creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

중·저준위 방사성폐기물 처분시설 사일로 콘크리트의 기체이동 특성 인자 실험 연구

Experimental Study on Gas Migration Characteristic Factors of Silo Concrete in Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility

2013년 2월

서울대학교 대학원

에너지 시스템 공학부

김 주 엽

중·저준위 방사성폐기물 처분시설 사일로 콘크리트의 기체이동 특성 인자 실험 연구

지도교수 김 은 희

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2013년 2월

서울대학교 대학원
에너지 시스템 공학부
김 주 엽

김주엽의 공학석사 학위논문을 인준함
2013년 2월

위 원 장 이 은 철 (인)

부위원장 김 은 희 (인)

위 원 김 주 열 (인)

초 록

국내 중·저준위 방사성폐기물 처분시설은 콘크리트 사일로로 이루어진 지하동굴 처분시설로서 2014년 6월 준공을 목표로 현재 건설 중에 있다. 처분시설은 운영 종료 후 최종적으로 폐쇄될 예정이며, 폐쇄 후 처분시설은 지하수로 포화되어 다양한 종류의 기체가 발생될 우려가 있다. 콘크리트 사일로 내부에서 발생한 기체가 축적됨에 따라 내부 압력이 증가할 수 있으며, 과압으로 인해 공학적 방벽인 콘크리트 사일로의 건전성이 손상될 수도 있다. 따라서 사일로의 콘크리트재가 내부에 축적되는 기체를 효과적으로 배출할 수 있는 지 여부에 대한 평가와 별도의 기체배출시스템이 필요한 경우에 시스템 설계 요건을 확인할 필요가 있다.

콘크리트 사일로로부터 내부 축적 기체가 효과적으로 배출될 것인지를 확인하기 위해서는 콘크리트를 통한 기체이동 현상을 실험적으로 파악하는 것이 선행되어야 하며, 전산코드를 활용한 실규모 기체이동 시뮬레이션 또한 수행되어야 한다. 본 연구에서는 처분시설에서의 기체이동 시뮬레이션에 필요한 입력자료를 확보하기 위해 처분시설의 콘크리트 사일로와 동일한 조성의 시편을 활용하여 기체투과압력(gas entry pressure) 및 투기계수(gas permeability) 측정 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 확보한 콘크리트 특성 자료는, 처분시설 사일로의 실규모 기체이동을 모사하고, 필요에 따라 기체배출시스템의 설계시 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 중·저준위 방사성폐기물 처분시설, 콘크리트 사일로,
기체이동, 기체배출, 기체투과압력, 투기계수

학 번 : 2011-21092

목 차

초 록 i
목 차 ii
그림목차 iv
표 목 차 vi

제 1 장 서 론 1

1.1 개요 1

1.2 국외 LILW 지하처분시설 3

1.3 국외 기체이동연구 5

1.4 연구목표 8

제 2 장 이론적 배경 10

2.1 다공성 매질에서의 기체이동 메커니즘 10

2.2 Gas entry pressure 14

2.3 Gas permeability 16

제 3 장 실험장치 19

3.1 콘크리트 시편 19

3.2 실험장치 21

3.2.1 압력용기 22

3.2.2 기타 계통 26

제 4 장 실험방법 28
4.1 Gas entry pressure 28
4.2 Gas permeability 30
4.2.1 시편 전처리 30
4.2.2 실험수행 31

제 5 장 실험결과 33
5.1 Gas entry pressure 33
5.2 Gas permeability 37

제 6 장 결론 48

참고문헌 52

Abstract 54

그 림 목 차

Figure 1. Concept of Concrete Silos for LILW Disposal Facility in Wolsong 2
Figure 2. Concrete Specimen 19
Figure 3. Water Curing of Concrete Specimens 20
Figure 4. Layout of Experimental Apparatus 21
Figure 5. Pressure Vessel Cylinder 23
Figure 6. Inlet/Outlet Nozzle 23
Figure 7. Lid of Pressure Vessel 24
Figure 8. Pressure Vessel Combined with Lid, Nozzle and Viton Sleeve 25
Figure 9. Emplacement of Concrete Specimen 25
Figure 10. Combination of Outlet Nozzle 26
Figure 11. Complete Experimental Apparatus 27
Figure 12. Presumed Data of Permeability Measurement 32
Figure 13. Observations in Case 1 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures 34
Figure 14. Observations in Case 2 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures 35
Figure 15. Observations in Case 3 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures 36
Figure 16. Estimates of Gas Permeability at 0% Effective Saturation 40

Figure 17. Estimates of Gas Permeability at 10% Effective Saturation 41
Figure 18. Estimates of Gas Permeability at 30% Effective Saturation 42
Figure 19. Estimates of Gas Permeability at 50% Effective Saturation 43
Figure 20. Estimates of Gas Permeability at 70% Effective Saturation 44
Figure 21. Estimates of Gas Permeability for Various Levels of Effective Saturation 45
Figure 22. Representative Estimates of Relative Gas Permeability (average) 47
Figure 23. Concept of Gas Transport Pathway and Gas Permeable Seal 51

표 목 차

Table 1. Composition of Concrete Specimen 20
Table 2. Measurements of Gas Entry Pressure..... 33
Table 3. Measurements of Discharge Flow (mL/min) 37
Table 4. Measurements of Effective Gas Permeability (m^2) ... 38
Table 5. Mean Estimates of Effective Gas Permeability (m^2) . 39
Table 6. Representative Estimates of Intrinsic Gas Permeability and Relative Gas Permeability..... 46

