

최 종
연구보고서

척박지 식생복원을 위한 골재 부산물 용토재
활용 기술 개발에 관한 연구

Development of soil material using aggregate
byproducts for revegetation of barren land

연구 기관

강원대학교

농림수산식품자료실



0014064

농림수산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “척박지 식생복원을 위한 골재 부산물 용토재 활용 기술 개발에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008 년 4 월 24 일

주관연구기관명 : 강원대학교

총괄연구책임자 : 정 영 상

연 구 원 : 김계훈, 김동욱, 김보연, 김수용, 김영남, 김진복, 김진수,
김학민, 김혁수, 김호진, 박상후, 설유정, 심규섭, 양수찬,
엄숙현, 이기철, 이재황, 이준수, 정승일, 정중환, 홍성준.

요 약 문

I. 제 목

척박지 식생복원을 위한 골재 부산물 용토재 활용 기술 개발에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

골재부산물은 골재를 생산할 때 필연적으로 발생하는 무기성 폐기물로서 연간 80 ~ 100만m³씩 발생하고 있다. 현행법상 골재부산물은 폐기물로 분류되어 있으나 적절한 개량을 통해 재활용할 수 있는 훌륭한 자원이다. 이에 본 과제는 골재 부산물을 농업용 용토재와 환경복원용 녹화 토양재로 재활용하는 기술을 개발하여 골재생산업체의 애로사항해결에 일조하고 객토재의 부족으로 어려움을 겪는 농촌의 객토자원을 확보함과 동시에 이를 이용한 신녹화공법을 개발하고자 하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

이와 같은 목표에 도달하기 위해 우선 전국 21개 골재업체로부터 골재부산물을 수집하여 물리성, 화학성, 광물학적 조성에 대해 분석하였고, 골재부산물의 용토재로서의 재활용을 위해 마사토, 코코피트, 피트모스, 퇴비, 인산석고 등을 이용하여 물성 개량 효과를 정량하였으며, 상추, 배추, 국화, 참외를 대상으로 작물 생육 평가를 하였고, pot 상토, 하우스 객토재, 노지 객토재로의 적용성을 평가하였다. 비탈면 녹화용 토양재로 활용하기 위해 개량된 골재부산물을 이용해 2차에 걸친 모의경사시험구 시험과 전라북도 순창과 남양주 수동의 도로건설현장에서 2차에 걸친 현장시험시공 및 사후 토양과 식생변화에 대한 모니터링을 통한 평가 활동을 수행하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

3년간의 연구를 통해 골재부산물을 농업용, 조경용, 환경복원용 토양재료로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 물론 작물의 생산성을 높이기 위해서는 식물 영양학적인 접근이 요구되며, 적절한 시비조건을 제시한다면 더욱 효과적인 용토재로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 경제성 측면에서 볼 때, 골재부산물은 비록 폐기물로 분류되어 있지만 자발적으로 비용을 지불하면서까지 처분하는 것은 현실적으로 어려운 특성이 있다. 또한 일정지역을 벗어나게 되면 운송비용 때문에 경제성이 현격히 떨어지게 된다.

따라서 골재부산물을 용토재의 경제적인 개발을 위해서는 농업용과 산업용을 분리해서 전략을 수립해야 한다는 것이 현재의 판단이다.

우선 농업용 토양재료로의 활용은 골재업체 주변의 농가에서 안정적으로 사용할 수 있는 가이드라인의 제시가 중요하다고 판단된다. 즉 중간 가공 단계를 거치지 않고 골재업체 주변 농가가 직접 골재부산물을 분양받아 하우스나 밭 등의 객토재로 활용하는데, 이 때 경작지의 물리성을 저하시키지 않도록 섞여 들어야 할 퇴비와 마사의 양에 대한 기준의 제시 등을 가정할 수 있을 것이다. 본 연구의 결과 골재부산물과 마사 및 퇴비 등의 부가재료가 50대50으로 혼합될 때 상추, 국화, 배추 등의 생육 성적이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그리고 퇴비만을 단독으로 50대50으로 섞어 사용하는 것도 추천할 수 있는 방법이었다. 참외 하우스 시험에서와 같이 3~4년 주기로 골재부산물로 하우스 토양을 객토하되 비료관리를 적절히 해 주는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 골재생산업체와 농민의 이익을 모두 만족시키는 방법으로는 이와 같은 방법들이 최선일 것으로 판단된다.

하지만 비탈면 녹화복원사업과 같은 부가가치가 발생하는 산업으로의 활용에서는 용토재료의 가공이 필수적이기 때문에 농업과는 기본적으로 접근 방법이 다르다고 볼 수 있다. 현재 골재부산물을 원료로 가공 처리를 하는 상토 공장은 없는 실정이어서 설비 등의 기반 사항이 준비되지 않은 상태에서 골재부산물 용토재 생산의 경제성을 분석하기는 어려우나, 골재업체가 집결되어 있는 곳에 생산 공장과 적합한 설비를 갖추고 골재부산물과 유무기 자재를 50대50으로 혼합하거나 기존의 녹생토의 25%에 해당하는 양을 골재부산물로 섞어 준다면 사업성이 있을 것으로 사료된다.

현재의 결과는 개량을 통해 골재부산물을 농업용 용토재와 비탈면 녹화용 토양 재료 적용할 수 있으며, 이렇게 사용된 골재부산물이 기존의 재료에 비해 뒤쳐지지 않는 효과를 볼 수 있다는 것이다. 하지만 골재부산물 용토재의 효과를 더욱 증폭시켜 재활용을 활성화하기 위해서는 시비처방에 대한 면밀한 후속 연구가 필요하며, 경제적인 재료 생산을 위해 골재생산업체 특히 각 지방의 골재협회와의 긴밀한 협조 하에 골재부산물을 개량하여 제품화할 수 있는 생산 기지가 마련되어야 한다. 또한 지방 농업기술센터는 지역의 주요 작물에 대한 골재부산물 처리 및 사용 방법에 대한 구체적인 연구 활동을 통해 농가에 효율적으로 보급될 수 있도록 지원해야 할 것이다.

SUMMARY

1. Title

Development of soil material using aggregate byproducts for revegetation of barren land

2. Objectives and Necessities

Aggregate byproduct is one of the industrial waste in the process of aggregate production, of which annual amount is up to 1,000,000m³. Since aggregate byproduct is classified as waste material under the Korean environmental regulation, recycling is limited as properly improved material. This study was to develop soil materials for agricultural soil amendment and slope revegetation using byproduct aggregates from quarries. The research result might contribute to activities for solving waste disposal problem of aggregate production companies, to use as appropriate soil amendment material for farmers and constructors for slope revegetation technology.

3. Results

According to preliminary survey on aggregate byproduct production companies, the 21 companies were selected to take aggregate samples. The physical, chemical and mineralogical properties of byproduct aggregates were analyzed. Mixing ratio of the organic and inorganic amendment treatments were designed to improve byproduct aggregate properties, and the growth of crops including lettuce, chinese cabbage, oriental melon and chrysanthemum were examined. Finally the preliminary tests using the specially designed slope runoff plots were performed followed by the field feasibility pilot tests.

Analysis of the byproduct aggregate showed that these materials were composed mainly of fine sand and silt particles. Due to poor physical and chemical properties, these aggregate material could not be used as soil materials for slope revegetation without pre-treatment. Among various improvement trials, the byproduct aggregates mixed with 10% compost, 10% cocopeat, 10% peatmoss, 10% coarse sand and 10% phosphogypsum by volume showed the satisfactory growth of the tested plants.

Lettuce and chrysanthemum grew satisfactorily under the amendment treatment composed of 50% aggregate byproduct and 50% compost in volume basis. Chinese cabbage cultivated in upland showed relatively sound growth in comparison with conventional soil condition when aggregate byproduct soil mixture was applied in the ratio of 0.5ML/ha. Through the oriental melon green house test, it was recommended the proper period of soil amendment using aggregate byproduct is 3 or 4 year.

The slope runoff plot test showed that the soil materials designed were appropriate as revegetation media. The survival and growth of the initial input plant seeds on the designed soil materials were better than those of Noksaengto. The soil hardness on the designed soil materials was more favorable for plant root growth.

The pH of these soil materials ranged from 6.36 to 6.57. The organic matter, total nitrogen and available phosphorus content were proper to plant growth. These materials, however, were high susceptibility to surface erosion, resulted from fine particle size and low stickiness, which demanded high mixing ratio of organic material.

The first field feasibility test confirmed the results of the slope runoff plot test. As the preliminary test, the byproduct aggregate soil materials provided better conditions for plant growth resulting in higher biodiversity of plants and the visual coverage of vegetation compared to those of Noksaengto. The erosion susceptibility of these soils could be overcome by adopting the hydro-seeding measure.

To enhance cost efficiency, byproduct aggregate soil materials were mixture

with Noksaengto and cocopeat. As the proportion of byproduct aggregates increased, the EC, ammonium and nitrate nitrogen concentration, and available phosphorus content decreased slightly, whereas the installation efficiency increased and the installation time was close to Noksaengto.

In conclusion, aggregate byproduct could be used as soil material for the agricultural soil amendment and the slope revegetation in sloped barren lands with proper improvement of physical and chemical properties.

4. Recommendation

To stimulate recycling aggregate byproduct as an alternative artificial soil material, these material should be allowed to be used with proper improvement of physical and chemical properties. Technical, economical and resource management supports might be necessary to boost recycling these material.

CONTENTS

Summary	5
Contents	8
Chapter 1. Outline of the research and development	14
Section 1. Objectives of research	14
Section 2. Necessities of research	14
1. Technical scope	14
2. Economical and industrial scope	15
3. Environmental scope	16
4. Social and cultural scope	17
Chapter 2. Status of research and development in Korea and abroad	18
Section 1. Aggregate by product production	18
Section 2. Recycling of aggregate byproducts	22
Section 3. Revegetation technology of sloped lands	25
Chapter 3. Contents and products of the research and development	29
Section 1. Material and methods	29
1. Sampling	29
2. Analysis	32
A. Physical properties	32
B. Chemical properties	34
C. Mineralogical compositions	34
3. Physical properties of aggregate byproducts	35
4. Chemical properties of aggregate byproducts	41
5. Mineralogical properties of aggregate byproducts	45
Section 2. Amendment of aggregate byproducts for soil material	59

1. Amendment design.....	59
2. Effect of amendment treatment with organic and inorganic materials on aggregate byproduct as soil material.....	60
A. Effect on physical properties.....	60
B. Effect on chemical properties.....	66
C. Increased properties as the artificial soil material.....	72
Section 3. Sloped plot test for revegetation	75
1. Slope plot design.....	75
A. 1st slope plots.....	75
B. 2nd slope plots.....	78
2. Preliminary sloped plot test.....	81
A. Revegetation possibility of aggregate byproduct soil material.....	81
B. Characteristics as soil material.....	85
C. Permeability and percolation of the material	90
Section 4. Field feasibility test.....	101
1. 1st field feasibility test site preparation.....	101
2. 1st field feasibility test site monitoring.....	107
A. Soil characteristics.....	107
B. Vegetation coverage.....	109
3. 2nd field feasibility test site preparation.....	116
4. 2nd field feasibility test site monitoring.....	122
5. Problems of aggregate byproducts as soil material and solutions...	123
6. Economic feasibility of aggregate byproducts as soil material for revegetation of sloped barren lands.....	124
A. Revegetation technology.....	124
B. Economic feasibility evaluation.....	125
Section 5. Aggregate byproducts as soil material for agricultural use...	137
1. Approach to use of aggregate byproducts as artificial soil material.....	137
2. Application of Aggregate byproducts as the bed soil.....	138
A. Experimental design.....	138

B. Growth of lettuce and chrysanthemum.....	139
C. Results of second growth test.....	142
3. Use of aggregate byproduct as alternative soil amendment material for oriental melon in a plastic film house.....	143
A. Design of experiment.....	143
B. Soil characteristics.....	144
C. Oriental Melon production.....	147
4. Upland amendment mentoring for chinese cabbage farm.....	149
5. Farm experiment design.....	155
A. Plot design.....	155
B. Soil characteristics	156
C. Soil characteristic after farm test.....	157
D. Plant growth.....	158
Section 6. Conclusions.....	161
● Appendix 1. The HRXRD of byproduct aggregates.....	162
● Appendix 2. X-ray diffractogram of aggregate by-product.....	183
● Appendix 3. TGA-DTA thermogram of aggregate by-product.....	183
● Appendix 4.The list of plant mentioned in this study.....	204
Chapter 4. Research goal achievement and contribution	208
Chapter 5. Plans for the application of the research and development	212
Chapter 6. Related abroad information obtained through the research and development	213
Chapter 7. References	214

목 차

요 약 문	2
목 차	11
제1장 연구개발과제의 개요	14
제1절 연구목적	14
제2절 연구개발의 필요성	14
1. 기술적 측면	14
2. 경제·산업적 측면	15
3. 환경적인 측면	16
4. 사회·문화적 측면	17
제2장 국내외 기술개발 현황	18
제1절 골재부산물 개요	18
제2절 골재부산물 재활용연구	22
제3절 비탈면 녹화기술	25
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	29
제1절 골재부산물 시료 채취 및 분석	29
1. 시료채취	29
2. 시료분석	32
가. 물리성 분석	32
나. 화학성 분석	34
다. 광물조성 분석	34
3. 골재부산물의 물리적 특성	35
4. 골재부산물의 화학적 특성	41
5. 골재부산물의 광물학적 특성	45

제2절 유·무기계 재료 투입이 골재부산물 토양재 특성에 미치는 효과.....	59
1. 골재부산물 개량 시험.....	59
2. 유·무기계 재료 투입이 골재부산물 토양재 특성에 미치는 효과.....	60
가. 물리적 특성에 미치는 영향.....	60
나. 화학적 특성에 미치는 영향.....	66
다. 골재부산물의 개량 효과 종합.....	72
제3절 비탈면 녹화재로의 적용성 검토를 위한 모의 시험.....	75
1. 모의경사시험구의 설치.....	75
가. 1차 모의경사시험구.....	75
나. 2차 모의경사시험구.....	78
2. 모의경사시험구를 이용한 사전 평가.....	81
가. 골재부산물 토양재의 녹화 특성.....	81
나. 골재부산물 토양재의 토양 특성.....	85
다. 골재부산물 토양재의 물 유출 특성.....	90
제4절 비탈면을 대상으로 한 현장검증.....	101
1. 1차 현장시험 시공지 조성.....	101
2. 1차 시험시공지 사후 모니터링 결과.....	107
가. 토양분석결과.....	107
나. 식생분석결과.....	109
3. 2차 현장시험 시공지 조성.....	116
4. 2차 시험시공지 사후 모니터링 결과.....	122
5. 골재부산물의 비탈면 녹화재로의 활용상의 문제점과 대책.....	123
6. 비탈면 녹화용 골재부산물 용토재의 경제성 고찰.....	124
가. 주요 비탈면 녹화공법.....	124
나. 골재부산물 용토재의 비탈면녹화용 토양재로서의 경제성 평가.....	125
제5절 골재부산물의 농업용 용토재로의 활용.....	137
1. 골재부산물의 농업용 용토재로의 활용을 위한 접근 방법.....	137
2. pot 상토로의 활용.....	138
가. 시험구 구성.....	138
나. 처리에 따른 국화와 상추의 생장량 비교.....	139
다. 2차 재배시험 결과.....	142

3. 참외 하우스 객토재로의 활용	143
가. 시험 개요	143
나. 골재부산물 처리 하우스 토양 특성	144
다. 참외 품질	147
4. 농가멘토링을 겸한 일반 배추밭 객토	149
5. 노지 pot 재배	155
가. 시험구 구성	155
나. 처리에 따른 토양 특성	156
다. 작물 재배 후의 토양 특성	157
라. 작물 성장량 분석	158
제6절 결론	161
● 부록1 (The HRXRD of byproduct aggregates)	162
● 부록2 (X-ray diffractogram of aggregate by-product)	163
● 부록3 (TGA-DTA thermogram of aggregate by-product)	163
● 부록4 (보고서에서 언급된 식물 사진 목록)	204
제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	208
제5장 연구개발결과의 활용계획	212
제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	213
제7장 참고문헌	214

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구목적

골재부산물은 골재를 생산할 때 필연적으로 발생하는 무기성 폐기물로서 연간 80 ~ 100만^m³ 발생하고 있다. 현행법상 골재부산물은 폐기물로 분류되어 있으나 적절한 개량을 통해 재활용할 수 있는 훌륭한 자원이다. 이에 본 과제는 골재부산물을 농업용 용토재와 환경복원용 녹화 토양재로 재활용하는 기술을 개발하여 골재생산업체의 애로사항해결에 일조하고 객토재의 부족으로 어려움을 겪는 농촌의 객토자원을 확보함과 동시에 이를 이용한 신녹화공법을 개발하고자 하였다.

제2절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

산업사회로 들어서면서 인류는 끊임없는 자원개발과 건설을 통해 주변 환경을 변화시키고 있다. 따라서 자갈과 모래와 같이 토목과 건축의 기본 골격을 이루는 재료인 골재는 건설시장규모의 성장과 함께 그 수요가 크게 증가하고 있다.

골재는 생산과정에서의 인위적인 분쇄 여부에 따라 자연골재와 인공골재로 나뉜다. 우리나라는 1980년대 이후 급속한 경제성장과 더불어 골재의 수요가 빠르게 증가되어 오고 있는 반면에 환경보존에 대한 시민들의 의식수준 또한 높아지고 있어 상대적으로 생태계 교란이 큰 하천이나 바다를 준설하여 자연골재를 채취하는 방법 보다는 석산에서 암석을 캐내 분쇄하여 인공골재를 생산하는 비중이 높아지고 있다. 이때 석산에서 생산되는 골재는 산림골재로 분류되며 최근 전체 골재생산량의 50%를 차지하고 있다(건설교통부 골재수급계획, 2006).

여타 산업과 마찬가지로 골재산업도 부산물을 배출하게 된다. 암석을 분쇄해서 자갈과 모래로 만드는 과정에 발생하는 미세한 입자가 그것이다. 석분 또는 석분토라 불리는 골재부산물은 그 입경이 0.075mm 이하이기 때문에 건설재료로 사

용할 수 없는 것으로 폐기물관리법에 의해 무기성 폐기물로 취급되며, 동법 시행규칙 제46조 제3항에서 골재부산물의 재활용 용도 및 방법에 대해 그리고 시행규칙 제8조에서 골재부산물의 보관에 대해 규제하고 있다.

연간 배출되는 골재부산물은 80~100만^m로 보고되고 있으며, 아직까지 재활용을 위한 뚜렷한 대책이 없어 대부분은 야적 또는 매립 등으로 처리되고 있다. 일례로 폐기물로서 매립 또는 야적되는 골재 생산 부산물 용토는 2000년 한해만 1,100만^m에 이를 것으로 추정되며, 일례로 강원도 속초에서 골재 파쇄 및 세척 공정 이후 발생하는 부산물 용토의 양이 하루 50~60톤 규모로 연간 13,200톤에 달하고 있다. 논이나 밭의 바닥에서 채취되는 대부분의 슬러지는 탈수 케익의 형태로 골재를 채취한 지역에 뒷채움으로 소비되고 있다. 하지만 골재부산물의 보관은 법률에 의해 90일 이내로 제한되기 때문에 골재생산업체에서는 신속하고 지속적으로 골재부산물을 소진할 수 있는 방안 마련에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이에 골재부산물을 아스팔트 재료, 경량골재, 벽돌 및 콘크리트 제품 등에 혼합재로 사용하기 적합한지에 대한 연구들이 보고되고 있으나 대규모의 재활용 기술이나 공법 개발은 미비한 상태이다.

따라서 석산 개발로 발생한 슬러지의 경우 대규모 침사지에 방치되고 있는 실정이어서, 슬러지의 용도개발은 새로운 부가가치의 창출에 기여할 수 있게 된다.

그러나 아직까지 우리나라에서 골재 부산물 용토의 용토로서의 가치가 평가된 바 없으며, 척박지 식재 지반 용토로 활용할 수 있는 기술이 개발된 바 없다. 이에 골재 생산 과정에서 발생하는 부산물의 용토로서의 가치를 평가하고 척박지에서 식생 복원을 위해 열악한 토양환경을 개선할 수 있는 소재로 활용할 수 있도록 이들 소재에 대한 식생 복원용 토양 조성물과 토양개량재 또는 농업용 용토재로의 적용 연구가 필요하다. 특히 이러한 소재를 실제로 현장에서 활용하기 위해서는 이들 소재들의 물성과 혼합비율 및 퇴비나 제지슬러지 등의 유기성 자재와의 혼합특성 등이 규명되어야 하며, 이러한 특성규명 과정으로부터 도출된 결과물은 식물의 건전한 성장과 관련된 여러 요인, 예를 들어 용적밀도, 공극률, 수리전도도, 토양강도, 수분특성, 양분 및 위해성 등을 충족할 수 있어야 한다.

2. 경제적 측면

우리나라의 농경지는 사질토가 많이 분포하며, 작물생산성을 높이기 위해 객토

제로서 산적토를 많이 이용하거나, 대체 객토제로 제오라이트나 벤토나이트를 사용(정등, 2005)하는데 이는 다른 객토제보다 비싸기 때문에 슬러지를 이용한다면 골재 업체는 처리비용 절감 효과와 농업인들에게 객토비용 절감 효과를 가져와 경제적 이익을 거둘 것으로 예상된다.

조경토는 대부분 산림토를 이용하게 되는데 산림토의 pH 범위는 5-5.5로 강한 산성을 띄어 산도 하자의 원인이 되기도 한다. 그리고 상토로도 마사토와 토양개량제가 이용된다. 따라서 산림토에 골재부산물과 부산물 인산 석고를 적절히 혼합하여 이용하고, 상토재료로 이용되고 있는 마사토 대신 골재부산물을 적절히 이용한다면 충분한 산업적 이용 가치가 있을 것으로 판단된다.

한편 농경지에서 객토 자원으로 마사토를 사용하고 있으며, 평창군의 고랭지 지역에서는 2~3년 주기로 ha당 2,200톤의 과다량을 사용한다(정등, 2006). 그리고 마사토는 상토재료로 배수와 통기성을 좋게하기 위해 이용하며, 척박지에서 식생 복원을 위한 지반 조성 용토로도 사용한다. 이로 인해 객토 자원이 크게 부족해지고 있다. 이에 따라, 일부 농민들은 골재 채취장에서 자갈을 채취하고 남은 부산물 용토를 이용하여 객토원으로 사용하기도 한다. 이 부산물 용토는 저니토에 가까우며, 고운 입자의 침전을 위해 응집제가 투입된 경우가 많아 정상적인 밭의 흡과는 다름에도 일부 농민들은 이 부산물 용토의 특성을 고려하지 않은 채 객토원으로 사용하는 경우가 있어, 이에 대한 합리적인 이용 방법이 필요하다.

또한, 이제까지 척박지에서의 식생 복원을 위한 지반 조성에 가장 흔하게 사용되는 방법은 마사토와 유기성 폐슬러지 자원을 활용하는 방법이었다. 그러나 마사토는 그 자원이 한정되어 있고, 마사토를 얻기 위해 채취 지역을 훼손해야 하는 문제를 안고 있다. 따라서 골재 생산으로 발생하는 부산물 용토를 척박지 식재 지반 조성에 활용할 수 있는 기술이 개발된다면 마사토 대체 용토로 사용할 수 있을 것이다.

3. 환경적 측면

한편 산업의 발전은 도로건설과 택지개발 등 크고 작은 토목공사를 촉진하게 된다. 산지가 많은 우리나라의 지형 특성상 토목공사로 인한 절개비탈면의 발생은 피할 수 없었기 때문에 훼손된 비탈면을 안전하게 녹화하여 침식붕괴를 방지하고 경관을 조기에 회복시키는 비탈면 녹화기술이 적극적으로 도입되고 개선 발전되어 왔다(정, 1999). 녹화기술이 적용되는 훼손지 녹화공간은 경우에 따라서

는 암반이 노출된 절개비탈면(cutting slopes)과 같은 곳으로 토양 환경이 매우 열악한 상태가 대부분이다. 그러므로 적합한 녹화기반재의 도입을 통한 토양개량 조치가 반드시 필요하며 또한 중요한 식생녹화의 성공요인이 된다. 대표적인 녹화공법인 중비토뿔어붙이기공법(hydroseeding measures with seed-fertilizer-soil materials)은 주로 암반절개지비탈 및 채석장잔벽비탈의 전면적인 속성녹화를 목표로 시공하는 공법으로(우, 2005), 이때 사용되는 녹화기반재 중 하나인 녹생토는 토탄(peat), 하수 또는 정수 오니, 제지 또는 식품 오니, 톱밥 또는 수피, 마사토 및 연소재를 혼합한 제품으로 현재 가장 널리 사용되고 있다(최, 2001).

따라서 지속적으로 발생하는 골재부산물을 녹화용 토양 재료로 재활용하는 것은 골재부산물의 처리뿐만 아니라 훼손된 토지의 식생복원이라는 두 개의 목표를 충족시킬 수 있는 접근법으로 판단된다.

4. 사회·문화적 측면

골재부산물은 골재생산 후 대부분이 야적되거나 방치되어 환경을 오염시킬 수 있고, 도로나 토지 개발로 발생한 비탈면, 간척활동으로 발생하는 간척지, 광산 활동에 의한 광미 야적지, 산불에 의해 산림이 훼손된 지역은 지역사회의 경관을 황폐화시키고 강우와 바람에 의한 토양 침식으로 주변 환경을 오염시킬 수 있다. 폐기물의 매립과 야적 또한 넓은 면적의 토양을 훼손하는 원인이 될 뿐만 아니라 경우에 따라 주변 환경을 오염시킬 우려가 존재한다. 따라서 이러한 환경 조건에서는 지역사회의 사회·문화활동은 크게 제약받을 수 있게 된다. 골재생산 부산물 용토 및 인산 석고를 활용한 농업용 용토재나 식생복원 소재의 개발은 폐기물의 생산적 처리와 훼손된 환경의 복구라는 두 가지 효과를 기대할 수 있게 되므로, 지역사회의 환경개선에 크게 기여할 것으로 기대된다.

제2장 국내외 연구 현황

제1절 골재부산물 개요

일반적으로 골재(aggregate)는 모르타르 또는 콘크리트를 만들기 위하여 시멘트나 물 등과 함께 일체로 굳어지는 모래, 자갈, 분쇄된 모래, 분쇄된 자갈 또는 쇠석 등과 같은 건축 자재를 가리킨다. 이러한 골재는 크게 천연 골재와 인공 골재로 분류할 수 있으며, 산지에 따라서 나눌 경우 강바닥에서 채취한 강모래 및 강자갈, 산지 끝 저변부나 구릉지 등에서 채취한 산림골재, 육지의 평지 부분인 옛 하천부지에서 채취한 육상 모래 및 육상 자갈, 그리고 해안 가까이서 채취한 바다자갈 등을 들 수 있다.

현재 골재의 수급과 채취 등에 관한 전국단위의 공식자료는 건설교통부를 통해 발표되고 있는데, 자료의 분류와 처리가 골재채취법의 정의를 바탕으로 하고 있다. 골재채취법(법제처, 대한민국 법률 제8479호)에서 골재는 하천, 산림, 공유수면 기타 지상, 지하 등에 부존되어 있는 암석(쇄석용에 한함), 모래 또는 자갈로서 건설 공사의 기초재료로 쓰이는 것으로 정의되어 있다. 그리고 골재채취법 시행령에서는 공급원을 기준으로 골재를 하천골재(riverine aggregates, 하천법 제2조의 규정에 의한 하천구역에서 채취되는 골재로서 수중골재와 하상골재를 말하며 “수중골재”는 수중 장비에 의하여 하천구역에서 채취하는 골재이고 “하상골재”는 하천구역에서 채취하는 골재 중 제2호 외의 것을 말함), 바다골재(marine sands, 바다 밑에서 채취하는 골재), 산림골재(crushed aggregates, 산림법 제2조 제1항 제1호의 규정에 의한 산림 안에서 채취하는 골재) 그리고 육상골재(old fluvial deposits, 하천골재와 산림골재외의 골재)로 구분하고 있다.

매년 발표되는 건설교통부 골재수급계획(건설교통부, 골재수급계획)과 통계청 자료(www.index.go.kr)를 통해 1992년부터 2006년까지 연도별 골재원별 골재허가실적 및 채취실적(Figure 1)을 살펴보면 하천골재의 감소와 산림골재의 증가가 두드러짐을 알 수 있다. 1996년까지 골재원별 채취량에서 하천골재의 점유율이 가장 높았으나 1997년 급속히 감소하면서 산림골재의 점유율이 증가하였다. 현재 산림골재 점유율은 전체의 50%를 넘고 있다. 이는 국토의 대부분이 산지인 우리나라의 지형적 특성과 산지 개발이 하천 개발에 비해 상대적으로 환경파괴에 대

한 부담이 적고 민원발생 소지가 적는데 주된 이유가 있는 것으로 설명할 수 있다.

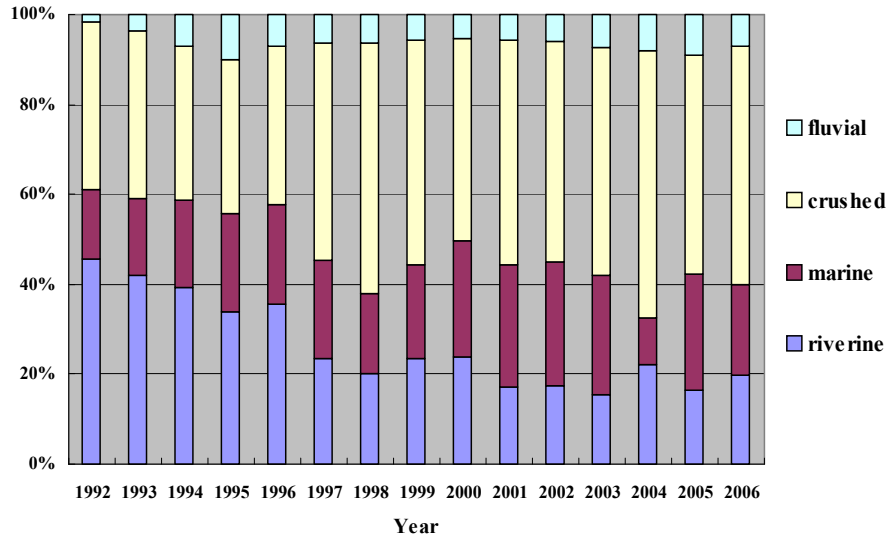


Figure 1. The actual mining record with aggregate resources.

건설교통부는 골재채취 실적이 1996년도에 정점에 달한 후 외환위기를 맞아 지속적인 하향세를 유지하다 2002년 이후 다시 상향 안정추세를 유지하고 있다 (1996년: 139백만 m^3 → 2002년: 119백만 m^3 → 2006년: 106백만 m^3)고 보고 있다.

따라서 전체 채취량의 50%를 넘게 차지하면서 1997년부터 2006년까지 평균 58 백만 m^3 가 생산되고 있는 산림골재의 중요성이 크게 부각되고 있다. 이에 한국지질자원연구원에서는 1993년부터 국내 골재자원의 현황 파악 및 부존 조사, 품질 평가 등에 관한 종합적인 연구를 진행해오고 있으며, 산림골재를 개발하는 골재 석산에 대한 전국적인 분포 형태(김 등, 2003; 이 등, 1994), 골재 대상 암종의 분류, 지역별 골재석산의 유형 특성에 대한 고찰이 이루어지고 있다(홍 등, 2004). 홍 등(2004)에 의하면, 쇄석용 산림골재 석산은 비교적 전국적으로 고른 분포를 보이지만 수요공급의 성격상 주로 서울, 부산 등 광역시를 중심으로 대도시 주변에 집중되어 있다. 그리고 골재로 이용되는 암석은 심성암으로는 화강암, 섬장암, 섬록암, 반화강암, 반암, 규장암, 맥암 등 7종, 화산암으로는 유문암, 안산암, 조면

암, 현무암, 응회암, 화산각력암 등 6종, 변성암으로는 편마암, 편암, 천매암, 슬레이트, 변성사암, 규암, 혼펠스, 석회규산염암, 각섬암 등 9종, 퇴적암으로는 사암, 셰일, 이암, 역암, 석회암, 각력암, 쳐트 등 7종이다. 이들 골재 대상암 중에서 화강암의 비율이 25%로 가장 높으며, 그 다음으로 편마암 20%, 사암 10%, 안산암 10%의 순서대로 많다.

Figure 2는 전형적인 산림골재업체의 전경을 보여준다.



Figure 2. The general view of an aggregate company.

산림골재 채취 과정에서 이와 같은 암석을 채취하고 분쇄하고 선별하여 자갈과 모래 등의 골재를 생산하기 때문에 버려지는 부산물이 발생하게 된다(Figure 3). 이때 발생하는 부산물이 골재부산물(byproduct aggregates)이 된다. 골재부산물은 보통 석분(stone dust 또는 rock dust) 또는 석분토라고 불리나 수세공정을 거친 세정수와 함께 슬러리 상으로 배출되기 때문에 생산 현장에서는 뿔이라고도 하며, 탈수 처리된 형상을 보고 슬러지 케이크라고도 한다.

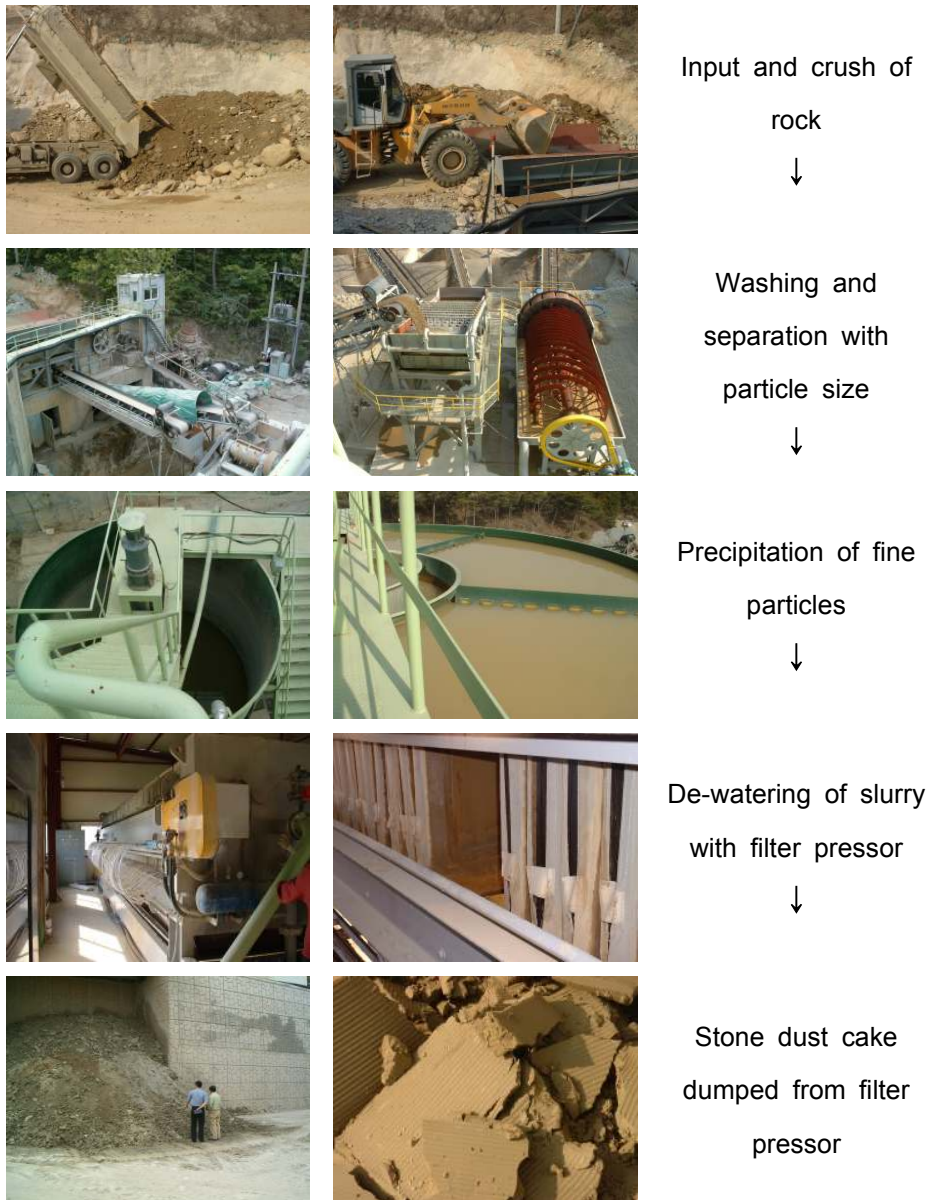


Figure 3. The process of aggregates and byproducts production (sourced by K-company located in Kosung, Kangwon-do).

사업장마다 차이가 있으나 대부분의 골재부산물은 침전과정을 통해서 0.075mm 이하, 5~30%의 수분을 포함한 쇄석미분슬러지 형태로 얻어지게 되며, 암질에 따라 다르지만 생산되는 인공골재의 건조 중량 기준으로 약 20~30% 정도 발생되고 있다(산업자원부, 2004). 하지만 실제 골재부산물 시료를 채취해서 입도분석을 한 보고(김 등, 2007)에는 골재부산물의 유효경이 0.008~0.178mm의 범위로서 평균 0.06mm로 나타나고 있다.

최근 한국지질자원연구원이 한국골재협회에 제출한 보고서(이 등, 2006)에 의하면, 골재부산물(석분토)의 발생은 부순 모래를 생산하는 공정에서만 발생하고, 그 생산량은 모래의 생산량과 비례하며, 모래 생산량의 약 15~20% 정도로, 연간 80~100만^m이다.

제2절 골재부산물 재활용 연구

폐기물관리법에서 산업폐기물로 분류되고 있는 골재부산물은 수분함량 70% 이하로 탈수나 건조했을 때, 토사를 50% 이상 혼합하여 성토재, 보조기층재, 도로기층재 및 매립시설 복토용으로 활용 가능하고, 수분함량 30% 이하로 탈수 건조했을 때는 단독으로도 활용 가능하도록 규정되어 있다(폐기물관리법 시행규칙 제 46조 제3항 관련 별표11의2). 하지만 이와 같은 방법은 골재생산업체의 입장에서는 자체적으로 처리할 수 있는 방법이 아니어서 폐기물 배출을 위한 처리 비용이 많이 발생하기 때문에 현실적으로는 결국 골재부산물이 적극적으로 처리되지 않고 방치되게 하는 결과를 낳고 있다.

따라서 이를 적극적으로 재활용할 수 있도록 유도할 만한 처리 방법이나 재활용 방안 마련이 매우 시급한 실정에 있다. 이에 골재부산물의 활용 연구는 골재부산물을 농업용 토양개량재, 모르타르 혼화재, 도로기층재, 채움재, 벽돌, 경량골재, 콘크리트 등의 재료로의 재활용 가능성을 확인하고 이를 산업화하려는 경향을 보이고 있다.

골재부산물의 세라믹 제품으로의 재활용 측면에서 이 등(2003)은 골재부산물의 물리 화학적 성상이 세라믹 원료 중 장식류에 속하며, 회장석과 sericite 등의 점토광물로 구성되어 있어 요업원료로 재활용이 가능한 물질이며 점토 벽돌과 인

공골재의 원료로 재활용하기 위한 연구가 이루어지고 있다고 하였다. 엄 등(2003)은 전통적인 세라믹 제품의 원료성분은 물과 혼합시 가소성을 주는 점토계 광물, 성형시 비가소성 충전제와 소성시 액상을 형성하는 장석, 그리고 용융되지 않고 충전제로 작용하여 망목구조를 형성함으로써 소성과정에서 연화를 막는 역할을 하는 실리카 등의 3가지 성분으로 이루어졌다고 하였다. 이를 근거로 전기로 더스트, 제강 슬래그, 종이재 및 알루미늄 드로스 등은 장석에 해당하는 RO/R_2O (여기서 R은 알카리금속 또는 알카리토금속)군으로 분류하고, 석탄회 및 폐주물사 등은 실리카의 역할을 하는 실리카군으로 분류하는 것이 가능하며 이들 각종 폐기물을 적절히 조합하여 동시에 처리함으로써 전통적인 세라믹 원료를 대체하는 것이 가능하다고 보았다. 그리고 전기로 더스트와 석탄회, 석분(골재부산물) 등의 무기계 폐기물을 점토벽돌의 원료인 고령토와 혼합하여 소결한 소성벽돌을 제작하였다. 전(2005)은 석분슬러지(골재부산물)에 입자 크기가 $10\mu m$ 이하인 진흙 분말과 물을 용적비 2 : 3 : 0.1로 혼합한 혼합물을 만들고 이를 발포 폴리스틸렌이나 발포폴리부틸렌에 소정의 두께로 코팅한 후 $200\sim 300^\circ C$ 의 온도에서 10~30분 동안 소성하여 폐석분 슬러지를 이용한 경량골재를 제조하였다.

산업자원부 보고서 “석분토를 이용한 지하공동의 친환경적 충전재 및 충전보강공법 개발 연구”(마 등, 2004)에서는 지반 침하 및 함몰의 잠재적 재해 요인인 석회암 지대나 광산 지역의 지하공동(cavity)을 석분토(골재부산물)를 이용해 경제적이고 효과적으로 충전할 수 있다고 보고하였다. 이 때 충전재의 최적 배합비는 석분토액 90%, CSA(calcium sulfo aluminate, 속경화혼화제) 16%, BS(blast-furnace slag, 고로 슬래그) 20%, $CaCl_2$ (수화반응 촉진제) 1%이었으며, 재령 7일 압축강도가 $3\sim 21kgf\ cm^{-2}$ 정도이며 재령 28일 압축강도는 $34\sim 60kgf\ cm^{-2}$ 정도로 나타났으며 이는 상부지반 하중을 공동 하부지반에 전달하는 충전재의 개념에서 충분한 강도를 가지는 것으로 보고되었다. 이어 폐광산 지대의 폐굴적 및 폐갱도를 보강하는 기존의 충전공법에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 시멘트 사용량을 최대 줄이고 그 대신 산업폐기물인 석분토로 대체시켜서 만들어진 경제적인 충전재료에 관한 특허가 등록되었다(마 등, 2006).

성 등(2002)은 “비활성 황토와 석분을 사용한 모르타르의 물리·역학적 특성” 연구에서 황토와 석분의 혼입량이 증가할수록 모르타르의 압축강도가 감소하는 경향을 나타냈으나, 황토 혼입량을 40%, 석분 혼입량을 20%까지 증가시켜도 벽돌 강도 기준을 만족한다고 하였고, “폐석과 석분을 사용한 식생 콘크리트의 특

성”(성 등, 2002) 연구에서 석분을 양을 조절해서 만족할 만한 식생 콘크리트를 제조할 수 있다고 하였다.

김 등(2007)은 석분토(골재부산물)와 원지반토를 일정한 배합비로 섞은 혼합토를 대상으로 한 토질시험을 통해 도로 보조기층재로서 재활용할 수 있다고 보고 하였다. 이 연구에 따르면, 석분토와 원지반토의 혼합비율이 감소됨에 따라 유효 경은 증가하고 균등계수와 곡률계수는 석분토 혼합비율이 25~75%일 경우 크게 증가하며, 석분토 혼합비율 25%일 때 지지력이 최대로 증가하였으며, 최적 전단 강도를 재현하기 위해서는 석분토 혼합비율을 25~50%로 조절함이 좋았기 때문에 석분토 25%와 원지반토 75% 비율로 섞은 혼합토가 도로 노상하부 60cm용 재료로서 적합한 것으로 나타났다.

척박지 녹화를 위해서는 식재 기반의 조성과 식물 소재의 연구 개발이 지속적으로 요구되며, 식재 기반 조성에서 경제성을 고려해 각종 유기·무기성 폐기물을 이용하여 자원의 재활용에 입각한 인공 토양 조성물에 대한 시도가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 인공 토양 조성물로는 녹생토, 식생토, 점녹토 그리고 인공 식생토 등이 있으며, 이들 조성물은 압축 공기를 이용한 건식 방식으로 치부된다. 각 조성물의 조성을 보면, 녹생토는 하수 슬러지, 제지오니, 제지 플라이애쉬, 일반 토양, 톱밥, 왕겨 및 토탄으로 구성되고[특허 제96-14291호], 식생토는 연탄재, 발효, 활성탄, 갈탄, 질석, 고토, 토탄, 야자열매껍질가루, 부숙톱밥, 피트모스 및 계분으로 구성되고[특허 제106895호], 점녹토는 토탄, 오니케익, 펄프오니, 톱밥, 마사토, 지렁이분 및 점질균으로 구성되고[특허 제100446호], 그리고 인공식생토의 경우 맥주오니, 톱밥, 부엽토, 수피, 비석, 백운석 및 석탄재로 구성[특허 제91881호]되어 있다.

골재부산물의 농업적 이용 측면에서 정 등(2005)은 국내에서 생산되는 암석 분쇄 석분의 현황을 파악하고 토양개량제로서의 효과를 구명하는 연구에서 입자의 크기가 8mm 이하인 석분과 석분으로부터 모래 입자를 분리하고 남은 미분의 토양학적 특성 분석 결과, 그 활용가능성이 매우 적으며, 토양개량제로서의 활용은 장기간의 시험과 연구를 통해 무기성 폐자원의 농경지 유입에 의한 안전성 및 부작용 등에 대한 정밀한 검토가 이루어져야 할 것이라고 하였다.

제3절 비탈면 녹화 기술

일반적으로 토양의 침식에 영향을 끼치는 인자는 지형, 기상조건, 토양의 성질, 그리고 식물의 생육을 들 수 있다. 토양침식은 빗물에 의한 분산 탈리 및 유거의 형성으로 인한 영향을 크게 받기 때문에 유거의 속도와 직접적인 관련이 있는 경사도와 경사길이가 지형 인자 중에서 가장 중요하다. 기상조건 중에서는 강우의 특성, 즉 강우량과 강우강도가 토양침식에 가장 큰 영향을 준다. 토양의 성질, 구조, 투수성 및 유기물 함량은 토양이 침식에 견디는 능력인 수식성에 영향을 주는 인자들이다. 식물은 빗방울에 의한 직접적인 타격으로부터 토양의 입단을 보호하여 침식을 막고, 식물의 뿌리는 토양의 입단구조를 발달시키며 피복에 의한 유속의 감소나 토양건조방지효과를 나타내며 그 정도는 식물의 종류 및 피도 밀도와 형태에 따라 달라진다(김 등, 2006). 이러한 인자들의 상호관계를 시험을 통해 알아내어 물에 의한 토양의 유실을 예측하는 공식이 토양유실예측공식(universal soil-loss equation, USLE)이다(Brady, 1990).

$$A = RKLSCP$$

이 공식은 6개의 인자를 곱하여 토양유실량을 계산한다.

A = predicted soil loss

R = climatic erosivity (rainfall and runoff)

K = soil erodibility

L = slope length

S = slope gradient or steepness

C = cover and management

P = erosion control practice

따라서 토양침식을 막기 위해서는 유거의 양과 속도를 줄이기 위해 경사도를 낮추고 단을 두어 경사 길이를 짧게 하는 조치와 식물로 피복하는 방법 그리고 개량을 통해 토양의 투수성을 증가시켜 유거의 양을 감소시키는 대책 등이 있다.

식물을 이용한 침식방지대책은 USLE의 C와 P인자를 조절하여 토양유실을 막는 방법이라 할 수 있다.

인류는 경사지와 강둑의 토양침식을 방지하지 하기 위해 수세기 동안 살아있는 식물과 다른 자연 재료들을 이용해 왔다. 이러한 자연 재료를 이용한 토양침식 방지방법은 산업혁명의 도래와 함께 기계와 콘크리트, 철강 기술의 발달로 견고하고 비활성의 침식방지자재에 밀려 한때 주목을 받지 못 하기도 하였지만 식생을 이용한 침식 방지 방법이 비용과 경관의 측면에서 효율적이라는 사례가 누적되면서 최근에는 토목공학 분야에서 중요한 기술로 주목받게 되었다 (Gray 등, 1996).

식물을 이용하여 훼손지 또는 민등땅 표면을 식재 피복하는 것을 녹화(revegetation)라고 정의하며, 이는 식생을 도입하는 장소와 대상에 따라 ‘도시녹화’, ‘사막녹화’, ‘절개지녹화’ 등으로 쓰이게 된다. 따라서 비탈면 녹화공법(斜面綠化工法, slope revegetation measures)은 비탈면에 식물을 도입하고 토목적 수단으로 비탈면을 피복 보호하는 방법의 총칭이다. 또한 비탈면 녹화공법은 녹(green)의 재생, 복원, 회복, 창출, 보호 등에 관한 계획, 시공, 관리 등의 행위를 총괄하게 된다. 녹화공법의 목적은 식물군집의 생존을 도모하여 군집이 가진 체반기능을 최대로 발휘할 수 있도록 함으로써, 자연생태계의 회복과 보전, 황폐한 녹색환경의 회복과 보전, 식생경관의 조성과 보전 등을 도모함에 있다(우, 2005).

녹화공법의 적용은 대상 비탈면의 경사도, 토질, 암질, 주변 경관 등의 여러 요인에 따라 다양하게 적용되고 있다. 일반적으로 토사비탈면에 사용되는 비탈면 녹화공법은 기계를 이용한 종자분사파종공법(seeding)이 주로 사용되고, 코아네트(coir-net), 쥬트네트(jute-net) 등과 같이 식생의 활착을 돕고 초기침식을 방지하기 위해 자연적으로 분해가 될 수 있는 천연소재의 망을 분사파종공법과 병행하여 시공하기도 하며, 매우 제한적으로 자생초종 및 목본의 활착을 위해 인력을 사용하여 파종한 후에 벗질거적을 덮는 공법도 사용되고 있다. 또한 고속도로 비탈면 중 암반지역 녹화공사에 가장 많이 사용되는 녹화공법은 식생기반재취부공법(植生基盤材吹附公法)으로 조기녹화를 도모하기 위해 초기 성장이 우수한 외래 도입초종 위주의 종자배합으로 시공되고 있다(김 등, 2007).

식생기반재취부공법은 시공 재료의 형상과 장비 구성에 따라 즉 토양 재료로 마사와 각종 유·무기 폐기물을 이용해 만든 부속토를 에어건(air gun)으로 분사하여 시공하는 건식 형태의 공법과 유기물 함량이 높은 토양을 접착제 등의 침

가제와 함께 물과 혼합하여 슬러리 형상으로 만들어 고압펌프를 이용해 분사하여 시공하는 습식 형태의 공법으로 나눌 수 있다.

전(2002)은 우리나라 주요 녹화공법을 취부방법에 의해 건식 형태와 습식 형태로 대별하였는데, 그 예로 녹생토공법과 PEC공법, 프로피아그린은 건식 형태로 SF공법, 텍솔공법, ASNA공법, NGR공법, CODRA공법은 습식 형태로 분류될 수 있다고 하였다. 그는 또한 주요 사용자재를 유기재료와 무기재료로 구분하여 녹화공법을 분류할 수 있다고 하였다.

녹화공법에 대한 여러 자료를 종합해 보면(Figure 4), 습식의 형태는 주요 재료가 슬러리 상으로 혼합하여 펌프로 뿜어 올리기에 적합한 공법이며, 건식의 형태는 마사토와 같은 토양이 많이 혼합되어 있어 고압의 에어건으로 쏘아 붙이기 적당한 공법으로 정리될 수 있다. 습식은 슬러리 상으로 뿜어 붙여지기 때문에 5cm 이상 두껍게 시공하기 어려운 반면 건식은 식생기반체를 10cm 이상 비탈면에 붙일 수 있다. 따라서 습식은 녹화 대상지가 토사 절토 성토 비탈면이나 풍화암 또는 리핑암일 때 효과적이며, 건식은 풍화암 또는 리핑암으로부터 토양층이 거의 남아 있지 않은 암반 비탈면에 적용될 수 있는 공법이다.

건식 공법에 가장 많이 사용되고 있는 재료인 녹생토는 하수 및 정수 오니, 제지 및 식품 오니, 화력발전소 및 제지회사의 연소재 등의 폐기물과 토탄과 마사토의 혼합물을 일정 기간 부숙시켜 제품화한 것(Table 1)으로 출하되는 제품의 pH는 5.5~ 7.0이 되어야 하고, 유기물 함량은 15~ 25%, 유기물과 질소의 비율은 50 이하, 수분함량은 45~ 65%, 구성 입자의 크기는 20mm 이하 그리고 용적 밀도는 1ton m^{-3} 가 되어야 한다. 또한 현장에 시공된 녹생토는 그 pH가 5.5~ 7.0이 되어야 하고, 전기전도도는 1.0dS m^{-1} 미만, 양이온치환용량은 6cmolc kg^{-1} 이상, 총질소함량은 0.06% 이상, 염농도 0.2% 미만, 그리고 유기물 함량 3% 이상의 조건을 만족시켜야 한다(최, 2001).

현재 사용되고 있는 인공토양 조성물은 주로 사면 부착력과 내침식성에 초점이 맞춰져 있고, 적용 가능한 식물 또한 목초, 코스모스, 싸리 등으로 한정되는 단점이 있다. 건조 후의 토양경도가 웬만한 식물이 생육하기 불가능할 정도로 증가한다는 것과 주요 구성 성분 중 유기성 슬러지 류가 많아 혼합시 식재층의 조직이 치밀해질 뿐만 아니라, 습윤 건조가 반복됨에 따라 수축 팽창하게 되어 갈라짐 현상이 심화됨을 단점의 예로 들 수 있다.

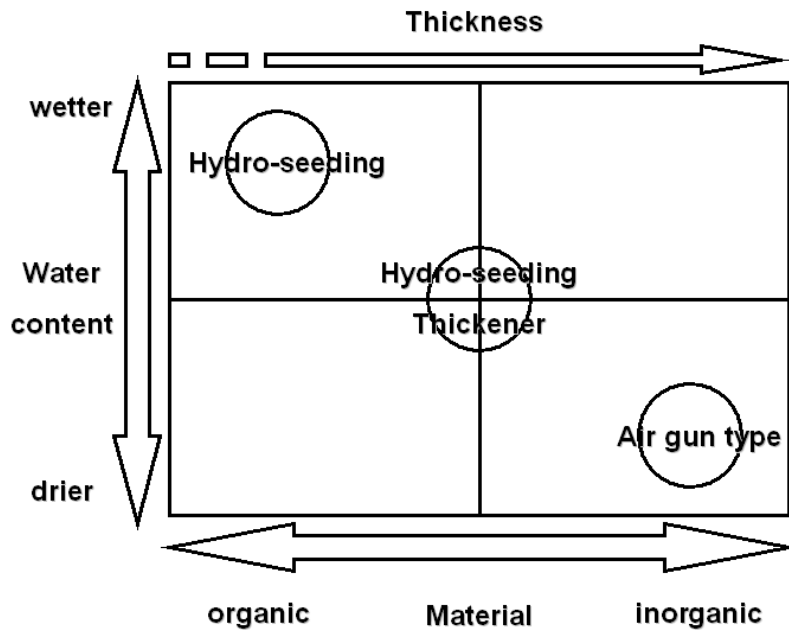


Figure 4. The diagram of re-vegetation measure classification with the phase of soil materials.

Table 1. The delivery requirements of Noksaengto (Choi, 2001).

The basic ratio of composition		Requirement	
Material	Ratio (%)	Item	Requirement
Peat	10 ~ 15	pH	5.5 ~ 7.0
Sewage sludge	20 ~ 25	Organic matter	15~ 25%
Paper-food sludge	25 ~ 30	O.M. / N	≤ 50
Saw dust, bark	5 ~ 10	Water content	45 ~ 65%
Coarse sand	20 ~ 25	Particle size	≤ 20mm
Ash	5 ~ 10	Bulk density	1ton m ⁻³

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 골재부산물 시료 채취 및 분석

1. 시료 채취

2005년 한국골재협회에 등록된 골재생산업체는 총 1,564개 업체로 골재 채취원에 따라 수중, 바다, 산림, 육상, 파쇄, 세척으로 구분 등록되어 있다. 골재업체의 지역적 분포를 보면 서울 경기권이 301개, 강원권이 228개, 충북권이 122개, 대전충남권이 147개, 전북권이 174개, 광주 전남권이 204개, 대구 경북권이 215개, 부산 경남권이 183개, 제주권이 37개이었다(한국골재협회, 2005).

한국골재협회의 각 지부의 도움을 얻어 제주도를 제외한 내륙의 골재생산업체 21개소를 직접 방문하여 시설을 확인하고 담당자 면담 후 시료를 수집하였으며, 각 시료 채취 사업장의 특징은 Table 2와 같다. 시료를 채취한 회사는 경기도 2개소(광주, 가평), 강원도 4개소(원주, 동해, 춘천, 속초), 충청북도 5개소(청원, 제천, 음성, 충주), 전라북도 6개소(익산, 군산, 전주, 정읍), 전라남도 1개소(광주) 그리고 경상북도 3개소(성주, 대구, 칠곡)에 위치하고 있다.

육상골재를 생산하는 전라북도 정읍의 JH와 하천골재를 생산하는 전라남도 광주의 DA를 제외하고는 모두 석산에서 채취한 원암을 깨서 골재를 생산하는 산림골재회사였다. 원암 파쇄와 골재 세정으로 발생하는 골재부산물 슬러리는 넓은 웅덩이에 모아 자연적으로 침전시키는 자연침전법이나 멤브레인 필터 사이로 이송해 압축 배출하는 방식인 필터 프레스법(filter pressor)으로 처리되고 있었다. 자연침전법은 에너지 소모가 없는 대신에 넓은 부지를 확보해야 하는 단점이 있었고, 필터 프레스법은 공간 활용과 슬러리 처리 효율이 높은 반면 기계를 가동하는데 에너지와 인력이 소요된다는 단점이 있었다. 방문했던 21개 사업장 중 전라북도 정읍의 JH, 전라남도 광주의 DA 그리고 경기도 가평의 HC에서만 자연침전법을 사용하고 있었고 나머지 업체는 필터 프레스를 사용하고 있었던 것으로 볼 때 필터 프레스법이 현장 여건에 맞고 실용적인 것으로 판단된다. 한편 강원도 동해시의 SS사업장의 경우, 회사 관계자에 따르면 원암 채취 지역이 석회암 지대라는 지역 특이성으로 골재부산물 자체가 석회 비료 또는 토양개량제로 사용된다고 하였다.

Figure 5는 몇몇 산림골재, 육상골재 그리고 하천골재업체의 전체적인 생산 설비와 골재부산물의 배출 상태를 보여준다.

Type of resource	Overall production process	Byproduct treatment
Crushed rock		
Crushed rock		
Old fluvial deposits		
Riverine aggregate		

Figure 5. The introduction of aggregate production and byproduct treatment with aggregate resource.

Table 2. The description of aggregate companies supporting this study.

Location (Sample name)		Source of aggregate	Sludge treatment
Kyung gi-do (2)	Kwangju (KG)	Crushed Rock	Filter pressor
	Kapyung (HC)	Crushed Rock	Natural sedimentation
Kang won-do (4)	Wonju (DM)	Crushed Rock	Filter pressor
	Donghae (SS)	Crushed Rock	Filter pressor
	Chuncheon (CC)	Crushed Rock	Filter pressor
	Sokcho (KG)	Crushed Rock	Filter pressor
Jeolla-do (7)	Iksan (YS)	Crushed Rock	Filter pressor
	Iksan (JS)	Crushed Rock	Filter pressor
	Iksan (SI)	Crushed Rock	Filter pressor
	Kunsan (KS)	Crushed Rock	Filter pressor
	Jeonju (DC)	Crushed Rock	Filter pressor
	Jeungup (JH)	Old fluvial deposits	Natural sedimentation
	Kwangju (DA)	Riverine aggregate	Natural sedimentation
Kyoung sang-do (3)	Sungju (DH)	Crushed Rock	Filter pressor
	Daegu (SU)	Crushed Rock	Filter pressor
	Chilgok (DE)	Crushed Rock	Filter pressor
Chung cheong- do (5)	Cheungwon (SB)	Crushed Rock	Filter pressor
	Cheungwon (SY)	Crushed Rock	Filter pressor
	Jecheon (KW)	Crushed Rock	Filter pressor
	Eumsung (JK)	Crushed Rock	Filter pressor
	Chungju (MJ)	Crushed Rock	Filter pressor

2. 시료 분석

가. 물리성 분석

본 연구에서 수거하거나 조제된 시료의 물리성 분석은 “토양 및 식물체 분석법”(농촌진흥청, 2000)에 준하여 수행되었으며, 분석 항목은 입경분석, 보수력, 투수성, 점착성, 가소성, 액성한계 등이며, 분석 방법은 다음과 같다.

입경분석은 0.05mm 체로 시료 중 모래 크기 부분을 걸러내고 분산제를 넣고 분산시킨 토양 혼탁액을 실린더에 담아 25℃ 항온 수조에 넣고 비중계(ASTM-E100, 152 H-62)를 이용하여 미사(0.002~ 0.05mm)와 점토(0.002mm 이하) 함량을 측정하였다. 그리고 미국 농무성의 토성분류법에 근거하여 토성을 결정하였다.

		0.002	0.05	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0	mm
clay	silt	very fine	sand	fine	medium	coarse	very coarse	gravel	

Figure 6. The USDA classification of soil particle with diameter.

보수력 측정은 토양수분추출기(SOIL MOISTURE equip, 15 bar ceramic extractor, Soil moisture, USA)를 이용하여 포장용수량을 구한 후 위조계수를 구한 값의 차로 유효수분 범위를 정하는 방법으로 하였다. 투수성은 시료의 특성상 교란 시료를 물로 포화시킨 후 변수위법으로 10cm의 수위 변화에 걸린 시간을 측정하여 포화수리전도도를 계산하여 분석하였다.

점착성 및 가소성은 일정한 시료를 취해 적당한 수분을 이용하여 반죽한 뒤 Table 3과 Table 4에 의한 촉감 테스트를 통해 측정하였다. 액성한계 시험은 전동식 액성한계 시험기(HS-132, (주)한신금풍)를 이용하여 충격횟수 25회일 때의 수분 함량을 구하여 측정하였다.

Table 3. Criteria for describing soil stickiness grade.

Grade	Criteria
A: Great	Soil adheres firmly to both fingers after release of pressure with stretches greatly on separation of fingers
B: Normal	Soil adheres to both fingers after release of pressure with some stretching on separation of fingers
C: Weak	Soil adheres to both fingers after release of pressure with little stretching on separation of fingers
D: None	Little or no soil adheres to fingers after release of pressure

Table 4. Criteria for describing soil plasticity grade.

