

디지털 이미지 처리 기법을 이용한 굵은골재의 입도분포곡선

Gradation Curve of Coarse Aggregate by Digital Image Analysis

이관호¹ · 김영진² · 황택진³ · 조재윤⁴

Kwan-Ho Lee¹, Young-Jin Kim², Tak-Jin Hwang³, and Jae-Yoon Cho⁴

(Received December 29, 2010 / Revised January 20, 2011 / Accepted January 22, 2011)

요 약

본 연구는 디지털 이미지 처리 기법을 이용하여 골재입자의 형상을 분류한 것이다. 디지털 이미지 처리 기법은 골재의 표면거칠기 및 형상계수 등의 정량적인 분석에 적합한 것이다. 연구에 사용된 골재입자는 주문진 표준사, 해양골재 2종, 쇠석골재 2종 등이 이용되었다. 해변자갈 I, II의 형상계수는 0.35~0.54, 쇠석 I 은 0.74의 범위로 박편 형태의 편평상으로 나타나는데 비해 주문진 표준사의 입자의 모양은 세장형으로 나타났다. 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I 과 달리 모든 시료보다 세장비가 작으므로 장축과 중축의 차이가 크고, 긴 입자의 형상특성을 보여주고 있다. 체가름 시험 및 실측을 통해 결정된 골재의 세장비 및 편평비와 디지털 이미지 처리 기법을 이용해 결정된 골재의 세장비 편평비는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 디지털 이미지 처리 기법을 이용하여 2차원 이미지를 3차원으로 변환하기 위하여 형상변환계수 및 등가직경이론을 제안하였고, 이를 이용하여 수정입도분포곡선을 작성하였다. 4종의 골재에 대한 편평비는 각각 0.30, 0.36, 0.47 및 0.83으로 측정되었다. 형상변환계수는 각각 0.77, 0.78, 0.84 및 0.92로 결정되었다. 형상변환계수에 디지털이미지 처리기법에서 구한 입경을 곱하여 입자의 크기를 보정하였다. 보정된 입자크기를 이용하여 보정된 체적 및 중량을 구하여 수정입도곡선을 작성하였다.

주제어 디지털이미지처리기법, 입자형상, 세장비, 편평비, 입도곡선, 형상변환계수

ABSTRACT

The purpose of this research is particle shape evaluation of aggregate using Digital Image Process(DIP). DIP is very useful to measure the roughness and particle shape of aggregates. Couple of aggregates, like standard sand, two different crushed stones, and two different marine aggregates, have been employed. Shape factors of two different marine aggregates are ranged 0.35 to 0.54. Crushed stone I is 0.74 which is highly flat, but standard sand is elongated shape. Especially, two marine aggregate showed a big difference of width and length which meant a long shape. There is any significant difference of elongation ratio and flatness for each aggregate with different measuring system, like direct measurement of vernier calipers and DIP method. Shape conversion coefficient and equivalent diameter for changing 2D image to 3D image by the Digital Image Process(DIP) have been suggested and modified particle size distribution curve has been showed. The measured flatness ratios of each aggregate were 0.30, 0.36, 0.47 and 0.83, respectively. Also, the conversion shape coefficients of each aggregate were determined as 0.77, 0.78, 0.84 and 0.92. The size of aggregate has been modified by multiplying the shape conversion coefficient and the aggregate size from DIP. The modified gradation curve with modified volume and weight of aggregate has been suggested. Within the limited test results, DIP is one of useful to get the particle shape of aggregate with limitation of measuring errors and to apply the particle distribution curve.

Key words Digital Image Process, Particle shape, Elongation ratio, Flatness ratio, Gradation Curve, Shape Conversion Coefficient

1. 연구개요

모래입자는 대부분 물리적인 풍화에 의해 형성된 부스러

진 암석 입자들로 구성되어 있거나 또는 화학적 풍화에 의해 남은 암석 부스러기로 구성되어 있으며 일반적으로 둥근 모양이다. 점토는 실트질 점토나 점토 및 실트로 구성되어 있

1) 국립공주대학교 건설환경공학부 교수(교신저자: kholee@kongju.ac.kr)

2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원

3) 동의대학교 토목공학과 교수

4) 동의공업대 건설정보과 교수

며 암석이나 흙의 화학적 풍화작용에 의해 생성되는 점토입자는 얇은 조각 모양을 띠고 있다. 흙의 물리적 특성은 다양한 형태의 입도 분포, 밀도, 간극속의 물과 공기뿐 아니라 입자의 형상에 의해 그 특성이 변화한다. 특히 조립도에 있어서는 입자의 형상이 밀도, 투수성, 전단강도, 압축성 등 공학적 거동에 매우 큰 영향을 미친다. 하지만 매우 다양하고 불규칙한 표면을 갖는 입자의 형상은 측정하기가 어려워 이를 정량화하기 위한 연구가 미흡하며, 조립도의 형상 분석을 위한 기존의 표준 차트를 이용 시 관찰자의 주관 및 낮은 분별력에 의해 제한되어 있는 실정이다(민덕기 등, 2003, 2004; 이종익, 2003). 일반적인 입자의 형상 분류를 위한 측정법은 표준 입자의 모양과 실제의 입자를 비교하는 기존의 표준 차트를 이용하여 분류하는 것이다. 그러나 다양하고 불규칙한 표면을 갖는 입자의 형상을 정밀하게 측정하거나 이를 정량화하기 어렵다. 디지털 이미지 처리 기법(DIP; Digital Image Processing)에 의한 사용 재료입자의 형상 계수 등의 정량적인 형상 특성 분석은 이러한 문제를 해결하는데 적절한 방법이다(황택진, 2007; Bernhardt, 1994; Li 등, 1993). 입자 모양의 분석 및 정량화를 위해서는 디지털 이미지 처리기법(DIP, Digital Image Processing)에 의한 시료의 이미지 분석 방법을 적용하였다. 본 논문에서는 체분석이 불가능한 일반토사 및 조립토 입자의 입도분포 특성을 디지털 이미지 처리기법을 적용하여 분석하는 방법을 제안하였다. 4종류의 형상 특성을 가진 시료를 디지털 이미지 처리 기법을 이용해 골재 입자의 형상 특성을 체분석 결과와 비교·분석하였다. 또한, 체분석시 오차가 많이 발생하는 굵은 골재 입자의 입도분포 특성을 디지털 이미지 처리기법을 적용하여 분석하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 천연자갈 및 쇠석골재 등 2종류의 시료를 디지털 이미지 처리 기법을 이용해 골재 입자의 형상 특성을 체 분석 결과와 비교·분석하였다. 특히, 2차원 이미지를 3차원 이미지로 변환 및 분석하기 위하여 등가직경이론을 제시하였고, 이를 이용한 형상변환계수 및 수정입도곡선을 작성하여 기존의 체분석 결과와 비교·분석하였다.

