

ORIGINAL ARTICLE

인공 퇴적암의 모래입자 크기와 함량이 역학적 성질에 미치는 영향에 관한 연구

변훈, Sayedalireza Fereshtenejad, 송재준*

서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

A Study on the Effect of Grain Content and Size on Mechanical Properties of Artificial Sedimentary Rocks

Hoon Byun, Sayedalireza Fereshtenejad, and Jae-Joon Song*

Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

*Corresponding author: songjj@snu.ac.kr

Received: February 21, 2018

Revised: March 13, 2018

Accepted: March 20, 2018

ABSTRACT

The relationship between the mechanical and textural properties of sedimentary rocks has been studied for decades. However, inconsistencies in the results have arisen from both the inhomogeneity of natural rocks and the difficulties encountered in controlling just one textural factor of interest in each experiment. This work produced artificial sedimentary rocks to enable control of every independent parameter at all times. Their homogeneity lowered the deviation of the results, and thus they produced clearer correlations than for natural rocks. The samples were made by mixing bassanite powder with water and silica sand, which produced rocks consisting of sand and gypsum cement. The effect of grain content and size on mechanical properties such as uniaxial compressive strength, Young's modulus, and seismic velocity was estimated. Increasing grain content lowered the compressive strength but raised Young's modulus and seismic velocity. Overall, grain size did not linearly affect the mechanical properties of the samples, but affected them in some way. In future, these results can be compared and integrated with similar experiments using different cement or grain types. This should allow comparison of the effects of the rock constituents themselves and their interactions, with applicability to all kinds of sedimentary rocks.

Keywords: Artificial sedimentary rocks, Grain content, Grain size, Seismic velocity, Uniaxial compressive strength, Young's modulus

초록

퇴적암의 역학적 성질과 구조적 성질간의 관계는 오랫동안 연구되었다. 그러나 암석의 불균질성과 실험에서 여러 구조적 성질 중 오직 하나의 영향인자만을 변화시키는 것의 어려움 때문에 실험 결과들간의 불일치가 관찰되어왔다. 본 연구에서는 인공 퇴적암을 사용해 역학적 성질에 영향을 미치는 모든 요인을 통제할 수 있도록 하였으며, 실제 암석에 비해 균질성을 높였다. 이로 인하여 실험 결과들의 편차가 낮아졌으며, 실제 암석에 대한 실험보다 더욱 명료한 상관관계가 밝혀졌다. 실험에 사용된 시료는 반수석과 파우더를 물과 규사와 혼합하여 만들었으며, 완성된 형태의 인공 퇴적암은 입자 알갱이로서의 모래와, 교결물질로서의 석고로 이루어졌다. 이 인공 퇴적암으로 모래입자의 비율과 크기가 일축압축강도, 탄성계수, 그리고 탄성파속도에 미치는 영향을 분석하였다. 모래입자의 비율을 높일수록 일축압축강도는 줄



어 들었으며, 탄성계수와 탄성파속도는 증가하였다. 전반적으로 모래입자의 크기는 암석의 역학적 성질과 비선형적인 관계를 보였다. 여기에서의 연구 결과는 추후에 다른 종류의 교결물질이나 입자 알갱이를 사용한 연구와 통합될 수 있다. 이로부터 입자 알갱이나 교결물질의 종류, 혹은 교결물질과 입자 알갱이 간의 상호작용 등이 암석의 역학적 성질에 끼치는 영향에 대한 고찰이 가능할 것이며 그 결과는 다양한 종류의 퇴적암에 적용 가능할 것이다.

핵심어: 인공 퇴적암, 모래입자 함량, 모래입자 크기, 탄성파 속도, 일축압축강도, 탄성계수

서론

입자의 크기와 형상, 석영 함량 등의 암석 구성요소의 특성으로부터 암석의 역학적 성질을 추론하는 방법에 대해 많은 연구가 이루어져왔다(Olsson, 1974, Onodera and Asoka Kumara, 1980, Gunsallus and Kulhawy, 1984). Howarth and Rowlands(1987)는 입자의 형상과 구조를 포함하여 다양한 요소 특성을 고려한 texture coefficient라는 개념을 도입하였다. Ersoy and Waller(1995)는 다양한 암석에 대해 texture coefficient과 더불어 다양한 구조적 특성과 일축압축강도, 간접인장강도, 탄성계수 등의 역학적 성질간의 관계를 찾고자 하였다. Gupta and Sharma(2012)는 탄성파 속도가 암석 입자의 종횡비(aspect ratio), 크기, 방향과 양의 상관관계를 갖는다는 사실과 texture coefficient를 높일수록 일축압축강도가 증가함을 보였다.

많은 연구자들이 육지 표면의 70% 이상을 덮고 있는 퇴적암의 중요성을 인식하여 퇴적암의 역학적 성질과 암석 구성 요소 및 구조적 특성간의 관계를 연구하였다. 예를 들면 공극률과 역학적 성질과의 관계(Bell, 1978, Dobereiner and Defreitas, 1986, Shakoor and Bonelli, 1991, Palchik, 1999), 그리고 석영 함량과 역학적 성질과의 관계(Fahy and Guccione, 1979, Gunsallus and Kulhawy, 1984, Bell and Culshaw, 1998) 등이 여기에 포함된다. 퇴적암의 주요한 구조적 특징인 입자 크기와 교결물질 함량이 역학적 성질에 미치는 영향도 많이 연구되었으나, 여러 실험 분석 결과가 항상 일치하지는 않았다. Bell(1978)은 상관관계는 약하지만 사암에서 교결물질의 비율이 높아지면 강도가 낮아지는 현상을 발견했다. 그러나 이와 반대로 교결물질의 비율과 강도간의 약한 양의 상관관계도 관측되었다(Fahy and Guccione, 1979, Clough et al., 1981, Shakoor and Bonelli, 1991). 뿐만 아니라 입자의 크기와 강도간의 음의 상관관계가 관측된 연구가 있었으나(Fahy and Guccione, 1979, Bell and Culshaw, 1993), 또 다른 연구에서는 두 특성 간의 유의미한 관계가 없는 것으로 밝혀지기도 하였다(Bell, 1978, Fahy and Guccione, 1979, Shakoor and Bonelli, 1991). 한편, 교결물질의 양은 탄성계수와 무관하고(Bell, 1978, Shakoor and Bonelli, 1991), 입자의 크기도 탄성계수와 상관관계가 없거나 매우 작게 보고되었으나(Shakoor and Bonelli, 1991, Palchik, 1999). Palchik(1999)는 입자 알갱이의 크기가 탄성계수에 영향을 미치는 것을 확인했다.

