

그라우팅 주입성능 실내실험 장비 개발 및 신뢰도 평가

Development and Assessment of Laboratory Testing Apparatus on Grouting Injection Performance

진 현 우¹⁾ · 유 병 현²⁾ · 이 장 근[†]

Hyunwoo Jin · Byunghyun Ryu · Janguen Lee

Received: July 20th, 2016; Revised: July 22nd, 2016; Accepted: August 24th, 2016

ABSTRACT : Grout is generally operated with low viscous material similar to water, but grout for micro crack with high viscous materials and high injection pressure is gradually increased under the development of underground and subsea space. In order to estimate grouting injection performance considering crack width, viscosity of grouting materials, and injection pressure, there should be a reliable standard laboratory testing method. In this paper, theoretical injection mechanisms of grouting materials are presented as radial and linear flows, and laboratory testing apparatus are introduced to simulate each flow case. Radial flow is simulated by using acrylic disk plates which are able to spread grouting material radially from the center of the disk plates, and linear flow is simulated by using stainless parallel plane plates which are able to spread grouting material linearly. Apparatus are consist of upper and lower plates and industrial films with different thickness are placed between plates in order to simulate various crack widths. Laboratory verification tests with these apparatus were conducted with tap water (1cP at 20°C) as an injection material. Through the laboratory testing results, the best laboratory testing method is recommended in order to estimate grouting injection performance.

Keywords : Grout, Viscous material, Viscosity, Micro crack, Laboratory testing, Injection performance

요 지 : 국내 그라우팅은 주로 물과 유사한 점도를 가진 재료를 이용하여 시공되고 있다. 하지만 최근에는 지하공간 및 해저공간 개발이 활발해짐에 따라 미세균열 보강을 위한 고점도의 그라우팅 재료와 고압의 주입압력을 사용하는 그라우팅 시공이 증가하는 추세이다. 따라서 균열 폭, 그라우팅 재료의 점도, 주입압력을 고려하여 그라우팅 재료의 주입성능을 평가할 수 있는 실내실험 기준이 마련되어야 한다. 본 논문에서는 그라우팅 재료가 주입되는 방식인 방사형 흐름과 선형 흐름에 관한 메커니즘을 이론적으로 정리하고, 각각의 흐름을 모사할 수 있는 실내실험 장비를 소개하고 있다. 방사형 흐름은 원형의 아크릴판으로 제작하여 그라우팅 재료가 중심에서 방사형으로 퍼져나가는도록 모사하였고, 선형 흐름은 평행한 스테인리스 철판으로 제작하여 그라우팅 재료가 한쪽 방향으로 주입되도록 그라우팅 재료의 주입 메커니즘을 모사하였다. 실내실험 장비는 상판과 하판으로 구성되어 있으며, 이 사이에 다양한 두께의 공업용 필름을 설치하여 현장에서 발생하는 다양한 균열 폭을 모사하였다. 본 연구에서 사용된 주입재료는 재료적 특성인 점도를 고정하기 위해 상온(20°C)에서 1cP로 알려진 물을 사용하여 실내실험 장비의 성능테스트를 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 최적의 그라우팅 재료 주입성능 평가 기법을 소개하고자 한다.

주요어 : 그라우트, 점성 재료, 점도, 미세균열, 실내실험, 주입성능

1. 서 론

최근 대도시를 중심으로 도시의 인구수용력이 한계점에 도달하고 있다. 도심지 공간부족 현상을 해결하기 위해 새로운 공간을 필요로 하는 요구가 증대되고 있으며, 그 대안으로 지하공간이 부상하고 있다(최춘식, 2002). 우리나라의 경우 국토의 70%가 산악지역으로 지하공간 확보가 용이한 지리적 이점을 보유하고 있어 추후 지하공간 개발이 활발해질 것으로 예상된다. 지하공간 개발을 위한 지하굴착 시 유의해야 할 사항 중 하나는 지하수 누출이다. 소량의 지하수 누출만

으로도 구조물의 안정성을 위협할 수 있기 때문에(Sievanen, 2003) 이를 대비할 수 있는 연구 및 기술 개발이 선행되어야 한다(Garshol et al., 2012). 따라서 향후에는 지하수 압력에 대응할 수 있는 고점도 그라우팅 재료 시장 및 고압 그라우팅 시공이 활발해질 것으로 예측된다(Barton, 2004).

상대적으로 지하공간 개발이 활발한 미국, 유럽 등의 선진국에서는 지난 20년간 고압의 그라우팅 시공 및 이에 적합한 고점도의 그라우팅 재료 개발을 중요한 미래 산업 기술로 여겨 활발한 연구를 진행해왔다(Garshol, 2007). 이에 반해 국내에서는 고점도 그라우팅 재료 시장이 아직까지는

1) Department of Geospace Engineering, University of Science & Technology

2) Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Department of Geospace Engineering, University of Science & Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

활성화되지 않은 관개로 고점도의 그라우팅 재료 및 고압의 그라우트에 대한 성능 평가의 기준이 제시되지 않은 실정이다. 국내 대부분의 그라우팅 시공현장에서는 연구에 의한 방법이 아닌 경험적 방법에 의존하여 그라우팅 재료를 물과 유사한 점도로 유지해 시공하고 있다(Do, 2012). 하지만 향후 지하공간 건설에 따른 미세균열 보강, 핵폐기물 처리에 필요한 고기밀 차단벽 시공, 해저터널 시공의 차수 및 보강 등에 고점도 그라우팅 재료 사용 및 고압 그라우팅 시공이 활발해질 것으로 예상된다. 따라서 그라우팅 재료 주입성능을 평가하기 위해 주요 변수를 고려한 기준화된 실내실험 방법이 요구된다(Kong, 2005).

