

碩士學位論文

용두암 주변 해안지역의 암반에  
대한 강도 및 안정성 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

高 讚 炫

2 0 0 6

碩士學位論文

용두암 주변 해안지역의 암반에  
대한 강도 및 안정성 연구

指導教授 南正萬



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

高讚炫

2006

# 용두암 주변 해안지역의 암반에 대한 강도 및 안정성 연구

指導教授 南正萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 6月

 濟州大學校 産業大學院  
제주대학교 중앙도서관  
建設環境工學科 土木工學 專攻

高讚炫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2006年 6月

委員 長	印
委 長	印
委 長	印

# A Study on the Strength in Rock and the Stability at Yongduam Coastal Area

Chan-Hyon Ko

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Master of Engineering

2006. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Construction & Environmental Engineering  
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차 .....	i
List of Tables .....	iv
List of Figures .....	vi
Summary .....	viii
I. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구방법 .....	2
II. 기존이론 .....	3
2.1 일반 토사사면과 암반사면과의 차이점 .....	3
2.2 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 요소 .....	4
2.2.1 저항력을 감소시키는 요인 .....	4
2.2.2 전단응력을 증가시키는 요인 .....	7
2.3 암반사면의 파괴유형 .....	8
2.4 암반사면의 안정해석 방법 .....	12
2.4.1 SMR에 의한 사면의 암반평가 .....	12
2.4.2 평사투영에 의한 방법 .....	15
2.4.3 한계평형법에 의한 분석 .....	16
2.4.4 수치해석 .....	21
III. 불연속면 조사방법 .....	22
3.1 조사개요 .....	22
3.2 조사방법 .....	23
3.2.1 불연속면의 방향 .....	23

3.2.2 불연속면의 간격 .....	24
3.2.3 불연속면의 연속성 .....	25
3.2.4 불연속면의 거칠기 .....	26
3.2.5 불연속면의 강도 .....	27
3.2.6 불연속면의 틈새 .....	29
3.2.7 불연속면의 충전물질 .....	30
3.2.8 불연속면의 투수 .....	31
3.2.9 불연속면의 방향수 .....	32
3.2.10 암피의 크기 .....	33
IV. 현장조사 .....	34
4.1 조사위치 및 현황 .....	34
4.2 지형·지질조사 .....	35
4.2.1 지형특성 .....	35
4.2.2 지질특성 .....	36
4.3 불연속면 특성조사 .....	39
4.3.1 불연속면의 방향성 .....	39
4.3.2 불연속면의 거칠기 .....	40
4.3.3 불연속면의 강도 .....	41
4.4 지반정수 선정 .....	46
4.4.1 비탈면의 강도정수 산정 .....	46
4.4.2 강도정수 산정결과 .....	50
4.5 불연속면의 현장조사 결과 .....	51
4.5.1 용두암 구간 조사결과 .....	51
4.5.2 1 구간 조사결과 .....	55
4.5.3 2 구간 조사결과 .....	57
4.5.4 3 구간 조사결과 .....	59

V. 암반사면의 안정성 해석 .....	61
5.1 현장조사에 의한 안정성 분석결과 .....	61
5.1.1 용두암 구간 안정성 분석 .....	62
5.1.2 1 구간 안정성 분석 .....	63
5.1.3 2 구간 안정성 분석 .....	64
5.1.4 3 구간 안정성 분석 .....	65
5.2 비탈면 안정대책공법 검토 .....	66
5.2.1 비탈면 안정대책공법 개요 .....	66
5.2.2 비탈면 보수·보강공법 선정 .....	67
5.2.3 비탈면 보강공법 적용 검토 .....	71
VI. 결  론 .....	73
VII. 참고문헌 .....	75



## List of Tables

Table 2.1	Adjustment rating of joints(Romana, 1993) .....	13
Table 2.2	Tentative description of SMR classes(Romana, 1993) .....	14
Table 3.1	Joint and fracture spacing .....	24
Table 3.2	Persistence .....	25
Table 3.3	Description of weathering .....	28
Table 3.4	Manual index test .....	28
Table 3.5	Aperture .....	29
Table 3.6	Seepage from discontinuities .....	31
Table 4.1	Dimension of investigated area .....	34
Table 4.2	Measured dip and dip-direction of slope with clinometer .....	39
Table 4.3	Roughness profiles and measured JRC values .....	40
Table 4.4	Conversion table of uniaxial compression strength .....	42
Table 4.5	Result of schmidt hammer test .....	43
Table 4.6	Classification of rock masses .....	43
Table 4.7	Result of uniaxial compression test .....	45
Table 4.8	Approximate values for the basic friction angle for different rocks .....	47
Table 4.9	Typical rock properties(Hoek and Bray) .....	48
Table 4.10	Shear strength of filled discontinuities .....	49
Table 4.11	Cohesion and friction angle estimated by each method .....	50
Table 4.12	Result of inspection in-situ rock mass in Yongduam .....	51
Table 4.13	Result of inspection in-situ rock mass in 1 zone .....	55
Table 4.14	Result of inspection in-situ rock mass in 2 zone .....	57
Table 4.15	Result of inspection in-situ rock mass in 3 zone .....	59
Table 5.1	Result of stereographic projection analysis in Yongduam .....	62
Table 5.2	Result of stereographic projection analysis in 1 zone .....	63

Table 5.3	Result of stereographic projection analysis in 2 zone .....	64
Table 5.4	Result of stereographic projection analysis in 3 zone .....	65
Table 5.5	Slope stabilization methods, summary and application .....	69
Table 5.6	Classification of soil slope stabilization methods .....	70
Table 5.7	Classification of rock slope stabilization methods .....	70



## List of Figures

Fig. 2.1	Four type of rock slope failure .....	8
Fig. 2.2	Conditions of plane failure .....	9
Fig. 2.3	Wedge failure geometry .....	10
Fig. 2.4	Toppling failure .....	11
Fig. 2.5	Main types of slope failure and stereoplots of structural conditions likely to give rise to these failures .....	15
Fig. 2.6	Geometry of slope with tension crack .....	16
Fig. 2.7	Wedge failure geometry .....	17
Fig. 2.8	View at right angles to line of intersection .....	18
Fig. 2.9	View along line of intersection .....	18
Fig. 3.1	Orientation of discontinuity .....	23
Fig. 3.2	Roughness and waviness .....	26
Fig. 4.1	Location map of investigated area .....	34
Fig. 4.2	Process which clinker is formed from aa lava .....	37
Fig. 4.3	Sectional diagram of aa lava flows .....	37
Fig. 4.4	Photograph of volcanic bomb in clinker .....	38
Fig. 4.5	JRC profile(after Barton & Choubey, 1977) .....	40
Fig. 4.6	Specimen before uniaxial compression test .....	44
Fig. 4.7	Specimen after uniaxial compression test .....	44
Fig. 4.8	Photograph of foreground in the right side, Yongduam .....	52
Fig. 4.9	Photograph of foreground in the left side, Yongduam .....	52
Fig. 4.10	Photograph of joint of the Yongduam rock .....	53
Fig. 4.11	Photograph of scoria layer weathering by seawater .....	53
Fig. 4.12	Photograph of weathering to the Yongduam rock center scoria layer ..	54
Fig. 4.13	Photograph of stratified structure to the direction flows .....	54

Fig. 4.14 Photograph of foreground in 1 zone .....	55
Fig. 4.15 Photograph of overhang and rock slope .....	56
Fig. 4.16 Photograph of overhang by irregular weathering .....	56
Fig. 4.17 Photograph of foreground in 2 zone .....	57
Fig. 4.18 Photograph of foreground in the right side, 2 zone .....	58
Fig. 4.19 Photograph of scoria layer of the lower part of slope in 2 zone .....	58
Fig. 4.20 Photograph of foreground in 3 zone .....	59
Fig. 4.21 Photograph of cavity by scoria layer weathering .....	60
Fig. 4.22 Photograph of the ceiling of cavity in 3 zone .....	60
Fig. 5.1 Classification of slope stabilization methods .....	66



## Summary

Yongduam is a rock formation on the shape of a dragon's head. The shape was formed when lava become solid while lava flowing out of a volcano two million years ago. The rock with 10m in height and 30m in length is a local natural culture property. And its academic value in geology is highly recognized.

But, this Yongduam are greatly threatened in stability from a lot of irregular joints, and weathering by breeze and seawater. And the coast near Yongduam is considered to have stability problems concerning falling rocks and collapse caused by weathering, disturbance, and loosening of the slope surface. Especially mass transportation and engineering work at nearby facilities are increasing the upper load, which results in instability.

Considering these facts, it is important to conduct a research on the safety of the slopes to prevent personal and economic losses that might result from slope collapse.

Therefore this research analyzes the strength parameter by employing the Schmidt hammer experiment to test the strength of intact rocks, which compose the rock mass. Also, the orientation, roughness, persistence, aperture, filling, and mechanical property of the discontinuity developed within the rock mass will be analyzed. Finally, the stability of the slope was determined by predicting the shape of the slope collapse using the stereographic projection, a stability analysis method of jointed rock slope.

# I. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

제주도는 1950미터 높이를 갖는 커다란 샷갓 모양을 하고 있는 섬으로 신생대 제 3기말에서 제4기초에 걸쳐 수십차례의 화산활동에 의해 만들어졌다. 360여 개의 오름도 이때의 화산활동에 의해 만들어진 것이다. 이러한 화산활동에 의해 만들어진 자연물은 하나같이 아름답고 각기 다른 특색을 가지고 있어 제주도에 찾는 관광객들이 날로 늘어가고 있다. 현재 제주도를 찾는 관광객수는 연평균 4백만명을 넘고 있으며 그 수입도 또한 1조5천억원을 넘고 있다.

특히나 공항에서 가까운 용두암은 관광객이 제일 먼저 찾는 곳으로 관광객이 하루도 끊이지 않는다. 용암 분출 당시 지금의 모습으로 굳어진 용두암은 거대한 기암형석으로 보는 시각과 위치에 따라 새로운 멋을 전해준다.

그러나 이러한 용두암이 현재 많은 불규칙한 절리들과 염분이 포함된 해풍과 해수로 인한 풍화로 인해 안정성에 크게 위협받고 있다. 그리고 용두암 주변 해안지역도 역시나 비탈면의 풍화, 교란, 이완되어 낙석 및 붕괴 등에 대한 안정성에 문제가 있는 것으로 판단되고 있다. 더욱이 대형교통의 정체와 주위시설의 토목공사로 인한 상부하중의 증가로 안정성에 큰 영향을 미치고 있다.

이로 인해 제주에 찾는 관광객들의 안전에 문제가 되고 있어 이러한 사면들의 붕괴로 인한 인적 혹은 경제적 손실을 방지하기 위하여 사면의 안정성문제에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 암반을 구성하고 있는 암석의 강도를 Schmidt hammer 시험을 통해 측정하여 지반강도정수를 산출하고 암반내 발달된 불연속면의 방향성, 거칠기, 연장성, 틈새, 충전물 및 역학적 특성을 조사하여 절리성 암반사면의 안정해석 방법인 평사투영법으로 사면붕괴형태를 예측하여 안정여부를 판단하였다.

## 1.2 연구방법

본 연구는 용두암뿐만 아니라 그 주변 해안지역도 포함하여 연구지역으로 선택하였다. 그리고 보다 정밀한 조사를 위해 용두암 및 주변지역을 4구간으로 나누어 조사하였다.

현장조사는 자연비탈면 중 위험한 것으로 판단되는 구간을 중심으로 실시하였으며, 기반암의 특성을 파악하기 위하여 기존문헌의 자료와 지형적 특징을 분석하고 이를 토대로 야외에서 발견되는 암상의 특징을 기록하였으며 단층 및 습곡, 불연속면의 특징(절리, 엽리, 층리 등)을 상세히 검토하였다. 불연속면에 대한 조사는 클리노미터를 통한 불연속면의 주향 및 경사측정, 절리간격 및 연장성 측정 등을 실시하였다.

불연속면의 안정성 여부를 파악하기 위해 불연속면의 방향성, 간격, 간극, 거칠기, 연속성, 충전물, 누수, 불연속면군의 수, 암괴의 크기 및 모양 등을 1978년 ISRM에서 제안한 기재사항을 기준으로 분류하였다.

본 연구구간 일대에 대한 지표지질조사 및 현장시험을 수행하여 지반공학적 특성을 파악한 후 비탈면의 원지반 특성에 부합되는 적절한 해석방법을 선정, 적용하여 최적 비탈면경사 및 보강공법을 결정하였다. 본 연구구간에서 토사사면이 차지하는 비중이 극히 일부로서 암반비탈면에 대해서만 검토하였으며 DIPS 프로그램을 이용하여 평사투영법으로 파괴가능성을 판단하고 안정성을 평가하였다.

## II. 기존이론

### 2.1 일반 토사사면과 암반사면과의 차이점

암반사면의 붕괴는 암반 내에 발달한 불연속면(단층, 절리 등)과 사면 구성물질의 공학적 특성(점착력, 내부마찰각), 지하수 유동 및 분포상태, 지표수 유입 가능성 여부 등의 요인들에 의해 발생한다. 따라서 사면붕괴가 발생한 지역에 대한 붕괴형태와 발생 원인을 파악하고 사면해석을 위한 기본 자료들을 수집하여 사면의 붕괴형태를 모델링 하여 안정성을 평가한 후 이에 따른 보강대책을 수립하게 된다.

암반은 불연속면을 포함하는 불연속체 매질이므로 암반의 물리적, 역학적인 특성은 불연속면의 방향성, 간격, 연장성 등의 기하학적인 형상과 풍화도 및 지하수의 영향에 의해 달라질 수 있다. 그러므로 암반사면의 거동은 토사사면과 달리 불연속면의 역학적인 특징에 지배를 받으므로 불연속면의 방향성과 변형과괴 거동을 중요하게 고려해야 한다.

암반사면의 안정성 해석은 다음과 같은 점에서 토사사면의 해석과 다르다.

#### 1) 파괴형태의 다양성 및 복잡성

암반사면의 파괴형태는 원호파괴 외에도 평면파괴, 쉼기파괴, 토폴링파괴 등 그 형태가 다양하고 복잡하여 이를 정확하게 모델링하는 것이 어렵다.

#### 2) 불연속면의 존재

암반 내에는 절리로 대표되는 불연속면이 존재하고, 이 불연속면들이 사면의 안정성에 대단히 큰 영향을 미친다. 문제는 이러한 절리들에 관한 입력자료들(암반 내 절리의 분포상태, 절리면의 강도 등)의 결정이 어렵다는 것이다.

## 2.2 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 요소

### 2.2.1 저항력을 감소시키는 요인

#### 1) 불연속면의 존재(Presence of Discontinuity)

불연속면은 암석사면의 안정성 해석에서 가장 중요한 인자인데, 그 종류도 다양하고, 정확하게 측정, 파악하기도 쉽지가 않아 사면 안정해석에 어려움을 주고 있다. 불연속면의 종류는 다음과 같다.

- 절리(joint) : 응력 변화에 의해 생긴 암반내의 균열 중 상대변위가 없는 불연속면
- 단층(fault) : 그 면을 따라서 상대변위가 발생했다고 인정되는 불연속면
- 파쇄대(fracture zone) : 띠 모양의 불연속면으로 지중응력의 작용에 의해 암반중의 일부 파괴된 구간
- 열극(fissure) : 절리보다는 규모가 작은 개구성 균열
- 층리면(bedding plane) : 퇴적암의 성층작용 시 형성된 각기 다른 층간의 경계면
- 편리(schistosity) : 변성암인 편암에서 나타나는 평행하고 조밀한 선구조
- 엽리(lamination, foliation) : 퇴적암에서 조밀한 평행 선구조(lamination)나 편마암에서의 띠모양의 선구조

불연속면 중에서 가장 대표적인 것은 절리로서, 사면 안정해석을 성공적으로 수행하기 위해서는 대상 암반 내에 존재하는 절리들에 관한 정확한 자료들을 수집하는 것이 필수적이다. 암반내의 절리들을 정확하게 설명하기 위해서는 다음과 같은 자료들을 수집해야 한다.

