지하공간의 특징을 고려한 도심지 대규모 지하공간의 활용과 구상 사례

글 장수호 / 한국건설기술연구원 스마트건설지원센터장, 선임연구위원 / **전화** 031-910-0661 / **E-mail** sooho@kict.re.kr

1. 머리말

급격한 도시화와 산업화는 생태계와 환경을 오염시키고 인간의 생활환경을 훼손하고 있으며 지속가능한 발전의 걸림돌이 되고 있다. 따라서 미래 세대들의 생활공간을 훼손하지 않고 각종 자원들을 깨끗하고 효율적으로 사용하는 것이 현재 우리 세대의 책임이라고 할 수 있다.

공간적인 측면에서도 지구 환경을 훼손하지 않으면서 에너지와 자원 소비를 최소화할 수 있고, 92억명(2050년 기준, UN추정)의 인류가 쾌적하게 생활할 수 있는 새로운 공간이 요구되고 있다. 지상공간 이외에 우리가 미래에 이용할 수 있는 신공간, 즉 뉴프론티어공간(New Frontier Space)은 지하공간, 해양공간 그리고 우주공간으로 요약할 수 있다. 그러나 해양공간과 우주공간은 아직까지 기술적인 한계로 인해 가까운 미래에도 본격적으로 인간의 거주공간이나 산업시설 등으로 활용하기는 어려울 것이다. 또한 건설비용, 이동수단 등에 있어서도 현실적인 한계가 있다. 해양공간의 경우에는 태풍, 파도, 해저 지진 등 자연재해에 대한 안전이 우려되며, 우주공간에서는 산소와 물의 공급, 태양광과 같은 우주 방사선에 대한 안전 등의 문제가 있다.

그렇다면 지속가능한 발전을 위한 지하공간의 미래 역할은 무엇일까? 국제터널지하공간협회(ITA)의 회장을 역임한 하비 파커(Harvey Parker)는 다음과 같이 지하공간의 미래 역할을 제시하였다(Roberts, 1996).

- 기존의 지상시설들을 지하로 옮긴다면 가용할 수 있는 지상공간을 2배 이상 증가시킬 수 있다. 예를 들면, 도시면적의 1/3 정도가 지하 30m 깊이까지 들어가면 기존 지상공간과 동일한 공간을 확보할 수 있다.
- 지진에도 지하의 안전이 충분히 검증되었음으로, 안전한 도시 라이프라인을 구축하고 싶다면 터널을 만드는 것이 좋다.
- 지하공간은 방사성 폐기물을 저장할 수 있는 지구상에서 유일하게 안전한 공간이다. 기타 유독성 폐기물 등을 저장하기에도 좋다. 지하 터널에 의해 안전하고 친환경적이며 매우 빠르고 도시의 미관을 훼손하지 않는 교통시스템을 구축할 수 있다. 터널은 깨끗한 물을 도시로 제공하고 폐수를 외부로 운송하는 매우 중요한 역할을 한다.
- 산업시설, 오피스시설, 그리고 거주 목적으로도 지하공간 활용 사례가 증가하고 있다.
- 전세계적으로 식품, 액체류, 가스류 등의 대량 저장을 위한 지하공간 시설들이 널리 활용되고 있다.
- 과거와 비교했을 때, 지하공간 활용에 따라 도시의 교통정체가 크게 감소하고 있다.

터널을 비롯한 지하공간 시설은 우리가 생각하는 것 이상으로 이미 다양하게 활용되고 있다. 특히, 도시 지역일수록 지하공간의 필요성이 더욱 높다. 특히, 인구의 대다수가 매우 제한적인 도시공간에 살고 있으며 앞으로도 그러할 것이기 때문에(2050년 기준, 전 세계 및 우리나라의 도시 거주비율은 각각 70% 및 90%, UN 추정), 도시공간을 지속가능하게 이용하고 개발하기 위해 지하공간의 활용은 필수적이다. 다만, 입지적인 특성 상 지하비축기지, 지하 발전소 등과 같은 특수 목적의 시설들은 지역적으로 반드시 도시 지역에 국한되지 않는다.

지하공간은 현재뿐만 아니라 과거에도 인류 역사에서 널리 활용되어 온 공간이기 때문에 새로운 공간이라고 할 수 없을지 모른다. 대표적으로 터키의 유명한 관광 명소인 카파토키아(Cappadocia)는 화산석의 일종인 응회암 지대에 만들어진 일종의 지하도시로서 일부는 약 4,000년전인 히타이트(Hittite) 시대까

지 거슬러 올라가며 수만 명이 최대 6개월까지 거주가 가능했다고 한다(한국터널지하공간학회, 2012).

그러나 지하공간이 가지고 있는 각종 장점들을 이용하는 새로운 개념의 지하공간 활용 방안들이 계속해서 제시되고 있다. 또한 기술 발전으로 인해 우리가 경제적으로 이용할 수 있는 지하공간의 깊이가 더욱 증가하고 있다. 이러한 측면에서 지하공간을 지속가능한 발전의 일환에서 신공간으로 볼 수 있을 것이다.

본 고에서는 이상과 같은 지하공간의 특징과 장·단점을 살펴보고, 도심지 대규모 지하공간의 활용과 구상 사례들과 더불어 새로운 지하공간 개발의 대안이 될 수 있는 격자형 지하공간 건설공법을 간략하게 소개하고자 한다. 특히, 이미 활발히 활용되고 있는 선형적인 터널 인프라들을 제외하고, 입체적이고 평면적인 대규모 지하공간 시설들을 집중적으로 다루고자 한다.

