

홍성 지역 화강 풍화 지층에 대한 풍화도 및 전단파 속도 고찰 Investigation into Weathering Degree and Shear Wave Velocity for Decomposed Granite in Hongsung

선창국¹⁾, Chang-Guk Sun, 김보현²⁾, Bo-Hyun Kim, 정충기³⁾, Choong-Ki Chung

- 1) 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원, Senior Researcher, Korea Earthquake Research Center, KIGAM
- 2) 중앙인사위원회 사무관시보, Assistant Junior Official Probationer, Republic of Korea Civil Service Commission
- 3) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & GeoSys. Eng., Seoul National University

SYNOPSIS : The weathering degree and shear wave velocity, V_s , were evaluated for decomposed granite layers in Hongsung, where earthquake damages have occurred. The subsurface geological layers and their V_s profiles were determined, respectively, from boring investigations and seismic tests such as crosshole, downhole and SASW tests. The subsurface layers were composed of 10 to 40 m thickness of weathered residual soil and weathered rock in most sites. In the laboratory, the weathering indexes with depth were estimated based on the results of X-ray fluorescence analysis using samples obtained from field, together with the dynamic soil properties determined from resonant column tests using reconstituted specimens. According to the results, it was examined that most weathering degrees represented such as VR , Li , CIA , $MWPI$ and WIP were decreased with increasing depth with exception of RR and CWI . For weathered residual soils in Hongsung, the V_s 's determined from borehole seismic tests were slightly increased with increasing depth, and were similar to those from resonant column tests. Furthermore, the V_s values were independent on the weathering degrees, which were decreased with depth.

Keywords : weathering degree, shear wave velocity, decomposed granite, weathered residual soil

1. 서 론

우리나라의 암반은 주로 화성암과 변성암으로 구성되어 있으며, 화성암의 대부분은 화강암이 주류를 이루고 있다. 화강암이 외부의 물리, 화학, 그리고 생물학적 풍화 작용을 받아 깨어지고 변질되어 생성된 풍화잔류토(weathered residual soil)를 화강 풍화토(decomposed granite)라고 하는데, 국내의 노년기 산지와 구릉 지대의 지표면에서 쉽게 발견할 수 있을 뿐만 아니라 평야지에서도 매립층이나 퇴적층 하부에서 찾아볼 수 있다. 이처럼 화강 풍화토는 국내 지반 구성 지층의 대표적인 토사라고 할 수 있으며, 이의 공학적 특성을 정량화 하여 지반 및 토목 설계에 종합적으로 활용하고자 하는 지반공학 측면의 다양한 연구가 지속적으로 추진되고 있다(Kim, 2001). 무엇보다도 화강 풍화토 형성 및 발달의 가장 근본적 특성인 풍화도의 경우 모든 강도 및 변형 특성의 기본적인 지표로 활용 가능함에 따라, 정량적 지수

를 제시하고 공학적 특성과의 상관성을 도출하기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다(이종규와 장서만, 2003; Tugrul과 Gurpinar, 1997). 화강 풍화토의 다양한 공학적 특성 중에서도 동적 물성은 최근 국내에서 활성화 되고 있는 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위한 국내 대표 지반의 기본 특성으로서 그 중요성이 강조되고 있다. 특히, 지반공학 관점의 대표적 동적 특성인 전단파 속도와 속도(shear wave velocity; V_s)는 지반 강성을 의미하는 실질적 지표로서 내진 목적의 지진 응답 특성 평가 뿐만 아니라 공용 상태의 지반 거동 특성 평가에도 직접 활용되는 매우 중요한 지반 정수이다. 따라서 국내 대표 지반인 화강 풍화토에 대한 풍화도의 정량적 판단과 더불어 전단파 속도의 합리적 결정은 시설물의 정적 및 동적 설계나 성능 평가와 같은 공학적 활용의 필수적 기반 사항이다.

본 연구에서는 화강 풍화토의 근본적 특성인 풍화도와 대표적 동적 특성인 전단파 속도에 대한 정량적 평가를 위하여 국내 화강암 분포 현황을 파악하였으며, 이를 토대로 대표적 화강 풍화토 발달 지역으로서 1978년 계기 지진 피해 사례가 기록된 홍성 지역을 선정하였다. 홍성 지역에서의 풍화도 및 전단파 속도의 체계적 평가를 목적으로 주요 부지들에 대한 시추 조사와 현장 탄성과 시험을 수행하였고, 현장에서 채취한 시료를 이용하여 실내에서 풍화도 분석 및 공진주 시험을 포함한 다양한 특성 평가 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 이와 같은 다양한 조사 및 시험을 토대로 산정된 풍화 지수 및 전단파 속도를 종합적으로 비교·분석하여 홍성 지역을 포함한 국내 화강 풍화토 발달 지역의 정적 및 동적 특성의 체계적 정량화를 위한 기본 특성을 제시하고자 하였다.

2. 홍성 지역의 지반 특성

우리나라는 일반적으로 침식과 풍화가 오랜 동안 지속된 노년기 지형에 해당되며, 한반도의 서쪽 지역에서 이러한 노년기 지형 특성이 두드러진다(Sun, 2004). 노년기 지형의 경우 지표뿐만 아니라 지하에서도 상당한 시간 동안 풍화가 진행되었으므로 기반암 상부 토사는 대개 풍화 지층이 지배적이다. 또한, 지질학적으로 우리나라의 기반암은 대부분 화강암이나 화강편마암 및 화강암질 편마암으로 구성되어 있으며, 주로 중생대 쥐라기(Jurassic period)에 관입되어 형성되었다. 따라서 모양이 화강암인 노년기 지형의 지역적 지반 특성은 화강 풍화토로 대표될 수 있다. 이와 같은 한반도의 지형 및 지질 특성 그리고 풍화 진행 과정에 대한 고찰에 근거해 볼 때, 우선 국내 화강 풍화토의 대표적 발달 지역으로 충청남도와 전라북도 권역을 들 수 있다. 광범위한 대상 권역 중 풍화도 평가와 더불어 본 연구의 지반 동적 특성 평가에 적합한 지역으로 1978년 10월 7일 발생한 규모 5.0의 지진으로 인해 건물, 구조물 등의 피해가 기록된 충청남도 홍성 지역을 최종적인 연구 대상으로 선정하였다(Kim, 2001). 그림 1은 국내 화강암의 지질 연대에 따른 분포도로서, 연구 대상인 홍성 지역의 위치를 확인할 수 있다. 홍성 지역은 경기 지괴(Gyeonggi Massif) 내에 위치하고 있고 쥐라기에 관입된 화강암이 모양을 구성하고 있다. 또한,

