

## 핵석풍화대의 강도평가에 대한 사례 연구

김성인, 신재근, 강세구, 이성기 (태조엔지니어링)

### 1. 서 론

핵석이란 서로 직교하는 수직절리와 수평절리에 의해 기반암이 일련의 블록(Block)으로 갈라진 후 블록의 모서리가 풍화의 과정을 거치면서 기질화(Matrix)되어 블록과 기질이 혼합되어 있는 형태를 말한다. 사실, 핵석은 각력층과는 다른 개념이기는 하지만 지반의 강도 평가를 위해서는 유사한 거동을 하는 모델로 처리되는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문에서는 각력층의 강도평가를 위한 서적이거나 논문을 주로 참조하였음을 밝히고자 한다.

핵석풍화대는 신선한 모암의 절리면을 따라 흐르는 물의 이동이 원활하여 화학적 풍화작용이 진행되면서 만들어지는데, 기질부는 암석이 풍화작용에 의해 연암-풍화암-풍화토로 변하여 형성되며, 블록의 중심부는 풍화를 받지 않아 둥근 암석을 형성하는 핵석의 형태로 남게 된다. 핵석풍화대는 수직적으로 4가지로 분류되는데 그림 1에서 보는 바와 같이 지표로부터 이동핵석대, 잔류핵석대, 절리풍화대, 신선암대로 구분할 수 있다. 이동핵석대는 침식작용에 의해 풍화가 심하게 일어나 풍화토의 유실 및 이동에 의해 핵석이 본래 위치에서 이동되어 분포하기 때문에 핵석이 서로 접하는 경우도 있고 기질부가 넓게 존재하기도 한다. 그러나 잔류핵석대의 경우, 모암이 그대로 풍화되어 형성이 되었기 때문에 핵석이 비교적 규칙적으로 분포하며 하부로 갈수록 핵석의 비율이 많고 기질부가 감소되는 특성을 보인다.

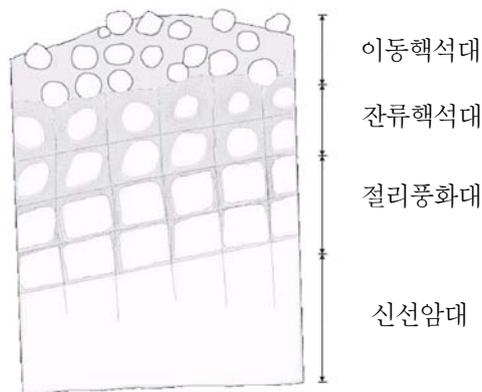


그림 1. 핵석지반 분포도

핵석풍화대에 대한 강도를 정확하게 구하는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 첫째, 상대적으로 약한 기질에 내포된 단단한 블록의 혼합체로 구성된 지반에서 불교란 시료를 채취하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 단단한 재료와 약한 재료에서의 드릴저항이 서로 다르기 때문에 천공시 단단한 재료가 약한 재료 방향으로 밀리게 되며, 그 결과 시료가 교란되거나 약한 재료의 많은 부분이 손실된다. 둘째, 불교란 시료를 채취하더라도 채취된 시료가 대상지반을 대표한다고 할 수는 없는데 그것은 블록의 크기 및 분포비율이 지역에 따라 상이하기 때문이다. 따라서 대형 현장시험을 통해 시료의 대표성을 찾는 것이 가장 바람직한 방법이지만 그것도 쉽게 접근할 수 있는 방법은 아니다.

따라서 일반적인 공학적 사례는 강도가 작은 기질에 대한 강도와 변형특성만을 가지고 설계하는 것이 보통인데 이 방법은 대상지반을 지나치게 나쁘게 평가하게 되어 결국 과도한 설계를 초래하는 단점이 발생하게 된다.

본 논문에서는 광양지반에서 나타나는 핵석의 강도평가를 위한 합리적인 조사방법 및 조사결과를 이용하여 사면의 설계와 터널설계에 적용한 사례에 대해서 언급하였다.