2. 지하공간의 특징과 활용 현황

지하공간은 밀폐된 공간 특성으로 인해 심리적 불안감을 일으킬 수도 있으나, 지진에 매우 안전하며 단열성, 화학적 안전성, 차광성 등과 같은 많은 장점들을 가지고 있어 이를 활용한 지하공간 시설들이 만들어지고 있다([그림 1]참조). 와인 저장고 등의 소규모 시설뿐만 아니라, 지하유류비축기지, 방사성폐기물 처분장 등의 대규모 지하시설들을 대표적인 예로 들 수 있다. 또한 쾌적한 온도와 습도를 유지하기 쉽기 때문에 적절한 환기와 조명이 있다면 지상공간보다 활동에 적합한 공간으로 조성될 수 있다. 이처럼 지하공간은 매우 안전할 뿐만 아니라 지상이 줄 수 없는 무한에 가까운 공간을 제공할 수 있다(장수호, 2016).

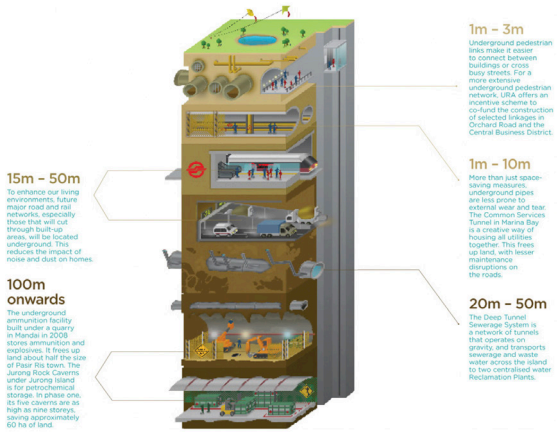
[그림 1] 지하공간의 특성(한국터널지하공간학회, 2012)

지하공간의 심도별/용도별 활용현황은 [그림 2]와 같으며, 고준위 방사성폐기물 처분시설이나 심부 지열에너지 개발의 경우에는 1,000m 이상의 심도에 위치하는 경우도 있다. 이상과 같은 각종 지하공간 시설들의 장·단점을 정리하면 <표 1>과 같다.

특히, 도시국가인 싱가포르 정부가 검토하고 있는 종합적인 지하공간 이용 개념에 따르면, 깊이별로 지하보도(1~3m), 지하 유틸리티(1~10m), 지하 철도/도로(15~50m), 대심도 하수 터널 시스템(20~50m), 지하 탄약저장고/유류비축기지(100m 이상) 등으로 지하 시설의 용도를 구분하고 있다([그림 3] 참조). 이는 서울과 같은 우리나라 대도시의 현황과 크게 다르지 않으며, 낮은 깊이의 지하공간은 이미 포화상태이며 도심지의 지하공간 활용이 보다 깊어지고 입체적으로 활용되고 있다는 점을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다.

[그림 2] 심도별/용도별 지하공간 활용(한국터널지하공간학회, 2012)

[그림 3] 싱가포르의 지하공간 이용 개념(싱가포르 URA, 2012)



3. 도심지 대규모 지하공간의 활용과 구상

복잡하고 협소한 도시공간 이용의 효율화를 통한 도시문제의 해결을 꾀하고 지상개발의 억제와 지하공간 특성의 활용을 통하여 보다 합리적인 개발을 추구하는 시도가 나타나고 있다. 지하도시

개발을 추구하는 대표적인 나라는 가까운 일본부터 프랑스, 캐나다 등이며, 지하도시 건설에 일찍부터 관심을 두고 추진해온 선진 외국의 사례를 살펴보면 다음과 같다.

<표 1> 주요 이슈별 지하공간 시설의 장·단점(Carmody & Sterling, 1993)

주요 이슈	하위 분류	잠재적인 장점	잠재적인 단점
물리적/제도적 이슈	입지	• 접근성 향상 • 지상공간의 부족 해결	• 불량하고 불확실한 지질조건
	격리성	• 기후: 열, 극한 환경, 화재, 지진 • 보호: 소음·진동, 폭발, 낙진, 산업재해 • 보안: 제한적인 접근, 지상 보호 • 오염: 유독 물질/공정	• 통신 제약 • 심리적 상태, 화재 안전, 개인 안전
	보존·보호	• 미학적 측면: 시각적인 영향, 인테리어 • 환경적 측면: 자연경관 및 생태 보호	• 미학적 측면: 높은 수준의 설계기술 필요 • 환경적 측면: 지하수 유출, 오염 등
	배치	• 지형적인 제약에서 자유로움 • 3차원적인 계획 가능	• 지반보강 필요 • 지하공간 크기의 한계 • 접근성 제한적 • 하수처리 필요
	제도	-	• 토지이용 권리 및 허가 확보 필요 • 투자 불확실성
생애주기 비용	초기 비용	• 용지비 절감 • 건설비 절감: 구조적 보강비용 절감, 기후변화에 무관 등 • 굴착된 토사/암석의 활용(판매) 가능	• 제약적인 작업조건 • 지반보강 필요 • 접근성 제한적 • 지하 굴착/운송/굴착토 처리 방법 필요 • 불확실한 초기 비용: 지질적인 원인, 계약적인 측면, 공사지연
	운영 비용	• 유지관리 비용 절감 • 보험 비용 절감 • 에너지 사용량 절감	• 장비/재료/인력의 접근성 확보 필요 • 환기/조명 • 유지관리/보수
사회적 이슈		• 토지이용 효율 향상 • 교통 효율 향상 • 에너지 보존 • 환경보호 • 국가안보에 유리 • 붕괴가능성 낮음	• 환경피해 • 영구적인 자연환경의 변화

3.1 프랑스 파리 '라데팡스'

프랑스에서는 파리 라데팡스(Paris-la-defense) 라는 이름으로 파리 도심에서 서쪽으로 약 6km 떨어진 지점에 대규모 부도심을 계획하고 완성하였다. 1958년부터 30여년에 걸친 장기적인 개발 구상을 바탕으로 1990년대에 대부분의 공사를 마무리 지었다.

