를 받을 수 있음	- 건물환경에 의해 부분적 보호가 이루어지며, 폭발압력은 부분적으로 적용받음(전체적인 보호 수준은 건물환경 자체에 의해 이루어지며, 대피공간 설계에 따라 고려되지는 않음) - 데이터센터, 회의실, 체육관, 식당 등에서 적용될 수 있으며, 신축건물에 주로 설계되어 위치되고, 건물 내 거주자는 외부에 나갈 필요 없이 내부에서 신속하고 쉽게 대피 가능 - 기존의 독립형 대피 시설 계획 또는 전통적인 대비 상대적인 비용 절감이 가능

대피 시설은 크게 독립형 대피 시설과 건물형 대피 시설로 나눌 수 있다. 독립형 대피 시설은 위험 요소로부터 떨어진 거리가 보장되어야 하며, 장기간의 대피가 가능한 시설이다. 반면, 건물 내 대피 시설은 건물환경에 부분적 보호가 이루어지며, 건물 내부에서 대피 장소가 설정되어, 외부로 나갈 필요 없이 내부에서 신속한 대피가 가능하다. 이는 기존의 독립형 대피 시설 또는 과거의 대피 시설 대비 비용 절감이 가능하다는 장점이 있다. 즉, 평상시에는 시설물의 역할을 하다가 재난 상황 발생 시 대피 장소로 활용될 수 있다는 것이다.

3.2 임시 대피 시설 지침

3.2.1 국외 대피 사례

- 미국 LA의 퍼스트 인터 스테이트 은행 건물 화재:
 - 건물 규모: 지상 62층, 지하 4층, 건물 높이 약 260m
 - 발화일시: 1988.5.4 22:37(통보시간, 15분 정도 지체된 것으로 추정)
 - 발 화 층: 12층
 - 피해 내역 : 인명피해 사망 1명, 부상 빌딩이용자 35명, 소방관 14명 건물피해 12층~15층까지 전소(코어 부분 제외)
 - 46층에 있던 청소원은 계단을 이용하여 30층까지 내려왔으나 문이 닫혀있어, 46층으로 되돌아가 동료 몇 명과 함께 승강기를 이용하여 피난하였음
 - 45층에 있던 청소원은 사무실을 경유 >> 승강기로 피난. 이 사람은 자매를 찾으러 다시 건물로 진입, 29층까지 승강기로 올라가고, 다시 계단으로 31층까지 올라가 자매를 포함한 6명을 발견, 승강기로 피난하였음
- 일본 오오사카시 아파트 건물 화재
 - 건물 규모 : 지상 14층, 건물 높이 약 41m
 - 발화일시 : 1989.9.9 10:40(통보시간 10:45분)
 - 발 화 층 : 10층 (1002호)
 - 피해 내역 : 인명피해- 부상 1명
건물피해- 발화 층부터 상층부 3개 층
 - 화재 당시 10층 이상에 있던 사람은 26명이었으며, 21명 자력으로 피난하였고, 5명은 소방대에 의해 구출되었다. 자력 피난자 21명 중, 12명은 계단을 통해, 나머지 9명은 승강기를 이용하여 피난하였음

3.2.1 국민안전처, 재해 구호 계획 수립지침(2015)

Table 8. 국내 비상 대피 시설 규모 및 기준

방호도	대상시설 규모 및 기준	비고
1등급	- 면적 660㎡ 이상, 벽 두께 1m 이상, 화생방 방호설비(공기여과기, 방폭문, 양압 설비 등) 설치, 정부청사, 광역시·도 및 인구 50만 이상 도시지역 1등급 시설 확충 권장	- 지휘용 및 총무시설
2등급	- 지하 2층 이하, 면적 660㎡ 이상, 지하철, 터널	- 다중집합장소
3등급	- 지하 1층 이하, 면적 660㎡ 이상 - 지하상가 등 양호한 건축물의 지하층, 지하 차·보도, 지하 주차장, 다층건물 지하층	- 다중집합장소
4등급	- 지하 1층, 면적 60㎡ 이상, 단독 주택 등 소규모 지하 1층	-

Table 9. 임시주거시설 관련 기준

구분		내용
임시주거시설 지정 기준	수용면적	- 1인당 3.3㎡
	수용시설 종류	- 이재민 수용이 쉽고 구조상 안전한 건물로 공공건물, 학교, 교회, 마을회관 등 - 중앙행정기관, 공공기관, 지자체가 운영하는 숙박 시설 또는 교육 훈련 시설, 연수 시설 내의 숙박 시설 - 우선 지정 사항 : 급식 및 부대시설 갖추어진 곳, 구호 차량 진입이 쉬운 곳
	수용시설 입지조건	- 지진해일, 상습침수 등 재해로부터 안전한 고지대로 지정, 저지대 등 상습 재해 발생 지역 내의 시설은 지정하지 않음 - 모든 방향에서 접근이 양호한 지역을 선정해야 함 - 지진 발생 시 주변에 고층건물이 있을 때 떨어진 거리를 고려하여 대피면적을 산출 - 대피 장소에 건축물이 있을 때 건축물로부터 건축물 높이의 1.5배를 제외하고 대피면적 산출 - 천막 등 대규모 임시주거시설의 설치가 가능한 장소로 지정해야 함 - 지진 피해가 발생하여 임시거주가 필요할 경우, 기존 임시 주거 시설 중 관공서 등 내진설계가 된 건축물이나 텐트 등을 활용
임시주거시설관리 기준	시설 관리 기준	- 이재민 발생 즉시 수용 및 대피를 할 수 있도록 관리 상태를 - 수시로 점검해야 함
	시설 설비기준	- 이재민에게 정보를 제공하는 안내도 등을 작성 및 비치 - 환기·조명·보온 등 생활환경을 양호하게 유지하기 위한 설비확보, 화장실, 간이목욕실 등 부대시설을 설치해야 함 - 간이 급수시설 설치, 급수 차량을 운영해야 함 - 적절한 통풍유지 및 철저한 화재 예방 시설을 완비해야 함

Table 10. 대피 시 1인당 필요 면적 산정 기준

항목	내용
NFPA 인명 안전코드 핸드북 2000	7.2.4.2.4 수평면의 비상구의 양측으로 점유자를 수용할 수 있는 1인당 유효 면적 3ft(0.28 m ²) 이상의 바닥 면적을 확보해야 함

4. 지하철 피난 기준 국내외 비교

4.1 국내 지하철 대피기준

4.1.1 철도설계 기준(건축)

(1) 대피 동선 계획

- 2방향 이상의 대피로 확보
- 대피 경로의 안전 구획 설정
- 대피 보조 시설의 설치 ex) 장애인, 노약자 보호구역
- 대피 시설의 방화 및 방연 성능 확보
- 대피 시 인간의 귀소 본능 및 생리적 특성 반영

- (2) 허용 대피시간은 지하철의 경우 재난 발생 시 안전한 위치까지의 허용 대피시간은 승강장 탈출은 4분, 안전한 구역까지의 경우 6분을 확보하여야 함

4.1.2 도시철도 정거장 및 환승·편의시설 설계지침(대피시간의 산정)

대피시간의 산정은 대기시간 + 이동시간으로 산출되며, 총인원과 인원 수용량에 따라 대기시간 및 이동시간을 산출한다. 단위 폭당 대피 수용량 및 대피요소별 재실자의 보행 속도는 아래의 표와 같다.

Table 11. 대피종류에 따른 대피 수용량

대피요소	대피 수용량
수평 이동요소 (승강장, 대합실, 통로)	80인/m·분
수직 이동요소 (계단, 정지된 에스컬레이터)	60인/m·분
작동 중인 에스컬레이터	120인/m·분
집·개표구	집·개표구당 60인/분

Table 12. 대피로에 따른 대피 인원 속도

대피요소	대피 속도
수평 이동요소 (승강장, 대합실, 통로)	60m/분
수직 이동요소 (계단, 정지된 에스컬레이터)	15m/분
작동 중인 에스컬레이터	36m/분

4.2 국외 대피기준

4.2.1 중국의 지하철 대피공간 기준

- 2008년 지하궤도교통 방공설계규범을 제정
- 지하철역 건설 시 평소 지하철 역사의 기능뿐 아니라 전시대비 기능을 충족하도록 출입구, 응급 대피 인원수에 따른 대피면적, 방공통풍 시스템, 급배수, 조명 등에 관해 규정함
- 지하철 임시대피 거주공간 활용 시 : 응급 대피 인수는 역사의 대피면적에 따라 구분

- 1인당 대피면적은 4~6m²
- 지하역사 구성 : 홀과 플랫폼 층으로 구분
- 이용자 출입구는 직접 홀과 연결, 크기는 평소와 전시 이용자의 유통량과 관련한 너비, 높이에 의해 결정
- 각 방공구간에는 전시 이용자 출입구가 2개 이상, 1개 이상의 직접 지상과 연결되는 전시 주요 출입구 필요
- 플랫폼 층에는 식수 저장(응급 이용자 대피를 위해 3일의 저장시간, 전시 상황 발생 시 대피를 위해 2 주간의 저장시간 지정

4.3 국내외 지하철 대피기준 비교

대피 인원의 산출에 있어 국내 기준은 미국의 NAFA 130 기준을 따르고 있으며, 플랫폼에서 벗어나는 데까지는 4분을 기준으로 하며, 마지막 탈출자가 벗어나는 데까지는 6분을 기준으로 하고 있다. 다음의 표는 국내 또는 해외의 피난 허용시간이다.

Table 13. Available Safety Egress Time, 피난 허용시간(ASET)

구분	출발지	도착지	ASET (피난 요구시간)
국내	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분
	가장 먼 출발지점	역 밖 출구	6.0 분
NAFA 130	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분
	가장 먼 출발지점	안전한 구역까지	6.0 분
홍콩	플랫폼 역사	역 밖 출구	4.5 분

4.4 대피시간과 대피 안전구역간의 상관관계

지하철에서의 대피시간은 수직 피난 통로인 계단의 경우, 너비와 높이가 제한되어 있다. 이는 대피 시 너비의 제한으로 정체 현상이 발생하게 되며, 대피가 지연되는 결과를 초래한다. 에스컬레이터를 통한 대피 경로 이동 또한 계단 높이의 증가로 교통 약자가 이용하기 어려워 대피시간이 증가한다. 따라서, 지하철 역사에서의 대피 시 수직 대피 경로보다는 수평 경로가 쉽고, 정체 현상의 발생확률이 낮다. 이러한 상황에서 대피 장소를 분산시킨다면 대피 경로의 증가에 따른 정체 현상이 줄어들게 된다.

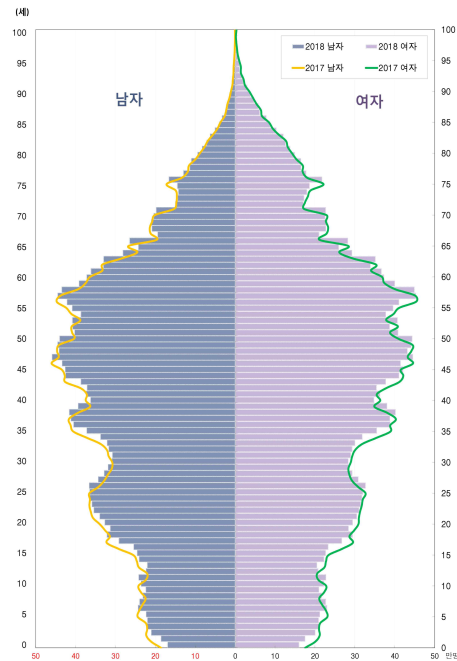
5. 안암역 시뮬레이션 진행

5.1 연령별 인구 비중 분석

본 연구에서 Sampling 한 안암역 지하철 역사는 다양한 나이로 구성된 시민들이 이용하는 대중 시설물로 SIP 위치선정을 위한 시뮬레이션 및 크기를 선정하기 위해 가장 중요한 변수 중 하나가 시설물을 이용하는 인원 산정이다. 이를 위해 2018년 인구 주택 총 조사 통계청 자료 나이, 성별로 보행 속도를 분류하였고, 안암역을 이용하는 승객도 마찬가지로 나이, 성별에 따라 분류하여 시뮬레이션에 반영하였다. 2018년 통계청 자료의 인구 주택 총 조사를 보면 남자는 천명, 여자는 천명으로 여성 인구가 남성 인구보다 다소 높게 나타나, 여성 100명당 남성의 수는 99.7 정도로 나타나 있다. 인구 구성은 다음과 같다. 여기서 40~50대 인구가 약 31.2 %로 가장 높게 나타났고 60대 이상 또는 10대 이하의 인구가 적은 항아리형 인구 피라미드 구조를 나타내고 있다.

(단위: 세, 천 명, %)

나 이	2017년(A)		2018년(B)		증감(B-A)	
	구성비	구성비	구성비	구성비	증감률	증감률
계	49,943	100.0	49,978	100.0	36	0.1
0-4	2,076	4.2	1,968	3.9	-108	-5.2
5-9	2,288	4.6	2,261	4.5	-27	-1.2
10-14	2,268	4.5	2,251	4.5	-17	-0.8
15-19	2,892	5.8	2,735	5.5	-156	-5.4
20-24	3,356	6.7	3,290	6.6	-66	-2.0
25-29	3,164	6.3	3,259	6.5	95	3.0
30-34	3,216	6.4	3,081	6.2	-135	-4.2
35-39	3,904	7.8	3,915	7.8	11	0.3
40-44	3,916	7.8	3,776	7.6	-140	-3.6
45-49	4,404	8.8	4,362	8.7	-42	-1.0
50-54	4,001	8.0	4,071	8.1	71	1.8
55-59	4,167	8.3	4,212	8.4	45	1.1
60-64	3,175	6.4	3,401	6.8	226	7.1
65-69	2,282	4.6	2,335	4.7	53	2.3
70-74	1,745	3.5	1,817	3.6	72	4.1
75-79	1,537	3.1	1,579	3.2	42	2.7
80-84	940	1.9	1,002	2.0	62	6.6
85세 이상	611	1.2	660	1.3	50	8.1
0-14세	6,632	13.3	6,480	13.0	-152	-2.3
15-64세	36,196	72.5	36,104	72.2	-92	-0.3
65세 이상	7,115	14.2	7,394	14.8	279	3.9
평균연령	41.4	-	42.0	-	0.6	-
중위연령	42.4	-	43.1	-	0.7	-



(a) 연령별 내국인 인구

(b) 성별 인구 피라미드

Figure 6. 내국인 인구 및 성별 인구 피라미드

5.2 시뮬레이션 인원 산정

본 연구의 모델 데이터는 서울지하철 교통공사에서 제공하고 있는 ‘서울시 지하철 호선별 역별 승하차 인원 정보’ 값을 이용하였고, 승하차 인원 중 가장 최댓값인 시간(2019년 5월) 기준으로 인원을 산정하였다. 안암역 승하차 인원을 확인한 결과 승차 인원은 4,479명/hr 명, 하차 인원은 3,718명/hr로 조사되었다. 시뮬레이션 인원은 산정을 위해 승차 74.65명/min, 하차 61.97명/min을 이용하였다. 승차 시간은 지상에서 플랫폼까지 대피자들이 이동하는 경우로 설정하여 시뮬레이션 결과 최대 219.9 sec이 걸렸값이 나타났다. 하차 시간은 플랫폼에서 지상까지 대피자들이 이동하는 경우 시뮬레이션 결과 최대 272.3 sec로 산출되었다. 승차 인원은 하차 인원보다 더 많은 것을 알 수 있고, 안암역에서 승차 인원은 최대 5~6 분을 기다려야 전철에 탑승할 수 있다. 시뮬레이션 수행 시 최대 인원 산정은 하차 인원이 역 밖으로 나가는 시간은 272.3 sec(4.538min) 동안 승차 인원과 동시에 역사에 머물게 된다. 따라서, 272.3 sec은 Pathfinder 모델링에서 인원 산정에 적용되었고, 이 시간을 분당 승하차 인구에 곱하여 전체 소요 인원을 산정하였다.

$$- \text{승차 인원 } 74.65\text{명} / \text{min} \times 4.538 \text{ min} = 338.76\text{명}$$

- 하차 인원 61.97명/ min X 4.538 min = 281.24명
- 역내 승무원 = 5명으로 가정
- 전체 시뮬레이션 인원수 = 332.76 + 281.24 + 5 = 625명

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(지상, B3)
Version: 2019.1.0508
Mode: Steering
Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):
Min: 0.1 "00001"
Max: 219.9 "00382"
Average: 15.3
StdDev: 34.5

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		
all behaviors	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Completion Times by Profile (s):

Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	50	0.1	"00002" 112.1	"00380" 16.9	33.5		
Female 30-39	23	0.1	"00009" 84.3	"00371" 9.9	25.6		
Female 40-49	25	0.1	"00005" 92.4	"00367" 13.7	29.5		
Female 50-59	25	0.1	"00007" 96.8	"00379" 15.1	32.6		
Female 60-69	15	0.1	"00012" 103.5	"00360" 12.5	32.0		
Female 70-79	7	0.1	"00026" 103.1	"00362" 14.8	36.1		
Female 80-89	1	219.9	"00382" 219.9	"00382" 219.9	0.0		
Male 20-29	52	0.1	"00001" 99.4	"00381" 16.1	32.7		
Male 30-39	18	0.1	"00010" 90.4	"00372" 13.6	30.4		
Male 40-49	25	0.1	"00006" 88.1	"00354" 12.7	26.5		
Male 50-59	23	0.1	"00008" 83.7	"00370" 10.1	26.0		
Male 60-69	15	0.1	"00011" 88.0	"00347" 11.1	28.2		
Male 70-79	6	0.1	"00025" 90.1	"00361" 15.1	33.6		
Male 80-89	1	180.8	"00383" 180.8	"00383" 180.8	0.0		
all profiles	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Travel Distances for All Occupants (m):
Min: 0.0 "00061"
Max: 158.6 "00382"
Average: 21.8
StdDev: 41.8

Figure 7. 지상에서 플랫폼까지 시뮬레이션 결과

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(B3,지상)
Version: 2019.1.0508
Mode: Steering
Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):
Min: 27.8 "00354"
Max: 272.3 "00139"
Average: 181.6
StdDev: 65.7

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		
all behaviors	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Completion Times by Profile (s):

Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	51	35.7	"00374" 260.0	"00190" 177.0	69.8		
Female 30-39	23	50.4	"00371" 261.0	"00114" 187.6	60.6		
Female 40-49	25	37.6	"00367" 249.0	"00110" 172.5	60.3		
Female 50-59	25	43.1	"00379" 265.6	"00195" 190.3	62.2		
Female 60-69	15	50.4	"00360" 265.2	"00129" 206.4	66.3		
Female 70-79	7	54.6	"00362" 263.6	"00131" 224.1	69.5		
Male 20-29	51	31.1	"00339" 261.7	"00132" 174.1	67.0		
Male 30-39	19	29.6	"00372" 263.0	"00127" 169.5	66.4		
Male 40-49	25	27.8	"00354" 243.5	"00220" 173.4	63.3		
Male 50-59	23	45.0	"00370" 266.4	"00139" 178.8	61.3		
Male 60-69	15	67.1	"00359" 256.4	"00128" 193.5	59.1		
Male 70-79	7	80.6	"00361" 257.1	"00213" 199.9	54.8		
all profiles	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Travel Distances for All Occupants (m):
Min: 26.7 "00354"
Max: 239.2 "00228"
Average: 163.6
StdDev: 52.4

Figure 8. 플랫폼에서 지상까지 시뮬레이션 결과

5.3 SIP 위치선정

본 연구에서 SIP 선정은 시뮬레이션 과정에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. FEMA(Federal Emergency Management Agency, 미국 연방 재난관리청) Risk Management Series 중 Design Guidance for Shelters and Safe Rooms에서는 Shelter의 위치 시 가장 중요한 것 중 하나는 얼마나 많은 사람을 수용할 수 있는 “수용력 (Capacity)”이다. 즉, 재난 발생 시 얼마나 많은 인원이 시설물 내에 안전하게 대피할 수 있는지가 중요한 요인이라 할 수 있다. SIP 선정은 시설물 내에서 단순히 면적을 통해 산출되는 것이 아니라, 공간구획 물 등을 제외한 실질적인 면적을 통해서 계산되어야 한다. SIP 선정 과정에서 또 다른 중요한 요인은 시간이다. 모든 인원이 Shelter로 최소한의 시간에 도착할 수 있도록 설계되어야 하기 때문이다. Shelter까지의 경로는 쉽게 접근 가능해야 하며 경로마다 표시도 명확해야 한다. Hazard Sign은 CPTED (Crime Prevention Through Environmental Design)을 다음의 원칙에 따라 설정해야 한다고 제시하고 있다. Natural Access, Natural Surveillance, Territoriality이고 아래의 이미지는 Exit을 나타낸다.

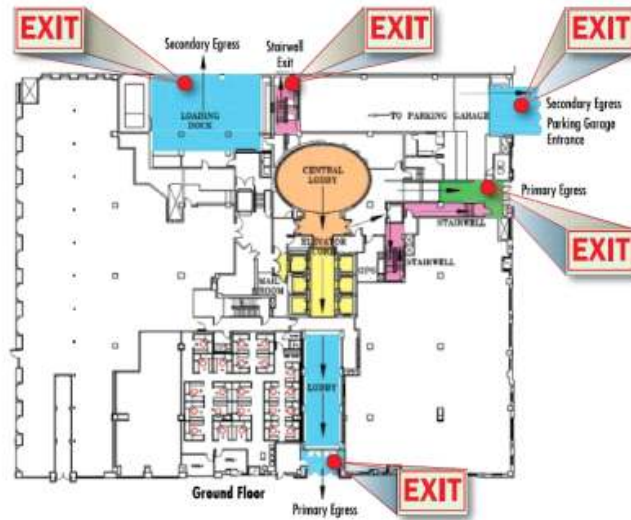


Figure 9. 평면도 및 외부 출구를 고려한 건물 내부의 Shelter 선정 예시

추가로 Shelter의 공간은 테러 등의 상황에서 건물에서 떨어지는 잔해를 효과적으로 제어할 수 있어야 하며, 미사일 낙석 등으로부터 보호 가능하여야 한다. 예를 들어 가정집에서의 가능한 Shelter의 위치는 다음과 같다.

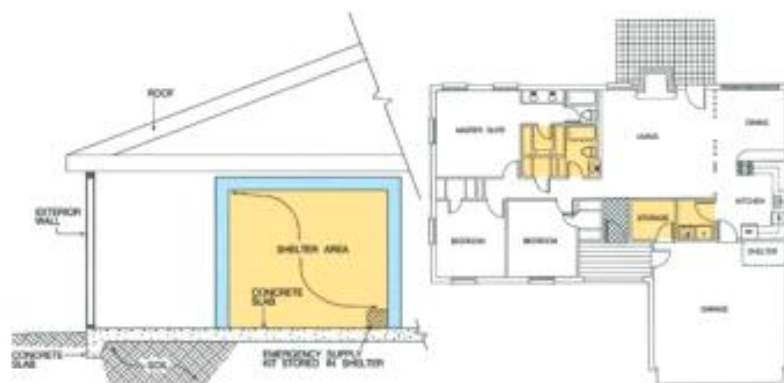


Figure 10. 가정용 내부 SIP 선정 예시

Shelter는 주변 위험 요소로부터 완벽히 보호 가능한 곳이면서, 60㎡의 방송 청취가 가능한 지하층 공간을 만족해야 하므로, 지하 1층과 2층이 적합하다. 지하 1층 및 2층 모두 대피 시설로 지정될 수 있는 60㎡ 이상의 면적이고, Shelter의 기능이 가능하다. 본 연구에서는 SIP 위치를 지하 1층의 1구역과 지하 2층의 2,3 구역으로 지정하였으며, 각 면적은 433㎡, 1945㎡이다. 엘리베이터는 Shelter와 가깝게 배치되어 있어, 대피시

간이 줄어들 수 있으므로, 재실자들이 빠르게 접근 가능한 위치이다. 반면 지하 3층은 지하철 도어가 유리
로 구성되어 있으므로, 재난 발생 시 파편으로 인한 2차 피해가 예상되므로, 지하 1층과 지하 2층을 SIP
로 지정하였다. 여기서 SIP 위치에 따른 비교를 위해, 지하 2층만 SIP으로 이용하는 경우와 지하 1층과 지
하 2층을 모두 SIP으로 활용했을 때의 대피시간을 비교해보도록 한다.

FEMA 453에 따르면, Shelter는 대피자들이 24시간 이상 대피 여부에 따라 수용인원이 달라진다. 즉, 24시
간 이상 시 수면이 필요한 최소한의 면적이 필요하므로, 이에 따라 수용력은 줄어들게 된다는 것이다. 만약,
24시간 이상 Shelter에서 지내야 할 경우, 수면 시설이 필요하며, 싱글베드를 기준으로 최소한의 면적은 $5.6 \text{ m}^2/\text{person}$ 이고, 여기서 이층 침대를 사용한다면 이의 절반인 $2.8 \text{ m}^2/\text{person}$ 의 면적이 필요하다. 반면 24시간 미
만 시 수면이 필요 없게 되므로 이보다 훨씬 적은 $1.86 \text{ m}^2/\text{person}$ 으로 규정하고 있고, 재실자들의 수용력이
보다 향상된다.

따라서 본 연구에서는 SIP의 수용력을 고려하여 수면이 필요 없는 24시간 미만을 기준으로 인원을 산정
하였으며, SIP의 위치로 지하 1층과 지하 2층의 구역에 따라 구분하였다. 수면이 불필요한 24시간 이내로
필요 면적을 산출할 경우 지하 1층 및 지하 2층은 각각 232.7명, 1048.65명으로 총 1281.35명이 대피할 수
있다. 반면 수면이 필요한 24시간 이상의 경우, 2층 침대를 사용한다고 하더라도 지하 1층은 154.64명, 지하
2층은 694.64명으로 총 849.28명밖에 머무르지 못한다. 5.2에서 계산된 결괏값을 보면 최악의 상황 발생 시
시뮬레이션에 필요한 인원은 총 625명이므로 만약 수면이 필요한 상황에 놓인다면 지하 2층 또는 지하 1층
과 지하 2층을 모두 활용하여 SIP으로 정해야 한다.

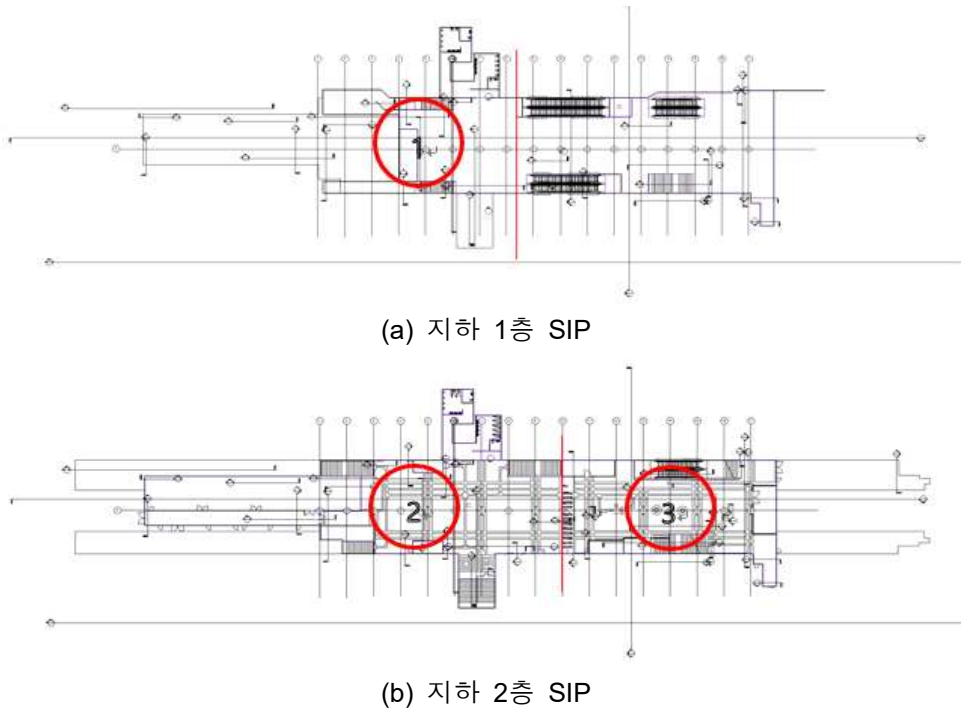


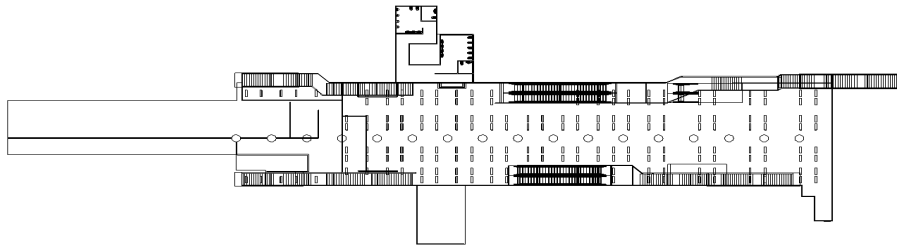
Figure 11. 지하 1층 SIP 및 지하 2층 SIP

5.4 안암역 모델링

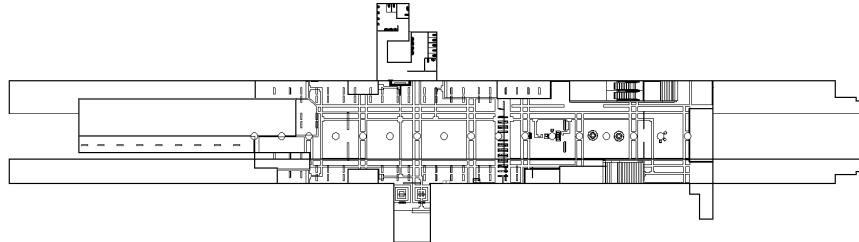
본 연구에서는 레이저 스캐닝을 통한 역설계로 데이터를 정합하여 안암역 역사의 도면을 획득하였다. 모
델링 데이터는 Autodesk Revit 프로그램을 사용하였으며, 포인트 클라우드 소프트웨어에서 오버랩하고 3D
모델링 작업을 진행하였다. 다음의 그림은 각 객체에 속성정보를 부여하여 3D 모델링을 진행한 과정을 나
타낸 것이다. 여기서 만들어진 모델링을 Pathfinder 프로그램에 대입하여, 역사 공간에 엘리베이터, 문, 계단
등을 구분하여 모델링을 진행하였다. Pathfinder의 경우 DXF 파일은 물론 DWG와 파일과의 호환성이 우수하
다는 장점이 있다.

Table 14. 안암역 계단 폭, 높이

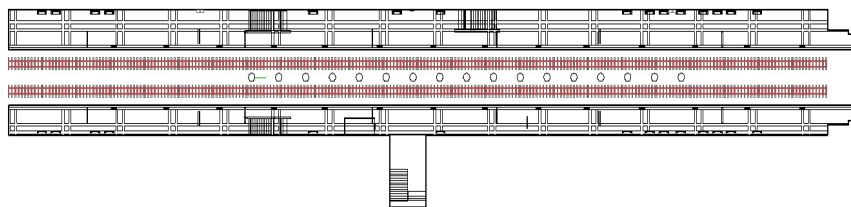
Location	Riser		Tread
B1F~Exit 1 Staircases	1Landing	166	320
	2Landing	166	320
	3Landing	166	320
	4Landing	166	320
B1F~Exit 2 Staircases	1Landing	157	320
	2Landing	168	320
	3Landing	173	340
	4Landing	168	340
B1F~Exit 3 Staircases	1Landing	157	320
	2Landing	168	320
	3Landing	173	340
	4Landing	168	340
B1F~Exit 4 Staircases	1Landing	143	335
	2Landing	157	335
	3Landing	171	335
	4Landing	175	300
B2F(Bomunsa Direction~B1F)		166	325
B2F(Korea University Direction~B1F)		172	325
B3F(Bomunsa Direction)~B2F		166	330
B3F(Back of Bomunsa Direction)~B2F		166	335
B3F(Front of Korea University Direction)~B2F		166	335
B3F(Back of Korea University Direction)~B2F		166	335



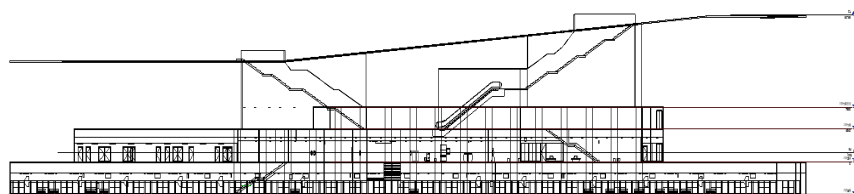
(a) B1 plan



(b) B2 plan



(c) B3 plan



(d) Section

Figure 12. 안암역 지하 및 전체 단면

Table 15. 주요 시뮬레이터의 특징 및 한계점(1)

구 분	시뮬레이터의 특징 및 한계점	비 고
ELVAC	-엘리베이터만을 이용한 피난 시뮬레이션 -재실자의 총 피난 시간만을 결과데이터로 제공 -피난이 시작되면 재실자들은 엘리베이터 앞에서만 대기하므로 다양한 피난 전략을 검증하기에는 부적합 -엘리베이터의 층간 이동 소요시간에 관한 데이터를 시뮬레이션할 수 없음 -화재가 발생한 층의 높이가 높아질수록 결과데이터 정확도가 떨어지므로 초고층 건축물의 피난 전략 검증에는 사용하기 어려움	엘리베이터 반영
ELEVATE	-엘리베이터의 크기를 입력할 수 없음 -마지막 재실자가 엘리베이터를 통해 건축물 밖으로 나왔을 때의 시간을 출력하기 때문에 건축물 외부로 피난하는 경우만 사용 가능 -5분당 출구로 나오는 피난자들의 수를 결과로 제공함 -엘리베이터 앞에 도달하기 전 피난 경로를 인식함	
BTS	-계단, 엘리베이터, 에스컬레이터를 이용한 피난 시간의 측정이 가능 -각 층의 모양, 이동방법의 선택, 재실자의 혼잡으로 인한 지체, 재실자의 보행 속도 입력 가능 -엘리베이터 앞에 도달하기 전 피난 경로를 인식함 -재실자들의 과밀·지체 현상을 반영하지 않음	
LEGION	-각 재실자 간의 상호작용모델에측에 집중하여 개발된 툴 -2D Continuous 피난 모델로 개발되어 CAD 기반의 대상지를 공간으로 인식하고 피난 시뮬레이션을 진행함 -재실자들이 인공지능을 가져 유동적인 보폭 속도의 증감을 반영하고 피난 경로의 절정 시에는 통계적 분석을 바탕으로 확률적인 의사결정을 함 -각 재실자의 피난 성능이 신체 유형을 기준으로 결정되므로 정확도가 떨어짐 -엘리베이터의 피난 성능을 입력할 수 있는 항목이 없음	

Table 16. 주요 시뮬레이터의 특징 및 한계점(2)

구 분	시뮬레이터의 특징 및 한계점	비 고
EVACNET	-다양한 종류의 건축물 피난 시뮬레이션을 수행할 수 있게 개발된 프로그램 -피난 시간 최적화에만 시스템의 목적이 집중되어 있어 각 피난자의 다양한 피난 행동특성이나 의사결정 특징을 시뮬레이션할 때는 부적합 -Node와 Arc를 이용하여 피난 성능을 검증하기 때문에 CAD 기반의 Visual Interface가 불가능함 -텍스트 기반의 항목 입력시스템으로 개발되어 있어 복합 건축물의 시뮬레이션 불가능	엘리베이터 미반영
Simulex	-복합 건축물 내 위치하는 많은 재실자의 피난 행동과 Way-Finding 방법을 시뮬레이션 -피난자별, 군집 별 피난 능력을 사용자가 개별적으로 지정할 수는 있으나 공간의 밀도에 따라 변화하는 유동적인 피난 속도의 증감을 지원하지 않음 -피난자 간의 거리에 따라 이동 속도의 변화를 지원하지므로 피난 시간의 증가에 따른 피난자들의 신체적 능력 감소나 정신적 혼란 상태는 지원하지 않음 -피난 결과데이터를 5초 단위로 제공하기 때문에 다른 시뮬레이션 모델과의 비교·분석이 어려움 -CFAST, FDS와 같은 연기 유동해석 시뮬레이션 프로그램과의 연동이 불가 -평면과 계단을 연결하는 Link에 피난자들이 끼이는 기술적인 결함이 있어 업데이트가 필요 (다수의 계단 Link 불가)	
Building EXODUS	-재실자의 피난 행동을 People-People, People-Structure, People-Fire 관계로 분류하여 화재 성상 및 유동에 따른 피난 시뮬레이션 가능 -피난 시간의 증가에 따른 피난자들의 신체적 능력 감소나 정신적 혼란 상태를 입력할 수 있는 항목 지원 불가 -평면상의 보행 속도, 계단을 오르내릴 때의 보행 속도를 입력하는 항목이 존재하지만 변화하는 유동적 보행 속도를 증명하는 알고리즘이 없음 -지속적인 버전 향상이 이루어지고 있으나 아직 초고층 건축물에는 소극적임	

5.5. 시뮬레이션 프로그램

다음의 표는 기존에 피난 시뮬레이터로 사용되는 프로그램의 특징 및 한계를 서술하고 있다. 공간 및 재실자의 특성에 따라 장점 및 특징을 아래 표와 같이 상세히 나타내었으며,

Table 17. Simulex, Building Exodus, Pathfinder의 입력요소

구분	Simulex	Building Exodus	Pathfinder
공간 특성	내부공간을 방, 복도 계단으로 구분	Node에 의한 공간 구성 (1 Node 당 1 재실자 점유 가능)	Mesh Triangle Space에 의한 공간 구성
재실자 특성	재실자 유형(32가지), 하나의 재실자 유형에는 총 10가지 신체 타입 가능	신체 타입 (성별, 나이, 몸무게, 키) 재실자 특성 (민첩성, 충동성, 인내심, 유친 관계, 재실자 출구 지식, 지도자 설정) 행위 모델 (극한 행동, 사회적 반응, 조급, 벽 근접, 의자 뛰어넘기, 복잡한 계단, 건물 친숙도 등)	신체 타입 (성별, 나이, 어깨너비) 재실자 행동 (Go to Rooms, Go to Elevator, Go to Waypoint, Simply Waiting in Place) 재실자 배치: 개별 지정, 그룹지정 (Random/Uniform), 재실자 수, 밀도 선정
재실자 이동 특성	Distance Map (목적지까지 최단 거리) 반응 시간 설정(3가지) 보행 속도(성별 및 나이 군에 따라 다름) 사람과 사람 간의 밀도 반영	인지(피난선택요소 : Local Familiarity All Main Exits, Local Potential, Floor Potential) 반응 시간(임의지정, 사용자 입력) 보행 속도(성별 및 나이에 따라 다름) 이동성(mobility) 설정 (0~1, 장애 정도가 높을수록 0에 가까움) 출구 유동률(Door Flow Rate)	경로 설정 (Path Generation, Locally Quickest, Backtrack Prevention) 반응 시간(임의지정, 사용자 입력) 보행 속도(성별 및 나이에 따라 다름) 재실자 이동(SFPE, Steering Mode) 출구 유동률(Door Flow Rate)
화재 특성	‘Drill’ Mode로 간단히 시뮬레이션 진행	위험 모델 (Upper, Lower: HCN, CO로 구성되며 Init, Grad, Pow, Limit 4가지 값을 가짐) 독가스에 대한 특성 PID, COHb 농도, RMV	‘Drill’ Mode로 간단히 시뮬레이션 가능

5.5.1. Pathfinder 프로그램 선정

본 연구에서 사용된 시뮬레이션 프로그램으로는 Thunderhead Engineering에서 개발한 Pathfinder를 사용하였다. Pathfinder는 Steering Mode, SFPE Mode 2가지 보행자 Behavior Mode를 제공하는데, 첫 번째 Steering Mode는 보행자들이 다른 보행자들과 상호작용하는 알고리즘으로 가능한 한 인간의 행동과 움직임을 모방하려 노력하는 상태고, 두 번째 SFPE Mode는 Engineering Guide to Human Behavior in Fire (SFPE, 2003)에서 정의된 가정 및 계산된 수치를 사용한다. 즉, SFPE Mode에서는 보행자는 서로 회피하려고 시도하지 않고 보행자들끼리 서로 투과되어 보이지만, 문의 흐름 제한이나 밀도에 따른 보행 속도 제어는 가능하다.

