

## 석회 공동의 특성과 카르스트 지역 내 교량 기초를 위한 조사 설계

### Characteristics of Lime-cavities and Survey Design for Bridge Foundation in the Karst Area

윤운상<sup>1)</sup>, Woon-Sang Yoon, 김학수<sup>2)</sup>, Hag-Soo Kim, 최원석<sup>1)</sup>, Won-Seok Choi

<sup>1)</sup> 바투엔지니어링 지반팀 과장, P. E. Geotech. Team, Batu Engineering.

서울대 지질과학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Geological Science, Seoul Nat'l Univ.

<sup>2)</sup> 바투엔지니어링 지반팀 팀장, Ph. D., Manager, Geotech. Team, Batu Engineering.

<sup>3)</sup> 서울대 자원공학과 박사수료, Ph. D. Candidate, Dept. of Min. & Petr. Eng. Seoul Nat'l Univ.

**SYNOPSIS** : Recently, the construction of the several highway bridges in the karst area have encountered severe problems associated with cavities and sinkholes. To solve this problems, it is important to understand the distribution characteristics of cavities in the construction site on limestone area. This paper briefly describes the different types, the distribution control factors and the infill sediment types of lime-cavities in the study area, bridge site in the karst area and propose the effective method of survey design. Cavity system may be divided into two main groups, 1)'slot and cave system' and 2)'sinkhole and cave system'. And the shape, the size and the distribution pattern of cavity are controlled by three main factors - rock type, geological structure and ground water condition. Additionally, infill sediment may be considered as one of the important design factors for foundation design and divided into four types by sediment properties. There are geophysical thechnics and geologic survey and drilling test, etc. by the survey method to interpretate characteristics of cavity system, and this methods are optimally designed at the site investigation stage.

**Key words** : cavity, sinkhole, karst, limestone, bridge foundation, slot, cave, site investigation

## 1. 서 론

근래 국내 카르스트 지대에 신설되는 고속도로 교량 구간에서 분포하는 석회 공동으로 인해 설계 및 시공에 많은 문제점이 제기되고 있다(임수빈 외, 1998). 교량 기초 하부의 석회 공동에 대한 대책을 마련하기 위해서는 선행적으로 석회 공동의 분포 특성에 대한 이해와 정확한 석회 공동의 분포 양상을 탐지하기 위한 계획, 설계, 시공의 각 단계에서의 합리적인 조사 설계가 이루어져야 할 것이다. 이 연구에서는 국내 석회암 지역의 특성과 석회암 지대에 건설중인 교량기초부에서 조사된 석회 공동의 분포 특성을 분석하고 효과적인 부지 조사 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 석회 공동의 분포 특성

국내의 석회암은 하부 고생대층 조선누층군의 소위 '대석회암통'으로 불리는 석회암류가 주를 이루며, 국부적으로 선캠브리아기 및 상부 고생대층내에 일부 석회암층이 분포한다(Lee, 1988). 대석회암통이 포함된 조선누층군은 두위봉형과 영월형으로 크게 구분되는 층서상의 특징을 보이며, 그 외에도 정선형, 평창형으로 구분되어지기도 하는데, 조선누층군의 하부에는 세일, 사암, 규암 등의 불용해성 암석이 주

를 이루는 양덕층군으로 이루어져 있다. 대석회암통은 대체로 석회암 또는 돌로마이트 등 석회질암이 주종을 이루며, 셰일 및 사암이 일부 협재한다. 조선누층군의 하부와 상부는 각각 부정합에 의해 선캠브리아기의 변성암류와 상부 고생대의 쇄설성 퇴적물이 주를 이루는 평안누층군이 분포한다. 지역적으로 대석회암통의 석회암층은 옥천대내의 북동부 방향으로 넓게 분포하며, 대표적인 분포지역은 문경, 단양, 제천, 영월, 평창, 정선으로 이어지는 남북방향인데, 이중 교량 기초와 관련된 지역은 고속도로 신설 구간인 단양, 제천, 문경 지역이 해당된다. 이 연구에서는 이들 교량 기초부와 관련된 석회 공동 시스템에 대하여 단양지역을 중심으로 그 유형, 분포의 제어 요소, 공동내 퇴적물에 대하여 조사·분석하였다 (그림 1).

