

도시 지하에 격자형 지하 공간 건설, 지속 가능한 도시개발 수단으로 부상

장수호 | 한국건설기술연구원 연구위원
sooho@kict.re.kr

지하 공간 개발의 필요성

터 키의 유명 여행지 중의 하나는 암반 내에 길을 뚫어 만든 일종의 동굴 수도원인 카파도키아(Cappadocia)이다. 카파도키아는 6세기부터 13세기까지 사용되었으며, 지하 수십 미터까지 파고 들어가서 지하 도시를 형성하기도 했다. 카파도키아 이외에도 과거부터 현재까지 활용된 수많은 지하 공간들은 지상 공간과 더불어 인류의 중요한 생활 공간이 되어 왔다. 지하 공간은 밀폐된 공간 특성으로 인해 심리적 불안감을 일으킬 수도 있으나, 지진에 매우 안전하며 단열성, 화학적 안전성, 차광성 등과 같은 많은 장점들을 가지고 있어 이를 활용한 지하 공간 시설들이 만들어지고 있다. 와인 저장고 등의 소규모 시설뿐만 아니라, 지하 유류비축기지, 양수발전소 등의 대규모 지하 시설들을 대표적인 예로 들 수 있다. 이처럼 지하 공간은 매우 안전할 뿐만 아니라 지상이

줄 수 없는 무한에 가까운 공간을 제공할 수 있다.

유엔의 도시화 전망(United Nation, 2007)에 따르면 2050년에는 전 세계의 도시 거주 비율이 70%에 달할 것으로 예상된다. 즉, 전 세계 인구의 2/3 이상이 도시에 거주하게 되는 것이다. 따라서 인구의 대다수가 매우 제한적인 도시 공간에 극도로 집중하여 살고 있으며 앞으로도 그러할 것이기 때문에, 도시 공간을 지속 가능하게 이용하고 개발하는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 기존의 지상 공간을 쾌적한 생활 공간으로 유지하고 각종 교통 인프라(도로, 지하철 등), 라이프 라인(전력구, 통신구, 가스관로 등), 혐오 시설(폐기물 처리, 공장 등)들을 지하화한다면 지하 공간이 지속 가능한 도시 발전을 위한 대안이 될 수 있을 것이다. 쉽게 생각하더라도 기존의 지상 시설을 지하로 옮긴다면 그 자체로 기존 지상 시설의 2배가 되는 면적을 확보할 수 있다. 물론 지하 공간

을 평면적 또는 수직적으로 확장한다면 더욱 큰 면적을 확보할 수 있게 된다.

사실 우리가 살고 있는 도시의 땅 밑에는 이미 지하철, 전력, 가스관 등이 거미줄 망처럼 깔려 있다. 하지만 현재 대부분의 지하 시설들은 선형(線形)적인 교통 시설과 라이프 라인에 집중되어 있으며, 오·폐수 처리장, 공장, 폐기물 처리 시설 등 혐오 시설들과 생활·위락·저장 목적의 대규모 지하 복합 시설과 같은 평면(平面)적인 대형 지하 공간의 개발과 활용은 미진한 상황이다. 더욱이 우리나라는 국토의 70% 이상이 산악 지형이며 도심지 지하에도 양호한 암반이 잘 분포해 있기 때문에, 대규모 지하 공간의 개발에 적합한 지형적·지질적 특성을 가지고 있다.

도심지 폐광산 - 기록물 보관소, 버려형 데이터센터 등으로 재활용

미국 캔자스시티에는 세계 최대 규모의 상업용 지하 복합 시설인 서브트로폴리스(SubTropolis)가 위치하고 있다. 서브트로폴리스는 헌트 미드웨스트(Hunt Midwest)사가 1960년대에 석회석 폐광산을

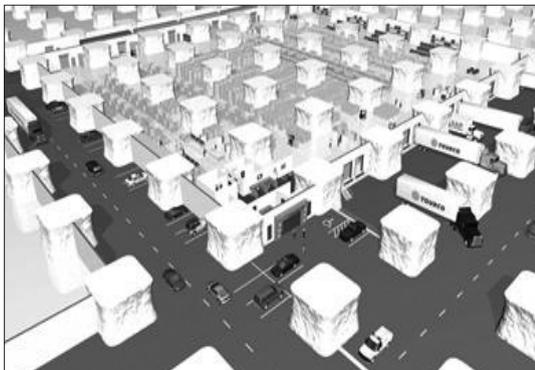
개조하여 개발한 것으로서 서울 여의도 면적의 약 58%인 150만평에 달한다. 서브트로폴리스는 자원 채굴 공법인 주방식공법(柱房式工法, Room-and-Pillar Method)으로 굴착한 것으로서, 굴착된 암반을 공간(房)으로 활용하고 굴착되지 않은 암반을 기둥(柱)으로 사용하는 개념이다. 1만여 개에 달하는 석회석 암반 기둥들의 폭과 너비는 7.7m이며 높이는 4.8m이다. 11개의 출입구를 통해 컨테이너 트럭을 비롯한 자동차들이 사방으로 연결된 왕복 2차선 도로로 운행하며 내부에는 50여 개의 입주 업체에 속한 1,300여 명이 근무하고 있다(<그림 1> 참조).

