

## 석회암 지역 재해 등급도 작성 및 응용에 관한 사례 연구

### A Case Study for Construction Hazard Zonation Maps and its Application

정의진<sup>1)</sup>, Uijin Jeong, 윤운상<sup>2)</sup>, Un-Sang Yoon, 김중휘<sup>3)</sup>, Jung-Hwi Kim, 마상준<sup>4)</sup>, Sang-Joon Ma, 김정환<sup>5)</sup>, Jeong-Hwan Kim, 이근병<sup>6)</sup>, K-B Lee

1) 서울대학교 지구환경과학부 박사과정, Graduate Student, SEES, Seoul National University

2) 주식회사 넥스지오 대표이사, CEO of NexGeo Inc.

3) 서울대학교 지구환경과학부 석사과정, Graduate Student, SEES, Seoul National University

4) 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept. KICT

5) 서울대학교 지구환경과학부 교수, Professor, SEES, Seoul National University

6) (주) 유신코어퍼레이션 지반공학부 이사, Director, Yooshin Eng. Corporation

**SYNOPSIS** : We presents an hazard zonation mapping technique in karst terrain and its assessment. From the detailed engineering geological mapping. Controlling factors of sink hole and limestone cave formation were discussed and 4 main hazard factors affecting hazard potential are identified as follows: prerequisite hazard factor(distributions of pre-existing sink holes and cavities), geomorphological hazard factors(slope gradient, vegetation, and drainage pattern etc.) geological hazard factors(lithology, fracture patterns and geological structures etc.) and hydraulic conditions(hydraulic head, annual fluctuation of ground water table and composition of g/w water). From the construction of hazard zonation map along the Jecheon-Maepo area, and vertical cross-sectional hazard zonations specific tunnel site we suggest hazard zonation rating systems.

**Key words** : hazard zonation; sink hole, limestone cave, hazard potential, Jecheon-Maepo, hazard zonation rating system

## 1. 서 론

싱크홀이나 석회 공동 등 카르스트 지역에서 흔히 관찰되는 용식 지형들은 침하나 붕락에 의한 토목 구조물의 손상과 지하수원의 오염 및 고갈 등 지질 재해를 유발시키는 직접적인 요인으로 작용한다. 최근 들어 국내에서도 석회암 지역에 대한 대규모 사회 기반 시설의 확충이 지속적으로 증대되고 있는 실정으로 석회암 지대의 용식 지형에 대한 이해와 용해성 암석에 대한 지질공학적인 특성에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다.

이 연구는 최근 철도 복선화 사업의 일환으로 지반조사 및 설계가 이루어진 제천-도담 지역에 대한 정밀 지표 지질 조사와 시추 조사, 각종 지구물리 탐사 자료 및 광물-암석학적 특성 분석을 통해 얻어진 지질학적 자료들을 바탕으로 지질재해 등급도(geological hazard zonation map)을 작성하는데 있다. 또한 재해 등급도를 활용하여 터널 등의 개별 구조물에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

## 2 지형 및 지질 특성

연구 지역은 제천시 대량동-단양군 매포읍에 이르는 약 10km 구간으로 5번 국도와 중앙선 철도가 연구지역 중심을 관통하고 있다. 연구 지역은 한반도 지체 구조상 옥천 습곡대 북동부에 해당하는 지역으로 이 지역에는 고생대 오로도비스기의 탄산염암류가 광범위하게 분포하고 있다. 이 지역은 옥천 습곡대의 중앙부에 위치하는 시대 미상의 변성 퇴적암류와 인접해 있고 심한 변성 및 변형 작용의 영향으로 영월이나 태백 지역의 하부 고생대 층과는 달리 퇴적학적 고생물학적 연구가 미진한 상태이다.

연구 지역 내에 분포하는 탄산염암류들은 단순히 백운암층(홍월리층)과 석회암층(삼태산층)으로만 구분되어 왔으나(태백산지구 지하자원 조사단, 1962) 금번 조사를 통해 암상적 특징을 기준으로 4개의 층군으로 새롭게 구분하였다. 이들은 각각 하부로부터 도리층, 신리층, 고명리층 및 단리층으로 구성되어 있으며, 고명리층의 경우 다시 3개의 멤버로 세분하였다.