라데팡스는 46만평의 넓은 대지 위에 상업 및 주거시설을 설치하고 파리 도심과의 교통망을 전부 지하로 설치하여 쾌적한 도시를 건설하였다.

라데팡스 전체의 교통 인프라를 지하화하여 이를 통해 확보된 지상공간을 효과적으로 이용하였다. 특히, 고속 교통로를 지하에 건설함으로서 소음과 진동을 줄여 쾌적한 부도심을 건설하여 지상도시와 완벽하게 융합된 지하도시를 포함하는 개념으로 보면 될 것이다. 모든 고속도로, 철도망 및 일반도로가 지하에 설치되어 지상의 교통혼잡이 없으며 지상 공간의 활용을 극대화시키는 좋은 본보기를 보여주고 있다([그림 4]참조).

[그림 4] 파리 라데팡스 전경

3.2 캐나다 몬트리올 '언더그라운드 시티'

캐나다의 몬트리올은 고위도에 위치한 지정학적 특성으로 인하여 겨울이 길고 영하 10~20도에 이르는 강추위가 발생한다. 따라서 도시의 주요 시설들을 지하화하는 언더그라운드 시티(Underground City)를 건설하기에 이르렀고 이는 오늘날 전 세계에서 가장 큰 지하 복합공간이다([그림 5]참조).

[그림 5] 몬트리올 언더그라운드 시티 내부

몬트리올의 언더그라운드 시티는 12㎢의 면적에 총 길이가 32km가 넘는 터널로 연결되어 있으며 대부분 통행로 양측에 상점이 있을 만큼 크다. 또한 지상의 건물들과 동일한 수준으로 공기

질과 조명을 제어하고 있어 '실내 도시(indoor city)'로도 불린다. 언더그라운드 시티에는 쇼핑몰, 아파트, 콘도, 은행, 사무실, 박물관, 대학, 7개의 지하철역, 2개의 통근용 기차역, 버스터미널, 원형극장, 경기장 등이 포함되어 있다. 또한 지상에서 언더그라운드 시티로 들어갈 수 있는 120개 이상의 접근통로가 설치되어 있고 겨울철에는 매일 50만명에 달하는 사람들이 언더그라운드 시티를 이용한다.

1962년에 몬트리올 최초의 지하 쇼핑센터가 건설된 이후로 1984년과 1992년 사이에 언더그라운드 시티가 본격적으로 확장되었고, 2008년에 현재의 모습을 가지게 되었다.

언더그라운드 시티는 몬트리올 도심지 한복판 지하에 자리잡고 있으므로 편리한 접근성을 통해 지상도시를 완벽하게 보완해주는 대체도시이며 기후적인 단점을 지하라는 지정학적 특징으로 상쇄시킴으로써 현재까지 지하공간 개발의 성공적인 모델로 평가받고 있다. 언더그라운드 시티와 앞서 소개한 라데팡스 뿐만 아니라 우리나라의 서울 코엑스 몰(COEX Mall) 역시 연면적 11만 9,000㎡에 백화점, 호텔, 공항터미널, 전시장의 지하공간이 하나로 연결되어 있는 지하도시로서 아시아 최대의 지하 쇼핑공간이다. 그러나 이러한 지하 시설들은 대부분 지상을 개착하여 얕은 심도의 천층(淺層)에 건설한 시설들로서 본격적인 대규모 도심지 지하공간의 활용사례로 보기 어려울 수 있다.

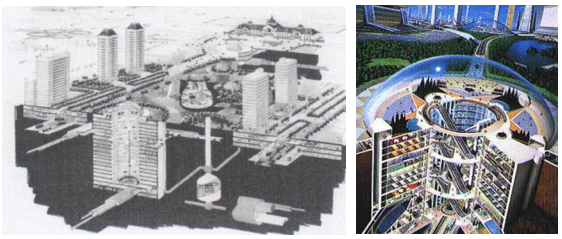
3.3 일본의 지하도시 구상 사례

일본은 많은 인구와 비싼 땅값, 높은 물가수준 및 각종 기술력이 맞물려 선진국 중에서도 지하도시의 계획과 구상이 활발하다. 이 중 대표적인 예는 앨리스 시티를 들 수 있다. 앨리스 시티는 일본의 다이세이 건설이 제시하였으며 동화인 "이상한 나라의 앨리스"에서 그 이름을 따왔다고 한다.

앨리스 시티는 대도시의 시가지 거점 등을 지하공간을 이용하여 자기 완결성이 높은 분산형 기능을 지닌 도시(앨리스 시티)로 전환하여, 인프라 시설의 상호 보관을 꾀하기 위해 도시 간을 네트워크화하는 것으로, 도시의 과밀화를 해소함과 함께, 인프라 설비의 정비가 가능해진다. 즉, 기존 도시의 보완기능을 갖춘 분산형 도시를 지하에 건설하고 두 도시를 연결하는 지하교통망을 구축함으로서 신규 부지확보 없이 제 2의 도시를 추가시킬 수 있다. 총면적 1백ha의 지하공간에 인구 20만명을 상주시킬 수 있는 규모로 계획하였으며 충분한 자급력을 가진 본격적인 대규모 지하도시 계획의 대표적인 예라 할 수 있다([그림 6] 참조).