본 연구에서 사용된 안암역 역사 모델링을 Steering Mode로 시뮬레이션을 진행하였을 때와 SFPE Mode로

시뮬레이션을 진행했을 때는 보행자들의 동선이 그림과 같이 다른 것을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 SFPE Mode에서는 보행자들은 숫자가 많이 겹치더라도 한 명의 공간으로만 공간을 차지하므로 동선이 비교적 간단하게 표현될 수 있다.

피난 대피 시뮬레이션 프로그램에는 다음과 같이 구성되어 있다. 이때 허용 가능 피난 시간 및 피난 시뮬레이션에서 산정된 REST(Required Safety Egress Time, 최소 피난 요구시간)과 ASET(Available Safety Egress Time, 허용 가능 피난 시간) 값을 비교하게 된다. 최종 결과를 통해 ASET 값이 더 크면 대상 건축물이 피난 안전성을 확보하였다고 판단한다. 다음은 국내에서 많이 활용되고 있는 Simulex, Building Exodus, Pathfinder 세 가지 시뮬레이션 입력 요소를 비교한 표이다.

5.5.2. 피난 시뮬레이션 과정

본 연구에 사용되는 Pathfinder 피난 시뮬레이션 과정은 다음과 같다.

- 1) 재실자의 특성 분석
- 2) 테러 등 재난 상황 설정
- 3) 출구 및 피난 경로 설정
- 4) 대피 Modeling 결과 반영
- 5) 재실자에 대한 인명 안전성 확보 여부 판단

시뮬레이션 사용자들의 재실자 설정 경향을 조사하기 위해 시뮬레이션 사용 경험이 있는 사용자들을 바탕으로 설문 조사. 평가항목은 다음과 같다.

- a) 단위 가구당 재실자 수
- b) 성별 분포
- c) 장애 여부 고려
- d) 연기에 의한 영향 인자 도입
- e) 평지 보행 속도
- f) 계단 보행 속도
- g) 몸무게 설정
- h) 키 설정에 대한 것이다.

단위 가구당 재실자 수의 경우 NFPA에서 제시한 최대 수용인원을 참고하는 것이 가장 높은 비율(45%)을 차지하였으며, 건축 계획상 세대 구성비(17%), 단위 가구당 평균 거주자(13%)가 그 뒤를 이었다. 전체 거주자 성별 분포로는 남자 50%, 여자 50% 비율(62%)로 가정하는 사용자가 가장 많았으며 그 뒤로 남자 60%, 여자 40% (19%)를 차지하였다. 장애 여부는 고려 안 함(95%)이 매우 높게 나타났으며 이를 통해 시뮬레이션 설정 시 대부분 사용자가 재실자의 장애 여부를 고려하지 않는 것을 알 수 있었다. 연기 피난 인자의 경우 가시도 및 연기 자극(65%)이 가장 높게 나타났으며 피난 과정에만 집중한다(14%), 연기속성 반영(14%)이 그 뒤를 이었다. 평지 보행 속도는 시뮬레이션에서 제시된 기본값인 DEFAULT 값 설정(36%)이 가장 높게 나타났으며 통계자료 참고(27%)가 그 뒤를 이었다. 계단 보행 속도 또한 DEFAULT 값 설정(59%)이 가장 높게 나타났으며, 통계자료를 참고하는 것(23%)이 두 번째로 나타났다. 다음 몸무게 설정에서는 나이를 기준(32%)으로 하여 설정하는 것이 가장 높게 나타났으며 키 설정 또한 나이를 기준(36%)으로 하는 것이 가장 높게 나타났다.

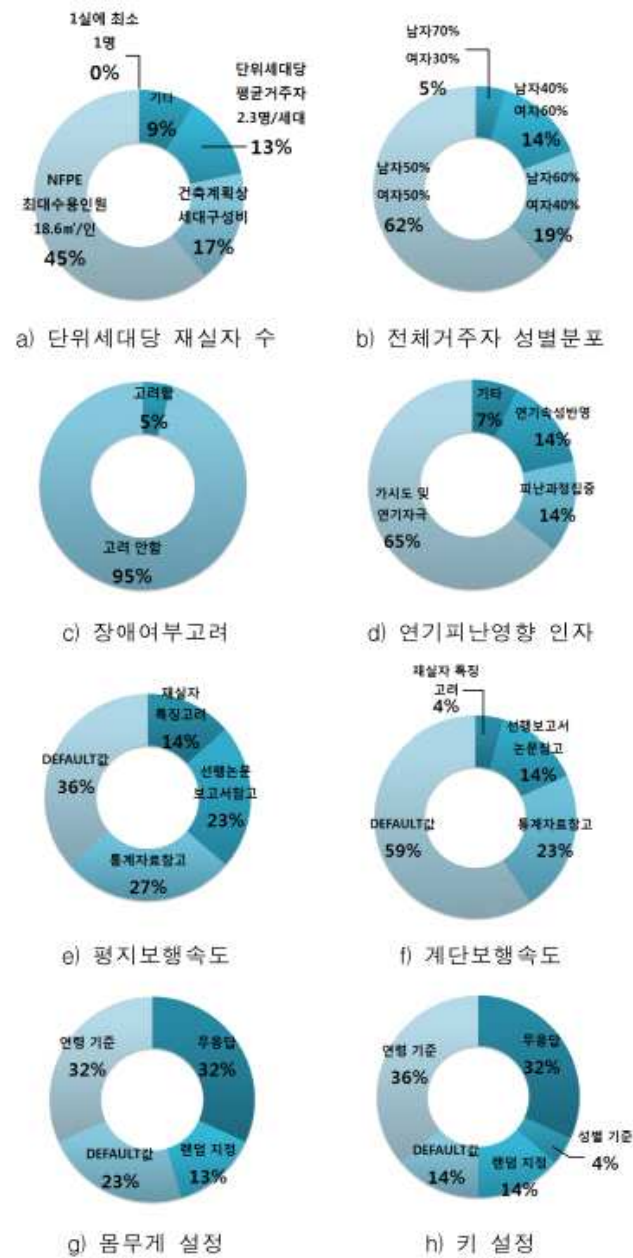


Figure 13. 재실자 설정 요소의 설문결과

5.6. 엘리베이터 승하차 프로세스

CBRE 상황 발생 시 피난자들은 엘리베이터를 통해 대피하는데 그 과정은 다음과 같다. 따라서 본 연구에서도 다음과 같은 과정을 통해 시뮬레이션을 진행하였다.

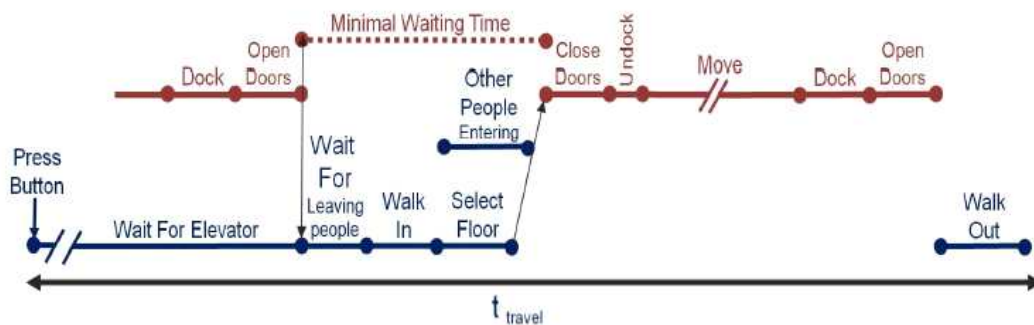


Figure 14. 엘리베이터 승하차 프로세스

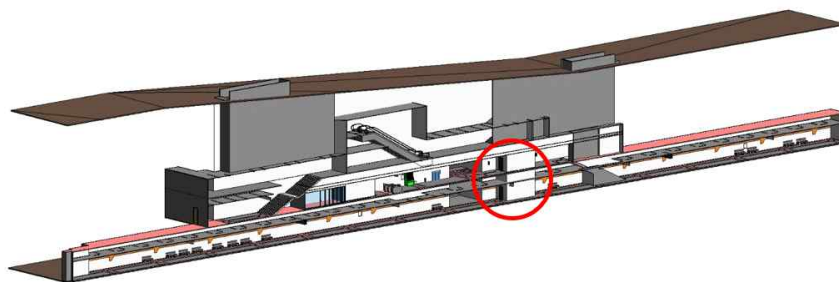
5.7 엘리베이터 대수 산정

본 연구에서 지정된 안암역 역사는 승강기 3대로 구성되어 있으며, 일반 승객 또는 장애인용으로 2대의 승강기, 장애인 전용 승강기 1대로 구성되어 있다. 엘리베이터의 규격은 다음과 같다.

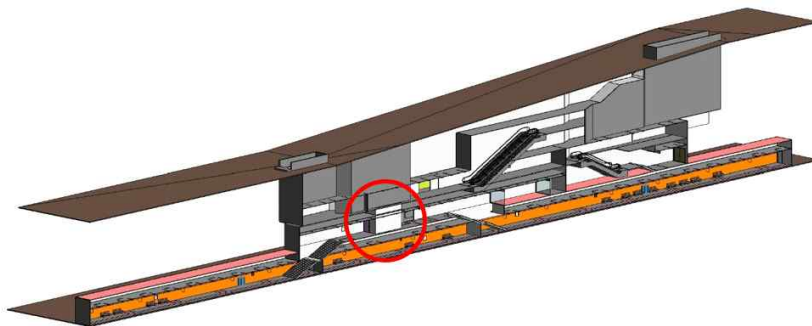
- 1) 출입문 규격(W x H) : 900 x 2100 (mm)
- 2) 카 내부 규격(A x B) : (유효면적) 1100 x 1350 이상 (mm)
- 3) 폭 : 2000 (mm)
- 4) 깊이 : 2200 (mm)
- 5) 속도 : 0.3m/s
- 6) 15인승, 1000kg 이내

Table 18. 안암역 엘리베이터 위치

시설	운행구간	위치	사용 여부
MRL 엘리베이터 1호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 2호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 3호기	F1-B2	1번 출구	사용 가능



(a) 3D 측면- 엘리베이터 1호기



(b) 3D 측면- 엘리베이터 2호기

Figure 15. 지하 2층 Shelter 위치 및 지하 3층 Shelter 위치

5.8 엘리베이터 속도 산정

CBRE 상황에서 계단만큼 폭이 넓지 않아서 많은 수의 인원을 수용하지는 못하지만, 노약자나 어린이, 임산부 등 빨리 건지 못하는 분들에게는 굉장히 중요한 운송수단이라고 할 수 있다. 에스컬레이터의 속도는 통상 국제적으로 0.5m/sec, 최대 0.75m/sec으로 정의하고 있고 경사 각도가 30도를 넘는 경우는 내림 방향에서 최대 30m/sec(출처: 건축설계 대사전: 설계편)으로 제한을 두고 있다. 지하철 주요설계기준(설비 분야)을 보면, 승강기 편의시설기준을 Table 9와 같이 정의하고 있다.

일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자를 위한 시설로 일반적인 엘리베이터보다 속도가 현저히 느리다. 화재, 지진 등 재난 발생 시 엘리베이터는 사용하지 않는 것이 원칙이지만 본 연구에서 검토하고 있는 CBRE(Chemical Biological Radiological and Explosive) 및 특히 테러상황 발생 시 빠른 대피를 요구하는 상황 시 엘리베이터 사용을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

Table 19. 대피요소별 대피 속도

대피요소	대피 속도
수평 이동 요소(승강장, 대합실, 통로)	60m/min (1.00m/s)
수직 이동 요소 (계단, 정지된 E/S)	15m/min (0.25m/s)
작동 중인 E/S	36m/min (0.60m/s)

즉, 엘리베이터 속도는 45m/min ~ 60m/min을 기준으로 지정하였는데, 이를 건축설계 대사전과 같이 단위를 sec으로 바꾸어서 보면, 0.75m/sec ~ 1m/sec이 된다. 반면, 현재 안암역에 사용되는 엘리베이터 평균속도는 0.3m/s로 운행되고 있다. 이는 한 개 안암역 지하철 한 층을 이동하는데 걸리는 시간 15s를 안암역 1층당 높이 4.64m를 기준으로 산정하였다. 따라서 본 연구에서는 엘리베이터 속도를 기존 설계된 속도인 0.3m/s로 시뮬레이션을 우선 진행하고 건축 대사전에서 정하고 있는 0.75m/sec 및 1m/sec을 기준으로 시뮬레이션을 진행하여 대피 속도와 비교를 하고자 한다.

여기서, 65세 이상과 같은 노약자의 경우 18세~40세 사이의 성인 보행 속도보다 느린 것을 고려해 대피 시뮬레이션에 반영하였다.

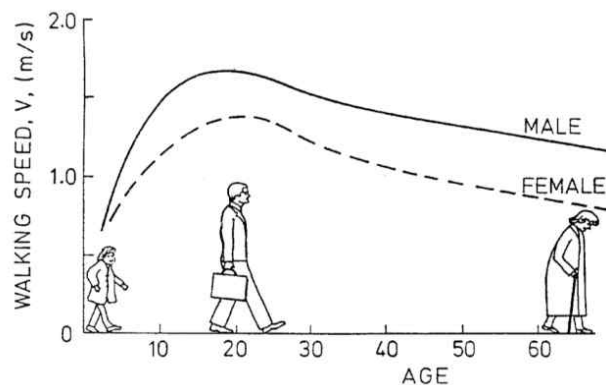


Figure 16. 연령 별, 성별 보행 속도 비교 그래프

5.9 엘리베이터 탑승 인원 결정

본 연구에 지정된 시뮬레이션 인원 917명을 역내에 고르게 배치해야 하는데 하차 인원 414명은 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 골고루 분포하고 승차 인원 498명은 승차 시간을 고려하면 대부분 플랫폼이 위치한 지하 3층에 위치할 확률이 높으므로, 양쪽 플랫폼에 골고루 배치하였다. 또한, 승무원으로 추정한 5명의 경우 1명은 지하 1층 나머지 4명은 지하 2층 과 3층에 배치한다. 배치 시 나이나 성별을 위의 표를 기준으로 임의로 배치하였고, 성별과 나이에 따라 보행 속도를 지정하였다. 위의 인원에 따라 대피자 배치 시 지하 1층은 명, 지하 2층은 명, 지하 3층은 명이다. 인구 분석결과에 따르면, 노약자(65세 이상) 인구는 전체 인구대비 약 13%를 차지하였고, 한국의 장애인은 약 250만 명이므로, 플랫폼에 4명을 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 이동하는 것으로 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 20. 성별, 연령에 따른 보행 속도

Index			Speed (m/s)	Contents			Researcher
				Average	Standard Speed	Assessment	
Walking Speed (m/s)	Fast		2	1.888	1.24~2.05	Horizontal Space 40m ² (2m×20m) : Adult	Hong et al.(2010)
					1.87	Waking inside the Building	Lee(2001)
					1.75~2.53	Fast Walking of 20s and 70s	Bohannon (1997)
	Average	20s and 30s	1.3	1.298	0.7~1.2	Traffic Engineering	Jeon(2011)
					1.25~1.8	Adult	Kim(1983)
					1.3	Population Density - 0.1 Person/m ²	Pauls(1983)
					1.4	Free Walking Speed of Street in London	Older et al.(1964)
					1.27~1.46	Average Walking of 20s and 70s	Bohannon (1997)
	Slow	Elders and Kids	1	1.006	0.8~1.1	Korean Nation Police Agency	Jeon(2011)
					0.93~1.28	Senior Citizen	Hong et al. (2010)
					0.92	Senior Citizen more the 34,485 Person	Studenski (2011)

Table 21. 연령 별 비율 및 보행 속도

나 이	남		여	
	비 율 (%)	보행 속도 (m/s)	비 율 (%)	보행 속도 (m/s)
20~29	16.583	1.358	16.433	1.341
30~39	7.443	1.433	7.465	1.337
40~49	8.541	1.434	8.567	1.390
50~59	8.042	1.433	8.066	1.313
60~69	4.945	1.339	4.960	1.241
70~79	3.907	1.262	3.106	1.132
80~99	1.349	0.968	1.353	0.943
합계	50.0(%)	-	50.0(%)	-

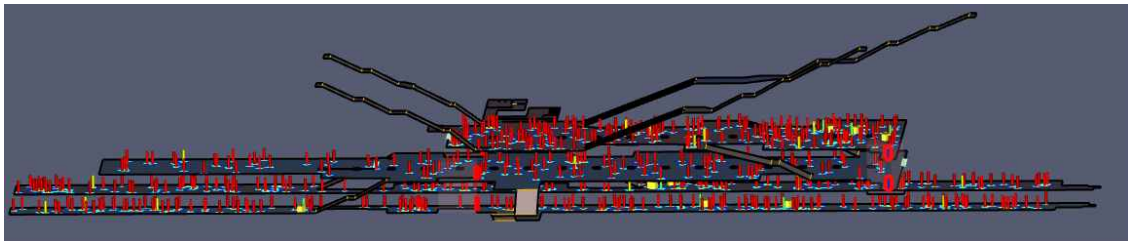


Figure 17. 보행자 배치도

본 연구에서 지정된 안암역 역사는 승강장의 면적에 따른 최소하중은 다음의 식을 사용하여 산정하였다.

Table 22. 내부면적에 따른 정격 하중

내부면적이 4.65m ² (50ft ²) 미만일 경우	내부면적이 4.65m ² (50ft ²) 이상일 경우
$(SI\ Units)$ $W = 35A^2 + 325A$	$(SI\ Units)$ $W = 2.45A^2 + 610A - 620$
$(Imperial\ Units)$ $W = 0.667A^2 + 66.7A$	$(Imperial\ Units)$ $W = 0.0467A^2 + 125A - 1,367$

A = 내부 총 면적, $mm^2(ft^2)$

W = 최소 정격 하중, $kg(lb)$

본 연구에서 사용되는 안암역 1호기의 내부면적을 위의 식(A)에 대입 시 최소 정격하중을 산출할 수 있다. 이를 바탕으로 1회 왕복 시 가능 인원을 선정하게 되며, 엘리베이터를 이용한 대피 소요시간을 추정할 수 있다.

5.9.5. 총 피난 시간 계산

일반적으로 엘리베이터를 이용한 대피는 왕복 엘리베이터 이동시간, 대피자 수, SIP까지 이동 거리, 엘리베이터 효율 등에 따라서 달라진다. 이동 효율은 엘리베이터에 대피자가 일부만 탑승할 경우 적용한다. 엘리베이터 수량은 안암역 지하철의 경우 2대가 설치되어 있으며, 엘리베이터의 고장 등은 이동 효율 등에서 고려하였으므로, 본 연구의 대피시간 산정 식에서는 제외하였다.

$$t_e = t_a + t_o + \frac{(1+\eta)}{J} \sum_{j=1}^m t_j$$

t_e : 대피 시간(s)

t_j : 엘리베이터 왕복 이동시간

t_a : 엘리베이터 피난 시작시각

t_o : 엘리베이터에서 SIP까지의 이동 시간(s)

J : 엘리베이터 수량

η : 엘리베이터 이동 효율

이를 통해 근사적으로 재난 발생 시 엘리베이터를 통한 대략 시간을 산출할 수 있으며, 총 대피 시간은 앞서 구한 근사 계산치의 합과 같다.

5.10 피난 전략

현재 지하철에서의 피난 방법은 최초 CBRE 상황 시 대피 층을 어떻게 인식하는지에, 안전한 장소로 이동하는 방법에 따라 다르게 수립된다.

피난 방법은 다음의 2종류로 분류된다. 우선 단계적 부분 피난 방법은 1개 층을 대피 장소(Shelter in Place, SIP)로 규정하여 해당 층으로 재실자들이 모여서 대피하도록 피난 전략을 수립한다. 다음으로는 전체 동시 피난 전략은 재난 상황 발생 시 2~3개 층을 SIP으로 모여서 재실자들을 보호할 수 있도록 하는 것이다. 이는 외부 재난 발생 상황으로부터 재실자를 보호하는 데에 효과적이다. 여기서 1개 층으로 하는 단계적 부분 피난은 재실자들의 정체 현상으로 피난 시간이 더 많이 소요되는 단점이 있다.

구조대의 구조 활동으로 대피자가 이동하는 것과 다르게 피난용 엘리베이터의 목적은 재실자들이 직접 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 안전하게 이동하기 위함이다.

6. 위치선정에 따른 결과 비교

6.1 피난 시나리오 설정

연구의 목적은 실제 CBRE 상황 시 SIP를 두 개 층으로 활용하여, 시나리오에 따른 예상 소요시간을 산출하고자 한다. 시나리오는 엘리베이터 사용 여부, 엘리베이터의 속도로 하였다.

- 시나리오 A : 계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 2층)
- 시나리오 B : 계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 2층)
- 시나리오 C : 계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)
- 시나리오 D : 계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)

Table 23. 대피로 변수 설정

변수	내용
(1)	SIP 위치(지하 2층)
(2)	SIP 위치(지하 1층 + 2층)
(3)	엘리베이터 속도 : 0.5m/s
(4)	엘리베이터 속도 : 1.0m/s

Table 24. 시나리오에 따른 변수 설정

시나리오 번호	변수
A	(1), (3)
B	(1), (4)
C	(2), (3)
D	(2), (4)

Table 25. 시나리오에 따른 대피시간

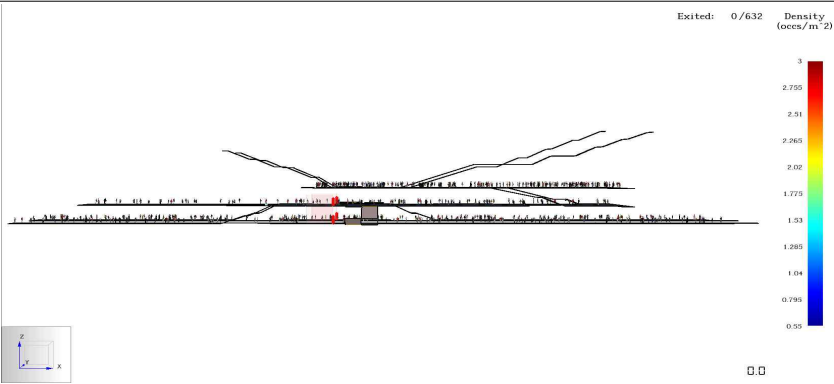
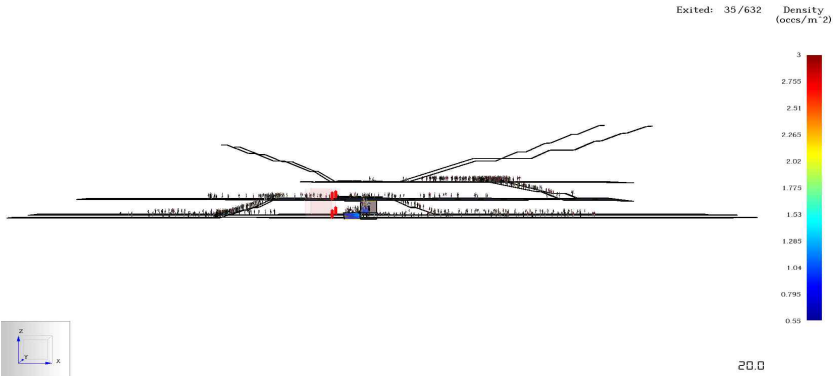
	시나리오	평균 대피시간 (초)	최대 대피시간 (초)
A	계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 2층)	79.6	298.0
B	계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 2층)	78.0	246.4
C	계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	50.0	297.8
D	계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	48.9	195.7

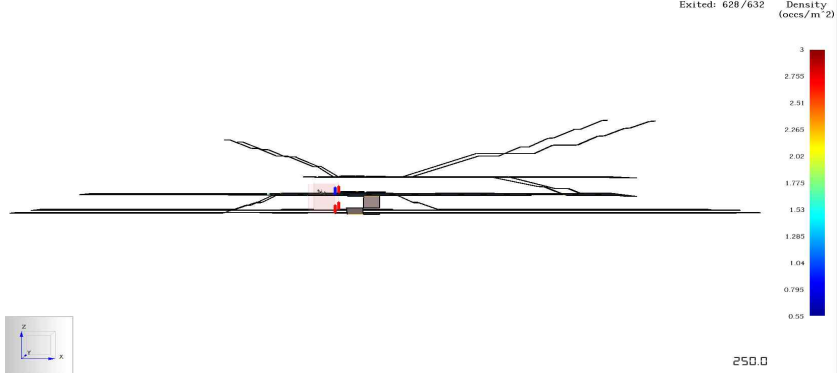
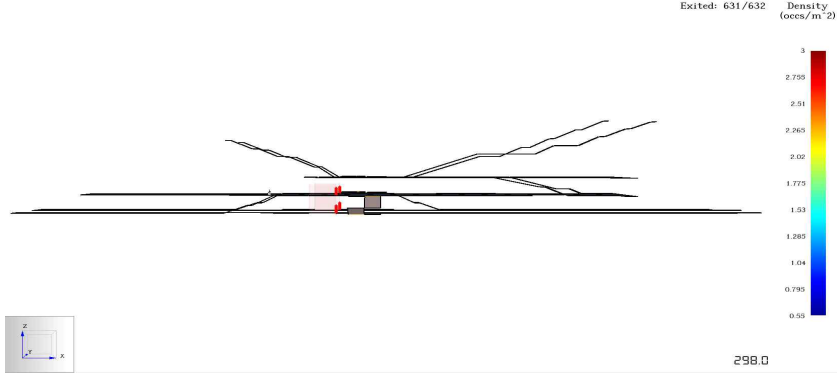
6.2 시뮬레이션 결과

6.2.1. 시나리오 A

시나리오 A는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로 하였다. 이때 시나리오 A와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였다. 이때 시뮬레이션은 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 색상은 단위 시간당 밀도를 표현하여 보행자의 이동에 따른 정체 현상을 육안으로 확인할 수 있다.

Table 26. 시나리오 A에 따른 대피시간

시간 (초)	이미지
0	
20	

시간 (초)	이미지
250	
298	

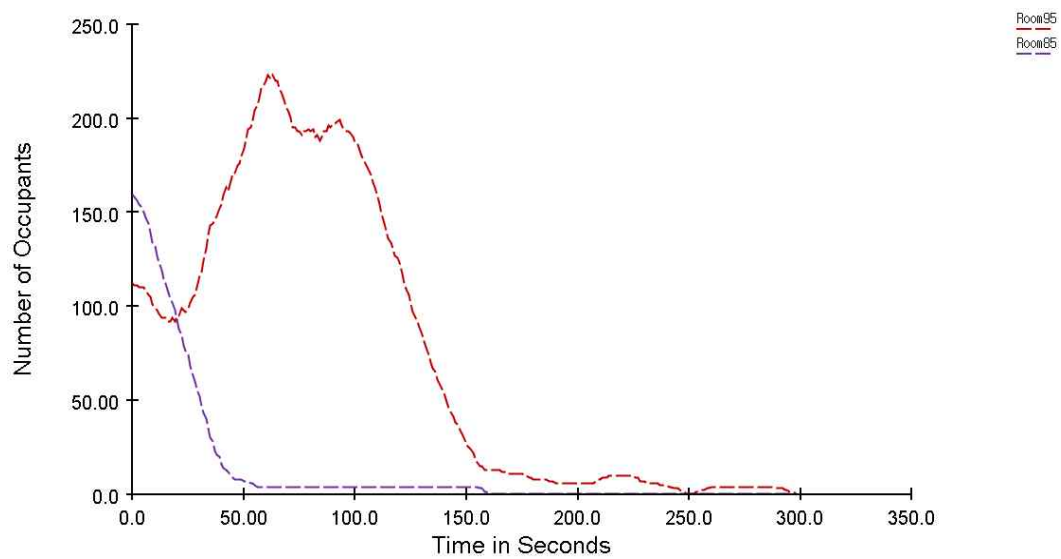


Figure 18. 시나리오 A의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***		
Simulation:	SIP(B2) ELE-0.5	
Version:	2020.1.0219	
Mode:	Steering	
Total Occupants:	625	
Completion Times for All Occupants (s):		
Min:	1.0	"00260"
Max:	298.0	"00002"
Average:	79.6	
StdDev:	45.0	
Travel Distances for All Occupants (m):		
Min:	0.6	"00260"
Max:	156.1	"00143"
Average:	76.0	
StdDev:	36.1	

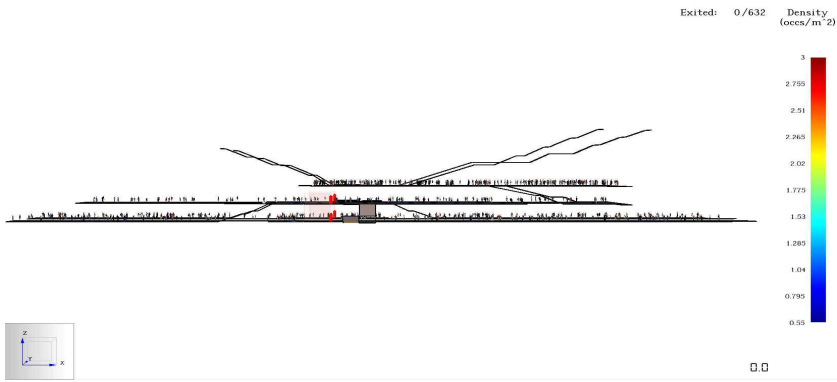
Figure 19. 시나리오 A에 따른 시뮬레이션 결과

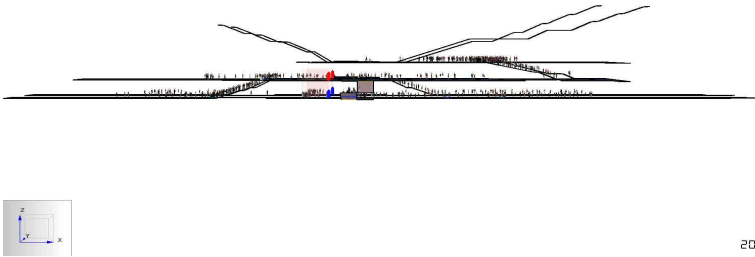
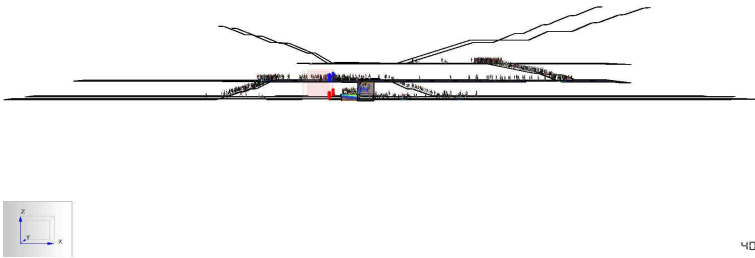
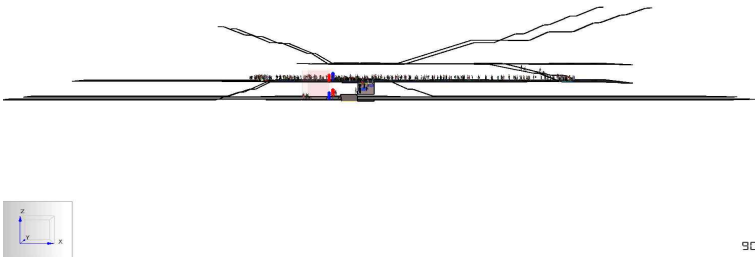
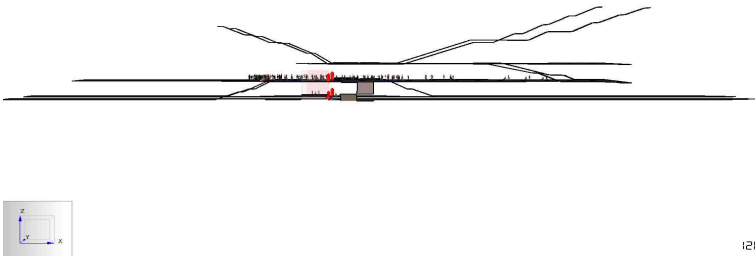
시나리오 A는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로 하였다. 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 시나리오를 설정하였다. 전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 298초이고, 평균 79.6초가 소요되었다. 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 76.0m로 나타났다.

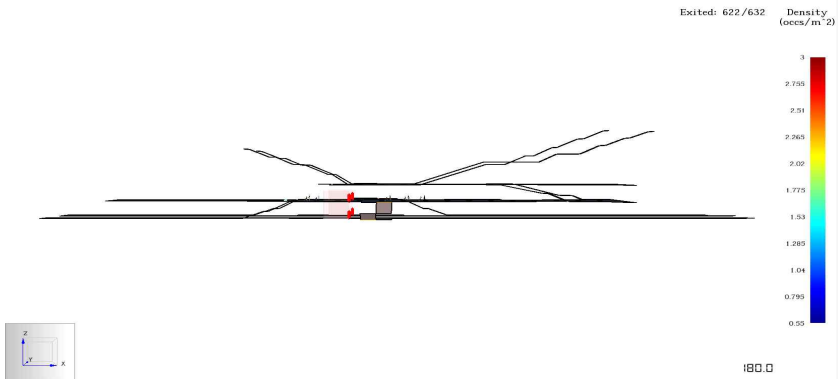
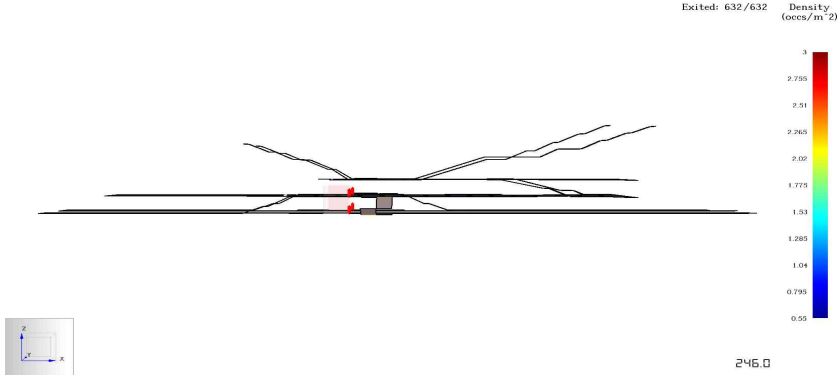
6.2.2. 시나리오 B

시나리오 C는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로 하였다. 이때 시나리오 A, B와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 1.0m/s로 지정하여 80대 이상의 고령 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였다.

Table 27. 시나리오 B에 따른 대피시간

시간 (초)	이미지
0	

시간 (초)	이미지
20	Exited: 35/632Density (oces/m²)  20.0
40	Exited: 122/632Density (oces/m²)  40.0
90	Exited: 389/632Density (oces/m²)  90.0
120	Exited: 498/632Density (oces/m²)  120.0

시간 (초)	이미지
180	
246.4	

전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 246.4초이고, 평균 78.0초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 140.4m, 평균 이동 거리는 75.2m로 나타났다. 엘리베이터의 향상된 이동 속도로 최대 대피시간은 시나리오 A에 대비 약 17.31% 줄어든 것을 알 수 있다. 이를 통해, 엘리베이터의 속도를 건축설계 기준 및 지하철 내 엘리베이터 설치인 1.0m/s 속도로 고려하여 대피를 고려한다면 CBRE 상황 발생 시 빠른 대피가 가능할 것으로 판단된다.