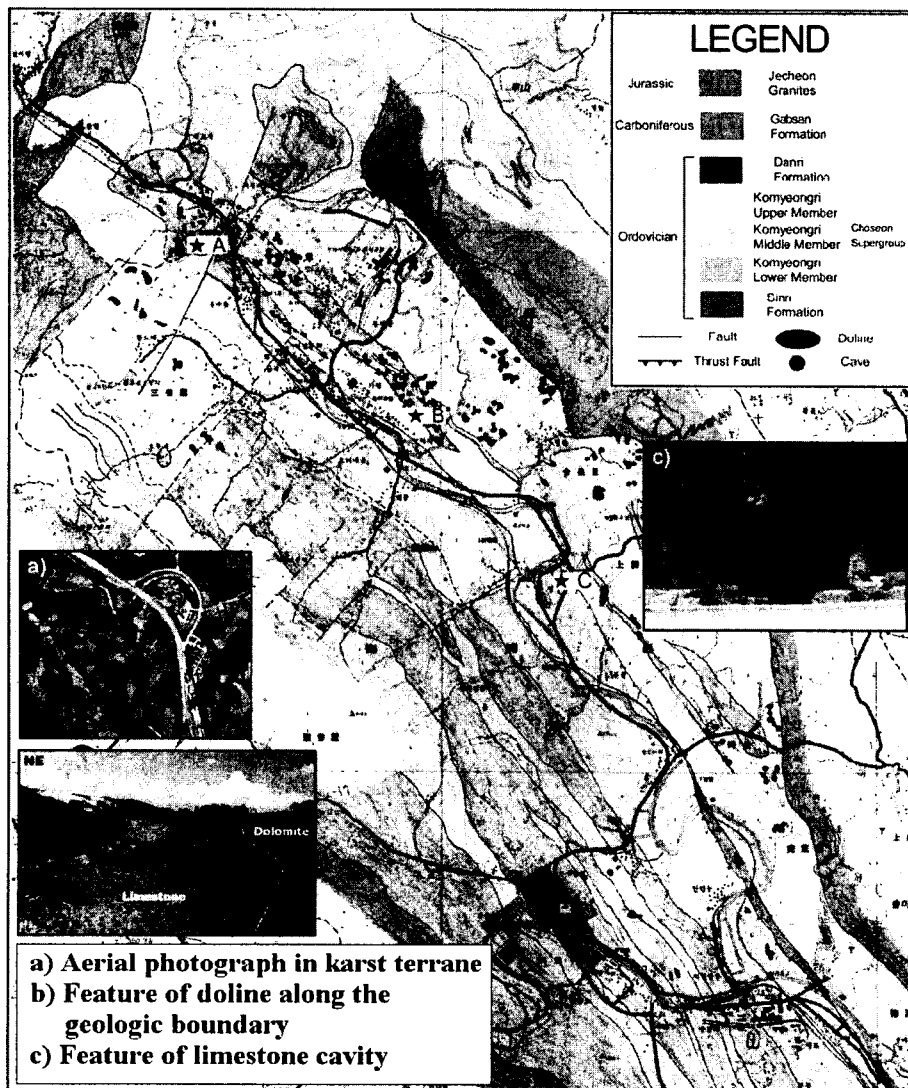


그림 1. 연구지역의 지질도 및 용식지형 분포 현황

## 3 용식 지형 형성 요인 분석

싱크홀이나 석회 공동 시스템 등 용식지형을 형성에 있어서는 암석의 종류와 물리, 화학적 특성, 불연속면 발달 상태, 지질 구조, 지형, 기후, 지하수위 등 매우 다양한 요인들이 복잡하게 관계하고 있다. 이번 연구에서는 용식 지형 형성에 주요 요인을 선행 요인(prerequisite factor), 지형 요인(morphological factors), 지질 요인(geological factors), 지하수 요인(hydrological factors) 및 외부 요인으로 구분하였다.

### 3.1 선행 요인 분석

지반 조건이나 환경의 변화에 의한 용식 지형의 추가적인 형성이나, 싱크홀의 붕락 등에 의한 재해 발생은 기존에 발달한 용식 지형의 분포 특성과 일차적으로는 깊은 관련이 있다(Yeung et. al, 2001). 따라서 대상 지역의 용식 지형 분포 현황 및 그 특성을 파악하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 이번 연구에서는 1:5,000 및 1:20,000 항공사진 및 DEM 자료를 활용하여 지표에 분포하고 있는 싱크홀에 대한 맵핑을 실시하였으며, 야외 조사와 시추 조사로부터 석회 공동의 위치와 개략적인 규모를 파악하였다.

