

2.4 패커 시험 (Packer Tests)

2.4.1 목적

불균질 대수층에서 지하수 및 용질이동에 대한 예측의 성패는 매질의 특성, 즉, 불균질성을 어떻게 반영하는가에 달려있으며 야외에서 불균질성의 특성화를 위하여 ‘패커’라는 도구의 사용은 불가피하다고 볼 수 있다. 모든 지하매질은 수리적 특성으로서 불균질성을 가진다고 생각될 수 있으며 특히, 이러한 불균질성에 대한 가정이 결정질암반에서는 모의의 주요한 요소가 되기도 한다. 이러한 수리적 불균질성을 파악하기 위하여 지구물리적 탐사법이 사용되기도 하지만 무엇보다도 수리적 특성을 직접 관측하는 것이 중요하다.

2.4.2 패커의 구성과 운영

패커의 운영은 일반적인 수리시험에 비해 많은 장비를 소요하는 작업이므로 야외에 나가기전 사전 운전이 바람직하지만 여의치 않은 경우, 장비현황을 일일이 검토하는 것이 좋으며 특히 구성성분간의 연결부에 소요되는 장비(coupling)를 세밀히 확인하는 것이 중요하다. 그림 2.4.1은 주입과 양수 시험에 사용되는 일반적 패커구성을 나타낸다.

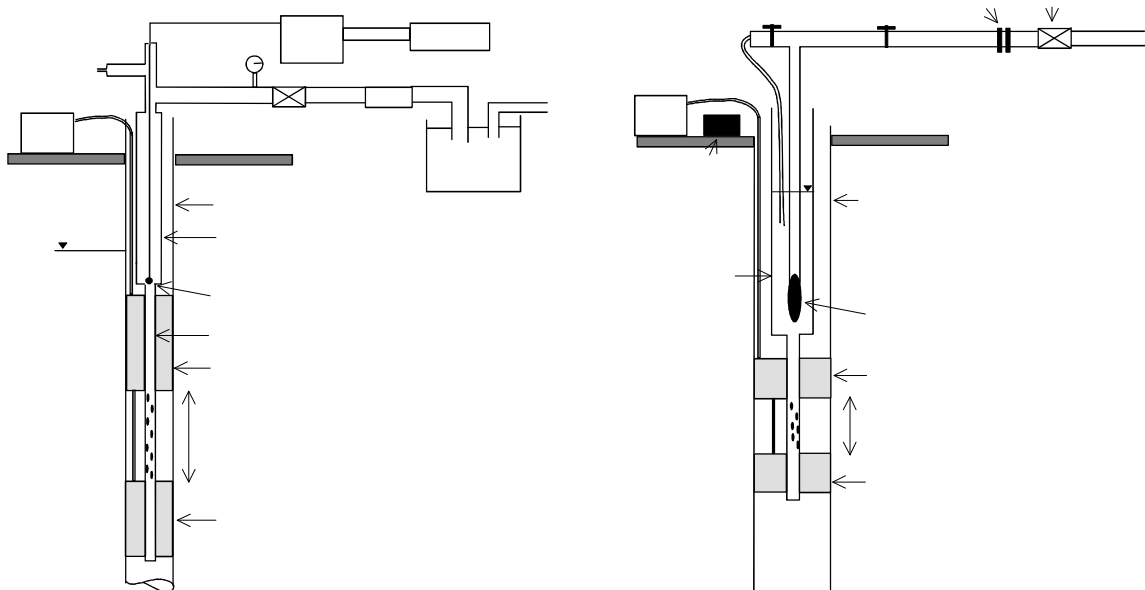


그림 2.4.1 주입 및 양수 시험시 일반적인 패커 구성.

1) 일반 장비 현황 (General equipment)

앞서 기술한 지하매질의 불균질성, 특히, 수직적 특성을 파악하기 위하여 일정구간을 격리시키는 목적으로 패커가 사용된다. 따라서, 격리된 구간의 수리적 특성이나 이 구간을 대표하는 시료를 채취하기 위하여 유용한 도구로 볼 수 있다. 지난 10여년 동안 패커와 관련된 기술이 개발되고 시험되었으나 표준화된 장비로 불릴 수 있는 것은 없으며 대략 두 종류의 패커가 주를 이루고 있다. 제안된 패커를 이루는 네 개의 주 구성요소는 다음과 같다.

