

화강암류 골재원석의 내구성과 관련된 암석학적 특성

민 경 원

〈강원대학교 공과대학 자원공학과 교수〉

김 재 동

〈강원대학교 공과대학 자원공학과 교수〉

임 길 재

〈강원대학교 공과대학 자원공학과〉

1. 서 론

최근 '80년대 중반 이후 건설 경기의 급속한 성장과 더불어 골재의 소비량이 매년 크게 증가하고 있으나, 콘크리트용 골재로서 주종을 이루던 하천자갈과 하천모래는 점차 고갈되어 산림골재, 바다골재의 사용량이 급격히 증가하고 있다. 특히 암석을 채취하여 크기에 따라 파쇄한 쇄석(부순돌) 및 쇄사(부순모래)가 하천 자갈과 하천모래의 대체골재로 개발이 활발해지고 있다. 국내 레미콘업체에서 사용하는 골재용 암석은 화강암, 현무암, 안산암, 석회암, 각섬암의 순으로 활용되고 있지만, 골재에 대한 공학적인 특성 연구는 미흡한 실정이다. 골재의 활용도 제고를 위해서는 암종에 따른 골재의 특성을 파악하고 보다 적합한 용도로 활용하는 방안이 강구되어야 할 것이다. 이에 여기에서는 골재원석으로 가장 많이 활용되는 화강암류에 대하여 암석학적 특성과 내구성을 파악하고 상호 관련성을 고찰하여 내구성을 지시할 수 있는 물성을 유추하여 보았다.

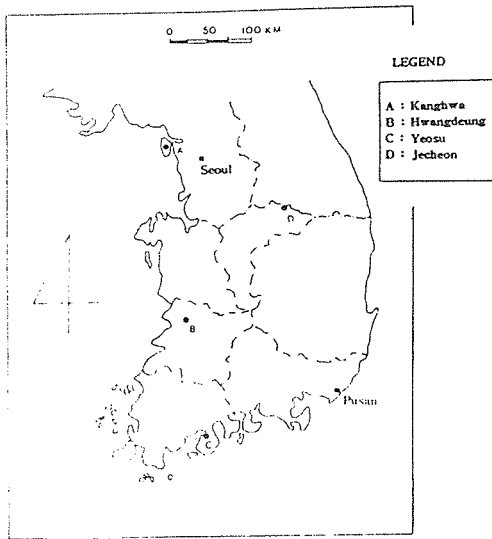
화강암류는 주요한 석재자원으로서 강도와 내구성이 우수하여 건축, 토목, 조각 및 공예품 재료로 광범위하게 이용되고 있어 국내 화강암류 석재자원에 대한 물리적, 역학적 제반 특성 등 공학적인 조사, 연구가 활발히 진행되어 왔다(대한광업진흥공사, 1989; 한국동력자원연구소, 1986). 지금까지의 연구 동향은 암석역학 분야로 압축강도와 탄성계수비에 의해 Deere & Miller(1966)가 공학적인 분류방법을 제안한 바 있고 풍화에 관해서는 기재적 특징과 물성변화 특징에 의한 지질공학적 풍화도 분류가 보고된 바 있다(Irfan & Dearman, 1978; 김형식 등, 1978; Lee & De Freitas, 1989). 이와 함께 풍화도에 따른 화학조성의 변화 등 암석학적 연구가 수행된 바 있다(Parker, 1970; Ruxton, 1968; 김태윤, 김명균, 1992). 또한 석재의 품질을 평가하기 위한 풍화도 분류가 제안되었다(이부경 1990). 외국의 경우, 석재 문화재나 예술품의 풍화 및 보존에 관한 연구가 상당히 이루어졌다(Winkler, 1975; Amoroso and Fassina, 1983).

본 연구에서는 골재 원석으로 활용되는 화강

암류의 내구성을 지시하는 암석학적 특성을 파악하기 위하여, 국내 일부지역의 화강암류를 시료로 하여 암석기재 및 화학분석과 비중, 흡수율, 쇼아경도, 탄성파속도, 일축압축강도, 인장강도 등의 기초물성시험을 실시하여 상호관계를 고찰하여, 내동결성 판단을 위한 동결-융해 시험과 내산저항성을 추정하기 위한 산침수시험을 실시하여 물성시험과의 관련성을 고찰하였다.

