

Research Paper

골재의 성분분석을 통한 토분함량 평가방법에 관한 실험적 연구

An Alysian Experimental Study on the Evaluation Method of Clay Mineral Content through Aggregate Composition Analysis

김인¹ · 한민철^{2*}

Kim, In¹ · Han, Min-Cheol^{2*}

¹Doctor's Course, Dept. of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

*Corresponding author

Han, Min-Cheol
Tel : 82-43-229-8484
E-mail : twhan@cju.ac.kr

Received : September 26, 2024

Revised : October 4, 2024

Accepted : October 7, 2024

ABSTRACT

This research was initiated to establish quality standards and testing methods for fine dust in aggregates, a component currently not regulated under the Korean Industrial Standards(KS) KS F 2527 for Concrete Aggregates. With limited existing research and no definitive quality or testing standards for fine dust, this study sought to provide a quantitative analysis of fine dust in aggregates and to set forth quality standards based on the dust content through a concrete performance evaluation. The experimental findings showed that the primary chemical constituents of the fine dust were aluminum oxide(Al_2O_3), iron oxide(Fe_2O_3), and silicon dioxide(SiO_2). It was observed that increasing levels of fine dust in the aggregates led to higher values of the fine dust index($Al_2O_3+Fe_2O_3$). This escalation in the fine dust index corresponded with an increase in the unit water content of the concrete and a consequent decline in compressive strength. Based on these observations, a maximum allowable limit for the fine dust index in aggregates was proposed at 23%. This limit was derived from the correlation between fine dust content and a 15% reduction in compressive strength of standard concrete specimens. The proposed evaluation method for the fine dust index based on its content in aggregates is expected to enhance concrete performance and ensure structural stability. This contribution to the field addresses a significant gap in the standards and provides a foundation for further research and standardization in the construction materials industry.

Keywords : clay minerals, aggregate, concrete, reducing unit water content, compressive strength

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

골재는 자원을 활용하고 건설산업에서 폭 넓게 사용되는 공공재의 성격을 띠는 대표적인 건설재료이나 육상골재 고갈 등으로 골재의 품질 여건은 다른 건설재료보다 열악한 편에 속하는 것이 사실이다. 과거 양질의 골재로 사용되었던 강자갈, 강모래 등과 같은 하천골재는 이미 고갈되었으며 대체자원으로 사용하는 산림골재는 산림보호 정책 및 님비(Nimby) 현상 등으로 인한 석산허가가 억제됨에 따라 채석이 어려운 상황이며 바다 모래 또한 어민들의 반발 및 수산자원 보호 등을 목적으로 채취량 감축 정책이 시행되는 등 전체적인 골재수요보다 공급량이 부족한 문제점이 발생하고 있다[1]. 특히, 골재품질에 가장 영향을 미치는 문제점으로 흙 또는 이물질 등을 통칭하는 ‘토분’이 골재에 과다하게 혼입되어 콘크리트에 사용될 경우



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

강도저하, 균열발생 및 콘크리트의 수명저하 등 다양한 문제를 발생시켜 콘크리트 구조물의 안전에 영향이 발생하면 국민 안전을 위협할 수 있다[2].

그러나 토분에 대한 기준에 대해 명확한 품질기준과 시험방법이 존재하지 않으며, 학계 및 산업계의 관련 연구도 제한적으로 보고되고 있는 상황이다[3-6]. 이와 관련하여 Park et al.[7]은 골재의 토분을 판정하기 위해 국내·외 규정을 고찰하고, 메틸렌블루법 등의 시험방법을 중심으로 연구를 진행한 바 있다. 또한, Sin et al.[8] 등은 비중계법(Hydrometer) 등의 시험방법을 활용하여 잔골재의 미립분 함유량 검토에 관한 연구를 진행하고, 골재의 토분 문제와 해결 방안을 제안한 바 있으며, Sin et al.[9]와 Shin et al.[10]의 연구자 등은 입도분석기를 이용한 골재 토분함유량 판정 가능성 분석을 진행 하였는데, 이를 통해 입도분석기를 이용한 골재의 토분함유량 측정방법의 활용 가능성을 보고한 바 있으나 정확한 분석결과를 도출하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 골재에 포함되어 있는 토분을 분석할 수 있는 정량적인 방법을 선정하여 평가하고 콘크리트의 성능평가를 통해 토분함량의 품질기준을 제안하고자 한다.

2. 골재의 물리적 평가 및 성분 분석

2.1 토분의 정의

토분에 대한 이론적 정의는 표준 및 관련 시방서 등에 명확하게 규정하고 있지 않다. 그러나 용어를 해석해 보면 “흙가루”의 뜻으로서, 실무에서는 골재에 포함되어 있는 흙, 이물질 등과 같은 유해한 미분을 표현하는 의미로 사용하고 있다. 골재에 포함된 토분은 흡수율이 높은 점토, 실트 등으로 구성되어 있으며 구성된 점토 또는 실트 등이 과다하게 포함된 골재를 사용할 경우 콘크리트의 단위수량 증가를 초래하여 전반적인 콘크리트의 품질성능을 악화 시킬 수 있다. 다만 미분 중에서 흡수율이 높지 않은 양질의 미분(석분)이 골재에 적정하게 혼입되어 있으면 필러(Filler)효과로 인해 콘크리트 성능에 유익한 영향을 미칠 수 있으므로[11] 유해한 흙 성분을 가지는 토분과 구분하여 정의할 필요가 있다.