- 절리군의 수(number of joint set) : 암반내의 절리들은 크게 같은 방향성을 갖는 것과 산만(random)하게 분포되어있는 것으로 분류할 수 있는데, 같은 방향성을 갖는 절리들을 하나의 절리군으로 취급하며, 이러한 절리군의 수가 몇인지를 파악하는 것이 중요하다.
- 절리면의 방향성(orientation)

- 절리간격(joint spacing) : 같은 방향성을 갖는 절리군의 절리들의 서로 떨어져 있는 간격으로, 몇 cm에서 몇 m에 이르기까지 다양하게 나타난다. 이 절리간격은 대상 굴착면의 크기와 관련해서 그 상대적인 중요성이 부각되게 된다. 즉, 절리간격이 넓은 경우에는 상당히 큰 굴착사면이 아니면 절리간격에 의해 영향을 받지 않게 된다.
- 절리면의 거칠기(joint roughness) : 절리면의 거칠기는 절리면의 전단강도에 가장 크게 영향을 미치는 요소로서, 그 면이 평면상의 매끄러운 상태에서 상당히 큰 굴곡을 갖는 아주 거칠은 상태에 이르기까지 다양하다. 사면 안정의 관점에서는 큰 굴곡을 갖는 거친 절리면이 상대적으로 유리하기 때문에, 절리면의 거칠은 정도를 정확하게 결정하는 것은 상당히 중요하다.
- 절리면의 풍화(weathering) : 절리면의 상태를 표시하는 인자중의 하나로 풍화의 정도를 나타내어야 한다. 절리면이 풍화가 되면, 표면에 약한 물질이 코팅되거나 충전되고, 급기야는 절리면의 강도를 저하시키는 요인이 된다.
- 충전 물질(filling material) : 절리면 사이에 충전된 물질은 사면의 파괴 시에 상대적으로 낮은 전단강도로 인해 파괴면이 될 가능성이 대단히 높기 때문에 지반조사 시 이러한 충전물질을 포함하는 절리면의 유무를 파악하는 것은 대단히 중요하다.

## 2) 풍화(Weathering)

암석의 풍화란 토양으로 변해가는 물리/화학적 변화의 과정을 일컫는 말로써 암석이 생성당시의 환경이 변해짐에 따라 불안정한 상태에서 안정한 상태로의 진행과정을 의미한다. 풍화작용은 크게 물리적, 화학적 및 생물학적 요인 등으로 구분된다. 암석이 이와 같은 풍화작용을 받으면 강도저하나 불연속면의 마찰저항력 등을 감소시킨다.

## 3) 수압(Water Pressure)

암반 내에 존재하는 물은 주로 절리나 파쇄대와 같이 개구성 불연속면에 분포하는 지하수에 작용하는 수압, 다공질의 퇴적암 등과 같은 암반에서는 암반 내 간극에 포함된 간극수에 미치는 간극수압 또는 인장균열과 같은 수직의 틈새에서 암괴의 측벽

에 가하는 수압을 유발하게 된다. 암석사면에 존재하는 물의 존재는 암석사면의 안정성에 다음과 같은 이유에서 큰 영향을 미치게 된다.

- 파괴시 파괴면에 작용하는 유효 연직응력을 감소시키고, 이는 파괴면을 따라 발생하는 전단강도를 저하시키게 된다.
- 암괴의 측벽에 전단력을 증가시킨다.
- 절리면 내에 충전되어 있는 지반재료의 강도를 현저하게 저하시킨다.



### 2.2.2 전단응력을 증가시키는 요인

#### 1) 상부사면의 하중증가

암석사면의 안정성을 저해하는 요인 중의 하나로는 상부 사면쪽에 구조물의 축조 등으로 인한 하중증가를 들 수 있다. 이러한 하중증가는 전단력의 증가로 나타나서 전도(overturhing)를 촉진시키게 된다.

#### 2) 사면굴착

사면안정성을 저해하는 또 하나의 요소는 사면의 일부 또는 전부를 굴착하는 것이다. 이러한 사면의 굴착은 전체사면의 경사를 급하게 만들어 전도 모멘트를 크게 하여 사면을 불안정하게 하는 요소가 된다.



### 2.3 암반사면의 파괴 유형

암석사면은 토사사면과 달리 그 파괴형태가 다양하여, 원호파괴는 물론 평면파괴, 썰기 파괴 그리고 전도파괴 등이 있다.

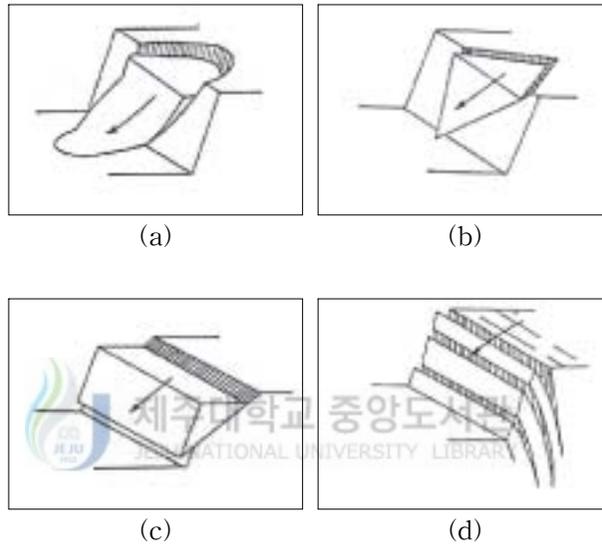


Fig. 2.1 Four type of rock slope failure

(a) Circular failure, (b) Wedge failure, (c) Planar failure, (d) Toppling failure

#### 1) 평면파괴(Planar Failure)

평면파괴는 층리면과 같은 지질학적 불연속면이 경사면과 동일한 주향을 가지고 마찰 각보다 더 큰 각도로 굴착면쪽으로 기울어져 있을 때 발생한다. 이러한 파괴 유형은 실제로 암반사면에서 드물게 나타나는데, 그 이유는 이러한 파괴유형을 일으키는 기하학적 조건이 만족되는 경우가 드물기 때문이다. 또한 평면파괴는 썰기파괴의 특수한 경우로 분류되기도 한다. 평면파괴가 발생하기 위해서는 Fig. 2.2에서와 같이 다음의 조건을 만족하여야한다.

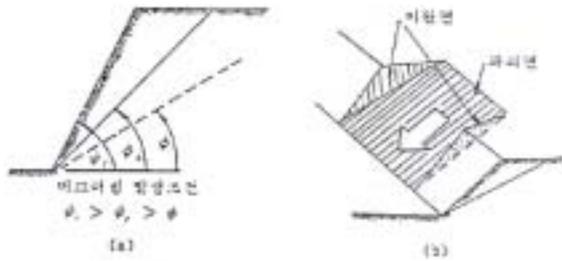


Fig. 2.2 Conditions of plane failure

- 평면파괴의 조건

- 미끄러지는 파괴면의 주향이 사면 경사면의 주향과 20도 내로 거의 평행한 방향성을 가진다.
- 파괴면이 경사면에 노출되어야 하므로 경사각이 사면의 경사각보다 작아야 한다.
- 파괴면의 경사각은 그 파괴면의 마찰각보다 더 커야한다.
- 미끄러짐에 대하여 저항력을 거의 갖지 못하는 이완면이 미끄러짐의 측면 경계부로서 암반 내에 존재하여야 한다.



2) 썩기파괴(Wedge Failure)

썩기파괴란 굴착방향으로 경사져 있는 두 불연속면의 교선이 사면 상부에 드러나 있을 때, 이 교선의 경사가 마찰각 보다 상당히 클 경우, 이들 불연속면 위에 놓여있는 썩기형 암반이 교선을 따라 아래로 미끄러져 내리는 형태를 일컫는다. 이 파괴는 썩기를 이루는 두 불연속면에 작용하는 수직력 뿐만 아니라 두 파괴면의 밀면적이 고려된 마찰력과 점착력, 그리고 수압과 기타 외력의 영향에 의존하므로 매우 복잡한 양상을 띤다. 미끄러짐의 기본역학관계를 설명하기 위하여 도시한 Fig. 2.3에서와 같이 간단하게 표현하면 미끄러짐의 조건은  $\psi_{f\phi} > \psi_{\phi} > \phi$ 로 규정된다.

여기서,  $\psi_{f\phi}$ : 두 불연속면에 대한 교선의 직각방향에서 바라보았을 때 측정할 수 있는 사면의 경사각이고,  $\psi_{\phi}$ : 교선의 경사각이며,  $\phi$ : 파괴면의 마찰각이다.

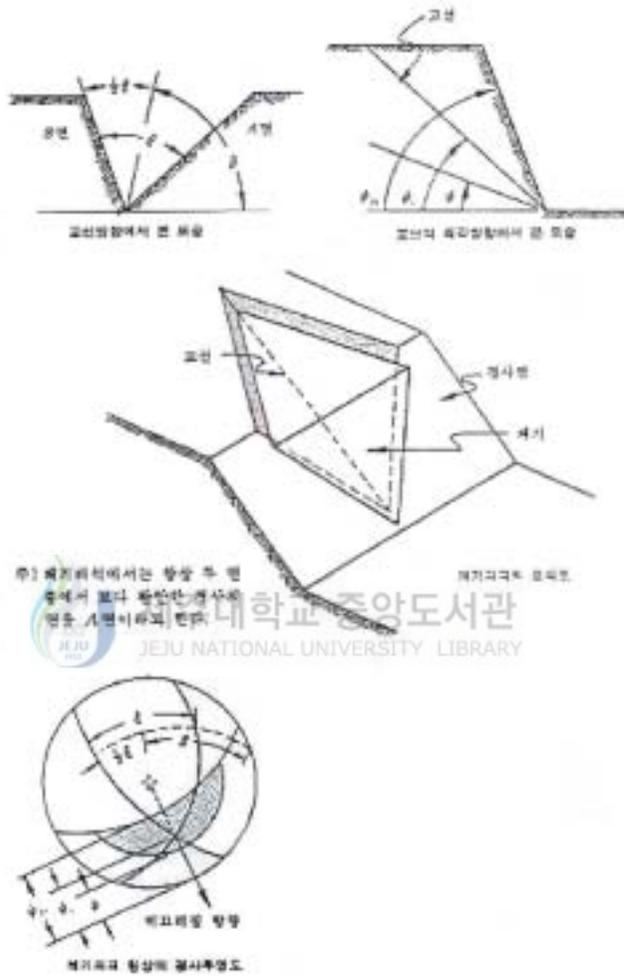


Fig. 2.3 Wedge failure geometry

### 3) 원호파괴(Circular Failure)

암반사면에서의 일반적인 파괴형태는 불연속면이라는 지질 요인에 좌우되는 것이 특징이나 마치 흙과 같이 암반의 구성입자들이 사면의 크기에 대해 극히 미소하고 서로 맞물려 있지 않은 조건하에서는 원호형태의 파괴가 발생된다. 즉, 암반의 불연속면이 여러 방향으로 매우 발달하여 구조적인 형태가 존재하지 않으나, 심하게 풍화가 진행된 암석사면의 경우에는 원호파괴가 일어날 수 있다.

#### - 원호파괴의 특성

- 사면을 구성하는 물질이 균질하고 등방적인 역학적 성질을 갖는 것이 일반적이다.
- 파괴는 사면의 하단을 통과하는 원호파괴면을 따라 일어나며, 수직 인장균열은 사면의 상부면이나 경사면에서 발생한다.

### 4) 전도파괴(Toppling Failure)

전도파괴는 암주나 암석 블록들이 고정된 어떤 기준점에 대해 회전하는 것을 수반하며, 전도되는 파괴유형이다. 1차적으로 미끄러짐 파괴 등에 의한 사면 하단부나 기반층의 2차전도파괴 혹은 하부층의 풍화로 인한 주상암반의 전도 혹은 점착력있는 재료에서의 인장균열로 인한 전도 등 2차적으로 발생하는 경우가 있다. 전도 파괴는 암주나 블록의 기하학적 유형에 따라 굴곡 전도파괴(flexural toppling), 블록 전도파괴(block toppling) 그리고 복합 전도파괴(block-flexural toppling)로 분류된다.

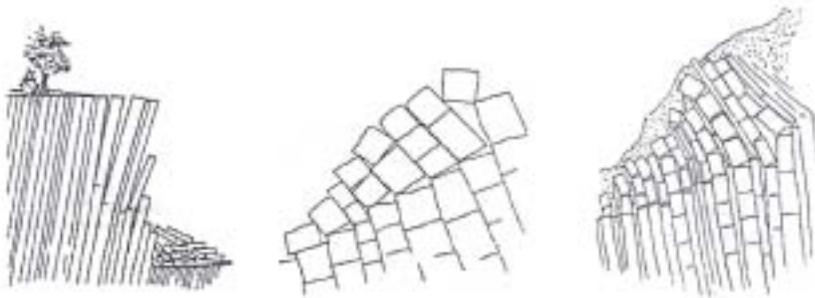


Fig. 2.4 Toppling failure

## 2.4 암반사면의 안정해석 방법

### 2.4.1 SMR에 의한 사면의 암반평가

#### 1) 개 요

- SMR(Slope Mass Rating)에 의한 암반분류법은 일반 암반의 평가법인 RMR(Rock Mass)을 근거로 하여 사면에 대한 요소들을 보정하는 방법으로 Romana(1985)에 의해 제시됨.
- RMR(Rock Mass Rating)에 의한 암반분류법은 사면에 적용하기가 곤란하며, 주로 터널에서 지보의 적합성을 평가하는 암반분류법임.

#### 2) SMR 암반분류법에서 고려되는 요소

- 암반의 일반적인 특성(RMR과 동일)

암석의 강도(15), RQD 값(15), 불연속면의 간격(20), 불연속면의 상태(30), 지하수 상태(20)

- 사면과 불연속면의 주향방향의 차이
- 사면의 경사방향과 불연속면의 경사각의 차이
- 불연속면의 경사
- 사면의 채굴방법

#### 3) 불연속면 및 사면과 관련된 보정요소

F1 : 암반사면의 경사방향과 불연속면 경사방향과의 차이 각의 절대값

- 차이각이 30°이상일 때는 붕괴가능성이 희박한 것으로 본다. F1은 0.15에서 서로 평행한 경우인 1사이의 값을 가진다.

F2 : 평면파괴형태에서의 불연속면의 경사각과 관련된 요소

- 불연속면의 전단거동 가능성의 척도를 나타내며 이 값은 1.00(경사각이 45°보다 큰 경우)에서 0.15(경사각이 20°보다 작은 경우)사이 값을 가지며, 전도파괴에 대한 값을 1로 본다.

F3 : 사면과 불연속면의 경사각의 차이 값

- 평면과파괴에서는 사면에 daylight되는 불연속면 가능성과 관련되며, 사면과 불연속면이 평행할 때는 양호한 상태를 나타내며, 사면의 경사각이 불연속면의 경사각 보다 10°이상 클 때는 불안정한 상태가 된다.
- 전도파괴의 경우는 전도의 성격상 불안정하거나 매우 불안정한 상태는 일어날 수 없으며 또한 갑작스런 전도파괴도 극히 드물고 전도된 사면도 그대로 유지되는 경우가 많다.