- i) 공내 패커부 (downhole packer unit)
- ii) 연결관 (connecting tube)
- iii) 가압부 (Pressure unit)
- iv) 지상 통제부 (Control unit at the surface)

이들 각각의 특성과 역할은 다음과 같다.

i) 공내 패커부: 패커의 역할인 구간격리를 수행하는 부분으로 단일 패커나 이중패커의 사용에 있어서 차이가 있으나 대개 부품장치와 투수관으로 구성되며 기타 사용목적에 따라 시료채취장비, 유량·유압계를 동반하도록 제작되어진다. 현재 사용되고 있는 패커의 부품장치는 면재형 (cotton braided) 또는 철재형 (steel-wire reinforced) 이 있으며 이들 각각의 특성은 다음과 같다.

표 2.4.1 패커의 부품 (expansion) 성질에 관한 요약.

패커 유형	크기-부풀기 전		크기-부풀 후		압력 (Pa/10 ⁵)
	직경 (mm)	길이 (m)	직경 (mm)	길이 (m)	
면재형 (cotton-braided)	125	1.57	196	1.45	3.45
철재형 (steel-wire)	78	1.37	155	1.20	3.45
철재형 (steel-wire)	164	1.54	285	1.42	2.07

최근에 들어서 심정에 대한 패커시험이 늘고 있으며 따라서 좀더 견고하고 압력에 대한 내구성이 강한 철재 부품장비가 유용하게 사용되고 있다. 이렇게 제작된 공내 패커부는 제작당시의 모양을 변형하여 사용하기 곤란한 단점이 있다. 패커의 부품특

성은 시험정의 특성과 시험목적에 따라서 어떤 류의 패커를 선택하는가를 결정하는 가장 중요한 특성으로 볼 수 있으며 일반적으로 NX (76mm)이상의 시험정에서 시험이 가능하도록 제작되지만 세정 (slim hole)에 대해서도 수행할 수 있도록 제작된다.

이중패커나 단일패커를 사용하여 시험구간을 결정하는 투수관은 수십 cm에서 수 m의 길이를 가지도록 제작되며 시험정 전구간에 대하여 수리시험이나 수위측정을 하는 경우는 수 m의 투수관이 사용되고 세부적인 단열특성을 관측하기 위해서는 수십 cm의 투수관이 사용된다. 이와 더불어 시험의 목적이 시료채취에 있는 경우 시료채취장비가 부가되기도 하며 일반적인 수리시험의 경우는 수압측정장비가 시험구간과 시험구간밖에 동시에 설치되어야 패커의 기밀성을 확인할 수 있다.

ii) 연결관: 연결관은 하부패커와 상부통제부를 연결하는 역할을 수행하며 스크류형의 철재관 (screw-coupled steel pipe)이 사용되고 일반적으로 직경 50mm 정도의 크기로 제작될 수 있다. 시험구간을 표시하는 투수관을 연결부로 보기도 한다. 그러나, 수중 양수기를 부착하거나 여타의 장비를 동시에 사용하는 경우는 주 연결관 (rising main)의 크기를 크게 제작해야만 시험목적을 달성할 수 있다.

iii) 가압부: 패커의 부풀림은 일반적으로 질소기체의 이용이 가장 빈번한 것으로 알려져 있으나 압축공기 또는 물을 사용하는 경우도 있다. 기체를 사용할 때 패커하단과 지상의 압축장비를 연결해주는 나일론관이 사용될 수 있으며 심정의 경우에는 (대략 280 m 이상의) 고압을 견디지 못하는 경우도 있는 것으로 알려져 있다. 가압특성을 관측하기 위해서 지상에서 시험운전을 하는 경우는 실제 시험구간의 정수압을 고려할 수 없으므로 제작 당시의 재질의 정확한 특성을 확인하는 것이 중요하다.

iv) 지상통제부: 지상통제장치는 이외에 지상에서 사용하는 유량계, 유압계, 양수기, 기록계, 발전기 등을 통칭하며 실험의 목적에 따라서 많은 차이를 보인다. 특히, 주입 또는 양수시험에 따라 전체 장비의 구성에 확연한 차이를 보이므로 유의할 필요가 있다.

2) 패커 운영 (Operation)

패커 운영의 핵심은 선택된 관정구간을 격리시키는 부품부 (inflation unit)의 운영

과 관련된 원리에 있다고 볼 수 있다. 패커의 부풀림 (inflation)과 되돌림 (deflation)은 시료채취, 가·감압을 위한 시험관과 함께 운용되는 주 연결관을 통한 공기 또는 유체 주입관을 통하여 이루어 진다. 그러나, 무엇보다도 필요한 구간을 정확히 선택하여 격리하는데 어려움이 따르며 특히, 철재의 연결관을 사용하지 않는 경우 연결부가 장비의 무게로 인하여 인장되는데서 오차가 발생할 수 있으므로 유의해야 한다. 이를 피하기위하여 느슨한 줄자를 따로 사용하거나 인장성이 없는 엑셀파이프를 연결하는 경우가 있다. 그러나, 무엇보다도 바람직한 것은 스크류형의 철재연결관을 사용하는 것으로 제작된 연결관의 길이를 더해나감으로써 정확한 구간을 선택할 수 있다. 그림 2.4.2는 패커시험을 위한 운영흐름도를 보여준다.