2.2 토분의 물리적 특성 평가

모든 암석은 풍화작용의 영향을 받는다. 이러한 암석의 풍화작용은 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의하여 발생하며 크게 팽창과 수축, 결빙과 용해, 하중 또는 식물 뿌리 등에 의한 모든 풍화과정을 거쳐 암석은 Figure 1과 같이 점점 안정한 광물로 변화된다.

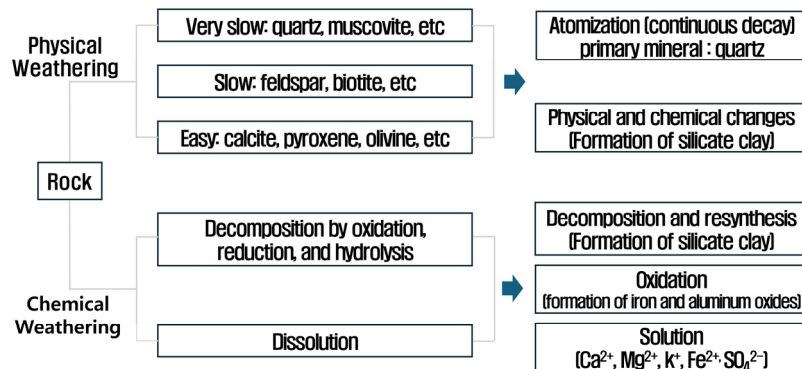


Figure 1. Principles of rock weathering

지표면 암석의 대표적인 조암광물 중 1차 광물인 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 등은 시간이 지나면서 2차 광물로 분리되어 안정화 되고 암석 내에서는 점차 알칼리 토류금속이 용탈된후 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 성분이 집적이 되면서 결국 암석이 풍화한 풍화토에는 점차 Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 증가하게 된다.

따라서 본 실험에서는 이러한 이론을 검증하고자 국내 선별파쇄골재, 산림골재, 육상골재를 대상으로 총 42개의 골재를 샘플링하여 골재토분의 성분분석을 진행하여 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 성분을 분석하고 골재의 업종에 따라 토분지수를 분석하고자 한다.

2.2.1 실험계획 및 방법

본 연구에 사용된 골재는 국내에서 생산하고 유통되고 있는 골재를 경기도, 충청도, 전라도, 경상도 지역으로 구분하고 선별파쇄골재, 산림골재, 육상골재로 구분하여 샘플링 하였다. 또한 Table 1은 골재의 샘플링 현황 나타낸 표이며 골재 품질시험을 위한 시료를 채취는 국토교통부에서 실시하는 골재품질검사 업무처리지침(국토교통부고시 제2033-309호, 2022. 6. 8. 제정) 제7조 시료의 채취 규정과 KS F 2501(골재의 시료채취 방법)에 따라 채취하였다. 또한 성분 분석 및 물리적 특성 평가 항목은 Table 2와 같고 토분의 성분 분석시 토분의 채취는 전국 42개 지역에서 채취된 골재를 대상으로 0.08mm체를 통과한 시료를 사용 하였으며 KS L 5222 시멘트 형광 X선 분석방법을 준용하여 실시하였다.

Table 1. Current state of aggregate sampling

Division	Screening Aggregate	Forest Aggregate	Land Aggregate
GYEONGGI-DO	14 EA	5 EA	2 EA
CHUNGCHEONG-DO	3 EA	3 EA	2 EA
JEOLLA-DO	3 EA	1 EA	2 EA
GYEONGSANG-DO	5 EA	1 EA	1 EA
Total	25 EA	10 EA	7 EA
Total		42 EA	

Table 2. Experimental plan for analyzing physical properties and composition of aggregates

Division	Experimental Items	Experimental Standards
Physical Character	Absolute dry density(g/cm^3)	KS F 2503, KS F 2504
	0.08mm sieve passing amount(%)	KS F 2511
	Absorption(%)	KS F 2503, KS F 2504
Component Analysis Method	Component analysis of XRF	KS L 5222

2.2.2 골재의 물리적 특성 평가결과

Figure 2는 골재의 골재원에 따른 밀도 결과를 나타낸 그림이다. 결과에서 나타나듯 42개의 시료는 KS기준 및 골재채취법에서 정하는 골재의 용도별 품질기준에 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 골재원별 밀도를 비교한 결과 선별파쇄 골재의 밀도가 2.59로 가장 낮게 나타났다. 이는 공사현장 등에서 반입되는 골재의 원석에 일부 혼입되는 흙, 점토, 풍화토등에 의한 것으로 낮게 나타는 것으로 판단되며 반면 가장 높은 골재는 산림골재로 2.63으로 나타났으며 골재의 밀도는 높을수록 콘크리트 강도와 비례하며 밀도가 높을수록 품질이 양호한 것으로 인식되고 있다.

