



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

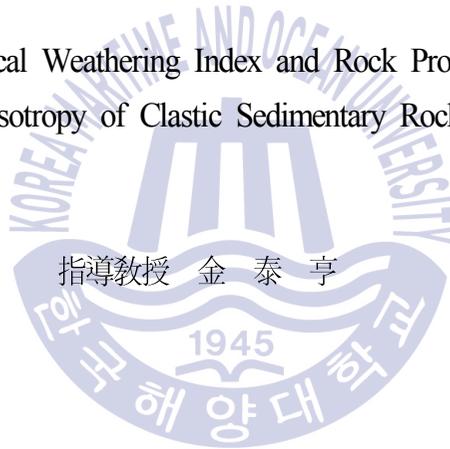
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

국내 퇴적암의 공학적 이방성을 고려한 풍화지수
산정 및 암의 특성 저감 연구

Estimation of Chemical Weathering Index and Rock Property Reduction
Considering Anisotropy of Clastic Sedimentary Rock in Korea



2017 年 08 月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科
金鍾祐

本 論文을 金鍾祐의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 : 서 영 교



委 員 : 김 성 욱



委 員 : 강 기 천



委 員 : 19 경 갑 수



委 員 : 김 태 형



2017 年 8 月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	x

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구의 필요성	4
1.3 연구의 내용	6

2. 이론적 배경

2.1 쇄설성 퇴적암의 이방성	8
2.2 대자율이방성	11
2.3 암석의 풍화	13
2.3.1 물리적(기계적) 풍화작용	14
2.3.2 화학적 풍화작용	14
2.3.3 생물학적 풍화작용	16
2.4 풍화지수	16
2.5 암반등급과 암반정수 산정	20
2.5.1 암반의 분류 기준	20
2.5.2 암의 정수 산정	21

3. 연구 방법	
3.1 대자율이방성	25
3.2 퇴적암의 풍화도	31
3.2.1 개요	31
3.2.2 전암분석	31
3.2.3 화학적 풍화지수	32
3.2.4 물리적 풍화지수	40
3.3 암의 정수 저감치 산정	43
3.3.1 개요	43
3.3.2 풍화가속실험	48
3.3.3 풍화정도에 따른 암 정수 해석	54
4. 시험결과 및 분석	
4.1 이방성 산정결과	61
4.1.1 시료 채취 지역	61
4.1.2 이방성 산정	63
4.2 퇴적암의 풍화지수 산정결과	70
4.2.1 풍화지수 산정지역	70
4.2.2 풍화지수의 산정	72
4.2.3 풍화지수간 상관성 분석	88
4.2.4 퇴적암 풍화지수 적용의 문제점	100
4.3 풍화가속시험 결과	109
4.3.1 기존의 풍화도 평가	109
4.3.2 쇄설성 퇴적암의 풍화도 평가	110
(1) 탄성과속도	111
(2) 흡수율	113
(3) 일축압축강도	115

4.3.3 풍화와 암 정수와의 상관성	116
(1) 화성암	116
(2) 퇴적암	121
5. 결론	128
참고문헌	131



List of Tables

Table 2.1 Magnetic susceptibility of various materials	12
Table 2.2 Classification of rock weathering conditions	18
Table 2.3 Criterion of rock classification	20
Table 2.4 Previous studies of weathering degree evaluation of sedimentary rocks	22
Table 3.1 Summary of weathering indices (if calculated using molecular proportions of elements oxides) evaluated in this study (modified from Price and Velbel, 2003).	36
Table 3.2 Range of chemical index of alteration(CIA)(modified from Nesbitt and Young, 1982, De Jayawardena, U. S. and Izawa, E., 1994)	38
Table 3.3 External pressure raising due to physical weathering(Bell and Rossman, 1992)	49
Table 3.4 Rock classification standard(comparison of A and B groups)	51
Table 3.5 Seismic velocity of rock types	52
Table 3.6 Weathering index and grade of granite (Irfan and Dearman, 1978)	54
Table 3.7 Classification of granite in Korea (Lee and de Freitas, 1989)	55
Table 3.8 Weathering rating geotechnical parameters of granites(Lee, 1993)	56
Table 3.9 Evaluation of Weathering index(CWI) (Sueoka, 1988)	57

Table 3.10 Comparison of chemical and physical weathering index(Chang, 2003)	59
Table 3.11 Properties of sedimentary rocks in Kyungsang system (이영휘 등, 1998)	60
Table 4.1 Sampling locations, rock types, and sampling number for anisotropy assessment	63
Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks	73
Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks	81
Table 4.4 Descriptive statistics of chemical weathering indices on sedimentary rock types	93
Table 4.5 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of sandstone	94
Table 4.6 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of mudstone	95
Table 4.7 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of shale	96
Table 4.8 Result of slake durability index on the shale and hornfels	110
Table 4.9 Results of seismic velocity of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test	112
Table 4.10 Results of absorption ratio through accelerated weathering test	114
Table 4.11 Results of unconfined compressive strength through accelerated weathering test	116

List of Figures

Fig. 1.1 Geologic map of Korea(1/1,000,000)	3
Fig. 1.2 (a) Distribution of rock types in geological engineering map (National Disaster Management Research Institute, 2010), (b) Area ratio according to the rock types (National Disaster Management Research Institute, 2013).	4
Fig. 2.1 Types of clastic sediments and sedimentary rocks(copyright 2000 John Wiley & Sons, Inc.)	9
Fig. 2.2 Anisotropy structure of mudstone and shale	9
Fig. 2.3 Progressive metamorphism of shale	10
Fig. 2.4 Anisotropy structure of slate and phyllite	10
Fig. 2.5 Classification of rocks based on formation	21
Fig. 3.1 Magnetic structures of rocks	25
Fig. 3.2 T-P _j diagram(Jelinek, 1981; Jelinek & Hrouda, 1982)	28
Fig. 3.3 Flinn diagram(Nagata,1961; Collinson, 1983)	29
Fig. 3.4 Photograph of samples for magnetic susceptibility tests	30
Fig. 3.5 Magnetic susceptibility test; (a) Magnetic susceptibility tester and (b) Anisotropy tester	30
Fig. 3.6 Chemical index of alteration (CIA) (modified from Nesbitt and Young, 1982)	39
Fig. 3.7 Weathering products of weathering process (modified from Mason, 1966)	40
Fig. 3.8 Relation of density-absorption index-weathering index	43
Fig. 3.9 Frequency distribution of unconfined compressive strength for rock types(National Disaster Management Research Institute, 2010)	45

Fig. 3.10 Distribution of unconfined compressive strength for rock types	46
Fig. 3.11 Swelling property of mudstone through soaking test	47
Fig. 3.12 Measurement apparatus of seismic velocity	51
Fig. 3.13 Unconfined compression tester	53
Fig. 3.14 Comparison of chemical and physical weathering index (a) Absorption index - L.O.I, (b) Absorption index - CWI, (c) Absorption index - WPI(modified from Chang, 2003)	58
Fig. 4.1 Map of sampling locations for anisotropy assessment	62
Fig. 4.2 Anisotropy of magnetic susceptibility of granite and sedimentary rocks(mudstone and shale) in Youngju area	64
Fig. 4.3 Anisotropy of magnetic susceptibility of sandstone and shale in Daegu Basin	65
Fig. 4.4 Map of Yangsan fault system	66
Fig. 4.5 Anisotropy of magnetic susceptibility of granite and volcanic rocks in Dongnae fault in Yangsan fault system	67
Fig. 4.6 Anisotropy of magnetic susceptibility of sandstone and shale in Dadaepo area	68
Fig. 4.7 Anisotropy of magnetic susceptibility of mudstone and shale in Gangseo area	69
Fig. 4.8 Map of sampling locations for weathering index assessment(Kim et al., 2017)	71
Fig. 4.9 Matrix plot of sandstone	90
Fig. 4.10 Matrix plot of mudstone	91
Fig. 4.11 Matrix plot of shale	92
Fig. 4.12 Range of chemical index of alteration (CIA) in major rocks and minerals (modified from Nesbitt and Young, 1982; De Jayawardena and Izawa, 1994).	97

Fig. 4.13 Chemical index of alteration(CIA) of sandstone	98
Fig. 4.14 Chemical index of alteration(CIA) of mudstone	99
Fig. 4.15 Chemical index of alteration(CIA) of shale	100
Fig. 4.16 Result of X-ray diffraction in fresh shale	102
Fig. 4.17 Result of X-ray diffraction in weathered shale	102
Fig. 4.18 Result of X-ray diffraction in containing calcite veins	103
Fig. 4.19 (a) Solid circles are chemical index of alteration (CIA) values for variety of fresh rocks and minerals; corresponding open circles show chemical index of weathering (CIW) values for same fresh materials (analyses from Carmichael et al., 1974; Smith, 1974; Cox et al., 1979; Anderson and Bender, 1989; De Ros et al., 1994). (b) Plot of corresponding CIA and CIW values shows extreme range of CIW values for unweathered materials (Fedo et al., 1995).	105
Fig. 4.20 Red circles are CIA values for variety of sandstone; corresponding black circles show CIW for same samples.	106
Fig. 4.21 Red circles are CIA values for variety of mudstone; corresponding black circles show CIW for same samples.	107
Fig. 4.22 Red circles are CIA values for variety of shale; corresponding black circles show CIW for same samples.	107
Fig. 4.23 Change of seismic velocity of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test	113
Fig. 4.24 Change of absorption ratio of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test	115
Fig. 4.25 Relation between density and absorption ratio due to weathering process (Choi et al., 2012)	117
Fig. 4.26 Relation between density and unconfined compressive strength due to weathering process (Choi et al., 2012)	118

Fig. 4.27 Relation between absorption ratio and unconfined compressive strength due to weathering process (Choi et al., 2012)	119
Fig. 4.28 Relation between CIA index and density due to weathering process (Choi et al., 2012)	120
Fig. 4.29 Decreasing rate of strength of granite through accelerated weathering test	121
Fig. 4.30 Relation between CIA and absorption ratio due to weathering process of sandstone	122
Fig. 4.31 Relation between CIA and seismic velocity due to weathering process of sandstone	123
Fig. 4.32 Relation between CIA and absorption ratio due to weathering process of mudstone and shale	124
Fig. 4.33 Relation between CIA and seismic velocity due to weathering process of mudstone and shale	125
Fig. 4.34 Change of seismic velocity of sandstone through accelerated weathering test	126
Fig. 4.35 Change of seismic velocity of mudstone/shale through accelerated weathering test	126
Fig. 4.36 Decreasing rate of seismic velocity of sedimentary rocks (sandstone and mudstone/shale)	127

Estimation of Chemical Weathering Index and Rock Property Reduction
Considering Anisotropy of Clastic Sedimentary Rock in Korea

Kim, Jong Woo

Department of Civil and Environmental Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Rock is classified into hard rock, moderate rock, soft rock, weathered rock based on the degree of weathering. However, this standard does not reflect the changes due to weathering process because it is qualitative standard based on visual observation. Also, the ground investigation at the time of designing is based on the condition at the time of construction which often fails to reflect the decrease in the durability of the rock during maintenance. The accurate information on rock characteristics at the time of construction and also for maintenance is very significant.

The geo-structures construction including the road, railroad, urban railroad, and urban area is increased with advanced excavation technology. But accidents by collapse due to uncertainties of rock is increasing as well. Based on the investigation these accidents, most of the damages caused by collapse take place on sedimentary rock rather than granite. Unfortunately, however, there are only few studies conducted on the weathering of sedimentary rock.

The clastic sedimentary rocks are classified into sandstone, mudstone, and shale

based on their deposition environment, and they have different types of lamination depending on the grain size as well as the arrangement pattern of composition particle of their rocks. The lamination causes anisotropy of mudstone and shale. Based on the test results obtained from magnetic susceptibility test, sandstone showed just less than 5% of anisotropy, but mudstone and shale showed about 20% of anisotropy. The anisotropy of mudstone and shale was higher than that of rock at fault zone in Kyungsang basin.

Weathering indices were estimated using whole rock analysis(X-ray fluorescence analysis) on clastic sedimentary rocks. In the cases of clastic sedimentary rocks, the correlation of weathering indices based on feldspar weathering was higher than weathering indices using Si. The indices with significant correlation in sandstone, mudstone, and shale (all three kinds of samples) were CIA and CIW in the weathering indices correlation analysis. Especially CIA, the most widely used weathering index of feldspar, was easy to apply as it suggests the index range of rock types and minerals, and easy to verify the weathering pathway. In addition, to make the accurate measure of weathering indices of clastic sedimentary rocks, samples with a high volume of carbonate minerals should be excluded through naked eye examination and X-ray diffraction analysis.

The weathering indices of sandstone, mudstone and shale indicated linear increase through weathering process. The weathering pathway followed from fresh sedimentary rock to illite and then kaoline. This indicated that the engineering problem of the mudstone and shale was related to their low critical load. Each rock had its unique critical load and when a rock reaches its critical load, its physical strength decreased and the rock property changed from the designing condition.

Accelerated weathering tests(7days which indicates 49years)through soaking in acid water and freezing-thawing tests changed the properties of hard and soft rocks of sandstone, mudstone and shale; seismic velocity decreased, absorption ratio increased, unconfined compressive strength decreased with weathering. Change of those properties in mudstone and shale were significantly varied compared to the sandstone. It was closely related to anisotropy magnitude of each rock material.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

시설물의 설계와 시공에서 최적의 암반 조건을 반영하기 위해 RMR(Rock Mass Rating), Q-system(Rock Mass Quality) 등의 암반분류방법이 이용되고 있고, 풍화 정도에 기초한 경암, 보통암, 연암, 풍화암, 풍화잔류토 등의 분류법이 사용되고 있다. 이러한 분류법은 현재 상태의 조건을 반영하는 것이며 실제 지반 조사에서 암반의 분류는 대부분 육안관찰과 설계자의 주관적 판단과 같이 정성적 기준으로 이루어지고 있다. 안타깝게도 모암의 특성과 암의 풍화과정에 따른 변화를 전혀 반영하지 못하고 있다. 암석의 풍화는 굴착과정에서 발생하는 기계적 풍화와 굴착 후 암반의 표면이 외부에 노출된 후 환경적인 요인으로 2차적인 화학적 풍화가 매우 빠르게 진행된다. 암석마다 고유한 임계부하량(Werner and Spranger, 1996)에 도달하게 되면 물리적 강도저하가 수반되며 설계조건과 다른 지반 특성으로 변화되어 구조물의 불안정성을 증가시키는 결과를 초래한다.

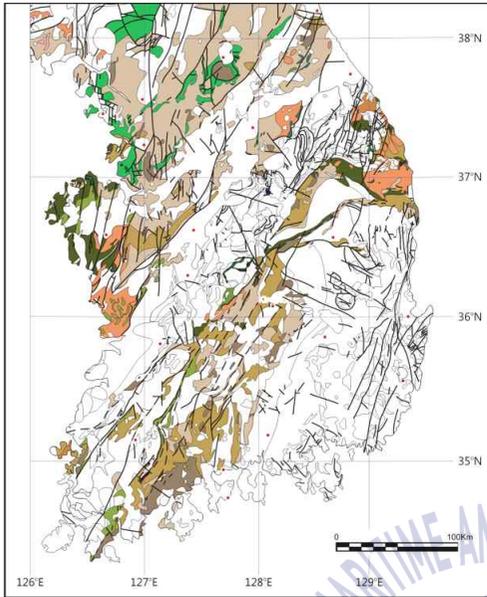
대부분 암석은 지표환경보다 높은 온도와 압력 조건에서 형성되며 암석이 지표에 노출되면 낮은 온도, 압력, 지표수 등의 영향으로 변형(변질)되며 이러한 과정은 풍화의 형태로 나타난다. 대표적인 풍화는 화학조성의 변화 없이 물리적으로 매질이 분리되는 물리적 풍화작용과 수분과 암석을 구성하는 원소의 반응으로 광물이 분해되는 화학적 풍화작용으로 구분된다. 물리적 풍화로 인해 세립화된 암석은 표면적이 증가하여 수분과 접촉하는 면적이 증가하기 때문에 화학적 풍화가 가속되는 원인이 된다. 암석은 풍화로 인해 공극률과 흡수율이 증가하는 동시에 입자 간의 결합력이 감소하여 역학적인 강도가 감소된다(이영휘, 1996; 이영휘 등, 1998, 2000, 2002)

현재까지 지반조사에 많이 활용되고 있는 한국지질도는 1:1,000,000, 1:250,000,

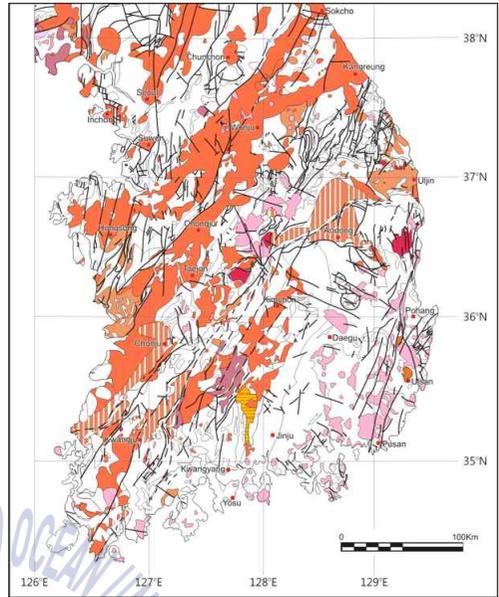
1:50,000 축척의 3종류가 있고(Fig. 1.1), 그 외에도 목적에 따라 1:25,000 축척의 지질도, 탄전지질도, 응용지질도 등이 있다. 지질도에 개별적으로 구분된 암종은 1:5만 지질도에서 1,425개, 1/25만 지질도에서 184개의 지층이 구분되어 있고 산상과 암질이 유사한 암석도 지질시대에 따라 서로 다른 지층명이 사용되고 있다. 이들 전국단위의 지질도에서는 암종별 공학적 특성은 전혀 고려되지 않았다. 따라서 지층의 순서와 지질시대와는 별개로 순수하게 암석의 공학적 기준에 따른 지질공학도가 필요하게 되었다(National Disaster Management Research Institute, 2010).

2010년 국립재난안전연구원에서 암종 분류에 의한 지질공학도를 제작한 바 있다. 국내 암석을 탄전층을 포함하여 총 14개 암종으로 구분하였다(Fig. 1.2(a)). 이를 기준으로 국내 분포하는 암종의 면적비를 산정하면 화성암 46.7%, 변성암 34.3%, 퇴적암 19.0%에 해당한다(National Disaster Management Research Institute, 2010).

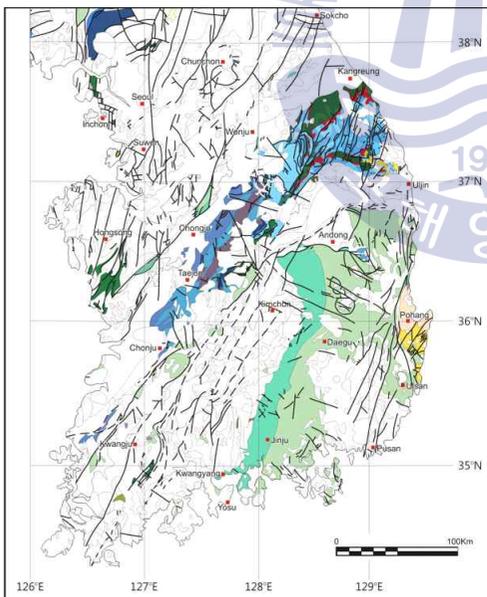
국내에서 화강암과 화강편마암이 차지하는 면적은 전체의 50% 이상이며, 1999년에서 2011년까지 발생한 재해 빈도를 지질공학도를 기준으로 구분하면 편마암에서 재해 발생사례가 가장 빈번하게 나타나고 있으며(26.4%), 규장질화강암(24.4%)과 안산암(11.9%)의 순으로 나타나며 이는 암석의 분포 면적과 유사한 경향을 보여준다(Kim et al., 2013). 급경사지 재해의 경우 산악지형을 이루는 많은 기반암이 화강암과 편마암으로 구성되어 있어 화성암, 변성암, 퇴적암 중 재해의 취약성이 화성암에 높은 것으로 평가되었다. 이와 같은 이유로 기존의 풍화연구는 화성암 특히 화강암과 화강편마암에 집중되었다(Yim, 2000; Chang, 2003; Choi et al., 2012). 하지만 화성암의 경우 풍화는 느리게 진행되어 풍화로 인한 암석의 물성변화로 인한 재해 발생보다는 암반에 불연속면에서의 구조적 결함 확대가 주원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2012). 임계부하량이 낮아 풍화가 빠르게 진행되는 것으로 알려진 퇴적암 특히 쇄설성 퇴적암(사암, 이암, 세일)에 대한 풍화연구는 매우 미흡한 실정이다.



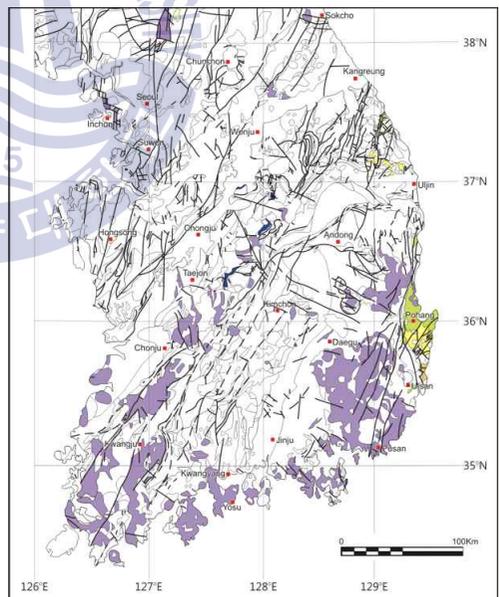
(a) Metamorphic rocks



(b) Igneous rocks



(c) Sedimentary



(d) Volcanic rocks

Fig. 1.1 Geologic map of Korea(1/1,000,000)(National Disaster Management Research Institute, 2010)

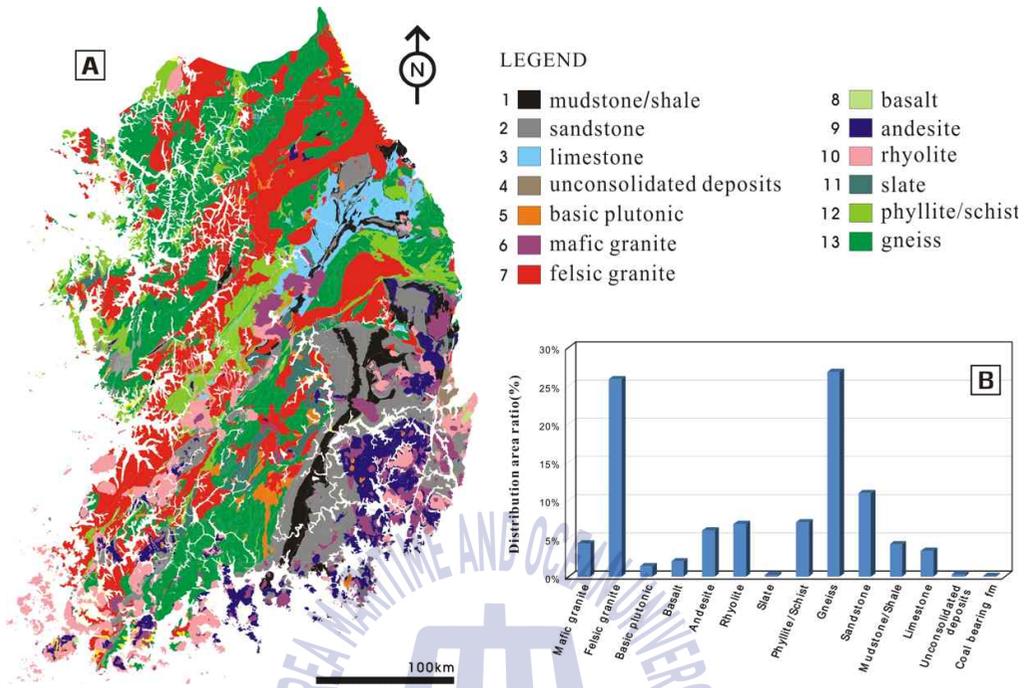


Fig. 1.2 (a) Distribution of rock types in geological engineering map (National Disaster Management Research Institute, 2010), (b) Area ratio according to the rock types (National Disaster Management Research Institute, 2013).

1.2 연구의 필요성

근래에 들어 암반층에 도로, 철도, 도시철도와 도심지의 지하구조물 건설이 증가추세에 있고 지반굴착 기술이 비약적으로 발전하고 있으나 암반의 불확실성에 기인한 크고 작은 붕괴사고는 지속적으로 늘어나고 있다. 관련된 경험 축적 및 기술 발전에도 불구하고 암반에서 붕괴사고는 계속해서 발생하고 있는데 그 원인에 대한 검토가 필요한 시점이다.

대표적인 암반 붕괴사고 사례를 살펴보면 다음과 같다. 부산지하철 2호선 붕괴(1998, 03), 호남고속철 달성터널 붕괴(2011. 9), 국도36호선 광비 1터널 낙반사고 발생(2011. 9), 인천지하철 터널 상부 지표 붕괴(2012. 2), 강원 인제터널 내

암석 붕괴사고 발생(2012. 7), 전남 구례 터널 상부 지표 붕괴(2012. 11), 집중 호우로 인한 포항지역 산사태(1998. 7), 포항국도대체우회도로 붕괴(2011, 9), 포항 환호공원 해안절개지 붕괴(2016, 8), 포항 양덕동 지반침하(2014. 6), 동해고속도로 동해~주문진간 확장공사 구간 산사태(2001. 4), 경북영천 경부고속도로 절개지 사고(2013. 7), 대구 수성구 알파시티 터널 붕괴사고(2017. 2) 등이다.

국토해양부는 2011년 9월 1일과 7일에 호남고속철도 달성터널과 국도 36호선 광비 1터널 공사 현장에서 잇따라 발생한 붕괴사고를 계기로 안전관리에 대한 강화를 마련하였으나 불안정한 급경사지와 터널의 붕괴는 지속되고 있는 실정이다(연합뉴스, 2011-09-09). 또한 최근의 지층붕괴에 의한 시설물 피해 중 상당수가 이암, 세일로 구성된 퇴적암과 친매암, 편암 등의 변성퇴적암에서 발생하고 있다. 전남 구례 터널과 경북영천 경부고속도로 절개지는 붕괴가 연속적으로 발생한 현장으로 각각 변성퇴적암과 퇴적암(이암, 세일)이 관련된 대표적인 지역이다.

토목 시공에서 암반은 암석의 물리·화학적 풍화 정도에 따라 경암, 보통암, 연암, 풍화암, 풍화토로 구분되며, 암반의 연경도는 암석의 압축강도와 불연속면의 빈도 등에 의해 결정되므로 암반의 내구성과 풍화도는 부(negative)의 상관성을 보인다. 계획, 설계, 시공과정에서 암반의 내구성은 풍화받지 않은 상태의 암반의 지반상태를 기초로 이루어지며 등방성의 고내구성을 가진 화강암과 근본적으로 층리, 엽리 등의 이방성을 가지는 퇴적암과 변성퇴적암은 풍화 이전 단계에서 화강암과 거의 대등한 강도를 보인다. 하지만 시공과정과 유지관리 동안 암반이 풍화가속 환경에 놓이게 되면 각 암반이 가지고 있는 이방성과 내구성의 차이에 의해 암반의 공학적 특성은 매우 상이하게 변하게 된다. 이와 같은 현상이 있음에도 불구하고 지금까지 지반공학적인 측면에서 풍화에 대해서는 화강암에 대해 집중적으로 연구되었으며 이방성 특성이 큰 퇴적암(사암, 이암, 세일)에 대한 연구는 소수에 의해서만 진행되었다(Kim et al., 2001; Lee and Kim, 2004; 이영휘 등, 1998, 2000, 2002).

지표에 노출된 암석은 물리적 화학적 원인에 의해 풍화가 진행되는데, 풍화 단계별 암석의 전암성분을 분석하여 정량적인 풍화를 평가하기 위한 시도가 진행되었고 그 연구 결과로 다양한 형태의 풍화지수가 제안되었다(Choi, 2011; Choi et al., 2012). 하지만 이들 연구는 화성암에 속하는 화강암에 치중되어 진행되었고, 최근의 연구에서는 제안된 풍화지수들이 모든 암석(화성암, 퇴적암, 변성암)에 일률적으로 적용하기에 한계가 있음이 밝혀졌다. 즉, 암종별로 최적화된 풍화지수의 제안과 적용에 대한 연구의 필요성이 대두되었다(Choi et al., 2014). 특히 최근의 붕괴사고는 이암, 셰일, 천매암, 편암 등의 퇴적암과 변성퇴적암이 집중적으로 발생되고 있어 쇄설성 퇴적암에 대한 풍화연구의 필요성이 요구되고 있다.

1.3 연구의 내용

본 연구에서는 국내에 분포하는 쇄설성 퇴적암(사암, 이암, 셰일)을 대상으로 연구를 수행하였다. 특히 이암과 셰일이 많이 분포되어 있는 경상분지를 주 연구지역으로 선정하였다. 암석의 풍화민감도를 평가할 때 기존에 사용되고 있는 슬레이크내구성 시험 결과와 스웰링 시험결과는 연구에서 제외시켰다. 이유는 이들 시험이 무결암(intact rock)을 대상으로 하기 때문에 내구성이 상대적으로 높게 평가되고, 미래의 풍화 진행과 속도를 예측하기 어렵고, 시험결과를 설계에 적용할 수 없는 현실적인 문제를 가지고 있기 때문이다.

다른 대안으로 쇄설성 퇴적암(사암, 이암, 셰일)을 대상으로 이방성 정도를 파악하고, 전암분석과 광물조성을 토대로 퇴적암에 맞는 최적화된 풍화지수를 제안하였다. 또한 풍화에 따른 지반정수의 저감율을 파악하기 위해 단계별 산침수와 동결융해 시험을 실시하여 그 결과를 분석하여 시간에 따른 암반정수의 변화 경향을 제시하였다. 본 논문의 각 장별 주요 연구 내용은 다음과 같다.

2장에는 기존연구로 암석의 이방성 이론, 풍화(물리적, 화학적, 생물학적), 풍화지수, 암반등급과 암반정수 산정 등이 설명되어 있다. 3장은 연구방법으로 대

자율이방성 측정, 퇴적암의 풍화도 분석, 암반정수 저감 산정 및 해석 등이 설명되어 있다. 4장은 퇴적암의 이방성 산정결과, 풍화지수 산정결과, 풍화가속화 시험결과에 대한 분석을 포함하고 있다. 그리고 5장은 본 연구의 결론이다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 쇄설성 퇴적암의 이방성

암석을 구성한 광물과 입자의 공간적 배열에 따라 암석의 구조(rock fabric)가 결정되며(Hobbs et al., 1976; Passchier and Trouw, 2005), 암석의 미세구조는 암석의 형성과 이후의 다양한 지질학적 과정을 통해 형성된다.

퇴적암은 수류에 의해 운반된 입자가 퇴적되어 형성되며 환경에 따라 피상, 판상형의 층리와 수류의 흐름에너지의 크기에 따라 비늘구조(imbrication), 선구조(lineation), 엽리구조(foliation) 등의 입자배열이 만들어진다(Fig. 2.1). 퇴적 후의 고결, 다짐 등의 숙성작용과 관련된 암석구조가 생성된다. 이 과정에서 이암과 셰일은 미세한 층리구조가 발달하며 풍화과정에서 이방성의 주요한 원인이 된다(Fig. 2.2).

화성암과 변성암의 경우에도 마그마와 용암, 화쇄류가 흐를 때 입자들의 흐름방향과 속도 등에 따라 흐름방향을 지시하는 다양한 선상배열이 만들어지며, 고체 상태의 암석이 지구조적 응력을 받게 되면 응력의 방향과 종류에 따라 엽리 또는 선구조와 같은 이방성을 나타내는 미세구조가 생겨난다(Fig. 2.3 and Fig. 2.4). 하지만 화성암과 변성암에서 이방성은 이암 및 셰일과 비교 시 상대적으로 낮은 편에 속한다.

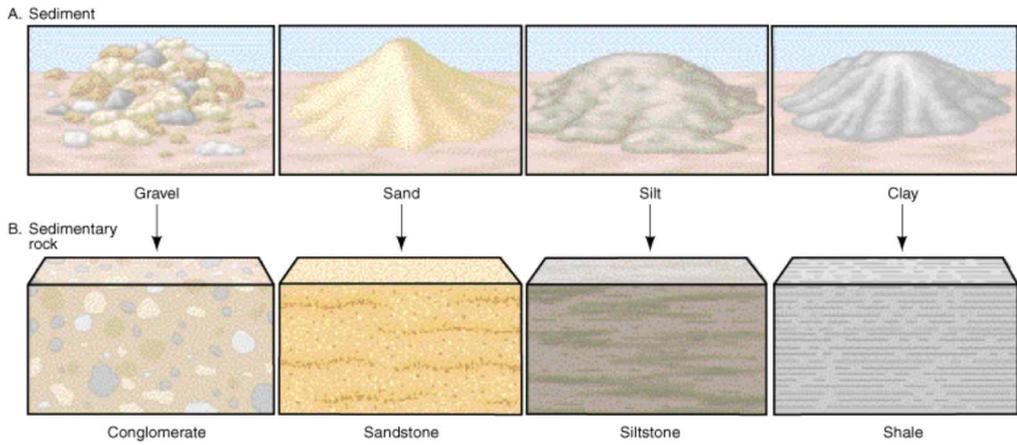


Fig. 2.1 Types of clastic sediments and sedimentary rocks(copyright 2000 John Wiley & Sons, Inc.)

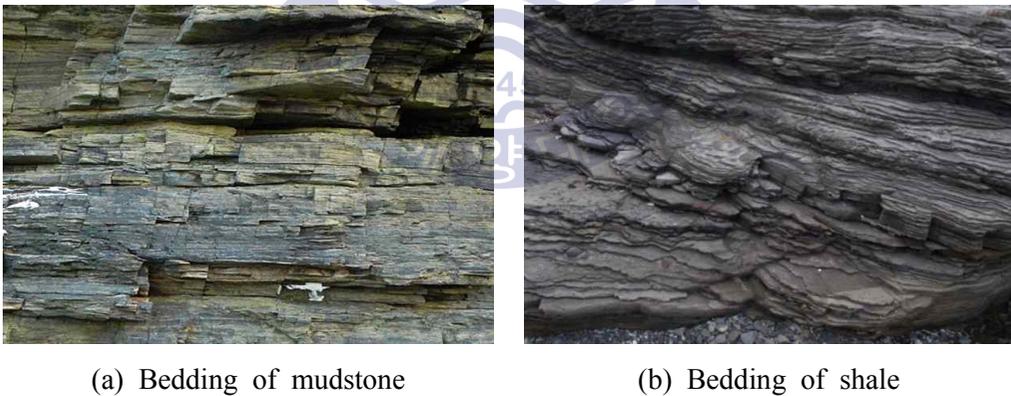


Fig. 2.2 Anisotropy structure of mudstone and shale(Moores and Twiss, 1995)

A.

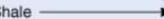
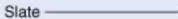
	Intensity of metamorphism 			
	Not metamorphosed	Low grade	Intermediate grade	High grade
Rock name	Shale 	Slate 	Phyllite 	Schist Gneiss
Foliation	None	Subtle	Distinct; schistosity apparent	Conspicuous; schistosity and compositional layering
Size of mica grains	Microscopic	Microscopic	Just visible with hand lens	Large and obvious

Fig. 2.3 Progressive metamorphism of shale(Moore and Twiss, 1995)



(a) Cleavage of slate

(b) Foliation of phyllite

Fig. 2.4 Anisotropy structure of slate and phyllite(Moore and Twiss, 1995)

2.2 대자율이방성

암석의 이방성을 확인하는 대표적인 방법으로는 정밀한 야외지질조사를 통하여 지층이나 절리, 단층 등의 여러 가지 선구조나 면구조의 방향성을 측정하여 종합적 해석을 도출하는 거시적인 방법(macro-structural analysis)과 암석시료를 채취한 후 박편을 제작하여 원래의 광물이나 이차생성 변성광물들의 쌍정과 배열(fabric), 파쇄상 등의 미세구조를 연구하는 미시적인 방법(micro-structural or petrofabric analysis)이 사용된다(조형성, 2014). 전자는 가장 전통적인 방법으로 암석공학 분야의 경험과 전문적인 지식이 요구된다. 후자의 방법은 어떤 지역의 지질구조는 표현 스케일에 제약을 받지 않고 미시적으로부터 이방성을 규명하는 방법으로 일반적으로 방향에 따른 탄성과 전달속도의 차이, 전기 전도도의 차이 그리고 대자율의 차이를 측정하는 방법이 있다(조형성, 2014).

이 중 연구에 적용한 대자율이방성(AMS : Anisotropy of Magnetic Susceptibility)은 세계적으로 통용되어 그 효용성이 입증되고 있다(Tarling and Hrouda, 1993; Borradaile, 1988; Henry et al., 2003; Martí-Hernández et al., 2004).

대자율이방성 연구는 미세자기구조(magnetic fabrics) 연구라고도 하는데, 암석의 자기학적 성질 중의 하나인 대자율을 이용한다. 자성을 가질 수 있는 물질을 외부자기장(H)에 노출시키면 그 물질은 자화되며, 자화강도(M)는 외부자기장의 크기와 물질의 자기적 성질에 비례하며 그 관계는 다음의 식(2.1)으로 표현된다.

$$M = \kappa H \quad (2.1)$$

여기서, κ : 물질의 고유한 자기적 특성을 결정하는 비례상수로 대자율(magnetic susceptibility)이라 한다. 일반적으로 대자율 κ 는 여섯 개의 독립성분을 가지는 텐서(tensor)로써 정의되며 대자율 텐서는 암석 시료에 대한 실험을 통해 결정하게 된다.

암석을 구성하는 광물이나 입자는 대자율의 크기에 기준하여 반자성(diamagnetic) 물질과 상자성(paramagnetic) 물질, 그리고 광의의 강자성(ferromagnetic) 물질로 구분되며, 반자성 물질의 대자율은 (-)값을 가지며 물질에 작용하는 외부자기장과 반대 방향으로 자화되며, 반자성 물질의 자화정도는 크기가 너무 작아서 효과는 거의 나타나지 않는다. 대표적인 반자성 광물로는 석영이나 장석류가 해당한다. 상자성 물질의 대자율은 (+)값을 가지는데 휘석류, 각섬석류, 감람석과 같이 철과 마그네슘을 가진 규산염광물이 이에 해당한다. 강자성 물질의 대자율은 (+)값을 가지며 높은 대자율을 보이며 크기는 온도나 외부자기장의 크기에 좌우되며, 강자성 물질은 일반적인 암석과 같이 상자성 물질에 비해 10,000이상의 대자율로 구분된다. 대표적인 강자성 물질로는 철금속의 소재로 활용되는 자철석이 강자성 물질에 해당하며, 그밖에 티탄자철석, 티탄철석, 자류철석 등이 이에 포함된다(Table 2.1).

