

# 국내 붕괴 절개면의 지질공학적 특성 연구

## A Study on Engineering Geological Characteristics of Slope Failures

박 혁 진  
김 승 현  
구 호 분

한국건설기술연구원  
한국건설기술연구원  
한국건설기술연구원

### 요 지

국내 절개면은 대개 절개면의 구성물질에 대한 지질공학적인 특성과 구성물질내의 지질구조 등에 대한 충분한 고려가 수행되지 않은 상태에서 구성물질의 강도에만 의존하여 설계·시공되었다. 따라서 매년 강우기와 해빙기에 반복적인 붕괴사고가 발생하고 있으며 이로 인한 인명피해와 재산손실이 매년 발생하고 있다. 따라서 절개면의 붕괴를 방지할 수 있는 근본적인 대책안의 제시와 함께 절개면에서 발생하는 붕괴를 예방하고 붕괴특성 및 붕괴 원인 규명을 위한 기초 연구로서 국내의 절개면에 대한 지질공학적인 특성 연구가 절실한 실정이다. 본 연구는 2001년 한국건설기술연구원에서 수행한 362개소의 절개면을 대상으로 절개면의 구성물질 및 지질구조에 대한 지질공학적 특성을 분석하였다. 본 연구는 국내에 분포하는 절개면의 붕괴 특성과 붕괴 인자에 대한 기초 연구로 차후 국내 절개면에 대한 설계기준을 재정립하고 절개면에 대한 효율적인 관리를 수행하기 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 1. 서 론

절개면의 안정성에 영향을 미치는 요인은 절개면 구성물질의 강도나 풍화와 같은 구성물질의 물성 그리고 층리, 절리나 단층과 같은 지질구조 및 지질공학적 특성이 있다. 이러한 요인들은 서로 상관성을 가지고 있으며 복합적인 작용에 의해 여러 요인이 동시에 절개면의 안정성에 영향을 미치고 있다. 그러나 국내 절개면은 대개 절개면 구성물질의 공학적인 특성이나 구성물질내의 불연속면 등 지질학적인 특성이 무시된 채 단순히 구성물질의 강도에 의존하여 설계되고 시공되어 왔다. 특히, 90년대 이전에 개설된 도로의 경우 도로개통에만 관심이 집중되었을 뿐 도로개설에 의해 발생하는 도로절개면에 대한 안정성 확보에는 소홀했던 것이 사실이다. 따라서 국내 국도변에 분포하는 도로절개면은 매년 강우기와 해빙기에 반복적인 붕괴 및 낙석 사고가 발생하는 등 안정성에 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 절개면의 안정성에 영향을 미치는 암반의 내적 요인, 즉 암종, 풍화, 지질 등에 대한 지질공학적인 고려가 부족했기 때문이다. 즉, 암종 및 지질구조에 따라 절개면의 붕괴유형과 발생빈도가 다르며 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 국내 절개면의 지질학적인 특성과 공학적인 특성이 체계적으로 연구되어야 한다. 특히, 절개

면의 붕괴를 방지할 수 있는 근본적인 대책안의 제시와 함께 절개면에서 발생하는 붕괴를 예방하고 붕괴특성 및 붕괴 원인 규명을 위한 기초 연구로서 국내의 절개면에 대한 지질공학적인 특성 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 2001년 한국건설기술연구원에서 조사를 수행한 362개소 국도변 절개면에 대한 지질공학적 특성에 관해 분석하고자 하였다. 본 연구는 국내에 분포하는 절개면의 붕괴 특성과 붕괴 인자에 대한 기초 연구로 차후 국내 절개면에 대한 설계기준을 재정립하고 절개면에 대한 효율적인 관리를 수행하기 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 조사 대상 절개면