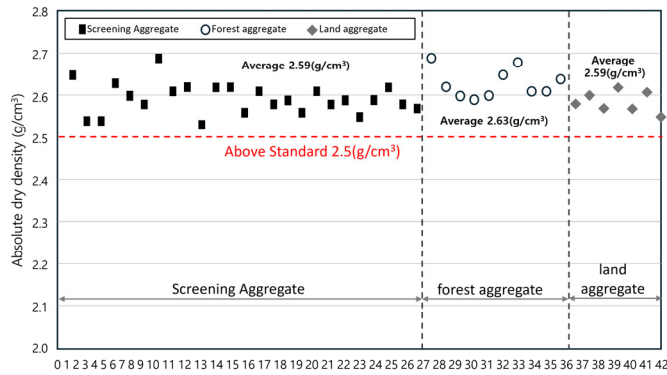


Figure 2. Absolute dry density of aggregates by source

Figure 3은 골재의 골재원에 따른 0.08mm 체 통과량의 실험결과를 나타낸 그림이다. 0.08mm 체 통과량의 기준은 골재의 생산방식에 따라 상이하며 선별파쇄골재, 산림골재는 원석 파쇄시 발생하는 석분에 의하여 기준치가 선별만 실시하는 육상골재에 비해 기준이 높다. 따라서 골재의 생산 방식별 품질기준과 결과를 비교한 결과 골재원에 상관없이 모든 시료는 KS F 2527과 골재채취법 시행령에서 정하는 골재의 용도별 품질기준에 만족하는 것으로 나타났으며 통과량 많은 순으로는 선별파쇄골재가 3.34%, 육상골재는 3.13%, 산림골재는 2.52%로 나타났다.

Figure 4는 골재의 골재원에 흡수율 실험결과를 나타낸 그림이다. 시험결과 흡수율은 밀도와 연관성을 가지는 품질 항목으로 밀도와 유사한 결과를 나타냈다.

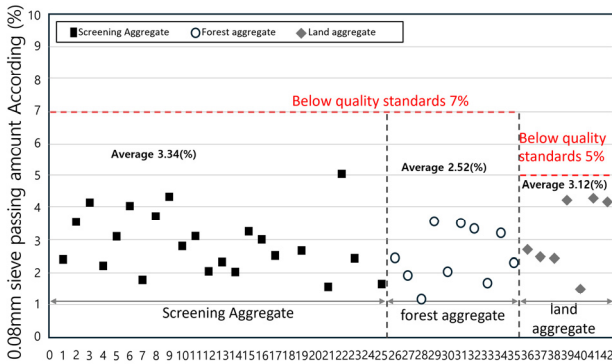


Figure 3. Quantity passing from aggregate sources

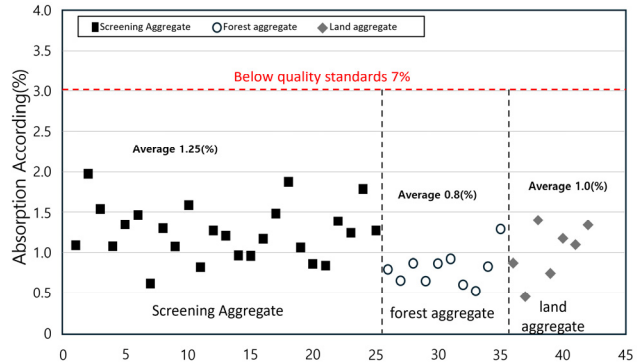


Figure 4. Water absorption rates of aggregates by source

2.3 토분의 성분분석

흙, 풍화토 등의 풍화된 세립토는 암석이나 흙의 풍화작용으로 인해 콘크리트용 골재에 일부 포함되어 있거나 골재의 표면에 코팅되어 있다. 풍화작용 중에 화학적 풍화는 물, 대기 중의 산소와 이산화탄소, 그리고 생물과 같은 유기물이 암석에 화학적인 작용을 유발시키는 것으로 이온이탈, 탄산화, 산화, 수화 및 가수분해 작용으로 요약된다. 화학적 풍화가 진행되면 조암광물의 변질에 의해 2차적으로 점토광물이 생성되며 이점토 광물의 생성은 풍화를 더욱 촉진되며 특히 점토광물 중에 팽창성 광물의 생성유무를 판단하는 방법으로는 X선 회절분석, X선 형광분석 등을 활용하여 화학적 풍화 민감도를 분석한다. 일반적으로 흙, 풍화토 등의 풍화된 점토광물의 미세입자를 토질공학에서 점토광물로 지칭하고 있으며 크게 카올린나이트, 일라이트, 몬모릴나이트 3가지로 구분하고 있다. 카올린나이트는 실리카판 1개와 알루미늄판 1개로 이루어진 층들이

1:1로 결합된 형태이며, 다른 점토광물과 비교하여 안정된 구조를 가지고 있어 수분의 침투를 억제하고 수분으로 포화되더라도 팽창이 잘 안 일어나는 것이 특징이다. 일라이트는 실리카판 2개와 알루미늄판 1개로 이루어진 층들이 2:1로 결합된 형태로서 각각의 3층 구조 사이에 칼륨(K)이온이 서로 결속되어 비교적 안정된 구조를 가지고 있다. 몬모릴로나이트는 실리카판 2개와 알루미늄판 1개로 이루어진 층들이 2:1로 결합된 형태로서 일라이트와 동일하지만 풍화작용에 의해 칼륨이온이 용탈되어 빠져나가 안정적으로 결속되지 못한 구조를 가지고 있다. 이렇게 결속력이 약함에 따라 각 층간의 양이온이 물 분