2. 디지털 이미지 처리기법 및 3차원 변환

2.1 이미지 처리 기법 개요

이미지처리기법에 대한 연구는 1950년대부터 영상처리 이론 개발과 군사적 목적으로 연구가 시작되었으며, 1970년대에 이르러 2차원 영상처리의 범용장치가 출현하였고 실제계 물체 인식, 장면해석, 공업용 가전제품 응용에 관한 연구가 시작되었으며 반도체 제조공정의 자동화를 중심으로 기술의 실용화가 되었다. 이와 같이 1980년대까지 영상 처리의 실용화를 거쳐, 비로소 1990년대에 영상 처리의 표준화가 진행되기 시작하였고, PC를 기반으로 한 다양한 응용 소프트웨어와

멀티미디어 및 네트워크 응용 시스템이 개발되어 현재는 여러 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 최근 이미지처리 기술은 의학, 생물학, 지리학, 재료공학 등 수많은 연구 분야에 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 시스템은 토목공학 분야에서 콘크리트 미세구조, 도로포장의 균열, 구조물의 변위 등의 연구에 적용되어 왔으며, 실제 적용된 사례도 보고되고 있다. 지반공학 분야에서도 디지털 이미지 분석 기술은 흙의 거동을 정량화하거나 지반 내 물질의 이동 경로를 추정하는데 이용되고 있다.

2.2 이미지 분석 시스템

이미지 분석 시스템이란 특정 대상의 이미지를 획득하여, 이로부터 연속적인 컴퓨터에서 진행할 수 있도록 수많은 데이터를 얻는 장치 및 일련의 과정을 말한다. 이미지 분석 시스템의 기본 데이터 획득은 광학현미경(microscope), 비디오 카메라(video camera), 스캐너(scanner) 등과 같은 장치로 대상 시료의 이미지를 획득하는 것으로부터 시작한다. 전체적인 시스템의 과정은 다음의 5가지 단계로 대별된다(민덕기, 이완진 2004). 이미지 획득(Image capture)은 대상 시료의 이미지를 획득함으로써 개개의 디지털 형식으로 이미지를 코드화하는 것을 말한다. 이미지 코드화(Image coding)는 이미지 습득에서 생성된 이미지를 컴퓨터에 저장하는 것을 말한다. 즉, 컴퓨터에 대상 이미지의 데이터를 픽셀 단위로 하여 좌표값, 명암정도, 밝기 등의 변수를 각각의 픽셀에 부여함으로써 전체 이미지를 구성하는 것이다. 이미지 재구성(Image reconstruction)은 생성된 이미지를 목적에 부합하도록 재구성하는 과정을 말하며, 대부분의 경우에는 필요하지 않는 과정이다. 특히, 이미지 획득의 과정이 충분한 정밀도로 수행되었다면 이 과정은 제외된다. 이미지 수정·개량(Image enhancement)은 중첩된 이미지의 삭제 혹은 분할, 해석에 필요하지 않는 이미지 부분의 삭제, 잡음 제거 등과 같이 목적에 부합하는 이미지를 구하는 과정이다. 이미지 분석(Image analysis)은 위에서 기

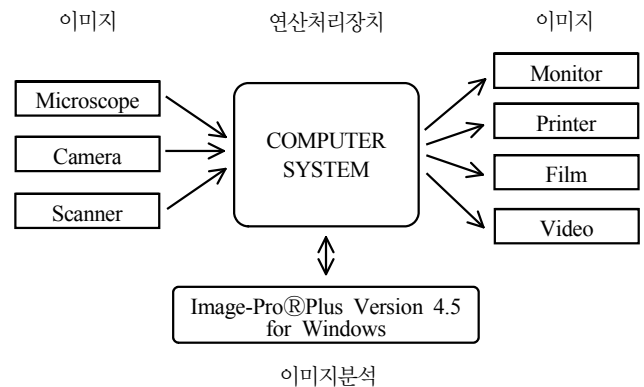


그림 1. 이미지 분석 시스템 (황택진, 2007)

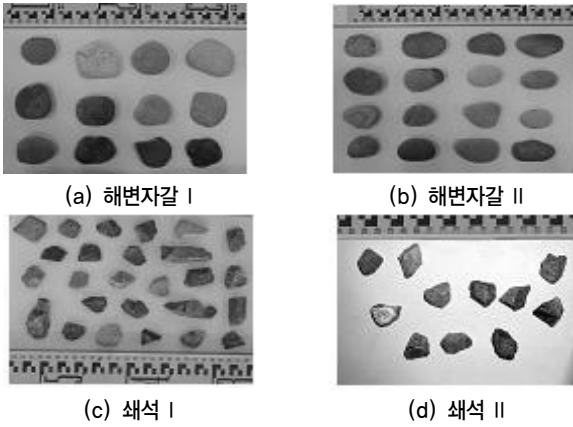


그림 2. 실험시료의 원이미지

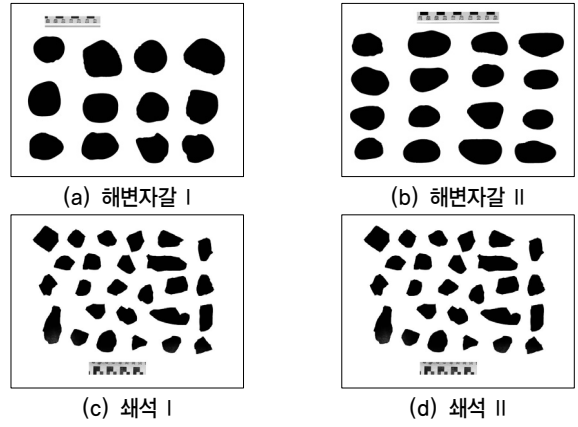


그림 4. DIP기법-수정된 이미지

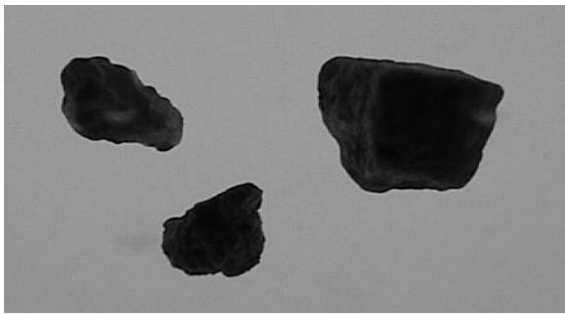


그림 3. 그레이 스케일로 변환

술한 단계를 거쳐 얻어진 이미지로부터 실제 연구에 필요한 변수들을 컴퓨터에 입력되어져 있는 프로그램을 사용하여 구하는 방법이다. 이미지를 처리하여 분석하는 과정은 이미지 획득, 이미지 코드화, 이미지 재구성, 이미지 수정, 그리고 이미지 분석의 단계로 생각할 수 있으며, 이러한 목적을 달성하기 위해 그림 1과 같은 이미지 입력장치, 연산처리장치, 이미지분석 장치 등이 하나의 시스템으로 구성된다.

2.3 디지털 이미지 처리 과정

디지털 이미지의 생성과정은 다음과 같은 순서에 따라 수행되었다. 먼저, 시료의 크기에 따라 이미지 입력장치를 선정하여야 한다. 조립토의 경우 디지털 카메라를 이용하여 직접적인 실험시료의 원이미지를 획득하였다. 그레이 스케일로 이미지 변환된, 그림 2는 조립토를 이용하여 획득한 원이미지이고, 이미지상의 각 픽셀이 흑, 백 및 다양한 색상을 가지고 있으며, 픽셀 크기에 의해 색상의 가지 수가 좌우되는 실제 색상을 가진 이미지이다.