전반적으로 퇴적암을 이용한 실험에서 얻은 분석 결과들은 서로 일치하지 않는 경우가 많았는데 이는 암석의 특성상 엄밀한 실험 조건에서 민감도 분석을 수행하기 어렵다는데 그 원인이 있는 것으로 보인다. 암석의 역학적 성질이 다양한 구성 요소에 의해 영향을 받지만 민감도 분석에서는 현실적으로 그 원인이 되는 파라미터의 수를 몇 가지로 제한하게 된다는 것과, 암석의 특성상 그나마도 분석 대상 파라미터 외에 다른 구성 요소(파라미터)들을 서로 완전히 일치시킨 상태에서 실험하기가 불가능하다는 한계가 있는 것이다. 즉, 어떤 실험에서 특정 파라미터에 의해 영향을 받는 것으로 나타난 역학적 성질이 사실은 고려대상이 된 (또는 되지 않은) 다른 영향 요소들과의 복합적인 관계에서 결정되는 것일 수 있다. 그러므로 보다 엄밀한 민감도 분석을 위해서는 하나의 구성 요소가 변하는 동안 다른 구성 요소는 고정시킬 수 있는 인공 퇴적암의 필요성이 대두된다. 예를 들어 두 종류의 사암 시험편이 같은 모래입자의 비율을 갖더라도 이 모래입자들이 시험편 내에 고르게 분포한 경우와 그렇지 않은 경우는 역학적 성질이 다르게 나타날

수 있다. 그러나 인공 퇴적암은 보다 균질하게 만들 수 있으므로 시험편 내부 모래입자들의 분포에 영향을 받지 않고 순수하게 모래 입자 비율의 영향을 분석할 수 있게 된다. 이러한 장점으로 인공 퇴적암을 사용한 실험은 실제 암석을 사용한 실험 결과를 보완하는 방식으로 사용될 수 있다.

인공 퇴적암을 활용해 교결물질 양과 모래입자 크기에 따른 역학적 성질 변화에 대한 몇몇 연구가 진행되었으나 대부분 콘크리트에 대한 연구였다. 콘크리트는 보통 자연에서 얻어지는 골재에 칼슘실리케이트 수화물이 주 성분인 시멘트를 혼합한 것이다. 콘크리트를 퇴적암에 비교하면 시멘트는 퇴적암의 교결물질과, 그리고 골재는 퇴적암 입자 알갱이와 유사한 역할을 한다. 콘크리트의 강도에 골재의 양과(Ward, 1964, Johnston, 1970, Cetin and Carrasquillo, 1998) 크기가(Wu et al., 2002, Meddah et al., 2010) 미치는 영향은 많이 연구되었다. Fattahpour 등(2014)은 포틀랜드시멘트를 이용해 인공 사암을 만들어서 교결물질과 입자 알갱이가 일축압축강도에 미치는 영향을 분석하였다. David, Menendez and Bernabe(1998)는 silica-glass 시멘트를 사용해서 교결물질 양과 암석의 역학적 거동간의 관계를 연구했다. 교결물질의 종류는 입자 알갱이들 간의 결합의 성질에 큰 영향을 미치기 때문에(Bruno and Nelson, 1991) 시멘트 외에 다양한 종류의 교결물질을 사용한 실험을 실시하여 그 결과를 비교해볼 필요가 있다.

이 연구에서는 자연 상태 퇴적암에서 자주 볼 수 있는 교결물질인(Goodman, 1993) 석고 교결물질을 모사하기 위해 반수석고를 사용하였고 퇴적암의 입자 알갱이를 모사하기 위해 모래를 사용하였다. 석고 반죽과 모래입자를 혼합하여 인공 퇴적암 시료를 만들고, 이 시료를 이용하여 입자 알갱이 크기와 교결물질 함량에 따른 역학적 성질을 분석하는 실험을 하였다. 본 연구에서 분석한 역학적 물성은 일축압축강도, 탄성계수, 그리고 탄성파속도이다. 시료 구성물이 교결물질과 모래입자들로만 이루어져 있으므로 교결물질 함량의 반대되는 의미로 모래입자 함량을 사용하였다. 실험에 사용된 모래입자의 직경은 전형적인 모래의 범위에 속하도록 한정시켰다. 따라서 본 연구 결과는 특히 사암에서의 모래입자의 크기와 함량에 따른 역학적 성질을 분석하는 것에 활용될 수 있다.

실험 방법

인공 퇴적암 시료

실험에 사용된 모래(규사)는 96%의 이산화규소와 2.44%의 산화알루미늄, 0.41%의 산화철(III), 그리고 1.15%의 기타 성분으로 이루어져 있다(한국화학융합시험연구원 분석 결과). 이 규사를 진동체(DGVS_800-3; 대가파우더시스템)로 입도에 따라 나누었다. 전체 입도의 범위는 0.2 - 1.08 mm인데 이는 전형적인 모래의 입도 범위(Table 1)에 속한다. 모래를 직경에 따라 세 그룹으로 나누고(coarse, medium, fine; Table 2) 이후 각 그룹별로 인공 퇴적암을 제작하였다.

Table 1. Specified diameter range of sand

Specified diameter	Suggested standard		
	AASHTO ^a	USDA ^b	USCS ^c
Upper limit (mm)	2	2	4.75
Lower limit (μ m)	50	75	75

^aASTM D3282-15 (2015). ^bSoil Survey Staff (1993). ^cASTMD2487-11 (2011)

Table 2. List of the group of grains used in the experiment

Classification of grains ^a	Sieve (mesh) size	Diameter range (mm)
Coarse	16-20	0.76-1.08
Medium	20-30	0.49-0.76
Fine	30-70	0.20-0.49

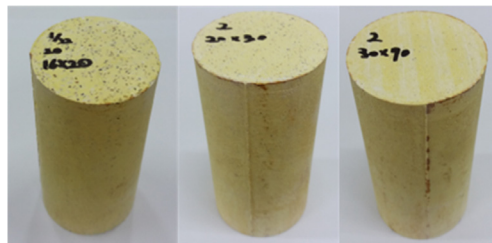
^aThese names are given only for relative size comparison

교결물질로서는 99%이상의 반수석고($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$)로 이루어진 공업용 석고(MR-150; (주삼우화학)를 사용하였다. 이 반수석고 파우더를 물이랑 섞으면 화학 반응을 통해 석고가 되는데 이 석고를 교결물질로 하여 모래입자들을 결합시킨다. 반수석고 파우더를 질량비 3:1로 물과 혼합하였고 경화되기 전에 모래와 섞은 후 금형에 부어 인공 퇴적암을 제작하였다. 모래 없이 교결물질로만 이루어진 순수 석고 시료도 제작하고 그 역학적 물성을 측정하였다(Table 3). 순수 석고 시료의 포아송비를 측정하기 위해 3개의 시료를 사용하였으며, 그 외 물성들을 측정하기 위해 7개의 시료를 사용하였다.