## 2. 연구동향

### 2.1 핵석지반의 강도평가

앞에서 서술한 바와 같이 일반적인 공학적 사례는 강도가 작은 기질의 강도와 변형특성만을 가지고 설계하여 지나치게 보수적으로 접근하는 것이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 강도와 강성을 평가하기 위한 여러 가지 기법이 개발되었다. Volpe 등(1991)은 핵석과 기질의 강도를 각각 구한 후 핵석풍화대의 체적비율을 토대로 가중 평균하는 방법을 사용하였지만 이론적으로 완벽하지 못한 단점을 가지고 있다.

따라서 핵석지반의 물리적 모델을 사용하는 연구는 기질의 강도와 강성을 토대로 블록의 비율과 방향성에 대한 연구가 진행되었다. Lindquist & Goodman(1994)은 실내에서 각력층의 모델을 구현하기 위해 플라이애쉬를 첨가한 모래-시멘트로 블록을 만들었으며, 기질은 벤토나이트-포틀랜드 시멘트를 혼합하여 만들었고 얇은 왁스층으로 절리면을 모델화하였다. 6인치 지름의 원통형 시료를 제작하고 삼축시험을 통해 전단강도정수 및 응력-변형률에 대한 특성을 조사하였다. 블록의 방향성을  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 4가지로 분류하였고 각각의 방향성에 대해서 블록의 비율을 다르게 한 3종류의 시료를 제작하여 총 12개 시료에 대한 삼축시험을 실시하였으며, 시험 결과는 표 1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 블록의 비율이 증가하게 되면 점착력은 감소하며 반대로 마찰각은 증가되는 것을 알 수 있다. 블록의 비율이 70%이상인 각력층의 경우 점착력은 기질만의 점착력 값의 절반 가까이 감소된다. 또한 블록의 비율이 높아지면 내부마찰각은 블록방향성에 따라 크게 변화되지 않음을 보여주고 있다.

표 1. 삼축압축시험에 의한 전단강도 결과(Lindquist & Goodman(1994))

블록방향	블록비율	점착력 (psi)	마찰각 (°)
N/A	0%	330	24.7
N/A	100%	445	38.3
0°	29%	345	26.2
30°	31%	250	32.9
60°	33%	377	23.4
90°	29%	276	32.8
0°	50%	233	33.5
30°	53%	206	32.3
60°	54%	229	33.3
90°	57%	231	37.6
0°	72%	199	39.6
30°	74%	163	38.2
60°	73%	180	41.2
90°	71%	302	34.0

블록의 비율이 0%인 시료, 즉 기질만의 점착력과 마찰각을 기준으로 시험결과를 그래프로 도시하면 그림 2와 같이 점착력비와 내부마찰각비로 표시할 수 있다. 따라서 현장에서 채취한 기질의 강도정수를 정확하게 구하고 블록비율을 알 수 있다면 핵석지반의 강도는 그림 2를 이용하여 대략적으로 추정할 수 있다.