하나의 이미지가 가지고 있는 색상의 일반적인 표현은 적색, 녹색, 청색(RGB)의 색상 값들로 대표 할 수 있고, 이들은 독립된 컬러 필터들을 통한 각 이미지 픽셀의 포착에 의해 얻어진다. 이러한 RGB색상의 조합으로 다른 모든 색상들을 만들 수 있으며, 컬러 이미지는 이러한 RGB색상의 독립적인

그레이 스케일 이미지들의 조합이므로 컬러 이미지 분석의 대부분의 방법들은 그레이 스케일의 이미지와 픽셀 정보가 동일하다. 따라서 본 연구에서는 원이미지를 그림 3과 같이 이미지의 색상정보를 단순화시킨 그레이 스케일 이미지로 변환하였다. 이러한 그레이 스케일의 이미지는 컬러 이미지를 분석하는데 있어서 데이터의 양을 축소할 수 있고, 이미지의 노이즈를 제거할 때 보다 나은 이미지를 획득할 수 있다.

그레이 스케일로 변환된 이미지는 이미지로부터 원하는 정보를 측정하기 위해 배경이미지와 입자이미지를 분리하는 것을 이진영상 처리라고 하며, 이는 측정을 원하는 입자를 검정색으로, 배경을 흰색으로 만드는 작업을 말한다. 입력 장치로 획득 된 이미지 데이터의 경우 낮은 해상도, 뚜렷하지 않은 초점, 그리고 부적절한 조명으로 인하여 실제로 시료에 존재하지 않았던 잡음이 형성되어 이미지의 해상도를 저하시키는 경우가 있다. 이와 같이 잡음을 제거하거나 이미지에서 특정한 형상을 강조하기 위하여 사용하는 기법이 필터링이다. 필터링 방법은 기본적으로 이미지의 일부분 또는 전체에 분포하는 픽셀의 밝기를 변화시켜 줌으로써 이미지 데이터 내에 포함되는 정보를 선택적으로 강조하거나 삭제하는 반복 과정을 통하여 이루어진다.

흑, 백 두 가지 색상만이 존재하도록 이진영상처리를 수행하고, 해석에 필요하지 않는 이미지의 삭제, 잡음 제거 작업을 필터링을 통해 수행하고 그림 4와 같은 수정된 이미지를 얻은 후, Image-Pro®Plus Version 4.5 for Windows를 이용하여 각 시료에 대한 각 입자의 넓이와 길이, 폭을 산출하였다. DIP기법에 의한 이미지의 면적은 프로그램에서 제공하는 실제 이미지의 형상 그대로의 면적을 측정하는 기능으로 측정 된다.

2.4 디지털 이미지의 3차원 변환

디지털 이미지의 3차원 변환은 Mora와 Kwan(2000)이 제안한 평균두께 이론과 Kwan의 이론(2000)을 수정 제안한 등

가직경 이론 등이 있다. DIP기법에 의해 측정된 이미지의 정보를 이용해 시료의 입도분포 특성을 판단하기 위해서는 DIP에 의해 구해진 2차원의 입자 정보를 체적과 중량을 갖는 3차원의 상태로 변환시켜야한다. 즉, 체가름에서 각 체에 남아있는 시료의 양은 무게에 의한 백분율로 표현되나, DIP에서는 시료 입자의 체적과 중량은 측정되지 않는다. 사실 DIP에서의 이미지는 오로지 입자의 2차원적인 투시일 뿐이기 때문에 입자의 두께는 측정이 불가능하다. 따라서 DIP에서 얻어진 굵은 골재의 정보는 오직 수평 투영면에 의한 백분율로 제시되어질 수 있다. 또한 체분석 방법에서 입자의 크기는 입자가 통과하는 체의 크기로 측정되어질 수 있으나 DIP에서는 입자의 크기는 입자의 폭과 같이 동일하지 않다. 그래서 DIP에서 얻어진 면적의 향에서 중량의 향으로 변환 시키는 가장 간단한 방법은 DIP의 측정 결과와 체분석 결과의 상관관계를 설정하는 것이다.

Mora 등(1998a, 1998b)은 DIP 기법에 의한 2차원적인 향을 평균 두께의 개념을 적용하여 3차원의 향으로 전환하고 DIP 기법을 적용한 입도 분포를 구하였다. 하지만 Kwan의 평균 두께 이론은 입자의 두께를 평균적으로 가정하는 이론으로써, 실제 입자의 모양을 적절하게 표현하기에는 다소 무리가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 DIP기법에 의해 측정된 입자의 넓이를 원으로 가정하고 등가 직경(equivalent diameter)을 산출하여 2차원의 면적의 향을 3차원의 체적과 중량의 향으로 환산하는 이론을 제안하였다. DIP기법을 적용하여 산출된 면적 A_i 으로부터 분석 대상 시료의 밀도 ρ 가 모든 입자에 대해 일정하며, 입자의 형상이 유사하다고 한다면, 환산 원의 등가 직경(D_{ei})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_i = \frac{\pi \times D_{ei}^2}{4} \quad D_{ei} = 2\sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad V_i = \frac{\pi \times D_{ei}^3}{6} \times \alpha \quad (1)$$

등가직경(D_{ei})를 갖는 구의 부피는 실제 입자의 체적과 차이가 나므로 환산계수, α 를 사용하여 나타낼 수 있고, 조사 대상의 입자의 형상이 유사하다는 가정으로부터 α 의 대표값은 전체 중량과 전체 체적을 사용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{M_t}{\rho \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi \times D_{ei}^3}{6} \right)} \quad (2)$$

여기서, M_t = 분석시료의 총 단위중량
 ρ = 분석시료의 밀도
 n = 분석시료의 개수

식 (1)에 의해 정의되는 α 를 대입하여 분석시료의 i 번째 체적을 식 (2)와 같이 정의할 수 있으며, 조사시료의 밀도가 일정하다는 가정으로부터 i 번째 분석시료의 중량(M_i)을 식 (4)와 같이 산출할 수 있다.

$$V_i = D_{ei}^3 \times \frac{M_t}{\rho \times \sum_{i=1}^n (D_{ei}^3)} \quad (3)$$

$$M_i = D_{ei}^3 \times \frac{M_t}{\sum_{i=1}^n (D_{ei}^3)} \quad (4)$$

등가직경 이론으로 각각의 중량이 산출된 시료는 등가직경(D_{ei})을 경계로 체 분석에 의한 입경과 동일하게 분리하여 각 경계에 대한 입도분포 곡선을 작성하였다.

3. 입자의 형상 분류

일반적인 입자의 형상분류를 위한 측정법은 표준입자의 모양과 실제의 입자를 비교, 즉 기존의 표준차트인 원마도(roundness)를 평가하기 위한 Krumbein(1991) chart와 구형도(sphericity)를 평가하기 위한 Rittenhouse chart를 이용하여 분류하는 것이다(Vallejo 등, 1995a, 1995b). 그러나 위의 두 표준차트를 이용하여 입자의 형상을 분석 시에는 관찰자의 주관 및 낮은 분별력에 의해 제한되어 있는 실정이다. 입자의 형태는 매우 복잡한 성질로서 정밀하게 기술하기가 쉽지 않고, 매우 다양하고 불규칙한 표면을 갖는 입자의 형상은 측정하기가 어려워 이를 정량화하기가 어렵다는 것은 잘 알려진 사실이다. 입자의 원마도(roundness)는 입자의 투영된 평면에서 모서리들의 내접원의 평균반경과 최대 내접원의 반경의 비로 측정한다. Krumbein chart는 입자의 모서리가 마모된 정도를 정량적으로 0.1~0.9의 범위로 표현한 것으로서, 입자의 모서리가 매우 거친 정도를 0.1, 완전히 마모되어 입자의 표면 거칠기 정도가 매끈한 정도를 0.9로 나타내었다. 입자의 구형도(sphericity)는 입자의 표면적(S)과 그 입자와 같은 체적을 갖는 구의 표면적(s)과의 비 s/S 로 나타낸다. Rittenhouse chart는 입자의 형상이 구에 가까워지는 정도를 표현한 것으로서, 매우 불규칙한 형태를 0.45, 구에 가까운 형태를 0.97로 나타내었고, 입자의 형태가 이상적인 완전한 구형일 경우 1로 나타내고 있다.

