

## 엽리가 발달한 편마암사면의 파괴활동 사례 연구

민경남<sup>1)</sup>, 윤진오<sup>1)</sup>, 이대선<sup>1)</sup>, 김춘수<sup>2)</sup>, 김근태<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>대원토질 엔지니어링사업본부, <sup>2)</sup>금광기업 토목1부

### 1. 서론

최근 많은 도로의 신설, 기존 도로의 선형변경 및 각종 부지확보공사 등으로 인한 굴착공사의 증가에 따라 비탈면의 안정성 문제가 강조되어 왔다. 특히, 편마암과 같은 이방성 암반이 분포하는 지역에서는 편리, 엽리, 절리 및 단층 등과 같은 불연속면의 방향성과 모암의 물리화학적 특성에 좌우되는 풍화도가 비탈면의 안정성에 미치는 영향이 가장 크므로 이들의 특성을 고려한 안정대책이 필수적이다.

편마암의 암반공학적 특성을 좌우하는 편리, 엽리 등의 이방성 지질구조는 암반사면에서 안정성에 영향을 주는 중요한 요인 중의 하나로 사면이 전체적으로 불균질한 강도 특성을 보이며, 단층 또는 습곡 등과 같은 거시적인 활동파괴 요인으로 작용할 수 있는 지질구조를 가질 때 대규모의 사면붕괴가 일어나는 경우가 많다.

연구지역은 전라북도 군산시 서수면 일대에 위치하며 복잡한 지질구조의 특징을 갖는 옥천변성대의 서남부에 위치한다. 이 지역은 2001년에 절취를 시작하여 2002년 절취가 완료될 때까지 강우에 의한 침투수의 영향으로 2001년 12월에서 2002년 8월에 걸쳐 3개 사면에서 활동파괴가 발생하였으며 절취에 의해 노출된 이방성 암반의 응력이완으로 추가적인 활동파괴의 위험성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 활동파괴 원인을 규명하기 위하여 기상자료 수집, 시료채취, 지표지질조사, 시추조사, 불연속면 강도시험 등의 현장조사와 풍화에 대한 암반사면의 영향성을 검토하기 위하여 X-선 회절분석 및 X-선 형광분석 등의 실내시험을 병행하여 사면붕괴의 원인을 파악하였다. 또한 이 연구는 편마암이 분포하는 암반사면에서의 활동파괴에 대한 조사 및 원인 분석에 의한 안정성 대책방안 수립의 기본 자료를 제공하고 이와 유사한 지질공학적 특성을 갖는 암반사면에서의 안정성평가 및 대책을 수립하는데 참고자료로 이용되길 기대한다.

### 2. 지질 및 붕괴현황

#### 2.1. 지질

오랜 시간 반복된 구조운동에 의한 파쇄대의 발달과 완충작용으로 인한 풍화침식의 결과, 연구지역의 지형은 대부분이 저지대의 구릉으로 형성되어 해발 150 ~ 230m 높이의 비교적

적 낮은 산계를 형성하고 있다.

주변지질은 검토구간의 대부분을 차지하는 선캠브리아기의 안구상편마암, 편암 및 화강편마암과 이를 관입한 쥐라기의 화강암과 소규모의 암맥들로 구성된다.

안구상편마암은 대체로 장축이 2~3cm 안구상의 변정을 가지는 것이 특징으로 간혹 장방형의 변정을 가지기도 한다. 이들 변정은 정장석 및 미사장석으로 구성되어 있으며 석기(matrix)는 엽리가 잘 발달되었다. 편암은 최소한 3차 이상의 중북변형과 녹색편암상에서 암피블라이트상에 이르는 중북변성상을 받았다. 화강편마암은 일반적으로 괴상의 등립상조직을 가지나 국부적으로 엽리가 발달된 것도 관찰된다. 화강암은 괴상으로 조립질의 등립상조직을 가지며 석영, 정장석 및 흑운모 등으로 구성되어 있다.

연구지역은 선캠브리아기의 안구상편마암으로부터 백악기의 맥암까지 다양한 종류의 암석들이 분포하며 특히 안구상편마암, 편암 및 화강편마암은 습곡작용과 단층작용에 의해 복잡한 지질구조를 갖고 있다.