### 3.2 지형 요인 분석

용해성 암석 분포 지역은 암석의 종류와 지형의 성숙 정도(maturity)에 따라 상부 표토층이 거의 발달하지 않는 산악지형에서부터 상당한 깊이의 토층 심도를 보이는 다양한 형태를 띠고 있다. 또한 대부분의 싱크홀의 경우는 하부가 점토나 현생의 점토나 사질 퇴적물 등으로 채워져 있다. 따라서 대부분의 용해성 암반이 분포하는 지역은 불규칙한 기반암선(rock head)을 보여준다. 이러한 차별적인 풍화 진행에 따른 불규칙한 기반암선의 발달을 예측할 수 있는 외적 요인으로는 지형 기복과 경사 및 수계 발달 상태(drainage system) 등을 들 수 있다. 이 외에도 상부 식생 현황 역시 지형 요인 분석의 요인으로 생각할 수 있다.

### 3.3 지질 요인 분석

#### 3.3.1 광물-암석학적 특징

용해성 암석 내에서 차지하는 방해석 함량과 암석 조직, 균열 발달 정도 등이 용식 지형 형성에 제어 요인으로 작용하는 것으로 보고된 바 있다(Goodman, 1993; Forth et. al, 1999). 연구 지역에 분포하는 다양한 암석에 대한 지구화학적 특성 분석 결과 위에서 언급한 요인 외에도 암석의 조직, 공극 발달 정도, 입자 크기, 불순물 및 점토 광물의 함량 등 다양한 요인들이 용식 지형 형성에 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났다. 이번 연구에서는 정밀 지표지질조사 결과와 지구화학적 특성 분석 결과를 바탕으로 각 층준에 대한 배점 기준을 마련하였다.

#### 3.3.2 강도 특성(strength properties)

암석 시료 혹은 현지 암반에 대한 강도 특성 역시 암석의 치밀한 정도와 풍화도를 반영하는 요인으로 용식 지형 형성 요인으로 고려할 수 있다. 무결암의 일축압축 강도가 일반적으로 사용되고 있으나 보다 넓은 지역에 대한 많은 양의 자료를 획득하기 위해 점하중 강도 시험이나 슈미트 해머 타격 시험 등을 사용할 수 있다. 이번 연구에서는 각기 다른 암종과 조직을 갖는 현지 암반에 대한 슈미트 해머 타격 시험을 통해 강도 특성을 측정하였다.

### 3.3.3 불연속면 발달 상태 및 지질 구조

암반 내에 발달하는 층리 등 1차 퇴적 구조와 절리를 포함하는 다양한 2차 불연속면들은 암반 내부의 지하수 유동 통로로 1차 공극보다 더욱 중요한 역할을 한다(Veni, 1987). 이러한 불연속면의 분포 특성을 파악하기 위해서는 불연속면의 방향성뿐만 아니라 불연속면의 크기를 지시할 수 있는 연장이나 간격, 절리 밀도 등 다양한 항목들에 대한 조사가 병행되어야 하며, 불연속면의 틈새와 충전물에 대한 정량화가 수반되어야 한다. 또한 단층이나 습곡축 등 대규모 지질 구조의 발달은 연약대를 형성하여 대규모 지하수의 유로로 작용하거나 불투수대를 형성함으로써 다양한 용식지형을 형성하는데 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 이번 연구에서는 각 암상에 따른 조사선 기법을 이용한 불연속면 조사를 실시하여 불연속면의 분포 특성 및 제반 역학적인 특성에 대한 기재를 실시하였으며, 대규모 지질구조를 인지하기 위해 항공사진과 음영기복도를 통한 선형 구조 분석 자료를 활용하였다.

### 3.4 지하수 요인

지하수는 용해성 암석의 용식 작용에 필수 불가결한 요인이다. 용식 지형 형성에 있어 현재 지하수위 뿐만 아니라 주변 환경 변화로 인한 수위 상승 혹은 하강 정도, 연간 지하수위 변동, 화학 조성 등이 중요한 요인으로 작용한다. 또한 암반이 절취 등에 의해 대기중에 노출되었을 때, 산성비의 영향 등으로 인한 풍화 및 용식 효과를 판단하기 위해 강우 및 지표수의 화학 조성 역시 중요한 분석 대상이 될 수 있다. 본 연구에서는 계획 노선을 따른 시추공에서 얻은 수위 자료를 참고 자료로 활용하였다.