Table 2.1. Magnetic susceptibility of various materials

Material	Magnetic susceptibility	Material	Magnetic susceptibility
흑연	-100	거정암	3,000 ~ 75,000
석영	-15.1	감람암	3,800 ~ 90,000
석고	-14.1	황철석(순수한)	35 ~ 65
암염	-10.3	황철석(광물)	100 ~ 5,000
대리석	-9.4	자류철석	$10^3 \sim 10^5$
돌로마이트(균질)	-12.5 ~ 44	적철석(광물)	420 ~ 10,000
돌로마이트(불균질)	20,000	티탄철석	$3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^6$
화강암 (자철석 없음)	10 ~ 65	자철석(광물)	$7.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^6$
화강암 (자철석 포함)	25 ~ 50,000	자철석(순수한)	1.5×10^7
현무암	1,500 ~ 25,000		

2.3 암석의 풍화

대기와 물이 있는 상태에서 나타나는 기온 변화, 화학적 변화 및 생물 작용이 지표 및 지표 부근의 굳은 암석을 기계적으로 파괴시켜 바위를 조각들로 만들고 이것을 더 작은 알갱이로 변하게 하는 기계적 풍화작용과, 암석을 화학적으로 분해하여 조암광물의 성분을 점차로 제거시켜 파괴되기 쉬운 물질로 변하게 하는 화학적 풍화작용을 합하여 풍화작용이라고 한다. 풍화는 지표부근의 암석의 구성 광물들이 새로운 물리적, 화학적 조건하에서 안정화 산물로 되어가는 붕괴과정과 변질을 의미한다(Ollier, 1969). 초기 광물이 생성될 당시의 온도와 압력은 현재와는 현저하게 차이가 있으며, 그 변화된 기온과 환경에 적응하여 안정되게 된다.

암석이 풍화작용을 받은 결과로 토양이 생성된다. 기계적 및 화학적 풍화작용은 단독으로 설명될 수 있는 현상이지만 이 두 작용은 언제나 동시에 일어난다. 다만 한랭한 지방에서는 기계적 풍화가 우세하게 일어나고, 온난 다습한 곳에서는 화학적 풍화가 우세하다. 중위도지방에서는 두 가지 풍화가 거의 비슷한 강도로 일어난다고 알려져 있다. 풍화작용으로 생성된 암석의 풍화산물은 풍화를 받은 부근에 머물게 되나 광물 중에서 용해되어 탈출한 성분은 빗물에 씻겨서 먼 곳으로 운반된다. 일부 대기 중의 어떤 성분과 물의 추가로 초기에는 풍화산물의 무게가 증가하기도 하지만 결국에는 용탈(溶脫)되는 성분 때문에 처음 무게보다 가볍게 변하게 된다. 침식작용과 운반작용은 풍화산물을 원위치에서 제거하는 작용으로 풍화작용과는 별개의 작용이지만 이들의 작용은 늘 풍화작용과 함께 일어나서 풍화작용을 촉진시킨다.

풍화는 지질학 이외의 다양한 학문에서 다루어지고 있다. 풍화에 따른 원소의 이동과 2차 광물의 형성은 암석학, 지구화학, 점토광물학에서 다루게 된다. 또 토양 중에 포함된 원소들이 지하수의 유동으로 인하여 암석의 성분에도 영향을 미치게 되므로 지하수 및 지구환경의 측면에서도 다루어지고 있다.

또한 최근 건설현장에서도 터널 및 사면 설계 시 종래에 적용하던 기존의 정성적인 암반분류방법에 추가적으로 광물의 조성과 풍화를 고려한 풍화지수를 적용하여 암석의 화학적 풍화를 고려하고 있는 추세이다. 그러므로 풍화에 수반되는 암석의 화학적, 물리적, 역학적 특성 변화에 관한 자료의 축적과 연구가 요구되고 있다.

2.3.1 물리적(기계적) 풍화작용

암석의 물리적 또는 기계적 풍화작용은 기온변화에 의한 동결작용과 생물에 의한 물리적 작용으로 일어나는 것으로 암석에 틈이 생기고 이 틈이 커지면서 더 많은 틈이 생기게 되어 바위가 작은 조각들로 변하는 작용이다. 산비탈에 걸쳐 있는 모서리가 예리한 돌덩어리들의 무더기는 동결작용으로 겨울에 만들어진 것들이 사면을 따라 아래로 이동하고 있는 것들이다. 온도의 변화로 생기는 암석 표면부의 팽창과 수축의 반복과 암석의 조암광물들이 각각 다른 팽창률을 가졌기 때문에 암석이 오랫동안 파괴된다고 생각되어 왔으나 물이 없는 상태에서 일어나는 온도변화는 쉽게 기계적 풍화를 일으킬 수 없다는 사실이 알려져 있다.

2.3.2 화학적 풍화작용

화학적 풍화는 대기 중의 산소, 이산화탄소, 물(지하수와 지표수) 및 생물과 유기물이 암석에 화학적인 작용을 일으키는 것으로 산화, 탄산화, 이온이탈, 수화 및 가수분해 작용으로 요약된다. 이들 작용은 대체로 동시에 발생하게 되며, 이런 작용으로 암석 중의 K_2O , Na_2O , CaO , MgO 등의 염기가 수용액으로 되고 Cl_2 , SO_4 , HCO_3 , CO_3 등의 이온도 물에 녹아 이동하다가 결국 바다로 들어가고 만다. 건조지대의 호수물에 들어간 염기와 이온은 화합한 후에 침전하여 가용성 염류의 층을 침전시킨다(Choi, 2011).

화학적 풍화로 용탈되는 원소의 양과 이동도는 광물을 구성하는 원소의 종류

에 따라 달라진다. 조암광물에서 이동성이 높은 화학종으로는 알칼리금속과 알칼리토금속은 K_2O , Na_2O , CaO , MgO 이 대표적이며 이동성이 낮은 화학종으로는 TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , P_2O_5 가 있다. 풍화로 인해 광물을 구성하는 원소는 천천히 용탈되며, 일반적으로 용탈되는 양과 속도는 원소에 따라 달라진다. 이동성의 차이를 보이는 화학종의 비를 측정함으로써 변질광물의 형성과 풍화의 정도를 나타낼 수 있고, 결국 풍화지수는 풍화가 진행되는 동안 이동성이 없는 성분에 대한 이동성이 높은 성분이 어느 정도 결핍되어 있는가를 측정하는 것이다. 풍화단계별 암석의 전암성분을 분석하여 정량적인 풍화를 관찰하기 위한 시도가 지속하였고 다양한 형태의 풍화지수가 제안되었다(Choi, 2011; Choi et al., 2012).

화학적 풍화에 따르는 조암광물의 안정성은 그 종류에 따라 다르다. 조암광물은 유색광물이 화학적 풍화에 약하고, 석영이 강하여 풍화에 대한 조암광물의 저항의 강도는 보우웬 반응계열을 따른다. 장석에서는 칼륨장석보다 칼리장석이 화학적 풍화에 강하다(Choi, 2011).

마그마가 고결할 때, 조암광물의 정출순서는 불연속계열은 ① 감람석 - ② 휘석류 - ③ 각섬석류 - ④ 흑운모 - ⑤ 장석 - ⑥ 백운모 - ⑦ 석영의 순서로, 연속계열은 ① 칼슘사장석 - ② 나트륨 사장석 - ③ 칼리장석의 순서가 된다. 화학적 풍화에 대한 안정성은 이들의 정출순서와 같은 순서로 커진다. 그러므로 고철질(염기성)인 암석일수록, 먼저 정출된 광물일수록 화학적 풍화에 약하다(Choi, 2011).

한편 지각을 구성하는 암석은 30~70 %의 많은 장석을 포함하고 있으며, 장석의 풍화는 이를 포함한 암석의 파괴를 의미한다. 장석류는 풍화하여 고령토로 변하고, 이에 철분이 섞이면 점토가 된다. 고령토가 더 풍화되어 규산분이 용탈되면 보크사이트로 변하고, 진흙이 같은 작용을 받으면 라테라이트(紅土)가 생성된다. 이들은 지표에서 일어나는 화학적 풍화의 최종산물이다(Choi, 2011).

풍화로 만들어진 변질광물은 풍화과정의 단계에 따라 생성물이 달라지며 이를 분석함으로써 풍화경로를 예측할 수 있다. 장석은 풍화과정에서 비정질상, 마이텔라이트, 할로이사이트와 버미쿠라이트(Jeong and Kim, 2002), 스멕타이트(Banfield and Eggleton, 1988), 카올리나이트의 순서로 변질광물을 생성하며, 흑운모는 풍화에 의해 일라이트, 질석(Banfield and Eggleton, 1988), 깃사이트(Gilkes and Suddhiprakarn, 1979a, 1979b), 카올리나이트(Harris et al., 1985; Rebertus et al., 1986) 등의 변질광물을 생성한다.

2.3.3 생물학적 풍화작용

식물은 암석의 풍화 및 흙의 형성에 큰 영향을 주는데 나무의 뿌리는 암석의 균열을 확장시키며, 풍화암을 풍화토로 변화시킨다. 굴을 파는 동물들도 암석의 기계적 붕괴에 영향을 미치며, 박테리아와 곰팡이는 유기물의 분해에 큰 역할을 한다. 또 박테리아의 작용은 라테라이트나 보크사이트와 같은 잔류광상의 형성에도 큰 역할을 한다(Choi, 2011).

2.4 풍화지수

기존의 풍화와 관련된 연구로는 조암광물의 풍화에 대한 정도를 나타내는 광물학적 연구(Goldich, 1938)를 시작으로 암석의 화학조성변화(Barth, 1948) 및 역학적 성질의 변화에 대한 연구 등 다양한 연구가 이루어져 왔다. 또한, 지구화학적인 연구로는 풍화에 따른 암석의 화학조성 변화와 주요 원소의 상대적 이동에 대하여 국내외에서 많은 연구결과가 발표되었다(Nam, 1971, 1987; Nam and Cho, 1993; Chesworth, 1973; Delvaux et al., 1989; Marsh, 1991; Condie et al., 1995). 특히 화학적 풍화에 의한 미량원소의 거동과 상대적 이동에 대하여 국외에서 다양한 연구가 수행되었다(Nesbitt, 1979; Duddy, 1980; Cullers et al., 1987; Cullers, 1988). 이와 관련해서 3.2.3절에서 좀 더 자세히 설명하도록 하겠다.

풍화에 의한 암석의 물리적·역학적 성질의 변화는 암반의 공학적 효용성을

크게 변화시킨다(김성수와 박형동, 1999). 그래서 풍화에 따른 풍화등급의 분류가 제시되었다(Dearman, 1976; Dearman et al., 1978).

Irfan and Dearman (1978)은 암석의 흡수율, 밀도, 점하중 강도 및 일축압축강도 시험을 통해 화강암의 풍화등급을 정량화 하였으며, Lee and De Freitas (1988)는 암석의 풍화내구성지수를 이용하여 풍화암의 정량화를 제안했으며, 화강암을 대상으로 일축압축강도, 흡수율, 점하중강도, 슈미트해머, 관입저항치 등을 풍화지수로 하여 6등급의 풍화도로 분류하였다. 암석의 풍화상태에 대한 분류는 여러 가지가 제안되고 있으며 일반적인 분류기준은 Table 2.2와 같다. 이와 관련해서 3.3.3절에서 좀 더 자세히 설명하도록 하겠다.

이수곤(Lee, 1993)은 국내 화강암을 풍화정도에 따라 6등급으로 제안하였으며, 실내시험 결과를 토대로 풍화도에 따라 값의 범위를 설정하였다. 정형식과 유병옥(1997)은 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구에서 6개의 암종에 대한 일축압축강도, 점하중지수, 슈미트해머 반발수치, 흡수율 및 이방성 특성을 규명하고자 하였으며, 김성환 등(1997)은 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성에 관한 연구를 통해 6개의 암종에 대해 수행된 암석시험 결과의 상관성 분석으로 암석강도를 추정하는 방법을 제안하였다. 하지만 이들 방법은 현재 상태의 암반등급과 강도를 규명하는데 제한적이며 유지관리 조건을 반영한 미래 상태의 암반등급 및 강도 평가는 할 수 없다. 이와 관련해서 2.5.2절에서 좀 더 자세히 설명하도록 하겠다.

Table 2.2 Classification of rock weathering conditions(choi, 2011)

States of weathering	ISRM(1981) / BSI 5930	Lee and de Freitas(1988)
Fresh	All rock material converted to soil: mass structure and material fabric destroyed. Significant change in volume	Feldspars can not be scratched with knife. Sample requires many blows of geological hammer to fracture it. (High to very high strength; approximate range of UCS is 125-260 MPa. QAI is 0.17-0.3810, PLS is 9-18 MPa. SHV is 59-62 for moisture content range 0.06-0.3010).
Slightly weathered	All rock material decomposed and/or disintegrated to soil. original mass structure still largely intact	Feldspars can not easily be scratched with knife. Sample requires more than one blow of geological hammer to fracture it. Slightly weaker than the fresh rock. (High strength; approximate range of UCS is 100-170 MPa. QAI is 0.24-0.88 %, PLS is 5-12.5 MPa, SHV is 51-56 for moisture content range 0.15-0.29 %).
Moderately weathered	More than 50 % of rock material decomposed and/or disintegrated to soil. Fresh/dicoloured rock present as discontinuous framework of corestones	Feldspars can be noticeably scratched with a knife, can not be peeled by a knife. Sample can be fractured with single firm blow of geological hammer, NX core can not be broken by hand. Can not be excavated with a spade. Considerably weaker than the fresh rock. (Medium strength: approximate range of UCS is 60-120 MPa. QAI IS 0.69-1.56 % PLS is 2-6 MPa, SHV is 37-48 for moisture content range 0.25-0.45 %).

*UCS. Uniaxial Compressive Strength; QAI. Quick Absorption Index; PLS, Point Load Strength; SHV. Schmidt Hammer Value; HPV, Hand Penetrometer Value.

Table 2.2 Classification of rock weathering conditions(continued)

States of weathering	ISRM(1981) / BSI 5930	Lee and de Freitas (1988)
Highly weathered	Less than 50 % of rock material decomposed and/or disintegrated to soil. Fresh/dicoloured rock present as continuous framework of corestones	Feldspars can be peeled by a knife with difficulty. Sample can not be indented by a geological pick or knife can be crumbled under firm blows with geological hammer, NX cores may be broken by hand with difficulty, can be excavated with a spade with great effort, can not be disintegrated by agitation in water. Significantly weaker than the fresh rock. (Low strength; approximate range of UCS is 35-55 MPa. QAI is 2.48-5.3 %, PLS is 0.3-0.9 MPa, SHV is 12-21 for moisture content range 0.37-3.8 %).
Completely weathered	Discoloration indicates weathering of rock material and discontinuity surfaces. All rocks material may be discoloured by weathering and may be weaker than in its fresh condition	Feldspars can be readily peeled by a knife. Sample can be readily indented by a geological pick or knife, can not be indented by thumb, can be excavated by hand with difficulty, can be disintegrated by agitation in water. Loses most of strength of fresh rock. (Dense to very dense: approximate range of UCS is 0.05-0.12 MPa. PLS & SHV are not available. HPV is sometimes achieved ranging over 0.38 MPa for moisture content range 7.84-21.00 %).
Residual soil	No visible sign of rock material weathering, perhaps slight staining of major discontinuity surfaces	Feldspars can be readily peeled by a knife. Sample can be indented by thumb with moderate effort, can be easily excavated by hand, can be disintegrated by agitation in water. Loses most of strength of fresh rock. (Loose to dense: approximate range of UCS is 0.03-0.05 MPa, PLS & SHV are not available, HPV is generally achieved ranging 0.24-0.35 MPa for moisture content range 12.24-22.10 %).

*UCS. Uniaxial Compressive Strength; QAI. Quick Absorption Index; PLS, Point Load Strength; SHV. Schmidt Hammer Value; HPV, Hand Penetrometer Value.

2.5 암반등급과 암반정수 산정

2.5.1 암반의 분류 기준

암반의 분류기준은 일반적으로 지질학적 분류, 품셈에 의한 분류, 공학적 분류가 있고, 이중 지질학적 분류는 지질연대에 의한 분류와 성인에 의한 분류로 나누어진다(Table 2.3). 지질연대에 따른 분류는 지층의 층서와 암석의 경년을 기준으로 한 연대에 따라 대(代, Era), 기(紀, Period), 세(世, Age)로 구분한다. 암석을 생성조건에 따라 분류하는 방법은 먼저 1단계로 생성과정에 따라 화성암, 변성암, 퇴적암의 3가지로 구분한 다음 암석의 생성조건과 조암광물의 종류 및 성분, 쇄설물의 입경, 결정구조 등에 따라 세분화한다(Fig. 2.5).

Table 2.3 Criterion of rock classification

구분	분류 방법	개요
지질학적 분류	<ul style="list-style-type: none"> 성인에 따른 분류 	<ul style="list-style-type: none"> 암석의 생성조건에 따라 분류
품셈에 의한분류	<ul style="list-style-type: none"> 지반조사에 의한 분류 탄성과 속도에 따른 분류 일축압축강도에 의한 분류 토공 작업성에 의한 분류 	<ul style="list-style-type: none"> 지반조사 시 암반분류기준에 의거 해머타격 및 탄성과 속도에 의한 분류 암석의 강도특성에 따른 분류 RQD, TCR, 탄성과 속도에 따른 분류
공학적 분류	<ul style="list-style-type: none"> RQD를 이용한 분류 RMR을 이용한 분류 Q-System에 의한 분류 	<ul style="list-style-type: none"> 시추조사시 회수된 Core를 이용 암반상태를 등급화 하여 분류 터널공사의 영향을 등급화

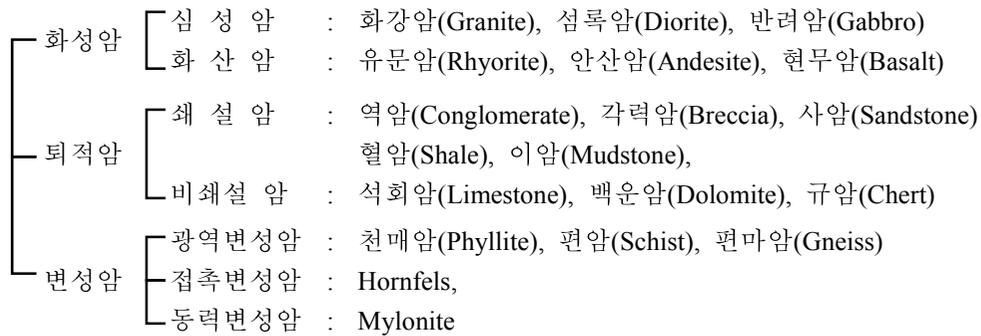


Fig. 2.5 Classification of rocks based on formation

2.5.2 암반정수 산정

기존의 암반분류는 현재 상태의 암반등급을 규명하는 방법에 제한적이며 유지관리 조건을 반영하여 미래 상태의 암반등급 평가는 단순히 슬레이크 내구성이나 풍화광물의 정성적 평가에 머물러 있다.

국내 화강풍화암에 대한 공학적 특성 구명에 관련된 연구는 풍화잔류토에 대한 공학적 특성 평가와 지질학적 특성을 바탕으로 한 풍화도 평가 및 암반 분류법에 의한 강도정수 추정에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. 국외의 경우 풍화도가 높은 암반에 대한 공학적 특성 연구는 1980년대부터 활발히 시도된 것으로 알려져 있는데, 대상 암반을 넓은 의미로 연약암(weak rock)이라 표현하여 국내에서 풍화암, 연암 및 경암으로 통용되는 관점과는 다소 차이가 있다. 이에 대한 국외 연구동향은 크게 풍화도 평가법, 암반정수 평가, 원위치시험방법, 암반의 정·동적 강도 변형 특성 및 투수특성 등으로 분류되어 상당히 다양한 분야에 심도 있는 연구가 진행되었다. Table 2.4는 퇴적암 특히 이암과 셰일에 대한 풍화도에 따른 암의 공학적 특성변화와 관련된 지금까지의 국내의 대표적인 연구 결과이다.

Table 2.4 Previous studies of weathering degree evaluation of sedimentary rocks

Title	Main content	Reference
포항이암층의 slaking 팽창 전단강도 특성	<ul style="list-style-type: none"> 이암은 건습이 반복시 slaking, 팽창이 발생하고 급속한 강도열화 현상 발생 비중 2.51, 자연함수비 14.5%, 건조단위중량 1.88kg/cm³ 잔류강도는 건습 반복횟수에 영향을 받으며, 5cycle 후 $\phi_r=28^\circ$, $C_r=0.25\text{kg/cm}^2$. 	한국지반공학회 이영휘(1996)
압축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성	<ul style="list-style-type: none"> 대구와 포항지역 퇴적암의 일축강도와 제반지수의 상관성을 제시 점하중과 단축강도: $\sigma_c=15.01 I_s(50)$, 흡수율과 단축강도: $\sigma_c=801.3 w-0.73$ 탄성파속도와 단축강도: $\sigma_c=122.35(Y.Vp2)0.55$ 슈미트햄머 반발치와 단축강도: $\sigma_c=7.6e0.09SHV$ 	한국지반공학회 이영휘 등(2000)
퇴적암의 풍화도에 따른 특성과 일축압축강도와 제반지수와의 상관성	<ul style="list-style-type: none"> 경상계 퇴적암의 지반정수와 일축압축강도와의 관계식 제시 점하중과 단축강도: $\sigma_c=17.323 I_s(50)$ 탄성파속도와 단축강도: $\sigma_c=102.48(Y.Vp2)0.6253$ 슈미트햄머 반발치와 단축강도 $\sigma_c= m^{5.0352}e^{0.1016}SHV$ 	한국지반공학회 이영휘 등(1998)
퇴적암의 공학적 특성 및 문제점	<ul style="list-style-type: none"> 대구 경북 지역에 분포하는 퇴적암은 퇴적환경에 의해 형성된 강도 이방성, 풍화에 의한 암반강도의 변화 층리면의 강도변화 내포 층리와 같이 고유 이방성을 가진 세일은 U형태의 이방성을 나타내며 비등방율이 2.3-3.7 정도를 보임 	한국암반공학회 이영휘 등(2002)
포항분지 제3기 이암의 크리프 특성	<ul style="list-style-type: none"> 포항 두호층 이암의 물성치 조사 진비중 2.45, 단위중량 1.79kg/cm³, 공극비 0.41, 공극률 29.07%, 흡수율 15.46%. 탄성계수 2.89x104kg/cm², 포와송비 0.30 	대한지질공학회 김광식 등 (2001)

Table 2.4 Previous studies of weathering degree evaluation of sedimentary rocks(continued)

Title	Main content	Reference
신생대 3기 퇴적암지역에서의 사면 및 교량 설계사례	<ul style="list-style-type: none"> • 물리적특성: 자연함수비 36-70%(평균: 37%), 액성한계 59 ~ 67%(평균: 63%), 소성지수 23 ~ 35%(평균: 30%), 비중 2.59 ~ 2.61(평균: 2.61), 습윤단위중량 1.70tonf/m³, 초기간극비 1.30 • 역학적특성: 비배수전단강도 0.32 ~ 0.34kgf/cm² (평균: 0.33kgf/cm²), 과압밀비 3.78, 압축지수: 0.41, 일축압축강도 83.15 ~ 104.88kgf/cm² (평균: 97.05kgf/cm²) 	한국지반공학회 이종범 외 (2007)
이암과 셰일의 지질공학적 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 이질암(이암)은 다른 암종에 비해 풍화 정도를 착각하여 더 신선한 상태로 판단하기 쉬워 풍화민감도 실험을 통해 판단 • 이질암에 대한 특성 분석은 슬레이크 내구성 실험, 팽창율 실험점토 성분 분석등과 지층구조와 암종의 정확한 해석들을 종합하여 현장설계에 바람직한 자료 제공 	암반역학위원회 학술세미나 문집 박형동(2002)
포항지역 이암의 Creep 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 일축강도(kg/cm²): 53 ~ 74 (평균: 63.5) • 탄성계수($\times 10^4$kg/cm²) 0.89 ~ 1.21 (평균: 1.07) • Creep rate($\times 10^{-4}$ hr): 1.00~16.20 (평균: 5.40) 	서울대학교 에너지자원 신기술연구소(1994)
포항분지 제3기층 두호층 이암의 크리프 거동	<ul style="list-style-type: none"> • XRD 분석결과: 석영 62.4%, 일라이트 18.4%, 사장석 9.5%, 녹니석 7.6%, 황철석 2.0%의 구성비 	대한지질공학회 논문집 김광식과 김교원 (2003)
포항, 대구지역 퇴적암의 물리, 역학적 특성에 관한 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 자연상태 174kg/cm², 건조상태 209kg/cm², 습윤상태 53kg/cm² 의 평균 일축압축강도를 나타냄 • pH 보다 온도에 대하여 Slaking에 영향을 줌 	대한자원환경지질 학술발표회 이승재 등(2000)

Table 2.4 Previous studies of weathering degree evaluation of sedimentary rocks(continued)

Title	Main content	Reference
일본의 이암/세일의 특징	<ul style="list-style-type: none"> 연암의 일축압축강도가 100-200kgg/cm²이하불연속면보다는 재료 자체의 물성에 좌우 퇴적 연암의 지질공학적 특성 중 연암은 홍적세 후기-신제3기 퇴적암으로 굴착후에 급속히 풍화가 진행 	한국암반공학회 윤지선(2002)
경상분지 세일 지역에서의 절토사면 파괴 특성	<ul style="list-style-type: none"> 경상분지 퇴적암은 세일, 사암, 이암의 퇴적암으로 구성되며, 층리경사는 10 ~ 20° 정도 사면파괴는 주로 층리면에 의한 평면파괴 형태가 우세 	한국암반공학회 김경석 등(2002)
이암/세일 지역에서의 터널 및 사면 시공시의 문제점	<ul style="list-style-type: none"> 다량의 점토광물 함유 Swelling strain은 1.0 ~ 6.4%로 나타나며, Medium durability 이상의 Slaking 지수를 보임 	한국암반공학회 이내용 등(2002)
경상분지 내 이암 및 세일지역에서의 붕괴사례	<ul style="list-style-type: none"> 국내 사면 붕괴 특성 대부분이 강우에 의한 것으로 확인되고 퇴적암등 저각도의 관상 불연속면을 따른 평면파괴 양상이 두드러짐 사면의 안정등급을 체계화함으로서 기존 사면은 물론 향후 조성대상 사면의 기본적인 불안정성을 파악하여 지질재해에 대비 	한국암반공학회 노병돈(2002)
이암의 공학적 특성과 이암층에서의 터널시공사례	<ul style="list-style-type: none"> 제3기 일본이암의 경우: 공극률이 1%에서 200Mpa, 10%에서 110Mpa, 20%에서 50Mpa, 40%에서 5Mpa의 강도를 나타냄(Hoshino, 1981) Lashkariporu & Nakhae의 관계식 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 점하중과 단축강도: $\sigma_c = 22.08 I_s(50)$ - 함수율과 단축강도: $\sigma_c = 79.51e^{-0.39w}$ - 공극율과 단축강도: $\sigma_c = 210.12n^{-0.82}$ 	한국터널공학회 지 이종만 외 (2001)

제 3 장 연구 방법

3.1 대자율이방성

화강암과 같이 마그마에서 기원된 암석은 형성 초기 등방성을 가지며, 외부에서 작용하는 압력의 방향과 크기에 의해 이방성(anisotropy)이 형성되며, 쇄설성 퇴적암은 층리와 사층리, 건열 등의 퇴적구조에 의한 이방성을 가진다. 광물의 대자율을 이용한 이방성 측정은 선구조와 엽리구조 등의 이방성 변형구조를 효과적으로 표현할 수 있다(Fig. 3.1).

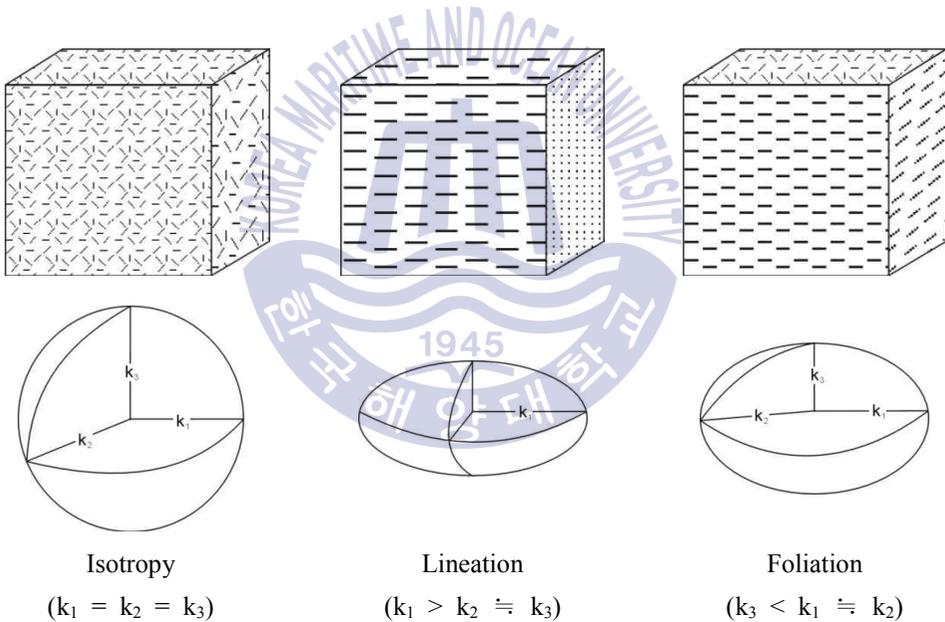


Fig. 3.1 Magnetic structures of rocks

암석에 외부자기장 H 를 가하면 유도자기 M 이 생성되는데, 그 관계는 식(3.1)과 같이 정의 된다.

$$\vec{M} = k\vec{H}, \quad k = \frac{\vec{M}}{H} \quad (3.1)$$

이때 k 를 그 암석의 대자율(volume magnetic susceptibility)이라고 한다. 암석의 대자율이 외부자기장의 방향(측정방향)에 무관하게 동일한 크기일 때 (즉, $k_1 = k_2 = k_3$) 그 암석은 자기적으로 등방성(magnetic isotropy)이라 한다. 방향에 따라 다른 경우에는 자기적으로 이방성(magnetic anisotropy)이라고 한다. 암석이 자기적으로 이방성이면 자기적 선구조(magnetic lineation, $k_1 > k_2 \approx k_3$)나 엽리구조(magnetic foliation, $k_3 < k_1 \approx k_2$) 혹은 이 두 가지 구조 모두를 가지게 된다.

대자율이방성텐서는 암석의 변형률텐서와 동일하며 이로부터 이방성을 해석할 수 있다. 각 시편에 대한 주축의 방향과 크기가 결정되며, 세 주축은 크기에 따라 k_1, k_2, k_3 는 변형력의 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 에 해당된다.

자기적으로 이방성인 경우 대자율(k)은 아래의 식(3.2)와 같이 대칭형의 2차(tensor of second order)가 되어 응력텐서(stress tensor)처럼 3×3 대칭행렬로써 표현된다.

$$\vec{M}_i = k_{ij}H_j \quad \begin{pmatrix} \vec{M}_1 \\ \vec{M}_2 \\ \vec{M}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{M}_1 \\ \vec{M}_2 \\ \vec{M}_3 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

이 이방성텐서로부터 고유벡터(eigenvector)와 고유값(eigenvalue)을 계산하면 각 시편에 대한 주 대자율축의 방향과 크기가 결정된다.

이 세 주축은 크기에 따라 k_1, k_2, k_3 로 표시되며, 서로 수직인 세 주축의 상대적 크기는 대자율 비등방타원체의 모양을 결정하며 이로써 자기적 엽리구조(magnetic foliation)와 선구조(magnetic lineation)가 판별된다(Woodcock, 1977; Boas, 1983; Davis, 1986; 김인수, 1990). 대자율 이방성의 크기 및 자기적 선구조와 엽리구조의 발달정도를 표현하는 여러 가지 공식이 알려져 있다(Tarling,

1983; Tarling and Hrouda, 1993).

이 연구에서는 대자율 비등방 타원체(Ellipsoid of AMS)의 3주축 ($k_1 > k_2 > k_3$)을 결정한 후, 대자율 이방성의 크기 정도는 Jelinek (1981)이 제안한 식(3.3)을 사용하였다. 선구조와 엽리구조의 판단기준으로는 대자율 타원체의 모양지수(shape parameter; T)는 Jelinek(1981)과 Hrouda(1982)의 식(3.4)를 사용하였다.

$$P_J = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]} \quad (3.3)$$

여기서, $\eta_1 = \ln k_1$, $\eta_2 = \ln k_2$, $\eta_3 = \ln k_3$, $\eta_m = \sqrt[3]{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$ 이다.

$$T = [2(\eta_2 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)] - 1, \quad (-1 \leq T \leq 1) \quad (3.4)$$

각 시편의 P_J 와 T를 계산한 후 각 지점별 우세한 자기적 구조를 판단하기 위하여 T- P_J 다이아그램(Jelinek, 1981; Hrouda, 1982)상에 도시하였다.

시편별로 계산치의 대다수가 T- P_J 다이아그램의 Prolate영역에 도시되면, 그 노두에서는 흐름에 의한 선구조(lineation)가 우세한 것으로 해석할 수 있으며, 그 흐름의 방향은 k_1 방향이 된다. 반면, 계산치의 대다수가 Oblate영역에 도시되면 그 노두에서는 지층의 형성 당시 상부지층의 하중이나, 지구형성적 응력에 의해서 엽리구조(tectonic foliation)가 형성된 것으로 해석되는데, 이때 작용된 힘의 방향은 k_3 축의 방향이 된다. k_3 축의 방향이 층리면과 수직하면 지층 하중에 의해 작용한 힘(load foliation)으로, 반면 층리면과 평행한 경우 지구조적 응력에 의한 것으로 볼 수 있다(김인수, 1990).

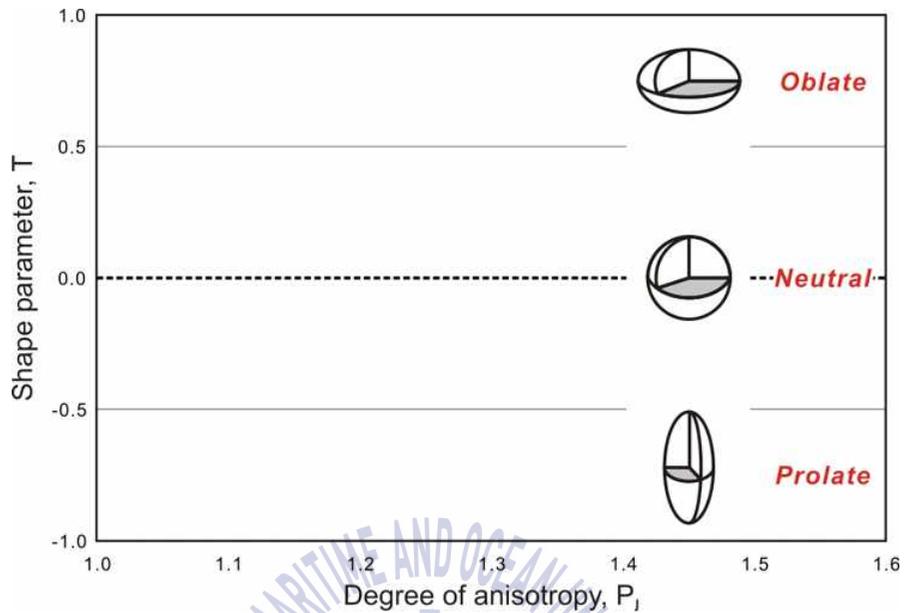


Fig. 3.2 T-P_j diagram(Jelinek, 1981; Hrouda, 1982)

한편 전통적으로 자기적 선구조(L)와 엽리구조(F)의 판단기준으로 사용된 Balsley & Buddington(1958, 1960)의 $L = k_1 / k_2$ 식과 Stacey et al. (1960, 1961)의 $F = k_2 / k_3$ 식을 이용하여 Flinn 다이어그램(Flinn, 1962)을 작성하여 비교자료로 활용할 수 있다(Fig. 3.3). 하지만 본 연구에서는 T-P_j다이어그램(Jelinek, 1981; Hrouda, 1982)을 주로 사용하였다.

이상과 같은 원리를 바탕으로 대자율이방성 연구를 통한 암석에 포함된 입자들의 방향성, 형태 그리고 배열상태 등의 총체적인 미세구조 해석이 가능하다. 대자율이방성 원리에 대한 더욱 자세한 설명은 Hrouda(1982), Tarling and Hrouda(1993), Borradaile and Henry(1997), Tauxe(2002), Martí-Hernández et al. (2004) 등에 상세히 소개되어 있다(조형성, 2014).

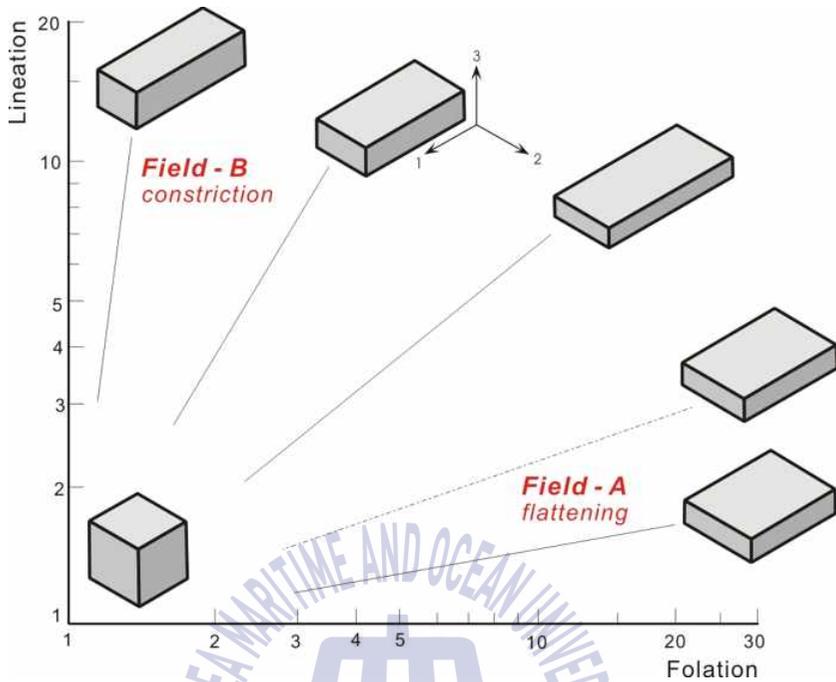


Fig. 3.3 Flinn diagram(Nagata,1961; Collinson, 1983)

대자율이방성 측정하기 위해서는 현장에서 채취된 시료를 실험실에서 직경 2.54cm, 높이 2.3cm의 원주형 시편으로 절단하였다(Fig. 3.4). 모든 대자율 비등방성 측정작업은 자기세척작업 이전에 실시되었다. 특히 건물이 자기력 측정에 미치는 간섭을 방지하기 위해 철근건물로부터 격리된 목조건물에서 Molspin Minisep 대자율 측정기를 이용 측정하였다(Fig. 3.5).