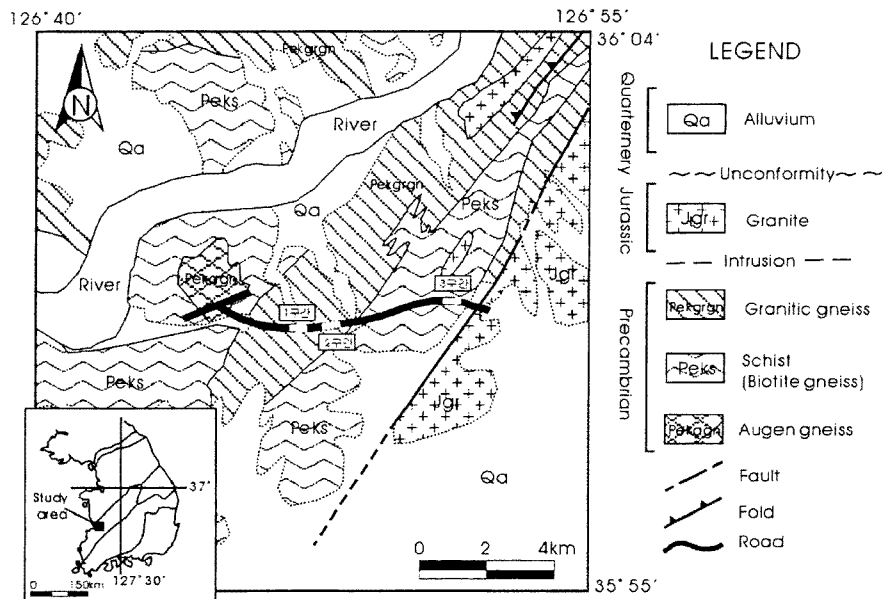


그림 1. 연구지역의 지질도  
(한국지질자원연구원 대전도폭설명서, 1996)

## 2.2. 붕괴현황

붕괴된 사면의 기반암은 안구상편마암, 편암 및 화강편마암으로 암종별로 다른 붕괴이력을 가지고 있다. 또한 세맥의 암맥들이 일부구간을 관입하고 있으며 각각의 구간은 평면과 괴를 유발시키는 엽리, 단층 및 습곡 등의 불연속면이 발달하고 있다. 구간별 붕괴현황을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 구간별 붕괴현황

구 분		제1구간	제2구간	제3구간
사 면 현 황	절개면특성	발파암	발파암	리핑암, 토사
	기울기	1:0.5(63°)	1:0.6(59°)	1:0.5(63°) ~ 1:1.0(45°)
	방향/높이	N80W / 40m	N75E / 35m	N60E / 55m
지 질	암종	화강편마암	안구상편마암	편암(흑운모편마암)
	주불연속면	엽리 및 단층	엽리 및 단층	엽리
	풍화정도	심한풍화 ~ 보통풍화	심한풍화	심한풍화 ~ 완전풍화
	지형	능선부	능선부	능선부
수 리 조 건	함수상태	습함	-	습함
	지하수	-	지하수 유출	-
붕 괴 이 력	위치 (sta.)	1+740	2+680	5+920
	규모	연장: 10m, 부피: 340m <sup>3</sup>	연장: 20m, 부피: 480m <sup>3</sup>	연장: 20m, 부피: 1100m <sup>3</sup>
	파괴 형태	평면파괴	썩기형 평면파괴	원호파괴
	붕괴시기	2001. 12	2002. 7	2002. 8
특이사항		점토질 탄질물 협재	배면내 구조물 인접	활동면에 암맥 관입

### 3. 현장조사

#### 3.1. 지표지질조사

본 연구에서는 RMR 시스템에 의거한 지질특성을 평가함으로써 사면의 암반등급 및 분류 등의 기초 자료를 마련하였고, 이를 현장답사를 통하여 검증함으로써 검토구간의 절리면 상태, 단층파쇄대, 풍화특성 및 지하수 영향성을 고려한 사면조사를 수행하였다.

연구지역 일대는 10개 지구의 대절취 암반사면이 존재하며, 본 연구에서는 이 중 붕괴가 발생한 3개 구간의 사면에 대하여 정밀 현장조사를 수행하였다. 본 지역 암반사면의 안정성은 불연속면에 의해 크게 좌우되기 때문에 불연속면의 특성을 파악하기 위해 ISRM(1978b)에 제시된 기준에 의거하여 조사선조사를 수행하였다.

조사선조사에 의해 3개 사면으로부터 누적 조사길이 117m, 235개의 불연속면 자료를 수집하였다. 현장에서 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 주요 불연속면을 Fracman 프로그램을 이용하여 Terzaghi 보정 후, 선정된 불연속면을 고려하여 3개의 불연속면세트로 구분하였다(표 2).

조사대상 지역은 적어도 2회 이상의 습곡작용이 발생된 것으로 인지된다. 절개면 주변 엽리면의 방향이 교란되어 있는 것은 후기 변성작용 동안에 형성된 습곡에 의한 것으로 판단된다. 편마구조(Gneissosity)인 엽리는 전 구간에 발달하는 가장 중요한 면구조로 비대칭 부조화 습곡을 형성하고 있다. 주향 NW 경사 SW 방향의 긴 습곡 날개(Long limb)가 발달하며 엽리를 따라 불연속면이 발달하고 있다.

습곡구조의 정부(Crest)에서 엽리는 사면과 거의 평행하게 발달하여 불리한 관계를 보인다. 엽리의 평사투영 결과 50/70에서 최대 집중도를 보이며, 습곡을 지시하는 거들(Girdle)을 형성하고 있다(그림 3).