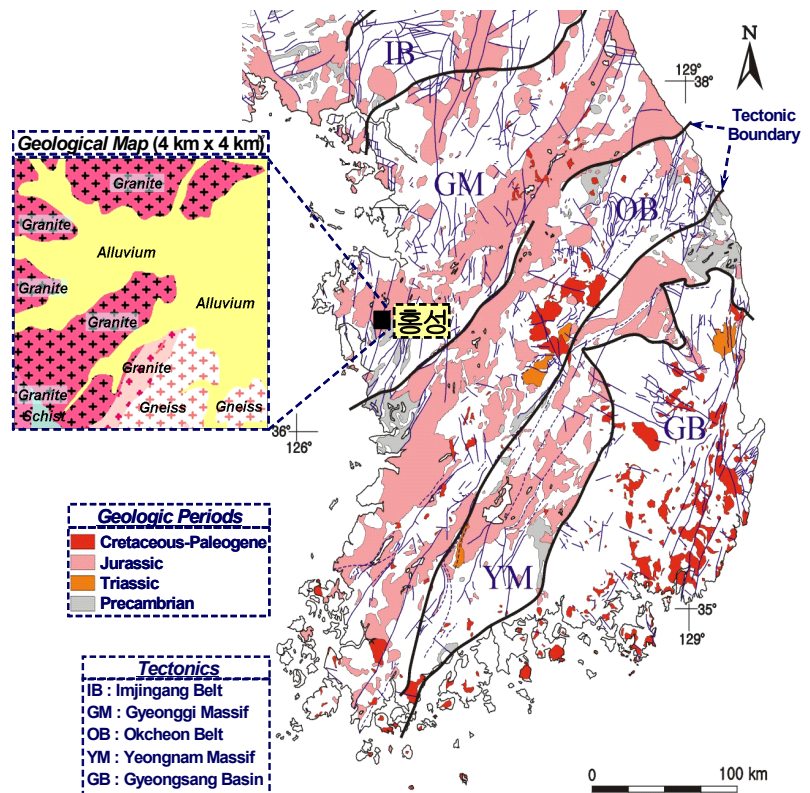


그림 1. 국내의 화강암 분포 및 홍성 지역의 지질 분포

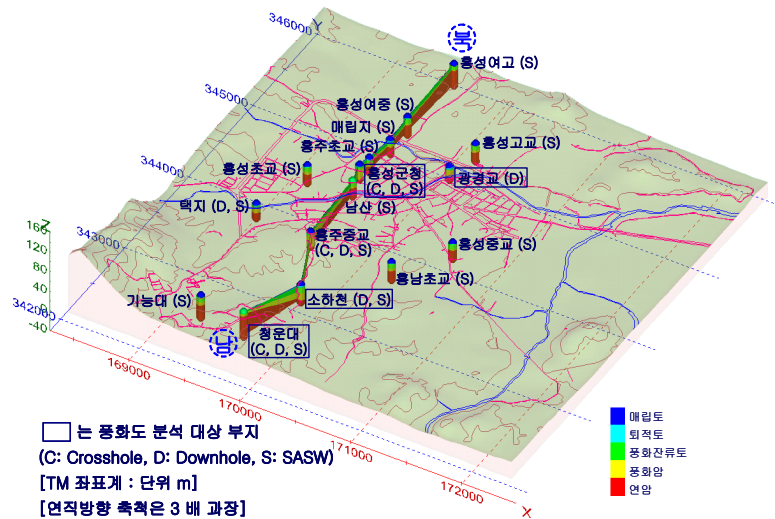
그림 1은 국내 화강암의 지질 연대에 따른 분포도로서, 연구 대상인 홍성 지역의 위치를 확인할 수 있다. 홍성 지역은 경기 지괴(Gyeonggi Massif) 내에 위치하고 있고 쥐라기에 관입된 화강암이 모양을 구성하고 있다. 또한,

대상 지역의 지질도(그림 1의 좌측 삽입 그림)를 확인해 보면, 편마암(gneiss)이 분포하는 남동부 일부를 제외하고는 대상 지역 대부분에 화강암(granite)과 충적층(alluvium)이 분포하므로, 홍성 지역에는 연암과 같은 기반암의 상부로부터 지표 부근까지 화강암의 풍화암(weathered rock)이나 풍화잔류토로 구성된 풍화 지층이 발달되어 있거나 풍화 지층의 상부에 다소의 충적층이 분포할 것으로 보인다.

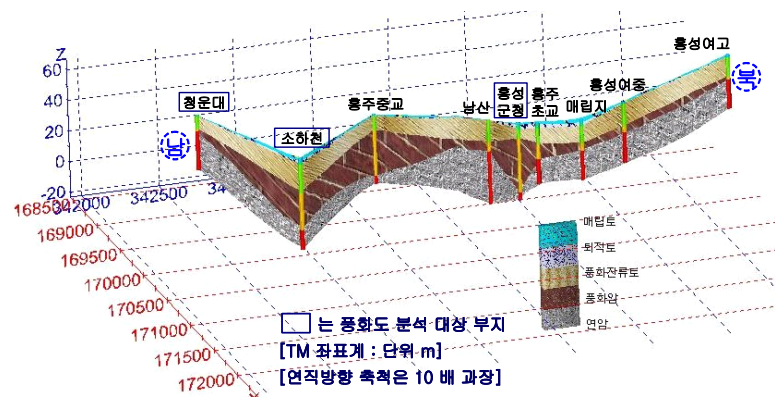
2.1 현장 지반 조사를 통한 홍성 지역의 지층 분포 특성

홍성 지역의 풍화 및 동적 특성을 평가하기 위하여 현장과 실내에서 다양한 조사 및 시험을 실시하였다. 대상 지역 내 조사 부지는 지질 및 지형 자료를 분석하고 고찰하여 산지 3개소, 구릉 6개소, 그리고 평야 7개소의 총 16개소로 결정하였으며, 현장에서는 시추 조사 및 표준관입 시험(Standard Penetration Tests; SPT) 그리고 탄성과 시험(seismic tests)을 통하여 지반 조사를 수행하였다. 총 6개소에서 9공의 시추 조사를 실시하였고, 탄성과 시험은 6개소의 다운홀(downhole) 시험, 3개소의 크로스홀(crosshole) 시험 그리고 16개소의 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 시험으로 구성된다. 현장 지반 조사 결과를 토대로 홍성 지역의 전반적인 지층 구성 및 지반 특성을 파악하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 6개소의 시추 조사 부지 중 4개소의 부지들(청운대, 광경교, 소하천, 홍성군청)을 홍성 지역에 대한 깊이별 풍화도 분석 대상 부지로 선정하여(그림 2(a)), 현장 채취 시료를 이용해 실내에서 정량적 풍화도 분석을 실시하였으며, 풍화도와 지반 동적 특성의 관계 분석을 위한 목적으로 크로스홀이나 다운홀 시험과 같은 현장 공내 탄성과 시험(borehole seismic test)으로 4 곳 풍화도 분석 대상 부지의 깊이별 전단파 속도를 정밀하게 측정하였다. 대상 지역인 홍성에서 수행한 지반 조사의 위치 및 위치별 탄성과 시험 내용과 대표(남북) 단면의 지층 구성은 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 4km × 4km 공간 대상 영역의 현장 지반 조사 자료를 데이터베이스(Database; DB)로 구축하고, GIS(Geographic Information System) 기법을 활용하여 대상 지역 전체의 지층 구성을 지질 구조에 합리적인 크리깅(kriging) 방법(Sun, 2004; Oliver와 Webster, 1990)으로 보간 예측한 공간 지반 정보도이다. 그림 2(a)에는 남북 단면의 지층 단면도와 조사 부지별 지층 주상을 삽입하여 지표면 분포 도로 및 등고선 정보와 함께 가시화 하였다. 또한, 그림 2(b)에 제시한 바와 같이 남북 단면의 보다 명확한 지층 분포를 조사해보았으며, 홍성 지역에는 전반적으로 풍화잔류토와 풍화암의 풍화 지층이 두껍게 발달해 있음을 확인할 수 있다.

대상 지역의 지층 발달 상태 파악을 위하여 시추 조사와 현장 탄성과 시험의 결과를 종합적으로 분석한 결과, 홍성 지역은 비교적 얇은 매립층 및 퇴적층 하부에 깊게 발달한 풍화 지층이 존재하는 것으로



(a) 홍성 지역의 지반 조사 위치 및 수행 시험 내력



(b) 홍성 지역 남북 단면의 지층 구성

그림 2. 홍성 지역의 지반 조사 위치 및 지층 구성

대상 지역인 홍성에서 수행한 지반 조사의 위치 및 위치별 탄성과 시험 내용과 대표(남북) 단면의 지층 구성은 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 4km × 4km 공간 대상 영역의 현장 지반 조사 자료를 데이터베이스(Database; DB)로 구축하고, GIS(Geographic Information System) 기법을 활용하여 대상 지역 전체의 지층 구성을 지질 구조에 합리적인 크리깅(kriging) 방법(Sun, 2004; Oliver와 Webster, 1990)으로 보간 예측한 공간 지반 정보도이다. 그림 2(a)에는 남북 단면의 지층 단면도와 조사 부지별 지층 주상을 삽입하여 지표면 분포 도로 및 등고선 정보와 함께 가시화 하였다. 또한, 그림 2(b)에 제시한 바와 같이 남북 단면의 보다 명확한 지층 분포를 조사해보았으며, 홍성 지역에는 전반적으로 풍화잔류토와 풍화암의 풍화 지층이 두껍게 발달해 있음을 확인할 수 있다.