## 4 방 법

위험도 분석(risk assessment)나 재해 등급도(hazard zonation map) 작성에 있어 많은 학자들에 의해 다양한 방법들이 제기된 바 있다(Hertz and Thomas, 1983; Fell, 1994; Einstein, 1997). 이 가운데 용식 작용에 따른 석회 공동 형성이나 싱크홀의 함몰 등 복잡한 지질학적 과정이 결합된 대한 합리적이고 통합적인 평가를 수행하기 위해서는 decision tree method가 가장 적합한 방법이다(그림 2).

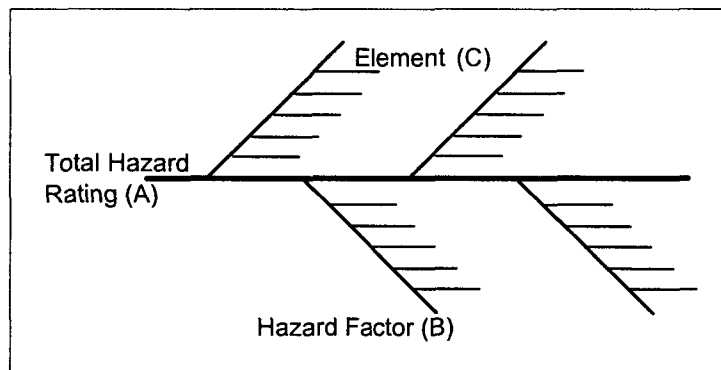


그림 2. decision tree model for hazard assessment

이 방법에서 위험도(risk)나 재해도(hazard)는 일반적으로 각 요인(factor)들에 대한 점수의 합으로 정의되며, 각 factor는 다시 재해도 작성의 가장 기본이 되는 hazard element로 세분된다. 이 모델에 따르면 최종적인 위험도 평가 점수는 각 하부 가지에서 상부 가지로 올라오는 순으로 계산되어 진다.

이번 연구에서는 광역적인 재해 등급도 작성에 있어서는 앞서 언급한 4가지의 재해도 평가 요인 가운데 선행 요인과 지질 요인에 대한 분석만을 수행하였으며, 수직 단면에 대한 재해 등급도 작성에 있어서는 지하수 요인을 추가로 고려하였다. 평면 광역 재해 등급도 작성시 선행 요인으로 고려한 항목은 항공사진 분석을 통해 얻어진 싱크홀의 면적과 야외 조사에서 획득된 석회 공동의 규모를 합산하여 단

위 면적당 용식 지형의 면적 비율을 직접 점수화 하였으며, 지질 요인 분석은 광물 암석학적인 특성과 지질 구조 발달 특성을 고려하였다. 이 가운데 지질 구조 발달 정도는 DEM을 이용한 선형 구조 분석 결과를 사용하였으며, 야외 조사 결과 단층으로 인지되는 선형구조에 대해서는 가중치를 부여하여 선형 구조의 선밀도를 점수화 하였다. 광물-암석학적인 요인은 각 암종에 따른 상대적인 용해 정도를 100점 만점으로 환산한 점수를 각 층준에 부여하는 것으로 점수화 하였다. 수직 단면에 대한 재해등급도 작성 시에는 지하수요인으로 지하수위를 고려하였으며, 현재 측정된 지하수위에서 상, 하부로 20m 구간을 최대 취약구간으로 구분하여 점수화 하였다. 불연속면 발달 상태 역시 각 단위 면적당 불연속면의 선밀도를 점수화 하였으며, 단층 등의 대규모 구조에 대해서는 가중치를 부여하였다. 각 분석 과정에 사용된 요인별 element는 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 재해 등급도 작성을 위한 재해 요인과 재해 성분(element) 및 이들의 배점 기준

Hazard factor		Elements		광역 등급	수직 단면 등급
요인(factors)	hazard value	Description	Value		
선행 요인	40 (10)	용식지형 분포 특성	1.000 (1.000)	○	○
지형 요인	- (-)	지형 분석	-	×	×
		수계 분석	-	×	×
		식생 분석	-	×	×
지질 요인	60 (80)	광물 암석학적 특성	0.667 (0.625)	○	○
		강도 특성	-	×	△
		불연속면 발달 상태	- (0.375)	×	○
		지질 구조	0.332 (-)	○	△
지하수 요인	- (10)	지하수위	- (1.000)	×	○
		수위 변동 폭(수두 차)	-	-	×
		지하수 성분	-	×	×

