

## 지하 천부 석회암 존재 지역의 지반침하 안정성 평가

신중호, 박 찬, 송원경, 한공창, 김정호 (한국지질자원연구원)

### 1. 서론

표토층 직하부의 지하 천부에 석회암이 분포하고 있어서 지반침하, 건물 균열 등의 심각한 지반안전문제가 대두되는 주거지역을 대상으로 하여, 지반침하의 원인을 규명하고 향후 침하 발생 위험성에 대한 안전진단을 수행하였다.

조사지역의 지반침하 안전진단을 위해서는 우선적으로 지반상태 즉, 석회암의 분포 범위와 그 내부에 형성되어 있는 공동 및 이에 수반되는 연약대의 분포 상황 등을 정확하게 파악하여야 하며, 이를 위하여 조사지역 전체에 대해 다양한 물리탐사를 수행하여 지하 구조를 3차원적으로 파악하였다. 또한 침하 원인 규명 및 안정성 평가를 위해 필요한 지반의 역학적 특성을 파악하기 위하여 암반공학적 시험 조사를 수행하였다.

이러한 시추 및 물리탐사를 통한 공동 존재 상황 조사 및 암반공학적 특성 조사를 종합하여 지반안정성 수치해석을 실시하였다. 수치해석기법은 지반침하 현상을 동적, 가시적으로 구현할 수 있는 입자유동해석 프로그램인 PFC를 이용하였다. 조사 자료에 의거하여 다양한 형태와 심도의 공동 모델을 설정하고 지반침하의 주 요인으로 평가되는 지하수 개발로 인한 지하수위 강하와 연계하여 각 조건별로 지반침하 발생 양상을 해석하여, 공동 유형 및 지하수위 조건에 대한 지반침하 안정성 여부 평가 및 이로부터 공동 유형별 안정기준을 설정하고자 하였다.

### 2. 조사지역의 지반침하 유형 및 원인

#### 2.1 석회암 지대의 지반침하 유형

일반적으로 석회암 지대에서는 용해작용이 장기간 진행되면서 불규칙하고 울퉁불퉁한 형태(pinnacle rockhead)가 발달하고, 지표 천부에서는 석회 공동 형성에 따라 상부지반의 침하위험성을 초래하게 된다(Fookes, 1988, 박형동, 1999). 지반침하는 석회암 자체의 붕괴에 의한 경우는 드문 편이며, 상부 토사가 점진적으로 하부 공동으로의 이동에 따른 발생이 다수를 차지하고 있다. 석회공동의 분포는 지질구조, 지반특성, 지하수상태에 의해 좌우된다.

(1) 지질구조 : 석회 공동 형성에 있어서 지질구조에 의한 영향은 그림 1(Gillieson, 1996)과 같이 주로 층리방향, 단층, 절리 등 불연속면의 발달상태에 의해 결정된다. 층리의 방향은 석회 공동의 진행방향을 제어하며 단층, 절리 등의 불연속면 특히 높은 경사의 불연속면은 공동의 시작과 싱크홀 형성을 지배한다. 불연속면을 통해 발달된 석회암 공동은 시간경

과에 따라 상부로 붕괴범위가 확산되며 지표침하를 야기한다. 불연속면 종류에 따라 석회암 공동의 형상이나 크기가 결정되기도 하는데, 수직절리가 발달한 곳은 좁은 폭을 가진 네트워크가 형성되고 단층이 존재하는 경우는 파쇄영향권에 공동이 우세하게 발달하기도 한다.

(2) 지반특성 : 석회 공동 상부 토사층의 역학적 특성에 따라서 지표에서의 지반침하 형태가 달라질 수 있다(Culshaw, 1987, Galloway, 1999). 지표에서의 침하 양상은 하부 공동의 형태나 규모와 같은 다른 요인들이 복합적으로 작용하지만, 토사층의 특성만으로 비교한다면 상부 토사층이 모래와 같은 사질토가 주를 이루는 경우와 점토와 같은 점성토가 주를 이루는 경우에 따라 지표에서의 침하 양상을 대별할 수가 있다. 사질토의 경우는 하부 공동이 점차 붕락됨에 따라 그 영향이 지표까지 전달되어 점성토에 비해 상대적으로 완만하고 서서히 침하가 일어나는 경향을 보인다. 반면에 점성토의 경우는 사질토에 비해 그 자체의 역학적 지지력이 어느 정도 있으므로, 하부 공동의 붕락 초기에는 그 영향이 지표까지 바로 나타나지 않다가 공동과 점성토 층 하부의 붕락이 어느 정도 진행되고 나서 지표에서 급격한 함몰형 지표 붕락이 발생한다.