대상 지역의 지층 발달 상태 파악을 위하여 시추 조사와 현장 탄성과 시험의 결과를 종합적으로 분석한 결과, 홍성 지역은 비교적 얇은 매립층 및 퇴적층 하부에 깊게 발달한 풍화 지층이 존재하는 것으로

나타났다. 시추 부지에서의 지층 구분은 풍화잔류토와 풍화암의 경우 병행된 표준관입 시험의 N값 50/15를 기준으로 결정했으며, 풍화암과 연암의 경우 굴진성 및 육안 판별로 결정하였다. 또한, SASW 시험 부지에서는 공내 탄성과 시험 부지들의 지층 조건별 전단파 속도 분포에 근거한 깊이별 전단파 속도를 토대로 지층을 구분하였다. 이를 위하여 홍성 지역의 시추 대상 부지의 지층 구분에 따른 전단파 속도의 분포를 분석한 결과, 지층별 전단파 속도의 주요 분포 범위는 매립토, 퇴적토 및 풍화잔류토와 같은 토사에서는 약 120~380 m/s, 풍화암에서는 약 360~600 m/s, 그리고 연암 지반에서는 파쇄가 심한 경우 680 m/s 정도에서 비교적 압밀 상태가 양호한 경우 1,200 m/s 이상을 보였다. 지반 조사 결과에 의하면 홍성 지역의 연암 심도는 분지 내의 시가지를 중심으로 15m~45m이며, 연암 상부에 10m~40m 두께의 풍화대가 분포하고 있다. 특히, 풍화 지층 내의 풍화잔류토 두께는 위에서 언급한 기준에 따라 분류해 보면 5m~20m 정도로 구성되어 있다. 이러한 풍화 지층은 퇴적층 형성 이전의 침식과 더불어 진행된 풍화뿐만 아니라 퇴적층 형성 이후 안정적인 풍화 환경으로 인해 발달한 것으로 판단된다. 풍화 지층의 동적 특성은 상대적으로 기반암보다 취약하므로 지진시 풍화된 토사층에서 증폭이 크게 발생하여 지표면 부근에 분포하는 구조물 등에 큰 피해를 유발시킬 수 있다. 따라서 풍화 지층의 분포 현황 파악 및 그의 동적 특성 평가는 지반의 지진 응답 특성 평가와 내진 설계 등에 중요한 자료로 활용될 수 있다.

2.2 실내 분석과 시험을 통한 홍성 지역의 광물 및 역학 특성

현장에서 채취한 시료를 이용한 X-선 회절(X-ray Diffraction; XRD) 분석으로부터 광물 구성 성분을 파악하였다. 그 결과, 홍성 지역은 모암인 화강암의 주구성 광물인 석영, 운모 및 정장석과 이차 점토 광물인 카올리나이트(Kaolinite)가 주류를 이루었고, 위치에 따라 세리사이트(Sericite)와 같은 점토 광물도 확인되었다. 특히 본 연구에서는 대상 지층에 대한 정량적 풍화도 평가의 목적으로 화학 구성 성분 파악을 위한 X-선 형광(X-ray Fluorescence; XRF) 분석을 실시하였으며, 풍화 지층과 기반암에서의 분석 결과를 토대로 다양한 화학적 풍화 지수를 결정하여 비교·분석하였다.

이와 더불어 흙의 기본 물성치 시험과 강도 정수 결정을 위한 직접전단시험을 실시하여 홍성 지역 지반의 대표적인 역학적 특성을 얻었다. 시험 결과에 의하면 풍화잔류토는 주로 SW, SP, SM과 같이 모래가 우세한 흙으로 분류되었고, 비중은 2.62~2.66, 마찰각은 39~45°, 점착력은 0.0~0.4kg/cm² 정도의 범위를 보였다. 한편, 현장 탄성과 시험으로부터 전단파속도와 그에 따른 미소변형률 수준의 전단탄성계수를 결정할 수 있으며, 실내 공진주 시험을 통하여 전단변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비와 같은 동적 특성을 결정할 수 있다. 이에 따라 채취한 교란 시료를 현장조건에 따라 재성형하여 공진주 시험을 실시하고 현장 시험에서 결정한 동적 특성과 비교하였다.

3. 홍성 지역의 풍화도 결정

풍화란 새로운 물리 및 화학적 환경 하에서 안정된 광물을 생성해 내기 위한 암석과 같은 조립질 광물의 지표 부근에서의 파쇄와 변화를 의미한다(박병기와 이광찬, 1999; Goldich, 1938). 풍화는 발생 과정 및 원인에 따라 물리적, 화학적 그리고 생물학적 풍화로 나눌 수 있으며, 공학적 관점에서는 유기질 표토층과 같은 제한적 상황에서 주로 발생하는 생물학적 풍화보다는 물리적 풍화와 화학적 풍화를 주요 작용으로 고려한다.

3.1 화강암의 풍화 기구

지반공학적인 측면에서 관심의 대상이 되어 온 화강암의 풍화는 주로 물리적 풍화와 화학적 풍화에 집중되어 왔다. 물리적 풍화는 화학적 변화 없이 암석이 부서지는 과정을 의미한다. 화강암은 마그마로부터의 응결 및 수축 과정을 통해 생성되며, 용기나 침식 작용으로 지표면에 노출되면서 응력 이완으로

인해 팽창되고 균열 및 절리가 발생하게 된다. 발생한 균열 및 절리는 암반에 침투한 물의 동결, 내부의 온도 경사 및 결정체의 이방적 열팽창, 건습의 반복 등과 같은 붕괴 촉진 현상이 발생하면서 더욱 발전하게 됨에 따라 물리적 풍화가 진행되고, 이들 균열의 경계면에서부터 화학적 풍화가 진행된다.

화학적 풍화는 외부 영향에 의한 화학 작용이 구성 광물을 이차 점토 광물로 변화시키는 과정을 의미한다. 화강암의 주요 구성 광물은 석영, 장석, 운모로서, 일반적으로 석영이 가장 안정되어 화학적 풍화에 대한 저항이 큰 것으로 알려져 있다. 장석은 물리적으로는 견고하지만 물에 의해서 쉽게 변질된다. 또한, 운모는 풍화 인자에 의해서 가장 먼저 영향을 받는 광물(Goldich, 1938)이지만 부서짐은 다소 느려서 장석질이 완전히 풍화되어 사라진 후에도 부분적으로 남아 있기도 한다. 화학적 풍화는 물리적 풍화와 더불어 진행되는데, CO_2 를 포함한 물이 균열이나 간극을 따라 침투하고 사장석이나 흑운모 같은 광물이 산화, 환원, 탄산화 등의 화학 반응에 의하여 규산의 양이온 용탈 및 수화작용을 촉진함에 따라 발생된다. 특히, 석영이나 정장석보다 사장석, 흑운모, 각섬석 등을 많이 포함하면서, 물의 공급과 침투가 용이하거나 평탄한 지형으로 침식이 미약하고 상부에 새로운 퇴적층의 형성으로 장기 풍화가 가능한 지역에서는 큰 화학적 풍화작용을 받는다. 화강암은 오랜 시간의 용탈 및 분해 작용을 받으면서 입자간의 이완 및 분리가 촉진되며 세립화되어 최종적으로 점토화가 되어 간다. 이로 인해 사장석과 흑운모는 소멸되며 카올리나이트, 일라이트(Illite), 깁사이트(Gypsite), 세리사이트 등의 이차 광물이 생성된다.