지질공학적 특성 자료 수집 및 현장조사가 수행된 위험절개면은 건설교통부 산하의 각 국도유지건설사무소로부터 보고된 위험절개면들과 한국건설기술연구원(2001)이 2000년에 수행한 현황조사로부터 파악한 위험절개면들 중 위험도에 따라 우선적으로 362개소 선정한 것이다. 이들 362개소 절개면을 대상으로 암반 및 토질 특성과 붕괴 현황 등과 같은 기초 자료와 붕괴에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 요인들에 대한 자료 수집 및 현장 조사를 수행하였으며 획득된 자료에 대하여 실제 발생한 붕괴와의 상관성을 분석하여 보았다. 붕괴 요인에 대한 분석을 위하여 절개면의 구성 재료에 따라 암반 절개면과 혼합 절개면으로 구분하였다. 암반 절개면은 절개면의 구성재료가 암반인 절개면을 의미하며 혼합 절개면은 한 절개면내에 암반과 토사가 함께 나타나고 있어 암반 절개면으로나 토사 절개면으로 그 특성을 판단하기 어려운 상태의 절개면을 의미한다. 362개소 조사 대상 절개면 중 암반 절개면과 혼합 절개면은 각각 245개소와 109개소로 그 분포는 각각 67.7%와 30.1%를 보이고 있다. 또한 8개소의 토사 절개면도 포함되어있으나 한정된 자료 양으로 분석결과의 신뢰도가 높지 않을 것으로 판단되어 본 연구에서는 분석을 실시하지 않았다. 본 연구에서는 이들 중 암반 절개면을 대상으로 붕괴 원인과 지질특성 등에 관하여 논하고자 한다.

## 3. 암반 절개면의 붕괴 요인 분석

### 3.1 암종에 따른 붕괴 현황

조사가 수행된 362개소의 위험절개면 중 암반으로 구성된 245개소의 절개면에 대하여 구성 암석들의 종류별 분포를 파악하여 보았다. 구성암종은 암석의 성인에 따라 화성암류, 퇴적암류, 변성암류로 구분하였으며 화성암류는 산출상태, 암석의 조직, 화학성분에 따라 심성암/반심성암과 화산암으로 구분하였다. 또한 퇴적암류는 기계적인 풍화에 의한 파쇄로 생성된 쇄설물질이 퇴적되어 고화됨으로서 생성되는 쇄설성 퇴적암과 화학적 풍화 등에 의해 생성된 비쇄설성 퇴적암으로 구분하였으며 변성암류는 암석 조직 내 편리, 엽리 등이 관찰되는 엽리상 변성암과 이들이 나타나지 않거나 발달상태가 미약한 비엽리상 변성암으로 구분하였다. 위험 암반절개면 중 52.2%가 변

성암으로, 32.7%가 화성암으로, 그리고 15.1%가 퇴적암으로 구성되어 있다(그림 1). 이들 절개면 중 87.3%에 해당하는 214개소에서 붕괴가 발생하였거나 붕괴이력 또는 낙석이 관찰되었다. 붕괴이력이 있는 절개면의 암종별 분포는 그림 2와 같다. 붕괴 절개면 중 약 50.9%가 변성암류로 구성되어 있으며 화성암류와 퇴적암류가 각각 32.2%와 16.9%를 차지하고 있다. 한국건설기술연구원(1989)이 제시한 국내의 암석분포에 따르면 변성암류가 34.1%, 화성암류가 37.2%, 퇴적암류가 20.6%, 충적층이 8.1%로 분포하고 있으며 따라서 암석분포와 붕괴절개면의 암종분포를 비교해 보면 변성암이 상대적으로 붕괴빈도가 높으며 화성암과 퇴적암의 붕괴빈도는 상대적으로 낮은 것을 알 수 있어 변성암이 붕괴에 민감한 것으로 보인다. 이러한 결과는 변성암에서 높은 붕괴빈도를 보이는 유병옥(1997)의 연구 결과와도 유사함을 보이고 있다. 그러나 유병옥의 연구결과에 따르면 화성암이 퇴적암보다 높은 붕괴빈도를 보이는 본 연구결과와는 달리 퇴적암이 화성암에 비해 높은 붕괴빈도를 보이고 있으며 이는 유병옥의 연구결과가 고속도로변의 도로절개면을 대상으로 하였고 고속도로의 경우 도로선형이 일반국도의 선형에 비해 직선적이어서 층리의 방향이 일정한 퇴적암의 특성상 고속도로변의 퇴적암에서 붕괴가 발생할 가능성이 높은 데 기인한 것으로 보인다.

