

일축압축 하에서 반복재하에 따른 포아송비의 거동분석 - 경상분지 퇴적암을 대상으로 -

이종석, 문종규*, 최응의

An Analysis of Poisson's Ratio Behaviors by Uniaxial Compressive Loading-reloading Test - On the Sedimentary Rocks of Kyungsang Basin -

Jong-Suok Lee, Jong-Kyu Moon*, Woong-Eui Choi

Abstract This paper deals with Poisson's ratio and volumetric strain behavior on loading-reloading terms under uniaxial condition targeting 404 individual rocks, which include sedimentary rocks as sandstone, shale, mudstone, conglomerate and tuff on Kyungsang basin. Poisson's ratio demonstrates increase, convergence and decrease behavior according to the increase in load, which results in preponderance of increase behavior. Volumetric strain demonstrates normal, positive and negative behavior according to the increase in load, which results in preponderance of normal behavior. On practice, Poisson's ratio can be indicative of high or low values with low values of design load. Consequently, a careful selection of results in in-situ sample experiment should be made and varying design conditions should be considered.

Key words Poisson's ratio, Volumetric strain, Uniaxial comp, Strength

초 록 경상분지 퇴적암, 사암, 셰일, 이암, 역암 및 응회암 시료 404개를 대상으로 재하-재재하 가압조건으로 포아송비와 체적 변형률 거동을 분석하였다. 하중증가에 따라 포아송비는 증가, 수렴 및 감소거동을 나타내며 증가거동이 월등히 우세하였다. 체적 변형률 거동은 하중 증가에 따라 정상거동, 양의거동 및 음의거동을 나타내고 있으며 정상거동 양상이 매우 우세하였다. 실무에서 사용하중은 매우 낮는데 이 범위에서 포아송비는 매우 높거나 혹은 낮은 값을 표출하는 바, 이의 적용은 현장시료의 실험을 통한 결과값 선택에서 설계조건을 고려하여 선택해야 할 것이다.

핵심어 포아송비, 체적 변형률, 일축압축강도

1. 서 론

건설공사를 위한 조사, 설계, 시공 및 감리업무를 시행함에 있어 암반에 대한 공학적, 지질학적, 재료역학적 지식이 필요하게 된다. 그러나 흙에 대한 토질역학적

학문의 발달은 3세기에 가까운 지식의 축척 및 활용의 경험을 가지고 있으나 암반에 대한 것은 아직 1세기 미만으로, 연구 실적이 미진한 부분도 있으며 본 연구의 주제인 포아송비에 대한 것도 그 중 한 예일 수 있다.

더욱이 암반, 암석의 탄성적인 특성 중 포아송비에 대한 연구실적은 풍부하지 못하여(Min et al., 2004) 종래의 경험에 의한, 즉 철이나 콘크리트의 재료역학적인 특성을 구명해온 구조공학의 해석을 준용하고 있다. 구조공학적인 시각에서는 재료의 탄성정수들은 재료의 특성값으로 인식되고 있으나 암석 코어에서는 응력수준에 따라 탄성계수나 포아송비는 재하-재재하 시험 과정에서 정수가 아닌 변수로 나타나고 있음을 실험을

Received: Jan. 10, 2013

Revised: Jan. 30, 2013

Accepted: Feb. 4, 2013

***Corresponding Author:** Jong-Kyu Moon

Tel) +82522591663, Fax) +82522592629

E-Mail) mjkl067@hanmail.net

Vice Pres., Dongmyung Eng. Consultant. Co., Prof. Engr. Geotch.

통해서 확인 할 수 있다. 암석시료에 대한 재하-재재하 압축실험에 따른 탄성계수의 변화는 변형계수를 통하여 응력수준에 따라 값의 변화(이중석 등, 2012)를 알 수 있었으며, 본고에서는 포아송비의 변화가 응력수준에 따라 변함을 관찰해 볼 것이다. 또한 체적 변형률의 다양한 변화와 거동도 관찰해 볼 것이다.

암반을 대상으로 시행하는 공사는 절리 등 불연속면을 포함한 비균질, 이방성 재료를 대상으로 하기 때문에 탄성론에서 Hooke의 법칙을 따르는 가정을 한, 균질, 등방성 재료가 아니며, 철이나 콘크리트에 비해서 매우 이질적인 재료로 인식하여야 할 것이다. 또한 각종 시험규정(ASTM, ISRM, KS 등)에 명시된 무결함 시료를 대상으로 시험을 수행한 결과는 암반, 암석의 재료역학적인 기본물성을 구명하는 수단으로 필요한 자료이지만, 자연의 암반을 대상으로 시행하는 설계 및 시공에서는 점선탄성계수보다 할선탄성계수가 현실에 부합되는 물질일 것이다(Hiltscher et al., 1984, Kwon et al., 1999).

본고를 위한 시험은 ASTM(D 7012-07e1, D 2938-95, D 3148-96, D 4543-01)과 ISRM(1979, 1981-Part 1, 1999)을 기준으로 하여 시험을 시행했다. 이들 시험의 기준들은 시료에 하중을 가하기 시작하여 파괴될 때까지 1회 재하시험으로 결과를 도출하고 있다. 실제 설계 및 시공에 적용되는 사용하중은 시료의 파괴강도보다 훨씬 작은 값이기에 낮은 하중상태에서의 탄성계수나 포아송비의 거동을 자세히 알기 위해서는 재하-재재하 시험의 필요성(Afrouz, 1991, Ofoegbu et al., 1992)이 대두된다. 낮은 응력수준에서는 응력-변형률 좌표에서 비선형거동이 나타나는 경우가 많아서, 표출된 거동이 재료의 특성인지 혹은 미세 불연속면의 폐합때문인지를 확실히 알기 위함이다. 본고는 이를 위하여 모든 시료에 재하-재재하 시험을 시행하여 포아송비의 거동을 살펴보았다.

본 연구의 재하-재재하 시험은 한 개의 시료를 대상으로 3회 이상의 반복 재하시험을 시행하였다. 채취한 블럭(대략 40*50*30 cm, 160 kg/개)에 대하여 Schmidt hammer 타격시험을 마친 시료이기 때문에 대략의 강도를 인지하고 있는 상태로, 코어의 강도를 짐작하여 1/3~1/4의 강도를 제1회로 재하한 후 하중을 제로(zero) 상태까지 서서히 강하시켜서 다음 목표 하중까지 재재하 하는 순서로 시행하였다. 4~6 MPa/min으로 재하하여 평균 4회 반복하중으로 30~40분 정도 소요되었다. NX 규격의 코어는 높이 110 mm를 기준하여 가공하였으며, 110 C°-24시간 건조 후 코어 높이의 1/2되는 지점에 수직으로 변형률계(PFL-10-11-11, 10 mm,

119.8 Ω, 10⁻⁶ mm)를, 반대편에 수평으로 변형률계를 부착하여 Sen Test Log Program에 연결하여 15 MN 용량의 압축기(ELE-ADR, 영국)로 시험을 시행하였다. Fig. 1은 응력, 변형률-시간관계를 나타낸 것이다.