기존의 연구자들은 실제 지반 균열을 따라 그라우팅 재료가 주입되는 메커니즘을 방사형과 선형으로 모사하여 주입 성능에 관한 연구를 진행해왔다. 지반 균열을 파이모양으로 모사하여 주변부에서 중심부로, 즉 방사형으로 수렴하여 침투하는 유량에 관한 방정식을 유도하였고(Sichart & Kyrieleis, 1930), 시추공을 중심으로 하여 수평방향으로 형성된 균열을 방사형으로 퍼져나가는 것에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구를 수행하였다(Witherspoon et al., 1979). 또한 두 개의 평행한 판 사이를 선형적으로 통과하는 유동체의 흐름 방정식을 유도하였다(Polubarinove-Kochina, 1962; Snow, 1965; Louis, 1969; Noorishad et al., 1982; Bear, 1972; Gale, 1977). 그라우트에 관해 많은 연구가 수행되어 왔지만 그라우팅 재료의 주입성능을 평가할 수 있는 기준은 정립되지 않은 실정이다.

본 논문에서는 그라우팅 재료의 방사형 및 선형 주입을 이론적으로 해석하고 이를 형상화하여 실내실험 장비를 제작하였다. 실내실험 장비를 이용하여 수행한 실험결과와 이론적 해석을 비교·분석하여 실험장비 및 해석방법의 신뢰성을 평가하고, 이를 바탕으로 최적의 그라우팅 재료 주입 성능 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 그라우팅 재료 주입성능의 이론적 해석방법

2.1 방사형 흐름(Radial flow)

지반에 시공하는 그라우팅은 수직으로 천공하고 주입공에 그라우팅 재료를 주입한 뒤 압력을 가해 그라우팅 재료가 지반 균열을 따라 방사형으로 주입된다(Borgesson et al., 1992, Bernander, 2004). 방사형 그라우팅 재료의 주입 메커니즘은 주변부의 지반을 강화하기 위한 말뚝기초 시공에서 주로 활용하고 있다. 이러한 메커니즘을 이론적으로 해석하기 위해, 그라우팅 재료의 주입과정을 Fig. 1과 같이 나타냈으며, 이는 유량 Q 를 가진 그라우팅 재료의 흐름으로 Darcy's

Law에 의해 Eq. (1)로 정리할 수 있다.

$$Q = \int_0^{2\pi} K \dot{\bar{i}} A = \int_0^{2\pi} r_o e K \frac{dh}{dr} d\theta = 2\pi r_o e K \frac{dh}{dr} \quad (1)$$

여기서, K 는 투수계수(m/s), i 는 동수경사, A 는 침투단면적(m²), r_o 는 그라우트 재료의 침투거리(m), e 는 균열 폭(m)이다.

Eq. (1)은 주입반경과 수두로 적분하여 Eq. (2)로 정리할 수 있다(Sichart & Kyrieleis, 1930).

$$Q = \frac{2\pi e K (h_o - h_w)}{\ln \frac{r_o}{r_w}} \quad (2)$$

여기서, r_w 는 주입관의 반경(m), h_o 는 주입부의 수두(m), h_w 는 침투부의 수두(m)이다.

Eq. (2)에서 사용하고 있는 투수계수(K)는 재료의 특성인 점성, 밀도, 중력가속도 및 고유투과계수(k , intrinsic permeability)에 영향을 받는 인자로서 그 관계식은 Eq. (3)과 같고, 고유투과계수(k , intrinsic permeability)는 Eq. (4)로 정의되므로, 투수계수(K)는 Eq. (5)로 나타낼 수 있다(Witherspoon et al., 1979).

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (3)$$

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (4)$$

$$K = \frac{e^2 \rho g}{12 \mu} \quad (5)$$

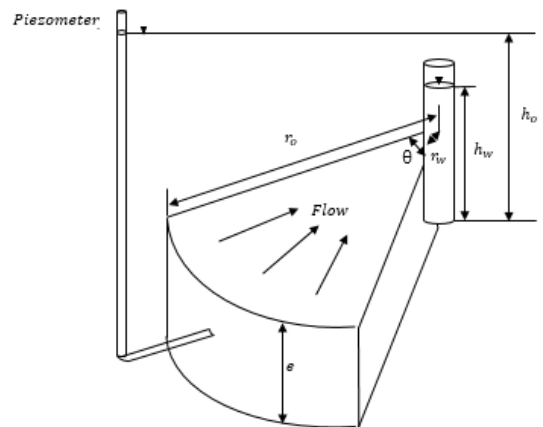


Fig. 1. Radial grout flow (Sichart & Kyrieleis, 1930)

여기서, μ 는 그라우팅 재료의 점도(Pa·s), ρ 는 그라우팅 재료의 밀도(kg/m³), g 는 중력가속도(m/s²)이다.

2.2 선형 흐름(Linear flow)

그라우팅 재료의 선형 흐름(Linear flow)의 이론적 해석방

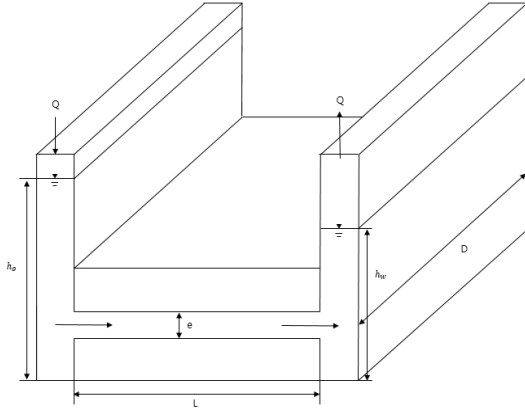


Fig. 2. Linear grout flow

법은 방사형 흐름(Radial flow) 해석방법과 유사하지만 Fig. 2와 같이 그라우팅 재료의 주입과정을 1차원 흐름으로 간주하여 해석하였다. 그라우팅 재료의 주입을 1차원 흐름으로 간주한 선형 흐름에서 그라우팅 재료의 유량 Q 는 Darcy's Law에 의해 Eq. (6)으로 나타낼 수 있다(Witherspoon et al., 1979).