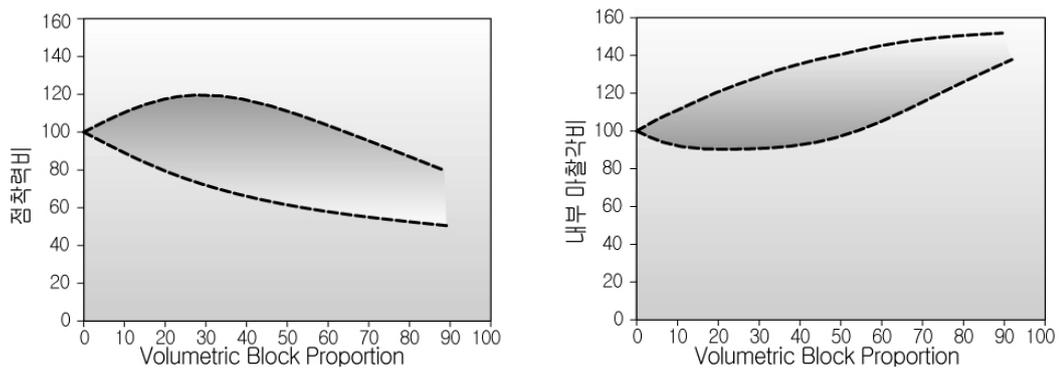


그림 2. 블록비율에 따른 핵석지반의 전단강도비

## 2.2 핵석의 분포비율평가

그림 2를 이용하여 핵석지반의 강도를 평가하려면 기질의 강도정수 외에도 핵석의 분포비율을 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

Medley(1994)는 핵석지반은 무질서하고 혼돈된(Chaotic) 특성을 나타내며 자기유사성(Self-similar) 또는 프랙탈(Fractal) 특성을 갖는다고 기술한 바 있다. 혼돈이론에 따르면 겉으로 보기에 무질서하고 불규칙적으로 보이는 자연현상에서도 나름대로 질서와 규칙성을 확인할 수 있는데, 무질서해 보이는 자연이지만 전체의 구조와 부분의 구조가 서로 닮은 것을 자기유사성이라 하며 이를 이론적으로 체계화한 것이 프랙탈 이론이다.

따라서 노두에서 관찰한 핵석은 전체지반의 극히 일부분이기는 하지만 자기유사성 이론에 따라 전체지반과 매우 유사하다는 것을 이론적으로 뒷받침할 수 있다.

핵석의 분포비율은 노두를 매핑(Mapping)하거나 촬영된 사진을 그림 3에서 보는 바와 같이 스캔라인(Scan line)을 이용하여 평가할 수 있다. 스캔라인에 걸쳐져 있는 핵석의 길이를 측정하여 이를 합한 후 스캔라인의 길이로 나누게 되면 선형블록비율(Block lineal proportion)을 구할 수 있다. 블록비율을 결정하는 다른 방법으로는 컴퓨터에 의한 이미지 분석법이 있는데 그림 3에서 회색으로 표현된 핵석의 픽셀(Pixel)수를 구함으로써 전체 면적에 대한 핵석의 면적을 평가할 수 있으며 이것을 공간블록비율(Block areal proportion)이라고 한다. 그림 3에서 공간블록비율은 35.6%이다.

선형블록비율을 이용하여 공간블록비율을 결정하는 방법은 그림 4와 같이 가로축은 전체 스캔라인의 길이에 대한 적용 스캔라인 길이의 비로 표현하고 세로축은 선형블록비율의 누적치를 표현하게 되면 초기에는 데이터가 이산되지만 적용한 스캔라인이 증가할수록 일정한 값으로 수렴이 되는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 전체 스캔라인 길이(1,684mm)의 50%인 840mm에서부터 수렴이 일어나며 그 수렴 값은 38%로 이미지분석에 의한 공간블록비율인 35.6%와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

스캔라인의 적절한 길이에 관한 연구는 Holmes(1921)에 의해 수행되었는데 적절한 스캔라인의 길이는 평균입자크기의 100배가 적절하다고 추천한 바 있다. 그림 3에서 블록의 평균 크기는 8.25mm이기 때문에 Holmes의 연구는 타당하다는 것을 보여주고 있다.