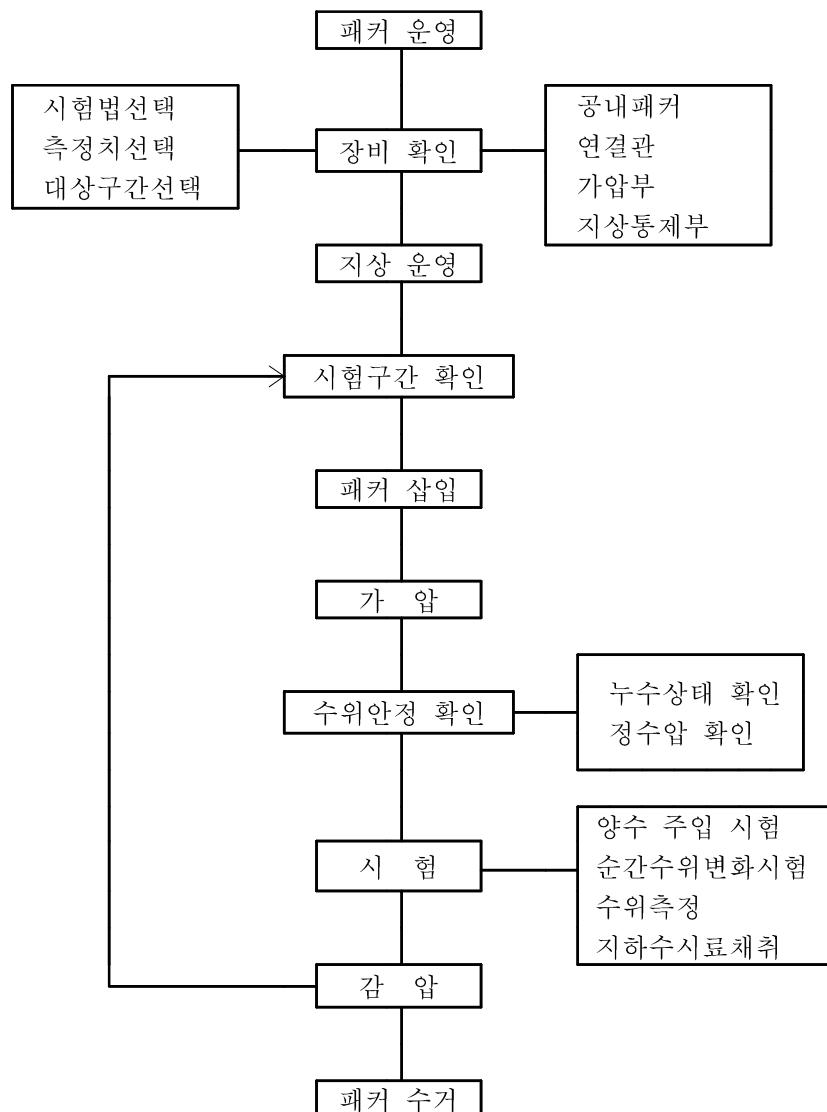


그림 2.4.2 패커 운영을 위한 흐름도

2.4.3 패커시험의 적용과 해석

패커시험은 원류는 1963년 Lugeon에 의해서 도안된 Lugeon 시험으로 볼 수 있다. Lugeon 시험은 댐기반의 안정성을 유지하기 위한 투수도를 측정하고 이에 따른 그라우팅 (grouting)의 가능성을 검토하기 위하여 사용되었다. 이로부터 다공질 매질의 현장 투수도를 lugeon이라는 단위로 측정하며 1 lugeon은 단위길이의 관정을 통하여 10기압의 압력으로 유체를 주입할 때, 분당 1L의 물이 주입될 때를 말하며 대략, 10-7 m/s 와 같다. 지질공학적 측면에서 1 lugeon은 그라우팅을 실시할 수 있는 한계투수도로써 사용된다. 이러한 목적으로 최초로 사용된 이후 점차 발전을 거듭하여 심정의 지하수 시료채취나 수리시험에 맞도록 보완되었으며 그 응용분야가 확장되게 되었다. 표 2.4.2는 패커를 이용한 수리지질학적 적용사례의 일반적 내용이다.