Table 2.1 Adjustment rating of joints(Romana, 1993)

		very favorable	favorable	fair	unfavorable	very unfavorable
P	$ a_j - a_s $	$>30^\circ$	$30 \sim 20^\circ$	$20 \sim 10^\circ$	$10 \sim 5^\circ$	$<5^\circ$
T	$ a_j - a_s - 180^\circ $					
P/T	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_i $	$<20^\circ$	$20 \sim 30^\circ$	$30 \sim 35^\circ$	$35 \sim 45^\circ$	$>45^\circ$
P	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_i - \beta_s$	$>10^\circ$	$10 \sim 0^\circ$	$0^\circ$	$0 \sim -10^\circ$	$<-10^\circ$
T	$\beta_i + \beta_s$	$<110^\circ$	$110 \sim 120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

F4 : 사면의 굴착방법에 따라 변하는 보정요소

굴착방법	자연사면	Presplitting	Smooth Blasting	발파 및 기계굴착	과도한 발파
F4	15	10	8	0	-8

결과적으로 이러한 보정요소가 고려된 SMR의 값은 아래 식으로 구함.

$$SMR = RMR_{basic} + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Table 2.2 Tentative description of SMR classes(Romana, 1993)

등급	SMR	관정	안정성	예상파괴
I	81~100	매우 양호	매우 안정	-
II	61~80	양호	안정	약간의 블럭
III	41~60	보통	부분적 안정	일부 불연속면 다수의 썩기형파괴
IV	21~40	불량	불안정	평면파괴 큰 썩기형파괴
V	0~20	매우 불량	매우 불안정	대규모 평면파괴

## 2.4.2 평사투영에 의한 방법

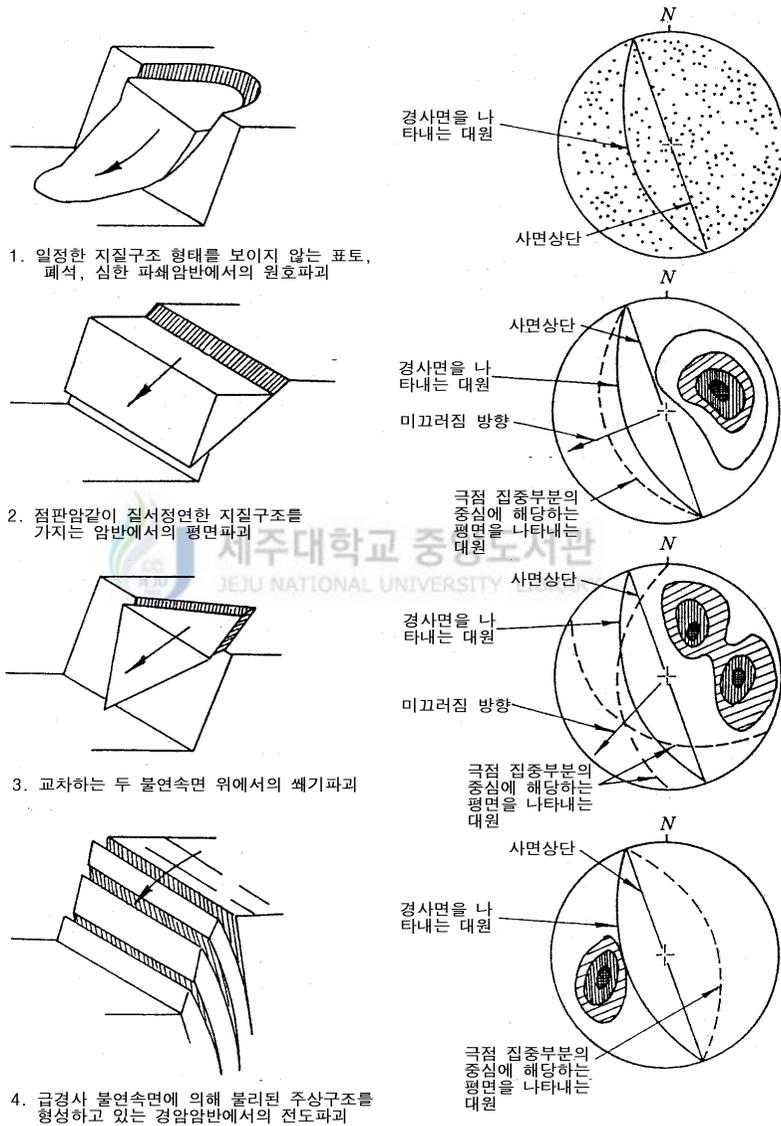


Fig. 2.5 Main types of slope failure and stereoplots of structural conditions likely to give rise to these failures

### 2.4.3 한계평형법에 의한 분석

#### 1) 평면파괴

- 사면의 기하학적 형상이 아래와 같다고 가정하였을 때 평면활동에 대한 안전율  $F_p$  는

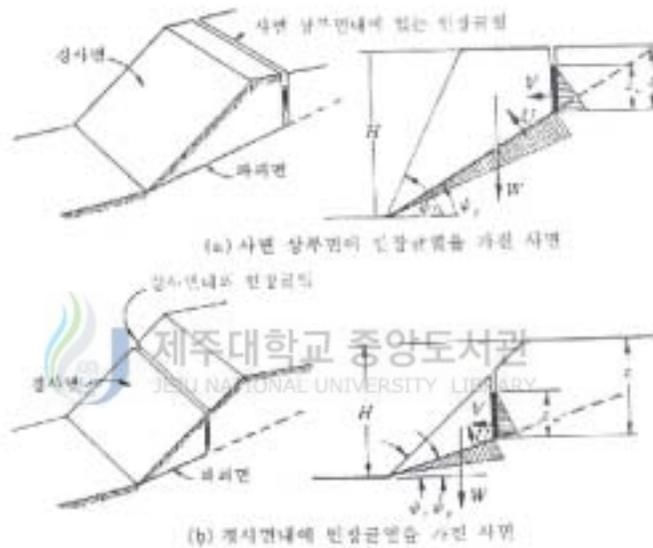


Fig. 2.6 Geometry of slope with tension crack

- 안전율

$$F_p = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p}$$

여기서

$$A = (H - z) \operatorname{cosec} \phi_p$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H - z) \operatorname{cosec} \phi_p$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$

사면 상부면에서의 인장균열(Fig. 2.6(a))에 대하여는

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \left( 1 - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right) \cot \psi_p - \cot \psi_f \right]$$

이고, 경사면내에서의 인장균열(Fig. 2.6(b))에 대해서는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \left( 1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \right]$$

- 건조사면(사면안전배수)

$$V, U = 0$$

$$F = \frac{cA}{W \sin \psi_p} + \cot \psi_p \tan \phi$$

- 인장균열 안에만 물이 있는 경우(인장균열 외에는 불투수성일 경우)

$$U = 0$$

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p}$$

- 인장균열 속과 미끄러짐면 위에 물이 있는 경우

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p}$$

2) 썩기 파괴

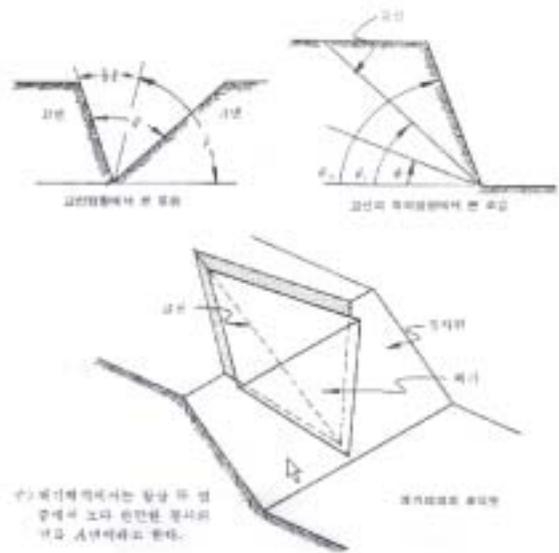


Fig. 2.7 Wedge failure geometry

- 썩기 파괴에 대한 해석

- 미끄러짐면이 단지 마찰에 의해서만 저항을 받고 두 면의 마찰각이 같다고 가정하면 안전율은 다음과 같다.

$$F = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \phi}$$

여기서,  $R_A, R_B$ 는 A, B면상의 수직반력임

$$R_A \sin \left( \beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \sin \left( \beta + \frac{1}{2} \xi \right)$$

$$R_A \sin \left( \beta - \frac{1}{2} \xi \right) - R_B \sin \left( \beta + \frac{1}{2} \xi \right) = W \cos \phi$$

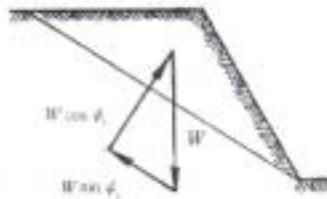


Fig. 2.8 View at right angles to line

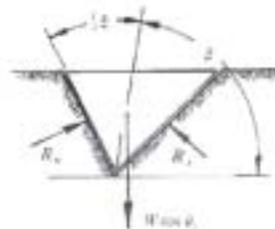


Fig. 2.9 View along line of

of intersection

intersection

$R_A, R_B$ 를 구해서 더하면,

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \phi \sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi}$$

이 식을 위 식에 대입하여 전개하면 다음과 같다.

$$F = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \phi}$$

또 이식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_w = K F_p$$

여기서  $F_w$ 는 마찰력에 의해서만 지지되는 썰기의 안전율이고,  $F_p$ 는 사면의 경사가 이고 파괴면의 경사가  $\phi$ 일 때의 평면파괴에 대한 안전율이다.  $K$ 는 썰기계수(wedge factor)라고 하는데 이것은 위 식에서 보는 바와 같이 썰기의 사잇각( $\xi$ )과 경사각( $\beta$ )에 의해 좌우된다.

### 3) 원호파괴

흙의 경우 어떤 우세한 지질구조가 존재하지 않으며, 파괴면은 최소저항선을 따라 사면 전체를 통해 자유롭게 나타날 수 있다. 흙사면의 파괴양상을 관찰해 보면 일반적으로 원형의 파괴면을 형성함을 알 수 있고 대부분의 사면안정이론은 이러한 결과에 근거를 두고 있다. 균열과 풍화가 심한 파쇄암석들로 구성된 사면의 거동도 흙사면과 유사한 거동을 보이며 파괴면도 원형을 이루고 있다. 따라서 이러한 사면의 안정해석을 토질역학적 접근방식으로 해석이 가능하다.

원호파괴가 발생하는 사면의 안전율 계산을 위해 원호파괴도표를 사용할 경우 다음과 같은 가정이 필요하다.

- ① 사면을 구성하는 지반은 균질하다고 가정한다.
- ② 재료의 전단강도는  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  관계식에 의하여 점착력  $c$ 와  $\phi$ 로부터 결정된다.

- ③ 파괴는 사면의 하단을 통과하는 원호파괴면을 따라 일어난다고 가정한다.
- ④ 수직인장균열은 사면의 상부면이나 경사면에서 발생한다고 가정한다.
- ⑤ 인장균열과 파괴면은 주어진 사면의 기하학적 형상과 지하수 조건에 대해 사면의 안전율이 최소가 되는 곳에 위치한다.
- ⑥ 해석에 있어서 지하수 조건은 건조사면으로부터 완전 포화사면에 이르는 범위에 대해 고려한다.

이러한 조건들 하에서 사면의 안전율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F = \frac{\text{슬라이딩에 저항하는 유효전단강도}}{\text{파괴면을 따라 작용하는 전단응력}}$$

#### 4) 전도파괴

전도파괴의 안전율은 암반층에 작용하고 있다고 생각되는 마찰각의 기울기 ( $\tan \phi_{available}$ )를 지지력 T가 주어질 경우 평형상태를 유지하는데 필요한 마찰각의 기울기 ( $\tan \phi_{required}$ )로 나눈 값으로 정의된다.

$$F = \frac{\tan \phi_{available}}{\tan \phi_{required}}$$

#### 2.4.4 수치해석

한계평형해석에서 구한 안전율은 사면의 안정성을 정량적으로 표현할 수 있다는 장점은 있으나 안전율 계산시 암석의 인장강도와 탄성계수와 같은 중요한 역학적 변수가 고려되지 않는다는 결함이 있다. 또한 한계평형해석만으로는 사면내부에서 발생할 수 있는 국부적인 파괴현상이나 사면의 변위거동을 파악할 수 가 없다. 따라서 이러한 한계평형 해석의 단점을 보완하고 사면의 전반적인 역학적 거동을 파악하여 안정성을 최종적으로 확인하기 위해서는 수치해석이 필요하다.



### Ⅲ. 불연속면 조사방법

#### 3.1 조사개요

본 조사는 지질도(1:50,000)와 지형도(1:50,000)를 이용하여 조사지역에 대한 암상, 층서, 미고결 퇴적물의 분포상태, 예상되는 지질연약대(단층, 선구조) 및 지질구조를 파악하고 절취사면을 대상으로 암석의 종류, 주절리 등과 같은 불연속면의 발달상태(절리방향, 절리간격, 절리의 연속성, 거칠기, 절리강도, 충전물, 절리틈새, 암괴의 크기) 및 풍화정도(기계적, 화학적 풍화) 등을 파악하였다.

지표지질조사 중 용두암 및 해안 절벽 내에서 측정된 주 불연속면의 방향성과 인장절리 및 전단절리군의 방향성에 대한 지질구조의 결과는 비탈면의 방향과 경사에 따른 비탈면 안정 검토에 활용하였으며 조사방법은 다음과 같다.

본 사면의 지표지질조사는 지형도(1:50,000), 지질도(1:50,000), 지질해머, Brunton Compass, 줄자, 야장 등을 사용하여 시행하였으며 절리의 경사방향(Orientation), 경사각, 간격(Spacing), 연속성(Persistence), 거칠기(Roughness), 강도(Strength), 틈새간격(Aperture), 충전물질(Filling), 지하수 용출상태, 절리군의 수, 풍화상태 및 암괴의 크기 등을 관찰하였다.

## 3.2 조사방법

### 3.2.1 불연속면의 방향

수평으로 퇴적된 지층이 지각의 변동으로 지층이 경사지게 되었을 때 그 성층면이 기울어진 형태를 나타내기 위해서 주향과 경사로 표시한다. 주향은 성층면과 수평면의 교선방향을 말하며, 이 방향은 북을 기준으로 하여 나타낸다. 경사는 성층면이 주향선과 직각을 이루는 각이 최대인 각을 나타낸다. 주향과 경사의 측정은 주로 Clinometer 및 Clinocompas를 사용한다.

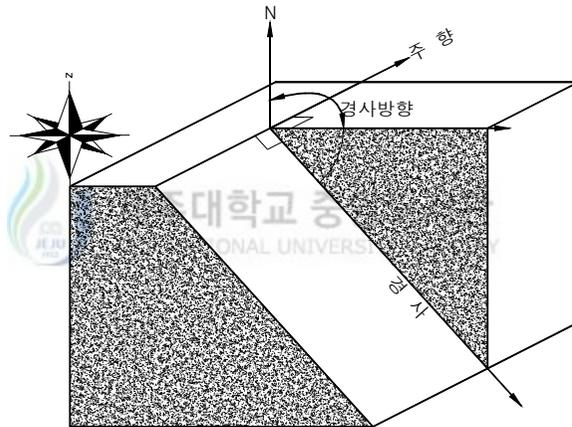


Fig. 3.1 Orientation of discontinuity

### 3.2.2 불연속면의 간격

불연속면 간격은 불연속면간의 수직거리이고 일반적으로 불연속면의 각 종류에 따라서 각각의 평균 수직간격을 측정한다. 절리의 간격은 암반을 구성하고 있는 암피의 크기를 결정하고 암반의 공학적인 성질(암반굴착의 난이도, 파쇄특징, 투수율 등)에 영향을 준다. 굴착시 암반의 파괴와 변형은 굴착크기에 대한 절리발달 간격의 비율이 중요한 요소이다. 절리의 간격을 측정하는 방법은 야외에서 각각의 불연속면 SET에 대해서 평균적인 불연속면 간의 거리를 구하는 방법과 직접 불연속면을 썰 수 없는 경우 시추코어로서 추정한다.

Table 3.1 Joint and fracture spacing

Description	Spacing(cm)	Grade
Extremely close spacing	$\leq 2$	V
Very close spacing	2 - 6	IV
Close spacing	6 - 20	III
Moderate spacing	20 - 60	II
Wide spacing	60 - 200	I
Very wide spacing	200 - 600	
Extremely wide spacing	> 600	

### 3.2.3 불연속면의 연속성

꺾기면에서 불연속면의 크기 또는 불연속면이 연장되는 정도이고 이는 암반의 공학적인 성질을 지배하는 중요한 요소이다. 불연속면의 연속성은 노두의 크기 때문에 현장에서 조사하는데 곤란한 경우가 있다. 암반 비탈면과 댐 비탈면의 안정성 검토시에는 불안정한 것으로 고려되는 불연속면의 연속성 정도를 추정하는 것이 매우 중요하다.