Fig. 3.4 Photograph of samples for magnetic susceptibility tests



(a) Magnetic susceptibility tester

(b) Anisotropy tester

Fig. 3.5 Magnetic susceptibility test; (a) Magnetic susceptibility tester and (b) Anisotropy tester

3.2 퇴적암의 풍화도

3.2.1 개요

암석의 풍화정도를 정량화하는 방법으로 화학적 풍화특성을 이용한 다양한 화학적 풍화지수가 이용되고 있다. 탄성과 속도, 흡수율, 밀도, 일축압축강도 등을 이용한 물리적 풍화도 풍화평가로 주로 이용되고 있다(이영휘, 1996; 이영휘 등, 1998, 2000, 2002).

3.2.2 전암분석

화학적 풍화지수는 화학반응 전의 광물 함유량과 반응 후 생성물 함유량의 비로 표현되는데 암석의 화학적 풍화과정이 서로 다르게 나타나므로 암석의 종류에 따라 다양한 지수가 제안되고 있다.

화학적 풍화지수는 2장에서 설명한 바와 같이 X-선 형광분석(XRF, 전암분석)으로 주로 암석의 화학적 특성을 검증하고 대비하기 위해 암석의 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 등의 성분을 분석하고 그 함량을 측정하는 것이다. 전암분석을 통하여, 암석종의 판단과 동일 암석의 주구성 성분의 변화를 분석 비교함으로써 화학적 풍화가 어느 정도 진행되었는가를 예측할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있다. 풍화에 의해 암석중의 원소는 천천히 용탈되어 버리며, 일반적으로 용탈되는 양과 속도는 원소에 따라 달라지며, 이것을 이용해서 이동성이 큰 화학종 (Na_2O , CaO , K_2O , MgO)과 이동성이 작은 화학종 (TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)과의 비를 측정함으로써 풍화의 정도를 나타낼 수 있다. 그러므로 풍화지수는 풍화가 진행되는 동안 이동성이 없는 성분에 대한 이동성이 높은 성분이 어느 정도 결핍되어 있는가를 측정하는 것이다.

3.2.3 화학적 풍화지수

화학적 풍화는 현 상태뿐만 아니라 유지관리 동안 예상되는 풍화를 정량화하기 위한 방법으로 전암분석은 광물의 화학적 조성을 검증하고 대비하기 위해 암석의 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 등의 성분을 분석하고 함량비에 따라 풍화의 진행을 예측할 수 있다.

풍화지수와 관련된 연구는 암석을 구성하는 조암광물의 풍화를 나타내는 광물학적 연구(Goldich, 1938)를 시작으로 다양한 연구가 이루어져 왔다. 특히 화학적 풍화지수는 풍화를 받기 이전의 광물 조성과 풍화반응 후 생성물의 함량비로 표현되는데 암석마다 풍화과정이 서로 다르게 나타나므로 암석의 종류에 따라 다양한 지수가 제안되었다. 그중에서 풍화에 의해 암석의 화학조성 변화와 주요 원소의 상대적 이동에 이용한 지구화학적인 선행연구가 활발하였고(Nam, 1971, 1987; Nam and Cho, 1993; Chesworth, 1973; Delvaux et al., 1989; Marsh, 1991; Condie et al., 1995; Chang, 2003; Choi, 2011), 특히 화학종의 함량 변화에 기초한 풍화지수들이 제안되었다(Vogt, 1927; Reiche, 1943; Ruxton, 1968; Parker, 1970; Vogel, 1975; Nesbitt and Young, 1982; Sueoka, 1988; Harnois, 1988; De Jayawardena and Izawa, 1994; Fedo et al., 1995).

전암분석을 이용하여 계산된 풍화지수는 지반을 구성하는 암석과 토양의 화학조성으로 풍화정도를 정량적으로 산정하는 방법으로 여러 연구자들에 의해 제안된 방법들이 있다.

화학적 풍화지수는 Vogt(1927)가 제안한 Vogt 비(V, Vogt ratio)가 가장 최초로 식(3.5)와 같이 제안되었으며, 이후 Reiche(1943)는 풍화지수를 풍화잠재지수(WPI, Weathering Product Index)와 생성물지수(PI, Product index)로 구분하여 식(3.6)과 식(3.7)을 제안하였다.

$$V = \frac{Al_2O_3 + K_2O}{MgO + CaO + Na_2O} \quad (3.5)$$

$$WPI = \frac{[K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O]}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \quad (3.6)$$

$$PI = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2} \quad (3.7)$$

풍화잠재지수(WPI)의 감소는 이동성이 큰 양이온이 감소하고 수산화물이 증가하는 것을 반영하며, 풍화산물지수 (PI)는 화학적 풍화의 주된 변화는 SiO₂ 및 유동성 원소의 감소와 수분 (H₂O⁺)의 증가로 풍화정도를 표현되며, PI가 감소하는 것은 풍화가 진행됨에 따라 실리카가 감소되는 것을 반영한 것이다.

Ruxton(1968)은 풍화과정 중 알루미늄은 일정하게 남는다는 가정 하에 풍화가 진행될 때 암석요소의 손실은 실리카의 손실에 의한 것으로 가정하여 SAR (Silica-Alumina Ratio)을 식(3.8)과 같이 제안하였다. 그러나 이 지수는 화강암과 석영반암과 같은 산성암에는 적합하지만, 염기성 또는 초염기성암에서는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다(Irfan, 1996).

$$SAR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (3.8)$$

Parker(1970)는 알칼리성 광물비 및 광물 부착강도를 토대로 파커지수(W_p; Parker Index)를 식(3.9)와 같이 제안하였다. 이는 가수분해(hydrolysis)가 실리카 풍화의 주된 화학적 반응의 요소가 되는 환경에서는 산성 및 염기성 암석 모두에 적용할 수 있다는 장점이 있다.

$$W_p = \left[\frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.9} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.7} \right] \text{ (molar basis)} \quad (3.9)$$

Miura(1973)는 제1철 (ferrous iron)과 제2철 (ferric iron)간의 이동성을 고려하여 식(3.10)과 같은 MI(Miura Index)를 제안하였다.

$$W_p = \left[\frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.9} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.7} \right] \text{ (molar basis)} \quad (3.10)$$

Vogel(1975)이 제안한 변형된 풍화산물지수(MWPI, Modify Product Index)는 식(3.11)과 같이 표현된다.

$$MWPI = \left[\frac{K_2O + Na_2O + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O + CaO + MgO} \right] \times 100 \quad (3.11)$$

Nesbitt and Young(1982)가 제안한 화학적 풍화지수 CIA(Chemical Index of Alteration)는 식(3.12)와 같이 표현되며, 이 지수(CIA)는 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 풍화지수이다.

$$CIA = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right] \times 100 \quad (3.12)$$

Harnois(1988)는 화학적 풍화지수(CIA)에서 K₂O의 함량을 제외시킨 지수로 화학적 풍화지수 CIW(Chemical Index of Weathering)를 식(3.13)과 같이 제안했다. 화학적 풍화지수는 50~100 사이의 값의 범위를 나타내며, 풍화지수와 풍화와는 정의 상관성을 가진다.

$$CIW = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right] \times 100 \quad (3.13)$$

Sueoka(1988)는 화강암이 전 세계적으로 분포되어 각기 다른 풍화환경에 따라 풍화정도가 다르기 때문에 조암광물의 화학적인 변화로서 풍화도를 분류하였

다. 이는 식(3.14)와 같이 제안되었으며, 제안된 화학적 풍화지수가 암반 및 풍화토에 대하여 풍화과정 전체를 표현할 수 있고 공학적 목적에도 부합한다고 하였다.

$$CWI = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{\text{all chemical components}} \text{ (molar basis)} \quad (3.14)$$

De Jayawardena(1994)는 Al_2O_3 , SiO_2 및 TiO_2 의 관계로부터 Si-Ti index와 Al-Ti Index를 식(3.15), 식(3.16)과 같이 제안하였다.

$$Si - Ti Index = \frac{SiO_2 / TiO_2}{(SiO_2 / TiO_2) + (SiO_2 / Al_2O_3) + (Al_2O_3 / TiO_2)} \quad (3.15)$$

$$Al - Ti Index = \frac{Al_2O_3 / TiO_2}{(SiO_2 / TiO_2) + (SiO_2 / Al_2O_3) + (Al_2O_3 / TiO_2)} \quad (3.16)$$

Irfan(1996)은 신선한 암석과 풍화암에 대한 K_2O , Na_2O , CaO 와 같은 이동성이 큰 물질의 함량을 이용하여 Mobile Index(I_{MOB})를 식(3.17)과 같이 제안하였다.

$$Mobile Index(I_{Mob}) = (Mob_{Fresh} - Mob_{Weathered}) \quad (3.17)$$

여기서, Mob_{Fresh} : 신선한 암석의 ($K_2O + Na_2O + CaO$) 함량, $Mob_{Weathered}$: 풍화암의 ($K_2O + Na_2O + CaO$) 함량이다.

Table 3.1은 연구에 적용한 풍화지수를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 3.1 Summary of weathering indices (if calculated using molecular proportions of elements oxides) evaluated in this study(modified from Price and Velbel, 2003).

Index	Formula	Fresh value	Weathered value
V	$(Al_2O_3+K_2O)/(MgO+CaO+Na_2O)$	<1	Infinite
SAR(R)	SiO_2/Al_2O_3	>10	0
WP(WIP)	$((2Na_2O/0.35)+(MgO/0.9)+(2K_2O/0.25)+(CaO/0.7))\times 100$	>100	0
CIA	$(Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O))\times 100$	≤ 50	100
CIW	$(Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O))\times 100$	≤ 50	100
Si-Ti Index	$((SiO_2/TiO_2)/((SiO_2/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)+(Al_2O_3/TiO_2)))\times 100$	>90	0
PIA	$((Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO-Na_2O-K_2O))\times 100$	≤ 50	100

※ V: Vogt ratio (Vogt, 1927), SAR(R): Silica-Alumina Ratio (Ruxton, 1968), WP(WIP): Weathering Index of Parker (Parker, 1970), CIA: Chemical Index of Alteration (Nesbitt and Young, 1982), CIW: Chemical Index of Weathering (Harnois, 1988), Si-Ti Index: Silica-Titania Index (De Jayawardena and Izawa, 1994), PIA: Plagioclase Index of Alteration (Fedo et al., 1995).

Table 3.1과는 별개로 Sueoka et al.(1988)은 강열감량(LOI, Loss on ignition) 자체가 화학적 풍화지수가 된다고 제안하였다. 강열감량은 시료를 950℃로 30분간 가열시 감소되는 양을 백분율로 표시한 양으로 시료에서 H₂O의 양을 나타낸다. Gupta & Rao(2001)는 13개 암종에 대한 암석학적 특성을 분석하고 풍화등급을 정리하였는데, 화학적 풍화지수는 모든 암종에 대한 합리적인 풍화등급을 정리하기는 어려우나 강열감량은 거의 모든 암종에 대하여 풍화지수로써 활용이 가능할 수 있다고 제안하였다. 강열감량은 소실되는 물질의 구성비로 풍화풍화가 진행됨에 따라 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나므로 풍화지수와와의 직접적인 비교가 간편하다.

본 연구에서 특히 Nesbitt(1982)가 제안한 화학적 풍화지수인 CIA 중점적으로 활용하였다. CIA는 풍화지수 또는 화학적 변질지수로도 불린다. 화학적 풍화지수는 1차 광물, 2차 광물의 비율을 반영하여 화학적 풍화의 정도를 나타내는데 지수값의 범위는 보통 50~100의 범위를 나타내며, 다른 풍화를 나타내는 풍화지수들과 풍화정도는 대부분 정의 상관성을 가진다. Table 3.2와 Fig. 3.6은 Nesbitt and Young(1982)이 미국 지역을 대상으로 분석된 암종별 CIA 지수를 보여준다. 이 지역의 경우 셰일의 CIA 지수는 70~75 정도를 보이는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 광물별 암석별 값이 비교적 정량화 되어있는 화학적 풍화지수를 대상으로 하여 암종별 지수값의 범위와 특성을 파악하였다(제4장 참조). 주 대상은 쇄설성 퇴적암인 사암, 이암, 셰일이다.



Table 3.2 Range of chemical index of alteration(CIA)(modified from Nesbitt and Young, 1982, De Jayawardena, U. S. and Izawa, E., 1994)

Item	Rock type	Range of CIA
Feldspar	unaltered albite	50
	unaltered anorthite	50
	unaltered K-feldspar	50
Rocks	fresh basalt	30-45
	fresh granite	45-55
	fresh granodiorite	45-55
	shale	70-75
Clay minerals	muscovite	75
	smectite	75-87
	kaoline, chlorite	100
	illite	75-85

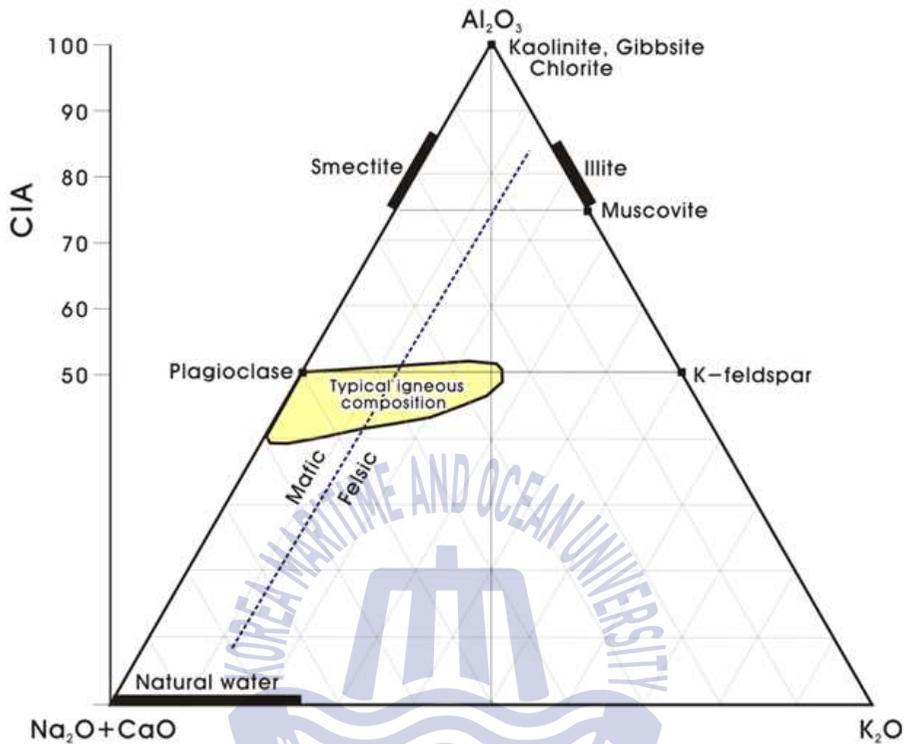


Fig. 3.6 Chemical index of alteration (CIA) (modified from Nesbitt and Young, 1982)

풍화가 진행됨에 따라 2차적으로 점토광물이 생성되며, 2차적으로 형성된 점토광물은 풍화를 더욱 가속화 시킨다. 특히 점토광물 중 팽윤성광물의 생성 유무의 진단은 풍화의 진행 정도와 함께 구조물의 안정성을 예측하는 자료가 된다. 풍화에 의한 화성암의 주성분 원소의 변화를 이용하여 화학적 풍화의 정도를 나타내는 많은 지표들이 제안되어 있는데 이는 화학적 풍화에 의해 암석과 광물중의 원소가 용탈되는데, 용탈되는 양과 속도는 원소 종류에 따라 달라지며, 이러한 화학종간의 비를 측정함으로써 풍화의 정도를 지시할 수 있다. 점토광물은 조암광물의 풍화변질에 의해 생성되며, 2차적으로 형성된 점토광물은

풍화를 더욱 가속화시킨다. 풍화가 진행됨에 따라 결정광물에서 조건에 따라 발생할 수 있는 광물을 모식화한 것으로 풍화가 진행될 때 형성될 2차 광물과 풍화의 최종산물을 나타내었다(Fig. 3.7).

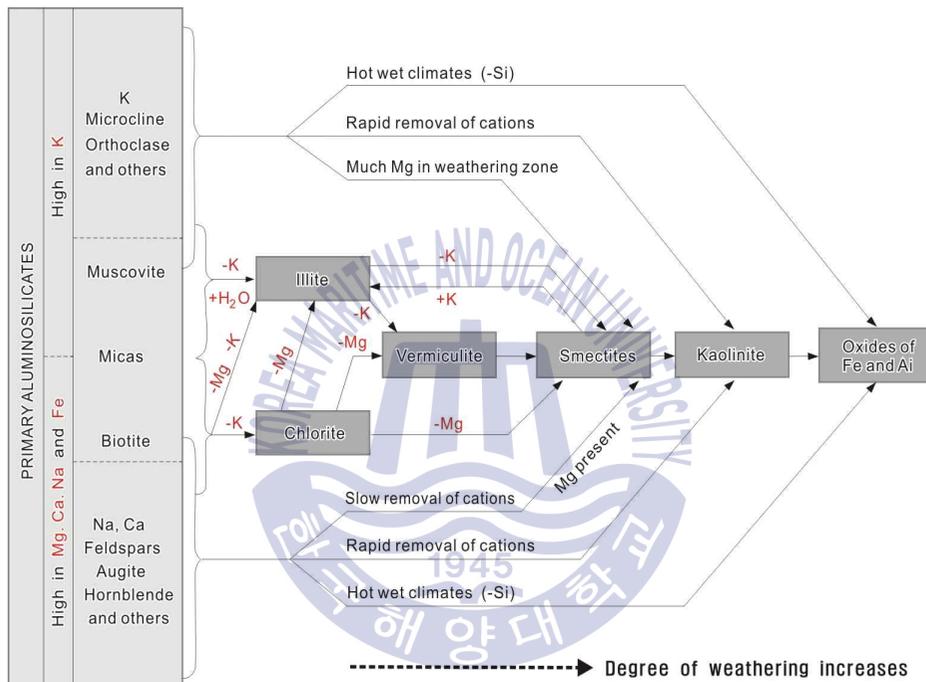


Fig. 3.7 Weathering products of weathering process(modified from Mason, 1966)

3.2.4 물리적 풍화지수

기계적으로 암석의 풍화 정도를 정량화하는 방법으로 탄성과 전달속도, 흡수율, 밀도, 압축강도 등을 측정하는 방법이 이용되고 있으며 현재 상태를 평가하는 기술이 활용되고 있다. 이 방법이 물리적 풍화지수로 탄성과속도, 간극비, 밀도, 흡수율 등으로 풍화도를 평가하는 지수로 표현된다. Hamrol(1961)은 암석

의 풍화가 진행될수록 간극율이 증가하고 이에 따라 포화함수량의 증가하고 건조밀도가 감소하는 특성을 이용하여 흡수율을 암석의 풍화지수로 제안하였다. 흡수율은 다음 식(3.18)과 같이 정의된다.

$$A_I = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad (3.18)$$

여기서, A_I : 흡수율 (%), P_1 : 암석의 건조중량, P_2 : 암석의 포화중량이다.

Irfan과 Dearman(1978)은 풍화도에 대하여 흡수율과 다른 역학적 계수간의 상관성이 좋게 나타나는 것을 증명하였으며, Pasamehmetoglu et al.(1981)은 풍화된 안산암에 대하여 흡수율을 풍화지수로 적용하여 풍화도를 평가하였다.

Iliev(1996)는 탄성과(P파) 속도를 이용하여 암석의 풍화도 평가뿐만 아니라 지질구조의 판별에도 이용할 수 있는 방법을 제안하였다. 이는 신선한 암석의 탄성과 속도와 풍화암의 탄성과 속도의 비로서 풍화지수 식(3.19)를 제안하였다.

$$K = \frac{V_0 - V_w}{V_0} \quad (3.19)$$

여기서, V_0 : 신선한 암석의 탄성과속도, V_w : 풍화암의 탄성과속도이다.

그러나 탄성과 속도를 적용할 때 P파를 이용하는 경우, 지하수가 존재하면 풍화도의 판정이 곤란하므로 최근에는 S파를 이용한 방법이 연구되고 있다. 또, Mendes et al.(1966)은 암석 조직의 변화를 관찰하여 암석 조직중의 풍화된 광물의 백분율을 풍화기준으로 하는 미세광물학적 지수(micropetrographic index)를 식(3.20)과 같이 제안하였다.

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{j=1}^m P_j X_j} = \frac{\text{Sound Minerals}\%}{\text{Unsound Minerals} + \text{Voids} + \text{Fissures}\%} \quad (3.20)$$

여기서, n of X_i : sound minerals의 백분율, m of Y_j : unsound minerals의 백분율, P_i, P_j : 가중계수(weighted coefficient)이다.

Franklin and Chandra(1972)이 제안한 슬레이크 내구성지수(S_d , Slake durability index)도 암석의 풍화도를 평가하는 정량적인 지표로 널리 사용되고 있다. 우리나라에서도 이 방법을 이용하여 풍화도를 평가하고 있다. Lee and de Freitas (1988)는 한국 여러 지역의 화강암을 대상으로 수행한 풍화내구성지수 시험 결과를 토대로 높은 풍화도의 정량적인 구분에 풍화내구성 지수가 유용함을 보였으며, Leung and Radhakrishnan(1990)은 사암 및 이암의 풍화내구성지수(slake durability index)와 일축압축강도의 상관성이 우수함을 보였다.

본 연구에서는 풍화가속실험을 통해 암석의 물리적 풍화지수를 산정하여 현재 상태의 암반의 특성을 규명뿐만 아니라 시공 후 유지관리 조건에서 반영할 수 있는 미래의 암반 특성을 평가하였다.

3.3 암의 정수 저감치 산정

3.3.1 개요

풍화가 진행됨에 따라 암의 밀도와 일축압축강도는 감소하고 흡수율은 증가하게 된다. 본 연구에서는 풍화가속실험을 통하여 실험 전후의 흡수율, 일축압축강도, 탄성과 속도를 측정하여 풍화가속실험에 따른 암 정수의 변화를 산정하고자 한다. Fig. 3.8은 풍화암(WR)이 풍화토(WS)로 풍화됨에 따라 밀도, 흡수율, 풍화지수간의 관계를 나타낸 것이다. 풍화가 됨에 따라 풍화지수가 증가하고 밀도는 작아지고 흡수율이 증가되는 것을 알 수 있다.

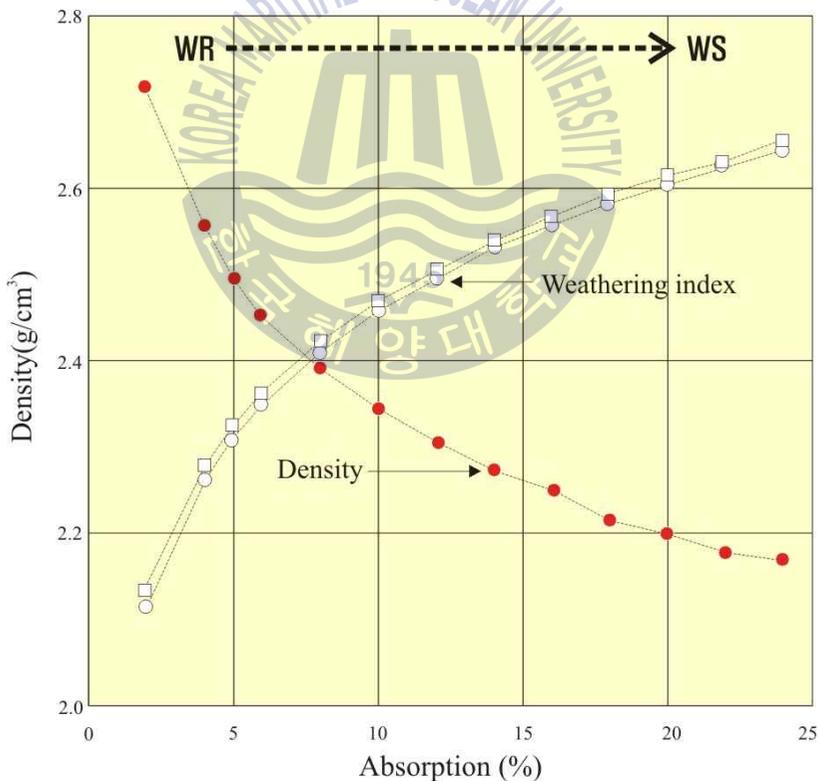


Fig. 3.8 Relation of density-absorption index-weathering index

Fig. 3.9는 신선한 암석과 풍화가 진행된 암석을 대상으로 하여 암종별 일축 압축강도를 측정된 결과이다. 암종별 풍화에 따른 강도특성이 서로 다를 수 있다.

화강암의 일축강도는 범위가 넓게 분산된 특징을 보여주는데, 일반적으로 화강암은 퇴적암이나 변성암과 달리 형성 당시 이방성에 의한 구조가 거의 없어 동질성이 높은 암석으로 알려져 있으나 동일한 화강암으로 분류된 경우라도 공학적 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 화강암의 강도는 우백질 또는 담황색의 산성암에서 다소 높은 강도를 보였으며, 유색광물을 포함하고 엽리구조가 관찰되는 화강암이 낮은 강도를 보였다.

퇴적암 시편의 강도 측정치는 분산의 정도가 크게 나타난다. 암석 시편이 유사한 풍화정도에 해당하는 것으로 볼 때 일축강도의 분산은 퇴적 당시 형성되는 1차 퇴적구조에 의한 것으로 판단된다. 쇄설성 퇴적암 중 이암과 셰일은 25 ~ 30MPa에서 최대 빈도를 보인다. 변성암은 변성정도에 따라 강도의 변화가 나타나며, 원암에서 저변성된 점판암은 변성이전 모암에 해당하는 쇄설성 퇴적암에 비해 높은 강도를 보인다. 점판암보다 변성이 진행된 친매암과 편암은 엽리구조가 발달하고 새로운 광물종이 형성되어 암석의 이방성이 증가하고 이에 따라 암석의 강도가 저하된다(National Disaster Management Research Institute, 2010).

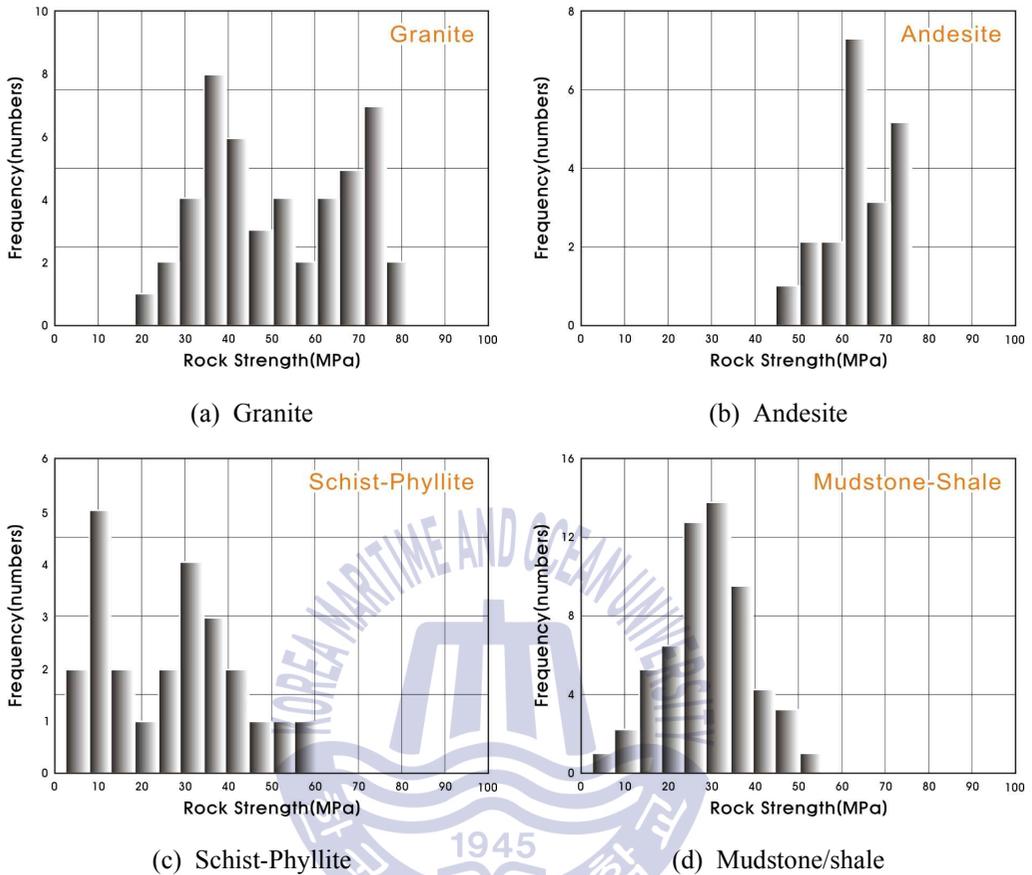


Fig. 3.9 Frequency distribution of unconfined compressive strength for rock types(National Disaster Management Research Institute, 2010)

Fig. 3.10은 암종별 일축압축강도를 정리한 것으로 암석의 생성 기원별에 따라 일축강도는 냉각과정에서 기공을 보이는 현무암을 제외하면 화성암(화산암) > 화성암(심성암) > 변성암 > 퇴적암의 순서의 변화를 보이며, 화성암은 염기성 암에서 산성암으로 갈수록 강도가 증가한다. 암종별 일축강도는 유문암 > 안산암 > 점판암 > 화강암 > 편마암 > 반려암 > 응회암 > 규암/돌로마이트 > 사암 > 석회암 > 현무암 > 이암/셰일 > 편암/천매암의 순이며, 이암 및 셰일로 구성된 암석과 천매암과 편암이 암석 강도에 가장 취약하다. 암석의 강도는 풍화에

비해하여 저감되므로 대규모 단층이나 습곡대가 발달하는 지역은 암종과 관계 없이 낮은 강도를 보일 것을 예상된다(National Disaster Management Research Institute, 2010).

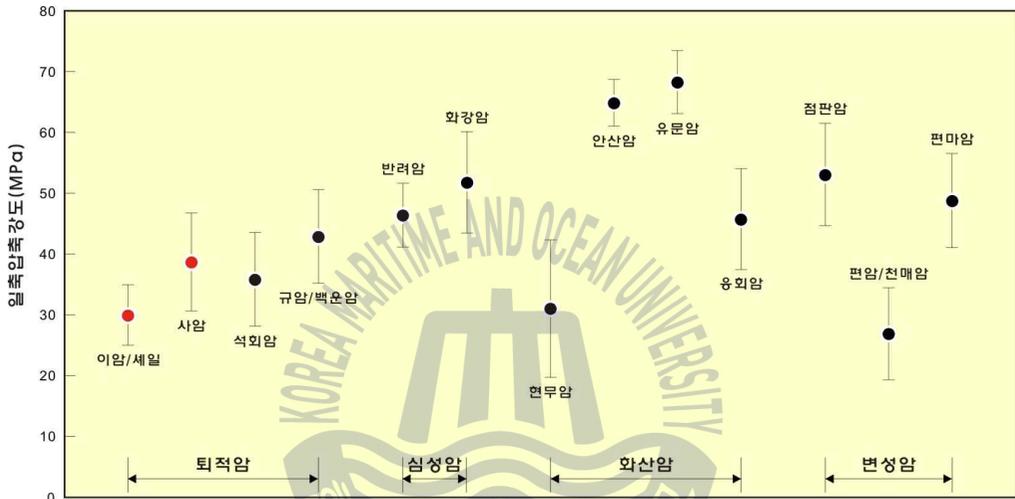


Fig. 3.10 Distribution of unconfined compressive strength for rock types(National Disaster Management Research Institute, 2010)

Fig. 3.11은 이암의 수침에 따른 팽윤 정도를 평가하기 위하여 단순 수침시험을 실시한 것이다. 그림에서와 같이 수침 1시간, 4시간, 24시간이 경과된 사진에서 이암이 층리를 따라 팽윤되는 특성을 보이고 있다. 좌측 시료는 백악기의 이암이며 우측은 신생대 이암에 해당된다. 단순 수침실험만으로 신생대 이암의 경우 층리면을 따라 박리되는 현상을 볼 수 있으며, 이는 이암과 세일의 특성을 단적으로 나타낸다 할 수 있다.

국내의 경우 동해안을 따라 삼척(북평), 영해, 포항, 울산 지역은 신생대 제3기 동안 형성된 이암층이 넓게 분포한다. 이 지역의 퇴적암은 제3기 말에서 현

재까지 지속적인 지반 용기로 인해 속성과정이 중단되어 미고결 상태를 나타내며 공학적으로 암석과 퇴적물의 특성을 동시에 보이고 있다. 즉 암반을 분류하기 위한 측정하는 방법에 따라 연암으로 분류되기도 하며 풍화암에 속하기도 한다. 이러한 암반은 시설물의 종류와 풍화환경의 노출정도에 따라 암반분류가 달라질 수 있고 지반정수 산정 시 일반적인 고결된 암반과 구별되는 적용기준이 필요하다.

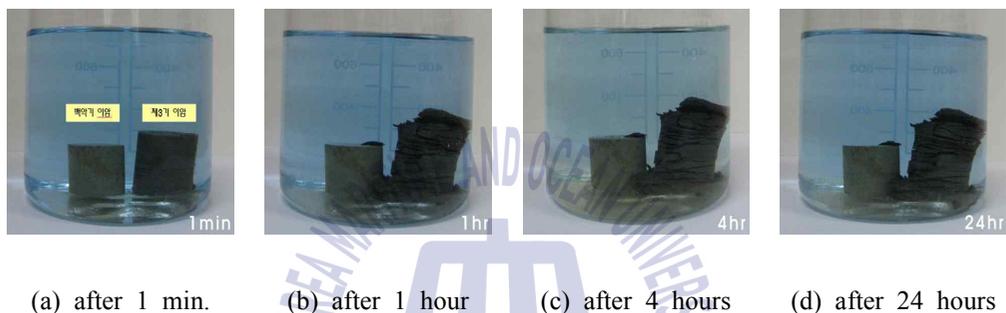


Fig. 3.11 Swelling property of mudstone through soaking test(National Disaster Management Research Institute, 2010)

인위적으로 조성된 터널과 인공사면은 현재 상태를 반영하여 초기 안정성과 충분한 안전율을 고려하여 지반과 시설물의 안정성을 확보하지만 장기간 공기 중에 노출되면서 여러 기후조건에 의한 풍화의 영향이나 수리적 조건의 변화에 의하여 파괴가 발생한다. 설계 시 고려된 암반조건에 대한 정확한 평가가 이루어졌다면 다소 과도한 안전율의 범위에서 암반붕괴는 발생하지 않을 것이나 최근 터널과 인공사면은 시공기술의 발달에도 불구하고 발생빈도는 증가하는 추세이다.

풍화가 많이 진전되지 않은 연암과 경암에서는 풍화에 의한 화학적풍화로 절리면 내 충전 물질의 상태 변화와 절리면의 장기적인 강도 저하에 의하여 파괴가 발생하게 된다. 본 연구에서는 화학적, 물리적 풍화가속화 시험을 통해 장기

적인 물성치의 강도저감특성을 예측하고 이를 암반의 안정성해석을 위한 설계 정수에 반영하고자 한다.

3.3.2 풍화가속실험

풍화에 의한 암 정수의 저감은 암종별로 풍화단계별 시료(풍화암/연암/경암)를 준비하여 성형하고, 실험실에서 풍화저감 실험을 수행한 결과를 바탕으로 암 정수의 변화를 예측하게 된다.

풍화가속실험은 자연적인 풍화현상을 실내에서 보다 가혹한 환경으로 모사하여 자연적으로 풍화되는 것보다 더 빠른 속도로 풍화현상을 진행시킴으로써 풍화에 의한 여러 가지 현상을 미리 예측하는데 목적이 있다. 이러한 풍화실험은 자연적으로 발생할 수 있는 물리적, 화학적 풍화를 모사해야 하는데, 물리적으로 동결-융해를 반복적으로 시행하며, 강산에 반응하여 화학적인 풍화를 가속화시키는 과정을 반복 수행한다. 그러나 이러한 실험도 자연적인 풍화요인을 일부만을 재현한 것으로 이에 대한 반복적인 실험이 요구된다.

암석은 물리적인 풍화에 의해 잘게 분해되며, 이러한 풍화작용은 주로 대륙성 기후나 사막 혹은 극지방에서 주로 일어나지만 습한 지역에서는 물리적 풍화작용은 화학적 풍화와 함께 수반되게 된다. Bell(1992)에 의하면 공극내에 물이 주위의 온도가 내려갈수록 주위 공극에 미치는 압력이 증가하게 되며, 영하 22℃의 경우에는 그 압력이 220MPa 까지 증대되고 있다(Table 3.3, Bell and Rossman, 1992).

Table 3.3 External pressure raising due to physical weathering(Bell and Rossman, 1992)

Physical weathering		Pressure(MPa)
Gelifraction at	0℃	0.1
	-2.5℃	33.6
	-10℃	113.5
	-20℃	200
	-22℃	220
Salt crystallization		2~20
Salt hydration		100
Clay expansion		2

화학적 풍화가 일어나기 위한 주요 요소는 강우일수, 강수량, 강우의 산성도, 기온이라고 할 수 있다. 예를 들어 부산지역은 지난 5년간 평균기온은 16°, 강수량 1592.5mm이며, 1mm 이상의 강우일수는 81일로 기록되어 있다. 국내 강우의 pH는 대기 오염등으로 인하여 4.0내외의 산성도를 보이고 있다(기상청, 2017).

채취된 시료를 성형하여 강제 풍화가속실험을 실시하였다. 초기 풍화상태를 파악하기 위해 초기의 흡수율, 탄성과속도, 일축강도를 측정하고, 실험 이후 변화된 흡수율, 탄성과속도, 일축압축강도를 재측정하여 변화정도를 파악하였다. 현장의 조건은 주로 기계적 풍화가 우세하게 일어날 것으로 기대되지만 화학적 풍화를 실험실 조건에서 가속화시키기 위하여 고온과 저온을 순환하여 반복 수행하였으며, 실험의 조건은 pH 2, 80℃의 증류수에 12시간 포화와 저온에서 용해 (화학적/기계적 풍화를 가속화)하는 과정을 7일간 반복수행하였다.