2. 포아송비의 특성

재료가 압축력을 받으면 그 힘의 방향으로 길이가 수축되는 변형률과, 힘이 작용하는 직각방향으로 길이가 신장되는 변형률의 비를 포아송비라 하며 이는 프랑스의 물리학자 Simeon Denis Poisson(1781-1840)의 연구업적을 기려 부르는 용어로 공학적으로 변형의 해결을 위한 중요한 parameter이다.

이 값은 재료가 균질하고 등방성 또는 직교 등방성이며, 작용하는 힘이 재료 길이의 전 구간에서 일정할 때만 적용된다. 암석에서는 하중-축변형률 좌표에서 선형 탄성변형을 나타내는 비례한도 내에서만 적용된다는 의미이다. 일축압축용 코어에서는 선형 탄성변형을 나타내는 구간 내에서는 탄성계수와 포아송비는 상수로 재료의 특성으로 간주될 수 있으며 이는 미세균열(micro crack)이 시작되는 구간까지만 적용된다(Bieniawski, 1967).

포아송비는 균질한 등방성, 선형 탄성재료에서는 이론적으로는 0.5를 넘지 않으나 이방성이 강한 재료나 특히 불연속면이 내재한 암석·암반에서는 0.5를 넘는 값을 표출하기도 한다. 또한 암석 코어의 실험 중 미세 크랙이 발생하는 부분에서 부터는 0.5를 넘기는 경우가 매우 자주 나타나기도 한다. 이 값은 양의 부호를 사용하나 극히 적은 예외에서는 음으로 나타나는 재료도 있다(Gercek, 2007. Wikipedia, 2011). 암석 코어의 일축 압축시험에서 도출된 포아송비의 일반적인 분포범위를

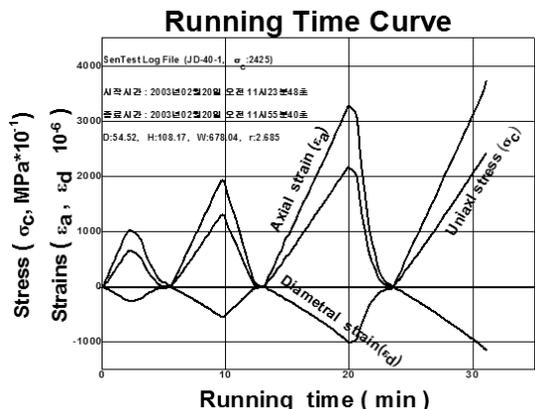


Fig. 1. Strain, stress-time curve (sandstone JD-40-1, illustrated)

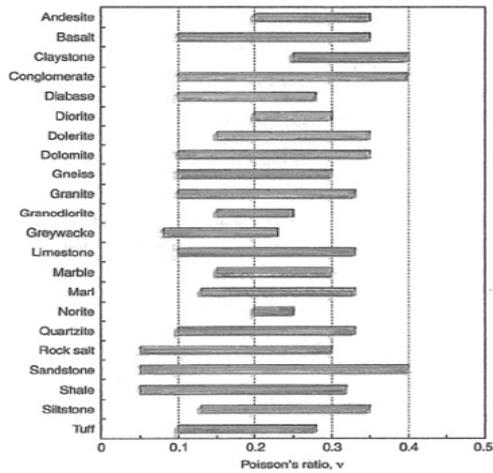


Fig. 2. Range of Poisson's ratio of various rocks

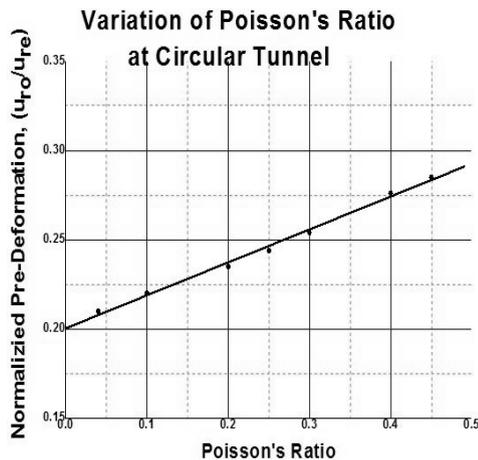


Fig. 3. Poisson's ratio at tunnel with elastic deformation

Fig. 2(Gercek, 2007)에서 볼 수 있다.

포아송비의 영향을 민감하게 받는 경우는 압력관의 흐름에 따른 관 재료의 설계나, 암반의 구조 지질학적 해석 같은 경우이다. 즉 깊은 지하공동의 굴착 시 상부에서 작용하는 토압이 클 때 내공의 변형은 포아송비에 영향을 받기 때문이다. 터널굴진에서 내공치수의 초기 값(u_{r0})과 굴진에 따라 내공치수(u_{re})의 변화의 비에 따른 포아송비의 변화를 나타낸 것이 Fig. 3이다(Gercek, 2007).

3. 포아송비의 거동

경상분지 퇴적암인 셰일 124개, 사암 170개(역암 4개

포함), 이암 70개 및 응회암 시료 40개를 포함한 모집단을 구성하여 일축압축시험을 시행하였다. 모집단의 실험값이 높은 신뢰도를 가질 조건은 실험성과의 정확성, 모집단구성의 보편성을 유지하는지를 검증해야 하며, 본 연구에서는 Origin 8.1 Program으로 간편히 쓸 수 있는 방법인 Kolmogorov-Smimov방법을 적용하였다. 404개 시료의 일축압축강도 분포는 95% 신뢰수준에서 정규분포를 이룬다는 판정하기에 해석작업을 시행하는데 자료의 신뢰성이 확보된다고 볼 수 있다. 이 방법은 표준편차, 변동계수, 평균값 및 증위값을 매개로 하여 자료의 정규성을 검증하는 방법이다. 이 방법으로 셰일, 사암, 이암, 역암 및 응회암의 정규분포 여부를 검증하였다(Fig. 4). 개별 암석에 대한 모집단의 규모는, 통계교재에서는 표본수가 30개 이상이면 95% 신뢰도를 확보할 수 있는 규모라고 기술하고 있고(김정년 1985, 김우철 등 2005), 최소 표본수 추정을 시행한 Yamaguchi (1970)와 Gill 등(2005)도 이와 같은 결과를 발표한 바가 있다. 따라서 본고의 최소 표본수는 응회암이 40개로, 해석의 신뢰도 재고를 위한 모집단규모는 적정하며 해석자료의 신뢰도 유지를 위해서도 적합한 자료로 사료된다.

