

# 카르스트 지역 내 교량 기초의 보강을 위한 조사 설계 사례 - 제천, 단양 지역

## Case History of Survey Design for Bridge Foundation in the Karst Area - Jecheon, Danyang Area

김학수<sup>1)</sup>, Hag-Soo Kim, 최원석<sup>2)</sup>, Won-Seok Choi, 윤운상<sup>3)</sup>, Woon-Sang Yoon, 김재민<sup>2)</sup>, Jae-Min Kim

<sup>1)</sup> 바투엔지니어링 지반공학부, Ph.D., Geotech. Team, Batu Engineering.

<sup>2)</sup> 바투엔지니어링 지반공학부, Geotech. Team, Batu Engineering.

<sup>3)</sup> 바투엔지니어링 지반공학부, P.E. Geotech. Team, Batu Engineering.

### 1. 서론

근래 국내 카르스트 지대에 신설되는 고속도로 교량 구간의 석회 공동 분포로 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 논문에서는 국내 석회암 지역의 특성과 특히 중앙고속도로 및 중부 내륙 고속도로의 석회암 지대 통과 지역의 석회 공동의 분포 특성을 분석하고 제천, 단양 지역에서 실시된 조사 사례를 바탕으로 효과적인 부지 조사 및 보강 확인조사 방법을 제안하고자 한다.

### 2. 석회 공동의 분포 특성

국내의 석회암은 하부 고생대층의 조선누층군의 소위 '대석회암통'의 석회암류가 주를 이루며 국부적으로 선캠브리아기 및 상부 고생대 층내에서 일부 석회암층이 분포한다 (Lee, 1988). 대석회암통이 포함된 조선누층군은 두위봉형과 영월형으로 크게 구분되는 층서상의 특징을 보이며, 그 외에도 정선형, 평창형으로 구분되어지기도 한다. 조선 누층군의 하부는 세일, 사암, 규암 등의 불용해성 암석이 주를 이루는 양덕층군으로 이루어져 있으며, 그 상위에 소위 '대석회암통'이 놓이게 된다. 대석회암통은 대체로 석회암 또는 돌로마이트 등 석회질 암이 주종을 이루며, 세일 및 사암이 일부 협재한다. 조선누층군의 하부와 상부는 각각 부정합에 의해 선캠브리아기의 변성암류와 상부 고생대의 쇄설성 퇴적물이 주를 이루는 평안누층군이 분포한다. 대석회암통의 석회암층은 옥천대내의 북동부 지역에 대상으로 넓게 분포하며, 대표적인 분포 지역은 남쪽에서부터 문경, 단양, 제천, 영월, 평창, 정선 등으로서 이 중 교량 기초와 관련된 지역은 고속도로 신설 구간인 단양, 제천, 문경 지역이 해당한다. 여기서는 이들 교량 기초 부지와 관련된 석회 공동 시스템에 대하여 단양 지역을 중심으로 그 유형, 분포의 제어 요소, 공동내 퇴적물을 중심으로 조사, 분석하였다(그림 1).

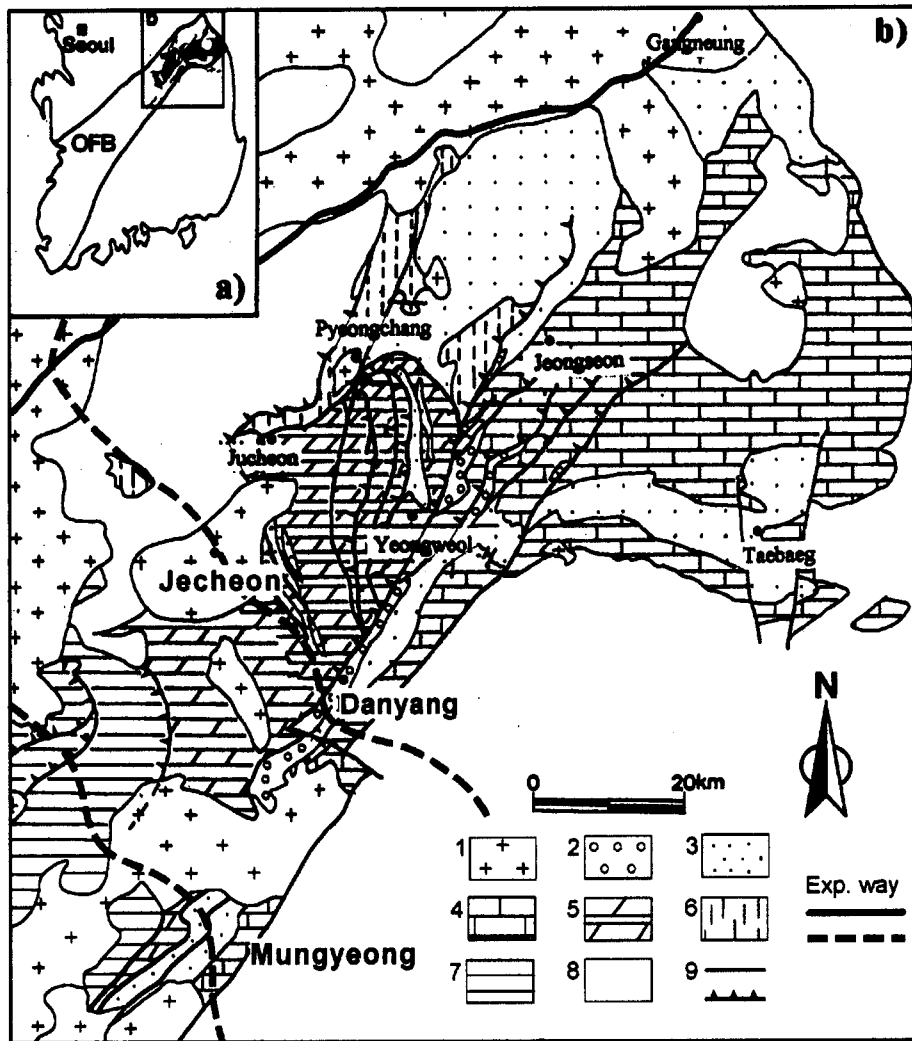


그림 1. 국내 석회암의 분포와 지질도

1. 중생대 화성암, 2. 대동층군, 3. 평안누층군, 4, 5, 6 조선누층군(4. 두위봉형, 5. 영월형, 6. 미분류 조선누층군), 7. 옥천층군, 8. 선캄브리아 변성암류, 9. 단층.
- 소위“대석회암통”의 석회암은 조선누층군(음영부분)에 해당함

## 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 연결된 대규모의 붕괴된 싱크홀(sinkhole) 등 여러 단계에서 다양한 규모와 형태를 가지는 공동 형태를 보이고 있다(그림 2). 그림 2는 고속도로 신설 구간 중 단양 지역의 교량 기초부에 대한 지질도로서 정밀 지표 지질조사와 시추 조사 자료를 이용하여 지층의 분포와 석회 공동의 분포 특성을 구성하였다. 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 진행된 바 있다(Culshaw and Waltham, 1987). 여기서

는 조사 지역에 분포하는 석회암의 특성과 석회 공동의 유형을 분석하여 석회 공동과 관련된 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 대비 시켰다(표 1).