Table 3.2 Persistence

Description	Model Trace Length(m)
Very low persistence	< 1
Low persistence	1 - 3
Medium persistence	3 - 10
High persistence	10 - 20
Very high persistence	> 20

### 3.2.4 불연속면의 거칠기

불연속면의 거칠기는 평균 평면에 대한 불연속면에 나타나는 작은 규모의 요철(Unevenness)과 큰 규모의 만곡(Waviness)으로 정의한다. 실제에 있어서 만곡은 전단면위의 초기방향에 영향을 주는 반면에 요철은 일반적으로 중간 규모의 현지 직접 전단 강도시험이나 실험실 시험에서 구해질 전단강도에 영향을 준다. 이 요철과 만곡은 절리면의 전단강도에 영향을 주기 때문에 불연속면의 전단강도를 추정하는데 반드시 필요하고 특히 불연속면의 충전물질이 없는 경우에는 정확한 추정이 가능하며 현장에서는 Profile Gauge 등을 이용하여 측정한다.

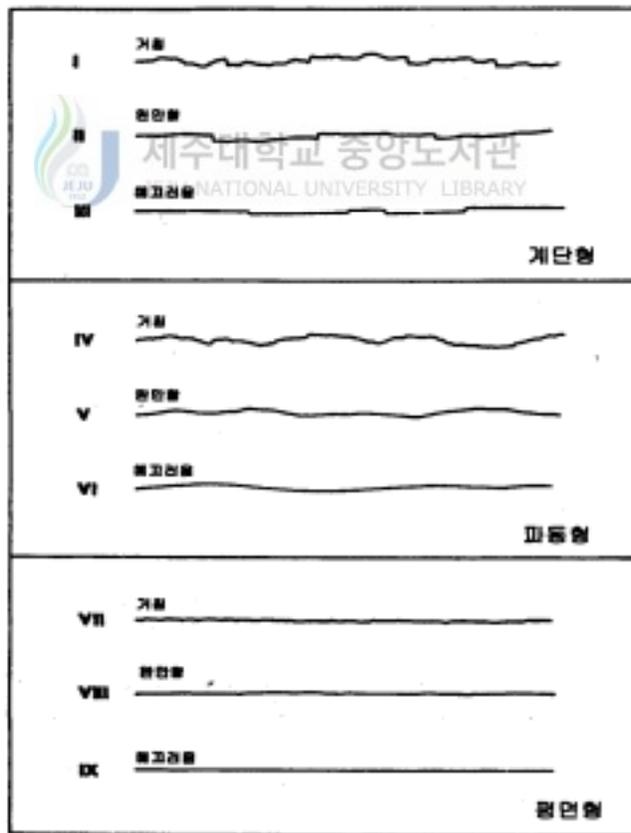


Fig. 3.2 Roughness and waviness

### 3.2.5 불연속면의 강도

불연속면 부근에 있는 암석의 일축압축강도로서 정의하며 불연속면의 강도는 불연속면 부근에서 종종 발달하는 풍화와 열수 변질에 의해서 암괴의 내부에 위치하는 암석의 강도보다도 낮은 경우가 있다. 불연속면이 거의 벌어지지 않고 그 불연속면 사이에 충전물질이 없는 경우에 이 불연속면의 일축압축강도는 전단강도에 중요한 영향을 미친다.

전단강도와 변형도에 영향을 주는 상대적으로 얇은 불연속면은 간단한 index 시험을 통해서 시험이 이루어진다. 대략적인 일축압축강도는 Schmidt hammer 시험이나 굽기 그리고 지질햄머시험 등으로 추정될 수 있다.

피복된 광물도 만약에 불연속면이 평면이거나 매끈한 경우 피복된 정도에 따라 불연속면의 전단강도에 영향을 줄 수 있다.

암석이나 암반이나 암석구성물질의 풍화정도는 불연속면의 강도를 서술적으로 표시할 뿐이고, Manual index test나 Schmidt hammer로써 정량적으로 구할 수 있다. 측정장비는 지질해머, 강한 칼, Schmidt hammer와 환산표 등이 있다.

Table 3.3 Description of weathering

등 급	용 어	정 의
I	신 선	암석의 구성물질이 풍화된 흔적이 없다. 주요 불연속면의 표면에 가벼운 변색이 있다.
II	약간풍화	변색은 암석과 불연속면 표면의 풍화를 나타낸다. 모든 암석구성물질이 풍화에 의해 변색되어 있거나 신선한 조건보다는 어느정도 약화되어 있을 수 있다.
III	보통풍화	암석구성물질의 반 이상이 토사로 분해되어 있다. 신선하거나 변색된 암석은 연속적인 하부구조나 corestone으로서 나타난다.
IV	심한풍화	암석구성물질의 반 이상이 토사로 분해되어 있다. 신선하거나 변색된 암석은 연속적인 하부구조나 corestone으로서 나타난다.
V	완전풍화	모든 암석구성물질이 토사로 분해되어 있다. 원래 암체구조가 아직까지 크게 손상되지 않았다.
VI	잔 류 토	모든 암석구성물질이 토사로 전환되었다. 암체구조와 암석조직이 파괴되었다. 체적상으로 많은 변화가 있으나 토사는 심각하게 운반되어 지지는 않았다.

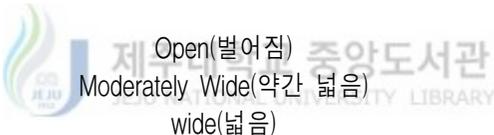
Table 3.4 Manual index test

분류등급	용 어	암 반 의 상 태
1	매우 강함	해머로 여러번 강하게 타격하여야 부서지거나, 단지 약간 부분만이 쪼개져 나감
2	강 함	해머로 한 두 번 강하게 타격했을 때 부서짐
3	중간 정도	해머로 한번 쳤을 때 쉽게 모서리가 부서짐 포켓 칼로 긁어지지 않음
4	약 함	해머로 쉽게 부서짐. 칼로 어렵게 벗길 수 있음
5	매우 약함	해머로 눌러 부서짐. 칼로 벗길 수 있음
6	극히 약함	엄지손가락으로 눌러 부서짐

### 3.2.6 불연속면의 틈새

불연속면의 사이 간격으로 공기, 물, 점토같은 물질로 충전되어 있다. 충전물질이 없는 경우 틈새의 정도는 투수시험으로 추정되어질 수 있다. 또한 불연속면의 전단강도(마찰각)를 감소시키는 요인이 된다.

Table 3.5 Aperture

불연속면의 틈새	표 시 방 법	
< 0.1mm 0.1 - 0.25mm 0.25 - 0.5mm	Very Tight(매우 촘촘함) Tight(촘촘함) Partly open(부분적으로 벌어짐)	폐쇄형 (Closed feature)
0.5 - 2.5mm 2.5 - 10mm > 10mm	 Open(벌어짐) Moderately Wide(약간 넓은) wide(넓음)	틈새형 (Gapped feature)
1 - 10cm 10 - 100cm > 1m	very wide(매우 넓은) Extremely wide(극히 넓은) Cavemous(동굴같은)	개방형 (open feature)

### 3.2.7 불연속면의 충전물질

한 불연속면에 대해 서로 인접한 암석벽면사이를 충전하고 있는 물질을 말하며, 모암보다는 일반적으로 강도가 약한 경우가 많다. 일반적으로 충전물질은 모래, 점토, 녹니석, 실트, 단층점토, 압쇄암, 단층각력암 등이나 벽면을 얇게 피복하는 광물 등도 포함된다. 단단한 광맥(방해석, 석영, 황철광 등)으로 충전된 경우를 제외하고는 일반적으로 깨끗한 면의 불연속면보다는 진단강도가 낮다. 그리고 충전된 불연속면의 거동은 충전물질의 광범위한 성질에 의해 좌우된다. 인접한 암석벽면사이의 수직거리를 간극에 대립하여 충전된 불연속면의 폭으로 표시한다. 충전된 불연속면은 다양한 형태로 출현하기 때문에 물리적 성질에 있어서는 특히 진단변형과 투수율에 관련하여 넓은 범위를 나타낸다.



### 3.2.8 불연속면의 투수

암반의 투수는 암석 내의 공극을 통하여 이루어질 수 있으나(1차 투수율), 주로 불연속면을 통해서 이루어 진다(2차 투수율). 지하수위, 투수통로, 수압 등은 암반의 유효응력을 감소시킴으로써 비탈면이나 지반의 안정성을 현격히 감소시킬 수 있다.

Table 3.6 Seepage from discontinuities

A. Open discontinuities	
Rating	Description
1	불연속면은 매우 tight하고 건조, 유수 흔적 없음
2	불연속면은 유수 흔적 없고 건조함
3	불연속면은 건조하나 유수 흔적 있음(착색되어 있음)
4	습기찬(습윤), 자유수 흔적 없음
5	불연속면 사이에서 물이 나오지만 지속적이지는 않음
6	불연속면에서 지속적인 물의 흐름을 보여줌 ( $\ell$ /min 측정과 수압을 기재할 수 있음)
B. Filled discontinuities	
Rating	Description
1	충진물은 매우 압밀, 건조, 유수 흔적 없음
2	충진물은 습윤(damp)하나 자유스러운 유수 흔적 없음
3	충진물은 축축함(wet), 가끔 물방울이 떨어짐
4	충진물은 밀려나간 흔적을 보이며, 지속적인 물의 흐름이 있음( $\ell$ /min)
5	충진물은 국부적으로 씻겨나감. 밀려나감 곳에서 유수 관찰 ( $\ell$ /min 측정과 수압을 기재할 수 있음)
6	특히 처음 노출된 곳에서 매우 높은 수압으로 충진물은 완전히 씻겨나감 ( $\ell$ /min 측정과 수압을 기재할 수 있음)

### 3.2.9 불연속군의 방향수

상호 교차하는 절리계를 이루고 있는 불연속면 종류의 숫자이다. 불연속면의 종류 수는 다음과 같은 공학적인 면에서 중요하다.

- 굴착시에 발파로 인하여 과도하게 파쇄되는 양을 결정한다.
- 암반비탈면 안정성을 결정한다.
- 불연속면 발달 간격이 좁은 여러개의 종류로 이루어진 암반은 어느 한 절리 종류로 무너지기보다는 토사비탈면 파괴와 같이 불연속면 종류에 영향을 받지 않는 원형의 파괴형태를 보인다.
- 한 방향(Set)만 있으면 Plane failure, Topping failure가 발생하고, 두 개 이상의 불연속면 종류가 있으면 Wedge failure의 가능성이 있다.



### 3.2.10 암괴의 크기

상호 교차하는 불연속면들의 상호방향과 각 불연속면의 발달간격에 의하여 암괴의 크기가 결정된다. 암괴의 크기와 각 암괴간의 전단강도는 어떠한 응력하에서 암반의 공학적인 거동을 결정하므로 암괴의 크기는 암반의 거동에 관한 지표를 제시한다. 즉, 큰 암괴로 이루어진 암반은 적은 변형을 가지는 경향이 있고 비탈면안정 해석시에는 작은 암괴로 이루어진 암반은 토사와 같은 파괴형태를 보인다. 또한 암석채굴이나 발파시에 암괴의 크기가 공사능률에 영향을 준다.



## IV. 현장조사

### 4.1 조사위치 및 현황

본 조사지역은 제주시 용담 2동에 위치하고 있는 용두암과 그 주변 해안지역으로 다음과 같이 4구간으로 나누어 정밀조사를 하였다. 그리고 비탈면별 연장, 높이는 다음과 같다.

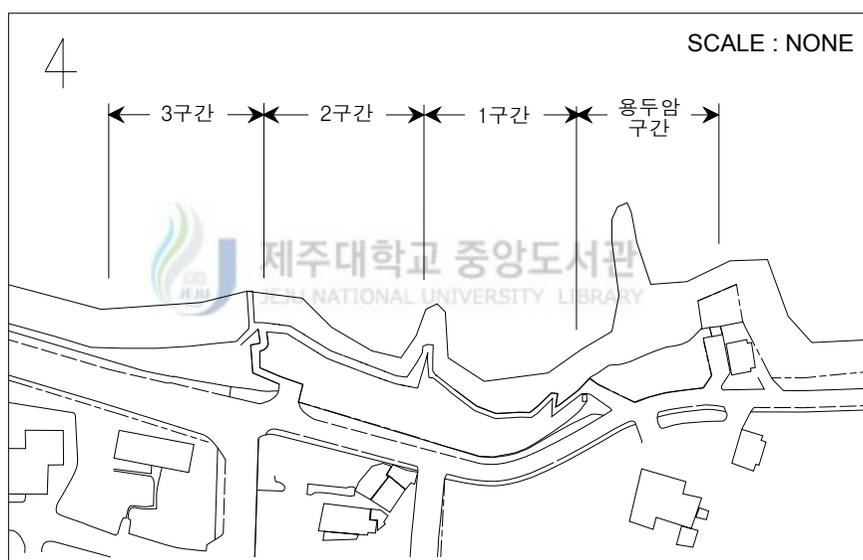


Fig. 4.1 Location map of investigated area

Table 4.1 Dimension of investigated area

구 분	용두암	1 구간	2 구간		3 구간	비 고
			봉적구간	해안절벽		
연 장 (m)	31	94	17	35	22	199
높 이 (m)	12	18	16	15	8	8~18

## 4.2 지형·지질조사

### 4.2.1 지형특성

용두암은 제주시 중심부의 서쪽 경계에 위치하고 있는 곳으로 한천의 하구인 용연의 서쪽 해안선에 위치하고 있는 기암으로 이루어진 용암의 구조를 말한다.

제주도는 주로 신생대 제4기에 형성된 신기(新期)의 화산도로서 섬 중앙에 해발 1,950m의 한라산을 중심으로 동심원상으로 분포된 용암류로 구성되어 있는 순상화산체이다. 제주도는 화산도의 특성을 반영하여 수계의 발달이 빈약하며 하천은 대부분 한라산을 중심으로 남북사면에 형성되어 있으며 건천을 이루고 있다. 특히 용수의 이용은 투수력이 좋은 현무암류를 복류하여 지하수는 해안에서 용천으로 용출하며 이러한 용천수는 예로부터 도민들이 주로 이용한 용수원이다.

제주시는 한라산의 북쪽 사면을 배경으로 하여 해안선에 형성된 도시로서 제주도의 중심도시이다. 제주시내를 흐르는 하천은 한천, 병문천 및 산지천이 있으며 이들 하천은 대부분이 한라산 정상부에서 발원하여 거의 직선적으로 북사면을 따라 흘러서 제주시내에서 바다와 만난다. 제주시의 구시가지를 형성하고 있는 지형특성은 동쪽으로 산지천을 경계로 하고 서쪽으로는 한천을 경계로 하고 있으며, 산지천, 병문천 및 한천의 연속적인 범람에 의해서 형성된 충적층의 평탄면과 해안단구지형이 특징적이다. 충적층의 평탄면은 중앙로와 관덕정을 중심으로 대규모로 형성되어 있으며, 해안단구지형은 해안저지대에서부터 한라산 고지대로의 경사면을 고려해 볼 때 중앙로의 평탄면, 남문로터리의 경사지, 광양지역의 평탄면 등 고지대로 가면서 연속적으로 추적 가능하며 제주시 서부지역의 제주공항은 전형적인 해안단구지형의 특성을 보여주고 있다.

#### 4.2.2 지질특성

용두암을 구성하고 있는 도남동현무암은 아아용암류의 특징을 보이며 클링커층의 발달과 용암 암맥의 발달이 특징적이다. 용암류의 경계면과 전면에는 대규모의 자과 각력암인 붉은색의 클링커층이 잘 발달되어 있다. 이 클링커층은 용암류 상부에서 0.5~1m두께로 2-3매 협재하며 용두암의 아아용암류 상하부에서는 그 두께가 10m에 까지 두껍게 발달해 있다.

또한 용두암의 암맥을 이루는 부분의 후면부인 해안절벽부와 용연의 하천 좌우 현벽에서는 용암류 단위가 하부 용암류와의 층서적 경계면에서 해안 과식동굴과 같은 형태의 클링커층을 차별침식한 해식동굴과 함몰대를 흔히 관찰할 수 있다. 용연 하천 하구에 발달된 해식동굴은 평균 높이가 3m, 폭이 4-5m정도이다.