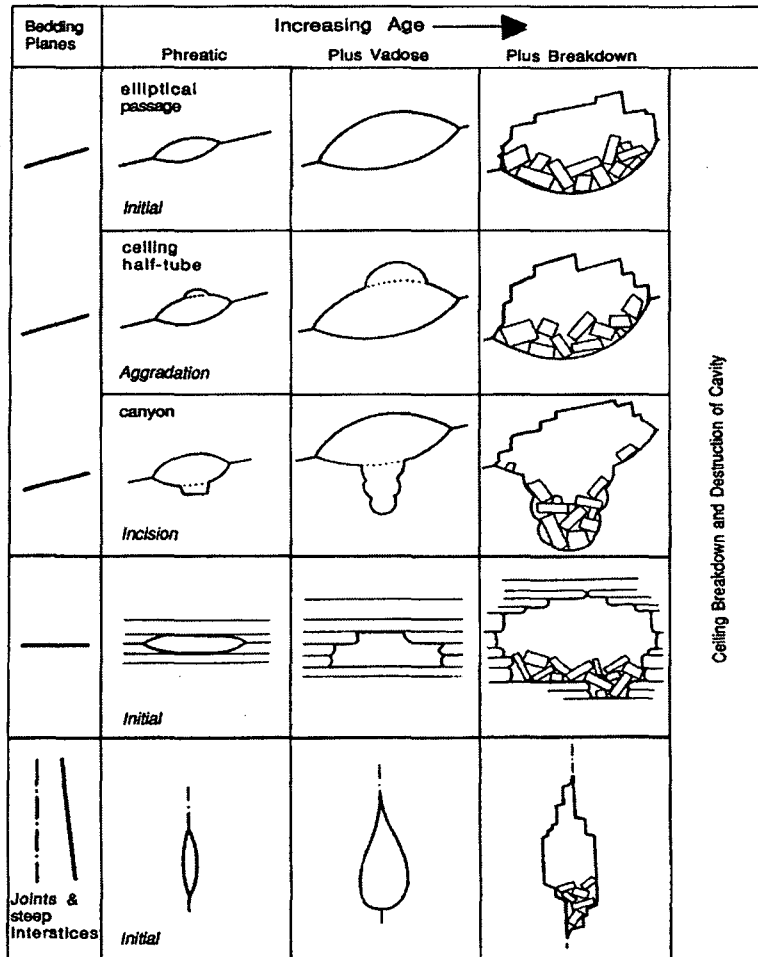


그림 1. 불연속면 발달 상태와 관련한 석회 공동 형성 과정(Gillieson, 1996)

(3) 지하수상태 : 지하수위의 변화는 기본적으로 지반의 역학적 평형상태를 깨뜨리게 되는데 이로 인해 지반침하가 발생할 수 있다. 즉, 자연 지하수위가 외부 요인에 의해 심한 변동이 되면 공동 상부 연약 토사층이 공동내로 유실되면서 직접적인 지반 침하를 유발할 뿐만 아니라, 특히 석회암 지대에서는 지표수의 침투로 인해 장기적으로 공동의 용식 확대를 초래할 수가 있다. 자연 지하수위 조건이라 함은, 공동 상부의 어느 수준에서 지하수위가 큰 변동없이 일정하여 상부 지반 하중과 지압 및 공동내 수압 상호간에 역학적 평형상태를 유지하는 것을 의미하는 것으로, 어떤 시기에 지하수위에 큰 변화가 발생하여 역학적 평형상태가 흐트러진 상태에서 이차적인 평형상태에 도달해가면서 지반 변형이 발생하는 과정 중에 지하수위가 회복된 경우를 의미하는 것은 아니다. 이러한 중간 상태에서는 재차 지하수위 회복만으로 즉시 지반 침하 진행이 억제되기는 어렵고 어느 정도의 지반 변형 및 침하가 진행되어 가면서 이차적인 평형상태에 도달할 것이다.

## 2.2 조사지역의 지반침하 원인 분석

본 조사지역에 대해 일차적으로 지질구조, 지반특성, 지하수상태 측면에서 지반침하 발생 원인을 분석하였다.

(1) 지질구조 : 지질조사자료에 의하면 단층대가 조사대상지역을 통과하고 있는데 방향은 북동-남서 방향이고 경사는 수직에 가깝다. 그리고 석회암 지대의 층리는 60도 이상의 높은 경사를 보이고 있으며, 시추코어조사에 의하면 많은 절리들이 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 지질구조적 측면에서 볼 때, 좁은 폭을 가진 네트워크 형태의 작은 석회 공동들의 존재 가능성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 지반특성 : 시추조사에 의하면 지표하 5m 내외 두께의 토사층은 주로 점토질이 많은 점성토의 특성을 보이고 있다. 그리고 이 토사층 직하부인 심도 10m 이내에서부터 석회암 층이 존재하는 것으로 나타났다. 이로부터, 작은 싱크홀(sink hole) 형태의 지반 함몰 발생 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

(3) 지하수상태 : 이 지역은 기본적으로 수량이 풍부하고 지질구조상 단층대, 절리 등의 존재로 인해 지하수 유동성이 클 것으로 추정된다. 수리조사 자료에 의하면, 이 지역은 과거 지하수 개발로 인해 지하수위가 최대 지표하 30m 정도까지 하강한 것으로 추정되고 있다. 이로 볼 때, 지하수 강하로 인해 천부에 작은 석회 공동들이 형성되고 장기적으로 상부 토사층이 하부 석회 공동 내로 유입되고 지하수 유동으로 유실되면서 소규모적 지반 함몰이 발생한 것으로 보인다. 즉, 본 조사지역의 지반 침하는 지하수 개발로 인한 지하수위 강하가 주된 영향 요인인 것으로 평가되었다.

## 3. 지질구조 및 지반특성 조사

### 3.1 전반적 지질구조

조사지역에 대해 일차적으로 많은 시추를 통해 현장 지반상태 및 공동 존재 유무를 확인하였다. 이를 바탕으로 하면서 전체적인 지질구조 파악 및 연약대 또는 파쇄대의 연장성 여

부를 정밀 조사하기 위하여 전자탐사, 전기비저항 탐사, 자력탐사 및 물리검층 등의 물리탐사를 수행하였다. 그리고 시추코어를 이용한 암석물성시험과 절리면전단시험, RMR 암반평가, 공내재하시험, 수압파쇄 초기지압측정 및 표준관입시험 자료의 종합적 분석을 통해 해석 대상 지반의 역학적 특성을 파악하였다.

조사지역에 대한 지질자료 및 탐사결과로부터 얻어진 지질구조도는 그림 2와 같다. 본 조사지역에는 북동-남서 방향의 단층대가 존재하며 이와 수반된 구조작용을 받았을 뿐만 아니라 중생대 이전의 지층인 석회암 및 편암에 화강암, 유문암등이 관입한 후에도 많은 구조작용을 받아 지질구조가 매우 복잡한 지역이다. 조사지역 중심가의 서쪽에 N20°E 방향으로 화강암과 석회암 지대의 경계를 확인할 수 있는데, 이는 시추 결과에 의한 연장선으로서 조사지역 외곽으로의 연장성은 뚜렷하지는 않다. 조사지역의 북동부 쪽으로 연장성을 갖는 석회암 지대가 지하수와 석회암의 상호작용으로 인해 공동을 포함하고 지반침하를 야기하는 연약대로 해석된다.