Table 3. Properties of the gypsum cement

Density (g/cm^3)	UCS (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)
1.75	38.3	8.24	0.275	3,325	1,858

시험편 모래의 질량 비율은 10%부터 50%까지 10% 단위로 증가시키며 만들었다. 이 수치는 실제 암석에 비해 낮은 값이나 인공 퇴적암을 제작하는 과정에 존재하는 기술적인 어려움으로 인해 최대 질량 비율을 50%로 제한하였다. 5가지 모래 함량 각각을 3가지의 입자 크기로 구분하였으므로 총 15종류의 시료가 만들어졌다. 각 조합당 실험은 최소 3번씩 반복하였다. 시험편의 높이와 직경은 각각 100 mm와 50 mm이고, 무게를 고려하여 각 시험편의 밀도를 계산하였다. 모든 시험편은 금형을 통해 붓고 4일간 양생시켰다. Fig. 1은 20%의 모래 함량과 각기 다른 모래입자 크기를 갖는 인공 퇴적암 시료의 사진이다. 시험편 밑면에 모래입자의 분포가 잘 드러나지만 가는 모래를 섞은 시험편의 경우에는 육안으로 잘 관찰이 되지 않아 현미경 사진을 통해 재확인하였다. 현미경 사진은 45 배율의 현미경과 Optika Vision Pro 소프트웨어(OPTIKA Microscopes Corporation)로부터 얻었다. 모래 함량 40%인 시료의 밑면 사진(Fig. 2)은 시료별 모래입자 크기의 변화를 잘 보여준다. 시료들의 평균 밀도는 Fig. 3에 나타나있다. 시편의 밀도는 모래 함량을 높일수록 높아졌는데 이는 그래프에서 알 수 있듯이 모래의 밀도($2.43 g/cm^3$)가 교결물질의 밀도($1.75 g/cm^3$)보다 크기 때문이다.

**Fig. 1.** Artificial sedimentary rock specimens consisting of 20% silica sand grains and gypsum cement. From left to right: coarse, medium, and fine sand-grained

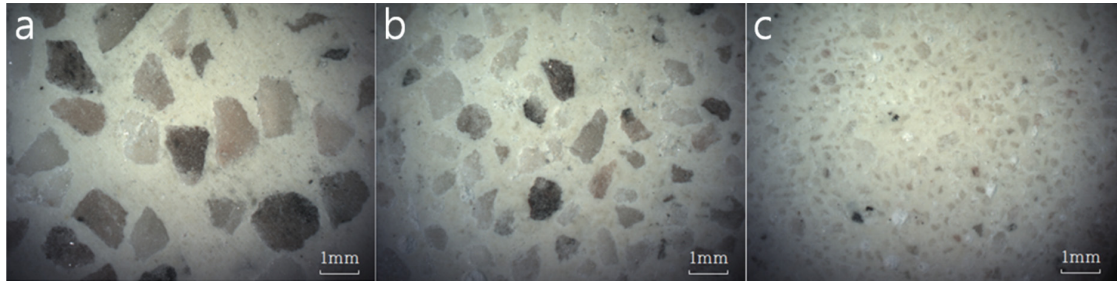


Fig. 2. Photomicrographs of the base surfaces of specimens containing 40% (a) coarse, (b) medium, and (c) fine grains

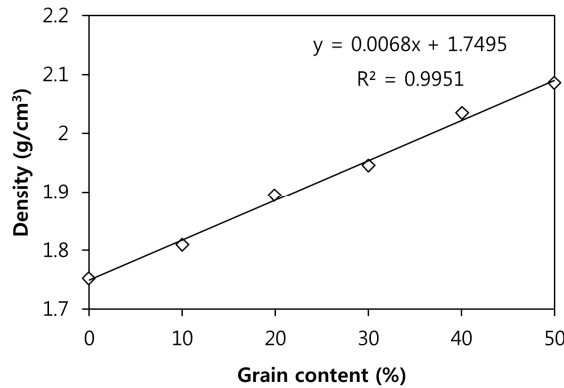


Fig. 3. Variation in density with grain content

실험 장비 및 절차

인공 퇴적암을 사용하여 다양한 실험을 수행하였다. Sonic Viewer-SX(OYO Corporation)를 이용하여 탄성파 속도(P파와 S파)를 측정하였고 MTS 816.04 System(MTS Corporation)과 스트레인 게이지로 일축압축강도와 탄성계수, 포아송비를 측정하였다. 순수 석고 시료와 인공 퇴적암의 탄성계수는 MTS 장비 자체의 변위값과 LVDT(CDP-10M BBW110059, Tokyo Sokki Kenkyujo Corporation)로 측정된 값들을 사용하였다. 단축압축 시험에서 하중은 0.4 mm/min의 일정 속도로 가압하였으며, 단축 하중 하에서의 하중과 변형 데이터는 0.2초 간격으로 수집하였다. 탄성파 속도, 일축압축강도, 탄성계수 측정은 동일한 조건의 시험편으로 최소 3번씩 반복한 후 평균값을 취하였다. 그 결과 모래 함량 5종류와 모래 크기 3종류에 대한 총 15가지 조합에 대해 탄성파 속도, 일축압축강도, 탄성계수의 대푯값이 얻어졌으며, 이를 분석에 활용하였다. Fig. 4는 파괴 시험을 수행한 시료의 모습을 보여 준다. 파괴면에 균질하게 보이는 모래입자들을 통해 시험편을 구성하는 모래입자들의 균질성을 확인할 수 있었다.