2. 시료 및 암석 기재

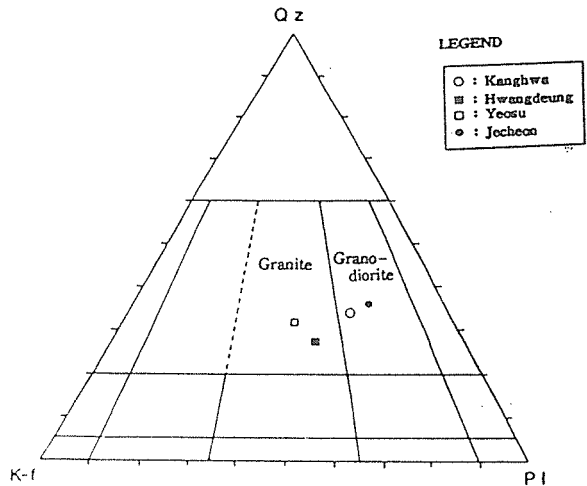
시험에 사용된 화강암류 시료는 제천, 강화, 여수 및 황등지역에서 석재로 채취된 암석을 사용하였다(Fig. 1).



〈Fig. 1〉 Sampling site of building stones.

이들 시료에 대해 박편을 제작하여 편광현미경 하에서 관찰하였고, 이를 Streckeisen-(1976)의 modal Quartz - K- Feldspar - Plagioclase(QAP) 삼각도에 도시하였다(Fig. 2). 그 결과를 보면 황등화강암과 여수화강암은 화강암 영역에 도시되고 제천화강암과 강화화강암은 화강섬록암으로 분류된다. 제천화강암은

흑운모 화강암으로서 등립상을 보이고, 회백색이며 2-3mm의 중립질로 장석류가 석영과 비슷한 비율로 들어 있고 현미경 관찰에서 약간 변질되었음을 알 수 있다. 황등화강암은 회색의 세립질 화강암으로 미르메카이트 조직을 보이기도 하고 결정들의 미세한 균열을 볼 수 있으며, 주성분은 석영, 사장석, K-장석, 흑운모 등이고 부성분으로 백운모, 저어콘 등이 분포한다. 강화화강암은 담회색 세립질 화강암으로 등립조직으로 석영과 장석이 1mm 이하로 존재한다. 여수화강암은 회색계 반상 화강암으로 중립질이고 1mm 정도의 스피를 관찰할 수 있으며 장석류가 다소 변질되고 있음이 보인다.



〈Fig. 2〉 Modal abundances of quartz, plagioclase and potassium feldspar for samples plotted with the IUGS classification scheme.

3. 실험방법

3-1. 화학분석

석재 시료의 화학분석을 하기 위하여 Jaw Crusher에서 1-3cm 정도의 암편으로 분쇄한 후 전량을 두껍고 넓은 종이위에서 약 1시간 동안 충분히 혼합한 후 사분법으로 나누어 적당량을 스테인레스 몰타르로 미분쇄 하였고 최종적

으로 Mixer Mill 을 사용하여 -200mesh 이하로 만들었다. 분석 대상 원소로는 주성분원소 10개로서 TiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, K₂O 및 P₂O₅는 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer)로 분석했으며, SiO₂, Fe₂O₃, FeO 및 Na₂O는 습식중량법으로 분석하였다.

3-2. 시편제작과 물리적 및 역학적 시험

시편은 각 시료의 신선한 암괴로부터 코아를 만들어 압축시험편은 직경과 길이의 비가 1 : 2로, 인장시험편은 직경과 길이의 비가 1 : 1-0.8이 되도록 원주형으로 제작하여 양면의 편평도를 ±0.03mm 이하로 정밀하게 연마하였다. 물성측정을 위해 각 화강암 시료를 압축시험과 압열인장시험을 위한 시편을 제작하여 겉보기비중, 공극율, 흡수율, 쇼아경도, 압축강도, 탄성계수, 압열인장강도, Los Angeles마모도, 탄성파속도를 측정하였다.