$$Q = \frac{e^3 \rho g D (h_o - h_w)}{12 \mu L} \quad (6)$$

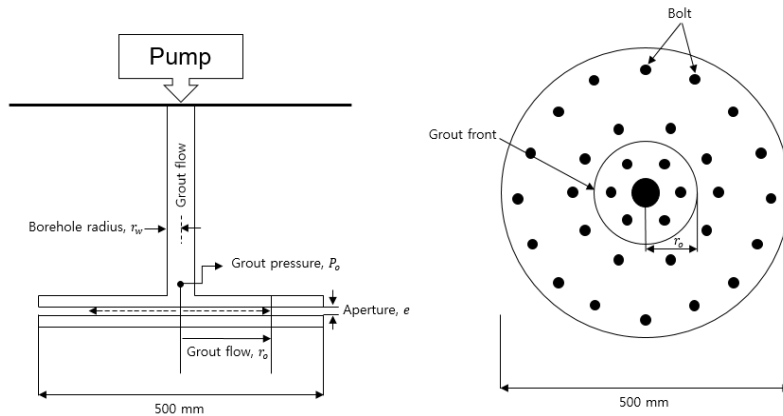
여기서, D 는 균열의 수직거리(m), L 는 침투거리(m)이다.

3. 실내실험

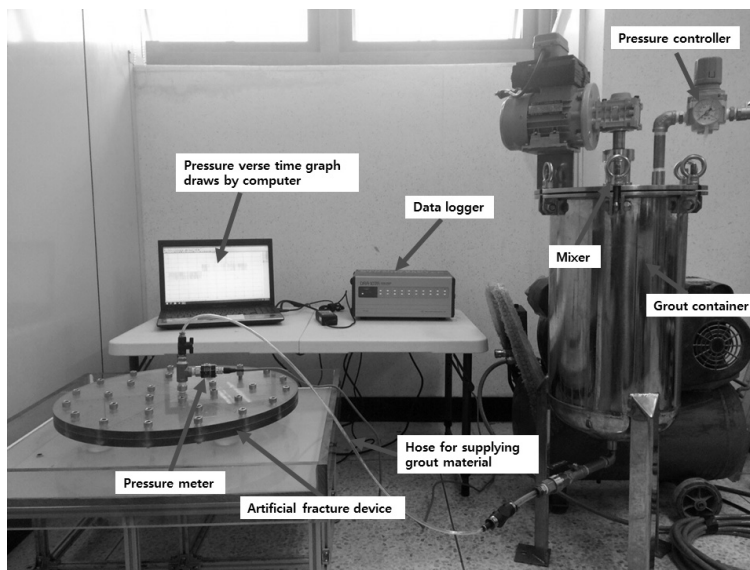
3.1 실험장비 제작

3.1.1 원판형 실험장비

방사형으로 주입되는 그라우팅 메커니즘을 모사하기 위해



(a) Disk plate model of fractured permeable media (Mohammed et al., 2014)



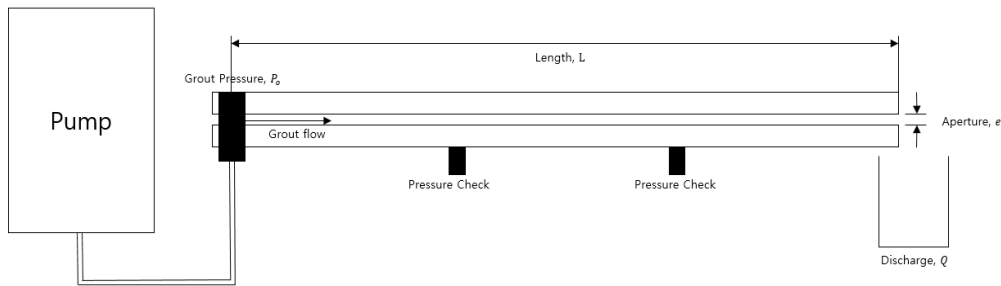
(b) Disk plate apparatus

Fig. 3. Experimental radial grout flow testing apparatus

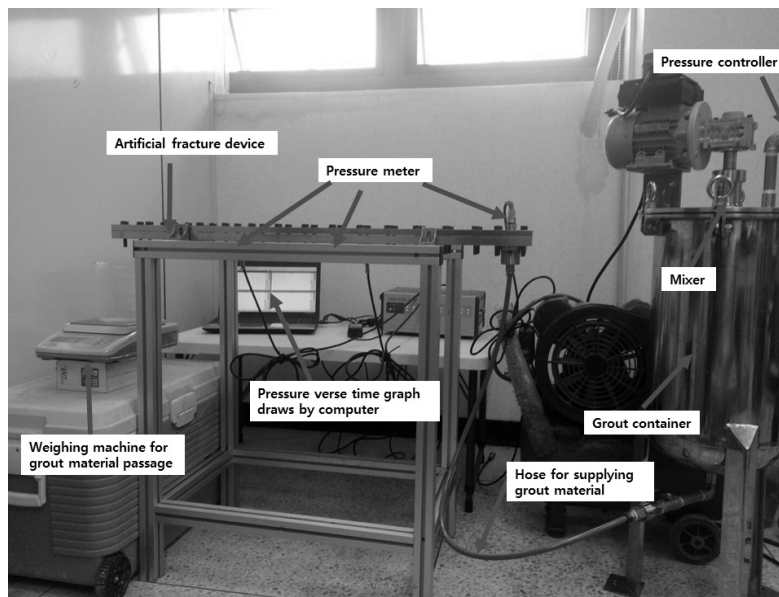
Fig. 3과 같은 원판형 실험장비를 제작하였다(Mohammed et al., 2014, KICT, 2014). 그라우팅 재료의 시간에 따른 주입반경을 육안으로 관찰할 수 있도록 2개(상판, 하판)의 판을 아크릴로 제작(직경 500mm, 개별 두께 15mm)하였으며, 상판과 하판 사이에 다양한 두께의 공업용 필름(폴리에스테르, 열수축 1% 이하, 탄성계수 450kgf/mm^2)을 설치하여 주요변수인 균열 폭을 조절할 수 있도록 하였다. 상판과 하판 체결은 균등한 압력 배분을 위해 전자식 토크렌치를 사용하였다. 그라우팅 재료는 교반장치(Mixer)를 포함한 소형 챔버에서 준비되며, 소형 챔버 상부덮개에는 주입 성능에 영향을 미치는 변수인 주입압력을 조절할 수 있는 압력조절 장치를 갖추고 있다. 압력조절 장치를 이용해 설정한 주입압력의 전달여부 확인을 위해 상판 중심부의 주입부(직경 11mm)에 압력계를 설치하여 주입압력을 확인하였다. 아크릴로 제작한 원판형 실험장비는 그라우팅 재료가 균열을 통과하는 것을 육안으로 확인할 수 있어 그라우팅 재료가 배출되기 시작하는 시간을 측정하였다.