지반 내 흙의 형성에 대한 연구의 일환으로 풍화 과정 및 정도를 정량적으로 파악하기 위한 많은 노력이 있어 왔다(Kim, 2001). 이러한 풍화 정도의 정량적인 지표로서 풍화 지수를 활용할 수 있으며, 광물 구성의 변화를 이용하는 광물학적 풍화지수, 입자의 비중 변화 등을 고려하는 물리적 풍화지수, 미세 균열이나 입자 조직의 변화를 이용하는 미세 광물학적 풍화지수 등의 여러 지수가 제시되어 왔다. 그러나 이러한 풍화 지수를 실제 적용할 경우, 관찰자에 따라 서로 다른 값이 제시될 수도 있으므로 풍화 지수의 결정에는 숙련도를 요하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 보다 객관적으로 풍화 특성을 평가하기 위하여 X-선 형광 분석으로부터 얻은 화학 조성을 이용한 정량적인 화학적 풍화지수를 이용하여 홍성 지역 풍화 지층의 풍화도를 확인하였다.

표 1. 화학적 풍화 지수(박병기와 이광찬, 1999; Tugrul과 Gurpinar, 1997)

제안자 및 기호	화학 성분을 이용한 산정식
Ruxton Ratio, RR (Ruxton, 1968)	$RR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
Weathering Index of Parker, WIP (Parker, 1970)	$WIP = \frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.90} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.70}$
Vogt Ratio, VR (Vogt, 1927; Roaldset, 1972)	$VR = \frac{Al_2O_3 + K_2O}{MgO + CaO + Na_2O}$
Modified Weathering Potential Index, $MWPI$ (Vogel, 1973)	$MWPI = \frac{Na_2O + K_2O + CaO + MgO}{Na_2O + K_2O + CaO + MgO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \times 100 (\%)$
Chemical Index of Alteration, CIA (Nesbitt and Young, 1982)	$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100 (\%)$
Chemical Weathering Index, CWI (Sueoka, 1990)	$CWI = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(\pm)}{\text{All Chemical Components}} \times 100 (\%)$
Ignition Loss ($H_2O(\pm)$), Li	$Li = \frac{\text{Loss by Ignition}}{\text{Mass}} \times 100 (\%)$

화강암이 풍화를 받게 되면 진행 정도에 따라 기존의 화학 조성이 바뀌게 되는데, 이러한 풍화 과정은 다음과 같이 세 단계로 구분할 수 있다. 풍화의 1단계에서는 먼저 K_2O , CaO , Na_2O , MgO , MnO ,

FeO 등의 알칼리 또는 알칼리 토류 금속이 용탈되고, 2단계에서는 SiO₂가 서서히 용탈되며, 3단계에서는 Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂가 집적됨과 동시에 강열감량(H₂O(±))이 급증한다. 이러한 화학 성분인 산화물들의 변화를 이용하는 기존의 다양한 화학적 풍화 지수를 표 1에 정리하여 제시하였다. 제시된 풍화 지수는 표 1을 토대로 산정할 경우 풍화 정도에 따라 각 지수의 값은 감소 또는 증가한다. 모양이 같은 동일 지층의 풍화 조건이면 일반적으로 풍화 정도는 심도 증가에 따라 감소하게 되며, 이러한 상황 하에서 표 1의 풍화 지수들의 값은 심도에 따라 그림 3에서 도시한 바와 같은 경향을 보일 것이다. 즉, 풍화는 대체로 지표면에 가까울수록 심하게 진행되므로, 지표로 접근할수록 풍화 지수 RR, WIP 및 MWPI는 감소하는 반면, VR, CIA, CWI 및 Li는 증가한다.

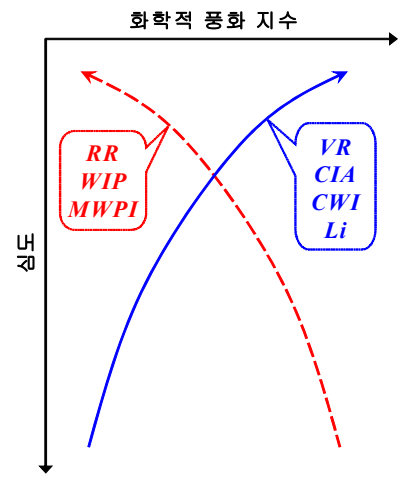


그림 3. 심도에 따른 풍화 지수

3.2 홍성 지역 대상 부지의 풍화 지수

홍성 지역의 정량적인 풍화도 평가를 위해 선정된 4곳 부지(청운대, 광경교, 소하천, 홍성군청)에서 깊이별로 채취한 시료를 이용하여 X-선 형광 분석을 실시하였다. 표 2에 제시한 바와 같이, X-선 형광 분석으로부터 각 부지의 심도별 화학 성분을 결정하였다. 각 부지별로 풍화도 분석 심도에서의 지층 구성을 표 2에서 확인할 수 있으며, 청운대와 소하천 부지의 경우 비교적 다양한 심도를 대상으로 X-선 형광 분석을 수행하였다.

표 2. 홍성 지역의 X-선 형광 분석 결과

부지명	지층 구분 및 심도 (m)		화학 성분										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Li
청운대	풍화 잔류토	3.0	70.99	15.57	0.28	2.38	0.47	0.31	1.41	4.29	0.05	0.03	3.95
		6.0	70.96	14.95	0.26	2.46	0.44	0.99	2.77	4.05	0.05	0.03	2.36
		8.0	69.91	15.60	0.24	2.16	0.39	0.72	2.90	5.18	0.05	0.03	2.05
	연암	10.5	73.90	13.47	0.28	2.32	0.53	0.82	2.87	3.98	0.06	0.06	1.64
		12.5	72.11	15.01	0.26	2.04	0.50	1.27	3.75	4.09	0.05	0.10	1.25
		14.0	72.72	13.72	0.26	2.46	0.54	1.69	3.04	4.14	0.07	0.11	1.26
		19.5	73.33	13.70	0.24	1.86	0.43	0.67	3.45	4.62	0.05	0.07	1.02
광경교	풍화 잔류토	7.5	71.12	14.50	0.20	2.98	0.30	0.78	2.54	4.82	0.03	0.07	2.20
		9.0	68.69	15.26	0.30	3.46	0.47	1.29	3.46	4.07	0.05	0.06	2.03
소하천	풍화 잔류토	9.0	74.00	14.12	0.24	2.11	0.34	0.31	1.12	4.09	0.06	0.03	3.37
		12.0	72.97	15.17	0.19	1.77	0.36	0.70	1.93	4.56	0.06	0.05	2.73
		13.5	75.65	13.89	0.19	1.60	0.36	0.74	2.08	4.60	0.05	0.05	1.86
		15.0	72.10	15.35	0.20	1.78	0.32	0.84	2.45	3.91	0.05	0.02	2.23
	풍화암	16.5	72.76	14.52	0.22	1.95	0.32	0.80	2.60	4.25	0.06	0.02	1.99
		18.0	70.40	15.29	0.22	2.21	0.32	0.89	2.54	4.91	0.06	0.02	2.16
		20.0	70.50	15.94	0.23	2.13	0.44	1.24	3.26	3.78	0.06	0.05	2.11
홍성 군청	풍화암	4.5	70.16	15.74	0.23	1.41	0.34	0.84	2.37	5.10	0.02	0.04	2.39
		6.0	73.03	13.58	0.23	2.41	0.35	0.60	2.59	4.14	0.02	0.05	2.13
		8.0	72.07	14.15	0.21	2.15	0.32	0.76	2.50	4.70	0.02	0.05	1.80
		10.0	69.21	15.89	0.19	2.14	0.26	1.09	3.36	4.83	0.03	0.04	1.58

X-선 형광 분석으로부터 파악된 각 부지의 심도별 화학 성분 결과(표 2)를 이용하여 기존에 제시된 화학적 풍화 지수들(표 1 참조)을 산정하여 표 3에 제시하였다. 특히, *Li*는 화학 성분으로서 뿐만 아니라 화학적 풍화 지수로서도 정량적인 활용이 가능하며, 지반을 구성하는 지층의 기본 특성으로서 광범위한 분야에서 파악 및 활용되고 있다(Kim, 2001). 이러한 이유로 *Li*는 몇몇 주요 화학적 풍화 지수와 함께 보편적 풍화 지표로 제시되어 왔다(박병기와 이광찬, 1999).