절개면에서 발생한 붕괴를 불연속면의 영향이 적고 비교적 소규모인 낙석과 불연속면의 영향에 의한 중·대규모 붕괴를 구분하여 붕괴이력에 대한 지질공학적 특성을 분석하였다. 변성암류로 구성된 붕괴절개면 중 45.9%가 불연속면의 영향에 의한 붕괴가 발생하였으며 퇴적암류와 화성암류의 경우 각각 36.1%와 33.3%가 불연속면의 영향에 의한 붕괴로 분석되었다(그림 3). 이를 암종별로 자세히 살펴보기 위해 암종에 따라 다시 자세히 구분하였다. 변성암 중 엽리구조의 발달이 미약하거나 거의 없는 비엽리상 변성암류는 전체 절개면 중 불연속면의 영향에 의한 붕괴가 차지하는 비율이 28.6%를 보이고 있으며 엽리구조가 잘 발달된 천매암과 편암으로 구성된 엽리상 변성암의 경우 전체 절개면 중 40.4%가 불연속면의 영향에 의한 붕괴를 보이고 있다. 결과적으로 엽리상 변성암의 경우 불연속면의 영향에 의해 발생하는 붕괴 비율이 비엽리상 변성암에 비해 현저하게 높음을 알 수 있다. 이는 엽리상 변성암에 뚜렷하게 발달된 엽리면이나 변성암에서 흔히 관찰되는 단층에 기인한 것으로 판단된다. 엽리면은 두 종류 이상의 광물들이 교대로 늘어선 암석 내 조직으로 특히 운모류들이 선택 배열될 경우 전단강도의 저하를 유발하여 미끄러짐을 발생시킬 수 있다.

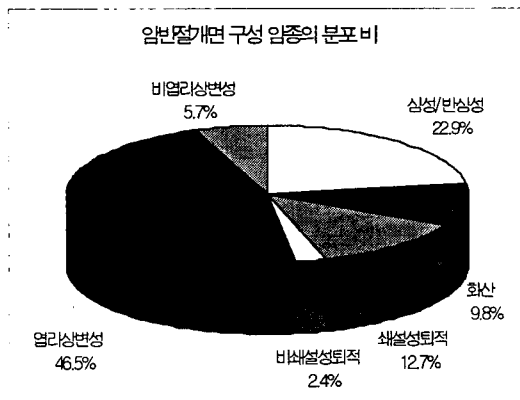


그림 1. 절개면 구성암종 분포 비율

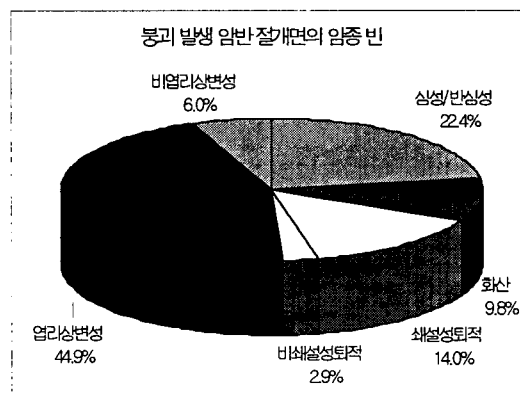


그림 2. 붕괴 절개면의 암종 분포

퇴적암의 경우에는 풍화에 의한 파쇄로 생성된 쇄설물질이 퇴적되어 고화된 사암, 역암 등의 쇄설성 퇴적암과 석회암과 고회암 등의 비쇄설성퇴적암으로 구분하였다. 쇄설성 퇴적암과 비쇄설성 퇴적암의 불연속면에 의한 붕괴비율은 각각 50.0%와 32.2%를 보이고 있다. 쇄설성 퇴적암은 풍화에 의한 차별적인 침식이 주요한 붕괴 원인이며 비쇄설성 퇴적암에서의 붕괴는 화학적 풍화에 의한 암석학적인 특성에 의한 것으로 판단된다.

화성암의 경우는 성인에 따라 크게 화강암, 섬록암과 같은 심성/반심성암류와 관입 또는 분출상으로 나타나는 안산암, 현무암 등의 화산암류로 구분하였다. 그림 4에서와 같이 심성/반심성암류의 경우에는 전체 절개면 중 30.4%가 불연속면에 의한 붕괴가 발생하였으며 화산암류에서는 전체 절개면 중 25.0%에서 불연속면 작용에 의한 붕괴가 발생했다. 즉, 심성/반심성암류의 붕괴비율이 화산암보다 높았으며 이는 심성/반심성암류의 경우 지표에 노출하게 되면 하중제거 또는 응력 해방에 의한 박리(exfoliation) 및 풍화작용이 진행되어 층상절리를 형성하게 되고 이러한 층상절리에 의해 심성/반심성암류에서의 붕괴비율이 화산암류에 비해 높은 것으로 판단된다.

