

## 가중치를 이용한 국내 석회동굴 발달 방향성 해석법 개발에 관한 연구

이상균<sup>1\*</sup> · 박형동<sup>2</sup>

<sup>1</sup>산업통상자원부 R&D 전략기획단, <sup>2</sup>서울대학교 에너지자원공학과

### Weighted Analysis Method for Estimating the Orientation of Limestone Caves in Korea

Sang-Kyun Lee<sup>1\*</sup> and Hyeong-Dong Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Office of Strategic R&D Planning, Ministry of Trade Industry and Energy

<sup>2</sup>Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University

다양한 원인에 의해 형성된 석회동굴 내 주굴과 가지굴 등은 일정한 방향성을 가지고 발달하게 된다. 이러한 원인은 주변에 분포하고 있는 층리나 절리, 단층 등과 같은 불연속면의 영향을 받고 형성된다고 알려지고 있다. 석회동굴에 발달된 방향성은 구간별로 어떤 불연속면의 영향을 받고 있는지는 확인이 가능하지만, 전체적으로 주된 영향을 준 불연속면과 발달 방향성을 방향을 명확히 파악하기는 어렵다. 본 연구는 이러한 석회동굴의 발달 방향성을 전체적으로 파악하기 위하여 연장성에 가중치를 적용하는 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 새롭게 제안하여 분석하였다. 새로운 분석법을 적용하기 위해 국내 석회동굴 9개를 임의 선정하여 분석하였다. 분석 결과, 발달 방향성 분포만을 해석한 것보다 두 가지 방식을 적용한 해석방법이 동굴 발달 방향성을 더욱 명확하게 해석할 수 있음을 확인하였다. 석회동굴의 주 층리각과 평균 폭의 연관성 분석을 통해 주 층리의 경사각이 저각일수록 석회동굴 폭 확장에 더 많은 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 현장자료를 이용하여 RMR 분석을 수행함으로써 각 석회동굴의 지반안정성을 분석하였다.

**주요어** : 석회동굴, 발달 방향성, 연장성, 광역선구조, 불연속면, 단층, RMR

Limestone caves that consist of main passages and branches are formed by a variety of processes, and have the characteristic of developing with a preferred orientation controlled by discontinuities such as bedding, joints, and faults around the cave. However, it is difficult to analyze a representative orientation from various orientations. To interpret the overall development orientation of limestone caves, this study proposes new development orientation analysis methods, termed the Average Span Ratio Method (ASRM) and the Individual Development Ratio Method (IDRM), using the weighting of persistence. Nine limestone caves in Korea were randomly selected for testing the new methods. The methods show a stronger development orientation for limestone caves than that obtained by traditional methods, which consider only the distribution of development orientations. Based on an analysis of the relationship between the average span and the dip angle of bedding, it is confirmed that shallowly dipping bedding is a major contributor to the expansion of span in limestone caves. In addition, using scan-line survey data acquired in the field, we perform an RMR analysis of stability of the ground around limestone caves.

**Key words** : limestone cave, development orientation, lineament, discontinuity, fault, RMR

\*Corresponding author: enada@osp.go.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

우리나라는 북한과 남한 일대에 고생대 오르도비스기의 석회암지대가 분포하고 있으며 수많은 석회동굴과 돌리네가 발달하고 있다. 카르스트(karst) 지형의 특성인 이러한 현상들은 석회암의 용식 작용에 의해 시작된다. 석회암의 용식은 100년에 수 mm도 안 되게 매우 서서히 진행되며, 용식이 진행된 암석의 강도는 통상 30~100 MPa의 범위를 보이는 것으로 보고되고 있다 (Dreybrodt *et al.*, 2002; Waltham and Fookes, 2012). 석회용식의 확장은 절리면, 층리면, 단층면 등을 따라 진행되지만 용식의 원인을 한가지로 규정하여 정의하기는 매우 어려운 일이며 그 연장 상태를 파악하는 것도 어렵다. 석회공동 내지 석회동굴이 외부로 노출되지 않는 한 그 진행 상태와 방향을 전혀 알 수 없으며, 노출되지 않은 석회용식은 싱크홀이나 지반침하와 같은 잠재적 위험성을 내포하게 된다(Culshaw and Waltham, 1987; Randall *et al.*, 1999).

석회동굴의 발달 방향성은 용식이 발달하는 지점의 불연속면 방향성에 주된 영향을 받아 형성되기 때문에 전체적인 방향성을 표현하기는 어려우며, 판단하기도 어렵다(Eneko *et al.*, 2010; Kim, 2011). 그러나 석회동굴의 발달은 방향성을 가지고 진행하며, 주변 불연속면의 영향을 받아 형성되기 때문에 전체 석회동굴의 발달 방향성에 주된 영향성을 주는 구조지질학적 인자를 판단할 수 있다.

본 연구에서는 석회동굴의 발달 방향성을 명확하게 판단하기 위해 발달 방향성의 연장에 가중치를 적용하여 전체적인 발달 방향성을 파악하고 그 원인이 어떤 불연속면에 주로 영향을 받았는지를 파악하고자 하였다.

연구를 위해 국내 석회동굴 총 9개를 임의 선정하여 분석을 수행하였다(Fig. 1, Table 1).

## 발달 방향성 분석

### 발달 방향성만을 이용한 해석

석회동굴의 발달과 확장은 단층, 습곡, 절리 또는 층리와 같은 구조지질학적 방향성과 연관되어 나타나지만,

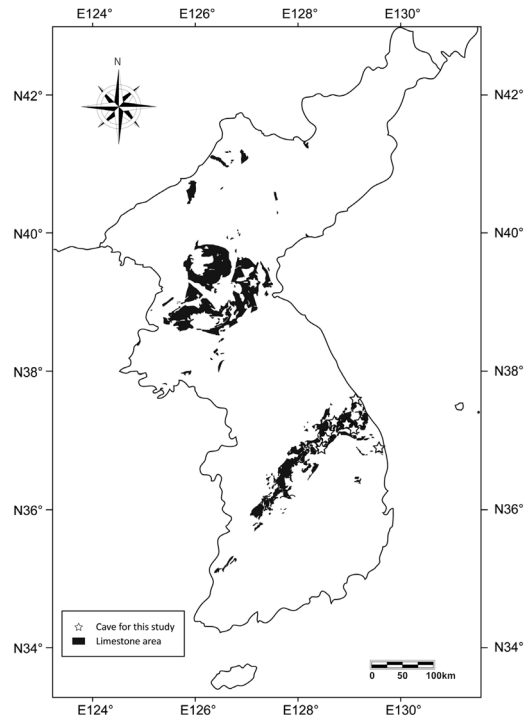
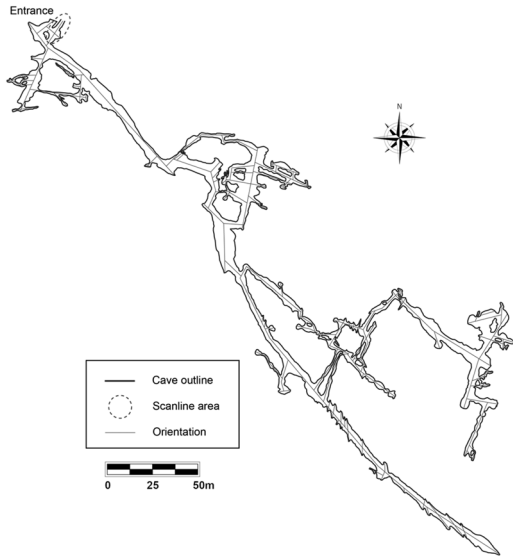


Fig. 1. Limestone areas and locations of the studied caves in Korea (based on KIGAM, 2001).