Fig. 4. Failure surface and distribution of grains inside an artificial sedimentary rock. This specimen contains 40% coarse grains

암석의 모래입자 함량과 크기를 결정하는 방법

인공 퇴적암을 이용한 연구의 결과를 이용하여 실제 암석의 물성을 추정하기 위해서는 두 종류의 암석을 구성하는 성분의 함량과 크기를 측정 또는 추정할 수 있어야 한다. 인공 퇴적암을 만들 때 전체 구성 입자의 함량과 크기는 직접 조정할 수 있으나 실제 암석의 경우에는 일부(모래)입자의 함량과 크기를 통해 전체를 추정하는 방법을 이용해야 한다. 따라서 여기에서는 현미경을 이용한 암석시료의 편평한 부분에 대한 표본 관찰을 통해 시료전체의 모래입자 크기와 함량을 추정하였다.

시료구성 입자의 형상을 구로 가정할 때 시료의 임의의 단면에서 관찰되는 입자단면의 직경은 입자구의 직경보다 항상 작다. Fig. 5는 모래 입자들을 포함하는 높이 H , 단면적 S 의 시료를 나타낸 것으로 시료의 수평 단면에 나타나는 모래 입자 형상을 보여준다. 암석의 표면에 보이는 모래입자의 직경을 이용해 실제 모래입자의 직경을 계산하는 방법이 Krumbein and Pettijohn(1938)에 의해 제안되었다. 모래입자의 모양을 구형으로 가정할 때 시료 단면에 보이는 모래입자의 직경과 실제 구형 모래입자 직경의 비율은 $\pi/4$ 이다. 따라서 이 관계를 이용하면 모래 입자의 단면 크기를 통해 실제 모래입자의 직경을 간단히 계산할 수 있다.

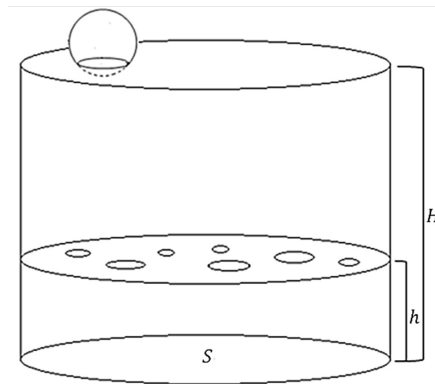


Fig. 5. Schematic representation of a grain inside a specimen and an image of grains on a plane inside the specimen

다음으로 시료의 단면에 보이는 모래입자의 함량으로부터 실제 모래입자의 함량을 예측해야 한다. 시료의 단면에서 측정할 수 있는 것은 모래입자의 면적(비)이므로 이를 통해 시료 전체에서 모래입자의 부피(비)를 계산하는 과정이 필요하며 이는 면적에서 부피로의 차원변환 문제에 해당한다. 결론적으로 모래입자의 부피비는 단면에서의 면적비와 같다. 이것은 Cavalieri의 원리(Rosenthal, 1951)를 통해 증명할 수 있다. Cavalieri의 원리는 공간상의 두 입체를 서로 나란한 임의의 평면으로 잘랐을 때, 두 단면의 넓이가 같으면, 두 입체의 부피는 같다는 원리이다.

여기에서는 먼저 Cavalieri의 원리로부터 간단한 따름정리를 만들어 다수의 입자로 구성된 암석에서 면적비가 부피비와 같음을 증명하였다. 만약 세 입체 A, B, C 가 같은 높이를 갖고 단면적이 바닥면으로부터 높이 h 에서 각각 $S_A(h), S_B(h), S_C(h)$ 라고 하고, $S_A(h) + S_B(h) = S_C(h)$ 를 만족시킬 경우 C 의 부피는 A, B 부피의 합과 같다. 이에 대한 증명은 다음과 같다. A 와 높이가 단면적은 같지만 단면의 모양은 다른 입체 A' 을 생각하면(Fig. 6) Cavalieri의 원리에 의해 A 와 A' 의 부피는 같다. 마찬가지로 B 의 부피도 입체 B' 과 같다. 가정에서 C 의 단면적이 A 와 B 의 합과 같았으므로, C 의 부피도 단면이 A' 과 B' 의 합으로 이루어진 입체 C' 의 부피와 같다(Fig. 6). Fig. 6에서 C' 의 부피가 A' 와 B' 의 부피의 합과 같음을 알 수 있으므로 C 의 부피는 A 와 B 의 부피의 합과 같음이 증명된다. 같은 방식으로 이 따름정리는 매우 많은 수의 입체들에 적용될 수 있다. 만약 하나의 큰 입체의 단면적이 나머지 입체들의 단면적의 합과 같고 모든 입체들이 높이가 같으면, 그 큰 입체의 부피는 나머지 입체들의 부피의 합과 같다. 이

원리를 통해 Fig. 5의 단면을 참고해서 원 문제를 해결할 수 있다.

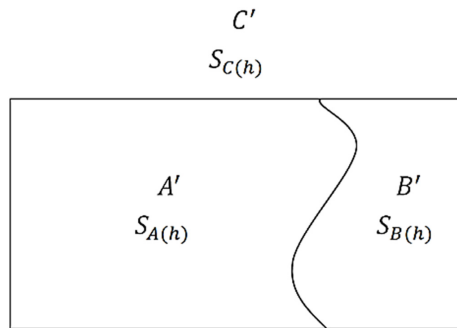


Fig. 6. Schematic cross-section of three solid bodies. The cross-section of C' is the union of the other two solid bodies

계산의 편의를 위해 모래입자들은 시험편 내에 고르게 분포되어 있어 밑면과 평행한 모든 단면에서 모래입자의 면적비는 같다고 가정한다. 하지만 모래입자의 모형을 구형으로 가정할 필요는 없다. 가정에 의해 밑면과 평행한 모든 단면에서의 모래입자의 총 면적 S_g 는 일정하며 바닥에서부터 높이 h 인 단면에 존재하는 모래입자가 $n(h)$ 개 일 때 각 모래입자의 단면적을 $S_1, S_2, \dots, S_{n(h)}$ 라 하면 다음 식을 만족한다.

$$S_g = \sum_{i=1}^{n(h)} S_i \quad (1)$$

식 (1)에서 h 가 특정 범위에 속해있을 때 $n(h)$ 는 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$n(h) = \begin{cases} n_1 & \text{at } 0 < h < h_1 \\ n_2 & \text{at } h_1 < h < h_2 \\ \vdots & \\ n_m & \text{at } h_{m-1} < h < H \end{cases} \quad (2)$$