앨리스 시티는 크게 (1) 지하에 인간 우선형의 쾌적성이 높은 도로를 가진 앨리스 타운 공간, (2) 대심도 지하철도에 의해 도시 간을 연결하는 기능을 가진 앨리스 터미널 오피스 공간, (3) 지상 시설의 백업 및 인프라 기능을 가진 앨리스 인프라 공간으로 구성된다. 이러한 구상의 특징은 앨리스 타운 공간을 얕은 심도의 지하에 두고, 앨리스 터미널 오피스 공간(대심도 지하 역사를 가진 상업·업무 등의 복합 시설)을 지상과 심부 지하를 연결하는 중간 지점에, 앨리스 인프라 공간(발전·지역 냉난방·폐기물 처리·하수처리 등을 복합 일체화한 시설)을 심부 지하로 두어 각 공간의 용도에 맞게 입체적으로 구획하여 이용하는 것이 핵심이다.

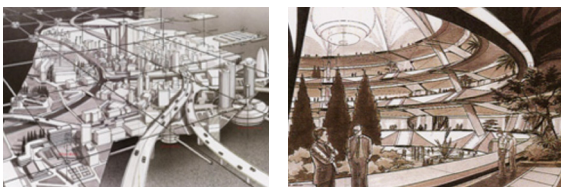
[그림 6] 앨리스 시티 개념도



일본에서의 또 다른 지하도시 계획의 예로서 어번 지오그리드(Urban Geogrid)가 있다. 이는 일본의 스미즈건설에서 1988년 4월에 발표하였으며, "그리드 포인트(직경 30m, 깊이 25m의 원주형으로서 2~3km 간격의 그리드 형상으로 설치)", "그리드 스테이션(직경 100m, 깊이 50m 정도이며 설치 간격은 약 10km)", 그리고 그들을 연결하는 "지하 네트워크(직경 3m 및 10m의 터널)"를 구성 요소로 하는 복합적인 지하도시이다.

본 구상은 도시의 체계적인 건설 계획을 실현하기 위해, 과밀 도시인 도쿄를 모델로 시뮬레이션한 것이며, 도쿄에서 유일하게 남았다고 볼 수 있는 미래 공간인 지하 공간을 이용하는 것이다([그림 7] 참조).

[그림 7] 어번 지오그리드 개념도



그러나 이상의 지하도시 구상들을 실현하기 위해서는 직경 50~100m 이상의 초거대 지하 돔(Dome) 건설기술 등이 필요하므로 아직까지 실현 가능성은 낮다고 할 수 있다.

3.4 러시아 시베리아 지하도시 '에코시티 2020'

과거 러시아에 위치한 동 시베리아의 초대형 미르니(Mirny) 광산에서는 폭이 1.2km, 깊이가 540m인 광산에서 전성기에 해마다 2,000kg에 달하는 다이아몬드를 채굴하였다. 그러나 이 광산은

2001년에 폐광되었고 현재는 지하에 거대한 구멍으로 남아 있다.

최근 들어 민간기업인 에이비 엘리스(AB Elis)에서는 2백만㎡에 달하는 이 초대형 폐광을 시베리아의 강한 햇빛에 의해 자가 발전을 하는 돔 시티(Dome city)로 탈바꿈시키는 구상을 하고 있다.

에코시티 2020으로 불리는 미래의 지하도시 발전 개념은 10만 명의 시민이 거주할 수 있는 공간을 제공함과 동시에 수직농장, 숲, 여가시설 등을 지하에 포함하는 것이다. 태양전지로 덮인 지상의 거대한 유리 돔을 통해 탄소배출을 하지 않으면서도 도시를 유지할 수 있는 에너지를 생산하는 개념도 포함되어 있다. 특히, 과거 광산으로 사용되었던 토지를 복원하는데 목적을 둔 이 프로젝트에서는 거친 시베리아의 기후로부터 정원과 같은 지하도시를 돔을 사용하여 보호하게 된다([그림8] 참조). 에코시티 2020는 시베리아의 생태계를 위협하는 도시의 무분별한 확대를 방지하면서 탄소배출을 하지 않는 친환경적인 대안으로 고려되고 있다. 무엇보다도 과거의 대규모 광산을 사람이 이용할 수 있는 공간으로 재창출하는 개념이 가장 특징적이라고 하겠다.

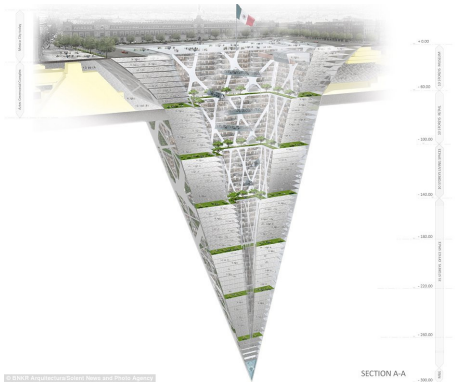
[그림 8] 에코시티 2020의 개념도

3.5 어스스크레이퍼(Earthscraper) 구상

지난 2011년에는 멕시코의 한 건축회사에서 초고층빌딩(Skyscraper)와 반대되는 개념인 어스스크레이퍼(Earthscraper) 구상을 제시하였다. 이는 빌딩을 거꾸로 설계한 피라미드 형태로서 지하도시의 일종으로 볼 수 있다([그림 9] 참조). 10만명을 수용할 수 있도록 설계된 이 건물은 깊이가 300m, 면적이 57,600㎡인 거대한 지하시설이다. 설계자들은 지진에도 견딜 수 있는 수많은 테스트를 통과한 유리들을 지상 입구에 설치하여 밀실 공포증을 해소할 수 있도록 하였다. 또한 광섬유 시스템으로 자연광이 어스스크레이퍼 구석까지 전달되며 수십 개의 공원들을 조성하기 때문에 높은 공기 정화 효과가 있다고 주장하고 있다. 건설에 필요한 예산은 약 5억 5천만 유로로 추정되며 공사 기간은 5년으로 예정하고 있다.