암석 시료의 실험결과로 도출된 역학적인 parameter들은 상호간의 상관성을 가지는 경우가 대부분이다. 그러나 포아송비의 경우는 상관관계를 가지는 경우가 발견되지 않았다. 본 실험의 결과에서는 포아송비와 일축압축강도, 포아송비와 탄성계수, 포아송비와 간극비는 상관관계가 나타나지 않았다. 본 실험 외의 석회암과 백운암 시료 87개의 자료에서도 포아송비와 일축압축강도(Fig. 5(a)), 탄성계수(Fig. 5(b)), 간극비(Fig. 5(c))와의 상관성은 나타나지 않았으며, 또 본고에 사용된 퇴적암 중 셰일 시료 77개로 포아송비와 일축압축강도와 관계(Fig. 5(d))를 관찰하였지만 상관성이 발견되지 않았다. 즉 포아송비는 역학적인 어떤 parameter와도 상관성이 없이 독자적인 거동을 한다고 볼 수 있다. 이러한 사실을 나타낸 것이 Fig. 5이다.

본 시험 대상인 경상분지 퇴적암 404개에 대한 일축압축시험에서 나타난 포아송비의 거동을 관찰하면 압축하중의 증가에 따라 값이 차츰 증가하는 경우, 수렴하는 경우, 감소하는 경우의 3가지 거동특성을 읽을 수 있다. 증가하는 경우는 전체의 60.89%이며, 증가하는 양상은 모두 제각기 다르게 나타난다. 감소하는 경우는 16.34%이고 일정한 값에 수렴해 나가는 경우는 22.77%이며 그 양상도 각기 다르게 나타나고 있다. 즉 반복재하로 하중이 증가하는 양상에 따라 포아송비도 일정한 상수값을 나타내는 parameter가 아닌 변수로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이들 분포 양상을 Fig. 6에 요약하였다.