Grade	Criteria
A: Great	When stood molding to 4cm length, 2mm thickness, hold itself weight
B: Normal	When stood molding to 4cm length, 4mm thickness, do not hold weight if hold itself weight, and mold to 2mm thickness
C: Weak	When stood molding to 4cm length, 6mm thickness, hold itself weight. If mold to 4mm thickness, do not hold weight
D: None	When stood molding to 4cm length, 6mm thickness, do not hold itself weight

나. 화학성 분석

본 연구에서 수거하거나 조제된 시료의 이화학성 분석 항목은 pH, EC, 유기물 함량, P2O5, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, T-N, 교환성 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), CEC (양이온교환용량), 유효 규산 함량, 중금속(Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Fe, Mn) 함량 등이며, 분석 방법은 “토양 및 식물체 분석법”(농촌진흥청, 2000)을 따랐다.

pH와 EC 측정은 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 pH meter(Scott CG842, Germany)와 EC meter(ISTEK 460CP, 대한민국)로 측정하였고, 유기물 함량은 Walkley-Black법으로 AR급 1N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 용액과 진한 H_2SO_4 을 시료에 가하며, 토양 유기물 함량에 따라 변하는 녹색의 강도를 표준시료와 비교하여 UV/Vis spectrophotometer(CPS-240A, Shimadzu, Japan)로 비색 정량하는 방법과 작열감량법을 사용하였다. 암모늄태 질소($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), 질산태 질소($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 및 전질소(T-N)는 Kjeldahl 증류장치(Kjeltec Auto 2300 Analyzer, FOSS tecator, Sweden)를 이용하여 증류, 감압, 적정을 통하여 정량하였다.

유효인산(P_2O_5)은 SnCl_2 에 의한 몰리브덴 청법으로 파장 660 nm에서 UV/Vis spectrophotometer(UV-2401PC, Shimadzu, Japan)를 이용하여 비색 정량하였다. 교환성 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)은 1N-ammonium acetate로 추출하여 Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6701F, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. 양이온교환용량(CEC; Cation Exchange Capacity)은 1N-Ammonium Acetate로 추출한 침출액을 Kjeldahl 증류장치(Kjeltec Auto 2300 Analyzer, FOSS tecator, Sweden)를 이용하여 측정하였다.

유효 규산 함량은 1N NaOAc로 추출한 침출액에 10% ammonium molybdate를 가한 후 UV/Vis spectrophotometer(UV-2401PC, Shimadzu, Japan)로 비색 정량하였다. 중금속 함량(Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Fe, Mn)은 0.1N HCl로 추출하여 ICP(Perkin Elmer Optima3000 XL, USA)로 측정하였다.

다. 광물 조성 분석

골재부산물의 광물 조성 분석을 위해 X선 회절분석, X선 형광분석 및 시차 열분석 등을 하였다.

골재부산물 시료의 조성 물질 동정을 위해 X선 회절분석을 수행하였다. 강원

대학교 춘천캠퍼스 공동시험실습관의 고분해능 X선 회절기(High X-Ray Diffractometer, PANalytical, X'pert-pro MPD, Netherlands)를 사용하여 Cu-K α 회절선, 40kV-30mA로 Start position 5.0084($^{\circ}$ 2Th), End position 79.9784($^{\circ}$ 2Th), Step size 0.0170($^{\circ}$ 2Th)의 조건으로 측정하였다. 측정된 강도로부터 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 1974 a, b) 데이터 카드로 동정하였다. X선 형광분석은 강원대학교 삼척캠퍼스 공동시험실습관에서 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, RIGAKU ZSX100E, Japan)를 사용하여 시료를 프레싱한 후 진공상태에서 시료에 X선을 조사하여 발생하는 형광 X선을 보통 분광 결정에 의해 분광시켜 분광된 강도를 검출기로 측정하였다.

시차열분석은 강원대학교 춘천캠퍼스 공동시험실습관에서 시차열분석기(Differential Thermal Analyzer, TA Instruments, USA)를 사용하여 기준 물질인 alumina powder를 이용해 800 $^{\circ}$ C까지 시료와 기준 물질간의 온도차와 강도 및 이때 만들어지는 흡열피크(endothermic peak)와 발열피크(exothermic peak)를 분석하였다.

3. 골재부산물의 물리적 특성

21개의 골재부산물 시료에 대한 입경 분석 결과는 Figure 7와 같다. 골재부산물의 모래(sand; 0.05~ 2.0mm), 미사(silt; 0.002~ 0.05mm) 그리고 점토(clay; < 0.002mm)의 평균 함량은 각각 26.4%, 55.8%, 17.8%로 나타났고, USDA 토성분류법에 따르면 미사질양토(silt loam)로 분류될 수 있었다. 하지만 실제 골재부산물 시료에 대한 입도분석보고(김 등, 2007)에 따르면 골재부산물의 유효경이 0.008~ 0.178mm의 범위로 나타나기 때문에 본 분석에서 모래로 분류된 입자는 0.25mm 이하의 가는 모래 또는 매우 가는 모래에 해당할 것으로 판단된다.

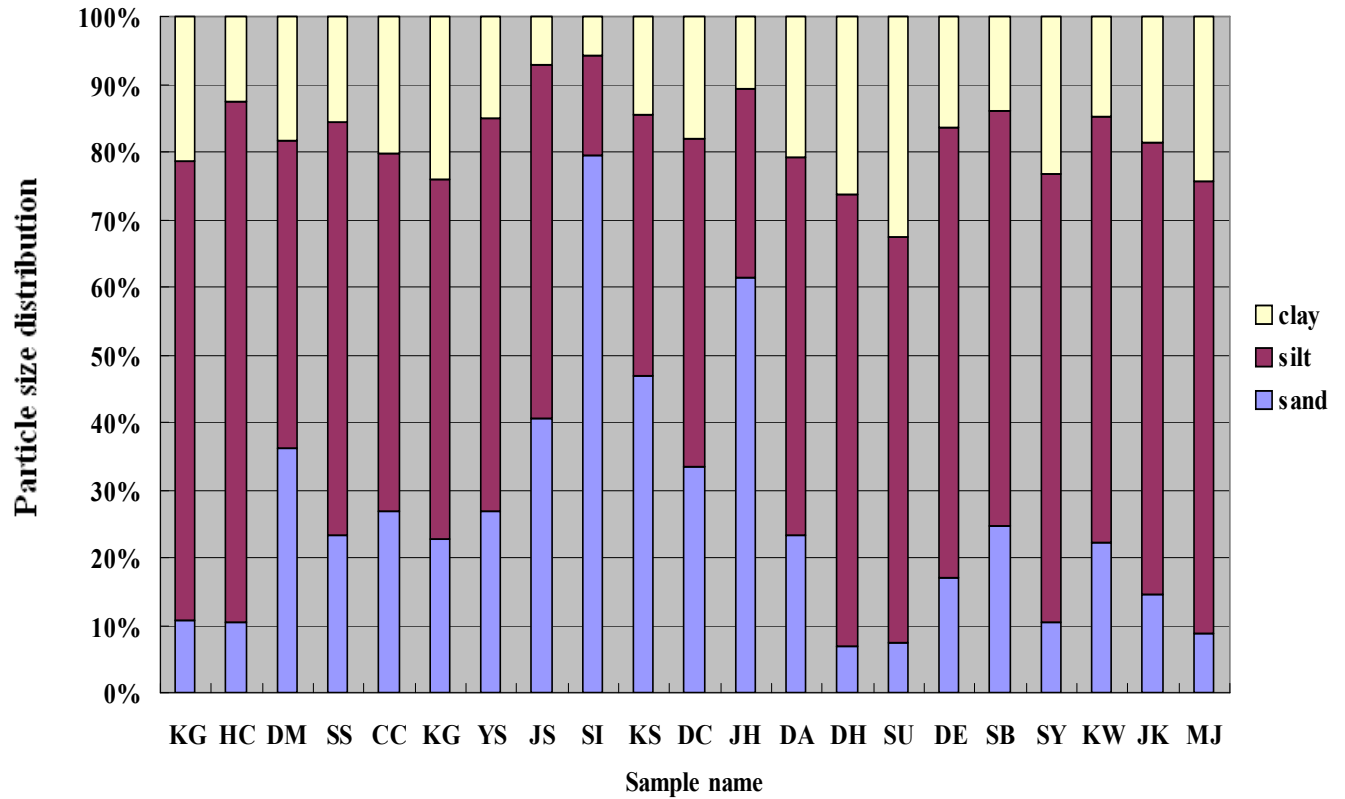


Figure 7. The particle size distribution of byproduct aggregates.

골재부산물의 평균 포장용수량은 11.99%였고, 평균 위조계수는 9.28%였다. 따라서 평균 유효수분함량은 2.71%로 계산되었다(Table 5). 골재부산물은 포장용수량에 있어서는 사양토의 특성을, 위조계수에 있어서는 식양토에 가까운 특성을 보이고 있어 식물이 이용할 수 있는 수분의 양이 비정상적으로 적었으며, 특히 미사 함량이 50%에 이르면서 압착되어 배출되기 때문에 공극이 발달할 수 없는 것이 수분 특성을 극히 열악하게 만든 것으로 판단된다.

Table 5. Soil water characteristics of byproduct aggregates.

	Field capacity (%)	Wilting point (%)	Available water capacity (%)
Mean	11.99	9.28	2.71
Standard deviation	6.83	6.43	2.11
Minimum	4.22	3.59	0.09
Maximum	28.65	27.98	7.41

점착성(stickiness)과 가소성(plasticity)은 사면의 안정성이나 경운성에 관련한 토질 역학의 중요한 지표이다.

골재부산물에 대한 점착성 분석 결과(Table 6), 시료의 대부분이 점착성 등급이 C(weak) 또는 D(none)로 점착성이 약하거나 없는 것으로 나타났다. 단, 전라도의 DA, 경상도의 SU 등 두 곳의 골재부산물이 B(normal) 등급의 점착성이 있었다. 골재부산물의 가소성 분석 결과는 점착성 분석 결과와 마찬가지로 대부분의 시료가 C(weak) 또는 D(none) 등급으로 가소성이 약하거나 없는 것으로 조사됐다. 단, 경기도의 KG, 전라도의 YS와 DA, 경상도의 DH 시료에서 B(normal) 등급의 가소성이 있었다(Table 6). 전라도의 DA 사업장에서 배출되는 골재부산물만이 가소성과 점착성이 모두 B 등급이었다. 따라서 골재부산물을 녹화용 토양재로 재활용할 때 점착성과 가소성을 높여줄 수 있는 재료와 혼합할 필요가 있다고 판단된다.

Table 6. The distribution of stickiness grade and plasticity grade of byproduct aggregates (A: great; B: normal; C: weak; D: none).

	Sample	Stickiness grade	Plasticity grade
Kyounggi-do	KG	C	B
	HC	C	C
Kangwon-do	DM	D	C
	SS	D	C
	CC	C	C
	KG	C or D	C
Jeolla-do	YS	C or D	B
	JS	D	D
	SI	D	D
	KS	C	C
	DC	D	D
	JH	D	D
	DA	B	B
Kyungsang-do	DH	C or D	B
	SU	B	C
	DE	D	D
Chungcheong -do	SB	D	C
	SY	C or D	C
	KW	D	D
	JK	C	C
	MJ	C	C

액성한계(liquid limit)는 토양 결지성의 형태가 점성의 액체로부터 소성으로 이행하는 전이점의 토양수분함량이다. 따라서 소성 상한(upper plastic limit)이라고도 한다. 액성한계는 토양의 비표면적 또는 점토함량, 점토광물의 종류, 교환성 양이온의 종류, 부식함량 등에 따라 차이가 있다(류, 2000). 골재부산물의 액성한계는 JS사업장의 골재부산물이 가장 낮았으며, DE사업장의 골재부산물이 가장 높았다(Figure 8).

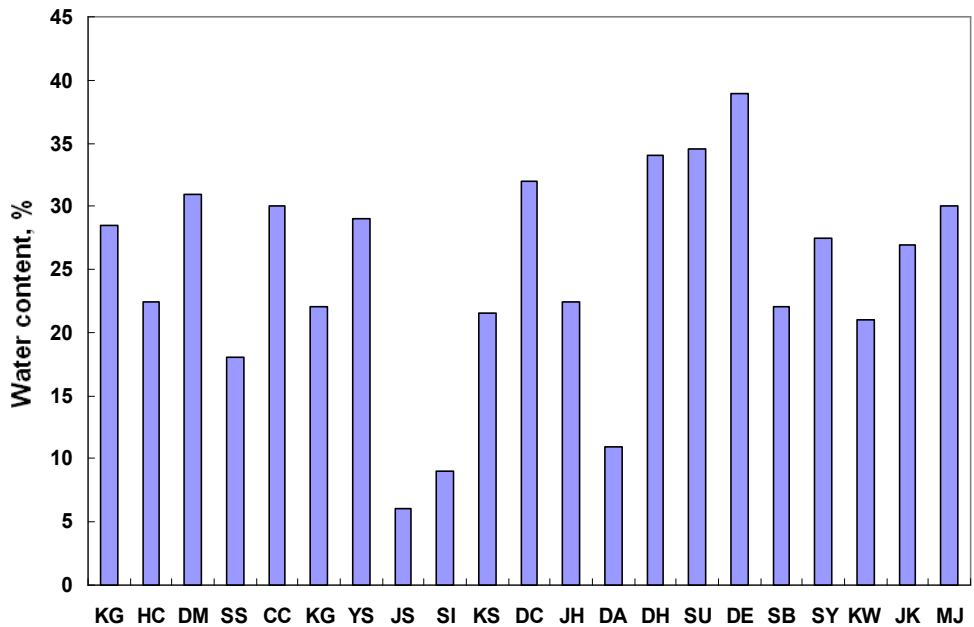


Figure 8. The liquid limit of byproduct aggregates.

응집력 지수(cohesive index, CI)는 소성지수(plasticity index, PI)와 소성한계(plastic limit, PL)의 비로 계산할 수 있으며, 토질역학에 있어 중요한 지표로 활용된다(Cornforth, 2005).

골재부산물의 액성한계는 모래함량에 대해서는 부의 상관($R^2 = 0.2949$)을 보였으나, 미사와 점토함량과는 매우 낮은 정의 상관(silt: $R^2 = 0.1743$; clay: $R^2 = 0.39$)을 보였다(Figure 9).

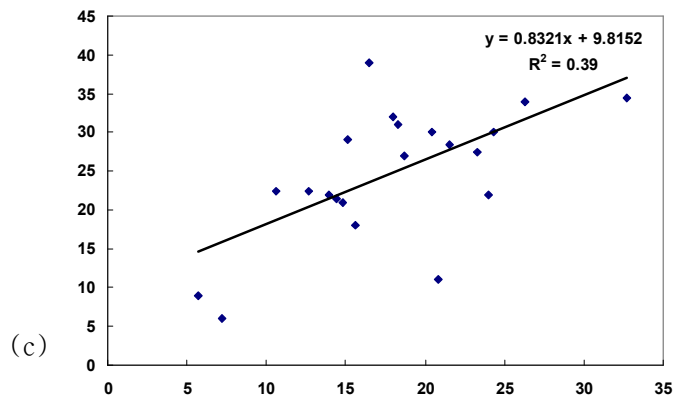
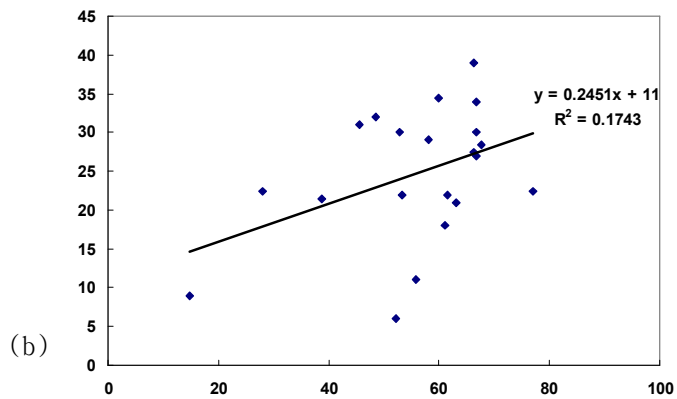
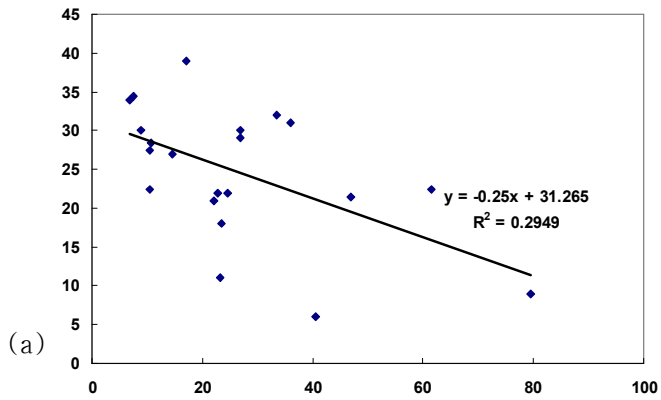


Figure 9. The correlation between liquid limit and particle size content of byproduct aggregates ((a) liquid limit - sand content, (b) liquid limit - silt content, (c) liquid limit - clay content).

4. 골재부산물의 화학적 특성

골재부산물의 pH, EC, 유기물 함량에 대한 분석 결과(Table 7), pH는 전라도의 JH, DA 사업장의 시료가 pH 6 정도로 약산성을 띠었으나 대부분 시료는 pH 8.4~ 10.9 범위의 염기성을 나타냈다(Figure 10). 전기전도도(EC)는 평균 167.88 μ S cm⁻¹ 로 측정되었으며, 분포 범위는 최소 33.00 μ S cm⁻¹ 에서 639.00 μ S cm⁻¹ 로 시료 간의 차이가 크게 나타났다. 골재부산물의 유기물 함량은 최소 0.29%에서 최대 1.13%의 분포를 보였고 평균 함량은 0.43%였다.

Table 7. The chemical properties of byproduct aggregates - pH, EC and organic matter content.

	pH	Electrical conductivity μ S cm ⁻¹	Organic matter content, %
Mean	8.72	167.88	0.43
Standard deviation	0.96	155.70	0.17
Minimum	6.20	33.00	0.29
Maximum	10.97	639.00	1.13

골재부산물의 평균 총질소 함량(T-N)은 0.069%로 최소 0.031%에서 최대 0.111% 범위에 있었다. 평균 암모니아태 질소 함량(NH₄⁺-N)은 30.39mg kg⁻¹ 였으며, 평균 질산태 질소 함량(NO₃⁻-N)은 17.40mg kg⁻¹ 였다(Table 8).

무기태 질소 중 암모니아태 질소 농도가 질산태 질소 농도 보다 2배가량 높은 것으로 나타났다. 이는 골재부산물의 pH가 알칼리인 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

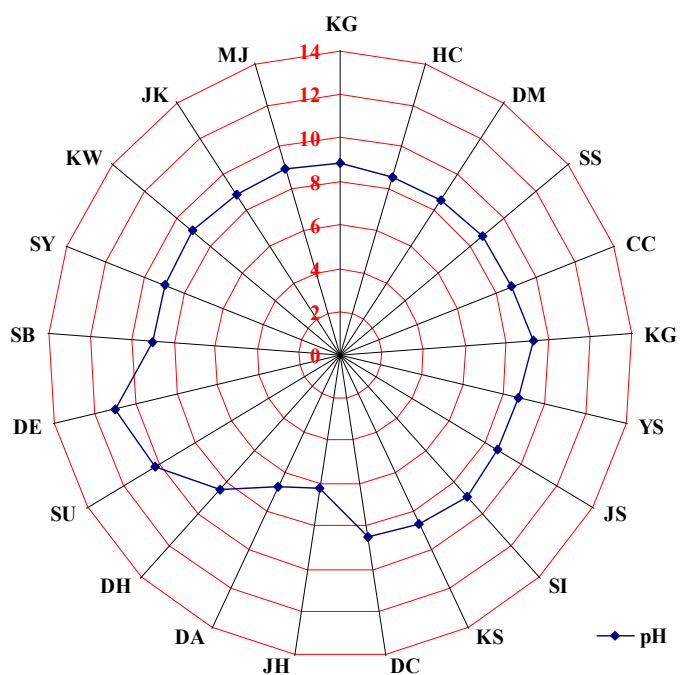


Figure 10. The pH distribution of byproduct aggregates.

Table 8. The chemical properties of byproduct aggregates - total nitrogen, ammonium and nitrate concentration.

	Total nitrogen %	NH ₄ ⁺ - N mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ - N mg kg ⁻¹
Mean	0.069	30.39	17.40
Standard deviation	0.022	23.98	11.99
Minimum	0.031	1.03	0.85
Maximum	0.111	67.20	30.80

골재부산물의 평균 유효인산함량은 12.98mg kg^{-1} 이었으며, 최소 10.15mg kg^{-1} 에서 최대 24.81mg kg^{-1} 의 범위에서 시료 간에 비교적 균일함을 보였다. 유효규산의 경우는 평균 유효규산함량이 117.47mg kg^{-1} 이었으나, 최소 19.58mg kg^{-1} 에서 최대 468.34mg kg^{-1} 의 범위로 시료 간의 변이가 크게 나타났다. 이는 규산함량이 인산함량 보다 원암의 광물 조성에 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 규소는 모든 작물에 대하여 필수양분은 아니지만 화분과와 그 밖의 일부 식물에 대하여는 필요한 성분으로 알려져 있다. 따라서 유효규산함량이 높은 일부 골재부산물은 규산질 비료로의 활용도 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다.

골재부산물의 평균 양이온교환용량(CEC)은 7.7cmolc kg^{-1} 로 일반 토양의 CEC인 10cmolc kg^{-1} 보다 낮았다(Table 9).

Table 9. The chemical properties of byproduct aggregates - available phosphate, silicate concentration and cation exchange capacity.

	Avail. - P_2O_5 mg kg^{-1}	Avail. - SiO_2 mg kg^{-1}	C.E.C. cmolc kg^{-1}
Mean	12.98	117.47	7.48
Standard deviation	3.82	103.91	4.14
Minimum	10.15	19.58	1.80
Maximum	24.81	468.34	17.40

골재부산물의 교환성 양이온은 Ca^{2+} 이 평균 $2.299\text{cmolc kg}^{-1}$ 로 가장 높았고, Mg^{2+} 평균 $0.472\text{cmolc kg}^{-1}$ 이었고, K^+ 은 평균 $0.021\text{cmolc kg}^{-1}$ 이었으며 Na^+ 은 평균 $0.055\text{cmolc kg}^{-1}$ 이었다 (Table 10). 따라서 골재부산물 입자 표면은 주로 2가 양이온으로 치환되어 있음을 알 수 있었다.

Table 10. The chemical properties of byproduct aggregates - exchangeable cation concentration.

	Ca ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	Mg ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	K ⁺ cmol _c kg ⁻¹	Na ⁺ cmol _c kg ⁻¹
Mean	2.299	0.472	0.021	0.055
Standard deviation	1.265	0.653	0.013	0.029
Minimum	0.742	0.039	0.046	0.015
Maximum	6.385	1.850	0.062	0.120

골재부산물의 재활용을 위해 양분 함유량뿐만 아니라 중금속 함유량도 매우 중요하다. 중금속은 환경 오염원이 될 수 있기 때문이다. 하지만 시료에 대한 중금속 분석 결과 채취한 골재부산물에는 전혀 중금속 문제가 없음을 보여주었다 (Table 11). 그러나 모든 사업장에서 배출되는 골재부산물이 중금속 문제에서 자유롭다고 할 수는 없기 때문에 안전성 확보를 위해 사전 분석이 전제되어야 할 것이다.

Table 11. The chemical properties of byproduct aggregates - heavy metal concentration and environmental limit level of Korean Ministry of Environment.

	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Fe	Mn
	----- mg kg ⁻¹ -----							
Mean	0.011	0.068	0.491	3.513	0.588	0.467	33.82	18.43
Standard deviation	0.013	0.037	0.304	3.273	0.343	0.345	27.55	11.52
Minimum	0.003	0.037	0.000	0.045	0.014	0.008	0.805	0.703
Maximum	0.062	0.169	1.093	11.98	1.477	1.261	106.4	49.14
Environmental limits (Min. of Environment)	1.500	4.000	50.00	40.00	300.0	100.0	-	-

5. 골재부산물의 광물학적 특성

토양 중 점토광물의 종류와 조성은 암석과 광물 그리고 이들의 풍화 산물인 점토 광물이 기후, 지형, 식생 등 상이한 토양 환경 조건과 평형을 이루기 위하여 물리, 화학 및 생물학적 작용을 수반하면서 토양 환경에 안정한 광물로 변화된다. 점토는 대부분 비표면적이 크고 음전하를 띠고 있어 보수력과 양이온 흡착력이 큰 2차 광물로 구성되어 있다는 것이 일반적인 지식이다.

따라서 골재부산물이 점토 크기의 입자를 많게는 30% 이상 함유하고 있다 할지라도, 이는 골재 생성 공정에서의 물리적 파쇄로 인해 발생하는 분진이나 잔재물이기 때문에 그 광물 조성은 원암과 일치하는 1차광물일 가능성이 높을 것으로 예측되었다. 이를 확인하기 위해 수행된 골재부산물 시료에 대한 X선 형광분석, X선 회절 분석 및 시차열분석 결과는 다음과 같았다.

가. 골재부산물의 X선 형광분석 결과

골재부산물 시료에 대한 X선 형광 분석 결과(Table 12), DM과 SS 시료를 제외한 나머지 19개 골재부산물 시료의 화학적 조성은 대부분 규산(Silica, SiO₂)이 차지하고 있었고, 그 함량 범위는 51~ 66%였다. 이들 시료의 구성성분 중 규산 다음으로 많은 것은 반토(Alumina, Al₂O₃)였고, 그 함량 범위는 17~ 27%로 분석되었다. 따라서 이들 시료는 80% 이상이 규산과 반토로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 반면에 DM과 SS 시료는 CaO의 함량이 각각 45.3%, 71.1%로 다른 구성 성분에 비해 월등히 많았으며, 규산 함량은 26.4%, 14.5%로 두 번째로 많은 성분이었다. 이는 DM과 SS 시료가 석회암 지역의 석산을 개발하면서 발생한 골재부산물이었기 때문인 것으로 판단된다. 그 외에 Fe₂O₃, K₂O, MgO는 합쳐서 10% 내외로 조사되었고, MnO이 소량 검출되었다. 그리고 원소를 규명하지는 않았지만 TiO 등을 포함할 것으로 예상되는 기타 성분이 검출되었다.

Table 12. The chemical composition of the byproduct aggregates.

Aggregate	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	Others
	----- Mass, % -----							
KG	63.4	18.7	5.2	4.8	2.4	2.4	0.08	2.9
HC	57.7	17.7	7.3	6.9	4.5	2.1	0.09	3.7
DM	26.4	9.9	4.4	2.3	9.7	45.3	0.39	1.5
SS	14.5	6.0	1.9	1.7	3.7	71.1	0.04	0.9
CC	66.1	17.1	2.2	5.7	0.9	3.7	0.02	4.2
GG	59.0	17.0	6.0	6.2	1.8	6.6	0.09	3.4
YS	62.0	18.7	4.4	5.9	1.7	2.8	0.07	4.3
JS	64.2	19.5	2.2	6.1	1.0	3.6	0.02	3.4
SI	62.1	18.4	4.6	7.2	1.6	3.3	0.07	2.8
KS	55.9	16.9	9.2	5.5	3.0	5.8	0.14	3.6
DC	60.7	22.2	3.9	6.1	1.4	2.6	0.11	2.9
JH	60.8	22.6	5.1	4.8	1.8	2.0	0.11	2.7
DA	55.9	26.9	5.9	4.5	1.8	1.9	0.13	2.9
DH	66.0	17.7	4.1	4.3	0.9	2.6	0.14	4.2
SU	53.3	18.5	5.9	4.8	4.9	9.5	0.19	2.8
DE	51.2	18.9	6.6	3.9	3.5	12.6	0.16	3.1
SB	60.1	21.5	4.4	6.3	2.3	2.5	0.13	2.9
SY	55.4	18.3	7.9	4.0	4.6	6.6	0.11	3.1
KW	64.5	18.8	2.6	5.9	1.2	3.5	0.04	3.6
JK	58.9	19.6	5.9	4.9	3.5	3.8	0.09	3.2
MJ	59.2	19.2	5.1	5.1	3.3	4.8	0.07	3.1

암석, 토양 또는 점토광물의 화학분석에 의하여 구한 SiO_2 와 Al_2O_3 의 함량을 분자비로 표시한 것이 규산/알루미나비(silica-allumina ratio)이며 규반비라고도 한다. 또한 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 함량을 R_2O_3 로 하고 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 로 나타낸 것을 규산-2·3산화물비 또는 규철반비라고 한다. 풍화과정에서 일반적으로 여러 종류의 원소는 암석, 토양 및 광물로부터 Na, Ca, K, Mg, Si, Al, Fe의 순서로 제거된다. 규산/알루미나비는 고온다우지역에서는 풍화가 진행되면서 낮아지며 반대로 비가 적게 내리는 지역에서 규소의 용탈이 적으면 규산/알루미나비는 커진다. 따라서 규산/알루미나비는 토양의 풍화도를 나타내는 지표가 된다(류, 2000).

풍화정도에 대한 지표로 사용되는 규산/알루미나비(silica-allumina ratio)는 1:1 광물 우세토양의 경우 2.36~ 3.63 정도를 나타내고, 2:1 광물 우세토양은 7 이상으로 비교적 높게 나타나는데, 골재부산물의 규반비는 1.70~ 3.42 로 1:1 광물 우세토양과 유사하게 나타났다. 이는 골재 부산물이 화학적 풍화 보다는 원암에서 기계적인 파쇄에 의한 단순 입자 크기의 축소로 보이며, 원암 가루, 즉 1차 광물로서 2차 광물이 거의 없기 때문이라 판단된다.

나. 골재부산물의 X선 회절분석 결과

점토광물의 회절형태는 많은 특징을 가지고 있다. 이러한 특징은 피크의 위치, 강도, 모양, 그리고 폭으로 나타난다. 피크의 위치는 $n\lambda = 2d\sin\theta$ 로 표현되는 Bragg법칙에 의해 결정된다. 석영과 같이 결정도가 높은 광물들은 예리한 피크를 만들며, 도메인 크기가 작은 점토광물의 경우에는 눈에 띄게 회절선이 넓어져서 점토광물의 회절형태임을 식별할 수 있다. 이와 같은 X선 회절특성을 이용하여 각개 광물을 식별하는 것을 정성분석이라 한다. 따라서 정성분석은 가장 강한 피크 또는 피크들을 나타내는 광물을 찾는 것으로 시작해서 그 광물이 갖는 약한 피크들의 위치를 발견해서 이를 확인하는 과정이다(문, 2006).

회절결과를 이용하여 광물을 동정하는 데는 하나발트법(Hanawalt)과 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standard) 카드법이 있는데, 본 연구에서는 JCDPS 카드법을 사용하였다.

분석 결과, 대부분의 골재부산물 시료가 화강암 또는 화강편마암 지역의 광물 조성을 보였으며, 일부 강원도 지역의 시료에서 석회암 지역 특성의 광물 조성을 보였다. 대표 시료로 사용한 경기도의 KG, 강원도의 DM, CC 및 전라도의 KS의

분석결과는 다음과 같다.

우선 화강암 또는 화강편마암 지역의 광물 조성을 보여주는 경기도 KG의 XRD그래프(Figure 11)와 전라도 KS의 XRD그래프(Figure 12)를 살펴보면, 두 시료 모두 피크 패턴이 유사하며 석영(quartz)과 단사녹니석(clinocllore)이나 금운모(phlogopite)가 주요 피크로 나타나고 있다. 석영은 대부분의 암석에 함유되어 있지만, 특히 화강암, 석영조면암 등의 산성화성암이나 편마암, 결정편암 등의 변성암 등의 주성분으로 되어 있다.

석영은 화학적 풍화에 대한 저항성이 강하기 때문에 다른 광물이 분해된 후에도 그대로 남아 있게 되어 토양 중의 모래의 주요 부분을 차지하고 있다. 이것은 식물의 생육에 있어서 영양분을 주지는 못하지만, 토양의 기초뼈대의 성분으로서 화학적 성질에 크게 관여한다.

강원도 CC의 골재부산물 시료에 대한 XRD그래프(Figure 13)는 KG와 KS 시료의 XRD그래프에서처럼 석영 피크가 가장 크게 나타났으나, 그 외에 백운석(dolomite)과 산화티타늄(anatase)의 피크가 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 백운석은 방해석의 돌로마이트화로 형성되는 탄산염 광물로 고회석이라고도 한다.

원암의 채굴지가 석회암지대인 강원도 DM업체의 골재부산물 XRD그래프(Figure 14)은 방해석(calcite)과 백운석(dolomite)이 주요 피크로 나타나, 골재부산물이 석회암에서 기인하고 있음을 확인시켜주었다. 골재부산물의 화학적 조성(Table 11)에서 보였듯이 DM시료는 칼슘산화물이 전체 조성의 45.3%를 차지하고 있어 이와 같은 결과를 뒷받침해주고 있다.

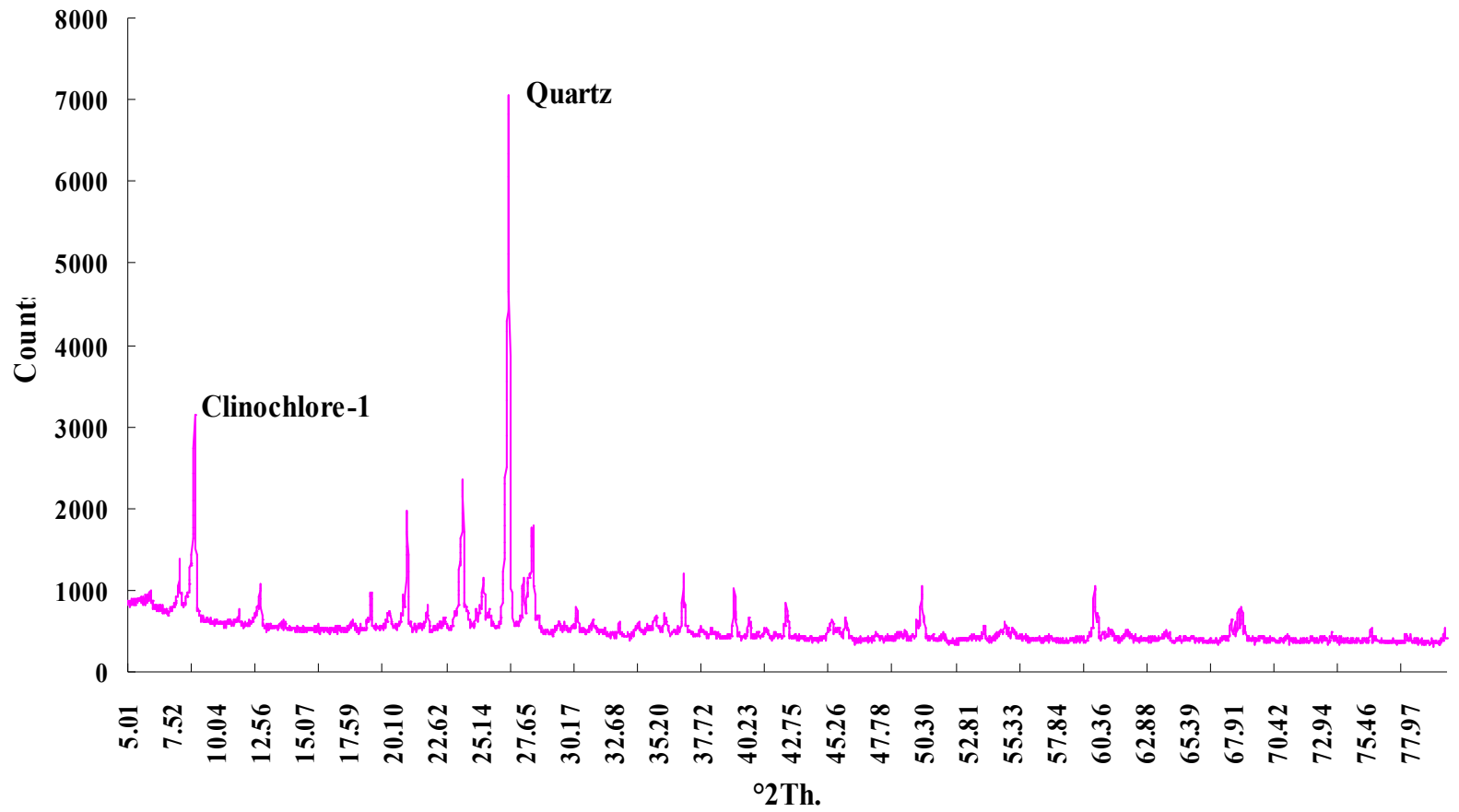


Figure 11. X-ray diffractogram of the byproduct aggregate sample from KG.

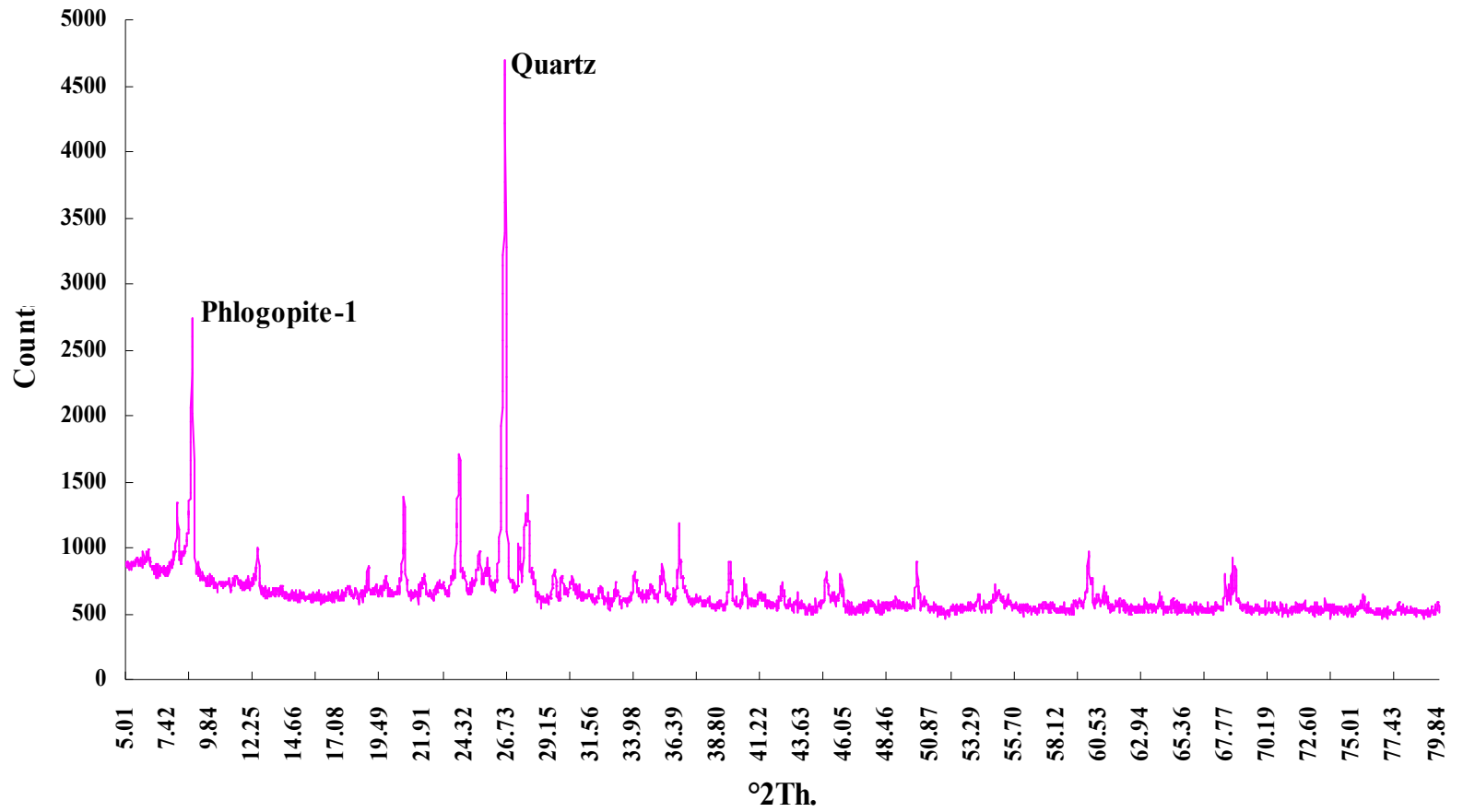


Figure 12. X-ray diffractogram of the byproduct aggregate sample from KS.

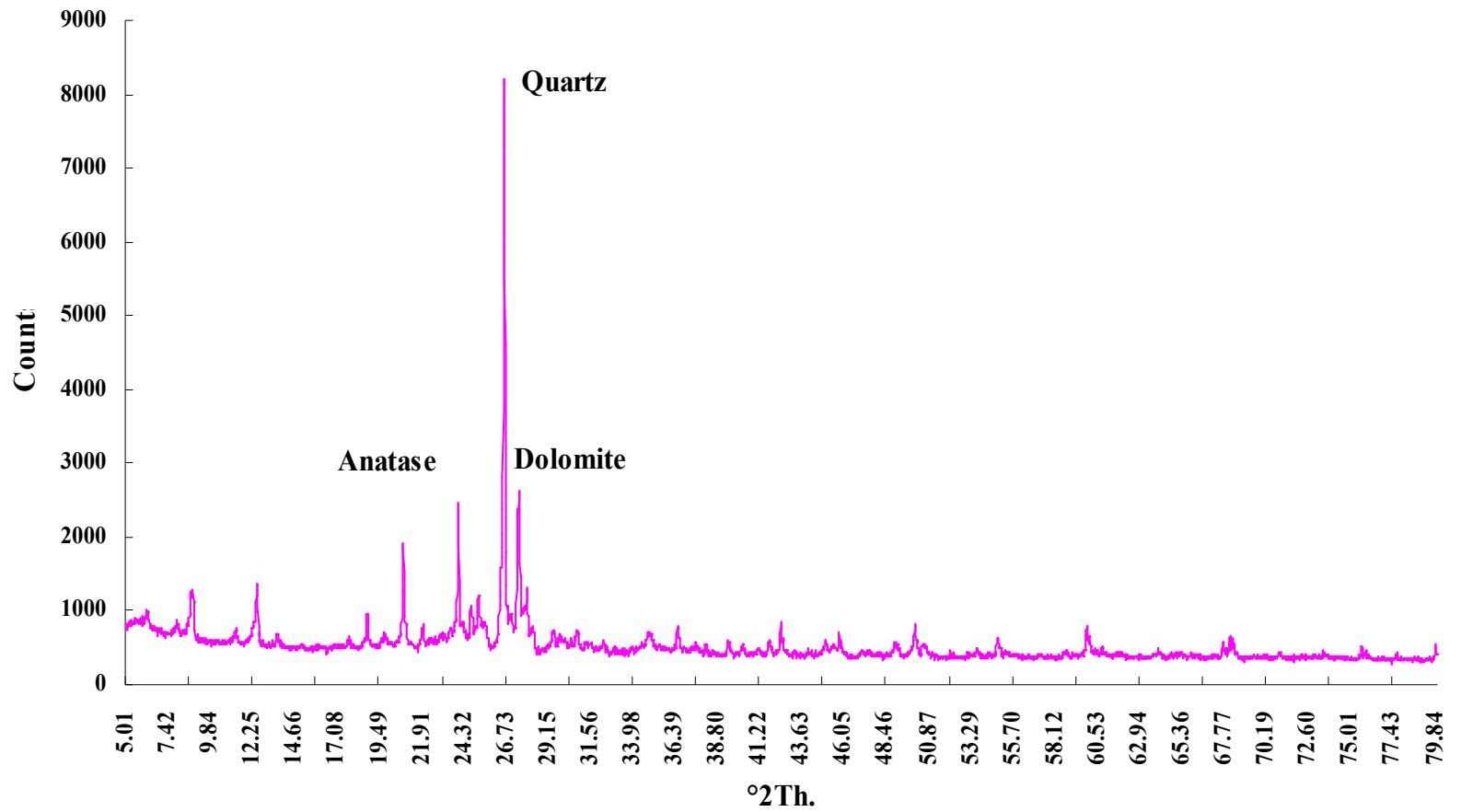


Figure 13. X-ray diffractogram of the byproduct aggregate sample from CC.

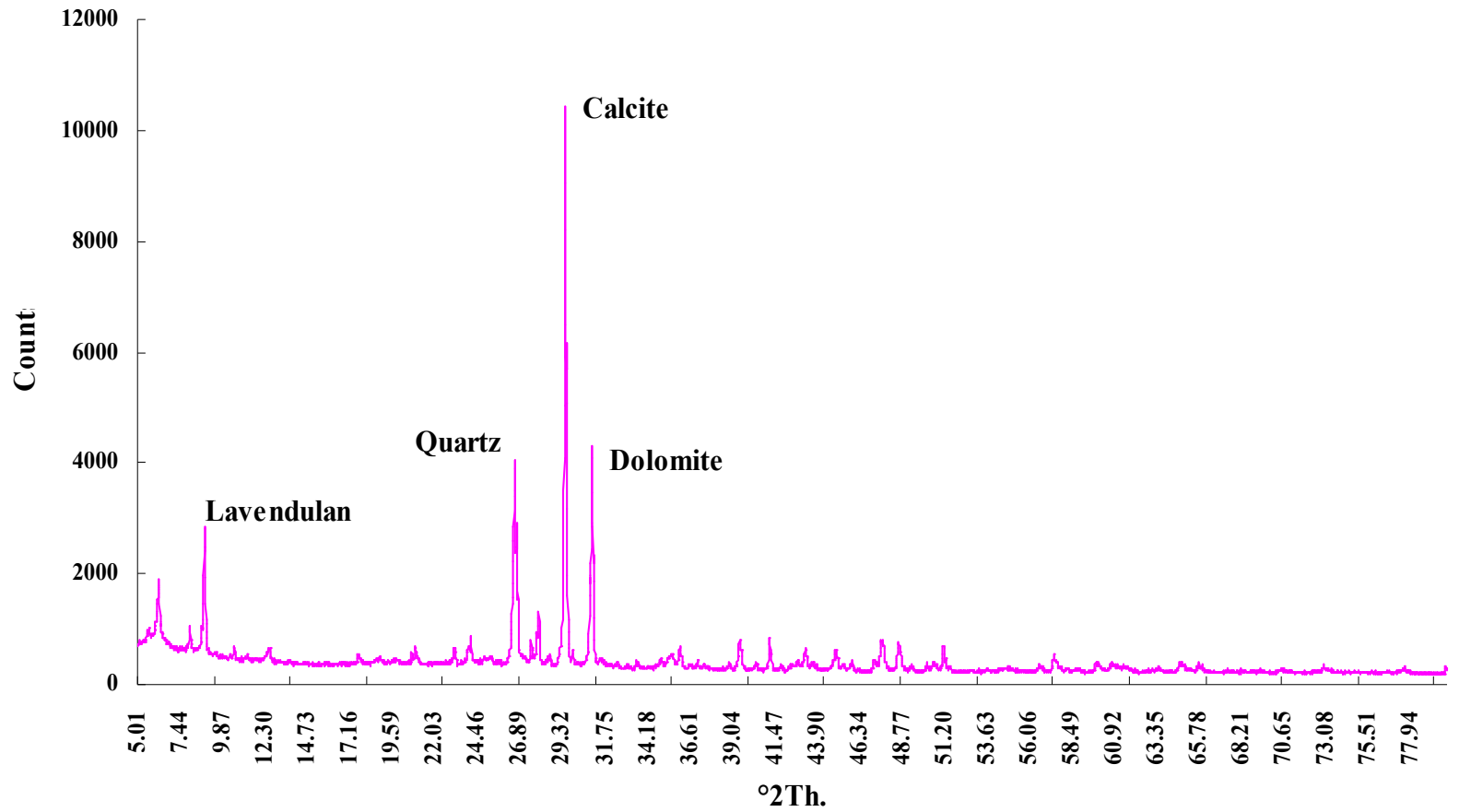


Figure 14. X-ray diffractogram of the byproduct aggregate sample from DM.

다. 골재부산물의 시차열분석 결과

점토광물 또는 일반 규산염광물은 가열을 하게 되면 일반적으로 탈수작용이나 기타구조의 분해 및 재결정작용에 따른 열적반응을 나타내는데, 이러한 여러 가지 성질의 변화, 즉 탈수작용, 재수화작용, 열용량의 변화 등을 측정하는 것을 열분석이라 한다. 이러한 성질의 변화 중 함수규산염광물인 점토광물에서 가장 중요한 것은 일정한 속도로 온도를 증가시키는데 기인되는 점토광물과 결합된 흡착수, 층간수 및 결정수의 손실에 따른 변화이다.

시차열분석은 가열에 따라 시료에서 발생하는 에너지 변화를 측정하는 방법 중의 하나로 DTA(differential thermal analysis)로 불리며, 보다 자세하게는 표준물질과 시료를 조절된 속도로 가열 또는 냉각시킬 때 시료와 표준물질 간의 온도 차이를 측정하여 기록하는 방법이다. 이 두 물질 사이의 온도 차이를 온도와의 관계로 도시하며, 이 때 만들어진 곡선을 DTA곡선이라고 한다.

시료와 표준물질과의 온도차를 ΔT 로 나타낸다. 시료의 온도가 표준물질과의 온도보다 낮아질 때 만들어지는 피크를 흡열피크(endothermal peak)라고 하며, 이 때 $-\Delta T$ 값을 갖고 반대로 시료의 온도가 표준물질의 온도보다 높아질 때 만들어지는 피크를 발열피크(exothermal peak)라고 하며 $+\Delta T$ 값을 갖는다. $\Delta T=0$, 즉 시료의 표준물질 사이에서 온도차가 없는 DTA곡선을 기준선으로 간주한다.

흡열반응은 열을 소비하는 반응으로서 흡착수, 층간수 및 결정수의 방출, 구조의 붕괴, 용융, 증발, 기화, 자성물질의 상전이 등 여러 가지 원인에 의하여 발생한다. 발열반응은 산화, 재결정화 작용 등에 의해 생긴다(문, 1996).

골재부산물 시료에 대한 시차열분석 결과, 뚜렷하게 두 가지 유형의 피크가 나타났다. 첫째는 열변화 곡선이 안정적이면서, 550°C에서 610°C 부근에서 주요한 천이를 보이는 유형(Figure 15, 16)이었고, 둘째 유형은 열변화 곡선이 불안정적이면서 여러 천이를 보이는 것(Figure 17, 18)이었다. 경기도 KG와 전라북도 KS 골재부산물 시료는 첫째 유형에 속하고, DM과 CC는 둘째 유형에 속하였다.

KG(Figure 15)와 KS 골재부산물 시료(Figure 16)에 대한 DTA곡선을 살펴보면, 두 곡선 모두 대체로 안정된 온도를 유지하다가 573°C 부근에서 뚜렷한 흡열과 발열 피크가 나타나고 있다. 국제열분석협회(International Confederation for Thermal Analysis; ICTA)에서 선정한 온도 교정용 표준물질 자료에서 석영이 573°C에서 상전이한다고 한 자료(Smykatz-Kloss, 1974)를 통해 볼 때 골재부산

물 시료에서 나타난 피크는 석영 때문인 것으로 판단된다.

보통 점토광물 중 카올리나이트(kaolinite)의 흡열피크는 약 500~ 600°C에서, 발열피크는 약 900~ 1,000°C에서 보이며, 몽모리로나이트(montmorillonite)의 흡열피크는 100~ 200°C과 200~ 300°C의 저온영역과 500~ 600°C의 고온영역에서 나타나고, 발열피크는 약 900~ 1,000°C에서 나타나는 것(Mackenzie, 1957)과 비교해 볼 때, KG와 KS 골재부산물 시료의 흡열과 발열피크에서는 이들 광물과 유사한 피크를 찾을 수 없었다.

두 번째 유형에 속하는 강원도의 DM(Figure 17)과 CC(Figure 18) 골재부산물의 DTA곡선은 앞의 두 시료와는 뚜렷한 차이를 보였다. DM 골재부산물 시료의 DTA곡선의 경우, 780°C 부근에서 뚜렷한 피크를 확인 할 수 있었는데 이는 주로 방해석으로부터 CO₂ 방출에 의한 것으로 보이며 방해석의 함량 차이에 따라 피크의 크기는 달라질 수 있다. CC 골재부산물 시료의 DTA곡선의 경우, 600°C 부근에서 나타난 미약한 흡열반응 피크는 X선 회절분석에 의해서 확인된 광물과 비교하여 녹니석(chlorite)에 의한 반응으로 생각된다.

Mackenzie(1957)와 Smykatz-Kloss(1974)에 의하면, 녹니석은 600~ 700°C의 고온영역에서 흡열피크가 나타나며, 800~ 900°C의 범위에서 발열피크가 나타난다고 보고하였다. 녹니석은 2:1형 점토광물에 속하며, 층간에 수산화물판(hydroxide sheet)가 존재한다(류, 2000).

DTA곡선에 흡열 및 발열 피크와 함께 표시되는 열변화에 따른 시료의 무게 감량 변화 분석결과에 따르면, 화강암이나 화강편마암을 모암으로 하는 시료인 KG와 KS 골재부산물의 경우는 열변화 곡선이 완만하게 감소하는 경향(Figure 15, 16)을 보이는 반면에 석회암을 모암으로 하는 시료인 DM과 CC 골재부산물의 경우는 700°C 부근에서 급격히 감소되는 것을 확인 할 수 있다(Figure 17, 18). 이러한 열변화에 따른 시료의 무게 감량 변화의 차이는 역시 방해석으로부터 방출되는 CO₂에 기인하는 것으로 판단된다.

Sample: KG
Size: 8.1114 mg

TGA-DTA

Run Date: 08-Nov-2006 02:03
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

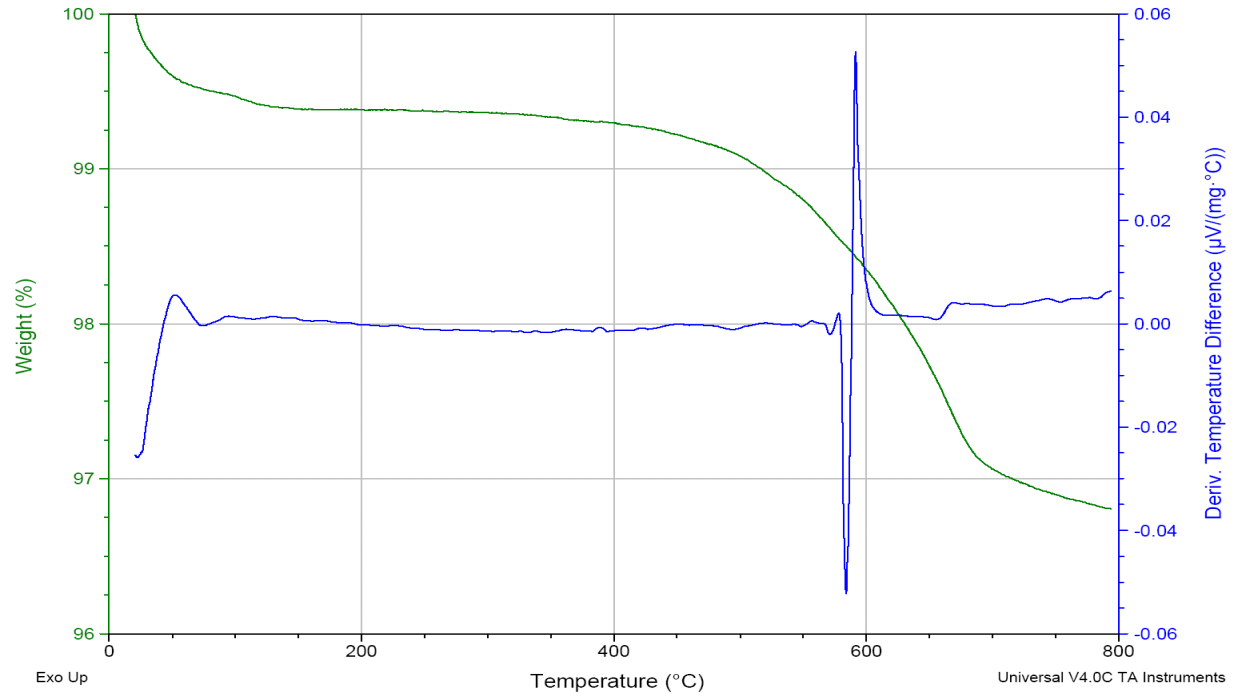


Figure 15. TGA-DTA thermogram of the byproduct aggregate sample from KG.

Sample: KS
Size: 11.5803 mg

TGA-DTA

Run Date: 10-Nov-2006 11:27
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

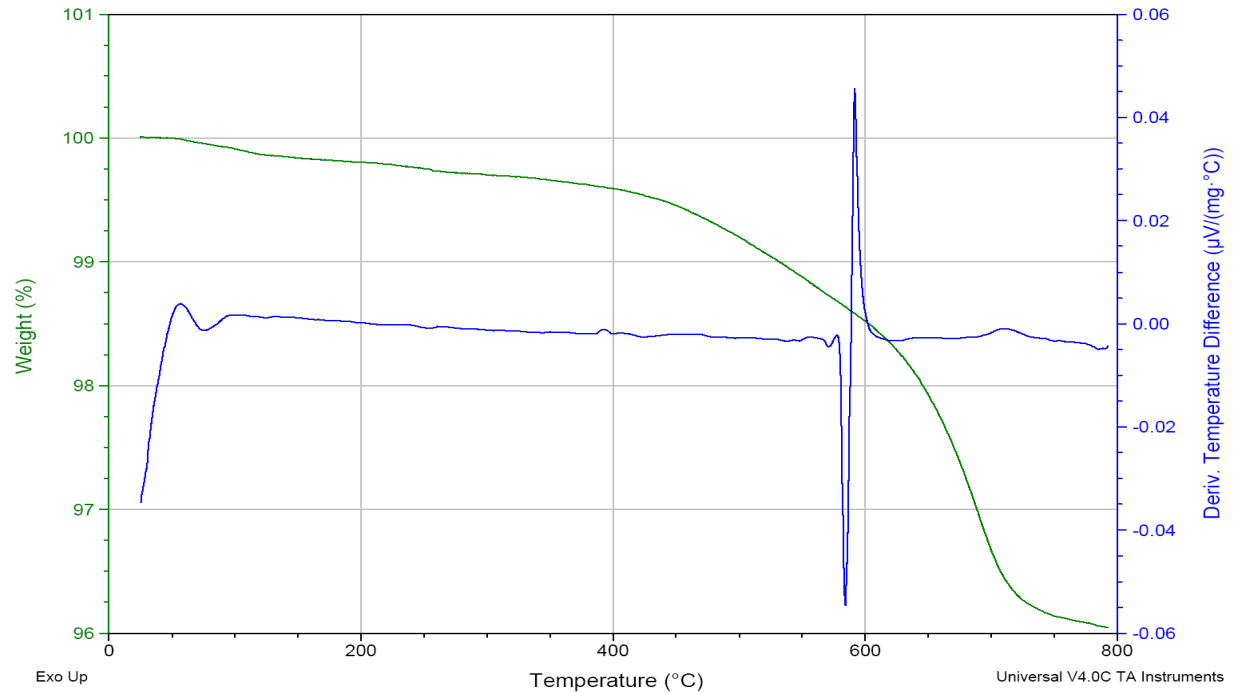


Figure 16. TGA-DTA thermogram of the byproduct aggregate sample from KS.

Sample: DM
Size: 10.4418 mg

TGA-DTA

Run Date: 22-Nov-2006 14:27
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

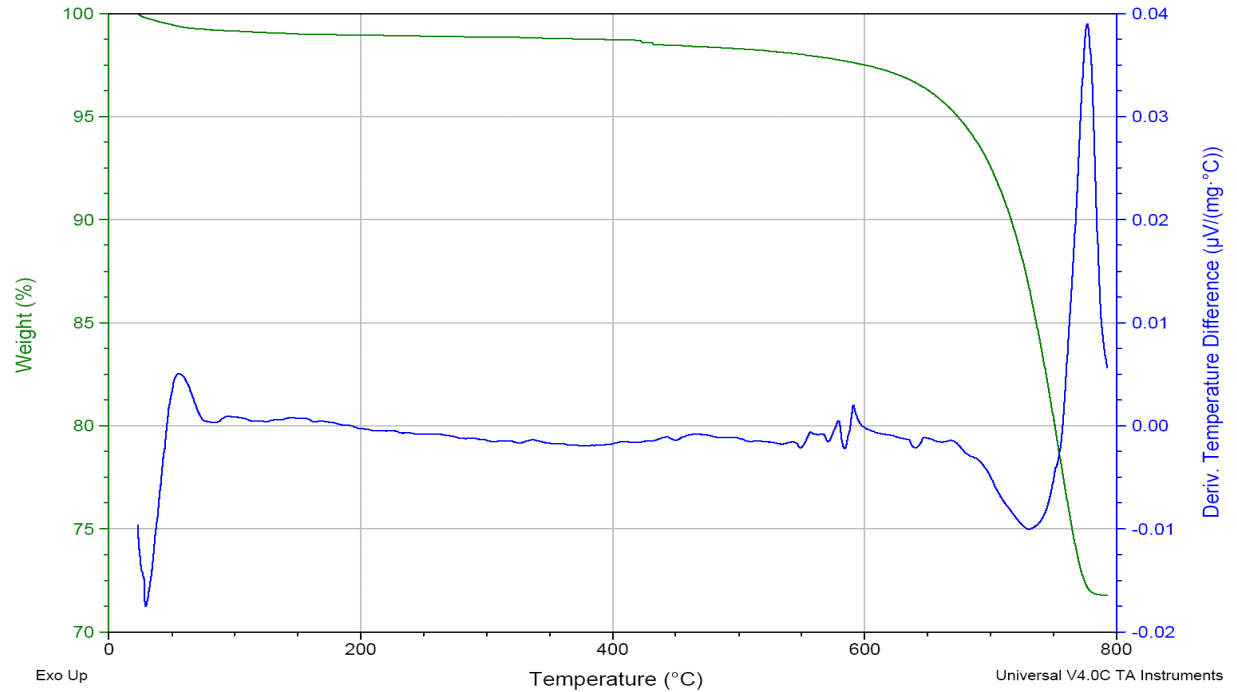


Figure 17. TGA-DTA thermogram of the byproduct aggregate sample from DM.