Table 1. List of the analyzed limestone caves.

Cave	Classification	Region	Entrance Opening
Gosu	Natural Monument 256	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	Open
Gossi	Natural Monument 219	Yeongwol-gun Gangwon-do	Open
Nodong	Natural Monument 262	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	Closed
Baengnyong	Natural Monument 260	Pyeongchang-gun Gangwon-do	Open
Seongnyu	Natural Monument 155	Uljin-gun Gyeongsangbuk-do	Open
Ondal	Natural Monument 261	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	Open
Yongyeon	City/Province Monument 39	Taebaek-si Gangwon-do	Open
Cheongok	Not-registered	Donghae-si Gangwon-do	Open
Hwanseon (a part of Daeri Caves)	Natural Monument 178	Samcheok-si Gangwon-do	Open



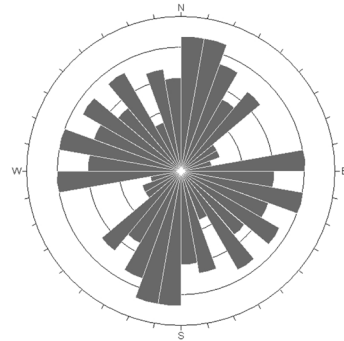
**Fig. 2.** Development orientation in Ondal Cave (based on Kim, 2011). A total of 162 orientations were extracted using the reported cave map. The main development orientation is expected to be NW-SE and NNE-SSW.

용식이 정확히 어느 지점에서부터 시작되었는지는 판단하기는 어렵다. 또한, 석회동굴의 주굴이나 가지굴을 내포하는 모든 발달 방향성은 그 폭과 연장에 있어서 매우 제각기이기 때문에 단순 발달 방향성만을 이용한다면 전체적인 동굴의 발달 방향성을 판단하기 어렵다.

Fig. 2는 충청남도 단양지역에 분포하는 온달동굴의 동굴도로 발달 방향성을 육안으로 판단할 때, 북서-남동 방향의 방향이 우세하고 일부 북북동-남남서 방향이 우세한 것으로 예상되고 있다. 그러나 석회동굴의 발달 방향성만을 분석한 결과 예상과 다르게 전체적으로 다양한 방향성을 보이며 발달하는 것으로 해석되었다(Fig. 3). 이는 크고 작은 주굴과 가지굴의 특성을 반영하지 못하기 때문으로 판단되며, 이를 보완하기 위해 석회동굴의 발달 방향성에 가중치를 적용하여 해석하는 방법이 필요할 것으로 판단하였다.

**연장성에 가중치를 적용한 해석법**

동굴의 발달 방향성 판단을 위해 기존에 조사된 동굴도에서 방향성을 추출하였다(Hong, 1991; Woo *et al.*, 2008; Hong, 2008; Kim, 2011). 석회동굴 내 방향성 추출은 동굴 내 통로를 중심으로 수행하였으며, 석회동굴 내 발달 방향성의 폭 측정간격은 5m 간격으로 임의 설정하여 산출하였다.



**Fig. 3.** Development orientation analysis using the distribution of extracted orientations from the map of Ondal cave. Unlike the expected orientation in Fig. 2, a rose diagram shows various possible orientations.

추출된 석회동굴의 발달 방향성은 주굴과 가지굴의 특성을 포함하는 것으로 주굴이나 연장성이 우수한 발달 방향성들이 석회동굴의 발달에 주된 영향을 주고 있다고 판단할 수 있다. 이러한 특성을 반영하기 위해서 연장성에 가중치를 적용한 방법을 제안하고자 한다.

**평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method, ASRM)**

석회동굴 내에 발달 방향성을 보이는 주굴 및 가지굴은 지질의 다양한 요인의 영향을 동일하게 받으며 현재의 형태를 이루고 있다고 판단할 수 있다. 발달 방향성을 보이는 모든 통로들은 폭이라는 동일한 요소를 내포하고 있기 때문에 모든 발달 방향성의 폭을 산출하여 평균치를 이용하여 판단하고자 하였다. 또한, 전체 석회동굴의 평균 폭 보다도 짧은 연장성을 보이는 발달 방향성은 석회동굴의 발달에 주된 영향을 주지 못한다고 판단하였다.

평균 폭 비율법은 동굴 내 발달 방향성의 폭을 모두 추출한 후 전체 폭의 평균을 기준으로 하여 기준 이상이 되는 발달 방향성에만 가중치를 주어 전체적인 석회동굴의 발달 방향성을 판단하는 기법이다.

주된 발달 방향성의 분포와 그 영향성을 같이 판단하기 위해 평균 폭의 2배, 3배, 5배를 추가적인 기준으로 설정하여 전체적인 발달 방향성의 형성을 같이 분석하였다.

**개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method, IDRM)**

석회동굴의 형성은 다양한 요인의 영향을 받았지만

실제 동굴의 확장 및 발달을 보이는 방향성은 국부적인 구조지질학적 영향에 의해 발달할 수 있다. 또한, 발달 방향성을 보이는 석회동굴 내 모든 통로(주굴 및 가지굴)는 국부적인 영향의 연결이라고 할 수 있다. 따라서, 각 발달 방향성의 연장성을 해당 발달 방향성의 폭에 대한 비율(개별 발달 비율)로 판단하여 각 통로의 발달 방향성을 해석할 필요가 있다.

개별 발달 비율법은 각 발달 방향성의 특성을 반영하는 해석법으로 발달 방향성을 보이는 것에 대한 해석만을 위한 기법이다. 방향성을 가지면서 발달한다는 것은 발달 방향의 연장이 폭보다 클 때 가능한 것으로 폭 대비 연장성이 최소 1.5배 이상일 경우만 석회동굴의 발달에 주된 영향을 주고 있는 것으로 판단할 수 있다.

평균 폭 비율법과 같이 주된 발달 방향성의 분포와 그 영향성을 같이 판단하기 위해 폭 대비 연장성의 비율이 2배, 3배, 5배인 추가적인 기준을 설정하여 전체적인 발달 방향성의 형성을 같이 분석하였다.

#### 가중치 설정 방식

가중치 설정 방식은 평균 폭 비율법과 개별 발달 비율법이 동일하다. 평균 폭 비율법에서는 석회동굴 발달 방향성 전체의 평균 폭이 최소 기준(criteria)으로 평균 폭의 2배, 3배, 5배를 기준으로 가중치를 설정한다. 개별 발달 비율법은 각 발달 방향성의 폭에 대한 연장성의 비율이 1.5인 수치를 최소 기준으로 하여 폭 대비 연장의 비율 2, 3, 5에 대한 기준을 추가적으로 제시하여 가중치를 설정한다.