용두암 주변을 구성하고 있는 용암에는 다양한 지질구조들이 관찰된다. 용두암은 아아용암류의 전면에서 나타나는 용암분류의 암맥으로서 그 모양이 특이하다. 용두암 주변에는 용두암과 같은 용암의 암맥이 7개 관찰된다. 대부분의 암맥은 용암류의 흐름방향을 따라 정북향으로 발달되어 있다. 이 아아용암류는 용두암 상류에 위치한 신제주 주변의 민오름, 오드싱오름과 같은 기생화산체에서 유출된 용암류이다. 용암류는 기생화산체에서부터 유출된 후 매우 빠른 속도로 흘러 이곳 해안까지 도달한 것으로 생각된다. 아아용암류의 표면은 암석이 쉽게 깨져서 내부의 용암과 함께 운반된다. 용암의 표면에 굳어 있던 암석이 부서지고 깨져서 용암류와 함께 운반되어 용암류의 표면에 붙어 있는 각력암을 클링커라고 한다(박기화 외, 2003). 아아용암류에서는 용암류의 상부와 하부에서 약 20m두께의 매우 두꺼운 클링커층을 형성하기도 한다. 용두암의 기형 암맥은 두꺼운 클링커층 내부에서 뜨거운 용암이 계속 공급되므로서 클링커 속을 뚫고 나온 용암분류의 암맥이다. 용두암은 두꺼운 클링커층에서 비교적 연약 지층인 붉은색의 클링커가 해안선 조간대에서 강한 해파에 의해 대부분이 제거되고 남아 있는 부분이다.

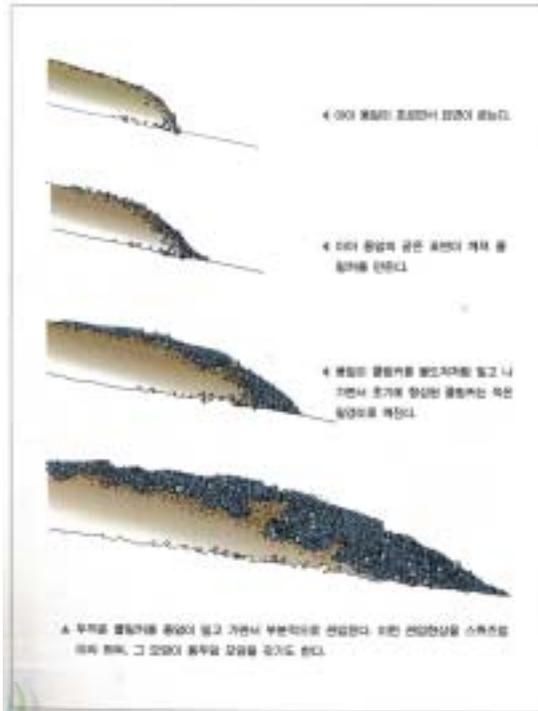


Fig. 4.2 Process which clinker is formed from aa lava



Fig. 4.3 Sectional diagram of aa lava flows

용두암을 비롯하여 용두암 주변의 해안단애에는 두꺼운 클링커층의 노두를 볼 수 있다. 해안선 주변에서 매우 약한 지층인 클링커층이 노출된 것은 용두암 주변지역의 특이한 지질구조 중의 하나이다. 또한 이 클링커층으로 부터는 아아용암류가 비교적 빠른 속도로 지표면을 흘러 형성된 다양한 화산지질학적 자료들을 간직하고 있으며 이러한 구조를 해안선 주변의 해안단애에서 관찰할 수 있다.

특히 용두암 인근의 해안단애에서는 상류의 기생화산체에서부터 운반되어 온 화산탄을 볼 수 있다. 이 화산탄은 직선거리로 약 5-7km의 상류에 위치하고 있는 민오름, 남조순오름 등에 분포하고 있던 것으로서 아아용암류의 연속적인 유출에 의하여 동시에 운반되어 이곳 용두암 해안까지 이동되어 퇴적된 것으로서 매우 중요한 것이다.

용두암 해안단애에서 쉽게 볼 수 있는 해식동굴들은 다른 해식동굴과는 다소 다른 성인을 보유하고 있다. 이 해식동굴들은 해안선 부근에서 강한 해파에 의해 형성되어 다른 해식동굴의 위치나 형성기구는 비슷하다고 할 수 있다. 그러나 이 해식동굴들이 형성되는 과정은 클링커층 내부를 흐르던 용암이 클링커를 넘쳐흘러 만들어진 특이한 구조를 하고 있어 다른 해식동굴과 차별된다. 이러한 용암을 스퀴즈업이라고 부른다. 이 해식동굴은 하부의 클링커를 차별 침식하여 만들어진 것이다.



Fig. 4.4 Photograph of volcanic bomb in clinker

### 4.3 불연속면 특성조사

#### 4.3.1 불연속면의 방향성

본 조사지역에 분포하는 불연속면들의 분포상태를 파악하기 위하여 현장의 자연비탈면에 대하여 불연속면의 종류 및 발달상태 등을 조사하였다. 절리의 발달상태가 불량하지만 대표적 특성을 나타내는 구역을 선정하여 대표 절리군의 방향성을 현장에서 직접 측정하였다. 6개 구역의 절리(군)를 측정하여 산정된 대표방향성을 Table 4.2에 수록하였으며, 이를 통계처리하기 위해서 컴퓨터 프로그램 DIPS를 사용하여 밀도 분포곡선(Pole density diagram)을 그려 주요 불연속면의 방향성과 특성을 조사하였다.

Table 4.2 Measured dip and dip-direction of slope with clinometer

구 간	주향 / 경사	절리군	Dip	Dip direction
용두암	N50E / 60~80SE, NW	J1	54	263
		J2	39	325
		J3	70	330
		J4	79	008
1 구간	N78W / 60~80SW	J1	78	026
		J2	82	220
		J3	64	126
		J4	19	062
2 구간	N80W / 70~85NE	J1	52	321
		J2	60	121
		J3	85	210
3 구간	N82E / 77NW	J1	85	105
		J2	83	202
		J3	89	352
		J4	43	230

### 4.3.2 불면속면의 거칠기

조사지역의 대표적인 절리면을 선정하여 절리면의 거칠기를 측정하였고, 현장에서 측정된 거칠기 형상은 표준프로파일곡선 Fig. 4.5를 이용하여 JRC선정에 활용되었다. 본 조사지역 절리면의 거칠기 형상 및 추정 JRC값들은 Table 4.3과 같다.

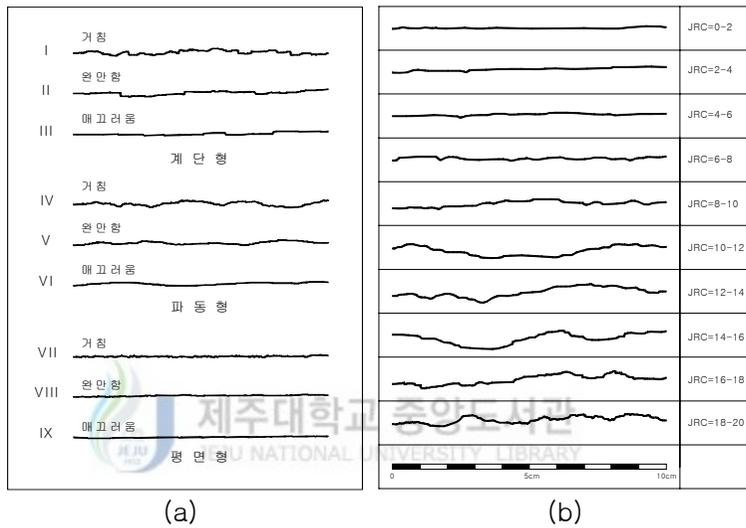


Fig. 4.5 JRC profile(after Barton & Choubey, 1977)

Table 4.3 Roughness profiles and measured JRC values

절리 번호	Dip/Dip direction	거칠기 형상	거칠기 지수 (JRC)	비고
J1	54/263		2~4	
J2	39/325		4~6	
J3	70/330		6~8	
J4	79/008		4~6	

각 절리면(J1~J4)에서 추정된 거칠기 지수(JRC) 최소값의 평균은 4 정도이며, 거칠기 지수의 범위는 2~8정도로 추정된다.

### 4.3.3 불연속면의 강도

불연속면의 강도는 불연속면 부근에 있는 암석의 일축압축강도로서 직접 측정할수 없을 경우에 대략적인 방법으로 Schmidt hammer 시험이나 굽기 그리고 지질햄머 시험 등으로 추정될 수 있다. 특히나 Schmidt 경도는 암석의 일축압축강도와 상당히 좋은 관계를 보여주어 일축압축강도시험이 불가능한 시료에 대해서는 일축압축강도의 추정이 가능하다. 그러나 Schmidt hammer의 경우 오차가 매우 크므로 다른 시험과 결합하여 비교함으로써 시험값을 사용하여야 한다. 특히 매우 연약하거나 매우 강한 암석에서는 잘 맞지 않는다.

그래서 본 연구에서는 Schmidt hammer 시험 결과값과 직접 일축압축시험한 결과값을 비교해 보고 Schmidt hammer 시험 결과값을 그대로 사용할 수 있는지를 검토해 보았다. 우선적으로 Schmidt hammer 시험을 실시하였다.

#### 1) Schmidt hammer 시험



Schmidt hammer는 원래 콘크리트의 압축강도나 탄성계수를 현장에서 간단히 측정하기 위하여 고안된 비파괴 시험기이다. 현지 암반의 강도를 가장 손쉽게 추정할 수 있는 방법으로 암반의 절리상태, 암벽의 거칠기, 습윤정도 등에 따라 측정치의 분산이 다소 심하며 암종에 따라 일축압축강도의 환산에 많은 편차를 나타내는 결점이 있으나 일반적으로 국내외에서 널리 사용되고 있는 시험이다.

Schmidt hammer는 해머를 스프링의 힘 즉, 미리 압축한 스프링에 축적된 힘을 방출함으로써 해머가 암반의 표면에 부딪칠 때 그 반발력을 측정함으로써 구하는 일종의 경도인데 신선하고 단단한 암반일수록 해머의 튀어오르는 거리는 크게 된다. 이 튀어 오르는 해머가 충격을 가하기 전에 스프링의 힘에 의하여 움직인 거리에 대한 백분율을 나타내며 이것을 Schmidt hammer의 반발치라고 한다.

본 조사지역의 불연속면에 대한 Schmidt hammer의 반발치를 측정하기 위해 절리면에 최소 10회 이상 Schmidt hammer를 타격하여 최대 및 최소 반발계수를 제외한 평균값을 산정하여 절리면 강도를 추정하였으며, 그 추정값을 다음 Table 4.5와 같다.

Table 4.4 Conversion table of uniaxial compression strength

R	+90°	+45°	0°	-45°	-90°
10			51		64
11			55		69
12			59		74
13			63		79
14			68		85
15			73		92
16			78		99
17			84		106
18			90		114
19			97		122
20	70	80	103	123	131
21	76	87	111	132	141
22	82	93	119	142	151
23	88	100	128	152	161
24	95	108	137	163	173
25	103	116	147	174	185
26	111	125	158	187	198
27	120	135	170	200	213
28	129	145	182	215	228
29	139	156	195	230	244
30	150	168	210	247	261
31	163	181	225	264	280
32	170	195	242	283	299
33	190	210	259	303	320
34	206	227	278	325	343
35	223	244	299	348	367
36	241	263	321	373	393
37	261	283	344	399	420
38	282	305	360	427	450
39	305	329	397	458	481
40	330	354	426	490	515
41	355	381	457	525	551
42	383	411	490	562	589
43	412	443	526	601	630
44	444	477	565	643	674
45	478	513	606	689	721
46	515	553	651	737	771
47	555	596	698	789	825
48	598	642	750	844	882
49	644	691	805	904	943
50	694	747	864	967	1009
51	749	805	927	1036	1079
52	808	869	995	1109	1154
53	872	938	1068	1188	1234
54	941	1013	1146	1272	1320
55	1016	1094	1230	1363	1412
56	1097	1181	1320	1459	1510
57	1184	1175	1417	1563	1615
58	1278	1376	1521	1674	1727
59	1379	1486	1632	1793	1847
60	1489	1595	1752	1920	1975

Table 4.5 Result of schmidt hammer test

불연속면 방향성	타격 횟수 별 반발치					반발치(R)		불연속면 압축강도(MPa)	비고
						범위	평균		
현무암	48	52	53	54	52	44~56	51	90.8	보통암 ~연암
	56	54	49	44	52				
Scoria	24	36	24	36	24	24~36	30	20.6	풍화암
	26	30	28	34	36				

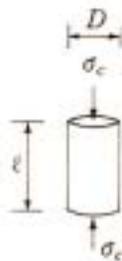
Table 4.6 Classification of rock masses

암석의 종류	극경암	경암	보통암	연암	풍화암
일축압축강도 건조상태(MPa)	160 <	130~160	100~130	70~100	30~70
Schmidt hammer	60 <	51~60	44~51	34~44	10~34
해머에 의한 타격	큰 해머로 타격시 튀기며 용이하게 깨지지 않음	큰 해머로 타격시 튀기며 약간 깨짐	큰 해머로 타격시 균열을 따라 크게 떨어짐	보통 해머로 타격시 비교적 용이하게 깨짐	보통 해머로 타격시 용이하게 소편으로 깨어지며 때로는 손으로도 쪼개짐

용두암에서의 Schmidt hammer 시험 결과 현무암인 경우 평균 반발치 51로서 환산 일축압축강도는 90.8MPa(927kg/cm<sup>2</sup>)이다. 이는 보통암이나 연암에 속한다. 그러나 Scoria는 평균 반발치가 30으로서 20.6MPa(210kg/cm<sup>2</sup>)의 강도를 보여 풍화암에 속한다. 이처럼 현무암과 Scoria의 강도가 차이를 보여 차별풍화가 심하고 전체적으로 암반의 풍화가 많이 진행되어 안정에 문제가 있을 것으로 보여진다.

## 2) 일축압축강도시험

다음으로 이 Schmidt hammer 시험의 결과를 그대로 받아들일 수 있는지 일축압축강도시험을 통해 비교·검토하겠다. 일축압축강도시험은 원리적으로 토질역학에서의 시험법과 같다. 시편은 다음의 조건을 만족하여야 한다. 즉,



$$\frac{l}{D} \approx 2.0 \sim 2.5$$

특히 시편의 위·아래의 면은 평평하게 하며, 편심을 줄이기 위하여 아교 등으로 캡핑(capping)해주고 일축하중을 가해야 한다. 일축압축과괴시의 하중을  $P$ 라 하면, 일축압축강도는 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

여기서,  $A$ 는 시편의 단면적이다.

본 연구지역이 보호대상지역으로 현장에서 직접 암석을 코어할 수 없어 주위의 낙석을 가지고 직경 40mm, 높이 80mm의 공시체로 제작하여 압축강도시험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같다.



Fig. 4.6 Specimen before uniaxial compression test

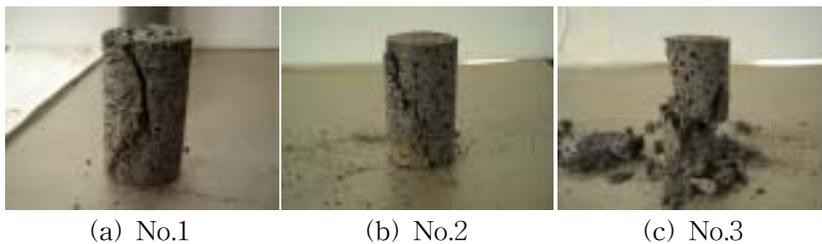


Fig. 4.7 Specimen after uniaxial compression test

총 3개의 암종에 대하여 강도 시험한 결과 Schmidt hammer 시험결과는 일축압축 시험결과보다 약 -5%~20% 의 차이를 보이고 있다. 이는 Schmidt hammer 시험을 해도 큰 오차는 나지 않을 것으로 판단되어 Schmidt hammer 시험을 통해 불연속면 강도를 예측 가능하다고 보여진다. 그리고 여기에서 사용된 시료는 낙석이라 모암보다 강도가 다소 낮을 수 있다.