Sample: CC
Size: 9.6005 mg

TGA-DTA

Run Date: 13-Nov-2006 13:23
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

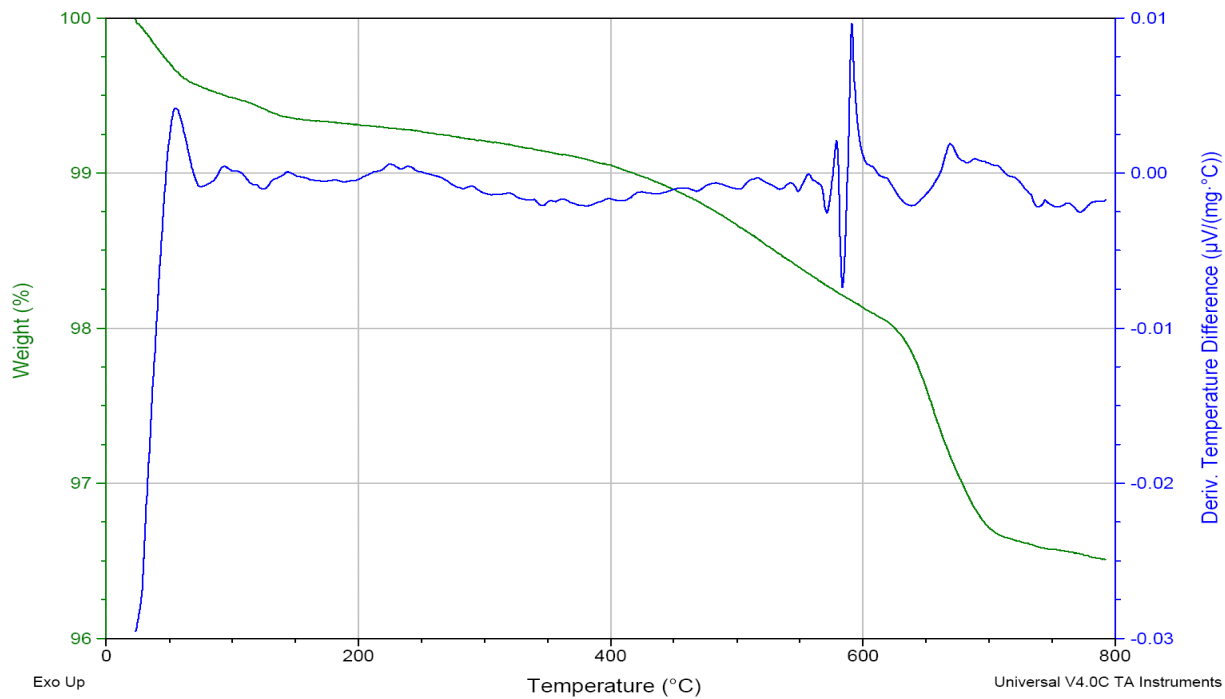


Figure 18. TGA-DTA thermogram of the byproduct aggregate sample from CC.

제2절 유·무기계 재료 투입이 골재부산물 토양재 특성에 미치는 효과

1. 골재부산물 개량 시험

21개의 골재부산물 시료 중 경기도의 KG, 강원도의 CC, 전라도의 KS 사업장 등의 3개의 시료를 택하여 유기질 계통의 개량제로 코코피트(2:1압축, 스리랑카), 피트모스(캐나다산 스피그넘 피트모스), 퇴비(돈분 톱밥 발효퇴비)를 무기질 계통의 개량제로 인산석고(남해화학), 마사토를 이용해 개량효과를 조사하였다. 각 처리구와 그 배합비(부피기준)는 Table 13과 같으며, 골재부산물 100% 처리구(ORI)와의 물성 차이를 비교하였다.

Table 13. The description of treatment for improving byproduct aggregate properties.

	Coco-peat	Peat-moss	Compost	Phosphogypsum	Coarse sand	Reference
	CP10 [#]	PM10	COM10	PG10	CS50	ORI ^{##}
Treat	CP25	PM25	COM25	-	-	MIX ^{###}
	CP50	PM50	-	-	-	-

The number in the treat name means the mixing proportion in volume.

Byproduct aggregates only

Byproduct-aggregates:cocopeat:peatmoss:compost:phosphogypsum:coarse-sand

= 5 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1

각각의 개량제는 골재부산물을 구성하는 입자들의 입도가 매우 작으면서 고르기 때문에 발생할 것으로 예상되는 가장 큰 문제점인 물리성 불량을 개선시키는

것을 1차 목적으로 하고 있으며, 부수적으로 유기물 함량과 양분 함량의 증대 효과를 보기 위함이었다. 인산석고는 칼슘에 의한 입단 구조 향상 및 인산비료 보충을 기대하고 사용되었다.

처리에 따른 토양의 물리 화학적 특성을 분석하여 개량 효과를 검증하였다. 물리성으로는 수리전도도, 유효수분함량, 가소성과 점착성 변화를 조사하였다. 화학성으로는 pH, 유기물 함량, 총질소 함량, 유효인산함량을 조사하였다. 분석 방법은 앞의 골재부산물 시료 분석과 같았다.

2. 유·무기계 재료 투입이 골재부산물 토양재 특성에 미치는 효과

가. 물리적 특성에 미치는 영향

1) 수리전도도

토양 내에서 투수 속도라 함은 물이 토양체를 통과하는 속도이다. 자연 상태에서 중력에 의한 수직 이동을 배수라 한다. 배수 속도는 포화된 토양에서 중력에 의하여 내려가는 상태를 기준으로 한다. 토양 조사에서 투수 속도가 하루에 0.025cm 이하의 속도이면 극히 느림, 1.5~ 5.0 cm이면 보통, 51cm 이상이면 극히 빠름으로 구분한다.

① 극히 느림 : $< 0.025 \text{ cm hr}^{-1}$

② 매우 느림 : $0.025 \sim 0.15 \text{ cm hr}^{-1}$

③ 느림 : $0.15 \sim 0.50 \text{ cm hr}^{-1}$. 토양의 투수가 느림보다 느리면 캠프 용지, 산책 공원 용지, 운동장 및 일반 밭 경작지로 부적합함.

④ 조금 느림 : $0.5 \sim 1.5 \text{ cm hr}^{-1}$. 토양의 투수가 조금 느림보다 느리면 정화조 저류지와 관개 농업 용지로 부적합함.

⑤ 보통 : $1.5 \sim 5.0 \text{ cm hr}^{-1}$

⑥ 조금 빠름 : $5.0 \sim 15 \text{ cm hr}^{-1}$. 토양의 투수가 조금 빠름보다 빠르면, 정화능이 적으므로, 정화조 저류조 용지 또는 폐수 관개 용지로 부적합함.

⑦ 빠름 : $15 \sim 50 \text{ cm hr}^{-1}$

⑧ 매우 빠름 : $>50 \text{ cm hr}^{-1}$

투수속도는 엄밀히 말하면 수리 구배가 1일 때의 수리전도도와 같은 값을 갖는다.

$$v = K \times I$$

(v 는 투수속도(m s^{-1}), K 는 수리전도도(m s^{-1}), I 는 무차원의 수리 구배임.)

Table 14은 토성에 따른 대표적인 수리전도도이다(산림청, 2006). 수리전도도는 토양 구조와 용적밀도에 따라서 수 배 또는 수백 배까지 다르다. 예를 들어 입단 구조가 잘 발달되어 있는 양토는 $2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ 의 수리전도도를 보이나, 분산되고 다져진 토양은 $1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ 정도를 보인다. 수리전도도가 $1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ 이상인 경우에는 지하수위가 높지 않은 한 배수 문제가 발생하지 않는다.

대부분의 토양은 $1 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 범위의 수리전도도를 보이는 데, 이러한 토양에 대해서는 관리 지하수위, 수리전도도와 강수량 및 배수 요구량에 따라서 배수 설계를 해야 한다. $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 이하의 토양에 대해서는 투수 불량에 의해 배수 관리가 매우 어려우므로, 조경 식재용 토양으로 부적절하다.

Table 14. The hydraulic conductivity with soil texture.

Soil classification	Hydraulic conductivity (cm s^{-1})
Gravel	150 ~ 20
Sand	$12 \sim 2.0 \times 10^{-1}$
Sandy soil	$2.0 \times 10^{-1} \sim 2.6 \times 10^{-3}$
Sand-loamy soil	$1.0 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-4}$
Loamy soil	$2.0 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-5}$
Clay loamy - clay soil	$0.3 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$

골재부산물에 대한 개량 효과 분석 결과, 세 종류의 골재부산물 자체(ORI)의

평균 수리전도도는 $4.13 \times 10^{-4} \text{cm s}^{-1}$ 로 양토(loamy soil)의 수리전도도(Table 14)와 비슷하였으나, 유·무기계 개량재를 혼합한 골재부산물 개량 토양의 수리전도도는 평균 $5.16 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ 로 사질토양(sandy soil)의 수리전도도(Table 14)와 유사했다. 따라서 골재부산물에 혼합해준 재료와 그 재료의 투입량에 따라 차이가 있으나 평균적으로 100배 이상 수리전도도가 증가되었음을 확인할 수 있었다.

재료별로는 퇴비를 혼합한 골재부산물 토양재(COM25)의 수리전도도가 $9.8 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ 로 가장 높았고, 퇴비, 코코피트, 피트모스, 인산석고, 마사토를 각각 10%로씩 혼합한 골재부산물 토양재(MIX10)의 수리전도도가 $7.4 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ 로 두 번째로 높았다. 코코피트와 피트모스를 혼합한 골재부산물 토양재(CP10, CP25, CP50, PM25, PM50)의 수리전도도는 $2.2 \times 10^{-2} \sim 4.7 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ 의 범위로 측정되어 다른 처리에 비해 2~4배가량 작았다.

인산석고를 10% 혼합한 골재부산물 토양재(PG10)의 평균 수리전도도($7.3 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$)가 마사토를 50% 혼합한 토양재(CS50)의 평균 수리전도도($5.3 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$)보다 높게 나타났지만, CS50의 측정치 변이가 심해 차이를 받아들이기는 충분하지 못하다고 판단되었다. 한편 혼합재료가 동일한 조건에서 투입량을 달리한 골재부산물 토양재의 수리전도도 측정치에 차이가 있었으나, 측정값의 변이가 커 95% 신뢰수준에서 유의성 있는 차이라 판단하기는 어려웠다(Figure 19).

이와 같은 결과로부터 수리전도도 증가 효과에 대한 경향을 유추해 보면, 유기물 중에는 퇴비의 효과가 무기물 중에서는 인산석고의 효과가 클 것으로 예측되었다. 또한 MIX10과 같이 유기, 무기계 재료를 혼합해서 사용하는 것이 골재부산물 토양재의 수리 특성을 개선시키는데 더 유리할 것으로 판단되었다.

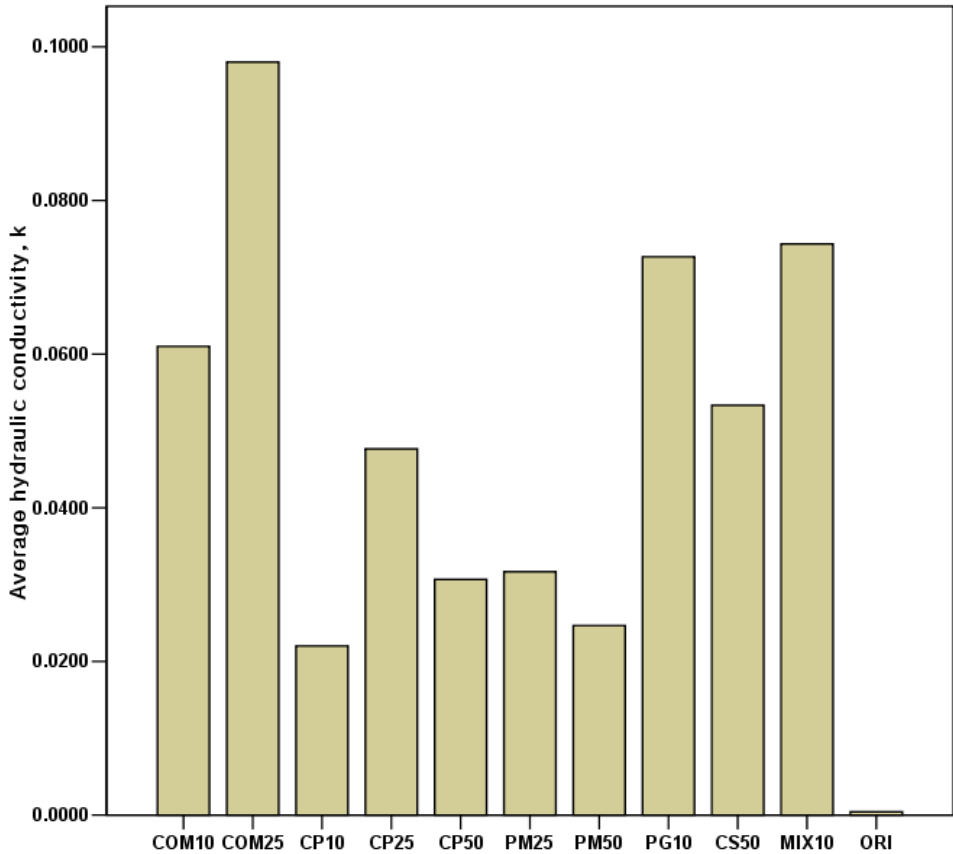


Figure 19. The effect of several conditioners on hydraulic conductivity (COM: compost; CP: cocopeat; PM: peatmoss; PG: phosphogypsum; CS: coarse sand; MIX: compost-cocopeat-peatmoss-phosphogypsum-coarse sand; ORI: original byproduct aggregate; number: mixing ratio based volume).

2) 유효수분함량

보수력은 점토 함량이 많을수록, 그리고 유기물 함량이 많을수록 크다. 그러므로 사양토보다는 양토나 식양토의 보수력이 크다. 그리고 사질양토 보다는 미사질양토의 보수력이 크다.

모래가 대부분인 사양토의 포장용수량은 11.3%이고, 위조계수가 3.4%에 불과하다. 유효수분은 7.8%이다. 점토가 많은 식양토의 포장용수량은 21.5%이고, 위

조계수는 10.2%이다. 식양토의 유효수분은 11.33%로 사토의 두 배이다. 직경 2mm 이상인 자갈은 보수력이 사토의 1/2 이하로 매우 작다(Table 15)(산림청, 2006).

Table 15. The water retention capacity with soil texture.

Soil texture	Field capacity		Wilting point		Available water	
	%	cm	%	cm	%	cm
Sand (S)	6.8	2.2	1.7	0.6	5.1	1.7
Lomy sand (LS)	8.5	2.7	2.3	0.7	6.2	2.0
Sandy loam (SL)	11.3	3.7	3.4	1.1	7.9	2.6
Fine sandy loam	14.7	4.8	4.5	1.5	10.2	3.3
Loam (L)	18.1	5.9	6.8	2.2	11.3	3.7
Silty loam (SiL)	19.8	6.4	7.9	2.6	11.9	3.9
Clayey loam (CL)	21.5	8.3	10.2	3.3	11.3	3.7
Silty clayey loam (SiCL)	22.3	7.2	12.2	3.3	10.1	3.3
Clay (C)	22.6	8.8	14.7	4.0	9.9	2.6
Organic soil	81.0	31.6	27.6	9.0	53.4	17.3

골재부산물 시료의 평균 유효수분함량은 2.71%로 모래의 5.1% 보다 훨씬 적었다. 따라서 골재부산물의 녹화용 토양재로의 개발을 위해서는 열악한 보수력의 개선이 필요하다. 여러 유·무기계 재료를 혼합한 결과 유효수분함량의 증가를 확인할 수 있었다. 그 중에서 코코피트와 피트모스를 혼합한 처리구(CP25, PM25)에서의 유효수분함량이 가장 높았으며, 7~ 9% 범위로 조사되었다(Figure 20).

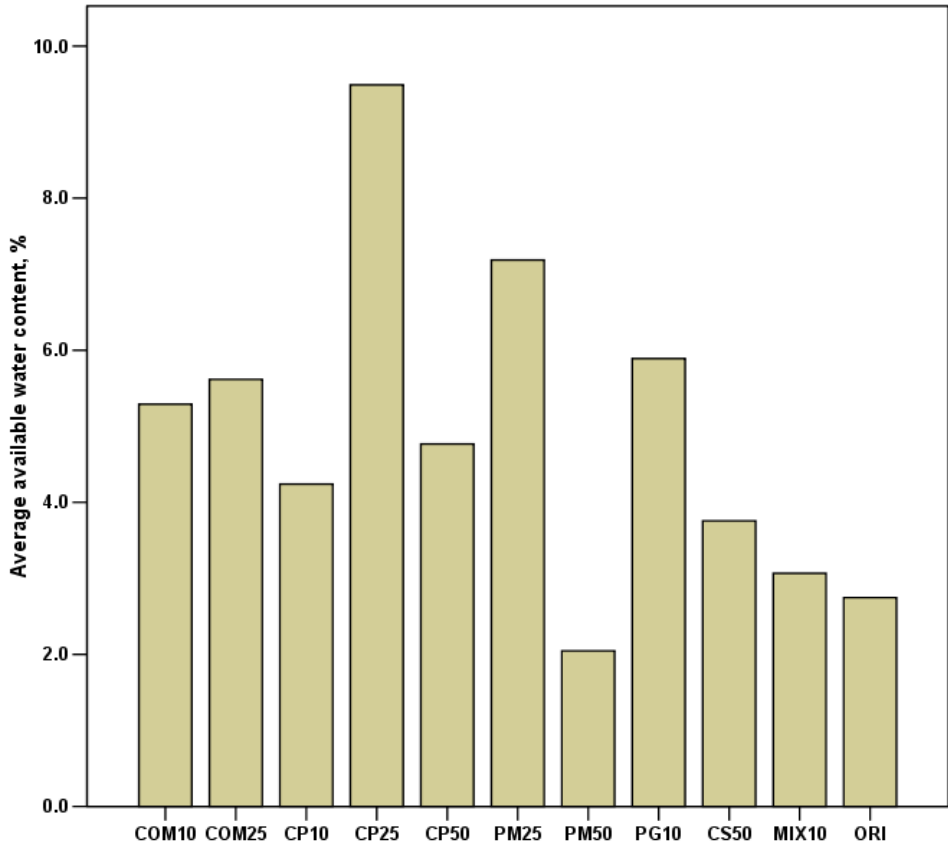


Figure 20. The effect of several conditioners on available water capacity.

3) 점착성과 가소성

골재부산물을 이용한 녹화용 토양재는 비탈면에 부착하는 재료이기 때문에 점착력이 중요하고 호스를 통해 이송되기 때문에 가소성 또한 중요하다. 이에 대한 시험 결과, 유기계 물질과 무기계 물질을 모두 혼합해 준 경우(MIX10)의 점착성과 가소성이 가장 많이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 각각의 재료에 대해서도 혼합비율이 25%가 넘게 되면 오히려 점착성과 가소성이 떨어지는 것으로 조사되었다(Table 16).

Table 16. The effect of several conditioners on the stickiness and plasticity of soil materials (A: great; B:normal; C: weak; D: none).

Treatment	Stickiness grade	Plasticity grade
COM10	C	B - C
COM25	C - D	B - C
CP10	C	B - C
CP25	C - D	B - C
CP50	C - D	C - D
PM25	C - D	B - C
PM50	C - D	C - D
PG10	C - D	B - C
CS50	C - D	C - D
MIX10	A - B	B
ORI	C	B - C

나. 화학적 특성에 미치는 영향

1) pH

식물과 미생물의 서식에 알맞은 토양의 pH는 중성에 가까운 5.5에서 7.5이나, 식물과 미생물의 종류에 따라서 다르다. 어떤 식물은 매우 낮은 pH인 4.5에서도 적응하며, 높은 pH인 8.3에서 사는 식물도 있다.

대부분의 산림 토양 pH는 계절적으로 변화하며 겨울에는 일반적으로 다른 계절에 비해 높고 여름철에 가장 낮으며, 연중 pH 1.0 범위에서 변화한다. 특히 임상의 pH는 신선한 낙엽으로부터 염기가 방출되는 시기인 가을이 가장 높고, 토양 pH는 같은 토양에서도 층위 사이에 상당한 차이를 보이는데 표토층의 pH가 심토층보다 낮은 것은 표토층으로 부터 양분의 용탈이나 식물 뿌리의 양이온 흡

수과정동안 발생된 수소이온이 토양 내에서 증가하기 때문이다. 토양 pH는 미생물의 활성이나 양분 유효도에 간접적인 영향을 미치기 때문에 결과적으로 임목 생장에 직접적으로 영향을 미친다.

보통 묘포 토양의 경우 침엽수 묘포는 pH 5.2~ 5.6, 활엽수 묘포는 pH 5.6~ 6.0 정도가 이상적이며, 대부분의 임목들은 pH 4.5~ 6.5에서 잘 자란다. 그러나 pH 5.0 이하의 산림지역에는 침엽수를 식재하는 것이 바람직하다.

골재부산물 자체(ORI)의 pH는 8.7로 높은 알칼리성을 띠고 있었다. 하지만 유기물질과 무기물질의 투여로 pH가 약알칼리성에서 중성 가까이로 낮추어지는 효과를 볼 수 있었다(Figure 21). 단일 재료 투입 효과로는 인산석고 처리구의 pH가 7.2로 pH를 낮추는데 가장 효과가 좋았으며, 다른 재료 즉 퇴비, 코코피트, 피트모스의 경우 투입량이 많아질수록 pH 감소폭이 커지는 경향을 보였다. 골재부산물에 퇴비를 혼합한 경우는 8.1에서 7.9로, 코코피트를 혼합했을 때는 7.9에서 7.4로, 피트모스의 경우에는 8.0에서 7.7로 감소하였다. 그러나 pH가 약산성 영역까지 감소된 처리구는 MIX10뿐이었으며, 이때의 평균 pH는 6.4이었다.

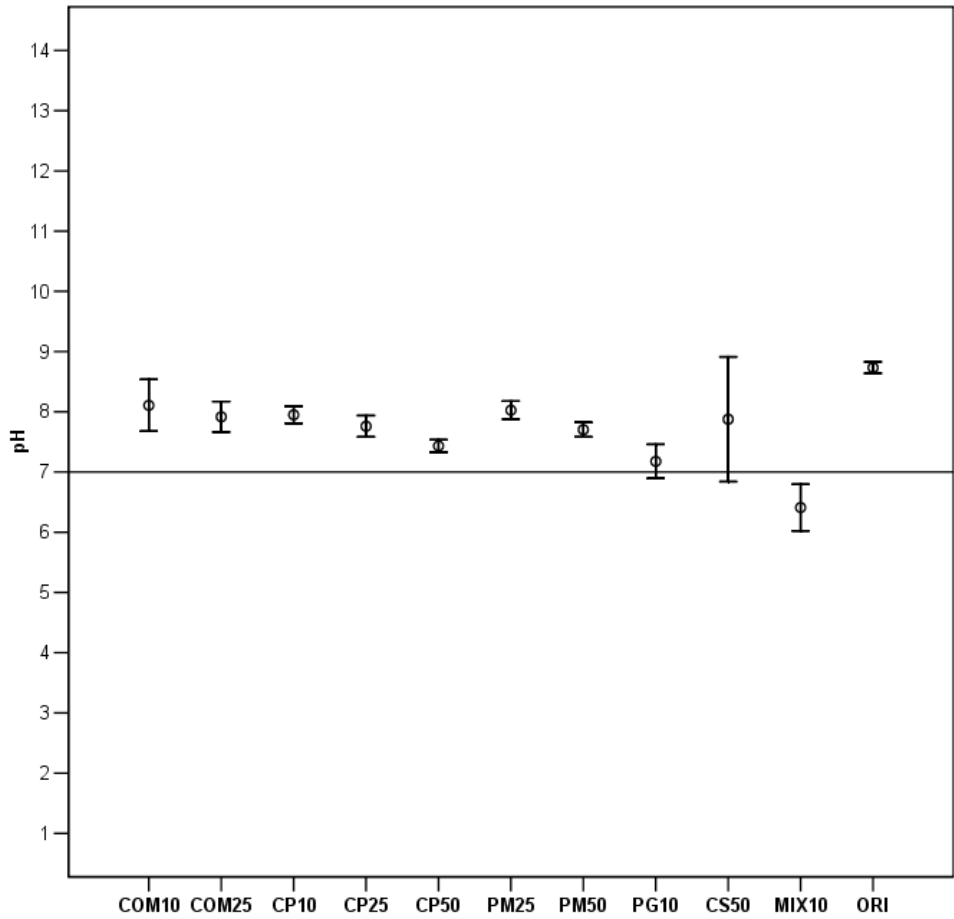


Figure 21. The effect of several conditioners on pH of soil material (COM: compost; CP: cocopeat; PM: peatmoss; PG: phosphogypsum; CS: coarse sand; MIX: compost-cocopeat-peatmoss-phosphogypsum-coarse sand; ORI: original byproduct aggregate; number: mixing ratio based volume; Error bar: 95% confidence level).

2) 유기물 함량

토양 유기물은 광물과 함께, 토양 중 가장 중요한 조성분으로, 동·식물의 유체가 분해되어 미생물체 또는 부식으로 변환된 토양 내의 유기물을 말한다. 토양

유기물의 함량은 0.5~ 5 %로 적지만, 토양의 성질에 대한 토양 유기물의 영향은 그 함량에 비하여 매우 크다. 토양 유기물은 미생물과 고등식물에 필요한 여러 가지 양분의 저장고이며, 토양의 물리적 화학적 성질을 결정한다. 토양 유기물에 의하여 이루어진 안정된 토양의 성질은 극히 일부를 제외하도 대부분 식물 생육에 이롭다.

토양 유기물의 기능은 다음과 같이 구분해서 설명될 수 있다.

- 토양 유기물은 직접 또는 미생물 활동을 통해 간접적으로 토양 입단을 만들고 유지하는 역할을 하여, 토양 물리성을 좋게 한다. 토양 입단이 잘 발달한 토양은 부드러우며, 통기성과 배수성이 좋아진다. 식물 뿌리 뻗음이 좋다.

- 토양 유기물은 비료가 시용되지 않은 토양에서 공급되는 영양소의 90에서 95%를 공급하는 영양소의 주공급원이다. 그리고 토양 유기물 함량 2% 이상인 토양에서 유기물은 유효 인산과 유효 황의 주공급원이다.

- 토양 유기물은 양이온 교환 용량(CEC)에 기여한다. 우리나라 토양의 CEC는 평균 10 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 인데, 유기물의 CEC는 200~ 400 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이다. 토양 유기물 함량이 2~ 3 %이므로, 토양 CEC의 30~ 70%를 유기물이 기여한다. 따라서 토양 유기물은 산성, 알칼리성, 염류도, 농약과 독성 중금속의 분해와 유해도 등의 급격한 변화에 완충 작용을 한다.

- 토양 유기물은 포장 용수량을 높여주는 역할을 한다. 특히 사질토에서 유효수분 보지력을 높이고, 세립질 토양에서는 공극을 많게 하여 통기성과 투수성을 좋게 한다.

- 토양유기물은 토양 표면에 잔재물로 남겨져 있을 때 멀칭의 효과로 토양의 유실을 방지하고, 토양 수분의 손실을 줄이고, 뜨거운 한낮의 과도한 온도 상승을 막아준다. 겨울에는 보온 효과가 있다.

이와 같이 유기물은 토양의 기본적인 특성을 좌우하는 결정적인 역할을 하기 때문에 골재부산물의 물성을 개량해서 녹화용 토양재로 개발하기 위해서는 반드시 유기물 재료가 투입되어야 한다.

골재부산물 자체의 평균유기물함량은 0.41%에 불과하였는데, 유기계 물질을 투입함으로써 최고 10.3%까지 증가되었다. 처리구 중에서 MIX10의 유기물함량이

가장 높은 것으로 조사되었다(Figure 22).

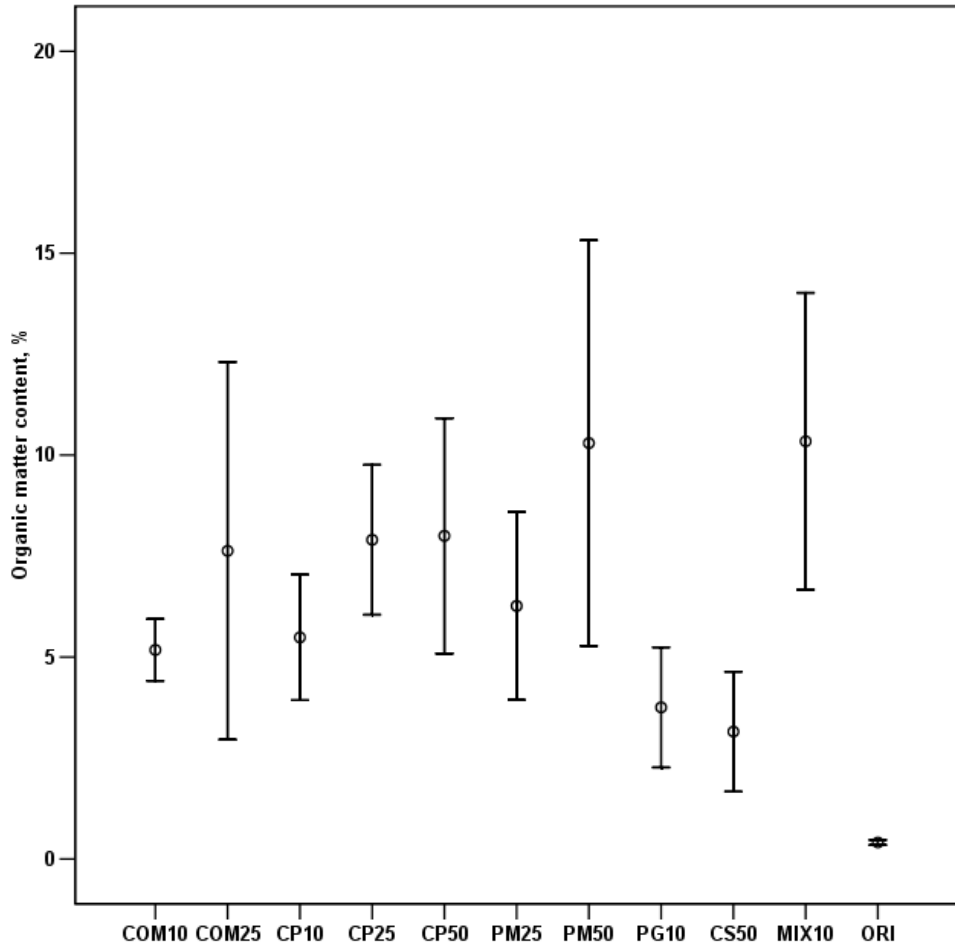


Figure 22. The effect of several conditioners on organic matter content of soil material (See Figure 21).

3) 총질소 함량

총질소 함량은 유기물 재료의 혼합비율이 높아질수록 증가하였으며, 특히 퇴비를 25% 투입했을 때 가장 높았으며, 이때의 총질소 함량은 0.23%이었다. MIX10

의 총질소 함량은 0.21%로 측정되었다(Figure 30). 따라서 동물성 유기물을 많이 함유한 퇴비가 혼합될 때 질소 함량이 크게 증가함을 알 수 있었다.

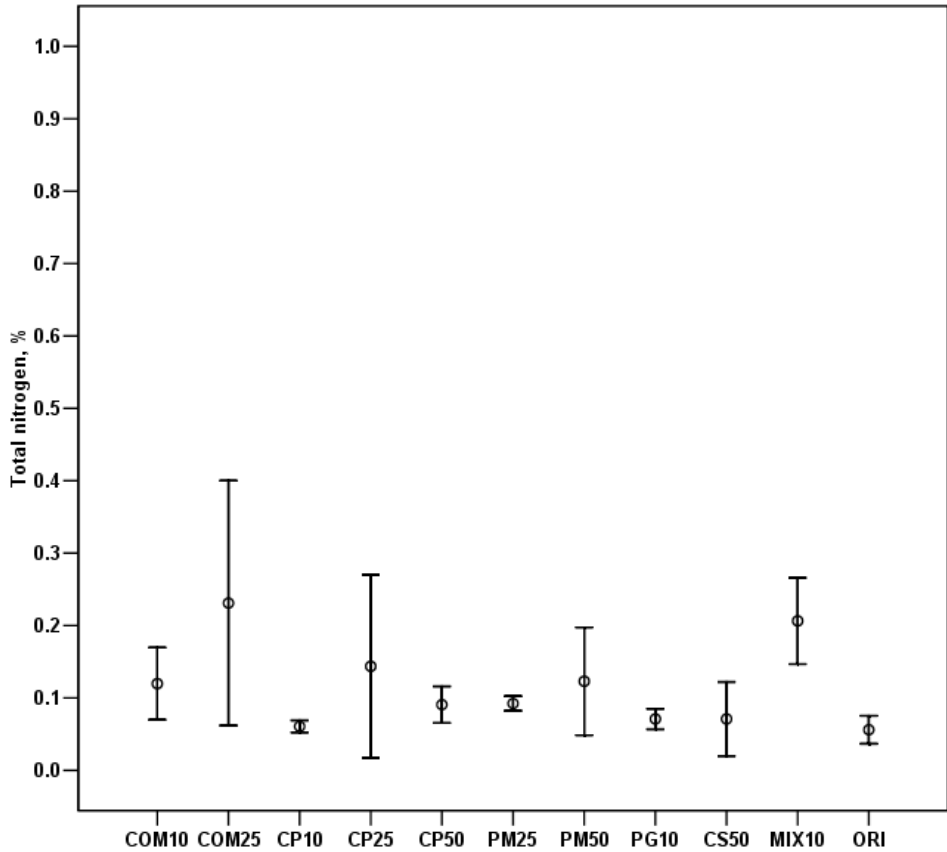


Figure 23. The effect of several conditioners on total nitrogen content of soil material (See Figure 21).

4) 유효인산 함량

유효인산 함량도 총질소 함량에서와 유사한 경향을 보였다. 즉 유기물 재료의 혼합비율이 높아질수록 증가하였다. MIX10에서의 유효인산함량이 $1,298\text{mg kg}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였다(Figure 24).

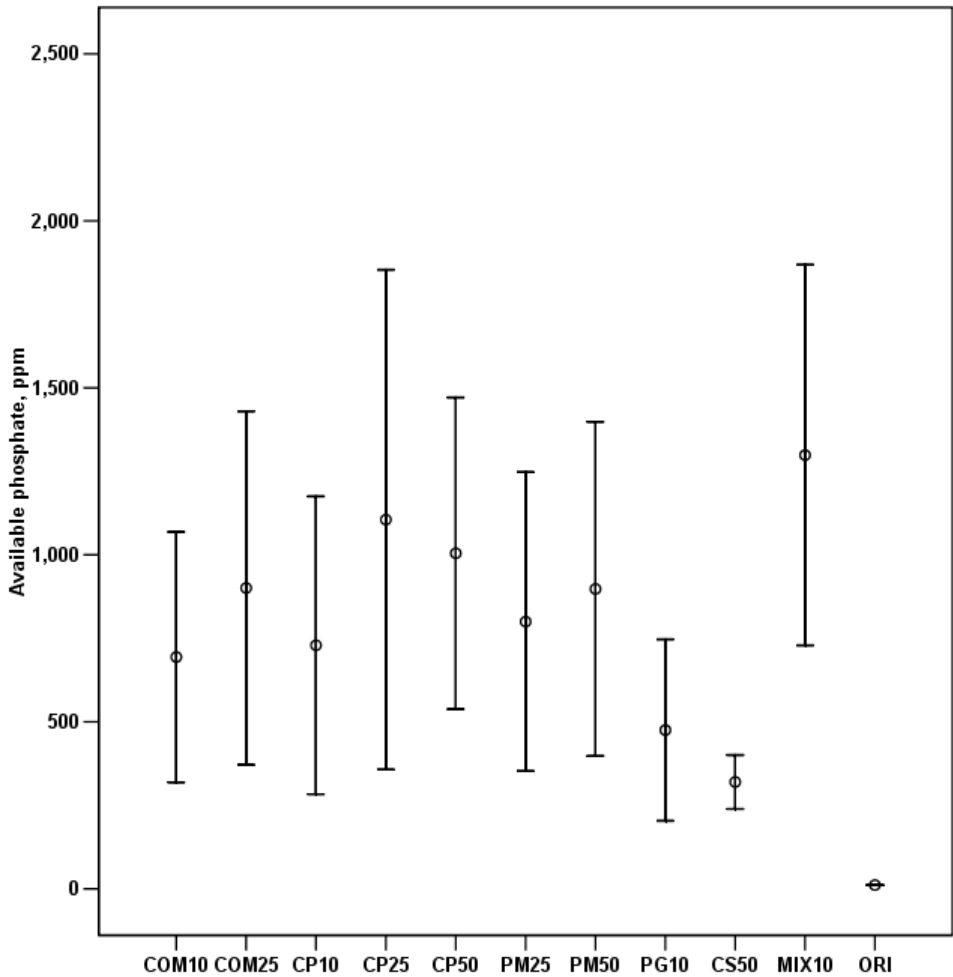


Figure 24. The effect of several conditioners on available phosphate content of soil material (See Figure 21).

다. 골재부산물 개량 효과 종합

이미 앞에서 언급했듯이 골재부산물 자체로는 식생기반재로 사용할 수 없기 때문에 적당한 유기물질과 무기물질을 혼합하여 식물이 자리 잡고 생육할 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서 사용한 유기물질은 퇴비, 코코피트, 피트모스였고, 무기물질은 마사토와 인산석고였다. 각각의 재료 투입으로 골재부산물 토양재의

물리성과 화학성이 개선될 수 있었다. 전체적으로 수리전도도와 유기물함량 및 총질소와 유효인산 등의 양분함량은 크게 향상되었으나, 가소성과 점착성 및 pH 개량 효과는 처리에 따라 개량 효과가 다르게 나타났다. 특히 유효수분함량에 있어서는 모든 처리에서 개량 효과가 가장 작게 조사되었다.

여러 분석 결과를 종합해 볼 때, 골재부산물을 개량하기 위해서는 유기물질과 무기물질을 함께 사용하는 것이 가장 추천할 만한 방법이었다. 즉 골재부산물에 퇴비, 코코피트, 펄트모스, 마사토, 인산석고를 부피기준으로 각각 10%씩 혼합해 준 MIX10의 물성이 식생기반재로서 가장 좋은 특성을 가지고 있는 것으로 판단되었다. MIX10의 평균 수리전도도는 $7.4 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ 로 골재부산물 자체(ORI)의 평균 수리전도도 $4.13 \times 10^{-4} \text{cm s}^{-1}$ 에 비해 200배 가량 개선되었으며, pH는 8.7에서 6.4로 크게 낮춰주어 식물 생육에 적합한 약산성을 띠고 있었다. 유기물 함량은 10.3%였고, 양분함량에 있어서 총질소 함량은 0.21%였고, 유효인산함량은 $1,298 \text{mg kg}^{-1}$ 였다. 따라서 유기물 환경 조건과 양분 조건이 식물 생육에 충분하다고 판단되었다. 이외에 MIX10의 가소성은 B등급, 점착성은 A - B등급으로 처리 중 가장 좋은 성적을 보이고 있어 기계 시공을 위한 재료의 유연성과 시공 후 점착성이 요구되는 비탈면 녹화를 위한 토양재로서 개발할 수 있다고 판단되었다.

또한 MIX10의 조건으로 골재부산물을 개량할 때 토성은 미사질양토에서 사질양토로 변화되었고, 양분의 증가로 전기전도도 및 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨 등 치환성 양이온의 함량이 크게 증가하였다. 이들 치환성 양이온 중에서는 칼슘이온의 함량이 가장 높았고, 치환성 양이온 전체의 대부분을 차지하고 있었다 (Table 17).

Table 17. The characteristics change of the byproduct aggregate samples before and after improvement.

		Texture	k^* cm s ⁻¹	pH	EC dS m ⁻¹	O. M. %	T-N %	Avail-P mg kg ⁻¹	Ex-K	Ex-Ca	Ex-Mg	Ex-Na
									cmol kg ⁻¹			
KG	Before	SiL	0.00078	8.80	0.188	0.427	0.042	11.14	0.06	2.17	0.06	0.06
	After	SL	0.089	6.77	3.140	9.37	0.262	1720	1.65	131.04	27.21	2.34
CC	Before	SiL	0.00009	8.76	0.168	0.451	0.038	10.64	0.03	2.46	0.04	0.04
	After	SL	0.053	6.11	5.850	7.56	0.197	1390	1.61	152.71	22.82	0.55
KS	Before	L	0.00037	8.64	0.122	0.347	0.059	11.99	0.02	1.72	1.67	0.07
	After	SL	0.081	6.35	4.530	7.76	0.160	1420	0.11	32.99	32.43	0.61

* Hydraulic conductivity.

제3절 비탈면 녹화재로의 적용성 검토를 위한 모의시험

1. 모의경사시험구의 설치

가. 1차 모의경사시험구

1차 모의경사시험은 골재부산물 슬러지가 50% 이상 혼합된 식생기반재가 척박한 비탈면 복원에 적용될 수 있는지를 검토하는 것을 목적으로 하였다.

모의경사시험을 위한 시험구의 전체적인 외관은 가로 1m, 세로 2m, 깊이 0.25m인 철재 사각틀과 이 사각틀을 받쳐주는 지지대로 구성되었다(Figure 25(a)). 전체 깊이 25cm의 사각틀에는 20cm 깊이 지점에 철망을 설치되어 있어 위쪽에는 시험 토양 재료를 채울 수 있게 하였고, 철망의 아래쪽은 토양층을 통과한 물이 흘러나갈 수 있는 5cm 높이의 공간이 조성되도록 하였다. 사각틀의 네 측면 중 경사의 끝에 해당하는 하단 측면은 천공 철판을 붙여서 토양층을 따라 흐르는 물이 정체되지 않고 흘러나갈 수 있도록 하였다(Figure 25(b)). 가로 철망과 세로 천공 철판을 통해 유출되는 물을 분리해서 수거할 수 있도록 하여 유거수와 침투수를 구분할 수 있도록 하였다. 또한 사각틀의 중심에 축을 달아 힘들이지 않고 손쉽게 기울기를 조정할 수 있도록 하였으며, 조정된 기울기를 유지할 수 있도록 버팀봉을 달았다. 버팀봉은 렌치를 이용해 쉽게 풀고 조일 수 있어 언제든지 경사 조정을 할 수 있다(Figure 25(c)).

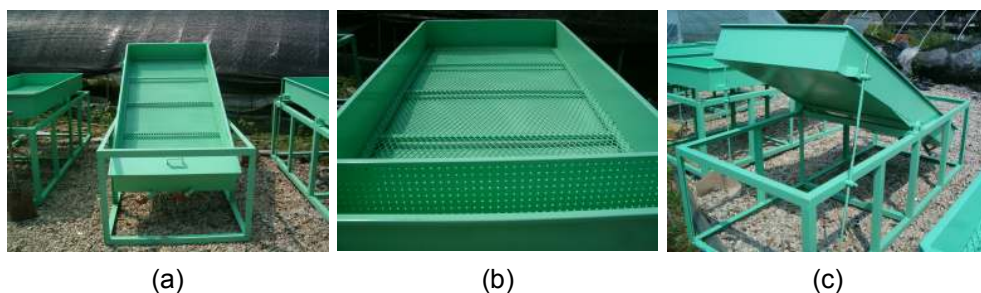


Figure 25. The structure of run-off pan (a: the front view of runoff pan; b: the wire net and the perforated iron plate; c: the device for controlling the gradient of pan).

시료를 채취한 사업장 중 경기 광주(KG), 강원 춘천(CC), 전북 군산(KS) 등 3개소로부터 협조를 받아 골재부산물 슬러지를 약 2톤씩 공급받았다. 골재부산물에 마사토, 피트모스, 코코피트, 부산물 석고, 퇴비를 혼합하여 식생기반재 3종을 만들었고 각각의 처리구는 골재부산물의 공급처를 반영해 KG, CC 그리고 KS로 명명하였다. 전체부피에 대한 재료의 혼합비는 부피를 기준으로 골재부산물 50%에 다른 5종의 재료를 10%씩이었다. 대조구로 마사토(Sand)와 대표적인 녹화용 식생기반재인 녹생토 처리구(Nok)를 두었다(Table 18).

본 시험에서 사용한 종자는 일반적으로 권장되고 있는 녹화용 자생 중에서 선택되었으며, 초화류로는 별노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonicus*), 산국(*Chrysanthemum boreale*), 술패랭이(*Dianthus superbus* var. *longicalycinus*), 층꽃(*Caryopteris incana*), 큰금계국(*Coreopsis lanceolata*)을 사용하였고, 목본 종자로는 붉나무(*Rhus chinensis*), 비수리(*Lespedeza cuneata*), 소나무(*Pinus densiflora*), 자귀나무(*Albizia julibrissin*), 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya*)를 사용하였다. 이들 종자들은 Table 17의 기준에 따라 각각의 질량을 재서 한 곳에 담아 혼합하였으며, 경사시험구의 면적과 개수를 고려해 총 2m² 분량으로 5개를 준비하였다.

Table 18. The composition of soil materials filled in the runoff pan.

	Byproduct aggregates	Cocopeat	Peatmoss	Compost	Phospho-gypsum	Coarse sand
Sand	-	-	-	-	-	100
Nok	-	-	-	-	-	-
KG	50	10	10	10	10	10
CC	50	10	10	10	10	10
KS	50	10	10	10	10	10

(Sand: coarse sand; Nok: Noksaengto; KG, CC, KS: the treat name which named after company supporting byproduct aggregates; unit: % volume basis).

Table 19. The germination rate and input amount of plant species used for the runoff pan test.

Scientific name	Korean name	Germination rate (%)	Input amount (g m ⁻²)
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	별노랑이	88	0.70
<i>Chrysanthemum boreale</i>	산국	66	0.11
<i>Dianthus superbus</i> var. <i>longicalycinus</i>	슬패랭이	88	0.66
<i>Caryopteris incana</i>	층꽃	80	1.04
<i>Coreopsis lanceolata</i>	큰금계국	80	0.79
<i>Rhus chinensis</i>	붉나무	50	4.51
<i>Lespedeza cuneata</i>	비수리	63	0.56
<i>Pinus densiflora</i>	소나무	54	3.25
<i>Albizzia julibrissin</i>	자귀나무	90	3.95
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	참싸리	73	4.33

종자 파종은 일반적인 작물 파종에서처럼 땅을 파서 뿌려주는 방법이 아닌 습식녹화공법을 응용하여 시험구 토양의 표면에 조성물(thickener)과 함께 붙여주는 방법으로 하였다. 이와 같은 방법은 종자를 균일하게 뿌려줄 뿐만 아니라 조성물이 멀칭의 역할을 하기 때문에 종자의 발아와 초기 생육에 유리한 환경을 제공해 줄 수 있다. 10개 식물종의 종자와 함께 혼합된 조성물은 제지화이버, 피트모스, 버미클라이트(팽화질석), 퇴비로 구성되었으며, 여기에 접착력 증진을 위해 생분해성 접착제인 CMC(carboxyl methyl cellulose)가 소량 첨가되었고, 수분 보유력을 높이기 위해 Na-polyacrylate계 고흡습성폴리머(super absorbent polymer)가 첨가되었다. 5조로 나눈 조성물과 혼합종자에 적당한 양의 물을 가하고 잘 개어준 후 각각의 시험구에 0.5cm 두께가 되도록 붙여주었다. 조성물 부착이 완료된 후 경사시험구의 기울기를 20°로 맞춘 후 고정하였다(Figure 26). 조성

된 경사시험구의 기울기는 clinometer(Suunto KB-14, Finland)로 확인하였다.

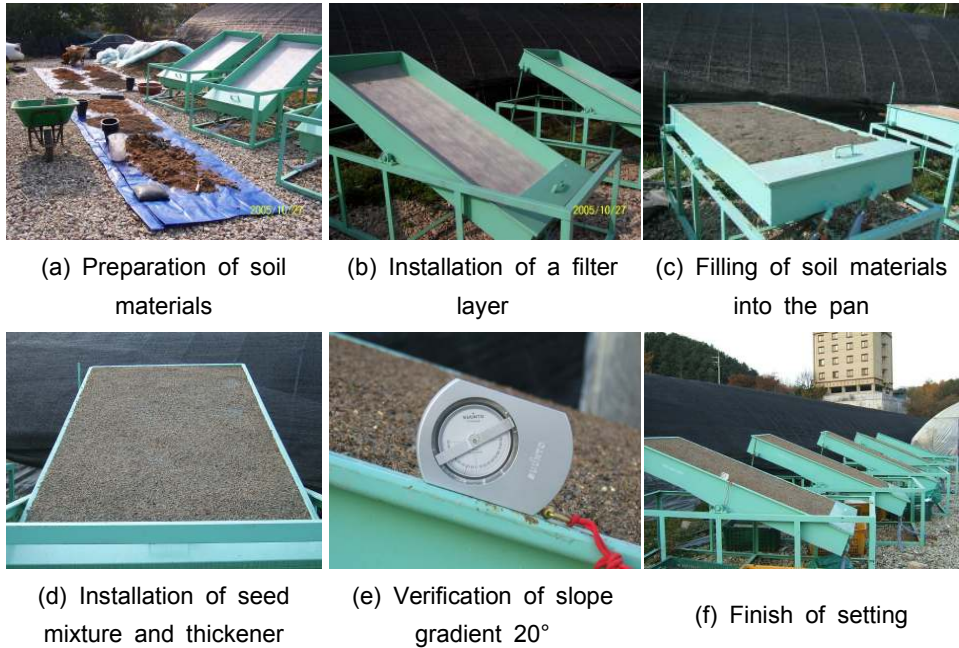


Figure 26. The procedure of the runoff pan installation.

설치완료 후 별도의 인위적인 관수는 없었으며 자연 강수에 의해서만 수분이 공급되었다. 처리구 간의 녹화율을 비교하기 위해 2006년 5월과 8월 두 차례 식생조사를 하였다.

두 번째 식생 조사 후 경사시험구의 토양 구조를 교란하지 않은 상태에서 penetrometer(Eijkamp, Netherland)를 이용하여 토양의 깊이에 따른 관입저항 특성을 처리구마다 3회 반복 측정하여 평균값을 구하고 깊이에 따른 관입저항값에 대한 그래프를 작성하였다.

식물체는 지상부와 지하부를 나누어 수확한 후 각각의 생중량을 먼저 재고 풍건시킨 후 다시 건중량을 측정하였다. 또한 경사시험구에서 토양 시료를 채취하여 용적밀도, 토성, pH, EC, 유기물 함량, 총질소 함량, 양이온교환용량(CEC) 등을 분석하였다. 분석방법은 앞의 골재부산물 시료 분석과 동일하였다.

나. 2차 모의경사시험구

2006년 9월 8일 1차 모의경사시험구 시험 종료와 동시에 경사시험구를 2개 늘려 7개의 경사시험구로 2차 시험에 착수하였다. 본 시험의 목적은 골재부산물 토양재를 하이드로시딩용 조성물로 피복했을 때와 피복하지 않고 노출되었시켰을 때 시험구로 떨어지는 빗물에 의한 표면 침식과 함께 기반층을 따라 유출되는 경로와 기반층을 통과해서 유출되는 경로의 양적 분배를 확인하고 유출수에 함유된 양분의 변화를 측정하는 것이었다. 비교를 위해 녹생토의 피복처리구와 노출구 그리고 마사토의 피복처리구와 노출구, 그리고 마사토에 인산석고 만을 사용한 처리구를 두었다. 2차 경사처리구의 기울기는 1차년도에 20°보다 가파른 30°로 하였다(Table 20, Figure 27).

Table 20. The description of each treatment installed in the 2nd runoff pan study.

	Treatment	Description
Sand	SV	Coarse sand with seed-mixture and thickener
	SB	Coarse sand without any treatment
	SP	Coarse sand treated phosphogypsum (1kg m ⁻²)
Nok	NV	Nok with seed-mixture and thickener
	NB	Nok without any treatment
KS	PV	Byproduct aggregate soil with seed-mixture and thickener
	PB	Byproduct aggregate soil without any treatment

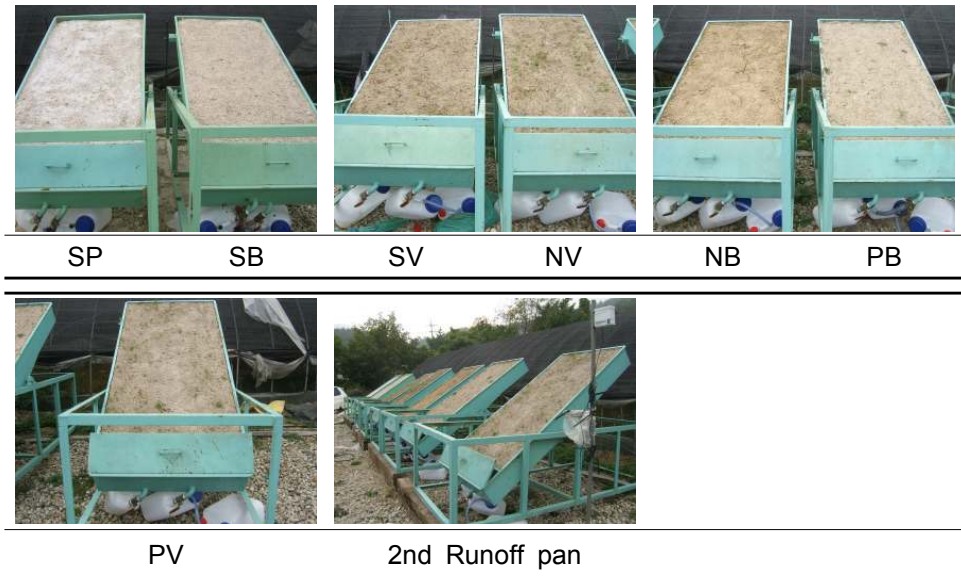


Figure 27. The second runoff pan study (SV: coarse sand with seed-mixture and thickener; SP: coarse sand with phosphogypsum; SB: coarse sand without any treatment; NV: Nok with seed-mixture and thickener; NB: Nok without any treatment; PV: improved aggregate byproducts with seed-mixture and thickener; and PB: improved aggregate byproducts without any treatment).

2차 경사시험구를 설치한 9월에는 한 달 동안 거의 비가 없는 고온 건조기간이었기 때문에 식물의 발아 및 생육이 활발하지 못했고, 10월에도 강수량이 매우 작은 편이었다. 물 시료를 충분히 모을 수 있을만큼 비가 온 다음날인 11월 3일, 6일, 9일, 15일 네 차례에 걸쳐 토양 표면과 토양층을 통해 나온 유출수와 토양층을 모두 통과해서 토양층 하부로 나온 유출수를 분리해서 받았다. 물통에 모아진 유출수의 양은 매스실린더를 이용해 측정하였고, 부피를 측정한 후 각각의 유출수를 큰 용기에 부어 골고루 섞어서 1리터들이 채수병에 담아 시험실로 옮겼다. 채취한 물 시료에 대해 pH와 EC는 pH meter(Scott CG842, Germany)와 EC meter(ISTEK 460CP, 대한민국)로 바로 측정하였고, 유출수 중 고형분의 양은 거름종이에 걸러 질량의 변화를 측정한 후 전체 유출수에 대해 환산하여 계산하였으며, 암모늄태 질소($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)와 질산태 질소($\text{NO}_3^- - \text{N}$)는 Kjeldahl 증류장치

(Kjeltec Auto 2300 Analyzer, FOSS tecator, Sweden)를 이용하였으며, 인산은 Bray-1법으로, 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+)은 Atomic Absorption Spectrophotometer(Shimadzu AA-6701F, Japan)로 분석하였다. 황산이온(SO_4^{2-}) 농도는 Ion Chromatography(Dionex DX-120, USA)를 이용해 측정하였다.

2. 모의경사시험구를 이용한 사전 평가

가. 골재부산물 토양재의 녹화 특성

골재부산물 개량 시험과 마찬가지로 경기도 용인(KG)과 강원도 춘천(CC), 전라북도 군산(KS)의 골재업체로부터 골재부산물을 공급받아 모의경사시험을 수행하였다. 모의경사시험에 사용된 골재부산물 토양재는 골재부산물에 코코피트, 피트모스, 퇴비, 인산석고, 마사토가 각각 10%씩 혼합된 것이었다. 시험구의 명칭은 골재부산물 공급 업체의 이름을 따서 KG, CC, KS로 하였다. 기존의 방법과 비교하기 위해 녹생토 처리구(Nok)를 두었고 일반 마사비탈면을 고려해 마사토를 채운 처리구(Sand)를 두었다.

설치 완료 후 일주일이 지나면서 종자가 발아되기 시작하였으나, 일찍 찾아온 겨울로 인해 기온이 영하로 떨어지면서 고사하였다. 월동 후 2006년 다시 발아가 되기 시작하였으나, 자생식물의 늦은 발아 특성과 봄철의 고온 건조한 기상 환경 때문에 6월이 되어서야 왕성한 생육을 보이기 시작했다. 8월에 성장량이 최대에 이르렀고 차차 쇠퇴하기 시작하였다(Figure 28).

1m x 1m 크기의 방형구를 이용한 식생조사 결과, 골재부산물 토양재(KG, CC, KS)와 녹생토 처리구(Nok) 모두 6월에는 초기에 투입한 식물 종자의 대부분이 출현하고 있음을 확인할 수 있었으나, 8월에는 급격히 감소하는 경향을 보였다.

골재부산물 토양재를 처리한 세 개의 모의경사시험구 KG, CC 그리고 KS에서는 처리구 간의 차이는 있었으나, 대체로 별노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonicus*), 산국(*Chrysanthemum boreale*), 술패랭이(*Dianthus superbus* var. *longicalycinus*), 층꽃(*Caryopteris incana*), 큰금계국(*Coreopsis lanceolata*), 소나무(*Pinus densiflora*), 자귀나무(*Albizia julibrissin*), 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya*)의 생육이 좋았다. 하지만 녹생토를 채운 모의경사시험구(Nok)에서는 6월에 확인된 8종의 식물 중에서 별노랑이(*Lotus corniculatus* var.

japonicus), 산국(*Chrysanthemum boreale*), 층꽃(*Caryopteris incana*) 만이 8월까지 생육하고 있었다. 따라서 초기 투입되는 종자의 생존과 활착의 측면에서 볼 때 골재부산물 토양재의 녹화 성적이 녹생토보다 양호하다고 볼 수 있었다.

일반적인 비탈면으로 상정해 조성된 마사토 처리구(Sand)에서는 초기에 투입한 식물이 6월에는 한 종도 발견되지 않았으며, 8월에 별노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonicus*), 산국(*Chrysanthemum boreale*), 술패랭이(*Dianthus superbus* var. *longicalycinus*), 층꽃(*Caryopteris incana*) 그리고 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya*)가 뒤늦게 출현하였으나 각각의 개체수는 극히 적었다(Table 21).

한편 녹화피복률에 있어서 골재부산물 토양재와 녹생토 모두 8월에 들어 100%의 피복률을 보이고 있었다. 하지만 녹생토의 경우에는 초기에 투입된 종자에 의한 것이 아니고 주로 바랭이(*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koel.), 쇠비름(*Portulaca oleracea* L.), 강아지풀(*Setaria viridis* (L.) P. Beauv. var. *viridis*), 여뀌(*Persicaria hydropiper* (L.) Spach var. *hydropiper*) 등 잡초에 의한 피복이었다. 이로 인해 의도된 즉 초기에 투입된 식생은 잡초에 의해 피압되어 사멸하였다. 8월의 식생조사 결과, 녹생토 처리구(Nok)에서의 식물종이 6월에 비해 감소한 것은 이를 증명하는 것으로 판단된다(Table 21).

생체량 측정 결과는 골재부산물 토양재에서의 초기 투입된 식물의 높은 생존율과 상대적으로 양호한 생육에도 불구하고 녹생토에서 수확된 식물체의 생중량과 건중량이 높게 나왔다. 즉 골재부산물 토양재에서 수확한 식물체의 지상부 생중량은 $600 \sim 1,200 \text{ g m}^{-2}$ 였던 것에 비해 녹생토에서의 지상부 생중량은 $2,600 \text{ g m}^{-2}$ 로 평균적으로 3배 가량 무거웠다. 수확된 식물체의 건중량도 마찬가지로 녹생토의 것이 3배 정도 큰 값을 보였다. 한편 공통적으로 식물체의 건중량이 지상부 보다는 뿌리부가 2~3배 가량 큰 것으로 조사되었다(Figure 29). 이는 잡초의 성장속도가 경관 조성을 위한 자생초화류의 성장속도 보다 2배 이상 왕성하였기 때문으로 판단된다.

이와 같은 결과를 통해 골재부산물 토양재가 기존의 녹화용 토양인 녹생토에 비해 초기 투입되는 자생초화류의 생존과 활착에 보다 유리한 환경을 제공하는 것으로 예상되었다. 그리고 이러한 특성은 비탈면 녹화 설계단계에서 최종 녹화 결과 즉 경관을 예측하고 반영할 수 있게 하는 중요한 요소가 될 수 있을 것으로 판단된다.

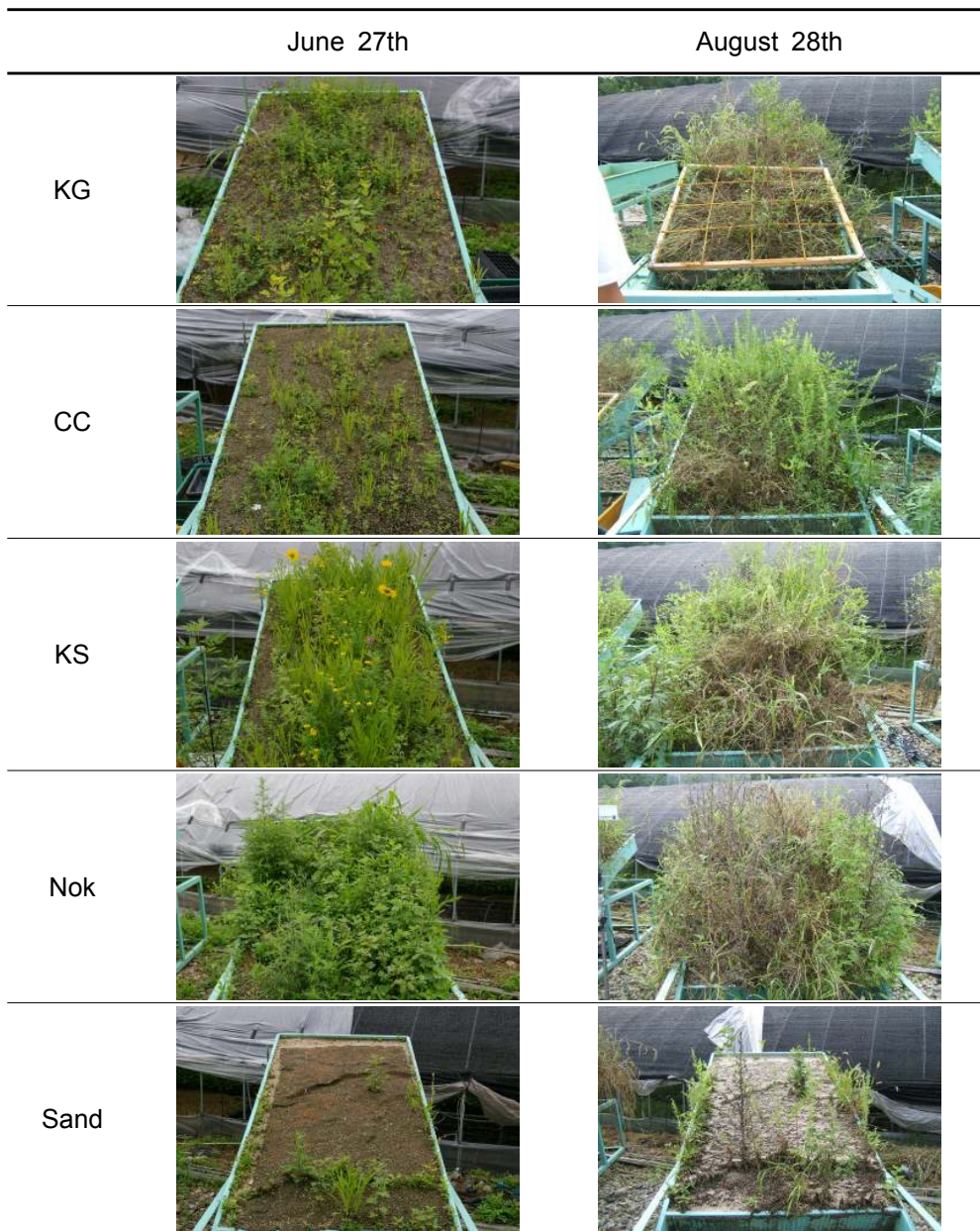


Figure 28. The changes of vegetation coverage for 1 year (KG, CC and KS: runoff pans filled with soil materials using aggregate byproducts which were collected from three different companies; Nok: runoff pan filled with conventional soil material made of coarse sand, sewage sludge, paper mill sludge; Sand: runoff pan filled with coarse sand).