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 확장 과 고립된 석회 공동의 연결
	Class IV Doline karst	들리네 및 싱크홀의 형성과 지하수위 주위의 석회 동굴의 발달
	Class V Major doline karst	들리네 및 석회 동굴의 붕괴 및 지하수위의 하강에 따른 새로운 석회 공동 시스템의 진전

홈과 공동 시스템(slot and cavity system)은 공동 발달 시기에서 비교적 초기 단계에 해당하는데, 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. 이 시스템은 Fookes and Hawkins(1988)의 Class I, II에 해당한다.

싱크홀과 동굴 시스템은 홈과 소규모의 고립된 공동이 상호 연결되고 보다 확장되어 지하수위까지 용해가 진행됨으로써 동굴과 싱크홀을 형성하고 결국 침하 또는 붕괴 들리네(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.

## 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 결정되는데 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 비 용해성 암석인 셰일 및 사암층에 의해 상, 하부가 둘러싸인 석회암층에서 석회 공동이 주로 분포하고 있으며, 특히 이 석회암층에 있어서도 석회암 내에 호층을 이루는 셰일 또는 이질 석회암층 사이의 괴상 석회암층에서 집중적으로 공동이 분포하며, 공동의 규모 역시 이 괴상 석회암의 두께에 직접적인 연관을 보이고 있다(그림 2).

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

지하수위의 수준은 공동 분포의 심도를 결정하는 중요한 요소로 작용하고 있다. 일반적으로 석회암의 용해과정에서 지하수위가 하강함에 따라 수직적으로 수 단의 동굴 시스템이 형성되며, 지하수위 부근에서 석회 공동의 수평적 확장에 의한 동굴의 형성이 현저한 것으로 알려져 있다. 조사 지역의 경우에서

도 석회 공동은 주로 현 지하수위의 상부에 집중적으로 분포하며, 현 지하수 이하에서는 지하수에 인접한 부분에 공동이 많이 분포하고 있다(그림 2). 석회 공동 및 단층 등 불연속면의 발달 위치에 따라 인접한 구역에서도 그 지하수위가 급격히 변화하므로 지하수위의 변동 상태 및 최저 지하수위의 확인은 석회 공동 및 동굴 시스템의 분포 위치 및 심도를 추정하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

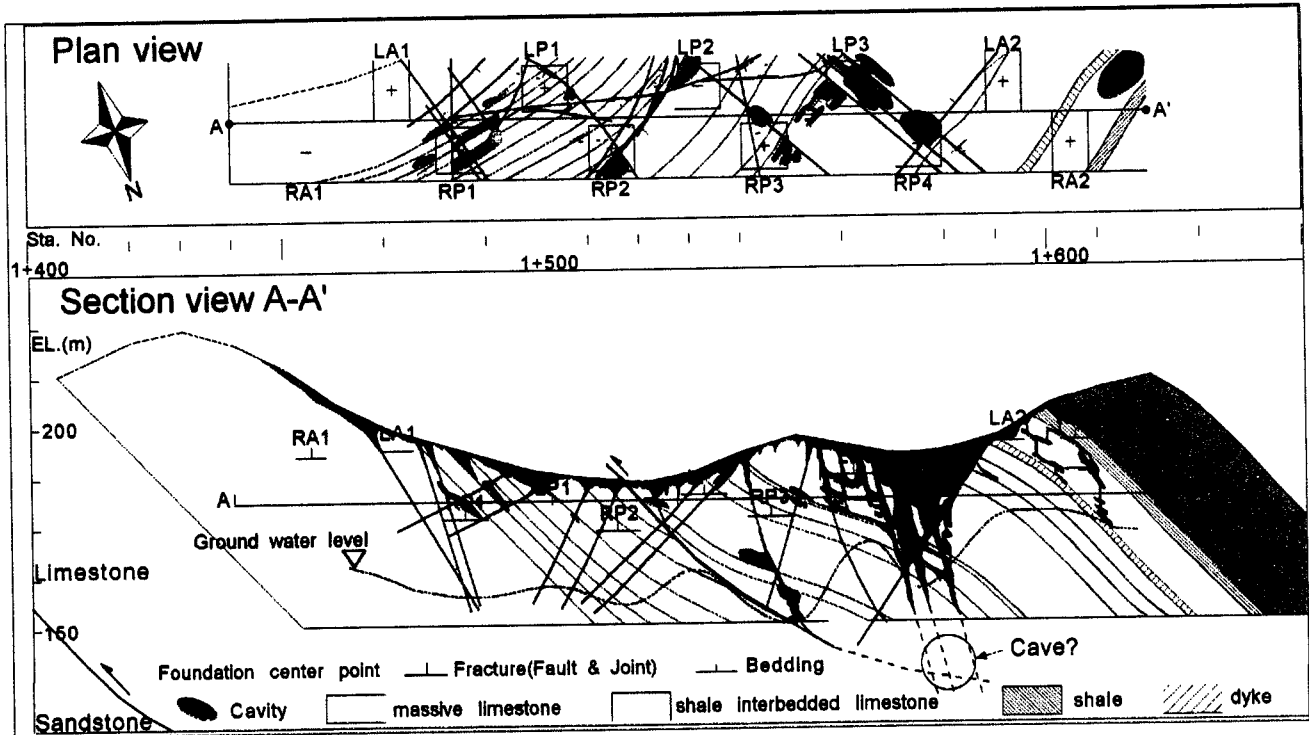


그림 2. 카르스트 지역(단양 지역의 사례)내 교량 기초 설계를 위한 지질도.

Plan view : 지질 평면도(해발 165m 평면),

Section view A-A' : 지질 단면도(지질 평면도상의 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 구분되어 질 수 있다.