서브트로폴리스의 가장 큰 장점으로는 비용 절감과 경쟁력 강화를 들 수 있다. 지하 공간의 장점 중의 하나인 항온성으로 인해 연중 기온을 17°C로 유지하고 있어 냉난방비가 크게 절감되어 지상과 비교할 때 유지비가 절반 정도에 불과하다. 임대료는 조건에 따라 차이가 있지만 2,800평당 2~2.5달러/년 수준이다. 사방이 암반으로 둘러싸여 있으므로 자연 재해와 도난의 염려가 없으며 지하 공간 구석구석까지 도로가 놓여 있고 사무실 앞에는 주차 공간이 충분하여 편리하다는 장점이 있다.

서브트로폴리스에 입주해 있는 업체로는 각종 제조업체, 창고, 우체국, 자동차 보관소, 캔자스시티의 기록물보관소 등이 있다(<그림 2> 참조). 특히, 서브트로폴리스 내의 캔자스시티 기록물보관소에 보관되어 있는 각종 필름, 종이 서류 등은 지하의 자연 상태 습도가 37%로 일정하여 별도의 습도 조절 장치 없이도 저렴한 비용으로 장기 보관이 가능하다.

대규모의 주방식 석회석 폐광산이 많이 있는 미국에서는 서브트로폴리스 외에도 펜실베이니아주의 아이언마운틴(Iron Mountain) 데이터센터(미국 특허상

<그림 1> 서브트로폴리스의 내부 구성 개념



자료 : Hunt Midwest 홈페이지(<http://huntmidwest.com>).

〈그림 2〉 서브트로폴리스의 현황



자료 : Hunt Midwest 홈페이지(<http://huntmidwest.com>).

〈그림 3〉 아이언마운틴의 활용 현황



자료 : Hunt Midwest 홈페이지(<http://huntmidwest.com>).

표국, 소니뮤직 등 입점), 미주리주의 스프링필드 언더그라운드(Spring Field Underground) 등이 운영 중에 있다(〈그림 3〉 및 〈그림 4〉 참조).

특히, 최근 들어서는 인터넷 사용량의 증가로 인해 데이터센터의 전력 사용량이 전 세계적인 문제가 되고 있다. 인터넷 사용량이 증가할수록 데이터센터에서 사용하는 전력량이 그만큼 증가하는 것이다. 그린 피스에 따르면 전 세계 데이터센터가 사용하는 1년 평

균 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 냉방 장치 가동에만 사용된다(동아일보 2015. 8. 15).

이러한 데이터센터의 전력 사용 문제에 대한 대안으로서 전 세계적으로 벙커형 데이터센터(bunker

〈그림 4〉 스프링필드 언더그라운드의 활용 현황

지하 창고 및 지하 저장소



자료 : Hunt Midwest 홈페이지(<http://huntmidwest.com>).

사무 공간



data center)의 건설이 활발히 검토 또는 이루어지고 있다. 특히, 병커형 데이터센터는 지하의 항온성으로 인한 전력 비용 절감뿐만 아니라 지하 공간을 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.

외국의 대표적인 병커형 데이터센터로는 스웨덴의 피오넨(Pionen) 데이터센터(과거 군용 지하 병커를 재 활용), 노르웨이의 그린마운틴(Green Mountain) 데이터센터(과거 나토 무기 저장고 개조), 스위스의 포트녹스(Fort Knox) 데이터센터(스위스군의 알프스산맥 지하 병커 개조), 미국 텍사스의 웨스트랜드 병커(Westlandbunker) 데이터센터(개인 소유 병커 시설 개조), 영국 런던 근교의 더 병커(The Bunker) 데이터센터(군용 병커 개조) 등을 들 수 있다.

일본에서는 폐광 등을 이용하여 지하 100m에 기업과 정부기관들의 데이터센터를 운영할 계획이며, 협소한 면적과 높은 토지 비용 측면에서 우리나라와 유사한 홍콩에서도 지하 공간을 데이터센터로 활용하기 위한 중장기 계획을 수립하였다. 우리나라에서도 정부통합백업센터와 일부 기업의 데이터센터를 병커형 데이터센터로 건설하기 위한 검토가 이루어졌으나, 아직까지 병커형 데이터센터의 구축 경험을 가지고 있지 못하기 때문에 다양한 외국 사례들에 대한 검토·분석과 우리 실정에 적합한 건설 방법이 제시될 필요가 있다.

격자형 지하 공간 건설 공법과 요소 기술 개발

도심지에서 대규모 지하 공간 개발은 대부분 개착

공사나 발파 공법에 의해 이루어지고 있다. 세계적인 규모의 코엑스몰(Coex Mall)도 진정한 의미의 지하 공간이라기보다는 개착 공사를 통해 건설된 얇은 심도의 지하 공간이라고 할 수 있다. 하지만 최근 들어 공사 중의 소음·진동 발생, 지하수 저감, 지반 침하 등의 문제로 인해 도심지 지하 공간을 건설하기 위한 공법으로 사용하는 데 한계에 도달한 상황이다.