자연상의 조건을 실험실로 그대로 재현하는 것은 어려우며, 정확한 1일 동안의 실험실에서의 조건을 판단하기 어려우나 실험실에서의 풍화가속실험을 식

(3.21)과 같은 다음과 같은 계산을 통해 자연상태 풍화기간의 재현이 가능하다 (엄정기, 2012).

$$W_{\text{weathering test at lab.}} = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \quad (3.21)$$

$1 \text{ day} = 6.94 \text{ years}$
 $7 \text{ days} = 48.6 \text{ years}$

여기서, F_1 = pH 효과(pH effect), F_2 = 온도효과(temperature effect), F_3 = 강우효과(precipitation effect), F_4 = 포화기간(saturation period) 이다.

이를 통해 산정된 가속실험 조건에서의 1일의 실험은 자연상태의 6.94년에 해당되며, 7일간의 풍화실험은 약 48.6년에 해당되는 조건이라고 볼 수 있다.

암 정수를 평가하기 위하여 본 연구에서는 흡수율, 탄성과속도, 일축압축강도를 측정하였다. 흡수율, 탄성과속도, 일축압축강도와 같은 특성은 그 대상이 연암 내지 경암에 국한하여 인공풍화가속실험을 수행하였다. 풍화암의 경우 실험 과정에서 너무 풍화가 극단적으로 진행되어 실험값의 일관성이 없어 풍화가속 실험은 진행되지 않았다. 실험과정에서 측정된 자료는 풍화등급에 따른 암석의 물리적 공학적 특징의 변화를 압축된 시간범위 내에서 변화를 관찰하는 것이 가능하다.

암석의 반복적인 산침수와 동결과 용해에 따른 풍화 정도를 파악하기 위하여 흡수율을 측정하여 물성변화를 관찰하고, 풍화의 진행정도를 예측하고자 하였다. 흡수율 시험은 KS F 2503에 준하여 시행되었으며, 식(3.22)와 같다.

$$\text{흡수율} = \{(M_{\text{sat}} - M_{\text{dry}}) / M_{\text{dry}}\} \times 100 (\%) \quad (3.22)$$

탄성과 속도의 측정은 지름×높이가 각각 5cm×10cm의 원주형 시편에 대해서 풍화단계별 탄성과 전달속도를 측정하였고 시험장비는 Contester-1000 model을 사용하였다(Fig. 3.12).



Fig. 3.12 Measurement apparatus of seismic velocity

기계적 풍화 원인 중 대표적인 것이 온도 변화에 따른 풍화로 암석이 동결-융해될 때의 물성은 변화되며, 암석의 강도 저하가 수반된다. 암석의 강제 풍화에 따른 탄성과 속도의 변화를 측정하여 물성변화를 관찰하고 풍화를 예측하였다. Table 3.4는 암분류기준을 나타낸 것이며, Table 3.5는 암종별 탄성과 속도를 나타낸 것이다.

Table 3.4 Rock classification standard(comparison of A and B groups)

Item	A	B
대표적인 암종	<ul style="list-style-type: none"> 편마암, 사질편암, 녹색편암, 각암, 석회암, 사암, 회록응회암, 역암, 화강암, 섬록암, 감람암, 사교암, 우교암, 셰일, 안산암, 현무암 	<ul style="list-style-type: none"> 흑색편암, 녹색편암, 회록응회암, 셰일, 이암, 응회암, 집괴암
함유물에 의한 육안감정	<ul style="list-style-type: none"> 사질분, 석영분을 다량 함유하고 암질이 단단한 것, 결정도가 높은 것 	<ul style="list-style-type: none"> 사질분, 석영분, 응회분이 거의 없는 것, 천매상의 것
500-1000 gr 해머의 타격에 의한 판정	<ul style="list-style-type: none"> 타격점의 암은 작은 평평한 암편으로 되어 비산되거나 거의 암분을 남기지 않는 것 	<ul style="list-style-type: none"> 타격점의 암은 작은 평평한 암편으로 되어 비산되거나 거의 암분을 남기지 않는 것

Table 3.5 Seismic velocity of rock types

Type		Seismic velocity		Note
		Field	Intact rock	
weathered rock	A	0.7 - 1.2 km/sec	2.0 - 2.7 km/sec	<ul style="list-style-type: none"> • 시편: 두께 15 ~ 20cm • 측정방법: X축 (결면에 평행, 탄성파 속도가 가장 빠른 방향)
	B	1.0 - 1.8 km/sec	2.5 - 3.0 km/sec	
Soft rock	A	1.2 - 1.9 km/sec	2.7 - 3.7 km/sec	
	B	1.8 - 2.8 km/sec	3.0 - 4.3 km/sec	
Moderate rock	A	1.9 - 2.9 km/sec	3.7 - 4.7 km/sec	
	B	2.8 - 4.1 km/sec	4.3 - 5.7 km/sec	
Hard rock	A	2.9 - 4.2 km/sec	4.7 - 5.8 km/sec	
	B	4.1 km/sec 이상	5.7 km/sec 이상	
Ultra hard rock		4.2 km/sec 이상	5.8 km/sec 이상	

산침수와 동결과 용해에 따른 풍화 정도를 파악하기 위하여 일축압축강도 시험을 실시하였으며, 원시료의 일축압축강도와 풍화실험 후의 값을 비교하였다. 암석 시험편의 장축 방향으로 압축력을 가한 후 파괴될 때의 하중을 측정하여 일축압축강도를 구하며 또한 시험편의 변형률을 측정하여 응력-변형률 곡선을 얻어 탄성계수나 포아송비를 구할 수 있다.

시험 시편은 국내의 석재에 대한 일축압축강도 시험규정(KS F 3033)에서는 각주 또는 원주형으로 되어 있으나 각주의 경우 시험편 제작이 어렵고 정밀도 상에 문제점이 있어 ASTM 또는 ISRM에서는 원주형을 권장하고 있다. 시편의 크기는 국내의 경우 직경과 높이의 비를 1.0으로 하고 있으나 일본 규정(JIS M 0302)은 약 2.0, ASTM (D2938) 또는 ISRM에서는 2.0 ~ 3.0을 규정하고 있어 외국의 시험결과와의 비교 시 주의가 필요하다. 시험편의 정밀도 규정은 ISRM에서 가압면의 편평도는 0.02mm, 측면과 가압면의 직각도는 0.001rad

(0.05mm/50mm), 측면 길이의 직진성은 전체길이에 대해 0.3mm 이내로 되어 있다. 일축압축시험에서 파괴하중을 P, 압축력을 받는 시험편의 단면적을 A라 할 때, 일축압축강도는 식(3.23)과 같이 계산된다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.23)$$

본 시험에서는 원형의 2.5cm크기의 직경을 가진 시험편을 사용하여 암석의 일축강도시험을 실시하였으며, 시험장비는 미국의 GCTS사 PLT-100 model을 사용하였다(Fig. 3.13).



Fig. 3.13 Unconfined compression tester

3.3.3 풍화정도에 따른 암 정수의 해석

기존에 보고된 풍화등급에 따른 정량적인 측정값은 대부분이 화강암 및 편마암 지역에서 채취된 암에 대한 시험결과이다.

Irfan and Dearman(1978)은 암석의 흡수율, 밀도, 점하중 강도, 일축압축강도 시험등의 결과로부터 화강암의 정량적인 풍화등급을 제시하였다. 여기에서 흡수율은 암석의 풍화를 구분하는 유용한 지표임을 제안하였으며, 일축압축강도와 점하중강도등의 역학적 특성과도 좋은 상관성을 보인다고 보고하였다 (Table 3.6).

Table 3.6 Weathering index and grade of granite(Irfan and Dearman, 1978)

Term.	Absorption (%)	Density (g/cm ³)	Point load strength (kg/cm ²)	Unconfined compressive strength (kg/cm ²)
Fresh	< 0.2	2.61 >	100 >	2500 >
Partially stained	0.2-1.0	2.56-2.61	60-100	1500-2500
Slightly stained	1.0-2.0	2.51-2.56	40-60	1000-1500
Moderately stained	2.0-10.0	2.05-2.51	10-40	25-1000
Completely stained	10 >	< 2.05	< 10	< 25

Lee and de Freitas (1989)는 일축압축강도, 흡수율, 점하중강도, 슈미트해머반발치, 핸드관입기 저항치 등을 풍화지수로 하여 한국의 화강암을 총 6등급의 풍화도로 분류하였다(Table 3.7).

Table 3.7 Classification of granite in Korea(Lee and de Freitas, 1989)

Grade	Term		Mechanical recognition				
			QAI	UCS	PLS	SHV	HPV
I	Fresh	F	0.17-0.38	1250-2600	90-180	59-62	-
II	Slightly weathered	SW	0.24-0.88	1000-1700	50-125	51-56	-
III	Moderately weathered	MW	0.69-1.56	600-1200	20-60	37-48	-
IV	Highly weathered	HW	2.48-5.3	350-550	30-90	12-21	-
V	Completely weathered	CW	-	0.5-1.2	-	-	3.8 >
VI	Residual soil	RS	-	0.3-0.5	-	-	0.24-0.35

※ QAI: Quick Absorption Index (%), UCS: Unconfined Compression Test (kg/cm²) PLS: Point Load Test (kg/cm²), SHV: Schmidt Hammer Value, HPV: Hand Penetrometer Value

Table 3.8은 Lee(1993)가 한국의 화강암에 대하여 풍화등급별로 제시한 암의 정수와 그에 따른 등급을 요약한 것이다.

Table 3.8 Weathering rating geotechnical parameters of granites(Lee, 1993)

Item	Weathering rating					
	I(F)	II(SW)	III(MW)	IV(HW)	V(CW)	VI(RS)
Unconfined compressive strength(kg/cm ²)	1470-2450	1260-1580	770-900	360-540	0.54-1.3	0.38-0.67
Elastic modulus (×10 ⁴ kg/cm ²)	60-73	36-46	18-24	5-9	0.04-0.01	0.0034 -0.0022
Angle of internal friction(°)	-	-	-	-	43-49	42-46
Adhesion(kg/cm ²)	-	-	-	-	0.19-0.31	0.08-0.21
Coefficient of permeability(m/sec)	5×10 ⁻⁴ -1.2×10 ⁻¹	9×10 ⁻³ -4.8×10 ⁻¹	2.4×10 ⁻³	8.5×10 ⁻² -3.1×10 ⁻¹	1.4×10 ⁻² -9.9×10 ⁻¹	1.8×10 ⁻¹ -6.0×10 ⁻²
Coefficient of consolidation(m ² /year)	-	-	-	-	1.9×10 (CW-RS) (4.2-5.9)×10	

Sueoka(1988)는 CWI에 따라 7단계로 풍화도를 분류하였다(Table 3.9). 그는 일본의 화강암을 7개의 풍화 등급으로 구분할 수 있는 화학적 풍화지수(CWI)를 제안하였는데 화강암 및 화강 풍화잔류토의 풍화과정 전체를 표현할 수 있고 공학적 목적에도 잘 부합된다고 언급하였다.

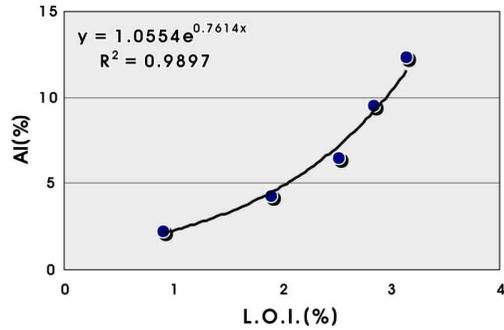
Table 3.9 Evaluation of Weathering index(CWI) (Sueoka, 1988)

CWI (%)	Division	Extent of weathering	Classification of weathered granite
13-15	I	Fresh Rock	Fresh rock
15-20	II	Slightly Weathered	Weathered granite
	III	Moderately Weathered	
	IV	Highly Weathered	
20-40	V	Completely Weathered	Granular disintegration sand Masado soil
	VI	Residual soil	Lateritic soil
40-60	VI	Residual soil	Lateritic soil
60-90	VII	Weathered Hard pan (as cemented)	Laterite or bauxite

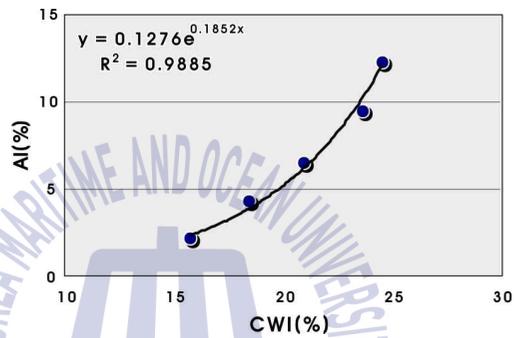
Gupta and Rao(2001)는 13개 암종에 대하여 암석의 비중, 건조밀도, 습윤밀도, 흡수율, 간극비 등의 암석학적 특성과 탄성파속도, 일축압축강도, 인장강도 등을 이용하여 화강암을 5개의 등급으로 구분하였으며, WPI, PI, SAR, Wp, MI 등의 화학적 풍화지수로부터 화강암 6개의 풍화등급으로 구분하였다. 여기에 적용된 화학적 풍화지수들이 모두 전 암종에 대하여 합리적인 풍화등급을 평가하기에는 무리가 따르지만, WPI 및 강열감량 지수의 경우 모든 암종에 대해 풍화지수로 유용하게 사용할 수 있는 것으로 평가하였다. 단 WPI는 암석의 알칼리 함량에 따라 매우 민감하게 반응하며, 각섬석과 같이 광물에 지배적인 암석과 열수변질 작용을 받은 특수한 경우에는 그 적용성에 주의가 필요하다고 하였다 (Choi, 2011).

Chang(2003)은 화강암에서 심도별 주요 화학성분의 분포 특성을 계산한 결과 XRF 분석 시 수행된 강열감량(LOI, Loss on Ignition)의 수치가 풍화도가 낮은 풍화암에서 풍화가 완전히 진행된 잔류토로 갈수록 증가하는 분포를 나타내어 풍화도 판정에 유용한 자료로 활용될 수 있음을 보였다(Table 3.10, Fig. 3.14).

(a) Absorption index - L.O.I



(b) Absorption index - CWI



(c) Absorption index - WPI(m)

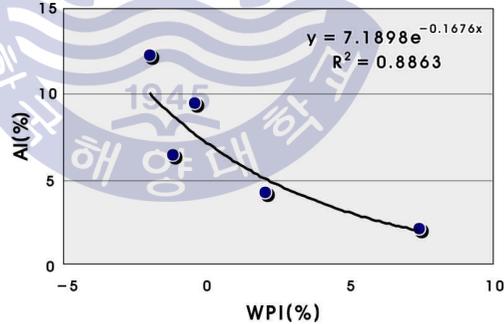


Fig. 3.14 Comparison of chemical and physical weathering index (a) Absorption index - L.O.I, (b) Absorption index - CWI, (c) Absorption index - WPI(modified from Chang, 2003)

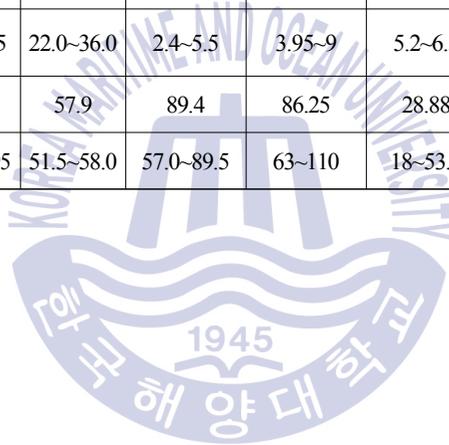
Table 3.10 Comparison of chemical and physical weathering indexes(Chang, 2003)

Term	Depth (m)	Chemical weathering index			Physical weathering index		
		WPI (%)	CWI (%)	L.O.I (%)	Absorption (%)	Dry density (g/cm ³)	Slake durability index
RS	0.5	-8.64	26.91	4.151	-	-	-
RS	1.0	-4.32	25.14	3.504	-	-	-
CW	2.0	-1.80	25.16	3.152	-	-	-
HW	4.0	-2.01	24.59	3.142	12.3	2.28	25
HW	6.0	-0.40	23.68	2.844	9.5	2.35	48
HW	8.0	-1.20	21.02	2.522	6.5	2.43	78
MW	10.0	2.03	18.49	1.895	4.3	2.52	92
MW	12.0	7.45	15.77	0.905	2.2	2.68	98

이영휘 등(1998)은 경상계 퇴적암(사암, 이암, 셰일)의 특성을 제시하였다 (Table 3.11). 이 결과는 대구지역 현장에서 채취된 NX-시료에 대해 실시된 시험결과이며 채취된 시료에 대한 풍화도 관정은 ISRM(1981)의 분류에 따라 분류되었다. 제시된 시험결과는 현재 상태의 퇴적암에 대한 결과로 미래 풍화에 따른 영향을 고려하지는 못한다. 하지만 이영휘 등(1998)과 같은 퇴적암에 대한 풍화와 암의 정수와의 관계를 연구는 극히 드물게 이루어져 매우 가치가 있는 연구 자료이다.

Table 3.11 Properties of sedimentary rocks in Kyungsang system(이영휘 등, 1998)

Type	Schmidt hammer	Seismic velocity		Point load test, Strength index, $I_s(50)$			Brazilian test (tensile strength)	Unconfined compression strength
		P-wave	S-wave	Irregualr	Axial	Diametric		
	(%)	(km/s)	(km/s)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
Sandstone	1.42~5.73	1.40~2.00	47.0~61.5	69.5~139.0	-	-	124~229	1495~1810
Mudstone A	4.14~5.19	1.62~1.87	56.1~59.4	74.0~102.0	80.5~87.0	72~81.0	135~183	1870~3560
Mudstone B	0.6~1.05	0.8~1.05	22.0~36.0	2.4~5.5	3.95~9	5.2~6.5	8~16	70~133
Shale A	5.14	1.70	57.9	89.4	86.25	28.88	182	887
Shale B	1.10~4.80	0.85~2.95	51.5~58.0	57.0~89.5	63~110	18~53.5	102~229	607~2285



제 4 장 시험결과 및 분석

4.1 이방성 산정결과

4.1.1 시료 채취 지역

연구를 위해 시료는 4개의 지역에서 채취되었으며, 영주, 대구, 양산(동래)-다대포, 강서지역에서 각각 채취되었다(Fig. 4.1). 영주지역(①)의 시료는 화강암, 변성퇴적암, 호상편마암이 분포하고 있으며, 대구지역(②)은 사암과 셰일이, 양산(동래)-다대포지역(③)은 화강암, 안산암, 장석반암, 혼펠스가, 강서지역(④)은 퇴적암, 응회암이 분포한다.

쇄설성 퇴적암의 이방성을 파악하기 위해 4개의 퇴적암 분포지와 화성암(화강암 및 화산암) 분포지에서 총 267개의 시편을 분석하였다. 시료는 경상분지 북부의 영주지역 1개소와 경상분지 중부의 대구지역 1개소 그리고 경상분지 남부의 부산 일원 양산(동래), 다대포, 강서 3개 지역이 해당된다(Table 4.1).

영주지역은 예천전단대가 통과하는 단층지역으로 화강암과 퇴적암이 변성을 받아 엽리가 발달하며 퇴적암의 모암은 이암과 셰일이었고 현재는 변성퇴적암으로 분포한다. 대구지역은 전형적인 흑색셰일과 담회색 사암의 호층으로 발달하며 연구지역 중 단층대의 영향이 가장 작은 암석군에 해당한다. 부산 일원은 양산단층계의 영향을 받은 지역은 동으로부터 동래단층에 인접한 금정산과 서면, 다대포 지역과 강서지역의 모량단층 연장부가 이에 해당한다. 서면지역은 이암과 셰일이 분포하지 않으나 단층대에서 이방성을 확인하기 위해 대상지역으로 포함하였고 다대포는 경상계의 다대포분지가 위치하며 강서지역은 경상계 밀양분지가 발달하고 있어 이암과 셰일의 분포 빈도가 높은 지역에 속한다.

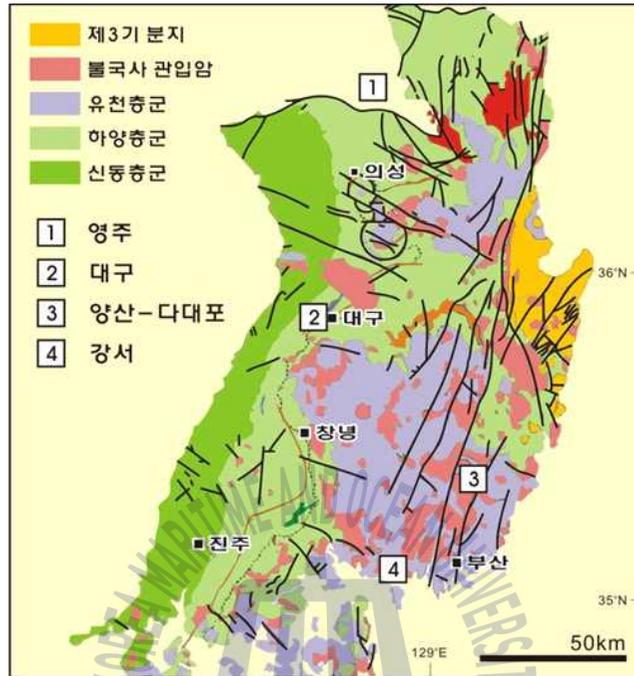


Fig. 4.1 Map of sampling locations for anisotropy assessment

Table 4.1 Sampling locations, rock types, and sampling number for anisotropy assessment

Location	Rock type	No. of samples	Sum No.
Youngju	Shale / Mudstone	16	47
	Granite	31	
Daegu	Shale	35	40
	Sandstone	5	
Yangsan(Dongnae)	Granite	76	119
	Volcanic Rocks	43	
Dadaepo	Shale	10	16
	Sandstone	6	
Gangseo	Shale / Mudstone	16	45
	Volcanic Rocks	29	

4.1.2 이방성 산정

지역별 시편을 이용하여 전방위의 대자율을 측정하고 이로부터 대자율타원체와 주축(k_1, k_2, k_3)의 크기를 결정하였다. 대자율 주축을 토대로 대자율이방성의 크기(P_J)와 타원체의 모양지수(T)를 계산하고 T- P_J 다이어그램을 작성하였다. T- P_J 다이어그램 분석을 통해 암석의 자기적인 구조와 연구의 대상인 사암, 이암과 셰일의 이방성을 판단하였다.

영주지역은 대규모 단층에 속하는 예천전단대의 직접적인 영향을 받은 지역으로 대자율이방성 결과(Fig. 4.2)에서 분포하는 모든 암석은 편원 영역(oblite)의 변형을 보이며 변형정도가 1.06 이상을 보이고 있다. 암종별로 화강암은 평

균 1.08 ~ 1.12의 변형정도를 나타내며 퇴적암류는 1.12 ~ 1.18의 범위로 변형의 정도로 동일한 지각운동에서 대해 퇴적암의 변형정도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 전단대에서 변형정도는 셰일/이암과 거의 같게 나타나 화강암이라 하더라도 전단파쇄대에 위치하는 경우 이방성이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. T-P_J 다이어그램과 더불어 Flinn 다이어그램도 그림의 오른쪽에 같이 도시하였다. Flinn 다이어그램 같은 경우 T-P_J 다이어그램보다 이전에 제시된 방법으로 그림에서 보는바와 같이 유사한 경향을 볼 수 있다. 하지만 일반적으로 Flinn 다이어그램은 T-P_J 다이어그램에 비해 이방성이 밀집된 형태로 보여지고 변형 형태가 명확하게 나타나지 않아 현재는 T-P_J 다이어그램을 선호하는 경향이 있다.

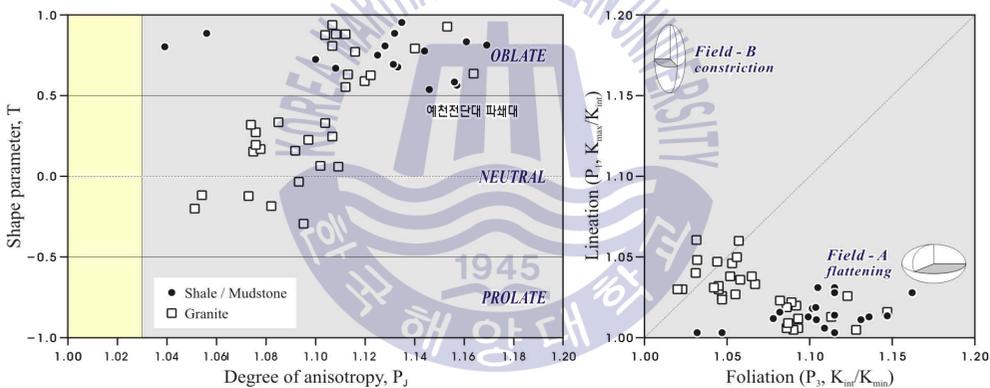


Fig. 4.2 Anisotropy of magnetic susceptibility of granite and sedimentary rocks(mudstone and shale) in Youngju area

Fig. 4.3은 대구지역 쇄설성 퇴적암의 대자율이방성을 나타낸 것으로 단층의 영향을 거의 발달하지 않았으나 이방성은 최대 1.10으로 등방체에 비해 10% 이상의 변형을 관찰할 수 있다. 암종별로 사암의 변형정도(P_J)는 1.03 미만으로 거의 변형 받지 않은 상태인 반면 셰일은 대조적으로 영주지역 단층대(예천전단대 Fig. 4.2 참조)에 분포하는 화강암과 유사한 정도의 변형정도를 보인다. 이와 같은 결과에서 두 가지 중요한 결론을 도출할 수 있다. 하나는 같은 쇄설성 퇴

적암이라 하더라도 사암의 경우 거의 화강암과 같은 등방의 거동을 보인다는 것과, 다른 하나는 화강암이라 할지라도 단층대에 위치한 경우 셰일과 같은 큰 이방성을 갖는다는 것이다. 화강암이 단층대에 위치한 경우와 셰일의 경우 변형의 형태가 편원하며 이는 퇴적암의 대표적 특징인 층리면으로 변형이 집중되는 것을 의미한다.

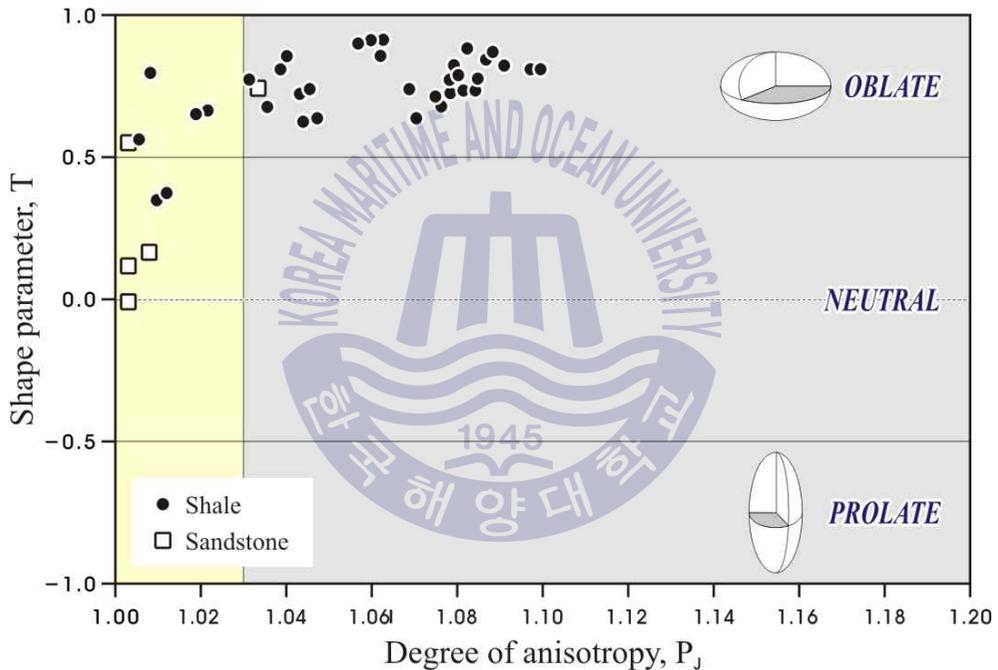


Fig. 4.3 Anisotropy of magnetic susceptibility of sandstone and shale in Daegu Basin

경상분지의 남부는 양산단층계의 단층군(Fig. 4.4)이 발달되어 있다. Fig. 4.5는 이 중 동래단층 통과지점에 인접한 금정산 화강암과 서면 지역 화산암의 결과로 단층대 지역의 변형정도는 1.04 ~ 1.14의 범위를 보인다. 단층의 영향이 클

수록 변형정도가 증가하고 또한 지각에 작용하는 응력에 취약할수록 변형정도는 증가하는 것으로 알 수 있다. 금정산과 서면 지역을 비교하면 동래단층의 영향은 화산암에 비해 화강암에서 더 큰 영향을 받는 것으로 추정된다(Fig. 4.5). 본 지역은 단층대에 위치한 화강암과 화산암의 이방성을 보여주는 것으로 앞의 영주에서와 같이 과쇄대(동래단층)에 위치한 경우는 이방성의 경향이 이암 및 셰일과 유사한 것을 알 수 있다.

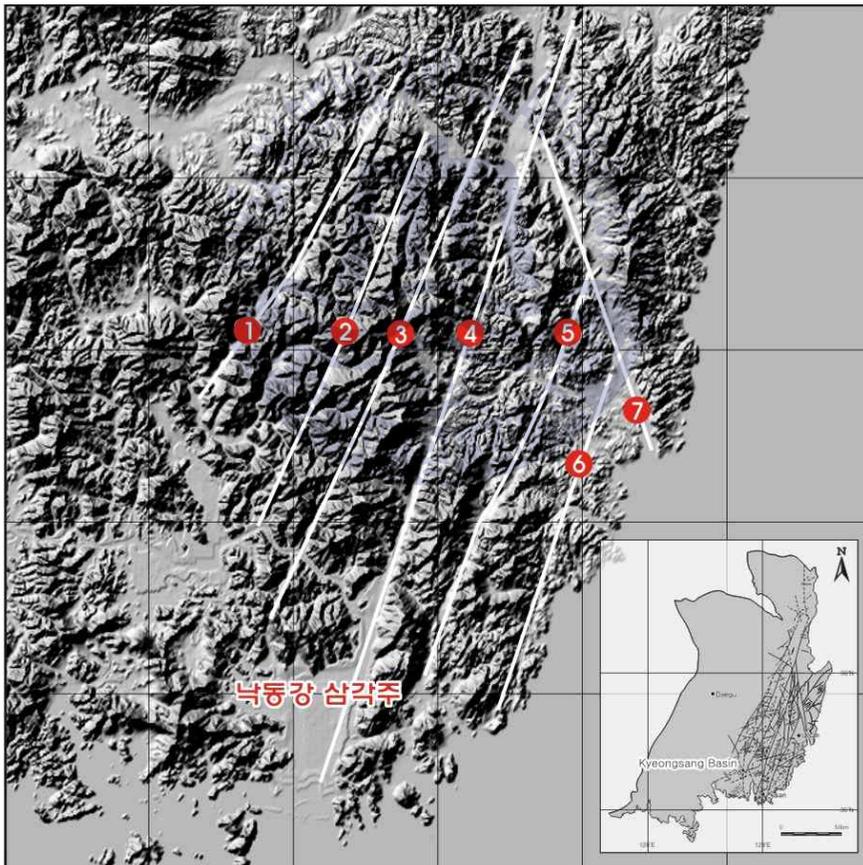


Fig. 4.4 Map of Yangsan fault system

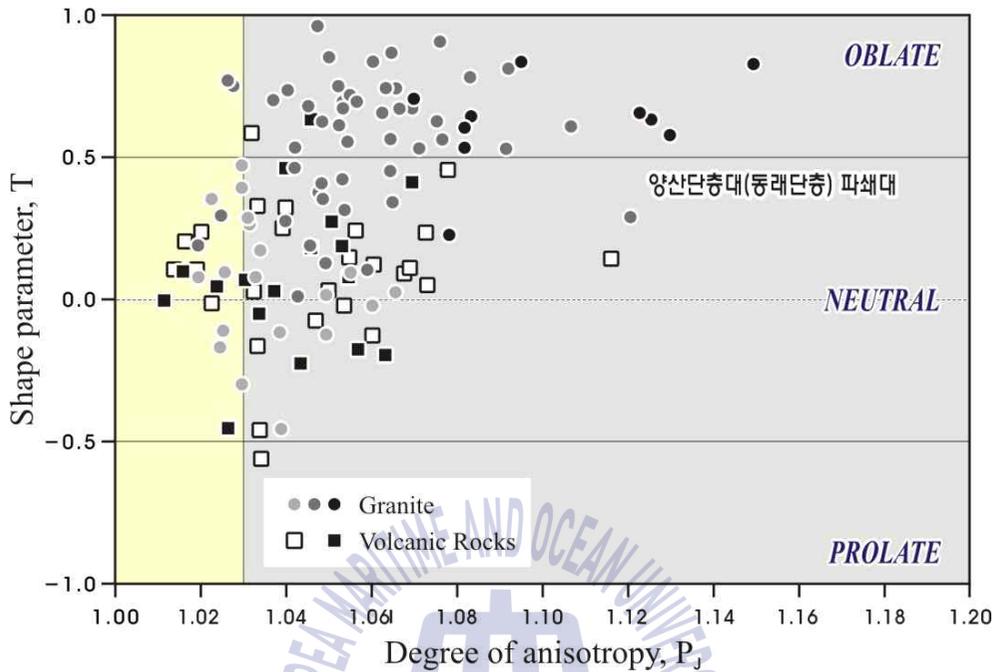


Fig. 4.5 Anisotropy of magnetic susceptibility of granite and volcanic rocks in Dongnae fault in Yangsan fault system

Fig. 4.6은 다대포분지의 사암과 이암에서 측정된 대자율이방성의 변형정도와 모양지수를 나타낸 것으로 전반적인 분포는 대구지역 셰일/사암의 호층과 유사하다. 사암의 이방성 크기는 모두 1.03 미만을 지시하는 반면 셰일의 이방성 크기는 최대 1.11까지 나타나고 있고 대구지역에 비해 다소 높은 분포를 보인다. 반면 대자율타원체의 모양지수는 두 지역 모두 편원 영역이 절대적으로 우세하나 다대포지역은 대구지역 셰일에 비해 모양지수는 작은 값을 보여준다. 다대포지역의 변형정도가 크게 나타나는 것은 동쪽으로 양산단층이 통과하고 있어 이에 대한 영향으로 추정된다.

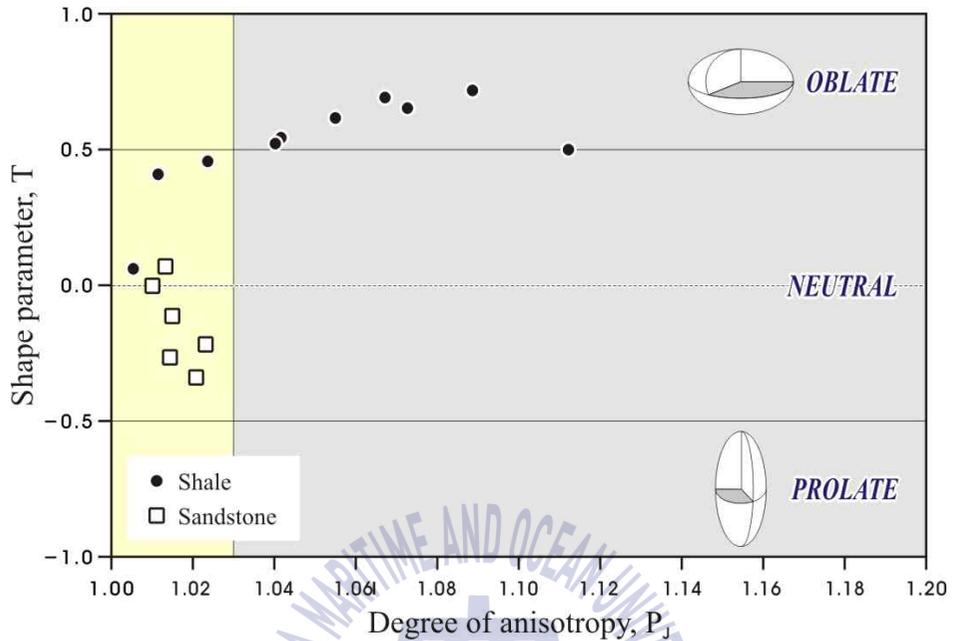


Fig 4.6 Anisotropy of magnetic susceptibility of sandstone and shale in Dadaepo area

Fig. 4.7은 부산 강서지역의 퇴적암과 화산암 분포지의 대자율이방성을 나타낸 것이다. 화산암의 변형정도는 대부분 1.03 이하를 보이는 반면 이암과 셰일이 우세한 퇴적암의 변형정도는 최대 1.16까지 넓은 범위에서 분포한다, 특히 대상지역은 양산단층계의 모량단층이 통과하고 있고 단층이 직접통과하는 지역에 분포하는 암석의 변형정도(P_j)는 1.16 이상으로 구별되며 이암과 셰일에서 이방성이 큰 암석은 단층과 동일한 이방성을 나타낸다.

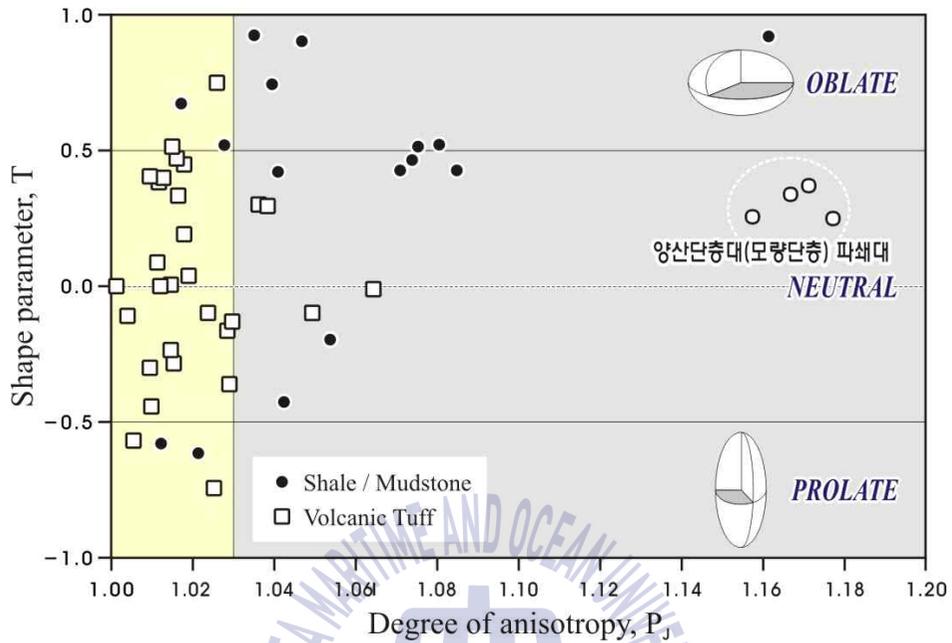


Fig. 4.7 Anisotropy of magnetic susceptibility of mudstone and shale in Gangseo area

대자율이방성을 통해서 단층작용을 포함하여 지각의 변형이 수반되지 않는 경우라도 퇴적암 중 이암과 셰일은 형성단계에서 층리면을 중심으로 이방성이 관찰되며 위치에 따라 단층작용과 유사한 정도의 변형량을 보여주는 것을 T-P_j 다이어그램을 통해 확인할 수 있었다.