첫째 퇴적물이 없는 빈 공동(Type I), 둘째 층상의 점토 및 실트로 채워진 공동(Type II, 셋째 비교적 원마도가 좋은 비용해성 암석의 자갈 및 점토질 실트의 혼합물에 의해 채워진 공동(Type III), 넷째 석회암의 각력과 암괴가 자갈, 점토, 실트 등과 혼합되어 채워진 공동으로 구분할 수 있다(Type IV)(표 2). 퇴적물이 없는 빈 공동은 지하수의 통로 또는 석회 동굴시스템 상부의 노출된 공동에서 발견되며, 층상의 점토 및 점토질 실트로 채워진 Type II 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 관찰된다. 이 퇴적물의 상부는 보통 비어있는 경우가 많다. Type III 공동 퇴적물은 외부에서 유입된 비용해성 암석의 원마도가 좋은 암편과 점토 또는 점토질 실트의 혼합물로 구성되며 가끔 석회암의 암편이 포함된다. 분급이 되어 있지 않은 혼합물은 싱크홀에서 주로 관찰된다. Type IV의 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	퇴적물 상대	분포 특성
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 분급이 되지않은 혼합물	• 싱크홀, TypeIV의 상부 또는 하부
Type IV	• 석회암의 각력 또는 암괴와 비용해성 암석의 자갈 및 적갈색 점토질 실트 등의 분급이 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 설계를 수행하여야 한다. 조사의 목적은 용해성 암층의 분포 특성, 지질 구조의 특성, 지하수의 특성 조사로부터 직접적인 공동 및 동굴 시스템의 분포 위치 및 형태, 공동 내 퇴적물의 특성으로 구체화하여야 하며, 각 조사법의 특성과 조사 시기 별 적용성 및 일반적인 조사 과정을 정리하고자 한다.

석회 공동의 조사는 적용시기 및 목적에 따라 개략 조사(reconnaissance)와 정밀 조사(detail survey), 확인 조사로 구분할 수 있으며, 적용 가능한 조사 방법은 표 3에 기술하는데 이 조사 방법들은 국내외 석회 공동조사를 위해 적용된 여러 사례가 있다.

개략 조사 단계에서 이용되는 물리탐사는 지표에서 탐사가 수행되는 방법으로 국내에서는 주로 쌍극자 배열법(dipole-dipole array)에 의한 2차원 전기비저항 탐사와 GPR탐사가 응용되었다. 이 방법 이외에도 국외의 경우에는 탄성파탐사(굴절법, 반사법), 전자탐사(electromagnetics), 정밀중력탐사(micro-gravity) 등을 적용한 예가 있다(McCann et al 1987, M. Long 1998). 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 국내의 적으로 이용 가능한 토모그래피 탐사 방법은 영상정보와 함께 심도별 탄성파속도(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 또는 복합적으로 적용하여 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 그라우팅에 의한 보강이 이루어진 경우에 정밀 조사 단계에서 수행되었던 토모그래피 탐사법에 의해 확인조사를 실시하여 시공전후 비교를 통한 그라우팅 효과를 검증하는 것이 타당하며, 현장 타설말뚝을 기초로 사용하는 경우는 석회암 지반의 불균질성 때문에 콘크리트 타설 시 문제가 발생될 가능성이 크므로 건전도 시험을 통한 품질확인이 필요하다.

표 3. 카르스트 지역의 교량 기초 설계를 위한 조사법의 활용

구 분	목 적	지질 조사	물리 탐사	비 고
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>• 기초질취면 상세 조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각종 토모그래피 탐사 (그라우팅 보강 공법)</li> <li>• 현타 말뚝 건전도시험 (타설말뚝 기초 형식)</li> </ul>	필요시

그림 3은 카르스트 지역내 교량 건설을 위한 부지 조사의 단계와 각 단계별 적용될 수 있는 조사 및 탐사법을 도시한 것이다. 카르스트 지역에서의 부지조사는 계획단계, 기본설계단계, 실시설계단계, 시공 단계 그리고 시공후 단계로 나눌수 있으며 석회공동 조사는 기본설계단계에서 개략탐사가 수행되어 개략적인 공동/연약대 분포를 확인한 후 안정성 및 경제성평가를 하고, 실시설계단계에서는 보강설계를 위한 정밀조사가 수행되어 보강대책이 수립되어야 한다. 시공단계에서는 보강에 대한 검증단계로 확인조사가 적용되어 구조물의 안정성에 대한 최종평가를 실시하여 추가보강이나 상부 구조물 시공의 여부를 판정한다.

카르스트 지역 내 교량 기초 보강공법으로 고려할 수 있는 방법들은 표 4.와 같이 정리될 수 있으며 보강공법은 조사된 지질여건과 상부 구조물의 규모 등을 고려한 안전성 평가와 경제성에 의해 선택되어야 한다. 국내의 경우 카르스트 지역 기초 보강공법으로는 공동 및 연약대의 점토 퇴적물을 치환·충진할 수 있는 삼중관 고압분사 주입공법의 가장 많이 적용되고 있으며 이 공법의 적용경우는 확인조사에 의한 평가가 요구된다.

각 단계별 적용 탐사법 및 적용사례는 다음과 같다.

### 3.1 개략탐사

개략탐사 단계에서는 상기하였듯이 국내의 경우는 쌍극자 배열에 의한 전기비저항탐사와 GPR탐사의 응용이 가장 활발하다. 전기비저항탐사는 석회공동 및 풍화 연약대의 범위에 대한 정보를 개략적으로 얻을 수 있고 교량 전구간에 대한 상대적 비교가 가능하므로 정밀조사의 위치 선정 및 추가조사의 필요성 판단에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 석회암 지대에서 기초의 불안정성을 지배하는 공동 및 풍화 연약대는 대개의 경우 지하수와 점토충진물을 다량 함유함에 따라 신선한 석회암의 고비저항값(약 10000 ohm-m 이상)과는 뚜렷한 대비를 보이므로 구조물 하부의 지반상태 및 지질구조를 파악하는 데에는 지표지질조사와 더불어 매우 효과적인 탐사법이다. 그러나, 지하수 상부에 빈 공동이 존재하는 경우에는 공동의 효과가 고비저항 값을 보이거나 탐사결과에서 인지되지 않는 상태를 보일 가능성이 크다. 따라서, 이러한 해석의 오류를 방지하기 위하여 천부의 빈공동 탐사에 효과가 큰 GPR탐사로 보완한다.