3.1.2 평행평판형 실험장비

그라우트 주입부에서 급격하게 좁아지는 지반 균열을 원활하게 통과해 확산되는지를 파악하기 위한 목적으로, 그라우팅 재료의 주입 흐름을 1차원 흐름으로 단순화시켜 Fig. 4와 같은 평행평판형 실험장비를 제작하였다(KICT, 2013). 그라우팅 재료 준비에 필요한 장비인 소형 챔버는 원판형과 동일하지만 1차원 흐름을 모사하기 위해 상판과 하판을 직사각형의 스테인리스 철판(상판두께 15mm, 하판두께 15mm, 폭 110mm, 길이 1,000mm)으로 제작하였다. 원판형 실험장비와 달리 육안으로 그라우팅 재료의 통과를 확인하지 못하는 단점이 있기 때문에 이를 보완하기 위해 3개의 압력측정 장치(그라우팅 재료 주입부에 1개, 균열모사부에 2개)를 설치하여 압력변화로 그라우팅 재료의 주입상태를 판단하게 하였으며, 추가적으로 상부 평판에는 4등분 되는 지점에 직경 1.5cm의 구멍의 아크릴을 총 3개 삽입하여 주입되는 동안 상부 평판의 지점별로 그라우팅 흐름을 육안 관측이 가능하도록 제작하였다. 1차원 흐름은 공업용 필름의 폭 80mm를 제외한 실제 흐름이 발생하는 폭 30mm로 통과하도록 제작



(a) Parallel plate model of fractured permeable media



(b) Linear grout flow test setup

Fig. 4. Experimental linear grout flow testing apparatus

되었기에 통과 시간뿐만 아니라 최종적으로 유출되는 통과 유량을 시간에 따라 측정할 수 있다.

3.2 해석방안

3.2.1 원판형 실험장비

원판형 실험장비는 그라우팅 재료가 중심부에서 방사형으로 퍼져나가는 방식으로, 상판과 하판 사이에 공업용 필름을 설치하여 균열을 모사하고 그라우팅 재료가 통과하여 빠져나가기 시작하는 시간을 측정한다. 방사형 흐름해석에서 도출된 이론식인 Eq. (2)와 주어진 실험조건에서 유량 계산식인 Eq. (7)을 연립하여 시간 t 에 관하여 정리하면 Eq. (8)과 같다.

$$Q = \frac{\pi r_o^2 e}{t} \quad (7)$$

$$t = -\frac{6\mu r_o^2}{e^2 P_o} \ln\left(\frac{r_o}{r_w}\right) \quad (8)$$

여기서, t 는 그라우팅 재료가 균열을 통과하여 밖으로 배출되기 시작하는 시간(sec)이다.

3.2.2 평행평판형 실험장비

3.2.2.1 통과시간에 의한 해석방안

평행평판형 주입장비는 원판형과 유사한 방법으로 해석하지만 그라우팅 재료의 흐름이 1차원이라는 차이가 있다. 1차원 흐름해석에서 도출된 이론식 Eq. (6)과 주어진 실험조건에서 유량 계산식인 Eq. (9)를 연립하여 시간 t 에 관하여 정리하면 Eq. (10)과 같다.

$$Q = \frac{LD e}{t} \quad (9)$$

$$t = \frac{12\mu L^2}{e^2 P_o} \quad (10)$$

3.2.2.2 통과유량에 의한 해석방안

평행평판형 실험장비는 그라우팅 재료의 흐름을 1차원으로 모사하여 제작하였기 때문에 주입 재료가 한 방향으로만 배출되어 통과유량을 측정할 수 있다. 그라우팅 재료가 균열 모사부에 진입한 시간 이후에도 그라우팅 재료의 주입이 스테인리스 균열 모사부에서도 연속적으로 이뤄지는지를 파악하기 위해서 시간에 따른 그라우팅 재료의 통과 유량을 측정하였다. Eq. (6)에 베르누이의 원리를 적용하여 Ep. (11)

로 정리하였으며 유량과 유입부의 압력을 측정하였다.

$$Q = \frac{e^3 DP_o}{12\mu L} \quad (11)$$

3.3 실험조건

3.3.1 통과시간을 기준으로 한 주입실험 조건

원판형 및 평행평판형 실험장비를 이용하여 그라우팅 재료가 균열 모사부를 통과해 밖으로 배출되기 시작하는 시간을 측정하였다. 주입재료는 물(1cP, 20°C)을 사용하여 재료적 특성인 점도가 장비의 성능테스트 결과에 영향을 미치지 않게 하였으며 주입압력 및 균열 폭을 변화시켜가며 실험장비 별로 각각 2번씩 성능테스트를 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타낸 것과 같이 원판형 실험장비는 균열 폭 0.1mm일 때 주입압력 36,000Pa, 균열 폭 0.025mm일 때 주입압력 54,000Pa로 주입성능 평가를 실시하였고, 평행평판형 실험 장비는 균열 폭 0.1mm일 때 주입압력 20,000Pa, 균열 폭 0.05mm일 때 주입압력 52,000Pa로 주입성능 평가를 실시하였다.