입자의 형태는 입자의 장축(a), 중축(b)과 단축(c)의 길이의 비로 나타내는데, 그림 2에서와 같이 중축에 대한 장축의 비로 입자의 신장율을 나타내는 세장비(elongation ratio $q=b/a$), 단축에 대한 중축의 비로 입자의 편평도를 나타내는 flakiness

ratio $p=c/b$ 는 3차원의 형태로 입자를 표현하기 어렵기 때문에 q 에 대한 p , 즉 형상계수(Shape factor) $F=p/q$ 를 이용하였다. 형상계수가 1보다 큰 것은 편장의 형태이고 1보다 작은 것은 편구의 형태이다. 영국BS표준(1989)에서는 박편(flaky) 형태도 긴형태도 아닌 등입방형(equidimensionals), 박편이나 긴형태도 아닌 횡판형(disc), 긴형태이나 박편형이 아닌 장주형(rods), 긴형태이나 박편형인 입판형(blades)으로 나누었으며, elongation ratio와 flakiness ratio가 2/3보다 큰 경우를 등입방형, elongation ratio가 2/3보다 크고 flakiness ratio가 2/3보다 작은 경우를 횡판형, elongation ratio가 2/3보다 작고 flakiness ratio가 2/3보다 큰 경우를 장주형, 그리고 elongation ratio와 flakiness ratio가 2/3보다 작은 경우를 입판형으로 나 타낸다. Lee & Chod(1983)는 이를 세분하여 9개의 형태로 분류하였다.

4. 실험재료 및 기본물성

조립토의 거칠기 및 입자 형상특성을 분석하고, DIP 입도 분석의 결과와 체분석을 비교하기 위한 시료를 선정·채취 하였다. 울산광역시 정자해변의 형상이 다른 해변자갈 2 종류, 콘크리트 배합에 사용되는 쇄석 2 종류 등 4종류의 형상이 다른 시료를 사용하였다. 또한 체가름이 불가능한 시료로 써, 해양 현장에서 많이 사용하는 아모르와 댐 현장에서 사용하는 필터용 시료에 대해, 체가름이 아닌 직접 DIP기법을 사용함으로써 암석시료에 대한 본 연구의 적용성을 검증하고자 하였다. 각 시료의 형태는 해변자갈은 얇거나 두꺼운 평판의 모양을 가지고 있다. 해변자갈 II는 해변자갈 I과 비슷한 형상 분포를 가지고 있으며, 쇄석 I은 해변자갈 II보다 조금 더 두꺼운 평판에 가까운 형상을 가지고 있으며, 쇄석 II는 넓은 형상 분포를 보이나 다른 시료에 비해 구에 가까운 형상을 가진 것으로 판단된다.

체분석 방법은 입자의 크기가 비교적 큰 조립질 시료의 입도분포 분석을 파악하는 가장 일반적인 방법으로써, 기본적으로 입자를 체 눈의 크기 별로 나누어 입도분포를 파악하는 방법이다. 각 체에 잔류하는 입자의 양으로써 입도분포를 분석하는 체분석은 KS-F 2309을 준용하였고, 입도분포 결과는 가로축을 log scale의 입경(mm)으로 세로축을 누가 통과 백분율(%)로 나타내어 입도분포 곡선을 나타낸다. 체 분석에 의한 입도분포를 분석하기 위해서는 입자의 형상에 따라 다음의 두 가지 경우를 고려해야한다. 첫째, 실제 체 분석에서는 체 눈금보다 큰 길이를 가진 입자가 체를 통과할 수 있다. 그림 5와 같은 세장형의 입자는 길이가 체 눈금보다 크어도 불구하고 폭과 두께가 체 눈금보다 작으면 그림과 같이 아무런 문제없이 체를 통과하게 된다. 둘째, 입자의 형상이 매우 얇은 박편의 모양일 경우 그림 6과 같이 체 눈금보다는 입자

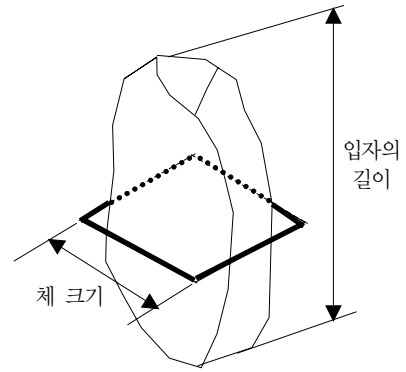


그림 5. 세장형 입자의 체 통과

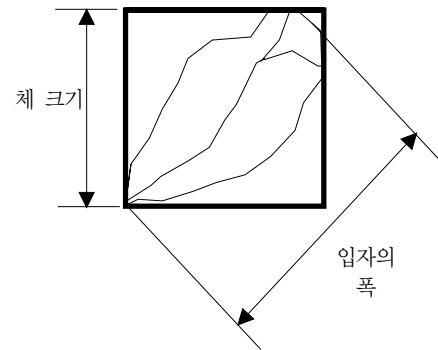


그림 6. 박편형 입자의 체 통과

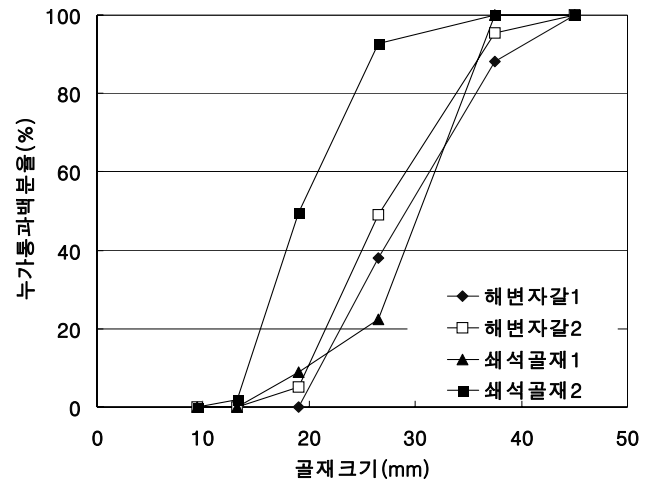


그림 7. 실험재료의 체분석 결과

의 길이와 두께가 크에도 불구하고 입자의 폭이 체의 대각선 길이 보다 작을 때 역시 체를 통과한다. 이와 같이 체 분석에 의한 입자의 입경 정의는 정사각형 체 눈금의 변의 크기로 정의된다.