3-3. 내동결성 시험

내동결성 시험은 온도 변화에 대한 화강암류의 저항성을 측정하기 위하여 실시되었고, 수분으로 포화된 암석을 급속히 얼릴 경우 암석 내부 공극, 균열 등에 포획된 수분이 동결되어 썩기효과가 발생하고, 미동결수분은 균열 선단에 가하게 된다. 동결-융해가 반복됨에 따라 인장균열의 전파, 성장 등 국부적으로 기계적 풍화가 진행되리라고 예상되어진다. 본 시험에서는 수분으로 포화된 시편을 -25℃에서 3시간 동결 후 상온의 물에 3시간 침수시켜 녹이는 과정을 반복한 후 흡수율, 탄성파속도, 쇼아경도, 압열인장강도 등의 물성을 측정하였다.

3.4 내산저항성 시험

CO₂, 황화물 등이 용해된 대기, 강수, 하천수 등은 산성을 띠게 되고 시공된 암석이 이들

을 지속적으로 접촉할 경우 치환력이 강한 수소이온에 의하여 암석내 불안정광물이 용해되어 화학적 풍화가 진행된다. 본 실험에서는 시편을 1% 황산 용액에 침수시켜 매일 새로운 용액으로 교환해 주며 20일 경과 후, 흡수율, 쇼아경도, 탄성파속도, 압열인장강도 등의 물성을 측정하여 그 변화를 고찰하였다. 실험에 사용된 1% 황산용액은 pH가 1.6정도로서 최근 강수의 pH가 대도시나 공업단지 주변에서 4-5에 이르고 있는 점을 고려하여 결정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 화학조성

사용된 화강암 시료에 대한 주성분원소의 평균 함량치는 Table 1과 같다. SiO₂ 성분을 보면 화강암류 시료는 전반적으로 낮은 함량의 범위이고 여수화강암이 54.4%로 아주 낮다. 일반적으로 암석의 풍화가 심할수록 상대적인 Al₂O₃의 함량이 증가하는 경향을 보이는데(문희수, 김신애, 1989) 본 화강암류 시료에서 Al₂O₃ 함량이 높게 나타남은 장식의 풍화와 관련되어 있음을 시사한다. 이와 관련하여 CaO, Na₂O, K₂O의 상대적인 함량은 감소한다.

규산염 암석의 풍화지수(Weathering Index)를 절대수치로 환산 표시하기 위하여 사용한 Parker 공식(Parker, 1970)은 다음과 같다.

$$\text{풍화도} = \left[\frac{(\text{Na})_a}{0.35} + \frac{(\text{Mg})_a}{0.9} + \frac{(\text{K})_a}{0.25} + \frac{(\text{Ca})_a}{0.7} \right] * 100$$

위 공식에 대입해야 할 4개의 요소를 화학분석치로부터 환산하여 이에 의해 풍화지수를 계산해 보면 강화화강암(68.8) > 황등화강암(67.6) > 제천화강암(66.9) > 여수화강암(62.5)의 순으로 그 값이 낮아진다. Parker에 의하면 거의 풍화 변질을 받지 않은 신선한 화강암인 경우는 80이상의 값을 갖고, 풍화 변질이 심화

되어 육안으로 식별이 용이한 풍화된 화강암은 30이하를 나타낸다고 한다. 화강암은 평균치인 75보다 낮으므로 약간의 풍화를 받았다고 볼 수 있으며 그 중 여수화강암이 다른 화강암류에 비해 상대적으로 풍화되었음을 알 수 있다.