또한, 붕괴형태를 불연속면의 작용에 의한 중·대규모 붕괴와 낙석으로 구분하여 붕괴빈도를 파악하여 보면 엽리상 변성암과 비쇄설성 퇴적암의 경우를 제외하면 낙석에 의한 붕괴가 불연속면의 영향에 의한 붕괴에 비해 2배 이상의 빈도수를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, 자료의 개소수가 적은 비쇄설성 퇴적암을 제외할 경우 엽리상 변성암에서 다른 암종 들과는 달리 불연속면에 의한 붕괴빈도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

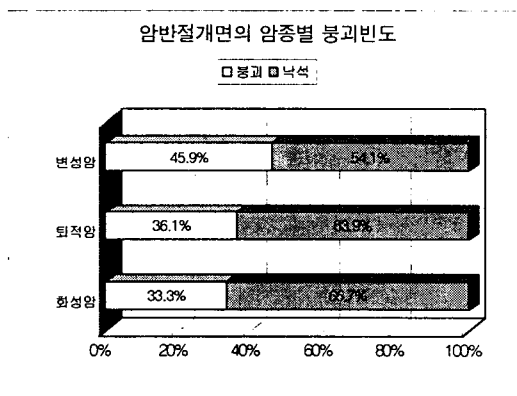


그림 3. 절개면의 암종별 붕괴비율

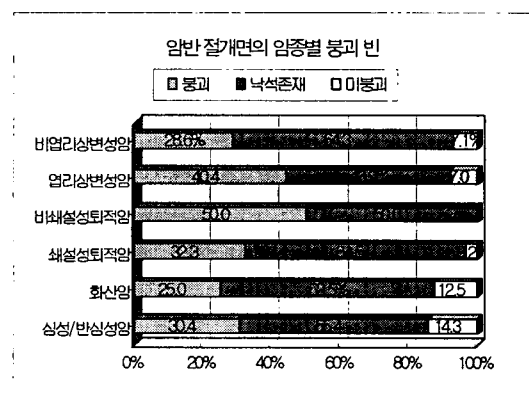


그림 4. 절개면의 상세 암종별 붕괴비율

### 3.2 암종별 붕괴유형 분석

암반 절개면에서 발생할 수 있는 붕괴의 유형으로는 불연속면의 특성에 의해 좌우되는 평면파괴, 썸기파괴, 전도파괴, 그리고 암반이 매우 연약하거나 절리면이 아주 심하게 발달한 경우 발생하는 원호파괴가 있다. 또한, 상기 붕괴유형이 2가지 이상 복합되어 발생하는 복합파괴와 절개면의 상층부를 덮고 있는 풍화토나 풍화암 등이 강우 등의 영향으로 유실되는 표층유실, 그리고 소규모의 암석이 상부로부터 자유 낙하함에 따라 발생하는 낙석 등이 있다.

전체 붕괴 절개면에 대해 붕괴유형을 분석한 결과 썩기파괴가 19.9%, 평면파괴가 16.1%, 표층유실이 8.1%, 그리고 낙석이 43.9%를 차지하고 있어 낙석을 제외하고는 썩기파괴가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 그 외에 전도파괴가 4.6%, 복합파괴가 4.6%, 그리고 원호파괴가 2.8%의 분포비율을 보이고 있다(그림 5). 이 자료를 암종에 따라 분류할 경우 암종별로 우세한 붕괴유형이 조금씩 다른 것을 알 수 있다.

변성암류의 경우 썩기파괴가 24.9%로 붕괴유형 중 차지하는 비율이 가장 높았으며 그 다음으로 평면파괴가 19.2%, 전도파괴가 3.8%, 복합파괴가 3.0%, 그리고 원호파괴가 1.9%의 붕괴비율을 보이고 있다(그림 6). 낙석의 경우 40.2%의 붕괴비율로 전 암종에서 차지하는 비율(43.9%)보다는 줄어들었으나 여전히 높은 비율을 차지하고 있다. 반면 표층 유실의 경우는 붕괴비율이 7.0%로 전체의 붕괴비율(8.1%)과 비슷한 비율을 보이고 있다. 변성암류의 경우 썩기파괴 및 평면파괴 발생빈도(44.1%)가 전체(36.0%)와 비교하여 높게 나오는 특징이 인지된다. 특히 엽리상변성암류는 암반 내 발달되는 벽개구조, 엽리구조, 편리구조 등과 지구조상의 응력변화에 의해 형성된 습곡이나 단층, 전단대와 같은 지질학적인 약대가 다른 암종으로 구성된 절개면에 비해 많이 나타난다. 이러한 다수의 불연속면의 발달은 절개면의 방향과의 관계에 따라 썩기파괴 또는 평면파괴를 유발할 가능성이 높다. 즉, 변성암류에서 나타나는 붕괴유형은 불연속면의 발달 상황이 붕괴에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