기준 이하일 경우에는 가중치 없이 기본치(Basic)만을 주며, 기준을 초과할 경우는 기준에 대한 발달 방향성의 연장성의 길이의 비율만큼을 가중하는 방식이 적용된다(Equation 1).

*If Persistence length of orientation ≤ Criteria,  
set weighting value = Basic*

*But Persistence length of orientation > Criteria,  
set weighting value =*

$$Basic \times \frac{Persistence\ length\ of\ orientation}{Criteria}$$

(Equation 1)

#### 동굴의 발달 방향성 분석

발달 방향성을 특성을 정확하게 판단하기 위해 발달 방향성만을 이용하여 분석하고 연장성에 가중치가 적용

된 평균 폭 비율법과 개별 발달 비율법을 이용하여 같이 분석을 수행하였다(Table 2).

고수동굴의 경우, 발달 방향성만을 해석한 결과 N60~70°E과 N0~20°W, N30~40°W 등이 우세한 것으로 보이지만, 연장성에 가중치를 적용한 해석에서는 발달 방향성만 분석한 결과에서는 잘 나타나지 않은 N50~60°W의 방향성이 우세하게 나타나고 있다. 개별 발달 비율법의 해석에 의하면 평균 폭 비율법에서는 두각되지 않았던 N30~40°W와 N30~40°E 방향성이 나타나고 있다. 두 방향성들은 방향성 폭에 대한 발달 정도가 우수한 형태들로 지금은 우세한 형태를 보이지는 않을지 몰라도 점차 동굴 발달에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

고씨동굴과 백룡동굴, 성류동굴, 천곡동굴, 환선동굴의 경우 전체 발달 양상은 방향성만을 분석한 것과 연장성에 가중치를 적용한 분석 모두 유사한 형태를 보이며 부수적인 방향성에서만 차이를 보이고 있다.

노동동굴은 발달 방향성만을 분석한 결과에서는 N40~50°E이 우세하고 N50~60°E 방향성이 부수적으로 나타나는 특성을 보인다. 그러나 평균 폭 비율법 해석에서는 N30~40°E이 매우 우세하며 이차적으로 N40~60°E과 N70~80°E이 나타나고 있다. 또한, 개별 발달 비율법의 해석에서는 N50~60°E의 방향성이 우세하며 이와 함께 N30~50°E, N70~80°E 방향성이 나타난다. 따라서 노동동굴의 발달 방향성의 주요 방향성은 N30~60°E로 넓게 해석하는 것이 맞는 것으로 판단된다.

온달동굴의 해석에서는 연장성에 가중치를 적용한 발달 방향성 해석의 필요성이 크게 나타난다. 방향성 분석만으로는 일부 N0~20°E의 방향성이 우수한 것으로 보이나 우세한 정도를 명확하게 말할 수 없을 만큼 다양한 방향성의 발달이 있는 것으로 해석된다. 그러나 온달동굴의 실제 발달 방향성을 보면 전체적으로 북서-남동 방향과 북북동-남남서방향이 우세하게 보이기 때문에 정확한 판단이 어렵다(Fig. 2, Fig. 3). 연장성에 가중치를 적용한 해석에서는 이러한 난해한 해석의 문제점이 해소되었다. 평균 폭 비율법을 적용하였을 경우에는 N40~50°W 방향성을 중심으로 N30~60°W이 가장 우세하고 부수적으로 N10~40°E과 N70~80°W 방향성이 나타나는 것으로 해석된다. 이와 달리 개별 발달 비율법에서는 N30~40°W를 중심으로 N40~90°W와 N80~90°E, N0~40°E의 방향성도 같이 나타나고 있다.

용연동굴은 방향성만 분석한 결과와 연장성에 가중치를 적용한 결과에서 나타난 우세한 방향성이 차이를 보

**Table 2.** Comparison between analysis using only the distribution of the development orientation and analysis using a weighting for the persistence of development orientations, for each limestone cave. Each number below ASRM is the average span ratio, and each number below IDRM is the ratio of the persistence for each span.

Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence of lineament							
		Average Span Ratio Method (ASRM)				Individual Development Ratio Method (IDRM)			
		1	2	3	5	1.5	2	3	5
Gosu									
Gossi									
Nodong									
Baeng-nyong									
Seong-nyu									
Ondal									
Yong-yeon									
Cheong-gok									
Hwan-seon									

이고 있다. 방향성 분석만 수행한 결과에서는 N20~30°E 이 가장 우세하다. 평균 폭 비율법을 적용하면 N30~40°W 방향성이 가장 우세하고 방향성 분석과 개별 발달 비율법이 사용된 분석에서는 방향성 분석만 수행된

결과와 같이 N20~30°E가 우세하게 나타나는 양상을 보인다. 이러한 경우 두 방향 모두 동굴의 발달에 영향을 미치는 것으로 해석하여야 할 것으로 판단된다.

**Table 3.** Discontinuities around each of the studied limestone caves. A scan-line survey was performed according to the ISRM (1978) guidelines. To protect the caves, data were acquired primarily at the entrances and exits.