그러나 아직까지 이를 현실화하기 위해서는 기술적으로 해결해야 할 사안들이 많다. 무엇보다도 심도가 깊어질수록 지반조건이 유리해지는 것이 일반적임에도 불구하고, 자연광의 전달(채광성)을 위해 지표의 면적이 넓고 심부로 갈수록 면적이 작아지기 때문에 전체적인 지하공간의 구조적 안정성과 경제성을 확보하기 어려운 형태이다(장수호, 2016). 그러나 미래 지하도시에 대한 새로운 청사진 중의 하나로서 그 의미가 있다.

[그림 9] 어스스크레이퍼의 상상도



3.6 대규모 지하 복합시설-도심지 폐광산의 활용

미국 캔자스시티에는 세계 최대 규모의 상업용 지하 복합시설인 서브트로폴리스(SubTropolis)가 위치하고 있다. 서브트로폴리스는 헌트 미드웨스트(Hunt Midwest)社가 1960년대에 석회석 폐광산을 개조하여 개발한 것으로서 서울 여의도 면적의 약 58%인 150만평에 달한다. 서브트로폴리스는 자원 채굴공법인 주방식공법(柱房式工法, Room-and-Pillar Method)로 굴착된 것으로서, 굴착된 암반을 공간(房)으로 활용하고 굴착되지 않은 암반을 기둥(柱)로 사용하는 개념이다. 10,000여 개에 달하는 석회석 암반 기둥들의 폭과 너비는 7.7m이며 높이는 4.8m이다. 11개의 출입구를 통해 콘테이너 트럭을 비롯한 자동차들이 사방으로 연결된 왕복 2차선 도로로 운행하며 내부에는 50여 개의 입주 업체에 속한 1,300여 명이 근무하고 있다([그림 10] 참조).

[그림 10] 서브트로폴리스의 내부 배치도

서브트로폴리스의 가장 큰 장점은 비용 절감과 경쟁력 강화를 들 수 있다. 지하공간의 장점 중의 하나인 항온성으로 인해 연중 기온을 17℃로 유지하고 있어 냉·난방비가 크게 절감되어 지상과 비교할 때 유지비가 절반 정도에 불과하다. 임대료는 조건에 따라 차이가 있지만 2,800평당 2~2.5$/년 수준이다. 서브트로폴리스에 입주해 있는 업체로는 각종 제조업체, 창고, 우체국, 자동차 보관소, 켄자스시티의 기록물보관소 등이 있다. 특히, 서브트로폴리스 내의 켄자스시티 기록물보관소에 보관되어 있는 각종 필름, 종이 서류 등은 지하의 자연상태 습도가 37%로 일정하여 별도의 습도 조절장치 없이도 저렴한 비용으로 장기 보관이 가능하다. 또한 중장비를 사용하는 제조업체의 경우에는 지하의 특성상 장비 무게로 인한 제약조건이 없어서 경쟁력 제고에 도움이 되고 있다.

대규모의 주방식 석회석 폐광산이 많이 있는 미국에서는 서브트로폴리스 외에도 펜실베이니아주의 아이언마운틴(Iron Mountain) 데이터센터(미국 특허상표국, 소니뮤직 등 입점), 미주리주의 스프링필드 언더그라운드(Spring Field Underground) 등이 운영 중에 있다([그림 11] 참조).

[그림 11] 스프링필드 언더그라운드 내부

3.7 지하 벙커형 데이터센터

최근 들어 인터넷 사용량의 증가로 인해 데이터센터(data center)의 전력사용량이 전 세계적인 문제가 되고 있다. 인터넷 사용량이 증가할수록 데이터센터에서 사용하는 전력량이 그만큼 증가하는 것이다. 그린피스에 따르면 전 세계 데이터센터가 사용하는 1년 평균 전력량은 6,840억kWh로서 우리나라의 연간 전력 소비량 4,551억kWh의 1.5배에 달한다. 이는 중국, 미국, 일본, 인도, 러시아에 이은 세계 6번째로 많은 전력 소비량이다. 특히, 데이터센터에서 사용되는 전력 중의 50%가 오직 서버의 열기를 식히기 위한 냉방장치 가동에 사용된다. 또한 전세계 데이터센터 시장규모(2015년)는 약 44조8천억 원에 달한다. 이러한 데이터센터의 전력사용 문제에 대한 대안과 공사비용 절감을 위해 전 세계적으로 벙커형 데이터센터(bunker data center)의 건설이 활발히 검토 또는 이루어지고 있다(한국건설기술연구원, 2017b).