Table 4.7 Result of uniaxial compression test

공시체	암 종	Schmidt hammer test 결과		일축압축시험결과			비 고
		평균 R	환산강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	직 경 (mm)	높 이 (mm)	강 도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
1	A	35	367	40	80	304.24	
2	B	43	630			511.57	
3	C	47	825			883.47	



## 4.4 지반정수 선정

### 4.4.1 비탈면의 강도정수 산정

암반사면의 안정성을 검토하기 위해서는 절리면 상태 및 특성을 분석 파악하는 것이 중요하다. 암반사면은 주로 취약한 절리면을 따라 거동하게 되므로 대상사면의 절리면의 공학적인 특성에 많은 영향을 받게 되는데 절리면의 전단강도에 주로 좌우된다.

사면에 작용하는 연직응력이 작은 경우, 점착력(Apparent Cohesion)은 무시될 수 있어 전단강도는 절리면의 마찰각에 의존하며 이때의 마찰각은 거의 최대 마찰각으로 작용하게 되고, 연직응력이 매우 큰 경우에는 점착력이 있으며 마찰각은 잔류마찰각으로 작용하게 된다. 실제 절리면의 점착력은 0이나 암석절리면 직접전단실험을 실시하면 이러한 점착력이 발생하는 것은 절리면의 불규칙성 때문에 발생하는 Interlocking 현상에 기인한다(Patton).

이에 따라, 본 검토에 적용될 강도정수를 추정하기 위해서 아래와 같은 방법들을 사용하였다.

#### 1) Barton의 경험식

강도에 대한 Barton의 실험결과(1973)에서 보면, 낮은 하중에서는 최대전단저항각에 가깝고 수직하중이 증가함에 따라 매끄러운 암석표면의 잔류전단저항각 값에 가까워짐을 알 수 있다. 그러나, 현장여건상 검토사면을 대표하는 교란되지 않은 시료를 채취하기가 어려우며, 시료를 채취하였다 하더라도 전단시험 과정시 시료가 교란되므로 시험결과를 현장 암반에 적용하는 데는 큰 오차가 발생된다. 이 문제를 극복하기 위하여 Barton(1973)은 여러학자들의 시험결과를 수집하여 여러 암석들에 대한 기본마찰각  $\phi_b$ 의 개략적인 값을 다음과 같이 제시하였다.

Table 4.8 Approximate values for the basic friction angle for different rocks

암 석 명	마찰각 $\phi_b$ (°)	암 석 명	마찰각 $\phi_b$ (°)	암 석 명	마찰각 $\phi_b$ (°)
각 석 암	32	화강암 (조립질)	31 ~ 35	편마암 (편암질)	23 ~ 29
현 무 암	31 ~ 38	석 회 암	33 ~ 40	화강암 (세립질)	29 ~ 35
역 암	35	반 암	31	미 사 암	27 ~ 31
백 암	30	사 암	25 ~ 35	점 판 암	25 ~ 30
백 운 암	27 ~ 31	세 일	27		

따라서, Barton의 경험식에 의거한 강도정수는 아래의 관계식을 이용하여 산정된다.

$$\phi_{peak} = JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b$$

본 조사지역의  $\phi_{peak}$ 를 계산하면 아래와 같다.

$$\phi_{peak} = JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b$$

$$= 4 \times \log_{10}(90.846/0.254) + 31 = 41.2^\circ$$

여기서, JRC = 4 (4.3.2 참조)

$$\begin{aligned} JCS &= 927 \text{ kg/cm}^2 = 927 \times 9.8 \text{ N/cm}^2 = 927 \times 10^4 \times 9.8 \text{ Pa} \\ &= 90,846,000 \text{ Pa} = 90.846 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_n &= 10\text{m} \times 2.6 \text{ t/m}^2 = 26 \times 10^3 \text{ kg/m}^2 = 26 \times 9.8 \times 10^3 \text{ N/m}^2 \\ &= 254,800 \text{ Pa} = 0.254 \text{ MPa} \text{ (수직응력작용 높이는 10m로 가정)} \end{aligned}$$

$$\phi_b = 31^\circ \text{ (Table 4.8에서 현무암의 최소값 적용)}$$

2) 문헌자료에 의한 추정

상기에서 제시된 추정방법 이외에 지표지질조사 자료를 바탕으로 기존의 문헌자료에 의거하여 불연속체 또는 연속체의 내부마찰각 및 점착력을 유추할 수 있다.

Table 4.9 Typical rock properties(Hoek and Bray)

암석의 종류 및 재료		$\gamma_t, \gamma_{sat}$ g/cm <sup>3</sup>	마찰각(°)	점착력 kg/cm <sup>2</sup>
종류	재료			
파쇄한 암	현무암	2.24 / 1.78	40~50	
	백암	1.28 / 0.99	30~40	
	화강암	2.60 / 1.76	45~50	
	석회암	1.92 / 1.28	35~40	
	사암	1.79 / 1.28	35~45	
	혈암	2.00 / 1.00	30~35	
암 석	-경질화성암- 화강암, 현무암, 규암	2.56~3.04	35~45	350~550
	-변성암- 규암, 편마암, 점판암	2.56~2.88	30~40	200~400
	-경질퇴적암- 석회암, 도로마이트, 사암	2.40~2.88	35~45	100~300
	-연질퇴적암- 사암, 석탄, 백암, 혈암	1.76~2.40	25~35	10~200

Table 4.10 Shear strength of filled discontinuities

암 석 명	설 명	최대 강도		잔류강도		시험자
		C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)	
현 무 암	점토화된 현무암의 각력암 점토에서 현무암까지의 함유량 변화가 큼	2.4	42	-	-	Ruiz, Camargo, Midea & Nieble(109)
벤토나이트	백악내의 벤토나이트층 얇은 층상 삼축시험	0.15 0.9~1.2 0.6~1.0	7.5 12~17 9~3	-	-	Link(110) Sindair & Brooker(111)
벤토나이트질 세일	삼축시험 직접전단시험	0 2.7	8.5~29	0.3	8.5	Sindair & Brooker(111)
점토	과압밀, 미거진면, 절리 및 소규모 전단면	0 1.8	12~18.5	0~0.03	10.5~16	Skempton & Petley(112)
점토세일	삼축시험	0.6	32	-	-	Sindair & Brooker(111)
협탄층 암석	점토 분쇄암층 두께 1.0 - 2.5cm	0.11~0.13	16	0	11~11.5	Stimpson & Walton(114)
백운석	변질된 세일층 두께 약 15cm	0.41	14.5	0.22	17	Pigot & Mackenzie(115)
섬록암, 화강섬록암 및 반암	점토 충전물 (점토 2%, Pl=17%)	0	26.5	-	-	Brawner(116)
화강암	점토충전물이 있는 단층 사질 양토로된 단층 충전물과 함께 약화됨 구조적 전단대, 편암질 및 파쇄된 화강암, 풍화된 암석 및 충전물	0~1.0 0.5 2.42	24~45 40 42	-	-	Rocha(105) Nose(117) Evdokimov & Sapegin(111)
석회암	6mm의 점토 1-2cm의 점토 충전물 1mm이하의 점토 충전물	1.0 0.5~2.0	13~14 17~21	0	13	Krsmanovic 등(120) Krsmanovic & Popovic(121)
석회암, 이화암 및 갈탄	층상의 갈탄층 갈탄 이화암 접촉면	0.8 1.0	38 10	-	15~24	Salas & Uriel(122)
갈탄	갈탄과 그 하부에 있는 점토사이의 층	0.14~0.3	15~17.5	-	11	Schultze(124)
몬모릴로나이 트 점토	백악내에 있는 8cm의 벤토나이트(몬모릴로 나이트)점토층	0.6 0.16~0.2	14 7.5~11.5	0.8	-	Eurenus(125) Underwood(116)
편암, 규암 및 규산질 편암	10-15cm 두께의 점토 충전물 얇은 점토를 가진 성층 구조 두꺼운 점토를 가진 성층구조	0.3~0.8 6.1~7.4 3.8	32 41 31	-	-	Serafim & Guerreiro(127)
점판암	세밀한 판상 및 변질상태	0.5	33	-	-	Coates, McRorie & Stubbins(128)
석영/고령토/ 연방간석	혼합시료에 대한 삼축시험	0.42~0.9	36~38	-	-	

#### 4.4.2 강도정수 산정결과

본 검토사면의 암반 강도정수는 상기에서 제시된 방법들을 종합하여 합리적으로 결정하도록 하며, 절리면을 포함한 불연속체의 강도정수와 신선한 연속체의 강도정수를 구분하여 산정하도록 한다. 각각의 방법에 따라 추정된 강도정수는 아래와 같다.

Table 4.11 Cohesion and friction angle estimated by each method

구 분	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	비 고
Barton의 경험식	-	-	41.2	JRC=4 JCS=90.846MPa
Barton의 비선형파괴기준식	-	1.23	44.0	
문헌자료	2.56~3.04	2.4	42.0	
서부산업도로(95호선)	2.34~2.76	-	31~50	
적 용	2.6	2.4	42.0	

## 4.5 불연속면의 현장조사 결과

### 4.5.1 용두암 구간 조사결과

용두암은 제주시내 서쪽 바닷가에 돌출한 기암으로 한천 하류의 용연에서 서쪽 200미터쯤의 바닷가에 있다. 높이는 12m에 길이 30m정도의 현무암으로, 지질학적으로 보면 용암이 분출하다가 굳어진 것이며, 섬갯분취와 희귀식물인 낙시돌풀 등이 자생하고 있다.

용두암은 N50E의 주향을 가지며 60~85SE 및 NW의 경사를 나타낸다.

용두암 우측 중심에는 가로 5.1m, 세로 2.8m의 Scoria 층의 풍화에 의한 공동이 형성되어 있다. 바닷물과 접해있는 끝부분의 경우 Scoria 층이 바닷물에 항상 접하고 있으며 다른 부분에 비하여 빠르게 풍화 및 산화가 진행되고 있다.

용두암의 현장조사 결과 바람이 많고 파도가 심한 지역적 특성에 노출되어 있어 이에 의한 침식 및 풍화의 진행이 매우 빠르게 진행되고 있다. 또한 낮은 강도특성을 갖는 현무암의 불안정한 절리군에 의한 붕락 및 Scoria 층의 풍화에 의해 대단히 불안정한 상태를 보이고 있다.

Table 4.12 Result of inspection in-situ rock mass in Yongduam

항 목	J1	J2	J3
방 향 성	54/263	39/325	70/330
간 격(m)	0.8~3.0	0.1~3.0	0.1~2.0
연속성(m)	0.7~2.5	0.7~2.5	0.7~2.5
거 칠 기	파동형 거침	파동형 거침	파동형 거침
틈새(mm)	0.1~90	0.1~90	0.1~90
충진물	없음	없음	없음
풍 화 도	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화
지 하 수	없음	없음	없음
지층구성	도남동현무암층이 주를 이루고 있으며 Scoria 층이 협재되어 있음		

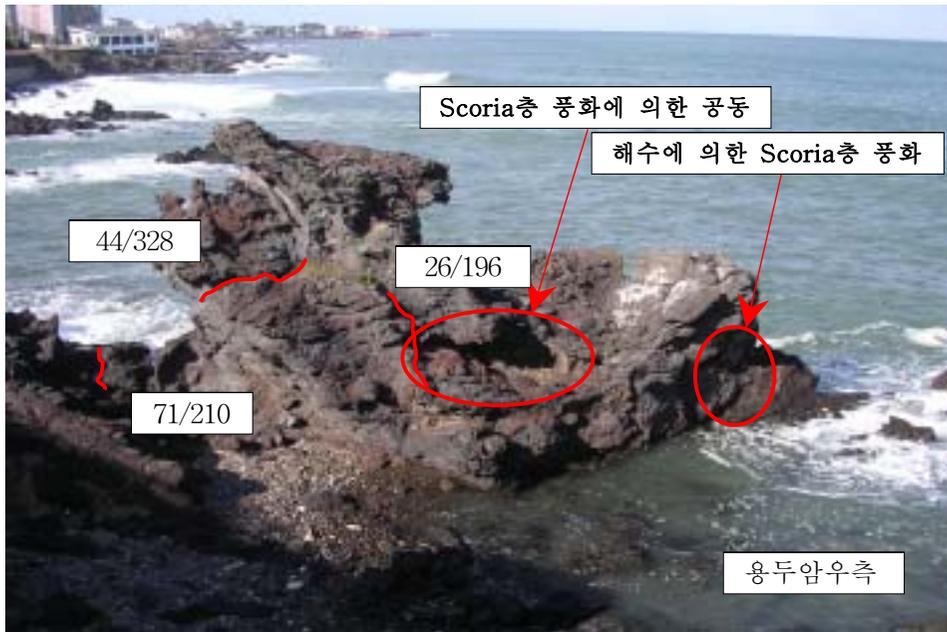


Fig. 4.8 Photograph of foreground in the right side, Yongduam



Fig. 4.9 Photograph of foreground in the left side, Yongduam



Fig. 4.10 Photograph of joint of the Yongduam rock

제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



해수에 의한 Scoria 층  
풍화 및 침식 진행

Fig. 4.11 Photograph of scoria layer weathering by seawater



Fig. 4.12 Photograph of weathering to the Yongduam rock center scoria layer



Fig. 4.13 Photograph of stratified structure to the direction flows

#### 4.5.2 1 구간 조사결과

본 구간은 용두암의 좌측에 위치하는 비탈면으로 관광객들의 왕래가 빈번한 관광로가 설치되어 있다. 암종은 분출암의 하나인 현무암으로 다공성이며 Scoria 층을 포함하고 있다.

비탈면은 N78/60~80SW의 주향과 경사를 가지며 Scoria 층의 풍화에 의한 역경사면이 다수 존재한다. 풍화에 의한 붕락층이 존재하며 그 크기는 수 cm에서 수 m까지 다양한 입도 분포의 낙석 입도분포를 보인다. 현재 Scoria 층의 풍화에 의한 낙석이 계속해서 발생하고 있다.



Fig. 4.14 Photograph of foreground in 1 zone

Table 4.13 Result of inspection in-situ rock mass in 1 zone

항 목	J1	J2	J3
방 향 성	78/026	82/220	64/126
간 격(m)	0.8~3.0	0.1~2.0	0.1~2.0
연속성(m)	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5
거 칠 기	파동형 거침	파동형 거침	파동형 거침
틈새(mm)	0.5~30	0.5~30	0.5~30
충진물	없음	없음	없음
풍 화 도	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화
지 하 수	없음	없음	없음
지층구성	도남동현무암층이 주를 이루고 있으며 Scoria 층이 협재되어 있음		



Fig. 4.15 Photograph of overhang and rock slope



Fig. 4.16 Photograph of overhang by irregular weathering

#### 4.5.3 2 구간 조사결과

본 구간은 용두암의 좌측에 위치하는 비탈면으로 관광객들의 왕래가 빈번한 관광로가 설치되어 있으며 현지 어민들이 좌판을 설치하고 상업활동을 하고 있는 곳이다. 암종은 분출암의 하나인 현무암으로 다공성이며 Scoria 층을 포함하고 있다, 또한 붕락에 의한 N82W/41NE의 붕적 비탈면을 형성하고 있다.

비탈면은 N80W/70~85NE의 주향과 경사를 가지며 Scoria 층의 풍화에 의한 낙석이 발생하고 있어 관광객 통행에 주의가 요망되는 곳이다. 현재 Scoria 층의 풍화에 의한 낙석이 계속해서 발생하고 있으며, 불안정한 절리군에 의한 붕락의 가능성이 있다.