Cave	Location	Set	Orientation		Spacing (cm)		Persistence (m)		Roughness (0-20)		Aperture (mm)		Strength (MPa)	
			Strike	Dip	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.		
Gosu	Entrance	Left lateral	Set 1	N5°W	62°SW	25.2	12.11	3.88	0.23	3.5	0.53	0	0	48.14
			Set 2	N73°W	80°NE	19	58.17	2.14	0.23	4.56	0.92	0.56	0.51	42.1
			Set 3	N54°W	81°SW	20.37	34.82	4.64	2.6	7.14	2.57	2.39	0.49	15.41
			Set 4	N87°W	64°SW	24.19	60.9	1.89	0.33	4.67	1	1.33	0.5	
		Set 5	N77°E	86°SE	2.5	1.31	3.08	2.11	3.44	0.53	0	0		
	Right lateral	Set 1	N39°W	31°NE	20.74	50.19	2.5	0.67	2.25	0.87	0.15	0.55	17.79	
		Set 2	N57°E	57°SE	32.36	-	5	0	5	0	2	0		
	Exit	Left lateral	Set 1	N21°W	70°NE	35.24	50.32	1.63	0.47	4.06	1.61	0	0	18.57
Set 2			N10°E	87°NW	52.23	62.95	1.71	0.39	5.43	0.98	0.86	0.38		
Right lateral		Set 1	N23°W	76°NE	10.39	21.97	1.98	0.11	2.82	1.01	0.05	0.21	19.94	
		Set 2	N77°E	62°NW	19.88	43.12	1.93	0.17	3.48	0.9	0.13	0.34		
Gossi	Entrance	Upper slope	Set 1	N58°E	44°NW	5.58	4.86	4.24	0.71	4.26	0.45	1.65	0.49	36.88
			Set 1	N5°E	66°SE	20.2	17.64	2.3	0.46	4	1.2	1.87	0.83	36.48
		Right slope	Set 2	N51°E	76°SE	5.34	2.01	2.17	0.29	2.67	1.15	1	0	17.71
			Set 3	N62°E	68°NW	9.14	-	2.25	0.35	2	-	2	-	
			Set 4	N29°W	74°NE	69.82	63.4	2.4	0.55	3.2	1.64	1.3	0.45	
Set 5	N52°W	73°SW	26.15	16.81	2.67	0.58	2.67	1.15	1	0				
Nodong	Entrance	Left slope	Set 1	N82°E	67°NW	24.18	28.67	4.16	0.71	4.47	0.97	1.36	0.8	19.59
			Set 2	N80°E	43°NW	4.98	1.2	6.09	1.25	3.44	1.48	1.64	0.92	17.71
			Set 3	N9°W	57°NE	15.09	1.22	5.6	0.55	3.2	1.1	0.6	0.55	
		Right slope	Set 1	N45°E	62°NW	7.98	2.47	2.2	0.25	3.58	1.11	1.45	0.5	17.55
			Set 2	N75°W	62°SW	5.24	0.55	2.73	0.53	3.64	0.79	1.64	0.49	
Set 3	N26°W	61°SW	17.16	15.69	1.83	0.29	4.67	1.15	1.33	0.58				
Baengnyong	Entrance	Right slope	Set 1	N77°E	28°NW	6.32	1.93	6.91	1.38	2.52	0.76	2.08	1.09	26.95
			Set 2	N86°W	65°SW	22.91	3.06	3.37	1.73	2.29	0.71	1.63	0.49	28.75
			Set 3	N15°W	66°SW	23.62	3.06	4.91	1.04	2.64	0.81	0.82	0.4	
Seongnyu	Entrance	Left slope	Set 1	N77°W	34°NE	101.16	98.25	6.5	0.93	3.5	0.93	1.75	1.04	36.02
			Set 2	N9°W	75°SW	114.38	171.5	9.36	1.45	3.5	0.52	1.21	0.58	27.87
			Set 3	N65°E	87°NW	215.67	395.3	7.45	1.21	2.55	0.69	0.82	0.4	
		Right slope	Set 1	N53°W	25°NE	45.46	39.91	8.1	2.13	2.7	0.48	4.6	1.71	19.67
			Set 2	N50°W	82°SW	50.86	30.35	7.5	1.17	3.83	0.83	0.83	0.39	27.18
Set 3	N62°E	88°SE	20	-	5	-	5	-	1	-				
Ondal	Entrance	Left lateral	Set 1	N3°W	52°NE	18.09	31.95	1.02	0.46	4.1	1.37	1.62	0.8	58.2
			Set 2	N83°E	48°SE	1.56	0.28	0.95	0.42	2.36	0.81	1.82	0.4	
			Set 3	N68°W	53°SW	2.2	0.37	0.6	0.22	2.8	1.1	1.4	0.55	
			Set 4	N65°W	87°SW	2	0.81	1.8	0.45	3.6	0.89	1.8	0.45	
		Right lateral	Set 1	N22°W	62°SW	3.14	0.99	1.37	0.22	3.43	0.91	0.76	0.43	58.2
Set 2	N35°W	80°SW	10.54	8.1	1.13	0.23	5.25	1.04	0.88	0.35				
Yongyeon	Entrance	Right lateral	Set 1	N78°W	54°SW	20.65	20.96	3.55	0.51	3.35	0.67	1.1	0.45	25.92
			Set 2	N23°E	41°NW	24.54	23.96	3.03	0.74	3.41	0.71	0.82	0.39	27.49
			Set 3	N37°W	76°NE	52.15	55.13	3.17	0.39	3.42	1.08	1.25	0.87	
Cheongok	Entrance	Upper slope	Set 1	N43°W	16°SW	49.27	42.75	5.25	2.22	4.5	0.58	1.25	0.5	33.62
			Set 2	N26°W	88°NE	123.3	83.13	4.5	2.89	5.25	1.5	1.5	0.58	18.16
			Set 3	WE	90°NW	92.97	38.2	4	3.46	4.67	0.58	2	1	
Hwanseon	Entrance	Left lateral	Set 1	N9°W	90°NE	39.25	89.1	3.73	0.96	6.2	2.31	2.8	1.97	17.65
			Set 2	N72°W	18°NE	5.74	6.5	3.2	0.45	4.4	2.19	2	0.71	14.93
			Set 3	N2°E	74°NW	36.08	46.81	4.13	0.83	6.75	1.04	3.13	2.8	

**석회동굴 주변 불연속면 특성**

**불연속면 분석**

석회동굴 주변의 구조지질학적 특성과 노두의 상태를 파악하기 위해서는 스캔라인조사를 통한 불연속면 특성 분석이 수행된다(Fookes and Denness, 1969; Attewell and Farmer, 1976; Baecher and Lanney, 1978; ISRM, 1978; Priest and Hudson, 1981; Pinnaduwa *et al.*, 1990). 불연속면의 상태는 석회동굴의 형성과 발달에 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인으로 정확한 조사가 수행되어야 하기에 ISRM (1978)에서 제시된 방법을 이용하여 총 9개의 석회동굴 주변 18개 지점에 불연속면을 조사하였다. 불연속면 조사 항목 중 현장강도의 항목은 슈미트 해머를 이용하여 분석하였으며 환산식의 경우 퇴적암과 석회암에 대한 상관식을 도출한 Katz *et al.* (2000)의 제안식을 사용하였다.





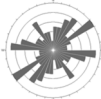




















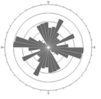










조사가 수행된 9개의 석회동굴은 천곡동굴을 제외한 8개 동굴이 천연기념물 내지는 시도지정문화재로 등록되어 있으며, 동굴 주변 노두와 입출구부 주변에 대한 스캔라인조사를 통해 현장 지질의 상태와 불연속면의 특징을 분석하였다(Table 3).

고수동굴 및 고씨동굴, 노동동굴, 백룡동굴, 온달동굴, 용연동굴 등 총 6개 지역의 석회동굴은 조선누층군의 막골층에 위치하고 있는 상태이며, 나머지 성류동굴, 천곡동굴, 환선동굴 등 3개의 석회동굴은 대기층에 위치하고 있는 것으로 파악되었다(Suh, 1978; KNURDRI, 1989; Jeong, 1991; Jeong, 1993a; Jeong, 1993b; Hong and Byun, 1993; Jeong *et al.*, 1994; Hong, 1995; Hong, 1995; Hong and Byun, 1995; Choi and Woo, 1996; Kim, 2003a; Kim, 2003b; Lim *et al.*, 2003; Woo and Lee, 2006; Kim and Woo, 2007; Choi, 2009; NRICH, 2010; Kim, 2011; Choi *et al.*, 2012).