1) 수리시험 (Hydraulic testing)

일반적으로 지하 매질의 수리적 특성에 관한 정보는 지하수위와 유량을 동시에 측정함으로써 직접 얻어질 수 있다. 패커를 사용하는 시험법의 분류 역시 이러한 수위와 유량의 관계에 따라서 수위 또는 양수량을 고정하고 다른 양수량, 수위를 측정하는 주입·양수시험과 수위와 유량이 동시에 변하도록 하는 순간수위변화시험류의 시험으로 구분할 수 있다. 주입 또는 양수시험의 경우 이에 대한 해석법이 잘 제시되어 있으나 일정한 수위나 유량을 유지하기 위한 설비가 필요한 단점이 있으며 순간수위변화시험, 순간압력변화시험, 드릴스텝시험 등 후자의 경우는 해석 자체의 유일성 문제가 제기된다.

표 2.4.2 패커의 적용에 대한 요약.

운용범주	시험법	관측치
수리 시험	Lugeon 시험 (주입 시험)	주입압-주입률
	순간수위변화시험	수위회복양상
	양수 시험	수위강하
	수위 측정	수직수두분포
지하수 시료채취	지하수 수질 측정	

(ㄱ) 주입시험 (inflow; Lugeon test)과 양수시험 (outflow test)

시험구간을 통하여 대수층으로의 일정량의 유량을 주입하거나 양수하는 시험에 대한 해석은 Hvorslev(1951)에 의하여 제시된 다음식이 주로 이용된다 (Bliss and Rushton, 1984).

$$Q = \frac{2\pi LKH}{\ln \left[\frac{L}{2\gamma_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2\gamma_w} \right)^2} \right]} \quad (2.4.1)$$

Q : 양수 또는 주입량 K : 수리전도도
 H : 양수 또는 주입후의 수위변화 L : 시험구간의 길이
 γ_w : 관정의 반경

이때 시험구간의 크기가 관정의 직경의 10배가 넘는 경우 근사식으로서 다음의 식이 이용될 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi LKH}{\ln[L/r_w]} \quad (2.4.2)$$

주어진 식을 이용하여 수리상수를 추정하는데 사용된 가장 중요한 가정은 매질이 등방성(isotropic medium)을 가진다는 것으로 대개의 경우 실재와 모순된다. 따라서, Hvorslev는 이식의 수정식으로 비등방성 ($m = \sqrt{K_r/K_z}$)의 매질에 대하여 다음의 관계식을 제시하였다.

$$Q = \frac{2\pi LKH}{\ln \left[\frac{mL}{2\gamma_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{2\gamma_w} \right)^2} \right]} \quad (2.4.3)$$

마찬가지로 $mL > 10\gamma_w$ 인 경우 수정식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{2\pi LKH}{\ln[mL/r_w]} \quad (2.4.4)$$

그러나, 수정식에서도 수리전도도의 수평, 수직성분의 평균값을 구하도록 주어졌으므로 단열압반과 같은 대수층의 특성을 정확히 반영할 수 없는 단점이 제기되었으며 Barker (1981)는 수평 단일단열이 있는 경우, 다음 관계식을 제시하였다.

$$Q = \frac{2\pi TH}{\ln[T/\exp(0.5772)r_w(K_r K_z)^{1/2}]} \quad (2.4.5)$$

T : 단열의 투수랑계수, K_r , K_z : 주변암반의 수평·수직 수리전도도

양수시험이나 주입시험에 대한 수학적 표현은 다르지 않지만 현장에서 직접 적용하는 과정에서는 서로 다른 특성과 장·단점을 가진다 (Brassinton and Walthal, 1985). 표 2.4.3은 두시험간의 장단점을 나타내는 도표이다.

표 2.4.3 주입 시험과 양수 시험의 특성 비교.

	주입 시험	양수 시험
(1)	투수성매질에서 많은 주입수를 필요로 한다. 시험시 사용하는 물의 특성이 지하수	주입수가 필요없으나 양수된 지하수를 처리해야한다.
(2)	와 다를 수 있다. (물의 온도가 5°C 변하는 경우 20%의 점성도가 변한다.)	양수된 물은 자연적인 지하수이다.
(3)	클로깅 (clogging)이 발생하기 쉽다.	클로깅이 발생하지 않는다.
(4)	양수를 지상에서 실시하고 유량이 적어도 통제하기 쉽다.	수중에서 양수를 하기 때문에 통제하기 어려우며 양수량이 적은 경우 시험에 어려움이 따른다.
(5)	연결관의 설치가 쉽다.	양수기의 운영을 위한 연결관의 추가가 필요하다.
(6)	유량의 통제가 쉽다.	유량을 정확하게 측정하기 어렵다.
(7)	지하수 시료채취가 불가능하다.	시료채취가 쉽다.
(8)	실험장비에 따라 실험가능한 수리전도도가 제한적이다.	비교적 넓은 범위의 수리전도도 범위에서 시험이 가능하다. (0.01-100 m/day)