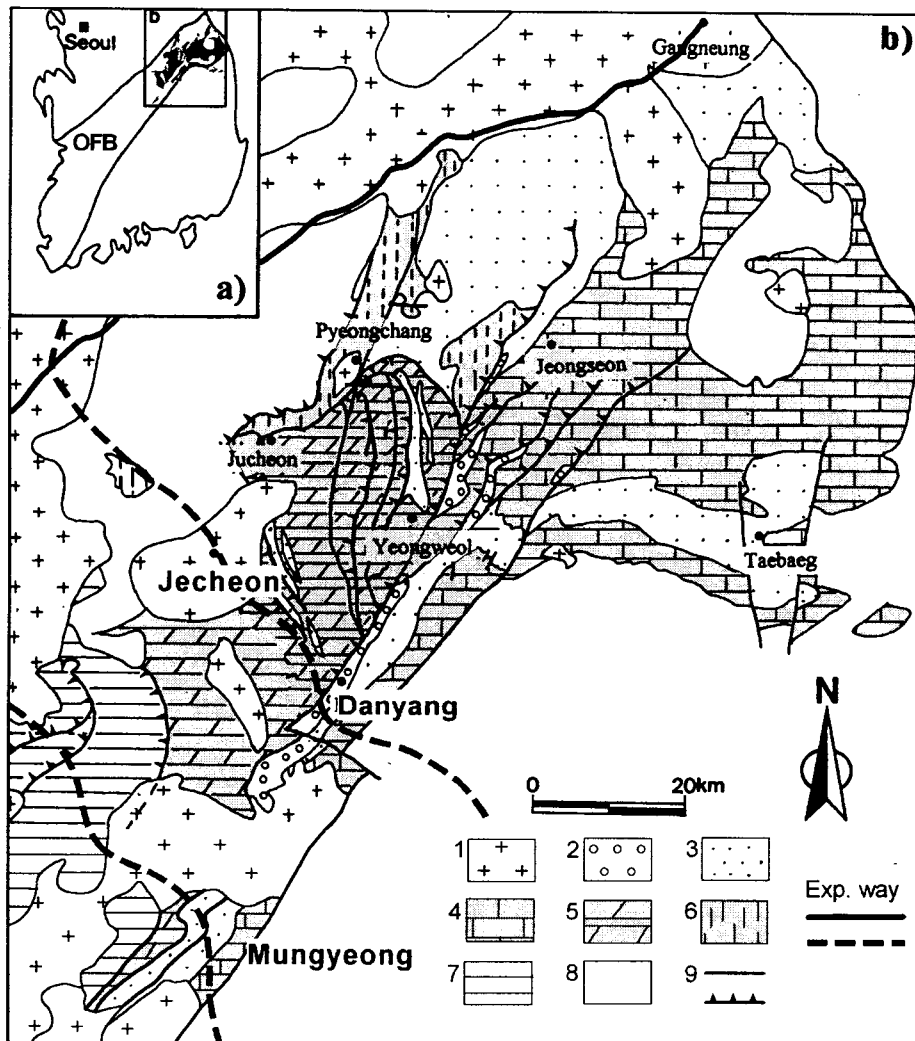


그림 1. 국내 석회암의 분포와 지질도

1. 중생대 화성암, 2. 대동층군, 3. 평안누층군, 4,5,6 조선누층군 (4. 두위봉형, 5. 영월형, 6. 미분류 조선누층군), 7. 옥천층군, 8. 선캠브리아 변성암류, 9. 단층.

소위 “대석회암통”의 석회암은 조선누층군(음영)에 해당

## 2.1. 석회 공동의 유형

조사 지역에서 석회 공동은 초기 공동 형성단계인 고각의 불연속면 용해로 인한 홈(slot) 또는 이와 연결된 소규모의 공동(void or cavity)으로부터, 하부의 동굴(cave)과 연결되어 대규모로 붕괴된 싱크홀(sinkhole) 등 다양한 단계와 규모를 가지는 공동 형태를 보이고 있다(그림 2). 그림 2는 고속도로 신설 구간중 단양지역내 교량 기초부의 지질도로서, 정밀 지표 지질조사와 시추 조사결과를 이용하여 지층의 분포와 석회 공동의 분포 특성을 나타내었다. Fookes and Hawkins(1988)는 결정질 석회암 지역에서의 카르스트 특성을 공동 형성의 단계와 형태에 따라 Class I (Limestone surface) ~ Class V (major doline karst)의 5개 등급으로 구분하였으며, 이외에도 돌리네의 발달 과정에 따라 그 형태와 진행 단계에 의해 여러 저자들의 분류가 시도된 바 있다(Culshaw and Waltham, 1987). 이 연구에서는 조사 지역에 분포하는 석회암의 특성과 석회 공동의 유형을 분석하여, 석회 공동 등 카르스트 특성을 크게 홈과 공동 시스템(slot and cavity system), 싱크홀과 동굴 시스템(sinkhole and cave system)으로 구분하고 이를 Fookes and Hawkins(1988)의 분류에 대비시켰다(표 1).