### 5 분석 결과

약 10km×3km 지역에 대해 0.5×0.5 단위 격자를 사용하여 앞서 언급한 재해도 요인에 대한 기본 분석을 실시하였다. 그 분석 결과는 그림 3과 같이 정리할 수 있다. 최종 재해 등급도 결과는 각 항목 점수에 가중치를 곱하여 합산한 후 100점 만점으로 정규화 하여 작성하였다.

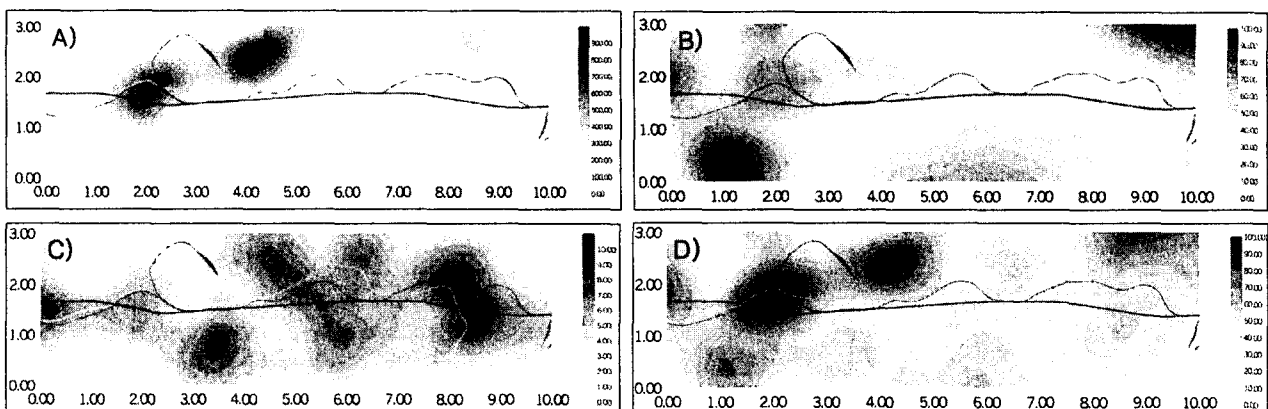


그림 3. 각 요인별 재해도 요인별 분석 결과 A) 용식지형 분포 밀도(km²/km²); B) 암상별 용해도 환산 점수; C) 선형구조 및 지질 구조 분포 밀도 (km/km²) 및 D) 최종 재해 등급도

야외에서 얻어진 정밀 지표지질조사 결과와 용식 지형에 대한 지질공학적 조사 결과 및 위의 분석 결과를 바탕으로 연구 지역 내에 발달하고 있는 카르스트 지형에 대해 I~V 등급의 재해 등급을 구분하였다(표 2). 또한 이를 바탕으로 각 등급에 따른 용식 지형 분포 특성과 추가적인 가능성 및 이들의 지질

학적 특성에 대해 기술하였으며, 각 등급별 재해 유형 및 규모 등에 대한 가능성을 분석하였다.