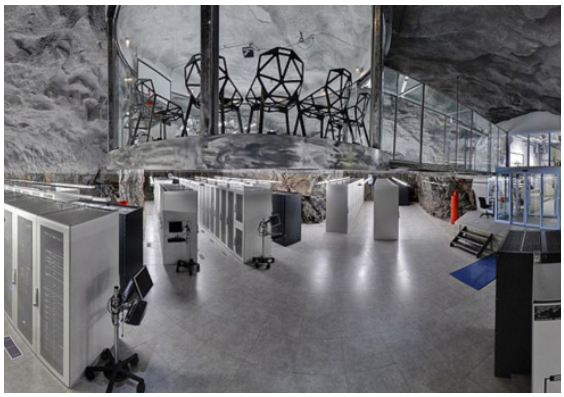
특히, 벙커형 데이터센터는 지하의 항온성으로 인한 전력비용 절감뿐만 아니라 지하공간을 이용하기 때문에 부지 비용을 최소화할 수 있고, 콘크리트 외벽을 시공할 필요가 없어 공사비도 대폭 절감할 수 있다. 또한 눈에 잘 띄지 않아 물리적 공격에 잘 노출되지 않으며 EMP(Electromagnetic pulse) 공격에도 상대적으로 안전하다는 장점을 가지고 있다. 기타 장·단점들은<표 2>와 같다.

<표 2> 벙커형 지하 데이터센터의 장·단점(Miller, 2013)

구분	특징
빠른 시장 대응성	기존 지하 벙커나 폐광산을 활용할 경우, 서버실만 구성하면 되기 때문에 시장 대응성이 매우 빠름
건설 비용	폐광산을 활용할 경우, 서버실을 만들 필요가 없고, 운영/방재 비용 절감 가능
역사와 기원	과거 폐광산을 데이터센터로 활용하기 위해서는 상업적인 목적에 부합되도록 변환 필요
냉각/환기	기존 광산의 온도와 환기 시스템을 그대로 활용할 수 없음
기계장비의 설치	관련 장비를 보관하기 위한 별도의 지하 챔버를 만들 수 있음 소화시스템에 지하수 사용 가능
작업자 고려사항	채광에 한계가 있으나 이는 지상 데이터센터의 경우도 동일함 지하공간 규모가 크기 때문에 주차장과 데이터센터의 이동거리 큼

외국의 대표적인 벙커형 데이터센터로는 스웨덴의 피오넨(Pionen) 데이터센터(과거 군용 지하벙커를 재활용), 노르웨이의 그린마운틴(Green Mountain) 데이터센터(과거 NATO 무기저장고 개조), 스위스의 포트녹스(Fort Knox) 데이터센터(스위스군의 알프스산맥 지하 벙커 개조), 미국 텍사스의 웨스트랜드 벙커(Westlandbunker) 데이터센터(개인소유 벙커 시설 개조), 영국 런던 근교의 더 벙커(The Bunker) 데이터센터(군용 벙커 개조) 등을 들 수 있다([그림 12] 참조).

[그림 12] 스웨덴 피오넨 지하 데이터센터



4. 확장성을 고려한 격자형 지하공간 건설기술

현재까지 도심지에서 대규모 지하공간 개발은 대부분 개착공사나 발파굴착에 의해 이루어지고 있다. 앞서 언급한 코엑스몰도 진정한 의미의 지하공간이라기 보다는 개착공사를 통해 건설된 얕은 심도의 지하공간이라고 할 수 있다. 하지만 최근 들어 공사 중의 소음·진동 발생, 지하수 저감, 지반침하 등의 문제로 인해 도심지 지하공간을 건설하기 위한 공법으로 사용하는데 한계에 도달한 상황이다.

특히, 개착공사나 발파공법으로 건설된 지하공간 시설들을 콘크리트로 마감 시공하기 때문에, 완공된 후에 지하공간 시설들을 확장하는 것이 현실적으로 거의 불가능하다. 더욱이 양호한 암반 조건이 아니면 대규모 암반 공동(Rock cavern) 형태의 지하공간을 한 번에 건설하는 것도 한계가 있다.

앞서 서브트로폴리스와 같은 외국의 사례에서 소개한 주방식 광산은 확장성과 공간 활용성 측면에서 유리하지만, 우리나라 도심지에 전무한 상황이며 과거의 폐광산들을 대규모 상업 지하시설로 활용하는 것도 우리나라의 지질 및 입지 조건을 고려할 때 어려움이 있다. 특히, 앞서 살펴본 주방식 폐광산들을 활용한 외국의 지하시설들 은 지하수 조건 등의 주변 환경 측면에서도 매우 유리한 조건들에 위치하고 있다.

또한 외국에서는 폐광산뿐만 아니라 과거 냉전 시대에 사용되었던 지하 군사 벙커를 지하 데이터센터로 활용하는 사례들이 다수 존재하나, 이 역시 우리나라의 여건상 군사 벙커를 활용하는 것이 불가능하다.

따라서 종래의 주방식 채굴법을 바탕으로 한 격자형 지하공간 공법을 적용하면, 대규모의 지하공간 개발이 가능함과 동시에 격자구조의 특성 상 운용 중에도 지속적인 확장이 가능하다는 점을 눈여겨볼 필요가 있다. 특히, 얕은 심도의 도심지 지하공간은 이미 포화상태로서 더욱 깊은 심도로 내려갈 수밖에 없다면, 상대적으로 양호한 암반의 지지력을 최대한 활용하면서 콘크리트 구조물의 시공을 최소화함으로써 공사비를 대폭 절감함과 동시에 충분한 안정성을 확보하는 것이 더욱 효과적일 수 있다. 필요에 따라서는 격자형 지하구조를 2층 이상의 다층 구조도 구현할 수 있다는 점도 특징이다(한국건설기술연구원, 2017a).

실제로 북유럽에서는 지하철 역사나 대규모 지하 주차장들이 주방식 공법을 바탕으로 한 격자형 지하공간으로 이미 건설되어 활용되고 있다([그림 13] 및 [그림 14]).