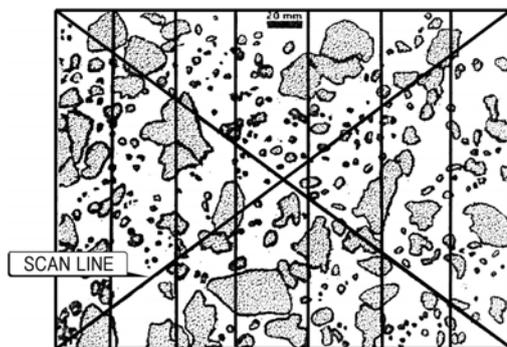


그림 3. 각력암의 그래픽모델

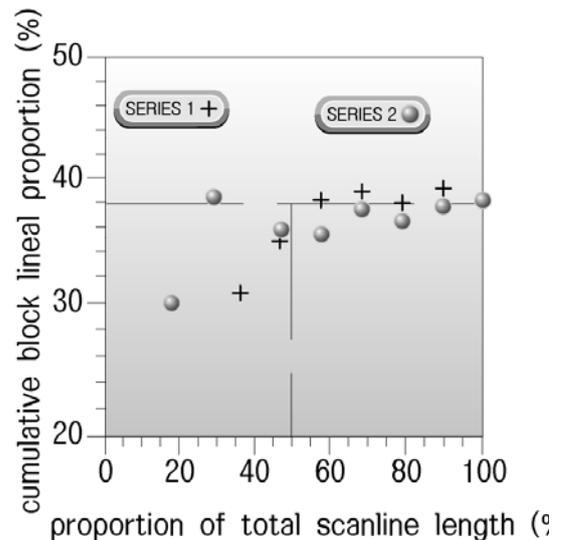


그림 4. 그래픽모델에서 구한 블록비율

### 3. 사례연구

#### 3.1 핵석분포현황

본 논문을 위한 대상 프로젝트는 전라남도 광양군을 통과하게 되는 경전선 중 일부 노선으로서 그림 5에서 보는 바와 같이 과업시점부에 핵석풍화대가 발달한 위치에 터널을 형성하고 절토사면이 만들어 지게 된다.

지표노두에서 관찰되는 핵석은 수십cm에서 3m이상의 핵석까지 다양한 크기를 보이고 있으며 시추조사와 물리탐사의 결과, 터널 구간의 핵석 분포는 지표에서 22m 심도까지도 확인되고 있다. 그림 6은 대심도 탄성과탐사 결과를 이용하여 핵석 분포구간을 추정하였는바 1,500m/sec의 등속도 곡선의 상부가 핵석풍화대로 판단된다.



그림 5. 과업구간 핵석분포현황

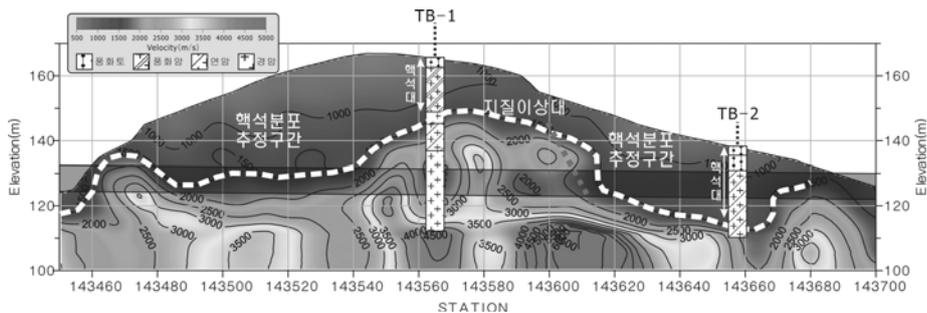


그림 6. 탄성과탐사에 의한 핵석풍화대 추정

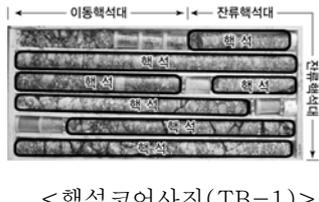
#### 3.2 핵석분포비율 분석

핵석분포비율은 먼저 시추공에서 육안으로 확인된 핵석 및 노두에서 관찰된 핵석에 대한 핵석비율을 평가하였으며, 시추공에서 확인된 핵석비율의 타당성을 검증하기 위하여 Tele-viewer 검층을 실시하여 비교하였다.