<Table 1> Analytical data of major element in samples(Unit:Wt. %).

| SAMPLE # | Kanghwa | Hwangdeung | Jecheon | Yeosu |
|--------------------------------|---------|------------|---------|--------|
| SiO ₂ | 70.00 | 69.70 | 65.60 | 54.35 |
| TiO ₂ | 0.21 | 0.40 | 0.67 | 0.99 |
| Al ₂ O ₃ | 17.30 | 16.90 | 17.30 | 19.73 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.79 | 0.68 | 1.78 | 3.83 |
| FeO | 1.12 | 2.25 | 2.73 | 5.87 |
| MgO | 0.30 | 0.30 | 0.90 | 0.97 |
| CaO | 2.20 | 3.10 | 4.90 | 8.38 |
| Na ₂ O | 3.52 | 3.44 | 3.24 | 3.16 |
| K ₂ O | 3.52 | 3.20 | 2.60 | 1.10 |
| P ₂ O ₅ | 0.08 | 0.12 | 0.17 | 0.22 |
| Ig-loss | 0.60 | 0.30 | 0.60 | 1.84 |
| Total | 99.64 | 100.39 | 100.49 | 100.44 |

4-2. 물성시험

각 화강암류 시료의 비중, 흡수율, 쇼아경도, 탄성파속도, 압열인장강도를 측정 한 결과가 Table 2에 나타나 있다. 화강암들의 비중을 보면 그 값의 범위가 2.6-2.8로서 화강암 범위에 해당된다.

Table 3은 ASTM(1985), Lee & De Freitas(1989), Irfan & Deerman(1978)이 제안하고 있는 암석의 풍화도에 관한 분류료를 요약한 것이다.

본 연구 대상의 화강암류 시료들에서 압축강도, 비중의 경우 전반적으로 신선암의 수준을 나타내고 있으며, 흡수율과 공극율 역시 양호한

것으로 판단된다. 그러나 황등화강암의 경우에 있어서는 P파의 속도가 낮게 나타나 일부 풍화의 영향이 있는 것으로 볼 수 있으며 이는 압축강도가 나머지 화강암류에 비해서 낮게 나타나는 경향과 일치하고 있다.

전체적 값을 보면 공극율이 높으면 인장강도가 낮고 공극율이 낮으면 인장강도가 높게 나타나는데 이는 암석 내에 공극이 클 수록 강도의 저하를 가져온다고 생각할 수 있다. 특히, 세립질 암석인 강화화강암과 상주화강암에서 이러한 경향이 잘 보인다. Fe를 함유한 광물이 함량이 많으면 화학분석에서 Ig-loss가 적은 경향을 보이고 압축 강도가 높으면 쇼아경도도 높은 값을 갖는다.

물성에 의한 풍화도를 보면 흡수율과 공극율

<Table 2> Physical properties of samples.

| | Kanghwa | Hwangdeung | Jecheon | Yeosu |
|----------------------|---------|------------|---------|--------|
| P-wave(m/sec) | 4600 | 3230 | 3650 | 3470 |
| Shore Hardness | 101 | 98 | 97 | 92 |
| Porosity(%) | 1.29 | 0.78 | 0.82 | 1.02 |
| Specific Gravity | 2.60 | 2.65 | 2.69 | 2.80 |
| Absorption(%) | 0.49 | 0.30 | 0.30 | 0.37 |
| Compressive(MPa) | 158.00 | 125.00 | 142.00 | 162.00 |
| Tensile(MPa) | 7.74 | 6.04 | 8.85 | 11.04 |
| Young's modulus(GPa) | 47.90 | 39.90 | 59.24 | 67.10 |
| Abrasion(%) | 16.31 | 41.74 | 27.80 | 13.11 |

(1MPa=10.20kgf/cm², 1GPa=1000 * 1MPa)

<Table 3> Summary of physical properties grouped by degree of weathering.

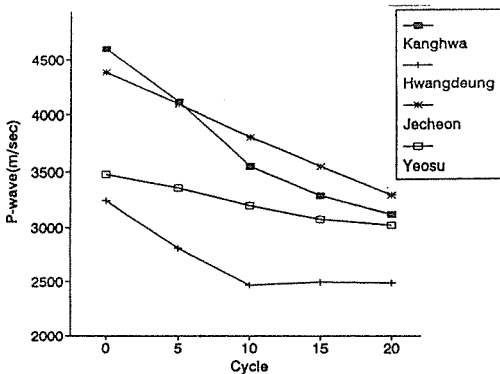
| | Fresh(F) | Slightly Weathered(SW) | Moderately Weathered(MW) |
|------------------|-------------|------------------------|--------------------------|
| Absorption(%) | 0.359-0.445 | 0.484-1.186 | 1.430-1.672 |
| Porosity(%) | 0.920-1.122 | 1.245-3.077 | 3.554-4.043 |
| Specific gravity | 2.536-2.650 | 2.437-2.735 | 2.396-2.667 |
| P-wave(m/sec) | 4814-5315 | 3267-5333 | 2307-3114 |
| Compressive(MPa) | 125-260 | 100-170 | 60-120 |

은 강화화강암이 약간 풍화된 영역에 속하고 나머지 화강암류들은 신선한 것으로 분류된다. 강도에 의한 분류는 모두 신선한 영역에 분포한다.