표 3. 홍성 지역의 화학적 풍화 지수

부지명	지층 구분 및 심도 (m)		화학적 풍화 지수						
			<i>RR</i>	<i>WIP</i>	<i>VR</i>	<i>MWPI</i>	<i>CIA</i>	<i>CWI</i>	<i>Li</i>
청운대	풍화 잔류토	3.0	4.56	43.28	9.10	6.78	72.18	22.25	3.95
		6.0	4.75	50.16	4.52	8.54	65.67	20.17	2.36
		8.0	4.48	59.50	5.18	9.49	63.92	20.20	2.05
	연암	10.5	5.49	50.03	4.13	8.38	63.71	17.72	1.64
		12.5	4.80	56.52	3.46	9.73	62.23	18.49	1.25
		14.0	5.30	53.55	3.39	9.58	60.73	17.70	1.26
		19.5	5.35	58.14	4.03	9.35	61.04	16.91	1.02
광경교	풍화 잔류토	7.5	4.91	54.49	5.35	8.69	64.07	19.96	2.20
		9.0	4.50	54.72	3.71	9.61	63.36	21.23	2.03
소하천	풍화 잔류토	9.0	5.24	39.99	10.31	6.10	71.88	19.88	3.37
		12.0	4.81	48.90	6.62	7.74	67.85	19.77	2.73
		13.5	5.45	50.14	5.84	7.86	65.20	17.35	1.86
		15.0	4.70	46.87	5.33	7.78	68.04	19.70	2.23
	풍화암	16.5	5.01	50.40	5.04	8.21	65.48	18.78	1.99
		18.0	4.61	55.41	5.40	8.96	64.71	20.07	2.16
		20.0	4.42	51.10	3.99	8.96	65.82	20.46	2.11
홍성 군청	풍화암	4.5	4.46	55.92	5.88	9.01	65.46	20.04	2.39
		6.0	5.38	49.19	5.00	7.95	64.92	18.50	2.13
		8.0	5.09	53.29	5.27	8.56	64.01	18.55	1.80
		10.0	4.36	59.68	4.40	9.85	63.14	20.08	1.58

심도별 풍화 지수의 정량적 변화를 알아보기 위하여 비교적 깊은 심도까지 풍화도가 분석된 청운대와 소하천 부지에서의 심도별 풍화 지수 분포를 그림 4에 도시하였으며, 각 그래프의 좌측 하단에는 풍화 지수별 심도에 따른 일반적인 증감 경향을 삽입하였다. 청운대 부지에서는 대부분의 화학적 풍화지수가 심도에 따른 풍화도 변화를 비교적 잘 반영하고 있다. 즉, 지표 부근에 가까워질수록 유동성 화학 성분의 용탈과 TiO_2 의 집적이 많이 발생하게 되므로 풍화도가 감소함을 확인할 수 있다. 특히, 하부 연암의 화학적 풍화 지수는 심도에 따라 그다지 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나, 그 상부의 풍화잔류토에서는 풍화 지수의 변화가 심하게 나타났다. 이는 암반에서는 화학적 풍화보다 물리적 풍화가 지배적이므로 화학적 풍화 지수는 비슷한 값을 보인데 반해, 풍화잔류토에서는 화학적 풍화 작용이 활발하여 심도가 얇아짐에 따라 그 값의 변화 양상이 확연히 나타난 것이다. 따라서 암반에서 보다 풍화잔류토에서

화학적 풍화도의 변별력이 크고 그 유용성도 높은 것으로 판단된다.

소하천 부지에서는 일부 풍화 지수의 경우 심도에 따른 풍화도 변화를 확인하기 어려웠다. 즉, 각 풍화지수의 산정에 활용되는 화학 성분의 용출 정도에 따라 풍화 지수 값이 다르게 결정되며, 이러한 화학 조성은 부지 위치 및 심도별 풍화 환경에 따라 차이를 보일 수 있다. 특히, 소하천 부지의 *RR*은 지표면에 가까워질수록 풍화 정도가 심해지고 지수가 감소하는 일반적인 경향과는 달리, 거의 변화가 없거나 오히려 다소 증가하였는데, 이는 소하천 부지에서 S_iO_2 의 용탈이 거의 발생하지 않았기 때문인 것으로 보인다. 또한, *CWI*는 깊이가 증가하면서 그 값이 변화가 없거나 오히려 감소하여 심도에 따른 일반적인 풍화 경향을 나타내지 않는 반면, *VR*과 *CIA*는 심도별 풍화 경향을 잘 나타내고 있는 경향으로 볼 때, 홍성 지역 소하천 부지에서는 Fe_2O_3 와 TiO_2 의 집적은 크지 않고 Al_2O_3 의 집적은 크며, K_2O 의 용탈은 미미한 것으로 판단된다. 더불어 *MWPI*, *Li* 및 *WIP*와 같은 소하천 부지의 화학적 풍화 지수는 대체로 지표면에 가까워질수록 풍화가 많이 진행되었음을 잘 보여 주고 있다.

그림 4의 소하천과 청운대 부지의 풍화 지수들을 종합적으로 비교해 본 결과, 집적되는 화학 성분인 Al_2O_3 와 강열감양을 주 판단 요소로 하여 풍화 정도를 결정하는 *VR*, *Li* 그리고 *CIA*가 홍성지역 화강암 풍화 지반에서의 심도에 따른 풍화도를 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 용탈되기 쉬운 알칼리 토류 금속을 종합적으로 고려하는 *MWPI*와 *WIP*도 비교적 심도별 일반적인 풍화 경향을 잘 보여주고 있다. 홍성 지역의 심도에 따른 풍화 경향을 잘 반영하고 있는 화학적 풍화 지수들의 값은 *VR*의 경우 3.99~10.31, *Li*의 경우 1.02~3.95, 그리고 *CIA*의 경우 61.04~72.18이었고, *MWPI*와 *WIP*는 각각 6.10~9.73과 39.99~59.50의 분포를 보였다.