울산광역시 정자해변의 형상이 다른 해변자갈 2종류를 실험에 사용하였다. 그림 7에 나타난 것과 같이, 해변자갈 I은 19mm~26.5mm 사이의 입자가 대부분 분포하고 있으며,

표 1. 체분석된 시험시료의 입도분포 특성

재료	실험결과	통일분류	#4 통과량 (%)	19mm통과량(%)	Cu	Cc
해변자갈 I		GP	0	1.8	1.44	0.94
해변자갈 II		GP	0	7.2	1.45	0.95
쇄석자갈 I		GP	1.7	9.0	2.13	1.06
쇄석자갈 II		GP	2.6	49.2	3.19	1.03

표 2. 각 시료별 형상계수

재료	항목	Elongation Ratio	Flakiness Ratio	Shape Factor	Sphericity Ratio
주문진표준사		0.76	0.60	1.16	0.79
해변자갈 I		0.86	0.30	0.35	0.61
해변자갈 II		0.66	0.36	0.54	0.54
쇄석 I		0.63	0.47	0.74	0.57
쇄석 II		0.79	0.83	1.04	0.79
필터		0.80	0.75	0.94	0.78
호박돌		0.72	0.76	1.05	0.73

표 3. 입도분석 방법에 따른 균등계수 및 곡률계수

	체분석		Kwan의 평균두께		등가직경	
	Cu	Cc	Cu	Cc	Cu	Cc
해변자갈 I	1.44	0.94	1.38	0.94	1.38	1.0
해변자갈 II	1.45	0.95	1.53	1.01	1.52	1.04
쇄석 I	2.13	1.06	2.15	1.40	2.09	1.45
쇄석 II	3.19	1.03	1.47	1.01	2.50	1.68

87.29% 이었다. 해변자갈 II 역시 19mm~26.5mm 사이의 입자가 대부분 분포하고 있으며, 90.20%이었다. 다른 두 종류의 시료는 콘크리트 배합에 사용되는 쇄석 2종류를 채취하여 체분석을 수행하였다. 쇄석자갈 I의 입경은 19mm의 누적 통과율 13.47%, 25.4mm의 누적 통과율 77.71%의 분포를 대부분 차지하고 있으며, 쇄석자갈 II의 경우는 각각 49.53%, 43.18%로써 나타났다. 표 2는 각각 해변자갈 I, 해변자갈 II 및 쇄석자갈 I, 쇄석자갈 II의 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c) 및 입도 분포 특성 결과를 정리한 것이다. 각각의 시료의 균등계수(C_u)는 1~3의 값을 가지고 있으며, 곡률계수(C_c)는 1 이하로 나타났다. 특히 해변자갈의 경우는 마모가 많이 발생되어 있는 상태이다.

5. 실험결과 분석 및 평가

5.1 입자형상 특성 분석

주문진 표준사는 #4체에 남은 시료의 형상계수를 산출하여 입자의 모양을 정량화 및 분석을 하였다. 주문진 표준사의 형상계수는 세장비를 나타내는 세장비는 0.76, 입자의 모양

이 구형에 가까워지는 정도를 나타내는 구형비는 0.79로써 구형에 가장 가까운 형태를 가지고 있다. 형상계수는 1.16으로 산출되었으며, 해변자갈 I, II은 0.35~0.54, 쇄석 I은 0.74의 범위로 박편 형태의 편평상으로 나타나는데 비해 주문진 표준사의 입자의 모양은 세장형으로 나타났다. 표 2와 같이 해변자갈 I, II는 거의 유사한 형상 특성을 가지고 있는 것으로 보여진다. 세장비는 0.66~0.86의 크기 범위를 나타내며, 주문진 표준사, 쇄석, 필터, 호박돌 등의 시료와 비슷한 세장비의 형상 특성을 가지는 입자 형태를 보인다. 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I과 달리 모든 시료보다 세장비가 작으므로 장축과 중축의 차이가 크고, 긴 입자의 형상특성을 보여주고 있다. 편평비는 모든 시료 중 가장 작은 크기인 0.30~0.36의 값을 보여 모든 시료 중 가장 얇은 편평상의 형태를 가지고 있으며, 1 이상이면 세장형 그리고 1 이하이면 편평상을 나타내는 형상인자는 모든 시료 중에서 가장 작은 0.35~0.54의 크기를 가지므로 역시 입자는 얇은 편평상의 형상을 보여주고 있다. 1에 가까울수록 구형을 나타내는 계수인 구형비는 0.54~0.61의 크기를 보이며 입자의 형상은 타원의 편평상을 보여준다. 결국 해변자갈 I, II는 표 3에 의하면 편평비 값이 거의 0.3

정도의 값을 나타내므로 이것은 입자의 형태가 거의 Plate 및 Thick Plate의 형태 사이에 존재하는 형상특성을 가지고 있다는 것이며, 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I과 비슷한 형상적 분포를 보이나 그에 비해 약간 타원형의 형태를 가진 시료로 판단된다. 쇄석 I, II는 서로 매우 다른 형상 특성을 가지고 있다. 세장비는 0.63~0.79의 크기 범위를 나타내며, 쇄석 II보다 쇄석 I의 세장비가 매우 작으므로 장축보다 중축이 훨씬 작고, 긴 형태의 입자 형상특성을 지니고 있다. 편평비는 0.47~0.83으로 두 시료의 차이가 매우 크므로 완전히 다른 편평도를 가지고 있다. 다시 말해서 쇄석 I은 약간 두꺼운 편평상을 나타내며, 쇄석 II는 모든 시료 중에서 가장 큰 편평비를 가지고 있으며, 거의 구형의 형상 특성을 나타내고 있다. 형상인자는 0.74~1.04의 크기로서 서로 매우 다른 형상 특성을 보여주며, 쇄석 I의 경우는 1보다 작은 편평상의 특성을 보여준다. 쇄석 II는 형상인자가 1.04의 크기를 가짐으로써 세장형의 범위를 나타내지만, 이 경우는 구형비가 0.79의 큰 값을 보여주므로, 거의 구형의 형상 특성을 보여 준다. 쇄석 I의 구형비는 0.57의 크기를 가지며, 구형과는 형상이 다른 약간 두꺼운 편평상의 형상 특성을 나타낸다. 결국 쇄석 I과 쇄석 II는 서로 다른 형상 특성을 가지고 있으며, 특히 쇄석 I은 편평비, 즉 C/B의 비가 0.47로써, 쇄석 II보다는 훨씬 작은 값을 보여주지만 해변자갈보다는 크므로, Plate 형인 해변자갈보다 더욱 두꺼운 Thick Plate에 가까운 형상을 가지고 있다. 쇄석 II는 비교적 넓은 형상분포를 가지고 있으나 해변자갈, 쇄석 I의 편평상에 비해 구형에 매우 가까운 형상특성을 지니고 있다. 쇄석 II의 형상계수는 편평비는 0.83, 구형비는 0.79로써, 거의 구에 가까우므로 본 연구에서 사용하고 있는 입경을 완전한 구로 가정한 등가직경 이론의 적용이 가장 적합한 시료인 것으로 판단된다. DIP입도분석 적용성의 검증용인 호박돌, 필터의 세장비는 0.72~0.80의 크기 범위를 나타내며, 세장비가 비교적 크므로 장축과 중축의 차이가 작은 둥근 형태의 입자 형상특성을 지니고 있다. 편평비는 0.75~0.76으로 쇄석 II보다는 작지만 다른 모든 시료보다는 크므로, 입자의 두께가 두꺼운 둥근 형상 특성을 나타내고 있다. 쇄석 II와 유사하게 형상인자가 거의 1이며, 구형비가 0.73~0.78의 큰 값을 보여주므로 거의 구형의 형상 특성을 보여 준다.