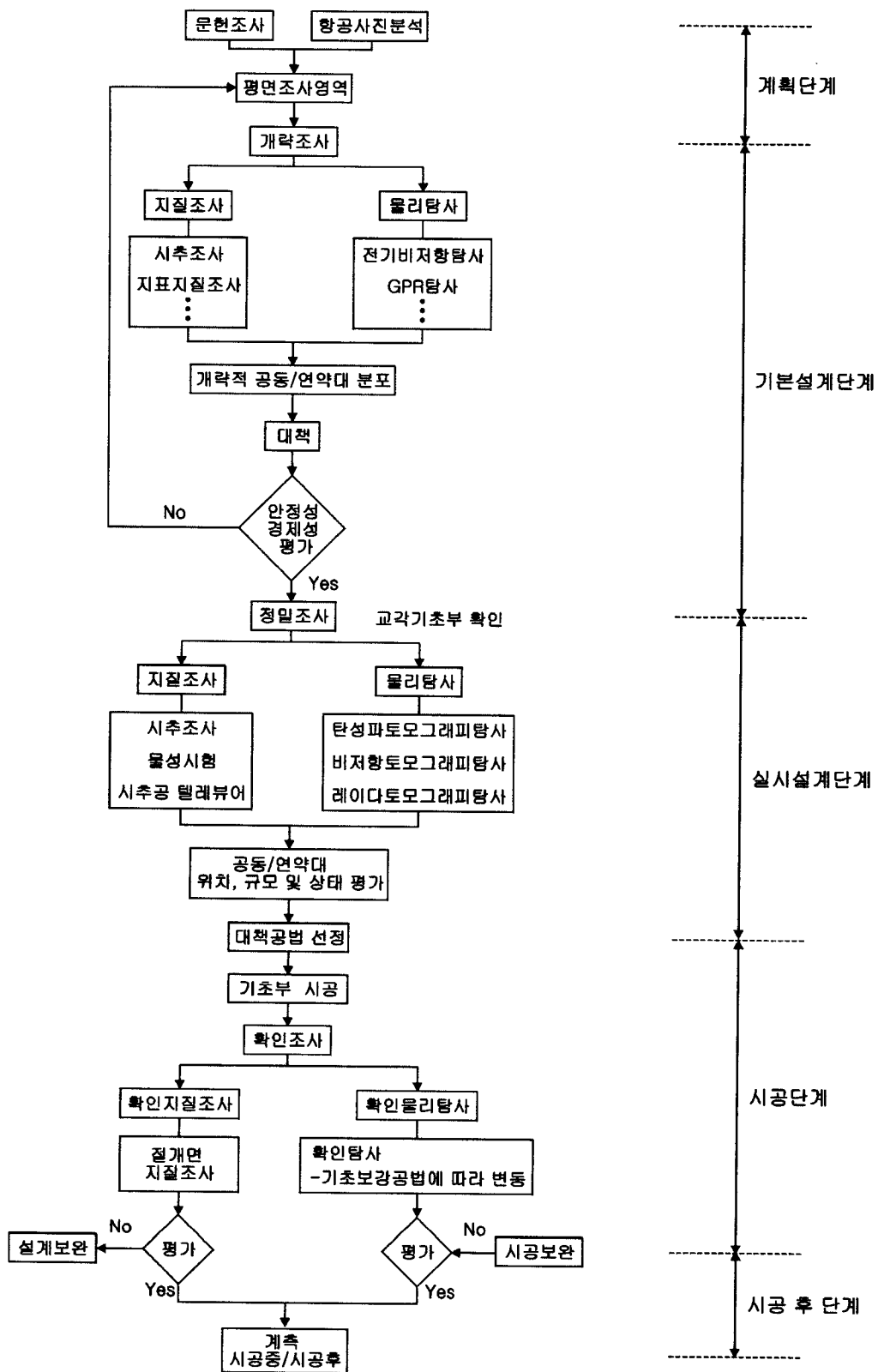
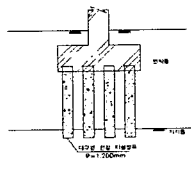
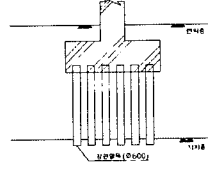
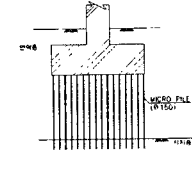
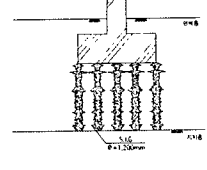


그림 3. 카르스트 지역내 교량 기초를 위한 부지 조사의 흐름도

표 4. 공법 비교

구분	깊은기초공법		지반보강공법	
	① 대구경 현장 타설 말뚝	② 강관말뚝	③ Micro Pile	④ 삼중관 고압분사 주입공법 + LW Curtain wall
공법 개요도				
공법 개요	<ol style="list-style-type: none"> <li>굴착기로 굴착한다.</li> <li>Bore hole내에 미리제작, 조립한 철근 케이지를 설치한다.</li> <li>현장에서 직접 콘크리트를 타설한다.</li> <li>직경 0.8~3.5m 까지의 대구경 철근 콘크리트 파일을 시공한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>굴착기로 천공한다.</li> <li>Bored Hole 내에 강관말뚝을 삽입한다.</li> <li>직경 800 mm 의 강관말뚝을 사용한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>천공기로 <math>\phi 200</math> 직경의 지반을 천공한다.</li> <li>Bored Hole내에 철근이나 <math>\phi 150</math> 직경의 강관을 삽입하고 시멘트 Grouting을 실시하여 Micro-Pile을 완성한다.</li> <li>Micro-Pile 하부 보강지역은 Grouting 한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3중관으로 천공하여 지중에 고압분류수(500kg/cm<sup>2</sup>)를 분사시킨다.</li> <li>연약대를 절삭하고, 그 슬라임을 지표면에 배출시키고 동시에 경화제로 그 공간을 충전시킨다.</li> <li>연약대를 개량단면으로 치환시켜 일체화 한다.</li> <li>교각 4 부근에는 천연동굴의 손상을 방지하고 고압분사 공법의 효율을 높이기 위해 LW 그라우팅을 실시한다.</li> </ol>
공법 타당성	<ol style="list-style-type: none"> <li>말뚝은 선단하중을 지반에 전달하므로 공동이 있을 경우, 새로운 침하 문제를 일으켜 하부 공동에 대한 별도의 대책이 요구된다.</li> <li>본당 지지력이 크지만 말뚝 선단에 공동이 있을 경우, 지지력 확보가 어렵다.</li> <li>공동 및 연약대(점토질층 협재)등으로 인하여 시공 관리가 어렵다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>말뚝은 선단하중을 지반에 전달하므로 공동이 있을 경우, 새로운 침하 문제를 일으켜 하부 공동에 대한 별도의 대책이 요구된다.</li> <li>말뚝선단에 공동이 있을 경우 지지력 확보가 어렵다.</li> <li>천공후 Bored Hole이 붕괴되거나 Hole 안에 Slime이 배출되지 않을 경우 별도의 항타장비가 필요하며, 충분히 근입되지 않을 경우 침하량이 크다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>장비의 규모가 작아 협소한 현장에서도 시공이 용이하다.</li> <li>직경이 작아 모든 지반에 적용이 용이하다.</li> <li>경사말뚝 시공이 가능하다.</li> <li>Cement Paste와 주변압반의 부착력이 커서 침하량이 작다.</li> <li>소구경이므로 Pile 간격을 좁힐수 있어 Group Pile의 지지력 감소를 최소화 할 수 있다.</li> <li>공동이 비어있거나 연약한 토사로 충전된 구간이 많으므로 안정성이 저하될 우려가 있다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>연약대를 치환·절삭하면서 지반을 개량하므로 강도 및 내구성이 우수하다.</li> <li>지반조건에 따라 개량단면의 조절이 가능하다.</li> <li>공동을 채우고, 연약대(점토질 협재)구간을 치환하여 주입재를 주입하므로 주변압반과 일체화시켜 보강효과가 좋다.</li> </ol>