4.2 퇴적암의 풍화지수 산정결과

4.2.1 풍화지수 산정 지역

풍화지수 연구를 위해 우리나라에 분포하는 암석 중 퇴적암 중 탄산염암에 해당하는 석회암, 돌로마이트를 제외한 사암, 이암, 셰일층으로부터 암석 시료를 채취하였다. 퇴적암 시료는 중생대 경상누층군과 고생대 평안누층군 지층에서 획득하였고 공간상의 위치는 Fig. 4.8과 같다. 총 196개의 시료 중 사암이 153개로 가장 많고, 이암 10개, 셰일은 33개가 풍화도 분석에 사용되었다.



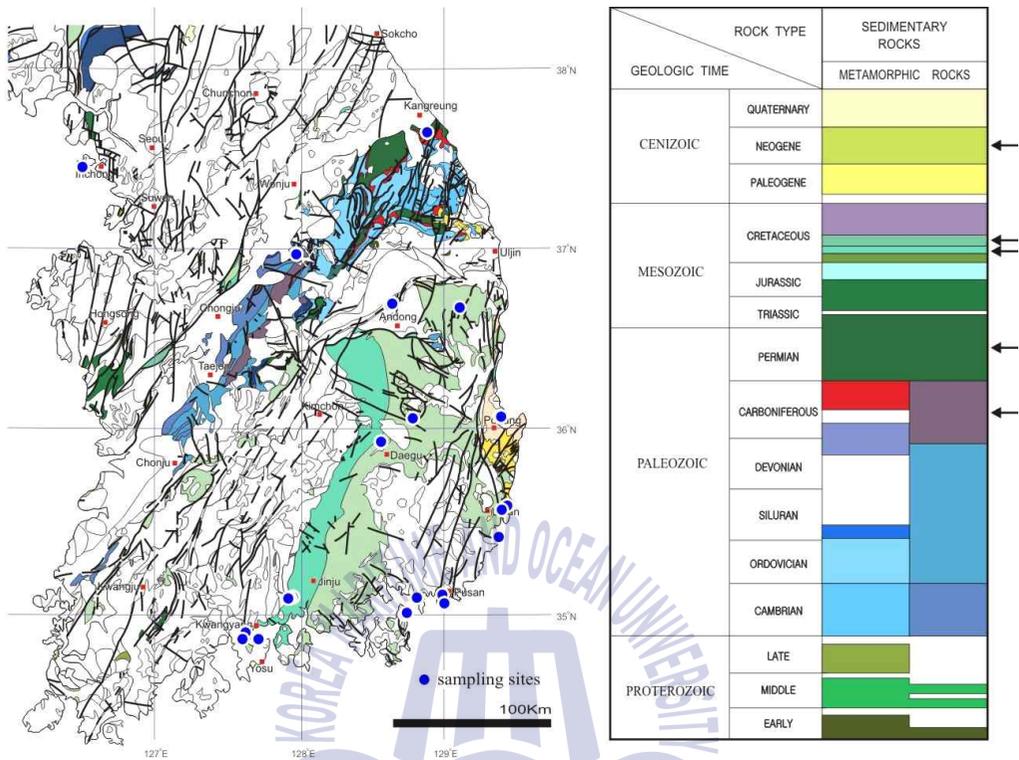


Fig. 4.8 Map of sampling locations for weathering index assessment(Kim et al., 2017)

풍화에 따른 광물의 변화를 파악하기 위하여 시료를 Ball Mill을 이용하여 분말로 만들고 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 분석된 시료는 정량프로그램인 Siroquant를 이용하여 광물별로 함량비를 산정하였고, 풍화에 강한 광물과 풍화에 약한 광물을 분리하였고, 암중에 따른 분포범위를 산정하였다.

퇴적암 시료를 대상으로 X-선 형광분석(전암분석)(Shimadzu, XRF-1700)과 X-선 회절분석(Philips, X'Pert-MPD System)을 수행하였고 암석의 화학조성을 이용하여, 다양한 화학적 풍화지수를 산정하고 상관성을 분석하였다.

4.2.2 풍화지수의 산정

쇄설성 퇴적암의 전암분석(X-선 형광분석)을 기초로 한 시료의 분석 결과를 몰비로 환산하여 정리하면 다음 Table 4.2와 같다. 표에서 sh는 셰일, ms는 이암, ss는 사암을 의미한다. 분석된 원소는 Al_2O_3 , CaO , CaO^* , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 , TiO_2 이다. 여기서 CaO^* 는 인산염과 탄산염의 효과를 제거한 CaO 의 함량비이다.

풍화가 진행될수록 CaO 와 Na_2O 는 용탈에 의해 총량이 감소하는 반면 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , LOI는 증가한다. 풍화지수와는 별개로 LOI는 강열감량에 의해 손실되는 양을 나타내는데, 암석의 변질정도에 비례하여 증가하며 이것은 암석 중에 포함된 H_2O 가 증가된 것을 의미하며, 한편으로 암석의 구성하는 광물군에서 H_2O 를 포함하는 점토광물이 증가된 것을 의미한다.



Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
sh-1	0.15	0.11	0.11	0.03	0.04	0.07	0.00	0.06	0.00	0.99	0.01	0.08
sh-2	0.17	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.00	0.05	0.00	1.03	0.01	0.02
sh-3	0.12	0.09	0.09	0.01	0.01	0.05	0.00	0.08	0.00	1.09	0.01	0.11
sh-4	0.12	0.07	0.07	0.02	0.01	0.04	0.00	0.07	0.00	1.18	0.00	0.10
sh-5	0.14	0.14	0.13	0.04	0.04	0.09	0.00	0.05	0.00	0.98	0.01	0.04
sh-6	0.19	0.01	0.01	0.04	0.07	0.04	0.00	0.03	0.00	0.98	0.01	0.05
sh-7	0.14	0.06	0.05	0.04	0.02	0.06	0.00	0.04	0.00	1.14	0.01	0.02
sh-8	0.14	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.07	0.00	1.25	0.00	0.05
sh-9	0.15	0.10	0.09	0.03	0.05	0.02	0.00	0.01	0.00	0.97	0.01	0.20
sh-10	0.15	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	1.22	0.00	0.12
sh-11	0.15	0.00	0.00	0.03	0.05	0.02	0.00	0.01	0.00	1.12	0.01	0.12
sh-12	0.14	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.08	0.00	1.20	0.00	0.07
sh-13	0.14	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.07	0.00	1.24	0.00	0.04
sh-14	0.15	0.10	0.09	0.04	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.93	0.01	0.21
sh-15	0.14	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.06	0.00	1.23	0.00	0.06
sh-16	0.13	0.01	0.01	0.04	0.04	0.03	0.00	0.02	0.00	1.15	0.01	0.11
sh-17	0.16	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.00	0.02	0.00	1.03	0.01	0.16
sh-18	0.17	0.01	0.00	0.04	0.03	0.05	0.00	0.01	0.00	1.06	0.01	0.11
sh-19	0.15	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	1.13	0.01	0.12
sh-20	0.15	0.17	0.16	0.04	0.03	0.06	0.00	0.01	0.00	0.83	0.01	0.26
sh-21	0.18	0.10	0.09	0.04	0.04	0.09	0.00	0.01	0.00	0.86	0.01	0.21
sh-22	0.18	0.06	0.06	0.03	0.04	0.06	0.00	0.01	0.00	0.97	0.01	0.16
sh-23	0.19	0.02	0.01	0.05	0.04	0.05	0.00	0.01	0.00	1.00	0.01	0.11
sh-24	0.12	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	1.25	0.01	0.08

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
sh-25	0.19	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.97	0.01	0.14
sh-26	0.14	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	1.19	0.01	0.09
sh-27	0.17	0.02	0.01	0.05	0.05	0.04	0.00	0.01	0.00	0.92	0.01	0.23
sh-28	0.20	0.01	0.01	0.05	0.06	0.08	0.00	0.01	0.00	0.91	0.01	0.14
sh-29	0.15	0.17	0.17	0.06	0.01	0.15	0.00	0.05	0.00	0.85	0.01	0.05
sh-30	0.18	0.11	0.11	0.05	0.03	0.12	0.00	0.03	0.00	0.86	0.01	0.09
sh-31	0.17	0.08	0.08	0.07	0.03	0.14	0.00	0.02	0.00	0.81	0.01	0.18
sh-32	0.14	0.15	0.15	0.02	0.05	0.12	0.00	0.06	0.00	1.00	0.01	0.00
sh-33	0.05	0.50	0.50	0.03	0.00	0.25	0.01	0.00	0.00	0.80	0.00	0.05
ss-1	0.16	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.00	0.03	0.00	1.07	0.01	0.05
ss-2	0.17	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.00	0.06	0.00	1.10	0.01	0.02
ss-3	0.14	0.04	0.04	0.03	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	1.16	0.01	0.04
ss-4	0.12	0.04	0.04	0.03	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	1.20	0.01	0.04
ss-5	0.13	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00	0.07	0.00	1.21	0.01	0.03
ss-6	0.18	0.05	0.04	0.04	0.01	0.10	0.00	0.11	0.00	0.94	0.01	0.07
ss-7	0.13	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.09	0.00	1.23	0.01	0.03
ss-8	0.14	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.00	0.07	0.00	1.14	0.01	0.04
ss-9	0.16	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.00	0.04	0.00	1.04	0.01	0.07
ss-10	0.15	0.10	0.09	0.06	0.01	0.03	0.00	0.08	0.00	1.00	0.00	0.03
ss-11	0.14	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.00	0.05	0.00	1.11	0.01	0.06
ss-12	0.15	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.00	0.08	0.00	1.08	0.01	0.04
ss-13	0.14	0.06	0.06	0.03	0.04	0.04	0.00	0.05	0.00	1.10	0.01	0.04
ss-14	0.12	0.04	0.04	0.03	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00	1.20	0.01	0.04
ss-15	0.15	0.05	0.05	0.03	0.02	0.06	0.00	0.06	0.00	1.08	0.01	0.08
ss-16	0.13	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	0.00	0.05
ss-17	0.09	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	1.36	0.00	0.05
ss-18	0.14	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	1.31	0.00	0.05

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ss-19	0.14	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.05	0.00	1.26	0.00	0.05
ss-20	0.13	0.02	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	1.26	0.00	0.05
ss-21	0.13	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	1.25	0.00	0.05
ss-22	0.18	0.01	0.01	0.03	0.05	0.03	0.00	0.01	0.00	1.07	0.01	0.12
ss-23	0.14	0.01	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.07	0.00	1.25	0.00	0.03
ss-24	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	1.45	0.00	0.03
ss-25	0.09	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	1.35	0.00	0.05
ss-26	0.14	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.07	0.00	1.27	0.00	0.02
ss-27	0.14	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	1.23	0.00	0.04
ss-28	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.03	0.00	1.29	0.00	0.07
ss-29	0.13	0.00	0.00	0.04	0.02	0.06	0.00	0.02	0.00	1.13	0.01	0.13
ss-30	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.03	0.00	1.31	0.00	0.06
ss-31	0.08	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	1.32	0.00	0.05
ss-32	0.10	0.23	0.23	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.90	0.01	0.28
ss-33	0.14	0.09	0.09	0.04	0.04	0.07	0.00	0.02	0.00	0.96	0.01	0.18
ss-34	0.13	0.12	0.12	0.03	0.03	0.06	0.00	0.03	0.00	1.00	0.01	0.20
ss-35	0.12	0.09	0.08	0.03	0.03	0.08	0.00	0.02	0.00	1.04	0.01	0.15
ss-36	0.11	0.07	0.07	0.02	0.02	0.07	0.00	0.03	0.00	1.14	0.01	0.13
ss-37	0.10	0.21	0.21	0.01	0.02	0.04	0.00	0.03	0.00	1.00	0.01	0.22
ss-38	0.13	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	0.00	0.05
ss-39	0.09	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	1.36	0.00	0.05
ss-40	0.14	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	1.31	0.00	0.05
ss-41	0.13	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.08	0.00	1.24	0.00	0.04
ss-42	0.13	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00	1.23	0.00	0.06
ss-43	0.17	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	1.17	0.00	0.13
ss-44	0.13	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00	1.29	0.00	0.03
ss-45	0.17	0.01	0.00	0.09	0.04	0.03	0.00	0.01	0.00	0.86	0.03	0.20

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ss-46	0.15	0.13	0.12	0.07	0.01	0.19	0.00	0.05	0.00	0.77	0.02	0.09
ss-47	0.13	0.14	0.13	0.05	0.03	0.23	0.00	0.05	0.00	0.82	0.01	0.08
ss-48	0.15	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	1.16	0.01	0.10
ss-49	0.12	0.16	0.16	0.03	0.03	0.06	0.00	0.01	0.00	0.92	0.01	0.27
ss-50	0.11	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	1.33	0.00	0.07
ss-51	0.17	0.00	0.00	0.05	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	1.01	0.01	0.16
ss-52	0.09	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	1.38	0.00	0.05
ss-53	0.16	0.08	0.08	0.04	0.04	0.05	0.00	0.02	0.00	0.92	0.01	0.21
ss-54	0.16	0.00	0.00	0.03	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	1.07	0.01	0.15
ss-55	0.17	0.09	0.08	0.05	0.05	0.07	0.00	0.01	0.00	0.87	0.01	0.21
ss-56	0.10	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	1.28	0.01	0.08
ss-57	0.08	0.09	0.08	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	1.19	0.00	0.19
ss-58	0.08	0.12	0.12	0.02	0.02	0.07	0.00	0.02	0.00	1.04	0.00	0.24
ss-59	0.06	0.21	0.21	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.00	0.55	0.00	0.33
ss-60	0.14	0.01	0.01	0.04	0.04	0.05	0.00	0.02	0.00	1.13	0.01	0.07
ss-61	0.19	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.00	0.02	0.00	1.14	0.01	0.09
ss-62	0.15	0.10	0.10	0.03	0.04	0.10	0.00	0.01	0.00	0.84	0.01	0.29
ss-63	0.08	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	1.38	0.00	0.05
ss-64	0.16	0.01	0.01	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	1.09	0.01	0.12
ss-65	0.10	0.14	0.14	0.03	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.96	0.01	0.30
ss-66	0.10	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	1.36	0.00	0.06
ss-67	0.07	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	1.40	0.00	0.05
ss-68	0.13	0.14	0.14	0.03	0.04	0.09	0.00	0.01	0.00	0.87	0.01	0.31
ss-69	0.07	0.12	0.12	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	1.21	0.00	0.18
ss-70	0.17	0.04	0.04	0.01	0.05	0.03	0.00	0.02	0.00	1.08	0.01	0.14
ss-71	0.13	0.11	0.11	0.04	0.03	0.05	0.00	0.01	0.00	0.98	0.01	0.23
ss-72	0.14	0.33	0.32	0.03	0.04	0.09	0.00	0.01	0.00	0.50	0.00	0.52

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ss-72	0.14	0.33	0.32	0.03	0.04	0.09	0.00	0.01	0.00	0.50	0.00	0.52
ss-73	0.09	0.11	0.11	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	1.18	0.00	0.19
ss-74	0.13	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00	1.13	0.01	0.15
ss-75	0.11	0.12	0.11	0.03	0.02	0.06	0.00	0.02	0.00	1.04	0.01	0.20
ss-76	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	1.45	0.00	0.04
ss-77	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	1.35	0.00	0.05
ss-78	0.08	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	1.43	0.00	0.03
ss-79	0.21	0.00	0.00	0.04	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.98	0.01	0.12
ss-80	0.13	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	1.27	0.01	0.07
ss-81	0.20	0.01	0.01	0.05	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.95	0.01	0.15
ss-82	0.17	0.02	0.01	0.04	0.05	0.05	0.00	0.02	0.00	1.07	0.01	0.07
ss-83	0.13	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	1.24	0.00	0.06
ss-84	0.11	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	1.31	0.00	0.06
ss-85	0.14	0.15	0.15	0.02	0.03	0.05	0.00	0.03	0.00	1.09	0.00	0.04
ss-86	0.10	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	1.30	0.00	0.12
ss-87	0.15	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.00	0.04	0.00	1.08	0.01	0.08
ss-88	0.16	0.13	0.13	0.05	0.02	0.13	0.00	0.03	0.00	0.84	0.01	0.13
ss-89	0.16	0.15	0.14	0.05	0.02	0.13	0.00	0.04	0.00	0.85	0.01	0.12
ss-90	0.17	0.01	0.00	0.04	0.06	0.03	0.00	0.01	0.00	1.07	0.01	0.07
ss-91	0.15	0.35	0.35	0.02	0.03	0.05	0.00	0.01	0.00	0.79	0.01	0.15
ss-92	0.13	0.07	0.07	0.01	0.03	0.05	0.00	0.04	0.00	1.20	0.00	0.08
ss-93	0.11	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.06	0.00	1.28	0.00	0.06
ss-94	0.17	0.00	0.00	0.03	0.06	0.02	0.00	0.01	0.00	1.04	0.01	0.16
ss-95	0.18	0.03	0.03	0.04	0.07	0.02	0.00	0.04	0.00	0.94	0.01	0.14
ss-96	0.12	0.07	0.07	0.02	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	1.18	0.00	0.05
ss-97	0.13	0.04	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00	1.17	0.00	0.14
ss-98	0.14	0.06	0.06	0.01	0.04	0.03	0.00	0.04	0.00	1.15	0.01	0.05

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ss-99	0.16	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00	1.10	0.01	0.14
ss-100	0.12	0.05	0.04	0.01	0.01	0.04	0.00	0.05	0.00	1.25	0.00	0.08
ss-101	0.14	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	1.17	0.01	0.10
ss-102	0.18	0.01	0.01	0.04	0.05	0.04	0.00	0.02	0.00	1.03	0.01	0.09
ss-103	0.11	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00	1.29	0.00	0.05
ss-104	0.15	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06	0.00	0.02	0.00	1.00	0.01	0.10
ss-105	0.18	0.01	0.01	0.04	0.04	0.05	0.00	0.01	0.00	0.98	0.01	0.18
ss-106	0.17	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00	1.06	0.01	0.09
ss-107	0.15	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06	0.00	0.02	0.00	1.01	0.01	0.08
ss-108	0.11	0.14	0.14	0.03	0.03	0.09	0.00	0.03	0.00	0.88	0.01	0.27
ss-109	0.09	0.20	0.20	0.03	0.02	0.12	0.00	0.03	0.00	0.78	0.01	0.38
ss-110	0.24	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.97	0.01	0.09
ss-111	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57	0.00	0.02
ss-112	0.17	0.00	0.00	0.04	0.05	0.08	0.00	0.00	0.00	1.06	0.01	0.08
ss-113	0.13	0.12	0.12	0.02	0.02	0.06	0.00	0.03	0.00	1.00	0.01	0.18
ss-114	0.15	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	1.13	0.00	0.10
ss-115	0.15	0.04	0.03	0.03	0.03	0.07	0.00	0.04	0.00	1.07	0.01	0.09
ss-116	0.15	0.07	0.06	0.04	0.02	0.08	0.00	0.05	0.00	0.99	0.01	0.13
ss-117	0.15	0.07	0.07	0.03	0.03	0.06	0.00	0.04	0.00	1.03	0.01	0.11
ss-118	0.15	0.12	0.11	0.03	0.03	0.07	0.00	0.04	0.00	0.97	0.01	0.13
ss-119	0.14	0.11	0.11	0.04	0.01	0.08	0.00	0.07	0.00	0.95	0.01	0.14
ss-120	0.15	0.08	0.08	0.03	0.02	0.08	0.00	0.05	0.00	0.96	0.01	0.18
ss-121	0.10	0.06	0.06	0.02	0.01	0.03	0.00	0.07	0.00	1.19	0.01	0.08
ss-122	0.11	0.03	0.03	0.03	0.01	0.04	0.00	0.06	0.00	1.20	0.01	0.06
ss-123	0.05	0.48	0.48	0.03	0.00	0.11	0.01	0.00	0.00	0.56	0.00	0.53
ss-124	0.14	0.01	0.00	0.04	0.04	0.04	0.00	0.02	0.00	1.15	0.01	0.07
ss-125	0.09	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.04	0.00	1.32	0.00	0.05

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ss-126	0.20	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.00	0.02	0.00	0.98	0.01	0.12
ss-127	0.14	0.02	0.01	0.03	0.03	0.06	0.00	0.02	0.00	1.16	0.01	0.08
ss-128	0.12	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.03	0.00	1.25	0.01	0.06
ss-129	0.15	0.01	0.01	0.04	0.03	0.05	0.00	0.02	0.00	1.12	0.01	0.08
ss-130	0.10	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	1.27	0.01	0.07
ss-131	0.11	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	1.35	0.00	0.03
ss-132	0.12	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	1.29	0.00	0.05
ss-133	0.12	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	1.29	0.00	0.05
ss-134	0.15	0.01	0.00	0.04	0.04	0.03	0.00	0.01	0.00	1.10	0.01	0.12
ss-135	0.10	0.14	0.14	0.01	0.02	0.03	0.00	0.04	0.00	1.08	0.00	0.18
ss-136	0.15	0.01	0.01	0.03	0.03	0.06	0.00	0.04	0.00	1.11	0.01	0.08
ss-137	0.15	0.08	0.08	0.03	0.03	0.07	0.00	0.03	0.00	0.99	0.01	0.16
ss-138	0.14	0.04	0.03	0.03	0.03	0.06	0.00	0.02	0.00	1.11	0.01	0.10
ss-139	0.13	0.13	0.12	0.01	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	1.13	0.00	0.05
ss-140	0.15	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	1.09	0.00	0.17
ss-141	0.17	0.10	0.10	0.04	0.03	0.10	0.00	0.04	0.00	0.85	0.01	0.18
ss-142	0.11	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.00	0.05	0.00	1.15	0.00	0.12
ss-143	0.16	0.00	0.00	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.07
ss-144	0.12	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	1.36	0.00	0.06
ss-145	0.15	0.00	0.00	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.01	0.21
ss-146	0.20	0.01	-0.01	0.11	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.73	0.01	0.27
ss-147	0.17	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.00	0.04	0.00	1.14	0.01	0.06
ss-148	0.17	0.06	0.06	0.02	0.03	0.02	0.00	0.06	0.00	1.12	0.01	0.03
ss-149	0.17	0.05	0.04	0.02	0.03	0.02	0.00	0.07	0.00	1.10	0.01	0.05
ss-150	0.16	0.06	0.05	0.02	0.03	0.04	0.00	0.07	0.00	1.08	0.01	0.05
ss-151	0.14	0.03	0.02	0.09	0.04	0.08	0.00	0.05	0.00	0.91	0.04	0.02
ss-152	0.13	0.09	0.08	0.11	0.01	0.16	0.01	0.03	0.00	0.77	0.05	0.07
ss-153	0.12	0.09	0.08	0.11	0.02	0.15	0.01	0.04	0.00	0.82	0.05	0.02

Table 4.2 Results of X-ray fluorescence analysis on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	Al ₂ O ₃	CaO	CaO*	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
ms-1	0.18	0.04	0.03	0.04	0.05	0.06	0.00	0.02	0.00	1.00	0.01	0.08
ms-2	0.17	0.09	0.08	0.05	0.04	0.06	0.00	0.02	0.00	1.00	0.01	0.01
ms-3	0.13	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	1.09	0.01	0.23
ms-4	0.13	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00	1.04	0.01	0.25
ms-5	0.14	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	1.19	0.01	0.14
ms-6	0.13	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	1.20	0.01	0.18
ms-7	0.10	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	1.19	0.00	0.10
ms-8	0.10	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	1.33	0.00	0.05
ms-9	0.15	0.01	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.05	0.00	1.17	0.01	0.06
ms-10	0.14	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	1.11	0.01	0.15

이들 값을 이용하여 산정된 화학적 풍화지수 V, SAR(R), WP(WIP), CIA*, CIW, CWI, Si-Ti, PIA 값은 Table 4.3과 같다. 화학적 풍화지수 산정 식 및 특징은 본 논문의 3.2.3절에 자세히 설명되어 있으므로 이를 참고하기 바란다. Table 4.2에서와 같이 sh는 셰일, ms는 이암, ss는 사암을 의미한다.

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
sh-1	0.8	6.7	85.8	42.1	46.9	3.2	83.7	40.0
sh-2	1.4	6.2	76.3	53.8	63.2	2.7	82.3	55.5
sh-3	0.6	9.5	74.9	38.4	40.1	3.6	86.5	37.3
sh-4	0.7	10.0	62.7	44.5	46.6	3.5	88.5	43.9
sh-5	0.7	6.8	87.2	39.5	44.0	3.0	83.4	36.8
sh-6	3.1	5.1	80.2	62.8	81.6	2.8	79.8	73.7
sh-7	1.1	8.1	55.2	55.0	60.8	2.8	84.6	56.1
sh-8	2.3	8.7	56.6	61.4	68.1	2.8	89.0	64.2
sh-9	1.7	6.3	56.0	51.7	61.4	4.0	81.9	52.5
sh-10	9.1	8.0	27.2	80.5	92.4	3.3	88.0	91.1
sh-11	7.1	7.3	42.3	74.6	95.9	3.5	83.0	94.2
sh-12	1.5	8.9	72.6	50.2	56.6	3.0	89.1	50.3



Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
sh-13	2.0	8.9	63.9	57.6	64.4	2.8	89.2	59.7
sh-14	1.3	6.3	59.2	49.7	58.3	4.1	82.1	49.6
sh-15	2.2	8.7	58.2	59.8	67.8	2.9	88.9	62.9
sh-16	2.9	8.8	46.3	66.9	82.8	3.6	85.3	77.4
sh-17	2.0	6.5	53.9	62.6	75.1	3.6	82.4	68.9
sh-18	3.1	6.3	37.1	78.2	91.9	3.3	81.6	90.2
sh-19	4.9	7.5	29.1	82.3	98.0	3.4	83.2	97.5
sh-20	0.8	5.5	58.8	43.1	47.4	4.4	80.8	41.5
sh-21	1.1	4.9	57.4	56.2	63.9	3.8	79.8	58.2
sh-22	1.7	5.5	50.4	63.0	72.6	3.5	80.6	67.7
sh-23	2.7	5.4	43.8	74.8	87.1	3.2	80.1	84.6
sh-24	2.9	10.2	27.6	78.2	89.9	3.3	86.1	88.1
sh-25	4.3	5.0	42.0	78.2	93.3	3.3	79.4	91.7
sh-26	3.9	8.7	32.2	75.8	88.1	3.3	83.1	85.8
sh-27	3.6	5.4	50.3	71.0	89.7	4.0	80.4	86.0
sh-28	2.4	4.5	62.7	72.7	91.2	3.2	78.2	88.2
sh-29	0.5	5.5	77.4	40.4	41.9	3.2	80.2	39.6
sh-30	0.8	4.9	70.9	51.0	55.7	3.2	79.3	51.2
sh-31	0.8	4.7	60.4	57.3	62.9	3.9	78.8	58.9
sh-32	0.6	7.0	105.0	36.3	41.2	2.6	83.6	32.1
sh-33	0.1	15.1	98.8	9.6	9.6	4.4	89.8	9.6
ss-1	1.6	6.9	61.9	60.4	72.2	3.0	83.0	65.5
ss-2	1.2	6.6	67.2	54.7	60.2	2.7	83.9	55.8
ss-3	0.9	8.4	63.3	50.4	50.9	2.9	86.6	50.4
ss-4	0.8	10.0	50.1	51.9	52.7	3.0	87.3	52.0
ss-5	1.1	9.4	57.8	52.3	55.7	2.9	87.0	52.6
ss-6	0.7	5.2	83.0	53.5	54.3	3.0	79.5	53.6
ss-7	1.0	9.5	62.3	54.3	55.5	2.8	87.3	54.5

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-8	1.1	8.3	59.3	54.6	57.9	3.0	85.3	55.2
ss-9	1.5	6.6	59.9	60.8	69.5	3.1	82.7	64.4
ss-10	0.8	6.6	72.2	44.8	46.3	2.9	84.5	44.4
ss-11	1.3	7.8	59.3	56.0	62.7	3.0	84.5	57.7
ss-12	1.1	7.1	79.8	51.1	56.7	2.8	85.0	51.4
ss-13	1.1	7.7	70.6	49.5	56.6	2.9	85.1	49.4
ss-14	0.8	10.2	49.6	53.3	54.1	3.1	87.5	53.4
ss-15	1.0	7.0	64.3	54.4	58.4	3.2	83.9	55.1
ss-16	19.4	10.3	32.9	75.4	97.5	2.9	90.9	96.5
ss-17	8.9	14.7	23.1	75.0	92.9	3.2	92.4	90.7
ss-18	11.5	9.6	38.1	72.9	92.9	2.8	90.4	90.3
ss-19	2.8	8.8	50.3	64.6	72.8	2.8	89.6	68.8
ss-20	1.9	9.8	59.3	55.6	63.1	2.9	90.4	57.4
ss-21	1.9	9.3	58.1	57.2	63.8	2.9	89.9	59.0
ss-22	4.5	6.1	53.1	70.7	89.8	3.3	81.8	86.0
ss-23	2.2	9.0	69.8	54.8	64.3	2.7	89.8	56.8
ss-24	13.8	17.4	19.6	77.3	98.5	3.0	92.1	97.9
ss-25	4.2	14.9	31.4	68.0	85.9	3.3	92.3	80.9
ss-26	2.2	9.3	73.5	54.1	64.5	2.6	90.1	56.0
ss-27	3.8	8.9	58.5	61.6	76.8	2.7	89.7	69.2
ss-28	1.2	14.7	36.2	63.8	70.7	3.5	89.2	67.2
ss-29	1.8	8.7	39.7	73.3	85.0	3.8	83.8	82.1
ss-30	1.1	14.6	33.2	66.2	70.8	3.4	90.3	68.6
ss-31	3.9	16.1	28.1	67.2	82.2	3.3	91.4	77.1
ss-32	0.4	8.7	69.5	27.3	29.2	5.5	85.3	24.0
ss-33	1.1	6.8	61.7	49.6	57.8	4.0	82.8	49.5
ss-34	0.8	7.9	67.1	41.1	46.2	4.3	84.0	38.5
ss-35	0.8	8.5	54.0	48.3	53.9	4.0	84.7	47.9

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-36	0.8	10.0	48.2	50.4	55.5	3.9	85.8	50.5
ss-37	0.4	10.2	68.1	27.4	29.1	5.0	86.9	24.5
ss-38	19.4	10.3	32.9	75.4	97.5	2.9	90.9	96.5
ss-39	8.9	14.7	23.1	75.0	92.9	3.2	92.4	90.7
ss-40	11.5	9.6	38.1	72.9	92.9	2.8	90.4	90.3
ss-41	1.7	9.3	71.7	52.2	59.5	2.8	90.1	52.9
ss-42	1.5	9.4	62.8	52.9	57.3	2.9	90.0	53.5
ss-43	11.0	6.7	35.3	78.3	92.1	3.2	86.7	90.4
ss-44	1.7	9.8	68.1	54.3	60.5	2.7	90.5	55.5
ss-45	4.7	5.0	40.5	78.4	96.9	4.1	74.3	96.0
ss-46	0.4	5.1	77.2	45.0	46.9	3.6	74.9	44.5
ss-47	0.4	6.2	96.5	38.9	43.3	3.5	79.0	36.1
ss-48	8.0	7.7	33.5	79.2	98.0	3.3	84.8	97.4
ss-49	0.7	7.5	63.8	37.5	41.8	5.0	83.8	34.3
ss-50	6.9	12.6	27.1	74.6	93.1	3.3	89.2	90.8
ss-51	3.8	6.0	40.4	78.6	95.3	3.6	81.2	94.0
ss-52	3.0	15.2	30.9	65.9	78.9	3.1	91.1	73.7
ss-53	1.4	5.7	61.7	53.9	63.2	3.9	81.5	55.5
ss-54	3.4	6.8	43.9	74.9	92.0	3.6	82.7	89.6
ss-55	1.3	5.2	60.3	55.0	64.8	3.9	80.5	57.1
ss-56	1.6	12.7	40.7	55.4	63.4	3.5	81.8	57.2
ss-57	0.6	14.9	44.8	39.0	42.3	5.2	89.9	37.0
ss-58	0.5	12.6	50.6	34.5	37.6	5.8	88.9	31.4
ss-59	0.3	8.6	65.0	20.2	21.8	7.7	84.2	15.0
ss-60	2.0	8.1	49.6	66.3	80.5	3.2	84.7	75.1
ss-61	5.2	6.1	53.3	71.8	89.9	2.9	82.0	86.5
ss-62	0.9	5.5	63.5	50.5	59.0	4.6	80.8	50.7
ss-63	5.4	16.3	24.9	71.8	89.1	3.3	91.4	85.6

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-64	5.7	6.9	44.2	73.2	94.3	3.4	83.1	92.0
ss-65	0.6	9.8	55.9	36.6	41.6	6.0	86.1	32.3
ss-66	7.0	14.0	21.7	76.9	93.6	3.3	90.3	91.8
ss-67	3.4	19.2	22.6	68.5	80.3	3.4	92.9	76.2
ss-68	0.7	6.5	62.4	42.4	48.1	5.1	82.5	40.1
ss-69	0.6	17.9	34.0	32.4	34.9	5.5	91.5	29.6
ss-70	2.4	6.3	58.9	61.6	74.9	3.4	82.3	68.0
ss-71	0.9	7.5	52.7	46.4	52.4	4.6	83.4	45.3
ss-72	0.4	3.5	90.3	27.8	30.0	6.4	77.1	23.9
ss-73	0.8	13.1	37.7	39.2	43.0	4.8	90.4	36.9
ss-74	1.4	8.6	46.9	57.2	66.6	3.8	85.0	60.0
ss-75	0.7	9.5	48.9	42.1	45.3	4.7	85.7	40.8
ss-76	8.0	17.8	17.4	77.1	90.3	3.0	93.3	88.3
ss-77	2.1	13.7	32.1	63.0	69.1	3.1	91.2	65.7
ss-78	3.5	18.0	22.8	67.5	78.3	3.0	93.2	74.2
ss-79	12.0	4.7	46.8	79.1	100.0	3.0	78.9	100.0
ss-80	12.8	9.9	24.8	80.9	98.8	3.2	87.1	98.4
ss-81	4.4	4.8	42.2	79.3	95.8	3.3	79.1	94.7
ss-82	2.4	6.4	55.3	68.0	83.3	3.0	82.9	78.4
ss-83	1.5	9.5	53.5	57.1	65.0	2.9	88.8	59.4
ss-84	1.5	12.3	39.4	58.4	64.7	3.1	90.3	60.4
ss-85	0.8	7.9	67.0	40.0	44.1	2.9	86.1	37.7
ss-86	1.6	13.5	40.1	55.8	63.1	3.8	91.8	57.6
ss-87	1.4	7.0	60.8	57.1	65.2	3.1	84.2	59.4
ss-88	0.6	5.3	70.1	46.7	50.0	3.6	78.7	46.2
ss-89	0.6	5.3	69.8	44.8	47.0	3.5	78.8	44.3
ss-90	5.0	6.2	58.9	69.3	91.3	2.9	83.0	87.3
ss-91	0.4	5.3	85.2	27.8	29.3	3.6	81.3	25.2

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-92	1.0	9.5	57.4	49.0	54.6	3.2	88.4	48.7
ss-93	1.1	11.2	48.3	54.8	57.2	3.1	90.4	55.2
ss-94	7.9	6.2	57.3	70.3	95.3	3.5	83.2	92.7
ss-95	2.9	5.1	86.2	57.2	74.7	3.3	79.4	63.5
ss-96	0.7	9.5	47.4	50.0	50.6	3.0	88.5	50.0
ss-97	1.4	9.3	52.4	53.0	59.1	3.7	88.8	53.8
ss-98	1.3	8.4	73.0	48.1	56.9	2.9	85.9	47.2
ss-99	2.3	7.0	40.0	72.0	81.7	3.4	84.7	78.8
ss-100	0.9	10.8	48.2	52.0	54.5	3.2	89.8	52.2
ss-101	2.7	8.6	39.3	69.4	81.9	3.4	84.8	77.9
ss-102	3.8	5.7	56.9	70.4	89.0	3.1	81.5	85.1
ss-103	1.5	11.9	46.6	56.0	63.3	3.1	90.7	57.8
ss-104	1.2	6.7	70.1	51.2	61.6	3.3	84.2	51.8
ss-105	3.3	5.5	42.9	76.7	92.1	3.6	81.0	90.1
ss-106	1.6	6.3	68.2	57.2	66.4	3.1	82.6	59.9
ss-107	1.2	6.7	70.5	51.2	61.6	3.2	84.2	51.8
ss-108	0.5	7.9	69.8	35.8	39.3	5.2	84.5	32.8
ss-109	0.3	8.6	74.2	26.8	28.6	7.2	85.1	23.4
ss-110	8.7	4.0	34.0	85.2	97.1	2.8	76.5	96.7
ss-111	42.4	34.4	10.3	77.3	98.1	3.0	93.0	97.4
ss-112	2.6	6.2	49.4	76.8	98.2	3.1	82.2	97.6
ss-113	0.7	7.7	62.4	42.3	46.1	4.1	85.0	40.8
ss-114	2.4	7.5	49.0	66.1	81.7	3.2	86.0	76.1
ss-115	1.2	7.1	60.7	59.0	67.0	3.3	83.6	61.8
ss-116	0.9	6.4	67.8	52.1	56.8	3.5	82.3	52.6
ss-117	1.0	6.8	63.5	52.2	58.0	3.4	83.6	52.7
ss-118	0.8	6.4	69.9	45.9	50.6	3.5	82.8	45.0
ss-119	0.6	6.6	73.3	43.0	44.7	3.7	82.4	42.4

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-120	0.8	6.5	66.9	50.0	54.4	3.9	82.7	50.0
ss-121	0.7	11.6	53.9	44.3	45.5	3.5	87.6	43.9
ss-122	0.9	10.8	51.8	52.4	54.6	3.2	87.5	52.6
ss-123	0.1	11.7	82.1	9.1	9.1	14.4	87.9	8.9
ss-124	2.6	8.1	46.3	69.4	83.9	3.2	84.4	79.6
ss-125	1.4	14.4	33.9	63.1	66.8	3.3	89.4	64.7
ss-126	2.5	5.0	58.7	69.5	84.0	3.1	80.6	79.8
ss-127	1.8	8.3	42.7	69.8	81.6	3.2	84.5	77.8
ss-128	2.1	10.5	38.0	68.6	78.9	3.2	86.9	75.2
ss-129	2.1	7.6	46.8	70.3	83.1	3.2	83.5	79.3
ss-130	1.1	13.4	34.3	54.9	58.9	3.6	88.4	55.6
ss-131	1.7	12.7	46.8	57.1	60.5	2.8	90.7	58.0
ss-132	3.2	10.3	39.7	66.7	74.7	3.0	88.7	71.3
ss-133	3.3	10.9	51.9	59.9	72.8	3.0	89.9	65.3
ss-134	4.0	7.2	39.3	75.3	92.3	3.4	83.6	90.1
ss-135	0.6	10.6	66.4	33.4	36.1	4.5	88.4	30.4
ss-136	1.6	7.2	53.8	66.5	75.7	3.2	84.4	71.8
ss-137	0.9	6.8	61.4	51.0	56.6	3.7	84.1	51.2
ss-138	1.4	8.1	49.3	61.4	71.1	3.4	85.4	65.6
ss-139	0.8	8.7	66.1	40.2	43.7	3.0	87.3	38.4
ss-140	2.2	7.3	45.7	70.4	87.9	3.7	86.2	83.9
ss-141	0.8	5.2	71.1	49.9	55.0	3.8	79.6	49.9
ss-142	0.8	10.6	60.4	41.2	45.3	3.8	87.8	39.2
ss-143	19.5	7.5	37.7	77.9	100.2	2.9	87.2	100.2
ss-144	21.1	11.5	21.6	78.5	94.8	3.0	90.0	93.4
ss-145	35.6	5.8	28.5	80.5	99.0	4.4	80.8	98.7
ss-146	14.1	3.6	22.3	90.1	102.6	4.1	75.1	103.0
ss-147	2.7	6.9	56.8	63.3	73.2	2.9	84.4	68.3

Table 4.3 Results of weathering index on clastic sedimentary rocks(continued)

No.	V	SAR(R)	WP(WIP)	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
ss-148	1.3	6.8	66.1	53.2	58.0	2.7	84.2	53.9
ss-149	1.5	6.4	73.3	54.2	60.2	2.8	83.9	55.2
ss-150	1.2	6.8	73.0	51.9	57.4	2.8	84.1	52.4
ss-151	1.1	6.7	76.2	54.1	64.9	3.4	68.3	56.1
ss-152	0.5	6.1	61.1	48.9	51.8	4.1	64.1	48.7
ss-153	0.5	7.0	64.1	46.9	50.2	3.8	65.3	46.4
ms-1	2.0	5.6	60.4	64.4	78.2	3.1	81.1	72.3
ms-2	1.3	5.7	63.0	54.6	62.3	2.7	81.2	56.1
ms-3	2.3	8.4	37.1	68.5	79.0	4.5	85.3	75.2
ms-4	2.3	7.7	37.7	70.3	80.9	4.6	84.3	77.5
ms-5	3.5	8.6	36.7	72.2	82.4	3.6	84.6	79.5
ms-6	4.6	9.2	26.6	78.8	90.9	4.0	86.0	89.2
ms-7	5.9	11.8	36.6	66.3	84.4	4.0	88.3	78.6
ms-8	5.3	13.1	44.4	61.4	80.2	3.1	89.0	71.5
ms-9	2.2	7.9	50.7	66.1	74.9	3.0	84.7	71.1
ms-10	2.8	7.7	36.1	74.0	84.4	3.8	82.7	81.9

4.2.3 풍화지수간 상관성 분석

퇴적암의 풍화도를 적합한 판정할 수 있는 풍화지수를 결정하기 위해 풍화지수들의 상관성을 비교하였다. 상관성 분석을 위해서 SPSS(PASW Statistics, ver. 18.0) 프로그램을 이용하였다. 풍화지수 뿐만 아니라 강열감량도 같이 비교하였다. 풍화과정에 따른 지수의 상관성은 우선 각각의 지수를 변수로 하여 산점도(scatter plot)를 작성하고 선형관계를 확인하였고, 이변량 상관계수를 통해 유의성을 검토하였다. 산점도가 일정한 경향을 보이는 경우 지수간 유의성이 있다는 것을 의미하며 흩어진 경우는 유의성이 없는 것을 의미한다.