표 2. 불연속면의 특징

구분	1구간			2구간			3구간			
	set 1	set 2	set 3	set 1	set 2	set 3	set 1	set 2	set 3	
방향성	40/60	85/170	60/350	60/195	60/120	35/245	60/20	80/110	50/190	
빈도/m	0.57	1.19	1.75	0.44	0.65	0.55	0.85	0.74	0.52	
간격(cm)	1.74	0.84	0.57	2.27	1.53	1.81	1.17	1.35	1.92	
연장성(m)	5.57	4.46	3.24	5.67	5.54	5.34	4.45	3.38	3.08	
JRC	2~4	2~4	8~10	2~4	6~8	6~8	4~6	4~6	4~6	
충진물	점토	철산화물	-	점토	철산화물	-	토사	토사	철산화물	
종식 유형 (%)	x	67	60	46	80	78	65	63	75	34
	d	32	39	54	20	22	33	32	23	64
누수	damp	-	-	dripping	damp	-	damp	damp	-	
엽리	50/55	40/60	-	55/70	40/70	-	45/90	55/110	-	

\* 종식유형 x: 조사영역 이탈, d: 다른 불연속면에 절단

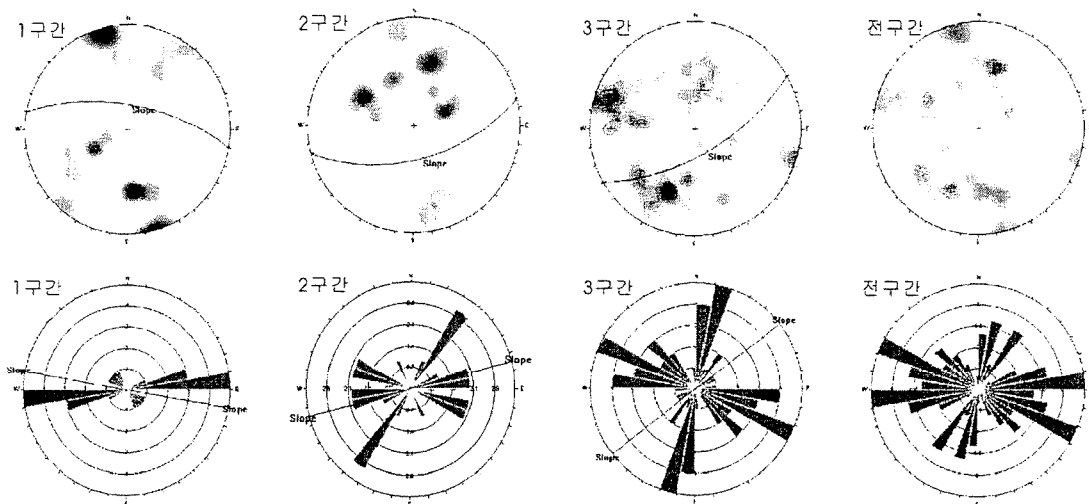


그림 2. 불연속면의 평사투영 결과

본 구간의 편마암은 심도에 따른 풍화등급의 변화가 분명하지 않으며, 엽리와 관련된 취약면의 분포에 영향을 받는다. 점진적인 풍화대의 형성보다는 엽리와 관련된 취약대를 따라 풍화가 집중적으로 이루어짐을 관찰할 수 있다.

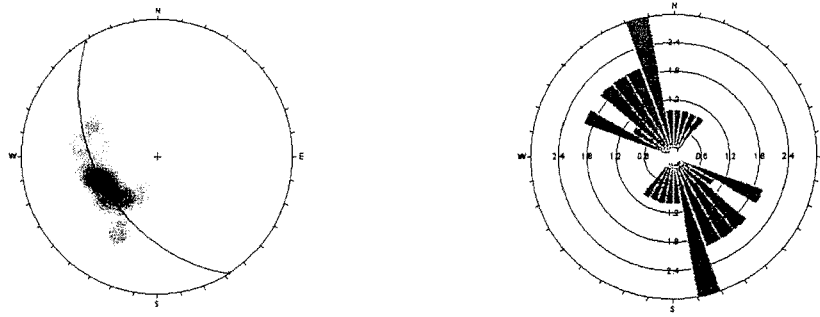


그림 3. 엽리의 평사투영 결과

### 3.2. 시추조사

지층의 분포상태 및 기반암에 발달한 불연속면의 수직적인 분포특성을 조사하기 위하여 NX 규격으로 시추조사를 실시하였다(표 3). 기반암의 상부는 지층의 기복이 상당히 심하여 풍화가 진행된 양상이 매우 불규칙하며 대부분 절리 및 균열이 발달하고 있다. 파쇄대는 주로 풍화암 및 연암층에서 나타나며 점토가 일부 구간에서 협재되기도 한다.

시추코아를 확인한 결과, 연암 이상에서는 비교적 풍화가 적게 진행되어 코아회수율이 높은 편이지만 엽리면을 따라 쪼개짐이 잘 발달하고 암질상태가 불량하며, 엽리면과 교차하는 절리군에 의해 암반이 더욱 파쇄되어 있다. 3구간에서는 흑운모가 심하게 풍화되어 갈철석화되어 황갈색을 띠고 있으며 코아로 회수되어 대기에 노출시 쉽게 판상으로 분리되고 잘게 부서져 실트질로 분해되는 경우도 흔하다.

지하수위는 시추공을 이용하여 약 1개월에 걸쳐서 측정되었다. 평균 지하수위는 지표면 하 6.8m, 14.6m, 17.8m를 갖는다. 구간별 지하수위의 차이는 지형적인 원인에 의한 것으로 판단된다.