앞에서 증명한 따름정리를 식 (2)의 모든 h 구간에 대해 각각 적용할 수 있다. 먼저 $0 < h < h_1$ 의 구간에는 n_1 개의 모래입자가 있다. 따름정리에 따라 이 모래입자들의 총 부피는 단면적이 S_g 이고 높이가 h_1 인 입체의 부피와 같다. 따라서 총 부피는 $S_g \cdot h_1$ 이 된다. 같은 방법으로 $h_1 < h < h_2$ 의 구간에서는 모래입자들의 총 부피는 $S_g \cdot (h_2 - h_1)$ 이 된다. 모든 구간 총에서 이를 다 더하면 시험편 내부의 모래입자의 총 부피는 다음과 같다.

$$V_{grain} = \sum_{i=1}^m S_g (h_i - h_{i-1}) = S_g (h_m - h_0) = S_g H \quad (3)$$

시험편의 단면적이 S 이므로 시험편의 부피는 $S \cdot H$ 이다. 따라서 식 (3)으로부터 모래입자의 부피 비율을 계산할 수 있다.

$$\frac{V_{grain}}{V_{specimen}} = \frac{S_g H}{S H} = \frac{S_g}{S} \quad (4)$$

식 (4)는 밑면에서의 모래입자의 면적 비율이 시험편에서 모래입자의 부피비율과 같음을 보여준다. 부피비율은 그대로 사용될 수도 있고 모래입자와 교결물질의 밀도를 이용해 질량비로 바꾸어 사용될 수도 있다.

결론적으로 3차원적인 모래입자의 함량과 크기를 얻을 수 있으며, 이는 암석의 역학적 성질을 예측하는 것에 도움을 준다. 검증을 위해 Fig. 2(a)의 현미경 사진을 이용해 모래입자 함량을 Optika Vision Pro를 통해 계산해보았다. 모래입자의 부피비는 35.7%로 계산되었으며, Fig. 3으로부터 얻은 모래입자와 교결물질의 밀도(각각 2.43 g/cm³, 1.75 g/cm³)를 활용하여 계산한 질량비는 43.5%가 나왔다. 실제 모래입자를 섞은 비율은 40%로 계산값과 유사하다. 따라서 이 방법으로 모래입자의 함량을 측정하는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

결과 및 토의

인공 퇴적암 시료에 대해 탄성과 속도, 일축압축강도, 탄성계수를 측정하였다. Table 4는 다양한 조합의 모래입자 크기와 함량에 대해 얻은 역학적 성질 값들의 평균과 표준편차를 보여준다. 각각의 역학적 성질이 모래입자의 크기와 함량에 받는 영향을 분석하였다.

Table 4. Experimental results of seismic velocities, UCS, and Young's modulus for specimens with every combination of grain content and size

Classification by grain content and size	P-wave velocity (m/s)		S-wave velocity (m/s)		UCS (MPa)		Young's modulus (GPa)	
	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.
Pure gypsum	3325	41.2	1858	28.4	38.3	2.84	8.24	0.56
10% coarse	3475	30.5	1905	4.73	35.5	2.82	7.95	0.74
10% medium	3435	54.7	1915	27.3	37.6	2.37	8.49	0.73
10% fine	3452	63.9	1892	32.5	38.5	1.66	8.44	0.73
20% coarse	3522	75.2	1960	16.9	34.8	4.20	8.02	1.51
20% medium	3474	31.1	1959	13.4	35.2	1.46	8.96	0.58
20% fine	3554	17.9	1983	11.6	37.1	3.63	9.95	0.54
30% coarse	3573	39.5	1992	15.9	32.0	1.81	7.89	0.65
30% medium	3475	44.2	1953	25.0	35.4	1.67	8.72	0.60
30% fine	3622	66.5	1999	67.5	34.6	2.69	9.03	1.06
40% coarse	3712	39.8	2068	12.1	33.6	1.74	9.79	0.14
40% medium	3489	67.4	1981	9.87	33.3	1.84	9.00	0.50
40% fine	3694	68.5	2071	33.4	35.2	1.64	10.1	0.55
50% coarse	3860	54.8	2160	9.54	29.8	1.86	10.3	0.51
50% medium	3585	44.5	1996	48.5	30.6	2.73	9.24	0.99
50% fine	3689	27.8	2047	40.0	25.8	4.32	10.1	1.27

탄성파 속도

탄성파 속도 시험 결과가 Fig. 7과 8에 나타나있다. P파와 S파 속도 모두 모래입자의 함량과 양의 상관관계를 보인다. 일반적으로 탄성파 속도는 밀도를 증가시킬수록 높은 값을 갖는다. 이 실험에서 모래입자의 함량이 높을수록 밀도가 높아지므로 이것이 탄성파 속도에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다. 이 시험을 통해 중간 크기의 모래를 섞은 시료들은 같은 밀도를 가지면서 입자 크기만 다른 시료들에 비해 속도가 낮은 것을 볼 수 있다. 또한, 굵은 모래와 가는 모래로 구성된 시료사이에서도 서로 다른 탄성파속도-입자 함량의 관계를 보였다. 모래입자 함량이 40% 이상이 될 때 굵은 입자 시료의 경우 기울기가 증가하나 가는 입자에서는 감소한다. 전체적으로 모래입자의 크기는 탄성파 속도에 영향을 미치는 것으로 보이나 단순 선형적인 관계는 나타나지 않았다. 모래입자의 함량과 탄성파 속도의 선형회귀분석 결과를 Table 5에 표시했다. Table 5를 보면 위와 같이 탄성파 속도가 입자 크기에 영향을 받음으로 인하여 입자 함량만으로 탄성파속도와의 선형관계를 분석하면 그 결정계수가 다소 낮은 것을 알 수 있다.