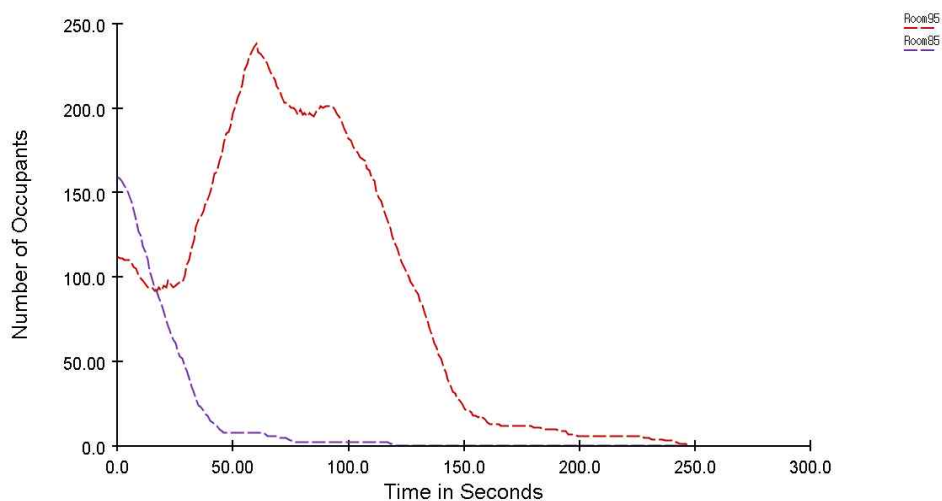


Figure 20. 시나리오 B의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

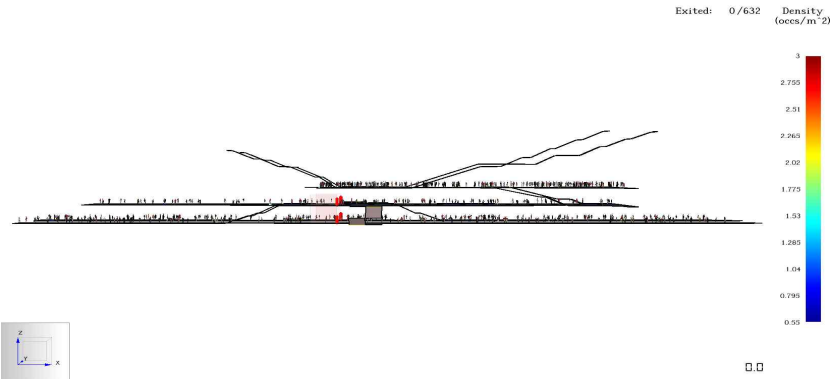
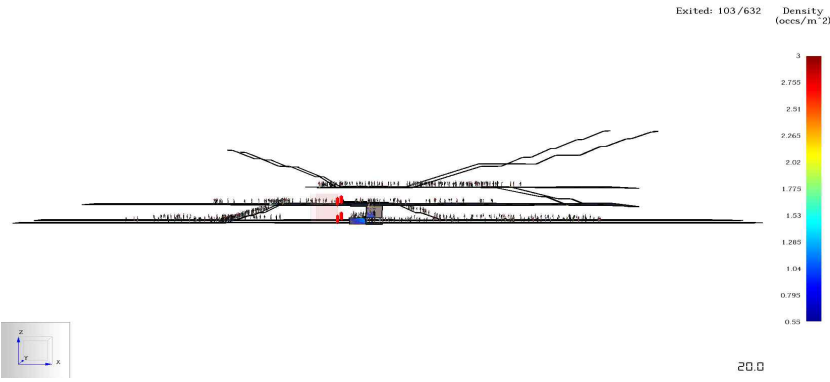
SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***		
Simulation:	SIP(B2) ELE-1	
Version:	2020.1.0219	
Mode:	Steering	
Total Occupants:	625	
Completion Times for All Occupants (s):		
Min:	1.0	"00260"
Max:	246.4	"00011"
Average:	78.0	
StdDev:	41.6	
Travel Distances for All Occupants (m):		
Min:	0.6	"00260"
Max:	140.4	"00145"
Average:	75.2	
StdDev:	36.2	

Figure 21. 시나리오 B에 따른 시뮬레이션 결과

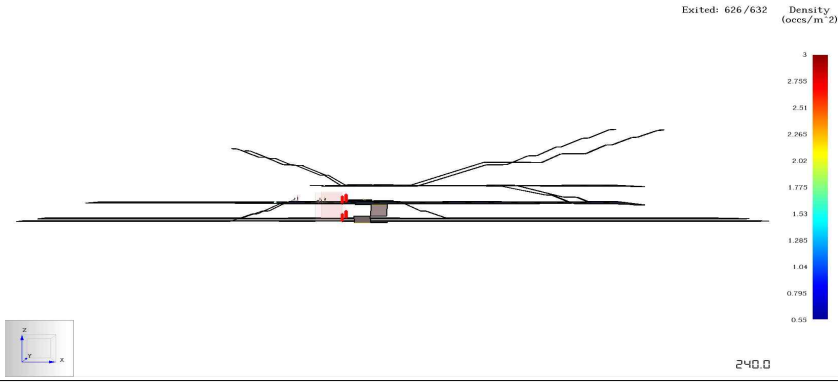
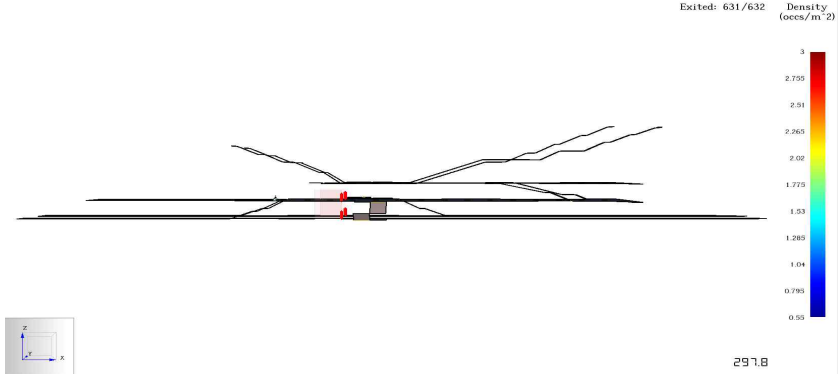
6.2.3. 시나리오 C

시나리오 C는 지하 2층뿐만 아니라 지하 2층을 모두 SIP으로 지정하여 대피자들이 이동하는 것으로 하였다. 이때 대피 수단은 엘리베이터, 계단을 이용하는 것으로 하였다. 이때 시나리오 A, B와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 기존 안암역의 속도인 0.5m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였다.

Table 28. 시나리오 C에 따른 대피시간

시간 (초)	이미지
0	
20	

시간 (초)	이미지
40	Exited: 254/632 Density (occs/m²) 3 2.735 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 40.0
90	Exited: 575/632 Density (occs/m²) 3 2.735 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 90.0
120	Exited: 614/632 Density (occs/m²) 3 2.735 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 120.0
180	Exited: 622/632 Density (occs/m²) 3 2.735 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 180.0

시간 (초)	이미지
240	
297.8	

전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 297.8초이고, 평균 50초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 50.5m로 나타났다. SIP을 지하 1층과 2층을 모두 사용할 경우 평균 대피시간은 약 50초로 기존 시나리오 A 대비 약 37.19% 대피시간이 줄어들었음. SIP의 접근성 향상으로 인해, 재실자들의 평균 대피시간은 줄어들었음. 최대 대피시간은 297.8초로 기존과 거의 차이가 없음을 알 수 있음.

이를 통해, SIP의 위치를 2개 층으로 지정할 시 기존 대비 평균적으로는 빠른 대피가 가능하지만, 노약자 또는 장애인을 고려한 최대 대피시간의 단축이 필요하다고 판단된다.

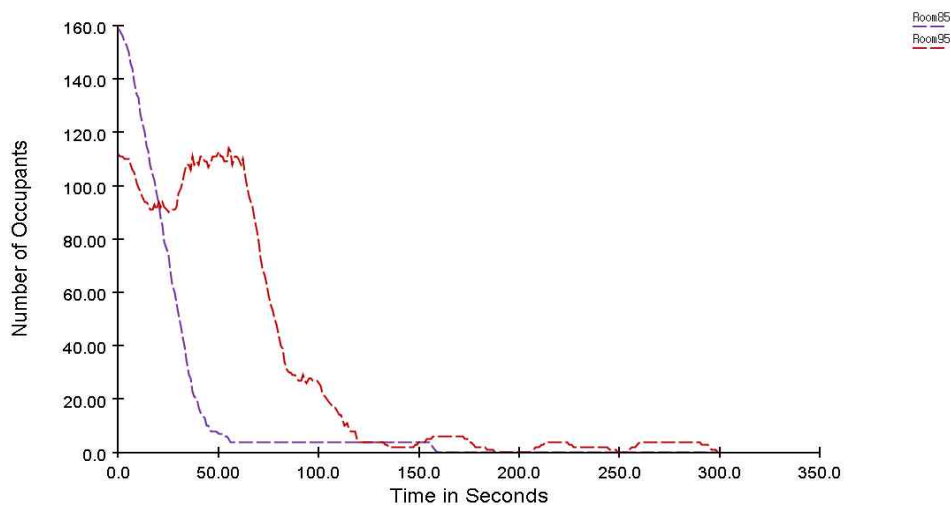


Figure 22. 시나리오 C의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

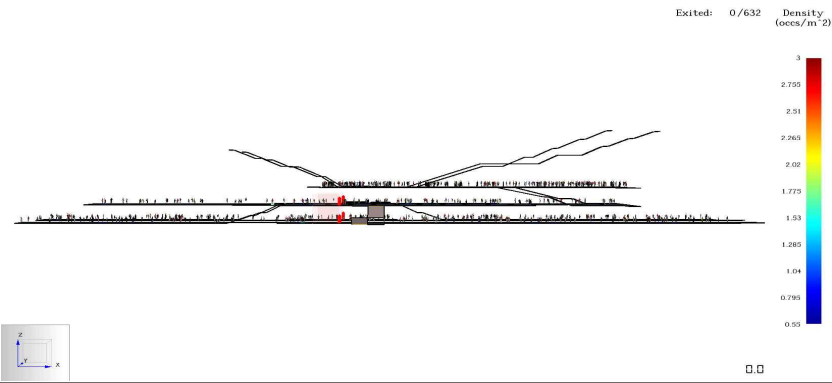
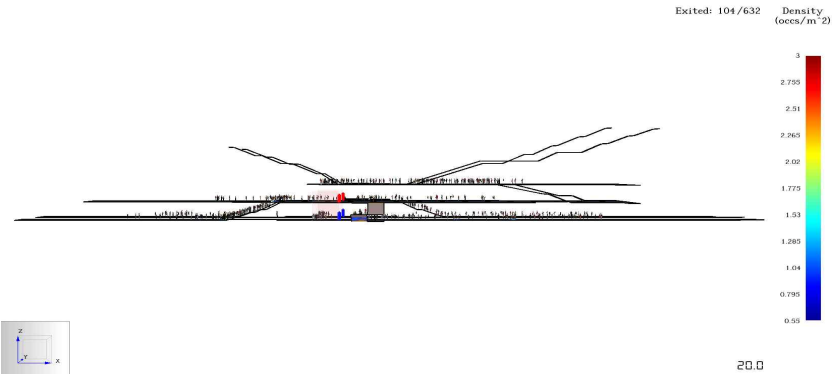
SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***		
Simulation:	SIP(B2,B1) ELE-0.5	
Version:	2020.1.0219	
Mode:	Steering	
Total Occupants:	625	
Completion Times for All Occupants (s):		
Min:	1.0	"00260"
Max:	297.8	"00002"
Average:	50.0	
StdDev:	34.8	
Travel Distances for All Occupants (m):		
Min:	0.6	"00260"
Max:	156.1	"00498"
Average:	50.5	
StdDev:	27.5	

Figure 23. 시나리오 C에 따른 시뮬레이션 결과

6.2.4. 시나리오 D

시나리오 D는 지하 3층의 인원을 지하 1층 및 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로, SIP의 위치에 따른 향상된 대피 속도를 구하고자 하였다. 이때 시나리오 A, B, C와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 1.0m/s로 지정하여 시나리오 C와 마찬가지로 엘리베이터 속도를 높여, 80대 이상의 인구와 장애인의 빠른 대피를 목적으로 하였다.

Table 29. 시나리오 D에 따른 대피시간

시간 (초)	이미지
0	
20	

시간 (초)	이미지
40	Exited: 255/632 Density (occs/m²) 3 2.755 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 40.0
90	Exited: 579/632 Density (occs/m²) 3 2.755 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 90.0
120	Exited: 617/632 Density (occs/m²) 3 2.755 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 120.0
180	Exited: 628/632 Density (occs/m²) 3 2.755 2.51 2.265 2.02 1.775 1.53 1.285 1.04 0.795 0.55 180.0

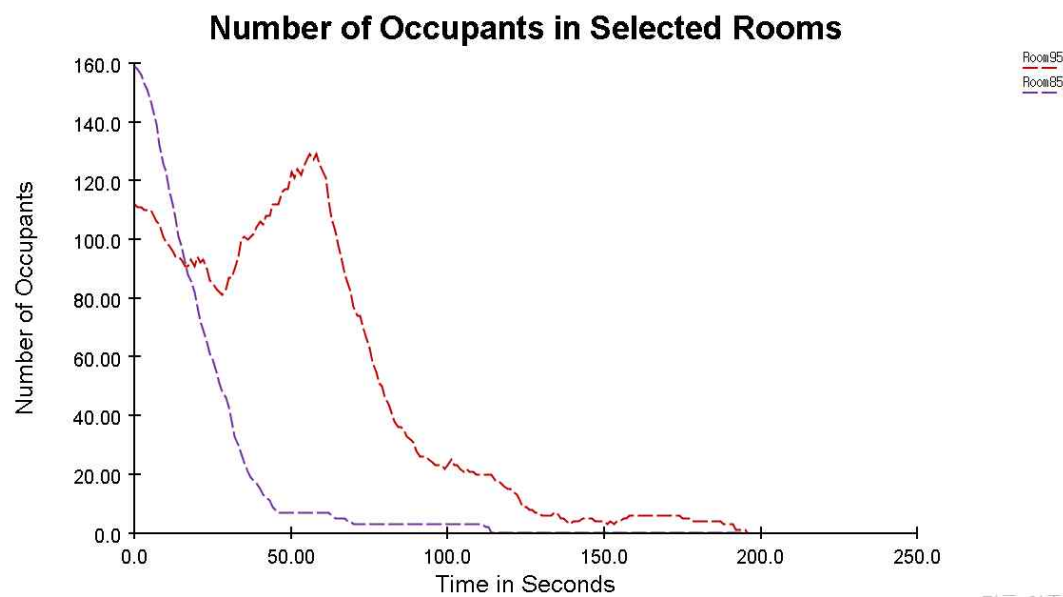
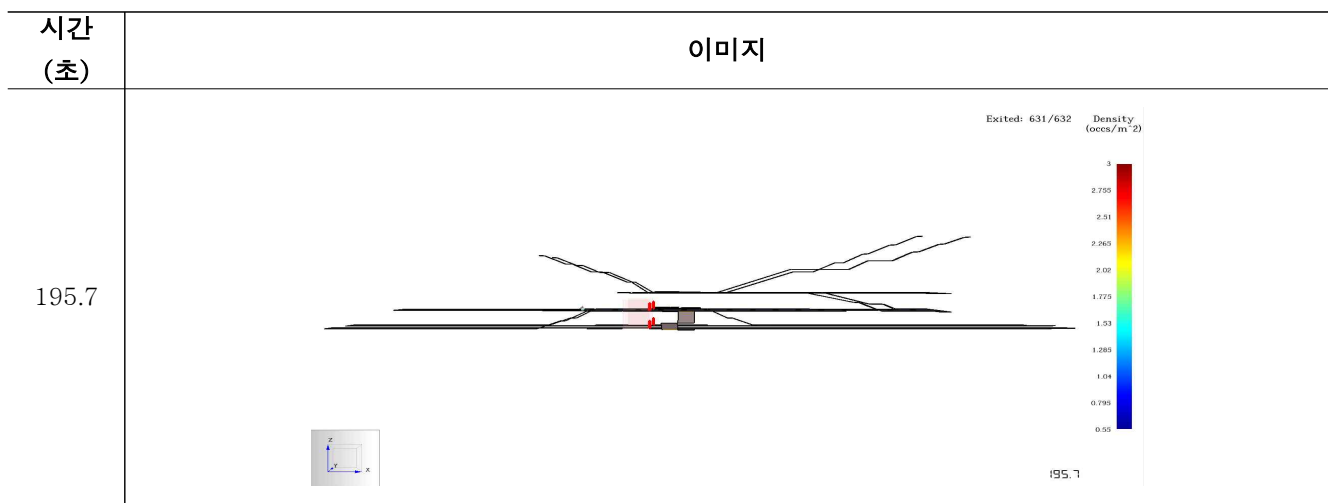


Figure 24. 시나리오 D의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation:	SIP(B2,B1) ELE-1	
Version:	2020.1.0219	
Mode:	Steering	
Total Occupants:	625	
Completion Times for All Occupants (s):		
Min:	1.0	"00260"
Max:	195.7	"00003"
Average:	48.9	
StdDev:	29.7	
Travel Distances for All Occupants (m):		
Min:	0.0	"00447"
Max:	132.6	"00484"
Average:	49.7	
StdDev:	27.2	

Figure 25. 시나리오 D에 따른 시뮬레이션 결과

전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 195.7초이고, 평균 48.9초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.0m, 최대 이동 거리는 132.6m, 평균 이동 거리는 49.7m로 나타났다. 시나리

오 D는 시나리오 C에 대비 엘리베이터의 속도가 향상되고, 시나리오 B에 대비 SIP의 접근성이 향상되었음. 시나리오 D는 시나리오 A, B 대비 평균 대피시간이 약 38%, 37% 줄어들었고, 시나리오 A, B 대비 최대 대피시간이 약 34%, 20.57% 줄어들었음.

추가로 시나리오 D의 최대 대피시간은 시나리오 C의 최대 대피시간 대비 약 34.28% 줄어들었음. 이는 대피경로의 증가에 따른 정체 현상이 줄어든 것으로 판단됨. 이를 통해, SIP을 지하 1층과 지하 2층 모두 사용하면서 동시에 엘리베이터의 설계속도를 향상 시 평균 및 최대 대피시간이 모두 감소할 뿐만 아니라, 대피 시 정체 현상을 줄여 안전한 대피가 가능할 것으로 판단됨.

6.3 시뮬레이션 결과 비교

위의 상황은 소요시간 비교를 위하여, 동일한 조건에서 보행자를 무작위로 배치하였으며, 산정된 휠체어 인원을 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 배치하였다. 시뮬레이션 결과 엘리베이터의 속도가 기존의 0.5m/s로 설정된 시나리오 A와 시나리오 C의 경우 평균 대피시간이 각각 79.6초, 50초로 SIP 위치가 추가됨에 따라 평균 대피시간이 감소하였다. 또한, 총 대피시간은 시나리오 A, B, C, D는 각각 298초 (5.23분), 246.4초 (4.10분), 297.8초 (4.96분), 195.7초(3.26분) 소요되었다. SIP 위치를 2곳 사용과 엘리베이터의 속도를 변경할 시, 최대 대피시간은 시나리오 A, 시나리오 B에 대비 각각 34.32%, 20.57% 향상되었다. 평균 대피시간은 SIP를 2개 층으로 사용 시 약 38% 줄어들었다. 국토교통부 고시의 지하철 역사의 피난 한계 시간 지침에 따른 마지막 피난자가 승강장을 탈출하는데 4분, 안전지대로 대피하는 데까지의 시간을 6분으로 제안하고 있다. 따라서 두 개 층을 SIP으로 지정할 경우 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 시나리오 D에 따른 설계 시 위의 2가지 규정을 모두 만족시키는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 CBRE 상황 시 지하철 역사에서 SIP을 지하 1층과 지하 2층을 동시에 활용하는 것을 제안한다. 대피자 전원이 SIP으로 이동하는데 필요한 시간은 표 3-6에 상세히 나타나 있다.

Table 30. 시나리오에 따른 대피시간

시나리오		평균 대피시간 (초)	최대 대피시간 (초)
A	계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 2층)	79.6	298.0
B	계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 2층)	78.0	246.4
C	계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	50.0	297.8
D	계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, SIP(지하 1층 + 지하 2층)	48.9	195.7

Table 31. 국내외 재난 발생 시 대피 시간에 관한 규정

국가	구분	출발지	도착지	ASET (피난요구시간)	재난 종류
한국	도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	역 밖 출구	6.0 분	
미국	NFPA 130	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	안전한 구역까지	6.0 분	
미국	FEMA 453	-	대피 시설	5 분	화재, 지진, 테러 등
일본	Handbook of Tsunami Evacuation Planning	-	대피 시설	3-5 분	지진

※ NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems

※ FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters

본 연구를 통하여 최적의 SIP 위치 선정 과정은 다음과 같이 제안을 한다.

1) Pathfinder 모델 작성 및 대피 인원 산정

- Pathfinder를 통한 대피 시뮬레이션에서 가장 먼저 모델링을 수행해야 함.
- 시뮬레이션 모델의 경우 기존 도면 데이터 또는 레이저 스캐닝을 통한 역 설계법을 통해 디지털 정보를 추출함.
- 추출된 정보를 3D BIM으로 작업 후 Pathfinder에 삽입하여 모델링을 수행함.
- 시뮬레이션 시 대피 인원의 산정은 국가통계포털에서 제공하는 월별, 시간대별 지하철 이용객 수 데이터를 통해 최다 승하차 인원을 선정함.
- 승차 인원이 플랫폼에서 지상으로 도착하는 시간 및 하차 인원이 지상에서 플랫폼으로 이동하는 시간을 산출함.
- 산출된 승하차 인원의 이동 시간과 열차 간격 시간을 통해 승하차 인원이 동시에 역에 머무는 시간을 산출함.
- 산출된 시간과 국가 통계 포털에서 제공한 인원을 이용하여 시뮬레이션 인원 설정함.

2) 시뮬레이션 수행을 위한 시나리오 작성

- 본 연구는 최적의 SIP 위치 선정을 위해 SIP 수와 엘리베이터 사용 여부 및 속도를 변수로 설정함.
- SIP 위치의 경우 FEMA에서 제시하는 대피자의 수면 필요 여부와 필요 시 1층 또는 2층 침대 사용에 따라 제시된 1인당 필요 면적을 산정함.
- 1인당 필요 면적에 따른 SIP 위치별 수용 가능 인원 산출함.
- 산출된 SIP 면적과 수용 가능 인원을 통해 SIP 위치 선정함.
- 엘리베이터 사용 여부 및 건축설계 대사전의 기준에 따라 엘리베이터 속도를 변수로 설정함.

3) 시뮬레이션 결과를 통한 SIP 위치 선정

- 고령자와 장애인의 경우 계단을 통한 수직 이동 시 정체 현상 및 피난 안전성에 대해 고려해야 함.
- 따라서, 엘리베이터의 경우 고령자와 장애인이 이용하여 SIP으로 대피하는 것으로 설정함.
- 엘리베이터를 활용한 대피 시간 계산식은 중국 GB50157, 미국 NFPA 130, 일본 JIS Railway Standard를 이용하여 시뮬레이션 결과와 비교함.
- 기존 엘리베이터의 속도 0.5m/s와 1.0m/s로 향상될 경우 20% 이상 대피 시간이 감소됨.
- 따라서, 고령자와 장애인의 대피 수단으로 엘리베이터를 이용하는 것이 타당함.
- 한국 및 미국 등 재난 발생 시 대피 시간에 대해 ‘도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계’, ‘NFPA’와 ‘FEMA’에서 규정하고 있음.
- 한국의 경우 6분 이내, 미국 NFPA 130도 6분 이내, FEMA 453은 5분 이내로 대피하도록 규정함.
- 본 연구에서 진행한 시나리오 A, B, C, D 모두 국내와 미국 기준에 부합하는 것을 확인함.
- 또한, SIP를 1곳에서 2곳으로 추가 지정할 경우 최대 25.9%의 대피 시간 감소가 가능함.
- 결과적으로, SIP 위치는 엘리베이터와 접근이 용이하며, 모든 재실자들이 최소한의 이동으로 도달할 수 있는 위치에 SIP를 추가적으로 지정하는 것이 합당함.

8. 최적 SIP 선정을 위한 제안

본 가이드라인에서는 지하철 역사 내에서 CBRE 상황 발생을 가정하고, 재실자들의 신속한 대피를 위하여 SIP 위치에 시나리오를 작성하였으며, 이때의 예상 대피 소요시간을 산출하고, 개선안을 제시하였다.

현재 안암역 지하철 모델은 SIP의 위치나 보행자의 동선을 고려하지 않고 설계되었다. SIP의 구조적 안전성도 중요하지만, 최적의 SIP 위치를 선정하고, 이에 SIP까지의 대피로의 동선을 개선해야 한다. 대피시간 중 가장 큰 영향을 끼치는 것은 정체 현상인데, 따라서 현재 안암역 지하 2층의 Room 85 및 95에서 발생하는 정체 현상이 전체 소요 대피시간에 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

개선안은 대피로의 경로 분석을 통해 가장 대피소요 시간이 적은 시나리오에 따른 최적의 SIP를 설정하는 것이다. SIP 위치가 지하 1층과 지하 2층을 동시에 사용될 경우, 평균적으로 재실자들이 정해진 SIP까지 이동되는 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있다. 이는 대피 시 동선 분산으로 인한 평균적인 대피 소요시간의 단축임을 알 수 있다. 하지만 단순히 SIP를 지하 1층과 지하 2층의 2구역으로 사용 시 평균적인 대피시간은 향상되었지만, 최대 대피시간의 단축은 거의 미미함을 알 수 있다. 따라서 엘리베이터 속도를 국가설계 기준에서 제안하는 1.0m/s로 제안 시 평균적인 대피시간의 향상뿐만 아니라, 최대 대피시간 또한 향상됨을 알 수 있다. 따라서 대피 경로의 분석을 통해 최적의 SIP를 제시하였으며 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, CBRE 상황에서의 대피 시뮬레이션 분석을 통해 최초 구조물 설계 시 계단 및 통로의 배치가 평균 대피시간을 결정하는 중요한 요인임을 검증하였다.

둘째, SIP 위치에 따라, 평균 대피시간이 20% 이상 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 평균 대피시간에는 대피 경로의 위치 및 대피 인원이 주요 변수로 작용한 것으로 판단된다.

셋째, 노약자와 장애인은 최대 대피시간 산출에 가장 큰 영향을 끼치므로, 엘리베이터를 속도를 개선하여 정체 현상을 해결하였고, 시뮬레이션 결과 최대 대피시간이 35% 이상 줄어들었다.

넷째, SIP를 지하 1층과 지하 2층의 2구역으로 모두 활용하면서 동시에 엘리베이터의 속도를 1.0m/s로 제안 시 최대 및 평균 대피시간이 모두 20% 이상 향상됨을 알 수 있다. 특히 시나리오 B와 시나리오 D의 비교 시, SIP 위치증가에 따라 평균 대피시간의 감소뿐만 아니라 최대 대피시간 또한 20% 이상 향상된 것을 알 수 있다. 이는 극한 상황에서의 대피자들 간의 병목, 정체, 패닉 현상 등을 이동 동선의 분산으로 향상되었기 때문이다.

다섯째, 한국 규정 ‘도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)’와 미국 규정 ‘NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System’에서는 역사 내 화재, 지진, 테러 등 재난 상황 발생 시 플랫폼에 있는 재실자들은 4분 이내에 플랫폼 밖으로 대피하도록 규정하고 있으며, 역사 내 가장 먼 출발지점에서 역 밖 및 대피 시설까지 6분 이내로 대피하도록 규정하고 있다. 본 연구에서 진행한 4가지 시나리오의 경우 대피 시설까지 대피 시간은 모두 6분 이내로 만족하고 있으나, 상기 두 규정에서는 포괄적인 재난 및 대피 시간을 정의한 단점이 있다. 하지만, 대피 시설에 관한 미국 규정 중 물리적 테러와 같은 재난 상황에서 대피 시설에 관한 규정 ‘FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters’에서는 대피 시설까지 5분 이내로 대피하도록 규정도 만족한다.

외부 테러 발생 시 지하철 내에서의 SIP까지의 안전한 이동을 위해 본 가이드라인에서는 기존 문헌 분석 및 Pathfinder 프로그램을 활용한 대피 시뮬레이션을 통해 예상 소요시간을 산출하였다. CBRE 상황이 늘어나고, 지하 공간이 점점 넓어지고, 깊어짐에 따라 최적의 SIP 선정이 점차 중요해지는 추세이다. 이러한 상황에서 동선을 고려한 최적의 SIP를 최초 설계 때 반영하고 보조수단으로 엘리베이터의 위치 및 속도 향상 시 예상 대피 소요시간은 확연히 줄어들어, 기존의 설계에 따른 대피 방법이 가지는 한계점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

1. Abboud, B.E., Hamid, A.A., and Harris, H.G., "Small-scale modeling of concrete block masonry structures," ACI Structural Journal, Vol.87, No.2, 1990, pp.145-155.
2. Abdul-Ahad, R.B. and Aziz, O.Q., "Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers," Cement and Concrete Composite, Vol.21, No. 4, 1999, pp.263-268.
3. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, ACI 318-05, American Concrete Institute, MI, USA, 2005.
4. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, MI, USA, 2002, pp.1- 45.
5. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-06, MI, USA, 2006.
6. ACI Committee 544, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999), MI, USA, 1988, pp.18.
7. Adebar, P., Mindess, S., St-Pierre, D., and Olund, B., "Shear tests of fiber concrete beams without stirrups," ACI Structural Journal, Vol.94, No.1, 1997, pp.68-76.
8. ASME, "American Standard Safety Code for Elevator, Escalators, Dumbwaiters and Moving alks", A17.1(1987).
9. CFPA-E No19:2009F, "Fire safety engineering concerning evacuation from buildings", 2009
10. Choi, J.H and Shin, S.J, "Proposal for Evacuee Guidance of Cloud-based Elevator System in Emergency Situation", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 15, No. 1, 2015, pp.22-29.
11. De Larrard, F., Sedram, T, "Optimization of Ultra High Performance Concrete By the Use of a Packing Model," Cement and Concrete Research, 1994, Vol. 24, No. 6, pp. 997-1009.
12. European Guideline, CFPA-E No 19:2009 Fire Safety Engineering Concerning Evacuation from Buildings, CFPA EUROPE
13. FEMA, "FEMA 453, Safe Rooms and Shelters: Protecting People Against Terrorist Attacks, Washington, DC.", 2006
14. FEMA, "Planning Considerations: Evacuation and Shelter-In-Place", 2019
15. Felix, C., Frank, M., Cristine, P. "Walking Patterns of Elderly in a Peruvian Public Space, Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics", 2016, 1-619, pp. 12-17
16. Hurley, M.J., "SFPE Hnadbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition", 2016
17. Hyun, E.M., Ahn, K.H., Lee, J.E., Kim, Y.S. "Improvement of Standard by Analyzing Evacuation Plans of Domestic High-rise Buildings", KIEAE Journal, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 53-62
18. E. Kuligowski, "Design of Occupant Egress Systems for Tall Buildings", International Conference CIB, 2004
19. G.R. Strakosch, "Vertical Transportation: Elevator and Escalators", 2nd Edition. Wiley & Sons, 1983.
20. NFPA 5000, "Building Construction and Safety Code", 2006, pp.178-179.
21. National Institute of Standard and Technology, Movement on Stairs During Building Evacuations, 2014
22. NFPA 80, "Standard for Fire Doors and Other Opening Protectives", 2013
23. NFPA 90A, "Standard for the Installation of Air-Conditioning and Ventilating Systems", 2002
24. NFPA 101, "Life Safety Code", 2012
25. NFPA 5000, "Building Construction and Safety Code", 2015
26. Thunderhead Engineering, Technical Reference Manual for Pathfinder, 2012
27. Jason, D.A., Dennis, S.M., Richard, D.P., Erica, D.K., Norman, G., Guylene P., Paul A.R. and Harold E.N. (2004) Occupant Behavior, Egress, and Emergency Communications : Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, NIST NCSTAR pp.1-7.
28. John H. Klote and Daniel M. Alvord, "Routine for Analysis of the People Movement Time for Elevator Evacuation", NIST, 1992 pp.3-12.

지하철 내 엘리베이터를 활용한 탈출로 기술 가이드라인

Shelter in Place :
Evacuation Technology Guidelines Using
Elevators inside the Subway



고려대학교

Smart SOS(Shelter of Sustainability) Lab

F-ace Lab / H-SOS Center

2020.12

목 차

1. 서 론	147
1.1. 연구 배경	147
1.2. 국내외 연구 동향	149
1.3. 연구 목적	150
2. 대피상황 발생 시 고려요소	151
2.1. 인간 대피 행동	151
2.2. 대피의 기본 원칙	151
2.3. 평면 계획상 대피 계획에서의 주안점	151
2.4. 재실자 특성에 따른 연구 분석	152
3. 국내외 엘리베이터 활용 대피 선행연구	153
3.1. 국내 엘리베이터 활용 대피 선행연구	153
3.2. 국외 엘리베이터 활용 대피 선행연구	153
4. 국내외 엘리베이터 설계기준	156
4.1. 국내 엘리베이터 설계기준	156
4.2. 국외 엘리베이터 설계기준	158
5. 안암역 시뮬레이션 진행	169
5.1. 연령별 인구 비중 분석	169
5.2. 시뮬레이션 인원 산정	170
5.3. SIP 위치 선정	172
5.4. 안암역 모델링	175
5.5. 시뮬레이션 프로그램	178
5.6. 엘리베이터 대수 산정	180
5.7. 대피 요소별 속도 산정	181
5.8. 엘리베이터 탑승 인원 결정	182
5.9. 대피 전략	184
6. 국가별 설계기준에 따른 대피시간 비교	185

6.1. 인원 산정	185
6.2. 엘리베이터를 통한 대피 프로세스	185
6.3. 계단만 사용 시 대피시간	188
6.4. 계단, 엘리베이터 복합 활용 시 대피시간	191
6.5. 대피시간 비교	196
7. 시나리오에 따른 결과 비교	197
7.1. 대피 시나리오 설정	197
7.2. 시뮬레이션 결과	197
7.3. 시뮬레이션 결과 비교	206
8. 결론	208
※ 참고문헌	209

1. 서론

1.1 연구 배경

대한민국은 남한과 북한이 대치하고 있는 휴전상황에서 테러에 자유로울 수 없다. 최근에는 극단주의 테러단체인 이슬람, 레반트, 이슬람국(IS)가 한국을 테러 목표로 삼을 수 있다고도 보도한 바 있다. 이처럼 여러 가지 잠재적 위험(CBRE - Chemical, Biological, Radiological and Explosive Attack)이 존재하는 국내에는 현재 백령, 대청, 소형, 연평도 등 서해 5도 및 접경지역에 정부 지원금으로 설치한 주민 대피 시설 341 개소와 민간 및 정부, 지자체, 공공단체 소유의 지하시설물에 23,386개의 공공용 지정 시설이 대피시설물로 지정되어 운영되고 있다.

Table 1. 국가별 지하철 테러 사례

날 짜	국 가	테러 사례
7 July 2005	 London, United Kingdom	London bombings
11 April 2011	 Belarus	Minsk Metro bombing
22 March 2016	 Brussels and Zaventem, Belgium	Brussels bombings
28 June 2016	 Istanbul, Turkey	Atatürk Airport attack
3 April 2017	 Saint Petersburg, Russia	Saint Petersburg Metro bombing
20 June 2017	 Brussels, Belgium	Brussels attack
15 September 2017	 London, United Kingdom	Parsons Green bombing

하지만 이러한 수치와는 달리 운영 중인 대부분의 대피 시설은 특별한 구조 설계기준 없이 60m² 이상의 방송 청취가 가능한 지하층의 공간이면 대피 시설로 지정될 수 있다. 달리 말해 유사시 국민을 보호해야 할 대피 시설은 행정적 지원과 기본적인 보호의 기능을 할 수 있겠지만 테러와 전쟁과 같은 물리적 위협으로부터의 보호 기능은 보장하지 못하고 있다. 대피 시설의 특성상 위험 상황에서 많은 인구가 집중적으로 모여 있게 되는데 이러한 상황에서 대피 시설이 충분한 대피 역할을 발휘하지 못한다면 이는 더 큰 인명 피해를 발생시킬 가능성이 크다. 따라서 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피 시설에 대한 설계기준 확립이 시급한 상황이다. 공공시설의 대피시설물은 방호성능도 중요하지만 설치되는 위치도 중요하다. 이용자가 위급한 상황에서 신속하게 대피할 수 있고 모든 이용자를 수용할 수 있는 위치에 있어야 한다.

대부분의 대피 시설은 특별한 구조 설계기준 없이 60m² 이상의 방송 청취가 가능한 지하층의 공간이면 대피 시설로 지정될 수 있다. 즉, 유사시 국민을 보호해야 할 대피 시설은 행정적 지원과 보호의 기능을 할 수 있겠지만 물리적 위협으로부터의 보호 기능은 보장하지 못하고 있다. 대피 시설의 특성상 재난 발생 시 많은 인구가 집중적으로 모여 있게 되는데 정적 지원과 보호의 기능을 할 수 있겠지만 물리적 위협으로부터의 보호 기능은 보장하지 못하고 있다. 대피 시설의 특성상 재난 발생 시 많은 인구가 집중적으로 모여 있게 되는데 이러한 상황에서 대피 시설이 명확한 기준 없이 설계된다면 이는 더 큰 인명 피해를 발생시킬 가능성이 크다. 따라서 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피 시설에 대한 설계기준 확립, 기존 대피 시설의 최적 대피로를 위한 대책의 수립이 시급한 상황이다.

Table 2. 전국 시도별 주민 대피 시설 확보 현황

시도	대상 인구 (천 명)	소요량 (1000m³)	확보량				정부 지원 시설		공공용 지정 시설	
			개소	면적 (1000m²)	확보율 (%)	수용인원 (천 명)	개	면적 (m²)	개소	면적 (1000 m²)
합계	46,918	38,707	23,727	107,180	276.9	129,915	34	101,919	23,386	107,078
서울	10,388	8,570	4,114	27,389	319.6	33,199	-	-	4,114	27,389
부산	3,453	2,848	1,922	6,594	231.5	7,992	11	5,031	1,911	6,589
대구	2,455	2,025	1,467	6,254	308.8	7,580	7	9,486	1,460	6,244
인천	2,930	2,417	1,204	5,834	241.4	7,072	175	23,163	1,029	5,811
광주	1,470	1,213	718	2,617	215.8	3,173	5	3,320	713	2,614
대전	1,531	1,263	1,235	3,745	296.5	4,539	8	7,722	1,227	3,737
울산	1,087	897	614	2,158	240.5	2,616	5	3,119	609	2,155
세종	66	54	29	379	696.4	460	-	-	29	379
경기	11,628	9,593	4,625	33,312	347.2	40,379	71	21,999	4,554	33,290
강원	1,325	1,093	826	2,130	194.7	2,582	34	13,338	792	2,116
충북	1,253	1,034	767	2,194	212.2	2,660	-	-	767	2,194
충남	1,350	1,114	702	2,651	238.0	3,214	2	1,086	700	2,650
전북	1,440	1,188	817	2,762	232.5	3,348	10	6,630	807	2,755
전남	1,266	1,045	1,569	1,852	177.3	2,245	-	-	1,569	1,852
경북	2,046	1,688	1,155	2,741	162.4	3,323	12	5,918	1,143	2,735
경남	2,665	2,199	1,510	4,000	181.9	4,848	1	1,107	1,509	3,998
제주	557	460	453	560	121.8	679	-	-	453	560

Table 3. 초고층 빌딩 화재 건수 및 사망자 수

국가	화재 건수	사망자 수
미국	226	590
캐나다	11	26
멕시코	2	4
푸에르토리코	1	96
브라질	3	202
콜롬비아	1	4
프랑스	1	2
필리핀	1	10
일본	1	32
인도	1	1
한국	2	201

최근 지하 공간이 넓어짐에 따라 SIP까지의 안전한 대피경로가 요구되고 있다. NAFA 및 IBC Code에서도 대피용 엘리베이터의 내용이 수록되어, 재난 상황 발생 시 엘리베이터를 통한 대피가 요구되는 추세이다. 특히, 9.11 테러 당시 재실자의 약 12% 정도가 엘리베이터를 통해 대피하였고, 화재 발생 시에도 연기는 위쪽으로 상승하기 때문에, 지하철 내에서의 엘리베이터 사용이 요구되고 있다. 이에 미국 등 선진국에서는 엘리베이터를 하나의 대피 수단으로 인정하고, 계단과 엘리베이터를 이용한 대피 방법을 제시하려는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 아직 원칙적으로 엘리베이터를 이용한 대피를 금지하고 있고, 대피용 엘리베이터의 도입 기준 역시 부족한 실정이다. 추가로, 노약자의 경우 대피상황 시 수직적 이동의 힘들 뿐만 아니라 대피 시 정체 현상을 일으키게 된다. 정부 산하의 승강기 검사기관인 한국 승강기 안전 공단의 통계자료에 의하면 현재 국내에 설치된 엘리베이터 설치 대수는 2020년 6월 중순 기준 약 726,795대였으며, 최근 5년 동안 엘리베이터 설치가 증가하고 있다. 이러한 국내의 상황을 고려할 때 현재 대피 시설에 엘리베이터를 통한 대피로의 대책의 수립이 시급한 상황이다.