**광역선구조 분석**

선구조는 선형적 지형요소로 지반에 포함된 단층대, 파쇄대 또는 차별침식의 특성을 반영하고 있다(Sabins, 1978; Masuoka *et al.*, 1988; Kim *et al.*, 1996). 이는 선구조의 특성은 지구조적 운동과 풍화의 영향에 의해 형성된 지형의 패턴을 대변한다고 할 수 있다(Park and Son, 2005). 또한, 선구조는 선형적 방향성을 내포하지만 그 연장성도 매우 중요하다. 여러 선구조를 단순히 분석하면 작은 선구조와 큰 선구조가 같은 비중으로

**Table 4.** Lineament orientation analysis around each limestone cave. Each number is 1/20, 1/10, 1/5 of the width of the lineament analysis area (10 × 10 km).

Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence of lineament			Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence of lineament		
		500 m	1 km	2 km			500 m	1 km	2 km
Gosu					Ondal				
Gossi					Yongyeon				
Nodong					Cheongok				
Baengnyong					Hwanseon				
Seongnyu									

해석되기 때문에 영향성이 큰 방향성의 패턴을 파악하기가 어렵다. 따라서 전체 선구조에 대한 방향성 해석과 함께 각 선구조의 연장성(persistence)을 고려한 해석도 필요하다.

본 연구에서는 동서방향 10 km, 남북방향 10 km 폭

으로 설정하여 광역 선구조를 수행하였으며, 가중치의 설정은 10 km의 1/20(500 m), 1/10(1 km), 1/5(2 km) 등을 각 기준으로 하였다. 가중치 설정방식은 발달 방향성 분석을 위한 가중치 설정방식과 동일하게 적용하였다. 세 기준인 500 m, 1 km, 2 km보다 큰 선구조의 연

**Table 5.** Orientations of the limestone caves. Parentheses contain the type of discontinuity. b, bedding; j, joint.

Cave		Orientation		
		Lineament	Discontinuity	Development of Cave
Gosu	Main	N50~60°W	N23°W/75°NE(b)	N60~70°E N50~60°W
	Sub	N10~20°E N0~10°W N30~40°E	N5°W/62°SW(b) N79°E/58°NW(j)	N30~40°E N30~40°W N60~70°E
Gossi	Main	N20~30°W N0~30°E	N58°E/44°NW(b)	N0~20°E
	Sub	N70~90°W	N5°E/66°SE(b) N51°E/76°SE(j)	N70~90°E N0~10°W N40~50°E
Nodong	Main	N0~10°W	N81°E/55°NW(b)	N30~60°E
	Sub	N0~10°W N30~40°E N60~80°W	N45°E/62°NW(b) N75°W/62°SW(j)	N70~80°E
Baengnyong	Main	N70~90°W	N77°E/28°NW(b)	N80~90°W
	Sub	N20~30°E N60~70°E	N86°W/65°SW(j) N15°W/66°SW(j)	N80~90°E N50~60°W N30~40°W
Seongnyu	Main	N70~90°W	N65°W/29°NE(b)	N30~50°E
	Sub	N0~10°W N60~80°E	N64°E/89°NW(j) N9°W/75°SW(b)	N60~80°E N50~70°W
Ondal	Main	N50~60°E	N22°W/62°SW(b)	N0~20°E N30~60°W
	Sub	N70~90°W N20~40°E N30~40°W	N3°W/52°NE(b) N83°E/48°SE(j)	N10~40°E N70~80°W
Yongyeon	Main	N40~50°E	N78°W/54°SW(b)	N20~30°E N30~40°W
	Sub	N80~90°W N60~70°W N60~70°E	N23°E/41°NW(j) N37°W/76°NE(j)	N0~10°W N20~30°W
Cheongok	Main	N20~30°E	N43°W/16°SW(b)	N0~10°W
	Sub	N80~90°W N50~60°E N50~60°W	N26°W/88°NE(j) WE/90°(j)	N50~60°E N0~10°E N80~90°E
Hwanseon	Main	N80~90°W	N9°W/90°(b)	N0~20°E N0~10°W
	Sub	N0~20°E N80~90°E N60~80°W	N72°W/18°NE(j) N2°E/74°NW(j)	N50~70°E N80~90°E



장에 대해서만 기준 대비 선구조 길이의 비율만큼 가중치를 적용하였다.

Table 4에서 보는 바와 같이 고수동굴의 경우, 선구조의 방향성만을 분석한 경우 주로 발달된 방향성이 N0~10°W, N50~70°W, N30~40°E 등으로 판단되지만, 연장성에 가중치를 적용한 해석의 경우에는 다소 다른 방향성을 보인다. 가장 우세하게 발달된 선구조의 방향성은 N50~60°W인 것으로 나타나고 있다. 이는 고수동굴 주변에 위치한 N0~10°W, N30~40°E의 선구조는 분포하는 개수는 많지만 연장성이 미약한 형태가 많음을 의미하며 주로 발달된 선구조는 N50~70°W라는 해석이 타당하게 된다.

고씨동굴과 백룡동굴, 온달동굴, 용연동굴, 천곡동굴, 환선동굴은 선구조의 방향성만을 해석한 결과와 연장성에 가중치를 적용한 방향성 해석 결과가 유사한 형태를 보이며 부수적인 방향성에서 다소 차이를 보인다.

노동동굴의 경우, 선구조의 방향성만을 분석한 해석에서는 N0~10°W이 우세하고, 연장성에 가중치를 적용한 해석에서 N60~70°W의 방향성이 더 우세한 것으로 나타나고 있기에 전체적으로 N60~70°W, N0~10°W이 모두 우세한 것으로 해석하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

성류동굴은 선구조의 방향성만의 해석에서는 부수적인 방향성이었던 N0~10°W 방향성이 연장성에 가중치를 적용한 해석에서는 더 우세한 것으로 해석되고 있다.

이와 같이 단층과 같은 구조지질학적 요인을 다수 내포하는 전체적인 선구조의 방향성을 명확하게 판단하기 위해서는 선구조의 방향성만 이용하는 것보다 선구조의 연장성에 가중치를 적용한 해석을 병행하면 주변 지형의 우세 방향성을 판단하는데 더 유용하다.

## 방향성자료와 석회동굴의 형성

### 방향성 자료의 동굴 발달에 대한 영향성

석회동굴 주변의 단층과 같은 구조지질학적 요인을 반영하는 광역 선구조 분석과 스캔라인조사를 통한 불연속면 분석 등을 통해 석회동굴의 발달 방향성에 대한 영향성을 분석하였다(Table 5). 세 가지 요인을 놓고 판단해 본 결과, Table 6에서 보는 바와 같이 고수동굴, 고씨동굴, 성류동굴, 온달동굴, 용연동굴은 주변 단층과 같은 지구조적 영향성이 동굴의 발달에 주된 영향을 준 것으로 해석되었다. 노동동굴과 백룡동굴, 환선동굴은 주로 층리의 방향성이 석회동굴의 발달 방향성과 매우 유사한 형태를 보이기에 단층의 영향성 보다는 층리 발달의 형태가 석회동굴의 발달에 영향을 더 크게 미친 것으로 해석되었다(Table 6).