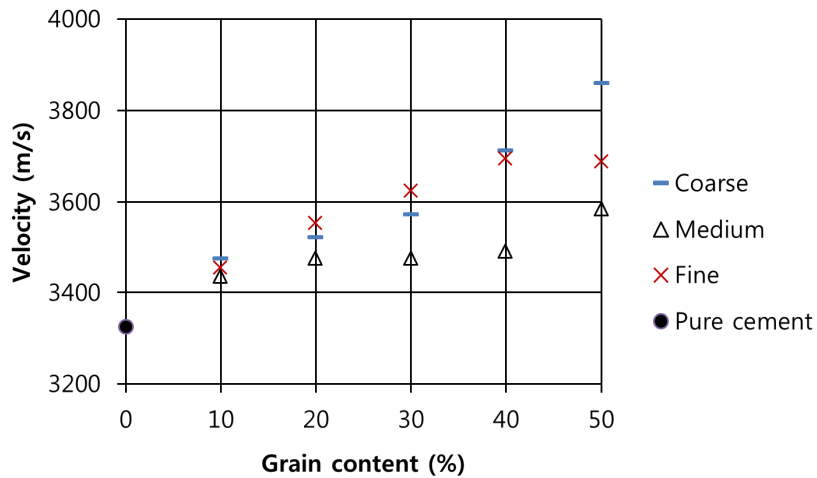


Fig. 7. Variation in P-wave velocity with grain content

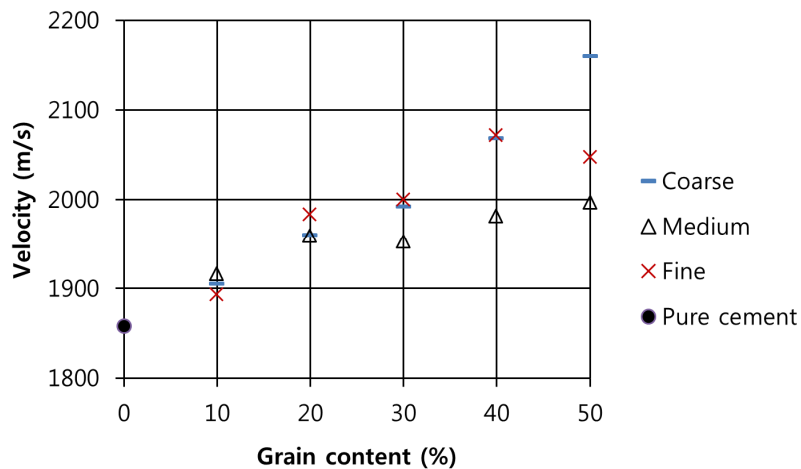


Fig. 8. Variation in S-wave velocity with grain content

Table 5. Relationship between mechanical properties and grain content

Mechanical property	Linear regression equation ^a	
P-wave velocity (m/s)	$V_p = 6.7307x + 3,369.1$	$R^2 = 0.662$
S-wave velocity (m/s)	$V_s = 4.0996x + 1,868.4$	$R^2 = 0.7391$
UCS (MPa)	$UCS = -0.1774x + 39.196$	$R^2 = 0.7116$
Young's modulus (GPa)	$E_{450} = 0.0356x + 8.0095$	$R^2 = 0.4849$

^ax: grain content (%)

일축압축강도

Fig. 9는 세 종류의 모래입자 크기에 대한 모래입자의 함량과 일축압축강도간의 관계를 보여준다. 보통 가는 모래입자를 함유할 수록 높은 강도를 보이거나 모든 모래입자 함량에 대해 일관성이 있지는 않다. 즉, 모래입자의 크기와 일축압축강도 사이에 뚜렷한 상관관계를 찾기는 어려우나, 일축압축강도는 모래입자의 함량을 높일수록 떨어진다고 할 수 있다. 이전의 연구자들 중에는 모래입자의 함량과 일축압축강도 사이에 약한 상관관계가 있다고 보고한 경우가 있다. Bell(1978)과 Shakoor and Bonelli(1991)은 모래입자 함량과 일축압축강도간의 약한 상관관계를 찾아내어 단지 유의성 검증만 했을 뿐 회귀식은 이끌어내지 못했다. 그러나 본 연구에서는 모래입자 함량에 따른 강도 변화의 추세가 비교적 뚜렷이 나타났다. 모래입자의 함량과 일축압축강도간의 선형회귀분석 결과가 Table 5에 포함되어 있다. 상기 문헌에서 소개한 결과에 비교할 때 본 연구에서는 모래 함량 이외의 다른 변수들을 적절히 통제 한 결과 모래입자의 함량이 강도에 미치는 영향이 더욱 명백하게 드러난 된 것으로 판단 할 수 있다.

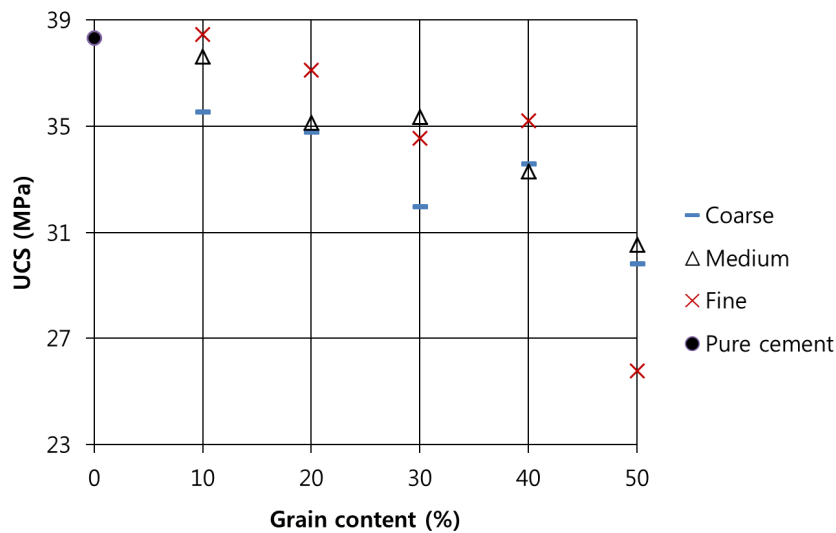


Fig. 9. Variation in uniaxial compressive strength with grain content

Fig. 10은 굵은 모래입자를 40% 함유한 시료의 파괴면을 보여준다. 파괴면에서 관찰되는 모래입자의 경우 대부분 모래 입자의 내부면이 아닌 경계면이 드러나 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 모래입자는 시험편에서 교결물질 내부나, 교결물질과 모래입자간의 접촉면에 비해 강도가 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 시료의 파괴는 교결물질과 모래입자의 접촉면, 혹은 교결물질에서 일어

난다. 결국 교결물질이 시료에서 모래입자들을 붙들어 결합시키는 접착제 역할을 하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 교결물질의 양이 줄어들면 시료의 강도가 감소하는 것을 이해할 수 있다.