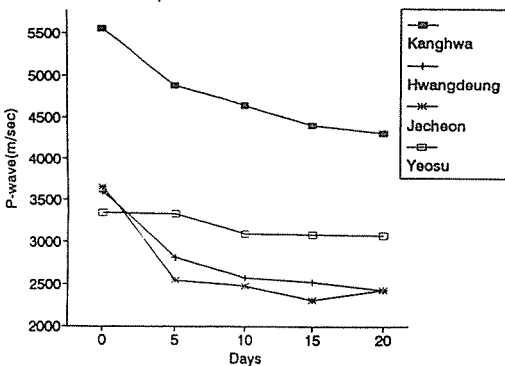
4-3. 동결-융해 시험

동결-융해를 동일 시험편에 대해 20회씩 실시한 결과, 여수화강암이 중량 손실이 가장 높고, 가장 낮은 탄성파속도의 감소율을 나타냈다. 쇼야경도가 전체적으로 감소함을 보이고 여수화강암의 흡수율이 증가함을 보였다. 변화하는 물성 중 가장 뚜렷한 감소를 갖는 요소는 탄성과 속도와 중량 감소이고 세립질 화강암에서 쇼야경도의 감소가 적다(Fig. 3)

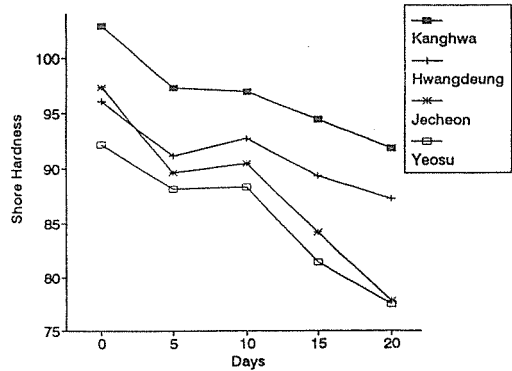
4-4. 산침수 시험



〈Fig. 3〉 Plot of P-wave for freeze-thawing samples.



〈Fig. 4〉 Plot of P-wave for acid immersion samples.