사암, 이암, 셰일에서 계산된 풍화지수들의 산점도에서 V, SAR, SITI 풍화지

수는 상관성이 관찰되지 않는다(Fig. 4.9 - Fig. 4.11). 산점도에서 상관성이 분명하지 않은 3개의 풍화지수는 SiO_2 함량을 기초로 한 풍화지수라는 것이 공통적이다. 조암광물 중 SiO_2 는 풍화저항력이 매우 높아 Si를 사용하는 풍화지수는 이동성이 낮은 화학종과 SiO_2 의 당량비로써 지수를 표현하며, 쇄설성 퇴적암의 경우 장석의 풍화에 기초한 풍화지수(CIA, CIW, PIA) 간의 상관성이 높은 것으로 나타났다. Table 4.4는 Table 4.3의 풍화지수 값을 이용하여 정리한 것이다.

풍화지수를 변수로 피어슨 상관계수의 절댓값이 0.7 이상인 동시에 유의확률이 오차의 한계(알파) 0.05보다 작은 두 변수의 조합이 풍화지수 간의 상관성이 있다고 할 수 있다($-1 \leq$ 상관계수 ≤ 1). 이변량 상관계수(Bivariate Correlation Coefficient)의 행렬 및 상관분석에서 유의성 검증은 양측검정을 기본설정으로 하였다.

사암에서 계산한 풍화지수의 상관성은(Table 4.5) 99% 수준에서 6개 이상의 지수들과 유의성을 나타내고 있으며, 이때 변수는 LOI, Wp, CIA, CIW, PIA로 나타났다. 사암은 이암과 셰일은 물론 화성암과 비교해도 지수 간의 유의성이 상당히 높은 것을 알 수 있다(Choi, 2011). Table 4.6은 이암의 상관성을 제시한 것으로 99% 수준으로 4개 이상의 유의성을 보이는 지수는 Wp만 유일하며, CIA, CIW, PIA는 3개의 지수와 유의성을 보인다. Table 4.7는 셰일의 상관성을 나타낸 것으로 다른 지수들과 4개 이상이 99% 수준으로 유의한 지수는 V, Wp, CIA, CIW, PIA로 나타났다.

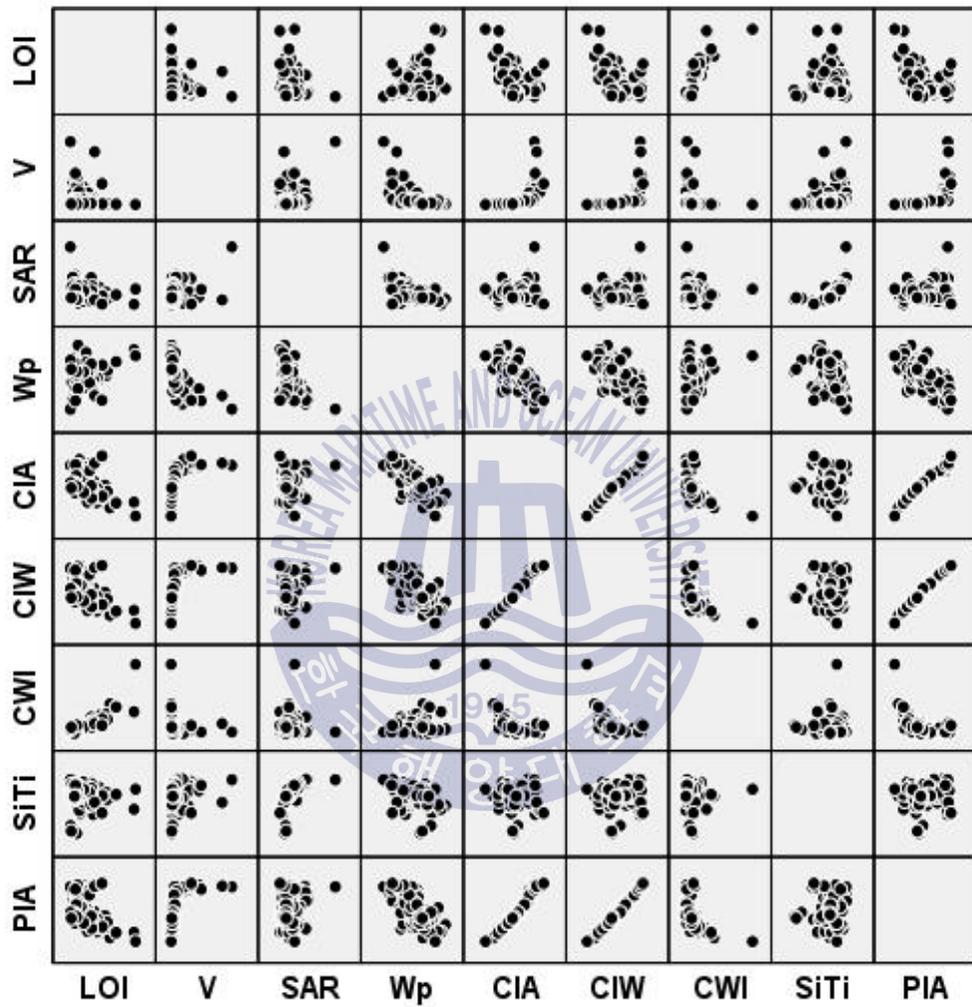


Fig. 4.9 Matrix plot of sandstone

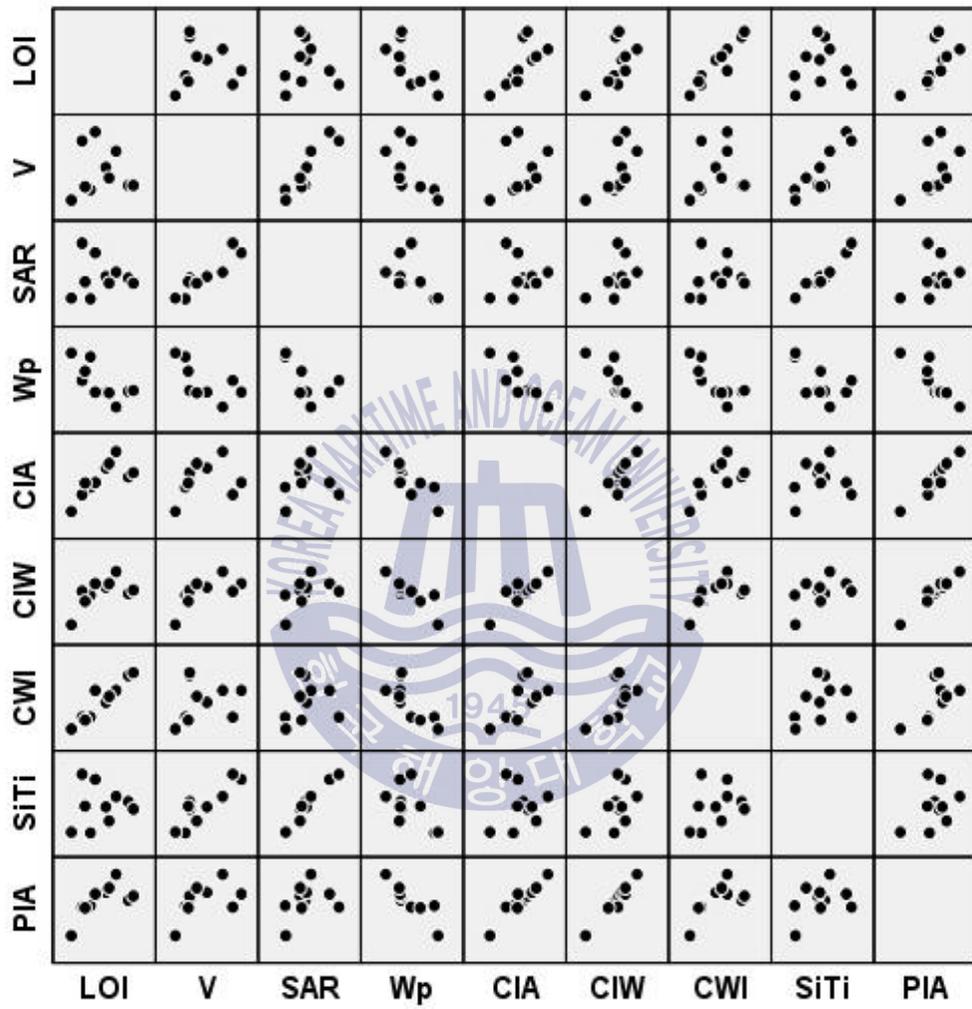


Fig. 4.10 Matrix plot of mudstone

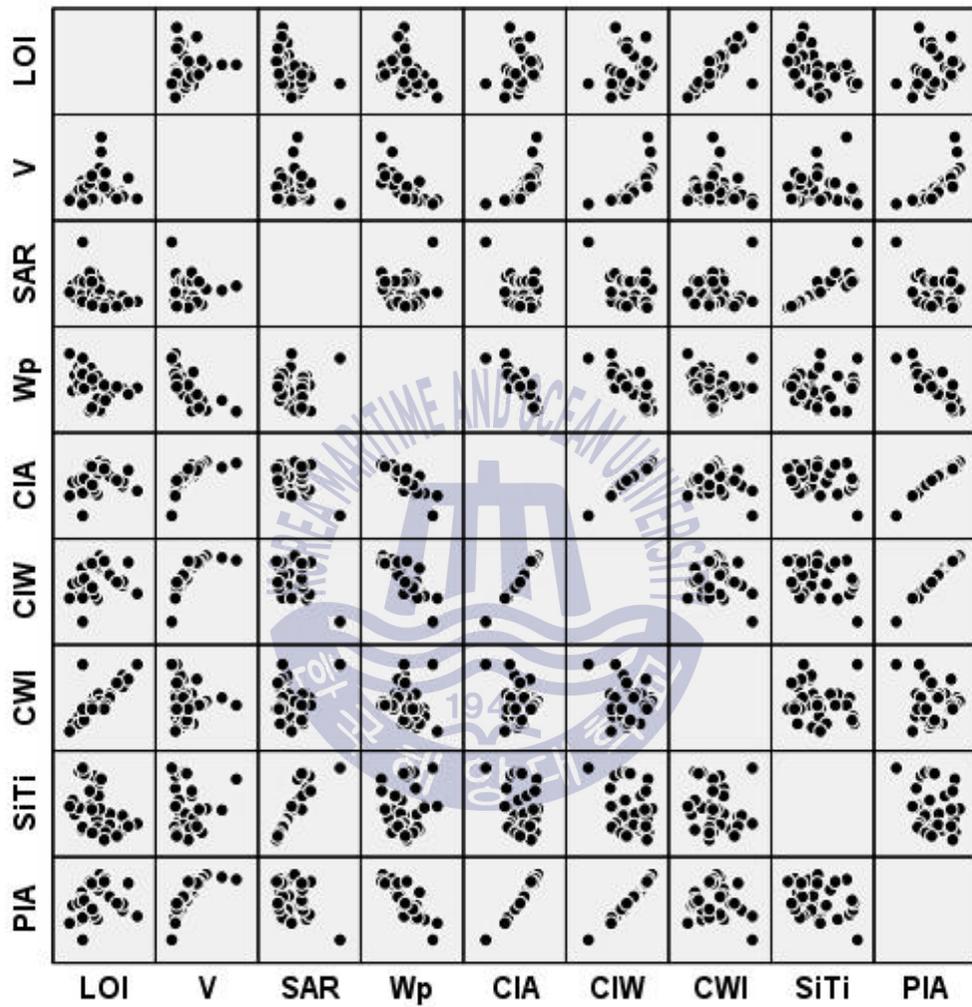


Fig. 4.11 Matrix plot of shale

Table 4.4 Descriptive statistics of chemical weathering indices on sedimentary rock types

Rock type	Index	Sum	Standard error	Median	Standard deviation	Variance	Kurtosis	Skewness	Range	Min.	Max.	Confidence level
Sandstone	V	3.5	0.5	1.5	5.7	32.8	20.6	4.1	42.3	0.1	42.4	0.9
	SAR	9.1	0.3	8.1	3.8	14.8	11.6	2.4	30.9	3.5	34.4	0.6
	Wp	52.8	1.4	53.8	16.8	281.1	-0.4	-0.1	86.2	10.3	96.5	2.7
	CIA	57.7	1.2	55.8	14.6	212.9	0.0	-0.4	80.9	9.1	90.1	2.3
	CIW	67.0	1.6	63.8	20.1	404.5	-0.7	-0.1	93.5	9.1	102.6	3.2
	CWI	3.6	0.1	3.3	1.2	1.5	42.8	5.5	11.8	2.6	14.4	0.2
	Si-Ti	85.3	0.4	85.0	4.9	24.5	3.4	-1.2	29.3	64.1	93.3	0.8
	PIA	62.8	1.7	57.6	21.2	451.1	-0.7	0.1	94.1	8.9	103.0	3.4
Mudstone	V	3.2	0.5	2.6	1.6	2.4	-0.9	0.7	4.6	1.3	5.9	1.1
	SAR	8.6	0.7	8.1	2.4	5.6	0.4	0.8	7.5	5.6	13.1	1.7
	Wp	42.9	3.7	37.4	11.7	135.9	-0.4	0.7	36.4	26.6	63.0	8.3
	CIA	67.7	2.2	67.4	6.8	46.5	0.6	-0.3	24.2	54.6	78.8	4.9
	CIW	79.8	2.4	80.6	7.5	56.3	3.2	-1.3	28.6	62.3	90.9	5.4
	CWI	3.6	0.2	3.7	0.6	0.4	-1.2	0.1	1.9	2.7	4.6	0.5
	Si-Ti	84.7	0.8	84.6	2.6	7.0	-0.6	0.2	7.9	81.1	89.0	1.9
	PIA	75.3	2.7	76.3	8.7	75.5	2.4	-0.9	33.1	56.1	89.2	6.2
Shale	V	2.3	0.3	1.7	2.0	3.8	4.4	1.9	9.1	0.1	9.1	0.7
	SAR	7.2	0.4	6.7	2.2	4.8	3.8	1.5	10.6	4.5	15.1	0.8
	Wp	59.5	3.4	58.2	19.5	381.0	-0.1	0.3	77.8	27.2	105.0	6.9
	CIA	58.2	2.8	57.6	16.3	265.5	0.8	-0.7	72.7	9.6	82.3	5.8
	CIW	67.6	3.7	64.4	21.1	445.4	0.0	-0.5	88.4	9.6	98.0	7.5
	CWI	3.4	0.1	3.3	0.5	0.2	-0.2	0.5	1.8	2.6	4.4	0.2
	Si-Ti	83.4	0.6	83.0	3.5	12.5	-1.0	0.5	11.6	78.2	89.8	1.3
	PIA	63.2	3.8	59.7	22.0	483.8	-0.6	-0.2	87.9	9.6	97.5	7.8

Table 4.5 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of sandstone.

Item		L.O.I	V	SAR	Wp	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
L.O.I	Pearson correlation coefficient	1	-.133	-.259**	.260**	-.466**	-.403**	.845**	-.258**	-.402**
	p-value(2-side test)		.101	.001	.001	.000	.000	.000	.001	.000
V	Pearson correlation coefficient	-.133	1	.335**	-.553**	.567**	.607**	-.151	.161*	.626**
	p-value(2-side test)	.101		.000	.000	.000	.000	.063	.047	.000
SAR	Pearson correlation coefficient	-.259**	.335**	1	-.601**	.085	.081	.012	.705**	.094
	p-value(2-side test)	.001	.000		.000	.295	.318	.884	.000	.248
Wp	Pearson correlation coefficient	.260**	-.553**	-.601**	1	-.698**	-.675**	.205*	-.451**	-.696**
	p-value(2-side test)	.001	.000	.000		.000	.000	.011	.000	.000
CIA	Pearson correlation coefficient	-.466**	.567**	.085	-.698**	1	.983**	-.568**	.072	.986**
	p-value(2-side test)	.000	.000	.295	.000		.000	.000	.377	.000
CIW	Pearson correlation coefficient	-.403**	.607**	.081	-.675**	.983**	1	-.507**	.071	.995**
	p-value(2-side test)	.000	.000	.318	.000	.000		.000	.380	.000
CWI	Pearson correlation coefficient	.845**	-.151	.012	.205*	-.568**	-.507**	1	-.096	-.491**
	p-value(2-side test)	.000	.063	.884	.011	.000	.000		.238	.000
Si-Ti	Pearson correlation coefficient	-.258**	.161*	.705**	-.451**	.072	.071	-.096	1	.075
	p-value(2-side test)	.001	.047	.000	.000	.377	.380	.238		.356
PIA	Pearson correlation coefficient	-.402**	.626**	.094	-.696**	.986**	.995**	-.491**	.075	1
	p-value(2-side test)	.000	.000	.248	.000	.000	.000	.000	.356	

NOTE

*: The correlation coefficient is significant at the 0.05 level.

** : The correlation coefficient is significant at the 0.01 level.

Table 4.6 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of mudstone.

Item		L.O.I	V	SAR	Wp	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
L.O.I	Pearson correlation coefficient	1	-.016	-.017	-.727*	.739*	.590	.945**	.095	.674*
	p-value(2-side test)		.964	.963	.017	.015	.073	.000	.794	.033
V	Pearson correlation coefficient	-.016	1	.913**	-.572	.261	.646*	.187	.872**	.507
	p-value(2-side test)	.964		.000	.084	.467	.044	.604	.001	.135
SAR	Pearson correlation coefficient	-.017	.913**	1	-.513	.101	.483	.184	.971**	.332
	p-value(2-side test)	.963	.000		.129	.781	.158	.611	.000	.348
Wp	Pearson correlation coefficient	-.727*	-.572	-.513	1	-.845**	-.858**	-.776**	-.569	-.884**
	p-value(2-side test)	.017	.084	.129		.002	.002	.008	.086	.001
CIA	Pearson correlation coefficient	.739*	.261	.101	-.845**	1	.869**	.652*	.163	.954**
	p-value(2-side test)	.015	.467	.781	.002		.001	.041	.652	.000
CIW	Pearson correlation coefficient	.590	.646*	.483	-.858**	.869**	1	.611	.500	.976**
	p-value(2-side test)	.073	.044	.158	.002	.001		.061	.141	.000
CWI	Pearson correlation coefficient	.945**	.187	.184	-.776**	.652*	.611	1	.290	.657
	p-value(2-side test)	.000	.604	.611	.008	.041	.061		.417	.039
Si-Ti	Pearson correlation coefficient	.095	.872**	.971**	-.569	.163	.500	.290	1	.373
	p-value(2-side test)	.794	.001	.000	.086	.652	.141	.417		.289
PIA	Pearson correlation coefficient	.674*	.507	.332	-.884**	.954**	.976**	.657*	.373	1
	p-value(2-side test)	.033	.135	.348	.001	.000	.000	.039	.289	

NOTE

*: The correlation coefficient is significant at the 0.05 level.

** : The correlation coefficient is significant at the 0.01 level.

Table 4.7 Correlation coefficient matrix and correlation analysis of shale.

	Item	L.O.I	V	SAR	Wp	CIA	CIW	CWI	Si-Ti	PIA
L.O.I	Pearson correlation coefficient	1	.129	-.421*	-.400*	.220	.238	.799**	-.468**	.227
	p-value(2-side test)		.475	.015	.021	.219	.183	.000	.006	.205
V	Pearson correlation coefficient	.129	1	-.046	-.696**	.759**	.775**	-.074	.040	.795**
	p-value(2-side test)	.475		.799	.000	.000	.000	.683	.827	.000
SAR	Pearson correlation coefficient	-.421*	-.046	1	.110	-.357*	-.369*	.075	.866**	-.315
	p-value(2-side test)	.015	.799		.541	.041	.035	.678	.000	.074
Wp	Pearson correlation coefficient	-.400*	-.696**	.110	1	-.866**	-.822**	-.145	.083	-.845**
	p-value(2-side test)	.021	.000	.541		.000	.000	.421	.645	.000
CIA	Pearson correlation coefficient	.220	.759**	-.357*	-.866**	1	.988**	-.194	-.259	.987**
	p-value(2-side test)	.219	.000	.041	.000		.000	.280	.145	.000
CIW	Pearson correlation coefficient	.238	.775**	-.369*	-.822**	.988**	1	-.164	-.297	.994**
	p-value(2-side test)	.183	.000	.035	.000	.000		.362	.094	.000
CWI	Pearson correlation coefficient	.799**	-.074	.075	-.145	-.194	-.164	1	-.176	-.139
	p-value(2-side test)	.000	.683	.678	.421	.280	.362		.328	.439
Si-Ti	Pearson correlation coefficient	-.468**	.040	.866**	.083	-.259	-.297	-.176	1	-.267
	p-value(2-side test)	.006	.827	.000	.645	.145	.094	.328		.133
PIA	Pearson correlation coefficient	.227	.795**	-.315	-.845**	.987**	.994**	-.139	-.267	1
	p-value(2-side test)	.205	.000	.074	.000	.000	.000	.439	.133	

NOTE

*: The correlation coefficient is significant at the 0.05 level.

** : The correlation coefficient is significant at the 0.01 level.

풍화지수의 상관성 분석에서 사암, 이암, 셰일에서 공통으로 유의한 상관성을 보이는 지수는 Wp, CIA, CIW, PIA이며 이 중에서 장석의 풍화지수에 가장 널리 이용되는 화학적 풍화지수(CIA)는 암종과 광물의 지수 범위가 제시되어 있어 활용이 간편하며, 풍화의 진행경로 확인이 쉬워 연구자들에게 널리 활용되고 있다(Fig. 4.12). CIA는 삼각도표로 표현이 가능하다. 삼각도표의 각 꼭지점은 3개의 원소 $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$, K_2O , Al_2O_3 를 나타내며 각 각의 양이 도표에 나타내어진다. 신선한 기반암에서의 풍화지수는 일반적으로 45 ~ 55의 값을 보이며, 풍화가 진행되면 최종적으로 카올린을 지시하는 100의 값에 도달하게 된다. 또한, 풍화단계의 있는 시료를 분석함으로써 암종별 풍화경로를 알 수 있고 화학종에 따라 생성되는 2차 광물의 종류를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다.

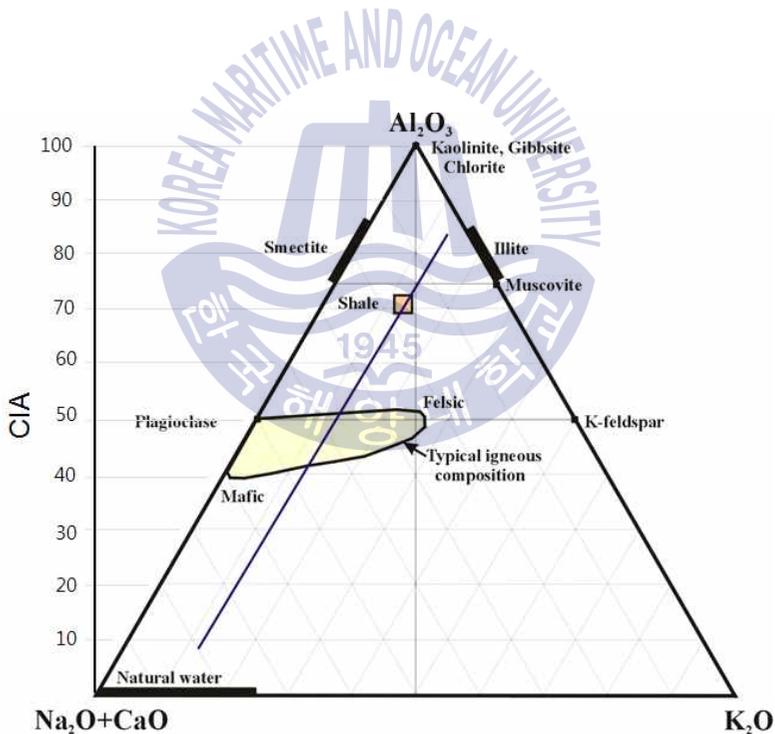


Fig. 4.12 Range of chemical index of alteration (CIA) in major rocks and minerals (modified from Nesbitt and Young, 1982; De Jayawardena and Izawa, 1994).

Fig. 4.13 ~ 4.15는 Nesbitt and Young(1982)의 자료와 본 연구에서 측정된 각 사암, 이암, 세일의 화학적 풍화지수(CIA)를 암종별로 구분하여 삼각도표에 나타낸 것이다. 회색원과 빨간색원이 본 연구에서 산정된 값이다. 풍화를 받은 정도에 따라 사암, 이암, 세일의 풍화지수가 선형적으로 증가하고 있다. 풍화의 진행경로는 신선한 상태의 퇴적암에서 일라이트와 녹니석의 단계로 풍화가 진행되며, 분석에 사용된 퇴적암에서 스멕타이트 계열의 2차 광물이 생성되는 경로의 풍화는 관찰되지 않는다. 이는 연구에 사용한 사암, 이암, 세일은 지속적인 노출 환경에서 일라이트-녹니석을 거쳐 카올린에 도달하는 경로를 따라 풍화가 진행되는 것을 나타내고 있다. 또 하나 이암과 세일의 경우 사암과 달리 풍화상태가 군집형태를 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 이방성이 큰 이암과 세일은 풍화가 시간에 따라 일정하게 진행되는 것이 아니라 급격하게 단계형식으로 진행되어 나타나는 것을 알 수 있다.

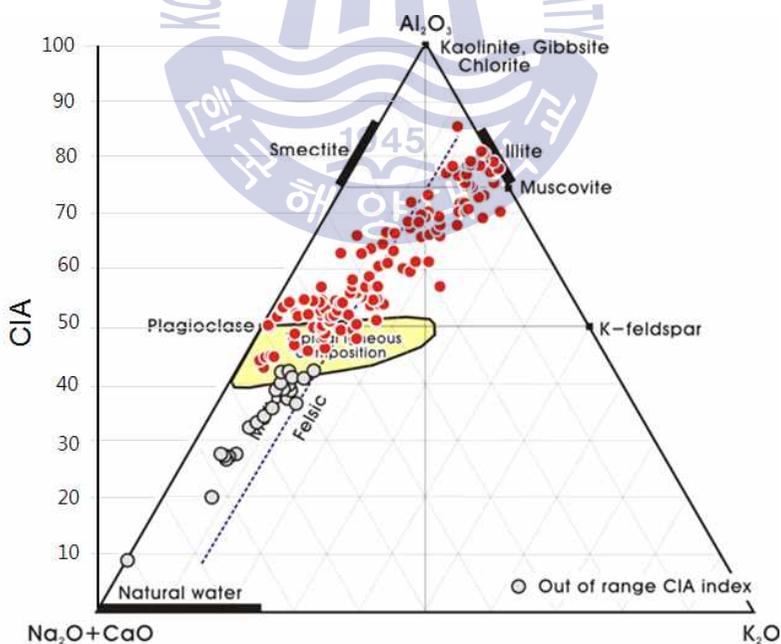


Fig. 4.13 Chemical index of alteration(CIA) of sandstone

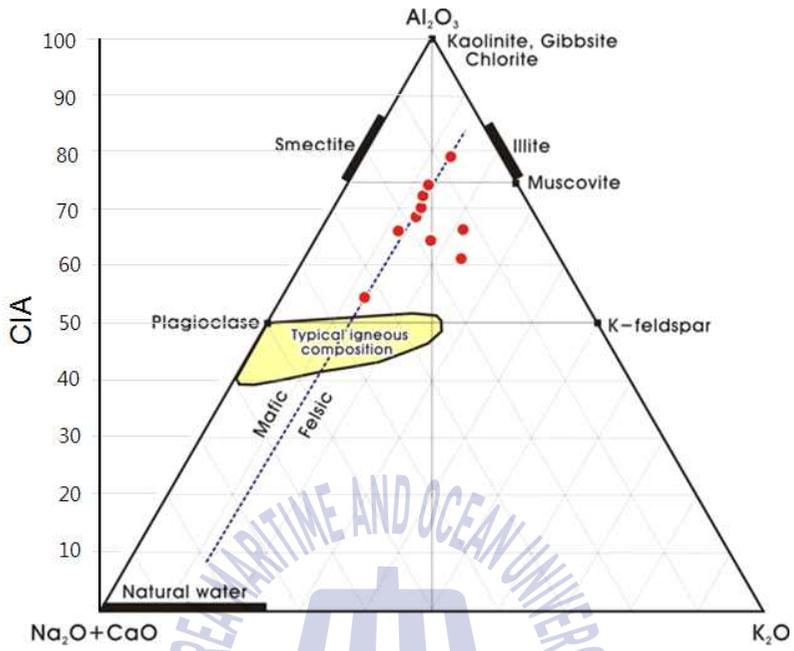


Fig. 4.14 Chemical index of alteration(CIA) of mudstone

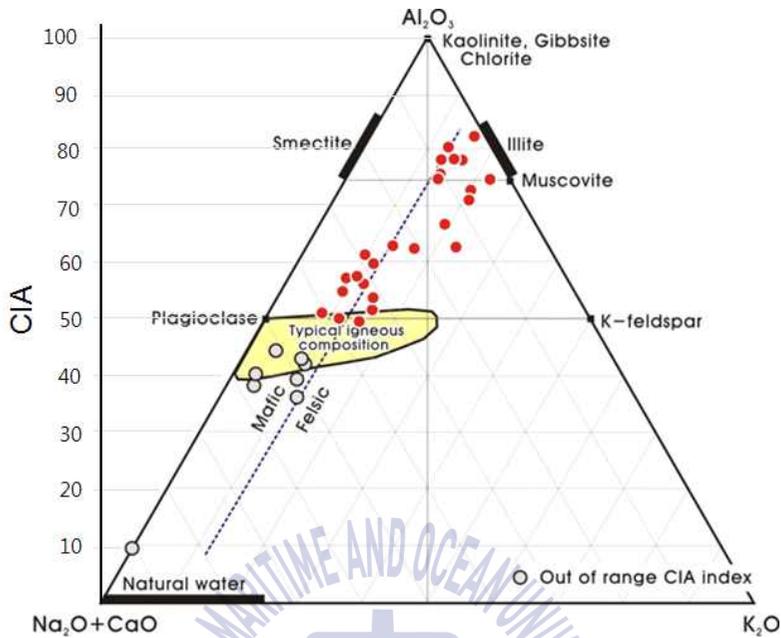


Fig. 4.15 Chemical index of alteration(CIA) of shale

그리고 일부의 사암과 셰일 시료는 CIA 지수가 45 미만의 값을 보이는데 매우 신선한 상태를 나타내는 풍화지수 값보다 낮은 값은 풍화도와 무관한 오류의 값이다. 이것에 대해서는 다음 절에서 좀 더 심도 있게 다루어졌다.

4.2.4 퇴적암 풍화지수 적용의 문제점

쇄설성 퇴적암에 해당하는 사암, 이암, 셰일의 전암분석을 통해 다양한 풍화지수를 산정하였고 각 지수들간의 유의성과 풍화지수 적용시 개선사항을 도출하였다. 사암, 이암, 셰일의 풍화지수는 장석의 풍화를 지수화한 W_p , CIA, CIW, PIA가 매우 높은 유의성을 보였으며 상대적으로 이동성이 화학종과 SiO_2 의 비를 고려한 지수들은 유의성이 없는 것으로 확인되었다. 지수 중 화학적 풍화지수(CIA)는 암석의 풍화 정도가 증가할수록 비례하여 지수값이 증가하였

고 풍화경로를 지시하는 다이어그램에서 지수의 상승에 따라 2차 변질광물이 생성되는 것을 확인하였다. 즉 쇄설성 퇴적암의 풍화를 평가하는 방법으로 CIA가 효과적으로 이용될 수 있고 변질에 의한 2차 광물의 생성을 가시적으로 예측할 수 있다. 하지만 탄산염이 포함된 암석의 경우 풍화지수 값이 적정범위 밖의 결과를 나타낸다.

풍화지수와 암석의 2차 광물의 조성을 비교하기 위해 세일에 대해 X-선 회절 분석을 수행하였다. CIA지수 60 ~ 70 범위의 세일은 육안관찰에서 풍화를 받지 않은 상태를 나타내며 광물조성은 대부분 석영과 장석으로 구성되어 있고 소량의 운모와 일라이트가 포함된 것을 볼 수 있다(Fig. 4.16). 지표에 인접한 세일은 CIA지수 70 이상으로 육안관찰에서 박리현상이 관찰된다. 광물조성은 풍화로 인해 2차 광물로 녹니석이 관찰되며 운모와 일라이트의 피크가 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다(Fig. 4.17).

반면 Fig. 4.18은 방해석 세맥을 포함하는 세일을 분석한 것으로 방해석을 제외하면 풍화 상태의 세일과 동일한 결과를 확인할 수 있다. 본 연구에서 화학적 풍화지수 산정 시 탄산염의 효과를 제거하기 위한 보정을 수행하였으나 CIA는 신선한 상태의 세일에 비해 낮은 30정도의 지수를 나타내며 이는 풍화 단계를 판단하기 위한 적정범위 밖의 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 화학종에 의한 풍화지수 산정에서 무엇보다 풍화를 대표할 수 있는 시료의 적절한 선택과 분석자료의 획득이 중요하다는 것을 의미한다.