결랑터널의 경우 2개의 시추공(TB-1, TB-2)에서 핵석을 확인하였으며, 인근의 깎기구

간과 옥곡 1터널의 경우 각각 1개소(CH-3, TB-21)에서 핵석을 확인하였으며 그 결과는 표 2와 같다. 여기서 핵석비율은 회수된 핵석의 길이를 잔류핵석대 총후로 나눈 값이다.

표 2. 시추코어 분석에 의한 핵석비율 평가

구 분	잔류핵석대 총후(m)	핵석 회수량(m)	핵석비율(%)	핵석 코어박스 사진
걸랑터널 중앙부 (TB-1)	3.0~16.3m : 13.3	5.2	39.1	
걸랑터널 종점부 (TB-2)	7.4~22.2m : 14.8	4.7	31.8	
깎기1구간	5.7~22.0m : 16.3	3.7	22.7	
이천1터널 중앙부	3.6~21.6m : 18.0	7.9	43.9	
평 균	15.6	5.4	34.4	

시추코어의 경우 코어 손실로 인하여 잔류핵석대의 분포상황을 잘못 평가할 가능성이 있으므로 Televiewer검층을 통해 기질부와 핵석의 길이를 추정하였다. TB-1 시추공의 경우 핵석과 기질이 혼재하는 잔류핵석대는 3.0~17.4m(길이 14.4m)에서 나타나며 이 중 핵석이 분포하는 심도는 7.0~8.1m, 10.3~13.2m, 14.55~15.5m 및 15.9~17.2m로서 총 6.25m에서 핵석이 나타나며 핵석비율은 43.4%이다. TB-2 시추공의 경우 잔류핵석대는 7.4~15.0m(길이 7.6m)에서 나타나며 핵석분포는 7.4~7.7m, 8.2~9.95m 및 13.1~14.6m의 심도에서 나타나며 총 3.55m연장에서 핵석이 확인되므로 핵석 비율은 46.7%로 추정되었다.

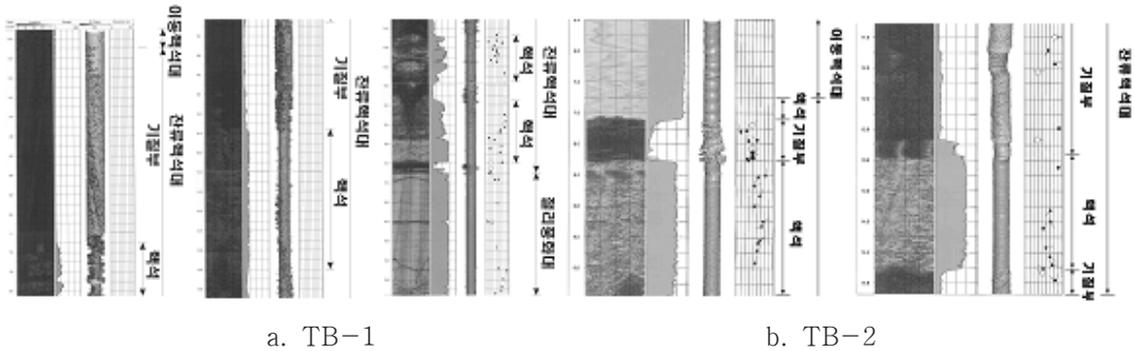


그림 7. Televiewer 검층에 의한 핵석비율의 평가

마지막으로 노두에서 관찰된 핵석의 비율을 측정하기 위하여 노선이 통과하는 지점의 노출된 2지점에서 현장사진을 분석하여 핵석의 분포도를 작성하고 이중 핵석이 차지하는 면적은 Pixel수를 계산하여 전체 지표면적에 대한 핵석의 면적비를 구하여 핵석비율을 결정하였다. S-4지점의 경우 그림 8과 같이 이동핵석대가 관찰되며 핵석은 원마도가 우수하며 수십cm에서 3m이상의 다양한 크기의 핵석이 존재하며 핵석비율은 24.8%로 측정되었다.