표 2. 재해 등급에 따른 지질 및 재해 특성 정리

위험도 등급	점 수	특 성
V 등급 (high hazard zone)	81~100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석회공동 및 추가적인 싱크홀 발생 가능성 매우 높음</li> <li>• 모암은 주로 괴상, 엽상 내지 얇은 세일 분할 석회암으로 구성되며 방해석의 구성 비율이 90% 이상이며 불순물로 규산염 광물이 소량 존재</li> <li>• 공동의 규모는 수 m 이상으로 각 공동은 지표면 혹은 지하에서 네트워크의 형태로 발달하여 다양한 지하수로가 발달</li> <li>• 다량의 싱크홀 및 기타 용식 지형을 지표면에서 쉽게 확인할 수 있으며, 면적비율 역시 (200m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>) 이상</li> <li>• 터널 굴착시 대규모 붕락이나 공동 퇴적물의 유입 및 지하수 출수 등이 예상되며, 지반 기초의 부동 침하 가능성이 매우 높음</li> </ul>
IV 등급 (hazard zone)	61~80	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석회공동 및 싱크홀의 형성 가능성 높음</li> <li>• 모암은 주로 석회암으로 두꺼운 세일 분할 석회암이나 리본 석회암으로 구성되어 이질성분 및 규산염 광물의 구성비율이 V 등급에 비해 다소 높음</li> <li>• 공동의 규모는 수 m에 이르나 V 등급에 비해 단속적이고 연속성이 약함</li> <li>• 다량의 싱크홀 및 용식 작용에 의한 지형적 특성을 지표면에서 관찰할 수 있으며, (100m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>) 정도의 면적율을 가짐</li> <li>• 굴착시 대규모 붕락이나 공동 퇴적물의 유입 및 지하수 출수 등이 예상되며, 기초 지반의 침하 역시 토목공사에서 큰 문제점으로 대두될 수 있음</li> </ul>
III 등급 (moderate hazard zone)	41~60	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석회공동 형성 가능성이 보통 정도로 지표상에서 소규모 용식지형 관찰</li> <li>• 모암은 주로 백운암질 석회암(dolomitic limestone)이나 리본 백운암 및 울리틱 백운암 등으로 방해석 성분이 일정 정도 포함된 암석이나 공극이 크고 불순물을 많이 함유한 탄산염암이 이 등급에 해당 됨</li> <li>• 주로 층리나 절리 등을 따른 석회공동 형성의 초기 단계의 형태로 발달하며 대부분 독립적인 형태로 발달</li> <li>• 단층 등 구조적 영향을 받는 일부 지역에서 대규모 공동의 발달 가능</li> <li>• 터널이나 교량 기초 등 구조물의 시공 시 위험 지역은 그리 많지 않고 단층 등의 구조대 통과 구간에서만 단층 파쇄대와 이를 따른 공동 형성에 주의를 요함</li> </ul>
II 등급 (low hazard zone)	21~40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대규모 석회공동 발달 가능성이 매우 미약</li> <li>• 주로 1차 구조가 발달한 층상 및 엽상 백운암이나 상대적으로 공극율이 높아 지하수의 유동이 유리한 조립질 백운암(울리틱 백운암) 등으로 구성</li> <li>• 1차 구조를 따른 소규모 공동 형성 가능하며, 단층 등의 지질구조와 관련하여 중규모 공동 발달 가능성이 있음</li> <li>• 지하 굴착 시 대규모 위험성은 없으나 공동이 지하수 유로(channel)로 작용하여 대규모 지하수의 유입 가능성이 있음. 교량 기초 등 기초지반과 관련된 곳에서는 큰 문제를 야기시키지 않음</li> </ul>
I 등급 (safe zone)	1~20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석회공동의 발달 가능성이 거의 없음</li> <li>• 구조적 연약대나 방해석 집합체 등에서 소규모 공동(bug) 형성</li> <li>• 주로 순수한 백운암이나 불순물로 규산염 광물을 포함한 백운암으로 구성되어 있으며, 방해석의 함량이 극히 낮음(5% 미만)</li> <li>• 대규모 단층대 등의 구조적 원인과 지하수위의 변화 등이 복합적으로 작용하지 않는다면 공동 형성 가능성은 거의 없음</li> <li>• 비교적 단단한 암질로 구성되어 있어 토목 공사에 큰 어려움은 없음</li> </ul>

위에서 제시한 재해등급의 적정성을 검증하기 위해 연구 지역 내에서 가장 높은 재해위험도를 가지고 있는 제천시 대량동 일대의 지역에 대한 상세 지질 재해도를 작성하였다. 이 지역은 석회암과 백운암의

경계 지역으로 대규모 단층(호미골 단층, 지경 단층)이 계획 노선을 관통하고 있는 지역으로 터널 시공이 계획된 지역이다. 이 지역의 터널구간에 대한 재해 등급도 작성 결과를 위한 평가 요인은 앞서 설명한 것처럼 광물-암석학적 특성을 고려한 지질 분포 단면, 불연속면 분포 특성, 지질 구조 및 지하수위 분포 특성으로 결과는 그림 4와 같다.