입자의 함량이 늘어날수록 시료의 강도가 저하되는 또 다른 이유를 모래입자와 교결물질간의 경계 면적 증가에서 찾을 수 있다. 일반적으로 이러한 경계면에서의 접착강도는 교결물질 강도보다 낮는데 이는 계면전이구역(interfacial transition zone)에서 “wall effect”가 발생하기 때문이다(Scrivener et al., 2004). 모래입자는 교결물질 입자보다 상대적으로 매우 크기 때문에 모래입자의 경계면이 wall 역할을 하여 근처에서 교결물질 입자가 성장하는 것을 방해한다. 그 결과 모래입자 주변의 교결물질은 다른 부분에서 보다 높은 공극률을 보이며 해당 위치에서 강도가 낮아진다. 종합하면 모래입자 함량을 높일 경우 상대적으로 높은 강도를 가진 성분이 증가함으로 인하여 시료 강도의 상승 요인도 발생하고 동시에 입자-교결물질의 접촉부가 늘어남으로 인한 강도 저하 요인도 발생한다. 시료의 강도는 가장 낮은 강도를 가진 부분/성분에 의해 크게 영향을 받으므로 결과적으로는 모래입자의 증가로 인해 전체 시료의 강도는 낮아지는 것으로 해석할 수 있다.

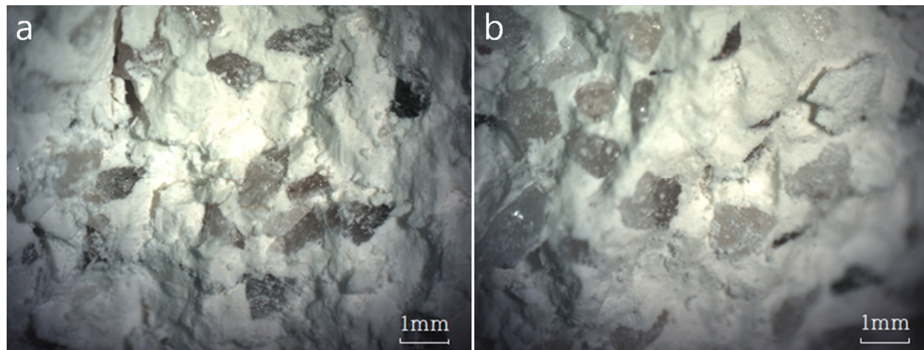


Fig. 10. Photomicrographs of failure surfaces in artificial sedimentary rocks containing 40% coarse grains

탄성계수

다양한 모래입자 크기에 따른 모래입자 함량과 탄성계수간의 관계가 Fig. 11에 나타나있다. 시료 강도의 50% 부근에서의 접선의 기울기(E_{t50})를 탄성계수로 사용했다. 탄성계수와 모래입자 함량간의 관계는 탄성파속도에서와 같이 모래입자의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 전체적인 추세에서 편차는 있지만, 입자 함량이 30%일 경우에 탄성계수가 입자크기와 관계없이 부분적으로 감소하였고 나머지 구간에서는 입자함량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 입자함량 30%에서의 감소폭은 입자크기에 반비례하여 가는 모래를 사용한 경우가 가장 감소폭이 크게 나타났다. 전반적으로 모래입자의 함량이 늘어날 경우 탄성계수도 증가하는 경향을 보인다. 이는 모래입자의 탄성계수가 교결물질의 탄성계수보다 높기 때문으로 판단된다. 반면 암석에 대한 실험결과(Bell, 1978, Shakoor and Bonelli, 1991, Palchik, 1999)에서는 이와 관련하여 유의미한 상관관계를 보고한 경우를 찾지 못하였다. Table 5에서 모래입자 함량과 탄성계수간의 선형회귀분석결과를 확인할 수 있다. 여기서 얻은 결과는 인공 퇴적암을 사용하여 실험 변수의 통제가 가능하게 됨으로써 나타난 것으로 판단된다.

전반적으로 입자의 함량이 늘어날수록 밀도, 탄성파 속도, 탄성계수는 증가하였고, 일축압축강도는 감소하였다. 이에 비추어 본 연구에서 사용된 모래입자는 교결물질로 사용된 석고에 비해 밀하고 탄성계수가 높음을 알 수 있다. 일반적으로 강도는 밀도, 탄성파 속도, 탄성계수와 양의 상관관계를 갖는다. 하지만 모래입자와 교결물질의 혼합으로 이루어진 인공 퇴적암의 강도는 두 구성요

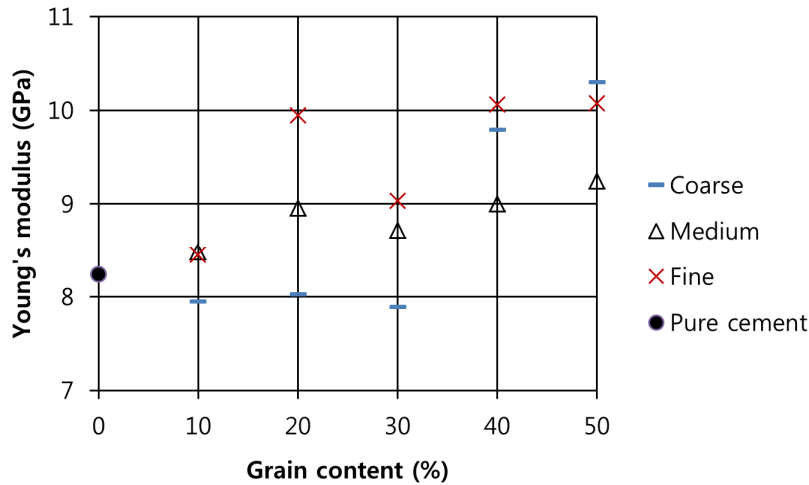


Fig. 11. Variation in Young's modulus with grain content for different grain sizes

소간의 결합력에 영향을 받는다. 따라서 낮은 결합력이 강도의 감소를 야기하였다. 본 연구에서 사용한 모래입자와 교결물질의 재료는 퇴적암에 나타나는 구성 성분의 한 종류로서, 이 연구 결과는 일부의 퇴적암에 적용 가능하다. 그러나 다른 구성 요소를 갖는 퇴적암의 경우를 모사하기 위해서는 다양한 종류의 재료로 실험을 수행할 필요가 있다.