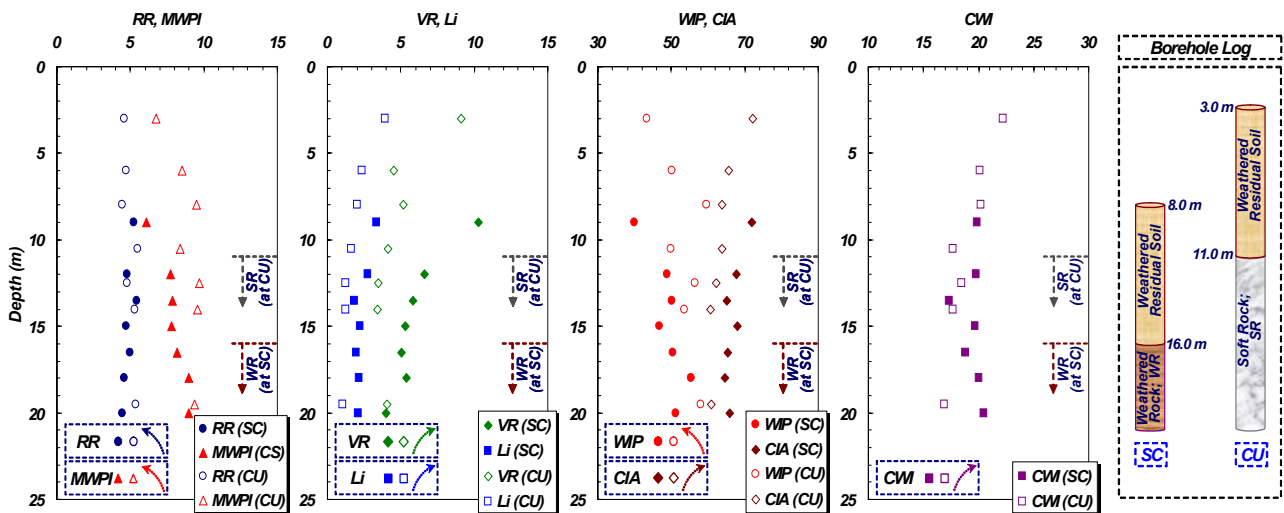


그림 4. 홍성 지역(소하천(SC) 및 청운대(CU))의 심도에 따른 풍화 지수 분포

그러나 이러한 화학적 풍화 지수가 절대적인 풍화 정도를 의미하는 것은 아니며, 모암 및 풍화 환경에 따라 그 지수 값이 다르게 결정될 수 있다. 화학적 풍화 지수는 흩에 포함된 화학 조성의 비율에 따라 결정되며, 이와 같은 지수는 동일한 모암에서도 주변의 풍화 환경에 지배를 받게 된다. 풍화 환경은 인접 지역에서도 위치별로 매우 상이하게 형성될 수 있고, 계절별 지하수의 변화 등에 의해서도 심도별로 다른 풍화 환경이 조성될 수 있다. 따라서 여러 부지의 화학적 풍화도를 단순히 비교하는 것은 바람직하지 않으며, 화학적 풍화도의 체계적 결정을 위해서는 보다 많은 부지의 다양한 풍화 지수 결정을 통한 종합적 판단에 근거해 위치별 풍화 특성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 여러 화학적 풍화 지수중에서도 *Li*는 그 편이성과 보편성으로 인해 풍화 정도의 기본 지표로서 다양하게 이용되어 왔다. 또한, 박병기와 이광찬(1999)은 국내 다양한 지역의 화강 풍화토 지반

에 대한 풍화 정도의 판단 지표로서 CWI 와 Li 의 대응 관계를 통해 보편적으로 이용되는 Li 를 제시한 바 있다. 본 연구에서는 보편적 풍화 지표이면서 홍성 지역에서도 심도에 따른 일반적인 풍화 경향을 잘 나타낸 Li 와 다른 화학적 풍화 지수들 간의 상관관계를 그림 5에 제시한 바와 같이 상호 비교 분석하였다. 풍화도의 산정식에서 집적되는 강열감양으로 표현되는 Li 와 상관성이 높게 분석되는 풍화 지수들은 심도별 풍화 경향에서 일반적 보편성을 보이는 것으로 이미 파악된 VR , $MWPI$ 그리고 CIA 이며, 특히 CIA 는 매우 높은 상관성을 보였다. 그 외에 WIP 및 CWI 는 Li 와 다소 낮은 상관성을 보이는 것으로 분석되었으며, RR 의 경우 Li 와는 어떠한 상관성도 발견하기 어려웠다. 비록 기본적인 풍화 지표로서 Li 를 기준으로 설정하고 풍화 지수간 상대적인 상관성 분석을 통해 비교한 결과이지만, 홍성 지역 풍화도 판별을 위한 합리적인 화학적 풍화 지수는 대표적으로 Li 와 CIA 를 제시할 수 있고, 더불어 VR 과 $MWPI$ 도 활용 가능할 것으로 판단된다.

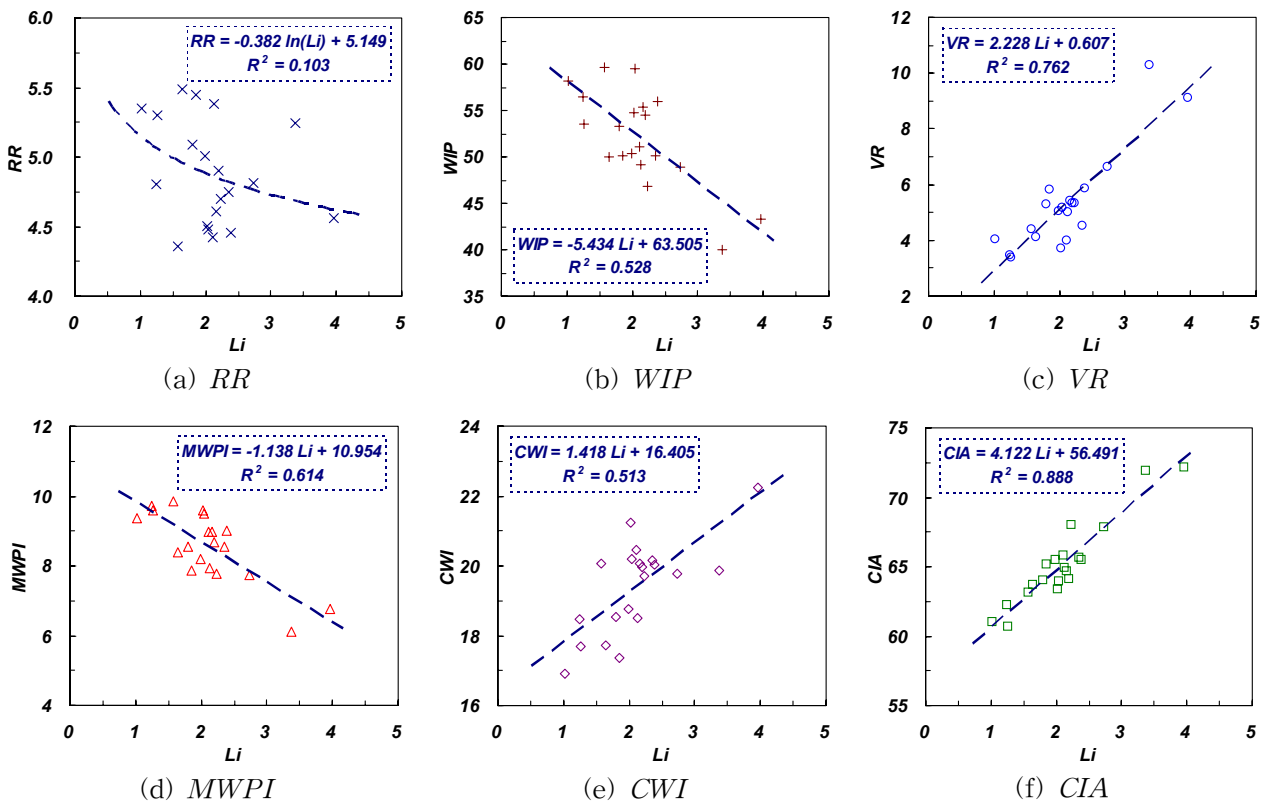


그림 5. 보편적 풍화 지표인 Li 와 화학적 풍화 지수와의 관계

4. 홍성 지역 풍화 지반의 깊이별 전단파 속도 결정

계기 지진이 발생했던 홍성 지역의 동적 특성 평가의 일환으로 주요 부지를 선정하고 현장에서 다양한 탄성과 시험을 수행하여 전단파 속도(V_s) 주상을 결정하였다. 그림 6은 크로스홀 및 다운홀 시험과 같은 공내 탄성과 시험이 실시된 홍성 지역 부지(그림 2 참조)의 깊이별 전단파 속도 분포로서, 시추 조사로부터 확인한 주요 관심 대상인 풍화잔류토 및 풍화암 지층의 깊이 분포도 함께 도시하였다. 또한, 해당 부지에서 SASW 시험이 실시된 경우 SASW 시험으로부터 결정된 전단파 속도 분포도 비교 제시하였다. 공내 탄성과 시험을 통해 결정된 풍화잔류토의 전단파 속도는 상부의 매립 및 퇴적토나 하부의 풍화암과는 달리 상하부 경계 부분을 제외한 지층 대부분의 영역에서 심도 증가에 따라 두드러진 증가