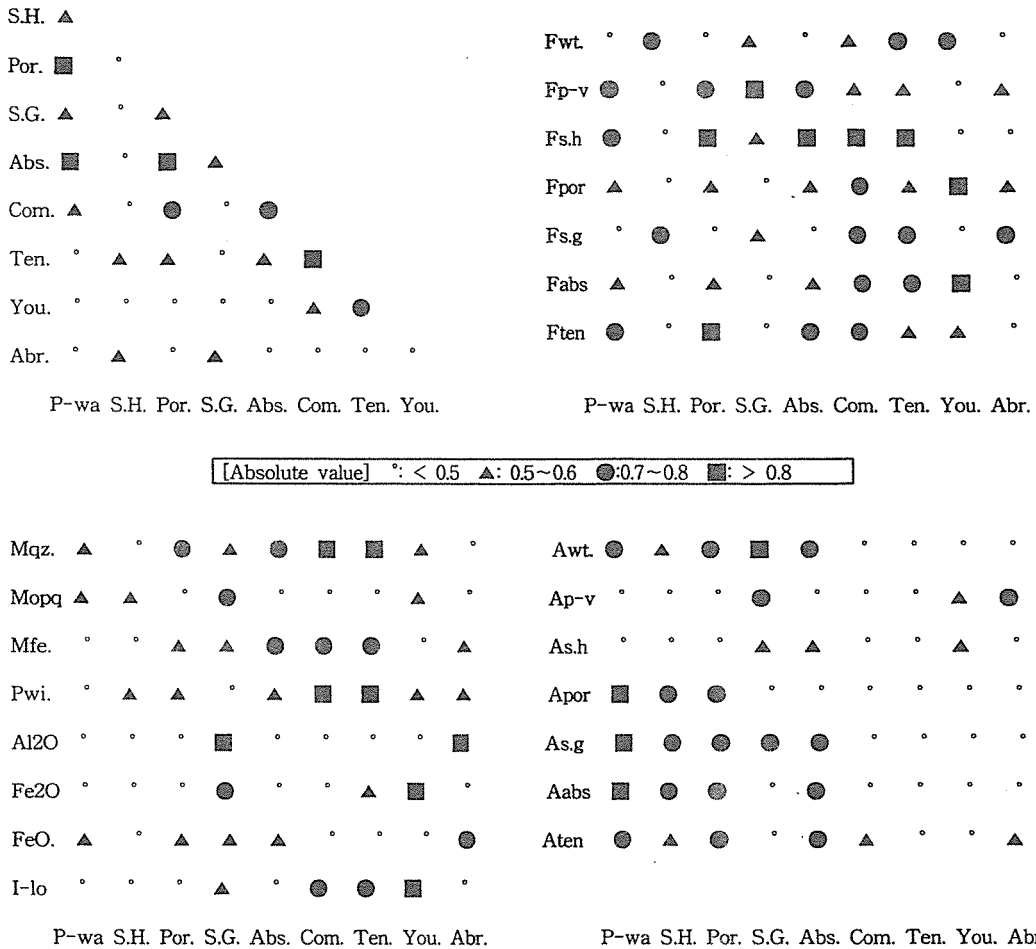


〈Fig. 5〉 Plot of Shore Hardness for acid immersion samples.

20일간 산침수 후 측정된 결과를 보면 강화화강암이 적은 중량 손실을 보이고 여수화강암과 상주화강암이 아주 낮은 감소를 보인다. 산침수 시간이 경과함에 따른 물성의 변화를 보면 탄성파와 쇼야경도가 감소를 하고 있다(Fig. 4, 5). 겉보기 공극율이 증가하면 강도가 감소하는 경향이 있다. 세립질 일수록 질량의 감소가 적은 경향을 보인다.

4-5. 제반 특성과의 상호 관계성

화강암류에 특성간의 상관계수를 구하여 보면 탄성파속도와 공극율, 흡수율이 0.8이상의 상관관계를 갖고 있으며, 이는 탄성과 속도로서 비교적 용이하게 화강암류의 내구성을 가늠할 수 있을 것으로 판단된다. 석영의 함량과 강도, 탄성계수와 Ig-loss가 높은 상관성을 가지고 있다. 내동결성 시험에 대해 Al₂O₃의 함량이 많을수록 풍화가 많이 일어날 수 있고, FeO의 함량이 많을수록 화강암류가 변질 받을 가능성이 높다. 또한, 내동결성 시험의 쇼야경도와 석영의 함량, 공극율, 강도 등이 높은 상관관계를 갖고, 내동결성시험의 압열인장강도와 공극율 그리고, 내산저항성시험에서 탄성파속도와 겉보기비중, 공극율등이 상관성이 높은 것으로 나타났다(Fig. 6). 내산저항성 시험에 대해 산이 강도에는 영향을 미치지 못 함을 알 수 있고, 불



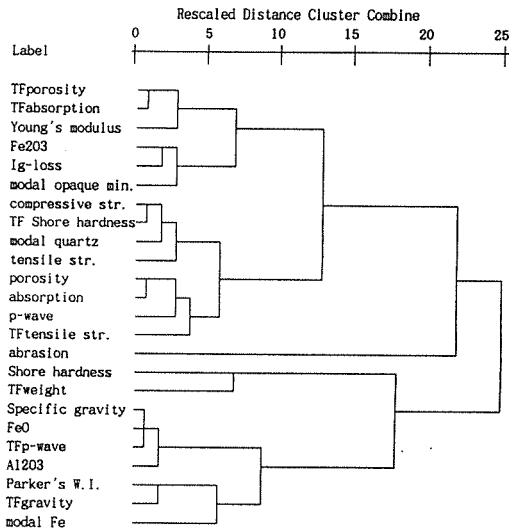
(Fig. 6) Absolute correlation charts between variable characteristics in granitic building stones.