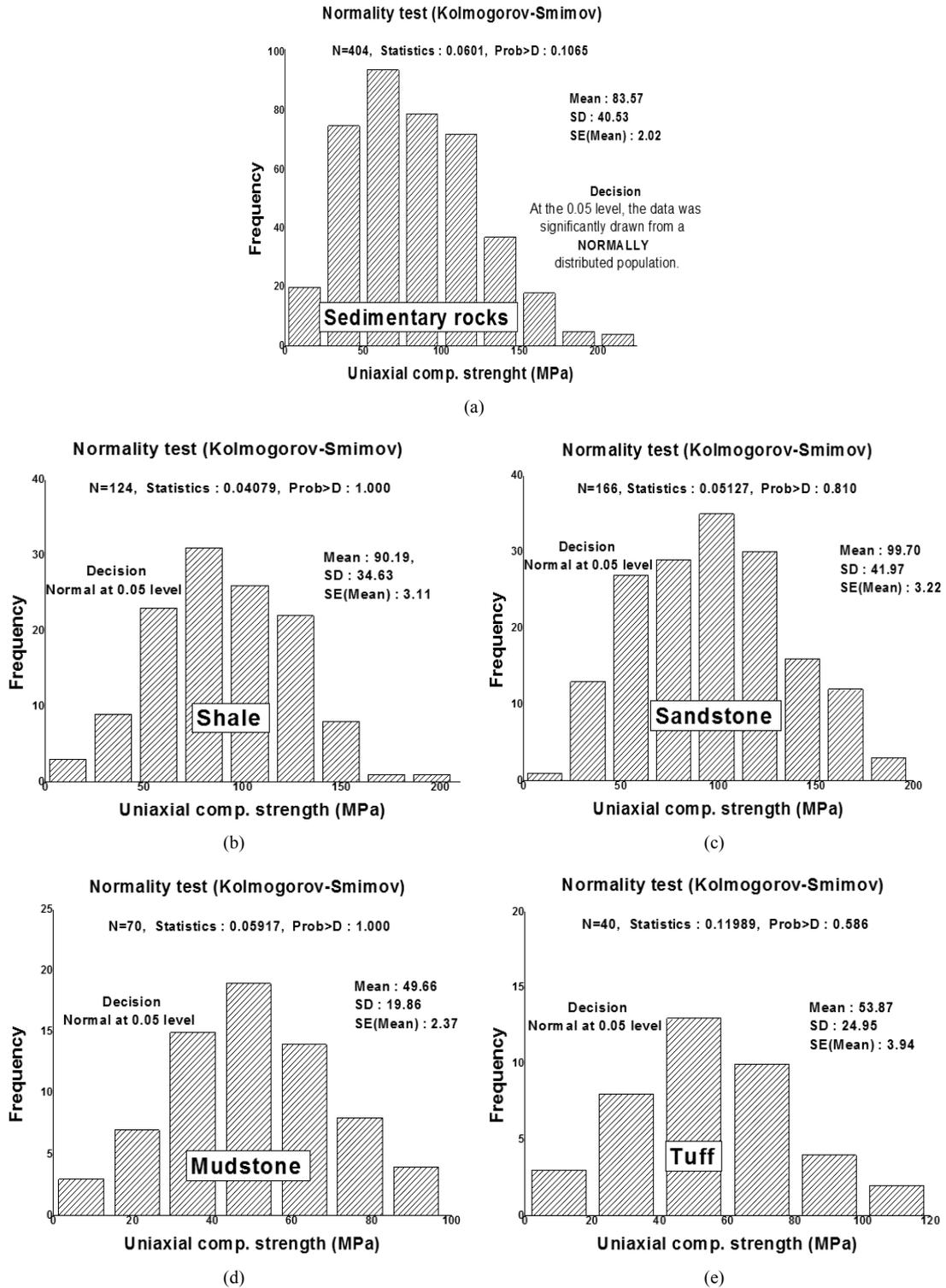


Fig. 4. Normality test for materials

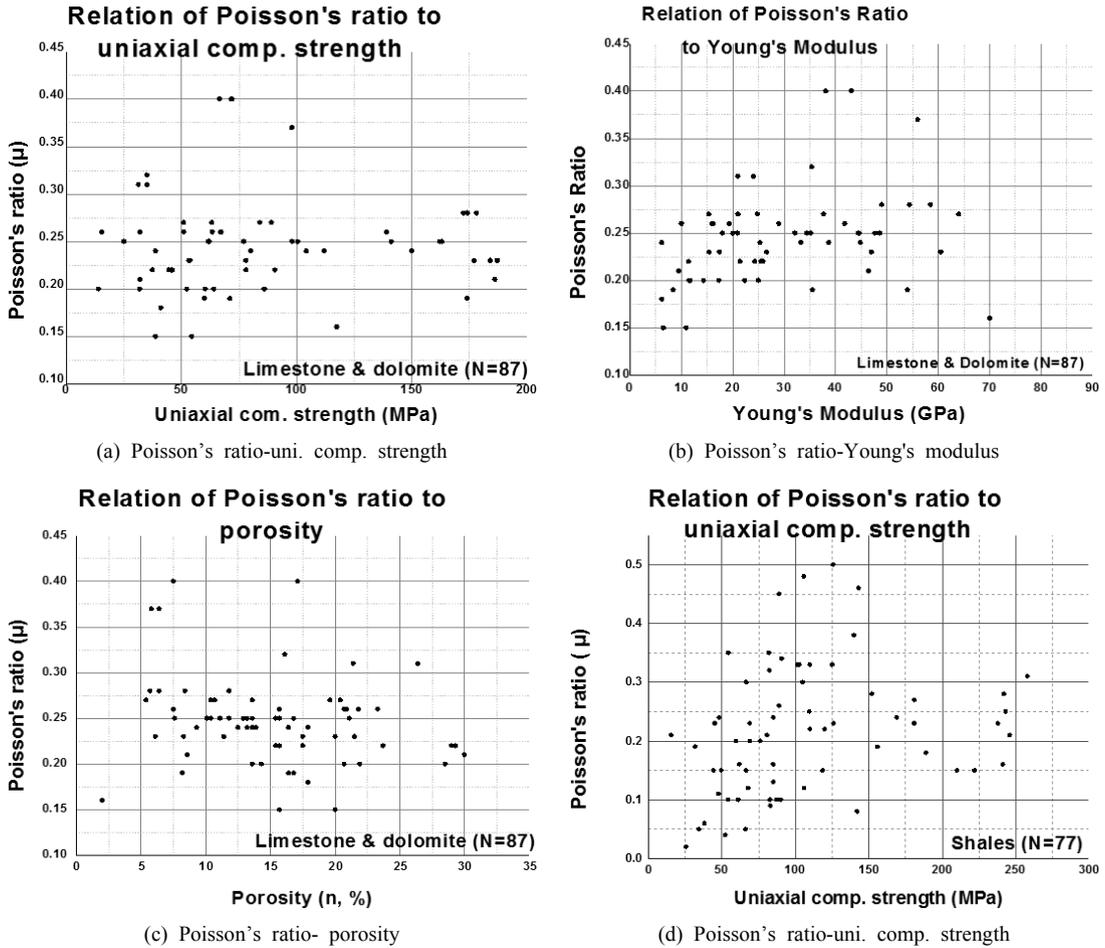


Fig. 5. Relation diagrams to Poisson's ratio

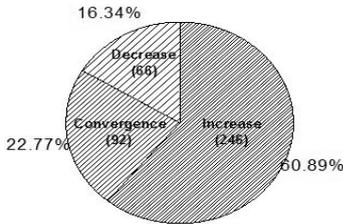


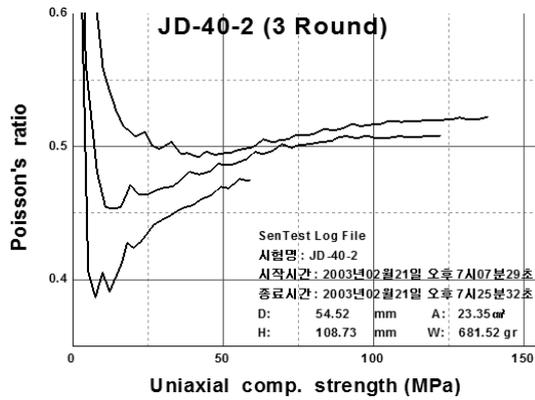
Fig. 6. Distribution diagram (Behavior of Poisson's ratio, N=404)

4. 포아송비의 증가

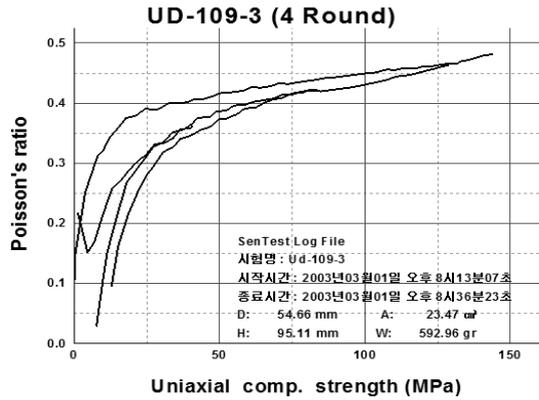
포아송비가 증가한다는 의미는 축 하중이 작용할 때 직경방향 변형률이 축 방향 변형률의 변화량보다 크다는 의미이다. 즉 축 방향 압축변형률에 비해서 직경방

향 인장변형률이 큰 경우이다. 본 연구에서는 하중의 재하-재재하 시험 중에 나타나는 포아송비의 거동은 하중재하에 따라 값이 증가하는 경우가 절대적으로 우세하게 나타나고 있다. Fig. 6에서와 같이 60%가 넘는 경우를 보이고 있다. 증가하는 양상은 제각각이지만 그 유형별로 분류하여 도시한 것이 Fig. 7이다. 증가양상은 하중단계에 따라 약간의 곡률을 이루며 단계적으로 증가하고 있다. 즉 직선형 증가형태와 곡선형 증가형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

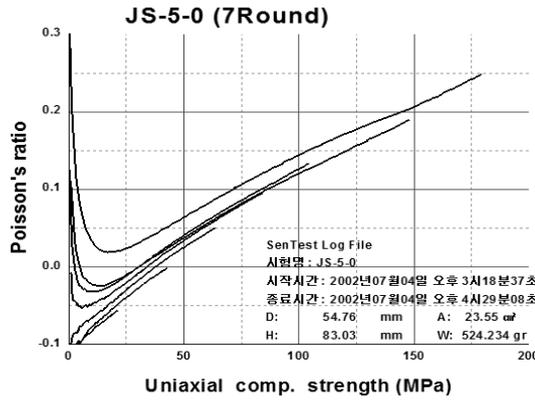
Fig. 7(a)는 사암시료(JD-40-2, 강도 137 MPa)의 포아송비 증가모양을 나타낸 그림이다. 3회 반복재하를 시행하는 동안 포아송비는 약 0.40에서 최종회에는 0.52에서 파괴된 그림이며 파괴하중의 1/2점에서의 값도 0.51로 높은 값을 보이고 있다. Fig. 7(b)도 3회 반복재하를 시행한 사암시료(UD-109-3, 강도 148 MPa)이