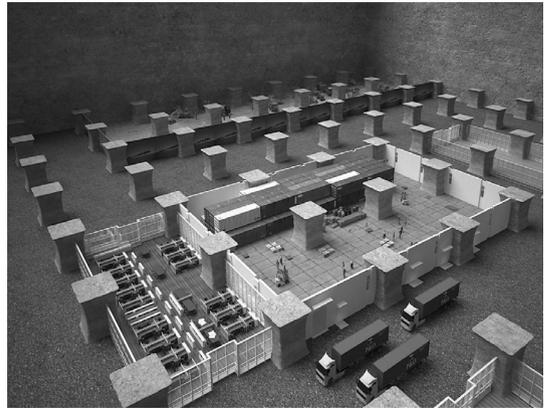
또한, 개착 공사나 발파 공법으로 건설된 지하 공간 시설들의 마감을 콘크리트 구조체로 시공하기 때문에, 완공된 후에 지하 공간 시설들을 확장하는 것이 현실적으로 거의 불가능하다. 더욱이 지하 유틸리티 축기지와 같이 양호한 암반 조건이 아니면 대규모 공동(cavern) 형태의 지하 공간을 한 번에 건설하는 것도 한계가 있다.

앞서 외국의 사례에서 소개한 주방식 광산도 우리나라에 전무한 상황이며 과거의 폐광산들을 대규모 상업 지하 시설로 활용하는 것도 어려움이 있다. 특히, 앞서 살펴본 주방식 폐광산들을 활용한 지하 시설들은 지하수 조건 등의 주변 환경 측면에서도 매우 유리한 조건들에 위치하고 있다.

한국건설기술연구원(이하 건설연)에서는 주방식 채광법 개념에 근거하여, 우리나라의 서울과 같은 대도시 하부에 존재하는 암반의 지지력을 최대한 활용하면서 인공적인 콘크리트 구조물의 시공을 최소화함으로써 공사비를 대폭 절감함과 동시에, 사용 중에도 지속적인 공간 확장이 가능한 격자형(格子, grid)의 지하 공간 건설 공법과 관련 시공 기술들을 개발하였다(〈그림 5〉 참조).

특히, 건설연에서는 기존에 사용된 폐광산을 단순 활용하는 것이 아니라, 도심지에서 새롭게 격자형 주방식 공간을 건설하는 것에 초점을 맞추어 높은 안정

〈그림 5〉 격자형 대규모 지하 공간의 건설 개념(좌) 및 투시도(우)



성을 확보할 수 있도록 다양한 시공 조건에 대한 해석·설계 검토를 실시하고 지하 공간의 지보 설계 및 방·배수 설계 패턴들을 제시하였다. 종래의 지하철정거장, 지하 주차장 등의 건설에 활용되는 개착식 공법과 비교할 때 20% 이상의 공사비 절감이 가능할 것으로 기대되며, 격자형 지하 공간의 굴착 면적이 증가할수록 공사비의 절감은 더욱 증가된다.

암반 굴착시에는 발파 공법을 기본적으로 적용하되, 굴착 공사로 인한 민원 발생 저감과 지하 공간을 지탱하는 기둥으로 활용되는 암반의 손상을 최소화하고자 기계 굴착 장비를 적용한다. 이때 기계 굴착 장비에서 실제 암반을 굴착하는 회전식 원통인 커팅 헤드(cutting head)가 가장 중요한데, 종래에는 약 6개 선진국에서만 이 분야의 기술을 비공개로 보유하고 있으나 이번에 건설연에서 커팅헤드의 설계 원천 기술을 개발하는 데 성공하였다. 이와 함께 암반 기둥을 현장에서 쉽고 빠르고 효율적으로 보강하기 위한 휴대용 고압 그라우팅 펌프 시스템과 더불어, 각종 굴착공사 현장에서 문제가 되고 있는 굴착토 및 굴착

암석의 처리 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 바이오폴리머(bio-polymer)라는 신재료를 굴착토 및 굴착 암석과 혼합해 압축 강도가 20MPa 이상인 시공 재료로 현장에서 재활용할 수 있는 건설연 자체의 바이오폴리머 기술도 완성하였다.

격자형 지하 공간 건설, 미래 시장으로 떠오를 듯

이상과 같이 격자형 지하 공간 건설 공법과 이를 실현하기 위한 요소 기술들을 개발한 상황으로서, 과거의 일반적인 지하 공간 시장뿐만 아니라 대규모의 데이터센터와 국방 시설들을 외부 공격으로부터 보호하기 위한 지하 벙커, 항온성과 격리성이 중요한 대규모 기록물 보관소, 도심지의 각종 보관·저장 시설 등이 중요한 미래 시장이 될 것으로 보인다. 특히, 이를 통해 밀집된 대도시에서 도시의 지속 가능한 발전과 쾌적한 지상 공간 창출에 기여할 수 있을 것이다. 현재 기술적으로는 거의 완성된 단계이므로, 앞으로는 지하 공간 관련 사업자 또는 건설사와의 협력을 통해 실제 사업 추진을 모색할 계획이다. CERIK