지표물리 탐사법을 이용하는 개략탐사는 탐사측선의 효과적인 설계도 매우 중요한데 전기비저항 탐사는 구조물 하부를 전체적으로 판단할 수 있는 측선과 각 기초의 하부의 정보를 추출할 수 있는 측선이 만족되어야 하므로 일반적으로 구조물의 진행방향과 같은 종측선과 각 기초부에서 구조물의 진행방향에 수직인 횡측선으로 구성되어야 한다. 석회암 지역에서 공동 및 연약대의 분포는 매우 국부적으로 형성될 수 있어 현장여건이 허락하는 한 많은 측선을 구성하는 것이 유리하지만 최소한 종측선 2개 이상과 기초부당 횡측선 1개 이상으로 탐사가 수행되어야 해석적 오류를 방지할 수 있다. 전기비저항탐사에 있어 전극간격은 목적조사심도(기초폭의 2배 이상, 임수빈외, 1998)에 따라 조정하여야 하지만 여건이 허락하는 한 수평해상력을 고려하여 최대한 짧게 유지하는 것이 유리하다.

GPR탐사는 구조물 하부 전구간을 동시에 필요가 없으며 기초부에 국한되어 종횡으로 3~4개 측선 이상의 탐사가 필요하다. GPR탐사는 천부(10m미만)의 석회공동에 대한 탐사로 측선중 일부 자료에서는 유용한 정보를 획득하지 못하는 경우가 있지만 탐사측선이 짧고 측정단위로 탐사가 비교적 간편하여 전기비저항탐사 측선이 누락된 구간과 천부의 빈공동에 대한 보조자료로 이용될 수 있으므로 해석의 오류방지 및 정밀지반조사 여부의 판단을 위해서 반드시 필요하다.

그러나, 상기한 측선의 설계는 현장의 지형지물의 상태에 따라 유동적이므로 현장여건을 고려한 최적의 설계가 이루어져야 한다.

그림 4는 그림 2의 교각기초 부지에 대한 지표물리탐사 적용사례로, (a)는 종측선에 대한 전기비저항탐사의 결과이며 (b)는 GPR 탐사에서 확인되는 공동들의 반응 결과들이다.

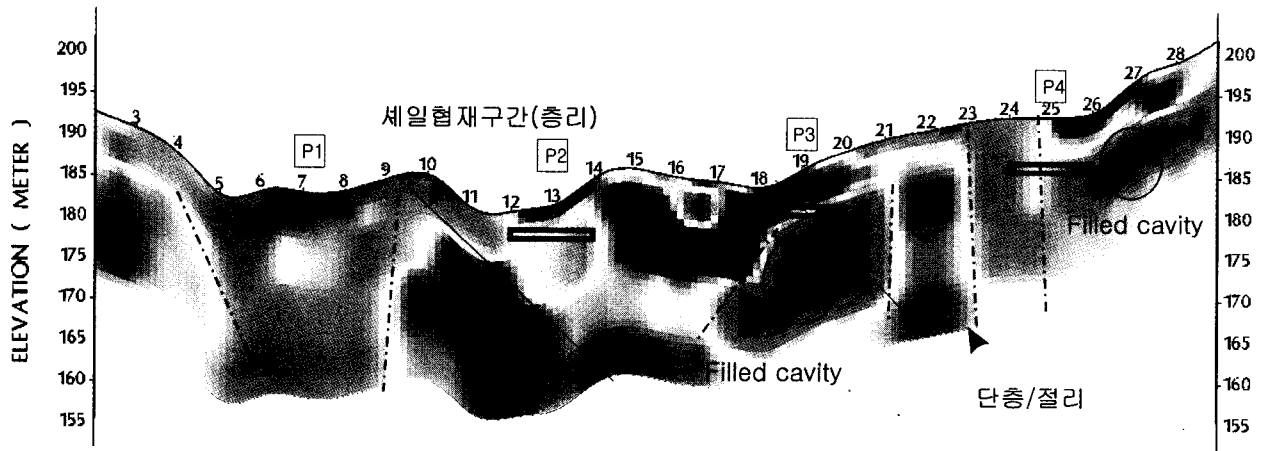
전기비저항탐사 결과에 의하면 교각 1, 3, 4번의 하부에서 공동 또는 연약대가 분포하는 것으로 확인되며 교각 2번의 하부는 상대적으로 안정된 지반으로 평가된다. 이중 교각 3번 하부에서 추정되는 공동은 GPR 탐사에서도 공동에 의한 반사신호로 나타나고 있다. 이 결과들은 지표지질조사 및 시추조사 결과에 의해 구성된 지질도에서 추정된 석회공동 분포현황을 검증하고 보다 구체적인 분포상태를 지시하고 있으며 소규모 공동이 협재된 연약대의 분포를 확인해 주고 있다.