그러나 천곡동굴의 경우 주변에 단층과 같은 지구조적 영향성 인자가 없고 기저지질이 주로 괴상의 형태를 띠며 층리의 방향성이 일관되지 않은 특징을 보인다. 따라서, 천곡동굴의 경우는 주된 영향을 준 인자를 설정하기 어렵다.

### 연장성과 폭을 통한 발달 양상 해석

단층이나 습곡, 불연속면 등의 영향으로 석회동굴의 발달이 진행되기도 하지만 폭을 넓혀가면서도 그 형상을 확장시킨다.

Table 7은 각 동굴의 평균 폭과 동굴 내 각 방향성의 연장성을 판단하는 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)의 정도를 제시한 내용이다. 개별 발달 비율은 각 발달 방향성의 평균 폭에 대한 연장의 비율로 각각 1.5, 2, 3, 5이상인 발달 방향성의 분포를 분석하여

**Table 6.** Expected influencing factors for the development of each limestone cave.

Cave	Based geology	Expected influential factors	
		Main	Sub
Gosu	Makgol formation	fault (lineament)	joint, bedding
Gossi	Makgol formation	fault (lineament)	bedding, joint
Nodong	Makgol formation	bedding	fault (lineament), joint
Baengnyong	Makgol formation	bedding	fault (lineament), joint
Seongnyu	Deagi formation	fault (lineament)	joint, bedding
Ondal	Makgol formation	fault (lineament)	joint, bedding
Yongyeon	Makgol formation	fault (lineament)	joint, bedding
Cheongok	Deagi (Pungchon) formation	-	lineament, joint, bedding
Hwanseon	Deagi formation	bedding	fault (lineament), joint

**Table 7.** Average span and individual development features. Each number of Individual Development Ratio represents the ratio of the persistence to the span. Numbers in parentheses indicate the proportion of the extracted development orientations.

Cave	Extracted orientation number	Average span (m)	Individual Development Ratio			
			1.5	2	3	5
Gosu	49	5.67	46(93.9%)	42(85.7%)	28(57.1%)	17(34.7%)
Gossi	324	3.08	305(94.1%)	279(86.1%)	216(66.7%)	122(37.7%)
Nodong	19	5.97	19(100%)	18(94.7%)	17(89.5%)	13(68.4%)
Baengnyong	143	3.72	131(91.6%)	122(85.3%)	88(61.5%)	57(39.9%)
Seongnyu	117	2.89	108(92.3%)	91(77.8%)	67(57.3%)	34(29.1%)
Ondal	162	2.42	155(95.7%)	137(84.6%)	106(65.4%)	54(33.3%)
Yongyeon	51	5.97	45(88.2%)	38(74.5%)	22(43.1%)	5(9.8%)
Cheongok	31	7.88	23(74.2%)	18(58.1%)	12(38.7%)	6(19.4%)
Hwanseon	336	5.41	314(93.5%)	280(83.3%)	219(65.2%)	109(32.4%)

석회동굴 발달의 우수한 정도를 해석하고자 하였다.

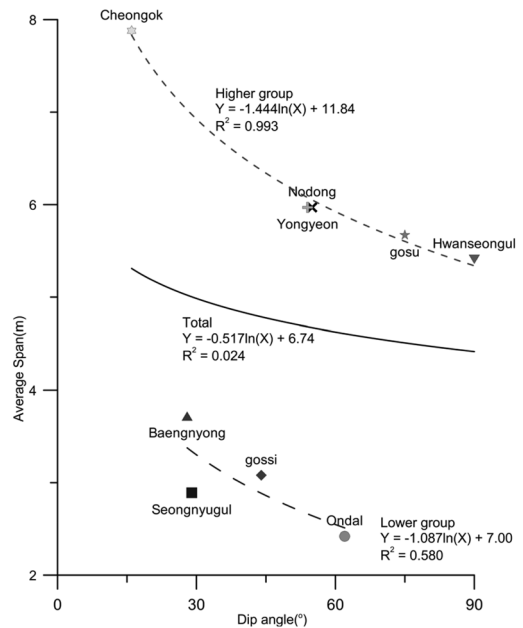
용연동굴과 천곡동굴의 경우 전체 동굴의 평균 폭이 가장 넓은 동굴들이며 다른 동굴에 비해 개별 발달 비율이 가장 낮은 것으로 해석되었다. 이는 동굴이 발달되는 정도가 상대적으로 낮은 상태이고 폭의 진행은 있지만 연장의 진행은 미미함으로 해석된다. 두 석회동굴만이 개별 발달 비율이 1.5 이상되는 분포가 90% 미만이며, 더욱이 폭에 비해 5배의 연장성을 가지는 비율이 약 9.8%와 19.8%를 보여 연장성이 약한 동굴로 해석된다. 천곡동굴은 대기층으로 석회암층이 주로 괴상의 형태를 보이며 선구조의 방향성 및 불연속면의 방향성과 동굴 발달 방향성의 비교에 있어서 명확한 연관성을 찾기 어려운 동굴이다. 즉, 이후 지속적으로 동굴의 발달이 진행되어도 외부로 연장성을 강하게 보이는 발달의 가능성은 희박한 것으로 판단된다.

이에 반해 다른 7개의 동굴들은 개별 발달 비율이 1.5 이상인 비율이 대개 90%를 넘고 있기에 연장성의 발달정도가 우수한 것으로 판단된다. 특히, 용연동굴과 평균 폭의 수치가 같은 노동동굴의 경우 개별 발달 비율이 5 이상인 분포가 68.4%를 보이고 있다. 이는 연장성이 우수한 동굴을 의미하는 것을 넘어 이후 용식에 의한 석회동굴의 추가적인 발달이 진행된다면 동굴의 연장 가능성이 다른 동굴에 비해 클 것으로 예상된다.

#### 층리와 폭을 통한 발달 양상 해석

석회동굴에서 층리가 폭의 확장에 어떤 영향을 주고 있는지 확인하기 위해 폭과 층리의 경사각을 이용하여 상관성을 분석하였다(Table 5, Table 7).

Fig. 4에서 보는 바와 같이 층리와 폭에 대한 전체



**Fig. 4.** Dip angle of bedding versus the average span of limestone cave. The coefficient of correlation is low for the total analysis. Separated into two parts, the correlation between dip angle and average span is very strong in the higher group.