Fig. 4.17 Photograph of foreground in 2 zone

Table 4.14 Result of inspection in-situ rock mass in 2 zone

항 목	J1	J2	J3
방 향 성	52/321	60/121	85/210
간 격(m)	0.5~3.0	1.0~3.0	1.0~3.0
연속성(m)	1.0~2.0	1.0~2.0	1.0~2.0
거 칠 기	파동형 거침	파동형 거침	파동형 거침
틈새(mm)	1~30	1~30	1~30
총 진 물	없 음	없 음	없 음
풍 화 도	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화	약간풍화~보통풍화
지 하 수	없 음	없 음	없 음
지층구성	도남동현무암층이 주를 이루고 있으며 Scoria 층이 협재되어 있음		



Fig. 4.18 Photograph of foreground in the right side, 2 zone



Fig. 4.19 Photograph of scoria layer of the lower part of slope in 2 zone

#### 4.5.4 3 구간 조사결과

본 구간은 용두암의 좌측에 위치하는 비탈면으로 현지 어민들의 탈의 시설이 설치되어 있는 장소이다. 암종은 분출암의 하나인 현무암으로 다공성이며 Scoria 층을 포함하고 있다,

비탈면은 N82E/77NW의 주향과 경사를 가지며 Scoria 층이 12.6m×2.6m의 크기로 존재하고 있다. 이 층의 풍화에 의한 2m깊이의 공동이 형성되어 있으며 상부 현무암의 인장균열이 다수 발생하고 있다. 또한 지하수의 침투에 의하여 Scoria 층이 빠르게 풍화되고 있어 붕락의 위험이 존재하고 있다.

현재 Scoria 층의 풍화와 인장균열 및 지하수침투에 의한 비탈면의 불안정성이 매우 크다.



Fig. 4.20 Photograph of foreground in 3 zone

Table 4.15 Result of inspection in-situ rock mass in 3 zone

항 목	J1	J2	J3
방 향 성	85/105	83/202	89/352
간 격(m)	1.0~2.0	1.0~2.0	1.0~2.0
연속성(m)	0.8~1.2	0.6~1.8	1.0~1.3
거 칠 기	파동형 거침	파동형 거침	파동형 거침
틈새(mm)	0.5~6.0	0.5~6.0	0.5~6.0
총 진 물	없 음	없 음	없 음
풍 화 도	약간풍화~심한풍화	약간풍화~심한풍화	약간풍화~심한풍화
지 하 수	지속적 흐름	지속적 흐름	지속적 흐름
지층구성	도남동현무암층이 주를 이루고 있으며 Scoria 층이 협재되어 있음		



Fig. 4.21 Photograph of cavity by scoria layer weathering



Fig. 4.22 Photograph of the ceiling of cavity in 3 zone

## V. 암반사면의 안정성 해석

### 5.1 현장조사에 의한 안정성 분석결과

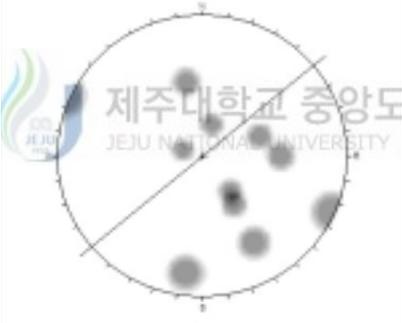
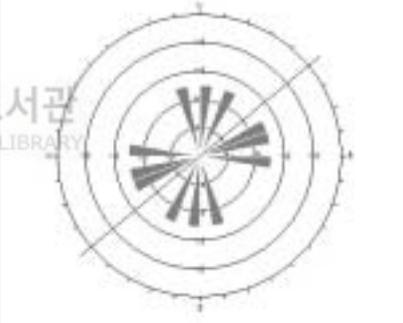
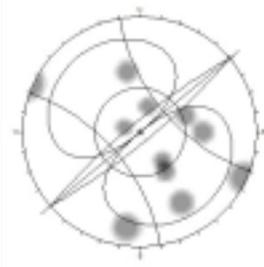
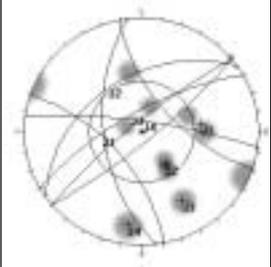
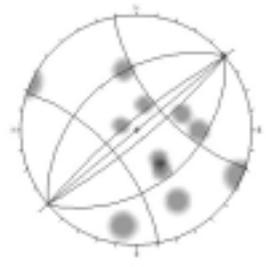
일반적으로 토질 공학적인 경우에 있어서 깎기비탈면 해석은 토층이 균질하다는 가정 하에 수행되고 있으나, 암반비탈면에 있어서는 불연속면에 따라 안정성 여부가 결정되고 있어 암반에서의 예상 활동면은 지표지질조사 등 현장조사에 의한 현지 암반상태를 고려하여 비탈면을 평가한다.

본 장에서는 조사구간 일대에 대한 지표지질조사 및 현장시험을 수행하여 지반공학적 특성을 파악한 후 비탈면의 원지반 특성에 부합되는 적절한 해석방법을 선정·적용하여 최적 비탈면경사 및 보강공법을 결정하였다. 본 검토구간에서 토사사면이 차지하는 비중이 극히 일부로서 암반비탈면에 대해서만 검토하였으며 DIPS 프로그램을 이용하여 평사투영법으로 파괴가능성을 판단하고 안정성을 평가하였다.

### 5.1.1 용두암 구간 안정성 분석

용두암의 경우 규칙적인 절리군을 형성하고 있지는 않으며 현재 우측 60~80°, 좌측 80~90° 정도의 경사를 보이고 있으며, Scoria층의 풍화에 의한 Overhang도 포함하고 있다. 그리고 평사투영해석 결과 평면, 썩기, 전도파괴의 발생 가능성이 있는 것으로 해석되고 절리 및 편리 등 많은 불연속면을 포함하고 있어 매우 불안정한 상태를 보이고 있다.

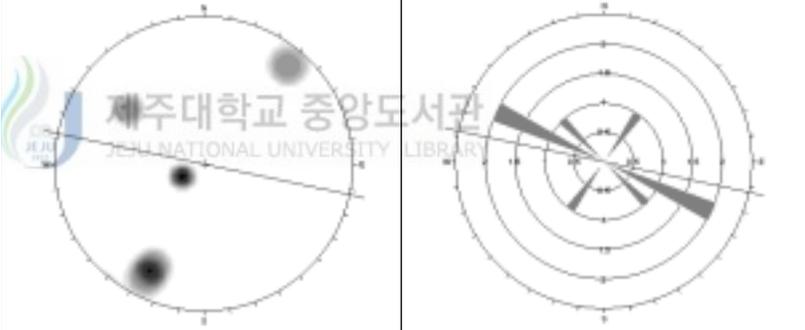
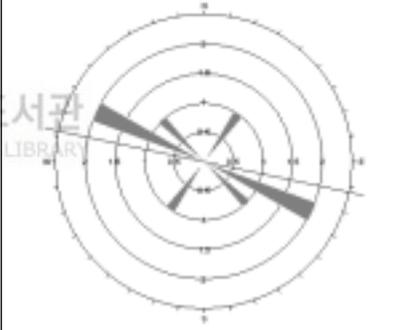
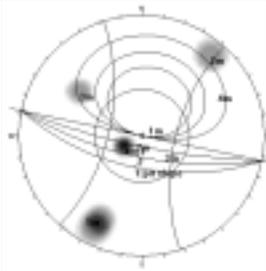
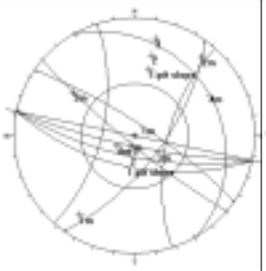
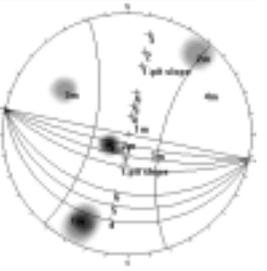
Table 5.1 Result of stereographic projection analysis in Yongduam

안정해석				
검토내용	불연속면 분포도		불연속면 방향성	
용두암의 방향 N50E				
주절리군 J1: 54/263 J2: 39/325 J3: 70/330 J4: 79/008				
내부마찰각 $\phi = 42^\circ$	평면파괴 안정성검토	썩기파괴 안정성검토	전도파괴 안정성검토	
				
검토경사	평사투영법			비고
	평면파괴	썩기파괴	전도파괴	
80°	○	○	○	× : 파괴 가능성 없음 △ : 파괴 가능성 약간 있음 ○ : 파괴 가능성 있음

### 5.1.2 1 구간 안정성 분석

본 구간의 경우 연속된 절리군을 형성하고 있지 않으며, 자연사면이 60~80° 정도의 급한 해안절벽을 이루고 있어 평사투영해석 결과 Scoria층의 차별풍화에 의해 절리군1(78/026)의 전도파괴 가능성이 있다. 그리고 절리군2(82/220)와 절리군3(64/126)의 썩기파괴 가능성이 있는 것으로 나타나고 있으나 절리의 연속성이 없어 가능성이 없는 것으로 사료된다.

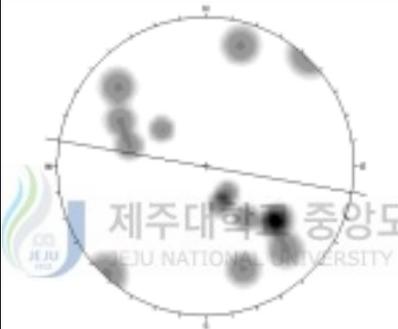
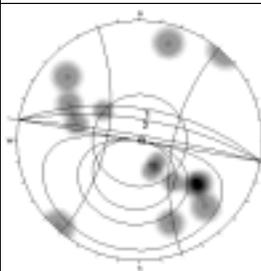
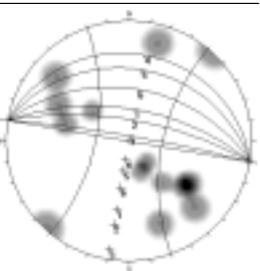
Table 5.2 Result of stereographic projection analysis in 1 zone

안정해석				
검토내용	불연속면 분포도		불연속면 방향성	
비탈면의 방향성 N78W				
주절리군 J1: 78/026 J2: 82/220 J3: 64/126 J4: 19/062				
내부마찰각 φ = 42°	평면파괴 안정성검토	썩기파괴 안정성검토	전도파괴 안정성검토	
				
검토경사	평사투영법			비고
	평면파괴	썩기파괴	전도파괴	
60°	x	x	○	× : 파괴 가능성 없음 △ : 파괴 가능성 약간 있음 ○ : 파괴 가능성 있음
70°	x	x	○	
80°	x	○	○	

### 5.1.3 2 구간 안정성 분석

본 구간의 비탈면은 N80W/70~85NE의 주향과 경사를 가지며 자연 비탈면의 경사가 70~80°정도의 급한 해안절벽을 이루고 있다. 평사투영해석 결과 Scoria층의 차별 풍화에 의해 질리군3(85/210)의 전도파괴 가능성이 있다.

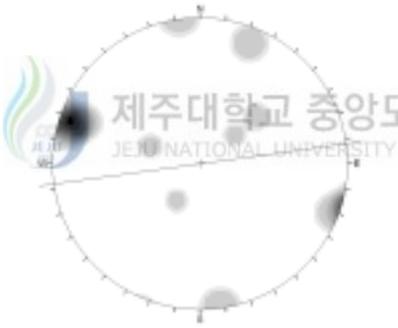
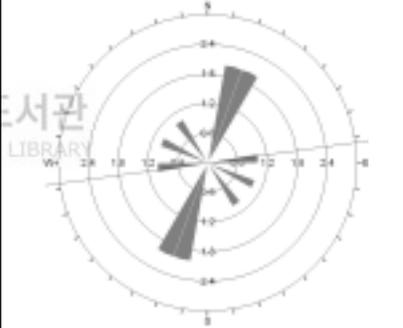
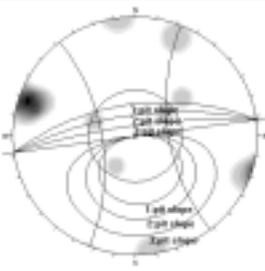
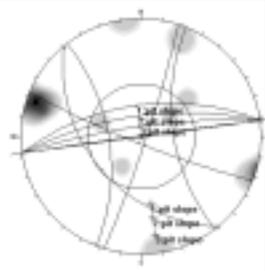
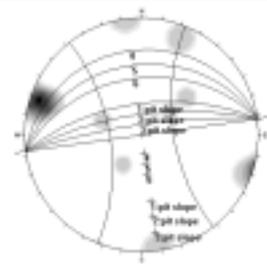
Table 5.3 Result of stereographic projection analysis in 2 zone

안정 해석				
검토내용	불연속면 분포도		불연속면 방향성	
비탈면의 방향성 N80W				
주절리군 J1: 52/321 J2: 60/121 J3: 85/210				
내부마찰각 φ = 42°	평면파괴 안정성검토	썩기파괴 안정성검토	전도파괴 안정성검토	
				
검 토 경 사	평사투영법			비 고
	평면파괴	썩기파괴	전도파괴	
60°	×	×	○	× : 파괴 가능성 없음 △ : 파괴 가능성 약간 있음 ○ : 파괴 가능성 있음
70°	×	×	○	
85°	△	×	○	

### 5.1.4 3 구간 안정성 분석

현재 자연 비탈면 경사는 77°이상의 경사를 이루고 있고 평사투영해석 결과 평면 및 썩기파괴의 가능성은 없으며 전도파괴의 발생 가능성이 있는 것으로 해석된다. 그리고 본 구간의 경우 Scoria층의 풍화에 의한 공동 형성으로 전도파괴의 가능성이 대단히 높다. 전도파괴의 경우 절리군3(89/352)에 의한 가능성으로, Scoria층의 풍화에 의한 것으로 사료된다.

Table 5.4 Result of stereographic projection analysis in 3 zone

안정해석				
검토내용	불연속면 분포도		불연속면 방향성	
비탈면의 방향성 N82E				
주절리군 J1: 85/105 J2: 83/202 J3: 89/352 J4: 43/230				
내부마찰각 $\phi = 42^\circ$	평면파괴 안정성검토	썩기파괴 안정성검토	전도파괴 안정성검토	
				
검토경사	평사투영법			비고
	평면파괴	썩기파괴	전도파괴	
60°	x	x	○	× : 파괴 가능성 없음 △ : 파괴 가능성 약간 있음 ○ : 파괴 가능성 있음
70°	x	x	○	
80°	x	x	○	

## 5.2 비탈면 안정대책공법 검토

### 5.2.1 비탈면 안정대책공법 개요

비탈면 파괴가 발생하지 않게 하기 위한 대책공법을 방지 기능별로 구분하면 다음과 같이 안전을 유지법과 안전을 증가법의 두 가지로 구분할 수 있다. 즉 강우, 용설 등과 같은 물의 영향에 의하여 비탈면의 안전율이 감소하는 것을 방지시켜주는 전자의 방법과 불안정하게 판단된 비탈면의 안전율을 말뚝 등의 저항력을 이용하여 증가시켜주는 후자의 방법이 있다.

여기서, 안전을 유지법은 비탈면파괴를 발생시키는 직접적 유인으로부터 비탈면을 보호하는 소극적 대책방법이라 할 수 있으며 안전을 증가법은 비탈면 파괴의 잠재적 취약성을 개선시키려는 적극적 대책방법이라 할 수 있다.



Fig. 5.1 Classification of slope stabilization methods

## 5.2.2 비탈면 보수·보강공법 선정

### 1) 보수·보강의 필요성

보수의 필요성은 비탈면 내의 구조물에 대하여 인지되는 변형 및 손상에 대해 비탈면의 안전성을 확보하기 위해 요구되는 보수의 수준에 의해 판단하며, 각종기준(도로설계편람, 한국도로공사 도로설계요령, 도로안전시설 설치 및 관리지침-낙석방지시설 편 등)을 참조한다.

보강의 필요성은 비탈면의 안전성평가 결과에 의해 비탈면의 안전율을 각종 기준에서 정하는 수치이상으로 확보하기 위하여 어느 정도까지 보강하여야 하는가의 판단에 의한다.

### 2) 보수·보강의 수준

보수·보강의 수준은 현재의 위험도, 경제성 및 시공성 등을 고려하여 다음을 고려 선택한다.

- 현상유지(진행억제)
- 대규모 붕괴위험이 없는 수준까지 회복
- 전면적인 보수·보강

### 3) 보수·보강의 우선순위

각 시설물에서 발생된 각종 결함에 대한 보수·보강은 다음 사항을 원칙으로 하여 우선순위를 결정한다.