표 3. 시추조사 결과

구간	지층명	심도 (m)	층후 (m)	RMR	SMR	지하수위 (GL -m)
1구간	풍화토	0.0 ~ 4.8	4.8			6.8
	풍화암	4.8 ~ 6.9	2.1			
	보통암	6.9 ~ 10.5	3.6	63	68	
2구간	풍화토	0.0 ~ 9.3	9.3			14.6
	풍화암	9.3 ~ 10.0	0.7	13	18	
	보통암	10.0 ~ 12.4	2.4	50	55	
3구간	풍화토	0.0 ~ 11.9	11.9			17.8
	풍화암	11.9 ~ 13.3	1.4			
	연암	13.3 ~ 19.5	6.2	25	8	

(GL. 0.0m 기준)

### 3.3. 기상자료

사면붕괴와 강우와의 상관성을 분석하기 위하여 붕괴 발생 당시까지의 강우기록을 조사하였다. 강우기록은 군산시 금동에 위치한 기상관측소에서 측정한 자료를 참조하였다.

2, 3구간의 붕괴시기는 2002년 7월, 8월로 당시 군산시내와 익산시에서 측정된 강우량은 70 ~ 110mm/day에 달하였는데, 지역별로 거의 같은 강우량을 기록하였으며 강우특성 또한 유사한 경향성을 보였다. 그림 4는 이들 관측소에서 관측된 누적강우량 분포를 나타낸 것이다.

기상자료를 검토한 결과 사면붕괴의 시기가 집중강우시 또는 직후에 발생한 것으로 조사되어 강우조건과 사면붕괴가 직접적 상관성이 있음을 알 수 있었다. 다만 제1구간의 경우 강수량이 상대적으로 적은 12월에 발생하였다.

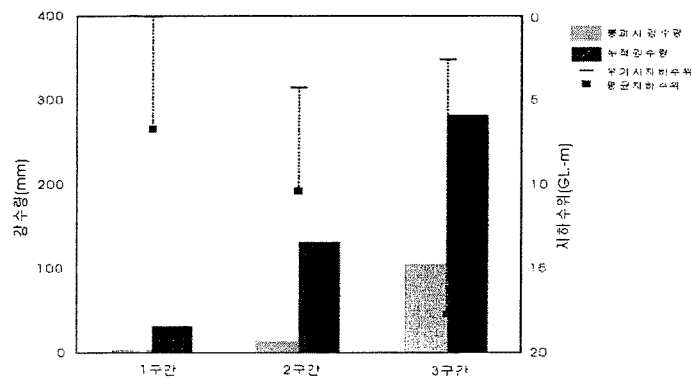


그림 4. 누적강우량과 지하수위

### 3.4. 슈미트햄머 시험

사면에 노출된 암반을 대상으로 Schmidt Hammer를 타격하여 일축압축강도로 환산하였다. 사용된 장비는 일본 Sanyo社에서 제작한 Rock Test Hammer로 각 지점별로 실시된 평균반발치를 구하고 이를 다시 상관표를 이용하여 일축압축강도를 산정하였다(그림 5).

타격대상구간은 절리면, 단층대 및 붕괴된 활동면으로 기본 타격간격을 2m로 하였으며 암종이 변하거나 단층대가 나타나면 주변부에 대한 반발치 변화도 측정하였다. Schmidt Hammer 시험결과는 사면평가지수 SMR에 참조하였다.

Schmidt Hammer 타격에 의한 반발도는 불연속면의 종류에 따라 변화의 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 불연속면의 형성조건과 암석의 특성 그리고 풍화작용의 결과에 따라 물리적으로 달라질 수 있다고 판단된다.

Schmidt Hammer의 반발치 R과 일축압축강도사이에는 암석의 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 정비례하는 관계를 가지며, 단 반발치 R이 70 이상일 경우에는 일축압축강도가 무한대로 증가하여 환산이 곤란하다(三木, 1987). 따라서 반발도의 변화는 암석의 강도변화로 이해해도 무방하며, 암석은 기계적 풍화에 의해 시간이 갈수록 강도가 약해지므로, 오래되어 이완된 불연속면 일수록 반발치 값이 작게 나타나게 된다.

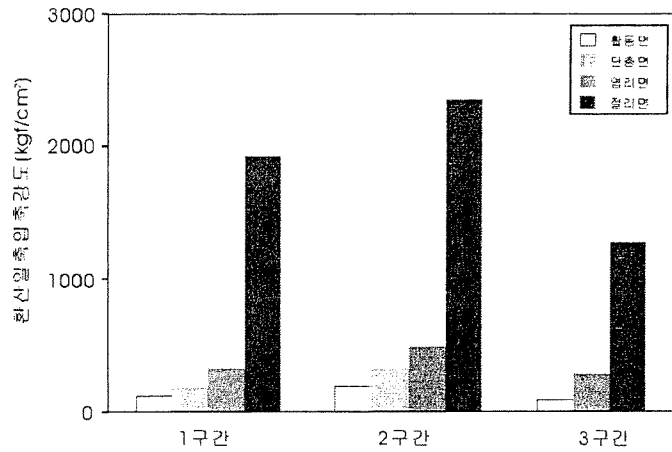


그림 5. Schmidt Hammer에 의한 일축압축강도

### 3.5. X-선 회절분석 시험

팽창성광물이 사면내에 분포하고 있을 경우에는 광물의 팽창이 사면의 거동에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 활동면에 충전되어 있는 점토질 탄질물과 토사에 대하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다.