3.3.2 통과유량을 기준으로 한 주입실험 조건

추가적으로 평행평판형 실험장비로 균열 모사부를 통과해 밖으로 배출되는 그라우팅 재료의 통과유량을 측정하여 그라우팅 재료의 주입성능 평가를 실시하였다. 주입재료는 이전과 동일하게 물을 사용하였고 실험조건은 Table 2에 나타낸 것과 같이 주입압력을 21,000Pa로 고정한 뒤, 균열 폭을 0.1mm, 0.05mm로 변화시켜 주입성능 평가를 실시하였다. 구하고자 하는 통과유량은 시간에 따라 값이 변하는 결과로서, 시간에 따른 통과유량의 평균값과 기울기 값을 측정하여 이론값과 비교·분석하였다.

Table 1. Condition of grouting injection performance test

Model	Viscosity (cP)	Crack width (mm)	Injection pressure (Pa)
Disk plate	1 (20°C)	0.1	36,000
		0.025	54,000
Parallel plate		0.1	20,000
		0.05	52,000

Table 2. Condition of additional grouting injection performance test

Model	Viscosity (cP)	Injection pressure (Pa)	Crack with (mm)
Parallel plate	1 (20°C)	21,000	0.1
			0.05

4. 실내실험 결과

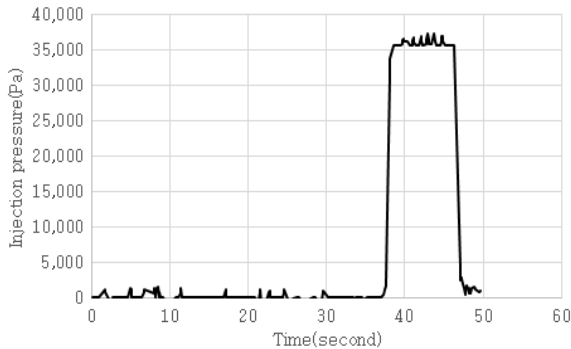
4.1 원판형 장비 주입성능 평가

원판형 장비의 주입성능 평가는 Eq. (8)을 이용하여 계산한 통과시간과 주입실험을 통해 얻은 통과시간을 비교하였으며 결과는 Table 3과 같다. 균열 폭이 0.1mm이고 주입압력이 36,000Pa일 때 이론식에 의한 통과시간은 4초였으나 실험에 의해 물이 원판 주변으로 흘러나오기 시작한 시간은 1초였고, 균열 폭이 0.025mm이고 주입압력이 54,000Pa일 때 이론식에 의한 통과시간은 355초라는 결과를 얻었으나 실험에 의해 물이 원판 주변으로 흘러나오기 시작한 시간은 5초였다. 2번의 실험 모두 통과시간 결과에 상당한 오차가 발생했으며 오차의 정도는 균열 폭이 작을 때 더욱 크게 나타났다.

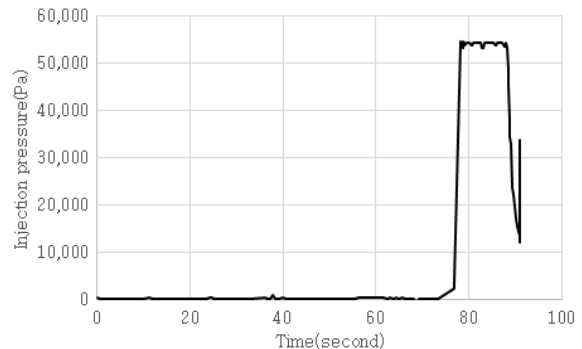
통과시간의 오차를 발생시킬 수 있는 원인으로는 주입압력과 균열 폭이 있다. 원인규명을 위해 압력조절장치를 이용해 설정한 주입압력이 주입부에 잘 전달되는지를 주입부의 압력계를 통해 측정된 결과와 비교하였다. Fig. 5(a)는 균열 폭을 0.1mm, 주입압력을 36,000Pa로 설정한 후 주입실험을 실시했을 때, Fig. 5(b)는 균열 폭을 0.025mm, 주입압력을 54,000Pa로 설정한 후 주입실험을 실시했을 때 측정

된 주입압력으로 설정한 주입압력이 주입부에 그대로 전달된 것을 확인할 수 있다.

따라서 통과시간 오차를 발생시킬 수 있는 변수를 균열 폭으로 한정하고, 아크릴로 제작된 상판과 하판의 균열 폭이 주입압력에 의해 영향을 받았을 것으로 예상하여 상용 FEM(Finite Element Method) 프로그램인 SOLIDWORKS로 확인하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 우선 실험에 사용된 아크릴 판의 도면을 이용하여 초기 형상을 구현하고 각각의 볼트 체결부위는 고정된 상태로 상부에서 아크릴 판 표면에 균일하게 50,000Pa의 압력이 가해지는 조건에서 탄성 변형으로 약 0.03mm의 변위가 발생하는 것으로 확인하였다. 따라서 상판과 하판이 50,000Pa의 압력으로 약 0.06mm의 공간이 발생한다. 이러한 결과를 반영하여 균열 폭 0.1mm와 0.025mm의 균열 폭에 추가적인 0.06mm를 고려하여 Eq. (8)을 이용해 해석을 수행한 결과 측정된 통과시간과 상당히 유사한 것을 확인할 수 있었다(Table 4). 결론적으로 아크릴 재질로 그라우팅 주입성능 장비를 제작할 경우에는 별도의 추가적인 보강이 필요하다. 주입압력이 비교적 낮거나 균열 폭이 상대적으로 큰 경우에는 아크릴 재질을 이용한 장비로 실험이 가능하지만 수치해석을 통한 정밀한 검토 및 주의가 필요하다.