Table 3. XRF Analysis results of aggregate

Division	Chemical Analysis(%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	
1	56.38	17.13	8.37	2.88	2.38	0.45	2.06	3.56	1.39	0.32	0.15	25.50	
2	60.31	19.01	6.37	1.23	1.61	0.00	2.24	3.88	0.76	0.16	0.09	25.38	
3	59.40	20.83	4.46	1.39	1.00	0.07	3.49	4.02	0.81	0.06	0.06	25.29	
4	60.12	17.33	6.79	2.24	2.61	0.22	2.72	3.65	0.86	0.14	0.10	24.12	
5	62.92	16.40	6.64	1.88	1.85	0.00	2.16	3.37	0.79	0.41	0.06	23.04	
6	61.01	16.70	6.30	3.53	1.78	0.00	3.25	2.46	1.01	0.40	0.07	23.00	
7	56.71	14.72	8.24	3.93	2.38	1.17	1.81	3.67	0.77	0.24	0.08	22.96	
8	60.71	16.51	6.45	2.34	2.16	0.15	2.54	3.64	0.82	0.18	0.08	22.96	
9	62.26	16.03	6.69	1.93	1.60	0.40	2.51	3.76	0.98	0.18	0.11	22.72	
10	63.19	16.61	5.80	2.29	1.08	0.00	3.81	3.50	0.97	0.31	0.07	22.41	
11	63.75	16.83	5.38	1.79	1.85	0.13	3.16	4.15	0.55	0.12	0.08	22.21	
12	63.94	16.40	5.82	1.41	1.64	0.00	2.18	3.64	0.64	0.36	0.07	22.22	
13	65.57	18.27	3.08	1.66	0.59	0.00	5.11	3.11	0.39	0.00	0.04	21.35	
14	64.78	15.17	5.20	2.97	1.83	0.42	3.12	3.39	0.65	0.33	0.07	20.37	
15	61.42	17.40	5.61	2.96	1.53	0.00	3.77	2.85	0.92	0.38	0.08	23.01	
16	63.49	15.77	5.27	2.83	1.66	0.00	3.60	3.13	1.21	0.22	0.06	21.04	
17	62.32	16.25	5.71	2.38	2.26	0.00	2.91	3.41	0.72	0.29	0.06	21.96	
18	60.83	14.11	7.65	3.87	1.72	0.13	1.85	4.24	1.10	0.32	0.08	21.76	
19	66.70	16.03	3.72	2.23	0.55	0.00	4.23	4.05	0.61	0.10	0.03	19.75	
20	67.03	14.68	5.67	2.15	0.69	0.00	3.41	4.69	0.53	0.12	0.03	20.35	
21	66.01	15.05	7.04	1.51	0.65	0.00	3.34	4.36	0.33	0.06	0.03	22.09	
22	70.26	13.77	9.32	0.13	0.49	0.00	1.00	2.91	0.38	0.00	0.06	23.09	
23	58.69	12.23	9.42	2.54	1.61	0.97	2.09	2.55	0.58	0.07	0.18	23.65	
24	61.20	16.81	6.08	4.31	1.57	0.47	3.78	2.21	0.75	0.18	0.09	22.89	
25	69.87	13.51	4.73	1.65	0.95	0.00	3.48	3.81	0.62	0.11	0.18	18.24	
26	66.76	13.74	4.88	3.42	2.25	0.22	0.71	3.78	0.58	0.17	0.12	18.62	
27	67.35	14.18	4.43	3.12	1.39	0.01	2.63	3.94	0.66	0.21	0.06	18.61	
28	67.47	14.95	3.34	1.81	1.15	0.86	1.99	4.89	0.45	0.15	0.04	18.29	
29	71.09	14.69	2.07	1.71	0.56	0.00	3.57	4.84	0.43	0.05	0.05	16.76	
30	68.88	13.71	2.62	2.13	1.10	0.47	2.23	4.91	0.33	0.08	0.04	16.33	
31	69.30	13.23	3.27	2.54	2.28	0.21	2.85	3.72	0.85	0.30	0.06	16.50	
32	67.13	12.38	6.05	2.74	1.69	0.18	2.42	3.50	0.75	0.37	0.06	18.43	
33	66.68	14.28	2.04	1.73	0.76	0.00	3.59	4.16	0.51	0.02	0.02	16.32	
34	80.33	10.30	2.30	0.16	0.46	0.00	1.04	3.24	0.36	0.00	0.10	12.60	
35	65.79	12.65	4.21	3.52	2.06	0.01	3.29	2.84	0.67	0.09	0.08	16.86	
36	75.64	11.50	2.88	1.16	0.96	0.00	2.28	3.17	0.79	0.02	0.05	14.38	
37	75.85	11.34	2.82	1.12	0.93	0.00	2.44	3.22	0.61	0.02	0.03	14.16	
38	64.17	15.66	5.15	2.67	1.48	0.00	3.83	3.08	1.20	0.21	0.06	20.81	
39	73.22	12.81	3.14	1.80	1.25	0.00	2.51	3.60	0.43	0.03	0.05	15.95	
40	76.24	9.91	4.10	0.88	1.16	0.00	1.14	3.47	1.00	0.03	0.04	14.01	
41	55.37	17.11	8.00	5.31	2.18	0.00	3.43	2.35	1.66	0.90	0.10	25.11	
42	73.26	11.92	3.57	1.34	1.05	0.01	2.26	3.07	1.16	0.05	0.07	15.49	

자를 끌어들이어 쉽게 팽창하기 때문에 점착성, 응집성, 수축성이 크므로 안정성이 떨어지는 특징이 있다. 이에 본 연구에서는 XRF 방법을 활용하여 골재에 포함되어 있는 풍화된 토분의 성분을 분석하였고, 그 실험결과를 Table 3과 같다.