없이 다소 또는 약간 증가하는 분포 경향을 보였다. 이와 같은 풍화잔류토 지층에서의 전단파 속도 분포 경향은 다운홀 시험보다는 크로스홀 시험에서 지배적이었으며, 심도 증가에 따라 전단파 속도가 확연하게 증가하는 SASW 시험의 결과와는 다소 차이를 보였다. 이러한 차이는 공내 탄성과 시험 부지와 SASW 시험 축선의 지리적 차이와 더불어 SASW 시험 축선의 하부 지하 층상 구조의 변화로부터 기인한 것이다. 일반적으로 전단파 속도는 간극비와 구속압에 많은 영향을 받으므로 심도가 깊어짐에 따라 증가하게 된다(Seed와 Idriss, 1970). 즉, 심도가 깊어지면 구속압이 증가하고 풍화도는 감소하게 되며, 간극비는 작아지므로 흙 입자를 통과하는 전단파 속도는 빨라지게 된다. 그러나 홍성 지역 풍화잔류토의 경우 일반적인 지반 조건에서 확연하게 두드러지는 심도 증가에 따른 전단파 속도의 증가 현상은 상하부 지층 경계 부분에서만 다소 관찰되었을 뿐이며, 풍화잔류토 지층의 대부분에서 심도 및 구속압 증가로 인한 전단파 속도의 두드러진 증가 경향을 발견할 수 없었다.

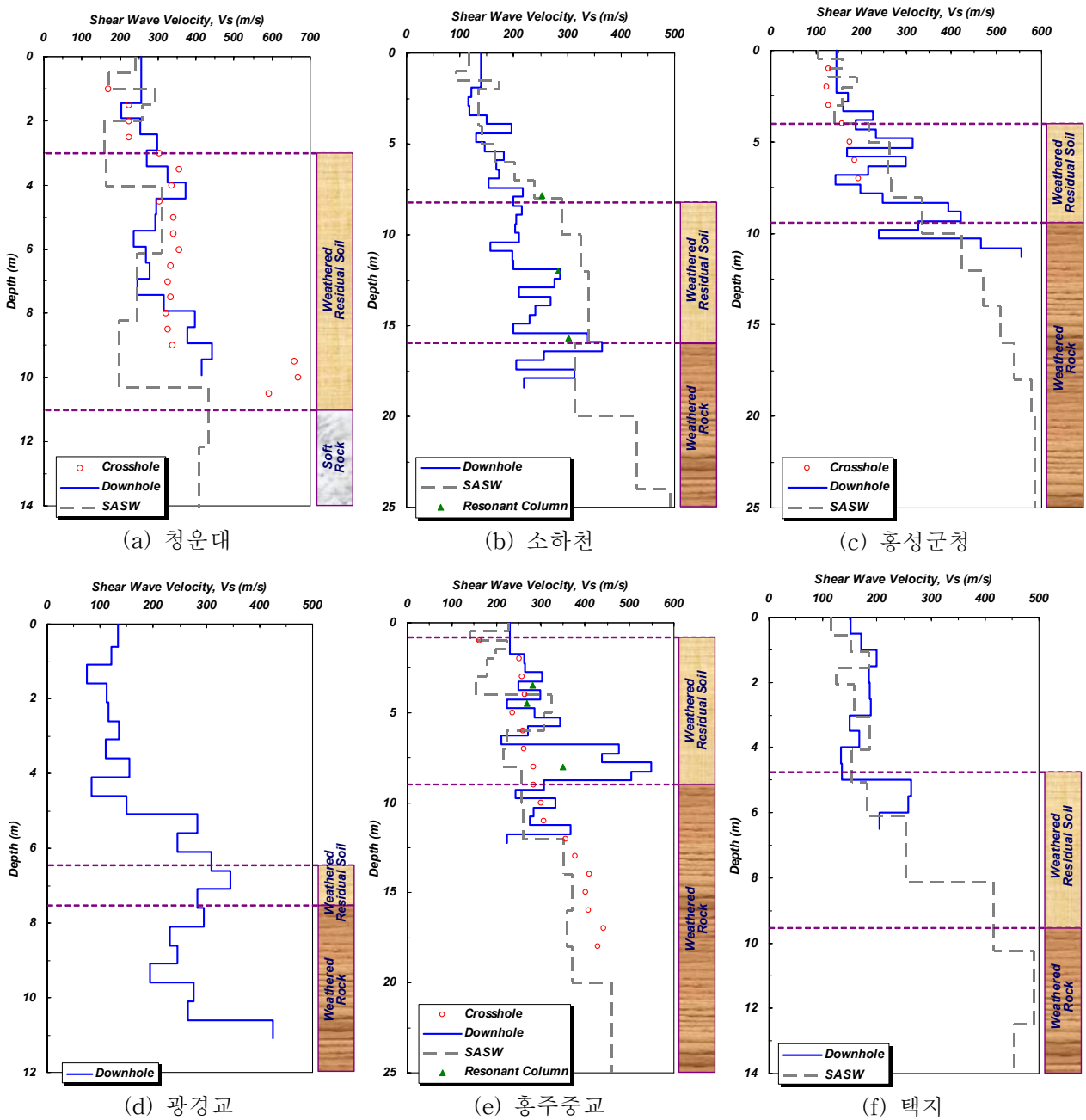


그림 6. 홍성 지역 공내 탄성과 시험 부지들의 심도별 전단파 속도 분포

현장 탄성과 시험과 더불어 실내에서는 현장 조건에 따라 재성형한 풍화잔류토 시료로 공진주 시험을 수행하여 미소변형률의 전단탄성계수로부터 전단파 속도를 획득하였다. 그림 6(b)의 소하천과 그림 6(e)의 홍주중교 부지에서는 공진주 시험과 현장에서 획득한 전단파 속도를 비교 도시하였으며, 공내 탄성과 시험과 공진주 시험으로부터 결정된 전단파 속도는 대체로 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 현장 탄성과 시험이 수행되지 않은 시료에 대하여 실내에서 공진주 시험을 활용하여 전단파 속도를 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도 정확한 현장 조건 구현 여부에 따라 원지반의 전단파 속도와 차이를 보일 수도 있으므로 공진주 시험은 현장 시험에 대한 보완이나 전단변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비 변화 곡선의 결정 목적으로 활용함이 바람직할 것으로 보인다.

홍성지역 풍화잔류토층에서는 전단파 속도가 심도에 따라 다소의 증가만을 보이므로, 풍화잔류토를 균일한 단일 층으로 보고 그림 7과 같이 크로스홀 및 다운홀 시험에서 얻은 전단파 속도를 종합하여 평균 전단파 속도를 결정하였다. 종합 분석 결과, 홍성 지역 풍화잔류토의 평균 전단파 속도는 256.7 m/s로 결정되었다. 반면, 풍화암 층에서는 여러 불리한 현장 시험 여건으로 인해 공내 탄성과 시험을 통해서만 제한적인 전단파 속도만을 결정할 수 있었으며, 대부분 SASW 시험으로부터 전단파 속도를 결정하였다. 풍화암 층에서 획득한 공내 탄성과 시험 및 SASW 시험의 전단파 속도를 종합해 본 결과, 시험 부지에 따라 전단파 속도의 분포 경향에서 다소 차이를 보이지만, 풍화암 층의 전단파 속도는 대체로 심도에 따라 증가하면서 400~600 m/s 정도의 분포를 보였다.