(a) Crack width = 0.1 mm



(b) Crack width = 0.025 mm

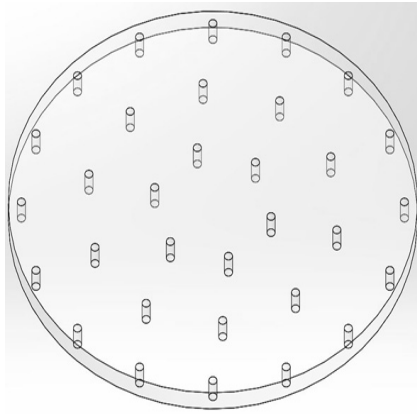
Fig. 5. Measured injection pressure of disk plate apparatus

Table 3. Measured and calculated passing time with disk plate model

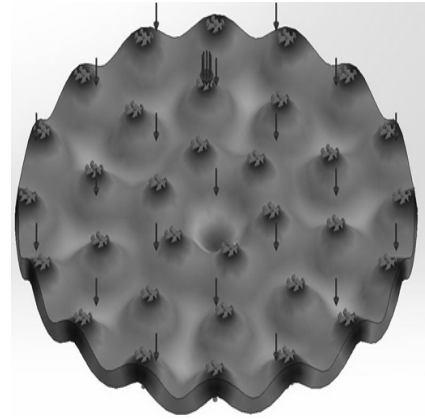
Viscosity (cP)	Crack width (mm)	Injection pressure (Pa)	Passing time (sec)	
			Calculated value	Measured value
1	0.1	36,000	4	1
	0.025	54,000	355	5

Table 4. Modified calculated passing time with disk plate model

Viscosity (cP)	Crack width (mm)	Injection pressure (Pa)	Passing time (sec)	
			Calculated value	Measured value
1	0.16	36,000	2	1
	0.085	54,000	4	5



(a) Geometry of acrylic plate



(b) Deformed acrylic plate under uniformly distributed pressure

Fig. 6. Deformation analysis of acrylic plate under uniformly distributed pressure

4.2 평행평판형 장비 주입성능 평가

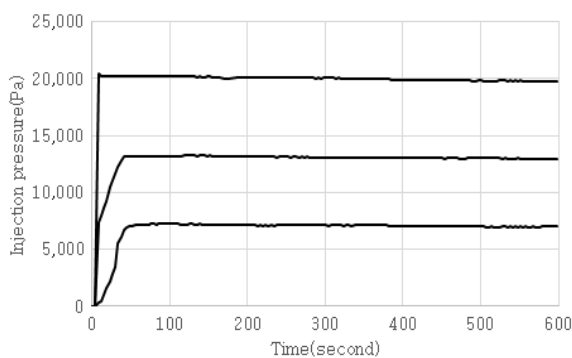
4.2.1 통과시간을 비교대상으로 선정한 신뢰성평가

평행평판형 장비를 이용한 그라우팅 주입성능 평가는 원판형 장비와 동일하게 물을 주입재료로 활용하여 실험을 실시하였으며, Fig. 7을 통해 설정한 주입압력이 그라우팅 재료의 주입부 및 균열모사부에 전달되는 것을 확인하였다. Fig. 7(a)는 균열 폭 0.1mm, 주입압력 20,000Pa일 때, Fig. 7(b)는 균열 폭 0.05mm, 주입압력 52,000Pa일 때 주입부 및 균열모사부의 압력을 측정된 결과이다. 압력이 가장 크게 측정되는 부분이 주입부에서의 압력이며 그라우팅 재료가 주입되는 방향으로 압력이 감소하여 수두차로 인해 그라우팅 재료가 주입되고 있다. Eq. (10)을 이용하여 구한 통과시간(sec)과 실험에서 측정된 통과시간(sec)을 Table 5에 비교하여 나

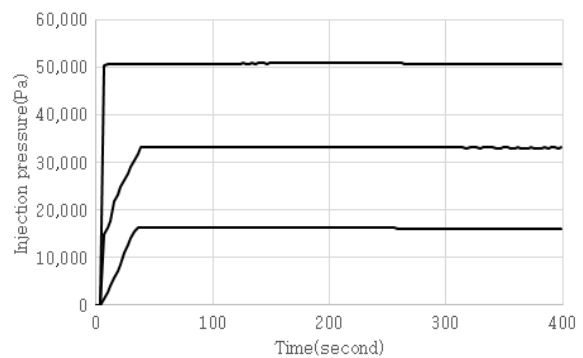
타내었고 서로 거의 일치하였다. 이러한 결과는 원판형 장비에서 발생한 오차가 아크릴 재질에 문제가 있다는 사실을 뒷받침하고 있다. 스테인리스 철판은 아크릴 재질과 비교하여 강성이 높기 때문에 비교적 높은 주입 압력에서도 변형이 발생하지 않기에 이론적으로 계산된 통과시간과 측정된 결과가 일치한다는 사실을 실험적으로 증명하였다.