홈과 공동 시스템(slot and cavity system)으로 발달한 카르스트 특성은 공동 발달 시기에 있어서는 비교적 초기 단계에 해당되는데 절리 주변의 용해로 생성된 홈과 이의 확장 또는 홈과 연결된 소규모의 공동의 발달로 특징지어지며, 소규모의 고립된 공동 분포와 불규칙한 석회암의 노출 표면(pinnacle)이 관찰되고 주로 층상의 석회암에서 잘 나타난다. 이러한 특징의 석회 공동 시스템은 Fookes and Hawkins(1988)의 Class I, II에 해당한다. 싱크홀과 동굴 시스템(sinkhole and cave system)은 홈과 소규모의 고립된 공동이 상호 연결되고 보다 확장되어 지하수위까지 용해를 진행시킴으로써 동굴과 싱크홀을 형성하고 결국 침하 또는 붕괴 돌리네(subsidence or collapse doline)가 발달하는 일련의 과정을 겪게 되는데, 재해를 유발할 수 있는 주의 대상이 된다. 이 시스템은 Fookes and Hawkins(1988)의 class III, IV, V에 해당한다.

표 1. 카르스트 지역의 공동 시스템에 대한 분류

구 분	Fookes & Hawkins(1988)	주 요 형 태
홈과 공동 시스템 (slot & cavity system)	Class I (Limestone surface)	절리 등 불연속면 주변의 용해
	Class II (Minor Karst)	절리 주변 용해로 인한 pinnacle의 발달과 소규모 고립된 석회 공동의 형성
싱크홀과 동굴 시스템 (sinkholl & cave system)	Class III (Karst)	지하수위 상부의 다수 절리 주변의 용해 확장과 고립된 석회 공동의 연결
	Class IV (Doline karst)	돌리네 및 싱크홀의 형성과 지하수위 주위의 석회 동굴의 발달
	Class V (Major doline karst)	돌리네 및 석회 동굴의 붕괴 및 지하수위의 하강에 따른 새로운 석회 공동 시스템의 진전

## 2.2. 석회 공동의 분포 특성

석회 공동의 분포는 암석의 종류, 지질 구조, 지하수 특성에 의해 제어되고 있다(Goodman 1993).

암석의 종류에 따라, 즉 용해성 암석과 비(또는 난)용해성 암석의 분포 조건에 따라 석회 공동의 분포 지역 및 규모가 결정되며, 100m 이상 두께의 층 단위 암석 분포 뿐 아니라, 수 m에서 수 cm 단위 두께의 암석 성분의 변화에 이르기까지 석회 공동의 규모와 형태에 큰 영향을 미치고 있다. 단양 지역의 경우 비용해성 암석인 세일 및 사암층에 의해 상, 하부가 둘러싸인 석회암층에서 석회 공동이 주로 분포하고 있으며, 특히 이 석회암층에 있어서도 석회암 내에 호층을 이루는 세일 또는 이질 석회암층 사이의 괴상 석회암층에서 집중적으로 공동이 분포하며, 공동의 규모 역시 이 괴상 석회암의 두께와 직

접적인 연관을 보이고 있다(그림 2).

또한 지질 구조의 영향은 주로 층리의 방향과 단층 등 불연속면의 발달 상태에 의해 결정되고 있으며, 층리의 방향은 석회 공동의 진행 방향을 제어하며, 단층 등 불연속면 특히 고각의 불연속면은 공동의 시작과 대규모 싱크홀의 형성을 지배하고 있다(그림 2).

특히 지하수위의 수준은 공동 분포의 심도를 결정하는 중요한 요소로 작용하고 있다. 일반적으로 석회암의 용해에 의해 지하수위가 하강하게되며 수 단의 동굴 시스템이 형성되며, 석회 공동의 수평적 확장에 의한 동굴의 형성은 지하수위 부근에서 현저하게 나타나고 있다. 조사 지역에 있어서도 석회 공동은 주로 현 지하수위의 상부에 집중적으로 분포하며, 현 지하수 이하에서는 지하수에 인접한 부분에 많이 분포하고 있다(그림 1). 지하수위 역시 석회 공동 및 단층 등 불연속면의 발달 위치에 따라 인접한 구역에서도 그 수위가 급격히 변화하는 등 지하수위의 변동 상태 및 최저 지하수위의 확인은 석회 공동 및 동굴 시스템의 분포 위치 및 심도를 추정하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