Table 21. The appearance number of the used plant species and their visual coverage ratio.

	KG		CC		KS		Nok		Sand	
	June	Aug.	June	Aug.	June	Aug.	June	Aug.	June	Aug.
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	156.0	128.0	112.0	60.0	56.0	36.0	80.0	8.0	-	1.0
<i>Chrysanthemum boreale</i>	24.0	12.0	60.0	28.0	52.0	32.0	28.0	84.0	-	2.0
<i>Dianthus superbus</i> var. <i>longicalycinus</i>	20.0	48.0	124.0	84.0	64.0	92.0	4.0	-	-	8.0
<i>Caryopteris incana</i>	40.0	4.0	156.0	8.0	112.0	92.0	48.0	48.0	-	6.0
<i>Coreopsis lanceolata</i>	36.0	-	112.0	56.0	68.0	72.0	24.0	-	-	-
<i>Rhus chinensis</i>	8.0	-	24.0	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lespedeza cuneata</i>	20.0	-	28.0	-	16.0	-	8.0	-	-	-
<i>Pinus densiflora</i>	20.0	-	24.0	24.0	44.0	16.0	4.0	-	-	-
<i>Albizzia julibrissin</i>	28.0	-	28.0	16.0	8.0	4.0	-	-	-	-
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	140.0	8.0	40.0	4.0	16.0	4.0	16.0	-	-	2.0
Visual coverage	50%	100%	43%	100%	65%	100%	48%	100%	0%	10%

(KG, CC and KS: runoff pans filled with soil materials using aggregate byproducts which were collected from three different companies; Nok: runoff pan filled with conventional soil material made of coarse sand, sewage sludge, paper mill sludge; Sand: runoff pan filled with coarse sand).

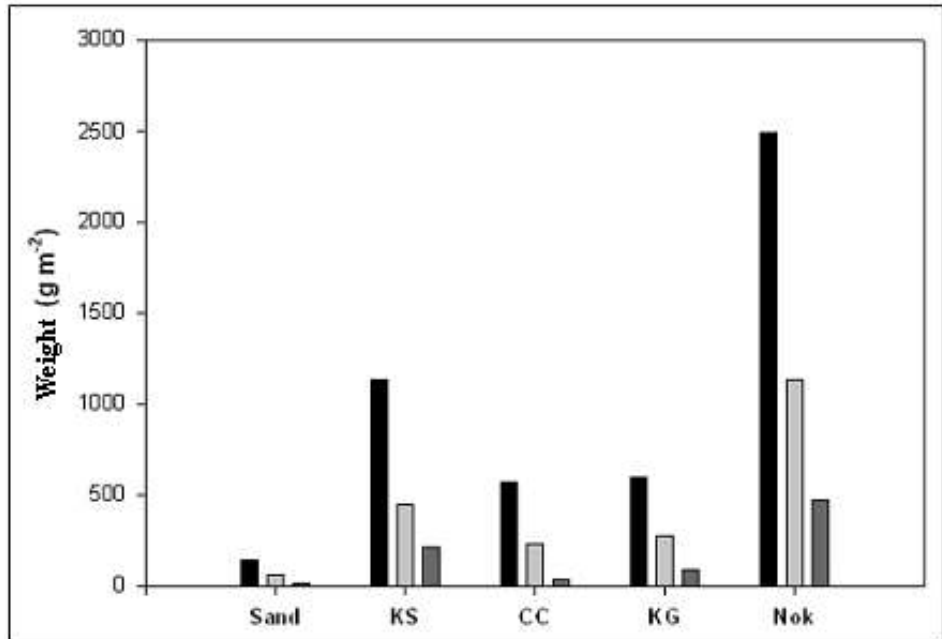


Figure 29. The weight of harvested plants (■ : the fresh weight of shoot; ▨ : the dry weight of root; ▩ : the dry weight of shoot / KG, CC and KS: runoff pans filled with soil materials using aggregate byproducts which were collected from three different companies; Nok: runoff pan filled with conventional soil material made of coarse sand, sewage sludge, paper mill sludge; Sand: runoff pan filled with coarse sand).

나. 골재부산물 토양재의 토양 특성

토양에 다른 물체를 관입할 때 토양이 나타내는 역학적 저항을 관입저항 (penetration resistance)이라 한다. 관입저항은 현지에서의 토양강도(soil strength), 즉 토양경도(soil hardness) 또는 치밀도를 나타낸다. 토양경도는 토양 수분함량과 토성, 유기물 함량, 답압 등의 환경 조건에 따라 영향을 받는다. 답압은 토양경도를 증가시키는 반면 양분의 유효도는 감소시켜 식물의 생육에 부정적인 역할을 한다(Kuht 등, 2004). 이는 식물 뿌리의 생육이 토양경도에 크게 영향을 받기 때문이다.

일반적으로 토양경도는 토양관입저항계와 토양경도계를 이용해 측정한다. 山中 (Yamanaka)식 경도계가 많이 사용되고 있는데, 경도값이 25mm 이상이면 투수 불량, 뿌리신장 저해 현상이 심화되어 식물의 생장이 어렵다고 알려져 있다(류, 2000). 또한 건설교통부에서는 ‘비탈면 녹화 설계 및 시공 잠정 지침’(건설교통부, 2005)을 통해 산중식 경도계로 27~30mm 범위의 토양경도를 갖는 지역에서는 토양이 너무 단단해서 식물의 생육이 곤란하고, 토양경도가 30mm 이상에서는 근계의 침입이 불가능하다고 하였다(Table 22).

Table 22. The relation of soil hardness and plant growth condition.

Soil hardness (mm)	Plant growth condition
≤ 18mm	Favorable for plant growth, but susceptible to eruption
18mm ~ 23mm	Optimal for plant growth
23mm ~ 27mm	Not bad for plant growth
27mm ~ 30mm	Difficult for plant root to grow
≥ 30mm	Limited for plant root to penetrate

하지만 산중식 경도계는 표토의 경도만 측정할 수 있기 때문에 본 연구에서는 데이터로거가 장착된 콘 형식의 전자관입저항계(Penetrologger, Eijkelkamp, Netherlands)를 이용해 깊이에 따른 연속적인 토양경도를 측정하였다. 콘 형식의 관입저항계는 산중식 경도계와 달리 측정단위가 MPa로 표시된다. 산중식 경도계에서 25mm는 15kg cm^{-2} 로 환산되며 이는 약 1.47MPa에 해당한다. 따라서 1.47MPa 부터는 식물의 뿌리생장이 크게 영향을 받기 시작한다고 볼 수 있다. 식물의 지상부를 제거한 후 깊이별로 콘 형식의 관입저항계로 토양경도를 측정 한 결과, 모든 처리구에서 깊이가 증가하면서 관입저항이 증가하였고, 토양 깊이가 15cm 이상이 되면서 감소하는 경향을 보였다. 세 종류의 골재부산물 토양재 (KG, CC, KS)의 관입저항은 서로 유사한 특성을 보였고, 반면에 녹생토(Nok)는 마사토(Sand)와 유사한 관입저항 특성을 보였다. 또한 두 개의 그룹은 뚜렷한 관

입저항 특성 차이를 보였다. 골재부산물 토양재에서는 토양경도가 가장 컸을 때도 2MPa 정도였으나, 녹생토와 마사토는 3.7MPa에 달했다.

전체적으로 골재부산물 토양재의 토양경도가 녹생토와 마사토 토양경도의 1/2 정도의 값을 보이고 있다(Figure 30). 토양경도분석을 통해 골재부산물 토양재가 식물의 뿌리발달에 더 유리한 토양 물리적 환경을 제공할 수 있을 것으로 사료되었다.

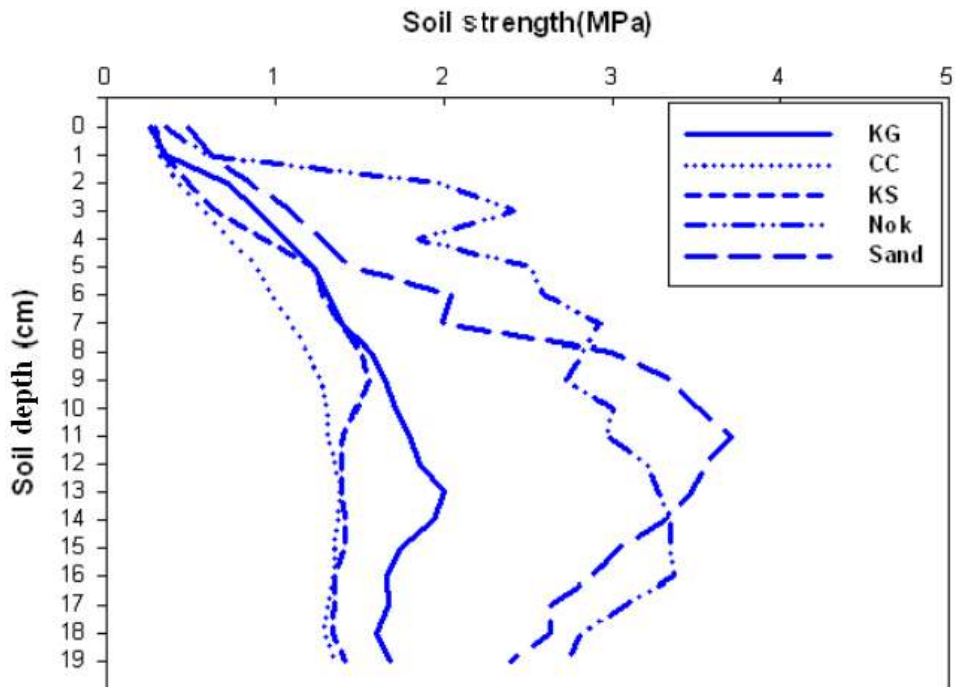


Figure 30. The profile of soil strength with depth (KG, CC and KS: runoff pans filled with soil materials using aggregate byproducts which were collected from three different companies; Nok: runoff pan filled with conventional soil material made of coarse sand, sewage sludge, paper mill sludge; Sand: runoff pan filled with coarse sand).

건설교통부(2005)는 녹화용 식생기반재의 토양의 화학성을 pH, EC, CEC, 총질소, 유기물함량, 염농도로 구분하여 평가기준을 제시하고 있다(Table 23). 각 모의경사시험구의 식물체를 수확한 후 채취한 토양에 대한 분석 결과, 골재부산물

토양재 처리구(KG, CC, KS)의 토양 화학성이 마사토(Sand)와 녹생토(Nok) 처리구에 비해 전반적으로 양호함을 알 수 있었다. 골재부산물 토양재의 pH는 6.36 ~ 6.57의 범위의 식물 생육에 적합한 값을 가진데 비해 녹생토의 pH는 8.29로 알칼리도가 높았고, 마사토 또한 녹생토 보다는 낮지만 알칼리성인 7.92였다. 유기물함량은 골재부산물 토양재와 녹생토 모두 7%대로 비슷한 수준을 보여주고 있었다. 총질소 함량은 녹생토가 0.34%인데 비해, 골재산물 토양재의 평균은 0.12%로 3배 가량 낮았으나 유효인산함량은 녹생토가 25.68mg kg⁻¹인데 비해 골재부산물 토양재의 평균은 136.08mg kg⁻¹로 5배 가량 높은 수준이었다. 양이온치 환용량은 각 토양재의 유기물함량이 높았기 때문에 일반토양에 비해 높았다. 용적밀도는 골재부산물 토양재가 녹생토에 비해 약간 작았다(Table 24). 따라서 골재부산물 토양재는 녹화용 토양재로서 기존의 녹생토 보다 우수한 화학성을 가지고 있다고 판단된다.

Table 23. The soil chemical properties required by Korean Ministry of Construction & Transportation after revegetation installation.

Item	Unit	Requirement
Soil reaction (pH)	-	5.5 ~ 7.0
Electrical conductivity (EC)	dS m ⁻¹	< 1.0
Cation exchange capacity (CEC)	cmol _c kg ⁻¹	≥ 6
Total nitrogen (T-N)	%	≥ 0.06
Salt concentration	%	< 0.2
Organic matter content	%	≥ 3.0

Table 24. The properties of the soil used for the first runoff pan study after harvest.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	Avail-P mg kg ⁻¹	T-N %	CEC cmol kg ⁻¹	Soil Texture	Bulk Density
Sand	7.92	0.03	1.36	10.79	0.01	5.69	Sandy Clay Loam	1.58
Nok	8.29	0.13	7.76	25.68	0.34	13.45	Sandy Clay Loam	1.09
KG	6.57	1.80	7.15	113.87	0.15	17.52	Sandy Loam	1.08
CC	6.36	1.75	7.01	119.45	0.19	17.37	Sandy Loam	0.99
KS	6.42	1.67	8.85	174.92	0.02	14.94	Sandy Loam	0.89

(KG, CC and KS: runoff pans filled with soil materials using aggregate byproducts which were collected from three different companies; Nok: runoff pan filled with conventional soil material made of coarse sand, sewage sludge, paper mill sludge; Sand: runoff pan filled with coarse sand).

다. 골재부산물 토양재의 물 유출 특성

2차 모의경사시험구로부터 빗물 유출 특성을 조사한 결과(Figure 31), 마사토 처리구(Sand)에서는 인산석고를 표면에 뿌려주었을 때(SP)는 대부분의 빗물이 토양 표면이나 토양층을 따라 유출(SP-U)되었고, 하이드로씨딩용 조성물을 붙이지 않은 처리구(SB)에서는 반대로 토양층을 통과해서 유출(SB-D)되는 빗물이 대부분을 차지하였다. 그리고 하이드로씨딩용 조성물을 붙여준 처리구(SV)에서는 거의 대부분의 빗물이 표면과 토양층을 따라 유출(SV-U)된 것으로 조사되었다. 이와 같은 현상은 상대적으로 공극이 큰 마사토 표면에 인산석고 가루가 뿌려짐으로 인해 표면 공극을 축소시켰을 것이라는 것과 하이드로씨딩용 조성물 또한 표면을 조밀하고 매끄럽게 하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

녹생토의 경우(Nok)에는 하이드로씨딩용 조성물을 붙인 처리구(NV)와 붙이지 않은 처리구(NB) 모두 시험구에 유입된 빗물이 토양 표면 또는 토양층을 흘러나갔다(NV-U, NB-U). 이는 표면에서의 처리 조건이 달라져도 녹생토 자체의 공극이 치밀하여 그 영향을 상쇄시키기 때문인 것으로 사료된다.

골재부산물 토양재의 경우에는 마사토와도 그리고 녹생토와도 다른 경향을 보여주었다. 즉 하이드로씨딩용 조성물을 붙인 처리구(PV)에서는 침투 후 유출되는 빗물(PV-D)이 많은 특성을 보였고 하이드로씨딩용 조성물을 붙이지 않은 처리구(PB)에서는 표면과 토양층을 통해 흘러나온 빗물(PB-U)이 훨씬 많았다. 이는 골재부산물 토양재를 구성하는 주요 토양 입자들이 작고 점착력이 약해 빗방울의 타격으로 쉽게 분산되어 공극을 막는 특징이 있는 반면, 하이드로씨딩용 조성물은 골재부산물 토양재가 빗물에 직접적으로 영향을 받는 것을 막아줄 수 있어 골재부산물 토양재의 구조가 유지되기 유리한 조건을 형성해 주기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 마사토와 녹생토에서와는 달리 골재부산물 토양재에서 하이드로씨딩용 조성물은 빗물의 표면 침투율을 오히려 증가시키는 결과를 보여주고 있다.

결론적으로 녹생토 처리구는 표면에 대한 하이드로씨딩용 조성물의 처리와 상관없이 100%에 가까운 유입 빗물이 표면 유출로 빠져나감을 알 수 있었고, 마사토와 골재부산물 토양재는 표면 조건에 따라 유출 특성이 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

한편 표면 처리 조건에 관계없이 집수된 전체 유출수 양은 마사토에서 38.0~

50.1L, 녹생토에서 37.6~ 44.8L였고, 골재부산물 토양재는 26.9~ 32.5L이었는데 이는 골재부산물 토양재의 수분보유력이 상대적으로 마사토와 녹생토의 수분보유력 보다 컸기 때문에 판단되었다.

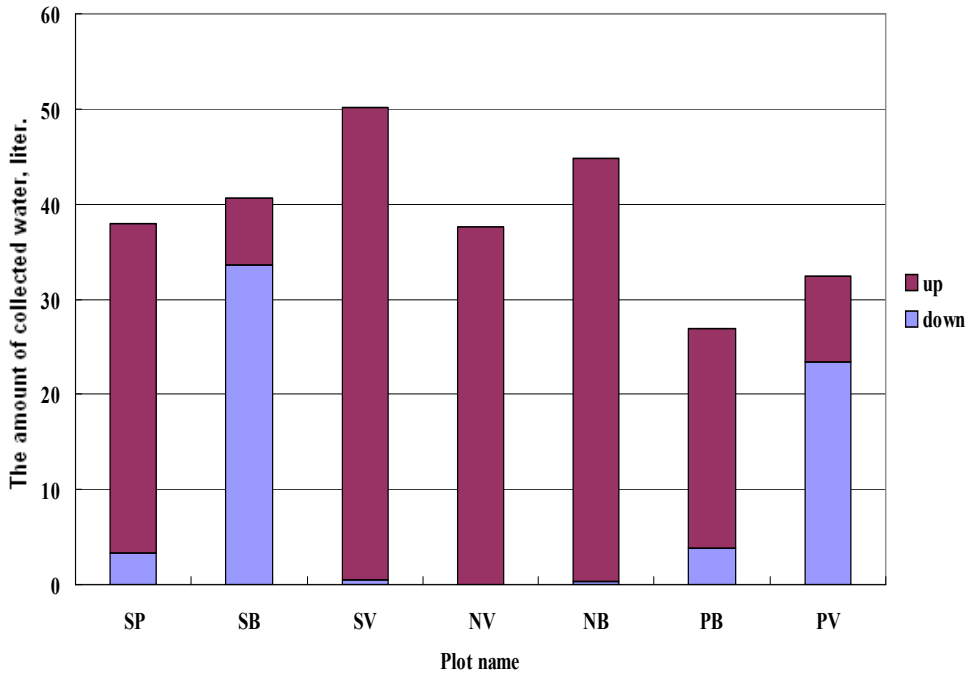


Figure 31. The properties of water flow distribution with soil materials (Up: runoff; down: infiltration), (SV: coarse sand with seed-mixture and thickener; SP: coarse sand plus phosphogypsum without seed and thickener; SB: coarse sand without any treatment; NV: Nok with seed-mixture and thickener; NB: Nok without any treatment; PV: improved byproduct aggregates with seed-mixture and thickener; and PB: improved byproduct aggregates without any treatment).

유출수의 pH 분석 결과(Figure 32, 33), 대부분의 처리구에서 유출수의 pH는 6 이상의 약산성 내지 7 부근의 약알칼리성이었던 반면에 골재부산물 토양재, 특히 하이드로씨딩용 조성물을 붙여 준 처리구(PV)에서는 평균 5.3의 강산성을 띠고

있었다. 이와 같은 경향에 있어 표면유출수 pH와 침투수 pH 사이에 유의성 있는 차이는 없는 것으로 판단되었다. 또한 전체적인 변화 경향은 표면유출수가 초기 감소했다가 감소했다는 것에 비해 침투수는 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 것으로 조사되었다.

한편 인산석고가 처리된 마사토(SP)의 표면유출수(SP-U)는 초기에 pH가 감소되다가 시간이 경과하면서 중성으로까지 증가하는 경향을 보였고 침투수(SP-D)는 반대로 산성으로 떨어지는 경향을 보였는데, 이는 표면에 사용된 인산석고의 산성원인 물질이 토양수와 함께 하층으로 이동하였기 때문인 것으로 분석되었다.

인산석고 처리구와 pH 변화 양상은 다르지만 인산석고를 표면 사용한 SP-U, SP-D의 pH가 상대적으로 낮은 수치를 보이는 현상처럼 골재부산물 토양재를 처리한 곳에서 채취한 유출수의 pH가 가장 낮은 이유는 골재부산물 토양재를 구성하고 있는 인산석고 때문인 것으로 판단된다.

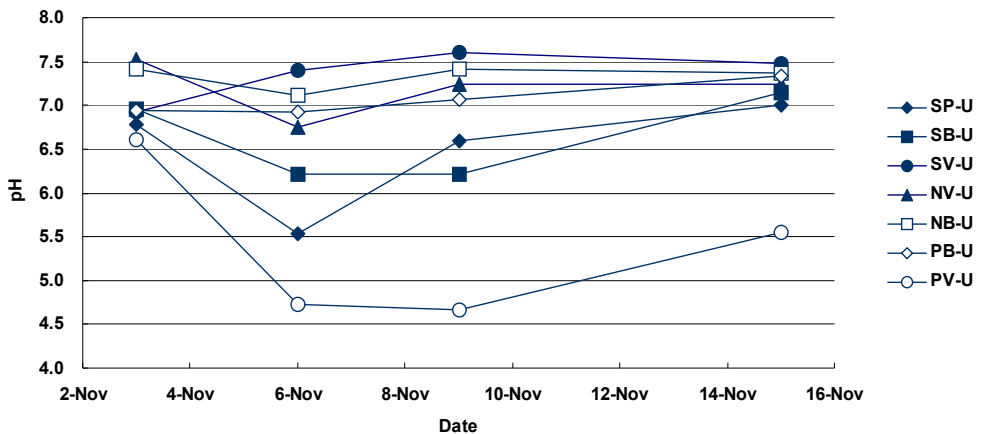


Figure 32. pH of water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 31).

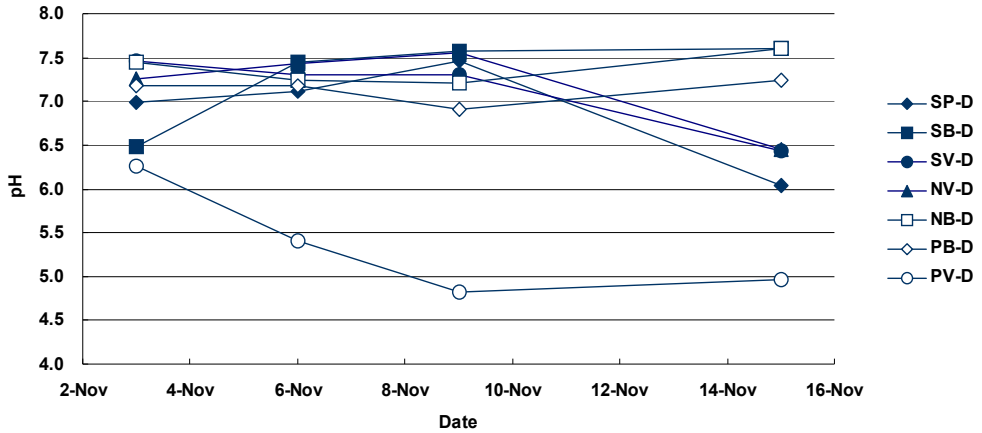


Figure 33. pH of water collected from lower drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 31).

유출수 중의 고형물(SS) 함량은 침식에 의한 토양유실의 정도를 가늠할 수 있는 기초 자료로 쓰일 수 있다. 즉 유출수에 포함된 고형물 함량이 높을수록 토양 유실이 크다고 볼 수 있기 때문이다.

유출수 양을 기록한 세 번의 데이터와 모의경사시험구 유출수의 고형물 함량을 이용해 실제 발생한 토양유실량을 계산해 보면(Table 25), 하이드로씨딩용 조성물을 붙이지 않은 골재부산물 토양재(PB)에서의 표면 침식에 의한 토양 유실량이 16,819mg으로 가장 높게 계산되었다. 하지만 조성물을 붙인 골재부산물 토양재(PV)에서는 207mg으로 크게 감소하는 결과가 나왔다. 다음으로는 녹생토에 하이드로씨딩용 조성물을 붙여준 처리구에서 5,300mg이 유실되는 것으로 계산되었다. 토양유실이 가장 적은 처리구는 아무 처리도 하지 않은 마사토 처리구로 127mg이었다. 그리고 녹생토에서는 조성물을 붙여주었을 때(NV)는 토양유실량이 2,274mg이었으나, 조성물을 붙이지 않았을 때(NB)는 1,292mg으로 감소하였는데 이는 골재부산물 토양재의 경우와는 반대의 결과였다.

한편 마사토와 녹생토에 하이드로씨딩용 조성물을 붙였을 때가 조성물이 없을 때 보다 유출수에 고형물이 크게 증가한 것과 골재부산물의 경우는 반대로 큰 폭으로 감소한 데에는 식생기반재의 특성과 조성물의 계면친화도와 식생기반재의 수분보유력과 상관이 높을 것으로 판단되었다. 즉 조성물과의 계면친화도가 작고 상대적으로 골재부산물 토양재 보다 수분보유력이 낮은 마사토와 녹생토의

표면에서는 조성물이 이탈되기 쉬웠고, 골재부산물 토양재 표면에서는 조성물이 토양침식을 억제하는 외피 역할을 했기 때문에 추론되었다.

Table 25. The total amount of soil loss during three rain event.

	1st rain event		2nd rain event		3rd rain event		Soil loss $a_1 \times b_1 +$ $a_2 \times b_2 +$ $a_3 \times b_3 =$ mg
	a ₁ particle content mg L ⁻¹	b ₁ water volume L	a ₂ particle content mg L ⁻¹	b ₂ water volume L	a ₃ particle content mg L ⁻¹	b ₃ water volume L	
SP-U	33	8.0	80	12.7	14	14.0	1,476
SB-U	21	3.5	61	1.5	7	2.0	127
SV-U	54	16.2	150	16.7	115	16.7	5,300
NV-U	49	10.3	91	14.3	36	13.0	2,274
NB-U	34	14.2	37	16.2	15	14.0	1,292
PB-U	823	9.8	970	7.5	255	5.8	16,819
PV-U	21	4.4	33	2.0	18	2.7	207

토양유실이 가장 심했던 하이드로씨딩용 조성물을 붙이지 않은 골재부산물 토양재에서의 유출수 고형물의 농도는 처음 강우에서 1,100mg L⁻¹ 였으나, 4번째 강우에서는 255mg L⁻¹으로 크게 감소하였다(Figure 34). 이는 시간의 경과에 따라 골재부산물 토양재의 표면이 안정화되었기 때문인 것으로 판단되었으며, 따라서 골재부산물 토양재를 녹화용 토양재로 상용화하기 위해서는 초기 침식방지 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

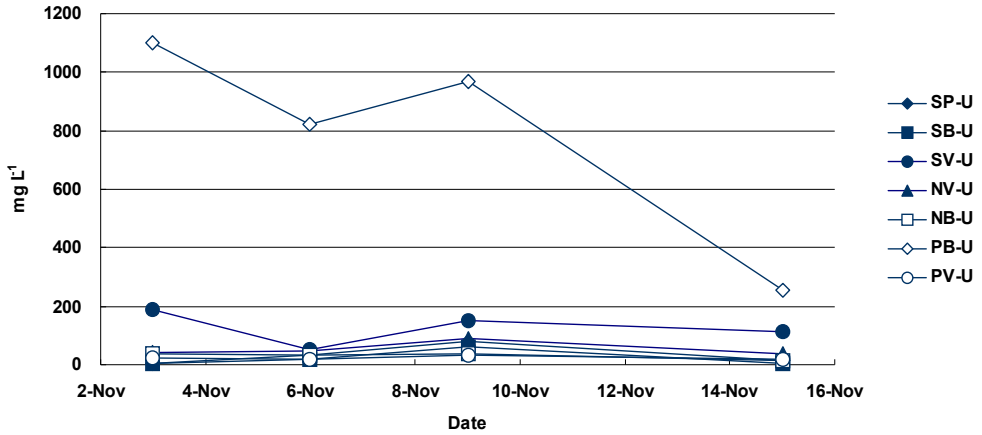


Figure 34. The suspended particle amount in water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 31).

유출수 중 질산태 질소의 농도는 양분함량이 높은 골재부산물 토양재와 녹생토에서 높게 나타났다. 초기 강우에서는 표면과 토양층을 통과한 유출수의 질산태 질소(NO_3^- -N) 농도가 침투수의 질산태 질소 농도 보다 다소 높았으나, 강우가 반침투수의 질산태 질소 농도가 급격히 상승하였다(Figure 35, 36). 이는 물에 녹기 쉽고 이동성이 강한 질산태 질소가 강우와 함께 토양 아래쪽으로 이동해 갔기 때문이며, 질산태 질소 농도의 증가는 유기물 분해로 인한 유기태 질소의 무기화의 영향 때문으로 판단된다.

유출수 중 암모니아태 질소(NH_4^+ -N)의 농도는 질산태 질소와는 달리 처리에 따른 차이가 매우 작게 조사되었다(Figure 37, 38). 조사 기간 동안 골재부산물 토양재와 녹생토 유출수에서의 암모니아태 질소 농도는 10mg L^{-1} 내외였으나, 질산태 질소 농도는 최고 600mg L^{-1} 에 달하고 있어 이들 두 식생기반재에서 무기태 질소는 주로 질산태 질소 형태로 거동하고 있음을 확인하였다. 경사시험구 토양 중의 무기태 질소는 주로 질산태 질소로 존재하고 있다고 판단된다.

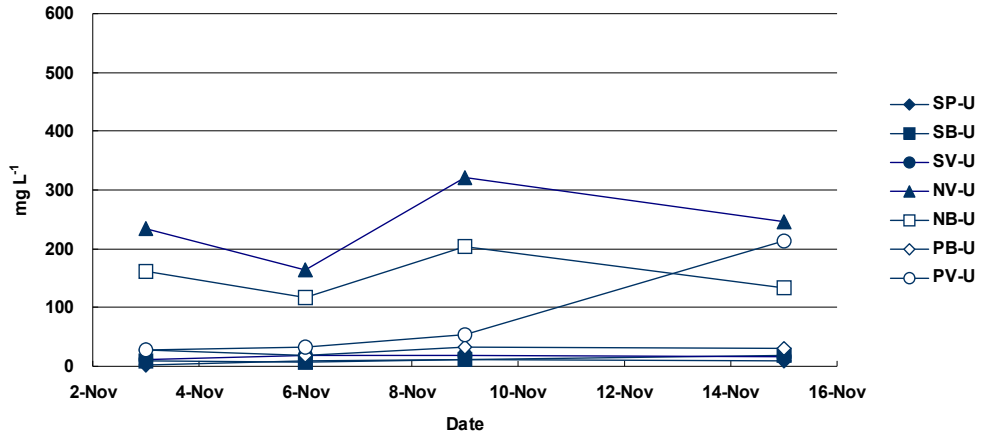


Figure 35. The $[NO_3^-N]$ in water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

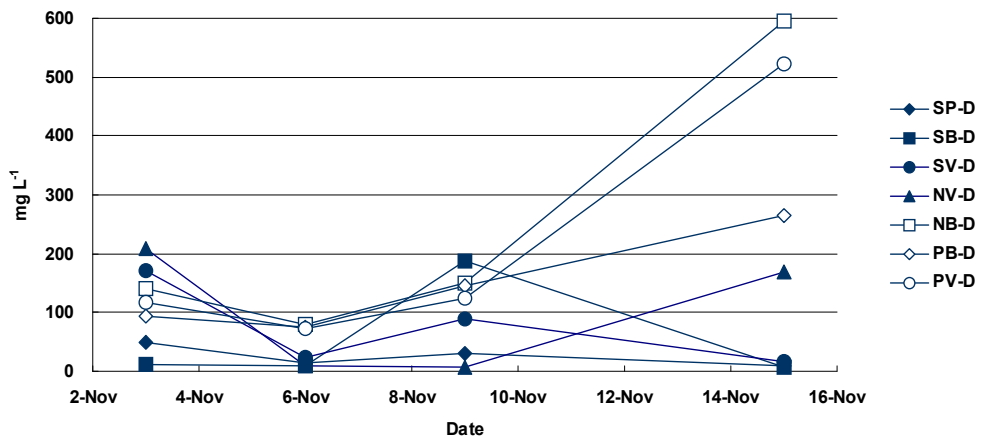


Figure 36. The $[NO_3^-N]$ in water collected from lower drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

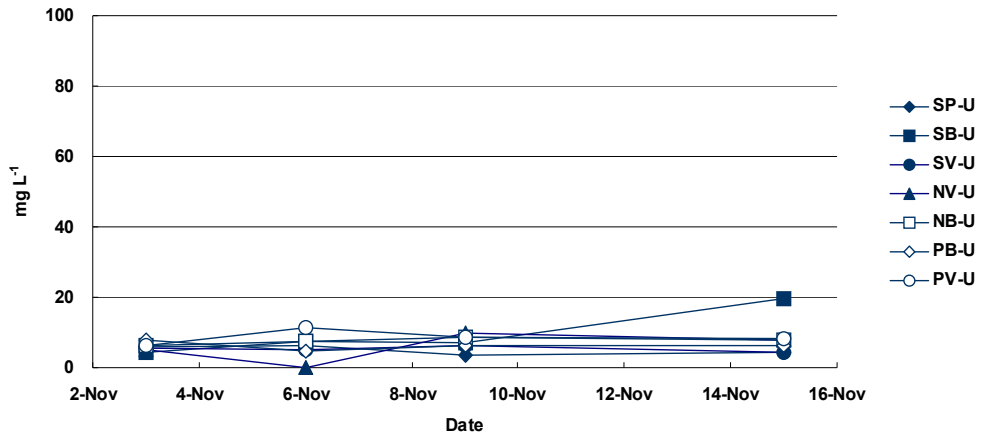


Figure 37. The $[\text{NH}_4^+\text{-N}]$ in water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

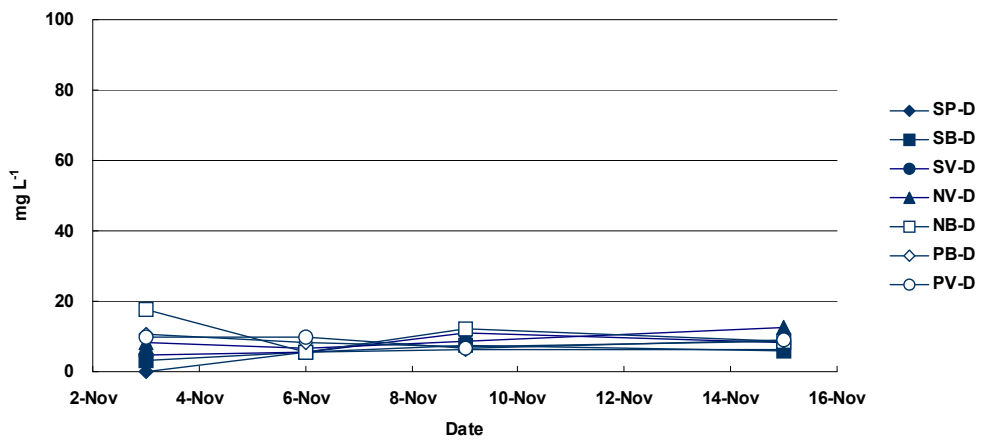


Figure 38. The $[\text{NH}_4^+\text{-N}]$ in water collected from lower drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

유출수의 유효인산함량 (Figure 39, 40)은 모든 처리구에서 증가하고 있었으며, 마사토에 하이드로씨딩용 조성물을 붙여준 처리구에서의 함량이 가장 높게 나타났다. 골재부산물 토양재의 경우 조성물을 붙인 처리구의 평균 유효인산 함량은 붙여 주지 않은 처리구에 비해 10mg L^{-1} 가량 높았다.

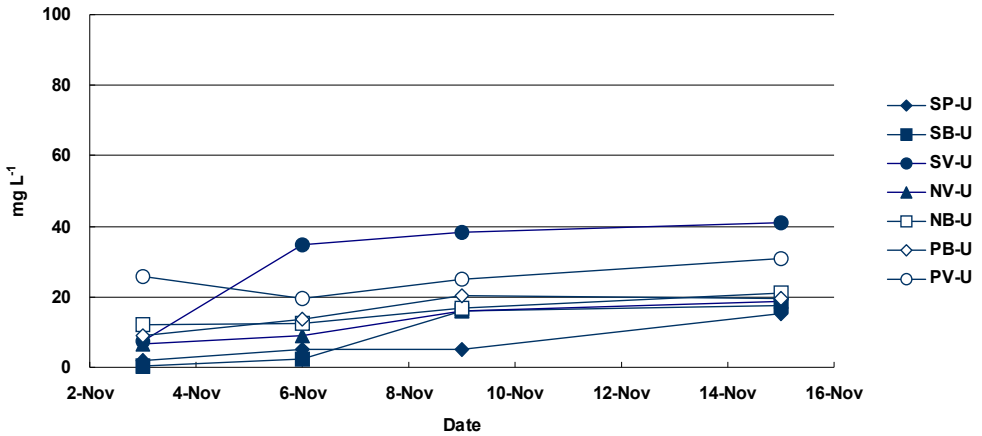


Figure 39. The available phosphate in water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

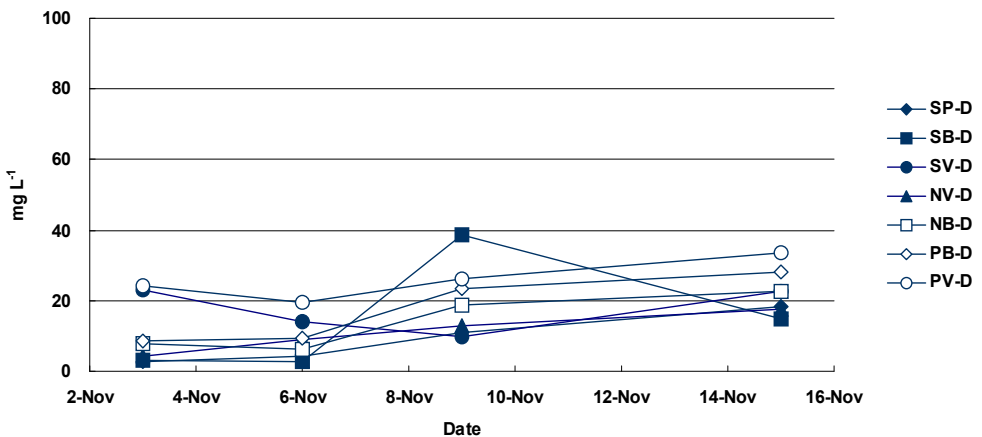


Figure 40. The available phosphate in water collected from lower drainage line of the 2nd runoff pan study (See Figure 30).

유출수의 황산이온 함량(Figure 41, 42)은 골재부산물 용토재 처리구에서 가장 높게 나타났으며, 이는 용토재 조제 과정에 투입된 인산석고에 기인하는 것으로 판단되며, 이로 인해 유출수의 pH가 가장 낮은 수치를 보이고 있다. 하지만 골재부산물 용토재 자체의 pH는 중성에 가까운 약산성을 나타내고 있고, 김 등 (2000)은 ‘부산물 석고를 이용한 산불피해 지역 토양유실 방지’ 연구에서 pH가 매우 낮은 인산석고의 처리에도 불구하고 처리구 토양 및 유거수의 pH는 대조구 토양 및 유거수의 pH와 별다른 차이를 보이지 않은 것으로 보아 인산석고의 사용에 따른 토양 및 계류수 pH의 변화는 거의 없을 것으로 보고하고 있고, 그리고 각각의 모의경사시험구에서 유출된 유출수의 pH와 황산이온함량과의 상관관계를 분석해 본 결과(Figure 43) 황산이온함량이 증가할수록 pH가 감소하는 경향을 보이고는 있지만 R^2 값이 0.1908로 매우 낮았기 때문에 인산석고의 황산이온이 골재부산물 토양재 및 이를 통과하는 유출수의 pH 변화에 미치는 영향에 대해서는 보다 심화된 연구가 필요한 것으로 판단된다.

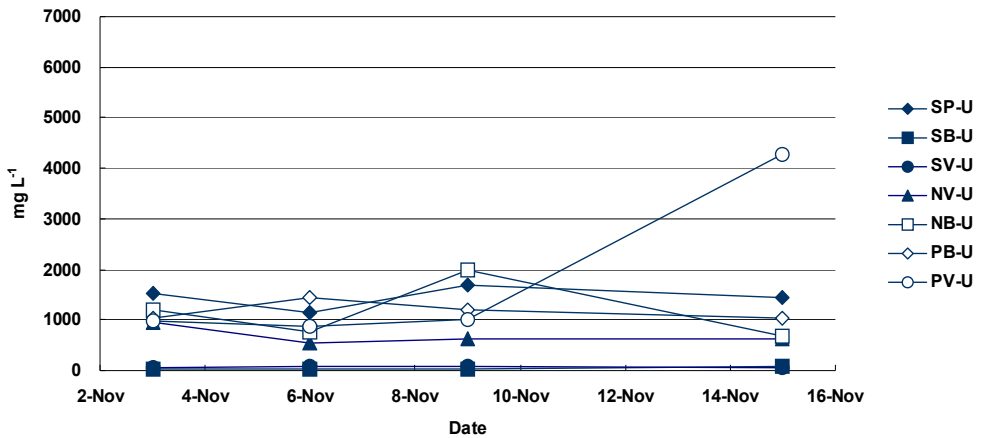


Figure 41. The [SO₄²⁻] in water collected from upper drainage line of the 2nd runoff pan study. (See Figure 31).

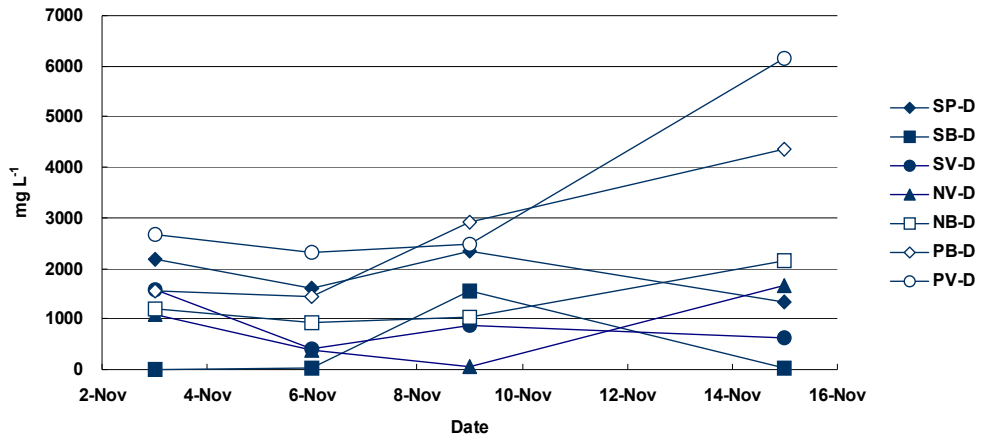


Figure 42. The $[\text{SO}_4^{2-}]$ in water collected from lower drainage line of the 2nd runoff pan study. (See Figure 31).

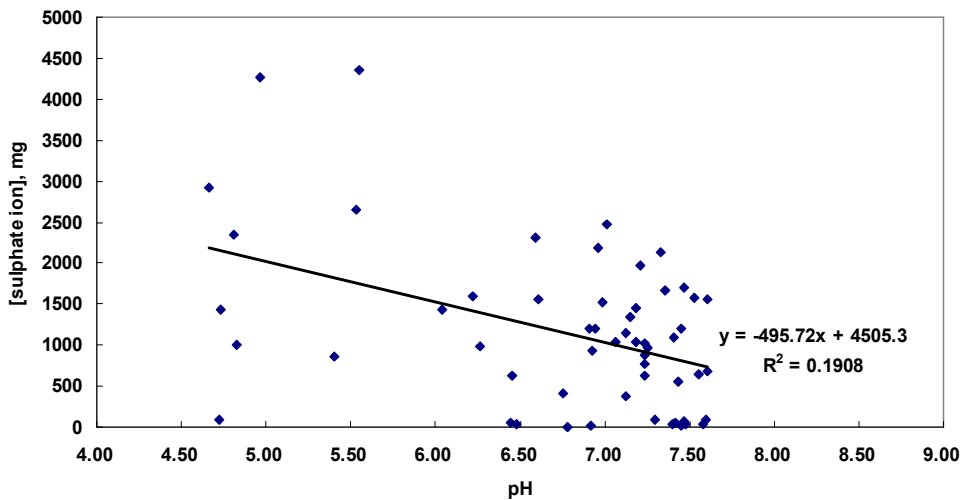


Figure 43. The relation between pH and sulphate ion concentration of the water drained from the 2nd runoff pan study.

제4절 비탈면을 대상으로 한 현장검증

1. 1차 현장시험 시공지 조성

현장 시험시공을 위하여 군산의 골재업체인 (주)대운개발로부터 골재부산물을 25톤 트럭 2대 분량을 제공받아 전문상토제조업체인 청주의 한국농산에서 마사토와 인산석고, 코코피트, 퇴비를 혼합해서 시험시공을 위한 식생기반재를 제조하였다. 총 32개의 톤백에 해당하는 골재부산물 식생기반재를 순창의 시험시공지로 운반하였다.



(a) Byproduct aggregates (b) Production facility (c) Soil materials

Figure 44. The preparation of soil materials using byproduct aggregates.

2006년 11월 2일부터 11월 8일에 걸쳐 현장 시험시공을 실시하였다. 시험시공에 사용한 장비는 크레인, 발전기, 컴프레서, 에어건 장비 등이었다. 시험시공 대상지는 전라북도 순창-운암 4공구 도로확장구간에 위치였으며, 사면은 3개의 단으로 구성되어 있었고, 시험시공은 중단을 대상으로 하였다(Figure 45).

대상 사면은 암반이 노출된 곳으로 일부 남아 있는 토양은 사양토(Table 26)였으며, pH가 7.98로 일반토양에 비해 알칼리도가 높았고, 유기물함량은 0.14%, 총 질소는 0.03%, 유효인산은 6ppm으로 비옥도 측면에서 매우 척박한 조건이었다(Table 27).



Figure 45. The site for the 1st field feasibility test.

Table 26. The soil texture of the 1st field feasibility test site.

Particle size	Particle distribution			Texture (USDA)
	Sand	Silt	Clay	
Percent	73.07	21.09	5.84	Sandy loam (SL)

Table 27. The chemical properties of soil in the 1st field feasibility test site.

pH	EC	O.M.	Avail-P	T-N	CEC	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
	dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%	cmol kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
7.98	0.06	0.14	6.00	0.03	13.00	0.20	0.59	0.24	0.14

대상 사면에 슬라이딩 방지를 위해 철망을 설치하고 그 위에 골재부산물 토양 재를 이용한 식생기반재와 일반 녹화토양인 녹생토를 건식 장비를 이용해 10cm 두께로 뿌어붙였다. 사용한 식물 종자는 일반적으로 비탈면녹화에 적용되는 재래 목본 4종과 재래초본(또는 자생식물) 13종, 그리고 양잔디 2종의 혼합종자(seed mixture)였다(Table 28).

Table 28. The germination rate and the amount of applied plant species used for the 1st field feasibility test.

Scientific name	Korean name	Germination rate (%)	Amount applied (g m ⁻²)
<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i> M.	낭아초	83	1.83
<i>Rhus chinensis</i>	붉나무	64	1.59
<i>Albizia julibrissin</i>	자귀나무	72	5.61
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	참싸리	84	5.00
<i>Dendranthema zawadskii</i> var. <i>latilobum</i> (Maxim.)	구절초	65	0.28
<i>Elsholtzia splendens</i> Nakai	꽃향유	90	0.11
<i>Silene armeria</i> L.	끈끈이대나물	67	0.04
<i>Patrinia scabiosaefolia</i> Fisch. ex Trevir.	돌마타리	58	1.81
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonicus</i>	별노랑이	90	2.63
<i>Lespedeza cuneata</i>	비수리	79	1.49
<i>Chrysanthemum boreale</i>	산국	81	0.44
<i>Centaurea cyanus</i> L.	수레국화	83	1.29
<i>Dianthus superbus</i> var. <i>longicalycinus</i>	술페랭이	86	2.78
<i>Callistephus chinensis</i>	야생과꽃	70	0.44
<i>Medicago savita</i> L.	자주개자리	74	1.56
<i>Caryopteris incana</i>	층꽃나무	68	1.39
<i>Coreopsis lanceolata</i>	큰금계국	89	1.17
<i>Lolium perenne</i>	페레니얼 라이그라스	95	1.19
<i>Festuca arundinacea</i>	틀페스큐	96	1.02

처리구는 모두 4개였으며 각각의 면적은 100m² 가량이었다. 녹생토 처리구간은 양잔디 위주의 처리구(Nok-grass)와 자생식물 위주의 처리구(Nok-native)로 나뉘며, 골재부산물 토양재 처리구간은 자생식물 위주의 혼합종자를 골재부산물 토양재와 함께 투입한 처리구(BA-native)와 골재부산물 토양재를 먼저 뿔어붙인 후 그 위에 1cm 두께로 종자뿔어붙이기를 한 처리구(BA-HS-native)로 나누었다.

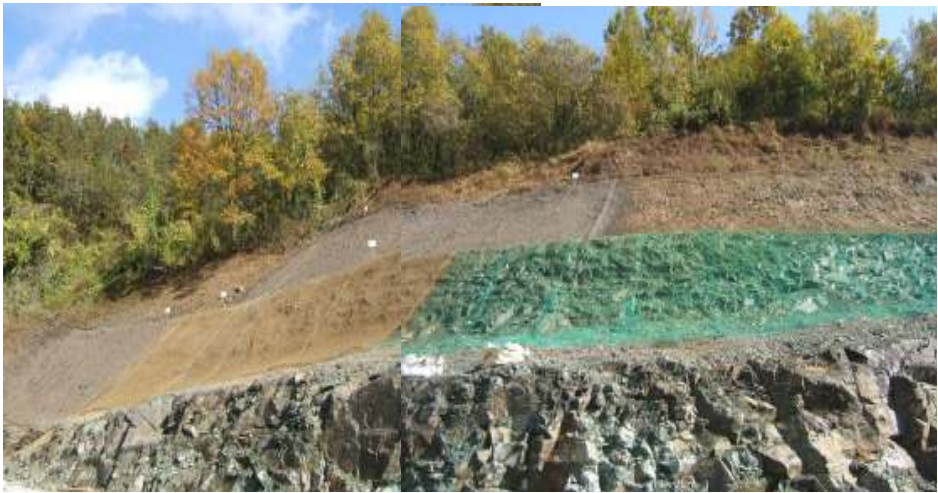


Figure 46. Field test installation.

시험시공을 하는 동안 골재부산물 식생기반재의 실제 적용에 있어 공정 진행, 사면 부착력, 시공의 수월성 등에 관한 관찰 가능한 문제점을 파악하였다. 시험시공은 면고르기, 철망 설치, 녹생토 시공, 골재부산물 토양재 시공, 하이드로씨딩, 차광막 설치의 순서로 진행되었다(Figure 47).



(a) Test site



(b) Installaton of wire net



(c) Installation of Nok-grass



(d) Installation of Nok-native



(e) Installation of BA-native



(f) Installation of BA-native



(g) Installation of BA-HS-native



(h) Installation of plastic mulch

Figure 47. The installation procedure of the 1st field feasibility test (Nok-grass, Nok-native, BA-native and BA-HS-native mean the treatment condition. See Table 29).

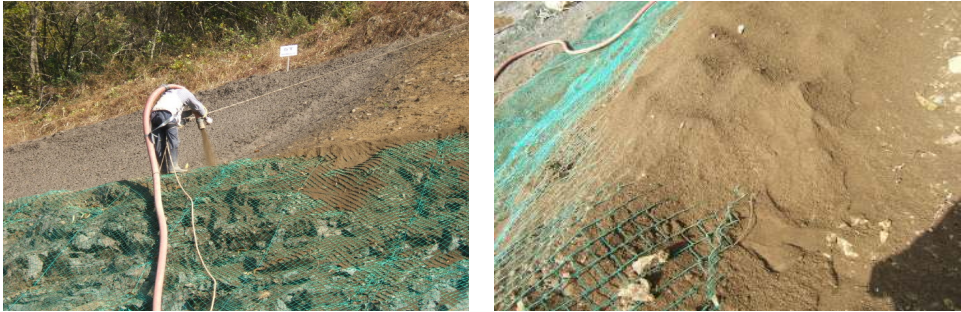
녹화시공 전문기술자에게 철망 설치와 녹생토 시공은 현재 비탈면 녹화를 위해 보편적으로 적용되는 공정이었지만, 골재부산물 토양재는 처음 접하는 재료였기 때문에 사전에 이에 대해 숙지시켰으며, 기술자들이 골재부산물 토양재로 시공하면서 경험한 몇 가지 사항들, 즉 재료의 이송과 사면부착 및 재료 변경에 대한 작업 만족도 등에 대해 질문하고 그 대답을 녹생토와 비교하여 골재부산물 토양재의 시공성을 분석하였다.

우선 골재부산물 토양재가 균일하게 혼합되어 있지 않아 지름 5cm 이상의 덩어리가 많이 있었다. 그래서 토양재가 컨베이어 벨트를 타고 이송될 때 수작업으로 덩어리를 깨주어야 했다. 그리고 에어건을 통해 분사될 때 토양재가 비탈면에 잘 부착되지 않고 날리고 흩어지면서 재료 손실율이 10%가 넘을 것으로 예측되었다. 시공기술자는 호스를 통해 뽑어져 나오는 토양의 상태와 흐름은 상당히 좋은 편이지만, 재료가 가볍고 점성이 부족해 고압 분사된 토양재가 그 자리에 부착되지 않고 튀어 흩어진다고 하였다.

이에 시공 작업을 중단하고 원인 분석과 함께 대책을 마련해야 했다. 현장 적용과정에서 발생한 문제점은 골재부산물 토양재가 분사되면서 입자가 흩어지는 것이었고 이를 해결하기 위해서는 토양재의 수분함량을 높여주어야 했다. 수분함량의 적당한 증가는 토양의 점착성을 높여주기 때문이다.

이를 위하여 골재부산물 토양재가 분사되는 호스 끝 부분에 물 호스를 끼워 넣어 고압에 의해 토양재와 물이 분사되면서 섞여지도록 하였다(Figure 48). 이러한 조치를 취한 후 토양재의 사면 부착력이 크게 향상되었고, 이에 따라 작업 속도 또한 2배 가량 빨라졌다.

새로운 재료를 개발할 때 실제 상황에서 그 재료에 대한 사전 적용을 통해 문제점을 도출하고 이를 해결하여 상품성이나 공정의 완성도를 높인다는 원칙에서 보면 앞에서의 문제는 실제 시공을 하기 전에는 예상하지 못했던 것이었음에도 불구하고, 현장에서 바로 조치함으로써 해결할 수 있는 가벼운 문제였다고 판단된다. 따라서 골재부산물 토양재를 비탈면 녹화용 자재로 사용할 때는 분사 호스에 물 호스를 부착시켜야 할 것이다.



(a) Before the trouble-shooting measure



(b) After the trouble-shooting measure

Figure 48. The trouble-shooting measure through attaching another water line to main hose during the installation of the 1st field feasibility test.

2. 1차 시험시공지 사후 모니터링 결과

시험시공 후 식생에 의한 녹화 피복률 변화를 조사하였고, 식생기반재 시료를 채취하여 토양학적 특성 변화를 분석하였다. 식생조사는 약 10개월이 경과한 2007년 9월 21일에 방형구법으로 각 처리구에서의 식물 출현종, 우점종, 피복률을 조사하는 방법으로 수행되었고 조사 데이터를 가지고 처리구에 따른 종다양성, 침입종의 종류 등에 대해 종합적인 분석을 하였다.

가. 토양분석결과

2007년 5월에 채취한 시공지 토양 특성을 골재부산물과 녹생토로 구분하여 비

교 분석하였다. 골재부산물 토양재 구간의 평균 pH는 6.90이었고 녹생토 구간의 평균 pH는 7.89였다. 모의경사시험구에서 보다는 골재부산물 토양재의 pH가 다소 높은 값을 보였지만 중성에 가까운 약산성이었던 것이었고 녹생토의 pH는 뚜렷한 알칼리성을 나타냈다. 유기물 함량과 코어 샘플러로 채취한 불교란 토양 시료의 용적밀도에 있어서는 두 토양에서의 유의성 있는 차이가 없었다. 유효인산은 골재부산물 토양재가 평균 59.23mg kg⁻¹으로 녹생토 평균 유효인산함량인 29.43mg kg⁻¹ 보다 두 배가량 높았다. 치환성 칼슘 이온 농도는 골재부산물 토양재에서 평균 114.02cmol kg⁻¹으로 녹생토 평균 치환성 칼슘 이온 농도인 22.33cmol kg⁻¹ 보다 5배 정도 컸다(Table 29).

따라서 종합적인 현장 토양 조건은 골재부산물 토양재의 특성이 녹생토 토양 특성 보다 식물 생육에 양호한 pH와 양분 조건을 가지고 있다고 판단되었다.

Table 29. The properties of the installed soil.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	Avail-P mg kg ⁻¹	Bulk density	Ex.-Ca ²⁺ cmol kg ⁻¹
Nok-grass	7.91	0.71	6.06	27.78	1.03	23.10
Nok-native	7.86	0.76	6.40	31.07	1.03	21.56
Average	7.89	0.74	6.23	29.43	1.03	22.33
BA-grass	6.88	2.11	6.12	62.13	0.98	123.04
BA-HS-native	6.91	1.84	6.40	56.32	1.09	104.99
Average	6.90	1.88	6.26	59.23	1.04	114.02

(Nok-grass: Noksaengto mainly with grass seed mixture; Nok-native: Noksaengto mainly with native plant seed mixture; BA-native: improved byproduct aggregate soil with native plant seed mixture; BA-HS-native: improved byproduct aggregate soil and hydro-seeding with native plant seed mixture).

나. 식생분석결과

2006년 11월 시험시공지가 조성된 후 겨울을 지나고 나서 이듬해인 2007년 3월이 되면서 녹화가 되기 시작하였다. 4월에는 모든 처리구에서 양잔디류에 의해 100% 녹화가 되었고, 시간이 흐름에 따라 식물 생육이 더욱 활발해졌다. 단 시험시공지 바로 위에 간판을 설치하는 과정에서 골재부산물 토양재 처리구의 일부(BA-HS-native 구간)가 훼손되는 일이 발생하였다. 하지만 토양 속에 남아있던 종자들이 발아하고 자리 잡으면서 곧 회복되었다. 식물 생육이 절정에 이른 7월과 9월 사이에는 골재부산물 토양재 처리구 중 하이드로씨딩 공법으로 종자를 뿌려준 처리구(BA-HS-native)가 가장 부피감 있는 경관을 보여주었다(Figure 49). 이와 같은 시공지 모니터링을 근거로 1년간의 녹화 모니터링을 통해 골재부산물 토양재를 이용한 비탈면 녹화 시공이 성공적으로 이루어졌다고 판단되었다.



(a) April 4. 2007.



(b) May 3. 2007.



(c) July 7. 2007.



(d) September 21. 2007.

Figure 49. The landscape change of the 1st field feasibility test site for one year.

2007년 9월 21일 실시된 식생조사결과는 다음과 같다(Table 30, 31, 32). 우선 토양 재료와 시공 조건에 상관없이 전 조사지역에서 Tall fescue(*Festuca arundinacea* Schreb.)와 Perennial Ryegrass(*Lolium perenne* L.)의 출현빈도와 피복율이 높았다. 이것은 조사대상지역이 시공 후 1년 정도 밖에 경과하지 않은 지역이기 때문으로 판단된다.

시간이 경과하면 양잔디류는 포기를 이루고 개체당 점유면적을 넓히면서 고착화되고 나머지 공간에 콩과식물인 별노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonica* Regel), 자주개자리(*Medicago savita* L.), 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya* Miq.), 낭아초(*Indigofera pseudo-tinctoria* M.)와 같은 식물들이 자리를 잡으면서 전반적인 식생피복률이 높아질 것으로 예상된다.

시험지내에서 원래 파종된 식물에 의한 평균 피복도는 골재부산물 토양재에 하이드로씨딩으로 자생식물 위주의 혼합종자를 처리한 BA-HS-native 구간이 91.3%로 가장 높았고, 녹생토에 자생식물 위주의 혼합종자를 처리한 Nok-native 구간이 63.1%였으며, 녹생토에 양잔디 위주의 혼합종자를 처리한 Nok-grass 구간이 52.5%였다. 평균 피복도가 가장 낮은 구간은 골재부산물 토양재에 양잔디 위주의 혼합종자를 처리한 BA-grass로 45.6%였다.

한편 BA-HS-native 처리구의 경우에는 가로세로 50 x 50cm 방형구에서의 초기 투입종 평균 출현식물종이 6.0개종으로 가장 많았고 그 분포 또한 균일하게 이루어지고 있어 높은 피복률에 의한 사면안정 기능과 동시에 시공지의 종다양성 측면에도 기여하고 있었다. BA-grass 구간의 경우 외부로부터 침입한 이입종수가 총 9종으로 나타났으나, 조사방형구에서의 평균 출현종수는 5.5종으로 BA-HS-native 구간에 비해 낮았는데 이는 평균피복도가 가장 낮은 BA-grass 구간의 비어있는 공간으로 외부의 종들이 많이 이입하고 있음을 말해주는 것이다. 따라서 BA-grass와 같은 녹화 방법은 종다양성 측면에서는 긍정적으로 보일지 모르지만 노출되는 부위가 많음으로 인한 토사의 유출, 사면 안전성의 저하와 같은 문제를 일으킬 가능성이 높다고 보인다.