[그림 13] 핀란드 헬싱키 지하주차장(Q-Park)

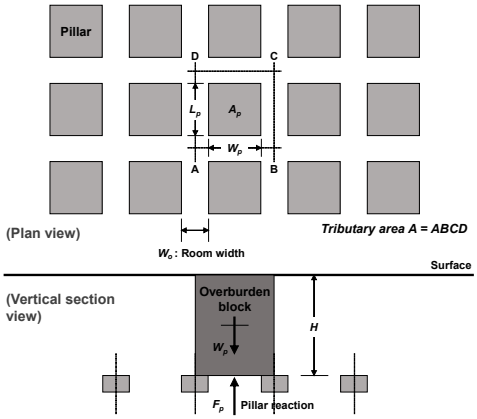
[그림 14] 스웨덴 스톡홀름 지하철역

그러나 서브트로폴리스의 경우와 같이 지하수 유입 문제가 없으면서도 신선한 암반에 위치한 사례가 많지 않으며, 도심지에서는 광산과는 달리 영구적인 안정성 확보가 필요하다. 그러나 격자형 구조물의 특성상 터널의 경우처럼 콘크리트 라이닝으로 지하공간 내부를 마무리하는 것도 힘들다.

이러한 측면에서 종래의 주방식 채굴법을 적용한다고 하더라도, 지하수 유입, 지반함몰 등과 같은 도심지 조건을 고려한 개선이 필요하다. 본 고에서는 주방식 채굴법을 기반으로 운영 중에도 확장이 가능한 격자형 지하공간 건설기술 사례를 간략히 소개하고자 한다. '주방식'이라는 용어가 독자들에게 혼동을 일으킬 수 있어, 여기서는 지하공간의 기하학적 형태를 나타내는 '격자형'으로 통일하여 소개하고자 한다.

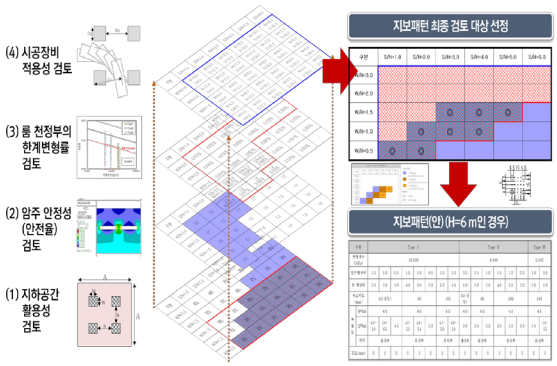
기본적으로 주방식 채굴법에서는 암주(rock pillar)가 모든 하중을 지지하는 개념으로서, 크기와 형상효과를 고려한 암주의 강도를 산정하고 이를 암주에 작용하는 응력과 비교하여 주방식 공간의 안정성을 평가하게 된다([그림 15] 참조). 이상과 같이 굴착하고 남은 암반기둥, 즉 암주가 전체적인 안정성을 좌우하기 때문에 록볼트와 숏크리트는 보조적인 역할로서 필요할 경우에만 적용된다.

[그림 15] 격자형 공간의 암주 안정성평가 개념(장수호 등, 2014)



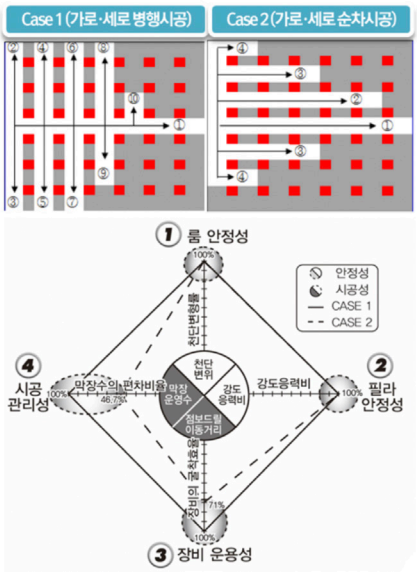
그러나 도심지에서 영구적인 구조물로 활용되어야 하는 측면에서, 보다 높은 안정성을 확보하기 위하여 격자형 지하공간에 대해 숏크리트와 록볼트로 구성되는 지보패턴을 암반조건에 따라 제시하였다([그림 16] 참조). 이 때 격자 구조물의 특성 상 암주가 존재하는 지하공간의 공간 활용성, 암주의 안정성, 천정부의 안정성과 시공장비(대형 트럭 등)의 적용성을 함께 검토하여, 이상의 4가지 고려항목에 적합한 지하공간의 기하학적인 형상 조건에 대해서 지보패턴이 제시되었다(한국건설기술연구원, 2017a).

[그림 16] 격자형 지하공간 지보패턴 도출 과정



격자형 지하공간에서 고려해야 할 또다른 사항은 동시에 다수의 굴진면의 운영이 가능하기 때문에, 굴진면 운영 개수에 따른 발파 굴착 및 시공장비에 대한 공정 최적화가 필요하다. 굴착 순서에 있어서는 가로세로 순차시공보다는 병행시공이 여러 고려항목에서 상대적으로 유리한 것으로 파악되었다([그림 17] 참조).

[그림 17] 격자형 지하공간의 굴착순서 비교



또한 기본적으로 암주에 의해 전체적인 지하공간 구조물의 안정성을 확보함과 동시에 지하공간 내부로의 지하수 유입 방지를 위하여, 뿜칠 방수 멤브레인(Sprayable waterproofing membrane)이나 TSL(Thin Spray-on Liner)과 같은 새로운 뿜어붙임 형식의 방수재와 지보재가 대안이 될 수 있다.