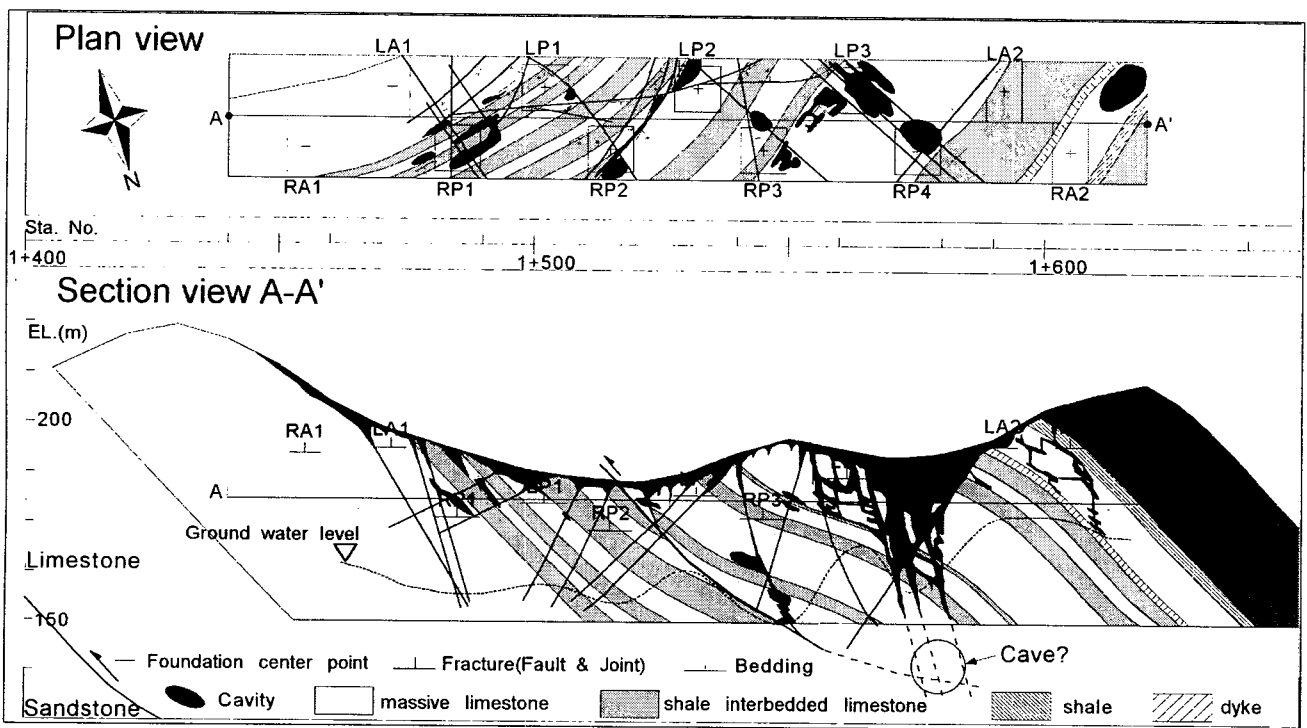


그림 2. 카르스트 지역(단양 지역의 사례)내 교량 기초 설계를 위한 지질도.

a) 지질 평면도(해발 165m 평면), b) 지질 단면도(a) 지질 평면도의 A-A' 단면)

### 2.3. 공동 내 퇴적물의 유형

공동을 채우고 있는 퇴적물은 퇴적물의 구성과 분급도 등에 의해 구분되어 질 수 있다(Statham and Baker 1986). 조사 지역의 석회 공동은 공동 내 퇴적물에 의해 크게 4개의 유형으로 구분된다.

첫째 퇴적물이 없는 빈 공동(Type 1), 둘째 층상의 점토 및 실트로 채워진 공동(Type 2), 셋째 비교적 원마도가 좋은 비용해성 암석의 자갈 및 점토질 실트의 혼합물에 의해 채워진 공동(Type 3), 넷째 석회암의 각력과 암피가 자갈, 점토, 실트 등과 혼합되어 채워진 공동으로 구분할 수 있다(Type 4)(표 2). 퇴적물이 없는 빈 공동은 지하수의 통로 또는 석회 동굴시스템의 상부의 노출된 공동에서 발견되며, 층상의 점토 및 점토질 실트로 채워진 Type 2 공동은 보통 고립된 소규모의 공동에서 관찰된다. 이 층상의 점토 및 점토질 실트에는 비교적 작은 석회암의 암편이 관찰되기도 하며, 주로 석회 공동의 모암 벽의 암편 탈락과 관련되어 관찰되는데, 이 퇴적물의 상부는 보통 비어있는 경우가 많다. Type 3의 공동 퇴적물은 외부에서 유입된 비용해성 암석의 원마도가 좋은 암편과 점토 또는 점토질 실트의 혼합물

로 구성되며 가끔 석회암의 암편이 포함된다. 등급이 되어 있지 않은 혼합물은 싱크홀에서 주로 관찰된다. Type 4의 퇴적물은 싱크홀의 하부 및 붕괴 돌리네에서 관찰된다. 이러한 석회 공동의 퇴적물의 특성 역시 교량 기초의 설계에서 조사 반영되어야 할 부분이다.