5.2 실측과 DIP에 의한 세장비 및 편평비

2차원 투영면인 압축용 주문진표준사와 해변자갈, 쇄석, 암석시료 등의 실험 대상 시료의 이미지로부터 산출된 DIP에 의한 장축과 중축의 측정 결과를 검증하기 위하여 실측과 DIP에 의한 중축에 대한 장축의 비로 나타내는 세장비를 비교하였다. 형상이 등입방형, 횡판형, 장주형, 입판형의 4가지 유형인 실험 시료의 입자를 무작위로 일정량을 채취하였고 실측과 DIP를 적용하여 입자의 장축과 단축을 측정하였다.

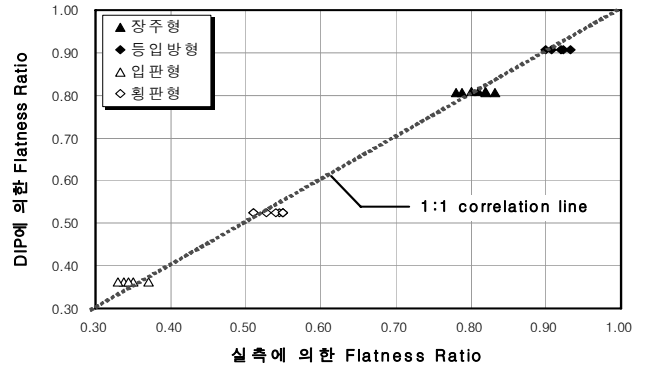


그림 8. 실측과 DIP에 의한 편평비 비교

그림 8은 실측과 DIP에 의한 중축에 대한 장축의 비를 나타내는 세장비를 비교한 결과이다. 1:1 상관 직선에 대하여 입자의 형태분류에 의한 등입방형, 횡판형, 입판형의 형태에서 거의 일치하는 것으로 나타났고, 장주형은 버니어 캘리퍼스 (vernier calipers)에 의한 입자의 크기를 실측 시 발생하는 개인적 오차로 인한 DIP에 의한 세장비와 아주 미소한 차이가 있었다. 따라서 DIP 기술은 매우 다양하고 불규칙한 표면을 갖는 입자의 형상 분석 시에 만족스럽게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9는 편평비에 중속된 매개변수인 λ 를 검증하기 위하여 실측과 DIP에 의한 편평비를 비교한 결과이다. 실측과 DIP에 의한 편평비를 분석한 결과, 1:1 상관 직선에 대하여 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으며, DIP에 의한 편평비를 입자 형태의 분류에 따라 산술 평균하여 실측의 편평비와 비교한 결과 97.5%의 높은 상관도를 나타내었다. 따라서 DIP 기술을 이용한 입자의 정량적인 형상 분석 시 Mora와 Kwan(2000)의 평균두께 산정 방법의 적용으로 실측 시 입자의 단축과 매우 일치하는 2차원 투영면인 입자의 이미지로부터 단축을 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 Kwan 이론과 등가입경이론을 적용한 입도분포곡선

그림 9, 그림 10, 그림 11 및 그림 12는 각각 해변자갈 및 쇄석에 대한 Kwan 이론 및 등가직경 이론에 의한 입도분석 결과를 동일 그래프에 나타내어 비교하였다. 입도분석 결과 체분석에 의한 입도분포는 역시 DIP기법에 의한 입도분포 곡선보다 작은 입경의 분포곡선으로 나타났다. DIP의 평면 이미지를 3차원의 입자로 변환하였으나 이러한 차이점은 역시 입자의 형상특성 즉, 입자의 폭은 동일하나 두께의 차이가 현저하게 발생하는 경우인 편평비 값의 차이에 따라 입도분포의 편차가 나타나는 결과를 보여주고 있다.

그림 9 및 10에서 보여주는 것과 같이 Plate형의 입자형상을 가지고 있는 해변자갈의 경우는 평균두께에 의한 입도분포와 등가 직경의 결과는 비슷한 분포를 나타낸다. 쇄석자갈

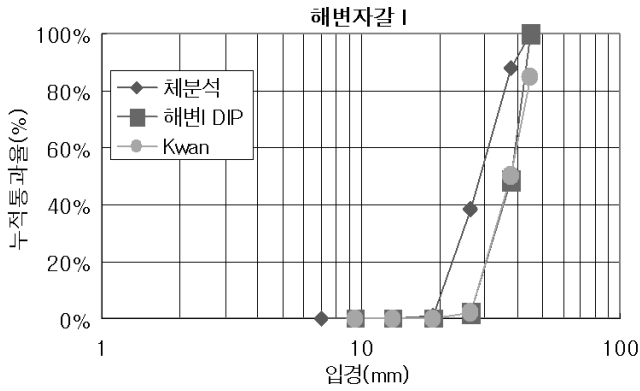


그림 9. 입도분포곡선(해변자갈 I)

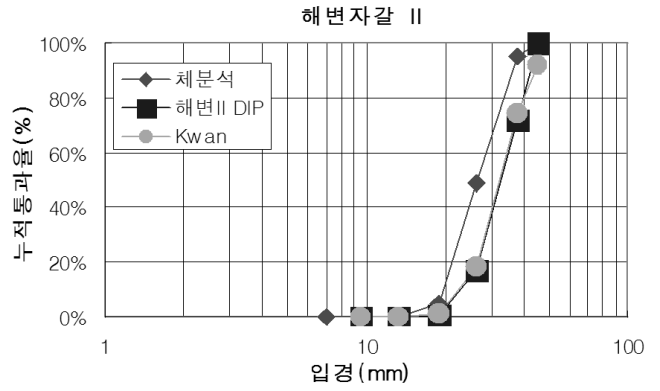


그림 10. 입도분포곡선(해변자갈 II)

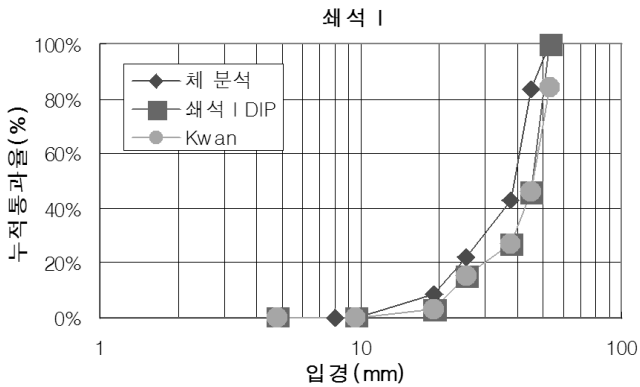


그림 11. 입도분포곡선(쇄석 I)

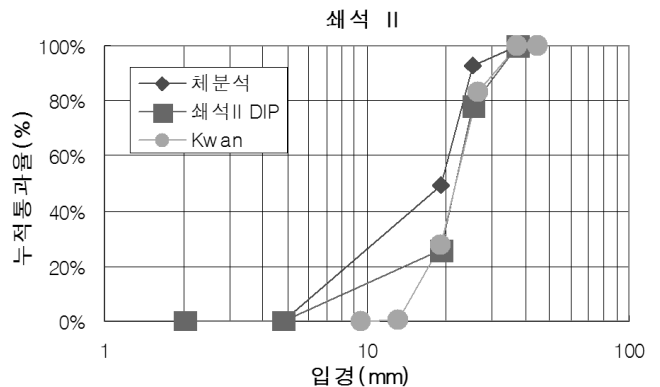


그림 12. 입도분포곡선(쇄석 II)

의 입도 분포를 보여주는 그림 12에서, 특히 구형을 나타내는 쇄석 II의 경우 Kwan의 결과보다 등가 직경의 결과가 체분석과 비교적 유사한 분포를 보여준다. 쇄석 II의 입자 형태는 편평비 값이 0.83, 구형비 값은 0.79로써, 거의 구에 가까우므로 본 연구에서 사용하고 있는 입경을 완전한 구로 가정할 등가 직경 이론의 적용이 가장 적합한 시료인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 그림 7을 통하여 잘 나타나고 있으며, Kwan의 평균두께 이론에 의한 결과는 오차가 매우 크게 나타났다.