해석의 경우 큰 연관성이 없는 것으로 보이지만, 평균 폭 5.4(m) 이상이 되는 폭 상위 그룹과 3.8 m 이하가 되는 폭 하위 그룹으로 분리하면 매우 새로운 결과를 도출할 수 있다. 고수동굴 및 노동동굴, 용연동굴, 천곡동굴, 환선동굴을 포함하는 평균 폭 상위 그룹은 약  $R^2=0.993$ 의 매우 우수한 상관성을 보이는 그룹으로 석회동굴 주변 층리의 경사각이 저각일수록 넓은 폭을 보

**Table 8.** Rock mass rating (RMR) for nine limestone caves in Korea.

Cave	Location		Parameter					Classification	
			Strength	RQD	Spacing	Condition of discontinuities	Ground water		Total
			15	20	20	30	15		100
Gosu	Entrance	Left lateral	4	13	10	9	10	46	Fair rock
		Right lateral	2	17	10	9	10	48	Fair rock
	Exit	Left lateral	2	20	10	20	7	59	Fair rock
		Right lateral	2	13	8	21	7	51	Fair rock
Gossigul	Entrance	Upper slope	4	13	5	9	10	41	Fair rock
		Right slope	4	20	10	11	10	55	Fair rock
Nodong	Entrance	Left slope	2	3	8	9	10	32	Poor rock
		Right slope	2	3	8	11	10	34	Poor rock
Baengnyong	Entrance	Right slope	4	8	8	9	10	39	Poor rock
Seongnyugul	Entrance	Left slope	4	20	15	9	10	58	Fair rock
		Right slope	2	17	10	9	10	48	Fair rock
Ondal	Entrance	Left lateral	7	20	5	11	10	53	Fair rock
		Right lateral	2	17	8	14	10	51	Fair rock
Yongyeon	Entrance	Right lateral	4	17	10	9	10	50	Fair rock
Cheongok	Entrance	Upper slope	4	20	15	9	10	58	Fair rock
Hwanseongul	Entrance	Left lateral	2	8	10	9	10	39	Poor rock

이는 것으로 해석되고 있다. 이에 반해, 고씨동굴 및 성류동굴, 온달동굴, 백룡동굴이 포함된 하위 그룹은  $R^2=0.580$ 의 상관성만을 보이고 있기에 명확한 해석이 어렵다.

석회동굴의 폭에 대한 특성은 총 9개의 동굴에 대한 결과만을 해석한 결과이다. 더 많은 동굴조사 자료를 바탕으로 해석하면 보다 정확한 특징을 보일 수 있으나, 현재 9개의 석회동굴 폭 자료를 기초로 하여 판단할 때 약 5m 이상일 경우에만 해당되는 특징이다. 그 이하일 경우에는 정확한 판단을 하기는 어렵다.

하위그룹이 상위그룹처럼 석회동굴 평균 폭이 약 5m 이상으로 확대되는 과정에서 나타나는 특징인지 지역적 특성으로 인해 나타나는 특징인지는 명확하지 않다. 그러나, 이 후 더 많은 동굴에 대한 자료를 통해 분석하면 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

### RMR (Rock Mass Rating)을 통한 지질공학적 분류 해석

국내 석회동굴의 총 9개에 대해 지질과 현장 불연속면 특성 자료를 바탕으로 Bieniawski (1989)에 의해 제

안된 RMR 분석을 수행하였다(Table 7).

전체적으로 RMR 수치가 32~59의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. 노동동굴로 입구의 좌우측 지점의 경우 RMR 수치가 32와 34를 보여 암반 상태가 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 분류되었는데, 실제 동굴 내부의 낙석 및 오염 등과 같은 여러 원인으로 인해 현재 일반인 출입이 금지된 지역이다. 그 외에 백룡동굴, 화암동굴, 환선동굴 주변에 불안한 정도(Poor rock)로 분류되는 지역이 위치한다.

RMR 분석 자료와 개별 발달 비율, 석회동굴의 발달 방향성을 종합하여 판단할 때, 동굴 발달 방향성이 층리 방향과 유사한 형태를 보이거나 주로 층리의 영향으로 석회동굴이 형성된 것으로 판단되면 폭 대비 연장의 발달이 큰 것으로 해석된다. 또한, 암반의 상태가 불안할 가능성이 큰 것으로 추정할 수 있다고 판단된다.

그러나, RMR 해석을 적용한 지점들은 석회동굴의 입출구 주변으로 RMR 분석이 각 석회동굴 전체를 판단할 수 있다고 하기에는 그 자료의 범위가 국부적이다. 주변 노두 및 갱내의 RMR 자료를 더 추가하여 해석한다면 보다 정확한 해석방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

석회동굴 주변에 방향성 자료를 이용하여 지질공학적 해석 결과는 다음과 같다.

1. 석회동굴의 발달 방향성에 대한 해석의 정확성을 높이기 위해 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 제안하여 분석하였다. 분석 결과 단순 방향성 분포만을 해석한 것보다 연장성에 가중치를 적용한 분석을 병행하여 해석할 경우, 전체 석회동굴 발달 방향성을 더욱 명확하게 해석할 수 있었다.

2. 석회동굴 발달 방향성을 해석한 결과 노동동굴, 백룡동굴, 환선동굴은 주로 층리의 방향성과 유사하여 다른 구조지질학적 요인보다 층리가 석회동굴 발달에 영향을 크게 준 것으로 해석되었다. 고수동굴, 고씨동굴, 온달동굴, 성류동굴, 용연동굴 등 5개의 지역은 주 영향성이 단층 등의 영향성을 잘 내포하는 광역 선구조의 방향성과 주로 유사한 형태를 보이는 것으로 해석되었다.

3. 석회동굴 폭의 발달 형태를 해석한 결과 노동동굴이 폭에 대한 연장성이 가장 우수한 동굴로 분석되었으며, 용연동굴과 천곡동굴은 상대적으로 연장성의 발달이 미약한 것으로 해석되었다. 연장성의 우수한 발달 정도는 이후 추가적으로 발달이 진행된다고 할 때 지속적으로 우수한 연장성의 진행이 있을 수 있음을 의미하는 것으로 해석된다.

4. 석회동굴이 형성된 폭과 주변 주 층리의 경사각의 연관성 분석을 수행한 결과, 석회동굴 주변의 층리면의 경사각이 저각일수록 그 평균 폭은 증가하며, 석회동굴의 발달에 어떤 방향성 인자가 영향을 주더라도 석회동굴의 폭 발달에는 저각의 층리의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.

5. 국내 석회동굴의 RMR 분석을 통해 노동동굴과 백룡동굴, 화암동굴, 환선동굴의 일부 지역의 경우 암반이 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 분석되었다.