표 2. 석회 공동 내 퇴적물의 분류

구 분	퇴 적 물 상 태	분 포 특 성
Type I	빈 공동	지하수의 통로 또는 공동의 상부
Type II	층상의 적갈색 점토 및 점토질 실트, 원마도가 좋은 비용해성 암석의 작은 암편과 완전 풍화된 석회암편 포함	소규모 고립된 공동 공동 시스템의 최하부
Type III	비용해성 암석의 원마도가 좋은 자갈과 적갈색 점토 및 점토질 실트의 등급이 되지않은 혼합물	싱크홀, Type IV의 상부 또는 하부
Type IV	석회암의 각력 또는 암괴와 비용해성 암석의 자갈 및 적갈색 점토질 실트 등의 등급이 되지않은 혼합물	싱크홀, 붕괴된 돌리네에서 큰 규모의 암괴 분포

### 3. 교량기초설계를 위한 석회 공동 조사

카르스트 지역 내 교량 기초의 효과적인 설계 및 석회 공동에 대한 대책을 위해서는 앞서 언급한 석회 공동의 분포 특성을 고려한 합리적인 조사 설계가 수행되어야 한다. 조사의 목적은 용해성 암층의 분포 특성, 지질 구조의 특성, 지하수의 특성 등에 대한 조사로부터 직접적인 공동 및 동굴 시스템의 분포 위치 및 형태, 공동 내 퇴적물의 특성으로 구체화하여야 하며, 각 조사법의 특성과 조사 시기별 적용성 및 일반적인 조사 과정을 정리하고자 한다.

석회 공동의 조사는 적용시기 및 목적에 따라 개략 조사(reconnaissance survey)와 정밀 조사(detail survey), 확인 조사로 구분할 수 있으며, 적용 가능한 조사 방법은 표 3에 기술하였다. 상기한 방법들은 국내의 석회 공동조사를 위해 적용된 사례가 있으며, 그림 3은 그림 2의 교량 기초 부지에 대한 각 조사법의 적용 사례로서, 전기 비저항 탐사, GPR 탐사, 탄성과 토모그래피 탐사를 통하여 지표 지질 조사 및 시추조사 결과에 의해 구성된 지질도에서 추정된 석회공동 분포 현황을 검증하고 보다 구체적인 분포 상태를 지시하고 있다.

개략 조사 단계에서 이용되는 물리탐사는 지표에서 탐사가 수행되는 방법으로 국내에서는 주로 쌍극자 배열법(dipole-dipole array)에 의한 2차원 전기비저항 탐사와 GPR탐사가 응용되었으나, 이 방법 이외에도 국외에서는 탄성과 탐사(반사법), 정밀중력탐사(micro-gravity), 전자탐사(electromagnetics) 등을 적용한 예가 있다(McCann et al 1987). 이상의 탐사 방법은 표토층의 물리적 성질, 현장 여건 등에 따라 적용방법의 조합을 다르게 구성할 수 있다.

정밀 탐사 단계에서 이용되는 물리탐사는 교각 기초부에 국한되어 수행되는 조사로 시추공을 이용한 방법들로 구성된다. 시추공을 이용하는 탐사로 가장 널리 이용되는 방법은 시추공 단면 사이의 영상(image)정보와 물성 정보를 동시에 획득할 수 있는 토모그래피(tomography) 탐사가 있다. 현재 국내외적으로 이용 가능한 토모그래피 탐사 방법은 영상정보와 함께 심도별 탄성과속도(P파 중심)의 정보를 제공하는 탄성과 토모그래피, 지하의 전기 전도도 분포를 알 수 있는 비저항 토모그래피, 지하의 유전율에 의한 전자파 속도 정보를 제공하는 레이다 토모그래피 탐사법 등이 있으며, 적용방법의 선택은 부지의 특성과 탐사 목적에 따라 단일 방법 또는 복합 적용으로 설계할 수 있다.