Figure 5는 XRF 분석을 결과를 나타낸 결과중 골재원에 따른 Al_2O_3 의 성분을 나타낸 그림이다. 실험결과 선별파쇄골재는 12.23~20.83%로 평균 16.14%로 측정되었고, 산림골재는 10.30~14.95%로서 평균 13.41%로 측정되었으며, 육상골재는 9.91~17.11%로 평균 12.89%로 측정되었다. 또한 Figure 6은 골재원에 따른 Fe_2O_3 의 성분을 나타낸 그림이며 실험결과 선별파쇄골재는 3.08~11.42%로서 평균 6.31%로 측정되었고, 산림골재는 2.04~6.05%로 평균 3.52%로 측정되었으며, 육상골재는 2.82~8.00%로 평균 4.24%로 측정되었다.

Table 3에서 나타나듯 골재 토분의 성분 분석결과 전체적으로 잔골재에 포함되어 있는 토분으로서 기본적인 분자구조의 풍화된 성분 함유량에 차이가 있는 것으로 확인되었다. 즉, 상대적으로 선별파쇄골재는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 산림골재 및 육상골재보다 높게 측정되었고, SiO_2 , K_2O 는 낮게 측정되었다. 반대로 산림골재와 육상골재는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 선별파쇄 골재보다 낮게 측정되었고, SiO_2 , K_2O 는 높게 측정되었다. 이는 점토광물이 알루미늄, 철, 마그네슘이 수화된 규산염 분자구조를 기본으로 실리카 정사면체와 알루미나 정팔면체로 구성되어 있고, 실리카판과 알루미나판이 서로 결합된 결정구조가 중첩되어 여러 겹으로 격자 구조되어 있음을 고려할 때 선별파쇄골재, 산림골재, 육상골재의 각 골재종류별 원석, 생산, 제조공정에 대한 특징이 기본적인 분자구조의 성분 함유량에 반영된 결과로 판단된다. 또한, $Al_2O_3+Fe_2O_3$ 의 성분이 높다는 것은 점토광물을 구성할 수 있는 기본적인 분자구조가 상대적으로 많이 보유하고 있음을 의미하는 것으로 사료된다.

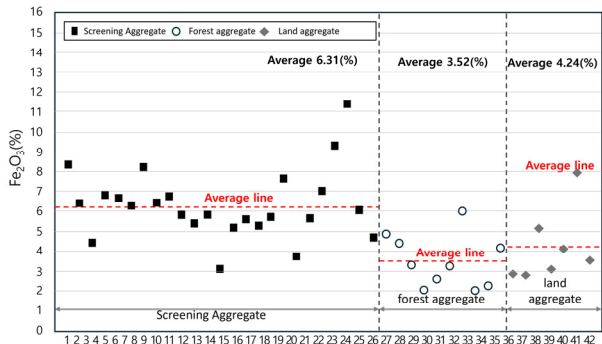
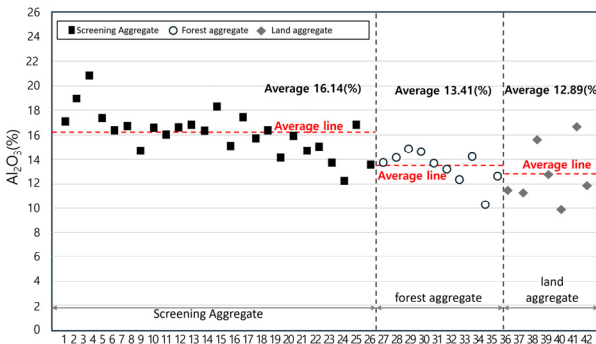


Figure 5. Al_2O_3 composition analysis in aggregates by source Figure 6. Fe_2O_3 composition analysis in aggregates by source

3. 골재의 토분지수에 따른 성분분석 및 콘크리트 성능평가

점토광물의 기본적인 분자구조(Si , Al , Fe , Mg)의 구성 성분을 정량적으로 분석하여 측정자의 측정오차 및 편차를 최소화 할 수 있는 XRF 분석법을 활용한 화학적 풍화지수 실험은 골재가 풍화과정을 거치면서 토분이 되고 이러한 점토광물은 기본적으로 Al_2O_3 및 Fe_2O_3 가 결합된 분자구조를 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 그리고 골재 중에 토분의 함유량이 증가함에 따라 Al_2O_3 및 Fe_2O_3 증가할 것으로 사료된다. 따라서, 앞서 검증한 골재의 성분분석 값을 근거하여 토분 함량에 따른 $Al_2O_3+Fe_2O_3$ (이하 토분지수로 칭함)에 따라 콘크리트에 미치는 영향을 검토 하고자 한다.

3.1 실험개요

골재의 토분 함량에 따른 성분분석을 실시하기 위해 토분은 선별파쇄골재를 생산하는 골재를 샘플링하고 0.08mm 체 이하의 토분을 임의로 채취하여 사용하였다. 또한 본 실험은 기존의 토분이 없는 세척한 골재를 Plain(토분 0%)으로 설정하고

Plain의 골재에 토분을 임의로 0%~15%까지 추가하였으며 굵은골재와 잔골재로 구분하여 토분지수를 분석을 실시하였다. 그리고 토분지수에 따라 콘크리트의 물성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부순 굵은골재, 부순 잔골재를 대상으로 토분의 첨가량에 따른 콘크리트의 물성실험 및 단위수량 증가량에 대한 평가를 실시하였다. 콘크리트 성능평가를 실시하기 위해 실험계획은 Table 4와 같고 실험에 사용된 골재의 특성은 Table 5와 같다. 또한 콘크리트의 배합은 Table 6과 같이 실시하였으며 배합은 목표 슬럼프 180±25mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 기준으로 배합을 실시하였다. 단위수량의 증가량 평가 방법은 plain 배합실험을 실시후 슬럼프를 측정하고 부족한 슬럼프값을 보정하기 위해 단위수량을 증가시켜 재 배합을 실시하였다. 이때 증가된 단위수량의 무게를 측정 하여 단위수량 증가량 평가를 하였다.