### 3.2 정밀탐사

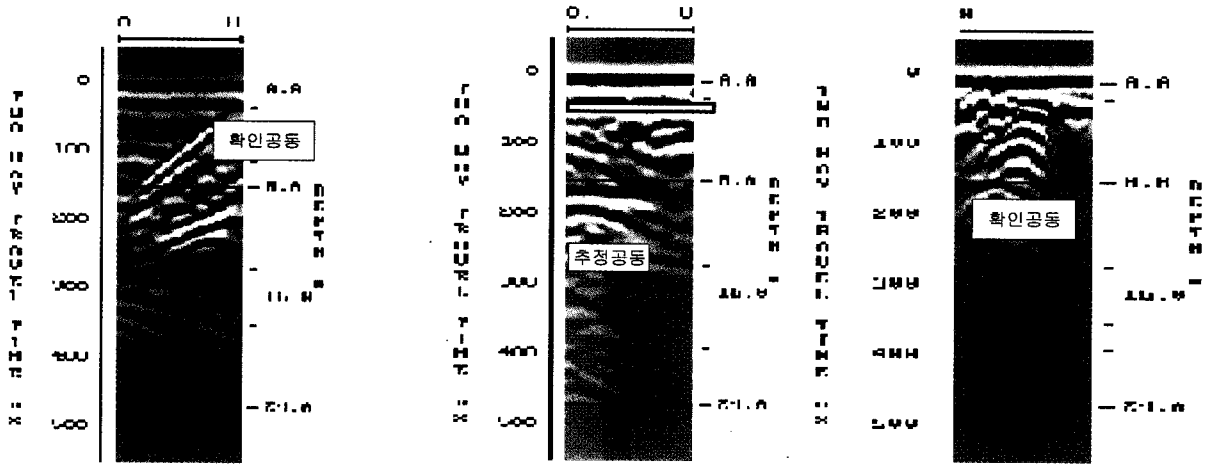
개략조사시 수행된 지표지질조사, 시추조사, 지표물리탐사의 결과를 바탕으로 보강이 필요할 것으로 판단되는 기초부에 대해 보강설계를 위한 정밀조사가 요구된다. 정밀조사에 이용되는 탐사법은 시추공을 이용하는 방법들로 국내외적으로 토모그래피탐사가 보편적이다. 토모그래피 탐사는 분류방법에 따라 다양하게 나뉘어지지만 이용되는 물리적 특성에 따라 탄성파, 전기비저항, 레이더 토모그래피로 나눌 수 있으며 이 방법들은 국내의 석회암 지역에서 탐사를 수행한 사례가 있다. 동일 부지에 대해 각 토모그래피 탐사가 공히 수행된 결과가 없어 어느 방법이 가장 효과적인지는 단정할 수 없지만 일반적으로 영상이미지(토모그램)는 고주파수의 특성을 가지며 송수신 간격을 조절할 수 있는 레이더 토모그래피 탐사의 해상력이 가장 좋은 것으로 생각되고, 정량적인 정보 측면에서 탄성학적 정보를 제공할 수 있는 탄성파 토모그래피 탐사가 유리한 것으로 알려져 있다.

본 사례연구에는 탄성파 토모그래피 탐사에 대한 예로서 그림 5와 같으며, 이 자료는 그림 4의 교각 3번에서 수행된 결과이다. 교각 기초부에 대한 탄성파 토모그래피탐사의 적용은 기초 하부의 국부적인 변화를 상세히 평가하기 위하여 "Z"자형의 3개 단면 또는 "X"자형 4개 단면이 일반적이거나, 교각의 크기, 경제성 등이 고려되어 1~2개 단면이 수행된 경우도 있다. 탐사심도는 기초접지압의 10%에 해당하는 기초폭의 2배가 일반적이거나 공동의 경우 기초폭의 3배까지는 지층 구조의 현황과 지반특성을 확인하여야 한다(임수빈외, 1998).

그림 5의 (a)는 각 단면의 결과를 펼쳐 2차원으로 표현한 결과이며 (b)는 2차원 결과들을 내삽(interpolation)하여 3차원으로 영상화한 결과이다.