이와 같은 결과를 통해 볼 때, 골재부산물 토양재를 이용한 녹화시공은 하이드로씨딩과 결합해 실시하는 것이 효과적이며, 또한 이 방법이 초기 녹화에도 매우 유용한 방법임을 말해주는 것으로 판단된다. 따라서 골재부산물 토양재를 이용한 녹화시공은 녹생토와 함께 도로 비탈면처럼 초기 녹화가 필요한 장소에서의 활용가치가 높은 시공방법이 될 수 있다고 사료된다.

비탈면의 길이가 길어지면 사면안정성을 위해 중간 중간에 소단을 설치하게 되는데 이러한 소단은 녹화시공을 하게 되면 비탈면이 아닌 편편한 평면이 되므로 주변으로부터 이입되는 종들이 우선적으로 정착하는 지역이다. 이 때문에 소단지역은 비탈면보다 출현종의 수가 많아 종다양도가 높게 된다.

본 조사에서 소단의 출현식물종수는 BA-HS-native 구간에서 18종으로 가장 많았으며, 그 뒤를 이어 BA-grass 구간에서 17종, Nok-grass 구간에서 15종, Nok-native 구간에서 13종의 순서로 많았다. 하지만 소단의 피복도는 Nok-grass, Nok-native, BA-HS-native, BA-grass 순으로 조사되었는데 이것은 척박한 환경에서도 잘 자라는 콩과식물인 벌노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonica* Regel)와 덩굴식물인 환삼덩굴(*Humulus japonicus* Siebold & Zucc.)이 높은 피도를 유지하고 있었기 때문이다. 소단의 이입종수는 BA-HS-native, BA-grass, Nok-grass, Nok-native 순으로 조사되었는데 이것은 BA-HS-native 구간에 앞으로 더 많은 종이 유입될 수 있음을 말해준다. 초기 이입종은 주변으로부터 유입된 초본류의 식물들은 줄명아주(*Chenopodium ficifolium* Smith), 쑥(*Artemisia princeps* Pamp.), 환삼덩굴(*Humulus japonicus* Siebold & Zucc.), 새콩(*Amphicarpaea bracteata* subsp. *edgeworthii* (Benth.) H. Ohashi) 등으로 초기 생장과 초기 피복률이 높은 특징을 가지고 있다.

2007년 들어서도 골재부산물 토양재를 사용한 구간의 녹화상태가 매우 양호하였으며, 향후 지속적인 모니터링이 필요하겠지만 안정된 경관을 계속 유지할 것으로 판단되었다.



Figure 50. The landscape of the 1st field feasibility test site, April 2008.

Table 30. The result of vegetation survey - the number of plant species and the average vegetation coverage.

		Nok-grass	Nok-native	BA-grass	BA-HS-native
	Ave. coverage of vegetation (%)	52.5	63.1	45.6	91.3
Slope area	No. of appearance species	3.1	4.1	5.5	6.0
	No. of invaded species	6	7	9	6
	Ave. coverage of vegetation (%)	75	65	35	50
Planar area	No. of appearance species	15	13	17	18
	No. of invaded species	11	10	12	15

(Nok-grass: Noksaengto mainly with grass seed mixture; Nok-native: Noksaengto mainly with native plant seed mixture; BA-native: improved byproduct aggregate soil with native plant seed mixture; BA-HS-native: improved byproduct aggregate soil and hydro-seeding with native plant seed mixture).

Table 31. The composition of plant species in the slope area.

Type	1(Nok-grass)								2(Nok-native)								3(BA-grass)								4(BA-HS-native)								
Serial Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Releve Number	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
Number of species	3	6	3	2	3	2	3	3	5	4	4	5	3	3	5	4	5	5	6	7	6	4	6	5	4	4	6	6	7	8	6	7	
Coverage (%)	50	20	30	80	60	30	60	90	60	40	35	95	60	90	75	50	20	40	45	80	35	95	35	15	95	90	95	95	90	95	80	90	
Height of herb layer(cm)	40	40	40	40	40	40	40	40	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	140	140	140	140	140	140	140	140	
Slope aspect(degree)	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	WN	
Altitude (m)	280	280	280	280	280	280	280	280	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	
Quardrate size(m ²)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Differential species of Site																																	
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	50	20	25	70	30	20	50	70	50	35	20	10	40	60	60	40	10			10	30	5		10	30	10	10	50	30	50	20	30	
<i>Lolium perenne</i> L.	+	+	5	10	30		10	20	10	5	10	+	20	20	15	10	10			+		+	5	5	50	10	30	15	30	+	30	40	
<i>Chenopodium ficifolium</i> Smith																	10	20				40					5	10	10	20	10		
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i> Regel													+		10	+	30							10	70	50	20	20	20	30	10		
<i>Artemisia princeps</i> Pamp.												80												5			+	+			+		
<i>Medicago sativa</i> L.												5								15	40	+		+					+	+		+	
<i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.																						50	30										
<i>Albizia julibrissin</i> Durazz.					+												+	+			+			+								+	
<i>Chelidonium majus</i> var. <i>asiaticum</i> (Hara) Ohwi			+					+														+	+	+	+								
<i>Callistephus chinensis</i>												+	+							+	+								+				
<i>Commelina communis</i> L.																				10				+					+			+	

(continued).

Type	1(Nok-grass)								2(Nok-native)								3(BA-grass)								4(BA-HS-native)											
Serial Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
Differential species of Site																																				
<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koel.		+																	+		5												5			
<i>Cardamine flexuosa</i> With.		+	+																+					+												
<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.									+	+									+		+															
<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	+												+								+	+		+												
<i>Ipomoea purpurea</i> Roth																			+																	
<i>Boehmeria spicata</i> (Thunb.) Thunb.													5																					+		
<i>Coreopsis lanceolata</i> L.		+																																		
<i>Rumex crispus</i> L.																																			+	
<i>Lactuca indica</i> L.										10																										
<i>Salix koreensis</i> Andersson													+																							
<i>Clematis apiifolia</i> DC.																																				
<i>Phragmites</i> spp.																																				
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i> Miq.																																				
<i>Dendranthema boreale</i> (Makino) Ling ex Kitam.																																				+
<i>Dianthus longicalyx</i> Miq.																																				+

Table 32. The composition of plant species in the planar area.

Type	1	2	3	4
Serial Number	1	2	3	4
Releve Number	1	2	3	4
Number of species	15	13	17	19
Coverage (%)	75	65	35	70
Height of herb layer(cm)	40	35	40	110
Slope aspect	WN	WN	WN	WN
	280	285	285	285
Altitude (m)	194	194	194	194
Quardrate size(m ²)	10	10	10	10
Differential species of Site				
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	30	5	20	20
<i>Lolium perenne</i> L.	20	+	10	10
<i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.		40		20
<i>Setaria faberii</i> Herrm.		10		
<i>Boehmeria spicata</i> (Thunb.) Thunb.				
<i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i> Regel	20	+		
<i>Commelina communis</i> L.		+	+	10
<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	+	+	+	+
<i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.		+	+	+
<i>Lactuca indica</i> L.	+	+		+
<i>Chelidonium majus</i> var. <i>asiaticum</i> (Hara) Ohwi	+		+	
<i>Rumex crispus</i> L.		+	+	
<i>Amphicarpaea bracteata</i> subsp. <i>edgeworthii</i> (Benth.) H. Ohashi		5	+	
<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv. var. <i>viridis</i>			+	+
<i>Artemisia princeps</i> Pamp.	+			+
<i>Cyperus amuricus</i> Maxim.			+	+
<i>Panicum bisulcatum</i> Thunb.		+		+
<i>Medicago sativa</i> L.			+	+
<i>Albizia julibrissin</i> Durazz.	+		+	
<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koel.				5
<i>Impatiens textori</i> var. <i>textori</i>				+
<i>Chenopodium ficifolium</i> Smith				+
<i>Cardamine flexuosa</i> With.			+	
<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.			+	
<i>Coreopsis lanceolata</i> L.			+	
<i>Xanthium strumarium</i> L.				+
<i>Phytolacca americana</i> L.	+			
<i>Isodon japonicus</i> (Burm.) Hara				+
<i>Salix koreensis</i> Andersson				+
<i>Trigonotis peduncularis</i> (Trevir.) Benth. ex Hemsl.	+			
<i>Paulownia coreana</i> Uyeki		+	+	
<i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i> (Andersson) Rendle		+		
<i>Cirsium japonicum</i> var. <i>maackii</i> (Maxim.) Matsum.			+	

3. 2차 현장시험 시공지 조성

2차 시험시공은 1차 때와는 토양 조성을 달리하였다. 1차 시공에 사용된 골재부산물 토양재는 골재부산물 50%에 마사토, 코코피트, 피트모스, 인산석고, 퇴비 등을 10%씩 섞어서 만들어진 것이기 때문에 재료의 수가 많고, 원예용 자재여서 비용도 많이 소요되는 조건이었다. 1차 시험시공의 목표는 골재부산물을 적당한 유기물과 무기물로 혼합했을 때 녹화용 토양재로 기능을 할 것인지 그리고 소기의 녹화 목적을 달성할 수 있을 것인지를 확인하는 것이었다. 앞의 1차 시공에 대한 결과 분석을 통해 골재부산물이 적절한 조치를 취하면 녹화용 토양으로서 충분히 활용될 수 있음을 보였기 때문에 2차 시험시공에서는 골재부산물의 물리화학적 특성을 개량하기 위해 투입할 수 있는 값싼 재료로서 기존의 녹생토와 코코피트를 선정하였고, 실제 적용성이 있는지를 확인함으로써 경제성이 향상된 골재부산물 토양재를 제시하는 것을 목표로 하였다.

2차 현장시험시공을 위해 경상북도 성주의 골재업체인 (주)대흥으로부터 골재부산물을 제공받아 전문상토제조업체인 충청남도 청양의 (주)신타에서 식생기반재를 제조하였다. 1차 시험시공과 달리 식생기반재의 재료로 골재부산물, 녹생토, 코코피트를 사용하였으며, 부피기준으로 골재부산물 10% , 코코피트 10% , 녹생토 80% 로 구성된 식생기반재 BA10, 골재부산물 25% , 코코피트 10% , 녹생토 65% 로 구성된 식생기반재 BA25, 골재부산물 50% , 코코피트 10% , 녹생토 40% 로 구성된 식생기반재 BA50 세 종류의 식생기반재를 제조하였다. 비교를 위해 다른 재료를 혼합하지 않은 녹생토 100%인 식생기반재 Nok는 녹생토 회사로부터 직접 공급 받았다.

각각의 처리구는 골재부산물 비중이 증가할수록 EC, 암모니아태 질소 농도, 질산태 질소 농도, 유효인산 함량 등은 소폭으로 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 골재부산물의 증가는 상대적으로 양분 함량이 높은 녹생토의 감소를 유발하기 때문이었다. 하지만 유기물 함량에 있어서는 녹생토(10.48%) 보다 2차 골재부산물 토양재에서 더 높은 12.5%로 분석되었는데 이는 골재부산물 토양재에 공통적으로 들어간 코코피트에 의한 것이라 판단된다. 여러 유기물 재료 중에 코코피트를 사용한 이유는 코코피트가 물과의 친화력이 높아 수분을 잘 흡수 저장하며 고압으로 뿜어지는 녹화 토양재의 압축을 완화시켜서 토양경도가 심하게 증가하는 것을 막아줄 수 있는 재료로 판단되었기 때문이다. pH는 모든 토양재에서 7.3

~ 7.4였으며, 토양재의 종류에 따른 차이는 없었다(Table 33). 치환성 양이온 함량에 있어서도 처리간의 차이는 없었다(Table 31).

Table 33. The properties of the installed soil for the 2nd feasibility test.

Treatment	pH	EC	O.M.	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Avail-P
		dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
BA10	7.36	1.10	12.52	127.12	39.34	31.52
BA25	7.47	1.03	12.59	117.06	67.69	29.54
BA50	7.37	0.73	12.52	62.18	13.72	27.37
Nok	7.42	1.10	10.48	182.00	22.87	40.76

(Nok: Noksaengto; BA10: 10% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 80% Noksaengto; BA25: 25% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 65% Noksaengto; BA50: 50% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 40% Noksaengto).

Table 34. The exchangeable cation concentration of the installed soil for the 2nd feasibility test (See Table 30).

Treatment	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
	cmol kg ⁻¹			
BA10	23.53	2.66	1.62	3.03
BA25	22.65	2.61	1.51	2.98
BA50	21.27	2.32	1.53	2.81
Nok	21.68	2.05	0.91	2.60

시험시공지는 경기도 남양주시 수동면 운수-대성간 도로 공사 현장에 위치하고 있는 암절개면으로 상단과 하단 두 개의 단으로 되어 있었다. 대상지를 4 등분하여 4 종류의 식생기반재 Nok, BA10, BA25, BA50을 약 100m²씩 10cm 두께로 취부하였다(Figure 51).

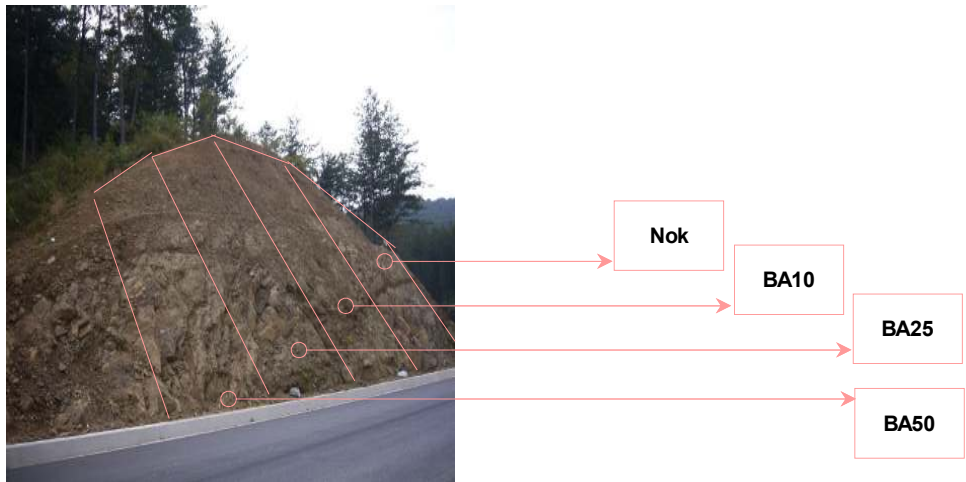


Figure 51. The site for the 2nd field feasibility test and the location of each treatment (Nok: Noksaengto; BA10: 10% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 80% Noksaengto, BA25: 25% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 65% Noksaengto, BA50: 50% byproduct aggregate + 10% coco-peat + 40% Noksaengto).

1차 시험시공 때 사용된 것과 같은 시공 장비가 동원되었으며, 식생기반재의 접착력을 높이기 위해 고압 호스 끝에 물 호스를 끼워 넣어(Figure 52) 식생기반재가 물과 섞여 뿌려질 수 있도록 하였다.

2차 시험시공은 1차 시험시공 때의 경험을 토대로 처음부터 분사 호스 끝부분에 물 호스를 부착하여 골재부산물 토양재의 사면 접착력을 높여주었다. 따라서 1차 시험시공에서 겪었던 시행착오는 없었다. 시공 기술자와의 사후 분석을 통해 골재부산물 토양재에 골재부산물 함량이 늘어날수록, 즉 Nok, BA10, BA25, BA50 순으로 시공자 입장에서 수월하고 가볍고 부드러워 시공하기 좋았으며, 시간도 녹색토와 차이가 없다는 결론을 얻었다. 하지만 골재부산물 토양재 제조과정에서 재료 혼합이 잘 안 돼서 후속 공정에 차질을 주었다.



Figure 52. The modification of air gun hose to increase the stickiness of soil material (green hose was for water supply).

녹생토 혼합종자 배합비에 대한 건설교통부 지침기준에서는 우리나라를 1지역군(난대성 생태계; 전남, 경남, 남해안), 2지역군(백두대간 생태계: 강원, 충북, 대구), 3지역군(서해안, 내륙 생태계: 서울, 경기, 충남, 전북, 서해안), 4지역군(동해안 생태계: 강원도, 경북 동해안) 4개의 생태권으로 나누고, 군락형태는 초본형, 관목형, 수림형의 3형으로 나누어 종자배합비를 제시하고 있다(건설교통부, 2005). 2차 시험시공에 사용된 혼합종자는 건설교통부 지침에 따라 3지역군의 관목형을 기준으로 준비되었으나, 실제 투입량에 있어서는 변동이 있었다(Table 35).

2007년 10월 12일부터 15일까지 4일에 걸쳐 2차 시험시공을 완료하였다. 각각의 처리구 구성에 앞서 공통적으로 철망 작업을 하였으며, 철망 작업이 완료된 후에 처리구 Nok으로부터 시작하여 BA10, BA25, BA50의 순서로 처리구를 조성하였다. 각각의 처리구 조성과정에서 재료의 상태와 시공 상의 차이 등을 관찰하였고 작업자들의 반응을 조사하여 골재부산물을 이용한 녹화용 식생기반재의 실효성을 분석하였다.

Table 35. The guide line of Ministry of Construction & Transportation and the actual amount of applied plant species seeds used for the 2nd field feasibility test.

Scientific name	Korean name	Guide line (g m ⁻²)	Actual amount applied (g m ⁻²)
<i>Albizzia julibrissin</i>	자귀나무	8	8
<i>Rhus chinensis</i>	불나무	8	3
<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	참싸리	16	11
<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i> M.	낭아초	16	6.6
<i>Lespedeza cuneata</i>	비수리	18	19
<i>Arundinella hirta</i>	안고초	24	-
<i>Medicago savita</i> L.	알팔파	16	17
<i>Festuca arundinacea</i>	톨페스큐	6	6.6
<i>Poa prantensis</i> L.	켄터키블루그라스	8	7.5
<i>Lolium perenne</i>	페레니얼라이그라스	6	6.6
<i>Dactylis glomerata</i>	오차드그라스	6	-
<i>Silene armeria</i> L.	끈끈이대나물	3	3.3
<i>Coreopsis lanceolata</i>	금계국	6	5
<i>Centaurea cyanus</i> L.	수레국화	6	1.5
<i>Dendranthema zawadskii</i> var. <i>latilobum</i> (Maxim.)	구절초	3	-
<i>Chrysanthemum boreale</i>	산국	3	0.3
<i>Dianthus superbus</i> var. <i>longicalycinus</i>	슬패랭이	-	3



(a) Before intallation



(b) Wire-net setting



(c) Seed-mixture



(d) Soil material



(e) Installation of Nok



(f) Installation of BA10



(g) Installation of BA50



(h) Finish

Figure 53. The installation procedure of the 2nd field feasibility test.

4. 2차 시험시공지 사후 모니터링 결과

2008년 4월 현재 2차 시험시공지에 투입된 종자가 발아되어 유묘가 형성되고 있으나 식물 생육이 아직 본격적으로 진행되고 있지 않아 처음 시공 때와 사면의 모습이 변하지 않고 있었다. 하지만 토양의 상태는 처리구에 따라 차이가 관찰되었다. 본 시공지에 적용된 녹생토 100% 구간(Nok)과 녹생토 80%에 골재부산물 10%와 코코피트 10%의 비율로 혼합한 구간(AB10), 녹생토 65%에 골재부산물 25%와 코코피트 10%의 비율로 혼합한 구간(AB25), 그리고 녹생토 40%에 골재부산물 50%와 코코피트 10%의 비율로 혼합한 구간(AB50)에 있어 가장 큰 차이는 토양경도와 이와 관련해 유거수에 대한 내침식성, 그리고 현재까지의 식물 발생 현황이다.

조사 결과, 녹생토의 비율이 낮아지고 골재부산물의 비율이 올라감에 따라 토양경도가 작아졌고, 발아된 식물의 수는 증가하는 반면에 침식의 위험성은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 침식의 위험성을 ‘거의 없다’를 1로 시작해서 ‘매우 위험하다’를 5로 해서 수치화해 볼 때 Nok 구간은 1, AB10 구간은 1~2, AB25 구간은 2, AB50 구간은 3~4로 평가할 수 있었다. 마찬가지로 방법으로 녹화도의 가능성(현재로서는 유묘 생육 상태를 통해 가능성을 볼 수 밖에 없음)을 ‘거의 없다’를 1로 시작해서 ‘매우 훌륭하다’를 5로 해서 수치화해 볼 때 Nok 구간은 2, AB10 구간은 3~4, AB25 구간은 3~4, AB50 구간은 4로 평가할 수 있었다.

따라서 골재부산물을 녹생토와 혼합해서 사용할 때는 25% 이내로 하는 것이 좋을 것으로 판단되며, 코코피트는 토양 조직을 약화시키는 특성이 있기 때문에 사용하지 않는 것이 좋다고 판단되었다.



Figure 54. The landscape of the 2nd field feasibility test site, April 2008.

5. 골재부산물의 비탈면 녹화재로의 활용상의 문제점과 대책

앞서 수행된 골재부산물 개량 시험을 통해 결정된 조성에 따라 골재부산물 토양재를 제조하였다. 골재부산물 토양재 제조과정에서 겪은 문제점은 골재부산물 자체 특성과 이로 인한 다른 재료와의 혼합 과정의 문제, 즉 재료 및 공정상의 문제점과 골재부산물 수급에 관련된 경제적인 문제점으로 구분할 수 있었다.

우선 재료적인 측면에서의 문제점은 대부분의 골재부산물이 슬러리 상태에서 필터프레스를 거쳐 압축된 케이크 형상으로 배출되기 때문에 수분을 함유하고 있고 쉽게 부수어지지 않는다는 것이다. 또한 골재부산물의 점착성 때문에 기계장치를 이용하는데도 어려움이 발생한다. 이러한 이유 때문에 골재부산물에 마사토, 코코피트, 피트모스, 인산석고, 퇴비 등 여러 재료를 혼합하기가 쉽지 않았다. 2차 시험시공에서는 재료를 단순화하기 위하여 마사토와 유기물 공급의 기능을 동시에 기대할 수 있는 기존의 녹생토와 코코피트만을 이용하여 토양재를 제조하였으나, 재료의 혼합은 1차와 마찬가지로 어려움이 있었다.

본 연구에서는 효율적인 골재부산물 토양재 제조를 위해 골재부산물의 수분함량을 줄여주고 재료의 혼합순서를 조정하는 방법을 적용하였다. 골재부산물은 수분함량이 감소하면 점성이 줄어들고 부스러지는 성질이 커지는 특성을 가지고 있다. 그리고 건조된 마사토와 코코피트를 먼저 골재부산물에 투입하여 섞게 되면 골재부산물의 수분을 낮추는 동시에 골재부산물의 점착력을 신속히 떨어뜨려 준다. 이러한 원리를 이용해 골재부산물에 마사토와 코코피트를 넣고 혼합하게 되면 혼합하는 과정에서 골재부산물 덩어리의 크기가 점차 작아지게 되고 균질성이 향상되게 된다. 골재부산물 덩어리가 충분히 작아져서 큰 덩어리의 지름이 5cm 이하가 될 때까지 혼합작업을 반복한다. 토양재 중 덩어리의 최대 크기는 지름 5cm 이하가 되어야 하며 전체 토양재 중에서 덩어리의 비율이 10%를 넘지 않는다면 시공 장비에 무리가 되지 않는다. 하지만 기본적으로는 토양덩어리는 시공의 연속성에 장애가 되기 때문에 덩어리의 존재가 바람직하지는 않다. 하지만 골재부산물이라는 재료의 특성을 감안할 때 위의 정도 조건을 만족시켜준다면 후속 공정에 문제는 없는 것으로 판단된다. 따라서 골재부산물 토양재의 생산은 다음과 같은 순서를 따르는 것이 좋다고 판단된다. 즉 골재부산물 토양재는 ① 골재부산물의 건조, ② 마사토와 코코피트의 투입, ③ 파쇄 및 혼합, ④ 기타 재료의 투입, ⑤ 혼합, ⑥ 포장의 순서로 생산될 수 있다. 하지만 본격적인 생산

공정 구현을 위한 여러 가지 설비 조건에 대해서는 별도의 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

또 하나의 문제점인 골재부산물 수급에 관련된 경제적인 문제점은 첫째, 골재부산물 배출지가 산간지역에 위치한 곳이 많다는 것과 집중되어 있지 않다는 것, 그리고 골재부산물의 무게가 무겁다는 것에 기인하는 바가 크다. 이로 인해 운반에 소요되는 비용이 크게 발생하기 때문이다. 실제로 골재생산업체 담당자들은 골재 판매업이 수지타산을 맞추기 위해서는 납품처가 반경 40km 이내여야 한다고 하였다. 운송거리가 멀어지면 유류비 증가는 물론 운송트럭의 회전율이 떨어지기 때문이다. 골재부산물 수급에 관련된 경제적인 두 번째 문제점은 골재부산물은 하수오니 또는 식품공장 오니 등과 같은 유기성 폐기물에 비해 폐기물 처리 시장이 형성되어 있지 않기 때문에 폐기물 처리비용을 받아 골재부산물 토양재 생산에 사용하기가 어렵다는 것이다.

따라서 골재부산물 토양재 생산공장은 골재부산물 발생원과 가까운 곳에 위치해야 하며 공장 운영에 있어 폐기물 처리 비용 또는 보조금을 지원받아야 경제성을 제고할 수 있을 것으로 생각된다.

6. 비탈면 녹화용 골재부산물 용토재의 경제성 고찰

가. 주요 비탈면 녹화공법

척박지 식생복원 기술은 파종공과 식재공으로 구분되나, 기계시공을 전제로 할 때는 건식과 습식으로 대별될 수 있다. 건식공법은 주로 무기질 계통의 식생기반재를 뿔어붙이는 공법으로 일반적으로 암반이 많고 경사가 급한 지역의 녹화에 많이 적용된다. 뿔어붙이는 토양의 두께가 10cm~ 20cm 범위가 되기 때문에 비용이 많이 드는 자생식물 보다는 값싸고 발아율이 뛰어난 양잔디를 사용한다. 반면에 습식공법은 유기질 계통의 식생기반재를 물이 담긴 탱크에서 교반하여 걸죽한 상태로 뿔어붙이는 공법으로 토양층의 두께가 5cm를 넘지 못 한다. 주로 토양층이 일정정도 남아 있는 지역의 녹화에 적합한 공법으로 자생식물의 적용이 건식에 비해 용이하다.

1) 녹화공법의 구분과 세부 기술 구성

가) 종자뿌어붙이기

종자뿌어붙이기공법(Hydrosseding)은 비탈 경사가 급하여 다른 공법으로는 파종이 부적당한 경우, 또는 토양조건이 열악한 급경사지 등에서 파종된 종자와 비료의 정착이 곤란한 곳에 Mortar Gun이나 Hydro-seeder 등의 기계와 기구를 사용해서 압축공기나 압축수에 의해 종자를 파종하는 공법이다. 주요 재료는 뿌러지는 종자의 지면 부착력을 높이기 위한 펄프 또는 파쇄-가공된 종子和 비료 및 녹화용 종자이다. 뿌러지는 재료가 슬러리 형태이기 때문에 습식녹화공법으로 분류된다.

나) 기반재취부공법

(1) 후리줄녹산토공법(후리줄+녹산토)

후리줄녹산토녹화공법은 경사도가 좀 급하고 경사면을 매끈하게 다듬어 놓은 곳은 녹화시공된 재료가 흘러내릴 우려가 있으므로 상하, 좌우2m 간격으로 D200mm의 착지핀을 박고 가시철망#14-2를 늘여서 이 착지핀에 고정시킨 다음 300-500denier 규격의 폴리비닐장섬유를 워터제트섬유분사기로 $20 \sim 40 \text{ gr m}^{-2}$ 정도 살포한 다음 하수슬러지케익 용량비 15~35%, 펄프슬러지케익 용량비 20~50%, 경량기포콘크리트분쇄물 용량비 20~30%, 코코 야자분쇄물용량비 10~30%를 혼합한 재료를 1㎡당 토양에서 분리한 토양미생물 농축균주 1,000g을 접종한 다음 10일간 부숙시킨 후 생성된 인공토양의 녹산토 1㎡당 5~10L와 뿌리심근촉진제 후리줄A 50-200g, 미생물활성제 후리줄F 100~400g, 비탈면의 결속 및 증산억제제 후리줄S 10-75g, 침식방지섬유 후리줄EF 50~140g 이 혼합된 후리줄과 시 공구간 1㎡당 참싸리 1~4g, 알팔파 4~8g, 비수리 1~5g, 안고초 0.5~2g을 기본배합으로 하고 쑥부쟁이, 산국, 끈끈이대나물, 코스모스 등을 소량 혼합한 혼합초목종자 5~50g을 녹화혼합재료로 구성한 뒤 슬러지펌프와 교반기가 장착된 후리줄살포기 탱크에 물 용량비 40~60%와 녹화혼합재료 40~60%를 투입하고 이를 20분 이상 교반한 다음 대상지역에 5~10mm 두께로 살포하여 녹화하는 것이다.

Table 36. The properties of hydro-seeding measures.

공 법	적용범위	시 공 개 요	특 징
종 자	Seed spray 토 사 리핑암	씨앗과 접착제, 침식방지제, 비료, 색소 등을 물과 혼합 후 고압취부기를 사용하여 사면에 뿌어 붙이는 공법	-공사비 저렴하고 시공성이 뛰어남 -우수시 토양 유실우려가 크고, 건조시 발아율 저조
뿌 어 불	씨앗부착 거적덮기 (론생공법) 토 사 리핑암	깎기사면 정리 후 식생용지에 종자와 비료를 접착시킨 후 벚짚을 입힌 기성제품으로 사면 전체를 덮고 고정핀으로 고정시키는 공법	-흡수 및 보수력이 강해 씨앗발아 및 생장에 유리하고 시공 용이 -거적이 지면과 밀착되지 않을 시 발아율 저조하고, 사면보호기능이 약함
이 기	Seed spray+거적 덮기 토 사 리핑암	흙깎기사면에 Seed spray를 실시 후 그 위에 벚짚으로 짠 거적을 사면 전체에 균일하게 덮고 대꽃이를 거적위에 설치 하는 공법	-국산 재료로 공사비 저렴하고, 거적 부식으로 잔디성장 촉진 -강풍 예상지역에 불리하며, 사면보호기능 미흡

즉, 녹산토는 척박지 토양에 녹화용 자재와 함께 살포된 식물의 종자가 초기 발아할 때 보습작용을 도와주고 후리졸의 특성으로 미생물 활성화속진을 시켜줄 때 녹산토에서 잠재된 토양 미생물이 활성화됨으로써 건강한 식물생육이 빠르게 이루어지게 되고 식물의 뿌리는 부식암이나 척박한 토양에 깊이 뻗어 내려 가뭄이 닥쳐와도 식물이 고사되지 않는다.

이와 같이 신녹생토 녹화공법으로 시공된 경우 암절개면과 신녹생토의 밀착이 크게 좋아져 갈라짐으로 인한 피해를 제거할 수가 있어 보습력을 향상시킬 수가 있고, 경도를 20mm 정도로 낮추게 되어 초기 발아 및 발아 후 생육에 좋은 결과를 가져오게 되며, 기존 공법에서는 10cm두께의 경우 전체물량에 종자를 혼합하여 시공하였으므로 평방미터당 1000g 정도의 혼합종자를 투입하였으나 신녹생토 공법에서는 5~10mm 덧씌우기에만 종자를 혼합하기 때문에 평방미터당 20g 정도만 투입하면 되므로 시공비를 현저하게 줄일 수가 있다.

(2) 원지반식생정착공법(CODRA)

원지반식생정착공법(CODRA 공법)은 특히 도로건설과 대규모 단지개발에 따른 절. 성토 사면에 대해서 사면안정, 조기녹화는 물론 자연 천이의 촉진을 통한 생태계 형성 및 이전 생태계로의 신속한 복귀를 위하여 개발된 것으로 인위적인 시설물이나 재료(망, 인공토양)의 도입을 억제하고 자연이 지닌 복원력을 이용하여 지반에 직접 식물을 정착시키는 방법이다. 이 공법은 식물 생육의 초기단계인 발아와 초기생장에 필요한 최소한의 생육보조제와 종자 접촉을 위한 고분자 수지 등을 이용하는 공법으로 자연 천이의 초기단계를 빠르게 시킨다는 점과 척박한 훼손지의 환경을 다음세대의 식물이 유입, 성장할 수 있는 생육 환경을 조기에 조성해 준다.

즉 척박한 환경에서 생존을 위해 보다 나은 조건을 찾는 식물의 생리현상을 이용하는 공법으로 생육 초기 시 요구되는 조건을 생육보조제를 이용하도록 하며, 성장 후는 뿌리를 암반의 절리, 균열지점에 식물 스스로 착생토록 하고, 천이 과정의 초기단계를 조기에 이행토록 하는 공법이다.

외래종자는 선구식물 기능 수행을 위해 시간차를 두고 성장토록 배합, 처리하여 다음세대를 위한 미기후, 토양 등을 개선토록하며, 단일종의 우점에 의한 왜곡된 환경을 피하기 위해 10·16종의 식물종자를 도입하여 주변 종의 침입이 원활

하도록 한다.

자연에서 흔히 볼 수 있는 상태로 녹화시키는 공법으로 다양한 식물 상을 형성하여 단조로운 경관을 피하고, 시간경과에 따라 주변 중 침입으로 주변경관과의 조화가 가능한 공법이다.

(3) 법면녹화배토습식공법(ASNA)

법면녹화배토습식공법(ASNA)은 암절토부의 표면 풍화 지역과 세굴낙석 방지 및 노출부 위의 영속적인 녹화를 위한 공법으로, 절. 성토지역 및 암절토부에는 P.V.C 코팅망(능형망), 보조양카, 주양카로 지반을 안정시키고, 식생대가 형성되도록 개발한 배토 습식으로 녹화가 되도록 하는 공법이다.

특수 인공토양인 배토조성물을 사용하여 표면이 원지반의 침식과 풍화에 견디도록 하였다. 그리고 기반제를 인위적으로 조성시킨 후 식물의 씨앗을 섞어 분무하여 암절토부에 완전 피복함으로써 시각적인 이질감을 해소시키며 안정감을 줄 수 있도록 한 배토조성물로 시공하는 습식공법이다.

(4) 자생식물 녹화공법 (NGR공법)

NGR(Native Groundcovers Restoration)공법은 자생식물을 이용하여 훼손된 환경을 단기간에 본래의 환경으로 복원하는 공법이며, 폐자재를 배제한 조성물 시공을 이용한 공법이다. 다양한 식생형태(종자와 영양체)를 이용하여 시공함으로써 식생의 조기정착기반을 확보하는 순수 국내 개발 녹화 공법이다.

계절적으로 다양하고 아름다운 경관을 제공해 주며, 자생식물 및 종자를 활용한 환경 친화적 공법이고, 다양한 유기물 재료의 혼합으로 조기 식생조성에 효과적이다.

또한, 종자 이외에 돌나물, 쯤썸바귀 등의 영양체를 함께 취부하여 시공기술의 다양화를 추구하였다.

재료는 건조피해를 방지하기 위한 고흡수성 수지와 침식 및 토사유출의 방지를 위한 식물용 접착제 및 멀칭재, 완효성 복합비료를 첨가되어 식물생육에 필요한 적절한 환경을 만들어 준다. 그러나 자생식물을 이용하는 시공이므로 양산지에 비하여 공사기간에 제한을 받는 편이다.

(5) 생태복원공법(CO-MAT)

식생도입이 어려운 경질토사 및 풍화암, 연암, 보통암, 경암 등으로 형성된 법면에 암반녹화에 적용되어온 철망 대신 co-mat장섬유(기반안정제)를 코매트 조성물(식생기반재)과 혼합종자를 동시에 취부함으로써 안정된 사면보호는 물론 조기녹화를 할 수 있는 녹화공법이다. COMAT 장섬유는 섬도 900denier 이상, 실의 강도 3.5kgf 이상인 백색의 연속장섬유로 취부작업시 식생기반재와 동시에 살포함으로써 토양입자간의 인장력과 지지하중을 강화 하여 법면에서 표토유실 예방효과와 부착망 대체효과가 있다. COMAT 조성물(식생기반재)은 아크릴성 라텍스, 코탄, 톱밥 또는 제지용 슬러지, 복합비료, 색소가 조성물로 구성된다. 종자배합은 양잔디와 초, 목본류를 혼합하여 설계기준에 따라 적용하되 특별한 명시가 없을 경우 감독관의 지시에 따른다.

다) 암반취부 녹화공법

(1) 녹생토 암절개면 보호식재공

경암, 연암, 풍화암 및 건조척박지, 견고한 점토질과 사력사면에 보비력, 응집력, 통기성이 강한 복합 유기질로 구성된 녹생토를 표준도 및 시방기준에 의거 양잔디와 야생화, 향토초목본류를 현장여건에 맞게 혼합 살포함으로써 사면유실 및 표면낙석방지를 겸한 이상적인 식생기반을 조성하여 영구적인 녹화를 유도하는 공법이다.

보습성, 보비성이 뛰어나 가뭄에도 피해가 적으며 암반위에서 이상적인 영구식생기반의 조성이 가능하다. 암절개면을 우수한 식생기반으로 조성함과 아울러 초목본류 종자와 혼합 취부함으로써 단시일 내에 녹화할 수 있다.

초기발아 녹화로 피복의 효과가 크며 사후관리가 용이하며, 경암, 연암, 풍화암 및 건조척박지에 보비력, 보습력, 통기성이 강한 복합유기질로 구성되어 있다.

그러나 공법의 주구성물질인 하수오니 사용에 따른 토양오염문제를 일으키고 있으며, 지나친 외래초본 위주의 시공으로 여름철 하고현상시 경관이 불량하다.

또한 주변 자연식생의 천이가 지연되는 등 자연식생의 회복이 늦어지는 단점이 있다.

Table 37. The properties of soil-media hydro-seeding measures.

공 법	적용범위	시 공 개 요	특 징	
후리줄 녹화 공법	토 사 리핑암	유기물재료를 주재료로 하여 씨앗, 섬유류, 혼합재 등을 뿔어붙이는 공법	-시공성이 좋고, 가격이 저렴함. -경암지역 적용이 어려움.	
기 반 재 취 부	원지반 식생정착 공법	리핑암 요철경암	암반에 직접 식물을 정착시키는 방법으로 식물망, 철망 등 의 보조공법이 필요 없이 단기 식물 보조제와 종자를 혼합하여 1·2cm두께로 암반에 살포	-시공성이 좋고 다양한 초종 구성 -시공비 저렴 -사면 낙석방지 효과 없음 -우기시 유실우려 -경암지역 효과 미흡
녹 화 공 법	아스나 공법	리핑암 경 압	암절개지에 철망을 설치한 후 종자 및 인공토양을 배합하여 고압 분사기를 이용, 부착하여 녹화하는 방법	-조기녹화 할 수 있으며 시공 용이 -시공비 고가 -망설치 및 취부가 장시간 소요
	NGR 공법	토 사 리핑암 요철경암	비탈암반에 식물재료(삼수), 종자, 비료, 유기질, 기반재 등의 재료를 고압분사기를 이용해 취부 부착시키는 공법	-타 공법에 비해 친환경적인 공법 -식물 천이가 쉽고 경관미 높음 -건조시 식생고사율이 높음

(2) 자연표토복원공법(S/F)

자연표토공법(SF녹화공법)은 유기질과 점토를 함유한 자연의 표토와 매우 가까운 식양토를 이용하여 식물의 생육에 최적인 고차단립구조를 형성시켜 적절한 녹화기반을 조성하는 공법이다.

예부터 농업에서 멀칭재로 사용하는 볏짚을 일정한 길이로 잘라 분사 취부하여 미생물, 작은 동물 및 여러 식물들의 생육환경인 표토층을 보호하면서 영양분이자 단립화 재료인 유기질을 공급하며 자연 삼림계의 식물생육기반층을 구성층별로 복원한 공법이다.

또한 균열이 있는 암반이나 연암, 사암지, 경질토 척박지, 산성지 등 녹화곤란 지역에 대해서 내침식성이 있는 생육기반을 조성하고 영속성 있는 목본군락의 복원을 가능하게 하는 녹화공법이다.

(3) 텍솔공법(Texsol)

텍솔공법(Texsol)은 프랑스 국립도로 및 교량연구소에서 개발된 기술로써 모래를 압축공기와 타설하면서 동시에 폴리에스터 화학 섬유를 고압수로 뿌린 후 잘 다지면 모래와 실이 뒤엉켜 모래 입자들이 흐트러지지 않는 점착강도를 발휘하여 전단강도를 증가시켜 연속 장섬유 보강토 녹화공법이다.

텍솔은 특수한 장비를 사용하여 자연산 모래에 화학섬유를 현장에서 혼합하여 만드는 획기적인 건설재료이며, 여러 가닥의 연속 장섬유를 모래의 0.15~0.25% (중량비) 사용할 경우 강도발휘에 중요한 접착력이 흙 입자와 실의 마찰로 인하여 얻어지며, 전단강도 특성이 매우 증가되는 공법이다.

텍솔의 강도는 모래의 입도와 실의 특성에 따라 결정되며, 텍솔 1lb당 3~4kg의 연속장섬유가 소요되며 이는 길이로 100~250km가 된다.

절토사면의 낙석방지 및 풍화를 방지하고, 강우 시 토사 유출을 방지하며, 우수한 녹색환경을 조성해 준다. 또한 영구적인 식생 기반 조성이 가능하고 갈수기에도 식물의 성장환경을 조성해 준다.

급경사 암절토 사면에도 시공이 용이하고, 옹벽 표면에도 식생정착이 가능하며, 특수시설물도 위장 녹화할 수 있다.

이 공법은 암비탈면이나 특수한 지질현장에서 활용할 수 있는 공법으로 사면

의 표층 붕괴 우려가 있거나, 침식과 세굴이 예상되는 사암 및 이암이나 마사토 사면에도 적용 가능한 공법이다. 하지만 주로 외래초종을 이용하기 때문에 주변 자연식생천이가 지연되고 있으며, 시공단가가 고가이므로 시공에 제약이 큰 공법이다.

(4) PEC공법

PEC(poly-Eco-Control)공법은 천연소재인 바크 퇴비와 접착제 등을 식생기반체로 사용하여 경암, 풍화암, 리핑암 등 암반사면을 녹화하고 미생물의 증식을 촉진하여 식생정착에 최상의 조건을 만들어 줌으로써 자연식생의 천이를 유도하여 사면을 녹화 및 복원하는 공법이다.

이 공법의 특징은 천연소재를 이용한 친환경적 공법이며, 식물성 유기질이 주 원료로서 충분히 발효시킨 후 공장에서 관리, 생산된 제품이다. 취부 기반재료는 원지반을 단립구조화시켜 통기성과 보수성을 좋게 하며 염기치환용량이 커 질소, 칼륨 등의 비료성분을 전기적으로 결합하여 보수성을 높여 준다.

토양 중에 식물생육에 유해한 물질이 포함되어 있거나 수소이온농도가 편중되어 있는 경우 완충작용을 해준다. 기존 공법의 단점인 균열, 원지반과의 분리현상을 개선한 공법이다. 미생물의 증식을 촉진하여 식생정착에 유리한 조건을 제공한다.

Table 38. The properties of rock revegetation measures.

공 법	적용범위	시 공 개 요	특 징	
암	프로피아 그린	리핑암 발파암	암절개지에 철망 없이 종자, 비료 등 유기물질을 혼합하여 고압분사기를 이용, 인위적으로 토양층을 부착하여 녹화	-사면의 표층안정 및 보호효과 우수하며 식물생육이 양호함 -지속적인 영양공급에 따른 생장 환경 조성 -초본류, 목본류의 적극 도입으로 조기 수림화 유도
반 취	자연표토 복원공법	토 사 리핑암 요 철 경 암	유기물과 점토를 함유한 식양토를 배합종자, 물, 양생제, 안정제 등을 혼합하여 뿜어붙이 기름하여 유기물기반을 조성하는 공법	-식물생육 최적의 토양구조 형성 -지속적 영양공급에 따른 생장 환 경 조성하며, 목본류의 적극 도입으로 조기 수림화 유도
부 녹	PEC공법	리핑암 발파암	고압취부기를 이용하여 다양한 천연 유기재료와 피복재료, 생분해성 토양안정제를 취부하여 식생기반을 조성하는 공법	-친환경적인 유기재료를 사용함 -주변 자연환경과의 조화 -식물생육이 양호하고 녹화효과 우수
화 공 법	텍솔공법 (Texsol)	리핑암 발파암	화학원사인 연속장 섬유를 설치 고정된 후 굵은 모래, 부엽토, 보습제, 접착제등을 혼합하 여 잔디씨앗과 함께 6·10cm 두께로 사면에 쏘아붙이는 공법	-사면의 요철 등에 구애받지 않고, 종자선택이 용이 -사면경사60%이하에 준함 -고가의 공사비
	녹생토공법	리핑암 경 암	암절개지에 철망을 설치한 후 종자, 비료 등을 섞은 기반재를 고압분사기를 이용, 부착하여 녹화하는 공법	-조기 녹화할 수 있으며 시공 용이

나. 골재부산물 용토제의 비탈면녹화용 토양재로서의 경제성 평가

모의경사시험과 2차에 걸친 현장시험시공을 통해 골재부산물을 코코피트, 퇴비 등의 유기질 자재와 마사토나 녹생토와 무기질 자재를 혼합하여 성공적인 녹화시공을 할 수 있음을 확인하였다. 따라서 골재부산물의 재활용 방안으로 녹화사업과의 연계가 가능하다고 판단된다.

하지만 사업화를 위해 양산되고 있는 기존의 재료와 공법과 비교하여 골재부산물을 이용한 녹화용 토양재 및 공법에 대한 경제성을 정확하게 평가하기에는 한계가 있다. 왜냐하면 대부분의 녹화용 토양재료는 폐기물 처리업체가 폐기물 처리비용을 받아가면서 생산하고 있는 데 비해 골재부산물은 현재까지는 그러한 공급체계가 수립되어 있지 않기 때문이다. 또한 공법에 따라 사용하는 재료와 시공 효율이 달라 업체마다 고유의 가격정책을 펴고 있는 것도 분석에 어려움을 준다. 취부되는 토양의 두께를 5cm로 한정하여 업체간 공사비를 비교해 보면, 단위면적 1m²당 60,850원(자생식물녹화공법, 에코앤바이오), 73,654원(자연표토복원공법, 현우그린), 42,927원(배토습식공법, 목도창조), 41,200원(PEC공법, 삼성에버랜드), 20,376원(코매트공법, 다원녹화건설), 약 26,000원(연속장섬유보강공법, 채광), 24,843원(녹생토공법, 녹산종합건설) 등으로 2만원대에서 7만원대까지 다양하다. 녹생토를 제외한 대부분의 시공자재들은 특정업체가 배타적으로 사용하기 때문에 별도로 판매되지 않기 때문에 재료의 생산가와 유통가는 파악하기 어렵다.

따라서 본 과제에서는 녹생토를 대조구로 진행되었기 때문에 녹생토를 기준으로 경제성을 분석하는 것이 합당할 것이다. 녹생토는 1톤백당 15,000원 ~ 20,000원 선에서 거래되고 있는 것으로 조사되었고 운임은 별도로 청구된다. 이를 기반으로 경제성을 따져 보기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 첫째, 골재부산물을 이용한 녹화용 토양재를 생산하는 생산 기지를 골재생산업체가 밀집한 곳에 조성해야 하고, 둘째 무상으로 골재부산물을 공급받아야 하며, 셋째 부지 내에 퇴비 등 유기성 자재를 자체 생산하는 시설을 갖추고 폐기물 처리업 등록을 해야 하며, 넷째 폐기물 처리 용역을 동시에 수행해야 한다. 이러한 전제조건이 만족된다면 충분히 경제성 있는 토양재를 공급할 수 있으며, 골재생산업체의 애로사항을 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

Table 39. Materials and installation cost of major slope revegetation measures.

습식 공법	자생식물녹화공법 NGR	자연표토복원공법 S/F	원지반식생정착공법CODRA	배토습식공법 ASNA
개발자	에코엔바이오(주)	(주)현우그린	일송환경복원(주)	(주)목도창조
개발년도	1998년	1998년	1996년	1996년
재료	NGRsoil NGRsoilplus 혼합종자 등	녹화기반재 유기양생체 침식방지제 입단형성제 배합종자	종이화이바 숨화이바 부엽토, 질석 제오라이트 비료	하수슬리지 제지슬리지 현무풍화토 분쇄펄프, 미생물 알콜레진집결제
개략공사비	섬유망1cm 절토 19,821원	seed형 11,709원	spray형 4,939원	무망1cm 6,040원
	섬유망2cm 마사경질 27,012원	섬유망1cm 20,984원	T=1cm 11,650원	무망2cm 9,640원
	섬유망3cm 리핑암 37,591원	섬유망2cm 32,019원	T=2cm 22,749원	무망3cm 14,637원
	철망4cm 52,464원	철망3cm 49,710원		철망3cm 34,656원
	철망5cm 60,850원	철망5cm 73,654원		철망5cm 42,927원

(continued)

반습식 공법	PEC비탈면녹화공법 PEC	코매트공법 CO-MAT	연속장섬유보강공법 텍솔	녹생토	금비토
개발자	삼성에버랜드(주)	(주)다원녹화건설	(주)채광	녹산종합건설(주)	김 용 각
개발년도	1998년	1999년	1989년	1988년	
재료	버섯배지, 바트퇴비 코코피트, 펄라이트 황토, 생분해성토양안정제	아크릴성 라텍스 코탄, 톱밥 제지용슬러지 복합비료, 색소	모래, 녹화토 폴리에스터화학섬유 비료, 보습제, 종자	하수오니케익, 펄프슬러 지, 토탄, 연탄재, 마사토, 연소재, 자연섬유	산업폐기물 종자, 철망
개략공사비	코아1cm 14,100원	T=3cm 13,060원	4cm 24,401원	철망5cm 24,843원	철망10cm 37,556원
	철망5cm 41,200원	5cm 20,376원	8cm 38,618원	철망10cm 38,428원	철망15cm 47,858원
	철망7cm 47,700원	8cm 30,053원	12cm 52,699원	철망15cm 49,440원	
		10cm 36,672원			

제5절 골재부산물의 농업용 용토재로의 활용

1. 골재부산물의 농업용 용토재로의 활용을 위한 접근 방법

특수한 목적에 의해 인위적으로 만들어진 토양을 용토라 하는데 이는 식물이 잘 자랄 수 있도록 좋은 토양과 유기물 그리고 생장에 필요한 여러 가지의 필수 양분들을 알맞은 비율로 혼합하여 제조하게 된다. 좋은 용토는 물과 양분을 머금을 수 있는 완충능력이 커야하고 또한 공급능력도 좋아야한다(정 등, 2005). 그리고 통기성과 배수가 우수해야 한다. 농업에 흔히 쓰이는 육묘용 상토나 원예 조경에 쓰이는 질 좋은 육묘의 조건은 배수와 통기성이 좋아야 한다. 일반적으로 통기성과 배수성을 좋게 하기 위해서 한천 모래나 마사토를 많이 이용하게 된다. 원예상토에서도 초화류나 분재용의 상토에서도 뿌리가 건전하게 생육할 수 있도록 수분과 공기의 유지를 위해 배수가 잘 되고 통기성이 좋게 흙을 배합한다.

우리나라의 농경지는 사질토가 많이 분포하고 있어 작물을 생산성을 높이기 위해서 주로 점토함량이 높은 산적토를 많이 활용하고 있다. 그리고 농경지의 토성이나 특성에 따라 유기물이 많은 이탄토나 저니토를 투입하기도 하고 CEC함량이 높은 점토광물을 넣기도 한다. 그리고 점토함량이 높은 지역에는 모래나 연탄재 그리고 마사토를 넣어 토양을 개량한다. 우리나라는 지형상 산림지역이 많이 분포하고 있어 대부분의 농경지(밭)가 경사지에 위치해 있다. 그리고 경사지에 위치한 밭은 대부분 고령지 농업을 행하고 있어 연작피해를 줄이기 위해서 농경지에서 객토 자원으로 마사토를 사용하고 있다. 그 예로 평창군의 고령지 지역에서는 2~3년 주기로 ha당 2,200톤의 과다량을 사용한다(정 등, 2006). 이러한 마사토들은 공사지역의 토양이나 주변 산림 개간 후에 얻어지는 토양을 이용하고 있어 이용에 한계가 있다. 이로 인해 영농객토 자원이 부족한 일부 농민들은 골재 채취장에서 골재부산물을 채취하여 객토원으로 사용한다. 또한 조경토로 이용되는 토양은 대부분 산림토를 이용하게 되는데 산림토의 pH 범위는 5-5.5로 강한 산성을 띄어 산도 하자의 원인이 되기도 한다.

골재부산물은 앞에서 언급된 바와 같이 주로 미사질로 구성되어 있고 입도의 분포가 비교적 균일한 특성을 가지고 있어 골재부산물 자체로만은 식물의 배지로 적당하지 않다. 즉 골재부산물은 토양으로서 불량한 물리성-구조의 치밀함, 불량한 투수성과 물리성과 식물 생육에 적합하지 못한 화학성-높은 pH, 낮은 양

분 함유량을 가지고 있어 다른 무기 및 유기 자재를 섞어 주어 개량해서 사용해야 한다.

2. pot 상토로의 활용

가. 시험구 구성

시험에 사용된 골재부산물 슬러지는 경기 광주, 강원 춘천, 전북 군산의 골재 생산업체에서 분양받은 것으로 하였다. 피트모스, 코코피트, 퇴비 등의 유기물과 부산물 석고, 마사토 등의 무기물, 그리고 유기물과 무기물을 모두 혼합하여 물성 개량을 시도했다. 처리구는 피트모스 등의 자재를 단독으로 수준별로 처리한 것과 유기 및 무기 자재를 골고루 혼합한 처리구를 두었다(Table 40).

공시식물은 국화와 상추로 하였고 각 처리당 5반복의 처리구를 두었다. 국화는 원예농가로부터 화분으로 구매하였으며, 상추는 하우스용으로 구매하였고 동절기 동안 재배를 하였다. 하우스는 이중의 비닐을 쳐서 보온을 강화하였으며, 재배기간 동안 자동온도제어 온풍기를 이용하여 하우스 온도가 8℃ 이상으로 유지되도록 하였다.

국화 생육 평가를 위해서 국화의 키를 측정하여 일반 토양에서 자란 것을 대조구로 하여 비교하였다. 즉 일반 토양에서 자란 국화의 키를 1로 보고 각각의 처리구에서 측정한 값을 일반 토양에서 자란 국화의 키 값에 대한 상대적인 비율로 나타냈다. 상추의 생육 평가는 상추 잎의 수, 대표적인 잎의 가로 세로의 길이를 일반 토양에서 자란 상추와 상대 비교하였다.



Figure 55. The green house for the crop growth experiment.

Table 40. The composition of soil materials for the green house study. (% volume basis)

Treat*		Aggregate byproduct	Coco-peat	Peatmoss	Compost	PG	Coarse Sand
Y o n g I n	KG10cp	90	10	—	—	—	—
	KG25cp	75	25	—	—	—	—
	KG50cp	50	50	—	—	—	—
	KG10pm	90	—	10	—	—	—
	KG25pm	75	—	25	—	—	—
	KG50pm	50	—	50	—	—	—
	KG10com	90	—	—	10	—	—
	KG25com	75	—	—	25	—	—
	KG10pg	90	—	—	—	10	—
	KG50cs	50	—	—	—	—	50
	KGori	100	—	—	—	—	—
	KGmix	50	10	10	10	10	10
Reference	Upland soil used by farmers						

*The same method was used for the other aggregate byproducts(CC and KS).

나. 처리에 따른 국화와 상추의 성장량 비교

1) 국화

경기 광주의 골재부산물 슬러지(KG)의 경우, 대체적으로 피트모스와 퇴비 처리구 및 유무기물질 복합처리구의 생육이 대조구보다 좋게 나타났으며, 코코피트 처리구는 매우 저조한 생육을 보였다.

강원 춘천의 골재부산물 슬러지(CC)의 경우, 대체적으로 피트모스와 퇴비, 마

사토 처리구 및 유기물질 복합처리구의 생육이 대조구보다 좋게 나타났으며, 코코피트 처리구는 상대적으로 저조한 생육을 보였다. 또한 슬러지 자체만으로도 대조구와 비슷한 생육 상태를 나타냈다.

전북 군산의 골재부산물 슬러지(KS)의 경우, 대체적으로 피트모스와 퇴비, 마사토 처리구 및 유기물질 복합처리구의 생육이 대조구보다 좋게 나타났으며, 코코피트 처리구와 부산물 석고 처리구는 상대적으로 저조한 생육을 보였다.

전체적으로 유기물 중에서는 피트모스와 퇴비 처리구에서 국화의 생육이 좋았으며, 코코피트 처리는 유기물 개량제로 적합하지 않은 것으로 판단된다. 무기물 개량제로는 마사토가 적당하고, 부산물 석고 단독으로는 개량 효과가 부정적이었다. 유기물과 무기물 첨가제를 골고루 혼합한 처리구에서도 양호한 생육을 보였다.

2) 상추

본 시험에 사용된 상추는 원예종묘상에서 플러그묘 상으로 구매한 적상치로 시험계획에 의해 준비된 포트에 이식하여 3개월간 재배 후 성장량을 측정하였다.

초장, 엽폭, 엽수를 측정하여 대조구의 값을 기본값으로 상대적인 성장량을 비교하였다. 국화와 달리 상추는 사멸한 처리구가 많았으며, 성장과정에서 잎이 말라 죽기도 하였다.

경기 광주의 골재부산물 슬러지 처리구에서는 KG25com의 생장이 가장 좋았으며, 코코피트 처리구는 매우 좋지 않았다. 강원 춘천의 골재부산물 슬러지 처리구에서는 퇴비로 개량한 것과 유기/무기 복합처리구에서의 생장이 대조구에 비해 좋게 평가되었다.

전북 군산의 경우에도 퇴비처리구가 좋은 성적을 보이고 있다.

전체적으로 퇴비 처리구가 양호한 성장을 보였고 나머지 처리구는 성장량이 저조했다. 특히 코코피트와 부산물 석고 처리구는 국화 시험에서와 마찬가지로 가장 생육상태가 불량하였다.

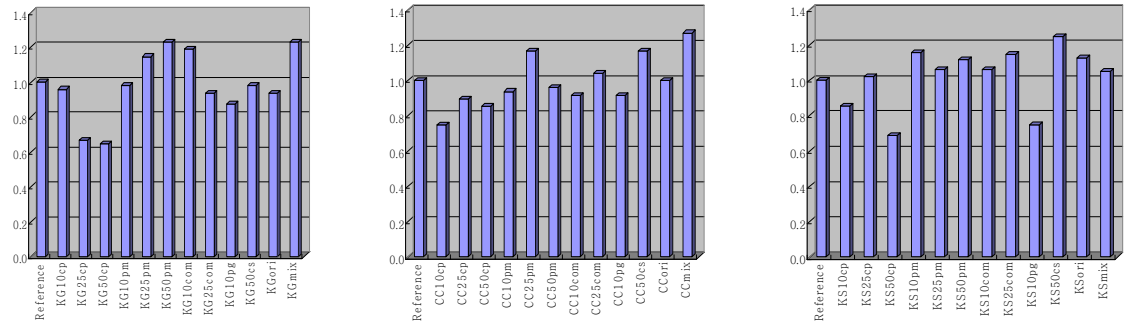


Figure 56. The comparison of chrysanthemum size with treatment.

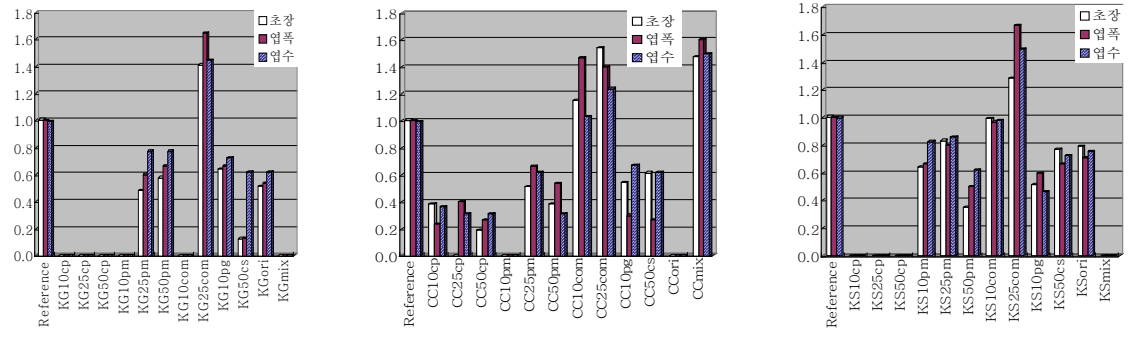


Figure 57. The comparison of lettuce growth with treatment.

다. 2차 재배시험 결과

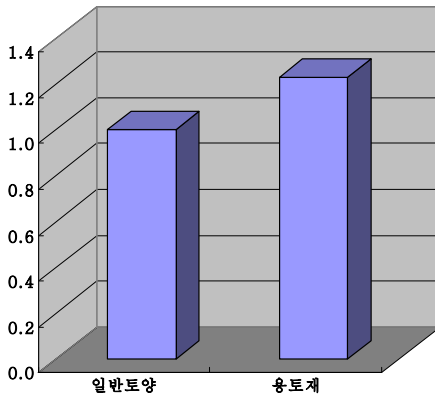
1차년도 국화 및 상추 재배 시험 결과, 골재부산물에 코코피트와 인산석고를 단독으로 처리했을 때에는 생육이 매우 저조하였으나, 퇴비를 단독으로 처리했을 때 좋은 생육 상태를 보였다. 또한 마사토-퇴비-인산석고-피트모스-코코피트를 부피비로 10%씩 혼합했을 때에도 생육 성적이 좋았다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 2차년도에는 골재부산물에 마사토-퇴비-인산석고-코코피트를 50-10-15-10-15의 비율로 혼합한 용토재를 제조하여 재배 시험을 수행하였다. 퇴비 단독 처리구의 생육성적이 좋았음에도 다양한 재료를 혼합한 이유는 토성을 양토에서 사양토로 개량하고자 했기 때문이다. 개량된 토양의 pH는 중성에 가까운 약산성으로 개선되었고, 양분성분으로 인해 EC가 증가하였다. 유기물 함량은 10배, 유효인산의 함량은 100배 가량 증가하였고 총질소는 0.41%였다. CEC도 크게 증가하였다. 토성은 사양토로 개선되었다. 본 시험에 사용한 골재부산물은 군산의 골재업체로부터 분양받았다.