(P-wa:p-wave, S.H.:Shore hardness, Por.:porosity, S.G.:specific gravity, Abs.:absorption, Com.:compressive strength, Ten.:tensile strength, You.:Young's modulus, Abr.:abrasion, Mqz.:Modal Quartz, Mopq:Modal opaque mineral, Mfe:Modal Fe, Pwi.:parker's Weathering Index, Al2O:Al2O3, Fe2O:Fe2O3, I-lo:Ig-loss, Fwt.:Freeze-Thaw weight, Fp-v:F.T.p-wave, Fs.h:F.T.Shore hardness, Fpor:F.T.porosity, Fs.g:F.T.specific gravity, Fabs:F.T.absorption, Ften:F.T.tensile strength, Awt.:Acid Immersion weight, Ap-v:A.I.p-wave, As.h:A.I.Shore hardness, Apor:A.I.porosity, As.g:A.I.specific gravity, Aabs:A.I.absorption, Aten:A.I.tensile strength)

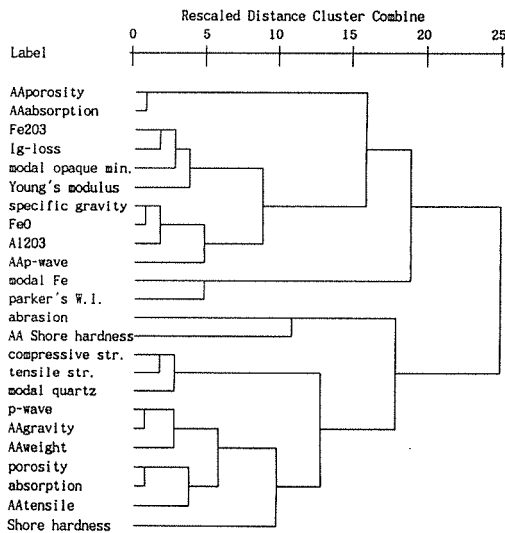
투명광물이 많을 수록 변질 받을 가능성이 크다. 내구성 시험에서 비중과 석재의 중량 손실과 밀접한 관계를 가지고 있고, 석영의 함량이 많으면 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

상관관계로부터 얻어진 상관계수를 이용하여 R형 군집분석을 하였다. 군집화 방법으로는 기

준결합방식(Average linkage method)을 선택하였다. 군집분석 결과 구한 dendrogram은 Fig. 7,8과 같다. 각 집단 간의 연관성을 이용해 물성, 화학성분들과 내구성의 군집성을 보면 화강암류의 경우 1) 압축 강도 - 석영 함량 - 압열인장강도, 2)탄성계수 - 불투명광물 함량 -



(Fig. 7) Dendrogram showing the correlated groups of multi-variables in freeze-thaw test. (TF:thawfreeze, str.:strength, min.:mineral, W.I.:weathering index)



(Fig. 8) Dendrogram showing the correlated groups of multi-variables in acid immersion test. (AA:acid immersion, str.:strength, min.:mineral, W.I.:weathering index)

Ig-loss - Fe₂O₃, 3) 결보기비중 - FeO - Al₂O₃ - 내구성 시험의 탄성파속도 감소율 4) 공극율 - 흡수율 - 내구성 시험의 압열인장강도 등이 높은 관련성을 갖는 군집으로 묶이고 있다. 군집들을 보면 석영의 함량이 강도에 많은 영향을 미치고 있음으로 판단되고 내구성의 중요 변수라고 생각되어지는 흡수율과 공극율이 내구성 시험의 압열인장강도와 같은 군집으로 나타났다. 또한, 이것과 더불어 탄성파속도가 석재의 내부 균열 정도나 공극상태를 확인하기 위한 유용한 물성이라 판단되어진다.