확인 조사는 보강공법에 따라 조사의 필요성이 판단되어야 하지만, 기초부 터파기시에 형성되는 절개면에 대한 확인 지표지질조사는 정밀 조사 단계의 결과를 확인하는 방법으로 간편하고 효율적인 방법이며 이 결과로부터 설계에 대한 보완을 할 수 있다. 확인 조사 단계에서 이용되는 물리 탐사 방법은 그

라우팅에 의한 보강이 이루어진 경우에 정밀 조사 단계에서 수행되었던 토모그래피 탐사법에 의해 확인 조사를 실시하여 시공전후 비교를 통한 그라우팅 효과를 검증하는 것이 타당하며, 현장 타설말뚝을 기초로 사용하는 경우는 석회암 지반의 불균질성 때문에 콘크리트 타설 시 문제가 발생할 가능성이 크므로 견전도 시험을 통한 품질확인이 필요하다.

표 3. 카르스트 지역의 교량 기초 설계를 위한 조사법의 활용

구분	목적	지질 조사	물리 탐사	비고
사전 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광역 지질의 인지</li> <li>• 용해성 암석의 분포 확인</li> <li>• 선구조 분석</li> <li>• 카르스트 지형의 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지질도 및 문헌 조사</li> <li>• 항공 사진 분석</li> </ul>		
개략 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주변 지질도의 작성</li> <li>• 단층대 등 주구조의 분석</li> <li>• 공동/연약대의 분포 파악</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지표지질조사</li> <li>• 시추 조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전기비저항 탐사</li> <li>• GPR 탐사</li> </ul>	탄성과 탐사 중력 탐사 전자 탐사
정밀 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상세 지질(단면)도의 작성</li> <li>• 공학적 지질 특성 분석</li> <li>• 기초 하부 공동 분포상태</li> <li>• 지지층 심도의 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상세 지표지질조사</li> <li>• 시추조사</li> <li>• 물성시험</li> <li>• 시추공텔레뷰어 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 탄성과 토모그래피</li> <li>• 비저항 토모그래피</li> <li>• 레이더 토모그래피</li> </ul>	
확인 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지질분포 및 구조 확인</li> <li>• 지반 보강효과의 검증</li> <li>• 현장 타설 말뚝의 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초절취면 상세 조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각종 토모그래피 탐사 (그라우팅 보강 공법)</li> <li>• 현타 말뚝 견전도시험 (타설말뚝 기초 형식)</li> </ul>	필요시