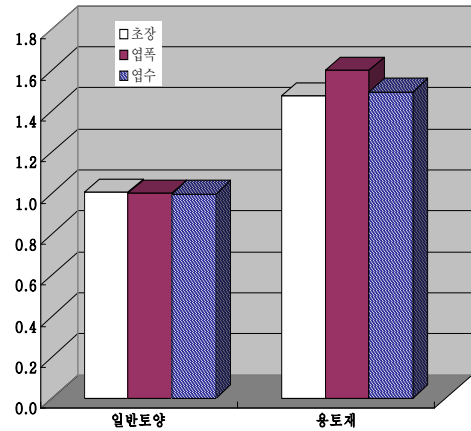
Table 41. The effect of soil improvement.

Improvement	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	Avail-P mg kg ⁻¹	T-N %	CEC cmol kg ⁻¹	Soil Texture
Before	8.62	0.17	0.61	0.88	0.00	12.21	Sandy Clay Loam
After	6.73	3.13	7.83	85	0.41	22.00	Sandy Loam

재배 용기는 가로-세로 각각 1.2m인 박스형태의 모듈을 이용하였으며, 1차년도와 마찬가지로 원예종묘상으로부터 상추 모종과 국화 모종을 구입해서 골재부산물 용토재를 미리 채운 모듈에 심어서 생육 상태를 조사하였다.



(a) Chrysanthemum



(b) Lettuce

Figure 58. The comparison of crop growth with treatment.

3. 참외 하우스 객토재로의 활용

가. 시험 개요

경상북도 성주군 소재 골재생산업체 (주)대흥에서 발생하는 골재부산물을 이용하여 주변의 참외 농가에서 골재부산물 처리 효과를 검증하는 시험을 수행 중에 있다. 앞의 국화와 상추 재배시험과는 달리 이 시험은 골재부산물을 별도의 가공 처리 없이 하우스 토양에 투입한 후 원래의 토양과 섞이도록 경운만 한 경우이다.

본 시험의 목적은 인근의 골재생산업체로부터 받은 골재부산물을 바로 객토재로 활용할 수 있는지를 확인하는 것이다. (주)대흥은 월간 약 1천m³의 골재부산물을 배출하고 있으나, 처리할 대상이 마땅치 않아 어려움을 겪고 있다. 이에 주

변 농가의 협조를 통해 하우스 용토제 시험을 수행하였으며, 일반 관행적인 방법과 비교하여 참외 생육에 미치는 영향을 밝히고자 하였다.



(a) the outside view (b) the inside view (c) the conventional soil

Figure 59. The green house for oriental melon production.

시료는 당해 연도 골재부산물을 처리한 하우스와 골재부산물을 처리한지 4년이 경과한 하우스 토양을 대상으로 표토(0~ 10cm)와 심토(10~ 20cm)로 구분하여 채취하였고, pH, EC, 유기물함량 등을 측정하였다. 각각의 표토에 대해서는 코어 샘플러를 이용해 비교란시료를 채취하여서 용적밀도 측정에 이용하였다. 3월과 4월의 모니터링을 통해 토양의 경시적 변화와 참외의 수확량 및 품질(외관, 크기, 당도 등)에 대해 분석하였다.

나. 골재부산물 처리 하우스 토양 특성

용적밀도 분석 결과, 골재부산물로 당해연도 객토한 하우스 토양의 용적밀도는 평균 1.29 g cm^{-1} 였고, 골재부산물을 처리한지 4년이 경과한 하우스 토양의 것은 1.19 g cm^{-1} 로 나왔다. 일반적인 하우스 토양의 추천 용적밀도가 1 g cm^{-1} 이하(농촌진흥청, 시설재배 시비·토양관리 요령)인 것에 비해 골재부산물을 처리한 하우스 토양의 용적밀도가 다소 큰 것으로 조사되었다. 또한 골재부산물을 처리하고 시간이 경과함에 따라 용적밀도가 감소하는 경향이 있을 것으로 예상되었다. 이는 골재부산물 슬러지가 압축된 채로 배출되어 초기에는 매우 치밀한 조직을 가지고 있다 차츰차츰 풀어지기 때문인 것으로 판단된다.

토양분석결과에 대해 항목별로 살펴보면 다음과 같다.

우선 pH의 경우, 하우스 주변의 골재부산물의 pH는 8.82로 강한 알칼리성을

띄고 있었고, 이를 이용해 객토한 하우스의 토양 pH는 당해연도의 것이 표토 8.18, 심토 8.13으로 골재부산물에 비해 조금 알칼리도가 낮아지긴 했으나, 여전히 강한 알칼리성을 나타냈다. 하지만 4년차에 해당하는 토양의 pH는 표토에서 7.12, 심토에서 6.88로 중성 부근으로 조사되었다. 따라서 골재부산물로 객토한 토양의 pH는 작기가 반복되는 동안 서서히 감소하는 것으로 판단되었다.

EC와 암모니아태 질소 및 질산태 질소의 함량은 골재부산물 자체 보다 하우스 토양에서 증가하는 경향을 보였으나 객토 연수에 의한 차이에서 오는 뚜렷한 경향은 없었다.

골재부산물을 참외 하우스에 객토한 후 유기물 함량과 유효인산함량이 증가 두드러졌다. 특히 당해년도에 비해 4년차 토양에서 유기물은 표토에서 4배 가까이 심토에서는 2배 가량 증가하였고 유효인산은 표토에서 5배 가까이 심토에서는 1.5배 가량 증가하였다. 이는 수확 후 남은 참외 뿌리 등의 작물 잔재와 채배 중에 가한 비료 성분의 축적 때문인 것으로 판단된다.

Table 42. The soil properties of oriental melon field using byproduct aggregates as soil amendment.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	Avail-P mg kg ⁻¹	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
AB [#]	8.82	0.16	0.34	13.04	16.47	2.52	18.06	1.81	0.26	1.66
1*- surface**	8.18	0.39	0.75	25.39	30.19	24.91	14.73	2.03	0.74	1.48
1-sub.**	8.13	0.40	0.82	10.97	26.76	40.57	15.22	2.14	0.92	1.50
4*- surface	7.12	0.58	2.99	19.90	77.53	111.15	9.19	3.56	1.25	1.29
4-sub.	6.88	0.31	1.57	13.72	37.73	60.96	7.97	3.23	0.51	1.17

(#: byproduct aggregate; *: use history - year; **: surface soil, subsurface soil)

하지만 참외가 심겨지고 집약적인 영농활동을 벌인 후 수확기 때 조사한 토양 조사 결과는 당해연도와 4년 경과한 하우스 모두 비슷한 토양 특성을 보이고 있었다(Table 43).

Table 43. The soil properties of oriental melon field using byproduct aggregates as soil amendment after the first harvest.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	Avail-P mg kg ⁻¹	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
1 year*	7.85	0.65	1.16	13.04	52.82	36.93	17.87	2.29	0.62	1.74
4 year	7.78	0.33	1.16	18.53	25.38	59.33	9.30	3.60	0.46	1.34

(*: use history - year)

토양분석결과 골재부산물로 객토한 참외 하우스 토양은 농촌진흥청에서 제시하는 시설재배지 토양 개량 목표(Table 44)와 비교해 보면 작물 생육에 유리한 토양환경을 제공하고 있지는 않는 것으로 조사되었다. 즉 pH는 다소 높고, 유기물 함량은 부족하고, 특히 유효인산의 함량이 10배 이상 작았다. 질소원도 부족한 것으로 나타났다.

하지만 실제로 참외 농가에서는 골재부산물을 객토재로 사용할 때 퇴비 등의 유기물을 주지 않고 액상 비료로 양분을 공급하고 있었기 때문에 적정량의 토양 개량제와 유기물, 그리고 비료가 공급되면 개선될 여지가 충분하다고 판단된다. 그리고 농민들은 일반 토양에서 보다 골재부산물을 넣어 주었을 때 생산성이 우수하다고 판단하고 있다. 따라서 인근 골재생산업체에서 무상으로 구할 수 있는 골재부산물은 비용을 지불하고 구입해야 하는 일반 객토재보다 훌륭한 객토재로 받아들이고 있다.

Table 44. The optimum soil condition of green house.

		Sandy loamy soil	Clayey loamy soil
Soil depth (cm)		≥ 25	
Ground water level (cm)		≤ 60	
Bulk density (g cm ⁻³)		≤ 1.0	
pH	H ₂ O	6.0 ~ 7.0	
	KCl	5.5 ~ 6.0	
Organic matter (g kg ⁻¹)		≥ 20	≥ 30
Available phosphorus (mg kg ⁻¹)		300 ~ 500	
Salt content	CaO (Ca cmolc kg ⁻¹)	840 ~ 1,200 (3 ~ 7)	1,400 ~ 3,400 (5 ~ 12)
	MgO (Mg cmolc kg ⁻¹)	200 ~ 400 (1 ~ 2)	400 ~ 600 (2 ~ 3)
	K ₂ O (K cmolc kg ⁻¹)	140 ~ 230 (0.3 ~ 0.5)	190 ~ 470 (0.4 ~ 1.0)
EC (dS/m)	Before cultivation	≤ 1.0	≤ 1.5
	After cultivation	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.5
NO ₃ ⁻ -N(mg kg ⁻¹)		50 ~ 150	100 ~ 250

(호남농업연구소, 2006)

다. 참외 품질

참외의 품질을 비교하기 위해서 참외의 가로 세로 길이와 생중량 및 건중량 그리고 상품성과 가장 관계가 깊은 당도를 측정하였다. 참외의 당도는 굴절당도계 (ATAGO Hand refractometer N1, 일본)로 측정하였다.

굴절당도계는 빛의 굴절변화를 이용하여 액체의 당분변화에 따라 굴절변화를

전기적 또는 광학적 신호로 나타낸 것이다.

당도는 순수한 물과 설탕(자당)으로 이루어진 수용액의 총질량에 대한 용해된 설탕(자당)의 질량백분율(%)이며, 빛의 굴절을 이용한 당도측정값은 (% Brix)로 표기한다. 굴절 빛이 서로 다른 두 물질의 경계면에서 진행방향이 꺾이는 현상으로 굴절은 매질이 다르면 그 속에서 빛의 속도가 다르기 때문에 일어난다. 시험에 사용한 기기의 측정범위는 Brix 0%에서 32%까지였다.

당도 측정은 다음의 순서로 따라 진행되었다.

-굴절계의 앞면 끝부분을 빛이 있는 방향으로 맞춘 후, 렌즈부분을 조절하여 내부의 눈금이 선명하게 보이도록 조정.

-영점 조절: 투명판을 열어 프리즘 부분에 증류수 1~2방울 떨어뜨린 후 투명판을 닫아 프리즘과 밀착되도록 함. 30초 기다린 후 교정용 스크류를 돌려 눈금이 '0'으로 표시된 부분과 푸른색/흰색 경계선이 일치하도록 조정

-투명판을 다시 연 후 천으로 프리즘부분을 닦는다. 당도를 측정하려고 하는 액체를 1~2방울 떨어뜨려준다. 그 후 투명판을 닫고, 약간 눌러준다. 30초 정도 기다려 준 후, 눈금과 푸른색/ 흰색 경계선이 일치하는 부분의 숫자를 읽어주면 된다.(숫자값이 Brix)

-측정 후 물기가 없도록 천으로 닦는다.

Table 45는 당해연도 골재부산물 객토 하우스와 4년된 하우스에서 수확한 참외 10개에 대한 생중량, 건중량, 수분함량, 크기, 당도에 대한 측정 결과를 나타내고 있다. 상대적인 비교를 위해 시장에서 구입한 참외를 대조구로 하였다. 시장에서 구입한 참외가 성주에서 채취한 참외 보다 사이즈가 컸기 때문에 중량은 구입 참외가 무거웠다. 골재부산물 객토 연수에 따른 크기와 중량에는 차이가 없는 것으로 판단되었다.

당도에 있어서는 골재부산물 객토 당해연도 토양에서 자란 참외의 당도가 시장에서 구입한 참외의 당도 보다 컸고 4년이 경과된 하우스에서 자란 참외의 당도가 가장 낮았다. 참외의 바깥과 안쪽 모두 같은 경향을 나타내고 있었다.

참외 재배 농가와의 인터뷰에서 한 농부는 3, 4년 주기로 골재부산물을 다시 객토해야 한다고 했고 그 이유를 지력의 소실로 설명하였는데, 참외 당도의 조사를 통해 골재부산물 객토 하우스에서 재배한 참외의 당도가 3, 4년이 지나면 일반 참외 보다 떨어지는 것으로 예상되었고, 이는 농부의 의견을 뒷받침하는 것으로 판단되었다.

Table 45. The properties of oriental melons grown in the byproduct aggregate amended soil and their comparison with oriental melons purchased market.

	Fresh	Dry	Water	oriental melon		Saccharinity	
	weight	weight	content	size (cm)		(brix, %)	
	g	g	%	Length	Width	Outer	Inner
4 year	27.65	3.54	87.19	10.56	7.25	10.36	16.86
1 year	27.51	3.77	86.30	9.95	7.50	12.00	17.06
Market	34.36	4.17	87.81	11.45	7.93	11.33	16.20

4. 농가멘토링을 겸한 일반 배추밭 객토

농가멘토링의 일환으로 배추생육시험을 수행한 장소는 경기도 남양주시 수동면 송천리 소재의 밭으로 최근 3년간 복토를 해서 경지정리를 한 곳이다. 실제 이 토지에서 경작활동을 하고 있는 농민과 협의하여 밭의 일부 약 30m² 정도를 시험포지로 조성하였다. 토지이력을 조사한 결과, 가을 작물 재배를 위해 퇴비를 4포/15평의 수준으로 뿌려 경운한 상태였으며, 시험포지 주변은 무, 배추, 싹갓 등의 작물 재배지였다.

시험 대상 농경지는 사양토로 판정되었으며, 일반 밭토양 평균치에 비해 pH는 높았고, 유기물 함량과 치환성 양이온 함량은 비슷하였고, 유효인산은 작았으나, 전체적으로 일반 밭토양과 유사하다고 볼 수 있었다.

Table 46. The soil physical properties in the experimental field.

Soil Texture				Bulk Density
Sand	Silt	Clay	Texture	
73.01	22.03	4.96	sandy loam	1.19

Table 47. The soil chemical properties in the experimental field.

pH	EC	O.M.	Avail-P	T-N	CEC	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
	dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%	cmol kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
6.51	0.08	1.84	88.71	0.14	11.64	9.62	0.05	0.85	0.21

시험포지는 이미 조성되어 있는 고랑을 토대로 5개의 구역으로 나누어서, 아무런 간섭을 하지 원래의 토양 조건(Ref.), 다시 한 번 경운만 한 조건(Blank), 골재 부산물을 이용한 토양개량제를 토심 20cm를 기준 부피로 해서 10%를 투입하고 경운한 처리구(T10), 25%를 투입하고 경운한 처리구(T25), 50%를 투입하고 경운한 처리구(T50)로 삼았다. 배추 정식은 2006년 9월 8일에 행했으며, 재배기간 동안 추가 시비는 없었고, 10월에 2차 토양 샘플링과 11월 20일 수확하였다.

골재부산물 토양 객토제는 골재부산물 슬러지 50%, 코코피트 15%, 마사토 10%, 퇴비 15%, 인산석고 10%로 구성되어 있으며, 이는 1차년도 연구결과 전반적으로 가장 안정된 생육기반으로 판단되는 혼합비였다. 객토 대상인 밭토양에 비해 미사의 함량이 높고, 유기물 함량과 유효인산의 함량이 높았다.

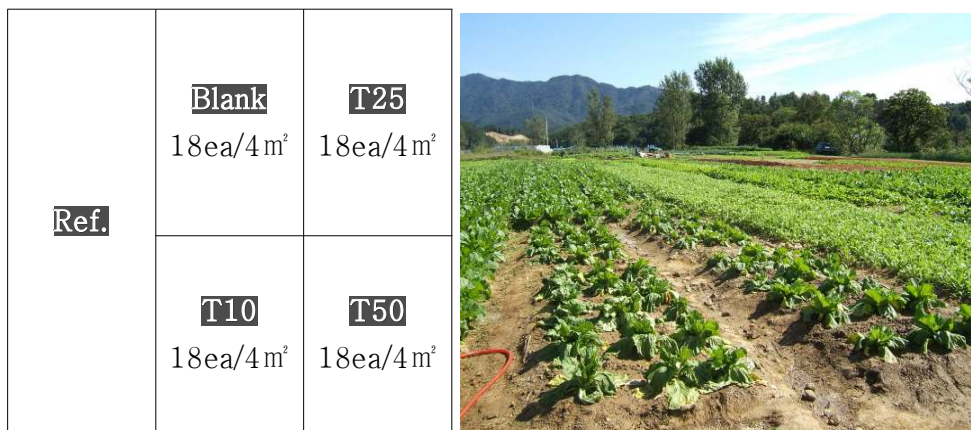


Figure 60. The configuration and application method of treats.

Table 48. The soil texture of aggregates by-products as soil materials.

Soil Texture			
Sand	Silt	Clay	Texture
49.01	46.75	4.24	sandy loam

Table 49 . The soil chemical properties of aggregates by-products as soil materials.

pH	EC	O.M.	Avail-P	T-N	CEC	Exchangeable cation (mg kg ⁻¹)			
	dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%	cmol kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
6.13	1.74	7.42	221.08	0.18	11.64	26.47	0.04	2.29	1.20

Table 50. The soil heavy metal contents of aggregates by-products as soil materials.

Cu	Zn	Cd	Pb
mg kg ⁻¹			
0.47	11.16	0.10	0.79

재배기간 동안 토양의 pH, 유기물 함량, 주요 양분의 변화 양상은 Table 51와 같이 조사되었다. pH는 처리량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이긴 하였지만 전체적으로 약산성과 중성에 머물렀다. 유기물 함량은 골재부산물 용토재의 처리량이 증가함에 따라 증가하였으며, 전처리구에서 배추를 심기 전에 비해 배추 수확 후 유기물이 감소하였다. 유효인산함량은 T25 처리구에서 가장 높은 값을 보였다. 대부분의 양이온 함량은 처리간에 뚜렷한 차이가 없었으나 Ca 함량은 골재부산물 용토재 처리량이 증가함에 따라 크게 증가하였다. 중금속 함량은 처리에 따른 변화가 보이지 않았다. 식물체 분석 결과 배추의 양분 및 중금속 함량의 차이 또한 유의하지 않은 정도였다.

Table 51. The change of soil properties during chinese cabbage growth with the application amount of soil materials using aggregate byproduct.

	T0			T10			T25			T50		
	initial	mid	final	initial	mid	final	initial	mid	final	initial	mid	final
pH	7.00	7.00	7.26	6.69	6.64	7.00	6.66	6.73	6.90	6.54	6.68	6.92
EC	0.21	0.13	0.09	0.86	0.93	1.27	0.94	1.10	0.90	1.21	1.29	1.55
O.M	2.25	1.77	1.29	3.06	2.59	2.11	3.27	2.99	2.18	4.29	2.65	2.38
Ava-P	103.11	91.50	88.00	92.76	78.55	97.85	111.05	111.66	78.40	84.65	86.60	58.00
T-N	0.20	0.16	0.16	0.14	0.01	0.14	0.17	0.16	0.17	0.14	0.12	0.13
CEC	9.29	8.66	13.00	12.51	12.66	12.62	13.65	12.43	12.86	13.29	12.98	14.00
Ca	8.01	9.77	0.52	19.05	22.47	1.49	22.57	24.91	1.13	28.18	28.62	1.49
Mg	0.04	0.06	3.12	0.03	0.03	3.18	0.03	0.03	2.92	0.02	0.03	2.64
K	0.70	0.76	0.29	0.50	0.54	0.44	0.61	0.81	0.38	0.53	0.67	0.26
Na	0.29	0.24	0.22	0.19	0.21	0.12	0.24	0.22	0.20	0.23	0.22	0.15
Cu	1.50	1.40	1.19	0.95	0.88	0.59	1.21	1.09	0.76	0.75	0.82	0.60
Zn	9.35	7.64	14.62	6.55	6.28	12.38	8.92	8.23	15.90	7.64	6.74	1.22
Cd	0.09	0.06	0.63	0.08	0.08	0.66	0.11	0.10	0.67	0.10	0.10	0.61
Pb	0.71	0.83	0.67	0.68	0.84	0.38	0.79	0.79	0.33	0.79	0.94	0.50

Table 52. The nutrient and the heavy metal content in chinese cabbage with the application amount of soil material using aggregate byproduct.

	P	N	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cu	Zn	Cd	Pb
	%	%	% %			ppm				
Ref	2.41	0.02	0.02	0.24	6.56	1.08	16.96	45.52	20.56	39.66
T0	3.18	0.02	0.07	0.38	10.01	0.99	17.88	43.48	22.68	22.32
T10	2.24	0.01	0.02	0.25	6.63	0.94	16.04	35.52	22.68	18.86
T25	2.83	0.02	0.00	0.29	8.43	1.34	18.34	48.18	25.84	5.00
T50	2.55	0.02	0.01	0.26	6.84	0.88	18.34	42.26	37.18	25.80

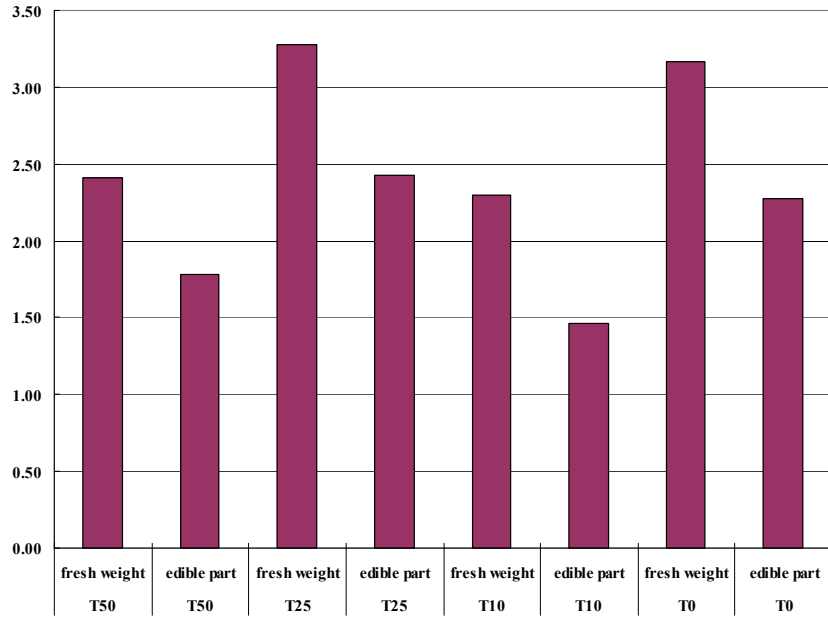


Figure 61. The fresh weight and the edible part weight of chinese cabbage.

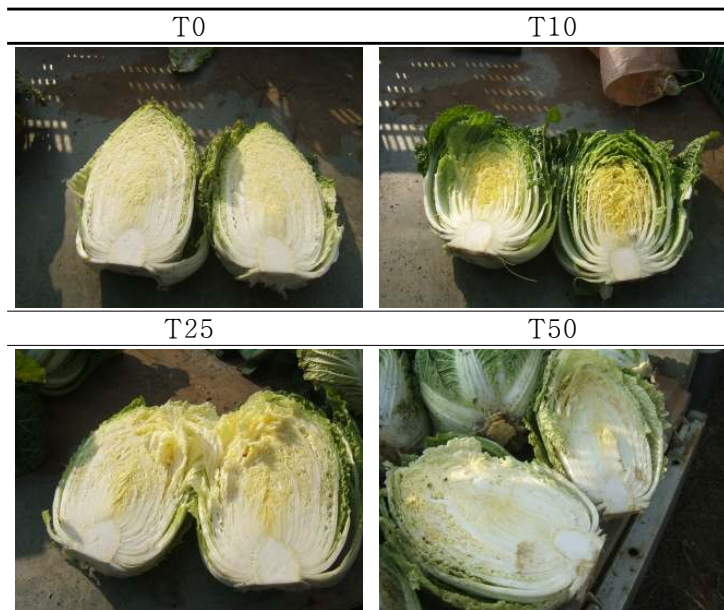


Figure 62. The pictures of harvested chinese cabbage

농가멘토링을 겸한 배추재배시험 결과, 골재부산물 용토제가 밭토양의 객토재로 사용하기에 문제가 없다고 판단되며, 이번 시험의 조성을 기준으로 할 때는 대상지 작토층 부피의 25% 가량을 처리하는 것이 적합하다고 판단된다. 실제 시험에서는 토심 20cm를 기준으로 작토층을 삼았기 때문에 적정 처리량은 0.5ML/ha에 해당한다.

5. 노지 pot 재배

가. 시험구 구성

2007년 5월부터 9월까지 노지에서 pot 재배시험을 하였다. 공시식물은 앞의 시험과 마찬가지로 상추와 국화로 하였다. 상추는 여름 상추로 종묘상에서 구입하였으며, 국화는 서울시립대학교에서 분양받았다. 골재부산물의 처리는 활용도를 높이기 위해 마사를 25%(sand25)와 50%(sand50) 섞은 처리구와 퇴비를 25%(come25)와 50%(com50) 섞은 처리구, 골재부산물에 화학비료(NPK 복합비료)만을 준 처리구(ori-F), 골재부산물 만으로 채운 처리구(ori)를 두었고, 비교를 위해 마사토 75%와 퇴비 25%를 섞은 대조구(reference)를 두었다. 각 처리구는 상추, 국화에 대해 각각 5반복으로 하였다.



Figure 63. The pot experiment of lettuce and chrysanthemum in the open area.

나. 처리에 따른 토양 특성

골재부산물에 퇴비를 혼합했을 때(com25, com50), pH가 중성 쪽으로 개선되었고, 유기물 함량과 유효인산함량도 크게 증가하였다. 골재부산물에 마사를 혼합했을 때(sand25, sand50)는 pH의 변화가 거의 없었으며 유기물 함량은 약간 증가하였다. 치환성 양이온 함량에 있어서는 처리간 차이가 없는 것으로 조사되었다. 토양분석결과로만 보아서는 대조구로 둔 마사토와 퇴비의 혼합구(reference)의 토양 특성, 특히 pH, 유기물 함량, 유효인산함량이 작물 생육에 가장 유리한 환경을 조성해 줄 것으로 판단되었다.

Table 53. The soil properties of pot filled with aggregate byproduct mixture.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	Avail-P mg kg ⁻¹	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
com25	7.94	0.32	3.13	17.15	17.15	6.93	19.46	1.71	0.29	1.43
com50	7.53	0.34	4.76	19.90	26.76	10.57	20.33	2.10	0.32	1.60
sand25	8.69	0.23	0.68	21.96	16.47	3.77	17.08	0.93	0.22	1.05
sand50	8.59	0.27	0.48	19.22	21.95	5.66	16.16	0.78	0.17	1.09
ori	8.66	0.30	0.34	10.97	16.47	2.74	19.14	1.09	0.26	1.36
reference	6.24	0.15	5.24	15.10	12.36	24.00	4.75	1.18	0.27	0.95

다. 작물 재배 후의 토양 특성

상추와 국화를 재배하고 난 후 토양 특성을 조사한 결과, 대조구를 제외한 모든 처리구가 알칼리성을 나타내고 있었다. 재배 전 토양 pH가 7 후반이었던 퇴비 처리구의 pH는 8 초반으로 증가한 것이 특이하였다. 유기물 함량은 퇴비 처리구(com25, com50)와 화학비료 처리구(ori-F)에서 증가하였고 나머지 처리구에서는 감소하였다. 유효인산함량을 비롯한 암모니아태 질소, 질산태 질소 및 치환성 양이온 등 나머지 양분은 재배 전후와 처리간에 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

Table 54. The soil properties of pot filled with aggregate byproduct mixture after cultivation.

	pH	EC dS m ⁻¹	O.M. %	NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	Avail-P mg kg ⁻¹	Exchangeable cation (cmol kg ⁻¹)			
							Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
com25	8.46	0.09	3.47	15.10	7.54	9.56	16.99	1.23	0.46	0.49
com50	8.02	0.10	7.01	8.93	3.43	9.86	17.75	1.85	0.52	0.52
sand25	8.92	0.07	0.27	3.43	12.36	3.78	12.76	0.69	0.40	0.46
sand50	8.85	0.06	0.34	11.67	13.04	8.82	10.67	0.51	0.36	0.48
ori-F	8.96	0.07	0.61	17.83	17.15	4.55	10.51	0.79	0.43	0.47
reference	6.16	0.02	4.29	18.53	11.66	20.13	4.41	0.99	0.37	0.52

라. 작물 성장량 분석

1) 상추

7월과 8월에 조사한 상추의 성장량을 토양의 조건에 따라 비교하면 골재부산물과 퇴비를 50대50으로 혼합한 com50에서의 생육이 가장 좋은 것으로 나타났다. 5반복의 평균 잎수는 com50에서 12.4장에서 14.8장으로 증가하였고, 평균 잎의 폭은 6.16cm에서 8.04cm로 증가하였으며, 평균 잎의 길이는 11.16cm에서 23.4cm로 가장 큰 증가율을 보였다. 나머지 처리구에서도 생육기간 동안 성장량의 증가가 관찰되었으나, 골재부산물 단독 처리구(ori)에서는 성장량의 감소가 관찰되었다. 한편 골재부산물에 복합비료를 시용한 처리구(ori-F)에서의 상추의 생장이 전반적으로 마사토 혼합구(sand25, sand50)에서와 비슷한 성적을 보이고 있었다. 앞에 언급된 토양분석결과에서는 대조구(reference)의 토양 조건이 식물 생육에 가장 적합할 것으로 예상되었으나 실제 상추의 생육은 골재부산물과 퇴비를 반반씩 혼합할 때 가장 좋은 것으로 나타난 데에는 분석항목에 포함되어 있지 않았던 다른 요인이 작용했을 수 있다고 사료된다.

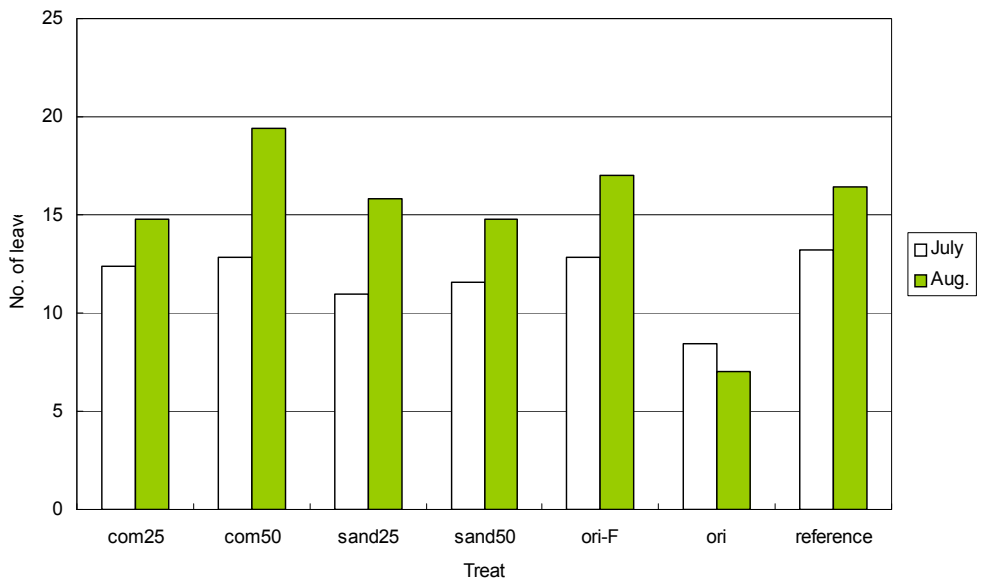


Figure 64. The number of lettuce leaves with soil condition.

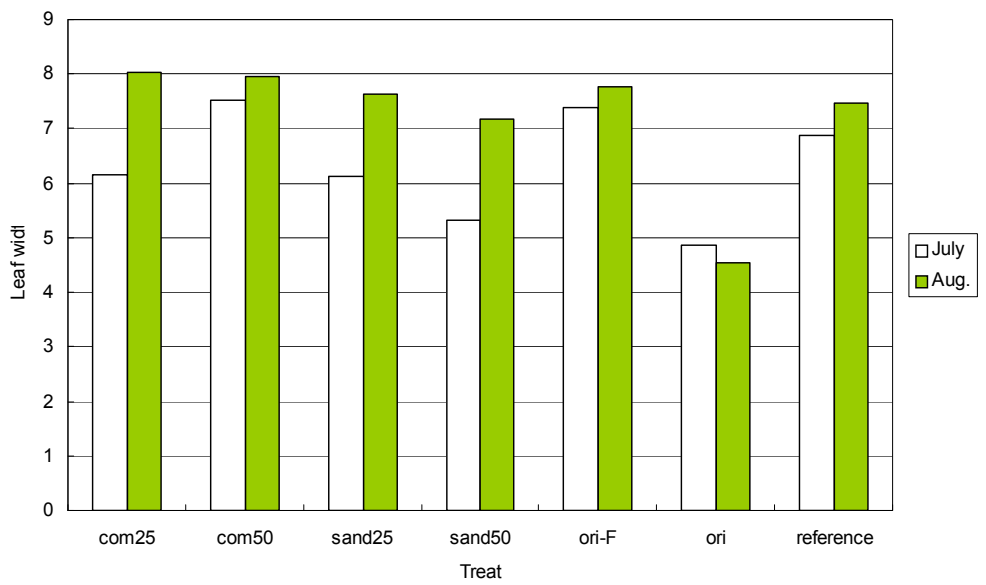


Figure 65. The width of lettuce leaves with soil condition.

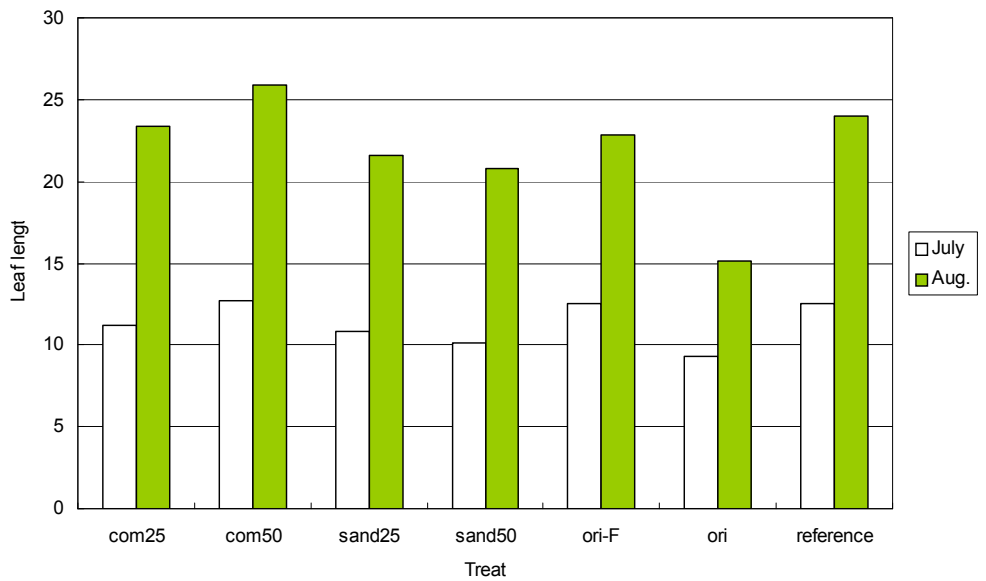


Figure 66. The length of lettuce leaves with soil condition.

2) 국화

상추와 마찬가지로 7월과 8월에 조사한 국화의 성장량을 토양의 조건에 따라 비교하면 골재부산물과 퇴비를 75대25와 50대50으로 혼합한 com25, com50에서의 생육이 가장 좋은 것으로 나타났다. 하지만 상추에 비해 선명한 차이를 나타내지는 않았다. 5반복의 평균 국화의 키는 com25에서 31.5cm에서 31.5cm로 변화가 없었으며, com50에서 30.6cm에서 32.4cm로 약간 증가하였다. 나머지 처리구에서도 생육기간 동안 성장량의 증가가 관찰되었으나, 퇴비구와 마찬가지로 변화의 폭이 미미하였다. 한편 골재부산물에 복합비료를 시용한 처리구(ori-F)에서의 국화의 생장이 전반적으로 마사토 혼합구(sand25, sand50)에서의 성장량을 조금 상회하는 성적을 보이고 있었다. 앞에 언급된 토양분석결과에서는 상추와 마찬가지로 대조구(reference)의 토양 조건이 식물 생육에 가장 적합할 것으로 예상되었으나 실제 국화의 생육은 골재부산물에 퇴비를 혼합할 때 가장 좋은 것으로 나타난 데에는 분석항목에 포함되어 있지 않았던 다른 요인이 작용했을 수 있다고 사료된다.

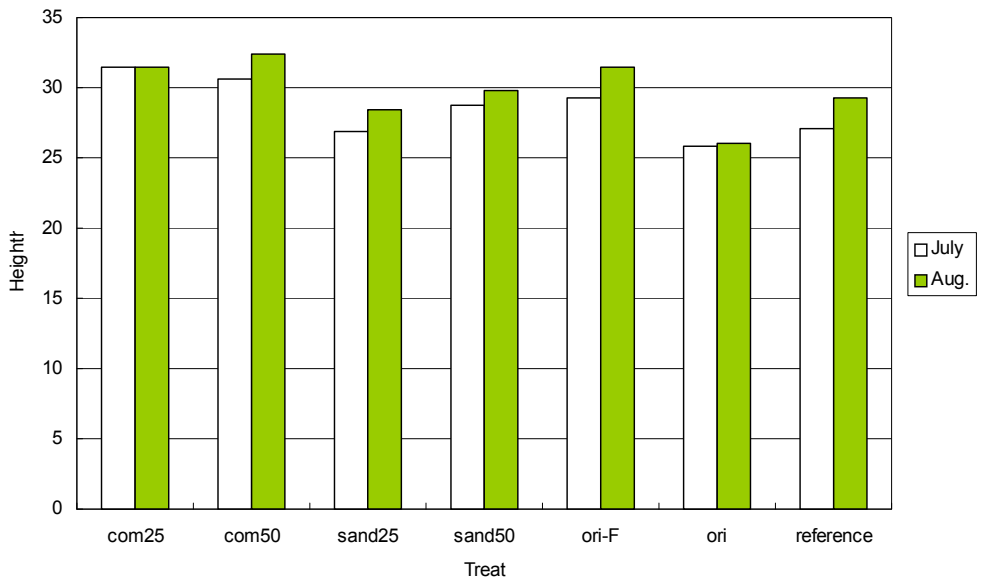


Figure 67. The height of chrysanthemum with soil condition.

제6절 결론

3년간의 연구를 통해 골재부산물을 농업용, 조경용, 환경복원용 토양재료로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 물론 작물의 생산성을 높이기 위해서는 식물 영양학적인 접근이 요구되며, 적절한 시비조건을 제시한다면 더욱 효과적인 용토재로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 경제성 측면에서 볼 때, 골재부산물은 비록 폐기물로 분류되어 있지만 자발적으로 비용을 지불하면서까지 처분하는 것은 현실적으로 어려운 특성이 있다. 또한 일정지역을 벗어나게 되면 운송비용 때문에 경제성이 현격히 떨어지게 된다.

따라서 골재부산물을 용토재의 경제적인 개발을 위해서는 농업용과 산업용을 분리해서 전략을 수립해야 한다는 것이 현재의 판단이다.

우선 농업용 토양재료로의 활용은 골재업체 주변의 농가에서 안정적으로 사용할 수 있는 가이드라인의 제시가 중요하다고 판단된다. 즉 중간 가공 단계를 거치지 않고 골재업체 주변 농가가 직접 골재부산물을 분양받아 하우스나 밭 등의 객토재로 활용하는데, 이 때 경작지의 물리성을 저하시키지 않도록 섞여 들어야 할 퇴비와 마사의 양에 대한 기준의 제시 등을 가정할 수 있을 것이다. 본 연구의 결과 골재부산물과 마사 및 퇴비 등의 부가재료가 50대50으로 혼합될 때 상추, 국화, 배추 등의 생육 성적이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그리고 퇴비만을 단독으로 50대50으로 섞어 사용하는 것도 추천할 수 있는 방법이었다. 참외 하우스 시험에서와 같이 3~4년 주기로 골재부산물로 하우스 토양을 객토하되 비료관리를 적절히 해 주는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 골재생산업체와 농민의 이익을 모두 만족시키는 방법으로는 이와 같은 방법들이 최선일 것으로 판단된다.

하지만 비탈면 녹화복원사업과 같은 부가가치가 발생하는 산업으로의 활용에서는 용토재료의 가공이 필수적이기 때문에 농업과는 기본적으로 접근 방법이 다르다고 볼 수 있다. 현재 골재부산물을 원료로 가공 처리를 하는 상토 공장은 없는 실정이어서 설비 등의 기반 사항이 준비되지 않은 상태에서 골재부산물 용토재 생산의 경제성을 분석하기는 어려우나, 골재업체가 집결되어 있는 곳에 생산 공장과 적합한 설비를 갖추고 골재부산물과 유무기 자재를 50대50으로 혼합하거나 기존의 녹생토의 25%에 해당하는 양을 골재부산물로 섞어 준다면 사업성이 있을 것으로 사료된다.

Appendix 1. the HRXRD of byproduct aggregates

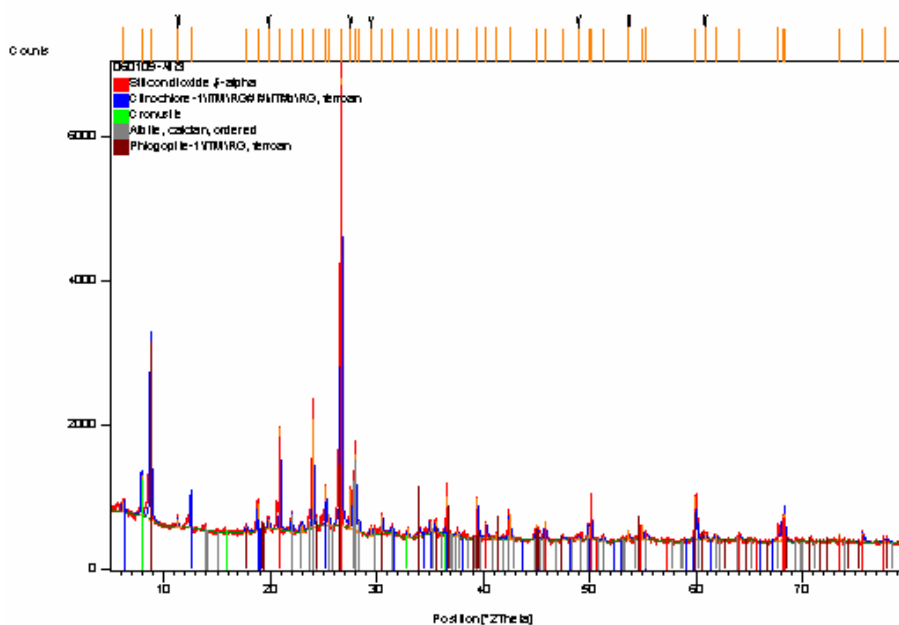


Figure 1-1. KG (Gyeonggi-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-083-2465	69	Silicon dioxide	-0.001	0.866	Si O ₂
00-029-0701	26	Clinocllore-1	0.008	0.077	(Mg , Fe) ₆ (Si) ₄ O ₁₆
00-054-0664	29	Cronusite	-0.028	0.073	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr ₂
00-041-1480	23	Albite	0.008	0.141	(Na , Ca) Al (S ₂
00-042-1437	27	Phlogopite-1	-0.027	0.351	K (Mg , Fe) ₃ (A ₂

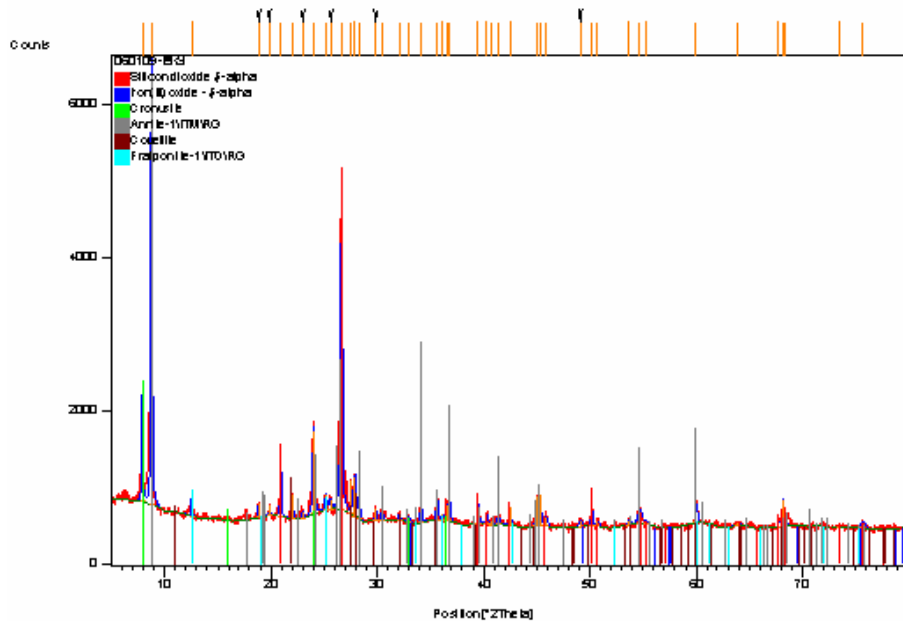


Figure 1-2. HC (Gyeonggi-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-083-2465	61	Silicon dioxide	-0.032	0.673	Si O ₂
01-073-0603	31	Iron(III) oxide	-0.042	0.058	Fe ₂ O ₃
00-054-0664	27	Cronusite	0.002	0.238	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr..
00-042-1413	32	Annite-1	0.017	0.847	K Fe ₃ +2 (Si , Al..
03-065-3929	25	Covellite	0.05	0.083	Cu S
00-034-0782	32	Fraipontite-1	0.019	0.052	(Zn , Al , Cu) ₃ ..

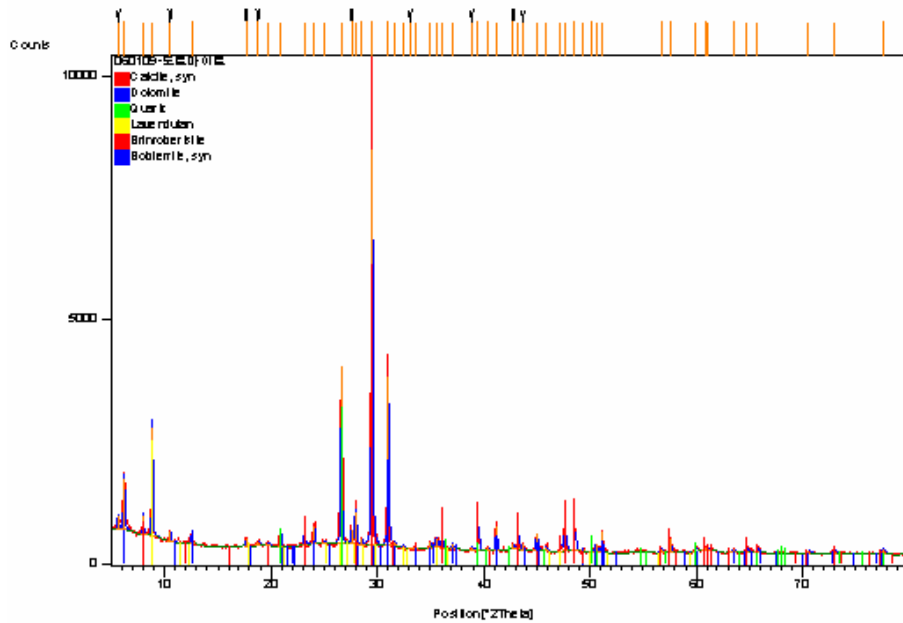


Figure 1-3. DM (Gangwon-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-081-2027	50	Calcite, syn	0.081	0.551	Ca (C O3)
00-036-0426	41	Dolomite	0.044	0.17	Ca Mg (C O3) ₂
01-085-0797	25	Quartz	-0.052	0.268	Si O2
00-051-1491	29	Lavendulan	-0.123	0.187	Na Ca Cu5 (As O4) ₂
00-054-1146	23	Brinrobertsite	-0.071	0.028	(Na , K , Ca)0.3..
00-033-0877	22	Bobierite, syn	-0.156	0.028	Mg3 (P O4) ₂ !8 H..

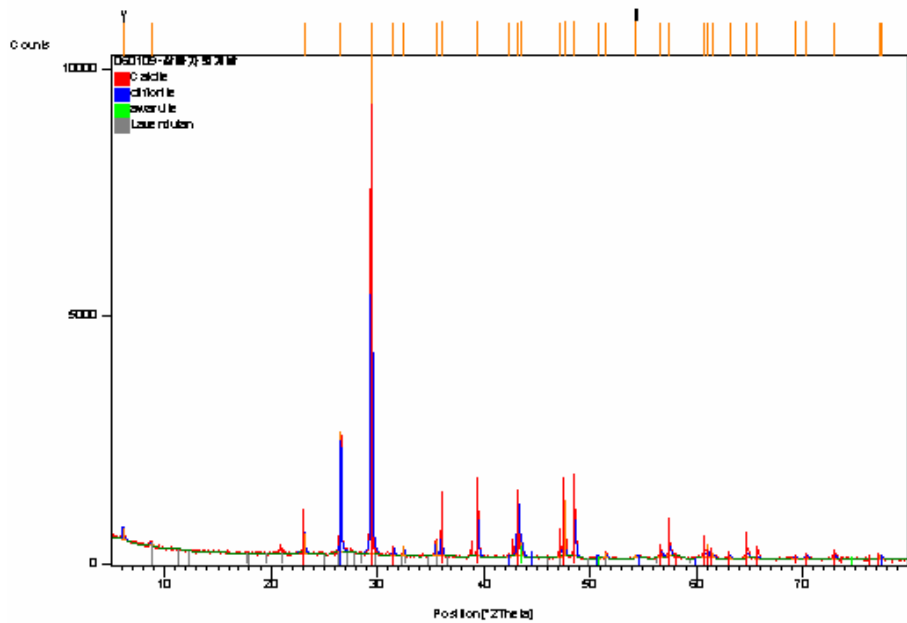


Figure 1-4. SS (Gangwon-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-086-2334	76	Calcite	0.036	0.884	Ca (C O3)
00-041-1487	42	cliftonite	0.145	0.218	C
00-047-1417	32	awaruite	0.085	0.022	(Fe , Ni)
00-051-1491	28	Lavendulan	-0.205	0.007	Na Ca Cu5 (As O4

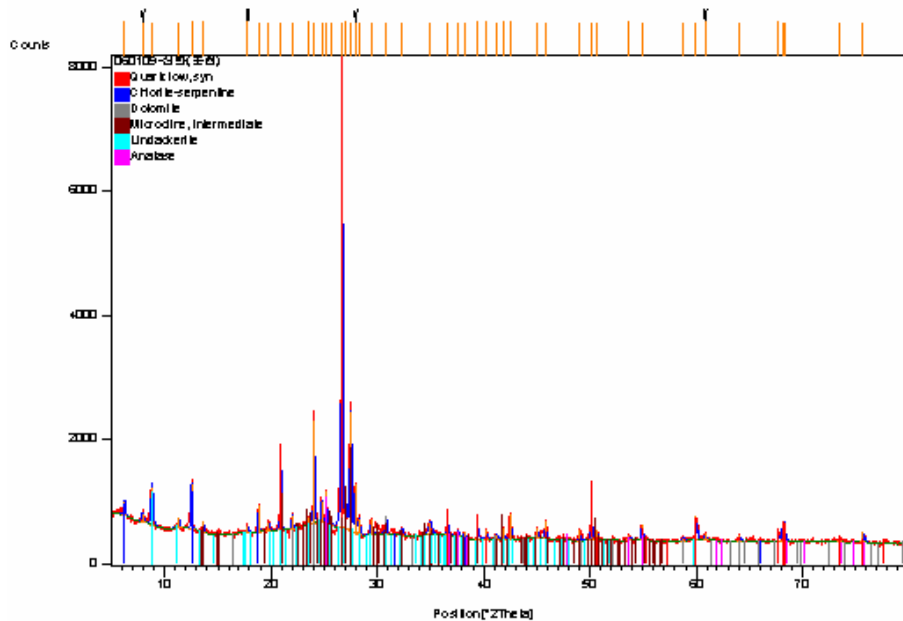


Figure 1-5. CC (Gangwon-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
03-065-0466	58	Quartz low, syn	-0.004	0.988	Si O ₂
00-052-1044	36	Chlorite-serpentine	-0.05	0.074	(Mg , Al) ₆ (Si ..
01-073-2444	19	Dolomite	0.103	0.035	Ca Mg (C O ₃) ₂
00-019-0932	23	Microcline, interm..	-0.042	0.165	K Al Si ₃ O ₈
00-051-1573	15	Lindackerite	0.106	0.069	Cu ₅ (As O ₄) ₂ (A..
01-071-1167	22	Anatase	-0.121	0.054	Ti O ₂

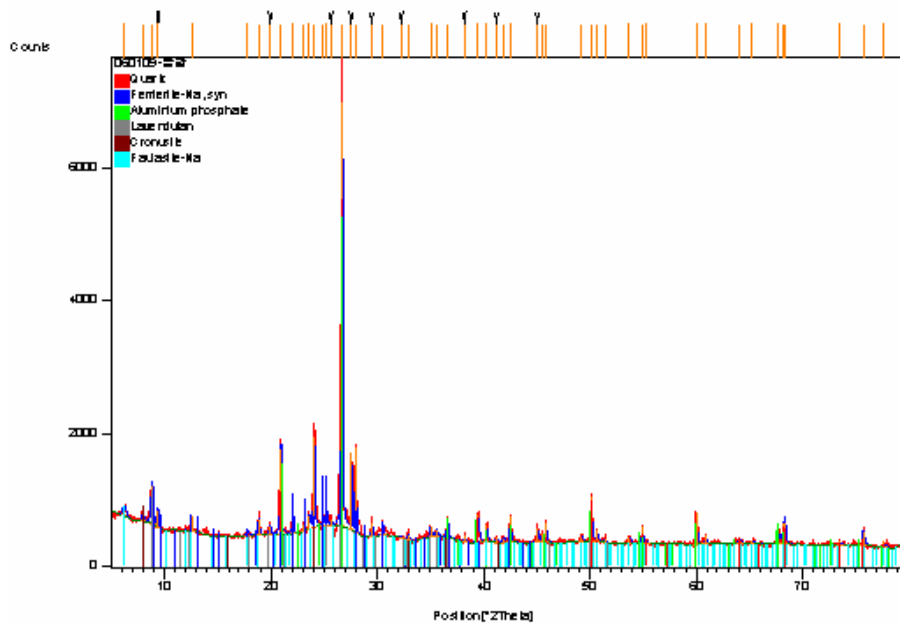


Figure 1-6. KG (Gangwon-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-085-0797	63	Quartz	0.021	0.644	Si O ₂
00-043-0576	18	Ferrierite-Na, syn	-0.094	0.096	Na _{0.96} Al ₂ N _{1.06} S..
01-076-0226	37	Aluminium phosphate	0.222	0.609	Al P O ₄
00-051-1491	24	Lavendulan	-0.125	0.07	Na Ca Cu ₅ (As O ₄ ..
00-054-0664	25	Cronusite	0.01	0.031	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr..
01-074-2394	14	Faujasite-Na	0.006	0.021	Na _{18.24} Ca _{11.74} Ce..

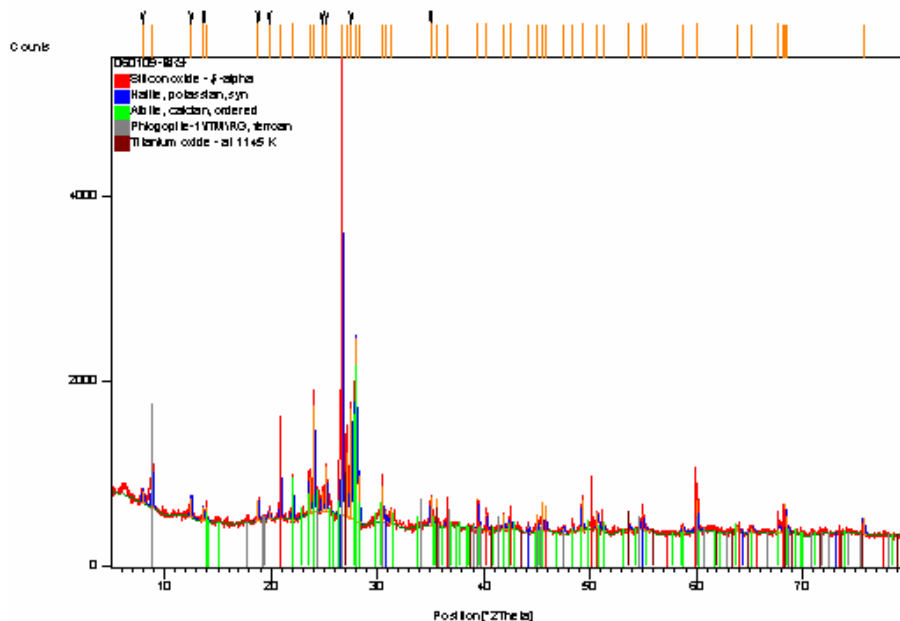


Figure 1-7. YS (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-089-8935	44	Silicon oxide - β-α..	0.08	0.962	Si O ₂
00-026-0918	27	Halite, potassian,..	-0.21	0.017	K _{0.2} Na _{0.8} Cl
00-041-1480	22	Albite, calcian, o..	-0.023	0.309	(Na , Ca) Al (
00-042-1437	15	Phlogopite-1\ITM \R..	0.055	0.206	K (Mg , Fe) ₃ (
01-077-0445	23	Titanium oxide - a..	-0.151	0.088	Ti O ₂

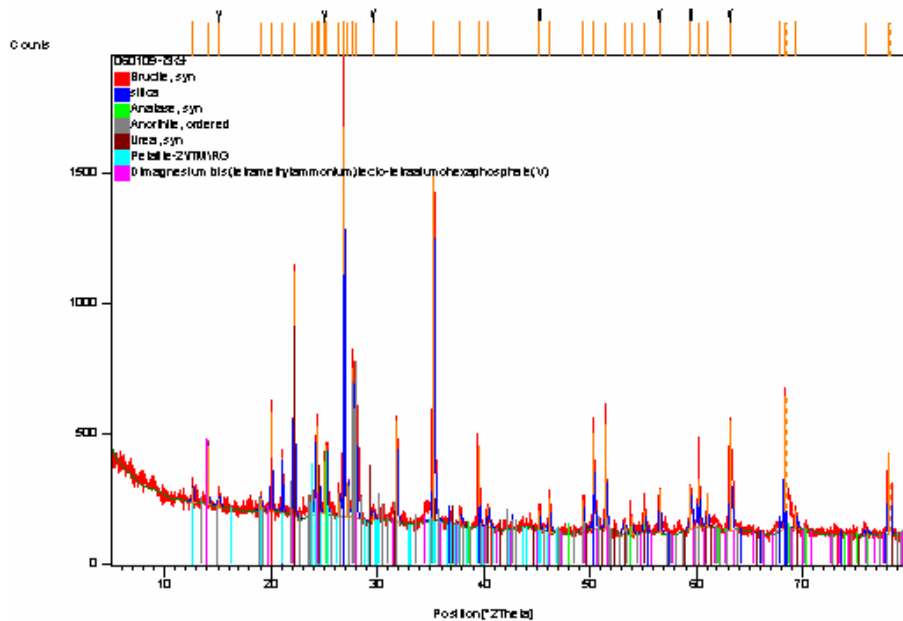


Figure 1-8. JS (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-082-2454	34	Brucite, syn	0.007	0.183	Mg (O H) ₂
00-033-1161	33	silica	0.186	0.474	Si O ₂
01-083-2243	24	Anatase, syn	-0.076	0.126	Ti O ₂
00-041-1486	18	Anorthite, ordered	-0.025	0.307	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
00-028-2015	14	Urea, syn	0.042	0.376	C O (N H ₂) ₂
00-014-0090	21	Petalite-2\ITM\RG	-0.005	0.104	Li Al Si ₄ O ₁₀
01-089-8955	10	Dimagnesium bis(te..	0.162	0.128	C ₈ H ₂₄ Al ₄ Mg ₂ N ₂ ..