퇴적암류의 암종별 붕괴 유형은 썩기파괴가 차지하는 비율이 14.3%로 가장 높으며 그 외 원호파괴(8.9%), 전도파괴(7.7%), 표층유실(7.1%), 복합파괴(3.6%), 평면파괴(3.6%) 순이다(그림 7). 특히, 퇴적암류에서의 낙석 발생 비율은 전체의 55.4%에 해당되어 다른 암종으로 구성된 절개면에 비해 높은 특징을 가진다. 또한 원호파괴의 발생비율(8.9%)이 화성암류(1.7%)나 변성암류(1.9%)에 비해 높은 비율을 차지한다. 불연속면에 의한 붕괴유형의 비율이 작은 것에 반해 썩기파괴의 높은 발생빈도는 연장성이 길고 절리간격이 좁은 층리면과 퇴적암에서 특징적으로 나타나는 층리면에 직교하는 절리들의 기하학적인 조합에 의해 나타나는 썩기형 암괴와 관련된 것으로 판단되어진다. 또한 높은 낙석발생빈도는 상대적으로 풍화에 약한 셰일이나 이암이 지표로 노출되면서 층리면을 따라 탈락하기 때문으로 판단된다.

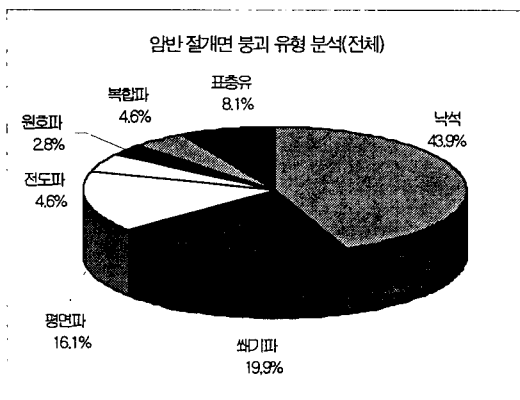


그림 5. 절개면 붕괴유형 분석(전체)

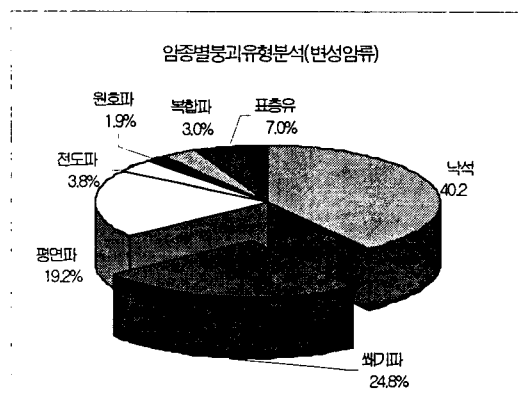


그림 6. 절개면 붕괴유형 분석(변성암)

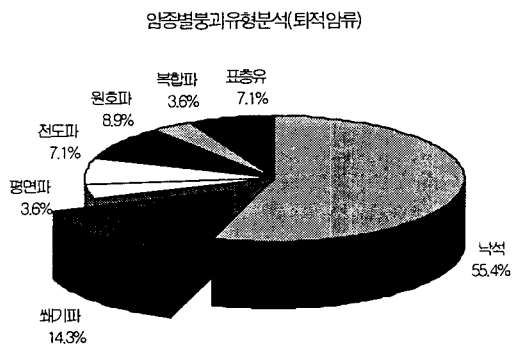


그림 7. 절개면 붕괴유형 분석(퇴적암)

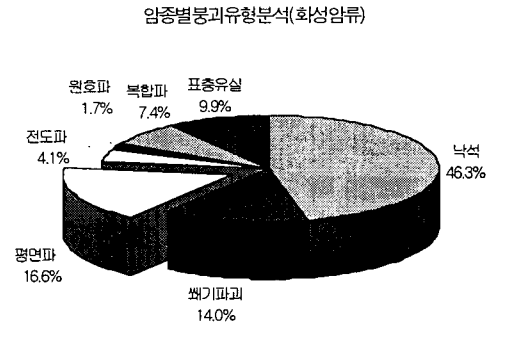


그림 8. 절개면 붕괴유형 분석(화성암)