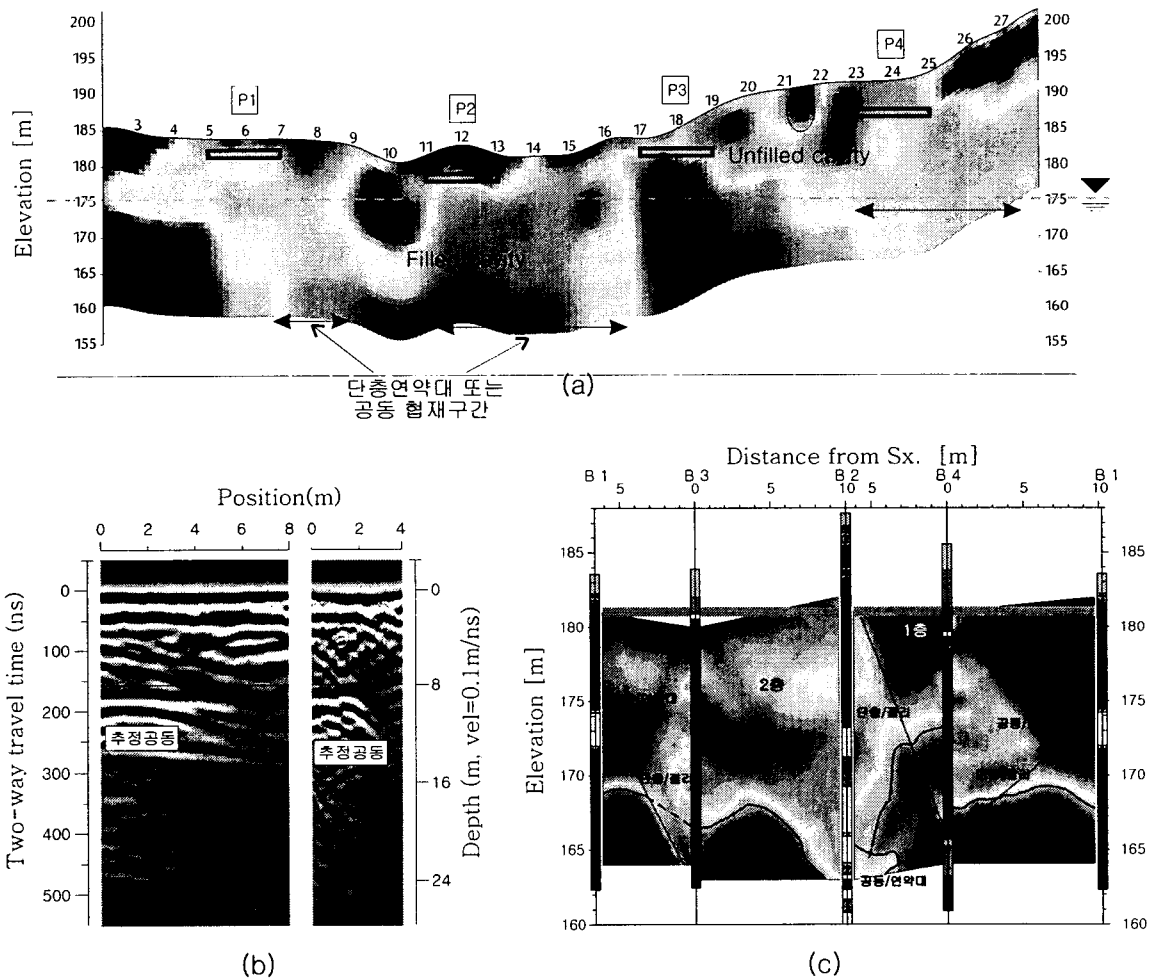


그림 3. 카르스트 지역 내 교량 기초(그림 2) 설계를 위한 탐사 결과의 예  
a) 전기비저항 탐사, b) GPR 탐사, c) 탄성과 토모그래피 탐사

그림 4는 카르스트 지역내 교량 건설을 위한 부지 조사의 단계와 각 단계별 적용될 수 있는 조사 및 탐사법을 도시한 것이다.