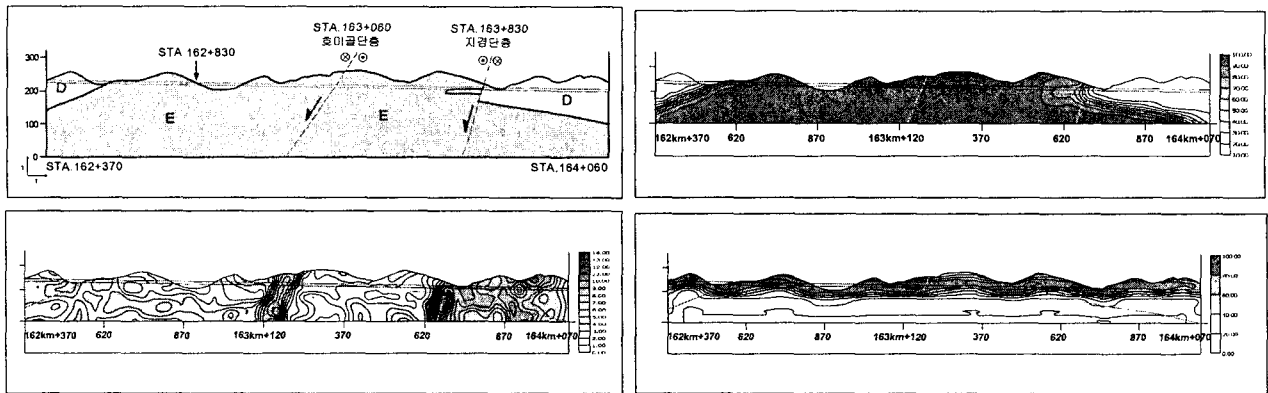


그림 4. 대량 지역 터널 구조물에 대한 재해등급도(좌상: 지질 분포, 우상: 지질 분포 rating 결과, 우하: 불연속면 및 단층 분포 rating 결과, 우하: 지하수위 rating 결과)

그림 5는 위의 결과를 종합하여 작성한 터널 단면 구간에 대한 지질 재해 등급도를 작성한 것으로 터널 통과 구간에 대해 위험도 등급과 터널 설계에 적용된 암반 등급을 비교한 결과이다. 위험도 등급의 경우 터널의 토피고가 낮은 지역(STA 162Km+600, STA 163Km+070 주변)과 호미골 단층(STA 163Km+200) 분포 지역에서 V등급을 보여주고 있으며 이때의 암반 등급 역시 IV 등급으로 터널 전체 구간에서 가장 낮은 값을 보여주고 있다. 재해 등급이 IV 등급인 구간에 대해서는 일부 구간을 제외하고 대부분 IV~III 등급의 암반 등급을 보이는 구간이 비교적 넓게 분포하고 있어 암반 등급과 어느 정도 일치하는 결과를 보여주고 있다. 또한 비교적 양호한 재해 등급(II~III 등급)을 갖는 지역에서는 암반 등급 역시 많은 부분 I~II 등급을 보여주고 있다.