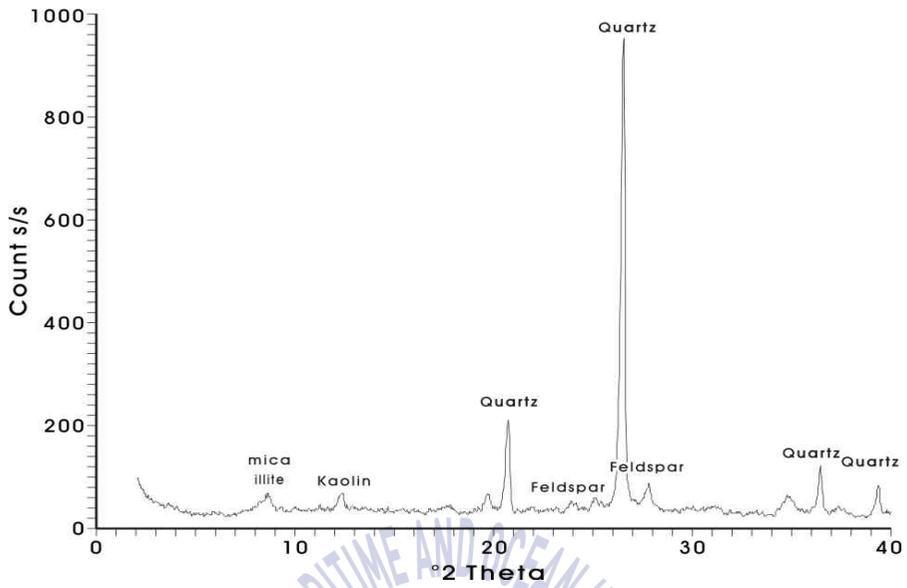


Fig. 4.16 Result of X-ray diffraction in fresh shale

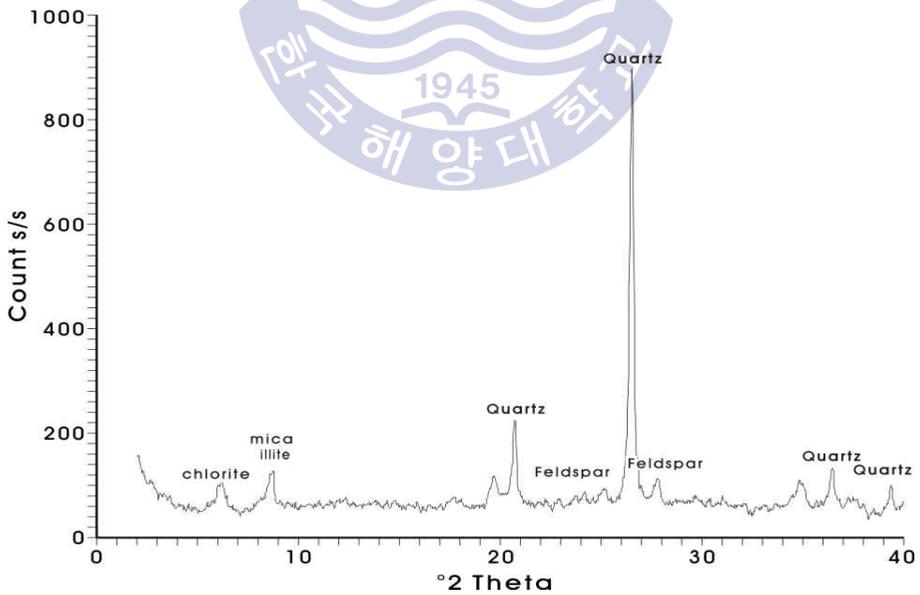


Fig. 4.17 Result of X-ray diffraction in weathered shale

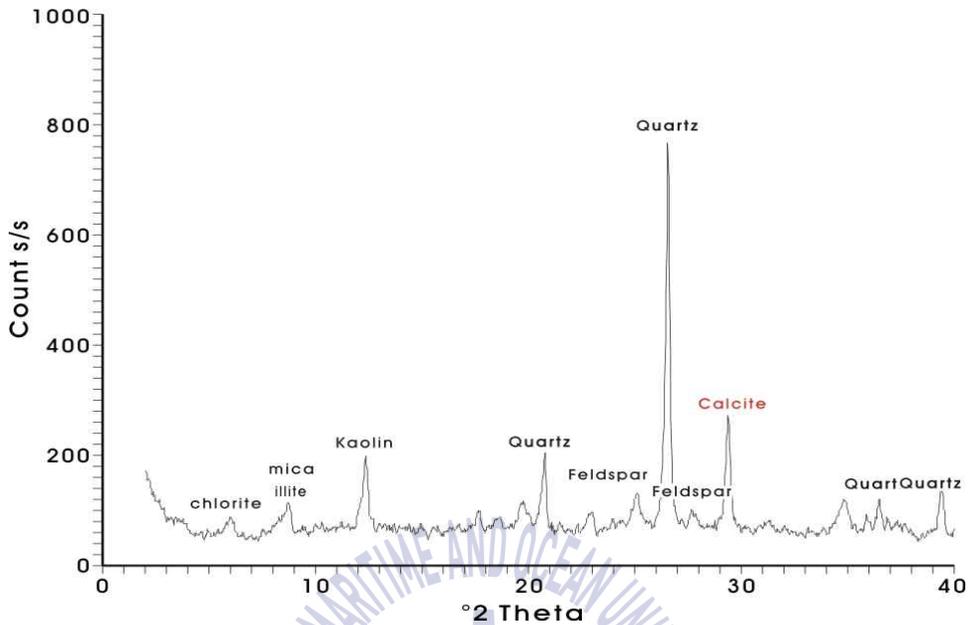
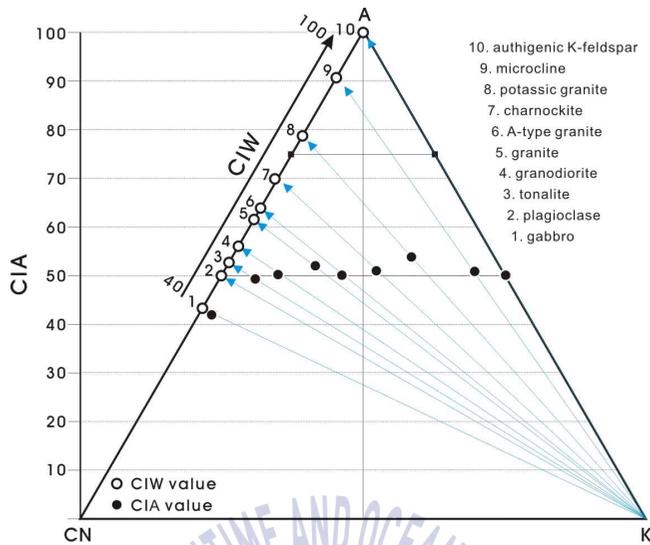


Fig. 4.18 Result of X-ray diffraction in containing calcite veins

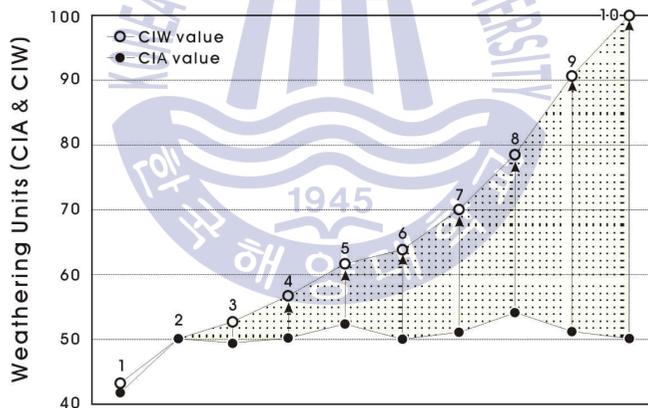
앞서 풍화지수 산정(4.2절)에서 고찰한 바와 같이 암석에 포함된 산화칼슘 (CaO)의 함량이 많은 경우 풍화지수는 산화칼슘의 함량비에 따라 풍화 정도와 무관한 범위 밖의 결과를 보여준다. 그러므로 방해석이 함량이 높은 암석이나 석회암, 돌로마이트 등의 탄산염암은 CaO 성분에 의해 풍화과정을 명확하게 설명하지 못하고 해석의 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. Fedo et al.(1995)는 동일 시료를 대상으로 CaO 화학종이 CIA와 CIA 지수가 미치는 영향을 검토하고 CIA에서 CIPW norm 값을 적용하여 방해석, 백운석(dolomite), 인회석에 의한 효과를 제거하는 것을 제시한 바 있다. 본 연구에서도 이 방법을 사용하여 CIA 지수를 산정하였다. 하지만 일부 시료의 경우 CaO 성분에 의한 문제가 완전히 해결되지는 않았다.

CIW는 K_2O 의 함량을 제외시킨 지수로 화학적 풍화지수로 K-장석과 연관된 알루미늄을 설명하지 않으므로 근본적으로 장석의 풍화를 지시하는 척도로 이용되고 있다(Nesbitt and Young, 1982; Maynard, 1992; Fedo et al., 1995). Fig. 4.19는 풍화 받지 않은 신선한 상태의 암석과 광물의 CIA와 CIW지수를 비교한 것으로(analysis from Carmichael et al., 1974; Smith, 1974; Cox et al., 1979; Anderson and Bender, 1989; De Ros et al., 1994), 다양한 암석에서 CIA지수는 50 내외의 일정한 값을 보이지만, 장석의 함량에 따라 CIW 지수는 상당히 넓은 범위에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. CIW 지수가 장석의 풍화에서 풍화도의 변별력은 높일 수 있다. 하지만 단순히 지수의 크기를 표현함으로써 CIA의 장점인 풍화경로와 2차 광물에 대한 정보를 확인할 수 없는 단점이 있다.





(a) ternary diagram of CIA vs. CIW



(b) plot of corresponding CIA & CIW values

Fig. 4.19 (a) Solid circles are chemical index of alteration (CIA) values for variety of fresh rocks and minerals; corresponding open circles show chemical index of weathering (CIW) values for same fresh materials (analyses from Carmichael et al., 1974; Smith, 1974; Cox et al., 1979; Anderson and Bender, 1989; De Ros et al., 1994). (b) Plot of corresponding CIA and CIW values shows extreme range of CIW values for unweathered materials (Fedó et al., 1995).

Figs. 4.20 ~ 4.22는 본 연구의 분석에 사용한 사암, 이암, 셰일의 CIA와 CIW를 나타낸 것으로, CIA의 경우 Fedo et al.(1995)에 의해 제안된 보정식을 적용하였으나 규산염에 포함된 CaO를 제외한 인산염과 탄산염암의 효과가 제거되지 않아 해석 범위를 벗어나는 결과를 보였다. CIW의 경우도 같은 이유로 해석 범위를 벗어나는 지수를 보여주고 있다. 즉 방해석, 백운석과 같은 탄산염 광물과 인회석 등의 인산염 광물에 의한 효과를 제거하기 위한 보정법을 적용한 CIA와 CIW 지수도 해석 범위를 벗어나는 지수를 보였다. 쇠설성 퇴적암의 풍화는 장석의 풍화과정을 기반으로 하는 풍화지수의 적용이 유효하나 범위를 벗어나는 결과는 풍화도 평가에서 제외되어야 한다.

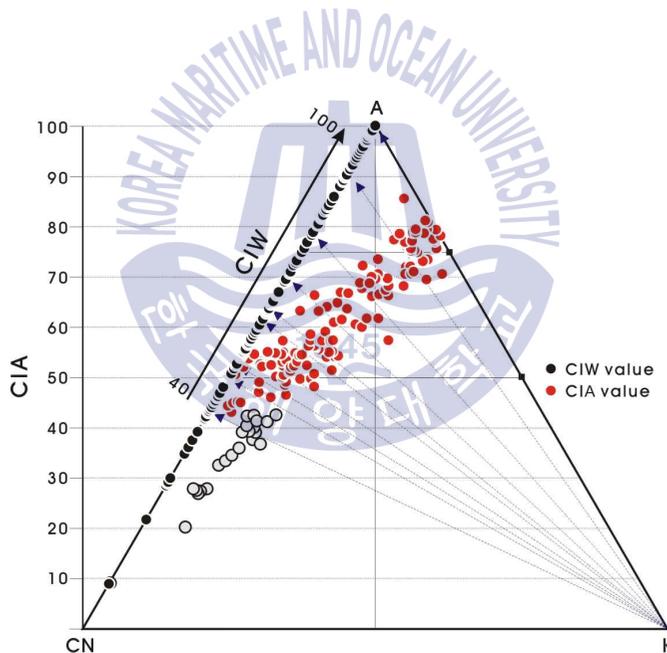


Fig. 4.20 Red circles are CIA values for variety of sandstone; corresponding black circles show CIW for same samples.

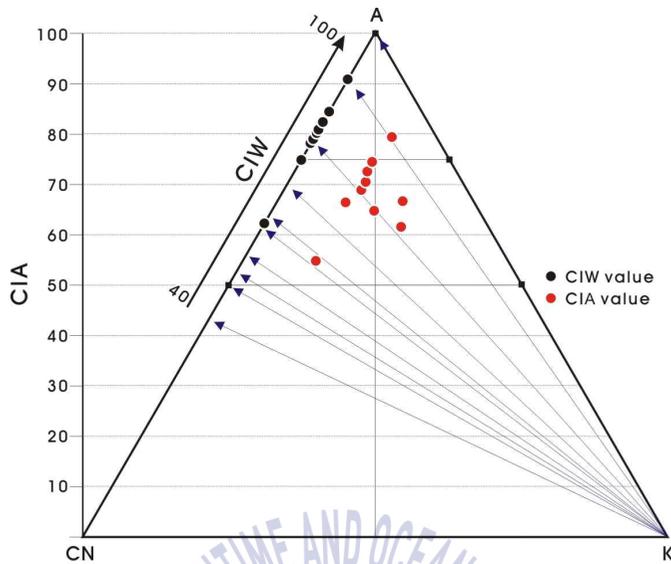


Fig. 4.21 Red circles are CIA values for variety of mudstone; corresponding black circles show CIW for same samples.

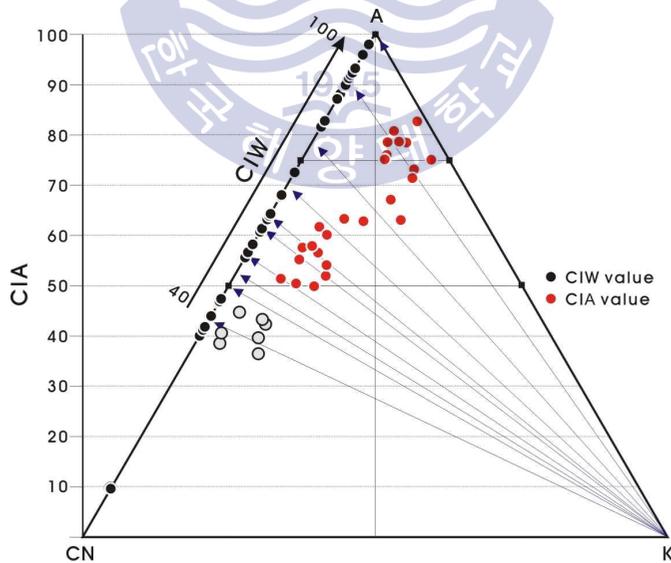
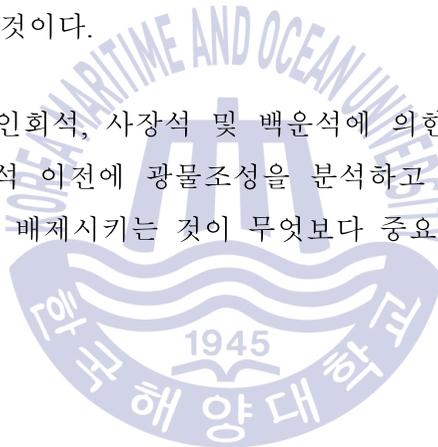


Fig. 4.22 Red circles are CIA values for variety of shale; corresponding black circles show CIW for same samples.

Price와 Velbel(2003)은 유용한 화학적 풍화지수는 풍화를 최대한 간단하게 표현할 수 있어야 하며, 분포 지역과 모암과 관계없이 적용 가능한 것이어야 한다고 정의하였다. 화학적 풍화지수는 화학종에 기초하는 것으로 지수간의 유의성이 확보되어야 하나 연구를 통해 지금까지 제안된 지수들은 암종에 따라 변별력의 차이가 분명하고 SiO₂ 화학종을 사용하는 풍화지수는 쇄설성 퇴적암에서 유의성이 전혀 나타나지 않았다. 쇄설성 퇴적암의 경우 CIA와 CIW는 상호간의 유의성이 매우 높고 풍화 정도에 따른 지수의 변화가 잘 반영하고 있다, 다만 CIW는 지수의 크기만을 고려하는 단점이 있어 CIA와 CIW를 동시에 고려하는 것이 중요하다. 이것은 산정된 풍화지수의 적정성과 신뢰성을 확보할 수 있어 쇄설성 퇴적암의 풍화지수 산정 시 2개 이상의 유의성 풍화지수를 고려하는 것이 효과적일 것이다.

CIA와 CIW 지수는 인회석, 사장석 및 백운석에 의한 효과를 완벽하게 제거하지 못하므로 전암분석 이전에 광물조성을 분석하고 암석 풍화의 오류가 될 수 있는 시료를 사전에 배제시키는 것이 무엇보다 중요한 과정이라 판단된다.



4.3 풍화가속실험 결과

4.3.1 기존의 풍화도 평가

풍화가속실험 결과를 분석하기 전에 기존에 풍화도의 설계반영을 위해 실시되고 있는 시험방법에 대한 문제점을 살펴보고자 한다. 도로 절개지 등의 암반의 풍화민감도를 평가할 때에 슬레이크내구성 시험 결과와 스웰링 시험결과만을 이용하여 사면의 풍화도를 평가해 오고 있다. 그러나 슬레이크 내구성시험의 경우 표준화된 시험방법을 따르는 경우 기본적으로 무결암만을 대상으로 하게 되므로 대부분의 경우 극히 높은 내구성으로 평가되는 경우가 많으며, 시 결과를 설계에 직접 적용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

Table 4.8은 세일층의 도담-영천 지역에 나타나는 세일, 혼펠스의 슬레이크 내구성 분석 결과를 정리한 것으로 풍화암과 연암에 대하여 3회에 걸친 시험을 적용한 것이다. 풍화가 진행된 암석의 경우라도 대부분이 극히 높은 내구성을 보이고 있음을 알 수 있다.

퇴적암의 경우 2회에 걸쳐 진행되는 슬레이크 내구성 실험보다는 3회를 실시하여 보완하고자 하는 노력을 하고 있으나 이 또한 무결암을 이용하므로 큰 변화가 없는 결과를 알 수 있다. 이러한 실험은 현재의 상태만을 평가할 뿐이며, 미래의 풍화의 진행과 속도를 예측하기 어려운 것으로 판단된다.

Table 4.8 Result of slake durability index on the shale and hornfels

Rock type		strata	I1	I2	I3	Evaluation
Haman layer	Shale	Weathered rock	99.3	99.0	98.2	Extremely high durability
		Soft rock	99.8	99.6	99.4	
		Soft rock	99.6	99.1	98.9	
Chunsan layer /Banyawel layer		Weathered rock	97.4	96.1	92.9	High durability
		Weathered rock	99.6	99.4	98.9	Extremely high durability
		Soft rock	99.7	99.5	99.3	
	Soft rock	99.9	99.9	99.8		
	Soft rock	99.9	99.8	99.7		
Hwasan layer	Hornfels	Soft rock	99.5	98.9	97.4	Extremely high durability
		Soft rock	99.9	99.8	99.6	
		Soft rock	99.9	99.9	99.9	

4.3.2 쇄설성 퇴적암의 풍화도 평가

대구 지역의 사암과 세일을 이용하여 산성용액을 이용한 풍화가속실험을 실시하였다. 앞 절의 화학적 풍화지수 산정에 사용된 동일한 공시체에 대한 실험을 실시하였다. 풍화가속실험은 보통 경암과 연암에 대해 실시하고 풍화암에 대해서는 실시하지 않는데 이유는 풍화암의 경우 가속실험 중 쉽게 풍화가 발생되어 평가가 어렵기 때문이다. 또한 설계시 풍화암의 경우 많은 보강이 이루어지지만 연암과 경암의 경우 좋은 암으로 판정되어 풍화에 대한 문제에서 제외하기 있기 때문이다.

(1) 탄성파속도

사암의 동결-융해의 반복 실험 결과에서 탄성파 속도는 초기치에 비해 10%내외의 저감되며, 풍화암은 최대 46%까지 저감되며, 경암은 5%미만의 저감 특성을 보였다(Table 4.9, Fig. 4.23). 셰일의 연암과 경암은 암석의 강도와 상관성이 나타나지 않고 60%정도의 속도가 저감되었다. 이는 암반이 노출 시 셰일에서는 강도에 상관없이 단시간내에 풍화가 가속되며, 암반의 물성치가 급격하게 저감될 것임을 나타내고 있다. 셰일에서 측정된 풍화가속실험 후 탄성파 속도는 일반적인 풍화암에서 측정되는 정도의 값을 보이고 있다(Table 3.5 참조).



Table 4.9 Results of seismic velocity of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test

Specimen				Seismic velocity(km/sec)	
				Before	After
Sandstone	Weathered rock	NCH-2	a	1.709	1.498
			b	3.197	1.500
	Soft rock	NCH-1	a	4.000	3.887
			b	4.020	3.540
			c	4.637	4.500
	Hard rock	NCH-1	a	5.544	5.230
			b	6.650	6.570
			c	6.264	5.850
		NCH-3	a	6.695	5.843
Mudstone/ Shale	Soft rock	NCH-1	a	1.497	측정불가
			b	1.463	측정불가
			c	2.172	0.980
			d	2.058	0.761
	Hard rock	NCH-2	a	1.971	0.670
			b	1.934	0.750
			c	1.645	0.584
			d	1.768	0.648
			e	2.387	0.704

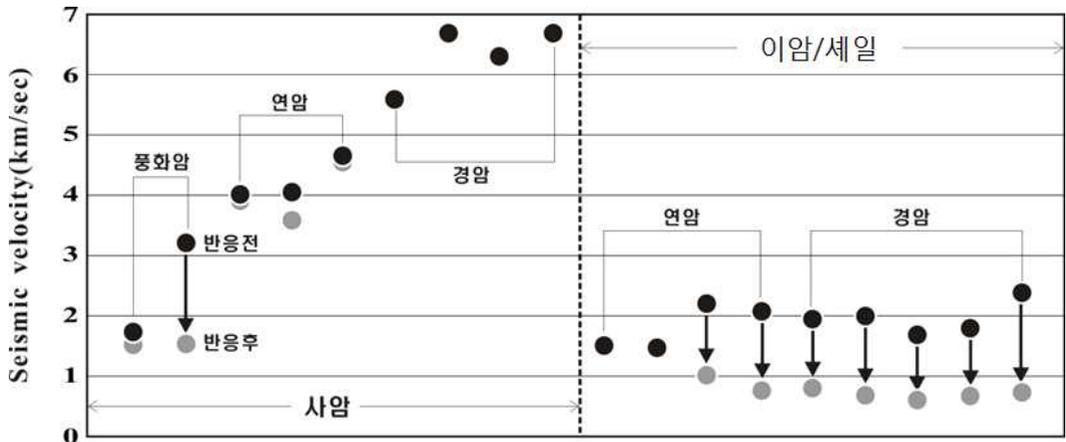


Fig. 4.23 Change of seismic velocity of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test

(2) 흡수율

일반적으로 풍화저항력에 따라 암석이 풍화되면 흡수율은 증가하며, 흡수율은 암석의 일축압축강도와 양호한 부의 상관성을 보이는 것으로 알려져 있다.

Table 4.10과 Fig. 4.24는 풍화가속실험 후 암석의 흡수율 분석 결과이다. 동결-용해의 반복 실험에서 사암의 흡수율 변화는 거의 나타나지 않으며, 사암의 풍화암과 연암은 풍화 진행에 따라 흡수율 증가가 정의 상관성을 보이고 있으며, 경암은 일정 기간 풍화가 진행되어도 흡수율의 변화가 거의 나타나지 않았다. 셰일은 풍화의 가속 정도에 비례하여 흡수율이 증가하며, 연암과 경암에서 흡수율이 증가되는 비율은 유사하다. 일부의 흡수율이 높은 일부 연암 시료에서는 초기 상태에서 시료가 파손되어 동결-용해 실험이 불가능하여 결과에서 제외되었다.

Table 4.10 Results of absorption ratio through accelerated weathering test

Specimen				Absorption ratio(%)	
				Before	After
Sandstone	Weathered rock	NCH-2	a	3.36	3.55
			b	1.96	2.32
	Soft rock	NCH-1	a	1.72	1.80
			b	1.04	1.21
			c	0.88	1.32
	Hard rock	NCH-1	a	0.22	0.22
			b	0.14	0.14
			c	0.09	0.19
		NCH-3	a	0.18	0.20
Mudstone/ Shale	Soft rock	NCH-1	a	4.71	8.19
			b	4.52	8.11
			c	2.56	5.62
			d	3.24	3.37
	Hard rock	NCH-2	a	2.94	3.01
			b	2.18	3.20
			c	1.32	1.63
			d	1.19	1.71
			e	0.74	1.44

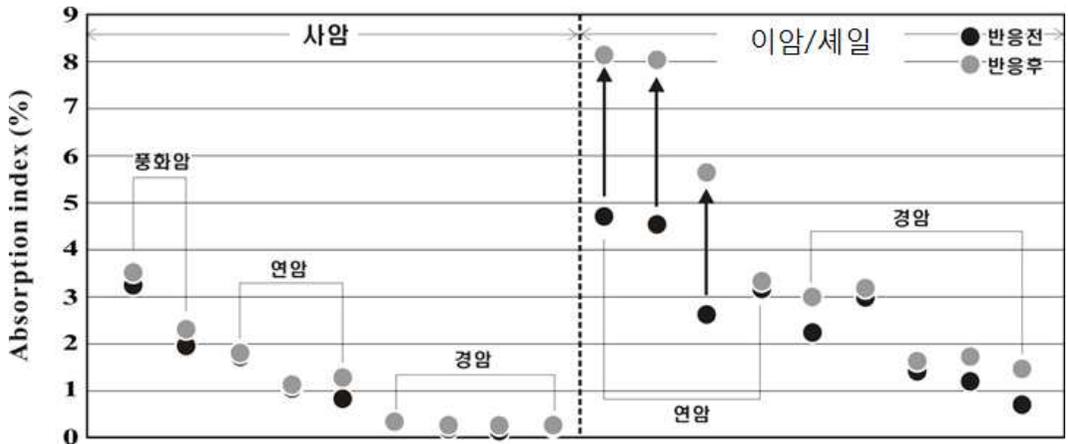


Fig. 4.24 Change of absorption ratio of sandstone and mudstone/shale through accelerated weathering test

(3) 일축압축강도

Table 4.11은 풍화가속실험 후 일축압축강도 측정결과이다. 풍화도가 유사한 시료에 대한 동결-융해 실험 전후의 일축압축강도의 측정하여 변화를 관찰한 결과로 사암에서 일축압축강도의 감소는 0.2 ~ 12.5% 범위의 저감이 나타났다. 사암의 풍화암은 이미 풍화가 상당부분 진행되어 일축강도의 저감은 거의 나타나지 않았으며, 사암의 연암은 풍화가속실험에서 최대 저감비를 나타냈으며, 경암은 2% 정도 저감되는 것으로 나타났다.

셰일에서 일축압축강도의 감소는 7.1 ~ 36.5% 범위의 저감이 나타났다. 셰일의 연암은 경암에 비해 풍화가 가속되는 환경에서 급격한 강도 저하가 수반되는 것으로 나타났다.

Table 4.11 Results of unconfined compressive strength through accelerated weathering test

Specimen			Unconfined compressive strength		
			Before	After	Reduction ratio
Sandstone	Weathered rock	NCH-2	36.0 MPa	36.0 MPa	0.2%
	Soft rock	NCH-1	47.4 MPa	41.5 MPa	12.5%
	Hard rock	NCH-1	57.5 MPa	56.3 MPa	2.0%
Mudstone/ Shale	Soft rock	NCH-1	16.9 MPa	10.7 MPa	36.5%
	Hard rock	NCH-2	54.8 MPa	51.0 MPa	7.1%

4.3.3 풍화와 암 정수와의 상관성

(1) 화성암

화강암의 풍화암과 잔류토는 풍화정도에 따른 물성치의 변화는 풍화가 진행됨에 따라 흡수율은 비례하여 증가하는 반면 밀도와 N-값은 감소하는 경향을 보인다.

Choi et al.(2012)은 화성암 시료에서 측정된 일축압축강도, 흡수율, 밀도값을 이용하여 암 정수와 풍화지수와의 상관성을 판단하였다. 화성암에서 건조밀도와 흡수율은 서로 높은 상관성을 보인다(Fig. 4.25). 또한 건조밀도는 일축압축강도와도 높은 상관성을 보인다(Fig. 4.26). Fig. 4.27에서와 같이 흡수율과 일축압축강도는 양호한 부의 상관성을 보이며, 이는 풍화에 따라 내부의 간극이 증대되고 입자간에 작용하는 압력의 감소로 인해 발생한다. 측정된 화학적 풍화지수(CIA)와 암 물성치인 건조밀도는 양호한 부의 선형적 상관성을 보여준다.

이러한 화학적 풍화지수와 물성치를 대비함으로써 암 정수 추정 자료의 정보를 제공할 수 있다(Fig. 4.28). 신선함 화성암의 경우 건조밀도가 2.7g/cm^3 이면 CIA 지수 값은 55 정도에 해당되고, 풍화된 화성암의 경우 CIA지수 75이고 건조밀도 2.1g/cm^3 정도를 나타낸다.

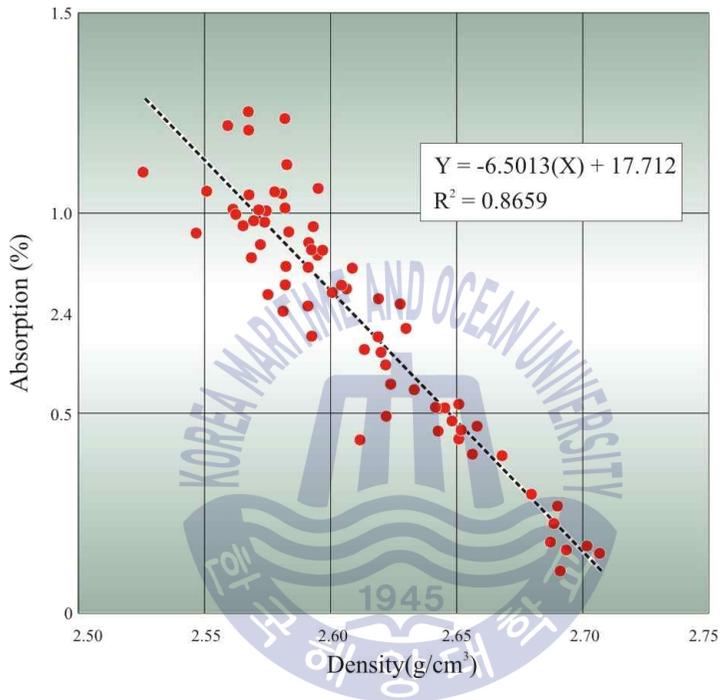


Fig. 4.25 Relation between density and absorption ratio due to weathering process(Choi et al., 2012)

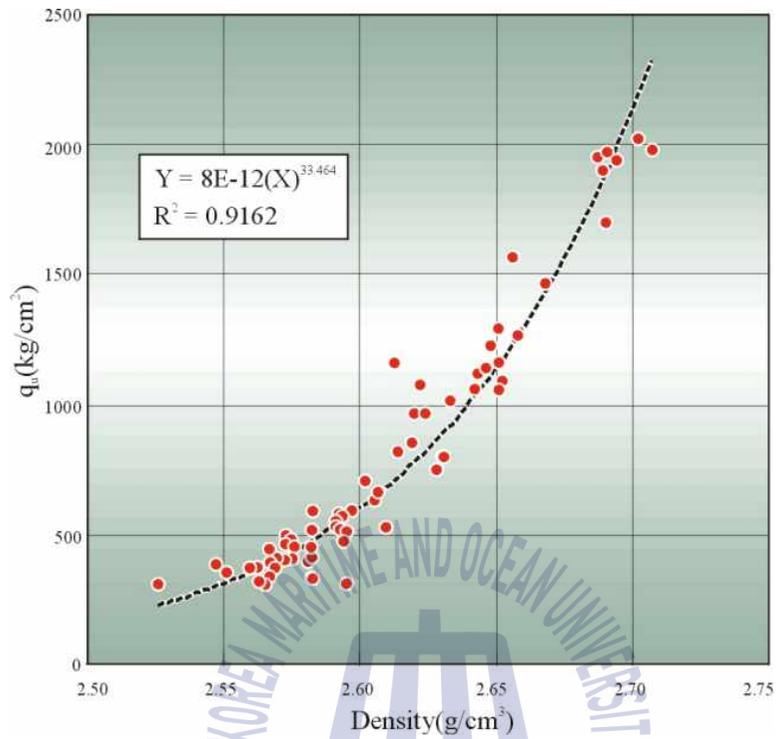


Fig. 4.26 Relation between density and unconfined compressive strength due to weathering process(Choi et al., 2012)

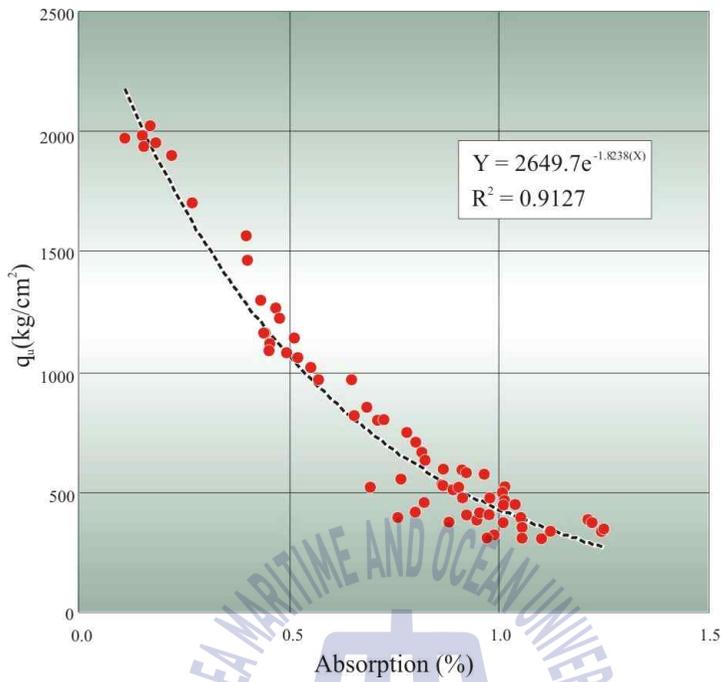


Fig. 4.27 Relation between absorption ratio and unconfined compressive strength due to weathering process(Choi et al., 2012)

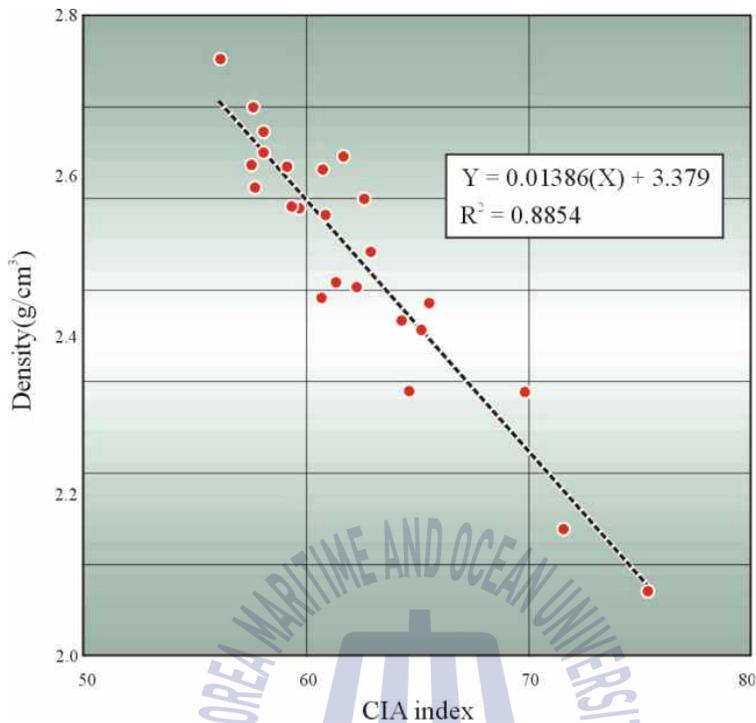


Fig. 4.28 Relation between CIA index and density due to weathering process(Choi et al., 2012)

Fig. 4.29는 화강암지역(안동지역)의 암에 대한 풍화가속실험 결과로 화강암의 강도정수가 경암은 3%, 연암은 9%, 풍화암은 12% ~ 15%로 저감되는 것을 알 수 있다. Table 4.11의 풍화암의 강도 저감을 보면 사암의 경우 경암에서 2.0%, 연암에서 12.5%, 세일의 경우 경암에서 7.1% 연암에서 36.5%로 나타나 퇴적암에 화강암에 비해 풍화로 인한 강도 저감이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 퇴적암이 가지고 있는 이방성 특성에 기인된 것으로 사암보다 세일에서 이방성 효과가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

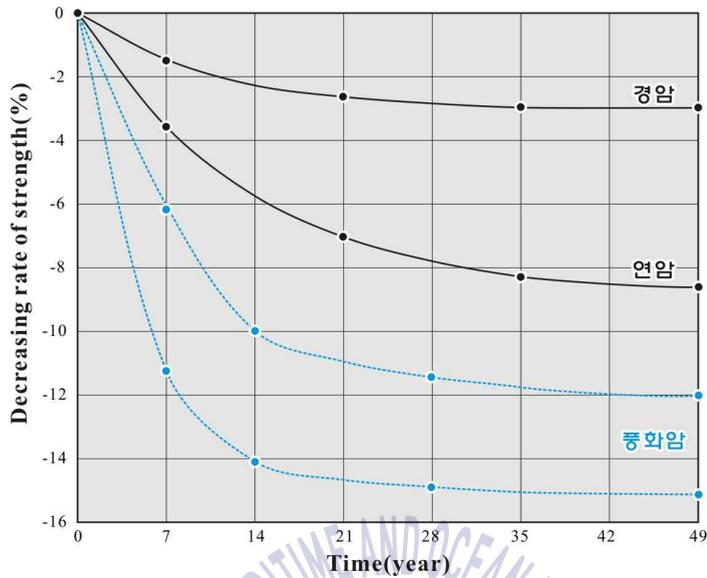


Fig. 4.29 Decreasing rate of strength of granite through accelerated weathering test

(2) 퇴적암

화성암에서와 같이 쇄설성 퇴적암에서도 풍화도에 따른 암 정수값이 제시되어야 할 것이다. Fig. 4.30과 Fig. 4.31은 사암의 풍화지수(화학적)와 흡수율, 탄성파속도 값(물리적 풍화지수)의 상관성을 분석한 것이다. Fig. 4.32과 Fig. 4.33은 세일의 풍화지수와 흡수율, 탄성파속도 값의 상관성을 분석한 것이다.

풍화정도에 따른 흡수율 값은 사암의 경우 풍화가 진행될수록(CIA 값이 증가할수록) 흡수율이 점진적으로 증가하고 있는 경향을 보인다(Fig. 4.30). 그러나 이암과 세일의 경우 풍화지수와 흡수율 모두 초기의 신선한 값에서 풍화된 값으로 급격히 변화하는 것을 알 수 있다(Fig. 4.32). 탄성파 속도의 경우도 이와 마찬가지로 사암의 경우 풍화가 진행됨에 따라 점진적으로 감소되는 양상을 보이나 이암과 세일에서는 급격히 풍화가 진행되는 것을 알 수 있다.