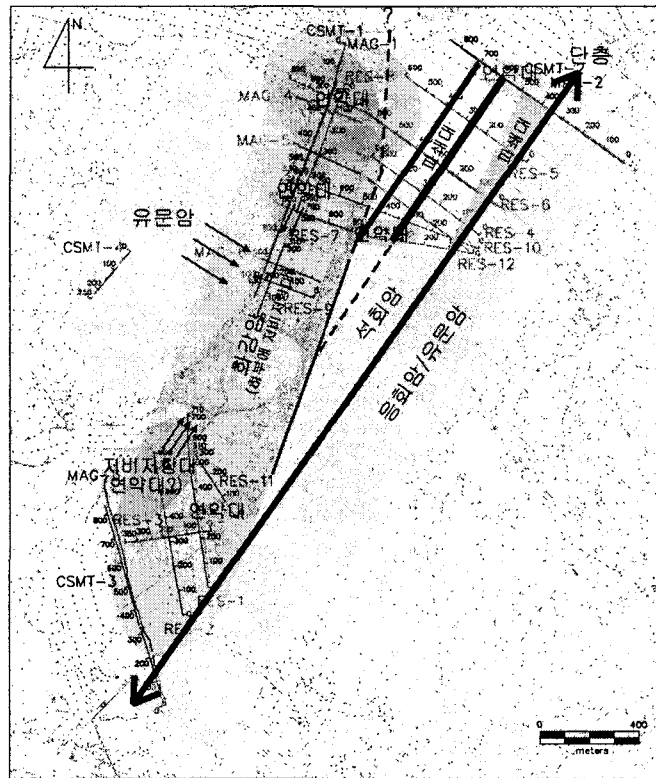


그림 2. 조사지역의 지질구조도

### 3.2 지하 석회 공동 및 연약대 분포 파악

조사지역에 격자 형태의 간격으로 시추된 시추공들을 이용하여 전기비저항 토모그래피 탐사를 실시하여 지하에 존재하는 공동 및 연약대에 대한 정보를 3차원적으로 획득코자 하였다. 그림 3은 조사지역의 몇 개 시추공을 이용하여 시추공 사이 지반에 대한 전기비저항 토모그래피 탐사 영상을 나타낸 것이다.

암석의 전기비저항은 구성 광물에 영향을 받을 뿐만 아니라 풍화 또는 변질 정도에 따라 변화한다. 조사지역의 화강암과 석회암은 풍화 또는 변질의 정도가 심하지 않은 경우에는 일반적으로 수천 ohm-m 이상의 전기비저항을 나타내며, 풍화가 심한 경우에도 100 ohm-m 이하로 내려가는 경우는 극히 드물다. 토양은 암석보다 낮은 전기비저항을 나타내는 것이 일반적이다. 토양의 구성 물질 중에서 점토는 상당히 낮은 전기비저항을 보여주며 특히 물에 포화되었을 경우 전기비저항은 더욱 낮아진다. 이는 현장 탐사를 수행할 때 시추공 내의 지하수에 대한 전기비저항을 측정하여 대부분 10 ohm-m 내외의 전기비저항을 갖고 있는 것을 확인하였다. 이에 근거하여, 그림 3의 토모그래피 영상에서 10 ohm-m 내외의 전기비저항을 갖는 부분은 암석이나 토양이 아닌 다른 물질로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 이 부분은 석회암이 아니라 물 또는 점토인 것으로 추정된다. 석회암 내부에 이와 같이 물 또는 점토로 구성되어 있는 부분이 존재한다면, 이는 바로 석회암이 지하수에 용해된 결과 공동이 형성되었으며 이 공동을 물 또는 점토가 충전하고 있음을 의미하는 것이다. 이와 반대로 석회암 내부의 공동이 완전히 비어 있을 경우에는 공동 내부의 물질인 공기는 전기가 통하지 않으므로 대단히 높은 전기비저항으로 영상화된다.

이와 같이 전기비저항 값의 변화에 의거한 해석과정을 통하여 전기비저항 토모그래피로부터 탐사 대상이 되는 공동의 형상과 심도 및 공동 내부 물질 등에 대한 정보를 대상지역 전체에 대하여 조사 획득하였다.