그림 9, 그림 10 및 그림 11에 보여주는 바와 같이, 결국 이러한 Plate형 입자의 형상특성의 측면을 고려하면, 해변자갈 I, II 및 쇄석 I의 경우에 DIP의 결과를 이용하여 3차원의 중량 및 체적을 가지는 입자를 모사한 후 시료의 입도분포 분석을 실시하는데 있어서, Kwan의 평균두께 이론과 등가 직경 이론은 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 그림 7과 같이 입자의 형태가 구형인 경우, 즉 쇄석 II와 같이 편평비와 구형비가 큰 값을 나타내는 시료에는 입도분석 시 Kwan의 평균두께 이론을 적용할 수는 없으며, 본 연구에서 제시하고 있는 등가직경 이론의 적용이 가장 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러므로 등가직경 이론은 구형의 형태를 가지는 입자들 뿐 만 아니라 Plate형의 형상특성을 가지고 있는 시료의 입도분석 시에도 체분석의 결과와 가장 잘 일치하는 입도

분포를 보여준다. 결국 입도분석 결과에 영향을 미치는 근본적인 이유로는 기존의 Kwan이론에 의한 입도분석은 입자의 두께를 평균적으로 가정함으로써, 실제 2차원의 이미지를 이용하여 3차원의 입자모양으로 모사를 하는 데 따른 형상적 편차가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

5.4 균등계수 및 곡률계수의 분석

기계적 체분석과 Kwan의 평균두께이론 및 등가직경 이론에 의한 균등계수 및 곡률계수 결과를 표 3에 나타내었다. 체분석과 Kwan의 평균두께 이론의 결과, 해변자갈의 입도분포는 약간의 차이점이 있지만 균등계수와 곡률계수는 유사하게 나타났다. 그러나 쇄석의 경우는 해변자갈보다 차이가 더욱 크게 나타나며, 특히 쇄석 II의 경우 균등계수의 차이가 더욱 크다. 등가직경 이론의 적용 시에 해변자갈의 균등계수와 곡률계수 및 쇄석의 곡률계수는 체분석과 Kwan 이론 및 등가직경 이론의 결과는 유사하거나 차이가 상대적으로 작게 나타난다. 그러나 쇄석 II의 균등계수는 체분석과 Kwan 이론과는 1.72의 매우 큰 차이를 보이지만, 등가직경 이론의 경우는 체분석의 균등계수와 매우 유사한 값을 보인다. 이것은 앞 절에서 언급하였듯이 역시 DIP 이미지를 이용하여 체적을 가지는 3차원 입자의 형태를 모사하기 위해서는 등가직경 이론

을 적용하는 것이 보다 정확한 결과가 나타나며, 향후 입자의 형상특성을 고려한 형상변환계수를 적용하기 위해서는 등가 직경 이론을 적용한 입도분석이 더욱 합리적인 결과를 보여 준다.

5.5 수정입도분포곡선

그림 13, 그림 14 및 그림 15에서 보여주는 해변자갈, 쇄석 I의 경우 평균두께 이론과 등가직경 이론의 결과는 비슷한 분포를 나타내지만 체분석과는 상당히 다른 결과를 보여주고 있다. 그러나 형상변환계수를 적용한 수정입도분포 곡선은 모두 체분석 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 보여 준다. 특히 입자의 모양이 구형인 쇄석 II의 그림 16에서 Kwan의 결과 외에 등가직경 이론의 결과도 비교적 체분석의 결과와 오차가 있음을 보여주며, 이것은 역시 입자의 형상에 따른 효과를 적용하지 못하였음을 보여주는 것으로 사료된다. 결국 쇄석 II 시료의 DIP 등가직경 이론의 결과에 형상변환계수를 적용한 그림 15의 수정입도분포곡선의 결과는 체분석의 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 보여 준다. Kwan이론이 적용 가능한 형상 특성의 범위를 정량적으로 표시할 수 있다. 입자 형상특성 분석 결과로부터 Kwan의 평균두께에 의한 방법이

적용 가능한 편평도의 범위는 약 0.5이하의 값을 보여주며, 편평도의 값이 0.6이상의 범위에 대해서는 적용하기 어려운 것으로 판단된다. 해변자갈 I, II는 편평비 값이 거의 0.3 정도의 값을 나타내므로 이것은 입자의 형태가 거의 Plate 및 Thick Plate의 모양을 가지고 있다는 것이며, 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I과 비슷하지만 더욱 타원형을 띄고 있다. 또한 쇄석 I의 경우는 Thick Plate의 형태와 비슷하며 편평비 값은 0.47로써, 해변자갈보다는 크지만 쇄석자갈 II보다는 훨씬 작은 값을 보여준다. 이러한 결과로 부터 알 수 있듯이, DIP 처리 이미지에 대해 입자의 직경을 완전한 구로 가정 한 등가직경 이론을 적용하는 것이 보다 광범위한 형상특성을 가지는 시료의 입도분석을 실시하는데 있어서 좋은 결과를 보여주는 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 DIP 결과를 이용한 입도 분석을 실시하는 목적은, Lee 등이 제안한 형상분류표에 따라, Plate형에서 구형의 광범위한 실질적인 입자의 형상특성을 고려하여 입도분석에 적용하기 위한 것이다. 그러므로 본 연구에서는 표 2에 제안된 형상변환계수를 적용함으로써, 현실적인 입도분석의 기준이 되는 체분석에 가장 잘 일치하는 입도분포 곡선을 구할 수 있었다. 현재의 보편적 입도분포 분석 시의 실험 방법은 현실적으로 체분석의 결과를 기준으로

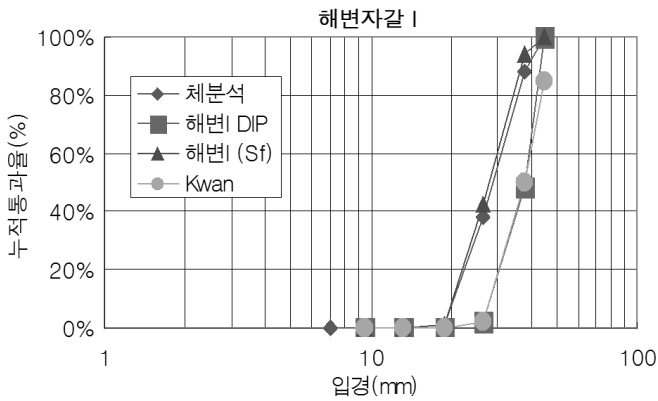


그림 13. 수정입도곡선(해변자갈 I)

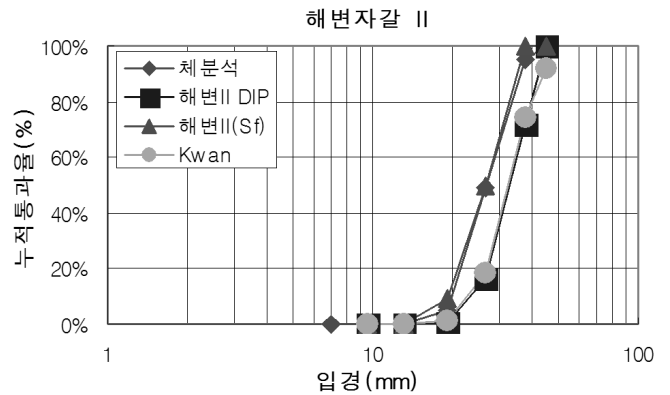


그림 14. 수정입도곡선(해변자갈 II)