결론

모래입자의 함량과 크기가 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수에 미치는 영향을 분석하였다. 여기에서의 분석 결과는 실제 암석을 대상으로 한 연구의 부족한 부분을 보완할 수 있는 것으로 판단된다. 이는 인공 퇴적암을 이용하는 경우 실제 암석의 경우와 다르게 하나의 특정 변수의 영향을 확인하고자 할 때 다른 변수를 일정하게 유지할 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 시료 내부의 모래입자의 쏠림 현상도 방지할 수 있으며, 실제 암석보다 실험 결과가 더욱 명확하게 나타나 상관관계를 결정하는 것에 유리하다. 분석결과 전반적으로 모래입자 함량이 높으면 탄성파속도와 탄성계수는 증가했으며, 일축압축강도는 감소했다. 모래입자의 크기는 상기 3종의 암석 물성과 비선형적인 관계를 보였다. 이들 성질간의 유의미한 관계를 분석하는 데에는 선형회귀분석을 이용하였다. 여기에서 얻은 상관관계와 회귀분석 결과는 추후에 암석의 역학적 성질을 예측하기 위해 활용될 수 있으며, 특히 역학적 성질 측정을 위한 직접적인 실험이 불가능 할 경우 유용할 것으로 판단된다. 비록 모래입자의 함량과 크기만으로 역학적 성질을 전부 예측하는 것은 무리가 있으나, 경향성을 확인했으므로 비슷한 종류의 암석 세트에서 일부의 역학적 성질을 알 경우 나머지 암석들의 역학적 성질은 어느 정도의 값을 가질 것인지 유추하는데 이 결과를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 석고 교결물질과 규사를 사용했으므로 연구결과는 이것들을 구성 성분으로 하는 퇴적암에 더 잘 적용될 수 있다. 하지만 암석의 역학적 성질은 모래입자와 교결물질의 종류에도 영향을 받으므로 다른 종류의 교결물질을 사용한 실험의 경우에는 다른 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 이 논문의 결과를 추후 다른 종류의 교결물질과 입자알갱이를 사용한 실험 결과와 비교하고 통합하게 되면 입자알갱이와 교결물질이 암석에 미치는 보다 일반적인 영향을 분석하는 것에 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 자원개발특성화대학사업 광물자원 탐사개발 연구단 과제의 일환으로 수행되었음. 또한, Brain Korea 21 Plus 프로그램의 지원을 받았음(No.21A20130012821).

REFERENCES

- ASTM D2487-11, 2011, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM D3282-15, 2015, Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
- Bell, F and Culshaw, M., 1993, A survey of the geotechnical properties of some relatively weak Triassic sandstones, Eng Geol Spec Publ., 139p.
- Bell, F., 1978, The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones, Northumberland, England, Eng Geol., Vol. 12, pp. 1-29.
- Bell, F.G. and Culshaw, M.G., 1998, Petrographic and engineering properties of sandstones from the Sneinton formation, Nottinghamshire, England, Q J Eng Geol., Vol. 31, No. 1, pp. 5-19.
- Bruno, M.S. and Nelson, R.B., 1991, Microstructural analysis of the inelastic behavior of sedimentary-rock, Mech Mater., Vol. 12, No. 2, pp. 95-118.
- Cetin, A. and Carrasquillo, R.L., 1998, High-performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties, ACI Mater J., Vol. 95, No. 3, pp. 252-261.
- Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C. and Rad, N.S., 1981, Cemented sands under static loading, J Geotech Eng., Vol. 107, No. 6, pp. 799-817.
- David, C., Menéndez, B. and Bernabé, Y., 1998, The mechanical behaviour of synthetic sandstone with varying brittle cement content, Int J Rock Mech Min Sci., Vol. 35 No. 6, pp. 759-770.
- Dobereiner, L. and Defreitas, M.H., 1986, Geotechnical properties of weak sandstones, Geotechnique., Vol. 36 No. 1, pp. 79-94.
- Ersoy, A. and Waller, M.D., 1995, Textural characterization of rocks, Eng Geol., Vol. 39 No. 3-4, pp. 123-136.
- Fahy, M. and Guccione, M., 1979, Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data, Bull Assoc Eng Geol., Vol. 16, No. 4, pp. 467-485.
- Fattahpour, V., Baudet, B.A., Moosavi, M., Mehranpour, M. and Ashkezari, A., 2014 Effect of grain characteristics and cement content on the unconfined compressive strength of artificial sandstones, Int J Rock Mech Min Sci., Vol. 72, pp. 109-116.
- Goodman, R.E., 1993, Engineering Geology-Rock in Engineering Construction, Wiley, New York, 86p.
- Gunsallus, K. and Kulhawy, F., 1984, A comparative evaluation of rock strength measures, Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr., Vol. 21 No. 5, pp. 233-248.
- Gupta, V. and Sharma, R., 2012, Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya, Eng Geol., Vol. 135, pp. 1-9.
- Howarth, D.F. and Rowlands, J.C., 1987, Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties, Rock Mech Rock Eng., Vol. 20, No. 1, pp. 57-85.

- Johnston, C.D., 1970, Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression, *Mag Concrete Res.*, Vol. 22, No. 70, pp. 5-16.
- Krumbein, W.C. and Pettijohn, F.J., 1938, *Manual of Sedimentary Petrography*, Appleton-Century-Crofts Inc., New York, pp. 129-133
- Meddah, M.S., Zitouni, S. and Belaabes, S., Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete, *Constr Build Mater.*, Vol. 24, No. 4, pp. 505-512.
- Olsson, W.A., 1974, Grain-size dependence of yield stress in marble, *J Geophys Res.*, Vol. 79 No. 32, pp. 4859-4862.
- Onodera, T., and Asoka Kumara, H., 1980, Relation between texture and mechanical properties of crystalline rock., *Bull Int Assoc Eng Geol.*, Vol. 22, pp. 173-177.
- Palchik, V., 1999, Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones, *Rock Mech Rock Eng.*, Vol. 32, No. 4, pp. 303-309.
- Rosenthal, A., 1951, The history of calculus, *Am Math Mon.*, Vol. 58 No. 2, pp. 75-86.
- Scrivener, K.L., Crumbie, A.K. and Laugesen, P., 2004, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface Sci.*, Vol. 12 No. 4, pp. 411-421.
- Shakoor, A. and Bonelli, R.E., 1991, Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones, *Bull Assoc Eng Geol.*, Vol. 28 No. 1, pp. 55-71.
- Soil Survey Staff, 1993, *Soil Survey Manual*, Soil Conservation Service: U.S. Department of Agriculture.
- Ward, M.A., 1964, *The testing of concrete materials by precisely controlled uni-axial tension*, University of London.
- Wu, K.R., Yan, A., Yao, W. and Zhang, D., 2002, The influence of RPCA on the strength and fracture toughness of HPC, *Cement Concrete Res.*, Vol. 32 No. 3, pp. 351-355.