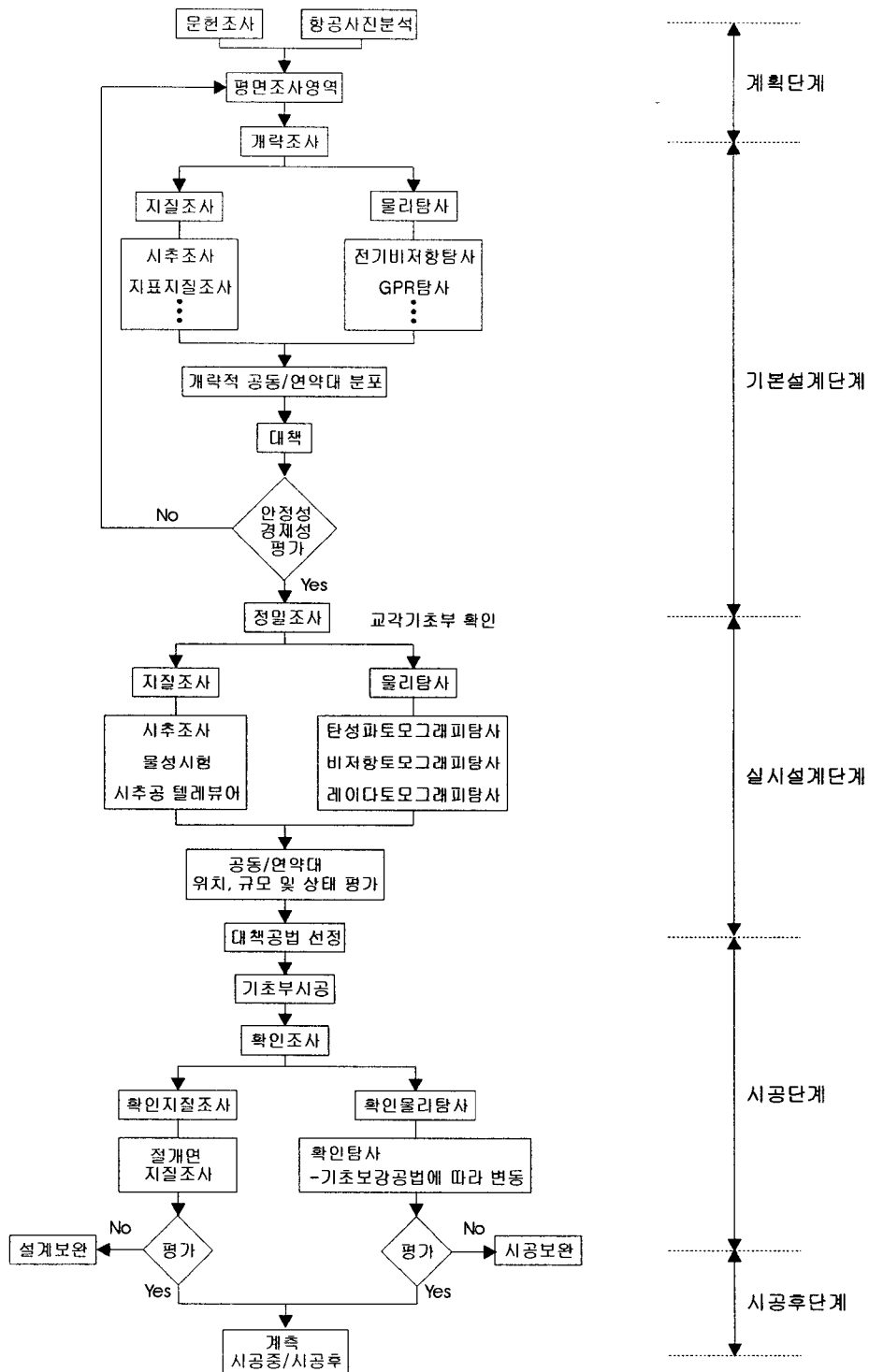


그림 4. 카르스트 지역내 교량 기초를 위한 부지 조사의 흐름도

## 4. 결론

교량 기초 하부의 석회 공동에 대한 대책을 마련하기 위해서는 선차적으로 수행되어야 하는, 석회 공동의 분포 특성에 대한 이해와 이를 바탕으로 한 계획, 설계, 시공의 각 단계에서의 합리적인 조사 설계를 위하여 국내 석회암 지역 내의 교량 기초의 사례를 통해 석회 공동의 분포 특성 및 효과적인 조사 방법을 연구하였다.

조사 지역에서 석회 공동의 형태 및 단계에 대한 공학적 분류를 위해 각 공동의 특성을 분석하여 공동 형태를 크게 홈과 공동 시스템(slot and cavity system), 싱크홀과 동굴 시스템(sinkhole and cave system)으로 구분하였다. 또한 이들 석회 공동의 분포의 제어 요인으로서 암석의 종류, 지질 구조, 지하수 특성을 분석하므로써 각 요인들의 특성과 상호 연관성에 의해 석회 공동의 형태, 분포 위치가 제어되고 있음을 사례를 통하여 분석하였다. 또한 공동을 채우고 있는 퇴적물은 퇴적물의 구성과 분급도 등에 의해 크게 4개의 유형으로 분류할 수 있었으며, 교량 기초의 설계 시 이에 대한 공학적 고려가 필요한 것으로 판단된다. 아울러 카르스트 지역 내 교량 기초의 효과적인 설계 및 석회 공동에 대한 대책을 위해서는 계획 단계, 기본 설계 단계, 실시 설계 단계, 시공 단계, 시공 후 단계로 구분하여 용해성 암층의 분포 특성, 지질 구조의 특성, 지하수의 특성의 조사로부터 직접적인 공동 및 동굴 시스템의 분포 위치 및 형태, 공동 내 퇴적물의 특성 및 지지층의 분포 등으로 구체화 하여야 하며, 이 때 효과적인 조사 기법으로 정밀 지표 지질조사, 전기비저항 탐사, 지하레이다 탐사, 탄성과 토모그래피 탐사 등 각종 토모그래피 탐사가 개략조사, 정밀조사, 확인조사 등에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 5. 참고문헌

1. 임수빈, 김문국, 조병철, 임철훈 (1998), "공동 및 점토 협재 파쇄대가 산재된 석회암층의 교량 기초 지반 보강 방법", 한국지반공학회 '98 가을 학술발표회 논문집, pp. 121-129.
2. Culshaw, M.G. and Waltham, A.C. (1987), "Natural and artificial cavities as ground engineering hazard", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 20, pp.139-150
3. Fookes, P.G. and Hawkins, A.B. (1988), "Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 21, pp.7-31
4. Goodman, R.E. (1993), Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc, pp.143-194.
5. Lee, D.S. (1988), Geology of Korea, Geological Society of Korea, Kyohak-Sa, pp.49-81
6. McCann, D.M., Jacson, P.D. and Culshaw, M.G (1987), "The use of geophysical surveying methods in the detection of natural cavity and mineshafts", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 20, pp.59-73.
7. Statham, I. and Baker, M. (1986), "Foundation problems on limestone: A case history from the carboniferous limestone at Chepstow, Gwent", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 19, pp.191-201