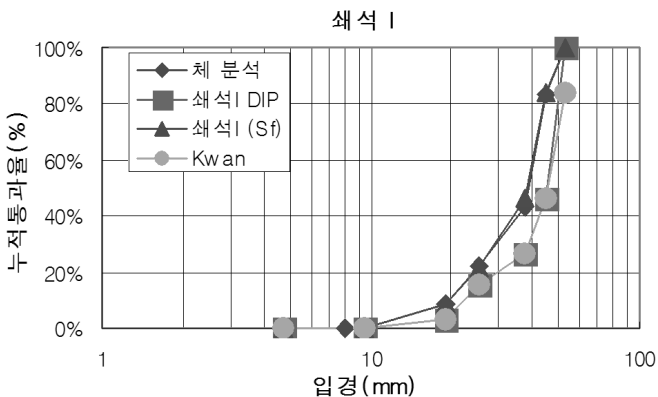


그림 15. 수정입도곡선(쇄석 I)

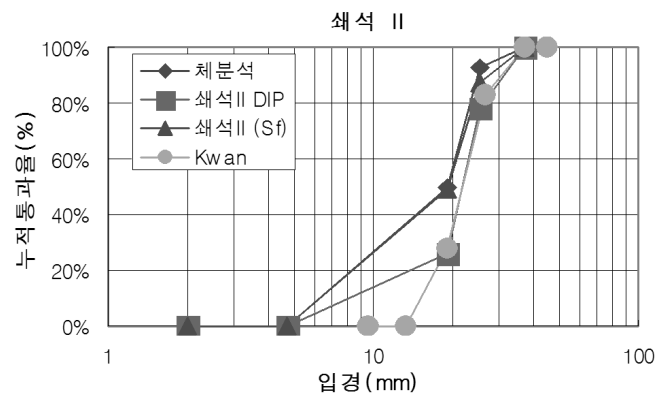


그림 16. 수정입도곡선(쇄석 II)

정하고 있으나, 이러한 형상특성에 따른 편차를 기계적인 체 분석 방법에서는 역시 극복하지 못하고 있다. 그러므로 본 DIP기법에 의한 입도분석은 이러한 물리적 오차를 극복할 수 있는 연구 방법이 될 수 있으며, 나아가 체분석이 불가능할 정도로 입경이 큰 시료들을 쉽게 입도 분석할 수 있는 연구 결과를 제시하였다.

6. 결론

본 연구에서 디지털 이미지 분석법을 이용하여 해변자갈 및 쇄석, 필터재료, 호박돌에 대하여 입자 형상특성의 분석과 정량화, 입도분석 등을 수행하였다. 제한된 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 해변자갈 I, II의 형상계수는 0.35~0.54, 쇄석 I은 0.74의 범위로 박편 형태의 편평상으로 나타나는데 비해 주문진 표준사의 입자의 모양은 세장형으로 나타났다. 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I과 달리 모든 시료보다 세장비가 작으므로 장축과 중축의 차이가 크고, 긴 입자의 형상특성을 보여주고 있다.
2. 해변자갈 I, II는 편평비 값이 거의 0.3 정도의 값을 나타내므로 이것은 입자의 형태가 거의 Plate 및 Thick Plate의 형태 사이에 존재하는 형상특성을 가지고 있다는 것이며, 특히 해변자갈 II는 해변자갈 I과 비슷한 형상적 분포를 보이나 그에 비해 약간 타원형의 형태를 가진 시료로 판단된다.
3. 2차원 투영면인 압축용 주문진표준사와 해변자갈, 쇄석, 암석시료 등의 실험 대상 시료의 이미지로부터 산출된 DIP에 의한 장축과 중축의 측정 결과를 검증하기 위하여 실측과 DIP에 의한 중축에 대한 장축의 비로 나타내는 세장비를 비교하였다. 형상이 등입방형, 횡판형, 장주형, 입판형의 4가지 유형인 실험 시료의 입자를 무작위로 일정량을 채취하였고 실측과 DIP를 적용하여 입자의 장축과 단축을 측정하였다. 1:1 상관 직선에 대하여 입자의 형태분류에 의한 등입방형, 횡판형, 입판형의 형태에서 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 DIP 기술은 매우 다양하고 불규칙한 표면을 갖는 입자의 형상 분석 시에 만족스럽게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
4. DIP기법을 입도분포 특성 분석에 적용할 때, 2차원 향을 3차원 향으로 변환시키기 위하여 등가직경 이론을 제안하였다.
5. 실험에 사용된 해변자갈 및 쇄석골재가 임의 현장에서

의 입도 기준을 만족하는지를 분석하기 위하여 DIP에 의한 입도분포 분석을 수행한 결과, 적용성이 입증되었으며 체분석에 의하여 수행될 수 없는 입자 크기가 매우 큰 대골재 시료에 대해 DIP기법의 입도분포분석의 적용은 매우 유용한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 민덕기, 이완진(2003), "Fragmentation 프랙탈을 이용한 입도분포 분석", 한국지반공학회 논문집, 19(2): 199~206.
2. 민덕기, 이완진(2004), "풍화잔류토에 대한 체 분석시험 규정에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 24(3C): 167~175.
3. 이종익(2003), "디지털 이미지 처리를 이용한 조립토의 형상 특성 분석", 석사학위논문, 울산대학교.
4. 황택진(2007), "디지털 이미지 처리기법을 이용한 대골재의 입도분포 분석에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교.
5. Bernhardt, C. (1994), "Particle Size Analysis; Classification And Sedimentation Methods", Chapter 7, 197-239, Chapman & Hall.
6. BS(British Standards Institution) (1989), "Methods for determination of particle shape: flakiness index, BS 812:105.1.
7. Krumbein, W.C. (1991), "Measurement of geological significance of shape and roundness of sedimentary particles", Sediment Petrol II, 64-72.
8. Lee, H. and E. Chou (1993), "Survey of image processing applications in civil engineering", in: Proceedings, EF/NSF conference on Digital Image Proceeding : Technique and Applications in Civil Engineering, ASCE, Hawaii, March, 203-210.
9. Li, L., Chan, P., Zollinger, D.G. and Lytton, R.L. (1993), "Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals", ACI Mater J 90, 357-365, April.
10. Mora, C.F., Kwan, A.K. and Chan, H.C. (1998a), "Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing", Pergamon, Cement and Concrete Research, 28(6): 921~932.
11. Mora, C.F., Kwan, A.K. and Chan, H.C. (1998b), "Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing", Pergamon, Cement and Concrete Research, 29: 1403~1410.
12. Mora, C.F. and Kwan, A.K. (2000), "Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing", pergamon, cement and concrete research, 30: 351~358.
13. Vallejo, L.E. and Zhou, Y. (1995a), "Fractal approach to measuring roughness of geomembranes", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 442-446, May.
14. Vallejo, L.E. and Zhou, Y. (1995b), "The relationship between the fractal dimension and krumbein's roundness number", Soils And Foundations 35(1): 163~167, Mar.