1구간의 충전물은 반대사면까지 연장된 주불연속면 set 1의 40/60 방향에 협재된 폭 10~15cm의 점토가 혼재된 탄질물이다. 3구간의 시료는 사면 붕괴 후 활동면에 잔존되어 있는 실트질로 와해된 모암을 대상으로 하였다(그림 6).

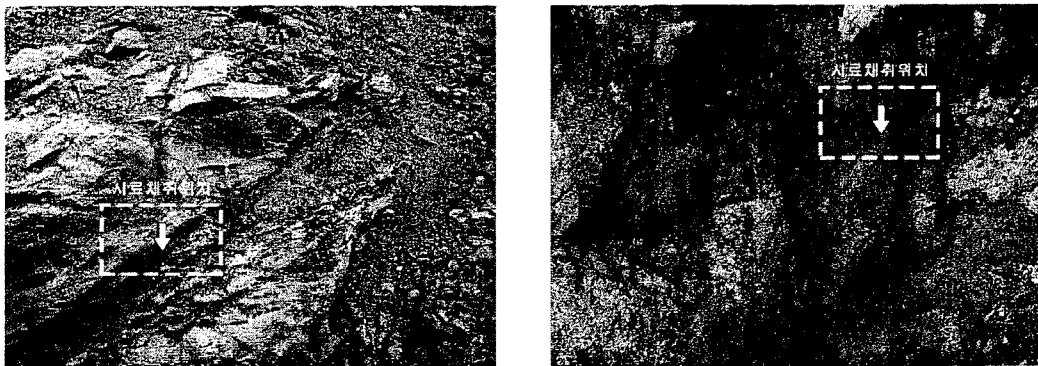


그림 6. XRD 시료채취 구간(좌: 1구간, 우: 3구간)

분석결과, 1구간에서 채취한 충전물에서는 석영, 백운모 및 점토광물인 일라이트(Illite)가 확인되었으며 3구간에서는 사장석, 정장석, 카올리나이트 및 석영이 확인되었다(그림 7).

1구간에서 점토광물인 일라이트가 산출되었으나, 다른 점토광물에 비하여 팽창성이 낮은 광물이므로 일라이트의 팽창성에 의한 사면의 활동가능성은 배제하였다. 일라이트는 모암인 화강편마암이 지하수의 침투에 의해 풍화되어 생성된 것으로 보이며 이 광물은 팽창에 의한 응력보다는 산사태 활동면의 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

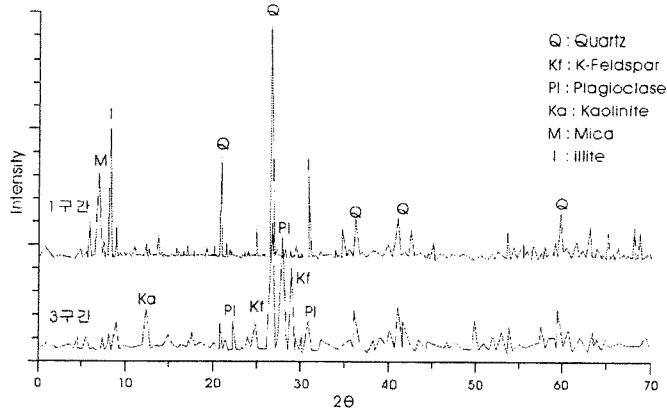


그림 7. X-선 회절분석 결과

3구간의 사장석은 일반적으로 암석의 구성광물 중 다른 광물에 비해 풍화가 쉽게 되는 광물로 알려져 있으며 또한 활동면에 상당한 두께로 잔존되어 있는 양상으로 보아 붕괴에 직간접적인 영향을 끼친 것으로 판단된다.

### 3.6. X-선 형광분석 시험

기반암의 화학적 풍화특성이 사면에 어떠한 영향을 미치는 지를 파악하기 위하여 신선한 모암과 풍화대의 화학조성과 광물조성을 분석하였다. 시료는 1구간의 점토질 탄질물과 신선한 모암, 3구간의 풍화된 모암과 신선한 모암을 대상으로 하였으며 주성분원소를 정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 X-선 형광분석(XRF)을 실시하였다(표 4).

XRF 분석을 통해 구해진 각 원소의 함량비를 신선한 모암의  $Al_2O_3$  함량에 대한 풍화대의  $Al_2O_3$  함량을 나눈 비율로 계산하여 신선한 모암에 대한 풍화대에서의 함량비 증감 비율의 변화를 살펴보았다(그림 8).

분석결과 풍화대의 원소함량 증감 변화가 뚜렷하다. Ca, Na는 풍화에 가장 민감한 변화를 보이는 것으로 확인된 사장석( $NaAlSi_3O_8$ ,  $CaAlSi_2O_8$ )을 구성하는 대표적인 알칼리 원소이다. 이들은 이온화 경향이 크고 다른 원소에 비해 상대적인 이동성이 크므로 물에 의한 가수분해 작용에 의해 용해되어 광물로부터 쉽게 제거될 수 있는 원소이다.