5. 결론

본 연구는 화강암류의 내구성을 판단하기 위하여 각 석재들의 물성치를 측정하고 암석의 초기상태와 내동결성 시험과 내산저항성 시험을 통하여 물성치들의 변화를 관찰함으로써 향후 내구성이 좋은 골재원석을 개발하는데 활용하며 다양한 용도의 골재개발을 위한 특성을 파악할 수 있는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 암석학적인 분석으로 황동화강암과 여수석이 화강화강암 영역에 들어가고 강화화강암, 제천화강암은 화강섬록암에 도시되어졌다. Parker의 풍화지수 계산에 의해 여수화강암이 비교적 풍화된 암석으로 분류되었다.

(2) 내구성시험 결과 탄성파속도와 쇼아경도가 감소하는 경향을 보였고 일부 시료에서 흡수율이 증가하는 경향이 있었다. 시료로 사용한 화강암류 중에서 제천화강암, 마천화강암, 상주화강암이 내동결시험과 내산저항성시험에 대해 질량 손실, 흡수율 및 강도 저하가 적은 것으로 나타났다.

(3) 화강암류의 특성들에 대한 상관분석 결과 탄성파속도와 흡수율, 공극율이 높은 상관성을 가지고 있다. 이는 탄성파속도로서 비교적 용이하게 암석의 내구성을 가늠할 수 있을 것으로

판단되고 석영의 함량이 강도에 영향을 준다. 그리고 내동결성 시험에 대해 Al_2O_3 의 함량이 많을수록 풍화가 많이 일어날 수 있고, FeO 의 함량이 많을수록 암석이 변질받을 가능성이 높다.

(4) 화강암류의 군집분석에서는 암석의 내구성에 중요변수인 흡수율과 공극율에 대해 내동결성 시험과 내산저항성 시험의 압열인장강도 감소율과 관련이 높은 군집으로 나타나고 있는데 비교적 제작과 측정이 용이한 압열인장강도도 탄성파속도와 같이 측정하면 내구성 판단에 유용할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. America Society for Testing and Maaterials, 1985, "Standard Specifications for Granite Building Stone"
2. Amoroso G.G. and Fassina, V., 1983, Stone decay and conservation. Nether-lands, Amsterdam: Elsevier Publishing, 453p.
3. Davis, J.C., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology (2nded.): Singapore, John Wiley & Sons, 646p.
4. Deere, D.U. and Miller, R.P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rocks: Technical Report No. AFLTR-65-116, Air Force Weapon's Laboratory, New Mexico, 308p.
5. 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, 17, 79-90.
6. Lee, S.G. and De Freitas, M.H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea: Quarterly Journal of Engineering Geology, 22, 31-48.
7. Parker, T.W., 1970, An Index of Weathering for Silicate Rocks: Geological Magazine, 107, 501-504.
8. Ruxton, B.P., 1968, Measures of the degree of chemical weathering of rocks: Journal of Geology, 76(5), 518-527.
9. Streckeisen, A.L., 1976, To each plutonic rocks and its proper name: Earth Science Review, 12, 1-34.
10. Winkler, E.M., 1975, Stone Properties, Durability in Mans' s Environment: New York, Springer-Verlag, 230p.
11. 강승철, 1985, 풍화된 화강암의 물리적, 암석학적 및 지구화학적 특성에 관한 연구: 서울대 공학석사학위논문, 71p
12. 김태운, 김명균, 1992, 국내산 화강암류 석재의 물리적 및 지구화학적 특성에 관한 연구: 한국자원공학회지, 29(5), 287-298.
13. 김형식, 임병조, 정명현, 1978, 화강암 질암류의 압축강도와 그 입도 및 광물성분과의 관계에 관한 연구: 지질학회지, 14(4), 175-185.
14. 대한광업진흥공사, 1989, 석재자원 특성 조사 보고: 제1호, 285p.
15. 문희수, 김신애, 1989, 강화도 온수리 지역 화강암의 풍화작용에 의한 카올리나이트의 형성: 광산지질학회지, 22(1), 65-80.
16. 이부경, 1990, 한국산 화강암류 석재의 내구성과 관련된 지시물성의 특성연구: 상지대 논문집, 11, 339-354.
17. 한국동력자원연구소, 1986, 화강암류 석재자원 조사연구: 46-194.