Table 4. Detailed experimental plans

Factors	Levels
Clay minerals in aggregates(%)	0, 1, 3, 6, 9, 12, 15
Mixture	Slump 180±25mm, Air content 4.5±1.5%
Fresh concrete	Slump, Air content, Water content per unit volume of concrete
Hardened concrete	Compressive strength(3 days, 7 days, 28 days)

Table 5. Physical properties of plain concrete aggregates

Factors	Coarse Aggregate	Crushed Fine Aggregate
Absolute dry density(g/cm ³)	2.7	2.6
Water absorption ratio(%)	0.7	1.2
Safety test(%)	4	4
0.08mm sieve passing amount(%)	0.7	2.9
Distribution of grain shape(%)	58	56
Attrition Rate(%)	21	-

Table 6. Concrete mix design specifications

Level	W/B (%)	S/a	Unit Weight(kg/m ³)						SP (%)	AE (%)
			C	FA	BFS	S	G	Clay		
Sand	48.6	52	258	56	56	920	822	55.3	0.70	0
										9.2
										27.6
										864.7
										837.1
										809.5
										781.9
Coarse Aggregate	48.6	52	258	56	56	920	772.8	49.2	0.70	822
										813.8
										797.4
										748.2
										723.6
										699
										123

3.2 실험결과

3.2.1 골재에 토분 첨가량에 따른 토분지수 분석결과

Table 7은 Plain 굵은골재에 토분 첨가량에 따른 화학성분 분석결과를 나타낸 표이다. 분석결과 토분의 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 함량도 증가하는 것으로 나타났다. 본 분석을 통해 토분의 첨가량이 증가함에 따라 소량의 토분 첨가량은 토분의 지수의 차이를 나타냈으며 토분첨가량이 계속하여 증가하면 토분지수의 증가비는 낮아지는 것으로 나타났다. 이로서 토분은 $Al_2O_3+Fe_2O_3$ 의 성분분석으로 향후 골재에 포함되어 있는 토분의 함유량을 유추 할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7. Chemical composition analysis of aggregates with varied clay mineral content

Clay Minerals Content	Chemical Analysis(%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (Clay Mineral index)	
Coarse Aggregate	0 %	64.45	15.08	3.37	2.40	1.19	2.90	5.15	0.36	0.24	0.60	19.45
	1 %	59.26	16.79	4.89	2.80	1.35	4.73	4.25	0.78	0.32	0.17	21.68
	3 %	58.53	16.95	5.96	2.70	1.30	4.94	3.75	0.92	0.36	0.11	22.91
	6 %	58.38	17.08	6.10	2.53	1.26	5.35	3.58	1.01	0.35	0.08	23.18
	9 %	58.57	17.16	6.05	2.54	1.17	5.61	3.50	0.98	0.39	0.07	23.21
	12 %	58.20	17.46	6.14	2.41	1.21	5.47	3.50	1.04	0.41	0.07	23.60
	15 %	58.03	17.27	6.28	2.60	1.21	5.84	3.37	1.02	0.40	0.06	23.55
Sand	0 %	63.35	15.46	3.51	2.50	1.19	3.48	5.06	0.41	0.19	0.46	19.97
	1 %	60.77	16.28	4.97	2.45	1.25	4.23	4.41	0.74	0.30	0.34	21.25
	3 %	59.17	16.74	5.77	2.50	1.27	4.86	3.93	0.94	0.35	0.33	22.51
	6 %	58.96	17.39	5.50	2.37	1.31	4.93	3.93	0.87	0.31	0.18	22.89
	9 %	58.12	17.51	5.96	2.41	1.30	4.97	3.82	0.94	0.34	0.16	23.47
	12 %	58.18	17.49	6.00	2.38	1.40	4.87	3.88	0.90	0.33	0.16	23.49
	15 %	58.14	17.73	6.20	2.34	1.30	5.22	3.64	0.99	0.37	0.10	23.93

Figure 7, Figure 8은 골재의 토분첨가량에 따른 토분지수의 상관관계를 분석한 그림이다. 굵은골재의 토분지수 상관관계 분석결과 R2값은 0.72로 나왔으며 잔골재의 토분지수 상관관계 분석결과 0.88로 나타났다. 상관관계 분석결과 R2 값이 높게 나타나는 것으로 보아 토분의 함량을 평가하기 위해서는 본 연구에서 제안하는 XRF 시험방법이 유효성이 있다고 판단된다.