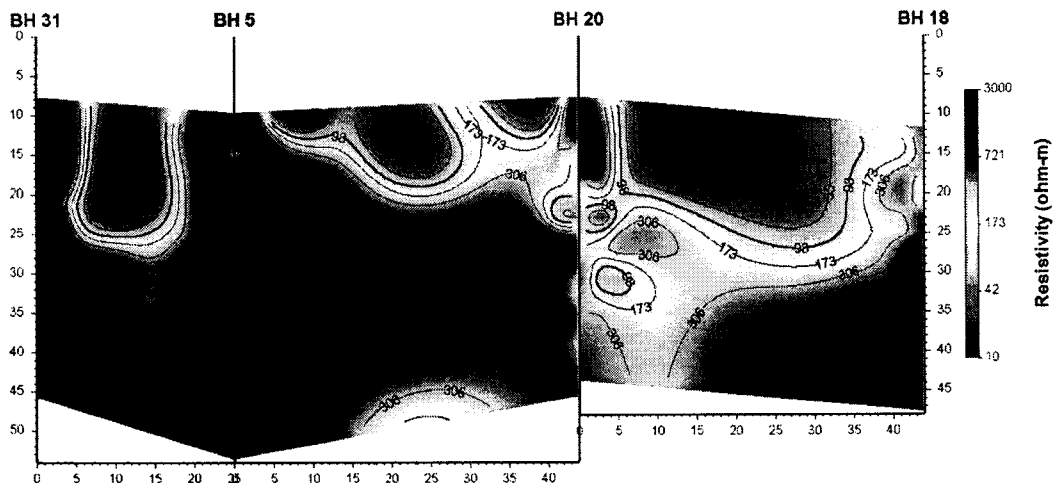


그림 3. 조사지역의 전기비저항 토모그래피 영상 예

#### 4. 지반안정성 수치해석

시추 및 물리탐사를 통한 공동 존재 상황 조사 결과를 이용하여 형태 및 심도에 따라 다양한 공동 존재 유형을 설정하고 지반침하의 주 요인으로 평가되는 지하수 개발로 인한 지하수위 강하와 연계하여 각 조건별로 지반침하 발생 양상을 해석하였다. 수치해석은 지반침하 현상을 동적, 가시적으로 구현할 수 있는 입자유동해석 프로그램인 PFC를 이용하였다.

##### 4.1 해석 모델 및 해석 조건

시추조사에 의해 확인된 조사지역의 지질층서 구분은 그림 4와 같다. 표토 토사층은 약 4m 이내이고 그 아래부터 심도 10m 이내에는 풍화암, 그리고 그 하부는 기반암(석회암)으로 이루어져 있다. 해석시 층서 구분은 이를 기준으로 하였다.

해석 단면은 조사지역내에서 지반침하가 발생하였고 향후 지반침하 우려가 상대적으로 높은 구역으로 하였다. 각 구역별 해석 단면에서 공동 존재 모델링은 시추 및 탐사로부터 나타난 공동 유형(규모 및 심도)를 이용하였다. 시추 및 탐사에 의해 나타난 공동 분포를 보면, 전체적으로 공동의 폭은 대부분 5~25m 범위에 있고, 높이는 15m 이내이다. 그리고 존재 심도는 5~40m 범위에 주로 분포하고 있다. 50m 하부에 대해서는 시추나 탐사가 이루어지지 않아 여기서는 그 존재 여부를 나타낼 수는 없다. 그림 5는 PFC 해석을 위한 몇 가지의 대상구역 단면 및 공동 존재 모델중의 한 예이다.