두 재료 모두 폴리머를 기반으로 하며 타설두께가 3~5mm인 것이 특징적이다.

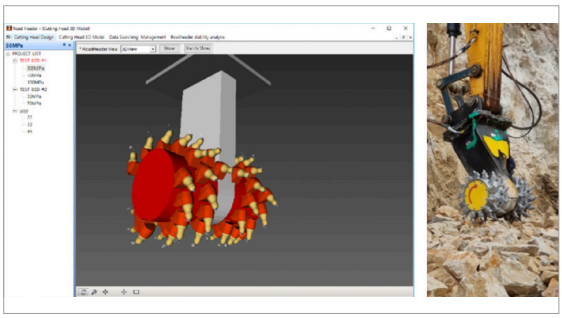
특히, 방수 멤브레인의 경우에는 국제터널지하공간협회 가이드라인(ITAtech, 2013)에 따르면 3bar의 수압조건에서 28일간 수밀성이 확보되어야 하며, 부착강도(28일)와 인장강도(7일)도 각각 0.5MPa 및 2MPa 이상이 요구된다. 뿜칠 방수멤 브레인의 타설장면과 타설 완료 후의 격자형 지하공간 시험시공 구간은 [그림 18]과 같다.

[그림 18] 뿜칠 방수 멤브레인이 적용된 격자형 지하공간 시험시공 구간

마지막으로 격자형 지하공간에서 가장 중요한 역할을 하는 암주의 굴착 손상을 최소화하고 암주 표면의 마무리를 위해, 부분단면 굴착기(partial-face excavation machine)를 활용하는 방안을 검토할 필요가 있다.

특히, 비공개 기술이었던 부분단면 굴착기의 커팅헤드(cutting head)에 대한 설계기술이 한국건설기술연구원(2017a)에서 개발되었다([그림 19] 참조).

[그림 19] 커팅헤드 설계시스템과 시제품



5. 맺음말

지하공간은 인류의 뉴프런티어 공간으로서 앞으로도 대도시를 중심으로 지속가능한 발전과 쾌적한 지상환경의 조성을 위해 더욱 대심도·대규모로 개발되고 이용될 것이다. 그러나 개착공법과 같이 공사 중에 지상공간의 환경을 훼손하는 건설공법은 한계에 도달하였으며, 아직까지 도심지 지하 활용에 대한 소유권이 모호한 부분이 있으므로 이와 관련된 기술적·제도적 보완이 필요하다. 특히, 지하공간의 소유권은 고층 건물 대비 지하공간의 경제성을 좌우할 수 있는 주요한 인자이다. 이와 더불어 환기·방재, 채광, 공간활용성 등 지하공간의 쾌적한 환경과 안전을 확보하기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

또한 격자형 지하공간과 같이 종래의 터널식이나 암반 공동 형태의 지하공간의 한계를 극복할 수 있는 새로운 기술과 개념에 대해서도 검토가 필요할 것이다.

일반적인 지하공간 시장뿐만 아니라 대규모의 데이터센터, 각종 국방시설들을 외부 공격으로 보호하기 위한 지하 벙커, 항온성과 격리성이 중요한 대규모 기록물보관소, 도심지의 각종 보관·저장 시설 등이 중요한 미래 시장이 될 것으로 기대한다.

최근 들어 싱가포르에서는 정부 주도로 192,000㎡ 규모의 "Underground Science City"를 구상하고 있다.

우리나라에서도 서울 영동대로 지하 복합개발 사업을 비롯하여 대규모의 지하공간 개발사업들이 활발히 검토되고 있다. 이와 같이 극심한 대도시 문제를 해결하기 위해 현실적인 지하공간 활용 방안을 구상할 때이다. 물론 지하공간 개발의 이점과 더불어, 지하공간 이용에 대한 사회적인 공감대 형성과 국민 안전 확보에 대한 고려가 우선적으로 선행되어야 할 것이다.

※ 참고문헌

1. 장수호, 2016, "지속가능한 발전을 위한 도심지 지하공간의 활용과 전망", 대한건축학회지 제60권 제5호, pp. 37-42
2. 장수호, 이철호, 최순욱, 허진석, 황제돈, 2014, "지류론과 암주 강도의 추정에 의한 주방식 지하구조의 무지보 암주 설계", 터널과 지하공간, 제24권 제5호, pp. 335-343
3. 한국건설기술연구원, 2017, "도심지 공간확장형 지하굴착 핵심 솔루션 개발", 2017년도 주요사업 최종보고서, KICT 2017-178, 2017년 12월
4. 한국건설기술연구원, 2017, "벙커형 데이터센터의 건설·운영 기술 개발을 위한 기획 연구", 2017년도 주요사업 최종보고서(기획연구과제), KICT 2017-177, 2017년 12월
4. 한국터널지하공간학회, 2012, "인류와 지하공간 - 터널과 지하공간의 역사", ISBN 978-89-97776-34-4(03500), 도서출판 씨아이알
5. Carmody, J. & Sterling, R., 1993, Underground Space Design, Wiley
6. ITAtech, 2013, "Design guidance for spray applied waterproofing membrane", ITAtech Report No.2, ITA (International Tunnelling and underground space Association)
7. Miller, R., 2013, "The Pros and Cons of Underground Data Center", Data Center Knowledge, 2013.10.9
8. Roberts, D.V., 1996, "Sustainable Development and the Use of Underground Space", Tunnelling and Underground Space Technology, 11(4), pp. 383-390
9. Tng, Serene, 2012, "Going Underground", Skyline, Nov/Dec 2012, Singapore URA (Urban Development Authority), pp. 10-11