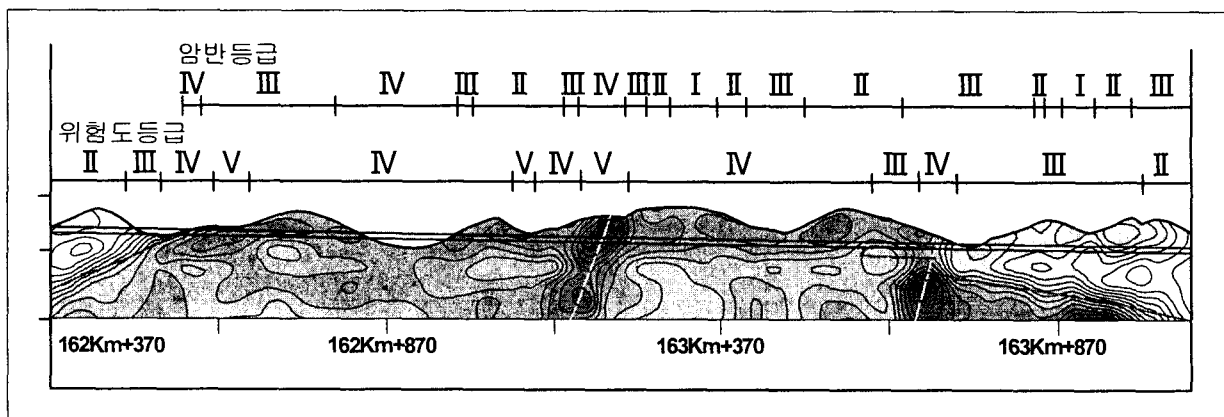


그림 5 터널 단면에 대한 재해등급도 작성 결과 및 위험도 등급과 암반 등급의 비교 결과

## 6 결론 및 토의

최근 철도 복선화 사업의 일환으로 지반조사 및 설계가 이루어진 제천-매포 지역에 대한 새로운 지질 조사 및 다양한 방법의 지질학적 접근을 통해 석회암 분포 지역에 대한 광역적인 지질 재해도를 작성하고 재해등급을 제시하였다. 또한 이 결과를 실제 터널 설계 등에 적용하기 위해 터널이 계획된 구간에 대해 수직 단면에 대한 지질재해도의 작성을 시도하였으며 기존의 암반 분류 결과와 비교하였다.

지질 재해도 작성은 지반공학의 다양한 분야에서 위험도 분석 방법으로 일반적으로 사용되는 decision tree method를 사용하였다. 그러나 이 방법은 이론적 완결성과 계산의 효율성 및 다양한 요소들을 간편하고 합리적으로 고려할 수 있다는 장점에도 불구하고 실제 계산에 있어 인위적이고 주관적인 판단에 상당 부분을 의존하는 단점이 있다. 본 연구에서는 재해 요인값(hazard value)과 가중치(weighting value)를 결정하기 위해 다양한 값들을 입력하였을 때의 결과 가운데 현장 조사 결과에 가장 부합하는 것을 채택하는 방식을 취하였다. 그러나 실제로 보다 정량적이고 합리적인 분석을 위해서는 가중치 결정과 요인값 결정에 있어 보다 세련된 통계학적 접근이 필요하다.

현재 제시된 결과는 석회암 분포 지역에 대한 재해 등급도 작성에 필요한 다양한 요인 가운데 극히 일부만을 고려한 결과로 앞으로도 지형 요인이나 보다 많은 지질 요인 및 지하수 요인 등에 대한 고려가 필요하며, 더 나아가 위험도 분석(risk analysis)을 위해서는 파급도(consequence)를 고려할 수 있는 경제-사회적인 요인에 관한 고려까지 수반되어야 할 것이다.

용해성 암석이 분포하는 지역에 대한 재해 등급도의 작성은 GIS-DB 시스템과 연계되므로 석회 공동이나 싱크홀 등의 용식 지형 분포 특성 및 형성 가능성에 대한 보다 효율적이고 체계적인 정보를 제공할 것으로 기대된다. 또한 정밀한 지질학적, 지구물리학적 조사 자료가 획득된다면 터널 등 개별 구조물 단위에서 용해성 암반의 지질 공학적 특성을 반영한 암반 분류 체계를 수립하는데 훌륭한 도구로 사용될 수 있다.

## 7. 참고 문헌

1. 태백산지구 지하자원 조사단, 태백산지구 지하자원 보고서 및 태백산지구 지질도, 대한지질학회·국립지질조사소, pp. 107.1962)
2. Beck, B. F., 1996, Karst geohazards: engineering and environmental problems in karst terrane. *Proceedings of the 5th multidisciplinary conference*, Gatlinburg, April, 1995, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol 33, Issue 2, 49A.
3. Einstein, H. H., 1997, Landslide risk-systematic approaches to assessment and management, *Proceeding of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, Potterdam, pp. 25-50.
4. Fell, R., 1994, Landslide risk assessment and acceptable risk, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 261-272.
5. Forth, R. A., Butcher, D. and Senior, R., 1999, Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal, *Eng. Geol.*, Vol. 52, pp. 67-74.
6. Goodman, R. E., 1993, *Engineering Geology*, John Wiley & Sons, New York, pp.143-193
- Yeung et. al, 2001)
7. Hertz, D. B. and Thomas, H., 1983, *Risk analysis and its application*, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 124.
8. Veni, G., 1987, Fracture permeability; implications on cave and sinkhole development and their environmental assessment. *Proceedings of 2nd multidisciplinary conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst*, Orlando, pp. 101-108. 49A.
9. Yeung, M. R., Hu, R. L., Wang, S. J. and Xiang, J. X., 2001, Application of GIS to the assessment of karst collapse risk in Tangshan, China, *Rock Mechanics in the National Interest*, Elsworth, pp. 451-458.