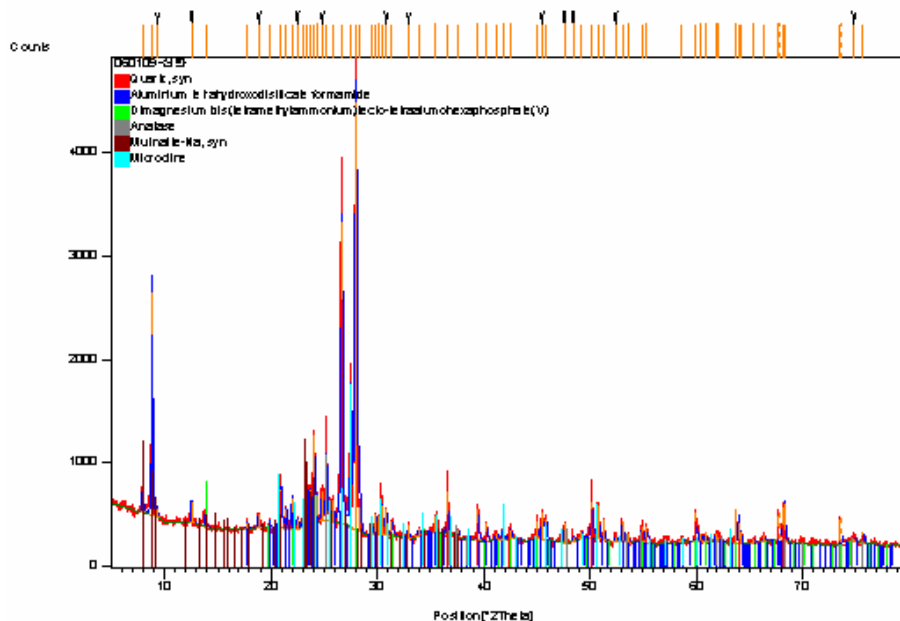


Figure 1-9. SI (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
00-046-1045	52	Quartz, syn	-0.006	0.442	Si O ₂
01-074-1758	24	Aluminium tetrahyd..	0.048	0.356	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H)..
01-089-8956	17	Dimagnesium bis(te..	-0.014	0.092	C ₈ H ₂₄ Al ₄ Mg ₂ N ₂ ..
01-071-1168	16	Anatase	-0.046	0.13	Ti O ₂
00-037-0361	21	Mutinaite-Na, syn	-0.026	0.174	Na _{2.6} Al ₄ (Si ₁₆₁ ...
00-001-0705	22	Microcline	0.02	0.278	K Al Si ₃ O ₈

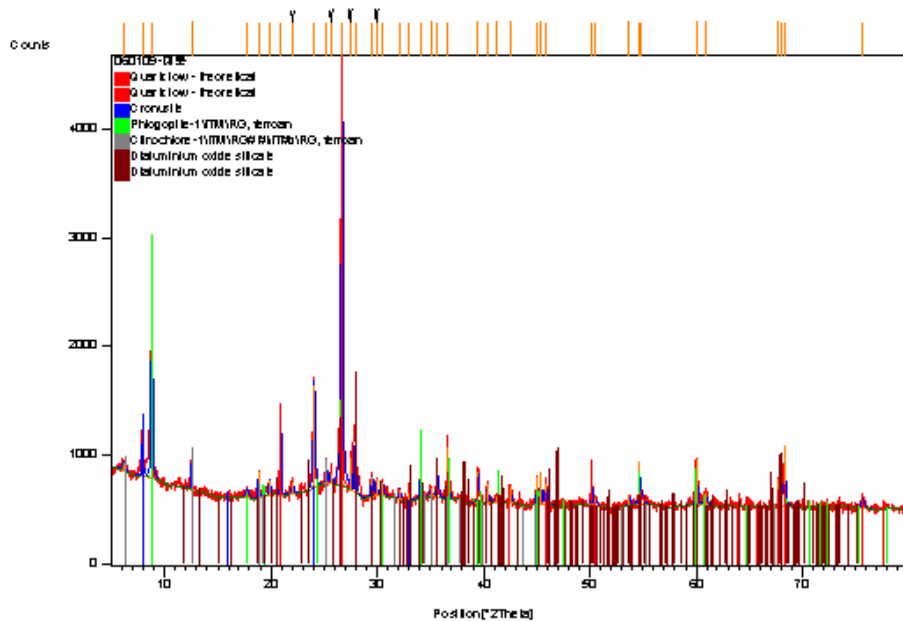


Figure 1-10. KS (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-2517	61	Quartz low -	0.052	0.839	Si O ₂
00-054-0664	30	Cronusite	0.004	0.125	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr..
00-042-1437	30	Phlogopite-1.	-0.003	0.482	K (Mg , Fe) ₃ (A..
00-029-0701	25	Clinocllore-1	0.031	0.085	(Mg , Fe) ₆ (Si ..
01-074-2217	7	Dialuminium oxide	0.004	0.238	Al ₂ Si O ₅

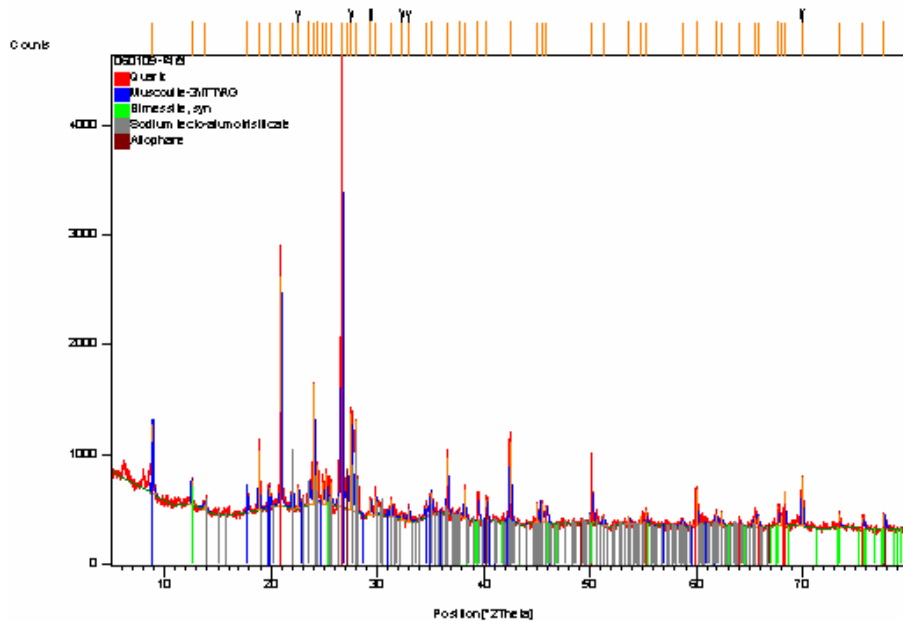


Figure 1-11. DC (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-3755	60	Quartz	0.025	0.85	Si O ₂
00-007-0042	26	Muscovite-3RG	0.017	0.101	(K , Na) (Al , ..
01-080-1097	14	Birnessite, syn	-0.093	0.038	Mg.29 Mn1.42 Mn.58..
01-089-6426	19	Sodium tecto-alumo	-0.032	0.163	Na (Al Si ₃ O ₈)
00-038-0449	32	Allophane	0.199	0.078	Al ₂ O ₃ !2 Si O ₂ !3..

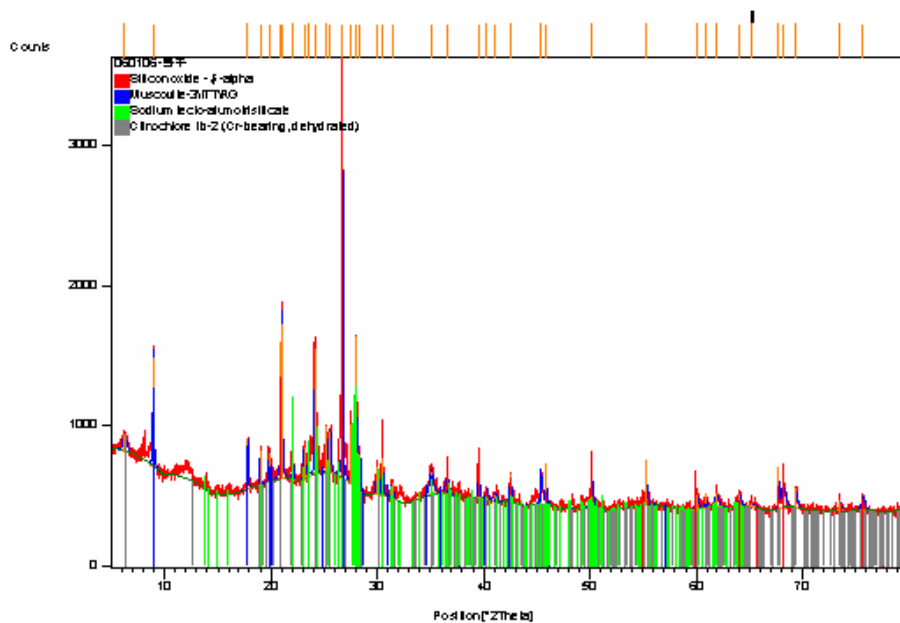


Figure 1-12. JH (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-085-0457	63	Silicon oxide -	0.068	1.002	Si O ₂
00-007-0042	32	Muscovite-3	0.067	0.153	(K , Na) (Al , ..
01-089-6423	21	Sodium tecto-alumo	-0.014	0.202	Na (Al Si ₃ O ₈)
01-089-6455	8	Clinocllore Iib-	0.057	0.037	Mg ₃ (Mg ₂ Al) ((..

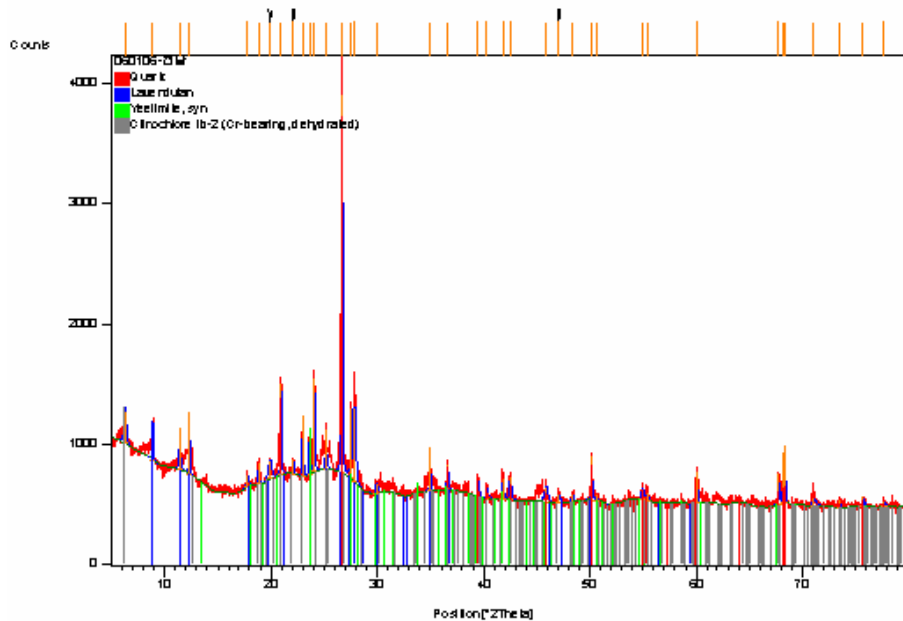


Figure 1-13. DA (Jeolla-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-3755	66	Quartz	0.036	0.7	Si O ₂
00-051-1491	26	Lavendulan	-0.073	0.077	Na Ca Cu ₅ (As O ₄ ..
00-033-0256	17	Yeelimite, syn	0.009	0.092	Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ S O ₄
01-089-6455	11	Clinochlore Iib-2	0.023	0.071	Mg ₃ (Mg ₂ Al) (..

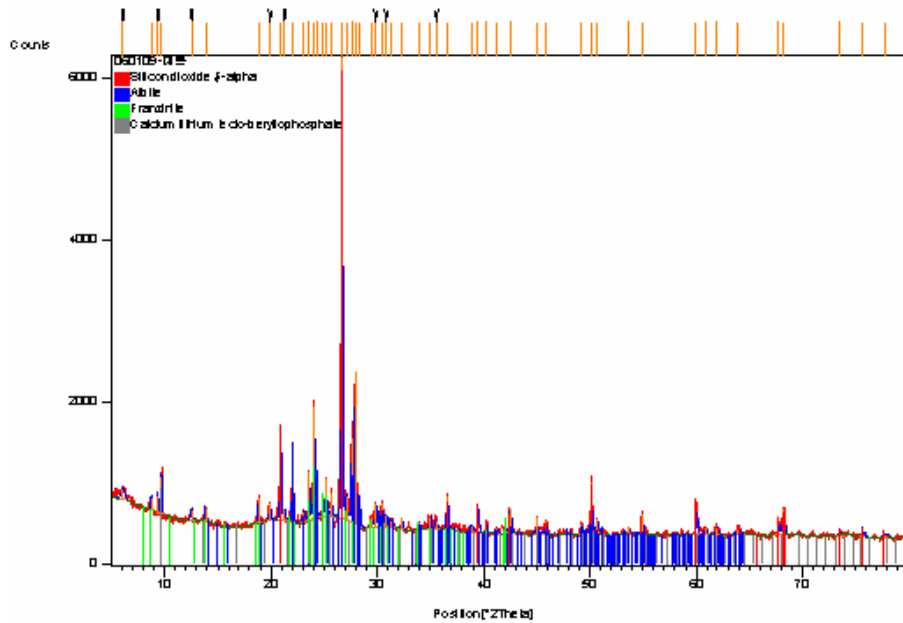


Figure 1-14. DH (Geongsang-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-083-2465	63	Silicon dioxide	-0.005	0.878	Si O ₂
01-070-3752	30	Albite	0.001	0.23	(Na _{0.98} Ca _{0.02})
00-030-1170	22	Franzinite	0.092	0.104	(Na , Ca) ₇ (Si
01-082-1147	16	Calcium lithium	0.139	0.049	Ca ₆ Li ₁₂ (Be ₂₄ P

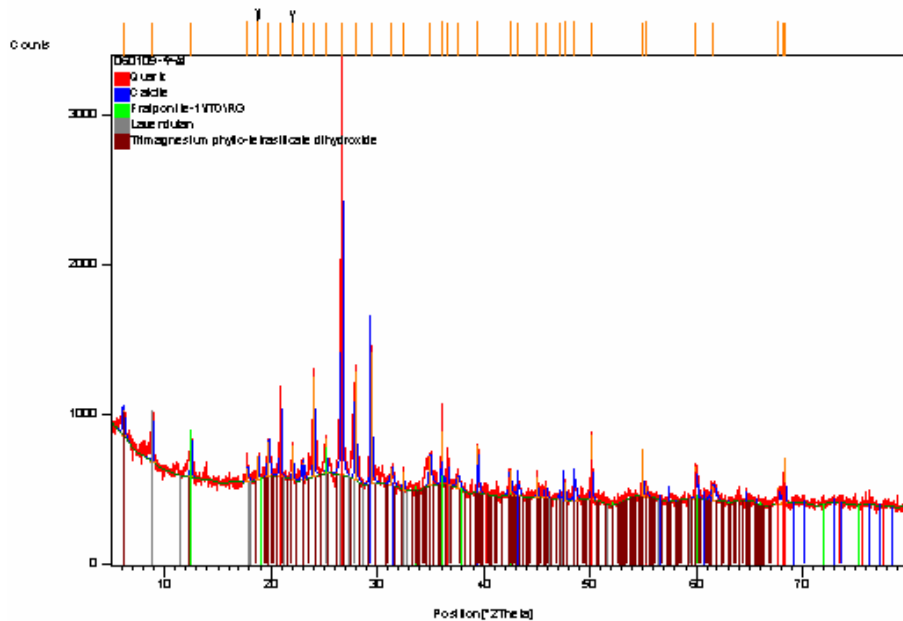


Figure 1-15. SS (Geongsang-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-3755	63	Quartz	0.014	0.811	Si O ₂
01-083-0578	42	Calcite	0.009	0.332	Ca (C O ₃)
00-034-0782	25	Fraipontite-1	-0.037	0.093	(Zn , Al , Cu) ₃
00-051-1491	31	Lavendulan	-0.077	0.101	Na Ca Cu ₅ (As O ₄
01-074-1732	19	Trimagnesium phyll..	0.024	0.049	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (O H

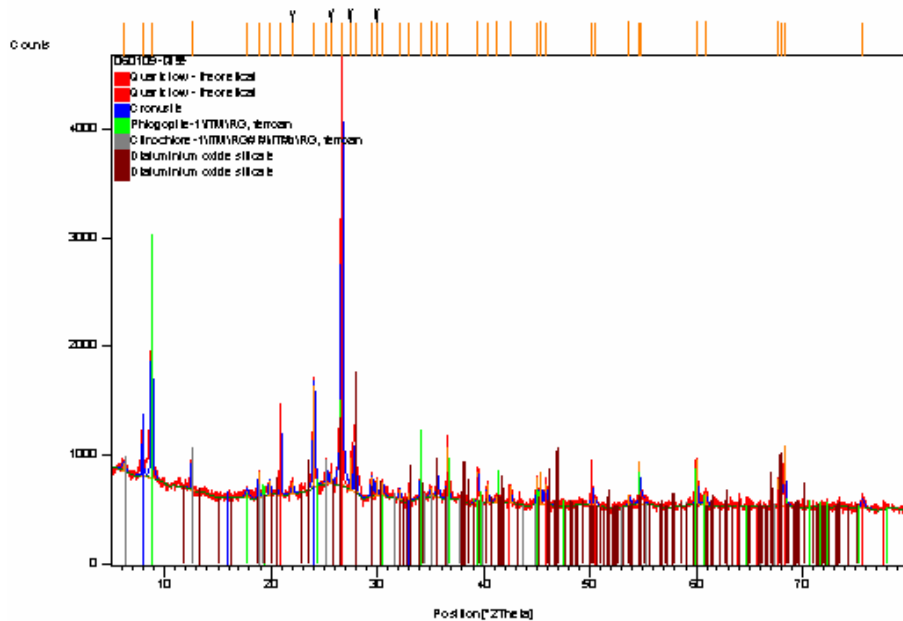


Figure 1-16. DE (Geongsang-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-2517	61	Quartz low - theor..	0.052	0.839	Si O2
00-054-0664	30	Cronusite	0.004	0.125	Ca0.2 (H2 O)2 Cr..
00-042-1437	30	Phlogopite-1	-0.003	0.482	K (Mg , Fe)3 (A..
00-029-0701	25	Clinocllore-1	0.031	0.085	(Mg , Fe)6 (Si ..
01-074-2217	7	Dialuminium oxide ..	0.004	0.238	Al2 Si O5

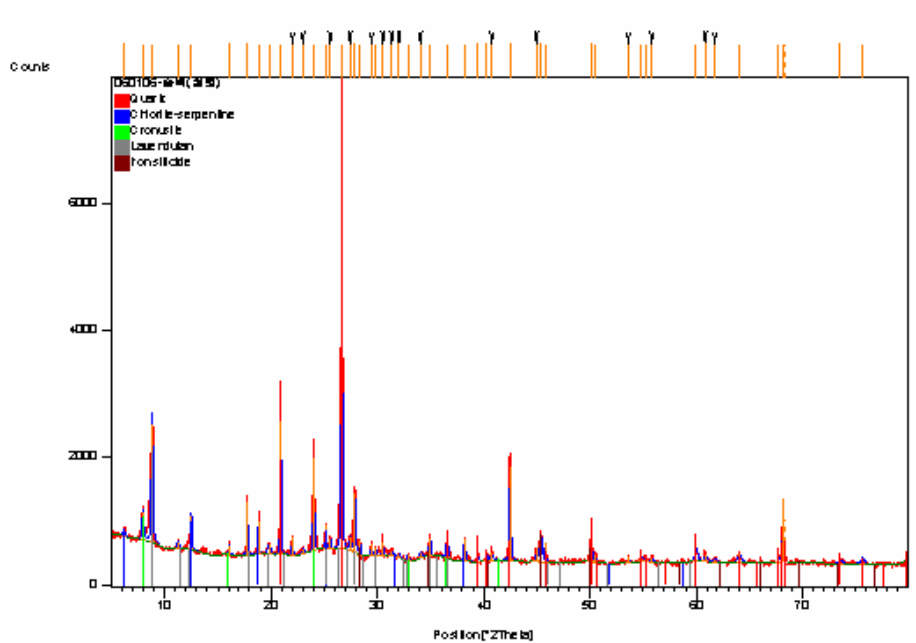


Figure 1-17. SB (Chungcheong-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-070-3755	56	Quartz	-0.009	0.853	Si O ₂
00-052-1044	37	Chlorite-serpentine	-0.09	0.055	(Mg , Al) ₆ (Si ..
00-054-0664	30	Cronusite	0.015	0.049	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr..
00-051-1491	24	Lavendulan	-0.13	0.176	Na Ca Cu ₅ (As O ₄ ..
01-076-1748	26	Iron silicide	0.115	0.055	Fe Si

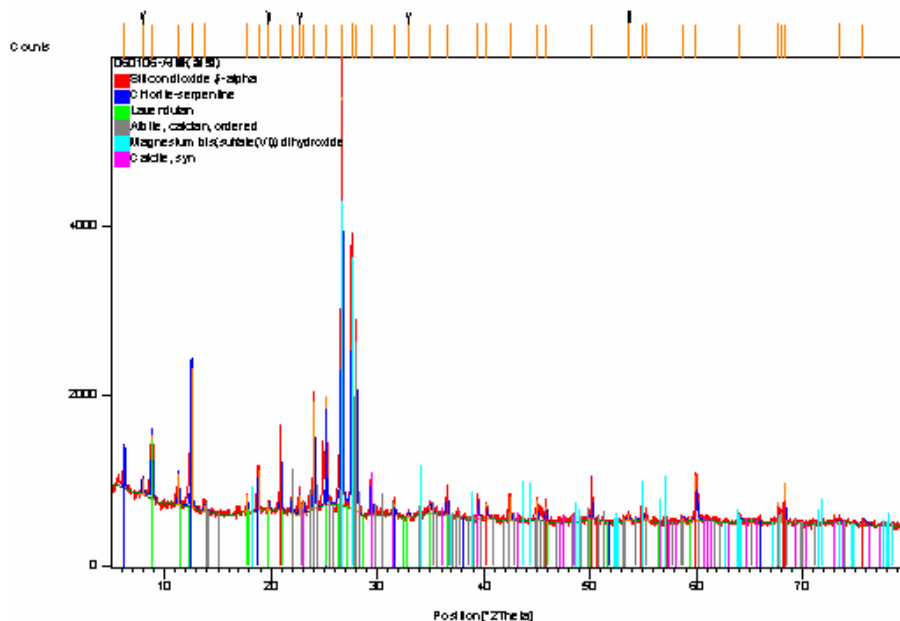


Figure 1-18. SY (Chungcheong-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-083-2465	70	Silicon dioxide	-0.002	0.795	Si O ₂
00-052-1044	45	Chlorite-serpentine	-0.068	0.269	(Mg , Al) ₆ (Si ..
00-051-1491	25	Lavendulan	-0.14	0.117	Na Ca Cu ₅ (As O ₄ ..
00-041-1480	14	Albite, calcian	0	0.333	(Na , Ca) Al (S..
01-079-1189	19	Magnesium bis	-0.047	0.599	Mg ₃ (S O ₄) ₂ (O ..
00-005-0586	11	Calcite, syn	0.055	0.088	Ca C O ₃

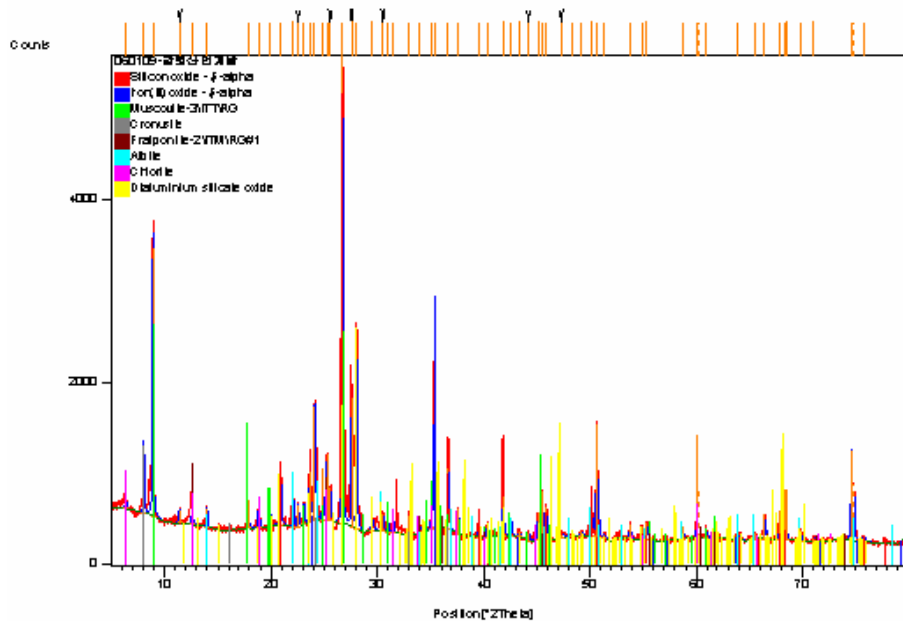


Figure 1-19. KW (Chungcheong-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-079-1906	50	Silicon oxide -	0.056	0.846	Si O ₂
01-073-0603	28	Iron(III) oxide -	-0.257	0.458	Fe ₂ O ₃
00-007-0042	16	Muscovite-3	0.045	0.377	(K , Na) (Al , ..
00-054-0664	23	Cronusite	0.094	0.134	Ca _{0.2} (H ₂ O) ₂ Cr..
00-014-0366	15	Fraipontite-2	-0.051	0.122	(Zn , Al) ₃ (Si ..
00-001-0739	15	Albite	0.144	0.317	Na Al Si ₃ O ₈
00-002-0028	17	Chlorite	0.018	0.077	(Mg , Fe) ₅ (Al ..
01-087-1709	7	Dialuminium silica	-0.043	0.396	Al ₂ (Si O ₄) O

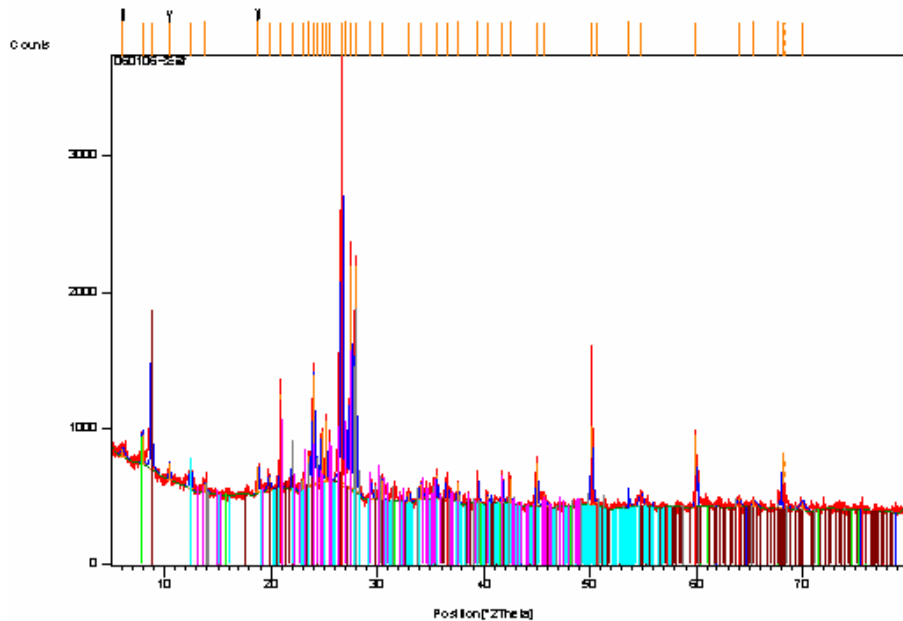


Figure 1-20. JK (Chungcheong-Do)

Pattern List

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-079-1910	56	Silicon oxide -	-0.025	0.828	Si O2
01-077-0446	32	Titanium oxide -	-0.142	0.097	Ti O2
01-073-0517	23	Valleriite	0.151	0.055	(Mg.68 Al.32 (O ..
00-041-1480	22	Albite, calcian	-0.022	0.362	(Na , Ca) Al (S..
01-074-1758	18	Aluminium tetrahyd..	-0.004	0.315	Al2 Si2 O5 (O H)..
01-071-0441	8	Beryllonite zincia..	0.033	0.064	Na (Zn.8 Fe.2) P..
00-022-0687	21	Microcline, ordered	-0.035	0.271	K Al Si3 O8

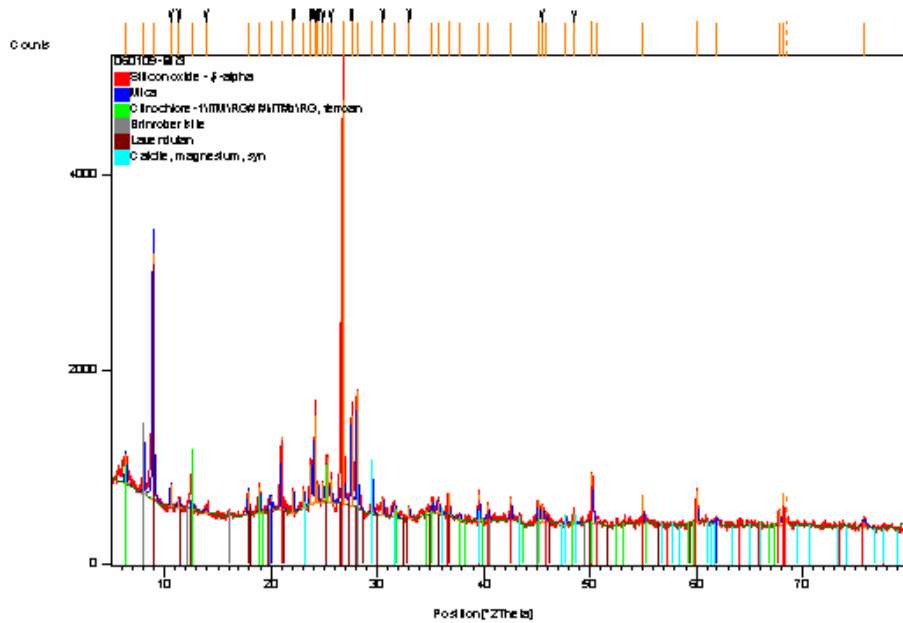


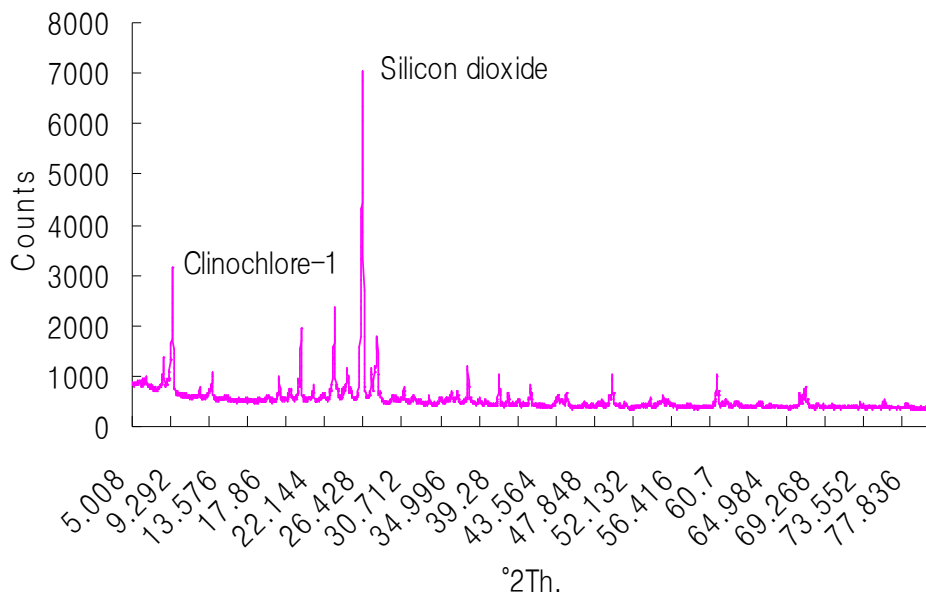
Figure 1-21. MJ (Chungcheong-Do)

Pattern List

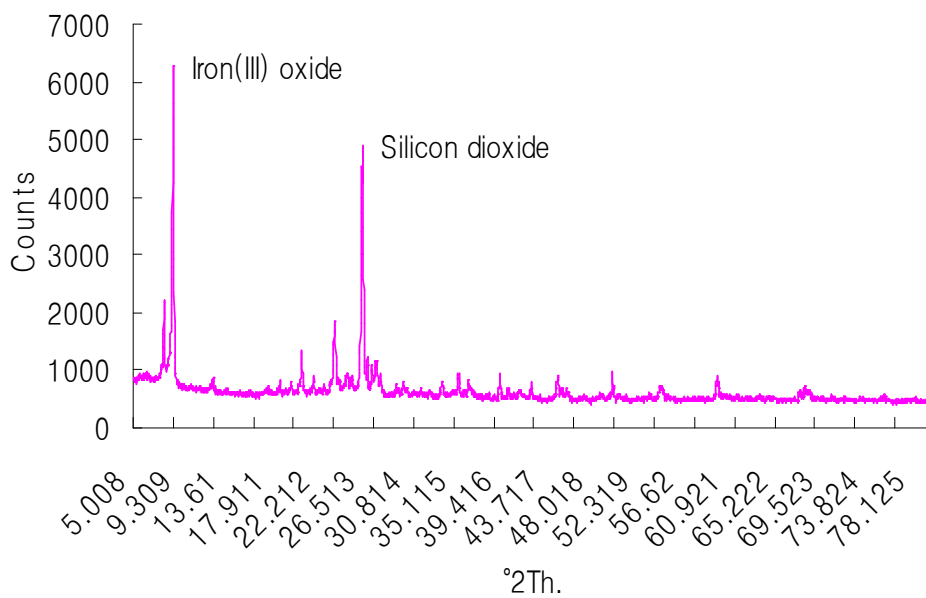
Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[2Th]	Scale Fac.	Chem. Formula
01-089-8935	64	Silicon oxide -	0.11	0.658	Si O ₂
00-002-0227	37	Mica	0.05	0.017	K - Mg - Fe - Al -..
00-029-0701	30	Clinoclone-1	0.107	0.12	(Mg , Fe) ₆ (Si ..
00-054-1146	23	Brinrobertsite	0.01	0.142	(Na , K , Ca) _{0.3} ..
00-051-1491	25	Lavendulan	-0.044	0.462	Na Ca Cu ₅ (As O ₄ ..
01-089-1305	15	Calcite, magnesium..	-0.032	0.108	(Mg _{0.06} Ca _{0.94}) ..

Appendix 2. X-ray diffractogram of aggregate by-product

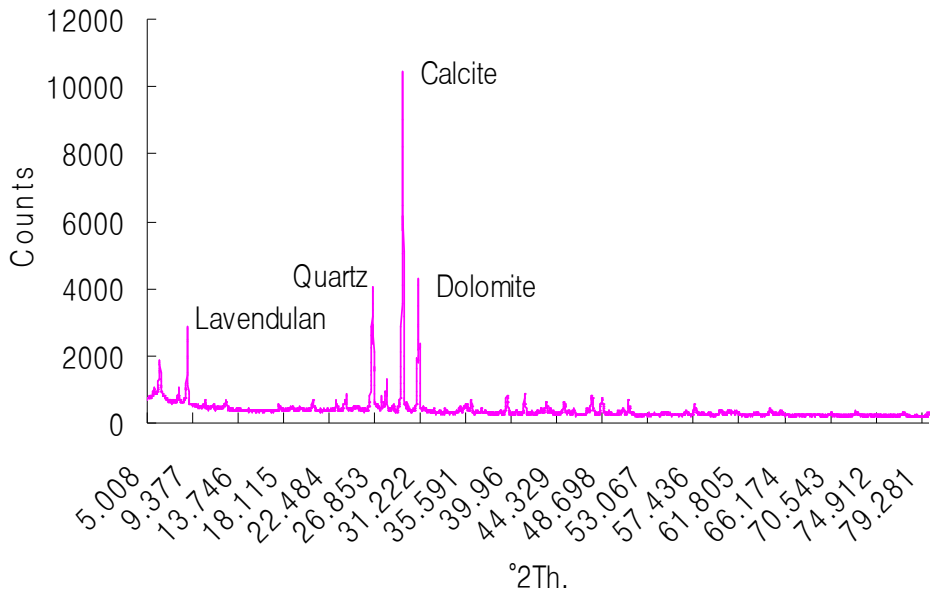
KG



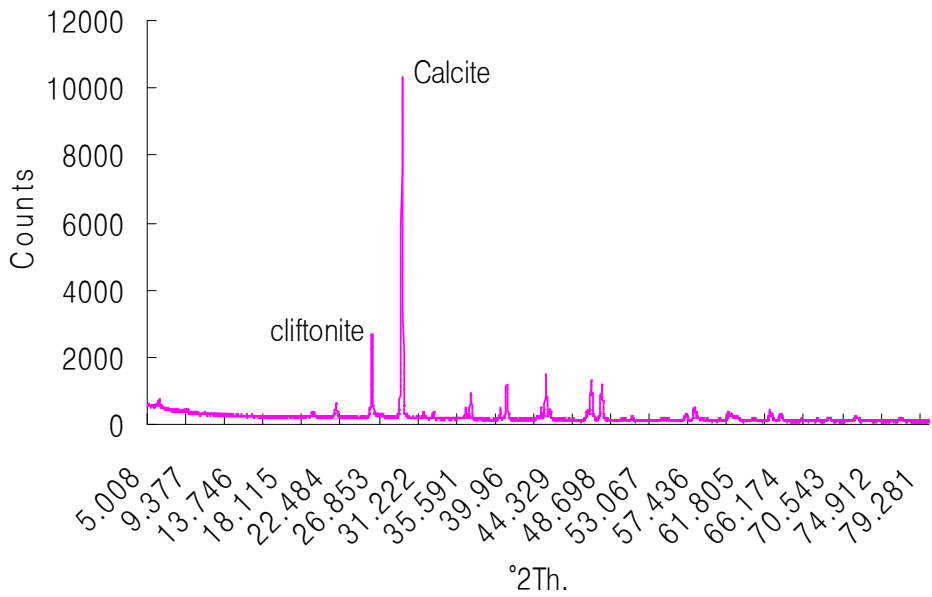
HC



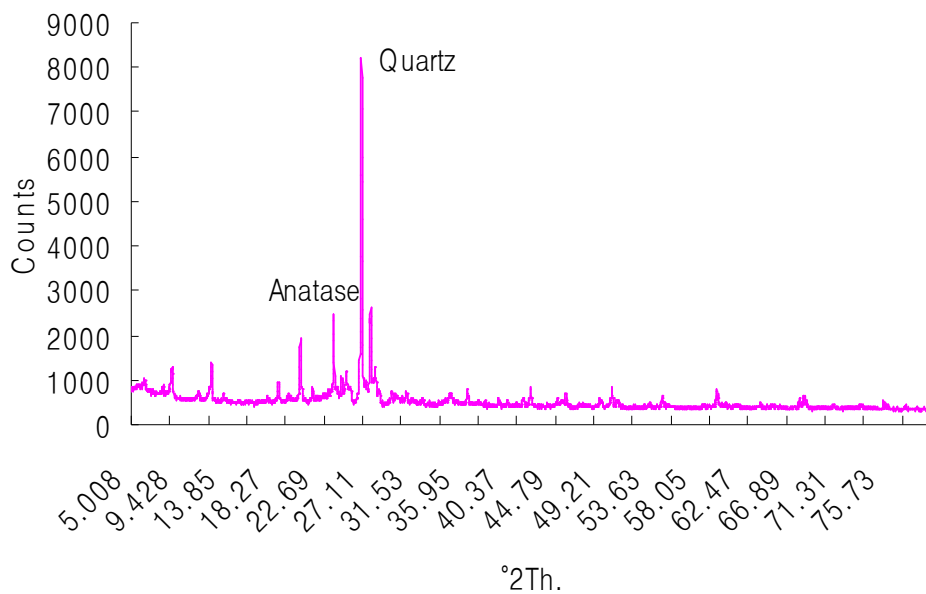
DM



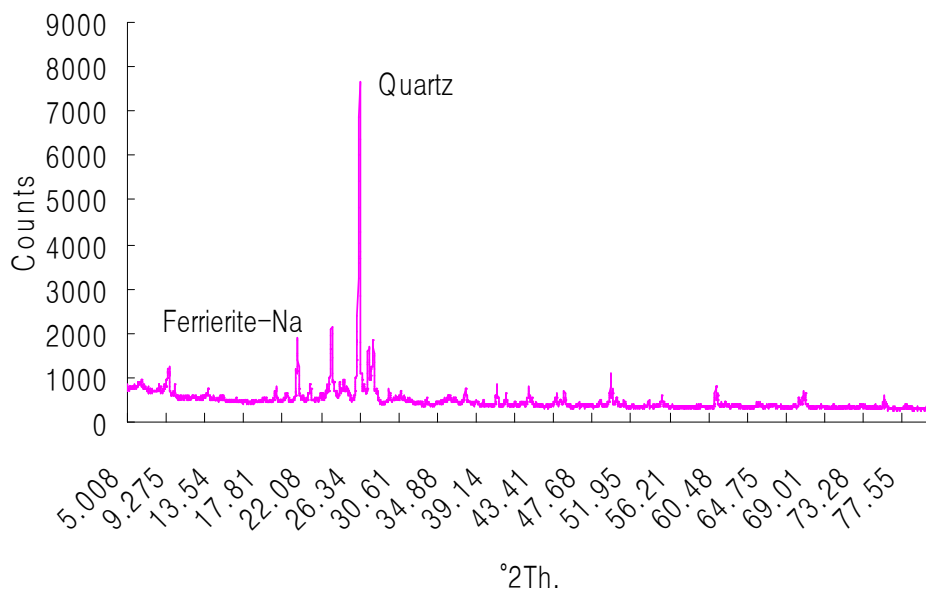
SS



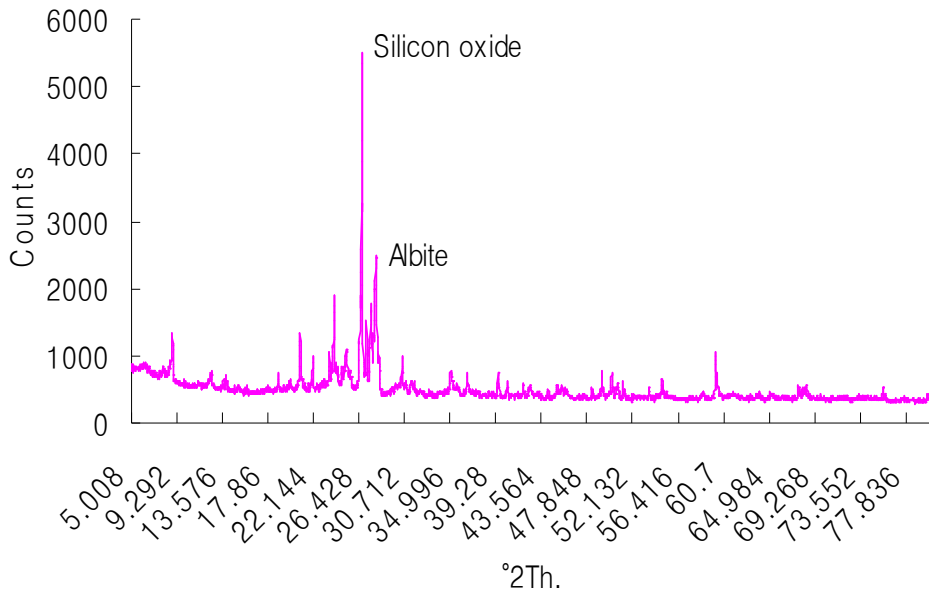
CC



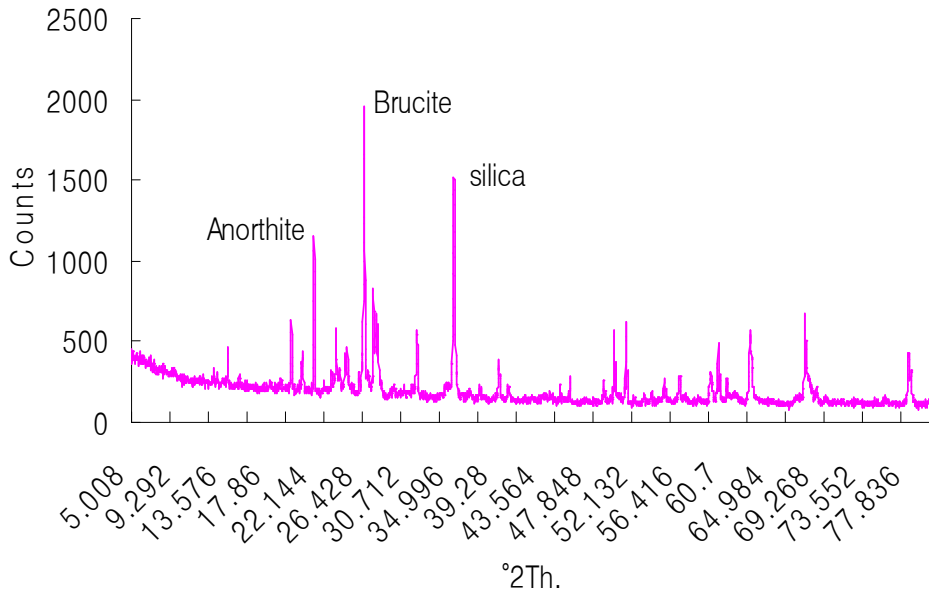
GG



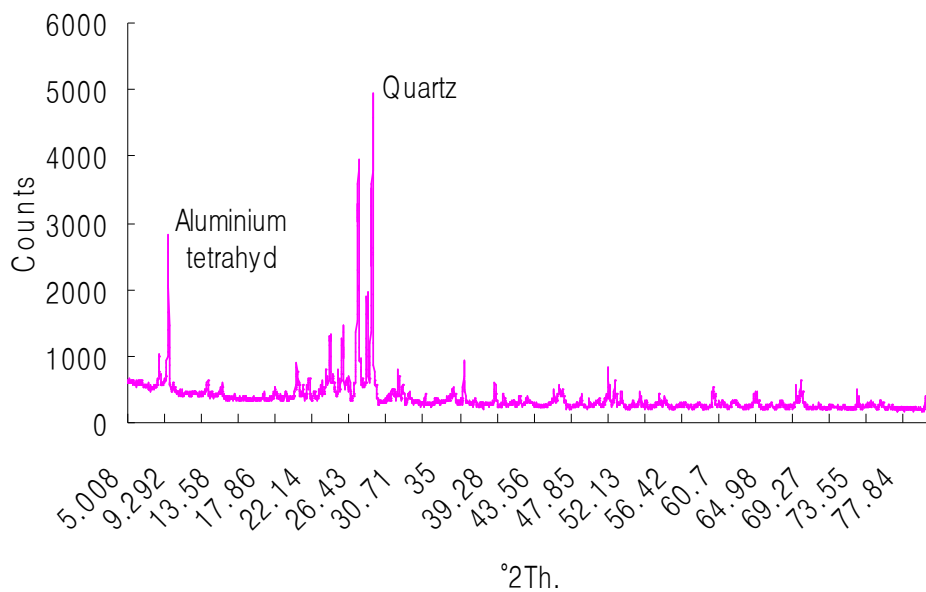
YS



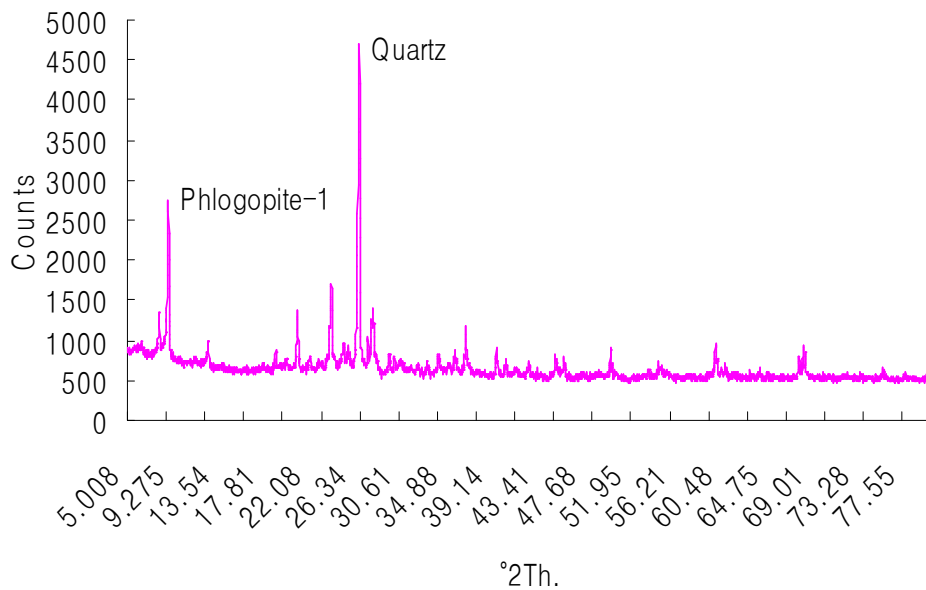
JS



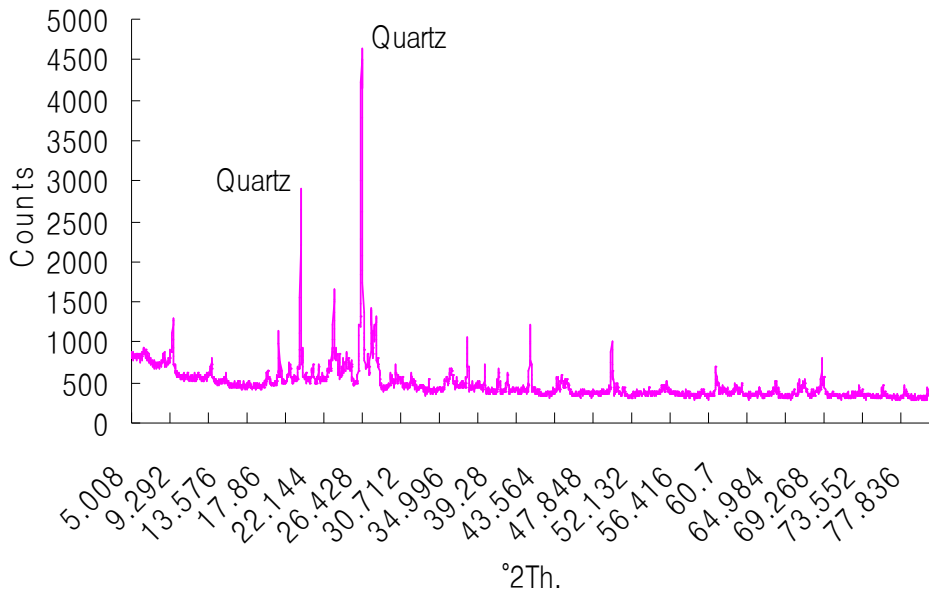
SI



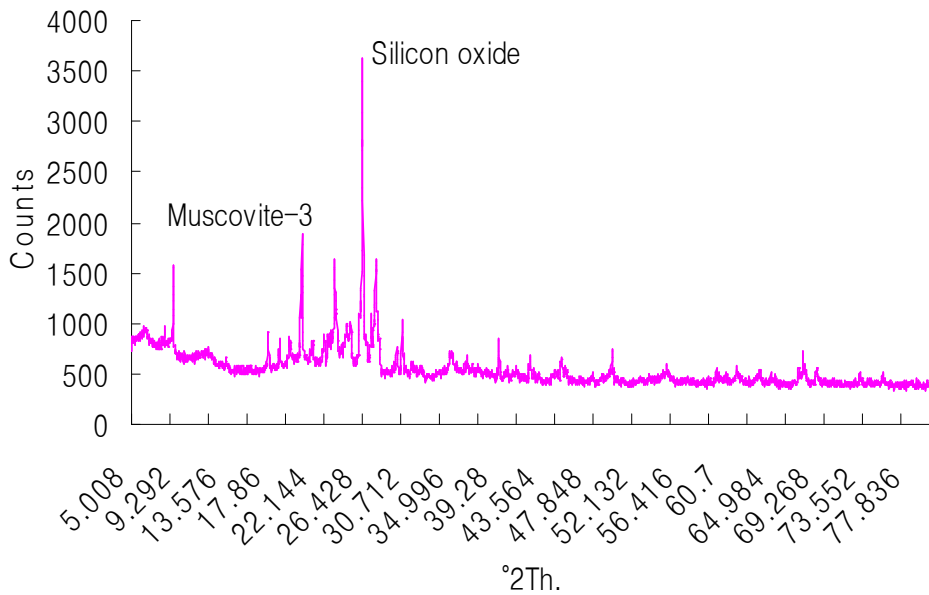
KS



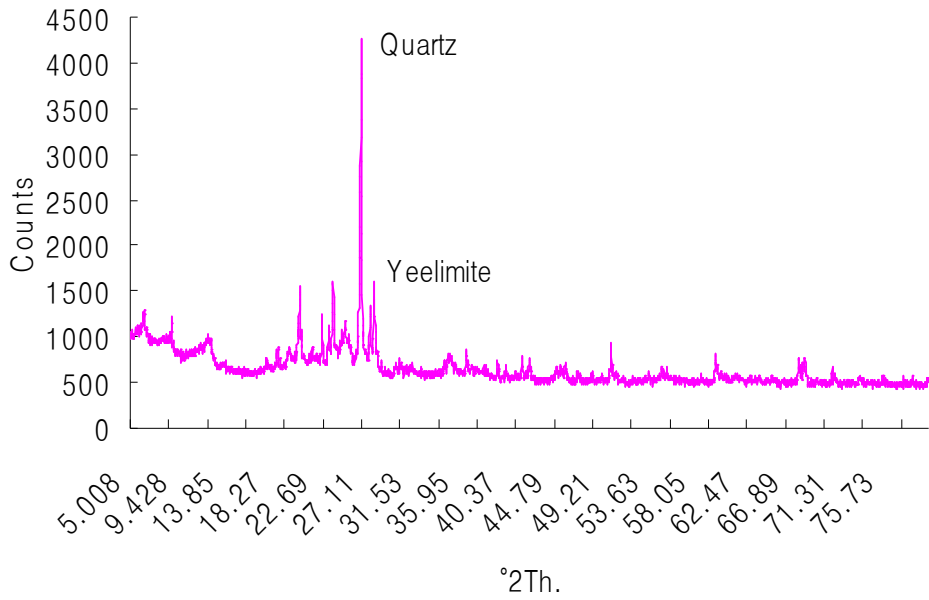
DC



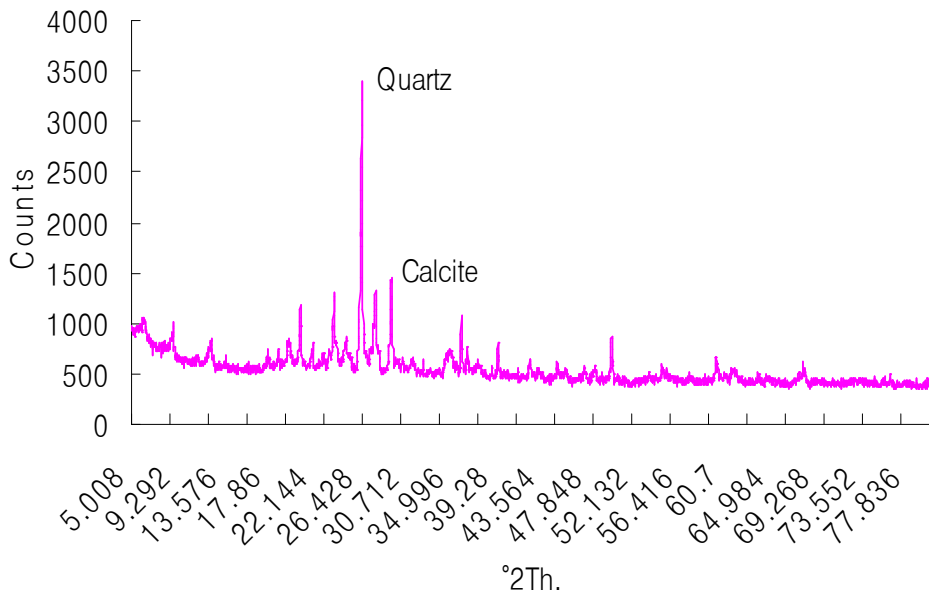
JH



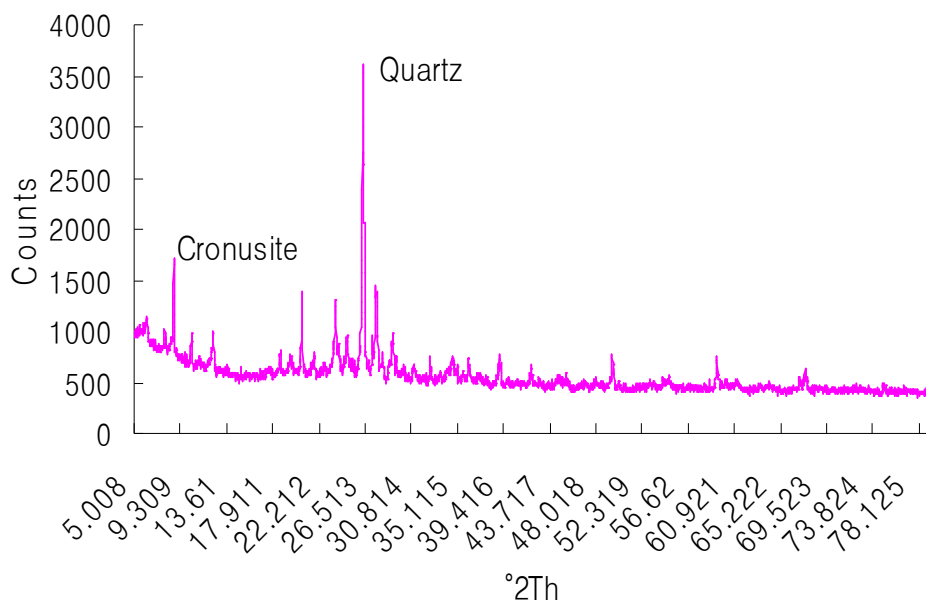
DA



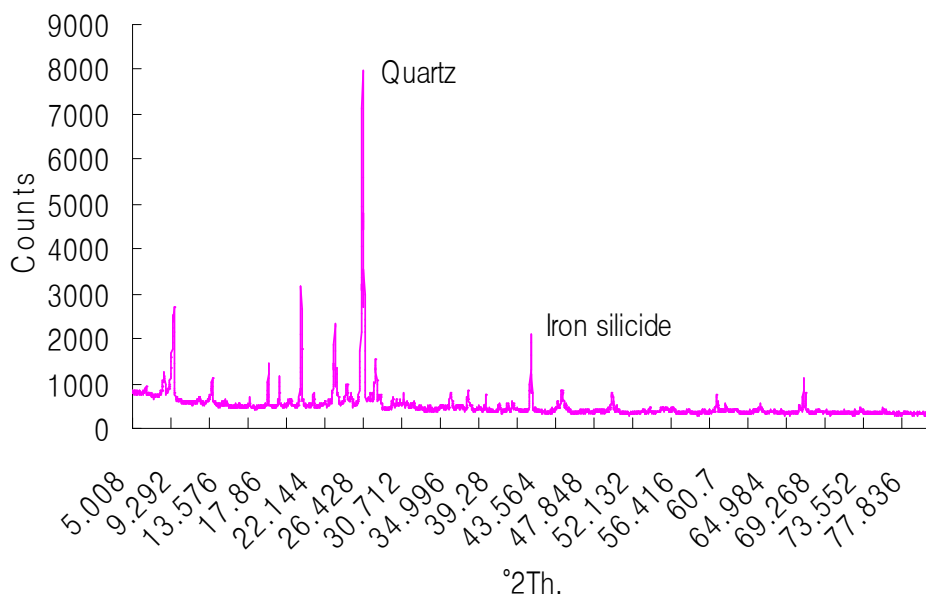
SU



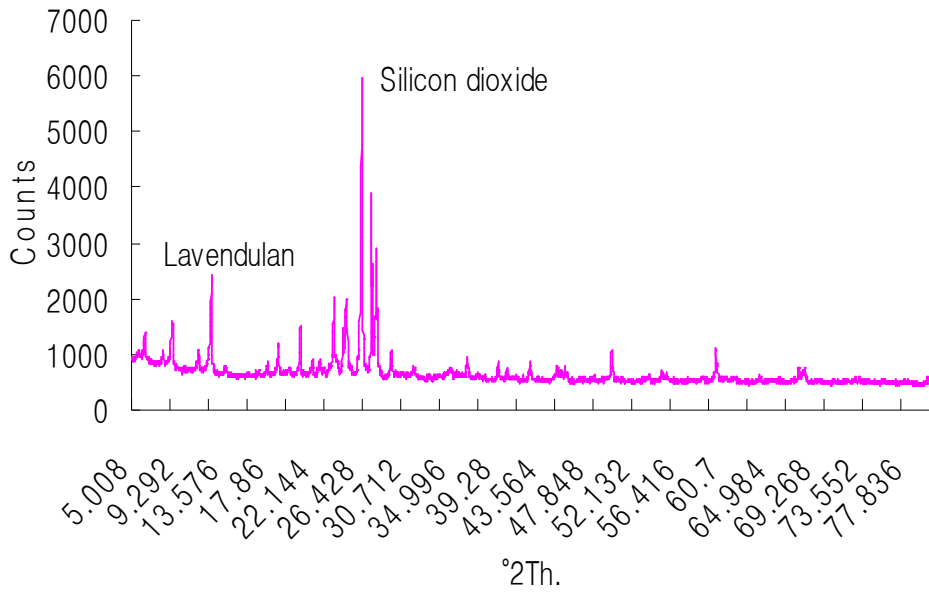
DE



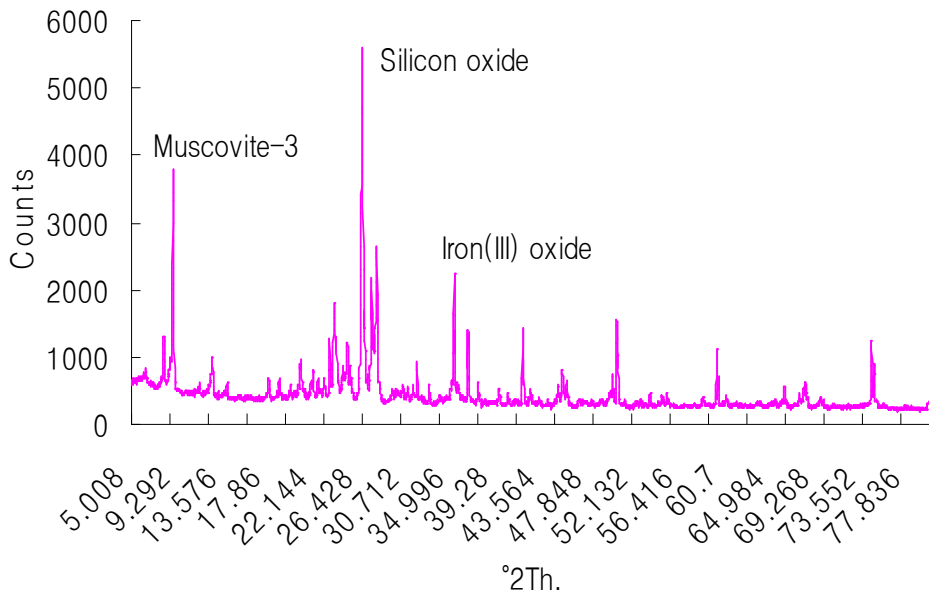
SB



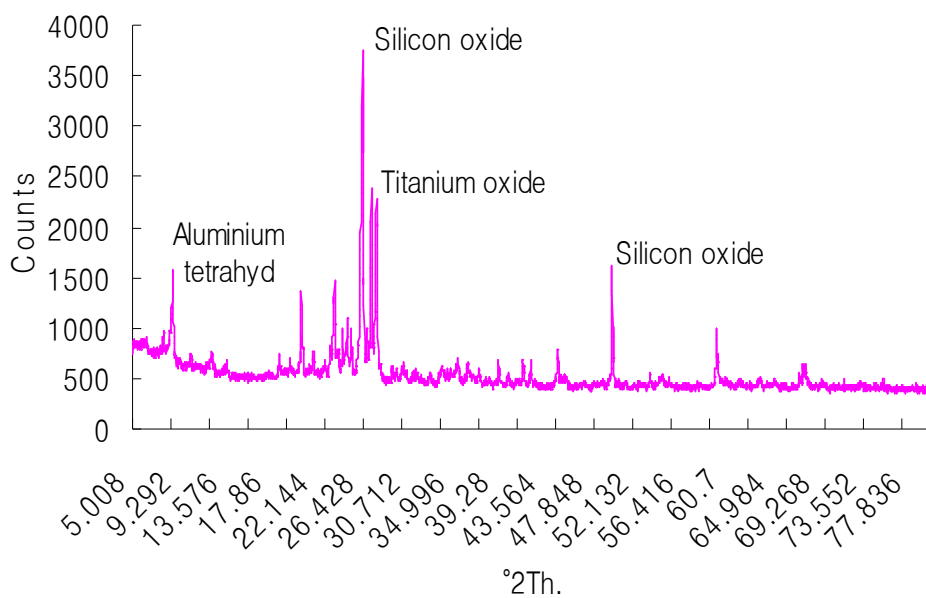
SY



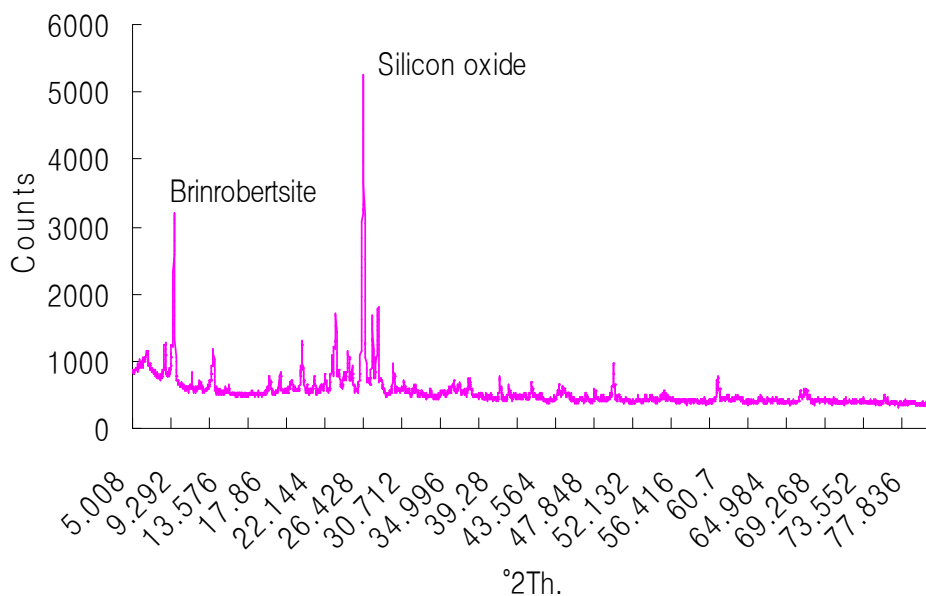
KW



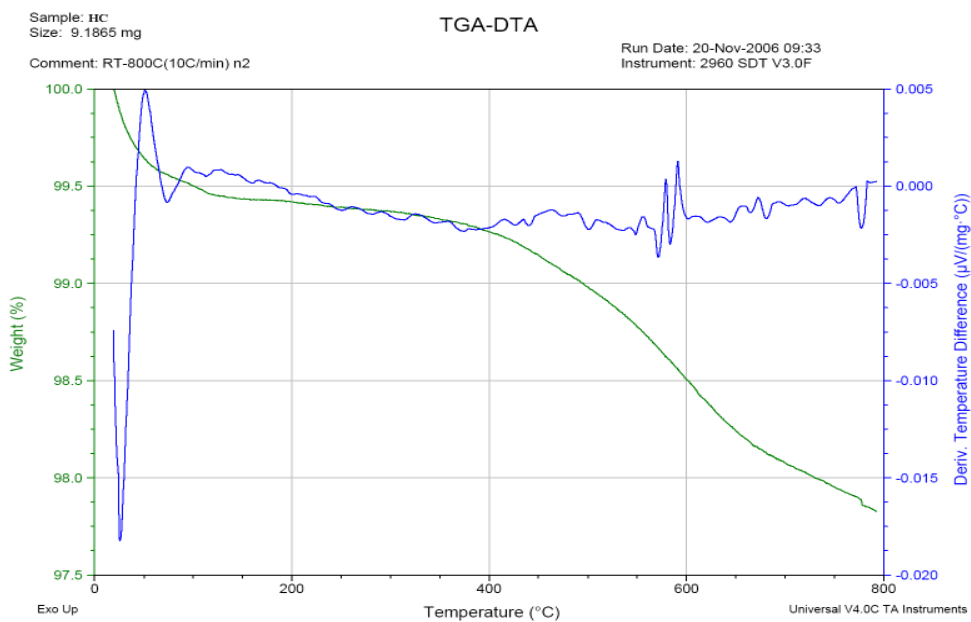
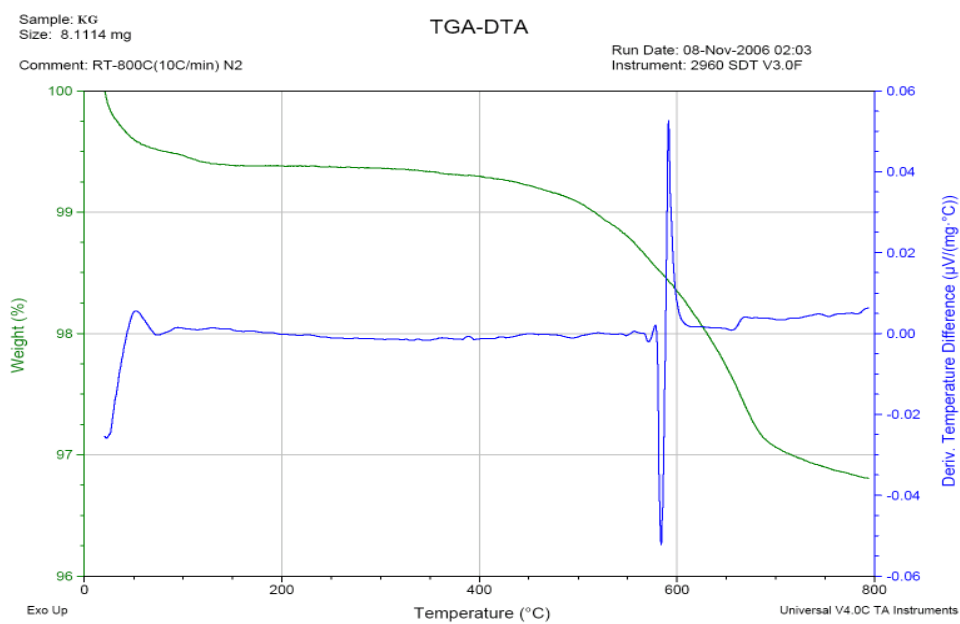
JK