반면, 화성암류의 경우 평면파괴의 발생빈도가 16.6%로 낙석(46.3%)을 제외하고는 붕괴유형 중 가장 높은 비율을 차지한다(그림 8). 이는 특히 심성/반심성암류에서 관찰되는 대표적인 풍화양상인 층상절리의 이완에 의한 슬라이딩과 절리의 연장성이나 발달정도에 영향을 주로 받는 썩기파괴와 평면파괴의 비율이 큰 것으로 판단된다. 한편, 불연속면의 작용에 의한 붕괴 양상인 평면파괴와 썩기파괴의 비율은 30.6%로 변성암류에 비해 낮은 반면 낙석의 발생비율이 46.3%로 변성암에 비해 그 비율이 증가함을 알 수 있다. 또한 화성암류의 경우 표층유실의 비율이 9.9%로 다른 암종에 비해 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 이는 국내에 흔히 분포하는 화강암 풍화토에서 발생하는 붕괴양상으로 보인다.

현황과 분석결과를 종합하면 국내 국도별 암반 절개면의 경우, 암종별 분포는 변성암류가 우세하며 붕괴절개면의 비율에서도 변성암류가 우세한 것으로 나타났다. 붕괴 유형 분석결과는 변성암류의 경우 다른 암종에 비해 불연속면에 좌우되는 유형이 우세하게 나타났으나, 화성암류 및 퇴적암류에서는 낙석이 우세하게 나타났다. 따라서, 변성암류의 경우는 불연속면, 특히 엽리면을 따라 발생하는 붕괴유형이 우세한 것으로 판단된다.

### 3.3 암종별 RMR 및 SMR 분석

암반 절개면의 경우 정확한 안정성 해석과 합리적인 유지 관리를 위하여 암반의 상태를 정확하게 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 양상을 나타내는 암반의 성질이나 조건을 간결하게 표현하기 위하여 RMR(Rock Mass Rating)에 기초한 암반평가를 실시하였다. 또한 절개면의 방향과 절개면 내 존재하는 불연속면의 방향을 고려한 SMR(Slope Mass Rating)을 이용하여 절개면의 안정성을 평가하는 인자로 사용하였다.

#### 1) 암종별 RMR의 특성

암반절개면의 RMR 등급별 빈도를 비교하기 위하여 작성한 원형다이어그램은 그림 9와 같다. 현장조사에 의해 획득된 암반절개면내 불연속면의 특성과 암반자체의 특성을 이용하여 RMR 등급을 산출한 결과 III등급(59.2%)이 가장 우세하며 II등급(30.6%), IV등급(9.0%) 순으로 나타났다.

암종별 RMR등급의 분포를 살펴보면 변성암의 경우 비교적 양호한 암반상태를 나타내는 I, II등급이 36.7%, 화성암의 경우 30.0%, 퇴적암의 경우 16.7%의 비율을 보이고 있어 변성암의 경우 붕괴

빈도가 높음에도 불구하고 암반의 상태가 양호한 절개면의 비율이 다른 암종보다 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 변성암에서 주로 발생하는 붕괴가 불연속면의 작용에 의한 것임을 보이는 이전의 결과와도 밀접한 관계를 보이며 즉, 변성암에서는 암반의 상태는 매우 양호하나 불연속면의 작용에 의해 발생하는 붕괴가 주로 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 풍화에 상대적으로 약한 퇴적암의 경우 다른 암종에 비해 암반의 상태가 불량한 것으로 나타났다.