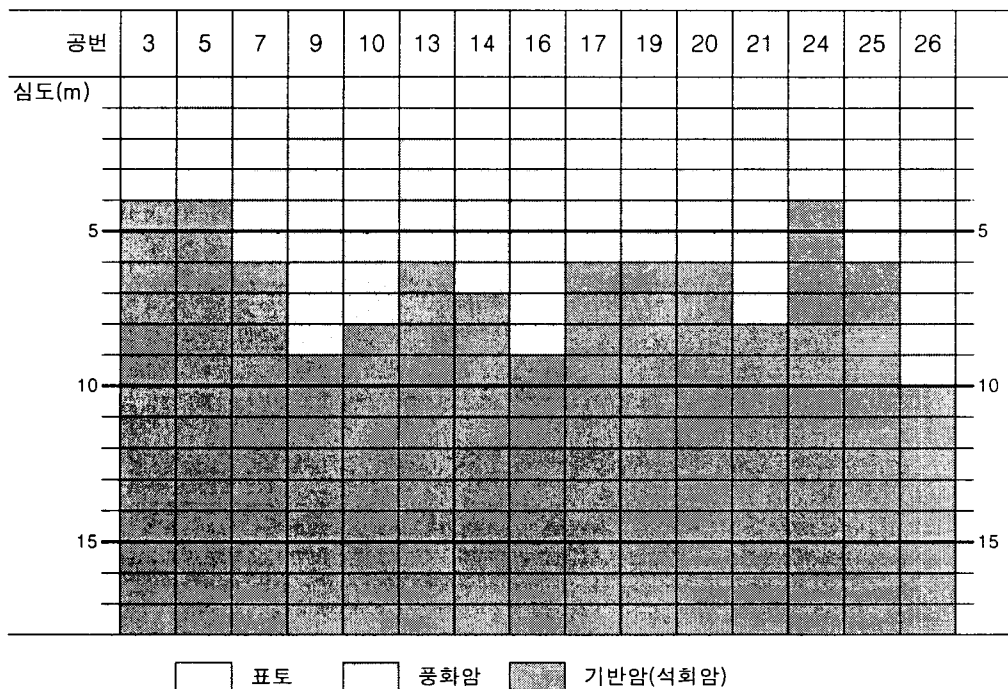


그림 4. 시추자료에 의거한 조사지역의 지질 상황

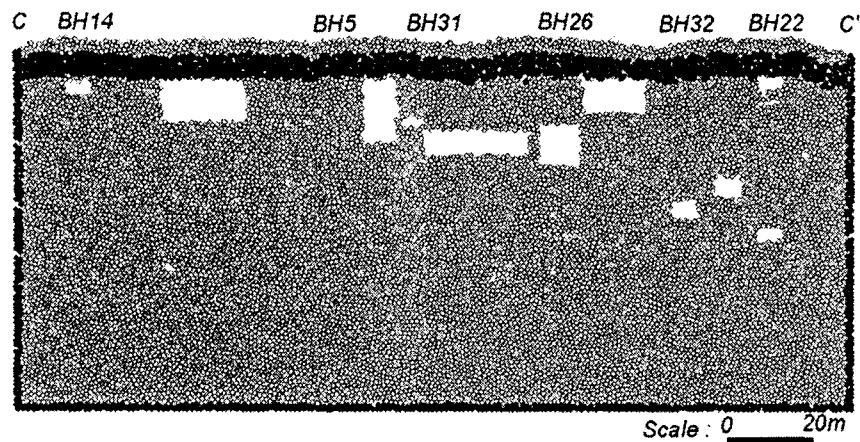


그림 5. PFC 해석 모델

본 PFC 해석에서는 공동의 존재 유형(폭, 높이, 심도), 지하수위 변화 및 공동 충전 상태를 주된 해석 조건으로 하였다. 지하수위 조건은 공동 상부의 표토층 수준에 위치하는 자연 지하수위, 천부 석회공동 존재 심도에 해당하는 지하수위, 지하 심부로 하강된 지하수위 등의 3가지 조건으로 하였다. 해석시 지하수위 변화 영향은 공동 모델의 내부 벽면에 지하수두의 수압에 상응하는 반력을 가하는 기법으로 모델링하였다(Guarascio, 1999). 그리고 각 지하수위 조건에 따라 해석 단면별, 공동 유형을 적용하였다. 물리탐사에 의하면, 이상대로 나타나는 지점들 중에는 공동으로 추정되는 곳 및 일부 점토로 충전되어 있을 것으로 추정되는 곳으로 구별하고 있다. 특히 점토 등으로 충전되어 있을 것이라고 하는 지점들은 지하 10m 내외에 있는 이상대가 대부분이다. 이 두 가지 경우를 모두 검토하기 위하여 물리탐사로부터 추정된 천부 공동에 대해서는 물 및 점토 충전의 두 조건을 적용하였다. 이러한 해석 조건을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 지반안정성 수치해석에 적용된 해석 조건

해석 변수		적용 조건	비 고
공동 유형	폭	4~25m	- 시추 및 탐사 자료에 의거 - 폭을 알 수 없는 시추 확인 공동의 경우는 폭을 6~10m 범위로 설정
	높이	0.3~15m	
	심도	8~45m	
지하수위		-3m, -10m, -20m	- 자연 지하수위 및 공동 심도 고려
충전 상태		물, 점토	- 지하수위 하부 공동은 물 충전 - 물리탐사 추정 공동 중에서 비교적 천부의 경우는 물 및 점토 충전 조건 모두 적용

## 4.2 해석 결과

조사지역에서 3개 구역 단면을 설정하여 해석을 수행하였는데 그 중에서 A-A' 단면 및 C-C' 단면에 대한 각 조건별 해석결과는 그림 6 및 그림 7과 같다. 공동이 무 충전인 경우를 보면, 공동 폭이 20m 이상으로 매우 크지 않으면 지하 3m 정도의 자연 지하수위에서 대부분의 공동과 상부 지표가 자연압밀변형 정도의 범위내에서 안정한 것으로 나타났다. 단지 10m 심도에서 공동의 폭이 10m 이상 및 공동 높이가 15m 정도인 경우는 공동 천정부에서 약간의 하향 이완이 나타나는 경우도 있었다. 지하수위가 지하 10~20m 하부로 내려가면, 10m 심도의 공동 지점은 모두 붕락되는 불안정한 양상을 보였다.