Table 4. 설치연도 엘리베이터 종류별 보유현황

설치연도	합계 (대)	승객용 (대)	장애인용 (대)	소방 구조용 (대)	휠체어 리프트 (대)	대피용 (대)	기타 (대)
15	38,224	18,279	7,925	8,526	234	7	3,253
16	45,120	21,311	10,112	9,343	248	19	4,087
17	48,789	19,255	12,997	12,057	315	23	4,142
18	50,497	16,891	14,462	14,786	362	36	3,960
19	44,603	14,967	14,929	10,071	548	74	4,014
20	10,455	5,028	3,304	721	197	0	1,205
전체	726,795	273,033	188,892	155,576	4,073	161	105,060
비율(%)	100.0	37.6	26.0	21.4	0.6	0.1	14.3

1.2 국내외 연구 동향

초창기 대피 시설에 관한 연구는 군사용 목적으로 수행됐다는 점에서 민간인을 대상으로 한 대피 시설에 적용하는 데 한계가 있으며, 연구 정보에 대한 접근 또한 쉽지 않다. 하지만 최근 빈번하게 발생하고 있는 테러로 인해 민간인 보호와 공공용 대피 시설에 관한 관심이 높아지고 있다. 특히 전쟁으로 인해 많은 민간인 피해가 발생한 이스라엘에서는 민간인 보호를 목적으로 한 시설물 내 대피 시설(Shelter In Place, SIP)이라는 새로운 형태의 대피 시설 개념을 제안하였으며, 911 테러 이후 미국을 중심으로 이러한 형태의 대피 시설이 세계적으로 퍼지고 있다.



인도 뭄바이 테러, 2008



터키 앙카라 테러, 2015



나이지리아 아부자 테러, 2011

Figure 1. 전 세계적으로 발생한 테러 현장

대피 시설은 형태에 따라 크게 유럽형과 대륙형으로 구분할 수 있다. 유럽형 대피 시설은 스위스를 중심으로 집단 보호시설(CPS, Collective Protection System) 체계로 발달하였고, 대륙형 대피 시설은 미국을 중심으로 시설물 내 대피 시설(SIP, Shelter In Place) 체계로 발달하였다. 국내의 정부 지원 대피 시설 및 공공용 대피 시설은 유럽의 집단 보호시설(CPS)과 거의 유사한 형태로 일정 깊이의 지하시설에 견고한 철근콘크리트 구조물을 구축하여 장기대피가 가능한 집단 보호 형태이다.



Figure 2. 국내 외 SIP 현황

미국의 민방위 대피 시설은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 기존의 유럽형 대피 시설과 형태가 유사한 화생방 공격에 대한 대응할 수 있는 독립형 대피 시설이며, 둘째는 시설물 내에 위치하는 대피 시설이다. 이 중 시설물 내 대피 시설(SIP)은 특정시설 및 구조물에 종속된 형태로 별도의 설계와 구조를 가진 공간이다. 이러한 대피 시설은 회의실, 체육관, 식당 등으로 다양한 활용이 가능하며, 평상시에는 기존 시설물로서의 사용도 가능하다. 따라서 독립형 대피 시설보다 비용 절감 측면에서 우수하다. 또한, 시설물 내 대피 시설(SIP)은 위치선정 조건이 충족될 경우 지상과 지하를 구분하지 않고 대피공간을 형성할 수 있다. 하지만 이러한 시설물 내 대피 시설(SIP)의 많은 장점에도 불구하고 국내 도입은 미흡한 상황이며, 국내 도입을 위해서는 많은 관련 연구가 선행되어야 한다. 특히 대도시를 중심으로 많은 인구가 밀집된 국내 상황을 고려하여야 한다.

국내 민방위 대피 시설은 크게 정부 지원 대피 시설과 공공용 대피 시설로 분류할 수 있다. 정부 지원 대피 시설은 설치 대상, 설치범위, 예산, 표준도면 등을 종합적으로 고려하여 설치 또는 선정되는 반면, 공공용 대피 시설의 경우는 특별한 규정이나 원칙 없이 다양한 시설을 대상으로 지정할 수 있게 되어있다. 하지만 국내 대피 시설에 관한 대부분의 연구는 현존하는 대피 시설의 통합관리 기술개발, 대피 시설의 생활 지원 공간구획 기술개발 등에 초점이 맞춰져 있고, 이와 관련하여 전기시설이나 통신 시설, 소방시설, 냉난방시설, 급배수시설 등 인간의 기본적인 생존을 보장하기 위한 관리 기준만이 제시되고 있다.

1.3 연구 목적

현재, 국내에서는 재난 상황 발생 시 승객의 안전을 위한 승강기에 대한 법규 및 기준은 제정되어있지만, 대부분 엘리베이터는 대피용으로 사용되지 않고 있다. 또한, 현재까지 개발된 대부분의 대피 시뮬레이션은 주로 계단을 이용하는 데 초점을 맞추고 있다. 하지만 9.11 테러와 같은 사고의 경우, 전체 재실자의 약 12% 정도가 엘리베이터를 이용하여 안전한 장소로 대피한 것으로, 나타났고, 고령화 사회로 진행됨에 따라 노령인구 및 거동이 불편한 인구가 지속해서 증가하고 있다. 이러한 상황에서, 재난 발생 시 엘리베이터를 활용한 대피의 필요성은 지속해서 증가하고 있다. 현재 대피 시설은 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하지 않아, 대피시간 증가 및 대피경로의 정체 현상이 심각하다. 이에 기존의 대피경로 방식이 아닌, 대피용 엘리베이터의 설치 및 보조적인 활용수단으로 노약자, 어린이, 임산부, 장애인의 대피에 활용되어야 한다. 추가로 일반적으로 지하철 역사에서 엘리베이터는 일반인들을 위한 용도가 아닌 장애인이나 노약자, 임산부들을 위한 용도로 사용하므로 속도가 일반 엘리베이터에 비해 느리게 설계된다. 따라서 본 연구에서는 시나리오별 엘리베이터 활용 대수 및 엘리베이터 속도에 따른 시뮬레이션을 진행하기로 한다. 전체 인원 중 노약자, 임산부, 장애인들을 전체 인구 통계치를 기준으로 산정하고, 지하에 접근이 쉬운 이용자들을 엘리베이터를 그룹 단위로 이동하는 것으로 가정하도록 한다.

2. 대피상황 발생 시 고려요소

2.1 인간 대피 행동

인간은 본능적으로 비상시 자신의 신체를 보호하기 위하여 이전에 갔던 길이나, 늘 사용하는 경로로 탈출을 도모하고자 한다. 따라서 엘리베이터까지의 탈출 경로를 알기 쉽게 표기하고, 엘리베이터 내부를 안전하게 보호되도록 유지 또는 관리하는 것이 중요하다. 테러로 인한 화재 등 위험 상황 발생 초기에는 재난 발생 당시 확인을 위해 소수 인원이 위험 장소로 밀집하지만, 위험 상황 발생이 심각해짐에 따라, 인간의 공포감이 급증하여 재난 발생 지점과 반대 방향으로 재실자들이 움직인다. 추가로, 재난 발생 상황으로 주변이 어두워지면, 인간은 본능적으로 밝은 곳으로 대피하려고 한다. 따라서 탈출 경로를 중심으로 채광을 집중적으로 밝게 하고, 혼란을 유발할 수 있는 상황을 예방하여야 한다.

2.2 대피의 기본 원칙

1. 2방향 대피로를 확보할 것
2. 원시적이지만 인간의 보행에 따르는 것을 제1원칙으로 할 것
3. 대피 경로는 단순 명확할 것
4. Fool Proof (문자보다 색을 사용하여 직감적으로 알아볼 수 있도록 하는 것), Fail Safe
(하나의 수단이 고장 등으로 실패하여도 다음의 수단에 의해 구제할 수 있도록 고려하는 것) 원칙을 중시할 것
5. 대피 경로를 따라 일정한 구역을 정하여 “대피 Zone”을 설정하고 안전한 대피 장소까지 유도하기 위하여 각 존의 안전성을 높일 것.

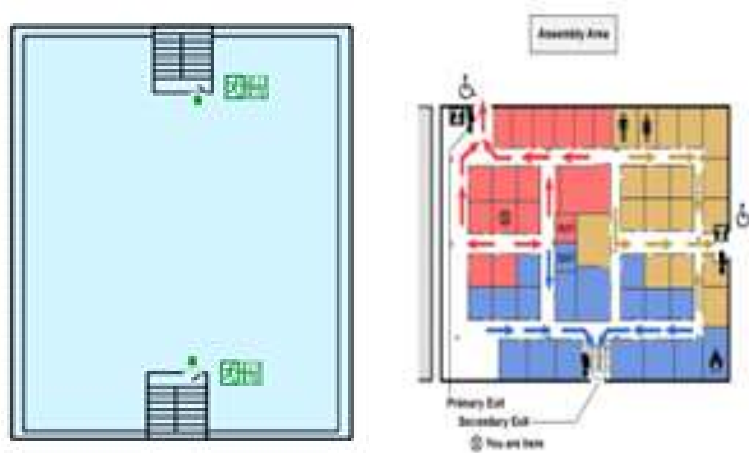


Figure 3. 2방향 대피 및 대피 경로도 예시

2.3 평면 계획상 대피 계획에서의 주안점

1. 대피 계획에서 대피은 열악한 환경에서 이루어지므로 비상시 인간의 심리, 생리를 고려해야 하며 신체적으로 또는 판단능력에 장애가 있는 환자 또는 장애인, 고령자 등 건강한 성인과는 동등한 대피 행동을 기대할 수 없는 사람들을 배려해야 한다.
2. 시설물 내의 모든 부분에서 두 방향 이상의 대피 경로를 계획하는 것이 대피의 기본 원칙 중 하나이다. 따라서, 어느 정도 이상의 면적이 있는 거실에서는 될 수 있는 대로 서로 떨어진 위치에 두 개 이상의 출입구를 설치하고, 복도의 끝부분은 대피계단으로 연결하여 두 방향 대피를 확보하여야 한다.

(건축법상 “거실”이란 건축물 안에서 거주, 근무, 작업, 집회, 오락, 그 밖에 이와 유사한

목적을 위하여 사용되는 방을 의미한다.)

3. 대피 경로는 단순 명쾌한 것이 좋으며 계단실까지 여러 번 꺾이는 복도, 직각 이외의 구부러진 곳, 위치를 알기 어려운 대피계단의 설계는 피해야 한다. 대피 행동은 물리적 심리적으로 어려운 상태에서 이루어지므로 연기가 가득 찬 상태에서 대피하는 때에도 원활한 대피가 가능하도록 대피 경로는 단순하고 명쾌하여야 한다.

4. 건물 화재 시 안정성에 관한 평가

거실의 대피 평가는 각 거실에 대해 그곳이 발화실이 된 경우의 대피 시간을 구해 허용시간과 비교 평가한다. 층 대피의 평가는 한 거실을 발화실로 하여 층 전체의 대피자 흐름을 설정한 후, 계산된 층 대피 시간과 복도 대피 시간을 각각 허용시간과 비교 평가한다. 대피 시작 시점은 발화 층을 기준으로 하고, 그 층에 있던 사람들 전원이 계단실 내까지 대피하는 상황을 예측하여, 이에 따라 3종류의 대피 시간을 구해 각각에 대한 허용시간과 비교하여, 건축물의 대피 안전성을 검토 평가한다.

2.4 재실자 특성에 따른 연구 분석

2.4.1 재실자 신체특성에 따른 분석

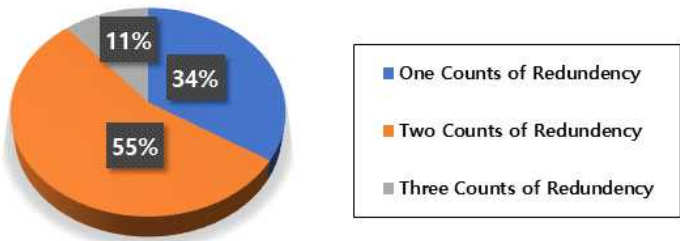
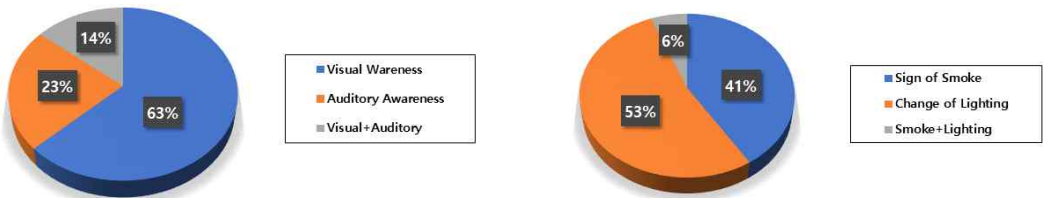


Figure 4. 인지적 여분에 따른 분류

10대부터 60대 이상까지 재실자의 나이별 보행속도 및 대피행태의 특성을 구분한 연구는 전체 신체특성 별 연구수행 중 가장 높은 비율인 50%를 차지하였으며, 목발 또는 휠체어 등 보조기구의 사용자 및 기타 장애인 등의 보행속도 및 대피행태에 관한 연구는 25%를 차지했다. 나이 별 특징과 장애 유무 모두 포함된 연구 또한, 25%의 비율을 나타냈다. 그러나 이중 나이 별 특성에 관한 연구는 20대 이상부터 60대까지의 연령층을 대상으로 한 연구가 가장 많았으며 유아 및 어린이와 70대 이상의 고령자에 관한 연구는 미비한 것으로 나타났다.

2.4.2 인지적 특성에 따른 분석



(a) 시, 청각에 따른 인지효과 (b) 후, 시각에 따른 인지효과

Figure 5. 재실자의 인지효과에 따른 분류

인지적 특성은 재실자의 인지효과에 관한 것으로 시각적 효과와 청각적 효과로 구분되었다. 청각적 효과에는 화재 경보와 같은 음향조건으로 구분하였으며, 시각적 효과에는 안내표지판, 유도등과 같이 안내의 역

할을 하는 조건과 연기 유입, 낮은 조도의 조명 등 시야를 방해하는 조건 등으로 구분하였다. 시각적 인지 조건은 전체 인지적 특성 중 63%로 높은 비율을 차지하였으며, 청각적 조건은 23%, 시청각이 모두 포함된 연구는 14%의 비율을 차지하였다. 이들 중 가장 많이 수행된 시각적 인지효과의 실험은 연기 유입에 관한 실험이 41%를 차지하였으며 유도등, 낮은 조도의 설정 등 조명제어에 관한 실험이 53%로 나타났고, 연기 유입에 관한 조사는 6%로 나타났다.

3. 국내외 엘리베이터 활용 대피 선행연구

3.1 국내 엘리베이터 활용 대피 선행연구

3.1.1 국내 엘리베이터 활용 대피논문

3.1.1.1 차종호(2012)

본 논문은 Pathfinder의 대피프로그램으로 승강기 수와 승강기를 이용한 대피자 수의 적정성에 관해 연구하였다. 연구결과, 대피 전용 승강기를 설치 시 전체대피 시간이 감소하는 것을 알 수 있음.

3.1.1.2 최준호(2010)

본 논문은 초고층 건축물의 화재 상황에서 수평적 대피 수단뿐만 아니라 수직적 이동수단인 엘리베이터를 이용한 대피 전략의 신뢰성을 평가한 후, 초고층 건축물 전용 대피 방법의 방향성을 제시하였음.

3.1.1.3 곽수영(2012)

본 논문은 전체 인원분포를 고려하여 건물 내 재실자들의 총 대피 시간을 최소화할 수 있는 전역적인 실내 보행자 최적 대피모형을 제시하였음. 재실자가 어떤 출구로 대피하느냐에 따라서 총 대피시간에 영향을 주기 때문에 실내공간을 격자형으로 나누고 재실자들의 움직임을 계산하여 이를 기반으로 대피 시뮬레이션 결과를 산출하였음.

3.2 국외 엘리베이터 활용 대피 선행연구

3.2.1 국외 엘리베이터 활용 대피 사례

- 미국 LA의 퍼스트 인터스테이트 은행 건물 화재:

- 건물 규모: 지상 62층, 지하 4층, 건물 높이 약 260m
- 발화일시: 1988.5.4 22:37(통보시간, 15분 정도 지체된 것으로 추정)
- 발화층: 12층
- 피해 내역 : 인명피해 사망 1명, 부상 빌딩이용자 35명, 소방관 14명 건물피해 12층~15층까지 전소(코어 부분 제외)
- 46층에 있던 청소원은 계단을 이용하여 30층까지 내려왔으나 문이 닫혀있어. 46층으로 되돌아가 동료 몇 명과 함께 승강기를 이용하여 대피하였음
- 45층에 있던 청소원은 사무실을 경유 >> 승강기로 대피. 이 사람은 자매를 찾으러 다시 건물로 진입, 29층까지 승강기로 올라가고, 다시 계단으로 31층까지 올라가 자매를 포함한 6명을 발견, 승강기로 대피하였음

- 일본 오오사카시 아파트 건물 화재

- 건물 규모 : 지상 14층, 건물 높이 약 41m
- 발화일시 : 1989.9.9 10:40(통보시간 10:45분)

- 발 화 층 : 10층 (1002호)
- 피해 내역 : 인명피해- 부상 1명
건물피해- 발화 층부터 상층부 3개 층
- 화재 당시 10층 이상에 있던 사람은 26명이었으며, 21명 자력으로 대피하였고, 5명은 소방대에 의해 구출되었다. 자력 대피자 21명 중, 12명은 계단을 통해, 나머지 9명은 승강기를 이용하여 대피하였음

3.2.2 국외 엘리베이터 활용 대피논문

3.2.2.1 The University of Jordan, (2017)

본 논문은 고층빌딩에서의 승강기의 교통 공학적 설계에 대해 다루고 있음. 고층 건물에 필요한 빠른 정격 속도에서 발생하는 문제뿐만 아니라 저층 건물과는 다른 고층빌딩에서의 공학적 설계에서의 요소를 다루고 있음.

승강기 시스템의 2가지 방법을 제시함. 첫 번째 방법은 주 출입문 위의 층수와 건물 내 인원수에 근거하여 시뮬레이션하였음. 각각의 매개변수 요소마다 최적의 형상을 찾기 위해 일반적인 기준을 개발하는데 이러한 요소를 사용함. 이것들은 건물의 가장 최적화된 형상을 사용하기 위해 설계자에게 시각적인 도움이 되는 2차원 Chart로 변형하여 나타냄.

두 번째 방법은 계산과 합리적인 설계기준에 따른 시뮬레이션에 근거하였음. 스카이 로비를 포함한 겹겹이 쌓아 올린 건물을 포함한 고층 건물 설계에 관해 다루고 있음.

Table 5. 비상용 엘리베이터 승강장의 구조

	Total building population in persons (@15% arrival rate)									
floors	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
20	i/p*	■	■	■	■	■	■	■	■	■
30	i/p*	i/p*	■	■	■	■	■	■	■	■
40	i/p*	i/p*	i/p*	■	■	■	■	■	■	■

■ Possible combination

* Improbable configuration due to the low population per floor (i.e., less than 50 per floor).

Table 6. 비상용 엘리베이터 활용에 따른 소요 대피시간

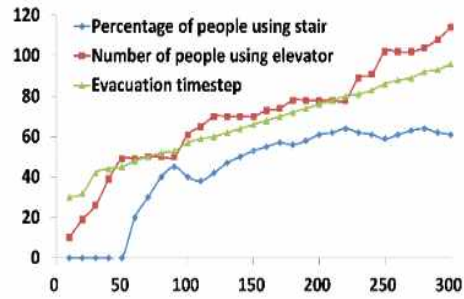
#	Elevator Location	Average Waiting Time (초)	Average Transit Time (초)	Average Time to Destination (초)
1	One Zone with Eight Elevator	105.1	102.5	207.6
2	Two Zones with a Total of Eight Elevators Four Elevators for the Lower Zone and Four Elevators for the Upper Zone	8	59.2	67.2
3	Two Zones with a Total of Seven Elevators, Four Elevators for the Lower Zone and Three Elevators for the Upper Zone	15	65.7	80.7
4	Two Zones with a Total of Six Elevators, Three Elevators for the Lower Zone and, Three Elevators for the Upper Zone	26.1	67.6	93.7

3.2.2.2 Min and Yu (2013)

본 논문은 고층빌딩에 수직 대피 요소인 엘리베이터와 계단을 모두 대피로로 활용한 사례이다. 해석 프로그램으로는 EVACNET 4를 사용하였고, 최적화된 엘리베이터 및 계단을 배치하였다. 대피 인원이 적은 시에는 수직 이동 속도가 높으므로 엘리베이터 활용이 더 효율적인 것을 알 수 있다. 하지만 대피 인원이 점점 늘어남에 따라 엘리베이터를 통한 대피에는 왕복 및 대기시간이 필요하므로 효율성이 저하되는 것을 알 수 있다. 시나리오 해석결과, 엘리베이터와 계단을 모두 활용했을 때가 계단 및 엘리베이터를 따로 활용했을 때 보다 대피시간이 더 단축됨을 알 수 있다.



(a) 계단만 대피 시 활용



(b) 엘리베이터 계단 복합 활용

Figure 6. 엘리베이터 및 계단 활용에 따른 소요 대피시간

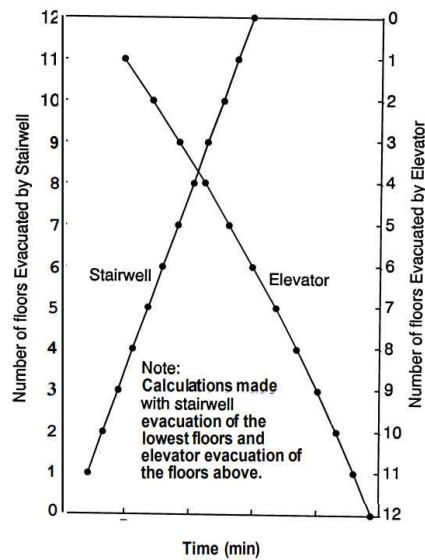


Figure 7. Hoffman Building2 엘리베이터 계단 복합 대피 사례

4. 국내외 엘리베이터 설계기준

4.1 국내 엘리베이터 설계기준

4.1.1 비상용 엘리베이터 승강장의 구조 (건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제 10조)

Table 7. 대피용 엘리베이터 승강장의 구조

구분	구조기준
구획	승강장은 개구부, 창 또는 출입구 등을 제외하고는 당해 건축물의 다른 부분과 내화구조의 바닥 및 벽으로 구획 * 공동주택의 경우 승강장과 특별대피 계단의 부속실 겸용 가능함. 단, 겸용공간은 별도 구획되어야 함.
출입문	각 층의 내부와 연결될 수 있도록 하되, 그 출입구(승강로의 출입구 제외)에는 각종 방화문을 설치(대피층에는 각종 방화문을 설치하지 않을 수 있음)
배연 설비	노대 또는 외부로 향하여 열 수 있는 창이나 연기배출 설비를 설치
내장재	벽 및 반자가 실내에 면하는 부분의 마감 재료(마감을 위한 바탕 포함)는 불연 재료로 설치
조명	채광되는 창이 있거나 예비전원에 의한 조명설비 설치
바닥면적	비상용승강기 1대에 대하여 6㎡ 이상 (옥외에 설치하는 경우 제외)
보행거리	대피층에 있는 승강장의 출입구(승강장이 없는 경우에는 승강로의 출입구)로부터 도로 또는 공지에 이르는 거리는 30m 이하
표지	비상용승강기 표지 설치

비상용승강기 승강장은 내화구조로 구획해야 한다. 또한, 각 층으로부터 대피 장소까지 이르는 승강로는 단일구조로 연결하여 설치한다.

4.1.2 대피 안전구역 설치기준

- 1) 대피 안전구역에 연결되는 특별 대피 계단은 대피 피난안전구역을 거쳐서 상하층으로 갈 수 있는 구조로 설치
- 2) 대피 안전구역의 구조 및 설비:
 - 2-1) 대피 안전구역의 바로 아래층 및 위층은 건축물의 열 손실방지에 적합한 단열재를 설치할 것. 이 경우 아래층은 최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕 기준을 준용하고, 위층은 최하층에 있는 거실의 바닥 기준을 준용할 것.
 - 2-2) 내부 마감 재료: 불연 재료
 - 2-3) 건축물의 내부에서 대피 안전구역으로 통하는 계단은 특별 대피 계단의 구조로 설치할 것.
 - 2-4) 비상용승강기는 대피 안전구역에서 승하차할 수 있는 구조로 설치할 것
 - 2-5) 대피 안전구역의 높이는 2.1m 이상일 것

4.1.3 비상용승강기 설치기준

- 높이 31m를 넘는 건축물에는 비상용승강기를 설치하며, 다음에 해당하는 건축물에는 비상용승강기를 설치하지 않을 수 있음.
- 1) 높이 31m를 넘는 각 층을 거실 이외의 용도에 사용하는 건축물

- 2) 높이 31m를 넘는 각 층의 바닥면적 합계가 500m² 이하인 건축물
- 3) 높이 31m를 넘는 부분의 층수가 4개 층 이하로서 당해 각 층의 바닥면적 200m² (벽 및 반자가 실내에 면하는 부분의 마감을 불연재료로 한 경우 500m²) 이내마다 방화구획으로 구획한 건축물

4.1.4 비상용승강기 대수 산정 (높이 31m를 넘는 각층 바닥면적 기준)

Table 8. 대피용 엘리베이터 설치 법규

최대 바닥면적	설치 대수
1,500m ²	1대 이상
1,500m ² 초과	1대에 1,500m ² 를 넘는 3,000m ² 이내마다 1개씩 가산한 대수 이상

- 1) 승용 승강기를 비상용승강기의 구조로 하는 경우 대수에 인정함.
- 2) 2대 이상 설치하는 경우, 소화에 유효한 간격을 두고 설치할 것.
- 3) 10층 이상인 공동주택의 경우에는 승용 승강기를 비상용승강기의 구조로 함.
(주택건설기준 등에 관한 규정 제15조 2항)

4.1.5 현행 엘리베이터 설계기준

4.1.5.1 대피 수단의 엘리베이터 기준

재난 상황 발생 시 엘리베이터를 통한 대피를 위해서는 먼저 엘리베이터의 안전한 공간구획이 선행되어야 한다. 대피설비 확보로 대피자가 엘리베이터를 타고 대피 장소까지 안전하게 이동할 수 있어야 하며, 엘리베이터까지의 대피로가 명확히 제시되어 대피자의 정체 현상을 줄여야 한다. 추가로 대피자에 따라 대피용과 일반용의 엘리베이터를 구분하여 설계 및 운영을 하여야 한다.

4.1.5.2 엘리베이터를 이용한 대피의 종류

- 1) 전체 비상 대피은 건물 전체 거주자들이 건물로부터 완전히 대피하는 것을 목적으로 하는 비상 대피을 의미한다. 전체대피은 극히 드문 경우에 적용되지만, 대형화재, 폭탄테러, 생화학적 공격 위협, 기상이변, 자연재해 등의 경우에 전체대피이 요구될 수 있다. 또한, 건물 전체의 정전, 단수 등의 사용 제한과 대피가 요구되는 상황에서도 전체대피이 고려될 수 있다.
- 2) 단계적 비상 대피은 건물을 세부 구역으로 나누어 대피 상황 발생 시점에 사용자의 위치에 따라 해당 안전구역으로 이동을 목적으로 하는 대피이다.
- 3) 부분적 비상 대피은 건물 내 특정 거주자 그룹의 대피이나 안전구역으로의 이동을 목적으로 하는 대피이다.

4.1.5.3 엘리베이터 속도

CBRE 상황에서 계단만큼 폭이 넓지 않아서 많은 수의 인원을 수용하지는 못하지만, 노약자나 어린이, 임산부 등 빨리 걷지 못하는 분들에게는 굉장히 중요한 운송수단이라고 할 수 있다. 지하철 주요설계기준 (설비 분야)을 보면, 엘리베이터는 보통 0.75m/s ~ 1.0m/s로 설계된다.

Table 9. 대피 수단의 엘리베이터 기준

방화구획 / 내화 성능	- 대피 엘리베이터는 열과 연기 유동, 스프링클러에서 분사되는 물로부터 보호받기 위해 방수 계획되어야 함 - 대피 엘리베이터의 설계는 강화 엘리베이터 혹은 방호 엘리베이터만을 이용하여야 함 - 대피 엘리베이터의 방호 및 관련 탈출 루트는 대피하는 동안 화재의 영향, 화염과 독성가스로부터 안전하도록 방화 계획되어야 함 - 엘리베이터의 와이어와 케이블은 화재 상황에서 1시간 이상 지속할 수 있는 내화성을 갖춰야 함
대피설비	- 엘리베이터의 승·하차 시 대피 경로를 대피자에게 알려주기 위한 유도설비가 설치되어야 함 - 각 건축물 내부에서 대피 엘리베이터 로비까지의 이동 경로를 대피자에게 알려주기 위해 유도등 및 유도표지를 설치해야 함 - 최종 대피층의 엘리베이터 Landing Door로부터 가장 인접한 위치에 ‘대피 엘리베이터’라고 명백히 적힌 스위치를 갖추어야 함 - 비상 전원까지 차단되어 엘리베이터 대피가 불가능해졌을 때 유도등 및 유도표지의 전원을 차단하거나 다른 대피 경로로 유도할 수 있도록 하는 설비가 필요함 - 대피 엘리베이터의 내부에는 시/청각적인 신호를 제공하는 2방향 통신설비가 설치되어야 함 - 엘리베이터 제어시스템과 화재 알람 시스템은 상호연동 되어야 하며, 대피 엘리베이터는 오직 화재 발생을 표시하는 수신기의 반응으로만 작동되어야 함 - 장애인을 대피시키기 위한 목적으로 화재 통제실의 관리자가 대피 엘리베이터를 안전하게 제어 및 행동 지시를 할 수 있도록 통신설비를 설치해야 함 - 건축물 내 자동으로 제어되고 화재의 진행 상황에 따라 조절할 수 있는 스프링클러 설비를 설치해야 함
대피로	- 초고층 건축물에는 대피계단을 필수적으로 설치해야 함 - 재실자들이 계단실을 이용한 대피이나 엘리베이터 또는 에스컬레이터를 이용한 대피 중 하나를 선택할 수 있도록 대피 전략을 통제해야 함 - 엘리베이터 로비에서 건축물 외부로 나갈 수 있는 직통 대피로의 확보 필수 - 대피 경로의 어떠한 부분도 대피 엘리베이터에 의해서만 접근되어서는 안 되며 대피 엘리베이터의 사용이 불가할 때를 대비할 수 있는 대안 경로를 마련해야 함
엘리베이터 로비	- 엘리베이터 로비에는 적어도 각 층수용 인원의 최대치 중 25%가 위치할 수 있도록 설계해야 함 - 엘리베이터 로비는 최소 0.28m²/인을 기준으로 설계함 - 엘리베이터 로비의 출입문은 자동문으로 설치해야 함 - 엘리베이터 로비에는 최소 50명당 1개의 휠체어를 비치할 수 있는 공간을 마련해야 함 - 엘리베이터 로비에 대피 엘리베이터의 도달시간을 명시할 수 있는 설비를 설치해야 함 - 화재 시 신체적 약자 전용 대피 엘리베이터로 사용되어야 하는 엘리베이터를 표시할 수 있는 표지를 설치하거나 스피커를 통해 방송할 수 있는 설비를 설치해야 함
비상 전원	- 대피 엘리베이터의 전원공급은 대피에 요구되는 시간 동안 사용이 가능하도록 유지해야 함 - 비상시 엘리베이터를 1시간 이상 움직일 수 있게 하는 비상동력을 확보해야 함
단계적 대피 전략	- 건축물 내부에 설치된 대피 층에서 지상층까지의 직통 대피 엘리베이터를 설치해야 함 - 옥상층과 지상층만을 운행하는 Express 엘리베이터를 설치해야 함 - 각 대피 층의 중앙에 위치하는 층에서 대피 층까지 운행하는 Local 엘리베이터를 갖추어야 함
기 타	- 재실자들이 평상시 대피 훈련을 통해 비상상황을 대처할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 함 - 대피 엘리베이터 주변 위험시설 설치 불가 - 위급상황의 발생으로 인해 엘리베이터가 작동을 멈춘 경우에도 환기와 냉방이 가능하도록 설계해야 함 - 장애인 전용 엘리베이터, 소방 엘리베이터, 재실자의 대피 엘리베이터로 각각 나누어 설계해야 함

4.2 국외 엘리베이터 설계기준

4.2.1 비상용 엘리베이터 승강장의 구조 (건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제 10조)

우리나라와 선진각국의 대피 설계 관련 사항을 비교, 검토한 결과 대피 출구의 수와 대피로의 최소 유효 너비 규정에 있어서 미국과 영국은 재실자 밀도와 바닥면적을 바탕으로 한 최대 재실자 수를 규정하고 있다. 반면, 우리나라는 건축물의 용도와 바닥면적으로 기준을 규정하고 있으며, CBRE 상황 시 재실자들의 안

전한 대피를 보장하는 관계 법령을 점진적으로 보완하고 있다. 따라서 복잡하고 다양한 건축물에 재실자를 중심으로 한 대피 설계 관련 사항을 우리나라의 실정에 적합하게 마련해가는 것이 필요하다고 판단된다.

또한, Fire Safety Engineering @ The University of Edinburgh 40th Anniversary & Celebration, 1974-2014 심포지엄의 Egress & Evacuation models 발표에 의하면 65세 이상이 되면 18세~ 40세 사이의 성인 보행속도보다 약 20~25% 정도 느려진다. 다시 말해서 보행속도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 나이와 성별이라고 할 수 있다.

4.2.2 IBC 설계기준

- 대피용 승강기

일반인이 이용하는 대피용 승강기는 거주자 스스로 사용하여 탈출할 수 있도록 설계해야 한다. 이 승강기는 1시간의 내화구조의 전실 형태로 제공되어야 하며, 방재센터와 연결되고, 기타 대피 표시들을 또한 제공해야 한다.

- 대피용 승강기의 대수

다음과 같은 시나리오 중 하나를 다루는 탈출 경로 분석에 따라 대피용 승강기의 대수가 결정된다.

- 1) 승강기를 이용하여 전면 건물에서 대피할 때 1시간 이내의 시간이 소요되는 경우
- 2) 승강기를 이용하여 누적 탑승자 부하가 가장 큰 연속된 5개의 층에서 대피할 때 15분 이내의 시간이 소요되는 경우

- 대피용 승강기 로비

- 1) 모든 대피용 승강기의 로비는 내부 출구(Interior Exit Stairway or Ramp)에 직접 접근할 수 있어야 함
- 2) 각각의 대피용 승강기는 다음과 같이 최소한의 바닥면적을 가져야 한다.

- ① 대피용 승강기 로비 바닥면적은 1인당 3ft² (0.28m²)가 필요하며, 바닥면적은 거주자의 하중을 최소 25% 이상 수용해야 함
- ② 대피용 승강기 로비 바닥면적은 30inch×48inch (760mm×1220mm)의 면적당 한 개 이상의 휠체어 공간을 수용해야 함

4.2.3 일본 법규 및 기준

일본 법규에 의하면, 엘리베이터의 설치는 높이 31m가 넘는 건축물에서 국내기준과 동일하게 설치 대수를 제안하고 있다. 여기에 엘리베이터의 설치를 위해서는 1대당 바닥면적이 10m² 이상이 필요하며, 옥내 소화전 및 연결 송수관의 방수구, 비상 콘센트 설비가 필요하며, 대피자의 원활한 이동을 고려하여 표시등이 설치되어 있으며, 내화구조의 바닥 및 벽으로 이루어져, CBRE 상황에서 연기 등 유독가스로부터 대피자의 안전성을 고려하고 있다. 다음의 표는 일본 규정에 따른 엘리베이터의 구조 및 주요 사항을 설명한 것이다.