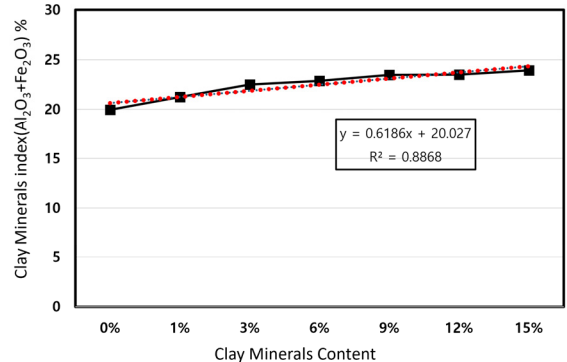
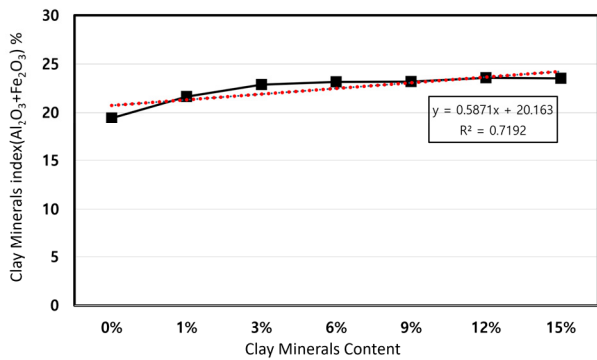


Figure 7. Analytical results of clay mineral index in coarse aggregates **Figure 8.** Analytical results of clay mineral index in sand

3.2.2 골재에 토분 첨가량에 따른 콘크리트 성능 평가결과

Figure 9는 콘크리트의 굵은골재 사용량 대비 토분 지수에 따른 압축강도와 단위수량 증가량에 대한 실험결과를 나타낸 것이며 Figure 10는 잔골재 사용량 대비 토분 지수에 따른 압축강도와 단위수량 증가량에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. Figure 9에서 나타나듯이 토분의 함량이 증가함에 따라 토분의 지수는 증가되며 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 특히 토분의 지수(Al_2O_3 와 Fe_2O_3)가 23% 이상의 실험체에서는 약 18% 이상의 압축강도 감소가 나타났다. 단위수량 또한 토분이 첨가되지 않은 Plain 실험체에 비해 $18kg/m^3$ 증가되는 것으로 나타났다. 또한 Figure 10의 결과에서는 토분지수가 22.5% 이상부터 압축강도가 약 20% 감소되는 것으로 나타났으며 단위수량은 $22kg/m^3$ 증가 하는 것으로 나타났다. 이는 토분의 성분중 몬모릴나이트의 성분이 물과의 흡착으로 인해 단위수량이 증가되었으며, 이로 인해 W/B가 증가하여 압축강도 또한 감소 되는 것으로 사료된다. 따라서, 골재의 포함된 토분은 콘크리트의 압축강도를 저하시키며, 특히 토분의 지수합이 콘크리트 표준시방서(KSC 14 20 10 : 2022 일반콘크리트)에서 콘크리트 압축결과를 만족하는 압축강도 값의 85%초과하면 적합한 것으로 판정한다 라는 규정을 감안하여 압축강도 저하폭이 15%이상이 되는 경우 품질에 심각한 악영향을 미칠 수 있을 것으로 사료되어, 본 연구범위에서는 압축강도 저하폭이 15%값인 굵은 골재의 경우 토분지수 23%이내, 잔골재의 경우는 토분지수 22.5%이내로 관리되어야 할 것으로 판단된다.

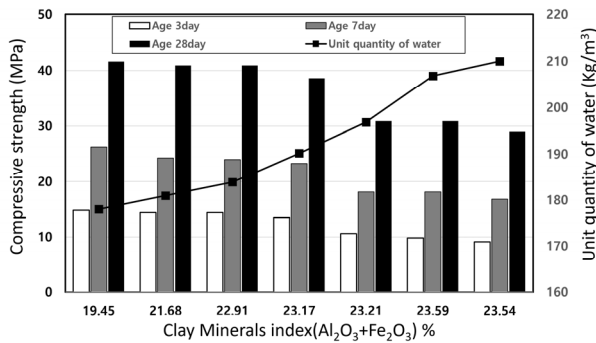


Figure 9. Compressive strength and unit water content of concrete mixes as functions of clay mineral content in coarse aggregate

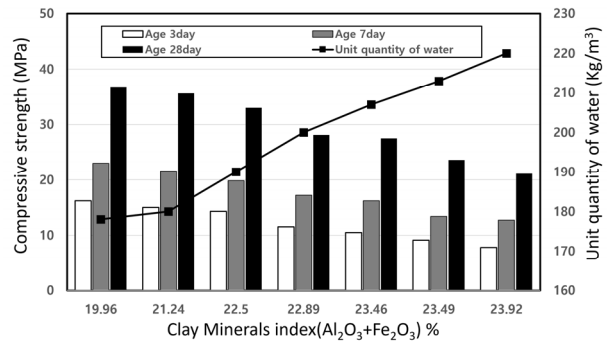


Figure 10. Compressive strength and unit water content of concrete mixes as functions of clay mineral content in fine aggregate