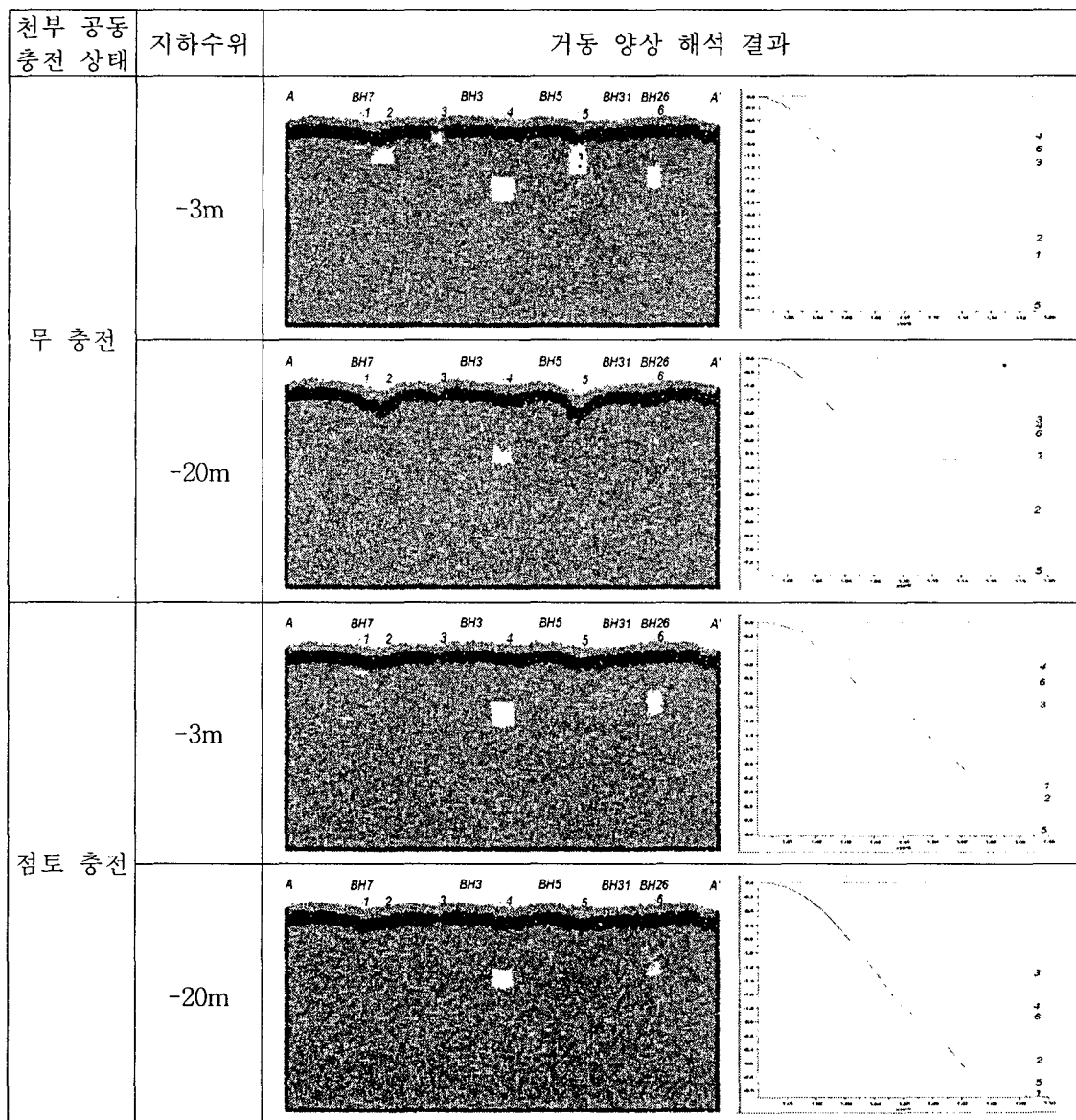


그림 6. A-A' 단면상의 공동 유형별 지반침하양상 해석 결과



특히 싱크홀(sink hole) 함몰과 유사한 침하를 보이는 곳은 10m 심도에서 공동 높이가 15m 정도인 지점(A-A'의 5번 하부, C-C'의 1번과 2번 하부)에서 뚜렷이 나타났다. 이와 비슷한 심도에 있지만 높이가 상대적으로 낮은 공동들은 완만한 침하 양상을 나타내고 있다. 즉, 동일 심도에서도 공동 규모(여기서는 공동의 높이)에 따라 지표에서의 침하 정도에 차이가 있음을 알 수가 있다. 한편, 지표하 10m 심도 부근의 천부 공동이 점토로 충전된 조건의 경우는, 빈 공동이 아니므로 급격한 지반붕락은 나타나지 않지만 연약한 점토로 인해 공동 규모에 따라서 변위 발생 정도에 차이가 있다. 즉, 공동 규모가 커지면 완만한 지반침하의 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다.

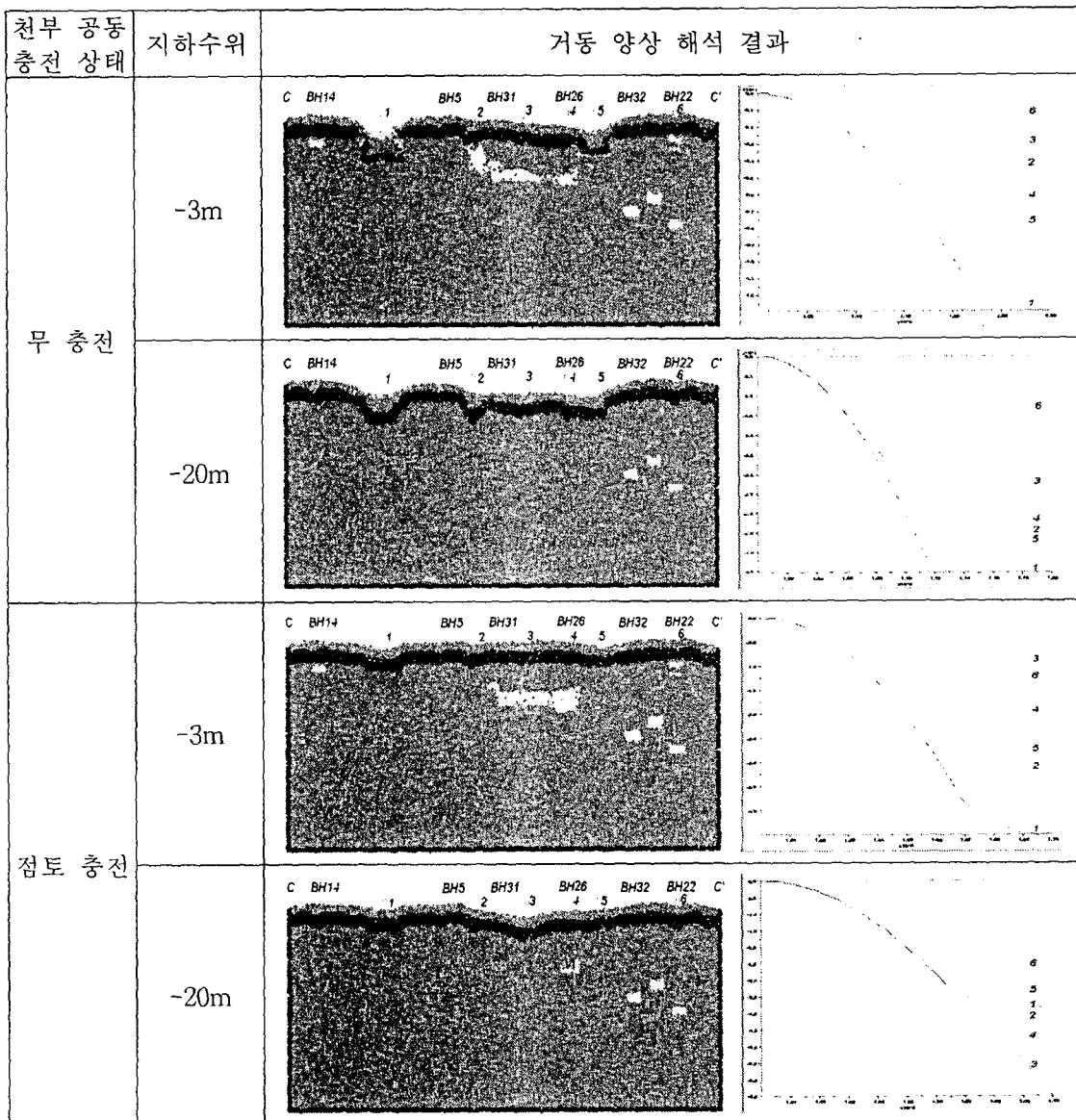


그림 7. C-C' 단면상의 공동 유형별 지반침하양상 해석 결과

## 5. 지반안정기준 검토

탐사로부터 확인된 공동 중에서 심도 10~20m 범위의 지하 천부 공동은 점토 등으로 충전되어 있을 가능성이 크다고 분석됨으로써, 이에 해당하는 탐사 추정 공동을 무 충전 및 점토 충전의 각 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, 이로부터 조사지역의 지반침하 안정기준을 종합적으로 검토하였다.