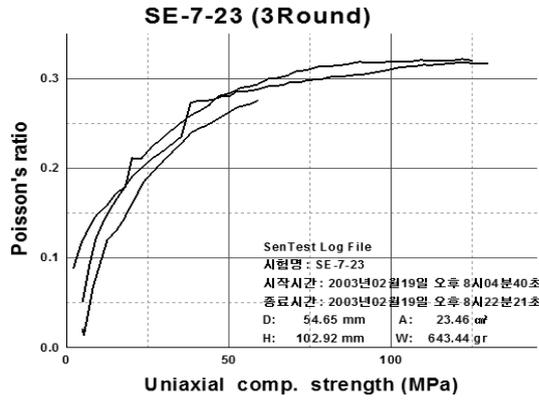
(a) Sandstone



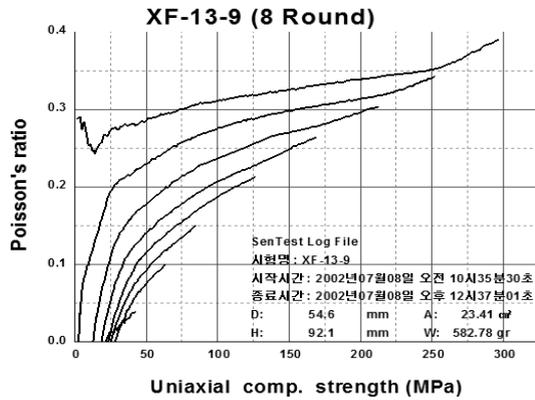
(b) Sandstone



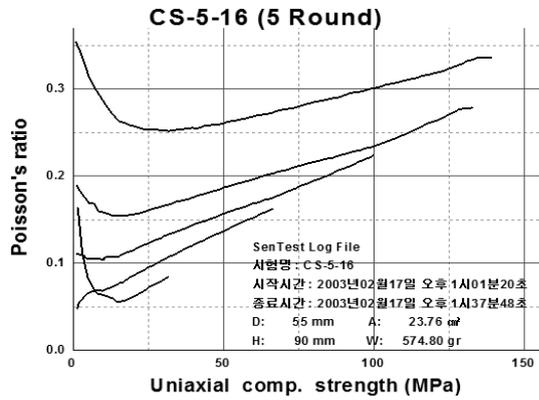
(c) Shale



(d) Tuff



(e) Shale



(f) Mudstone

Fig. 7. Poisson's ratio increase as strength increasing

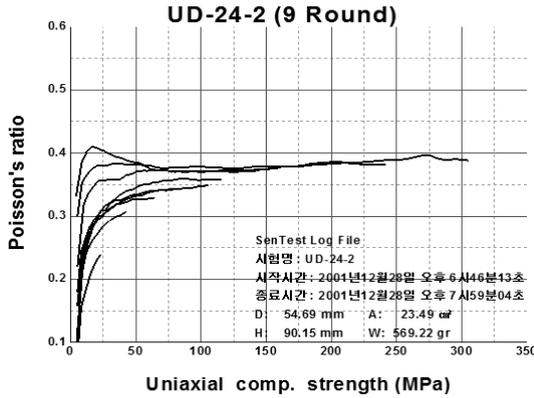
며 재하단계에 따라 값이 증가하는 모양이나 재하중 약 25 MPa 이하에서는 포아송비값을 잡기가 어려운 양상을 보이고 있다. Fig. 7(c)는 7회 반복재하를 시행한 셰일시료(JS-5-0, 강도 178 MPa)이며 포아송비의 증가는

거의 직선성을 띠고 있다. 최종회의 중간값은 약 0.15이나 파괴 시 값은 약 0.25로 나타난다. Fig. 7(d)는 응회암 시료(SE-7-23, 강도 129 MPa)로 3회 반복재하를 시행한 그림이며 포아송비의 증가는 곡선형을 나타내고

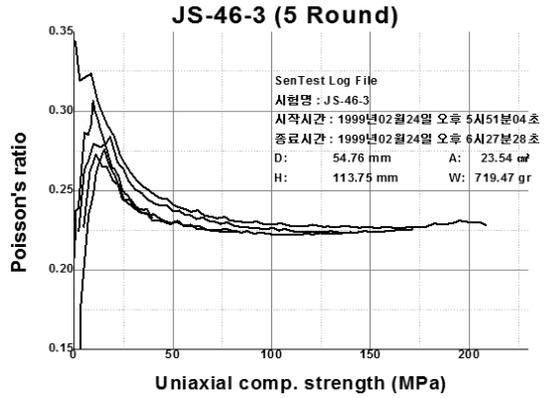
있다. 약 0.1에서 시작하여 0.32에서 파괴된 시료이다.

Fig. 7(e)는 세일시료(XF-13-9, 강도 290 MPa)로 재하-재해하 과정에서 포아송비가 약 0.1에서 0.38로 매우 큰 폭으로 증가한 경우이다. 증가양상도 단계별로

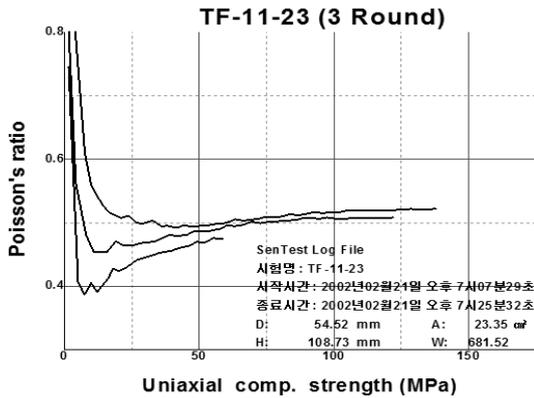
확연함을 보이는 것이 고강도 시료의 특성으로 사료된다. Fig. 7(f)는 이암시료(CS-5-16, 강도 138 MPa)의 5회 반복재하 시험결과이며 포아송비의 증가양상은 확연한 직선성을 나타내고 있다.