ㄴ) 순간수위변화시험 (slug tests)

연결관내의 수위를 순간적으로 변화시키거나 압력을 변화시킴으로서 수위변화와 유량변화를 동시에 관측할 수 있다. 이러한 시험의 경우 시험시간이 상대적으로 짧은 장점이 있으나 구해진 수리상수가 실험조건에 민감하게 반응하므로 주의를 요구한다. 다음은 수리전도도를 구하기위한 식을 나타낸다.

$$K = \frac{r^2 \ln(L/\gamma_w)}{2L(t_o - t)} \ln(H/H_o) \quad (2.4.6)$$

H_o : 시간 t_o 에서의 수위, H : 시간 t 에서의 수위

2) 수위측정 (piezometric head measurement)

나공상태에서 측정된 수위는 일반적으로 관측정에서 수위의 수직적 평균치로서 다루어지며 수직적 불균질성이 큰 대수층에서는 중요한 의미를 가지지 않는다. 또한 자연상태의 지하수 유동특성은 수위분포와 수리전도도에 의해서 결정되기 때문에 격리구간의 수위측정이 매우 중요하다. 이외에도 수리시험시 일정구간의 수위를 관측하기 위하여 패커를 이용한 압력의 측정이 중요하게 다루어질 수 있다.

2.4.4 패커시험 계획과 해석상의 유의 사항

패커시험은 주변암반의 단열분포와 시험구간의 길이, 패커의 크기에 따라 시험계획에서 결과까지 그 특성이 다르게 나타나므로 이러한 인자의 민감도를 고려하는 것이 매우 중요하다.

1) 단열의 크기

100 m 이상의 단열대가 존재하는 경우는 단열대의 크기에 무관하게 수위와 유량의 관계가 얻어진다. 그러나, 소규모 단열이나 단열대는 수위-유량관계의 급격한 변화를 야기한다. 따라서, 대규모의 단열대가 존재하지 않는 경우는 실험도안과 측정에 있어서 높은 정밀도를 가지도록 해야한다.

2) 시험구간의 길이

패커시험의 구간 선택은 되도록 대수층에서 정확한 정보를 취득할 수 있도록 정해져야 한다. 대개의 경우 시험구간은 1.0~10.0 m 사이에서 정해지지만 단열의 수리적 성질과 주변암반의 수리적 성질을 고려하는 해석법에 있어서 시험구간의 크기에 무관하게 단열의 존재유무만이 실험에 중요한 인자가 되기 때문에 해석상의 오류를 커지게 할 수 있다. 따라서, 시험목적과 해석법을 고려하여 시험구간을 선택하는 것이 중요하다.

3) 패커의 길이

일반적으로 사용되는 패커의 길이는 0.75~2.0 m로 제작되며 기밀성만 유지된다면 실험결과에는 큰 영향을 미치지 못함이 알려져 있다. 따라서, 기밀성을 유지할 수 있는 최소의 길이가 적절하다고 할 수 있다.

4) 자유면의 영향

시험공내에 인위적으로 조작된 자유면의 영향으로 주입량 또는 양수량이 증가할 수 있다. 이러한 영향은 정수압이 20 m 물기둥 이상을 유지하는 경우는 무시할 수 있으나 그 상부에서는 자료의 해석에 오류를 제공할 수 있다. 결과적으로 상부구간에서 추정된 수리전도도는 실제보다 커지게 나타난다.

2.4.5 참고 문헌

- Barker, J. A., 1981, A formula for estimating fissure transmissivities from steady-state injection-test data. J. Hydrol. Vol. 52, pp. 337-346
- Bliss, J. C. and Rushton, K. R., The reliability of packer tests for estimating the hydraulic conductivity of aquifer, Q. J. Eng. Geol. Vol. 17, pp. 81-91.
- Brassington, F. C. and Walthall, S. 1985, Field techniques using borehole packers in hydrogeological investigations, Q. J. Eng. Geol. Vol. 18, pp. 181-193.
- Hvorslev, E. E., 1951, Time lag and soil permeability in groundwaer observations, Misc. Bull. U.S. Army Corps., Vicksburg Eng. Waterways Exp. Stn, No. 36.
- Lugeon, M. 1933, Barrages et Geologie. Dunod, Paris (republ.1979 for 4th Int. Congress Rock Mech., Montreux).