4.2.2 통과유량을 비교대상으로 선정한 신뢰성 평가

통과유량을 활용해 신뢰성 평가를 할 경우 주입된 그라우팅 재료가 배출되는 시점이 아닌 지속적인 주입상태를 확인할 수 있기 때문에 더욱 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 평행평판형 장비는 주입재료가 균열부를 통과해 한 방향으로 배출되도록 제작했기 때문에 통과유량에 의한 신뢰성 평가가 가능하다. 통과유량에 관한 이



(a) Crack width = 0.1 mm

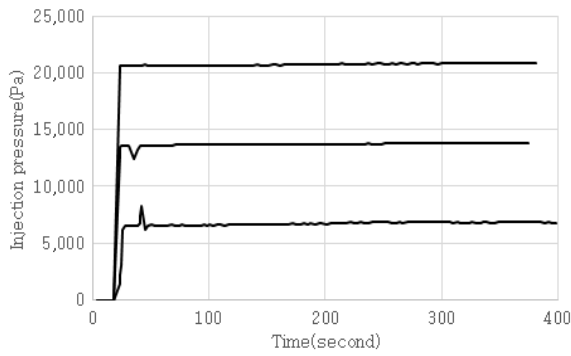


(b) Crack width = 0.05 mm

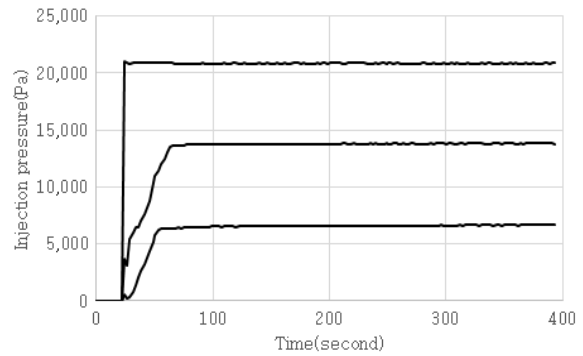
Fig. 7. Measured injection pressure using parallel plate apparatus

Table 5. Measured and calculated passing time with parallel plate model

Viscosity (cP)	Crack width (mm)	Injection pressure (Pa)	Passing time (sec)	
			Calculated value	Measured value
1	0.1	20,000	6	6
	0.05	52,000	23	21

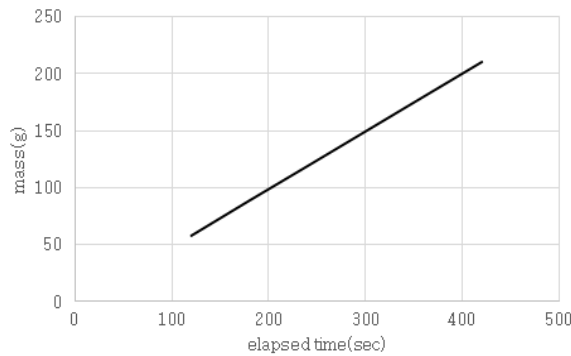


(a) Crack width = 0.1 mm

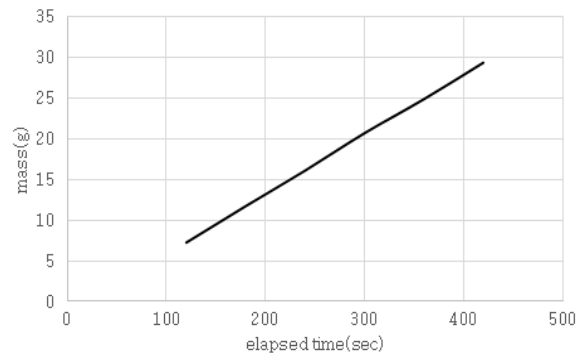


(b) Crack width = 0.05 mm

Fig. 8. Measured injection pressure using parallel plate apparatus



(a) Crack width = 0.1 mm



(b) Crack width = 0.05 mm

Fig. 9. Measured time vs. discharge curve using parallel plate apparatus

Table 6. Additional injection performance test using parallel plate apparatus

Viscosity (cP)	Injection pressure (Pa)	Crack width (mm)	passage rate of discharge (m ³ /sec)		Error (%)		
			Calculated value	Measured value		Slope value	Mean value
				Slope value	Mean value		
1	21,000	0.1	5.25E-07	4.99E-07	4.96E-07	5.25	5.96
		0.05	6.56E-08	6.86E-08	6.68E-08	4.34	1.74

론방정식은 Eq. (11)에 정리하였고 주입재료로는 물을 사용하였으며, 주입압력은 21,000Pa과 균열 폭은 0.1mm, 0.05mm로 설정하여 2번의 실험을 실시하였다. Fig. 8(a)는 균열 폭이 0.1mm일 때, Fig. 8(b)는 균열 폭이 0.05mm일 때 주입압력을 측정된 결과이며 이를 통해 주입압력의 전달 및 주입 상태를 확인하였다. 실험은 7분 동안 실시하였으며 분당 통과량을 측정하였다. 주입이 시작되고 균열부를 통과할 때까지는 배출되는 유량이 없어 평균유량 값에 영향을 미칠 수 있으므로 처음 1분을 제외한 나머지 6분의 결과를 Fig. 9에 나타냈으며 Fig. 9(a)는 균열 폭이 0.1mm일 때, Fig. 9(b)는 균열 폭이 0.05mm일 때의 통과량 그래프이다. 통과량은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내며 이는 그라우팅 재료가 시간에 따라 일정한 양이 주입된다는 것으로 해석할 수 있다.