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트용 골재의 토분과 연관한 현황, 토분 평가관련 기준 및 발생원인을 조사하고 시사점을 도출하였으며, 아울러, 토분이 콘크리트에 미치는 영향에 대해 실험적으로 고찰하였는데, 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 연구에서 토분의 성분 분석을 자세히 검토하고자 국내 선별파쇄 골재, 산림골재, 육상골재를 대상으로 총 42개의 골재를 샘플링하여 골재토분의 성분분석을 진행하여 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 성분을 분석하고 골재의 업종에 따라 토분지수를 분석하였다. 또한 골재의 토분지수에 따라 콘크리트에 미치는 영향을 분석하고 콘크리트에 허용될 수 있는 토분함량 실험적으로 고찰하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) 토분의 포함하는 성분중 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 성분분석을 하기 위해서는 XRF(X선 형광분석법) 장비를 사용하여야 하며 전국 42개의 골재를 대상으로 성분 분석을 실시한 결과, 골재가 포함하는 토분의 함유량에 따라 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 성분 함량이 변화되는 것으로 나타났으며 선별파쇄 골재에서 높은 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 함량이 측정 되었다.
- 2) 세척된 골재에 임의적으로 토분을 추가하여 XRF 분석을 실시한 결과 추가된 토분의 함량이 높을수록 Al_2O_3 와 Fe_2O_3

성분이 증가하는 것으로 분석 되었다.

- 3) 골재의 토분 함유량에 따른 콘크리트 물성 평가 결과 토분 함량이 증가함에 따라 콘크리트의 단위수량은 증가하는 것으로 나타났으며 이로 인해 압축강도는 감소되는 것으로 나타났다.
- 4) 콘크리트의 실험결과, 콘크리트의 압축강도가 Plain에 비해 -15%까지 감소하였을 때 골재가 포함하는 토분의 지수 (Al_2O_3 와 Fe_2O_3)성분의 합은 23%으로 나타났다.

요약

본 연구는 한국산업표준(KS)의 KS F 2527(콘크리트용 골재)에서 규정되지 않은 토분의 품질기준과 시험방법을 제안하기 위해 진행되었습니다. 현재 토분에 대한 명확한 품질기준과 시험방법이 존재하지 않으며, 학계 및 산업계에서도 관련 연구가 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 골재에 포함된 토분을 분석할 수 있는 정량적인 방법을 선정하고 이를 평가하여, 콘크리트 성능 평가를 통해 토분 함량의 품질기준을 제안하고자 하였으며 성능평가결과 토분의 화학적 조성은 점토에서 흔히 발견되는 화학 성분인 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 로 구성되어 있음을 확인하였다. 또한 토분 함량이 증가함에 따라 토분지수 ($Al_2O_3+Fe_2O_3$)도 증가하는 것으로 나타났으며 토분지수의 증가에 따라 콘크리트의 단위수량은 증가하고, 압축강도는 저하되는 경향을 나타냈다. 콘크리트 성능 평가를 바탕으로 골재가 포함하는 토분의 지수(Al_2O_3 와 Fe_2O_3)의 최대 한계점은 23%로 나타났다. 이는 Plain 콘크리트 실험체의 압축강도 대비 15% 감소점을 기준으로 토분지수 값을 설정한 결과이다. 따라서 본 연구에서는 토분함량에 따라 토분지수를 평가방법에 대해 연구 하였으며 이는 콘크리트의 성능 향상과 안정성 확보에 기여할 것으로 사료된다.


키워드 : 토분, 골재, 콘크리트, 단위수량, 압축강도

Funding

Not applicable

ORCID

In Kim,  <https://orcid.org/0009-0006-8050-5157>

Min-Cheol Han,  <https://orcid.org/0000-0002-2555-673X>

References

1. Park MY, Park KT. The problems and solution method of aggregates clay. Magazine of the Korea Concrete Institute. 2020 Jul;32(4):21-7.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Aggregate Extraction Act article 22-4 Quality Standards for Aggregates. Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2021 Jul 27.
3. KS F 2527. Concrete aggregate. Eumseong (Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2020 Dec 14. p. 1-120
4. JIS A 5005. Crushed stone and manufactured sand for concrete. Tokyo (Japan): Japan Industrial Standards. 2020. p. 1-9.
5. ASTM C 33. Standard specification for concrete aggregates. PA: American Society for Testing and Materials. 2018. p. 1-13.

6. BS EN 933-9. Tests for geometrical properties of aggregates - part 9: assessment of fines - methylene blue test. United Kingdom: British Standards Institution; 2013. p. 3-15.
7. Park MY, Hong JH, Choi HK, Lee JM. Suggestion of aggregate soil decision and evaluation test method for improving concrete quality and securing structure stability. Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2021 Nov 3-5; Gyeongju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2021. p. 375-6.
8. Sin SJ, Choi YH, Han JH, Hyun SY, Han MC, Han CG. Possibility of determination of aggregate soil content using hydrometer method. Proceedings of the Architectural Institute of Korea; 2019 Oct 39-2; Daejeon, Korea. Seoul (Korea): Architectural Institute of Korea ; 2019. p. 465-2
9. Sin SJ, Hyun SY, Park KT, Park MY, Han MC, Han CG. Possibility of determination of aggregate soil content using a particle analyse. Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2019 Nov 31-2; Byeonsan, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2019. p. 331-2.
10. Sin SJ, Lee HJ, Han JH, Hyun SY, Han MC, Han CG. Comparative analysis of dry and wet clay content test of crushed fine aggregate using particle size analyzer. Proceedings of the Korea Recycled Construction Resources Institute; 2019 Nov 19-2; Gyeongju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Recycled Construction Resources Institute; 2019. p. 161-2.
11. Choi HK, Han MC. Experimental study on the proposal of an assessment method and quality standard for identifying the fine particles of clay components in fine aggregates. Journal of The Korea Institute of Building Construction. 2022 Dec;22(6):585-96. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2022.22.6.585>