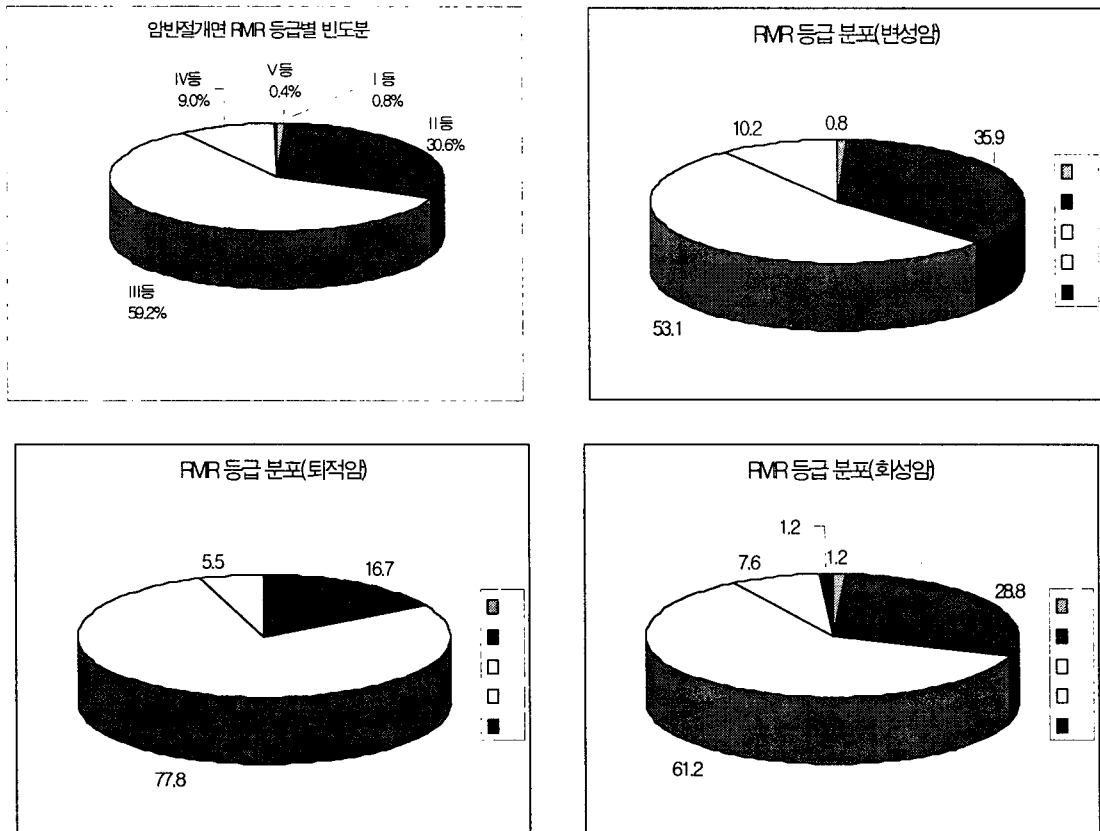


그림 9. 각 암종별 RMR 등급 분포

## 2) 암종별 SMR의 특성

암반절개면의 SMR 등급별 빈도를 비교하기 위한 원형다이어그램은 그림 10과 같다. SMR 분류법에 의해 절개면의 안정성에 크게 문제가 없는 I, II 등급의 경우 11.0%로 SMR 등급 평가의 기본 자료인 RMR에서 I, II 등급 비율인 31.4%에 비해 크게 감소하였음을 알 수 있다. 반면 불안정한 상태인 III 등급이하의 분포는 89.0%를 보이고 있다. 특히 시급한 공법이 요구되는 매우 불안정한 상태인 V 등급의 절개면도 12.6%의 비율을 보이고 있다. 이렇게 RMR의 등급 분포와 SMR의 등급 분포에 차이를 보이는 것은 RMR평가에서 고려되는 암반 내 불연속면의 공학적 특징 외에 불연속면의 방향(경사/경사방향)이 절개면 안정성에 훨씬 영향을 끼치고 있음을 보여주는 것이다.

특히 암반절개면 중 가장 많은 비율을 점하고 있는 변성암의 경우, RMR분류법에서 IV등급은 10.2%에 불과하지만, SMR분류법에서는 IV등급이 22.7%, V등급이 13.3%로 급증하여 엮리, 편리와 같은 불연속면의 방향과 절개면의 방향과의 관계가 절개면 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