S-8지점은 그림 9에서 보는 바와 같이 이동핵석대와 잔류핵석대가 공존하며 이동핵석대에 비해 상대적으로 잔류핵석대에서 3m이상의 큰 핵석이 존재하고 있다. 그림 10 및 표 3과 같이 노두사진의 Pixel수 분석결과, 핵석비율은 이동핵석대의 경우 9~24.8%, 잔류핵석대의 경우 57.8%로 추정되었다(표 3. 참조)



그림 8. S-4지점의 핵석노두



그림 9. S-8지점의 핵석노두

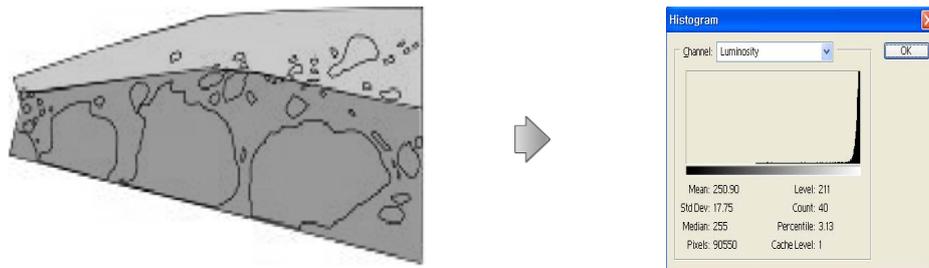


그림 10. 핵석사진 분석에 의한 Pixel 수 계산

표 3. 이동핵석 분포 면적비

구 분	이동핵석분포 Pixel수	이동핵석 Pixel수	핵석 분포 면적비(%)
S-4	588,865	145,958	24.8(이동핵석대)
S-8	94,433	8,508	9.0(이동핵석대)
	214,413	123,863	57.8(잔류핵석대)

이상과 같이 시추코어의 핵석비율의 측정, Televiewer를 이용한 핵석비율 평가 및 노두사진 분석에 의한 핵석비율을 평가한 결과 이동핵석대의 경우 핵석비율은 9~25%(평균 17%) 내외이며 잔류핵석대의 경우는 22.7~57.8%(평균 45%)로 평가되었다. 세가지 방법 중 시추코어를 이용하는 경우 핵석비율이 가장 적게 나오고 있으며 Televiewer 및 노두사진 분석 순으로 핵석비율이 증가된다. 시추코어의 경우 코어의 손실에 따른 핵석비율이 가장 낮게 나올 것으로 판단되며, 노두사진 분석의 경우 가장 참값에 근접하기 때문인 것으로 분석된다.

### 3.3 핵석풍화대의 전단강도 추정

핵석노두에서 기질부의 전단강도를 구할 수 있다면 앞에서 설명한 그림 2를 이용하여 핵석풍화대 전체 전단강도를 추정할 수 있다. 따라서 노출된 핵석 풍화대인 이동핵석대에서 3개소 및 잔류핵석대에서 3개소 등 총 6개소에서 기질부의 시료를 불교란 상태로 채취하여 실내에서 삼축압축시험을 실시하였으며 결과 표 4와 같다.

표 4. 기질부의 삼축시험결과

구 분	이동핵석대(기질부)		구 분	잔류핵석대(기질부)	
	점착력(kN/m <sup>2</sup> )	내부마찰각(°)		점착력(kN/m <sup>2</sup> )	내부마찰각(°)
시험체-1	13	34.2	시험체-4	280	34.2
시험체-2	3	33.5	시험체-5	350	31.3
시험체-3	10	34.2	시험체-6	320	33.4
평 균	11.5	34.0	평 균	317	33.0

이동핵석대의 핵석비율은 17%로 추정되며, 그림 11과 같이 전단강도를 추정하면 점착력비는 83~115%, 마찰각비는 91~119%정도의 범위를 가지고 있다. 따라서 이동핵석대의 추정점착력은 9.5~13.2kN/m<sup>2</sup>(평균 11.4kN/m<sup>2</sup>), 마찰각은 30.9~40.5°(평균 35.7°)으로 평가되었다.