표 4. XRF에 의한 화학조성 결과

Sample No.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	Total
1-1	68.23	14.09	5.26	1.98	1.81	2.52	2.95	0.63	0.09	0.06	2.34	99.94
1-2	56.34	10.12	20.15	4.18	0.57	0.39	0.53	3.26	0.44	0.27	3.57	99.82
3-3	68.56	13.44	5.56	2.06	1.69	2.16	2.70	0.61	0.07	0.07	3.12	100.03
3-4	57.01	10.71	18.64	4.71	0.84	0.13	0.47	2.87	0.21	0.24	4.42	100.26
3-5	53.56	11.38	19.52	4.29	0.51	0.28	0.90	3.15	0.35	0.23	5.48	99.64



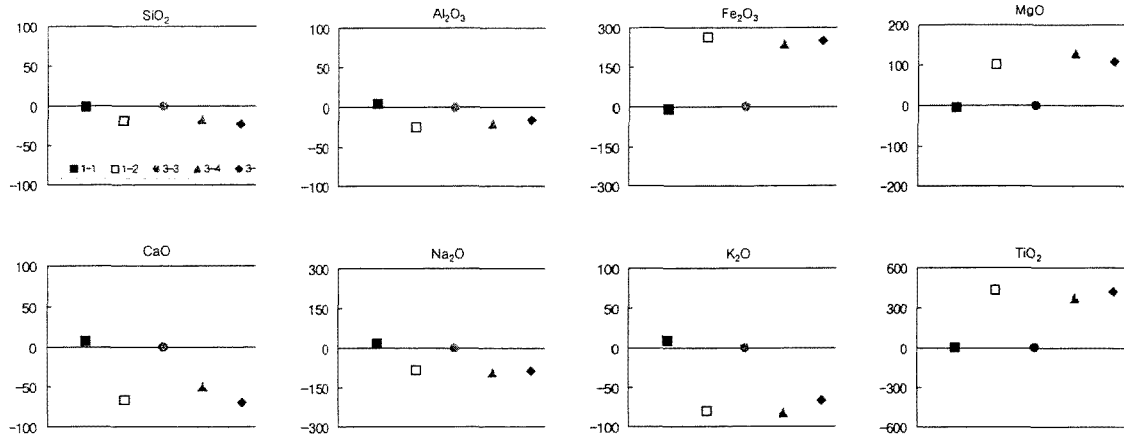


그림 8. 주원소의 증감 변화도

암석이 풍화를 받기 시작하면 계절의 변화 또는 1일 동안의 기온 변화에 따라 풍화가 일어나 암석의 내부에 절리나 틈이 발생하며, 얼음의 쪼개작용에 의해 형성된 틈은 시간이 경과함에 따라 점점 커지게 된다. 또한 이 틈을 따라 공기 및 물과 접하게 된 부분에서는 산화, 가수분해 및 수화작용 등의 화학적 풍화가 진행되어, 풍화에 대한 저항이 낮은 광물들은 화학적으로 분해되고 용해 및 세탈작용을 거치면서 암석내부에서 점토광물로 변하여 제거되기 쉽다. 결국 풍화가 진행되면서 암석내부에는 공극이 증가하므로, 풍화시간이 오래 지속될수록 암석의 밀도는 감소하게 되고 함수량은 증가하게 된다.

## 4. 붕괴원인 분석

### 4.1. 제1구간

붕괴시기는 2001. 12. 동절기에 발생하였다. 본 구간은 안구상편마암과 화강편마암의 경계영역이며 불연속면을 따라 풍화가 내부 깊숙이 진행되어 있다. 특히 두께 15cm의 점토질 탄질물이 주불연속면에 충전되어 있다. 탄질물은 전단강도가 매우 낮으며 특히 수분을 함유할 경우 전단강도가 상당히 저하되는 것으로 보고되어 있는데 본 지역은 단층작용과 풍화작용에 의해 강도가 현저히 저하된 상태이다.

붕괴된 절리면의 조도는 평면형의 매끄러운 상태로 증력방향으로 이동한 단층조선이 활동면에서 관찰되고, 활동면의 방향은 N32W/50NE에서 N28W/42NE로 주불연속면 set 1의 방향과 일치한다(그림 9).

붕괴는 평면파괴로 엽리면을 따라 슬라이딩이 발생하였다. 붕괴된 활동면과 사면의 주향 방향은 20° 이내로 불리한 조건을 가지고 있으며 배면에는 임시도로가 형성되어 있다.

붕괴의 직접적인 원인은 점토질 탄질물이 협재된 불연속면을 따라 풍화가 가속되어 상부 암괴의 자중에 의해 절리면 전단강도가 약화되어 발생한 것으로 판단된다. 특히 붕괴시기는 2001년 12월 10일을 전후로 하여 발생하였는데 이때의 최저온도 변화는 약 8.5℃(-2.0℃ ~ 6.5℃)로 3일전에 내린 8mm의 강우가 지중에 침투하여 불연속면내의 점토질 탄질물내에

서 동결되었고 이후 갑작스런 온도의 상승으로 인한 해빙이 반복되면서 불연속면의 내부에 형성된 균열이 확장되면서 사면붕괴가 발생한 것으로 사료된다.