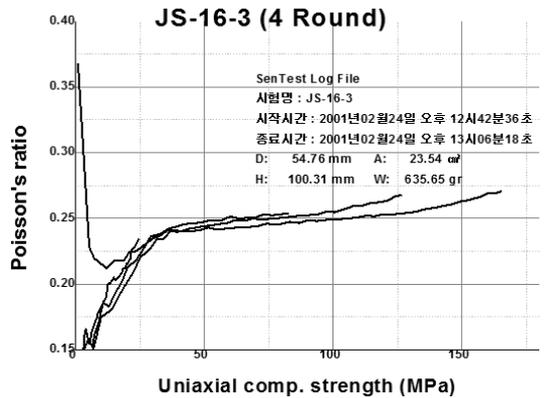
(a) Sandstone



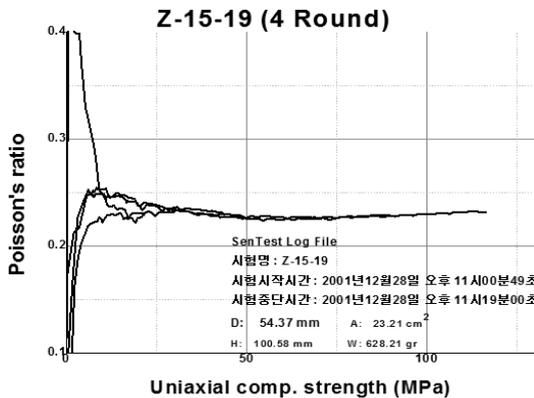
(b) Shale



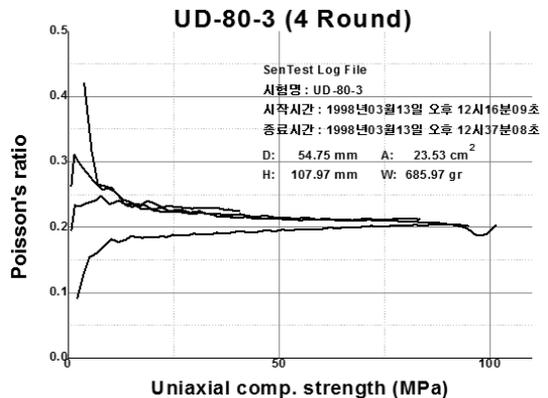
(c) Tuff



(d) Shale



(e) Sandstone



(f) Conglomerate

Fig. 8. Poisson's ratio convergence as strength increasing

5. 포아송비의 수렴

시료의 강도범위(100~300 MPa)도 다양하게, 압중도 출토지역이 다른 곳의 시료를 선정하여 재하-재재하

압축시험을 시행하여 도출된 포아송비를 검토하였다. 그 중에서 반복하중 증가에 따라 포아송비 값이 일정한 값으로 수렴되는 양상의 결과를 모아 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8((b, JS-46-3), (c, TF-11-23))는 하중재하 시

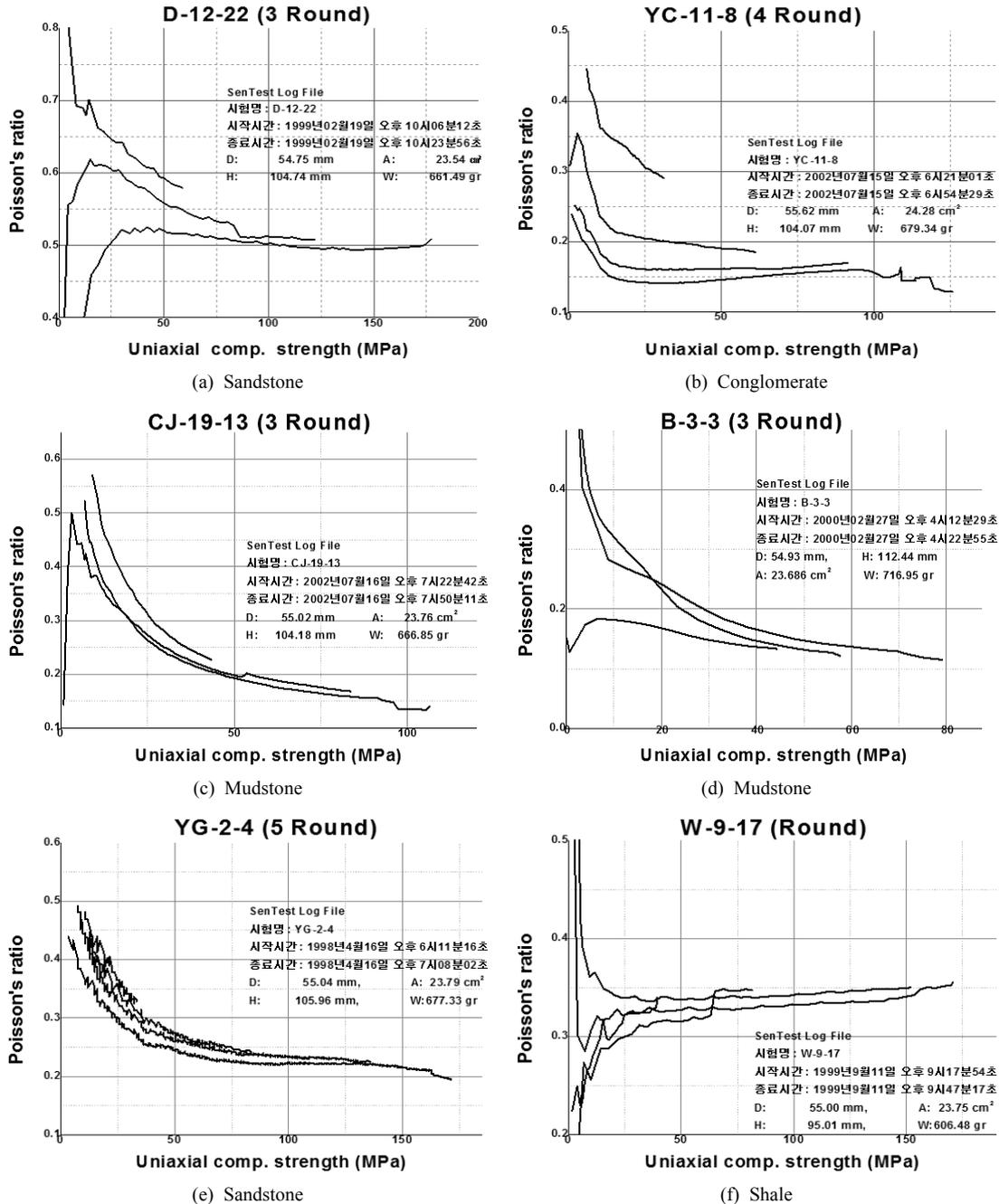


Fig. 9. Poisson's ratio decrease as strength increasing

점에서 감소양상을 보이며 수렴되는 현상을 나타내는 시료들과 증가양상 Fig. 8(a, UD-24-2), (d, JS-16-3), (e, Z-15-19))을 보이는 시료들을 볼 수 있다.

초기 양상이 진정되며 차츰 일정한 값으로 수렴되어

가는 현상은 축 압축변형률과 직경방향 변형률의 변화 양상이 초기 변형률과 거의 동일하기 때문일 것이다. 이런 시료들은 재료의 균질성과 등방성이 이상적인 가정에 가깝다는 것으로 짐작할 수 있을 것이다. 이론적