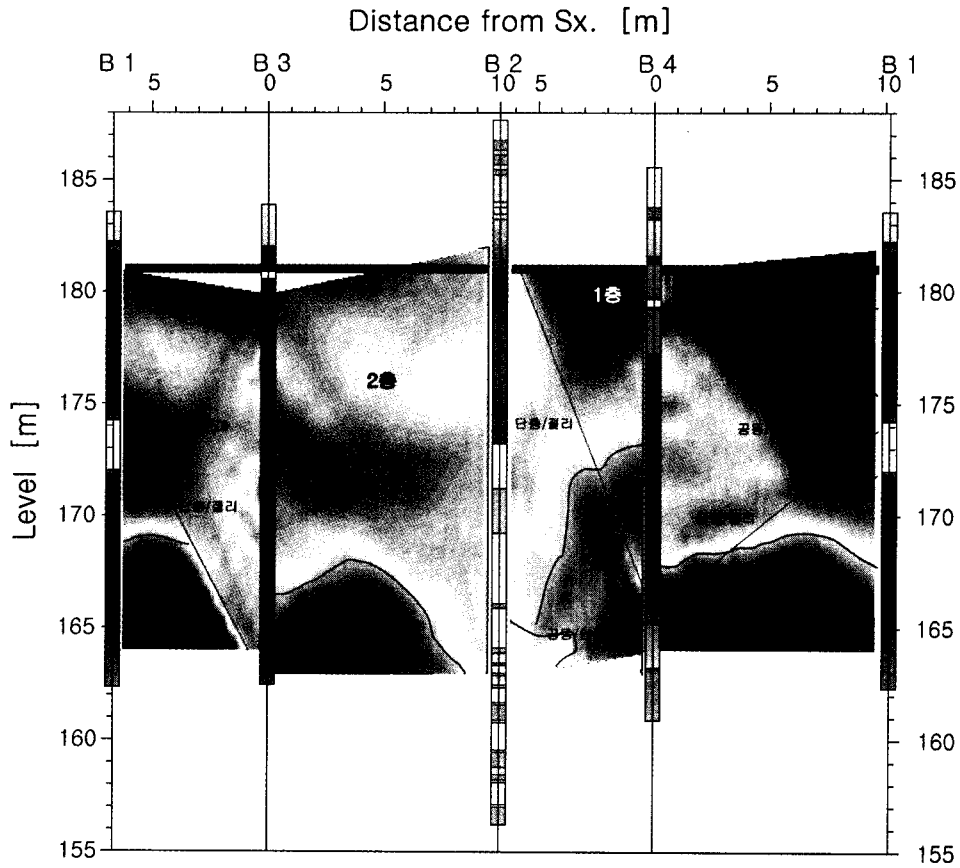


(a) 전기비저항탐사 예

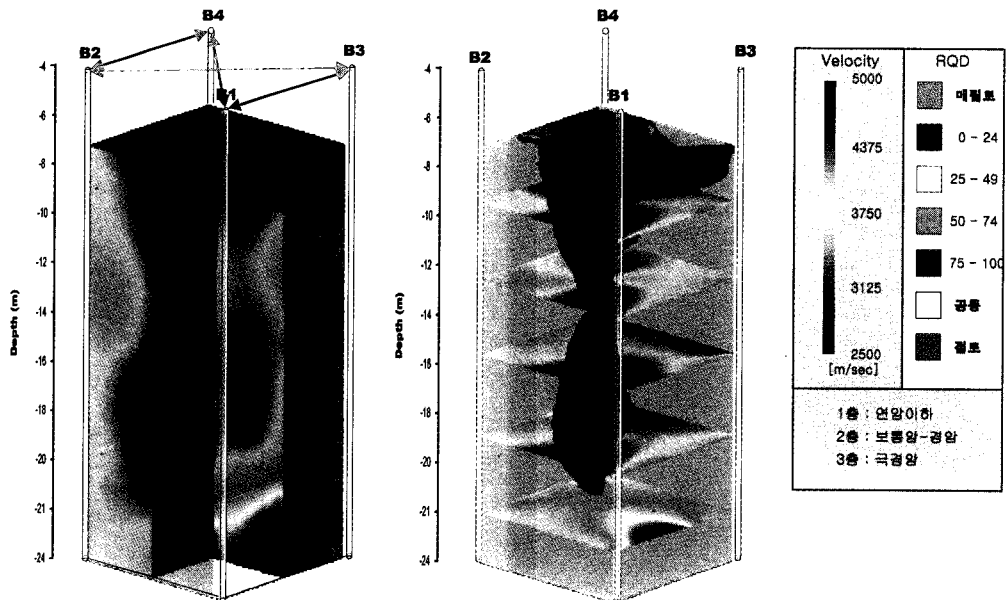


(b) GPR탐사 예

그림 4. 카르스트 지역내의 교량 기초설계를 위한 개략탐사 결과 예



(a) 2차원 탄성과 토모그램



(b) 3차원 탄성과 토모그램

그림 5. 카르스트 지역내의 교량 기초설계를 위한 탄성과 토모그래피탐사 결과 예

토모그램에서 확인되는 B1번공 EL.175m 하부의 공동은 지표물리 탐사의 결과와 동일하며 B2 번 공 EL.167m 하부에서 발견되는 상대적 저속도층은 공동으로 평가되나 그 규모는 이 결과만으로 추정하기 힘들다. EL.175m 부근에서 확인되는 공동의 규모는 그림 (b)에 의하면 상부의 연암이하 구간과 연관된 소규모의 고립된 공동으로 B1번공을 포함하는 사분면이 공동의 영향범위로 평가할 수 있다.

일반적으로 석회암의 경우 충분히 고결되면 탄성과 속도를 지배하는 인자는 퇴적암에서 볼 수 있는 공극률 등이 아니라 불연속면이나 공동과 같은 2차 공극에 직접적인 영향을 받게 된다. 특히, 국내의 경우와 같이 고생대 석회암은 풍화를 받지 않은 신선한 암반의 경우 5000m/sec 이상으로 평가된다. 따라서, 탄성과 속도에 의한 층구분은 건설표준품셈(탄성과 속도에 따른 암반분류)에 의해 연암이하(2.5km/sec 이하), 보통암-경암(2.8~4.1km/sec), 극경암(4.2km/sec 이상)의 3개 층으로 하였다. 이 중 첫 번째층인 연암이하 구간은 상당한 풍화를 받았거나 공동과 관련된 것으로 평가되고, 중간층은 불연속면이나 절리 주변이 용해된 홈(slot) 형태의 소규모 연약대가 협재되어 있는 구간으로 평가할 수 있으며, 극경암 구간은 신선한 석회암 암반으로 분류할 수 있다. 따라서 연암이하 구간은 보강이 반드시 고려되어야 하며 중간층은 저속도층의 분포 양상에 따라 보강여부를 판단하여야 한다.

### 3.3 확인조사

정밀지반조사의 결과와 실내 압축 시험 결과를 바탕으로 보강전 안정해석을 실시하여 상부 구조물의 허용변위를 만족시키는지 여부로 보강의 필요성을 결정하며, 침하발생 요소인 석회공동과 점토협재 연약대의 보강을 위해 연약지반 개량에 널리 이용되는 삼중관식 고압분사 공법을 적용하였다. 보강공의 배치는 그림 6과 같다. 본 사례는 상기한 탐사결과 지역이 기초 보강중인 관계로 인근 지역에서 수행된 결과를 수록하였다.