MJ



Appendix 3. TGA-DTA thermogram of aggregate by-product

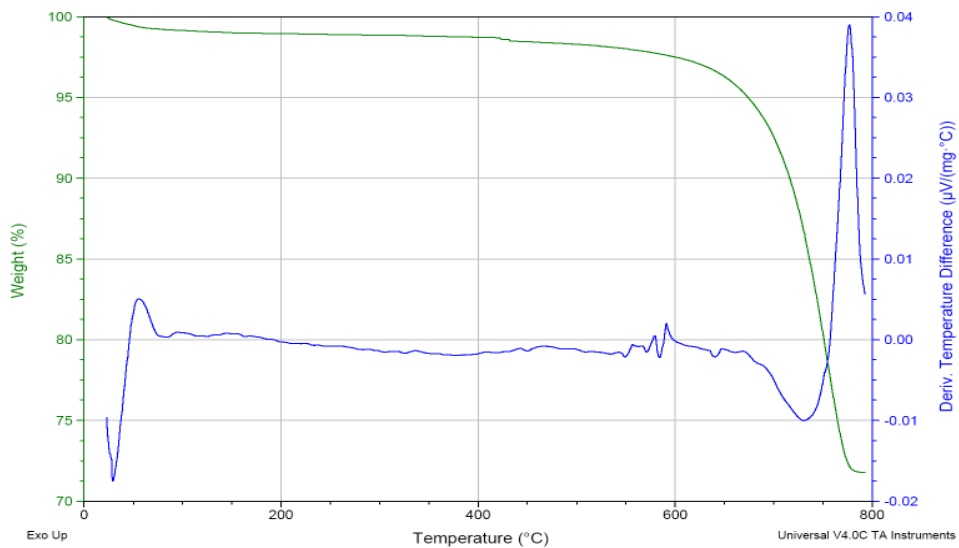


Sample: DM
Size: 10.4418 mg

TGA-DTA

Run Date: 22-Nov-2006 14:27
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

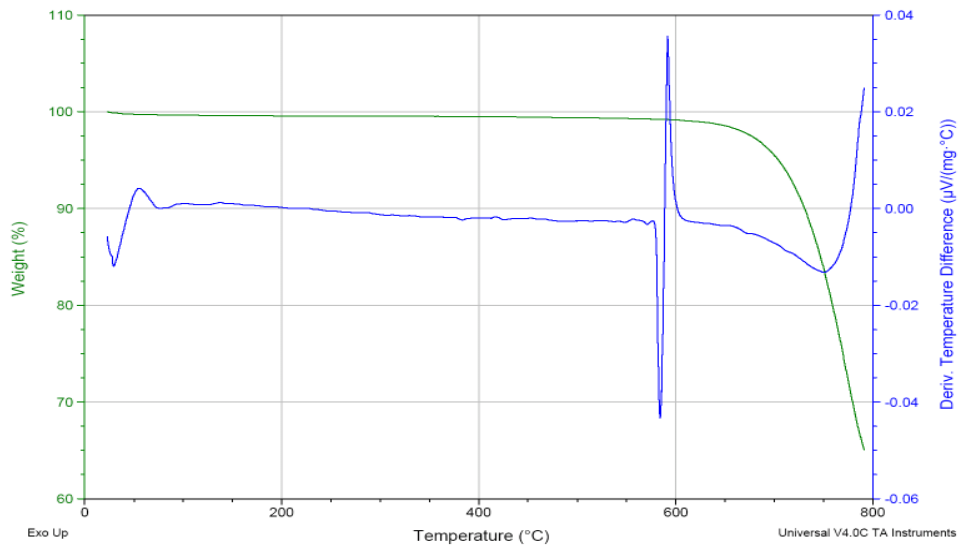


Sample: ss
Size: 14.1145 mg

TGA-DTA

Run Date: 11-Nov-2006 00:17
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

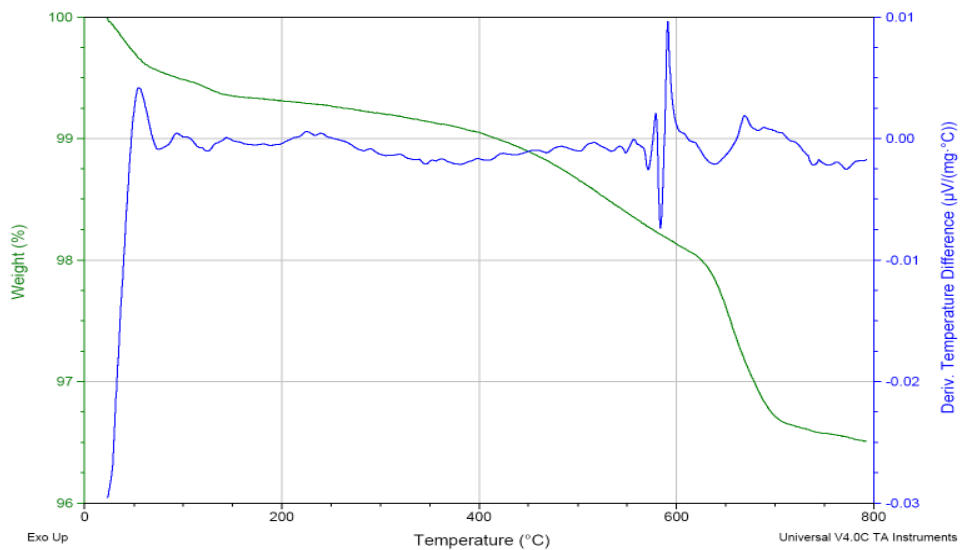


Sample: CC
Size: 9.6005 mg

TGA-DTA

Run Date: 13-Nov-2006 13:23
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

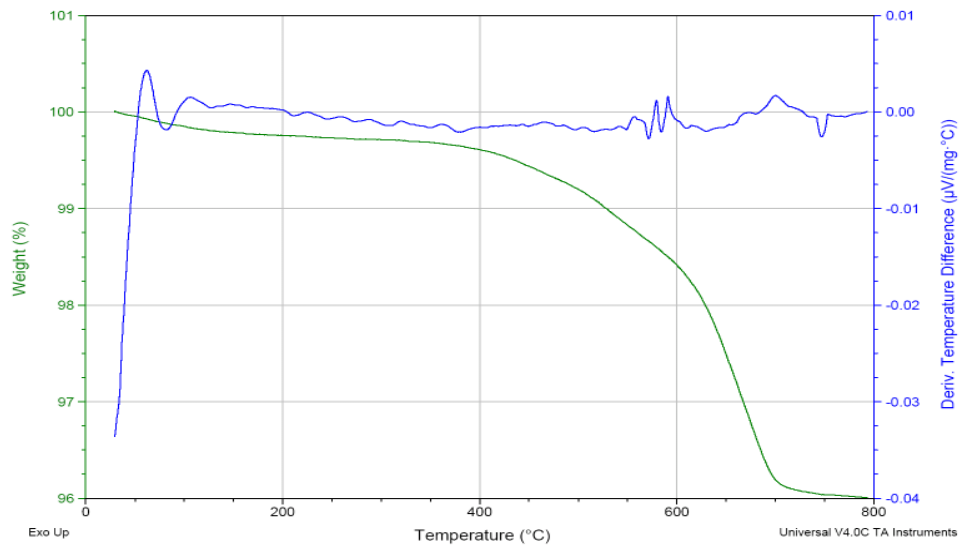


Sample: GG
Size: 10.0073 mg

TGA-DTA

Run Date: 21-Nov-2006 17:01
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

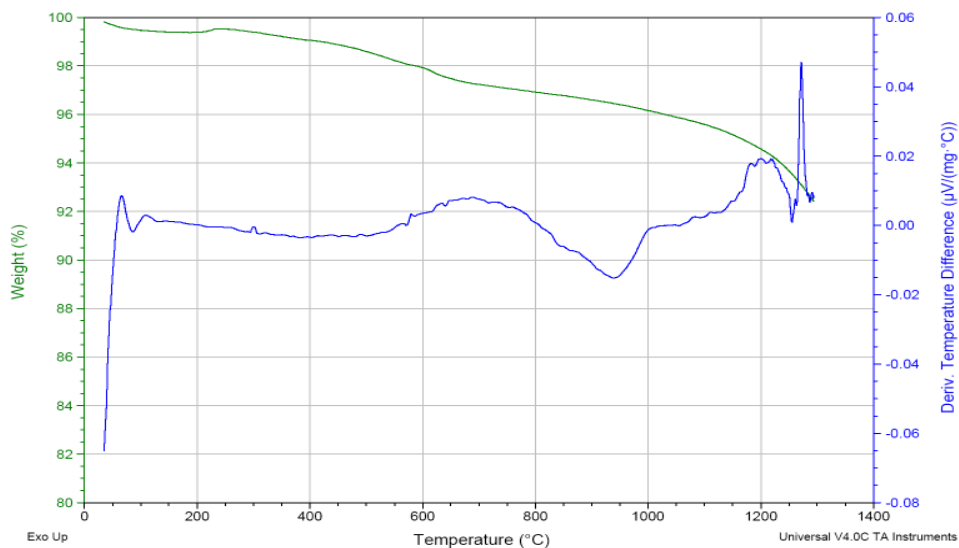


Sample: YS
Size: 6.8227 mg

TGA-DTA

Run Date: 10-Oct-2006 18:15
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-1300C(10C/min)

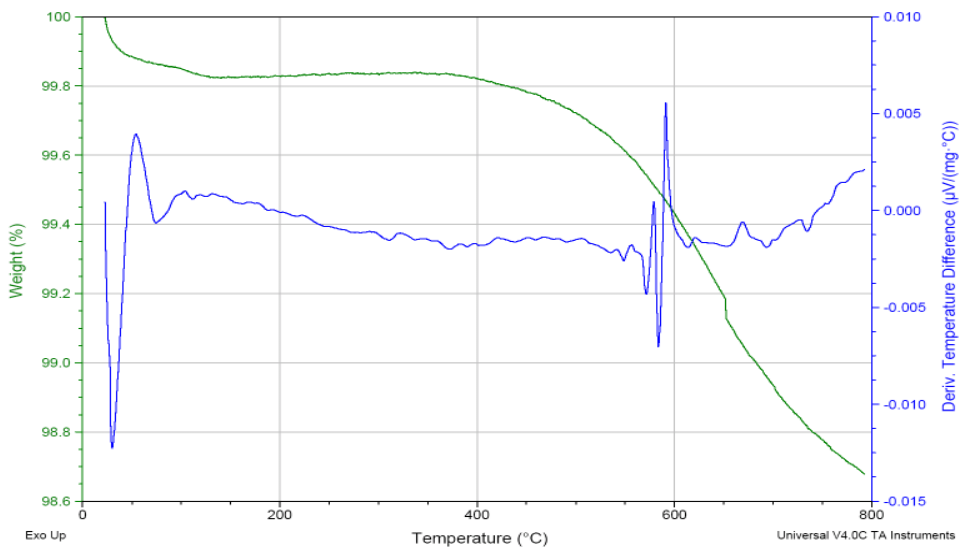


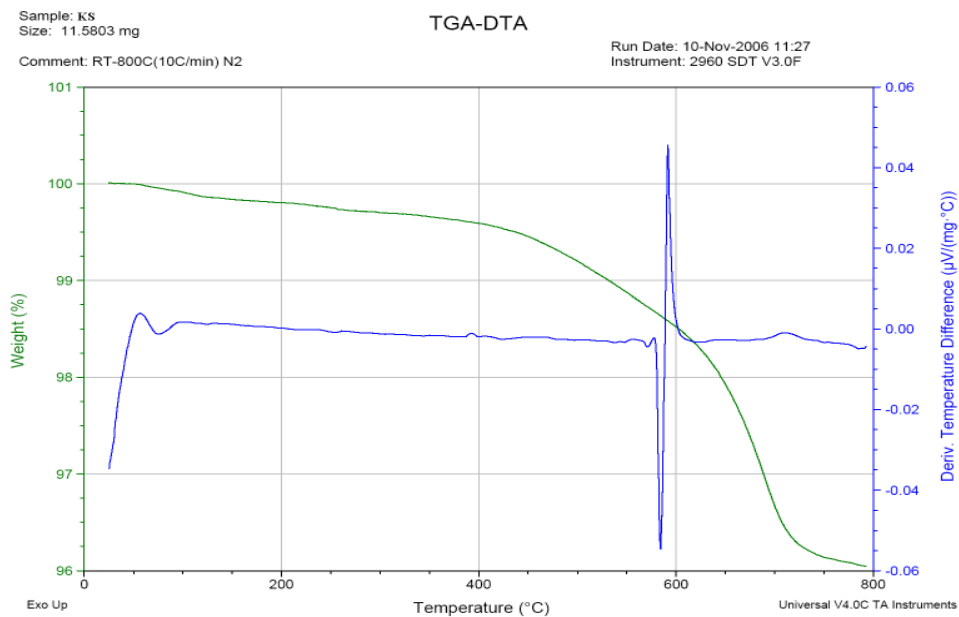
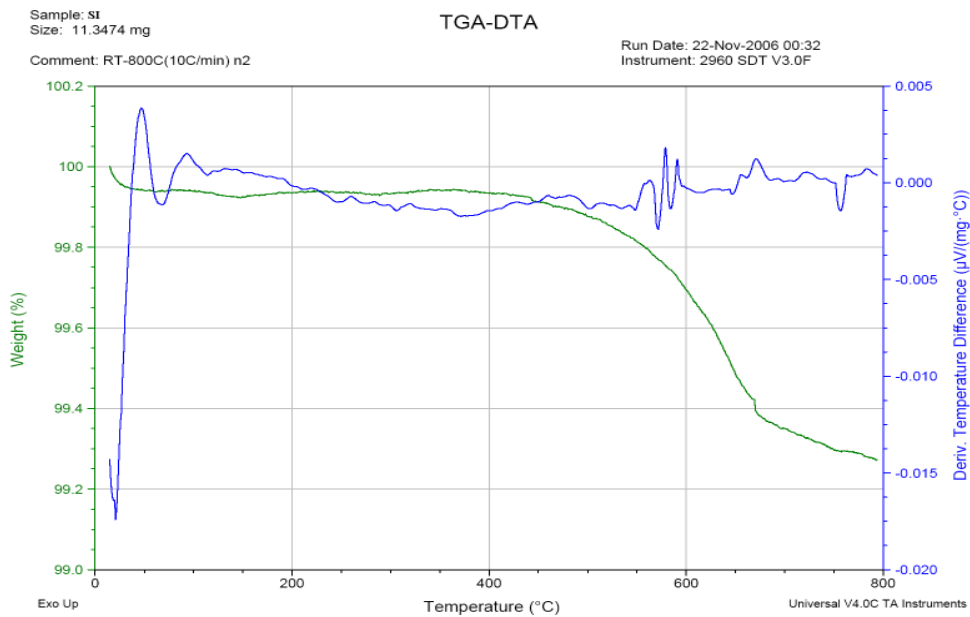
Sample: JS
Size: 11.0120 mg

TGA-DTA

Run Date: 14-Nov-2006 12:52
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2



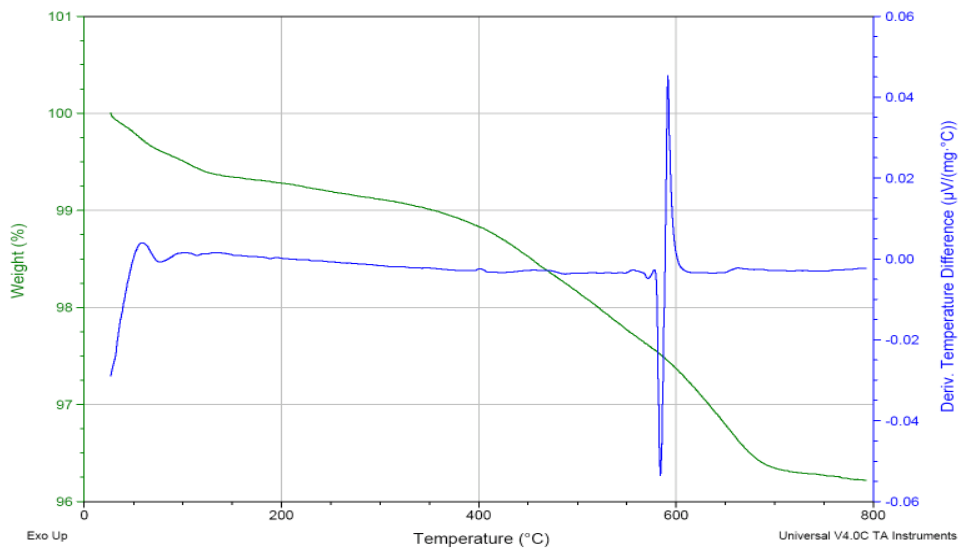


Sample: DC
Size: 10.9508 mg

TGA-DTA

Run Date: 11-Nov-2006 14:24
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

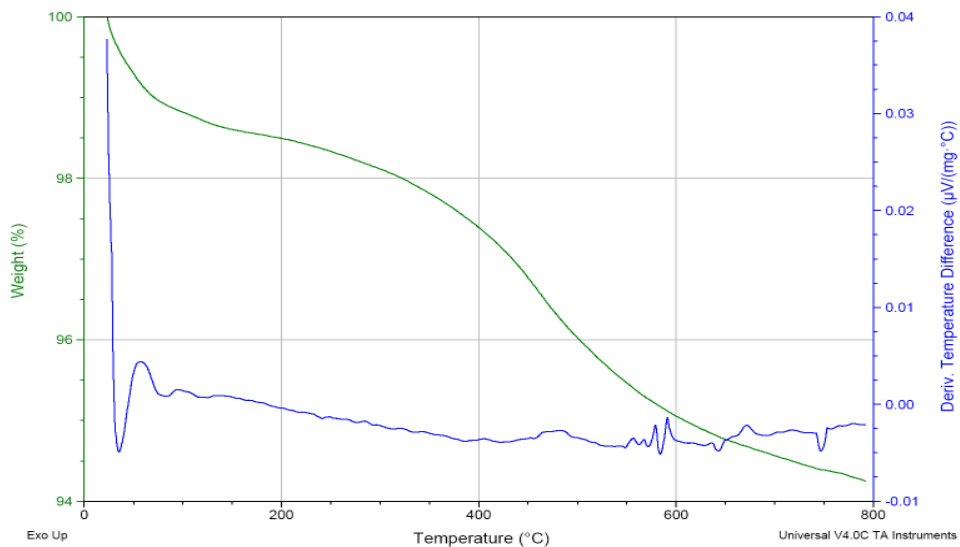


Sample: JH
Size: 9.3924 mg

TGA-DTA

Run Date: 22-Nov-2006 03:01
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

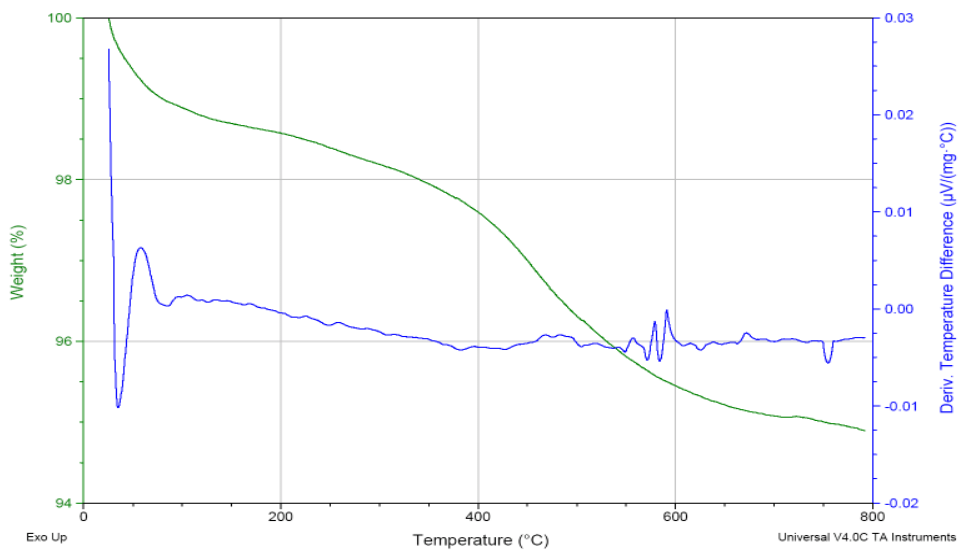


Sample: DA
Size: 7.7529 mg

TGA-DTA

Run Date: 20-Nov-2006 12:35
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

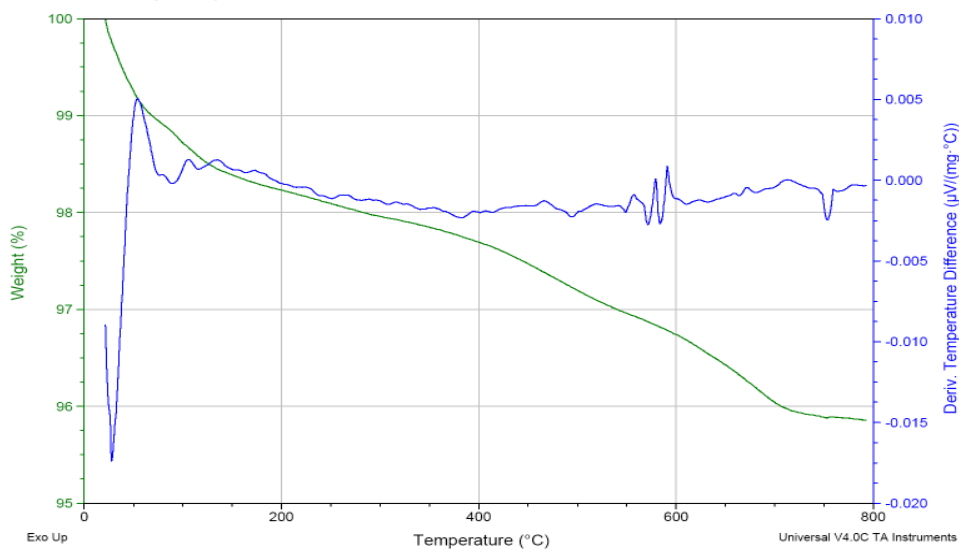


Sample: DH
Size: 10.2870 mg

TGA-DTA

Run Date: 21-Nov-2006 01:49
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

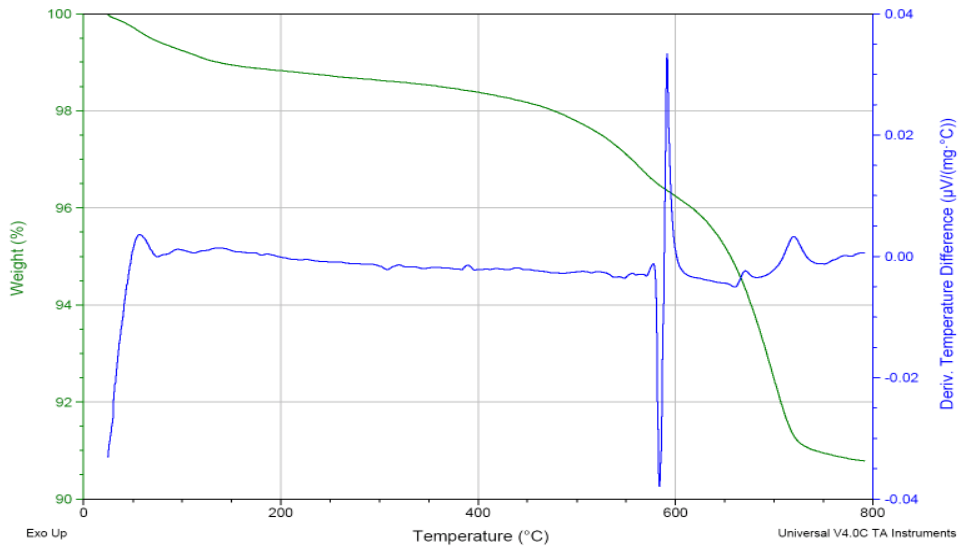


Sample: SU
Size: 11.0290 mg

TGA-DTA

Run Date: 08-Nov-2006 12:58
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

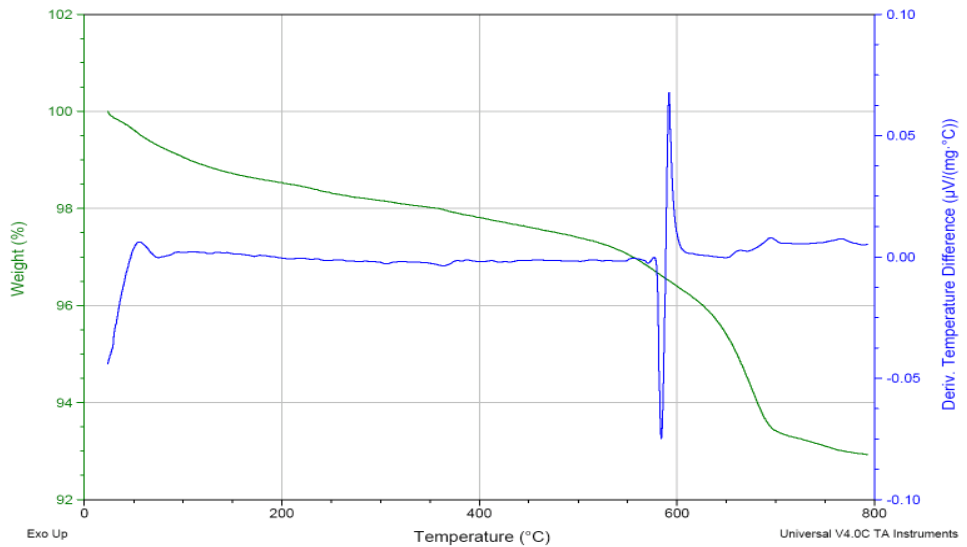


Sample: DE
Size: 6.5653 mg

TGA-DTA

Run Date: 07-Nov-2006 15:46
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) N2

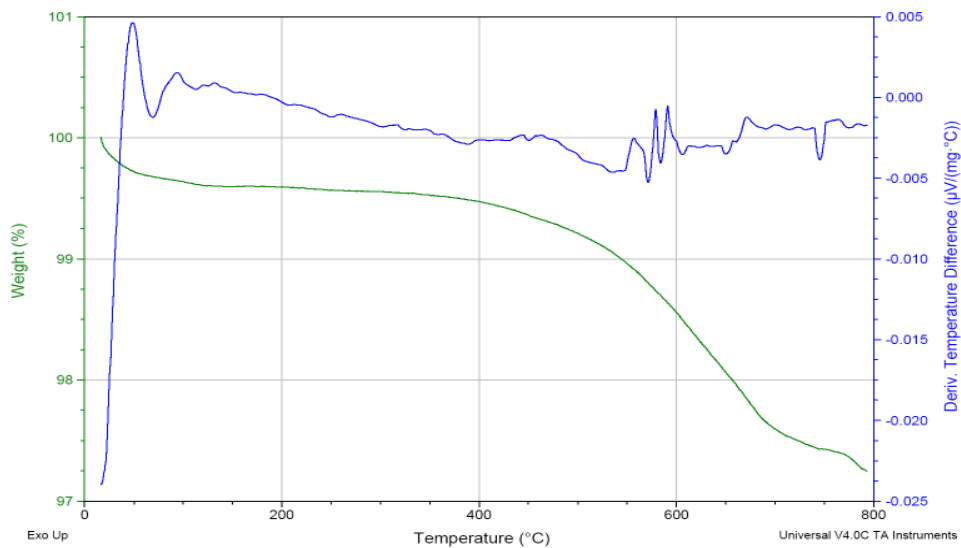


Sample: SB
Size: 10.4856 mg

TGA-DTA

Run Date: 21-Nov-2006 20:55
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

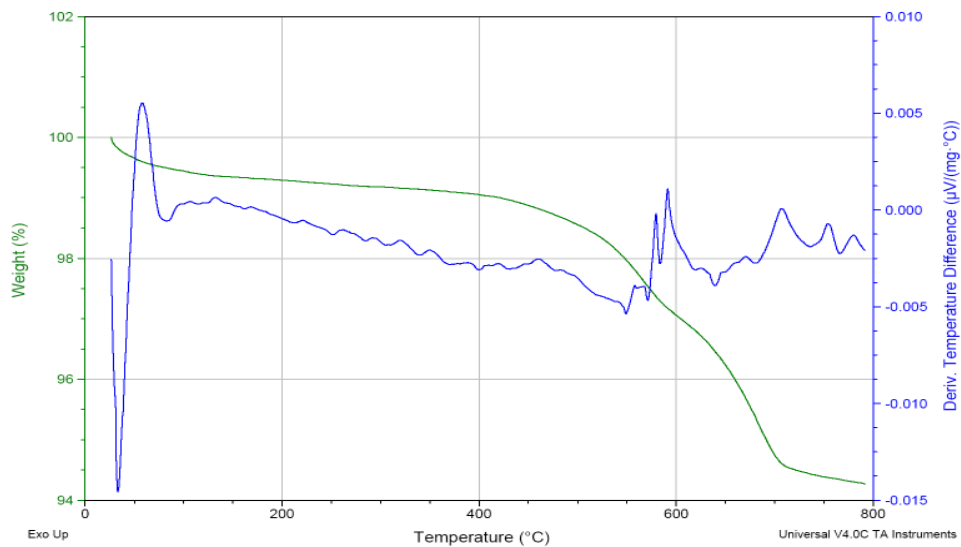


Sample: SY
Size: 10.3737 mg

TGA-DTA

Run Date: 23-Nov-2006 14:46
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

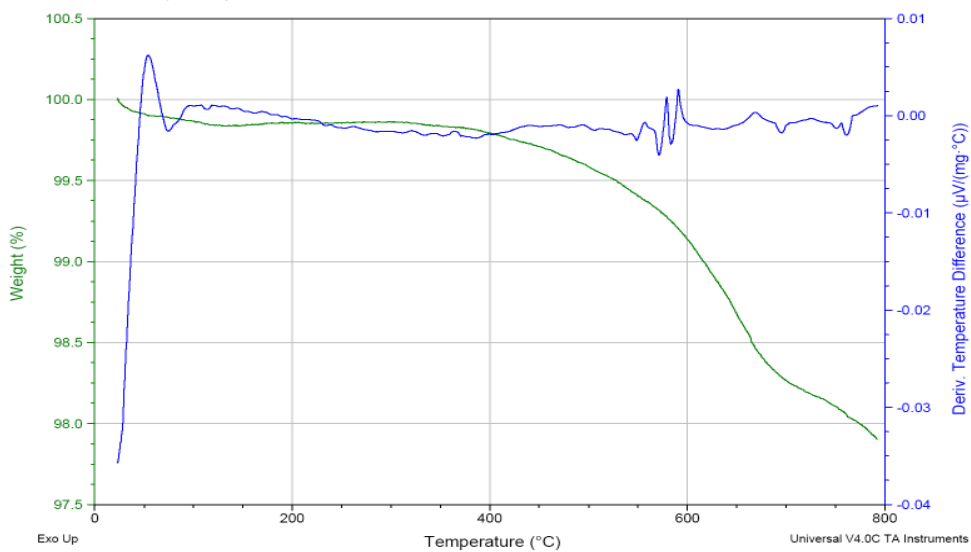


Sample: KW
Size: 7.0669 mg

TGA-DTA

Run Date: 15-Nov-2006 02:47
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

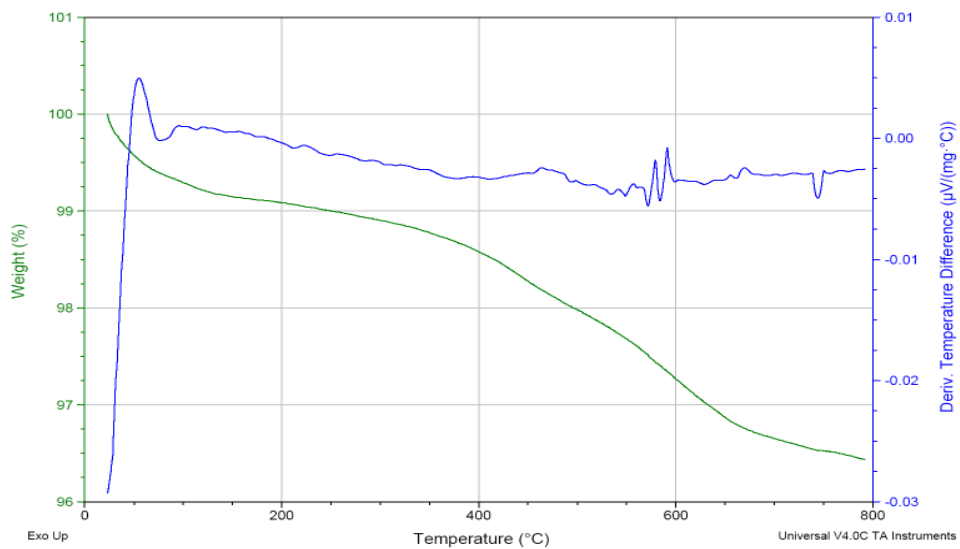


Sample: JK
Size: 8.8725 mg

TGA-DTA

Run Date: 21-Nov-2006 13:35
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2

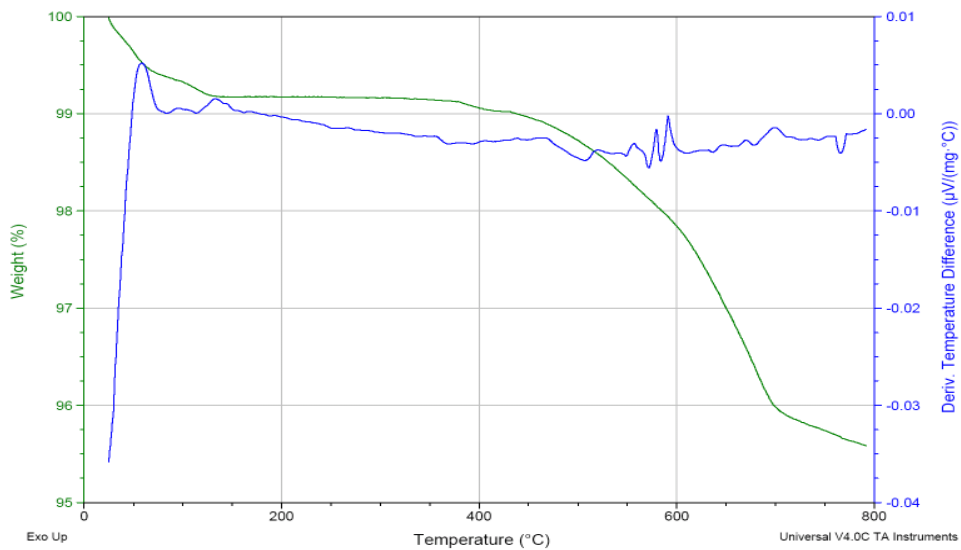


Sample: MJ
Size: 8.6594 mg

TGA-DTA

Run Date: 15-Nov-2006 11:01
Instrument: 2960 SDT V3.0F

Comment: RT-800C(10C/min) n2



- 본연구에서 언급된 식물 사진 목록(The list of plant mentioned in this study).

자체 사진과 산림청 국가생물종지식정보시스템 식물도감 인용.

	가을강아지풀 <i>Setaria faberii</i> Herm.		강아지풀 <i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv. var. <i>viridis</i>
	개기장 <i>Panicum bisulcatum</i> Thunb.		개망초 <i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.
	구절초 <i>Dendranthema</i> <i>zawadskii</i> var. <i>latilobum</i> (Maxim.)		꽃마리 <i>Trigonotis</i> <i>peduncularis</i> (Trevir.) Benth. ex Hemsl.
	꽃향유 <i>Elsholtzia splendens</i> Nakai		끈끈이대나물 <i>Silene armeria</i> L.
	낭아초 <i>Indigofera</i> <i>pseudo-tinctoria</i> M.		닭의장풀 <i>Commelina communis</i> L.
	도꼬마리 <i>Xanthium strumarium</i> L.		등근잎나팔꽃 <i>Ipomoea purpurea</i> Roth

	<p>마타리 <i>Patrinia scabiosaefolia</i> Fisch. ex Trevir.</p>		<p>물봉선 <i>Impatiens textori</i> var. <i>textori</i></p>
	<p>미국자리공 <i>Phytolacca americana</i> L.</p>		<p>바랭이 <i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koel.</p>
	<p>방동사니 <i>Cyperus amuricus</i> Maxim.</p>		<p>방아풀 <i>Isodon japonicus</i> (Burm.) Hara</p>
	<p>버드나무 <i>Salix koreensis</i> Andersson</p>		<p>벌노랑이 <i>Lotus corniculatus</i> var. <i>japonica</i> Regel</p>
	<p>보리쟁이 <i>Youngia japonica</i> (L.) DC.</p>		<p>불나무 <i>Rhus chinensis</i></p>
	<p>비수리 <i>Lespedeza cuneata</i></p>		<p>사위질빵 <i>Clematis apiifolia</i> DC.</p>
	<p>산국 <i>Dendranthema</i> <i>boreale</i> (Makino) Ling ex Kitam</p>		<p>새콩 <i>Amphicarpaea</i> <i>bracteata</i> subsp. <i>edgeworthii</i> (Benth.) H. Ohashi</p>

	<p>소나무 <i>Pinus densiflora</i></p>		<p>소리쟁이 <i>Rumex crispus</i> L.</p>
	<p>쇠별꽃 <i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.</p>		<p>쇠비름 <i>Portulaca oleracea</i> L.</p>
	<p>수레국화 <i>Centaurea cyanus</i> L.</p>		<p>술패랭이 <i>Dianthus longicalyx</i> Miq.</p>
	<p>쭉 <i>Artemisia princeps</i> Pamp.</p>		<p>안고초 <i>Arundinella hirta</i></p>
	<p>애기똥풀 <i>Chelidonium majus</i> var. <i>asiaticum</i> (Hara) Ohwi</p>		<p>야생과꽃 <i>Callistephus chinensis</i></p>
	<p>억새 <i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>prupurascens</i> (Andersson) Rendle</p>		<p>영경귀 <i>Cirsium japonicum</i> var. <i>maackii</i> (Maxim.) Matsum.</p>
	<p>여뀌 <i>Persicaria hydropiper</i> (L.) Spach var. <i>hydropiper</i></p>		<p>오동나무 <i>Paulownia coreana</i> Uyeki</p>

	오차드그라스 <i>Dactylis glomerata</i>		왕고들빼기 <i>Lactuca indica</i> L.
	자귀나무 <i>Albizzia julibrissin</i> Durazz		자주개자리(알팔파) <i>Medicago savita</i> L.
	좀개잎나무 <i>Boehmeria spicata</i> (Thunb.) Thunb.		좀명아주 <i>Chenopodium</i> <i>ficifolium</i> Smith
	참싸리 <i>Lespedeza cyrtobotrya</i> Miq.		층꽃 <i>Caryopteris incana</i>
	켄터키블루그라스 <i>Poa prantensis</i> L.		큰금계국 <i>Coreopsis lanceolata</i> L.
	톨페스큐 <i>Festuca arundiancea</i> Schreb.		페레니얼라이그라스 <i>Lolium perenne</i> L.
	환삼덩굴 <i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.		황새냉이 <i>Cardamine flexuosa</i> With.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

3년간의 연구를 통해 골재부산물을 농업용, 조경용, 환경복원용 토양재료로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 체계적인 연구를 통해 과제 제안시 제시했던 농업용 용토재와 식생복원용 용토재 개발 목표를 달성했다.

연차별로 목표달성도 및 관련분야에의 기여도를 정리하면 다음과 같다.

1. 1차년도(2005년) 목표달성도

세부연구목표	평가의 착안점 및 기준
골재부산물 특성	골재 부산물 용토의 수집방법이 발생원별로 유의한가?
골재부산물의 용토재로서의 활용성 파악	골재 부산물 용토 및 기존 식생복원 기반재의 분석결과가 정량화 되었는가?
부산물 물성 개량	골재 부산물 용토의 개량 전후의 물성이 제대로 평가되었는가?
농업 용토재 개발	pot 재배 시험구가 제대로 구성되었는가?
식생복원 용토재 개발	pilot 시험구의 설치가 제대로 되었는가?
식물 생장에 미치는 영향	pot 재배 시험구와 pilot 시험구에 대한 모니터링이 제대로 진행되었는가?

1차년도 과제를 시작하면서 골재협회의 도움을 받아 전국 21개소의 골재업체를 방문하여 현황 및 시료를 수집하였다. 골재업체의 위치에 따라 암석과 처리방법이 달라 전국단위의 골재부산물의 특성을 조사할 수 있었고, 수집한 시료의 물리성과 화학성, 그리고 광물학적 조성을 분석하여 정량화하였다. 그 중 전체를 대표할 3곳의 골재부산물을 이용해 피트모스, 코코피트, 퇴비, 인산석고, 마사토를 이용해 개량 시험을 하였고 개량 전후의 물성 변화를 정량화하였다. 개량방법에 따른 식물생육반응을 보기 위해 상추와 국화를 대상으로 pot 시험을 수행하였으며, 경사지 적용을 위해 2x1m 크기의 모의경사시험구 5조를 설치하여 예비시험을 하였다.

2. 2차연도(2006년) 목표달성도

세부연구목표	평가의 착안점 및 기준
식물 생장에 미치는 영향	pot 재배 시험구와 pilot 시험구에 대한 모니터링이 제대로 진행되었는가?
농업 용토재 개발	하우스 재배 시험지의 선정이 적절하였는가?
농업 용토재 개발	생육조사 항목을 올바르게 선정하고 적기에 조사하였는가?
식생복원 용토재 개발	현장적용 시험 부지에 대한 환경 분석이 제시되었는가?
식생복원 용토재 개발	현장적용 시공 과정에 대한 상세한 시공보고서가 작성되었는가?
식생복원 용토재 개발	시공지에 대한 정기적인 관찰일지가 제시되었는가?

pot 재배 시험구와 모의경사시험구(pilot 시험구)에 대한 작물 생육상태와 식생 변화상태를 모니터링하여 보고하였으며, 경북 성주의 참외하우스를 대상으로 토양과 참외 품질 분석을 통해 골재부산물의 하우스 토양 객토재로의 활용성을 조사하였다. 또한 노지 배추밭의 개량된 골재부산물의 처리효과와 적정처리량에 대해 보고하였다. 전라북도 순창의 도로공사현장을 식생복원용 용토재에 대한 현장 시험시공을 실시하였고 이에 대한 시공보고서를 작성하였다. 시공 후 식생변화에 대한 모니터링을 실시하여 보고하였다.

3. 3차연도(2007년) 목표달성도

세부연구목표	평가의 착안점 및 기준
농업 용토재 개발	하우스 연용 효과가 정량적으로 평가되었는가?
농업 용토재 개발	생육조사 항목을 올바르게 선정하고 적기에 조사하였는가?
식생복원 용토재 개발	시공지에 대한 정기적인 관찰일지가 제시되었는가?
식생복원 용토재 개발	pilot 시험구와 현장시험 결과가 체계적으로 비교 분석되었는가?
식생복원 용토재 개발	현장적용 결과 드러난 문제점이 있다면 그에 대한 해결방안이 구체적으로 제시되었는가?

경북 성주의 참외하우스의 골재부산물 당해연도 처리구와 4년차 처리구의 토양과 수확 참외의 품질을 일반 시중 참외와 비교하였다. 골재부산물을 마사와 퇴비로만 개량한 골재부산물 용토재에 상추와 국화를 재배하여 조사하였다. 시공지에 대한 식생조사를 실시하여 처리에 따른 차이를 분석하여 보고하였으며, 경기도 남양주에 2차 시험시공지를 조성하였다. 시험시공을 준비하고 수행하는 과정에서 발생한 문제점을 파악하여 현장에서 해결하거나 근본적인 해결방안을 제시하였다.

4. 관련분야에의 기여도

과제수행과정에서 1건의 논문게재와 5건의 국내학술발표, 2건의 해외학술발표를 하여 관련 학술분야에 기여하였으며, 2006년 출원된 특허가 2007년 등록됨으로써 관련분야 사업화에 크게 기여하였다.

● 산업재산권-2007년 특허등록(국내)

등록인	기술명	등록일	등록번호
정영상, 김동욱, 심규섭, 양수찬	무기성 폐기물을 주재료로 하는 토양개량제, 식생기반재 및 이를 이용하는 토양개량방법 및 녹화방법	20071008	10-0767054

● 국내외 전문 학술지게제

- 1) 양수찬, 정영상, 김동욱, 심규섭. 골재부산물의 용토재 활용을 위한 특성분석. 한국토양비료학지. 40(5): 418-428.

● 국내외 학술회의 발표

- 1) 정영상, 양수찬, 김학민, 김동욱. 2006. 골재부산물의 농업적 이용을 위한 특성 분석. 한국토양비료학회 2006년 춘계학술발표회 논문 초록집. 39(별

호 1): 198-199.

- 2) 김동욱, 양수찬, 김학민, 김계훈, 정영상. 2006. 골재부산물을 이용한 척바지 식생복원 용토재 개발. 한국토양비료학회 2006년 추계학술발표회 논문초록집. 39(별호2) :78-79.
- 3) 김동욱, 정승일, 양수찬, 김학민, 설유정, 김계훈, 정영상. 2007. 골재부산물을 이용한 녹화용 식생기반재 개발. 2007년 한국환경복원녹화기술학회 학술발표회 초록집. p.78-84.
- 4) 김동욱, 정승일, 양수찬, 김학민, 설유정, 김계훈, 정영상. 2007. 골재부산물 처리가 작물 생육에 미치는 영향. 2007년 한국환경복원녹화기술학회 학술발표회 초록집. p. 248.
- 5) 김동욱, 정승일, 양수찬, 김학민, 설유정, 김계훈, 정영상. 농업 용토재로 사용하기 위한 골재부산물 개량 연구. 제 69차 정기총회 및 2007년도 한국토양비료학회 춘계학술발표회 논문초록집. 40(별호1): 116.
- 6) Kim, D. W., S. I. Jung, H. M, Kim, H. S. Kim, Y. S. Seol, Y. S. Jung, G. H. Kim. 2007. Development of soil material for slope revegetation using aggregate byproducts. The 4th international conference on soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas. p.94.
- 7) Lee, G. C., Y. S. Jung, S. H. Park, D. W. Kim. 2007. Improvement of Physical and Chemical Properties of the Aggregate Byproducts to Reuse as Artificial Soil Material for Plantation. Eighth Conference of the East and Southeast Asian Federation of Soil Science. p. 208.

● 학위 논문

- 1) 김동욱. 2008. 골재부산물을 재활용한 비탈면 녹화용 토양재 개발. 서울시립대 환경원예학과 박사학위논문. 120p.
- 2) 양수찬. 2007. 골재 부산물의 용토재 활용을 위한 특성 분석. 석사논문. 강원대학교 농화학과 석사학위논문.

제5장 연구개발결과의 활용계획

연구과정 중에 골재부산물을 이용한 비탈면 녹화토양재의 제조와 이를 통한 비탈면녹화공법을 포괄하는 “무기성 폐기물을 주재료로 하는 토양개량재, 식생기반재 및 이를 이용하는 토양개량방법 및 녹화공법”을 특허 출원하여 등록 결정(등록번호 10-0767054-0000, 2007년 10월 8일) 받았으며, 2차례의 시험시공을 통해 현장 검증을 수행하여 사업화의 기초를 놓았으며, 향후 관련업체와 기관과의 협조를 통해 본격적인 사업화를 추진할 계획이다. 한편 활발한 학술활동을 통해 KSCI인 한국토양비료학회지에 1편의 논문이 게재되었으며, 4건의 국내학술발표 및 2건의 국제학술발표(ESAFS, 일본; SUITMA, 중국)를 하였다. 그리고 SCI인 Environmental Science and Health Part A에 논문이 투고되어 심사결과를 기다리고 있다. 과제기간동안 과제와 관련한 연구로 1명의 석사(2006)과 1명의 박사(2008)인력이 양성되었으며, 2008년 하반기에 1명의 석사가 배출될 것으로 예정이다.

본 과제의 연구결과를 바탕으로 골재부산물에 퇴비 등의 유기질 자재와 마사토 등의 무기질 자재를 5대50으로 혼합하게 되면 pot 상토, 하우스 객토재, 노지 객토재로 사용할 수 있고, 비탈면 녹화용 토양재의 제조 및 이를 이용한 녹화공법에 적용할 수 있다. 이에 따라 객토재를 확보하기 위한 환경 훼손을 줄여줄 수 있으며, 복원사업을 통해 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

현재의 결과는 개량을 통해 골재부산물을 농업용 용토재와 비탈면 녹화용 토양재로 적용할 수 있으며, 이렇게 사용된 골재부산물이 기존의 재료에 비해 뒤쳐지지 않는 효과를 볼 수 있다는 것이다. 하지만 골재부산물 용토재의 효과를 더욱 증폭시켜 재활용을 활성화하기 위해서는 시비처방에 대한 면밀한 후속 연구가 필요하며, 경제적인 재료 생산을 위해 골재생산업체 특히 각 지방의 골재협회와의 긴밀한 협조 하에 골재부산물을 개량하여 제품화할 수 있는 생산 기지가 마련되어야 한다. 또한 지방 농업기술센터는 지역의 주요 작물에 대한 골재부산물 처리 및 사용 방법에 대한 구체적인 연구 활동을 통해 농가에 효율적으로 보급될 수 있도록 지원해야 할 것이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음.

제7장 참고문헌

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1985. Standard test method for classification of soils for engineering purposes. D-2487-83. 1986 Annual Book of ASTM standards 04.08: 395-408. Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia.

Brady, N.C. 1990. The Nature and Properties of Soils. Macmillan. 431-445.

Cornforth, D.H. 2005. Landslides in Practice. John Wiley & Sons, Inc. 295-314.

Duncan, J.M., and S.G. Wright. 2005. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons. 261.

Fedo, C.M., H.W. Nesbitt, and G.M. Young. 1995. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23:921-924.

Gray, D.H., Sotir, R.B., 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. John Wiley & Sons.

Guggenheim, S., and R.T. Martin. 1995. Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA and CMS nomenclature committees. *Clay Minerals* 30:257-259.

Hamois, L. 1998. The CIW index - A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* 55:319-322.

Jenny, H. 1941. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York. 288.

Kuht, J., and E. Reintam. 2004. Soil compaction effect on soil physical properties and the content of nutrients in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy Research* 2(2):187–194.

Mackenzie, R.C. 1957. *The Differential Thermal Investigation of Clays*. Mineralogical Society. London. 456.

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

Parker, A. 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine* 107: 501–504.

Petijohn, F.J. 1975. *Sedimentary rocks* 3rd ed. Harper and Row, New York.

Price, J.R., and M.A. Velbel. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology* 202:397–416.

Ruxton, B.P. 1968. Measures of degree of chemical weathering of rocks. *J. Geol.* 76:518–527.

Smykatz–Kloss, W. 1974. *Differential thermal analysis; Application and results in mineralogy*. Springer–Verlag, Berlin Heidelberg New York. 185.

Souri, B., M. Watanabe, and K. Sakagami. 2006. Contribution of Parker and Product indexes to evaluate weathering condition of Yellow Brown Forest soils in Japan. *Geoderma*. 130:346–355.

Tohru O., and A. Hiroyoshi. 2007. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology* 240:280–297.

건설교통부. 2005. 비탈면 녹화 설계 및 시공 잠정 지침. 건설교통부.

건설교통부. 2005. 2006년도 골재수급계획. 건설교통부.

구자욱, 김창석, 이도진, 임일빈, 권오도, 국용인, 천상욱, 한성욱. 2005. 한국의 잡초도감. 2nd Ed. 한국농업시스템학회.

김경수, 송영석. 2007. 도로 보조기층재로서 채석장 석분토의 재활용가능성 분석. Journal of Engineering Geology 17(2):279-287.

김계훈, 김길용, 김정규, 사동민, 서장선, 손보균, 양재의, 엄기철, 이상은, 정광용, 정덕영, 정연태, 정종배, 현해남. 2006. 토양학. 향문사.

김계훈, 정창욱. 2000. 부산물 석고를 이용한 산불피해 지역 토양유실 방지. 한국환경복원녹화기술학회지 3(4):52-59.

김남춘, 송호경, 박관수, 전기성, 이상화, 이병준. 2007. 고속도로 절·성토 비탈면 녹화 공법의 적용 실태 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 10(2):1-15.

농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법. 농촌진흥청.

류순호. 2000. 토양사전. 서울대학교출판부.

마상준, 김동민, 안상철, 이상욱. 2006. 석분토를 이용한 수중 불분리 충전재 및 그 제조방법. 대한민국 특허청. 등록번호 10-0633081.

문희수. 1996. 점토광물학. (주)민음사.

박관수, 전기성, 송호경, 김남춘, 최재용. 2006. 고속도로 절토 비탈면과 인접 자연식생지의 토양환경 비교 분석. 한국환경복원녹화기술학회지 9(2):16-22.

박철수, 정영상, 주진호, 양재의. 2004. 강원도 고랭지의 석비레 성토지 토양 특성. 한국토양비료학회지 37(2):66-73.

법제처. 골재채취법. 법률 제8479호.

산림청. 2006. 가드너 양성 기본교재.

산림청. 국가생물종지식정보시스템. <http://www.nature.go.kr/>

산업자원부. 2004. 석분토를 이용한 지하공동의 친환경적 충전재 및 충전보강공법 개발 연구. 161.

성찬용, 류능환, 윤준노. 2002. 비활성 황토와 석분을 사용한 모르타르의 물리·역학적 특성. 한국농공학회지 44(6):83-89.

성찬용, 윤준노. 2002. 폐석과 석분을 사용한 식생 콘크리트의 특성. 한국농공학회지 44(3):85-91.

안태봉, 구호분, 김태욱, 이종현, 배현철, 권상훈, 조성학, 강희양, 문영상. 1997. 절개사면의 보강녹생토 공법 개발 연구. 한국건설기술연구원.

양수찬. 2007. 골재 부산물의 용토재 활용을 위한 특성 분석. 석사논문. 강원대학교.

엄태호, 김유탉, 이기강, 강승구, 김정환. 2003. 폐기물을 재활용한 소성벽돌의 미세구조 분석. Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology 13(4):199-204.

우경진, 전기성. 2005. 비탈면 입지조건에 따른 녹화 특성에 관한 연구. 한국토양비료학회지 8(5):47-55.

우보명. 2005. 훼손지환경녹화공학. 서울대학교출판부.

이기강, 김정환. 2003. 무기계 폐분진을 이용한 전자재 제조기술Ⅱ : 인공경량골재. 세라미스트 6(3):특집

이창섭, 조태진, 이상배, 원경식. 2007. 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구. The J. of Eng. Geology 17(2):235-251.

이평구, 염승준, 홍세선, 김경수, 윤현수, 음철현, 신성천, 김원영, 박성원, 강민주, 연규훈, 이옥중. 2006. 석분토의 특성 및 활용방안을 위한 연구. 한국골재협회. 105.

전기성, 김남춘, 이태옥. 2007. 비탈면 녹화 설계 및 시공 잠정 지침. 한국환경복원녹화기술학회지 10(1):100-113.

전기성, 우경진. 2005. 유기질계 토양개량재를 이용한 절토비탈면 녹화공법 적용 시험 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 8(3):13-20.

전기성. 2004. 도로비탈면의 환경인자를 고려한 식생구조분석에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 7(2):12-20.

전기성. 2002. 비탈면 유형분석과 개선방안 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 5(5):22-29.

전찬진. 2005. 석분 폐슬러지를 이용한 경량골재 및 그 제조방법. 대한민국 특허청. 출원번호 10-2004-0027176.

정영상, 곽한강, 노희명, 박문희, 손보균, 윤세영, 정연태, 주진호, 황선웅, 홍순달, 하상건. 2005. 토양학. 강원대학교 농업전문경영인 트랙사업단.

정영상, 양재의, 주진호, 신호중, 황선웅. 2006. 고랭지 밭 비점오염원 최적 관리를 위한 조사 사업. 환경부.

정원교, 김명숙, 김선관, 장용선. 2005. 암석분쇄 석분의 토양개량효과에 관한 연구. 농업과학기술원.

정태건. 1999. 우리나라 도로녹화의 발전과정과 비탈면 녹화사업의 전망. 한국환경복원녹화기술학회지. 2(1):88-93.

최훈근, 김규연, 이재안, 배재근. 2001. 부산물퇴비 및 녹생토의 생산 운영실태 및 제품의 품질관리에 대한 조사분석. 폐기물자원화 9(2):123-131.

한국골재협회. 2005. 골재채취업등록명부. 한국골재협회.

한국공업규격. 1972. 흙의 입도시험 방법. KS F 2302.

호남농업연구소. 2006. 재배작물의 시비·토양관리 요령. 농촌진흥청 작물과학원.

홍세선, 이창범, 박덕원, 양동윤, 김주용, 이병태, 오근창. 2004. 국내 골재석산의 분포와 유형 분석. 자원환경지질 37(5):555-568.