### ■ 천부의 탐사 추정 공동이 점토 등으로 충전된 상태

자연 지하수위 수준으로 유지될 때는 20m 하부에 무 충전 공동(단지 물이 차 있는 공동)이 존재하더라도 지반안정성에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 심도 10~20m 범위의 공동은 점토 등으로 충전되어 있으므로 공동의 붕락은 일어나지 않지만 연약한 점토 특성으로 인해 압밀침하가 일부 발생하는 정도이다. 따라서 지하수 유동에 의해 충전 물질의 유실이 발생하지 않고 지상의 외부 상재하중이 추가로 가해지지 않는다면 전체적으로 안정하다고 볼 수 있다.

단지, 충전된 공동 폭이 20m 이상이거나 공동 높이가 15m 이상이 되는 경우에는 연약 점토 충전물질의 압밀침하량이 상대적으로 커지므로 완만한 지반침하 현상을 나타낼 수 있는 것으로 해석되었다. 이 개소들은 실제로 지반침하가 발생하거나 지상 가옥에 균열 발생이 나타난 지점과 거의 일치한다. 실제 침하현상을 공동 규모에 따른 해석결과와 연계하여 볼 때, 이 개소에서는 공동 폭이나 높이가 커서 연약 충전 물질의 압밀량이 크거나 지하수 유동에 따른 충전 물질의 유실 가능성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

### ■ 전체 탐사 추정 공동이 점토 등으로 충전되어있지 않은 상태

이 경우에 공동 유형(폭, 높이, 심도)과 지하수위 조건에 따른 안정/불안정 평가 결과는 그림 8과 같으며, 지하수위 조건별 안정기준을 분석하면 다음과 같다.

지하수위가 표토 토사층 심도 정도인 지표하 -3m인 경우, 공동 심도가 10m 내외에서 공동 폭이 5m 이내이면 '안정' 범위에 속하고, 공동 폭이 5~10m 범위에서는 공동 천정의 부분적 이완 파괴가 일어나지만 지표까지 직접적인 영향을 미칠 정도는 아닌 '약간 불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 10m 내외이고 공동 폭이 10m 이상에서는 공동 및 지반붕락이 발생할 가능성이 있는 '불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 20m 이상에서는 본 조사지역에서 확인된 최대 공동 폭인 25m까지도 '안정' 범위에 속한다.

지하수위가 지표하 -10m인 경우, 공동 심도가 15m 이내에서는 공동 규모에 관계없이 '불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 20m 정도에서는 공동 폭이 5m 내외이면 '안정', 공동 폭이 10m 이상으로 커지면 '약간 불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 25m 이상에서는 공동 폭이 15m 까지 '안정' 범위에 속한다.

지하수위가 지표하 -20m인 경우, 공동 심도가 15m 이내에서는 공동 규모에 관계없이 '불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 20m 정도에서는 공동 폭이 5m 정도이면 '약간 불안정', 공동 폭이 10m 이상으로 커지면 '불안정' 범위에 속한다. 공동 심도가 30m 이상에서는 '안정' 범위에 속한다.