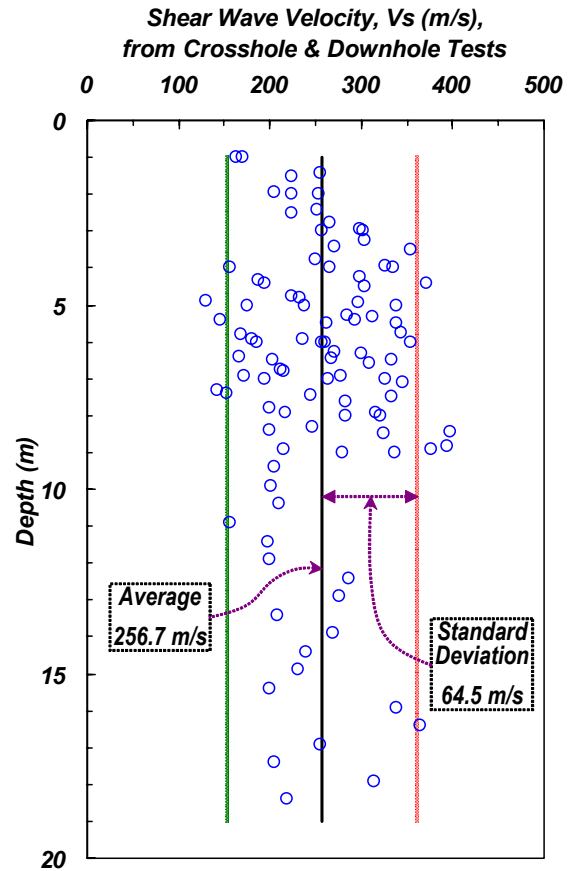


그림 7. 홍성 지역 풍화잔류토의 평균 V_s

5. 홍성 지역에서의 풍화도와 전단파 속도의 관계

국내 대표적 풍화 지층 발달 지역인 홍성 지역의 풍화잔류토 층에서 전단파 속도에 대한 풍화도의 영향을 알아보기 위하여 풍화도 평가 목적으로 선정된 4 곳 부지들(청운대, 광경교, 소하천, 홍성군청)의 다운홀 시험에서 결정된 전단파 속도를 산정된 화학적 풍화 지수들과 비교해 보았다. 다양한 풍화 지수들 중 풍화 정도의 지표로 파악된 Li 및 CIA 와 전단파 속도의 관계를 그림 8에 제시하였다. 비교 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 전단파 속도와 화학적 풍화 지수의 일반적인 관계성을 규명하기는 어려웠다. 이러한 경향은 홍성 지역 풍화잔류토에서 풍화도는 전단파 속도의 지배적인 영향 요인으로 작용하지 않기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 즉, 일반적으로 심도 증가에 따라 풍화도는 감소하게 되고 홍성 지

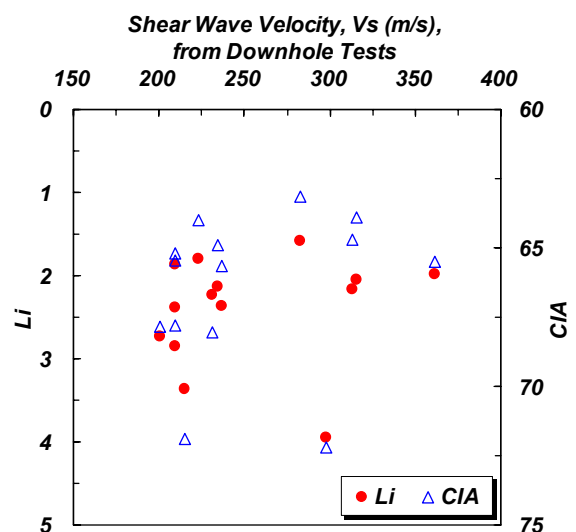


그림 8. 홍성 지역의 V_s 와 풍화 지수 관계

역 풍화잔류토를 대상으로 산정된 대부분의 풍화 지수에서도 이러한 경향은 확인되었으나, 대상 지층의 전단파 속도는 심도 증가에 따른 분명한 증가 없이 다소의 증가만을 보이므로 홍성 지역에서 풍화 지수와 전단파 속도의 상관 관계성을 도출하기는 어려웠다. 본 연구에서는 복합적인 현장 여건으로 인해 공내 탄성과 시험으로부터 깊은 심도까지의 전단파 속도를 획득하지는 못하였으며, 이로 인해 풍화 지층 전반에 걸친 전단파 속도의 정량적 평가는 제한적으로 이루어 졌다. 따라서 향후 전단파 속도와 풍화도의 보다 체계적인 비교 및 분석을 위해서는 풍화암을 포함한 풍화 지층 전체와 기반암에 대한 전단파 속도와 다양한 풍화 지수의 종합적 결정이 선행되어야 할 것이다. 이를 위해서는 무엇보다도 지역적 풍화 특성 및 동적 특성의 종합 평가를 위한 다양한 부지의 선정 및 분석과 그에 근거한 지반의 풍화와 동적 특성 자료의 축적 및 상호 분석이 필요할 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

화강암 풍화 지층이 두껍게 발달해 있고 계기 지진이 발생했던 홍성 지역의 지반을 대상으로 풍화 및 동적 특성 평가를 위한 현장 및 실내 조사와 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 홍성 지역의 지층은 시가지를 중심으로 한 평야 및 구릉지에서 오랜 동안의 풍화 작용으로 형성된 풍화잔류토와 풍화암의 풍화 지층이 최대 40 m 정도의 두께로 발달해 있다.
- (2) X-선 형광 분석 결과를 토대로 다양한 화학적 풍화 지수를 결정하여 홍성 지역의 풍화 지층에서 심도 증가에 따른 풍화도의 감소 경향을 확인하였다. 특히, 홍성 지역 풍화도 판별을 위한 합리적인 화학적 풍화 지수는 대표적으로 Li 와 CIA 를 제시할 수 있고, 더불어 VR 과 $MWPI$ 도 활용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 공내 탄성과 시험으로 결정한 홍성 지역 풍화잔류토 지층의 전단파 속도는 심도나 구속압 증가에 따라 두드러진 증가 없이 다소의 증가만을 보였으며, 풍화잔류토의 평균 전단파 속도는 256.7 m/s 정도로 결정되었다. 또한, 현장 조건에 따라 재성형된 시료를 이용한 공진주 시험으로부터 현장 탄성과 시험의 전단파 속도에 상응하는 전단파 속도를 결정할 수 있었다.
- (4) 홍성 지역의 풍화잔류토 지층에서는 심도 증가에 따른 풍화 정도의 감소 경향을 보이는 풍화 지수와는 달리 전단파 속도는 증가 경향이 미미함에 따라 풍화 지수와 전단파 속도간의 상호 관계성을 찾을 수 없었다. 본 연구에서는 광범위한 홍성 지역에 대해 제한적인 몇몇 부지의 풍화 지수 및 전단파 속도만을 평가하였으므로, 풍화도와 동적 특성의 보다 체계적인 관계 정립을 위해서는 대상 지역 내의 다양한 부지에 대해 풍화와 동적 특성을 체계적으로 평가하고 자료의 축적을 통한 종합 분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박병기, 이광찬 (1999), “국내 화강풍화토 지반의 풍화도 평가방법”, *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제1호, pp.127-140.
2. 이종규, 장서만 (2003), “화강 풍화암의 풍화도 및 강도정수의 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제2호, pp.227-236.
3. Goldich, S. S. (1938), "A Study in Rock Weathering", *Journal of Geology*, Vol.46, pp.17-58.
4. Kim, B. -H. (2001), *Investigation for Shear Wave Velocity and Degree of Weathering of Decomposed Granite Soil in Hongsung*, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
5. Oliver, M. A., and Webster, R. (1990), "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol.4, No.3, pp.313-332.
6. Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1970), *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*, Report No. EERC/70-10, Earthquake Engineering Research Center, pp.144-184.
7. Sun, C. -G. (2004), *Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, pp.130-136.
8. Tugrul, A., and Gurpinar, O. (1997), "The Effect of Chemical Weathering on the Engineering Properties of Eocene Basalts in Northeastern Turkey", *Environmental and Engineering Geosciences*, Vol.3, No.2, pp.225-234.