또한 잔류핵석대의 핵석비율은 45%로 추정되며 점착력비는 63~115%, 마찰각비는 95~139%정도의 범위를 가지고 있다. 따라서 이동핵석대의 추정점착력은 199.7~ 364.5kN/m<sup>2</sup>(평균 282kN/m<sup>2</sup>), 마찰각은 31.4~45.9°(평균 39°)으로 평가되었다.

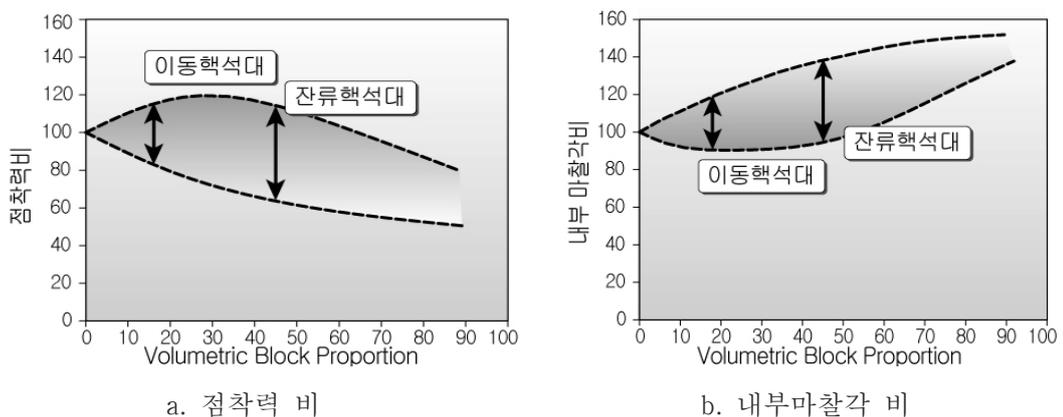


그림 11. 블록비율에 따른 전단강도비 추정

#### 4. 결 론

핵석풍화대의 전단강도를 유추하기 위해서 기존에는 기질부의 전단강도만을 이용하는 보수적인 방법을 사용하였지만 핵석풍화대의 블록비율을 추정하고 기질부의 전단강도를 구하여 Lindquist & Goodman(1994)의 연구결과를 사용하게 되면 보다 합리적이고 비교적 용이하게 결과를 얻을 수 있었다.

광양지역에서 발달하는 핵석풍화대의 전단강도를 추정하기 위하여 시추코어를 이용하는 방법, Televiewer 검층에 의한 방법 및 노출된 노두의 사진을 분석하는 방법을 사용하였으며 이중 노두사진을 분석하는 방법이 오차가 가장 적다는 것을 확인하였다.

그러나 노두사진 분석에 의한 방법은 2차원적인 접근법에 불과하기 때문에 3차원의 블록 분포비율을 표현할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 체적블록비율을 구하기 위한 노력과 연구가 필요하다.

#### ■ 참고문헌 ■

1. Holmes, A., (1921), "Petrographic Methods and Calculations", Thos. urray and Co., London, England.
2. Lindquist, L.S. & Goodman, R.E., (1994), "Strength and deformation properties of a physical model melange", Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium, Balkema, pp.843~850
3. Medley, E., (1994), "Using stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks)" Proc. 7th International IAEG Congress, Balkema, pp.1031~1040.
4. QVolpes, R.L., Ahlgren, C.S., Goodman, R.E., (1991), "Selection of engineering properties for geologically variable foundations", Proc. 17th Int. Cong. on Large Dams(ICOLD), pp. 1081~1101.