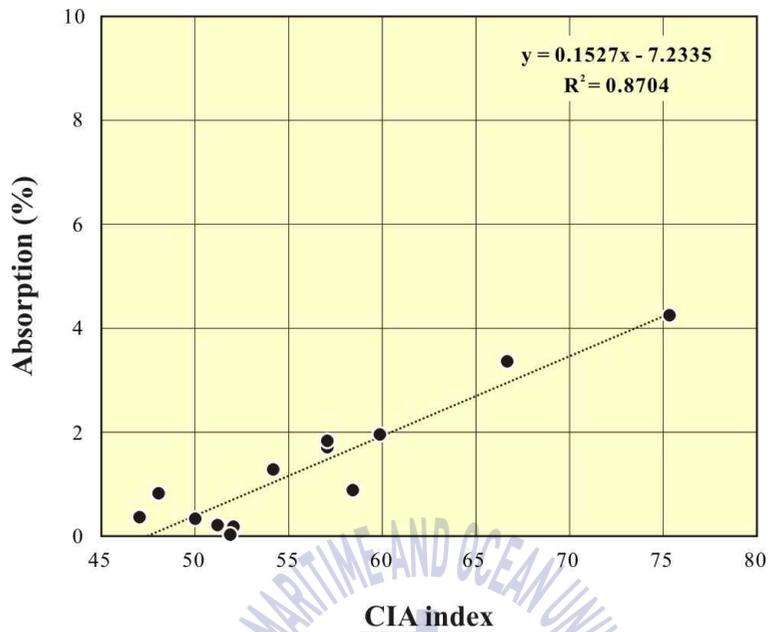
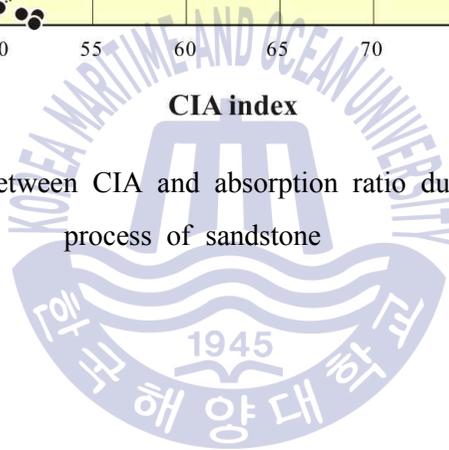


Fig. 4.30 Relation between CIA and absorption ratio due to weathering process of sandstone



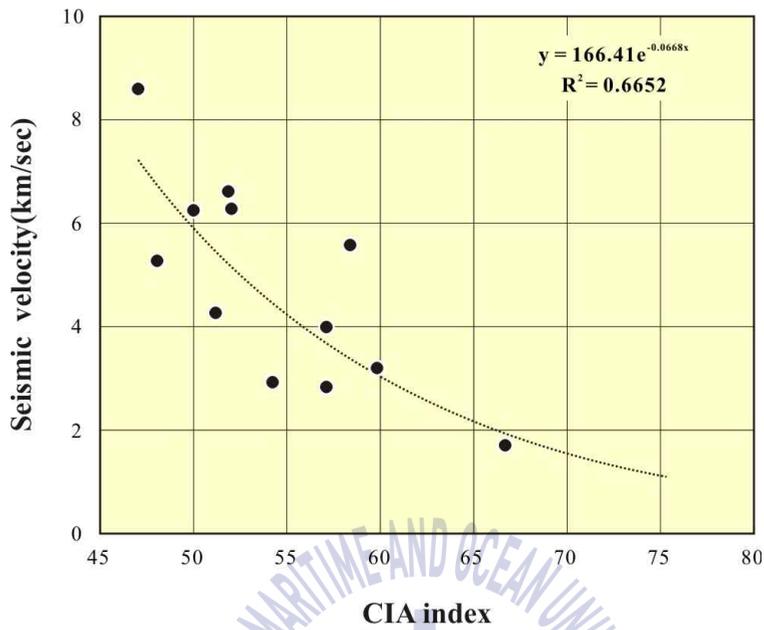
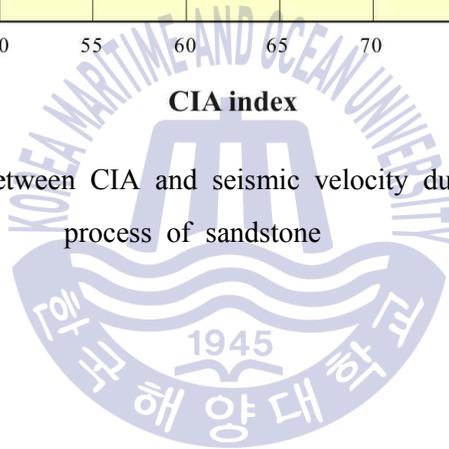


Fig. 4.31 Relation between CIA and seismic velocity due to weathering process of sandstone



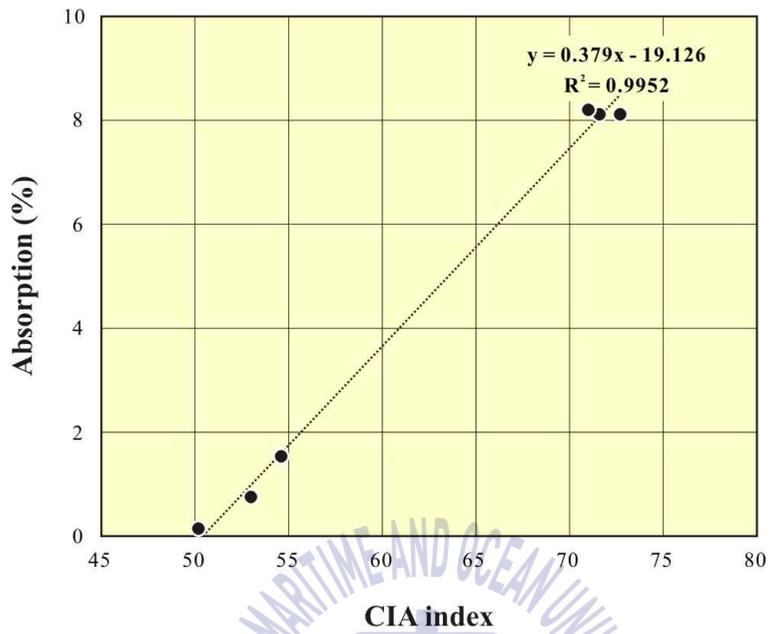
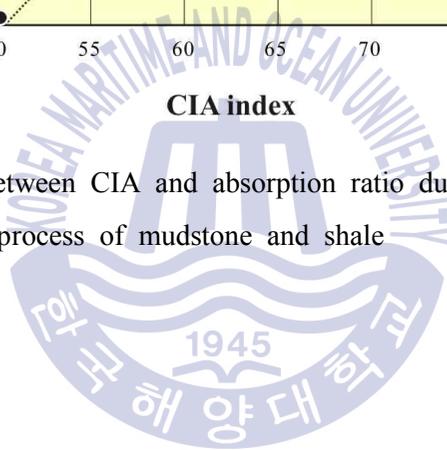


Fig. 4.32 Relation between CIA and absorption ratio due to weathering process of mudstone and shale



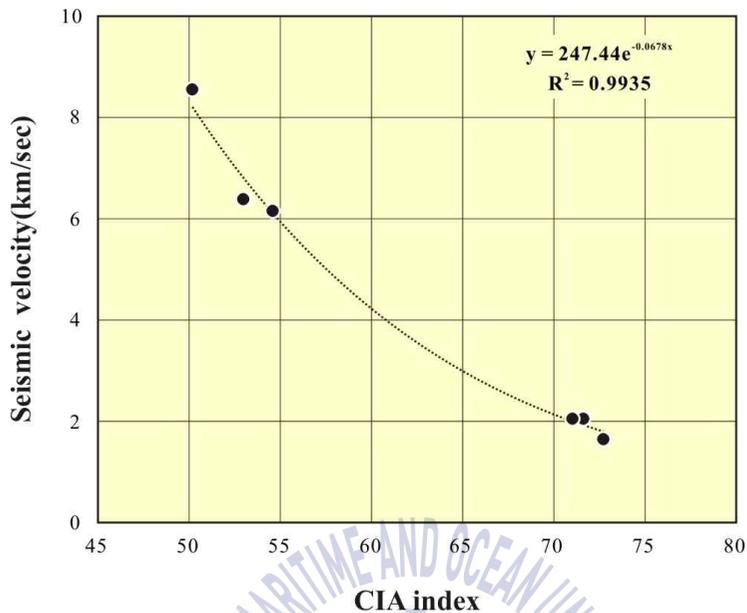


Fig. 4.33 Relation between CIA and seismic velocity due to weathering process of mudstone and shale

Fig. 4.34과 Fig. 4.35는 사암과 이암/셰일의 풍화가속실험 전후의 탄성과속도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 7년은 풍화가속실험 1일에 해당되고 49년은 7일에 해당된다. 사암의 경암은 풍화가속실험에 따른 탄성과 속도는 1.8 ~ 8.0% 저감되었으며, 평균 5.4% 저감비를 보였다. 사암의 연암은 8.6 ~ 47.9%의 탄성과속도의 저감을 보였으며, 평균 27.0%의 저감비를 나타내고 있다. 이암과 셰일은 지층 분류에서 연암 및 경암으로 분류된 암석에서 초기 탄성과속도 값이 낮은 값의 범위를 보였다. 7회에 걸친 풍화가속실험으로 77.4 ~ 87.0%의 변화를 보였으며, 평균 80.3%의 저감비를 보이고 있다. Fig. 4.34과 Fig. 4.35를 비교해보면 사암의 경암과 연암은 풍화가속실험 후에도 보통암 정도의 탄성과속도 값을 보여주나 이암과 셰일은 실험 후 경암과 연암이 풍화암 정도의 탄성과속도 값으로 작아지는 것을 알 수 있다(Table 3.5 참조). 이것은 셰일이 가지고 있는 이방성의 특성으로 인해 풍화가속에 따른 것으로 판단된다.

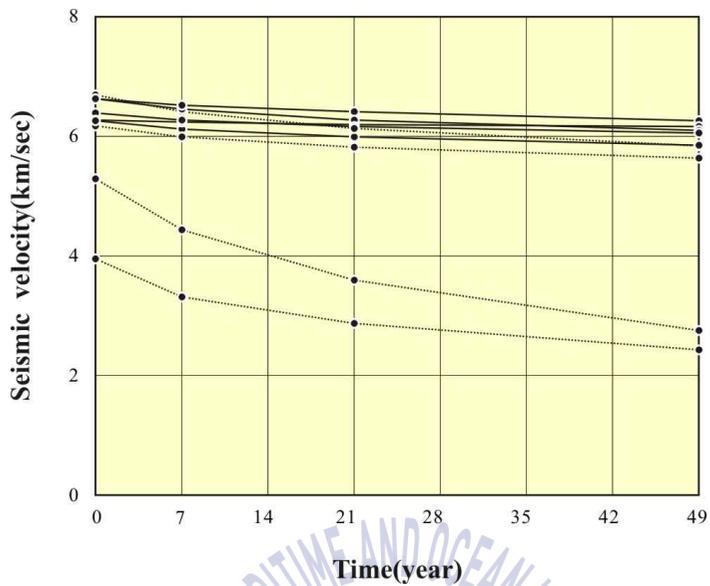


Fig. 4.34 Change of seismic velocity of sandstone through accelerated weathering test

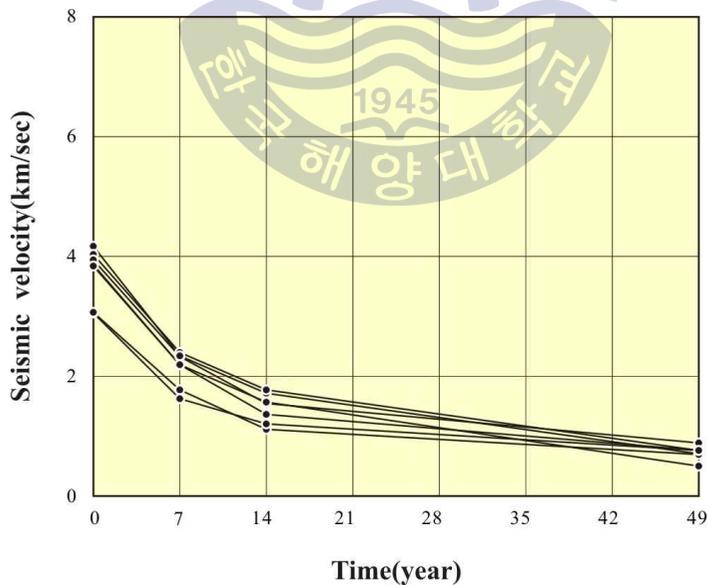


Fig. 4.35 Change of seismic velocity of mudstone/shale through accelerated weathering test

화강암과 퇴적암의 탄성과속도 값을 비교해보면 암종별 풍화의 영향을 더 분명하게 할 수 있다. 화강암의 경암에서는 3%, 연암에서 9%의 탄성과 저감비 (Fig. 4.33)를 보인 반면, 퇴적암인 사암의 경암에서 5%, 연암에서 27%의 암 정수가 저감되었으며, 셰일의 경우 연경암에서 평균 80%의 탄성과속도 감소되었음을 알 수 있다(Fig. 4.36). 이 결과는 현재의 공학적 분류로 경암이나 연암으로 분류된 퇴적암이 풍화에 매우 취약한 특성을 가지고 있음을 보여준다. 특히 이암과 셰일은 사암에 비해 풍화가속으로 인한 탄성과속도가 급격하게 저감된다. 7년 후 약 31%, 14년 후 55%로 저감되는데 이것은 셰일이 가지고 있는 이방성의 특성에 기인된 것으로 판단된다.

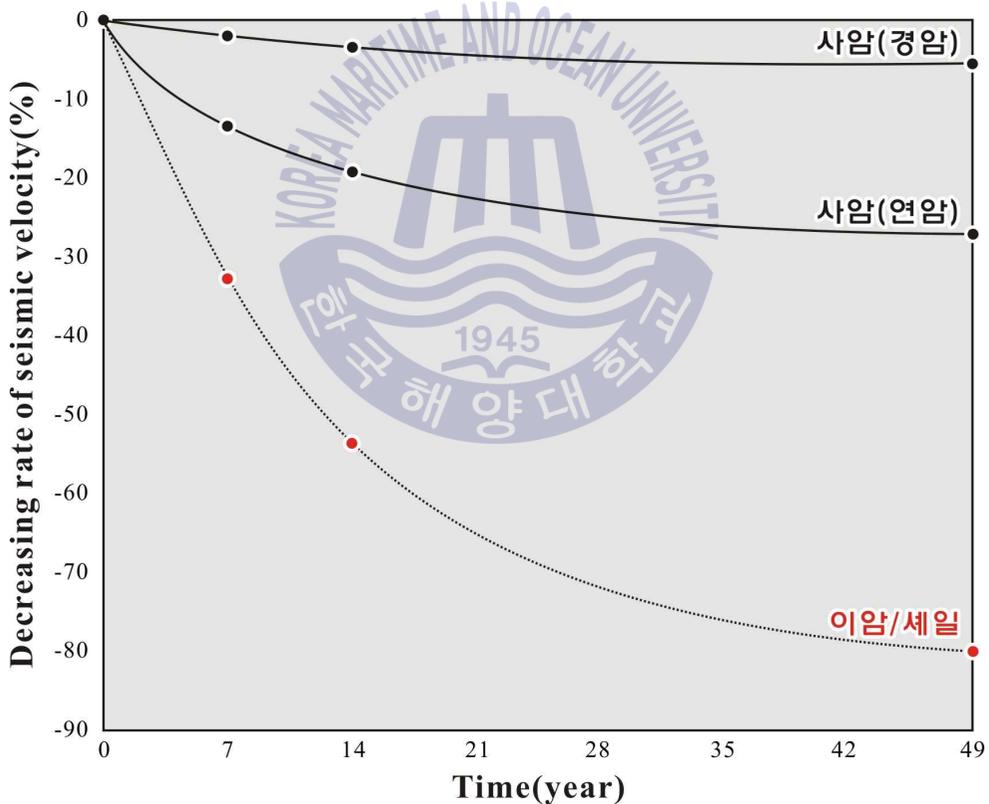


Fig. 4.36 Decreasing rate of seismic velocity of sedimentary rocks (sandstone and mudstone/shale)

제 5 장 결 론

최근의 암사면 또는 터널 붕괴사고는 이암, 세일, 천매암, 편암 등의 이방성이 큰 퇴적암과 변성퇴적암 집중적으로 발생되고 있어 쇄설성 퇴적암에 대한 풍화연구의 필요성이 요구되고 있다. 하지만 기존의 풍화연구는 분포면적이 큰 화성암 특히 화강암과 화강편마암에 집중되었고, 퇴적암 특히 쇄설성 퇴적암(사암, 이암, 세일)에 대한 풍화연구는 매우 미흡한 실정이다. 화성암의 경우 풍화는 느리게 진행되어 풍화로 인한 암석의 물성변화로 인한 재해 발생보다는 암반에 불연속면에서의 구조적 결함 확대가 주원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 반면 풍화암은 경우 화성암에 비해 상대적으로 임계부하량이 낮아 풍화가 빠르게 진행되어 불연속면의 구조적 결함보다는 전체적인 암반의 풍화에 의해 붕괴 및 파괴가 발생하는 것으로 추정하고 있다. 그래서 본 연구에서는 국내에 분포하는 쇄설성 퇴적암(사암, 이암, 세일)을 대상으로 풍화에 대한 연구를 수행하였다. 이암과 세일이 많이 분포되어 있는 경상분지를 주 연구지역으로 선정하였다. 암석의 풍화민감도를 평가할 때 기존에 많이 사용하고 있는 슬레이크내구성 시험과 스웰링 시험은 미래의 풍화 진행과 속도를 예측하기 어렵고, 시험결과를 설계에 적용할 수 없는 현실적인 문제를 가지고 있어 연구에서 제외시켰다. 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 쇄설성 퇴적암은 형성환경에 따라 사암, 이암, 세일로 구분되며 이는 구성하는 입자의 크기 뿐 아니라 입자의 배열에 의한 이방성의 원인이 되는 미세층리(lamination)을 가진다. 이러한 구조는 변성퇴적암의 이방성의 원인이 되기도 한다.

2. 연구에서 대자율변형률을 이용해서 사암, 이암, 세일의 이방성 정도를 파악하였다. 쇄설성 퇴적암 중 역암과 사암은 이방성의 정도가 등방성에 대비하

면 5% 미만의 이방성을 보였으나 이암과 세일은 20% 정도의 이방성을 보였고 암석의 변형율과 비교하면 경상분지 일원의 세일은 단층작용과 습곡작용을 받은 단층대 암석의 이방성보다 높게 나타났다.

3. 화학적 풍화지수 분석결과에서 사암, 이암, 세일은 장석의 풍화에 기초한 W_p , CIA, CIW, PIA가 잘 맞는 것으로 나타났으며 CIA 지수가 풍화상태뿐만 아니라 풍화경로를 알 수 있어 퇴적암의 풍화를 가장 적합하게 표현할 수 있는 지수인 것으로 나타났다. 또한 비교를 위해 CIW지수 분석도 병행하는 것이 제안되었으며, 시료에 탄산염 물질이 함유된 경우 분석의 정도가 낮아지므로 분석시료 준비과정에서 해당물질의 제거가 필요한 것으로 판명되었다.

4. CIA 지수를 통한 경상분지 쇄설성 퇴적암의 풍화경로를 파악해본 결과 기반암-일라이트-카올린의 경로를 따라 급작스럽게 진행되고 있어 이암과 세일의 공학적 문제는 점토광물이나 팽윤성 광물에 의한 파쇄대에서 부분적 변화에 의한 것이 아니라 암석 자체의 낮은 임계부하량(저항력)으로 인해 풍화조건에서 화학적 풍화가 가속되어 지반의 내구성이 예상보다 빨리 저감되는 것에 그 원인이 있음을 알 수 있다.

5. 산침수와 동결융해실험을 통해 극한 조건의 풍화가속환경에서 49년 후 이암과 세일의 연암과 경암의 탄성과 속도는 현재의 연암, 경암이 가지고 있는 강도와 상관없이 60%정도의 저감되는 것으로 나타났고, 흡수율은 풍화에 따라 증가하여, 연암과 경암에서 흡수율의 증가 비율은 유사하게 나타났다.

6. 화강암지역(안동지역)의 암의 일축압축강도정수 저감비를 강도별로 살펴보면 경암은 3%, 연암은 9%, 풍화암은 12% ~ 15% 내외의 값으로 나타났다. 이암과 세일의 경암과 연암에서 일축압축강도의 감소는 7.1 ~ 36.5% 범위로 나타나 풍화가 가속되는 환경에서 이암과 세일은 급격한 강도 저하가 수반될 수 있음을 알 수 있다.

7. 구조물 또는 시설물이 위치한 암반조건에 반영은 물리적·공학적 특성에 기초하고 있으나 암반의 샘플과 지구물리학적 검토는 현재조건을 반영한 것이며 구조물 및 시설물이 유지되는 기간, 즉 미래조건에 변화를 반영하지 못하고 있다. 이러한 이유로 그 동안 시공기술이 비약적으로 발전하였으나 지층붕괴에 의한 시설물 피해 빈도는 전혀 줄어들지 않고 있다. 암석의 화학적 조성의 변화는 암반상태변화의 전조현상으로 활용될 수 있다. 본 연구를 통해 얻어진 쇄설성 퇴적암의 풍화지수를 통한 암석의 변화과정을 이해하고 극한조건에 상태 변화로부터 암 정수의 저감율을 산정함으로써 풍화암에 대한 효과적이고 경제적인 설계와 시공에 기여할 수 있을 것이다.



참고문헌

- 김경석, 유병옥, 이상돈, 2002, 경상분지 세일 지역에서의 절토사면 파괴 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, pp.103-114.
- 김광식, 김교원, 정자혜, 2001, 포항분지 제3기 이암의 크리프 특성, 대한지질공학회 학술발표회논문집, pp.3-14.
- 김광식, 김교원, 2003, 포항분지 제3기층 두호층 이암의 크리프 거동, 대한지질공학회논문집, 13(2) pp.227-238.
- 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화 실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학회지, 36(2), pp.141-149.
- 김성환, 유병옥, 조성로, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화에 관한 특성연구, 사면안정학술발표회 논문집, pp.115-136.
- 김인수, 1990, 포항이남 제3기 분지 암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. 광산지질, 23권, pp.59-71.
- 노병돈, 2002, 경상분지 내 이암 및 세일지역에서의 붕괴사례, 한국지반공학회 암반역학위원회 이암/세일에 관한 학술세미나 및 현장지질실습, pp.142-164.
- 박형동, 2002, 이암과 세일의 지질공학적 특성, 한국지반공학회 암반역학 위원회 학술 세미나 논문집, pp.20-30.
- 서울대학교 에너지 자원 신기술연구소, 1994, 포항지역 이암의 Creep 특성에 관한 연구 보고서, pp.1-100.

엄정기, 2012, 인공풍화과정에 의한 김해지역 백악기 화강암의 풍화특성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 22(1), pp.32-42.

윤지선, 2002, 일본의 이암/셰일의 특징, 한국지반공학회 암반역학위원회 이암/셰일에 관한 학술세미나 및 현장지질실습, pp.12-13.

이내용, 김용일, 정한중, 김영근, 2002, 이암/셰일 지역에서의 터널 및 사면 시공시의 문제점, 한국지반공학회 암반역학위원회 이암/셰일에 관한 학술세미나 및 현장지질실습, pp.301-325.

이승재, 노상립, 윤지선, 2000, 포항, 대구지역 퇴적암의 물리, 역학적 특성에 관한 연구, 대한자원환경지질 학술발표회, pp. 219-220.

이영희, 1996, 포항이암층의 slaking 팽창 전단강도 특성, 한국지반공학회, 12(2), pp.33-42.

이영희, 박영목, 김용준, 금병술, 1998, 퇴적암의 풍화도에 따른 특성과 일축압축강도와 제반지수와의 상관성, 한국지반공학회, pp.131-134.

이영희, 김용준, 박준규, 2000, 압축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성, 한국지반공학회, 16(1), pp.5-17.

이영희, 김용준, 정강복, 2002, 퇴적암의 공학적 특성 및 문제점, 한국지반공학회 암반역학 위원회 학술세미나 논문집, 32-50.

이종만, 광현준, 정한중, 김영근, 2001, 이암의 공학적 특성과 이암층에서의 터널시공사례, 한국터널공학회지, 3(4), pp. 99-113.

이종범, 김창현, 김경태, 한진희, 이광희, 2007, 신생대 3기 퇴적이암지역에서의 사면 및 교량 설계사례, 한국지반공학회, 23(2) pp.27-34.

정형식, 유병옥, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 13(6), pp. 71-93.

조형성, 2014, 대자율이방성(AMS) 방법의 다양한 지질학적 적용, 부산대학교 대학원, 이학박사학위논문, p.498.

Balseley, J. R. and Buddington, A. F., 1958, Iron-titanium oxide minerals, rocks and areo-magnetic anomalies of the Adirondack area, New York. *Econ. Geol.*, v.53, pp.777-805.

Banfield, J. F. and Eggleton, R. A., 1988, Transmission electron microscope study of biotite weathering. *Clays and Clay Minerals*, 36, pp.47-60.

Balseley, J. R. and Buddington, A. F., 1960, Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. *Amer. J. Sci.*, 258A, pp.6-20.

Barth, T. W., 1948, Oxygen in rocks: a basis for petrographic calculation. *The Journal of Geology*, 56, pp.51-60.

Bell, D, Rossman, G., 1992, Water in earth's mantle-The role of nominally anhydrous minerals, *Science* 255(5050), pp.1391-1397

Boas, M. L., 1983, *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 793 p.

Borradaile, G.J., and Lagroix, F., 2000. Thermal enhancement of magnetic fabrics in high grade gneisses. *Geophysical Research Letters* 27, pp.2413-2416.

Borradaile, G.J., 1988, Magnetic susceptibility, petrofabric and strain - a review. *Tectonophysics* 206, pp.203-218.

Carmichael, I. S. E., Turner, F. J., and Verhoogan, J., 1974, *Igneous petrology*: New York, McGraw-Hill, 739p.

Chang, S. M., 2003, Evaluation on weathering intensity and rock mass properties of weathered granite, PhD thesis, Dankook University, 179p (in Korean with English abstract).

Chesworth, W., 1973, The residual system of chemical weathering: a model for the chemical breakdown of silicate rocks at the surface of the earth. *Journal of Soil Science*, 24, pp.69-81.

Choi, E. K., 2011, A study on the chemical index of alteration (CIA) and geotechnical properties of igneous rocks by weathering, PhD thesis, Pusan National University, 199p (in Korean with English abstract).

Choi, E. K., Kim, S. W., Kim, I. S., and Lee, K. H., 2012, A study on the chemical index of alteration of igneous rocks, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 28(3), pp.41-54 (in Korean with English abstract).

Choi, S. H., Lee, J. H., Oh, C. W., Lee, K. H., and Kim, S. W., 2014, A study on the change of biotite granite by the artificial weathering experiment, *Proceedings of the Annual Joint Conference, the Petrological Society of Korea and the Mineralogical Society of Korea*, pp.114-116 (in Korean with English abstract).

Collinson, D. W., 1983, *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation*. Chapman & Hall, London, 503p.

Condie, K. C., Dengate, J. and Cullers, R. L., 1995, Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, pp.279-294.

Cox, K. G., Bell, J. D., and Pankhurst, R. J., 1979, The interpretation of igneous rocks: London, George Allen & Unwin, 450p.

Cullers, R. L., Barrett, T., Carlson, R. and Robinson, B., 1987 Rare earth element and mineralogical changes in Holocene soil and sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado. USA. *Chemical Geology*, 63, pp.275-297.

Cullers, R. L., 1988, Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediments formed by intense weathering of the Danbury granite, Georgia, USA. *Lithos*, 21, pp.301-314

Davis, J. C., 1986, *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 646p.

De Jayawardena, U. S. and IZawa, E., 1994 A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka, *Engineering Geology*, 36, pp.303-310.

Dearman, W. R., 1976, Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13, pp.123-127.

Dearman, W. R., Baynes, F. J. and Irfan, T. Y., 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, pp.345 -374.

- De Ros, L. F., Sgarbi, G. N. C., and Morad, S., 1994, Multiple authigenesis of K-feldspar in sandstones: Evidence from the Cretaceous Areado Formation, San Francisco basin, central Brazil: *Journal of Sedimentary Research*, A64, pp.778 - 787.
- Delvaux, B., Herbillon, A. J. and Vieloye, L., 1989, Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon, taxonomic, mineralogical and agronomic implications. *Geoderma*, 45, pp.375-388.
- Duddy, I. R., 1980, Redistribution and fractionation of rare earth and other elements in a weathering profile. *Chemical Geology*, 30, pp.363-381.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., and Young, G. M., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance, *Geology*, 23(10), pp.921-924.
- Flinn, D., 1962, On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quart. J. Geol. Soc. London*, v.118, p. 385-433.
- Franklin, J. A. and Chandra R., 1972, The slake durability test. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 9, pp.325-341.
- Gilkes, R. J. and Suddhiprakarn. A., 1979a, Biotite in deeply weathered granite; I, Morphologic, mineralogical, and chemical properties, *Clays and Clay Minerals*, 27(5), pp.349-360.
- Gilkes, R. J. and Suddhiprakarn. A., 1979b, Biotite alteration in deeply weathered granite; II, The oriented growth of secondary minerals, *Clays and Clay Minerals*, 27(5), pp.361-367.

Gill, J. B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer, Berlin, 390p.

Goldich, S. S., 1938, A study in rock weathering. The Journal of Geology, 46, pp.17-58.

Gupta, A. S. and S. K., Rao, 2001, Weathering Indices and Their Applicability for Crystalline Rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60, pp.201-221

Hamrol, A., 1961, A Quantitative Classification of Weathering and Weatherability of Rocks. Proc 5th International Conference of Soil and Mechanical Engineers, 2(3), pp.771-774

Harnois, L., 1988, The CIW index: a new Chemical Index of Weathering. Sedimentary Geology, 55, pp.319-322.

Harris, W. G., Zelazny, J. C., Baker, J. C., and Martens, D. C., 1985, Biotite kaolinization in Virginia Piedmont soils: I. Extent, profile trends, and grain morphological effects. Soil Science Society of America Journal, 49(5), pp.1290-1297.

Henry, B., Jordanova, D., Jordanova, N., Souque, C., and Robion, P., 2003, Anisotropy of magnetic susceptibility of heated rocks. Tectonophysics, 366, pp. 241-258.

Hobbs, B.E., Means, W.D., Williams, P.F., 1976, An outline of structural geology. John Wiley & Sons, New York, 571 p.

Hoshino, K., 1981, Consolidation And Strength of the Soft Sedimentary Rocks, ISRM International Symposium, 21-24 September, Tokyo, Japan

Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys* 5, 37-82

Iliev, I. G., 1996, An attempt to estimate the degree of weathering of their physico-mechanical properties. *International Society of Rock Mechanics*, 1, pp.109-114.

Irfan, T. Y., 1996, Mineralogy, Fabric Properties and Classification of Weathered Granites in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29, pp.5-35.

Irfan, T. Y. and Dearman, W. R., 1978, Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 11, pp.233-244.

ISRM, 1981, Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18, pp.85-110.

Jeong, G. Y. and Kim, H. B., 2002, Oxidized biotite in the weathering profile of Andong Granite. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 15, pp.183-194 (in Korean with English abstract).

Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79. pp.63-67.

Kim, S. W., Jung, S. J., Choi, E. K., Kim, S. H., Lee, K. H., Oh, J. L., and Park, D. G., 2013, Time status of slope collapse for 1999-2011, in Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(6), pp.669-681 (in Korean with English abstract).

- Kim, S.W., Choi, E. K., Kim, J. W., Kim, T. H. and Lee, K. H., 2017, Chemical Weathering Index of Clastic Sedimentary Rocks in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 27(1), pp.67-79 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. S., Kim, G. W., Heo, N. Y., Rui, D. H., Lee, J. H., and Choi, J. H., 2001, A study on the geotechnical assessment of sedimentary rocks due to weathering in Taegu area, *Proceedings of the KSEG*, pp.15-22 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. G., 1993, Weathering of granite. *Journal of Geological Society of Korea*. 29, pp.396-413.
- Lee, S. G. and de Freitas, M. H., 1988, A revision of the descriptions and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 22, pp.31-48.
- Lee, S. H. and Kim, S. J., 2004, Weathering characteristics of sedimentary rocks affected by periodical submerging, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 17(1), pp.23-35 (in Korean with English abstract).
- Leung, C. F. and Radakrishnan, R. 1990, Geotechnical properties of weathered sedimentary rocks. *Developments in Geotechnical Engineering*, 21, p.29-48.
- Mason, B. H., 1966, *Principles of geochemistry* (2ed ed.): New York, John Wiley and Sons, 329p.
- Marsh, J. S., 1991, REE fractionation and Ce anomalies in weathered Karoo dolerite. *Chemical Geology*, 90, pp.189-194.

- Martín-Hernández, F., Lunebürg, C.M., Aubourg, C., Jackson, M., 2004, Magnetic Fabric: Method and Application. Geological Society of London, 551 p.
- Maynard, J. B., 1992, Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols: *Journal of Geology*, 100, pp.279 - 289.
- Mendes, F. M., Aires-Barros, L. and Rodrigues, F. P., 1966, The Use of Modal Anaysis in the Mechanical Characterization of Rocks Masses. Proc. 11st Int. Congr. ISRM, Lisbon, Publ, 2, pp.217-223.
- Moores, E.M. and Twiss, R.J., 1995, *Tectonics*, Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, p. 415.
- Miura, K., 1973, Weathering in plutonic rocks. Part I Weathering During the late-Pliocene of Gotsu plutonic rock. *J. Soc. Eng. Geol. Japan*, 14, pp.43-61.
- Nagata, T., 1961, *Rock Magnetism*, 2nd ed., Maruzen, Tokyo, 350p.
- Nam, K. S., 1971, Variation of chemical composition and relative movement of important elements on the weathering of granitic and basaltic rocks, *Journal of the Geological Society of Korea*, 7(4), pp.227-290 (in Korean with English abstract).
- Nam, K. S., 1987, Variation of chemical composition and relative movement of major elements on the weathering of granitic and basaltic rocks, PhD thesis, Chonbuk national university, 90p (in Korean with English abstract).
- Nam, K. S. and Cho, K. S., 1993, Relative of major elements on the weathering of rocks, *Journal of Korean Institute of Mining geology*, 26(1), pp.97-81 (in Korean with English abstract).

National Disaster Management Research Institute, 2010, Improvement of disaster warning system for steep slope. NIDP-PR-2010-01-02, 304p (in Korean with English abstract).

National Disaster Management Research Institute, 2013, A study on the failure characteristics and safety factors of steep slopes based on the rainfall infiltration analysis - unsaturated characteristics and steep-slope risk evaluation of weathered metamorphic soil test-beds. NDMI-PR-2013-19-02, 308p (in Korean with English abstract).

Nesbitt, H. W., 1979, Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279, pp.206-210.

Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, pp.715-717.

Ollier, C. D., 1969, *Weathering*. Oliver and Boyd Ltd., 250p.

Pasamehmetoglu, A. G., Karpuz, C. and Irfan, T. Y., 1981, The Weathering Classification of Ankara Andesites from Rock Mechanics Point of View. ISRM International Symposium, Tokyo Publ, 1, pp.185-190.

Parker, A., 1970, An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, pp.501-504.

Passchier, C.W., and Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics* (2nd Ed.). Springer, 366 p.

- Price, J. R. and Velbel, M. A., 2003, Chemical weathering indices applied to weathering profile developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical geology*, 202, pp.397-416.
- Rebertus, R. A., Weed, S. B., and Boul, S. W. 1986, Transformation of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Science Society of America Journal*, 50, pp.810-819.
- Reiche, P., 1943, Graphic representation of chemical weathering. *Journal of Sedimentary Petrology* 13, pp.58-68.
- Richard E. Goodman, 1980 *Introduction to Rock Mechanics*, pp.37-39
- Ruxton, B. P., 1968, Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology* 76, pp.518-527.
- Smith, J. V., 1974, *Feldspar minerals 2: Chemical and textural properties*: Berlin, Springer-Verlag, 690p.
- Stacey, F. D., Joplin, G. and Lindsay, J., 1960, Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S. E. Australia. *Geofiz. Pura Appl.*, 47, pp. 30-40.
- Stacey, F. D., Lovering, J. F. and Parry, L. G., 1961, Thermomagnetic properties natural magnetic moments, and magnetic anisotropies of some chondritic meteorites. *J. Geophys. Res.*, 96, p.1523-1534.
- Sueoka, T., 1988, Identification and Classification of Granite residual Soils Using Chemical Weathering Index. *Symposium on The Weathering Residual Soil*, pp.89-94.

Tarling, D. H., 1983, Palaeomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology. Chapman & Hall, London, 379p.

Tarling, D.H., and Hrouda, F., 1993, The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman and Hall, London. 227 p.

Tauxe, L., 2002. Paleomagnetic Principles and Practice. Springer, New York, 299p.

Vogel, D. E., 1975, Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South - Central Quebec. Canadian Journal of Earth Sciences, 12, pp.2080-2085.

Vogt, T., 1927, Sulitjelmafeltets geologi og petrografi, Norges Geologiske Undersokelse. 121, p.1-560.

Werner, B. and Spranger, T, 1996, Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical area where they are exceeded Texte 71: 96. Berlin, Germany : Federal Environmental Agency; 144p.

Woodcock, N.H., 1977, Specification of fabric shapes using an eigenvalue method, GSA Bulletin, 88(9), pp.1231-1236.

Yim, G. J., 2000, A study on weathering characteristics of granitic rocks, PhD thesis, Kangwon National University, 148p (in Korean with English abstract).

연합뉴스 2011-09-09, <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=101&oid=001&aid=0005259946>

기상청/기후자료 2017, http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp

감사의 글

긴장된 모습으로 대학원에 입학한지가 엇그제 같은데 벌써 마무리 단계인 것 같습니다. 많은 분들의 도움에 이 한편의 논문이 완성되어 너무나 감사할 따름입니다.

지반공학 연구실 입문부터 본 논문이 완성되기까지 열정과 관심으로 지도하여 주신 김태형 교수님 진심으로 고맙습니다. 그리고 심사하는 과정에서 아낌없는 조언을 해주신 서영교 교수님, 경갑수 교수님, 강기천 교수님, 김성욱 박사님 감사합니다. 또한 바쁘신 와중에도 늘 격려를 아끼지 않으신 김도삼 학과장님, 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 이재하 교수님 감사합니다.

휴일을 마다하지 않고 사무실에 출근하여 논문 작성 및 발표에 많은 도움을 주신 최은경 박사님에게도 무한한 감사의 뜻을 전합니다. 학사 일정 공지 등 논문 작성에 도움을 주신 한국해양대 토목공학과 지반공학 연구실 후배님들께도 진심으로 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

대학원 생활에 많은 배려와 성원을 보내주신 권준안 건설본부장님을 비롯한 직장 동료 여러분과 특히 자료 준비에 많은 도움을 준 윤태일 대리에게도 감사드립니다.

무엇보다 지금까지 모든 것을 감내하며 용기와 따뜻한 애정을 주었던 사랑하는 아내 김미영에게 이 모든 기쁨을 전하고 싶습니다. 그리고 믿음직한 아들 태현이에게도 고마움을 모두 주고 싶습니다.

이 결실을 바탕으로 앞으로 배우는 자세로 더욱더 삶에 충실할 것을 다짐하면서 저를 아시는 모든 분들께 이 한편의 논문을 바칩니다.

2017년 8월

김중우 배상