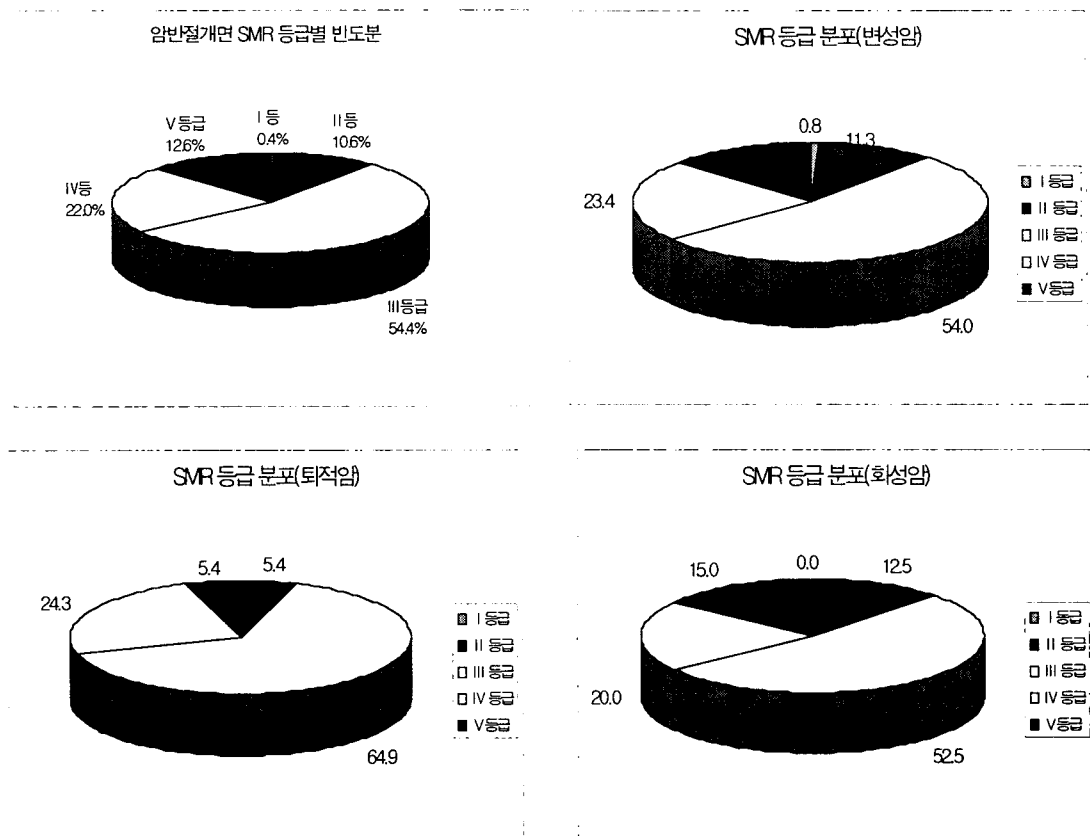


그림 10. 각 암종별 SMR 등급 분포

#### 4. 결 론

1. 245개소의 암반절개면에 대한 현장조사 결과, 87.3%인 214개소에서 붕괴가 발생하였으며 이들 붕괴 절개면을 암종별로 분석한 결과 50.9%가 변성암류로, 32.2%가 화성암류로, 16.9%가 퇴적암류로 구성되어 있다. 이러한 결과를 국내의 암석분포인 변성암류 34.1%, 화성암류 37.2%, 퇴적암류 20.6와 비교해보면 변성암류에서 붕괴가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히, 엽리상변성암에서 붕괴빈도가 매우 높음을 알 수 있다.

2. 변성암의 경우 불연속면의 영향을 받는 평면파괴와 쉼기파괴의 비율이 44.1%로 다른 암종에 비해 매우 높게 나타나고 있다. 이러한 현상은 변성암류에서 주로 발견되는 벽개, 엽리, 편리 구조와 단층 및 전단대와 같은 지질구조들이 절개면의 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3. 화성암에서는 다른 암종과 달리 평면파괴의 비율이 쉼기파괴보다 높으며 이는 화성암류에 특징적으로 발달하는 층상절리에 의한 영향으로 보인다. 퇴적암의 경우 낙석의 분포비율이 55.4%로 다른 암종에 비해 매우 높은 비율을 보이고 있다. 반면 불연속면에 의한 붕괴는 17.9%로 작은 비율을 보이고 있으며 이는 연장성이 길고 절리간격이 좁은 층리면과 퇴적암에서 관찰되는 층리에 직교하는 수직절리들에 의한 영향으로 판단된다.



## 참고 문헌

- 유병옥, 1997, 암반절취면의 안정성 평가 및 대책에 관한 연구, 박사학위 논문, 한양대학교
- 한국건설기술연구원, 1989, 사면의 안전진단 및 보호공법, 건설교통부
- 한국건설기술연구원, 2001, 도로절개면 유지관리 시스템 개발 및 운용 (III), 건설교통부