측정한 통과유량의 평균값 및 기울기를 각각 이론방정식에 의한 통과유량의 값과 비교하여 신뢰성을 평가하였다. 그

결과 Eq. (11)에 의해 계산된 통과유량 값과 실험을 통해 측정된 통과유량의 평균값 및 기울기 값이 6% 이내의 오차를 보이며 상당히 유사한 결과를 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 그라우팅 재료의 주입성능을 평가할 수 있는 실내실험 방법 정립을 위해 실험장비를 제작하였다. 점도를 고정변수로 설정하고 균열 폭과 주입압력에 따른 그라우팅 재료의 주입성능 평가를 실시하여 실내실험 장비의 신뢰성 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 주입재료로 점도가 1cP(20°C)인 물을 이용한 결과 스테인리스 철관으로 제작한 평형평판형 장비는 해석방법 및 실험장비의 타당성이 입증된 반면, 아크릴로 제작한 원판

형 장비는 주입압력에 의해 균열 폭에 오차를 발생시키는 것으로 나타났다. 아크릴 재질로 그라우팅 주입성능 장비를 제작할 경우에는 별도의 추가적인 보강이 필요하다. 주입압력이 비교적 낮거나 균열 폭이 상대적으로 큰 경우에는 아크릴 재질을 이용한 장비로 실험이 가능하지만 수치해석을 통한 정밀한 검토 및 주의가 필요하다. 따라서 변수에 오차를 발생시키지 않는 스테인리스 철판으로 제작된 평행평판형 장비가 그라우팅 재료 주입성능 평가를 수행하기에 더욱 적합한 장비라 판단된다.

- (2) 지속적인 그라우팅 재료의 주입상태를 확인하기 위해 평행평판형 장비를 이용하여 추가적인 실험을 수행하였다. 주입재료로 물을 이용하였으며 통과유량을 비교대상으로 선정하여 통과유량의 평균 및 기울기 값을 이론식과 비교하였다. 그 결과 그 오차가 6% 미만으로 산정되어 해석방법 및 실험장비의 타당성이 입증되었다. 결론적으로 그라우팅 주입성능 평가는 정밀도 측면에서 일시적인 통과시간보다 지속적인 모니터링을 통해 측정된 결과와 이론식을 비교·분석하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 그라우팅 재료 주입성능 평가를 위한 장비로서 평행평판형 장비의 타당성을 입증하였다. 통과유량을 비교대상으로 선정할 경우 그라우팅 재료의 지속적인 주입을 확인할 수 있어 주입성능을 더욱 정밀하게 평가할 수 있는 방법이라 판단된다. 향후 약액형 및 마이크로시멘트 등을 주입 재료로 활용하여 그라우팅 재료의 점도를 고려한 추가적인 실험을 수행한다면, 보다 정밀한 그라우팅 재료 주입성능 평가 기법을 정립할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 검증된 그라우팅 주입성능 평가 장비는 향후 다양한 고점도 그라우팅 재료의 점도를 측정하는데 활용이 가능하며 불연속면을 모사한 수치해석의 입력변수 제공 및 그라우팅 재료별 최소 균열폭과 적정 주입압에 대한 평가에 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “지하굴착 시공 효율성 향상을 위한 신재료 활용 기술 개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. 최춘식 (2002), 지하구조물의 누수현황에 따른 시멘트 그라우팅 지수기법에 관한 연구, 지반환경, 제3권 제2호, pp. 20~31.
2. Barton, N. (2004), The theory behind high pressure grouting – parts 1 and 2, Tunnels and Tunneling International, Volume 36, No. 9~10, pp. 28~30, 33~35.
3. Bear, J. (1972), Dynamics of fluids in porous media, Dover Publication Inc., New York, pp. 65~113.
4. Bernander, S. (2004), Grouting in sedimentary and igneous rock with special reference to pressure induced deformations, Technical Report, Lulea University of Technology, pp. 5~18.
5. Borgesson, L., Pusch, R., Fredriksson, A., Hokmark, H., Karnland, O. and Sanden, T. (1992), Final report of the rock sealing project-sealing of zones disturbed by blasting and stress release, Technical Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., pp. 29~41.
6. Do, J. M. (2012), A study on the field application of automatic grouting system, Korea Geo-Environmental Society, Vol. 13, Issue. 1, pp. 63~74 (in Korean).
7. Gale, J. E. (1977), A numerical field and laboratory study of flow in rocks with deformable fractures, Ph.D. Thesis, University of California, pp. 255.
8. Garshol, K. F. (2007), Pre-excavation grouting in tunneling, UGC International, BASF Construction Chemicals Europe LTD, pp. 11~23.
9. Garshol, K. F., Tam, J. K. W., Chau, H. K. M. and Lau, K. C. K. (2012), High pressure grouting for groundwater ingress control in rock tunnels and caverns, Geotechnical Aspects of Tunneling for Infrastructure Development, pp. 105~110.
10. Kong, S. K. (2005), Properties of cement based permeation grout used in ground engineering, Master Thesis, National University of Singapore, pp. 1~7.
11. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2013), Development of key excavation solutions for expandable urban underground space, Research Report, pp. 45~51 (in Korean).
12. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2014), Improving efficiency of underground excavation using new construction materials, Research Report, pp. 12~18 (in Korean).
13. Louis, C. (1969), A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Rock Mechanics Research Report, Imperial College of Science and Technology, pp. 90.
14. Mohammed, H. M., Pusch, R. and Knutsson, S. (2014), Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions, Tunneling and Underground Space Technology. Vol. 45, pp. 10~19.
15. Noorishad, J., Ayatollahi, M. S. and Witherspoon, P. A. (1982), A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis of fractured rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 19, pp. 185~193.
16. Polubarinova-Kochina, P. (1962), Theory of groundwater movement, Princeton University Press, New Jersey, pp. 613.
17. Sichart, W. and Kyrieleis, W. (1930), Grundwasser absekungen bei fundierungsarbeiten.
18. Sievanen, U. (2003), Preliminary estimations of water inflow and grouting conditions at Olkiluoto site, Working Report, Saanio & Riekkola Oy, pp. 5~6.
19. Snow, D. (1965), A parallel plate model of fractured permeable media, Doctor Thesis, University of California, pp. 89~128.
20. Witherspoon, P. A., Amick, C. H., Gale, J. E. and Iwai, K. (1979), Observations of a potential size-effect in experimental determination of the hydraulic properties of fractures, Water Resources Research, Vol. 15, pp. 1142~1146.