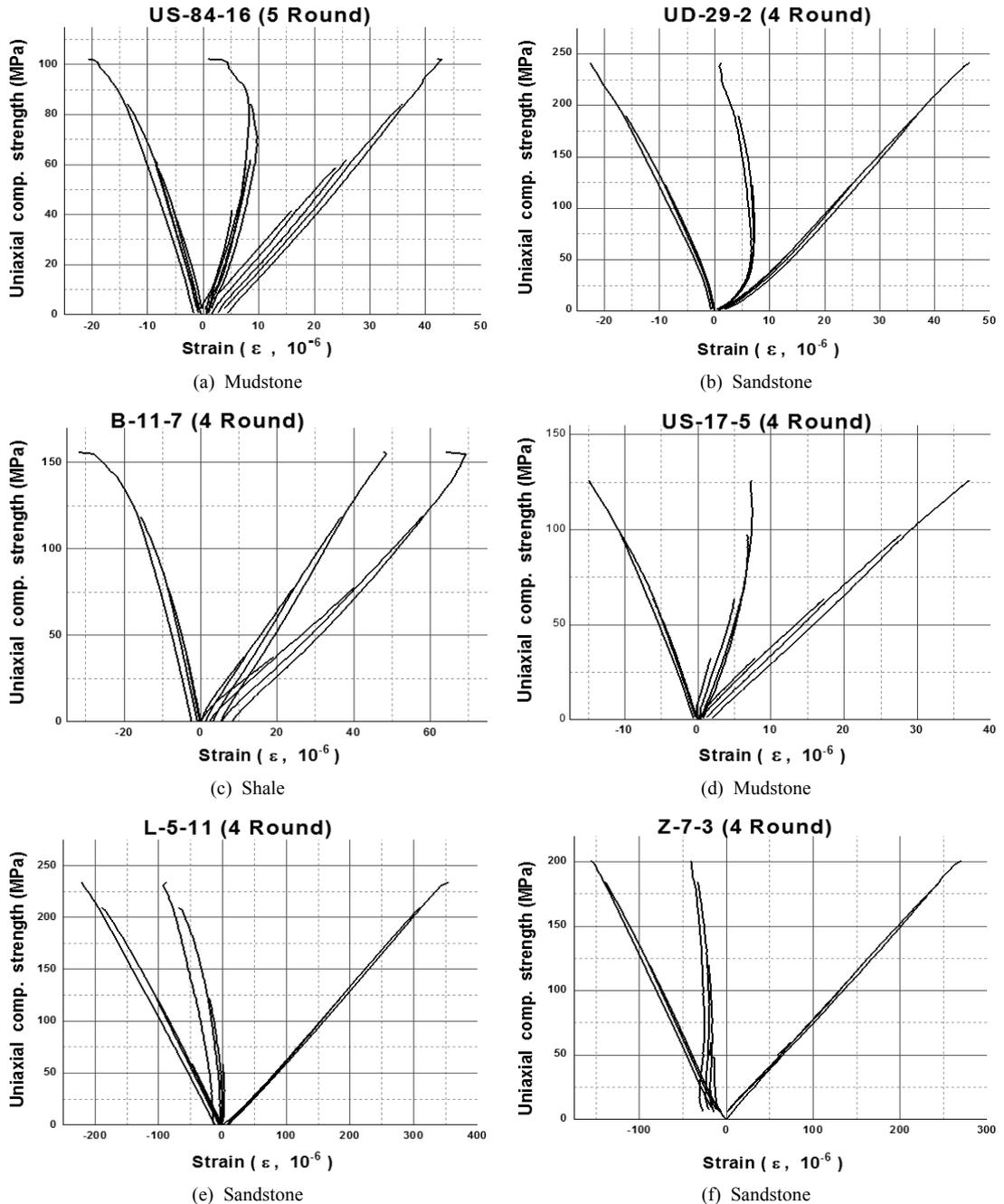


Fig. 10. Variation of volumetric strain

인 면에서는 Fig. 8의 결과가 포아송비 거동의 표준적인 양상으로 볼 수도 있을 것이다. 특히 Fig. 8(a, e) 시료의 결과에서 이와 같은 추정을 하기가 쉬울 것 같다. Fig. 8(c, d)는 약간의 증가양상을 보이기는 하지만 그 폭은 매우 미미하기 때문에 전체적인 결과와 비교하면 수렴하는 군에 분류함이 타당할 것으로 판단하였다.

6. 포아송비의 감소

404개 시료 중 16.34%에 해당되는 66개의 시료는 반복재하에 따라 포아송비가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 일축압축 조건하에서 재하-재재하 가압을 시행하면 포아송비가 감소하는 것으로 알려져 있으나, 시료에 따라 증가하는 경향, 감소하는 경향을 나타내는, 즉 일정한 경향을 보이지는 않는다는 연구보고(Heap, 2008)도 있다.

본 연구에서 감소하는 경향의 결과를 Fig. 9에 요약하였다. 감소형태도 여러 가지로 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9(a, D-12-22)와 Fig. 9(b, YC-11-8)는 하중 증가에 따라 단계적 감소를 하고 있지만 파괴하중에 가까울수록 다소 증가하는 양상을 띠고 있다. 이 두 시료는 압축과 강도가 상이하지만 감소양상은 동일하게 나타나고 있다. Fig. 9(c, CJ-19-13)와 Fig. 9(d, B-3-3)는 미소하지만 단계적으로 증가, 감소하는 거동을 보이고 있지만 하중증가에 따라 계속 감소거동을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(e, YG-2-4)와 Fig. 9(f, W-9-17)는 수렴하는 양상을 보이고 있지만 전체적인 흐름은 감소하고 있음을 볼 수 있다.

7. 체적 변형률의 거동

재하-재재하 가압을 시행한 시험결과에서 체적 변형률 거동을 도시하였다(Fig. 10). 일반적인 체적 변형률의 양상은 변형률 양의 방향으로 전개되다가 파괴 하중값의 약 65~85% 범위에서 변곡점이 생기고 그 이후부터는 변형률 음의 방향으로 방향이 전환되는 형태를 나타내는 양상이 일반적인 형태(Lau et al, 2004)로 알려져 있다(Fig. 10(a), US-84-16). 양의 방향 변형률은 전체 체적이 감소하며 음의 상태에서는 체적이 증가하는 현상이나 응력-변형률 좌표 상에서 편의상 체적이 감소하는 현상을 양으로, 체적이 증가하는 현상을 음으로 나타내고 있다. Fig. 10(a, b)는 체적 변형률 곡선이 변곡점을 형성하는 형태이다. 그러나 Fig. 10(b, UD-29-2)는 변곡점이 낮은 지점에서 발생하고 있다.

Fig. 10(c, B-11-7)와 Fig. 10(d, US-17-5)는 체적 변

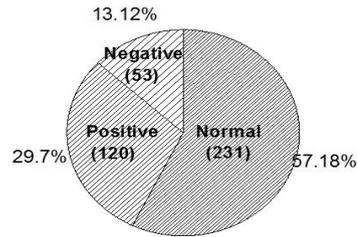


Fig. 11. Distribution diagram (Behavior of volumetric strain, N=404)

형률이 양의 방향으로만 변화하는 형태이다. 즉 하중이 가압되는 동안에 전체 체적이 계속 감소만 되는 형태이다. 이러한 축방향 하중에 의해 시료의 축방향 높이가 작아지며, 한편 직경방향 길이가 증가하기는 하지만 증가하는 비율이 축방향 압축량보다 작기 때문에 포아송비가 작아서 결국 전체 체적이 감소되기 때문이다.