Table 10. 일본 엘리베이터 구조 및 규정

구분	구조기준
방화구획	승강로, 기계실, 승강장은 방화 구획할 것
통화장치	중앙감시실의 감시반과 연락 가능할 것
예비전원	화재로 인한 정전 시에도 운행할 수 있도록 비상 전원(자기발전설비)
일반사양	속도 60m/분 이상, 소방대 15명 탑승, 승강기 실외 깊이는 150mm 이상
일반운용상황	평상시에는 승객 화물용으로 겸용 화재 등 비상시에는 소방대전용으로 전환
운전방식	비상시 대피층으로 카를 부를 수 있도록 하고 소방전용이 가능토록 할 것
관제운전금지	화재 등 비상시에 승강기를 대피층으로 이동시켜 승객을 대피, 대기하는 방법
사용형식	로프식, 제어방식은 가변 전압 가변주파수 방식(VVVF)이 주로 사용됨

4.2.4 중국 (GB 7588:2003)

(1) 승객 수

- (정격 하중)/75로 계산

Table 11. 엘리베이터 탑승 인원수에 따른 필요 공간

승객 수	최소 허용 면적 (m ²)	승객 수	최소 허용 면적 (m ²)
1	0.28	11	1.87
2	0.49	12	2.01
3	0.60	13	2.15
4	0.79	14	2.29
5	0.98	15	2.43
6	1.17	16	2.57
7	1.31	17	2.71
8	1.45	18	2.85
9	1.59	19	2.99
10	1.73	20	3.13

20명 초과 시, 1인당 0.115m²씩 추가

(2) 최대 수용 면적

Table 12. 엘리베이터 탑승 무게에 따른 필요 면적

정격 하중 (kg)	최대 허용 가능 면적 (m ²)	정격 하중 (kg)	최대 허용 가능 면적 (m ²)
100 ¹⁾	0.37	900	2.20
180 ²⁾	0.58	975	2.35
225	0.70	1000	2.40
300	0.90	1050	2.50
375	1.10	1125	2.65
400	1.17	1200	2.80
450	1.30	1250	2.90
525	1.45	1275	2.95
600	1.60	1350	3.10
630	1.66	1425	3.25
675	1.75	1500	3.40
750	1.90	1600	3.56
800	2.00	2000	4.20
825	2.05	2500 ³⁾	5.00

1. 1인용 승강기의 최소하중

2. 2인용 승강기의 최소하중

3. 2500kg 초과 시, 100kg 증가할 때마다 0.16m²씩 추가

제시된 하중의 중간값에 대해서는 선형보간법을 이용

4.2.5 유럽 (BS EN81-70)

(1) 최대 수용 면적

Table 13. 휠체어를 동반한 엘리베이터 탑승 인원

Type of Lift	Accessibility Level	크기 (W × D) (mm x mm)	무게 (명)
1	1명의 휠체어 사용자	1000 × 1250	450kg (6명)
2	1명의 휠체어 사용자와 동반인	1100 × 1400	630kg (8명)
3	1명의 휠체어 사용자 + 여러 명의 동반인 (안에서 휠체어 회전 가능)	2000 × 1400	1275kg (17명)

(2) 엘리베이터 탑승 인원 및 규격 상세

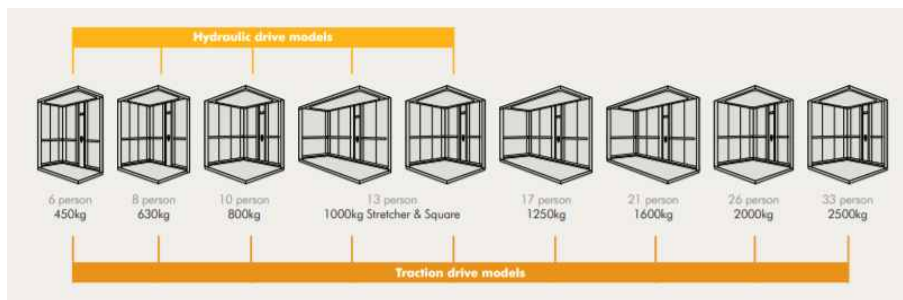


Figure 8. 엘리베이터 탑승 인원 및 규격 상세

Table 14. 탑승 인원에 따른 엘리베이터 규격

명 (무게)	크기 (W x D)
6-Person (450kg)	1000 x 1250mm ²
8-Person (630kg)	1100 x 1400mm ²
13-Person Stretcher (1000kg)	1100 x 2100mm ²
13-Person Square (1000kg)	1400 x 1600mm ²
17-Person (1250kg)	1950 x 1400mm ²
17-Person Stretcher (1250kg)	1200 x 2300mm ²
21-Person (1600kg)	1950 x 1750mm ²
21-Person Stretcher (1600kg)	1400 x 2400mm ²
26-Person (2000kg)	1500 x 2700mm ²
33-Person (2500kg)	1800 x 2700mm ²

(3) 엘리베이터 개폐 시간

- 개폐 시간 : 엘리베이터 제어시스템에서 필요에 따라 출입문의 개폐 시간을 조절할 수 있다(2~20초 사이). 상세한 내용은 다음과 같다.

- 1) 닫힘 버튼 등을 통해 대기시간 단축 가능.
- 2) 휠체어를 타고 있는 사용자 역시 엘리베이터 출입하는데 충분한 시간이 필요함.

4.2.6 NFPA 5000

NFPA 5000에 의하면, 대피 구역에 있는 엘리베이터는 화재로 인한 전원차단 시 발생 가능한 위협으로부터 완전히 보호되어야 하며, 지속적인 동력 공급이 가능하며, 연기 유입이 되지 않도록 설치되어야 한다. 이에 2차 대피 대피로로 사용되는 엘리베이터는 점유 인원이 약 90% 이하로 탑승하여야 하며, 엘리베이터의 종류와 관계없이 대피 용량을 별도로 100% 확보되어야 한다. 상세한 내용은 다음과 같다.

- 1) 대피 능력이 최소 8인 이상이어야 함.
- 2) 엘리베이터가 운행되는 모든 층에 승강장을 설치하고 승강장의 방화벽은 최소 1시간 이상의 내화 성능을 보유하여야 하고 방연 벽의 기능을 하여야 함.
- 3) 엘리베이터의 문은 최소 1시간 이상의 방화성능을 보유하여야 하고 화재에 노출된 후 30분경과 시점에서 측정한 최대 전이온도가 주변 온도보다 250℃를 초과하지 않아야 하며 연기감지기 및 화재경보 설비에 의해 자동폐쇄 되어야 함.
- 4) 엘리베이터가 물에 의한 수손 위험이 없도록 배치되어야 하며 상용전원과 비상 전원이 모두 설치되어야 하고 전력 및 제어용 배선은 화재가 발생하더라도 최소 1시간 이상 작동성능을 확보하여야 함.
- 5) 엘리베이터 및 승강장에는 중앙제어반과 양방향 통신설비가 설치되어야 하고 지진이 발생했을 때도 엘리베이터가 작동할 수 있도록 지진 방호대책을 확보하여야 함.

4.2.7 ADAAG Manual 2004 (A Guide to the Americans with Disabilities Act Accessibility Guidelines)

미국 ADAAG 가이드라인에 따르면 출입문은 최소 20초 동안 열려있어야 하며, 출입구를 막는 물체 또는 사람이 없을 때는 그전에 닫힐 수 있다. 다음의 식은 최소 허용시간을 구하는 데 사용된다.

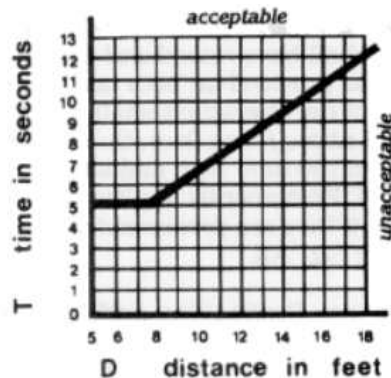


Figure 9. 거리에 따른 엘리베이터 이동 속도

$$T = D/(1.5\text{ft/s}) \text{ or } T = D/(445\text{mm/s})$$

*T = 전체 대피 소요시간

D = 로비 또는 복도로부터 떨어진 거리 60inch(1525mm) 내외로 제한

4.2.8 중국 : 홍콩 (Code of practice for the design and construction of buildings and building works for the installation and safe use of lifts and escalators)

Table 15. 엘리베이터 설치를 위한 최소 치수

Rated Load (kg)	No. of Passengers	Rated Speed (m/s)	Car Internal Sizes				Well Min. Dimensions		Clear Entrance		Pit Depth p_h (mm)	Headroom s_h (mm)
			Width c_w (mm)	Depth c_d (mm)	Max. Area c_a (mm ²)	Height (mm)	Width w_w (mm)	Depth w_d (mm)	Width e_w (mm)	Height e_h (mm)		
630	8	1.0	1100	1400	1.66	2300	1800	2100	800	2100	1700	4450
		1.5	1100	1400	1.66	2300	1800	2100	800	2100	1700	4650
		1.75	1100	1400	1.66	2300	1800	2100	800	2100	1800	4850
680	9	1.0	1400	1250	1.75	2300	1800	2100	800	2100	1700	4450
		1.5	1400	1250	1.75	2300	1800	2100	800	2100	1700	4650
		1.75	1400	1250	1.75	2300	1800	2100	800	2100	1800	4850
800	10	1.0	1400	1350	2.0	2300	1900	2300	800	2100	1700	4450
		1.5	1400	1350	2.0	2300	1900	2300	800	2100	1700	4650
		1.75	1400	1350	2.0	2300	1900	2300	800	2100	1800	4850
		2.0	1400	1350	2.0	2300	1900	2300	800	2100	2800	5650
		2.5	1400	1350	2.0	2300	1900	2300	800	2100	2800	5650
900	12	1.0	1600	1350	2.2	2300	2100	2100	900	2100	1700	4450
		1.5	1600	1350	2.2	2300	2100	2100	900	2100	1700	4650
		1.75	1600	1350	2.2	2300	2100	2100	900	2100	1800	4850
		2.0	1600	1350	2.2	2300	2100	2100	900	2100	2800	5650
		2.5	1600	1350	2.2	2300	2100	2100	900	2100	2800	5650
1000	13	1.0	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	1800	4300
		1.5	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	1800	4300
		1.6	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	1800	4300
		1.75	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	1800	4850
		1.8	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	1800	4850
		2.0	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	2800	6000
		2.5	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	2800	6000
		3.5	1600	1400	2.4	2300	2400	2300	1100	2100	3650	6300
1250	16	1.0	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4400
		1.5	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4400
		1.6	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4400
		1.75	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4850
		1.8	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4850
		2.0	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	2800	6150
		2.5	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	2800	6150
		3.5	1950	1400	2.9	2300	2600	2300	1100	2100	3650	6300
1350	18	1.0	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4800
		1.5	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4800
		1.75	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	1900	4850
		2.0	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	2800	6150
		2.5	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	2800	6150
		3.5	2000	1500	3.1	2300	2600	2300	1100	2100	3650	6300
1600	21	1.0	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	1900	4800
		1.5	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	1900	4800
		1.75	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	1900	4850
		2.0	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	2800	6150
		2.5	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	2800	6150
		3.5	2000	1750	3.56	2300	2600	2600	1100	2100	3650	6300

4.2.9 ASME A17.3, A18.1 Safety Standard for PlatformLifts and Stairway Chairlifts, The American Society of Mechanical Engineers

ASME A18.1 규정은 구조적 지지대, 헤드룸의 여유 공간(최소 80인치 이상), 진입로 등 기타 요구 사항을 다루고 있다. 여기서 ASME A18.1 규정은 수직 플랫폼 리프트와 경사 플랫폼 리프트의 두 가지 유형의 플랫폼에 대해 다룬다.

추가로, 엘리베이터에서 1인당 0.22m²까지 허용한다. 그러나 정격 하중은 750lb (340kg)을 초과해서는 안 되며, 내부면적은 최대 12ft²(1.1m²)를 만족해야 한다. 여기에 정격 속도는 50ft/분 (0.25m/s)를 넘어서는 안 된다. 상세한 기준은 아래의 표와 같다.

Table 16. 엘리베이터 설계 하중, 속도 및 최대 바닥면적

종류	Capacity (수용력)	Rated Load (정격 하중)	Rated Speed (정격 속도)	최대 바닥면적	기타
Vertical Platform Lift	-	200kg (450lb) 이상 475kg (1,050lb) 이하 *바닥면적 1.4m ² (15ft ²) 이상: 340kg (750lb) 이상 *바닥면적 1.7m ² (18ft ²) 이상: 475kg (1,500lb) 이상	0.15m/s (30ft/분) 이하	(partial) Runway Enclosure Provided: 1.7m ² (18ft ²) Runway Enclosure not Provided: 1.7m ² (18ft ²) Courtroom Lift: 2.3m ² (25ft ²)	*총 길이 (partial) Runway Enclosure Provided: 4,250mm (168inch) 이하 Runway Enclosure not Provided: 1,500mm (60inch) 이하 Courtroom Lift: 600mm (24inch) 이하
Inclined Platform Lift	1명	200kg (450lb) 이상 340kg (750lb) 이하	0.15m/s (30ft/min) 이하 (경사면 따른 속도 기준)	1.1m ² (12ft ²)	-
Inclined Stairway Chairlift	최대 2명	1인용: 최소 115kg (250lb) 2인용: 최소 180kg (400lb)	0.2m/s (40ft/min) 이하	-	-
Private Residenc e Vertical Platform Lift	-	200kg (450lb) 이상 340kg (750lb) 이하 * 바닥면적: 최소 1.4m ² (15ft ²)	0.15m/s (30ft/min) 이하	1.7m ² (18ft ²)	총 길이: 4250mm (168inch) 이하
Private Residenc e Inclined Platform Lift	1명	200kg (450lb) 이상 320kg (700lb) 이하	0.15m/s (30ft/분) 이하	1.1m ² (12ft ²)	-
Private Residenc e Inclined Stairway Chairlift	최대 2명	1인용: 최소 115kg (250lb) 2인용: 최소 180kg (400lb)	0.2m/s (40ft/분) 이하	-	-

**4.2.10 인도 (MANUAL FOR STANDARDS AND SPECIFICATIONS FOR RAILWAY STATIONS
MINISTRY OF RAILWAYS (RAILWAY BOARD)_GOVERNMENT OF INDIA)**

(1) 최대 수용 면적

- 크기 : 1500mm x 1500mm, 문 너비 : 1100mm
- 탑승 인원 : 13명 (1000kg)
- 속도 : 0.6m/s, 1.0m/s (Pit 깊이에 따라 달라짐)

4.2.11 영국 법규 및 기준(BS5588-5)

① 일반기준

- 외벽은 2시간, 내벽은 1시간 방화할 수 있도록 설계하며, 최소 30분 이상 방화문이 작동하여야 한다.

② 승강기

- 최소 폭 1.1m×깊이 1.4m, 8인용 승강기
- 정격 속도 : 일주 주행을 1분 미만에 할 수 있는 속도
- 대피용 승강기 화물이나 쓰레기 운반용으로 사용하지 말 것.

③ 승강장 : 전용면적 5m² 이상

④ 승강로

- 스프링클러 설비 설치 불가

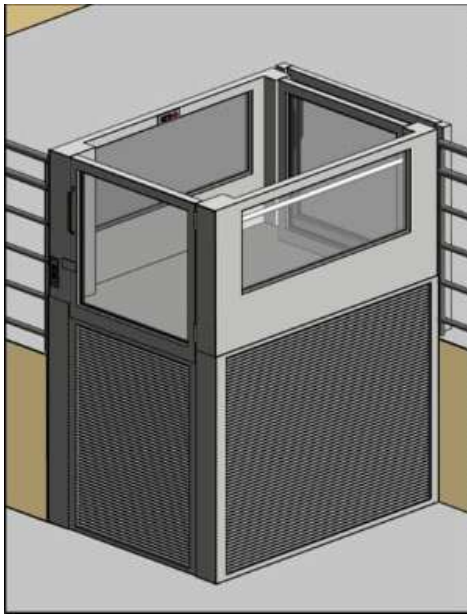
로비로부터 승강로를 분리하는 벽 1m 이내는 전기장치 설치

전기장치는 승강로 피트 바닥에서 1m 이내에 설치금지

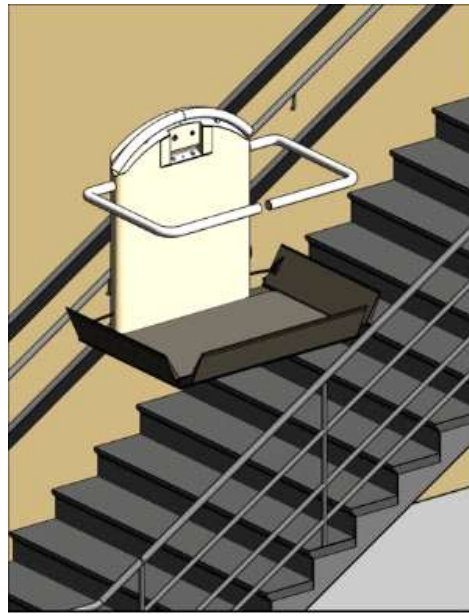
CEN Standard의 영국 규준에 따르면 엘리베이터 설계기준 및 치수는 다음과 같다. 엘리베이터 속도는 0.15m/s로 규정되어 있고, 탑승 인원은 휠체어 탑승 인원이 포함될 시 1명을 추가로 가산할 수 있으며, 약 8명가량 탑승할 수 있다.

Table 17. 엘리베이터 설치에 대한 필요 규격

	Speed	Minimum Platform/Car Size	Capacity	Travel
Passenger Lift	Over 0.15m/s	1100mm Wide x 1400mm Deep	8 Person	Medium Rise to High Rise
Cabin / Enclosed Platform Lift	Up to 0.15m/s	900mm Wide x 1400mm Deep 1100mm Wide x 1400mm Deep	Unaccompanied Wheelchair User/ Wheelchair User + 1	Medium Rise
Open Platform	Up to 0.15m/s	800mm Wide x 1250mm Deep	Unaccompanied Wheelchair	Low Rise



(a) Vertical Platform Lift



(b) Inclined Platform Lift

Figure 10. 경사 각도에 따른 엘리베이터 구분

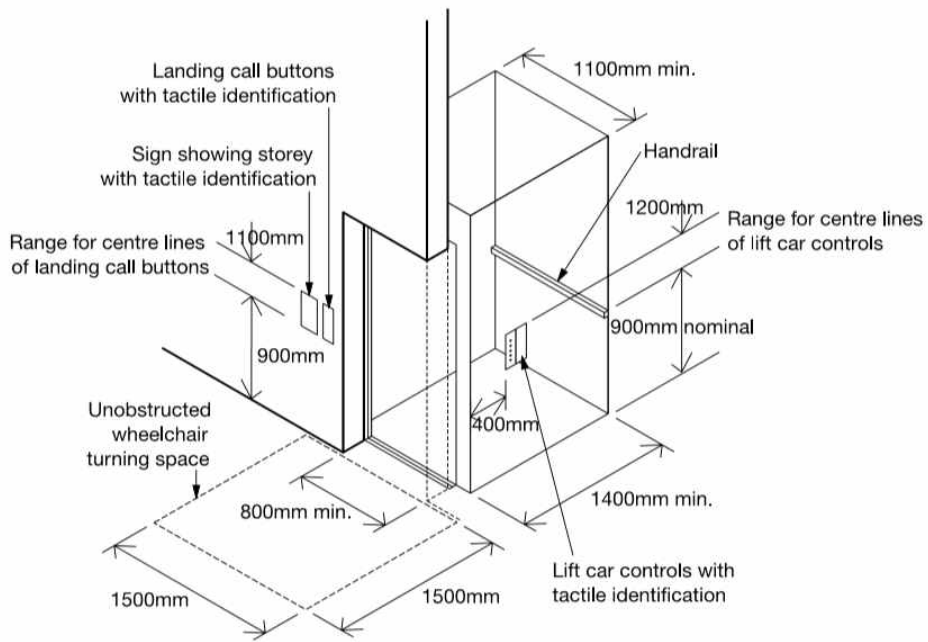


Figure 11. 대피용 승강기의 규격

4.2.12 NFPA 101, 92A Code의 대피용 엘리베이터

- (1) 엘리베이터의 대피 용량은 8명 이상일 것.
- (2) 승강장 벽은 1시간 이상의 내화 및 방연 성능 갖출 것.
- (3) 승강장 문은 1시간 이상의 내화 성능 및 자기 폐쇄식 또는 연기감지기에 의한 자동폐쇄식일 것.
- (4) 상용과 예비전원을 갖추고, 배선은 1시간 이상 성능확보.
- (5) 2방향 통신설비 및 배선은 1시간 이상 성능확보
- (6) 엘리베이터 운전은 승강장에서 연기가 감지되면, 엘리베이터의 리콜 후에 (1단계), 소방대원이 엘리베이터 내에서 수동으로 운전할 수 있을 것 (2단계)
- (7) 밀폐된 엘리베이터 문, 경사진 바닥, 바닥 배수로, 그리고 엘리베이터 샤프트 벽을 밀폐하는 방법을 조합하여 사용할 것.
- (8) ASME/ANSI A17.1, Safety Code for Elevators and Escalators에 따라, 지진이 발생했을 때 순서에 따라 운전을 중지시킬 것.
- (9) 승강장에 크기가 최소 5cm 이상인 아래의 운행 안내 메시지를 다음 표지판을 부착할 것.

Table 18. 엘리베이터에 부착되는 표지판

Elevator Status	Message
Normal Use	Elevator in Service
Elevators Recalled and Waiting for Fire Service	Please Wait for Fire Department or Use Stairs
Elevator out of Service	Elevator Out of Service

4.2.13 Elevator Design Manual/ U.S Department of Veterans Affairs (미국 보훈부)

Table 19. 종류에 따른 엘리베이터 규격 및 수용량

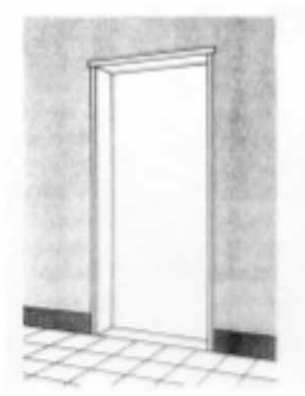
종류	문의 크기	면적	수용량
Elevator for Non-Healthcare Facilities	42 Inch	-	1,125kg (2,500lb)
Passenger Elevator, Single Speed Center Opening Door	48 Inch	3.92m ² (42.2ft ²)	1,818kg (4,000lb)
Passenger/Service Elevator, Two speed Side Opening or Center Opening Door	48 Inch	4.65m ² (50ft ²)	2,259kg (5,000lb)
Service Elevator, Two Speed Side Opening or Center Opening Door	48inch	4.65m ² (50ft ²)	2,273kg (5,000lb)
Bariatric and Trauma Elevator, Center Opening Door or Two Speed Side Opening Door	54 Inch	5.36m ² (57.7ft ²)	2,727kg (6,000lb)

*Passenger Elevator: 일반 보행자, 병원 직원, 휠체어, 장애인 이동할 때 사용하는 승강기;

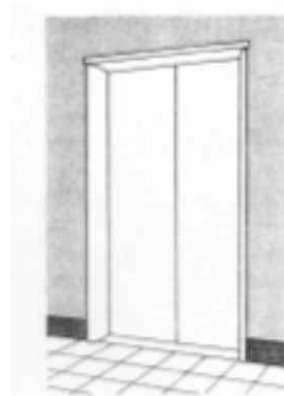
Hospital Elevator: 환자, 직원, 카트, 장비 이동할 때 사용하는 승강기

(환자: 휠체어, 침대, 들것에 누워있는 사람을 모두 포함; Combination Passenger and Service Elevator: 의료 기관에서 일반적인 활동의 간섭이 없는 상황에서 사용

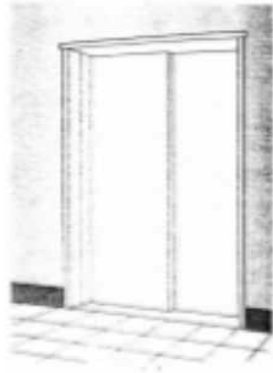
Elevator: 의료



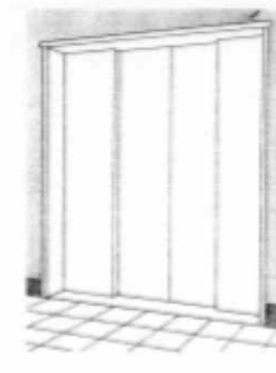
(a) Single Slide



(b) Center Opening



(c) Two-Speed, Side Opening



(d) Two-Speed, Center Opening

Figure 12. 엘리베이터 도어 종류

5. 안암역 시뮬레이션 진행

5.1 연령별 인구 비중 분석

SIP 위치선정을 위해 가장 중요한 변수 중 하나는 시설물을 이용하는 대피 인원 산정이다. 이를 위해 2018년 인구 주택 총 조사 통계청 자료를 참조하여 나이, 성별로 보행 속도를 분류하였고, 안암역을 이용하는 승객도 마찬가지로 나이, 성별에 따라 분류하여 시뮬레이션에 반영하였다. Sampling 한 안암역 지하철 역사는 다양한 나이로 구성된 시민들로 구성되어 있다. 2018년 통계청 자료의 인구 주택 총 조사에 따르면 여성 인구가 남성 인구보다 다소 높게 나타나, 여성 100명당 남성의 수는 99.7 정도로 나타나 있다. 연령에 따른 상세 인구 구성은 다음과 같다. 여기서 40~50대 인구가 약 31.2%로 가장 높게 나타났고 60대 이상 또는 10대 이하의 인구가 적은 항아리형 인구 피라미드 구조를 나타내고 있다.

(단위: 세, 천 명, %)

나 이	2017년 [※] (A)		2018년 [※] (B)		증감(B-A)	
		구성비		구성비		증감률
계	49,943	100.0	49,978	100.0	35	0.1
0-4	2,076	4.2	1,968	3.9	-108	-5.2
5-9	2,288	4.6	2,261	4.5	-27	-1.2
10-14	2,268	4.5	2,251	4.5	-17	-0.8
15-19	2,892	5.8	2,735	5.5	-156	-5.4
20-24	3,356	6.7	3,290	6.6	-66	-2.0
25-29	3,164	6.3	3,259	6.5	95	3.0
30-34	3,216	6.4	3,081	6.2	-135	-4.2
35-39	3,904	7.8	3,915	7.8	11	0.3
40-44	3,916	7.8	3,776	7.6	-140	-3.6
45-49	4,404	8.8	4,362	8.7	-42	-1.0
50-54	4,001	8.0	4,071	8.1	71	1.8
55-59	4,167	8.3	4,212	8.4	45	1.1
60-64	3,175	6.4	3,401	6.8	226	7.1
65-69	2,282	4.6	2,335	4.7	53	2.3
70-74	1,745	3.5	1,817	3.6	72	4.1
75-79	1,537	3.1	1,579	3.2	42	2.7
80-84	940	1.9	1,002	2.0	62	6.6
85세 이상	611	1.2	660	1.3	50	8.1
0-14세	6,632	13.3	6,480	13.0	-152	-2.3
15-64세	36,196	72.5	36,104	72.2	-92	-0.3
65세 이상	7,115	14.2	7,394	14.8	279	3.9
평균연령	41.4	-	42.0	-	0.6	-
중위연령	42.4	-	43.1	-	0.7	-

Figure 13. 연령별 내국인 인구

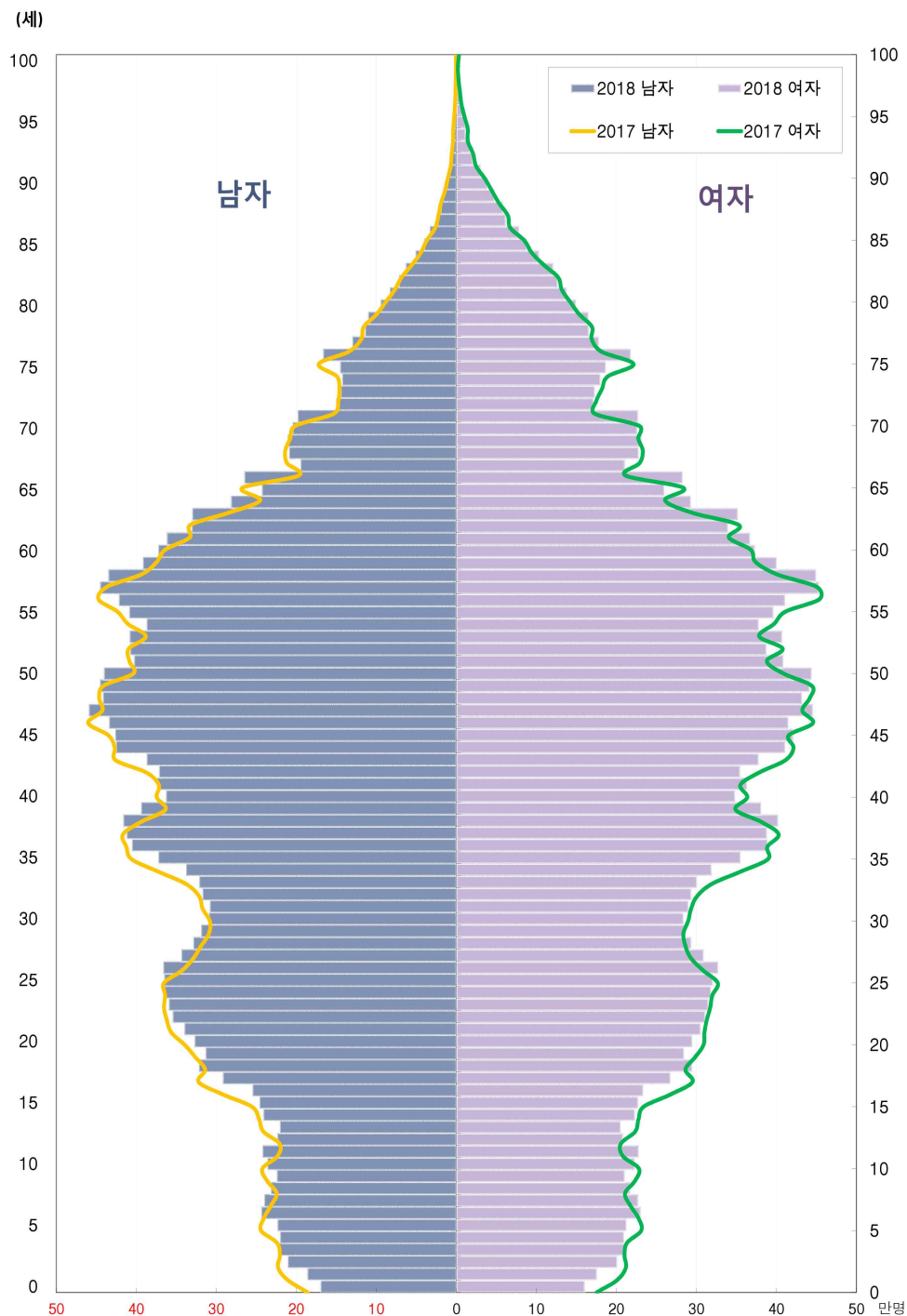


Figure 14. 성별 인구 피라미드

5.2 시뮬레이션 인원 산정

본 연구의 모델 데이터는 서울지하철 교통공사에서 제공하고 있는 ‘서울시 지하철 호선별 역별 승하차 인원 정보’ 값을 이용하였고, 승하차 인원 중 가장 최댓값인 시간(2019년 5월) 기준으로 인원을 산정하였다. 안암역 승하차 인원을 확인한 결과 승차 인원은 4,479명/시간, 하차 인원은 3,718명/시간으로 조사되었다. 즉 시뮬레이션 인원은 승차 인원 74.65명/분, 하차 인원 61.97명/분으로 정하였다. 승차 시간은 지상에서 플랫폼 까지 대피자들이 이동할 경우 시뮬레이션 결과 최대 272.3초가 걸맞았으므로 나타났다. 하차 시간은 플랫폼에서 지상까지 대피자들이 이동할 경우 시뮬레이션 결과 최대 219.9초로 해석결과가 나왔다. 승차 인원은 하차 인원보다 더 많은 것을 알 수 있고, 승차 인원은 최대 12~31분을 기다려야 전철에 탑승할 수 있으므로, 최대 인원 산정 시 승차 인원이 역 안에 대기하는 시간 272.3초 (4.54분)은 중요한 변수가 된다. 272.3초는 Pathfinder 모델링을 통해 계산되었으며, 이 시간 동안을 승하차 인구에 곱하여 전체 시뮬레이션 인원을 산정하였다.

- 승차 인원 74.65명/분 X 4.54분 = 339명
- 하차 인원 61.97명/분 X 4.54분 = 281명
- 역내 승무원 = 5명으로 가정(지하 3층 : 2명, 지하 2층 : 2명, 지하 1층 : 1명)
- 전체 시뮬레이션 인원수 = 339 + 281 + 5 = 625명

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(B3,지상)
Version: 2019.1.0508
Mode: Steering
Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):
Min: 27.8 "00354"
Max: 272.3 "00139"
Average: 181.6
StdDev: 65.7

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		
all behaviors	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Completion Times by Profile (s):

Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	51	35.7	"00374" 260.0	"00190" 177.0	69.8		
Female 30-39	23	50.4	"00371" 261.0	"00114" 187.6	60.6		
Female 40-49	25	37.6	"00367" 249.0	"00110" 172.5	60.3		
Female 50-59	25	43.1	"00379" 265.6	"00195" 190.3	62.2		
Female 60-69	15	50.4	"00360" 265.2	"00129" 206.4	66.3		
Female 70-79	7	54.6	"00362" 263.6	"00131" 224.1	69.5		
Male 20-29	51	31.1	"00339" 261.7	"00132" 174.1	67.0		
Male 30-39	19	29.6	"00372" 263.0	"00127" 169.5	66.4		
Male 40-49	25	27.8	"00354" 243.5	"00220" 173.4	63.3		
Male 50-59	23	45.0	"00370" 266.4	"00139" 178.8	61.3		
Male 60-69	15	67.1	"00359" 256.4	"00128" 193.5	59.1		
Male 70-79	7	80.6	"00361" 257.1	"00213" 199.9	54.8		
all profiles	286	27.8	"00354" 266.4	"00139" 181.6	65.7		

Travel Distances for All Occupants (m):
Min: 26.7 "00354"
Max: 239.2 "00228"
Average: 163.6
StdDev: 52.4

Figure 15. 지상에서 플랫폼까지 시뮬레이션 결과

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation: 안암역(지상, B3)

Version: 2019.1.0508

Mode: Steering

Total Occupants: 286

Completion Times for All Occupants (s):

Min: 0.1 "00001"

Max: 219.9 "00382"

Average: 15.3

StdDev: 34.5

Completion Times by Behavior (s):

Behavior	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
GO TO F1	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		
all behaviors	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Completion Times by Profile (s):

Profile	Count	Min	Min_Name	Max	Max_Name	Avg	StdDev
Female 20-29	50	0.1	"00002" 112.1	"00380" 16.9	33.5		
Female 30-39	23	0.1	"00009" 84.3	"00371" 9.9	25.6		
Female 40-49	25	0.1	"00005" 92.4	"00367" 13.7	29.5		
Female 50-59	25	0.1	"00007" 96.8	"00379" 15.1	32.6		
Female 60-69	15	0.1	"00012" 103.5	"00360" 12.5	32.0		
Female 70-79	7	0.1	"00026" 103.1	"00362" 14.8	36.1		
Female 80-89	1	219.9	"00382" 219.9	"00382" 219.9	0.0		
Male 20-29	52	0.1	"00001" 99.4	"00381" 16.1	32.7		
Male 30-39	18	0.1	"00010" 90.4	"00372" 13.6	30.4		
Male 40-49	25	0.1	"00006" 88.1	"00354" 12.7	26.5		
Male 50-59	23	0.1	"00008" 83.7	"00370" 10.1	26.0		
Male 60-69	15	0.1	"00011" 88.0	"00347" 11.1	28.2		
Male 70-79	6	0.1	"00025" 90.1	"00361" 15.1	33.6		
Male 80-89	1	180.8	"00383" 180.8	"00383" 180.8	0.0		
all profiles	286	0.1	"00001" 219.9	"00382" 15.3	34.5		

Travel Distances for All Occupants (m):

Min: 0.0 "00061"

Max: 158.6 "00382"

Average: 21.8

StdDev: 41.8

Figure 16. 플랫폼에서 지상까지 시뮬레이션 결과

5.3 SIP 위치 선정

본 연구에서 SIP 선정은 시뮬레이션 과정에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. FEMA(Federal Emergency Management Agency, 미국 연방 재난관리청) Risk Management Series 중 Design Guidance for Shelters and Safe Rooms에서는 Shelter의 위치선정 시 가장 중요한 것 중 하나는 얼마나 많은 사람을 수용할 수 있는 “수용력(Capacity)”이다. 즉, 재난 발생 시 얼마나 많은 인원이 시설물 내로 안전하게 대피할 수 있는지가 중요한 요인이라 할 수 있다. SIP 선정은 시설물 내에서 단순히 면적을 통해 산출되는 것이 아니라, 공간 구획물 등을 제외한 실질적인 면적을 통해서 계산되어야 한다. SIP 선정 과정에서 또 다른 중요한 요인은 대피시간이다. 모든 인원이 최소한의 시간 내로 Shelter까지 도착할 수 있도록 설계되어야 하기 때문이다. Shelter까지의 경로는 쉽게 접근 가능해야 하며 경로마다 표시도 명확해야 한다. 아래의 이미지는 Exit 경로가 표시된 시설물 내부의 Shelter를 나타낸다.

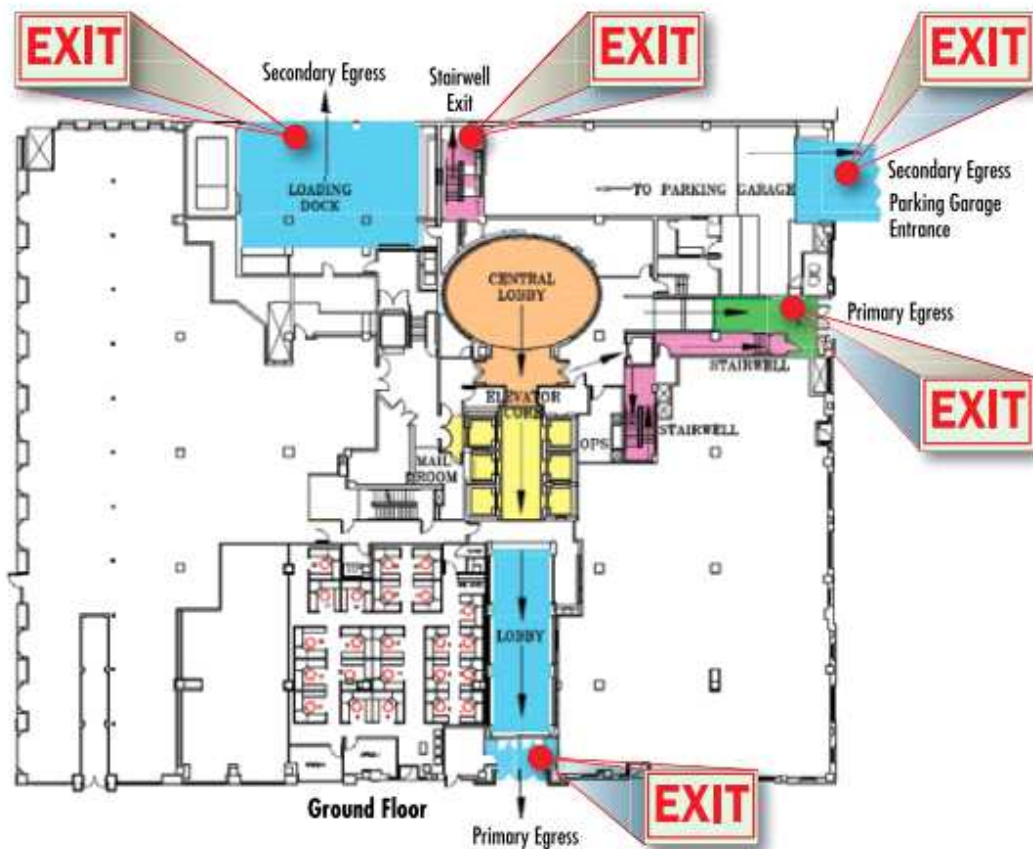


Figure 17. 평면도 및 외부 출구를 고려한 건물 내부의 Shelter 선정 예시

추가로 Shelter의 공간은 테러 등의 상황에서 건물에서 떨어지는 잔해를 효과적으로 제어할 수 있어야 하며, 미사일 낙석 등으로부터 보호 가능하여야 한다. 예를 들어 가정집에서의 가능한 Shelter의 위치는 다음과 같다.