6. 동굴의 발달 방향성과 기반암의 암종, 동굴 발달의 주된 영향을 주는 방향성 인자, RMR을 통한 암반분류 등을 종합적으로 해석해 보면, RMR에서 불안한 정도인 것으로 분류된 노동동굴과 백룡동굴, 환선동굴은 주로 층리의 영향을 받아 발달된 것으로 판단된다. 또한, 개별 발달 비율이 5이상인 방향성의 분포를 볼 때, 가장 발달 비율이 우수한 곳은 노동동굴과 백룡동굴로 해석되고 있다. 이는 층리의 영향이 석회동굴의 발달에 주로 영향을 미친 지역은 단층과 같은 방향성 인자에 의해

발달된 동굴에 비해 연장성이 우수하지만 암반의 안정성은 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

## References

- Attewell, P. B. and Farmer, I. W., 1976, Principles of Engineering Geology. Chapman & Hall, London, 1045p.
- Baecher, G. B. and Lanney, N. A., 1978, Trace length biases in joint surveys, 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 56-65.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, Wiley, New York. 251p.
- Choi, D. -W. and Woo, K. -S., 1996, A study for petrogenesis and structure of secondary materials for Yongyeon (in Korean), The geological society of Korea, 51th regular general meeting and Conference, 56-57.
- Choi, J. -H., Ko, K., Kim, J. -Y., and Kim, Y. -S., 2012, A paleoseismological study based on the damage characteristics of speleothems in limestone cave: a case study from Seongryu Cave in Uljin, Korea (in Korean), Journal of the geological society of Korea, 48(3), 225-240.
- Choi, Y. -S., 2009, Karst Landforms in Chon-gok dong, Dong-hae Shi, master dissertation, Kangwon National University, Kangwon-do South Korea, 46p.
- Culshaw, M. G. and Waltham, A. C., 1987, Natural and artificial cavities as ground engineering hazards, Quarterly Journal of Engineering Geology, 20, 139-150.
- Dreybrodt, W., Romanov, D., and Garbrovsek, F., 2002, Karstification below dam sites: a model of increasing leakage from reservoirs, Environmental Geology, 42, 518-524.
- Eneko, I., Miguel, Á. S., Alberto, F., and Carmen, T., 2010, Geological risk assessment for cultural heritage conservation in karstic caves, Journal of Cultural Heritage, 11(3), 250-258.
- Fookes, P. G. and Dennes, B., 1969, Observation studies on fissure patterns in cretaceous sediments of south-east England, Geotechnique, 19, 453-477.
- Hong, C. -R., 1995, A study for Cheongok as tourist attraction (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 40, 58-69.
- Hong, C. -R. and Byun, D. -J., 1995, Development and environmental evaluation of Hwanseongul in Samcheok (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 43, 37-48.
- Hong, H. -C., 1991, A study for speleothem of Cheongok(in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 28, 68-84.
- Hong, H. -C., 2008, A study on the Mechanism of Environmental Pollution in Caves (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 89, 37-45.
- Hong, H. -C. and Byun, D. -J., 1993, A study for con-

- formation and characteristic of Ondal (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 34, 23-29.
- Hong, S. -H., 1995, A study for speleothem of Ondal Cave (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 40, 11-38.
- ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. And Geomecha. Abstr., 15, 319-368.
- Jeong, C. -H., 1991, Lipid survey around Cheongok Cave (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 27, 53-67.
- Jeong, C. -H., 1993a, A study for geology of Gosu Cave (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 32, 63-76.
- Jeong, C. -H., 1993b, A study for geography and geology around Hwanseongul (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 34, 11-22.
- Jeong, C. -H., Kim, B. -W., and Kim, C. -Y., 1994, Physical geographical environment around Ondal Cave (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 36, 38-67.
- Kangwon National University Resources Development Research Institute (KNURDRI), 1989, A scientific investigation report for Baengnyong Cave (in Korean). 164p.
- Katz, O., Rechesa Z., and Roegiersc, J. C., 2000, Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, 723-728.
- Kim, R., 2003a, Geological Investigation of the Gossi Cave and Age of Some stalagmites of the Limestone Caves in Korea, master dissertation, Kangwon National University, Kangwon-do South Korea, 168p.
- Kim, R., 2011, Environmental Analysis and Management Direction of showcaves in Korea, doctoral dissertation, Kangwon National University, Kangwon-do South Korea, 172p.
- Kim, R. and Woo, K. -S., 2007, Geological study for Seongnyugul (in Korean), The geological society of Koea, Proceedings of the 2007 Autumn Meeting, 108.
- Kim, S. -K., 2003b, A study for development and protection of the environment in Hwanseongul (in Korean), Baewha treatises, 22, 19-36.
- Kim, W. -K., Won, J. -S., and Kim, S. -W., 1996, A Technique Assessing Geological Lineaments Using Remotely Sensed Data and DEM : Euseons Area, Kyungsang Basin (in Korean), Journal of the Korean society of Remote Sensing, 12(2), 139-154.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2001, Tectonic map of Korea.
- Lim, B. -R., Kim, J. -H., and Lee, K. -M., 2003, Geological structure around Geunnam-Wonnam myeon Uljin-gun (in Korean), The Korean Geographic Society, Proceedings of the 2003 Autumn Meeting, 11.
- Masuoka, P. M., Harris, J., Lowman, P. D., and Blodget, H. W., 1988, Digital Processing of Orbital Radar Data to Enhance Geological Structure: Examples from the Canadian Shield, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, 621-632.
- National Research Institute of Cultural Heritage (NRICH), 2010, Characteristic study report for opening cave of Natural Heritage (in Korean), Natural Heritage Center of National Research Institute of Cultural Heritage. 199p.
- Park, S. J. and Son I., 2005, Discussions on the Distribution and Genesis of Mountain Ranges in the Korean Peninsular (I) : The Identification Mountain Ranges using a DEM and Reconsideration of Current Issues on Mountain Range Maps (in Korean), Journal of the Korean Geographic Society, 40(1), 126-152.
- Pinnaduwa, H. S. W., Deepa, N. W., and Stephansson O., 1990, Three dimensional stochastic joint geometry modeling including a verification: A case study, Rock Mechanics Contributions and Challenge, Balkema, Rotterdam, 1051-1058.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, 183-197.
- Randall, C. O., David, J. W., Robert, C. M., Richard, W. H., Robert E. W., and Stanka, S., 1999, A geologic framework in karst: US Geological Survey contributions to the hydrogeology of the Ozarks of Missouri, Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst, Balkema, Rotterdam, 57-62.
- Sabins, F. F., 1978, Remote sensing: principles and interpretation, W.H. Freeman and Company, New York. 494p.
- Suh, M. -S., 1978, Cave topographical study for petrogenesis and secondary materials of Baengnyong (in Korean), Journal of the Speleological Society of Korea, 3, 1-6.
- Waltham, A. C. and Fookes, P. G., 2012, Engineering classification of karst ground conditions, Quarterly Journal of Engineering geology and Hydrogeology, 36, 101-118.
- Woo, K. -S. and Lee, M. -Y., 2006, Geological study for Cheongok Cave in DongHae-si Kangwon-do (in Korean), Proceedings of the 2007 KOQUA Autumn Meeting, 31.
- Woo, K. -S., Kim, R., and Choi, Y. -K., 2008, A scientific investigation report for state and preservation value of Nodong Cave (in Korean), Danyang-gun Chungcheongbuk-do, 82p.

---

원고접수일: 2013년 11월 4일

수정본채택: 2014년 1월 18일

게재확정일: 2013년 1월 21일

**이상균**

산업통상자원부 R&D 전략기획단  
135-080 서울시 강남구 테헤란로 305 한국기술센터  
8층  
Tel: 02-6009-8792  
Fax: 02-6009-8799  
E-mail: enada@osp.go.kr

**박형동**

서울대학교 에너지자원공학과  
151-742 서울특별시 관악구 관악로 1  
Tel: 02-880-8808  
Fax: 02-871-8938  
E-mail: hpark@snu.ac.kr