- 보수보다 보강을 우선으로 한다.
- 중대 결함사항을 우선 고려한다.
- 전체 시설물에서의 우선순위 결정은 각 시설물이 가지는 중요도, 결함의 심각성 등을 종합검토 후 단기, 중기, 장기로 구분하여 우선순위를 결정한다.

#### 4) 보수·보강공법의 선정

붕괴가능성이 인지되는 깎기 비탈면의 보수·보강은 보수·보강재료와 공법의 내하력, 내구성, 기능 및 미관 등을 검토하여 결정한다. 이 때 중요한 것은 깎기 비탈면의 결함 및 손상발생 원인에 대한 정확한 판단이며, 이를 통해 적절한 공법을 선정할 수 있고 또한, 적절한 보수·보강재료를 선택할 수 있다. 따라서 깎기 비탈면 관련 제반자료와, 진단 시 수행한 각종 상태평가 및 안전성평가 결과를 기초로 하여 결함 발생 원인에 대한 정확한 추정 후 보수·보강공법을 선택한다. Table 5.5은 깎기 비탈면에서 사용되는 보수·보강공법의 개요이다.

#### 5) 보수·보강공법의 종류

깎기 비탈면의 보수·보강은 다음의 4 종류로 구분된다.

- 경사완화 및 구조물에 의한 보강공법
- 표면보호공법
- 낙석방지공법
- 배수공법



비탈면의 보수·보강공법은 비탈면의 구성재료와 공법의 원리에 따라 Table 5.6 및 Table 5.7로 구분하여 적용하여야 한다.

Table 5.5 Slope stabilization methods, summary and application

구분	종류	공법 개요	적용
보강방법	깎기공법 (경사완화)	비탈면의 경사를 완화시켜 비탈면의 안정성을 증대시키는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
	록볼트 (Rock Bolt)	강봉을 이용하여 암체들 서로를 연결시켜 암반의 전단강도를 증가시키는 공법	암반 비탈면
	앵커 (Anchor)	앵커의 인장력으로 암반블록이나 토체를 안정된 지반에 고정하여 안정화시키는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
	쏘일네일링 (Soil Nailing)	지중에 보강재를 좁은 간격으로 삽입하여 사면의 전단강도를 증가시키는 공법	토사 비탈면 연약/파쇄암반 비탈면
	다우웰 (Dowel)	소규모의 국부적인 탈락이 예상되는 암블록에 직경 25mm, 길이 1-3m 정도의 강재를 설치하여 암블록의 탈락을 방지시키는 공법	암반 비탈면
	콘크리트 버팀벽 (Buttress)	비탈면의 암 탈락에 의해 지지력이 상실된 구간에 버팀벽을 설치하여 보강하는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
	옹벽	옹벽구조물을 설치하여 옹벽이 배면토압을 부담하도록 하여 사면을 안정화시키는 공법	토사 비탈면
	마이크로파일 (Micro Pile)	지중에 천공 후 강관을 삽입하고 시멘트 밀크를 주입하여 소구경 파일을 형성하는 공법	토사 비탈면
	보강토 공법	흙 비탈면 내에 보강재를 배치하여 보강재와 흙의 마찰력을 이용하여 파괴나 변형에 저항하는 공법 (그라우팅 공법 등)	토사 비탈면
	조합 공법	여러 보강공법을 조합하여 시공하는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
보호공법	식생공	깎기 비탈면 표면에 식생을 하여 우수에 의한 침식을 방지하고 풍화작용을 억제시키는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
	돌쌓기, 블록쌓기	경사도가 1:1이상(45°이상)인 깎기 비탈면에 사용하며 돌이나 블록 등으로 사면을 덮어 풍화 및 침식을 방지하는 공법	토사 비탈면
	돌붙임, 블록붙임	경사도가 1:1이하(45°이하)인 깎기 비탈면에 사용하여 옹벽으로서의 역할과 함께 풍화 및 침식을 방지하는 공법	토사 비탈면
	콘크리트격자	콘크리트 격자를 사면에 덮어 깎기 비탈면의 표면붕락을 방지하는 공법	토사 비탈면
	샷크리트 (Shotcrete)	표면 정리후 철망을 앵커핀으로 고정시킨 후 시멘트 모르터를 뿜칠하여 표면을 보호하는 공법	암반 비탈면
	개비온(돌망태) (Gabion)	철망상자속에 돌체움을 한 돌망태를 벽돌 쌓는 방법으로 쌓아 올려 벽체를 형성하는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
	조합 공법	여러 보호공법을 조합하여 시공하는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면
낙석방지방법	뜯돌제거	깎기 비탈면상의 뜯돌, 전석이 바리 또는 낙하되지 않도록 제거하는 공법	암반 비탈면 토사 비탈면
	와이어로프 걸이	뜯돌이나 전석이 움직이지 않도록 격자모양의 와이어로프나 여러개의 로프를 이용하여 깎기 비탈면상에 고정시키는 공법	암반 비탈면
	낙석방지망	방지망의 장력 및 자중을 이용하여 이완된 암석을 포획하거나 암석의 운동에너지를 억제하는 공법	암반 비탈면
	낙석방지울타리	지주, 와이어로프, 철망, 유연성 재료 등으로 구성된 울타리로 낙석에너지를 흡수하는 공법	암반 비탈면
	피암터널	강재, 철근콘크리트 및 PC 콘크리트 등으로 도로위에 처마를 설치하여 낙석을 받아 막거나 계곡으로 낙하시켜 낙석에 의한 피해를 방지하는 공법	암반 비탈면
	낙석방지 옹벽	토사나 전석이 도로에 유입되는 것을 방지하기 위해 절토사면 앞에 옹벽을 설치하는 공법	암반 비탈면 토사 비탈면
	낙석흡수도랑 (Ditch)	깎기 비탈면의 하단부에 도랑을 설치하여 낙석을 방지하는 공법	암반 비탈면
조합 공법	여러 낙석방지공법을 조합하여 시공하는 공법	토사 비탈면 암반 비탈면	

Table 5.6 Classification of soil slope stabilization methods

원 리	공 법
경사도완화	절취
흙막이 (토류공)	앵커 (Anchor)
	소일네일링 (Soil Nailing)
	역지말뚝
	마이크로 파일 (Micro Pile)
	옹벽
배수	개비온 (Gabion)
	산마루촉구
	수평배수공
	소단배수로
표면보호	도수로
	식생공
	격자블록
	돌쌓기, 돌붙임

Table 5.7 Classification of rock slope stabilization methods

원 리	공 법
경사도완화	절취
암반보강	록볼트 (Rock Bolt)
	앵커 (Anchor)
	다우웰 (Dowel)
	콘크리트 버팀벽 (Buttress)
	샷크리트 (Shotcrete)
간극수압감소	수평배수공
	촉구배수공
표면보호	식생공
낙석제어	낙석방지망
	낙석방지울타리
	뜯돌제거 (면정리)
	낙석흡수 도랑 (Ditch)
	피암터널

### 5.2.3 비탈면 보강공법 적용 검토

#### 1) 용두암 구간

본 구간의 경우 암반 내에 존재하는 불연속면에 의한 평면, 썩기, 전도파괴에 대한 가능성을 내포하고 있으며, Scoria 층의 침식에 의한 불안정 요인 또한 내포하고 있다.

본 구간의 경우 보강방안은 암반 내에 존재하는 불연속면이 더 이상 발달되지 않도록 하는 것이 타당하며, 본 구간이 조사구간에서 가장 경관이 중요한 구간이므로 보수나 보강을 하더라도 경관을 다소라도 해칠 경우 관광지로서의 기능이 크게 저하되기 때문에 보강공법을 적용 시에는 경관측면을 우선적으로 고려하여 대책에 보다 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 2) 비탈면 1 및 2 구간

본 구간의 경우 암반의 불안정 요인은 암반 사이에 분포하는 내에 존재하는 Scoria 층의 침식에 의해 Scoria 층 상부의 암반이 Overhang 되어 있으며, 암반 내에 존재하는 불연속면에 의한 평면 또는 썩기파괴 가능성이 있는 것으로 분석되었으나, 불연속면의 연속성이 없는 점을 감안할 때 그 가능성은 미약한 것으로 판단되며, 평면 또는 썩기파괴 가능성 보다는 전도파괴의 가능성이 높으며 Scoria 층의 침식에 의한 불안정 요인 또한 내포하고 있다.

본 구간의 경우 보강방안은 암반의 불연속면 보강 및 Scoria 층의 침식 방지를 동시에 충족시킬 수 있는 공법이 필요할 것으로 판단되나,

본 구간의 경우도 경관이 매우 중요한 구간이며 경관을 다소라도 해치는 공법을 적용할 경우 관광지로서의 기능이 크게 저하되기 때문에 공법 적용 시 경관을 저해하는 요소가 있을 경우 문제가 될 수 있기 때문에 용두암 구간과 같이 대책에 보다 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3) 3 구간

본 구간의 경우 공동의 붕괴로 인한 안정성이 문제가 시급한 상태이나, 앞 구간과 달리 용두암 산책로 내에 있지 않으므로 경관 측면은 현 상태보다 다소 떨어지더라도 안정성을 최우선으로 고려하되 보수보다는 보강을 하는 것이 바람직하며, 보강방법은 공동 입구에 자연석 쌓기를 하여 경관 저해를 최소한으로 하고 자연석 배면은 토사 또는 콘크리트로 뒷채움 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

단, 이 경우 배면의 침투수에 의한 뒷채움재의 유실을 방지할 수 있는 시설은 반드시 필요하며, 제시된 공법으로 보강할 경우 경과적인 측면에서도 주변지형과 조화를 이룰 수 있기 때문에 바람직한 공법으로 사료된다.



## VI. 결 론

본 연구에서는 용두암 및 그 주변 해안지역에 존재하는 암반의 강도를 측정하여 암반의 현재 상태를 살펴보고 안정성을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. Schmidt hammer 시험과 일축압축강도시험을 비교한 결과 Schmidt hammer 시험결과값이 일축압축시험결과값보다 약 -5%~20% 보다 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 Schmidt hammer 시험을 해도 큰 오차는 나지 않을 것으로 판단되어 Schmidt hammer 시험을 통해 불연속면 강도를 예측 가능하다고 보여진다.
2. 용두암에서 Schmidt hammer 시험 결과 현무암인 경우 평균 반발치 51로서 환산일축압축강도는 90.8MPa(927kg/cm<sup>2</sup>)이다. 이는 보통암이나 연암에 속한다. 그러나 Scoria는 평균 반발치가 30으로서 20.6MPa(210kg/cm<sup>2</sup>)의 강도를 보여 풍화암에 속한다. 이처럼 현무암과 Scoria의 강도가 차이를 보여 차별풍화가 심하고 전체적으로 암반의 풍화가 많이 진행되어 안정에 문제가 있을 것으로 보여진다.
3. 용두암 구간인 경우 N50E의 주향과 60~80SE, NW의 경사를 가지고 있으며 1구간은 N78W/60~80SW, 2구간 N80W/70~85NE, 3구간 N82E/77NW의 주향과 경사를 각각 가진다. 불연속면 압축강도(JCS)는 90.8 MPa이고 거칠기 지수(JRC)는 4정도로 추정되고 있다. 그리고 비탈면의 절리면 내부마찰각은 Barton의 경험식에 의해 41.2°로 산정되었다.
4. 평사투영 결과 용두암 구간의 경우 암반 내에 존재하는 불연속면에 의한 평면, 쉼기, 전도파괴에 대한 가능성을 내포하고 있으며, Scoria층의 침식에 의한 불안정 요인 또한 내포하고 있다. 나머지 구간인 경우는 평면 또는 쉼기파괴 가능성보다는 전도파괴의 가능성이 높아 낙석의 위험이 크다.

5. 본 구간의 붕괴 원인은 해안선에 위치하고 있는 자연적인 원인이 큰 몫을 차지하고 있으나 관광지 개발에 따른 해안도로의 개설을 비롯한 시설물의 설치 등의 인공적인 간섭이 침식을 촉진시키고 있다. 용두암을 비롯한 주변 해안단애의 보존은 인공적인 시설물의 설치를 최대한 억제하고 차량을 통제하며 주위시설의 토목공사를 자제함으로써 현재의 상태를 자연적으로 유지하는 것이 바람직하다고 생각된다.



## VII. 참고문헌

- 박기화, 이병주, 최현일, 황재하, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서, 제주도, p.151.
- 박기화, 이봉주, 한만갑, 김정찬, 기원서, 박원배, 김태윤, 2003, 제주도 지질여행, 한국 지질자원연구원·제주발전연구원, pp.31~41.
- 엄관용, 2002, 제주도 화산암의 역학적 특성에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, pp.32~39.
- 오비호, 2005, 암반사면의 안정성 해석에 대한 사례 연구, 전남대학교 석사학위논문, pp.5~53.
- 오수동, 1999, 암반사면의 안정성 평가에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, pp.5~18.
- 용연·용두암 유적지 문화재 자원조사, 2000, 제주시·제주발전연구원, p.
- 이인모, 2005, 암반역학의 원리, 세론, pp.222~240.
- A. Nozaki & T. Mizokami, 1999, Modeling jointed rock masses and prediction of slope stabilities by DEM, Rock Mechanics or Industry, Vol. 1, pp.89~90.
- Barton M. R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Elsevier, Vol. 7, pp.287~332.
- Brawner, C. O., Pentz, D. L. and Sharp, J. C., 1972, Stability studies of a footwall slope in layered coal deposit. Proc. 13th Symposium on Rock Mechanics, ASCE, pp.329~365.
- Christian, J. T., 1994, Reliability Applied to Slope Stability Analysis, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 120, No. 12, pp.2180~2207.
- E. Hoek and J. W. Bray, 1981, Rock Slope Engineering, 3rd ed., Inst. Min. Metall., London, pp.150~223.
- Goodman, R. E., 1970, The deformability of joints. In Determination of the In-situ Modulus of Deformation of Rock, American Society for Testing and Materials Special Technical Publications, Number 477, pp.174~196.

- Hoek, E., Bray, J. W. and Boyd, J. M., 1973, The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. Quarterly J. Engineering Geology, Vol. 6, No. 1., p.
- Hoek, E. T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 106, No. GT9, pp.1013~1035.
- Li, K. S. and Lumb, P., 1987, Probabilistic Design of Slopes, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp.520~535.
- Patton, F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st International Congress of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 1, pp.509~513.
- Paulding, B. W. Jr., 1970, Coefficient of friction of natural rock surfaces. Proc. ASCE J. Soil Mech. Foundation Div., Vol. 96(SM2), pp.385~394.
- Rengers, N., 1971, Roughness and friction properties of separation planes in rock. Thesis, Tech. Hochschule Fredericiana, Karlsruhe, Inst. Bodenmech. Felmech. Veroff, 47, pp.129.
- Richard E. Goodman, 1980, Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons, pp.254~287.

## 감사의 글

본 논문이 나오기까지 용기와 격려, 지도를 아끼지 않으신 남정만 교수님께 먼저 깊은 감사를 드리며, 논문심사의 수고를 아끼지 않으신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 제가 학문에 전념할 수 있도록 가르침과 조언을 해주신 여러분들께도 깊은 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 도움을 준 많은분들과 우리 지반공학연구실의 김기영, 조영웅에게도 감사드립니다. 더운 날씨에도 연구실에서 열심히 공부하는 승범, 성환, 승현, 도형, 태건, 창세, 승용, 영민에게도 고마운 마음을 전합니다.

대학원생때부터 많은 도움을 준 원생들에게도 감사드립니다. 그리고 특히나 바쁜 와중에도 귀중한 시간을 쪼개어 자료정리 등 항상 옆에서 챙겨주시고 도와주신 김준호 대학원생에게도 이 지면을 빌어 다시 한번 감사드립니다.

끝으로 어려운 여건에서도 항상 맑고 밝은 미소로 내조를 아끼지 않았던 아내 선자에게 모든 영광을 돌리며, 그동안 아빠로서 잘해주지 못하고 항상 미안하게 생각하고 있으며 사랑하는 아들 재범, 재용에게도 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.