Shelter는 주변 위험요소로부터 완벽히 보호 가능한 곳이면서, 60m²의 방송 청취가 가능한 공간을 만족해야 하므로, 안암역의 경우 지하 1층과 2층이 적합하다. 지하 1층 및 2층 모두 대피 시설로 지정될 수 있는 60m² 이상의 면적이고, Shelter의 기능이 가능하다. 두 층의 유효면적은 지하 1층 및 2층은 각각 2100m², 919m²이다. 반면 지하 3층은 지하철 도어가 유리로 구성되어 있으므로, 재난 발생 시 파편으로 인한 2차 피해가 예상되므로, 본 연구에서는 지하 1층 및 지하 2층이 SIP로 가능하나 대피자의 수용력을 고려하여 지하 2층을 SIP로 지정하였다.

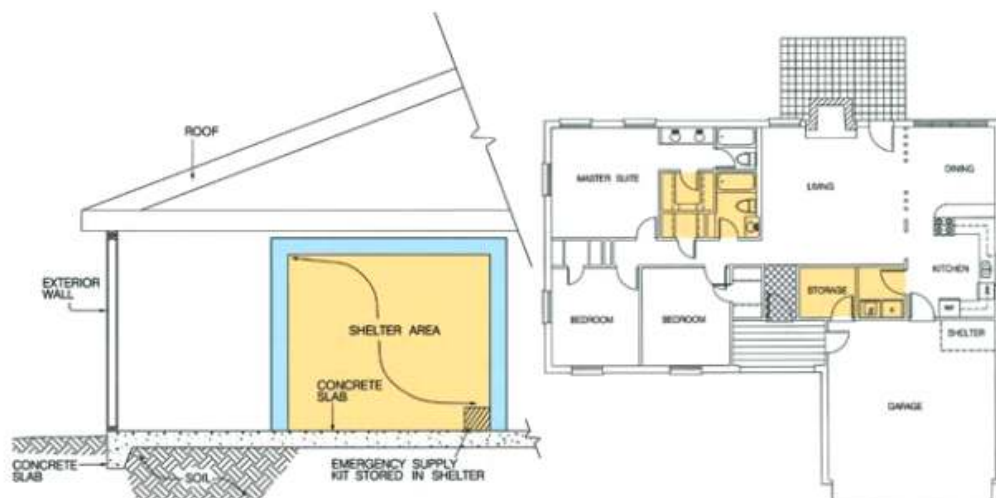
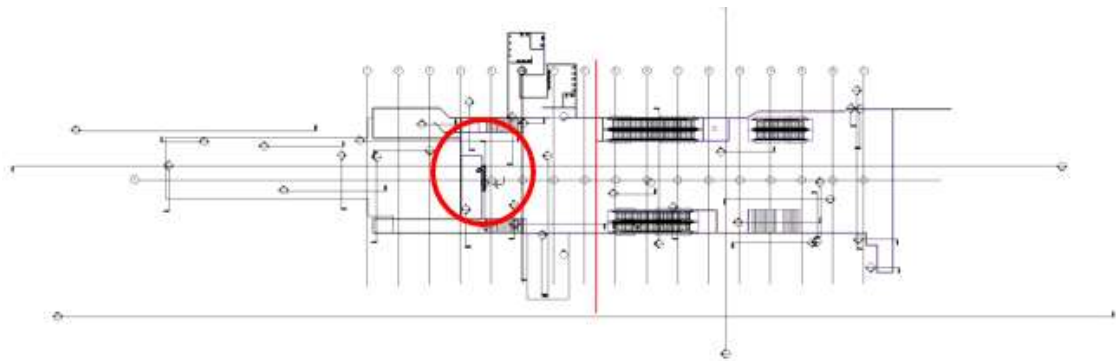


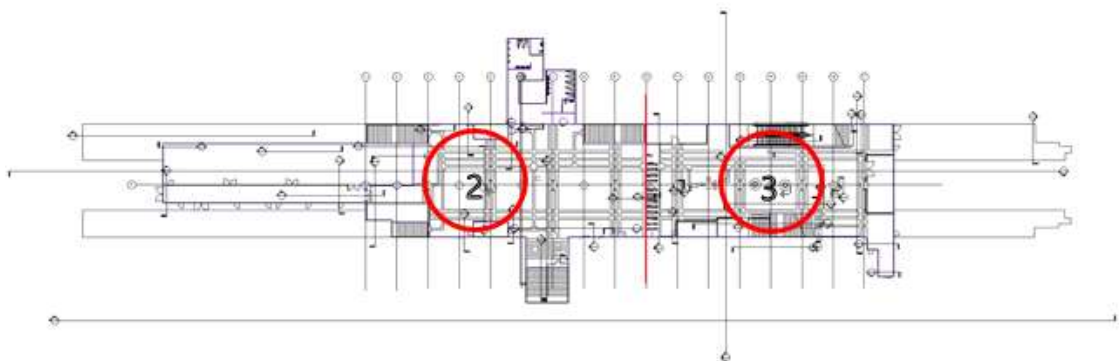
Figure 18. 가정용 내부 SIP 선정 예시

FEMA 453에 따르면, 대피자들의 Shelter 재실 시간이 24시간을 넘는지 안 넘는지 아닌지에 따라 수용 가능 인원이 달라진다. 즉, 24시간 이상 시 수면이 필요한 최소한의 면적이 필요하므로, 이에 따라 수용력은 줄어들게 된다는 것이다. 만약, 24시간 이상 Shelter에서 지내야 할 경우, 수면 시설이 필요하며, 싱글베드를 기준으로 최소한의 면적은 $5.6\text{m}^2/\text{person}$ 이고, 이층 침대를 사용한다면 이의 절반인 $2.8\text{m}^2/\text{person}$ 의 면적이 필요하다. 반면 재실 시간 24시간 미만 시 수면이 필요 없게 되므로 이보다 훨씬 적은 $1.86\text{m}^2/\text{person}$ 으로 규정하고 있고, 재실자들의 수용력이 보다 향상된다.

따라서 본 연구에서는 SIP의 수용력을 고려하여 수면이 필요 없는 24시간 미만을 기준으로 인원을 산정하였으며, SIP의 위치로 지하 2층의 면적을 산출하였다. 수면이 불필요한 24시간 이내로 필요 면적을 산출할 경우 지하 1층 및 지하 2층은 각각 232.7명, 1048.65명으로 총 1281.35명이 머물 수 있다. 반면 수면이 필요한 24시간 이상의 경우, 2층 침대를 사용한다고 하더라도 지하 1층은 154.64명, 지하 2층은 694.64명이 수용 가능하여 총 849.28명밖에 머무르지 못한다. 최악의 상황을 가정하여 5.2에서 계산된 결괏값을 적용하면 시뮬레이션에 필요한 인원은 총 625명이다. 만약 수면이 필요한 상황에 놓인다면 지하 1층 또는 지하 1층과 지하 2층을 모두 활용하여 SIP로 정해야 한다.



(a) 지하 1층 SIP



(b) 지하 2층 SIP

Figure 19. 지하 1층 SIP 및 지하 2층 SIP

Table 20. SIP 면적 및 수용 가능 인원

	1	2	3
면적 (m^2)	433	1176	769
수용 가능 인원 (명)	$433/1.86 = 232.7$	$1176/1.86 = 635.25$	$769/1.86 = 413.4$

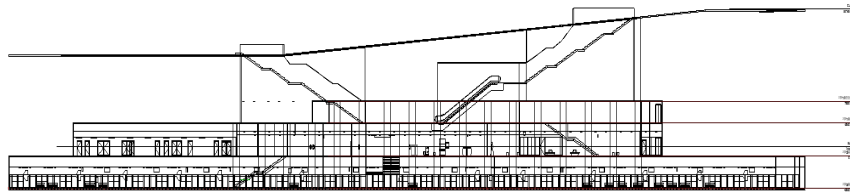
5.4 안암역 모델링

5.4.1. 계단 모델링

본 연구에서는 레이저 스캐닝을 통한 역설계로 데이터를 정합하여 안암역 역사의 도면을 획득하였다. 모델링 데이터는 Autodesk Revit 프로그램을 사용하였으며, 포인트 클라우드 소프트웨어에서 오버랩하고 3D 모델링 작업을 진행하였다. 다음의 그림은 각 객체에 속성정보를 부여하여 3D 모델링을 진행한 과정을 나타낸 것이다. 여기서 만들어진 모델링을 Pathfinder 프로그램에 대입하여, 역사 공간에 엘리베이터, 문, 계단 등을 구분하여 모델링을 진행하였다. Pathfinder의 경우 DXF 파일은 물론 DWG와 파일과의 호환성이 우수하다는 장점이 있다. 다음은 모델링에 설정된 안암역 계단의 폭 및 높이를 나타내고 있다.

Table 21. 안암역 계단 폭, 높이

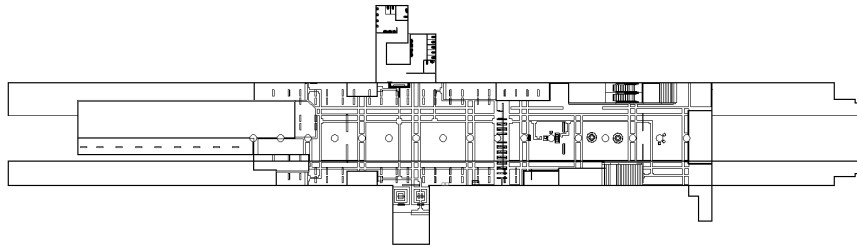
위치	계단 높이 (mm)		계단 폭 (mm)
B1F ~ Exit 1 계단	1 Landing	166	320
	2 Landing	166	320
	3 Landing	166	320
	4 Landing	166	320
B1F ~ Exit 2 계단	1 Landing	157	320
	2 Landing	168	320
	3 Landing	173	340
	4 Landing	168	340
B1F ~ Exit 3 계단	1 Landing	157	320
	2 Landing	168	320
	3 Landing	173	340
	4 Landing	168	340
B1F ~ Exit 4 계단	1 Landing	143	335
	2 Landing	157	335
	3 Landing	171	335
	4 Landing	175	300
B2F(Bomunsa Direction ~ B1F)		166	325
B2F(Korea University Direction ~ B1F)		172	325
B3F(Bomunsa Direction) ~ B2F		166	330
B3F(Back of Bomunsa Direction) ~ B2F		166	335
B3F(Front of Korea University Direction) ~ B2F		166	335
B3F(Back of Korea University Direction) ~ B2F		166	335



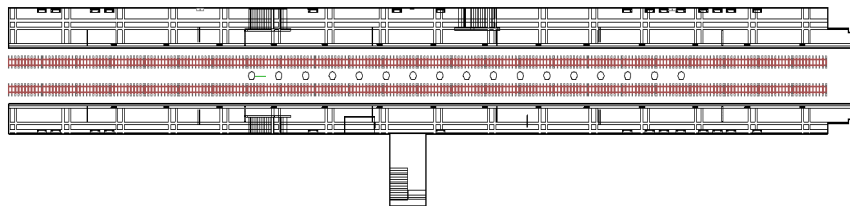
(a) Section



(b) B1 plan



(c) B2 plan



(d) B3 plan

Figure 20. 안암역 지하 및 전체 단면

Table 22. 주요 시뮬레이터의 특징 및 한계점

구 분	시뮬레이터의 특징 및 한계점	비 고
EVACNET4	-다양한 종류의 건축물 대피 시뮬레이션을 수행할 수 있게 개발된 프로그램 -대피 시간 최적화에만 시스템의 목적이 집중되어 있어 각 대피자의 다양한 대피 행동 특성이나 의사결정 특징을 시뮬레이션할 때는 부적합 -Node와 Arc를 이용하여 대피 성능을 검증하기 때문에 CAD 기반의 Visual Interface 가 불가능함 -텍스트 기반의 항목 입력시스템으로 개발되어 있어 복합 건축물의 시뮬레이션 불가능	엘리베이터 미반영
Simulex	-복합 건축물 내 위치하는 많은 재실자의 대피 행동과 Way-Finding 방법을 시뮬레이션 -대피자별, 군집 별 대피 능력을 사용자가 개별적으로 지정할 수는 있으나 공간의 밀도에 따라 변화하는 유동적인 대피 속도의 증감을 지원하지 않음 -대피자 간의 거리에 따라 이동 속도의 변화를 지원하지므로 대피 시간의 증가에 따른 대피자들의 신체적 능력 감소나 정신적 혼란 상태는 지원하지 않음 -대피 결과데이터를 5초 단위로 제공하기 때문에 다른 시뮬레이션 모델과의 비교·분석이 어려움 -CFAST, FDS와 같은 연기 유동해석 시뮬레이션 프로그램과의 연동이 불가 -평면과 계단을 연결하는 Link에 대피자들이 끼이는 기술적인 결함이 있어 업데이트가 필요 (다수의 계단 Link 불가)	
Building EXODUS	-재실자의 대피 행동을 People-People, People-Structure, People-Fire 관계로 분류하여 화재 성상 및 유동에 따른 대피 시뮬레이션 가능 -대피 시간의 증가에 따른 대피자들의 신체적 능력 감소나 정신적 혼란 상태를 입력할 수 있는 항목 지원 불가 -평면상의 보행 속도, 계단을 오르내릴 때의 보행 속도를 입력하는 항목이 존재하지만 변화하는 유동적 보행 속도를 증명하는 알고리즘이 없음 -지속적인 버전 향상이 이루어지고 있으나 아직 초고층 건축물에는 소극적임	
ELVAC	-엘리베이터만을 이용한 대피 시뮬레이션 -재실자의 총 대피 시간만을 결과데이터로 제공 -대피가 시작되면 재실자들은 엘리베이터 앞에서만 대기하므로 다양한 대피 전략을 검증하기에는 부적합 -엘리베이터의 중간 이동 소요시간에 관한 데이터를 시뮬레이션할 수 없음 -화재가 발생한 층의 높이가 높아질수록 결과데이터 정확도가 떨어지므로 초고층 건축물의 대피 전략 검증에는 사용하기 어려움	
ELEVATE	-엘리베이터의 크기를 입력할 수 없음 -마지막 재실자가 엘리베이터를 통해 건축물 밖으로 나왔을 때의 시간을 출력하기 때문에 건축물 외부로 대피하는 경우만 사용 가능 -5분당 출구로 나오는 대피자들의 수를 결과로 제공함 -엘리베이터 앞에 도달하기 전 대피 경로를 인식함	엘리베이터
BTS	-계단, 엘리베이터, 에스컬레이터를 이용한 대피 시간의 측정이 가능 -각 층의 모양, 이동방법의 선택, 재실자의 혼잡으로 인한 지체, 재실자의 보행 속도 입력 가능 -엘리베이터 앞에 도달하기 전 대피 경로를 인식함 -재실자들의 과밀·지체 현상을 반영하지 않음	반영
LEGION	-각 재실자 간의 상호작용모델 예측에 집중하여 개발된 툴 -2D Continuous 대피 모델로 개발되어 CAD 기반의 대상지를 공간으로 인식하고 대피 시뮬레이션을 진행함 -재실자들이 인공지능을 가져 유동적인 보폭 속도의 증감을 반영하고 대피 경로의 결정 시에는 통계적 분석을 바탕으로 확률적인 의사결정을 함 -각 재실자의 대피 성능이 신체 유형을 기준으로 결정되므로 정확도가 떨어짐 -엘리베이터의 대피 성능을 입력할 수 있는 항목이 없음	

5.5. 시뮬레이션 프로그램

위의 표는 기존에 대피 시뮬레이터로 사용되는 프로그램의 특징 및 한계를 서술하고 있다. 공간 및 재실자의 특성에 따라 입력요소를 아래 표와 같이 상세히 나타내었다.

Table 23. Simulex, Building Exodus, Pathfinder의 입력요소

구분	Simulex	Building Exodus	Pathfinder
공간 특성	내부공간을 방, 복도 계단으로 구분	Node에 의한 공간 구성 (1 Node 당 1 재실자 점유 가능)	Mesh Triangle Space에 의한 공간 구성
재실자 특성	재실자 유형(32가지), 하나의 재실자 유형에는 총 10가지 신체 타입 가능	신체 타입 (성별, 나이, 몸무게, 키) 재실자 특성 (민첩성, 충동성, 인내심, 유친 관계, 재실자 출구 지식, 지도자 설정) 행위 모델 (극한 행동, 사회적 반응, 조급, 벽 근접, 의자 뛰어넘기, 복잡한 계단, 건물 친숙도 등)	신체 타입 (성별, 나이, 어깨너비) 재실자 행동 (Go to Rooms, Go to Elevator, Go to Waypoint, Simply Waiting in Place) 재실자 배치: 개별 지정, 그룹지정 (Random/Uniform), 재실자 수, 밀도 선정
재실자 이동 특성	Distance Map (목적지까지 최단 거리) 반응 시간 설정(3가지) 보행 속도(성별 및 나이 군에 따라 다름) 사람과 사람 간의 밀도 반영	인지(대피선택요소 : Local Familiarity All Main Exits, Local Potential, Floor Potential) 반응 시간(임의지정, 사용자 입력) 보행 속도(성별 및 나이에 따라 다름) 이동성(mobility) 설정 (0~1, 장애 정도가 높을수록 0에 가까움) 출구 유동률(Door Flow Rate)	경로 설정 (Path Generation, Locally Quickest, Backtrack Prevention) 반응 시간(임의지정, 사용자 입력) 보행 속도(성별 및 나이에 따라 다름) 재실자 이동(SFPE, Steering Mode) 출구 유동률(Door Flow Rate)
화재 특성	'Drill' Mode로 간단히 시뮬레이션 진행	위험 모델 (Upper, Lower: HCN, CO로 구성되며 Init, Grad, Pow, Limit 4가지 값을 가짐) 독가스에 대한 특성 PID, COHb 농도, RMV	'Drill' Mode로 간단히 시뮬레이션 가능

5.5.1. Pathfinder 프로그램 선정

본 연구에서 사용할 시뮬레이션 프로그램으로는 Thunderhead Engineering에서 개발한 Pathfinder를 선정하였다. Pathfinder는 Steering Mode, SFPE Mode 2가지 보행자 Behavior Mode를 제공하는데, 첫 번째 Steering Mode는 보행자들이 다른 보행자들과 상호작용하는 알고리즘으로 가능한 한 인간의 행동과 움직임을 모방하려는 상태이고, 두 번째 SFPE Mode는 Engineering Guide to Human Behavior in Fire (SFPE, 2003)에서 정의된 가정 및 계산된 수치를 사용한다. 즉, SFPE Mode에서는 보행자는 서로 회피하려고 시도하지 않고 보행자들끼리 서로 투과되어 보이지만, 문의 흐름 제한이나 밀도에 따른 보행 속도 제어는 가능하다.

본 연구에서 사용된 안암역 역사 모델링을 Steering Mode로 시뮬레이션을 진행하였을 때와 SFPE Mode로 시뮬레이션을 진행했을 때는 보행자들의 동선이 그림과 같이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 SFPE Mode에서는 보행자들은 숫자가 많이 겹치더라도 한 명의 공간만을 차지하므로 동선이 비교적 간단하게 표현될 수 있다.

대피 대피 시뮬레이션 프로그램에는 다음과 같이 구성되어 있다. 이때 허용 가능 대피 시간 및 대피 시뮬레이션에서 산정된 REST(Required Safety Egress Time, 최소 대피 요구시간)과 ASET(Available Safety Egress Time, 허용 가능 대피 시간) 값을 비교하게 된다. 최종 결과를 통해 ASET 값이 더 크면 대상 건축물이 대피 안전성능을 확보하였다고 판단한다. 다음은 국내에서 많이 활용되고 있는 Simulex, Building Exodus, Pathfinder 세 가지 시뮬레이션 입력요소를 비교한 표이다.

5.5.2. 대피 시뮬레이션 과정

본 연구에 사용되는 Pathfinder 대피 시뮬레이션 과정은 다음과 같다.

- 1) 재실자의 특성 분석
- 2) 테러 등 재난 상황 설정
- 3) 출구 및 대피 경로 설정
- 4) 대피 Modeling 결과 반영
- 5) 재실자에 대한 인명 안전성 확보 여부 판단

시뮬레이션 사용자들의 재실자 설정 경향을 조사하기 위해 시뮬레이션 사용 경험이 있는 사용자들을 바탕으로 설문 조사. 평가항목은 다음과 같다.

- a) 단위 가구당 재실자 수
- b) 성별 분포
- c) 장애 여부 고려
- d) 연기에 의한 영향 고려
- e) 평지 보행 속도
- f) 계단 보행 속도
- g) 몸무게 설정
- h) 키 설정

단위 가구당 재실자 수의 경우 NFPA에서 제시한 최대 수용인원을 참고하는 것이 가장 높은 비율(45%)을 차지하였으며, 건축 계획상 세대 구성비(17%), 단위 가구당 평균 거주자(13%)가 그 뒤를 이었다. 전체 거주자 성별 분포로는 남자 50%, 여자 50% 비율(62%)로 가정하는 사용자가 가장 많았으며 그 뒤로 남자 60%, 여자 40% (19%)를 차지하였다. 장애 여부는 고려 안 함(95%)이 매우 높게 나타났으며 이를 통해 시뮬레이션 설정 시 대부분 사용자가 재실자의 장애 여부를 고려하지 않는 것을 알 수 있었다. 연기 대피 인자의 경우 가시도 및 연기 자극(65%)이 가장 높게 나타났으며 대피 과정에만 집중한다(14%), 연기속성 반영(14%)이 그 뒤를 이었다. 평지 보행 속도는 시뮬레이션에서 제시된 기본값인 DEFAULT 값 설정(36%)이 가장 높게 나타났으며 통계자료 참고(27%)가 그 뒤를 이었다. 계단 보행 속도 또한 DEFAULT 값 설정(59%)이 가장 높게 나타났으며, 통계자료를 참고하는 것(23%)이 두 번째로 나타났다. 다음 몸무게 설정에서는 나이를 기준(32%)으로 하여 설정하는 것이 가장 높게 나타났으며 키 설정 또한 나이를 기준(36%)으로 하는 것이 가장 높게 나타났다.

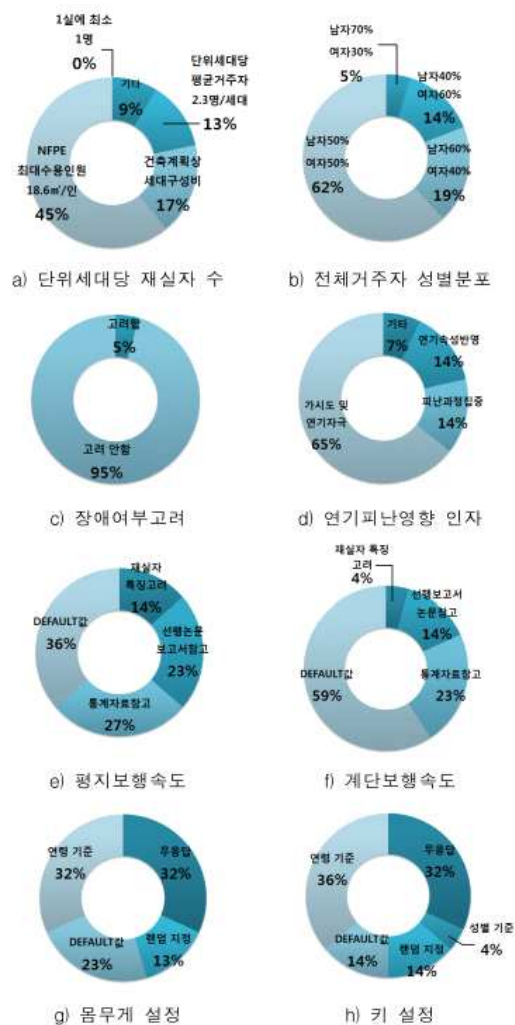


Figure 21. 재실자 설정 요소의 설문결과

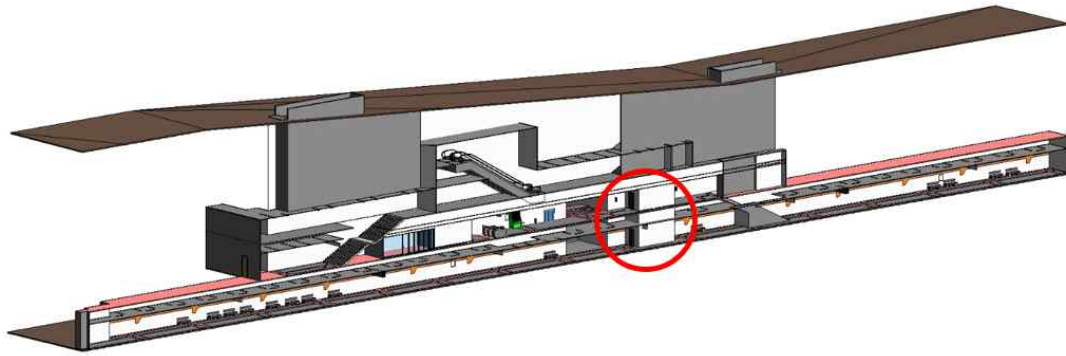
5.6 엘리베이터 대수 산정

본 연구에서 지정된 안암역 역사는 승강기 3대로 구성되어 있으며, 일반 승객 또는 장애인용으로 2대의 승강기, 장애인 전용 승강기 1대로 구성되어 있다. 엘리베이터의 규격은 다음과 같다.

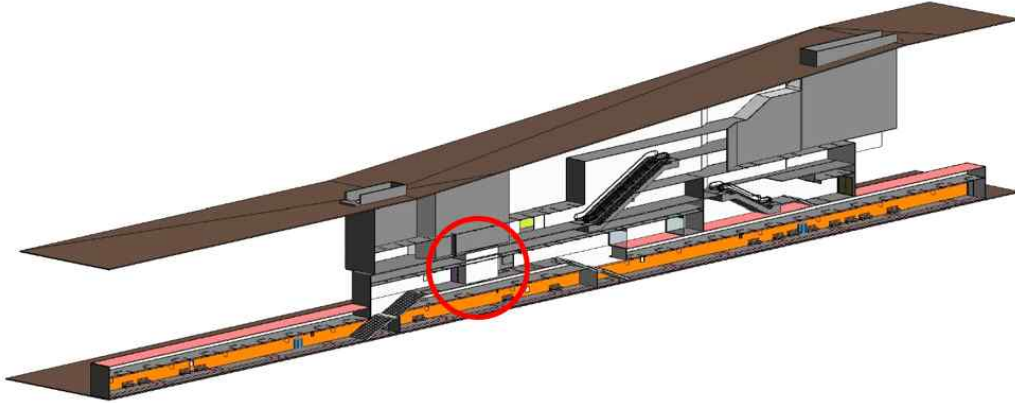
- 1) 출입문 규격(W x H) : 900 x 2100 (mm)
- 2) 카 내부 규격(A x B) : (유효면적) 1100 x 1350 이상 (mm)
- 3) 폭 : 2000 (mm)
- 4) 깊이 : 2200 (mm)
- 5) 속도 : 0.5m/s
- 6) 15인승, 1000kg 이내

Table 24. 안암역 엘리베이터 위치

시설	운영구간	위치	사용 여부
MRL 엘리베이터 1호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 2호기	B2-B3	지하 B2-B3	사용 가능
MRL 엘리베이터 3호기	F1-B2	1번 출구	사용 가능



(a) 3D 측면- 엘리베이터 1호기



(b) 3D 측면- 엘리베이터 2호기

Figure 22. 지하 2층 엘리베이터 위치 및 지하 3층 엘리베이터 위치

5.7 대피 요소별 속도 산정

CBRE 상황에서 에스컬레이터는 계단만큼 폭이 넓지 않아서 많은 수의 인원을 수용하지는 못하지만, 노약자나 어린이, 임산부 등 빨리 걷지 못하는 분들에게는 굉장히 중요한 운송수단이라고 할 수 있다. 에스컬레이터의 속도는 통상 국제적으로 $\sim 0.5\text{m/s}$, 최대 0.75m/s 로 정의하고 있고 경사 각도가 30도를 넘는 경우는 내림 방향에서 최대 30m/s (출처: 건축설계 대사전: 설계편)로 제한을 두고 있다. 국토교통부 고시 제 2014-764호에 따르면 대피요소별 이동 속도의 수평 이동 속도는 1.0m/s 수직 속도는 0.25m/s 로 정의하고 있다.

일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자를 위한 시설로 일반적인 엘리베이터보다 속도가 현저히 느리다. 화재, 지진 등 재난 발생 시 엘리베이터는 사용하지 않는 것이 원칙이지만 본 연구에서 검토하고 있는 CBRE(Chemical Biological Radiological and Explosive) 및 특히 테러상황 발생 시 빠른 대피를 요구하는 상황 시 엘리베이터 사용을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

Table 25. 대피 요소별 대피 속도

대피 요소	대피 속도
수평 이동 요소(승강장, 대합실, 통로)	60m/분 (1.00m/s)
수직 이동 요소 (계단, 정지된 E/S)	15m/분 (0.25m/s)
작동 중인 E/S	36m/분 (0.60m/s)

엘리베이터 속도는 건축설계 대사전에 따르면 $45\text{m/분} \sim 60\text{m/분}$ 을 기준으로 지정하였는데, 단위를 초로 바꾸어서 보면, $0.75\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ 가 된다. 반면, 현재 안암역에 사용되는 엘리베이터 평균속도는 0.3m/s 로 운행되고 있다. 이는 한 개 안암역 지하철 한 층을 이동하는데 걸리는 시간 15초로 안암역 1층당 높이 4.64m 를 기준으로 측정하였다. 따라서 본 연구에서는 엘리베이터 속도를 기존 설계된 속도인 0.3m/s 로 시뮬레이션을 우선 진행하고 건축 대사전에서 정하고 있는 최대 1.0m/s 를 기준으로 시뮬레이션을 진행하여 대

피 속도와 비교를 하고자 한다.

여기서, 80세 이상과 같은 노약자의 경우 18세~70세 사이의 성인 보행 속도보다 보행 속도가 현저히 느린 것을 고려해 대피 시뮬레이션에 반영하였다.

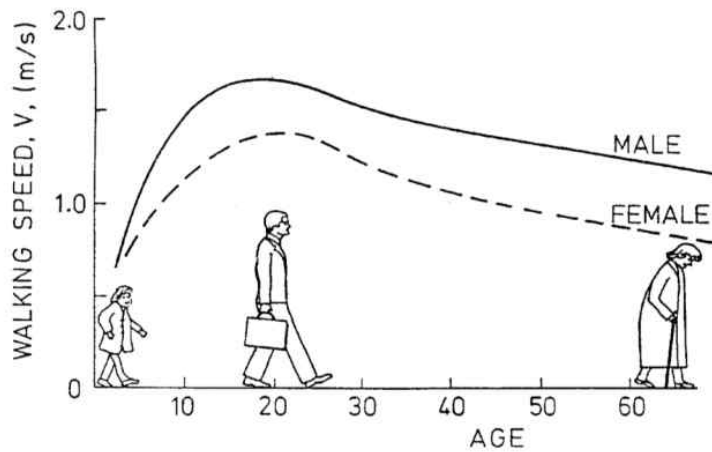


Figure 23. 연령 별, 성별 보행 속도 비교 그래프

5.8 엘리베이터 탑승 인원 결정

본 연구에 지정된 시뮬레이션 인원 620명을 역내에 고르게 배치해야 하는데 하차 인원 281명은 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 골고루 분포하고 승차 인원 339명은 승차 시간을 고려하면 대부분 플랫폼이 위치한 지하 3층에 위치할 확률이 높으므로, 양쪽 플랫폼에 골고루 배치하였다. 또한, 승무원으로 추정한 5명의 경우 1명은 지하 1층 나머지 4명은 지하 2층과 3층에 배치한다. 승차 및 하차 인원 배치 시 나이와 성별을 아래의 표를 기준으로 임의로 배치하였고, 성별과 나이에 따라 보행속도를 지정하였다. 위의 인원에 따라 대피자 배치 시 지하 1층에는 197명, 지하 2층에는 115명, 지하 3층에는 318명이다. 인구 분석결과에 따르면, 노약자(80세 이상) 인구는 전체 인구대비 약 3%를 차지하였고, 한국의 장애인은 약 250만 명이고, 한국 보건 사회 연구원에 따르면 장애인 인구수는 전체 인구수에서 약 13.8%를 지정하고 있다. 장애인 인구 중 약 8.9%는 보행 시 많은 도움이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전체 인구수 13.8%에서 8.9%를 곱한 0.0123%를 전체 장애인 인구로 산정하였다. 즉, 승 하차 시뮬레이션 인구 620명 중 약 8명을 휠체어를 통해서 SIP으로 이동하고, 승차 인원 배치와 동일한 비율로 지하 3층에는 5명, 지하 1층에 나머지 3명을 배치하였고, 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 이동하는 것으로 시뮬레이션을 진행하였다.

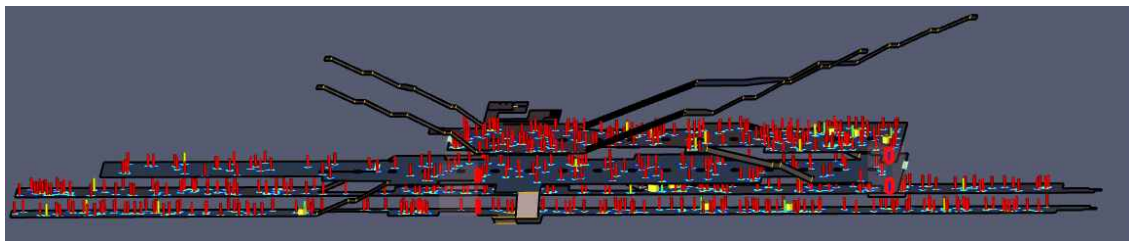


Figure 24. 보행자 배치도

Table 26. 연령 별 비율 및 보행 속도

나 이	남		여	
	비 율 (%)	보행 속도 (m/s)	비 율 (%)	보행 속도 (m/s)
20~29	16.583	1.358	16.433	1.341
30~39	7.443	1.433	7.465	1.337
40~49	8.541	1.434	8.567	1.390
50~59	8.042	1.433	8.066	1.313
60~69	4.945	1.339	4.960	1.241
70~79	3.907	1.262	3.106	1.132
80~99	1.349	0.968	1.353	0.943
합 계	50.0(%)	-	50.0(%)	-

Table 27. 성별, 연령에 따른 보행 속도

Index			Speed (m/s)	Contents			Researcher
				Average	Standard Speed (m/s)	Assessment	
Walking Speed (m/s)	Fast	20s and 30s	2	1.888	1.24~2.05	Horizontal Space 40m ² (2m×20m) : Adult	Hong et al (2010)
					1.87	Waking inside the Building	Lee(2001)
					1.75~2.53	Fast Walking of 20s and 70s	Bohannon (1997)
	Averag e		1.3	1.298	0.7~1.2	Traffic Engineering	Jeon(2011)
					1.25~1.8	Adult	Kim(1983)
					1.3	Population Density – 0.1 Person/m ²	Pauls(1983)
					1.4	Free Walking Speed of Street in London	Older et al (1964)
					1.27~1.46	Average Walking of 20s and 70s	Bohannon (1997)
	Slow	Elders and Kids	1	1.006	0.8~1.1	Korean Nation Police Agency	Jeon(2011)
					0.93~1.28	Senior Citizen	Hong et al (2010)
					0.92	Senior Citizen more the 34,485 Person	studenski (2011)

본 연구에서 사용된 안암역 역사의 승강장 면적에 따른 최소하중은 다음의 식을 통해 산정하였다.

Table 28. 내부면적에 따른 정격 하중

내부면적이 4.65m ² (50ft ²) 미만일 경우	내부면적이 4.65m ² (50ft ²) 이상일 경우
<i>(SI Units)</i> $W = 35A^2 + 325A$	<i>(SI Units)</i> $W = 2.45A^2 + 610A - 620$
<i>(Imperial Units)</i> $W = 0.667A^2 + 66.7A$	<i>(Imperial Units)</i> $W = 0.0467A^2 + 125A - 1,367$

A = 내부총면적, $m^2(ft^2)$

W = 최소 정격 하중, $kg(lb)$

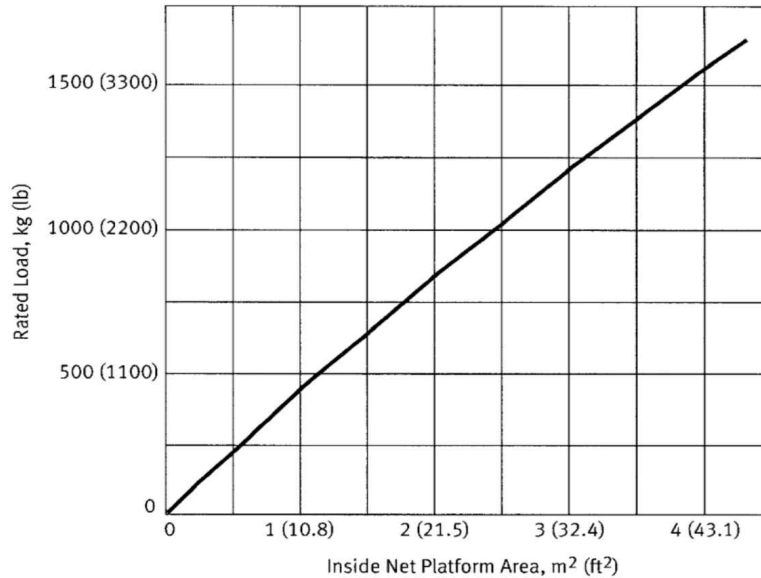


Figure 25. ASEM A17.3_순 면적에 따른 정격 하중 산출

본 연구에서 사용되는 안암역 1호기의 내부면적을 위의 식(A)에 대입 시 최소 정격 하중을 산출할 수 있다. 이를 바탕으로 1회 왕복 시 가능 인원을 선정하게 되며, 엘리베이터를 이용한 대피 소요시간을 추정할 수 있다.