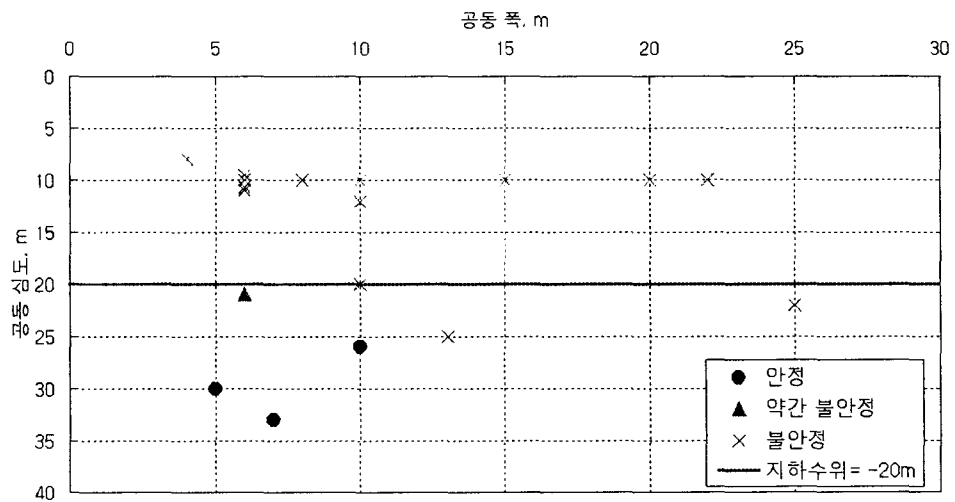
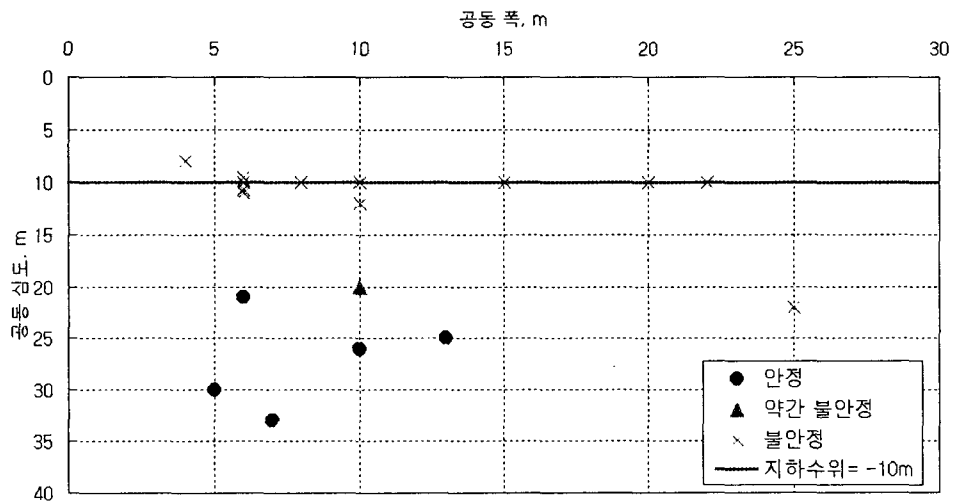
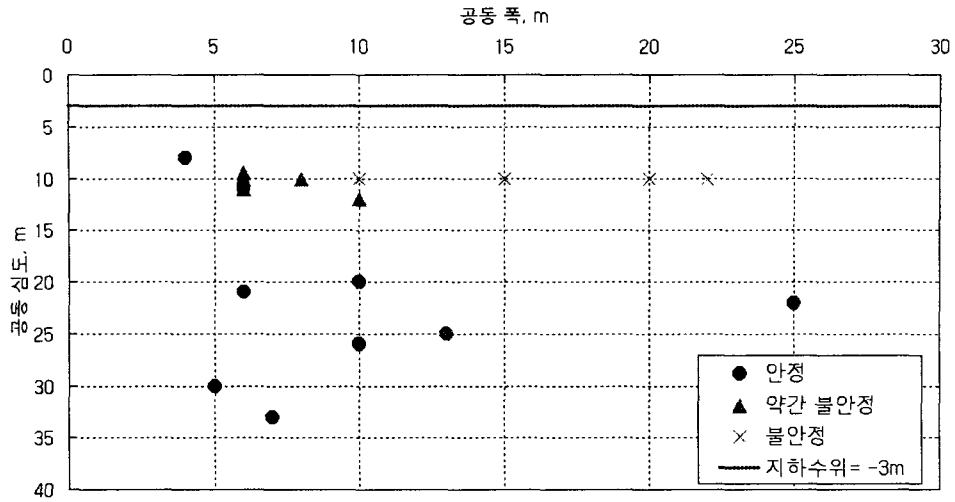


그림 8. 공동 유형과 지하수위에 따른 지반안정해석 결과

## 6. 결론

비교적 천부 지하에 석회암이 분포하고 있어서 지반침하가 발생한 주거지역을 대상으로 각종 물리탐사, 암반공학조사 및 수치해석을 통하여 지반침하 원인 규명 및 침하 위험성에 대한 안전진단을 수행하였다.

조사지역은 급경사의 단층대, 층리, 절리 등이 혼재하고 점토가 많은 토사층 직하부에 석회암층이 있어서, 좁은 폭을 가진 네트워크 형태의 작은 석회 공동 및 작은 싱크홀 형태의 지반 함몰 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다. 그리고 수량이 풍부하고 지하수 유동성이 큰 지질구조에서 과거 지하수 개발로 인한 심한 지하수위 변동 이력으로 볼 때 이것이 석회 공동 형성 및 지반침하의 주된 요인으로 평가되었다.

시추 및 전기비저항 토모그래피 탐사에 의해 확인된 석회 공동 및 연약대는 토사층 직하부인 5m 심도부터 나타났으며, 토사층 직하부 석회 공동은 점토 충전의 가능성이 크지만 지하수 팽팽으로 인한 점토의 유실 등으로 비게 되면서 지반침하를 유발할 수 있다.

지반침하 안정성 해석은 동적, 가시적 거동 양상을 구현할 수 있는 PFC를 이용하였고, 공동 모델의 내부 벽면에 지하수두에 상응하는 반력을 가하는 기법으로서 지하수위 변화 영향을 적절히 모델링할 수 있었다. 수치해석결과, 지반침하의 주된 요인인 지하수위 강하와 연관되어 직접적인 지표침하를 유발하는 공동 유형은 토사층 및 풍화암층 직하부인 약 10m 내외 심도에 존재하는 경우이다. 이 경우 토사층 하부로의 지하수위 강하는 지반의 역학적 평형상태를 흐트러뜨리고 공동 상부 토사의 공동내 유실로 인해 직접적인 지반침하를 유발하고 또한 지표수의 침투로 인해 장기적으로 공동의 용식 확대를 초래할 수가 있다. 따라서 근본적으로 지하수위를 자연 지하수위 또는 토사층 심도 내에서 유지하는 것이 지반안정유지를 위해 가장 중요한 것으로 평가되었다.

## 참고문헌

1. 박형동, 1999, 석회암 공동의 지질공학적 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 세미나 논문집, 3-20.
2. Culshaw M.G. and A.C. Waltham, 1987, Natural and artificial cavities as ground engineering hazards, Quarterly J. of Eng. Geology, 20, 139-150.
3. Fookes, P.G. and A.B. Hawkins, 1988, Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme, Quarterly J. of Eng. Geology, 21, 7-31.
4. Galloway, D., D.R. Jones and S.E. Ingebritsen, 1999, Land subsidence in the United States, USGS Circular 1182, 177p.
5. Gillieson, D. 1996, Caves: Processes, development, management, Blackwell publishers, 324p.
6. Guarascio, M., M. Fabris and E. castelli, 1999, Numerical model simulation of the subsidence induced by solution mining, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Proc. of Int'l FLAC Symp., Minnesota, USA, 233-240.