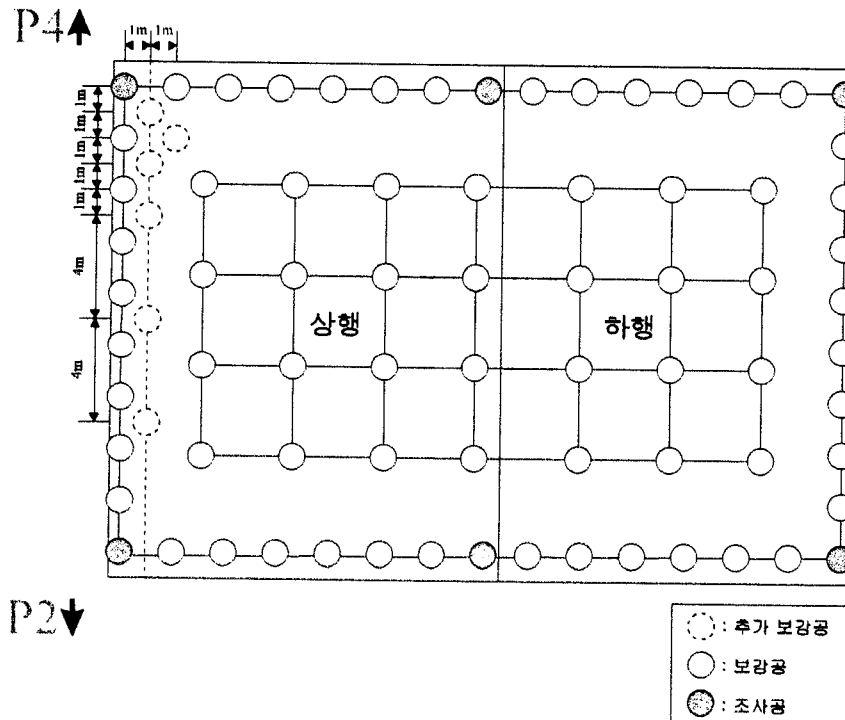


그림 6. 보강공 및 조사공 위치

보강공법의 성질에 따라 확인조사의 방법이 달라지며 본 사례의 경우와 같이 삼중관 고압분사주입 방식에 의해 보강된 지반의 보강효과 검증은 절대적 기준을 찾기 힘들다, 역학적 특성 및 개량의 균질성 확인을 위해 탄성과 탐사가 유용함으로 보강전후 유사 단면에 대해 탄성과 토모그래피 탐사를 실시함으로써 속도 및 공동 또는 연약대의 분포형상 비교를 통해 보강의 효과를 검증하는 방법을 택하였다. 보강 전후의 탄성과 토모그래피 탐사 결과의 예는 그림 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 보강전 조사에서 확인되는 공동/연약대의 영향이 보강후의 탄성과 토모그래피 탐사의 결과에서는 확인되지 않고 있으며 전체적으로 탄성과 속도가 증가되었음을 알 수 있다.

보강 후의 관리 탄성과 속도는 상기한 연암이상(2.5km/sec) 이상으로 볼 때 본 구간에 대한 보강 효과는 양호한 것으로 판단된다.

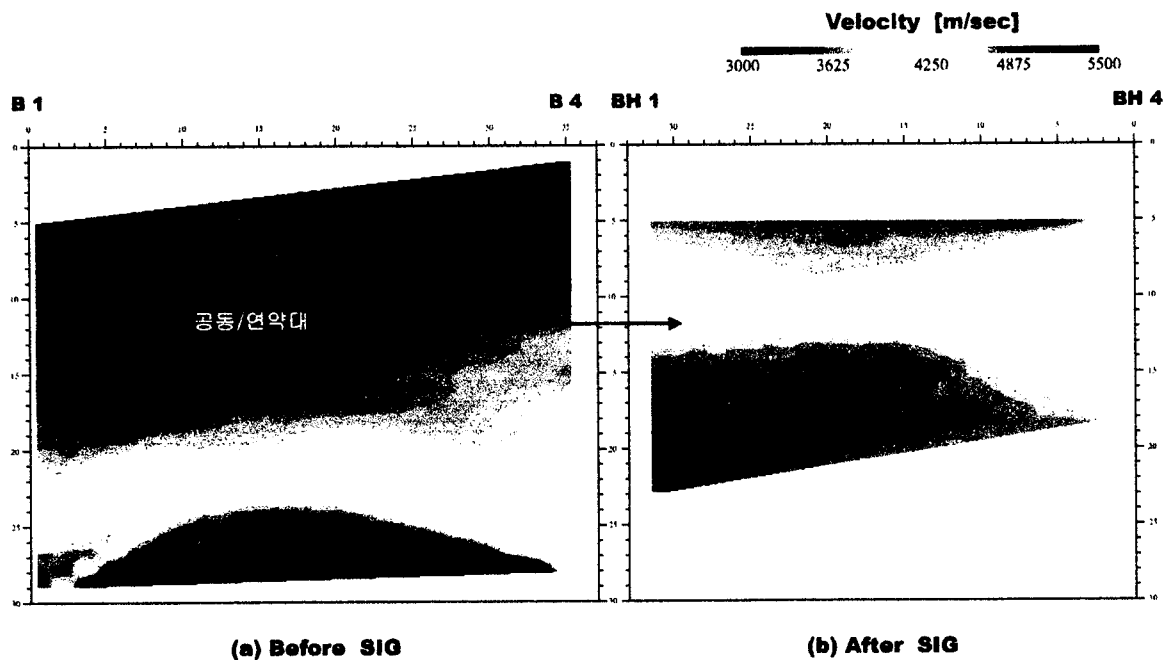


그림 7. 탄성과 토모그래피 탐사에 의한 삼중관 고압분사주입 방식 보강 효과검증

#### 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 공동 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 크게 구분하였다. 또한 이들 석회 공동의 분포의 제어 요인으로서 암석의 종류, 지질 구조, 지하수 특성을 분석함으로써 각 요인들의 특성과 상호 연관에 의해 석회 공동의 형태, 분포 위치가 제어되고 있음을 사례를 통하여 분석하였다. 또한 공동을 채우고 있는 퇴적물은 퇴적물의 구성과 분급도에 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 융해성

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 구체화하여야 하며, 이 때 효과적인 조사 기법으로 정밀 지표 지질조사, 전기비저항 탐사, 지하레이다 탐사, 탄성과 토모그래피 탐사가 개략조사, 정밀조사, 확인조사 등에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

개략조사 단계에서 지표물리탐사의 일환으로 이용되는 전기비저항탐사는 석회공동 및 풍화 연약대의 저비저항대와 신선한 석회암의 고비저항값과 뚜렷한 대비를 보이므로 구조물 하부의 지반상태 및 지질 구조를 파악하는 데에 지표지질조사와 더불어 매우 효과적인 탐사법이며, GPR 탐사는 탐사의 간편성으로 인하여 좁은 공간에서도 탐사가 가능하므로 기초부에 국한하여 전기비저항탐사의 보조자료로 활용될 수 있다.

정밀조사 단계와 확인조사 단계에서 주 탐사법인 토모그래피 탐사는 탄성과, 레이다, 전기비저항 토모그래피의 3 종류가 응용 가능하나, 역학적 특성이 반영되는 탄성과 토모그래피 탐사가 영상정보 면에서 레이다 토모그래피에 비해 해상력이 떨어지지만 보강전후의 관리기준과 공동 및 연약대의 분포상황을 비교적 정확하게 제공해 주므로 타 탐사에 비해 장점을 가지는 것으로 확인되었다.

## 5. 참고문헌

1. 윤운상, 김학수, 최원석 (1999), "석회 공동의 특성과 카르스트 지역내 교량기초를 위한 조사 설계", 한국지반공학회 '99 봄 학술발표회 논문집, pp. 399-406.
2. 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.
3. 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
4. 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
5. Goodman, R.E. (1993), Engineering Geology, John Wiley & Sons, Inc, pp.143-194.
6. Lee, D.S. (1988), Geology of Korea, Geological Society of Korea, Kyohak-Sa, pp.49-81
7. 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.
8. M. Long (1998), "A trial of five geophysical techniques to identify small scale karst", Proceedings of the 1st International Conference on Site Characterization Vol. 1, pp.569-574.
9. 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