여기서 승강기는 노약자 및 80세 이상의 노약자가 먼저 탑승하게 배치하는데, 5.1.에서 산정된 시뮬레이션 인원에 따라 배치하였다. 여기에, 안암역에 운영되고 있는 3대의 엘리베이터 중 1대는 지하 2층에서 지하 1층을 거치지 않고 지상으로 바로 이동한다. 나머지 2대는 지하 3층에서 지하 2층으로 이동하는 것으로 설계되어 있다. 또한, 엘리베이터는 8인 이상으로 설계되고, 앞서 구한 정격 하중으로 탑승 인원 산출 시 약 10명의 인원이 1회당 대피한다고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 만약 대피자를 태우기 위해 한 층 이상 정지할 경우 식 (1)과 (2) 중에서 식 (2)를 기준으로 계산해야 하지만 본 연구에서는 1개 층으로만 엘리베이터가 이동하기 때문에 식(1)을 기준으로 계산하였다. 총 이동 효율에서는 엘리베이터가 대피 장소의 지하 1층과 지하 2층 모두에 멈추는 것을 반영해야 한다. 하지만 본 연구의 안암역의 엘리베이터는 지하 3층에서 2층의 한 층만 운행하므로, 이에 대한 고려는 필요하지 않다.

5.9 대피 전략

현재 지하철에서의 대피 방법은 최초 CBRE 상황 시 대피 장소로 이동하는 방법에 따라 다르게 수립된다.

대피 방법은 다음의 2종류로 분류된다. 우선 단계적 부분 대피 방법은 1개 층을 대피 장소(Shelter In Place, SIP)로 규정하여 해당 층으로 재실자들이 모여서 대피하도록 하는 대피 전략을 수립한다. 여기서 1개 층으로 하는 단계적 부분 대피는 재실자들의 정체 현상으로 대피 시간이 더 많이 소요되는 단점이 있다. 다음으로는 전체 동시 대피 전략은 재난 상황 발생 시 2~3개 층으로 SIP를 분산 배치하여 재난 상황 발생 시 재실자들이 자신으로부터 가까운 보호구역으로 모이는 전략이다. 이는 외부 재난 발생 상황으로부터 재실자를 보호하는 데에 효과적이다.

구조대의 구조 활동으로 대피자가 이동하는 것과 다르게 대피용 엘리베이터의 목적은 재실자들이 직접 엘리베이터를 이용하여 SIP으로 안전하게 이동하기 위함이다.

6. 국가별 설계기준에 따른 대피시간 비교

6.1 인원 산정

연령 별 인구는 앞서 시뮬레이션 진행한 것과 동일하게 산정하였으며, 층별 인원도 동일한 인구 변수로 진행하였다.

6.2 엘리베이터를 통한 대피 프로세스

엘리베이터를 통한 예상 대피시간 계산은 미국 NIST에서 산출된 ELVAC VERSION 1.0의 프로그램에 따라 계산하였으며, 여기서 사용된 대피시간 계산식은 다음과 같다. KS B ISO 41902-1 적재하중 1150kg 비상용 엘리베이터를 이용하여 왕복 엘리베이터 소요시간을 계산하였다. 이동 거리는 안암역 지하철 1층 거리이며, 총 엘리베이터 이동 거리는 4.64m이다. 일반적으로 지하철에서 엘리베이터는 장애인이나 노약자들을 위해 설계되어 일반적인 엘리베이터보다 속도가 현저히 느리다. 화재나, 지진 등의 상황 발생 시는 엘리베이터를 이용하지 않는 것이 원칙이나 본 연구에서는 테러나 추가적인 재난 발생 상황도 포함할 수 있으므로 엘리베이터의 속도를 현재 운행되는 엘리베이터 속도인 0.5m/s로 지정하였다. 엘리베이터 속도에 따른 가속도는 $0.30m/s^2$ 와 같다. 최대 탑승 정원은 엘리베이터의 용량을 고려하여, 1회당 10명으로 산출하였다.

- 지하 층수 : 3층
- 총 엘리베이터 이동 거리 : 4.64m
- 엘리베이터 문 개폐 시간 : 25초
- 엘리베이터 1개 층 운행 시간 : 15초
- 엘리베이터 평균속도 : 0.30m/s
- 엘리베이터 최대속도 : 0.50m/s
- 엘리베이터 문 : 1100mm, 중심작동형
- 엘리베이터 최대 정원(N) : 10명
- t_d : 4.6, e : 0.05
- α : 0.1, γ : 0

6.2.1. 엘리베이터 출발시간(t_a)

엘리베이터 대피 출발시간은 “엘리베이터가 움직여서 왕복 이동을 시작하기 전까지의 시간”이다. 자동 엘리베이터의 경우 모든 엘리베이터가 대피층으로 이동된 후에 엘리베이터 대피가 시작된다고 가정한다. 이 경우 출발시간은 엘리베이터가 대피층으로 이동하는 시간과 탑승자가 엘리베이터에서 하차하는 시간의 합계이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$t_a = t_r + (t_u + t_d) (1 - \mu) \quad \text{----- (1)}$$

t_a : 가장 먼 층에서 대피층까지의 엘리베이터 이동시간(초)

t_r : 왕복 엘리베이터의 이동시간(초)

t_u : 대피자들이 엘리베이터를 떠나는 시간(초)

t_d : 엘리베이터 문이 한번 열리고 닫히는 시간(초)

t_s : 엘리베이터가 정지해 있는 시간(초)

μ : 총 이동 효율

수동 엘리베이터의 경우에는 엘리베이터 운전자가 화재 경보를 받는 시간과 경보를 받은 후 엘리베이터에 탑승하는 시간이 출발시간이 된다. 이 경우 식 (1)에 의해 계산된 출발시간보다 많이 증가할 수 있다.

일반적으로 엘리베이터의 문이 열리고 닫히는 시간 t_d 는 아래의 표와 같이 엘리베이터 문의 규격에 따라 달라진다. 또한, 문이 완전히 열리고 닫히기 전까지 엘리베이터는 출발할 수 없고, 도착 층 바닥에 레벨이 끼워지기 전까지 엘리베이터 문은 닫혀있다.

6.2.2. 엘리베이터 문의 개폐 시간(t_d)

엘리베이터 문의 개폐 시간은 아래의 표와 같이 문의 폭에 따라 달라지게된다. 문의 작동 시간은 대피 시간의 예측 및 산정에 큰 영향을 주는 변수이다. 엘리베이터의 문이 완전히 닫히거나 열리기 전까지는 대피자들이 출발할 수 없고, 엘리베이터 문이 완전히 열리기 전까지는 대피자들이 하차할 수 없다.

6.2.3 엘리베이터 대기시간(t_s)

대기시간은 엘리베이터가 도착할 때 문을 여닫는 두 번의 시간과 대피하기 위해 사람들이 엘리베이터에 탑승하는 시간, 엘리베이터에 하차하는 시간을 포함한다. 여기서 엘리베이터 배치에 따라 시간 효율이 달라지는데, 일반적인 엘리베이터 배치와 다른 배치한 엘리베이터 배치는 기본 효율 값(μ)을 증가시킨다.

$$t_s = (t_i + t_u + 2t_d)(1 + \mu) \quad \text{-----} (2)$$

t_i : 대피자가 엘리베이터로 탑승하는 시간

$$< \mu = \alpha + \epsilon + \gamma >$$

기본 이송 비효율 α 는 정지 가능성, 문 작동 시간, 문 정체 등 정체 현상을 고려하여 일반적으로 10%를 적용한다. 엘리베이터는 위치한 대수의 배치에 따라 효율이 달라지고, 기본 이송 값이 달라지게 된다. 너무 엘리베이터 간의 간격을 멀리 배치하면, 대피자 동선이 멀어질 수 있고, 대피자가 모두 탑승하지 않은 채로 엘리베이터를 지나 보내게 된다. 반면, 한 줄로 너무 많은 엘리베이터를 사용하는 것 역시 비효율성을 가지게 된다.

γ 는 대피자의 신체적 특성에 따라 엘리베이터 안에서 움직이는 시간의 차이가 발생하는데, 일반적으로 업무용 엘리베이터의 경우 γ 값은 0을 병원 엘리베이터와 같이 탑승자의 신체적 특징이 다양한 경우 0.05 값을 적용한다. 따라서 본 연구에서 사용되는 지하철 내 엘리베이터는 장애인과 일반 대피자가 같이 탑승하는 경우로 산정하므로, γ 값으로 0.05를 적용하였다.

대피자가 엘리베이터에 타는 시간 t_i 은 대피자 수 N 에 따라 달라진다. 대부분 엘리베이터는 대피 인원이 포화 상태로 탑승한 후에는 추가 인원이 탑승이 어렵고, 대피 인원이 충분하지 않을 때는 일부만 탑승한다. ASEM A17.1에 따르면 엘리베이터의 설계는 1인당 약 $0.14m^2$ 의 공간이 필요하다.

6.2.4. 엘리베이터 운행 시간

엘리베이터는 일반적으로 아래의 그림과 같이 움직이는 것을 알 수 있다. 우선 초기 속도가 증가하다가 등속도로 이동하고 이후 속도가 줄어든다. 감속 과정은 가속 과정과 같다. 초기에 가속 후, t_2 이후로는 등속도로 움직인다. 구체적으로 전이 가속도 및 전이 감속도 구간을 거쳐, 등속도 운동을 하게 된다

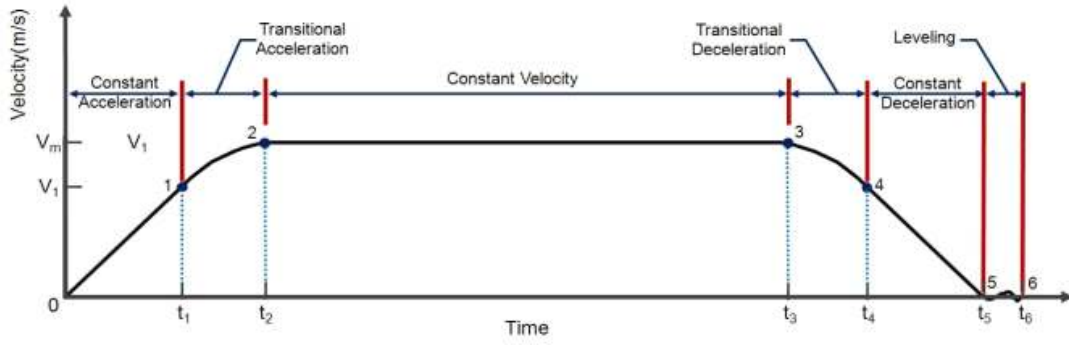


Figure 26. 시간에 따른 엘리베이터 속도 변화

다음의 식은 초기 속도에서의 소요시간으로 아래의 식 (t_1)과 같다.

$$t_1 = \frac{v_1}{a}$$

a : 가속도 [m/s^2]

v_1 : 속도 [m/s]

또한, 엘리베이터를 통한 소요시간에 따른 거리 산출은 다음 식과 같다. 등가속도 기간 중 이동 거리(S_1)는 다음 식과 같다.

$$S_1 = \frac{(v_1)^2}{2a}$$

전이 가속도에 도달하는 시간 t_2 는 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{(v_m)^2 - (v_1)^2}{2v_1a} + t_1$$

여기서 t_2 에 도달할 때 이동한 거리 S_2 는 다음 식과 같다.

$$S_2 = \frac{1}{3a} \left(\frac{v_m^3}{v_1} - v_1^2 \right) + S_1$$

엘리베이터가 완전히 멈춘 시간 t_5 에 레벨링이 맞닿는 시간인 t_k 을 추가하면 전체 엘리베이터의 소요시간 t_T 와 같다.

$$t_5 = 2t_2 + \frac{S_T - 2S_2}{V_m}$$

$$t_T = t_5 + t_k$$

여기서 레벨링이 맞닿는 시간은 약간의 정체가 발생하므로 $t_k = 0.5$ 초로 가정한다.

일반적으로 업무용 엘리베이터의 경우 운행속도가 약 1~9m/s이고, 가속도는 $0.6m/s^2$ 이다.

6.2.5. 엘리베이터 왕복 이동시간(t_r)

왕복 이동은 처음 대피 시점부터 시작된다. 왕복 이동은 엘리베이터 문이 닫히고 승강기가 이동한 후 승강기 문이 열리고 대피자가 탑승하고 다시 문이 닫혀 대피층으로 이동하고 문이 열려 대피자가 하차하는 순서로 이루어진다.

$$t_r = 2t_T + t_s$$

t_r : 왕복 이동 중 편도 이동 시간(초)

t_s : 대기시간(초)

여기서 승강기는 노약자 및 80세 이상의 노약자가 먼저 탑승하게 배치하는데, 5.1.에서 산정된 시뮬레이션 인원수에 따라 배치하였다. 여기에, 안암역에 운영되고 있는 3대의 엘리베이터 중 1대는 지하 2층에서 지하 1층을 거치지 않고 지상으로 바로 이동한다. 나머지 2대는 지하 3층에서 지하 2층으로 이동하는 것으로 설계되어 있다. 또한, 엘리베이터는 8인 이상으로 설계되고, 앞서 구한 정격 하중으로 탑승 인원 산출 시 약 10명의 인원이 1회당 대피한다고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 만약 대피자를 태우기 위해 한 층 이상 정지할 경우 식 (1)과 (2) 중에서 식 (2)를 기준으로 계산해야 하지만 본 연구에서는 1개 층으로만 엘리베이터가 이동하기 때문에 식(1)을 기준으로 (1)을 기준으로 계산하였다. 총 이동 효율에서는 엘리베이터가 대피 장소의 지하 1층과 지하 2층 모두에 멈추는 것을 반영해야 한다. 하지만 본 연구의 안암역의 엘리베이터는 지하 3층에서 2층의 한 층만 운행하므로, 이에 대한 고려는 필요하지 않다.

6.2.6. 총 대피 시간 계산

일반적으로 엘리베이터를 이용한 대피는 왕복 엘리베이터 이동시간, 대피자 수, SIP까지 이동 거리, 엘리베이터 효율 등에 따라서 달라진다. 이동 효율은 엘리베이터에 대피자가 엘리베이터 용량의 일부만 탑승할 경우 적용한다. 엘리베이터 수량은 안암역 지하철의 경우 2대가 설치되어 있으며, 엘리베이터의 고장 등은 이동 효율 등에서 고려하였으므로, 본 연구의 대피시간 산정 식에서는 제외하였다.

$$t_e = t_a + t_o + \frac{(1+\eta)}{J} \sum_{j=1}^m t_j$$

t_e : 대피 시간(초)

t_j : 엘리베이터 왕복 이동 시간(초)

t_a : 엘리베이터 대피 시작시각

t_o : 엘리베이터에서 SIP까지의 이동 시간(초)

J : 엘리베이터 수량(대)

η : 엘리베이터 이동 효율

이를 통해 근사적으로 재난 발생 시 엘리베이터를 통한 근사 대피시간을 산출할 수 있으며, 총 대피시간은 앞서 구한 근사 계산치의 합과 같다.

6.3 계단만 사용 시 대피시간

6.3.1. 중국 : GB50157(2013)_CFDOM (Code for Design of Metro)

$$T = 1 + \frac{Q_1 + Q_2}{0.9[A_1(N-1) + A_2B]} \leq 6 \text{분}$$

Q_1 : 열차 내 승객

Q_2 : 승강장 내 승객

A_1 : 자동 에스컬레이터의 처리 수용량

A_2 : 계단의 처리 수용량

1 : 반응 시간, 지하철 내의 비상경보 장치, 방송 시스템에 대한 반응 시간은 고정

N : 에스컬레이터 개수

B : 계단의 총 폭

- B3->B2

$$T = 1 + \frac{302}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 11.7 \right]} = 1.944 \text{ 분}$$

- B1->B2

$$T = 1 + \frac{199}{0.9 \left[\frac{9600}{60} \times 0 + \frac{3700}{60} \times 3.8 \right]} = 1.88 \text{ 분}$$

$$\therefore T = 1.944 \text{ 분}$$

6.3.2 미국 : NFPA 130 (2014)

$$T_{total} = T + W_p + \sum_{i=1}^N W_{N^i}$$

Table 29. B3->B2 대피 요소

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	11700	0.0555	649
에스컬레이터 (0)	0	0.0555	0

Table 30. B3->B2 이동 거리 및 대피 속도

이동 시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
승강장 T1 (일반인)	83.2	37.7	2.210
승강장 T1 (노약자)	83.2	30.0	2.773
B3->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B3->B2 (노약자)	4.64	11.6	0.400

- F_p (승강장 대피시간) = $321 \div 649 = 0.495$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T1 = 0.495 - 2.773 = 0.00$ 분
- 총 대피시간 = $T + W_p = 2.773 + 0.4 + 0.00 = 3.173$ 분

Table 31. B1->B2 대피 요소

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	3800	0.0555	210
에스컬레이터 (0)	3530	0.0555	195

Table 32. B1->B2 이동 거리 및 대피 속도

이동시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
B1 내의 이동시간 (일반인)	36.7	37.7	0.973
B1 내의 이동시간 (장애인)	36.7	30.0	1.223
B1->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B1->B2 (장애인)	4.64	11.6	0.400
B2 내의 이동 시간(일반인) / 개찰구 전	31.6	37.7	0.838
B2 내의 이동 시간(장애인) /개찰구 전	31.6	30.0	1.053
B2 내의 이동(일반인) / 개찰구 이후	17.2	37.7	0.456
B2 내의 이동(장애인) /개찰구 이후	17.2	30.0	0.573

- F_p (승강장 대피시간) = $199 \div (210+195) = 0.491$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.491 - 1.223 = 0.00$ 분
- F_b (개찰구 유동 시간) = $255 \div 400 = 0.638$ 분
- W_b (개찰구의 대기시간) = $F_b - F_p = 0.638 - 0.491 = 0.147$ 분
- 총 대피시간 = $T + W_p = 1.223 + 0.4 + 1.053 + 0.573 = 3.396$ 분

6.3.3 일본 “JIS Railway standards”

$$T_{total} = \sum t_i + T_{i-max^+}$$

- B3->B2 대피 소요시간

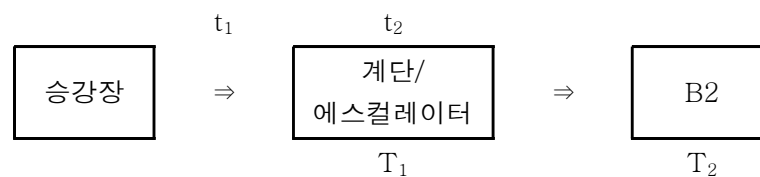


Table 33. B3->B2 대피 소요시간

대피 경로	t ₁ (초)	T ₁ (초)	t ₂ (초)	T ₂ (초)	필요 시간 (초)
A	132.8	20.5	26.1	20.5	199.9
B	90.0	20.5	26.1	20.5	157.1
C	90.0	25.6	26.1	25.6	167.3
D	166.4	18.9	45.5	18.9	249.7

- B1->B2 대피 소요시간

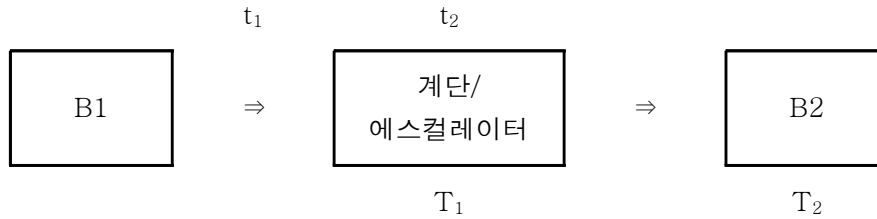


Table 34. B1->B2 대피 소요시간

대피 경로	t ₁ (초)	T ₁ (초)	t ₂ (초)	T ₂ (초)	t ₃ (초)	T ₃ (초)	t ₄ (초)	필요 시간 (초)
A	73.4	21.6	31.8	21.6	63.2	35.4	34.4	281.4
B	72.4	20.2	25.8	20.2	51.0			259.4

∴ SIP 위치가 B2일 때의 대피시간은 약 281.4초 (4.69분) 정도 소요된다.

6.4 계단, 엘리베이터 복합 활용 시 대피시간

6.4.1 엘리베이터(속도 : 0.5m/s) 대피시간

일반적으로 많은 수의 대피자들이 좁은 공간을 통과해야 하는 병목 구간에서는 정체 현상이 발생하기 쉽다. 따라서 본 연구에서는 Specific Flow(F)를 사용하여 보행 속도를 산출하였다.

- 탑승시간(t_i):

$$t_i = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4\text{초} + (10 - 4)\text{초} = 10\text{초}$$

- 하차 시간(t_u)

$$t_u = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4\text{초} + 0.6(10 - 4)\text{초} = 7.6\text{초}$$

- 대기시간(t_s)

$$t_s = (t_i + t_u + 2t_d)(1 + \mu)$$

$$= (10\text{초} + 7.6\text{초} + 2 \times 4.6\text{초})(1 + 0.15) = 30.82\text{초}$$

- 편도이동시간(t_5)

$$v_1 = 0.6 \times 0.5 = 0.3\text{m/s}$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \left(\frac{V_1}{a} \right) \\ &= \left(\frac{0.3}{0.3} \right) = 1.0\text{초} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(\frac{V_1^2}{2*a} \right) \\ &= \left(\frac{0.3^2}{2*0.3} \right) = 0.15\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_2 &= \left(\frac{V_m^2 - V_1^2}{2*V_1*a} \right) \\ &= \left(\frac{0.5^2 - 0.3^2}{2*0.3*0.3} \right) + 1.0 = 1.889\text{초} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= \left(\frac{1}{3a} \right) \left(\frac{V_m^3}{V_1} - V_1^2 \right) + S_1 \\ &= \left(\frac{1}{3*0.3} \right) \left(\frac{0.5^3}{0.3} - (0.3)^2 \right) + 0.15 = 0.513\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_5 &= 2t_2 + \frac{S_T - 2S_2}{v_m} \\ &= 2 \times 1.889 + \frac{4.64 - 2*0.513}{0.5} = 11.006\text{초} \end{aligned}$$

- 전체 승강기의 소요시간(t_T)

$$\begin{aligned} t_T &= t_5 + t_k \\ &= 11.006 + 0.5 = 11.506\text{초} \end{aligned}$$

- 왕복 이동시간(t_r)

$$\begin{aligned} t_r &= 2t_T + t_s \\ &= 2 \times 11.506\text{초} + 30.82 = 53.832\text{초} \end{aligned}$$

이를 통해 지하 3층에서 대피자가 엘리베이터에 탑승한 후 지하 2층에서 대피자가 엘리베이터에서 다시 하차하고, 지하 3층으로 이동한 1회 대피 소요시간은 약 53.832초이다.

6.4.2 엘리베이터(속도 : 1.0m/s) 대피시간

안암역 내의 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 운행되고 있으나, 건축설계 대사전 및 지하철 내의 엘리베이터 설계에 따르면 엘리베이터의 속도는 45m/분 ~ 60m/분, 즉 1.0m/s까지 지정될 수 있다. 따라서 엘리베이터와 계단을 복합 활용 시 엘리베이터의 속도를 0.5m/s, 1.0m/s 모두 계산하여 예상 대피시간을 계산하고자 한다. 다음의 식은 엘리베이터의 속도를 1.0m/s로 지정함에 따라, 계산된 예상 대피시간이다.

- 탑승시간(t_i):

$$t_i = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4 + 1 \times (10 - 4) = 10 \text{ 초}$$

- 하차 시간(t_u)

$$t_u = t_{dw} + t_{io}(N - N_{dw}) = 4 + 0.6 \times (10 - 4) = 7.6 \text{ 초}$$

- 대기시간(t_s)

$$t_s = (t_i + t_u + 2t_d)(1 + \mu) = (10 + 6.4 + 2 \times 4.6)(1 + 0.15) = 29.44 \text{ 초}$$

- 편도이동시간(t_5)

$$v_1 = \frac{0.6}{1} = 0.6 \text{ m/s}$$

$$t_1 = \frac{v_1}{a} = \frac{0.6}{0.4}$$

$$S_1 = \frac{(v_1)^2}{2a} = \frac{(0.6)^2}{2 \times 0.4} = 0.45 \text{ m}$$

$$t_2 = \frac{(v_m)^2 - (v_1)^2}{2v_1a} + t_1 = \frac{1^2 - (0.6)^2}{2 \times 0.6 \times 0.4} + 1.5 = 2.83 \text{ 초}$$

$$S_2 = \frac{1}{3a} \left(\frac{v_m^3}{v_1} - v_1^2 \right) + S_1 = \frac{1}{3 \times 0.4} \left(\frac{1^3}{0.6} - 0.6^2 \right) + 0.45 = 1.538 \text{ m}$$

$$t_5 = 2t_2 + \frac{S_T - 2S_2}{V_m} = 2 \times 2.833 + \frac{4.64 - 2 \times 1.539}{1} = 7.228 \text{ 초}$$

- 전체 승강기의 소요시간(t_T)

$$t_T = t_5 + t_k = 7.228 + 0.5 = 7.728 \text{ 초}$$

- 왕복 이동 시간(t_r)

$$t_r = 2t_T + t_s = 2 \times 7.728 + 29.44 = 44.896 \text{ 초}$$

∴ 따라서 승강기의 한 번 왕복 시간은 $v = 1m/s, a = 0.6m/s^2$ 기준, 대략 44.896초이다.

6.4.3 중국 : GB50157(2013)_CFDOM(Code for Design of Metro)

- B3->B2

$$T=1+\frac{302}{0.9\left[\frac{9600}{60}\times0+\frac{3700}{60}\times11.7\right]}=1.49\text{분}$$

- B1->B2

$$T=1+\frac{199}{0.9\left[\frac{9600}{60}\times0+\frac{3700}{60}\times3.8\right]}=1.94\text{분}$$

$$\therefore T=1.94\text{분}$$

6.4.4 미국 : NFPA 130 (2014)

- B3->B2

Table 35. 미국 Code에 따른 B3->B2 단위 수용량

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	11700	0.0555	649
에스컬레이터 (0)	0	0.0555	0

Table 36. 미국 Code에 따른 B3-> B2 대피시간

이동 동선	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
승강장 T ₁ (일반인)	83.2	37.7	2.210
승강장 T ₁ (장애인)	83.2	30.0	2.773
B3->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B3->B2 (장애인)	4.64	11.6	0.400

- F_p (승강장 대피시간) = $321 \div 649 = 0.495\text{분}$
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.495 - 2.773 = 0.00\text{분}$
- 총 대피시간 = $T + W_p = 2.773 + 0.4 + 0.00 = 3.173\text{분}$

- B1->B2

Table 37. 미국 Code에 따른 B1-> B2 단위 수용량

대피 요소	폭 (mm)	mm당 수용량 (p/mm*분)	수용량 (p/분)
계단 (4)	3800	0.0555	210
에스컬레이터 (0)	3530	0.0555	195
자동 개찰구	단위 수용량 = 50명/분		400

Table 38. 미국 Code에 따른 B1-> B2 대피시간

이동시간	거리 (m)	속도 (m/분)	시간 (분)
B1 내의 이동 (일반인)	36.7	37.7	0.973
B1 내의 이동 (장애인)	36.7	30.0	1.223
B1->B2 (일반인)	4.64	14.6	0.318
B1->B2 (장애인)	4.64	11.6	0.4
B2 내의 이동(일반인) : 개찰구 전	31.6	37.7	0.838
B2 내의 이동(장애인) : 개찰구 전	31.6	30.0	1.053
B2 내의 이동(일반인) : 개찰구 이후	17.2	37.7	0.456
B2 내의 이동(장애인) : 개찰구 이후	17.2	30.0	0.573

- F_p (승강장 대피시간) = $199 \div (210+195) = 0.491$ 분
- W_p (승강장 출구 대기시간) = $F_p - T_1 = 0.491 - 1.223 = 0.00$ 분
- $F_{\text{개}}$ (개찰구 유동 시간) = $255 \div 400 = 0.638$ 분
- $W_{\text{개}}$ (개찰구의 대기시간) = $F_{\text{개}} - F_p = 0.638 - 0.491 = 0.147$ 분
- 총 대피시간 = $T + W_p = 1.223 + 0.4 + 1.053 + 0.573 + 0.147 = 3.396$ 분

$$\therefore T = 3.396 \text{ 분}$$

6.4.5 일본 “JIS Railway standards”

- B3->B2

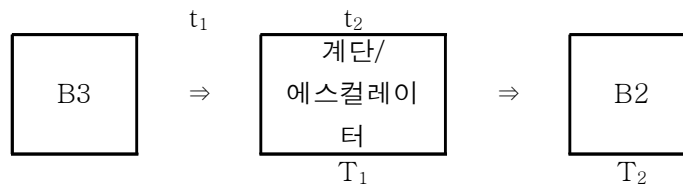


Table 39. 일본 Code에 따른 B3->B2 경로별 대피시간

대피 경로	t ₁ (초)	T ₁ (초)	t ₂ (초)	T ₂ (초)	필요 시간 (초)
A	66.3	19.2	21.3	19.2	126.0
B	45.0	19.5	21.3	19.5	105.3
C	45.0	24.0	21.3	24.0	114.3
D	83.2	17.7	28.2	17.7	146.8

- B1->B2

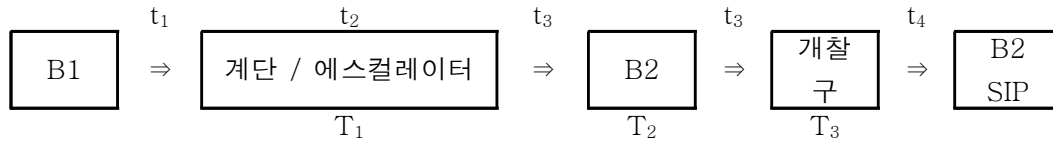


Table 40. 일본 Code에 따른 B1->B2 경로별 대피시간

대피 경로	t ₁ (초)	T ₁ (초)	t ₂ (초)	T ₂ (초)	t ₃ (초)	T ₃ (초)	t ₄ (초)	필요 시간 (초)
A	73.4	21.6	31.8	21.6	63.2	35.4	34.4	281.4
B	72.4	20.2	25.8	20.2	51.0			259.4

∴ T = 4.69분

6.5 대피시간 비교

6.5.1. 엘리베이터 대피시간

- 엘리베이터 속도 0.5m/s로 계산 시 : 약 3.080분 소요
- 엘리베이터 속도 1.0m/s로 계산 시 : 약 2.885분 소요

6.5.2. 총 예상 대피시간

Table 41. 국가별 설계 코드에 따른 대피시간 비교

국가	계단 (분)	계단 + 엘리베이터 속도 0.5m/s (분)	계단 + 엘리베이터 속도 1.0m/s (분)
중국	1.94	3.080	2.885
미국	3.396	3.396	3.396
일본	4.69	4.690	4.690

중국 코드는 대피 시 층과 층 사이의 대피시간만을 고려하며, 이에 따라 층 안에서의 대피시간을 계산하는 데에는 한계가 있다. 일본 코드는 대피경로에 따른 계산 방법이 더 자세히 제시되어 있다는 점에서 예상 대피시간이 다소 높은 값을 보였다. 여기에 미국과 일본 코드는 엘리베이터를 통한 이동보다 계단을 통한 시간이 더 지배적이므로, 총 대피시간에는 계단을 통한 대피시간이 반영된 것을 확인할 수 있다.

7. 시나리오에 따른 결과 비교

7.1 대피 시나리오 설정

현재 안암역에선 3대의 엘리베이터가 운영되고 있다. 본 연구의 목적은 실제 CBRE 상황 시 엘리베이터를 활용하여 각각의 시나리오에 따른 예상 소요시간을 산출하고자 한다. 앞서 계산한 안암역 엘리베이터의 평균속도, 최대속도는 각각 0.3m/s, 0.5m/s로 정해져 있지만, 건축설계 대사전 및 지하철 내의 엘리베이터 설계에 따르면 엘리베이터의 속도는 45m/분 ~ 60m/분으로 지정된다. 또한, EN81 1991에 따르면 엘리베이터 개폐 시간은 약 2 ~ 20초가량으로 설계되며, 최대 2초까지 단축할 수 있다고 규정하고 있다. 따라서 새로운 시나리오에서는 안암역 엘리베이터의 최대속도를 1.0m/s로, 개폐 시간은 2초로 설정하였다.

Table 42. 대피로 변수 설정

변수	내용
(1)	계단
(2)	엘리베이터 속도 0.5m/s : 2대 사용
(3)	엘리베이터 속도 1.0m/s : 2대 사용

Table 43. 시나리오에 따른 변수 설정

시나리오 번호	변수
A	(1)
B	(1), (2)
C	(1), (3)

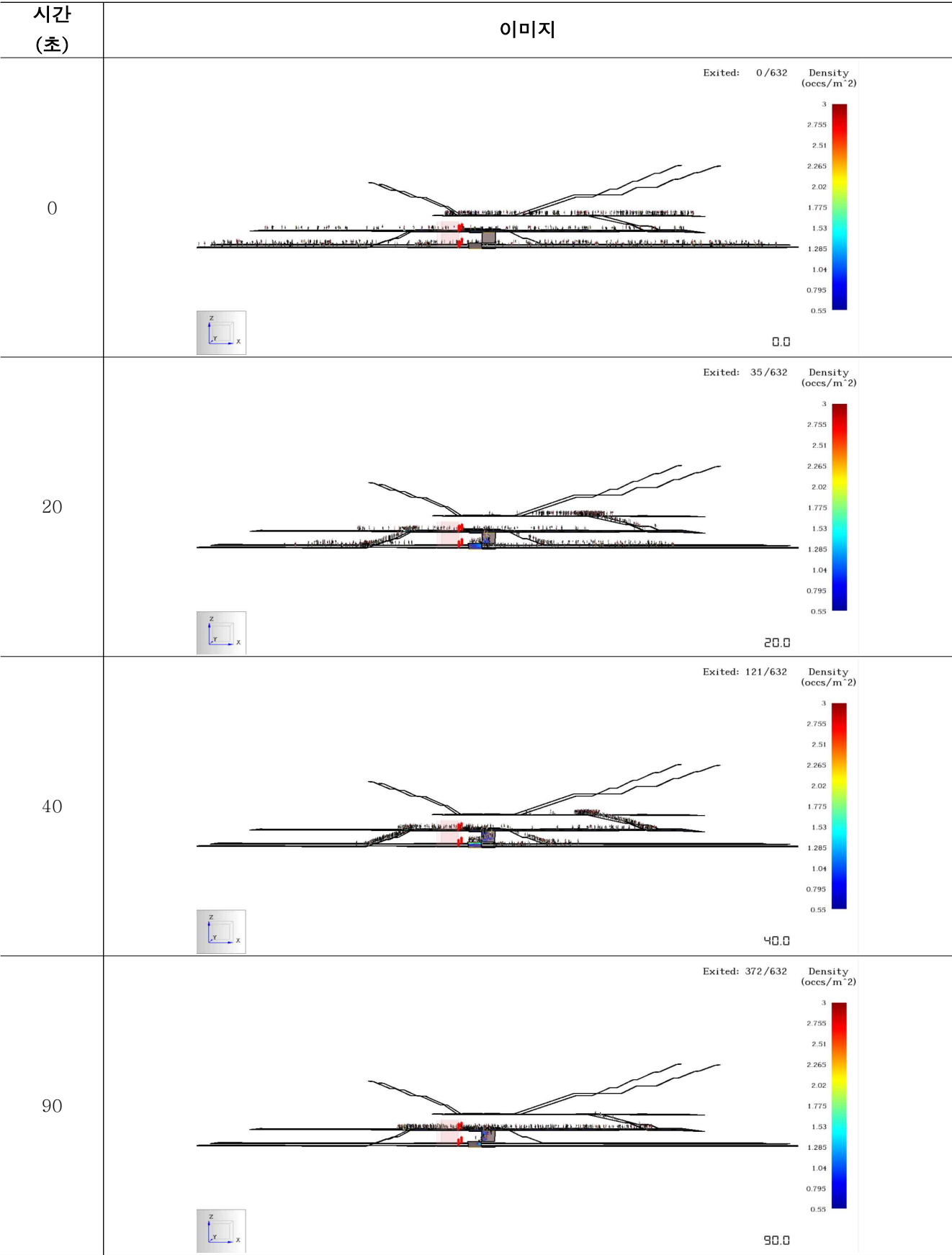
- 시나리오 A : 계단 + 엘리베이터 X
- 시나리오 B : 계단 + 엘리베이터 속도 : 0.5m/s
- 시나리오 C : 계단 + 엘리베이터 속도 : 1.0m/s, 개폐 시간 : 2초

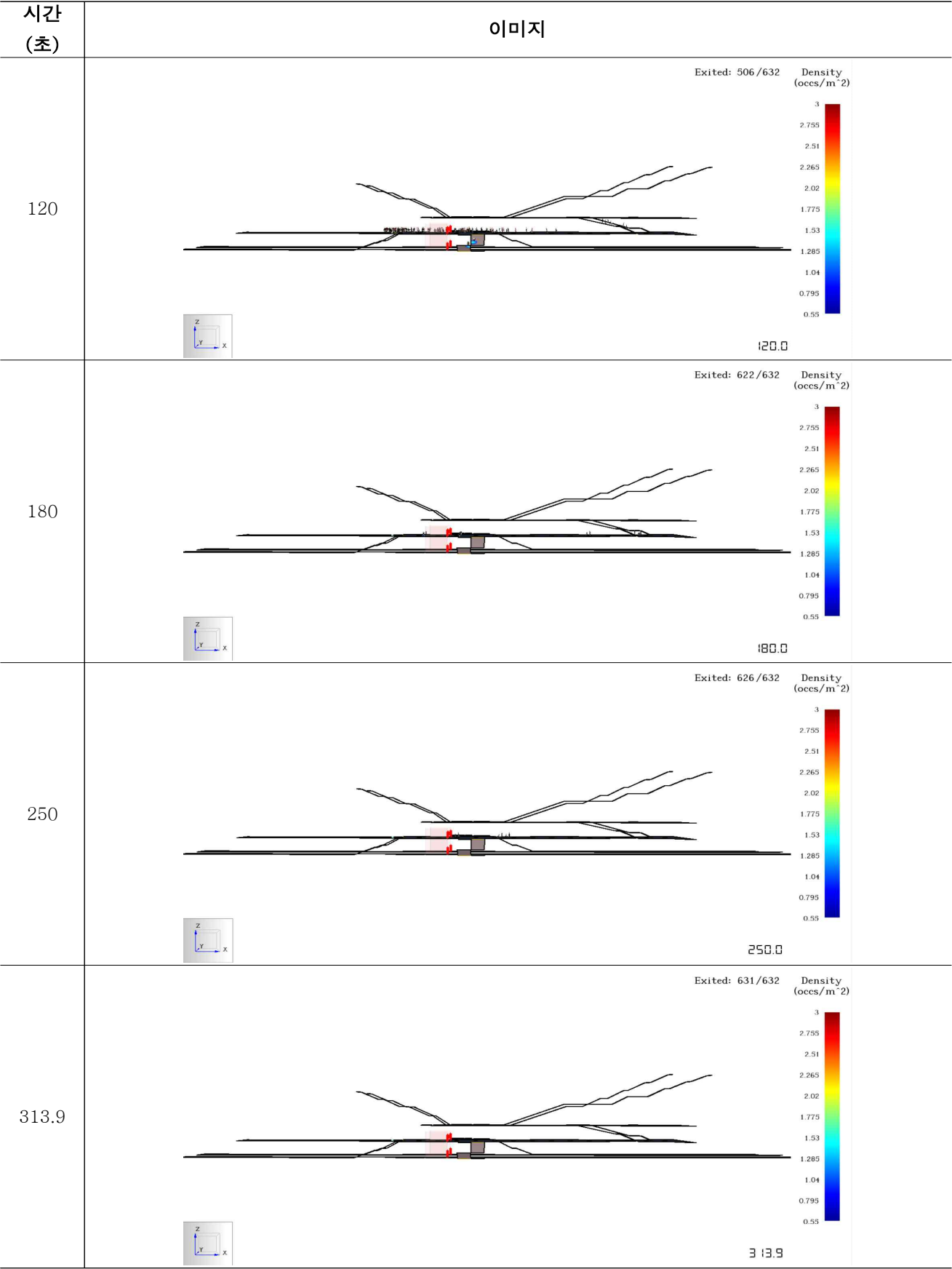
7.2 시뮬레이션 결과

7.2.1. 시나리오 A

시나리오 A는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 모든 대피자들이 이동하는 것으로 시뮬레이션하였다. 이때 시뮬레이션은 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 색상은 단위 시간당 밀도를 표현하여 보행자의 이동에 따른 정체 현상을 맨눈으로 확인할 수 있다. 이때 시나리오 A는 엘리베이터를 이용하지 않고 계단 및 에스컬레이터로만 지정된 SIP으로 이동하는 것으로 하였다.