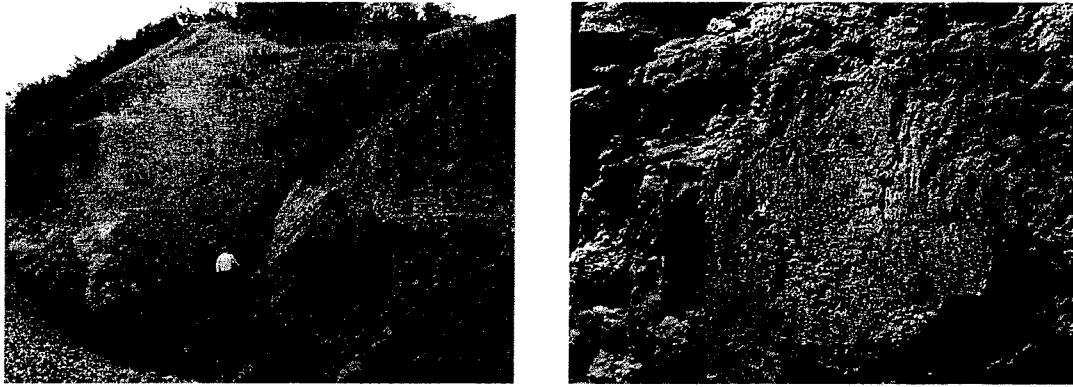


그림 9. 제1구간 활동부 전경(좌)과 단층조선(우)

#### 4.2. 제2구간

파괴활동은 주로 1:0.6로 절취된 발파암 부분과 일부 리핑암 구간에서 2002년 7월 우기 직후에 발생하였다. 기반암은 엽리가 발달한 안구상편마암으로 붕괴구간 인근에는 단층이 발달하며 암맥의 관입이 빈번하다. 단층과 관입 등의 지질작용으로 안구상편마암의 엽리방향은 교란되어 있으나 대체적으로 N20W/55NE 방향을 가진다(그림 10).

특히 엽리면을 따라 풍화가 내부 깊숙이 진행되어 있으며 수평적인 차별풍화 양상도 관찰된다. 주절리 방향은 N85W/60SW 방향으로 연장은 5.0m 이상으로 지표면까지 연속되고, 틈새는 10mm~20mm 이상으로 벌어져 엽리면과 교차하며 강우에 의해 사면내로 지표수가 많이 침투되고 있으며 절취면으로 하향하는 지형적인 특징으로 지하수의 흐름이 지속되고 있다.

붕괴의 원인은 엽리면에 의한 차별풍화와 주절리군이 교차하여 암질이 불량해 졌으며 집중강우에 의한 지표수 침투가 활동을 가속화 시킨 것으로 판단된다. 또한 붕괴구간 인근에도 인장균열이 관찰되고 있어 추가적인 활동 가능성이 예상되고 있다.

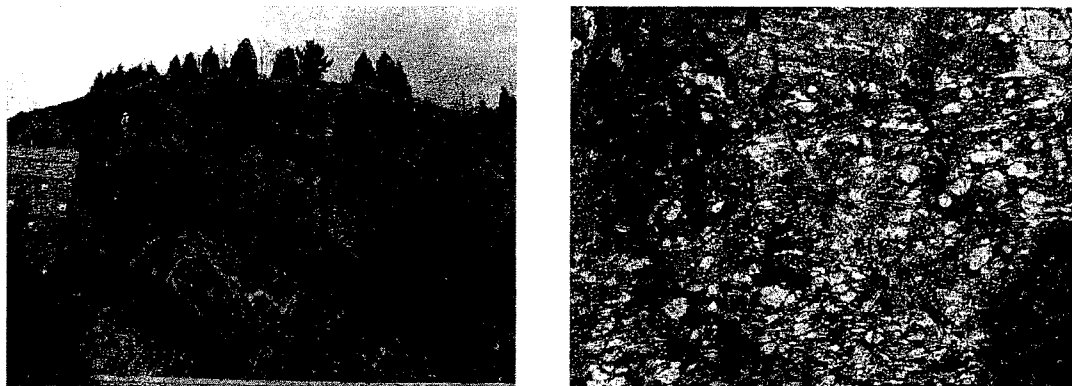


그림 10. 제2구간 붕괴구간 전경(좌)과 안구상편마암의 엽리(우)

### 4.3. 제3구간

붕괴시기는 2002년 8월 이며 강우량 110mm/day 직후에 붕괴가 발생하였다. 기반암은 엽리가 발달한 흑운모편마암으로 화강암과의 경계부에 위치한다. 두 암체의 경계부는 심하게 풍화되거나 파쇄되어 있으며 편마암은 화강암체 내에 포획암으로 존재하기도 한다.

흑운모편마암은 심하게 풍화되어 황갈색을 띠는 실트질의 가는 모래로 구성되어 있으며 배면에는 폭 10cm의 인장균열이 분포하여 추가적인 붕괴의 위험을 안고 있다.

본 지역의 붕괴양상은 주 활동면인 엽리면의 방향이 N3W/45NE로 사면의 방향인 N60E와 많이 벗어나 있음에도 불구하고 엽리면을 따라 원호파괴 형태로 발생하였다. 흑운모편마암의 주구성광물인 흑운모는 풍화저항도가 상당히 낮아 대기에 노출시 쉽게 풍화되는 광물로 활동면에는 붉은색의 점토가 피복, 충전되어 있거나 일부구간에는 운모류가 밀집되어 분포하고 있다. 활동면이 노출된 구간에는 완전히 풍화된 산성암맥이 폭 1.0m의 두께로 절취면과 유사한 방향으로 엽리를 단절시키고 있으며 이들 불연속면에는 점토화가 진행 중인 사장석 등이 충전되어 있으며 지반내에 공극이 발달하고 있다(그림 11).