Fig. 10(e, L-5-11)와 Fig. 10(f, Z-7-3)는 위의 경우와 정반대 현상을 보이고 있다. 재하-재재하 가압을 하는 동안 체적 변화율은 음의 방향으로만 변형을 하는 경우이다. 이러한 경우는 축방향 압축력이 증가함에 따라 직경방향 변형률의 증가가 비례적으로 커서, 전체의 체적이 증가하는 경우이다. 즉 포아송비가 0.5를 넘기는 경우에 나타나는 현상이다.

일반적으로 알려져 있는 체적 변형률 형태(Fig. 10(a, b))를 정상거동(normal behavior)으로, 양의 변형을 계속하는 형태(Fig. 10(c, d))를 양의 거동으로(positive behavior), 음의 변형을 계속하는 형태(Fig. 10(e, f))를 음의 거동으로 간주하여 거동분포를 분석하면 Fig. 11과 같다. 404개의 시료 중 정상거동 양상을 보이는 형태가 절대적으로 우세한 57.18%에 이르고 있음을 확인할 수 있다. 음의 거동, 양의 거동이 발현되는 이유는 암석시료가 불균질성이며 눈에 보이지 않는 미세한 불연속면의 내재로 인한 비등방성재료이기 때문에 발생하는 양상으로 사료된다.

8. 검토

포아송비는 하중이 증가할수록 그 값이 증가한다고 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 밝혀졌듯이 증가하는 형태가 절대적으로 우세한 60.89%로 나타나지만, 수렴하는 경우도 22.77%, 감소하는 경우도 16.34%로 나타나고 있다. 즉 보편적인 견해인 증가한다고만 할 수가 없는 현상이다. 체적 변형률도 계속 증가하는 현상과 감소하는 현상의 결과를 볼 수 있었다.

실무기술자들은 사용하중 범위에 따라 포아송비의 범위를 최적화된 상태의 것으로 선택해야 할 것이다. 사용하중은 실험에서 나타나는 파괴하중에 비해서 매우 낮기 때문에 포아송비의 거동특성을 고려하여 현지암석 시료의 실험결과에 따른 값을 적용해야 할 것이다. 그러나 매우 낮은 사용하중에서의 포아송비 값은 매우 높거나 낮기 때문에 값을 선택할 때는 설계조건을 검토해야 할 것이다. 체적 변형률의 결과는 압축을 받는 재료의 dilatancy와 직결되는 문제로 사용하중에 따른 적용범위를 명확히 해야 할 것으로 사료된다.

9. 결론

경상분지 퇴적암 중 사암, 셰일, 이암, 역암 및 응회암 시료 404개를 대상으로 일축압축조건하에서 재하-재재하 가압을 시행하여 포아송비의 거동과 체적 변형률 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포아송비는 하중재하 단계에 따라 증가, 수렴 및 감소 거동을 나타내고 있으며 증가 거동이 60.89%로 절대적으로 우세한 양상을 보이고 있다.
2. 체적 변형률은 정상거동, 양의 거동 및 음의 거동을 나타내나 정상거동이 57.18%로 매우 우세한 양상을 보이고 있다.
3. 포아송비의 초기거동은 매우 높거나 매우 낮은 값을 보이기 때문에 초기값은 사용 하중 범위에서 설계조건을 감안하여 적용해야 할 것이다.

참고문헌

1. Afrouz, A. (1991), "Determination of rock mass modulus nonlinear variation with loading and depth", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 28, No. 2-3, pp. 179-183
2. ASTM D 70012-07e1, "Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures", *Annual Book of ASTM Standards*, 2009.
3. ASTM D 2938-95, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Annual Book of ASTM Standards*, 2005.
4. ASTM D 3148-96, "Test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression", *Annual Book of ASTM Standards*, 2005.
5. ASTM D 4543-01, "Practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances", *Annual Book of ASTM Standards*, 2005.
6. Bieniawski Z.T. (1967), "Mechanism of Brittle Fracture of Rock, Part 2-Experimental, Studies", *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 4.
7. Gercek H. (2007), "Poisson's ratio value for rocks", *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 44, pp. 1-13.
8. Gill D.E., Corthesy R. & M.H. Leite (2005), Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties, *Eng. Geol.*, Vol. 78, pp. 29-51.
9. Hiltcher R., Carlsson A. and Olsson T. (1984), "Determination of the deformation properties of bedrock under turbine foundations", *Rock Mech. and Rock Eng.*, Vol. 17, No. 1, pp. 37-49.
10. ISRM (1979), "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 16(2), pp. 135-140.
11. ISRM (1981), Part 1, "Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials".
12. ISRM (1999), Draft "ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression", *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 36, No. 3, pp. 279-289.
13. Kim, J.Y. (1985), "Statistics", Kyung-Mun Sa ed.
14. Kim, U.C., Kim, J.J., Park, B.W., Park, S.H., Song, M.S., Lee, Y.J., Juon, J.W. and Cho, S.S. (2005), "Modern Statistics", Col. of Nature, SNU, Young-Ji sa ed.
15. Kwon S. and Wilson J.W. (1999), "Deformation Mechanism of the Underground Excavations at the WIPP Site", *Rock Mech. and Rock Eng.*, Vol. 32, No. 2, pp. 101-122
16. Lau J.S.O. and Chandler N.A. (2004), "Innovative laboratory testing", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, pp. 1427-1445.
17. Lee, J.S., Moon, J.K. & Choi, W.E. (2012), "An analysis of elastic moduli behaviors of uniaxial compression under loading-reloading test(1)", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 8, pp. 65-78.
18. Min K.B. and Jing L. (2004), "Stress dependent mechanical properties and bounds of Poisson's ratio for fractured rock masses investigated by a DFN-DEM technique", *Sinorock 2004 Symposium, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 41, No. 3, CD-Rom.
19. Ofogbu G.I. and Curran J.H. (1992), "Deformability of intact rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 29, No. 1, pp. 35-48.
20. Poisson S.D. (1781-1840), "Memoire sur l'equilibre et le mouvement des corps elastiques, Mem de l'Acad, Paris, 1829, pp. 8.
21. Yamaguchi U. (1970), "The number of test-pieces required to determine the strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 7, No. 2, pp. 209-227.
22. Wikipedia (2011), <http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s-ratio>.



이 종 석

1976년 서울대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1980년 서울대학교 대학원 토목공학과 공학석사
1986년 서울대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 052-259-2259
E-mail: jslee@ulsan.ac.kr
현재 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수



문 종 규

1964년 서울대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2002년 울산대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2007년 울산대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 052-259-1668
E-mail: mjk1067@hanmail.net
현재 동명기술공단(주) 부사장, 울산대학교 건설환경공학부 겸임교수



최 응 의

2003년 한국교육개발원 기계 공학사
2007년 울산대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2009년 울산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

Tel: 052-251-2113
E-mail: Choiwe@hhi.co.kr
현재 현대중공업(주), 해양사업본부 설계부장