Table 44. 시나리오 A에 따른 대 피시간





전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 313.9초이고, 평균 79.7초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 146.0m, 평균 이동 거리는 75.5m로 나타났다. 여기서 휠체어를 통한 이동은 대피 초기에 정체 현상을 만들어 전체적인 대피시간을 늘릴 뿐만 아니라 최소 대피시간은 145.4초로 이에 대한 고려가 필요하다.

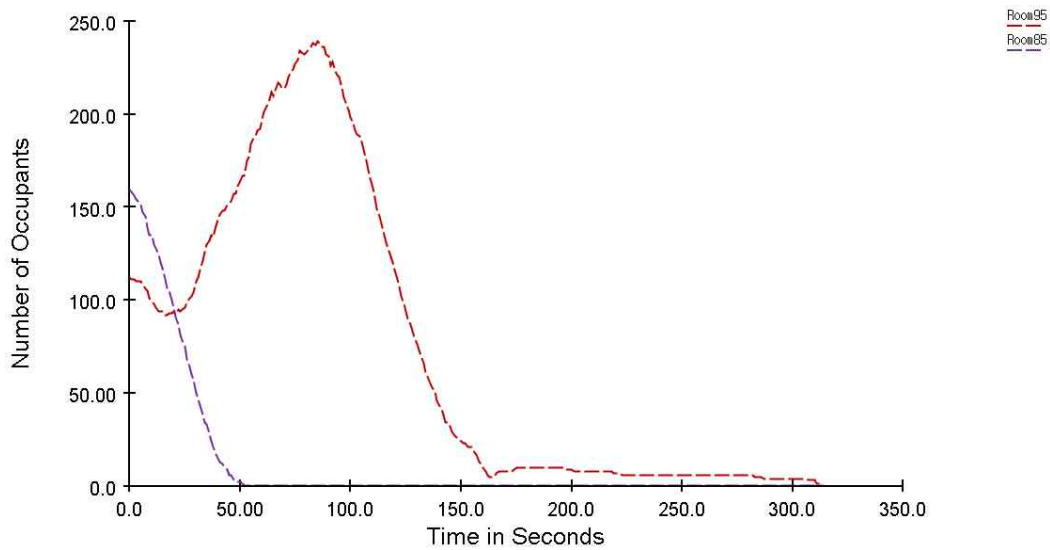


Figure 27. 시나리오 A의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

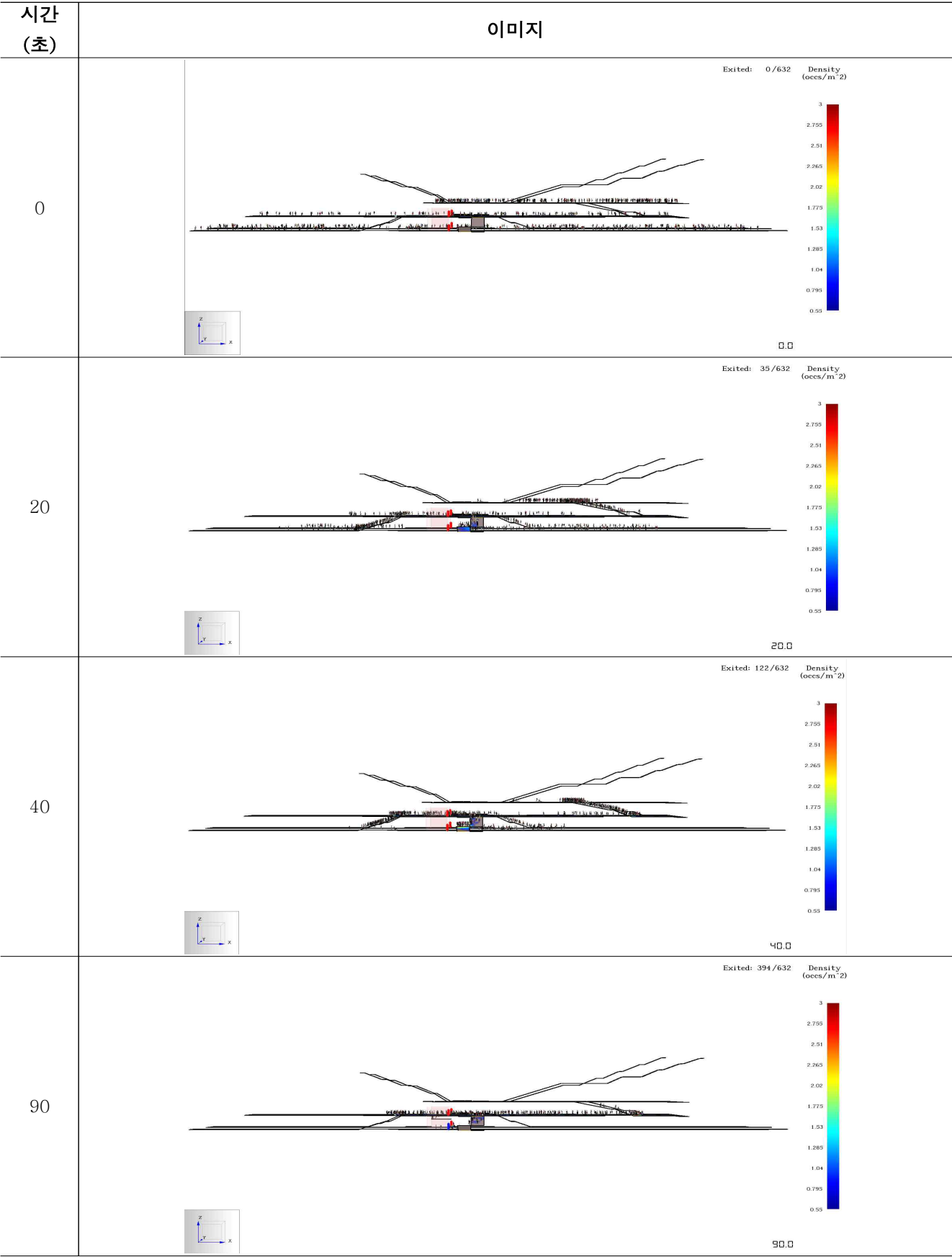
SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***			
Simulation:	SIP(B2) ELE(x)		
Version:	2020.1.0219		
Mode:	Steering		
Total Occupants:	625		
Completion Times for All Occupants (s):			
Min:	1.0	"00260"	
Max:	313.9	"00011"	
Average:	79.7		
StdDev:	43.0		
Travel Distances for All Occupants (m):			
Min:	0.6	"00260"	
Max:	146.0	"00143"	
Average:	75.5		
StdDev:	36.2		

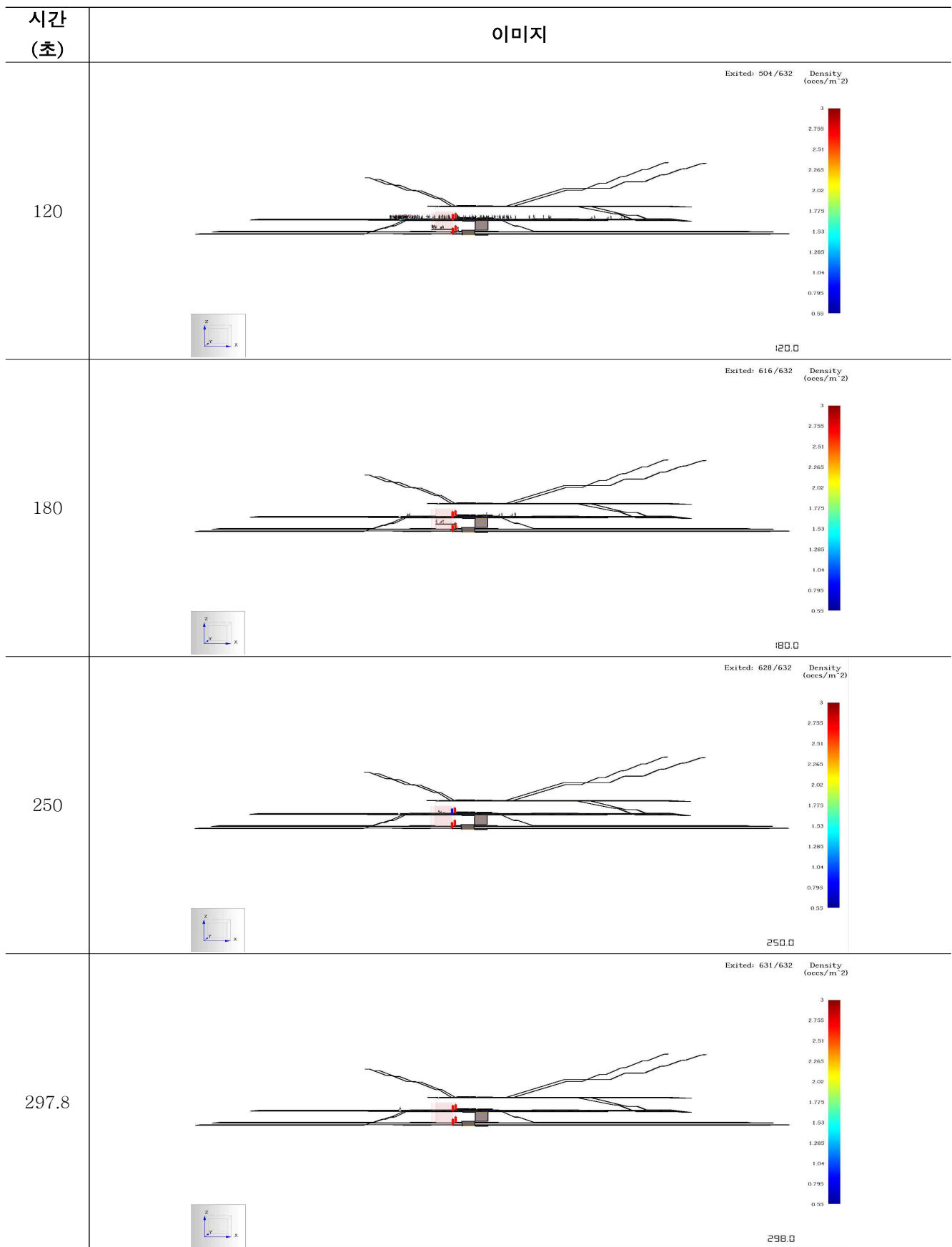
Figure 28. 시나리오 A에 따른 시뮬레이션 결과

7.2.2. 시나리오 B

시나리오 B는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로 하였다. 이때 시나리오 A와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 0.5m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였다.

Table 45. 시나리오 B에 따른 대피시간





전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 297.8초이고, 평균 79.6초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 156.1m, 평균 이동 거리는 76.0m로 나타났다. 엘리베이터의 낮은 이동 속도에도 불구하고 최대 대피시간은 시나리오 A 대비 약 5.13% 정도 최대 대피시간은 줄어든 것을 알 수 있다. 이를 통해, 엘리베이터의 속도를 건축설계 기준 및 지하철 내 엘리베이터 설치 속도로 고려하여 대피를 고려한다면 CBRE 상황 발생 시 빠른 대피가 가능할 것으로 판단된다.

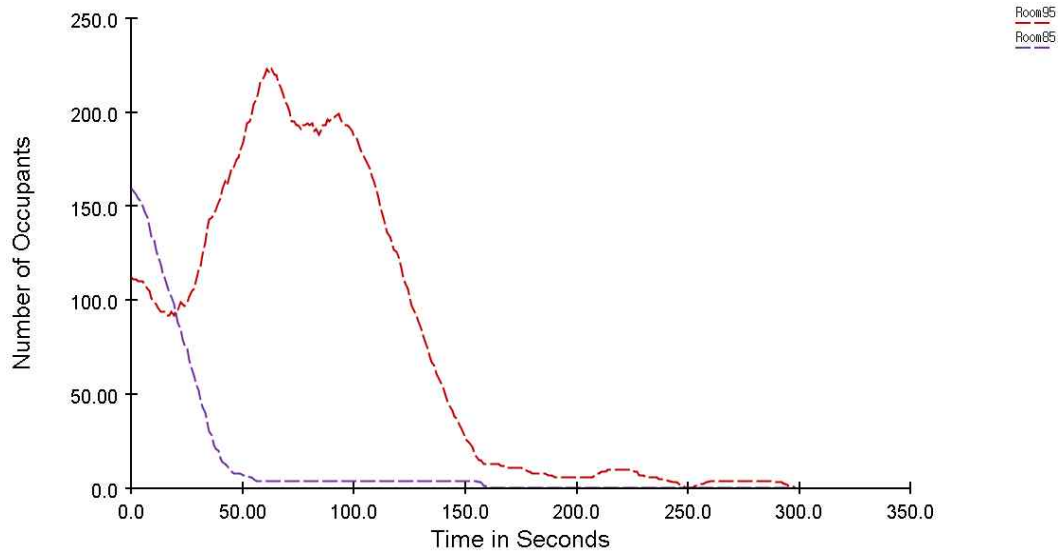


Figure 29. 시나리오 B의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

```

***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***
Simulation:      SIP(B2) ELE-0.5
Version:         2020.1.0219
Mode:           Steering
Total Occupants: 625

Completion Times for All Occupants (s):
Min:            1.0      "00260"
Max:            298.0    "00002"
Average:        79.6
StdDev:         45.0

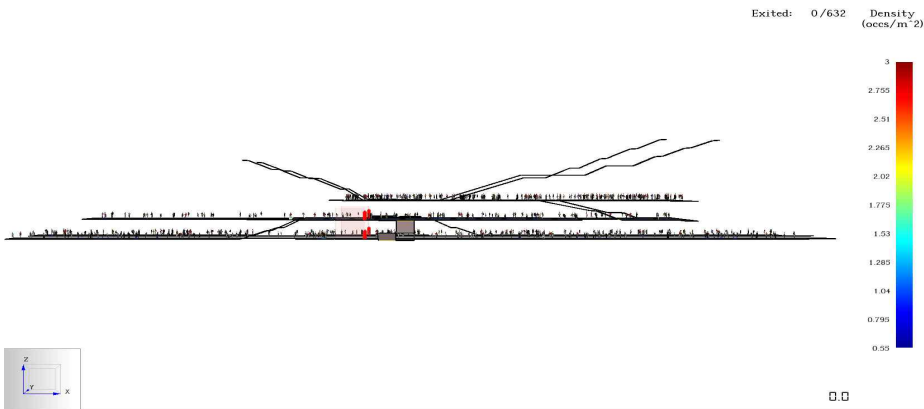
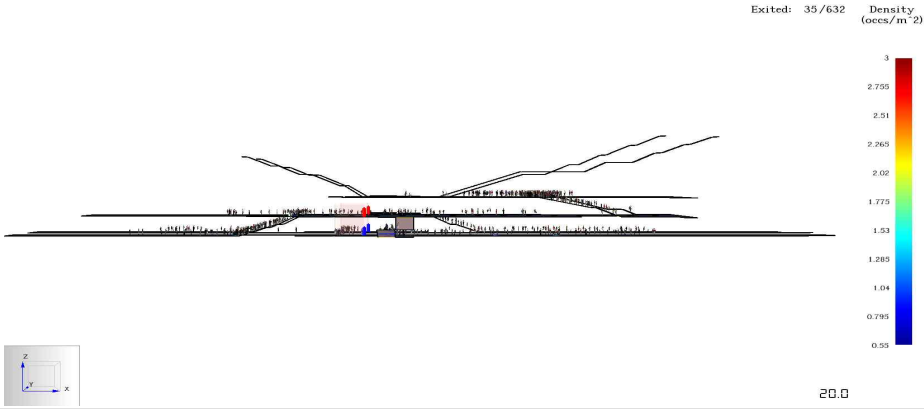
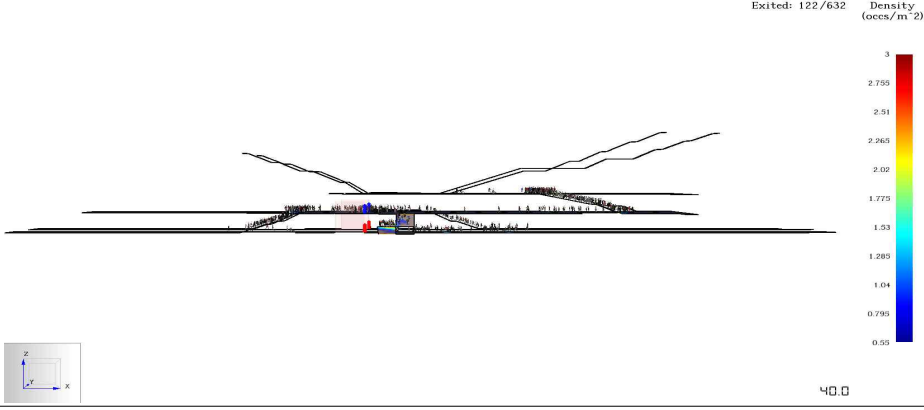
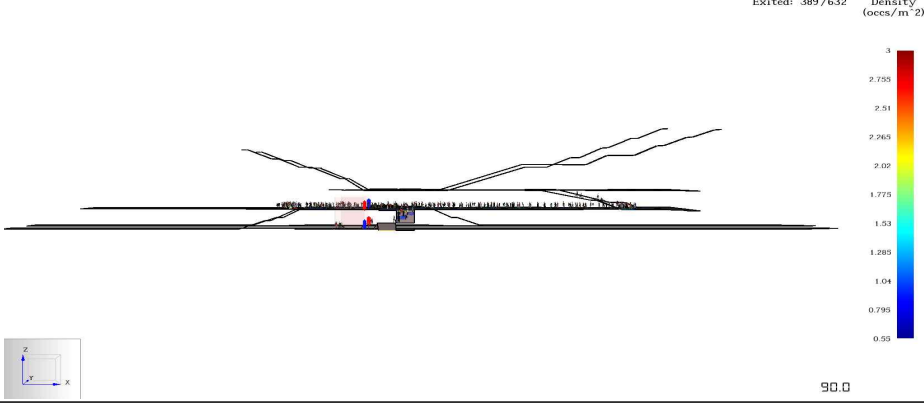
Travel Distances for All Occupants (m):
Min:            0.6      "00260"
Max:            156.1    "00143"
Average:        76.0
StdDev:         36.1
  
```

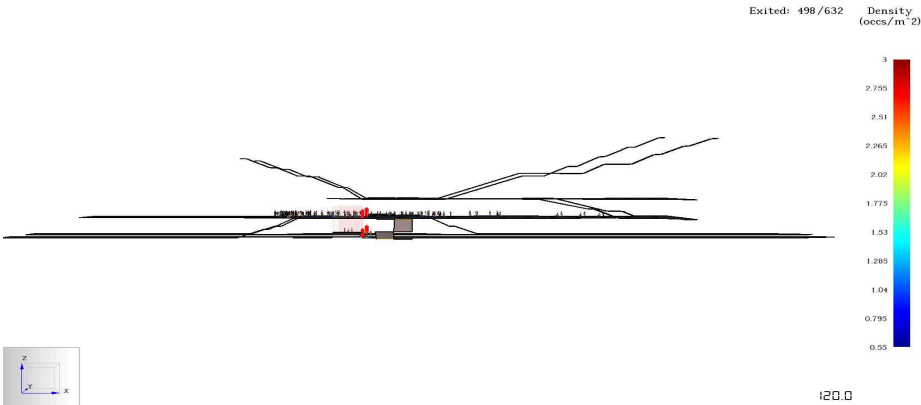
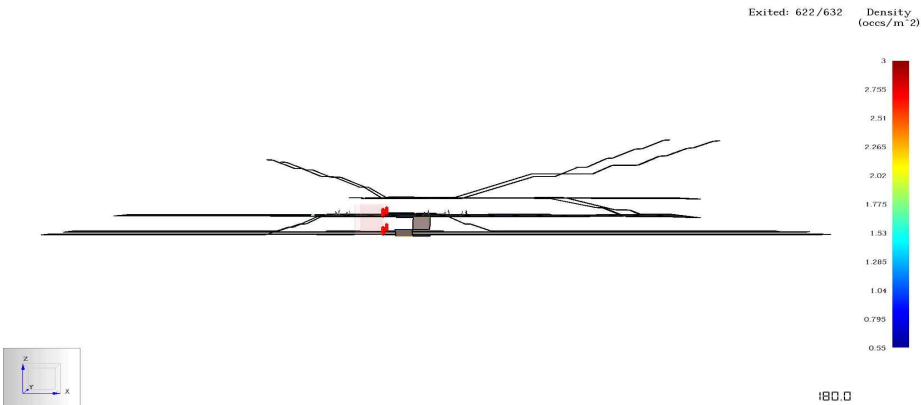
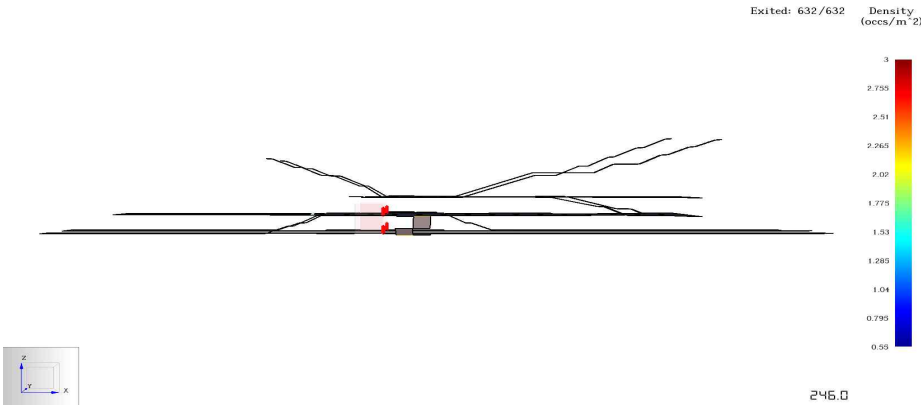
Figure 30. 시나리오 B에 따른 시뮬레이션 결과

7.2.3. 시나리오 C

시나리오 C는 지하 3층 및 지하 1층의 인원을 지하 2층의 SIP으로 엘리베이터, 계단, 에스컬레이터를 이용하는 것으로 하였다. 이때 시나리오 A, B와 마찬가지로 주요 시간대에 이미지를 캡처하였고, 엘리베이터의 속도는 1.0m/s로 지정하여 80대 이상의 인구와 장애인이 탑승하는 것으로 하였다.

Table 46. 시나리오 C에 따른 대피시간

시간 (초)	이미지
0	
20	
40	
90	

시간 (초)	이미지
120	
180	
246.4	

전체 결과를 확인하면, 최소 대피시간은 1초, 최대 대피시간은 246.4초이고, 평균 78.3초가 소요되었고 이동 거리는 최소 이동 거리가 0.6m, 최대 이동 거리는 141.8m, 평균 이동 거리는 75.3m로 나타났다. 엘리베이터의 향상된 이동 속도로 최대 대피시간은 시나리오 A, 시나리오 B에 대비 각각 21.50%, 20.86% 줄어든 것을 알 수 있다. 이를 통해, 엘리베이터의 속도를 건축설계 기준 및 지하철 내 엘리베이터 설치인 1.0m/s 속도로 고려하여 대피를 고려한다면 CBRE 상황 발생 시 빠른 대피가 가능할 것으로 판단된다.

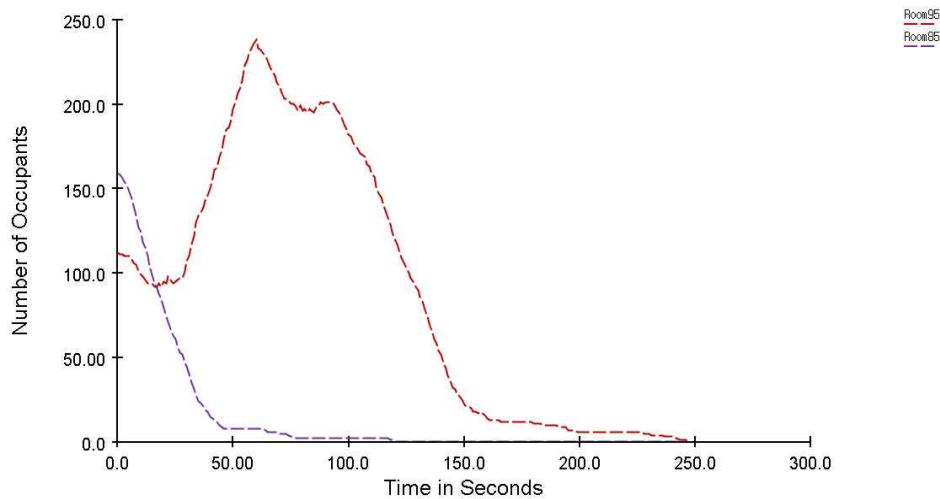


Figure 31. 시나리오 C의 시간에 따른 Room 85, Room 95 재실자 수

SUMMARYSUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***

Simulation:	SIP(B2) ELE-1	
Version:	2020.1.0219	
Mode:	Steering	
Total Occupants:	625	
Completion Times for All Occupants (s):		
Min:	1.0	"00260"
Max:	246.4	"00011"
Average:	78.0	
StdDev:	41.6	
Travel Distances for All Occupants (m):		
Min:	0.6	"00260"
Max:	140.4	"00145"
Average:	75.2	
StdDev:	36.2	

Figure 32. 시나리오 C에 따른 시뮬레이션 결과

7.3 시뮬레이션 결과 비교

엘리베이터 이용 대수에 따른 대피자 전원이 SIP으로 이동하는데 필요한 시간은 다음과 같다. 위의 상황은 소요시간 비교를 위하여, 동일한 조건에서 보행자를 무작위로 배치하였으며, 산정된 휠체어 인원수를 지하 3층, 지하 2층, 지하 1층에 배치하였다. 시뮬레이션 결과 엘리베이터 유무에 상관없이 평균 대피시간은 모두 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 하지만, 총 대피시간은 시나리오 A, B, C는 각각 313.9초 (5.23분), 297.8초 (4.96분), 246.4초 (4.10분) 가 소요되었다. 이는 엘리베이터의 속도 및 개폐 시간의 변경 시, 대피시간은 시나리오 A, 시나리오 B에 대비 각각 21.50%, 17.26% 향상된 것을 알 수 있다. 이를 통해 평균 대피시간에서는 엘리베이터의 유무보다는 대피로의 배치 또는 계단을 통한 대피가 지배적이지만, 재난 발생 시 노약자 또는 장애인의 신속한 대피를 고려한다면 엘리베이터의 속도가 1.0m/s 이상 설계하여야 대피시간 단축 효과가 우수한 것을 알 수 있다.

표 48에 따르면, 한국 규정 ‘도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)’와 미국 규정 ‘NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System’에서는 역사 내 화재, 지진, 테러 등 재난 상황 발생 시 플랫폼에 있는 재실자들은 4분 이내에 플랫폼 밖으로 대피하도록 규정하고 있으며, 역사 내 가장 먼 출발지점에서 역 밖 및 대피 시설까지 6분 이내로 대피하도록 규정고 있다. 본 연구에서 진행한 시나리오 A, B, C의 경우 대피 시설까지 대피 시간은 모두 6분 이내로 만족하고 있으나, 상기 두 규정에서는 포괄적인 재난 및 대피 시간을 정의한 단점이 있다. 하지만, 대피 시설에 관한 미국 규정 중 물리적 테러와 같은 재난 상황에서 대피 시설에 관한 규정 ‘FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters’에서는 대피 시설까지 5분 이내로 대피하도록 규정함. 따라서 계단만 사용하여 대피한 시나리오 A의 경우 5분을 초과함. 반

면에 계단과 엘리베이터를 함께 사용하여 대피한 시나리오 B, C만 이 기준을 만족한다. 이어 재난 상황 발생 시 엘리베이터 사용이 필요함을 알 수 있다. 결과적으로, 물리적 테러 발생 시 역사 내 대피 시설로 대피할 때 엘리베이터를 사용하면 대피 시간을 감소할 수 있으며, 한국과 미국의 대피 시간에 관한 규정에 모두 만족함.

따라서 본 연구에서는 CBRE 상황 시 지하철 역사에서 대피경로로 엘리베이터를 활용하는 것과 엘리베이터의 운행속도를 건축설계 대사전에 제시하고 있는 1.0m/s로 활용하는 것을 제안한다.

Table 47. 시나리오에 따른 대피시간

시나리오		평균 대피시간 (초)	최대 대피시간 (초)
A	계단 + 엘리베이터 X	79.7	313.9
B	계단 + 엘리베이터 0.5m/s	79.6	298.0
C	계단 + 엘리베이터 1.0m/s	78.0	246.4

Table 48. 국내외 재난 발생 시 대피 시간에 관한 규정

국가	구분	출발지	도착지	ASET (피난요구시간)	재난 종류
한국	도시철도 정거장 및 환승 편의 시설 설계 지침(2018)	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	역 밖 출구	6.0 분	
미국	NFPA 130	플랫폼 역사	플랫폼 출구	4.0 분	화재, 지진, 테러 등
		가장 먼 출발지점	안전한 구역까지	6.0 분	
미국	FEMA 453	-	대피 시설	5 분	화재, 지진, 테러 등
일본	Handbook of Tsunami Evacuation Planning	-	대피 시설	3-5 분	지진

※ NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems

※ FEMA 453 - Safe Rooms and Shelters

8. 결론

본 가이드라인에서는 지하철 역사 내에서 CBRE 상황 발생을 가정하고, 재실자들의 신속한 대피를 위하여 엘리베이터 변수에 따라 예상 대피 소요시간을 산출하고, 개선안을 제시하였다.

개선안은 기존의 지하철 역사 내의 엘리베이터의 속도 및 개폐 시간이 매우 느리므로, 대피용 엘리베이터의 건축설계 기준 규정에 따라 기존 0.5m/s이던 속도를 1.0m/s로 변경하였다. 또한, 엘리베이터 개폐 시간을 EN81-70 기준에 따라 2초로 줄인 후 대피 시뮬레이션을 진행하였다. 재난 상황 발생 시 장애인 또는 노약자들의 신속한 대피를 위해 본 가이드라인에서는 지하철 내에서 계단뿐만 아니라 엘리베이터를 동시에 활용하여 대피 시뮬레이션을 진행하여 예상 대피 소요시간을 구하였다. 먼저 국가별 설계 코드에 따른 예상 소요시간을 계산하였으며, 이를 Pathfinder 프로그램을 통해 산정된 결과와 비교하였다. 대피시간 계산을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 일본의 설계식에 따른 예상 대피시간은 경로에 따른 정체 현상 및 동일한 층에서의 이동 거리를 고려하여 대피시간을 계산한 점에서 대피시간이 가장 크게 나왔다.

둘째, 엘리베이터의 속도 및 개폐 시간을 개선 시, 계단만을 통한 대피보다 약 21.50% 최대 대피시간이 줄어들었다.

셋째, 노약자의 엘리베이터를 통한 대피는 보행자의 단위 시간당 흐름을 개선하여, 대피 시 정체 현상이 줄어들었다.

넷째, Pathfinder를 통한 대피 예상 소요시간은 국가별 설계기준에 따른 대피시간보다 더 높은 값을 나타내었다. 이는 Pathfinder 프로그램에서는 극한 상황에서의 대피자들 간의 병목, 정체, 패닉 현상 등을 효과적으로 반영하였기 때문이라 판단된다.

외부 테러 발생 시 지하철 내에서의 SIP까지의 안전한 이동을 위해 본 가이드라인에서는 기존 문헌 분석 및 Pathfinder 프로그램을 활용한 대피 시뮬레이션을 통해 엘리베이터를 활용한 예상 소요시간을 산출하였다. 지하 공간이 점점 넓어지고, 깊어짐에 따라 엘리베이터를 통한 대피의 중요성이 늘어나는 추세이다. 이러한 상황에서 만일 엘리베이터의 위치 및 속도 향상 시 예상 대피 소요시간은 줄어들 뿐만 아니라 계단만을 이용한 대피 방법이 가지는 한계점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

1. Armm., E and Ros, S.H, “Emergency Evacuation Elevator Systems Guideline”, 2004
2. ASME, “American Standard Safety Code for Elevator, Escalators, Dumbwaiters and Moving alks”, A17.1(1987).
3. Cha, J.H, “Elevator Evacuation Studies Using a Computer Program,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 11, 2012, pp.5525-5533.
4. Choi J.H., Galea E.R., Hong WH., “Individual Stair Ascent and Descent Walk Speeds Measured in a Korean High-Rise Building”, *Fire Technology*, Vol. 50, 2014, pp.267-295.
5. Choi J.H., Hwang, H.S., and Hong, W.H., “Designing an Evacuation Simulator for a High-rise Building Considering an Egress Elevator,” *Journal of Architectural Institute of KOREA*, Vol. 26, No. 2, 2010, pp.87-94.
6. Choi, J.H and Shin, S.J, “Proposal for Evacuee Guidance of Cloud-based Elevator System in Emergency Situation”, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 15, No. 1, 2015, pp.269-276.
7. FEMA 453, “Risk Management Series, Design Guidance for Shelters and Safe Rooms”, 2006.
8. Galea, E.R, Building EXODUS V.4.06 “User Guide and Technical Manual”, *Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich*, 2006.
9. Hwang, H.S., Choi, J.H., Jeon, G.Y., and Hong, W.H., “A Measurement of Maximum Flow-density through the Egress Elevator for a Design of the Evacuation Model,” *Journal of Architectural Institute of KOREA*, Vol.26, No.12, 2010, pp.313-322.
10. IES. Simulex User Guide, “Evacuation Modeling Software”, *Integrated Environmental Solutions, Inc.* 2006.
11. International Code Council “International Building Code” 2000 edition.
12. Jeffrey S. Tubbs, Brian J. Meacham, Egress Design Solution, *ARUP, Wiley*, 2007.
13. John H.K and Daniel, M. A, “Routine for Analysis of the People Movement Time for Elevator Evacuation”, *NIST*, 1992, pp.3-12.
14. Kim, H.J., Lee, S.H., and Hong, W.H., “Sensitivity Analysis on the Staircase Evacuation Time for Occupant Input Attributes of Evacuation Simulation Tools - Focused on SIMULEX, Building EXODUS, Pathfinder,” *Journal of Architectural Institute of KOREA*, Vol. 29, No. 11, pp.319-326.
15. Kim, H.J and Park, Y.H, “A Study on the Consideration Factors for the Calculation of Elevator Evacuation Time,” *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 1, 2010, pp.8-14.
16. Kuligowski, E, “Design of Occupant Egress Systems for Tall Buildings”, *International Conference CIB*, 2004
17. NFPA 5000, “Building Construction and Safety Code”, 2006, pp.178-179.
18. Park, B.J and Lee, K.H, “A Study on Evacuation Performance for Various Subway Station Categories during Acts of Terror or Fires,” *Journal of Architectural Institute of KOREA*, Vol. 28, No. 10, pp.73-82.
19. Park, D.O “An Efficiency of Elevator Evacuation in High-Rise building” *Kwangwoon University*, Master's Thesis, 2007.
20. Peter Thompson, IES - Simulex User Guide, 2003.
21. SFPE Engineering guide : Human Behavior in Fire, SFPE, *Society of Fire Protection Engineers*, Massachusetts, USA, 2003.
22. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(Third Edition), *National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts and Society of Fire Protection Engineers Bethesda, Maryland*, 2002.
23. Strakosch, G.R. “Vertical Transportation: Elevator and Escalators”, 2nd Edition. Wiley & Sons, 1983.
24. Thunderhead Engineering, Technical Reference Manual for Pathfinder, 2012
25. John H. Klote and Daniel M. Alvord, “Routine for Analysis of the People Movement Time for Elevator Evacuation”, *NIST*, 1992 pp.3-12.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.