활동면은 엽리를 따라 발생하였으며 이러한 엽리 방향으로 풍화가 가속되고 후기에 관입한 산성암맥의 광물성분(사장석) 등이 유입된 지표수 및 지하수에 의해 용해되거나 유동되어 지반내에 공극이나 틈을 형성시켜 이에 따른 절리면의 전단강도가 감소가 사면붕괴와 연결된 것으로 사료된다.

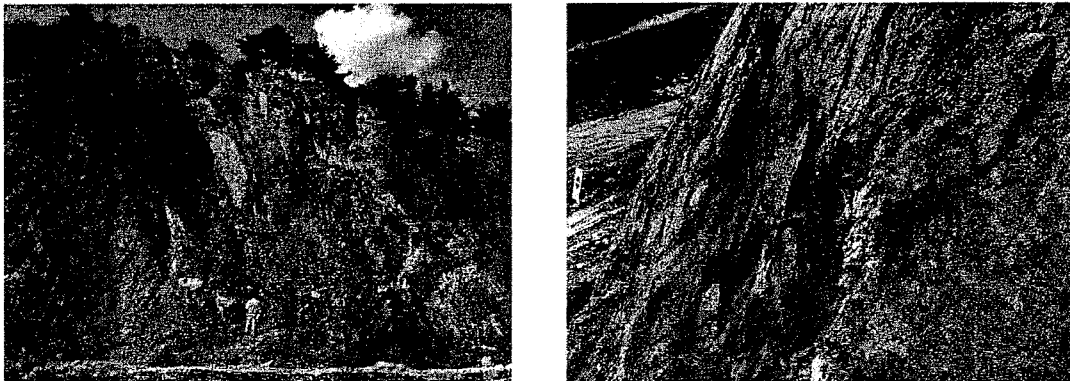


그림 11. 제3구간 붕괴구간 전경(좌)과 활동면(우)

## 5. 결론

엽리와 같은 이방성 지질구조를 가지는 편마암사면에서의 활동파괴의 원인을 파악하기 위하여 기상자료 수집, 시료채취, 지표지질조사, 시추조사, 불연속면 강도시험 등의 현장조사와 풍화에 대한 암반사면의 영향성을 검토하기 위하여 X-선 회절분석 및 X-선 형광분석 등의 실내시험을 병행하여 사면붕괴의 원인을 파악하였다.

1구간 붕괴의 직접적인 원인은 점토질 탄질물이 협재된 불연속면을 따라 풍화가 가속되었으며 이후 지표수가 침투하여 불연속면내에서 동결되었고 이후 갑작스런 온도의 상승으로 인한 해빙이 반복되면서 불연속면의 내부에 형성된 균열이 확장되면서 사면붕괴가 발생한

것으로 사료된다.

2구간 붕괴의 원인은 엽리면에 의한 차별풍화와 주절리군이 교차하여 암질이 불량해 졌으며 집중강우에 의한 지표수 침투가 파괴활동을 가속화 시킨 것으로 판단된다. 또한 붕괴 구간 인근에도 인장균열이 관찰되고 있어 추가적인 활동파괴의 위험성이 증가하고 있다.

3구간은 편마구조인 엽리를 따라 붕괴가 발생하였으며 이러한 엽리 방향으로 풍화가 가속되고 후기에 관입한 산성맥암의 광물성분(사장석) 등이 유입된 지표수에 의해 용해되거나 유동되어 지반내에 공극이나 틈을 형성시켜 이에 따른 절리면의 전단강도가 감소가 사면붕괴와 연결된 것으로 판단된다.

본 사례연구를 통하여 편마암과 같은 변성암이 분포하는 암반사면에서의 활동파괴에 대한 원인을 분석하였으며 이를 토대로 향후 이와 유사한 지질공학적 특성을 갖는 암반사면에서의 안정성 평가와 대책을 수립하는데 참고자료로 이용되기를 기대한다.

## 참고문헌

1. 이수곤, 1994. 암석과 불연속면의 분류 및 공학적 특성, 토목시공 도등기술강좌 (series III), 대한토목학회, PP.253~338.
2. 한국지반공학회, 1997. 지반공학 시리즈 5 사면안정.
3. 현대엔지니어링(주), 1998. 서수-군산간 도로확장 및 포장공사 토질조사 보고서.
4. (주)지우엔지니어링, 2000. 서수-군산간 도로확장 및 포장공사 지질조사 보고서.
5. Golder Assoc. Inc., Fracman-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation(version 2.603).
6. Priest, S.D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, First Edition, Chapman & Hall.
7. Terzaghi, R., 1965, Source of Error in Joint Surveys, Geotechnique, Vol. 15, 287-304.
8. Dearman, W.R., Baynes, F.J., and Irfan, T.Y., 1978, Engineering grading of weathered granite, Engineering Geology, Vol. 12, pp. 354-378.