제 1 장 서 론

1.1 개요

2012 년 현재 국내에는 23 기의 상용원전이 운전 중에 있으며, 원전 및 기타 시설에서 발생되는 중·저준위 방사성폐기물(LILW: Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste)을 처분하기 위한 처분시설이 2014 년 6 월 준공을 목표로 건설 중에 있다. 1 단계 LILW 처분시설은 콘크리트 사일로를 사용한 지하동굴처분 개념을 채택하여 건설 중이며, 6 개 사일로의 총 처분용량은 LILW 처분드럼 기준으로 10 만 드럼이다. 이후 동일 부지에 50 만 드럼을 처분할 수 있는 2 단계 천층처분시설을 건설할 예정에 있다. 폐기물 처분용기가 처분될 콘크리트 사일로는 해수면 기준 지하 80 ~ 130 m 에 위치하며, 따라서 처분시설의 최종폐쇄 이후 콘크리트 사일로는 지하수로 포화될 것이다. 또한 사일로 내부에서는 시간이 흐름에 따라 금속 부식, 유기물의 미생물 분해, 방사분해 등으로 인해 기체가 발생될 것으로 예상된다[1]. 발생된 기체들은 사일로의 상부로 이동하여 축적될 것이다. 기체의 축적으로 인해 콘크리트 사일로 내부의 압력이 상승하게 되며, 공학적 방벽인 콘크리트 사일로의 건전성이 손상될 수도 있다. 따라서 실험 및 모델링을 통해 콘크리트 사일로의 안전성을 평가할 필요가 있다. Figure 1 은 콘크리트 사일로 구조를 나타낸 개념도이다.

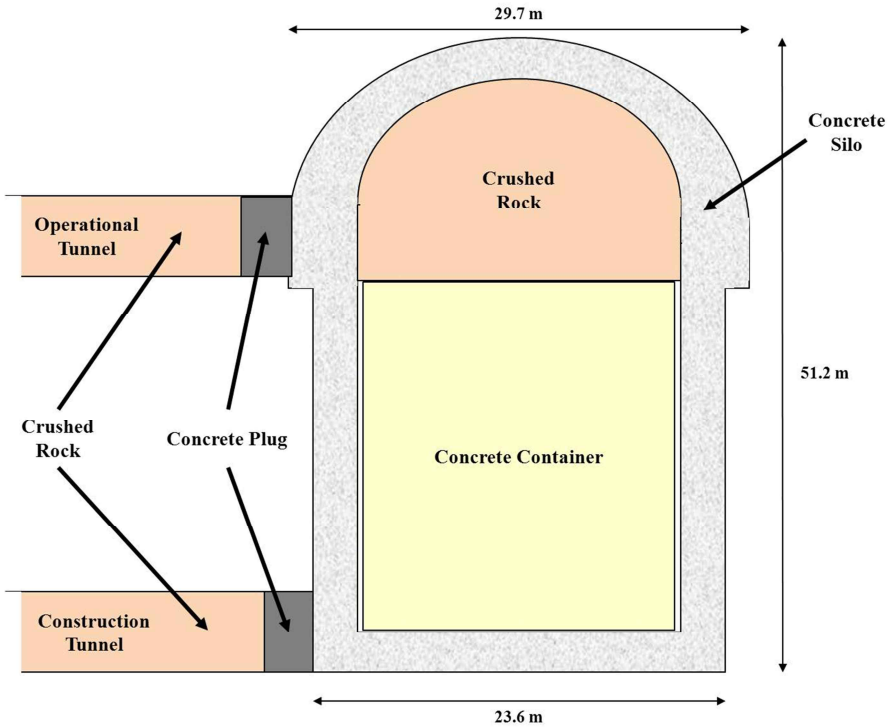

Figure 1. Concept of Concrete Silos for LILW Disposal Facility in Wolsong

1.2 국외 LILW 지하처분시설

해외 일부 국가에서는 LILW 처분방식으로 우리나라와 비슷한 지하처분시설을 채택하여 개발하였다. 스웨덴은 Forsmark 부지에 SFR 1 LILW 처분시설을 운영 중이며, 2040 년에 폐쇄할 예정이다. SFR 1 은 사일로와 몇 개의 수평 암반 처분고로 구성되어 있다[2]. 사일로는 해수면으로부터 60 m 아래에 위치해 있으며, 강화 콘크리트로 구성되어 있다. 사일로는 높이 53 m, 직경 28 m, 두께 0.8 m 의 실린더형 구조물로, 폐기물 처분용기 사이의 빈 공간은 다공성 콘크리트 그라우트로 채워진다. 폐기물 처분용기를 채운 뒤 콘크리트 실린더의 윗부분은 1 m 두께의 콘크리트 덮개로 밀봉되며, 콘크리트 덮개에는 모래로 채워진 기체 배출 파이프들이 설치되어 사일로 내부에서 발생된 기체가 이 파이프를 통해 배출된다. 콘크리트 덮개 위로는 100 mm 두께의 모래층과 1.5 m 두께의 모래/벤토나이트(S/B) 혼합재층이 위치한다. 사일로 상부의 나머지 공간은 모래 또는 자갈로 채워지며, 콘크리트 플러그로 연결된다[3]. 처분시설의 최종 폐쇄 이후 발생되는 기체는 모래 파이프를 통해 사일로 상부로 이동하게 되어, 내부의 과압을 방지한다. 콘크리트 덮개 상부에 일정한 압력 이상의 기체가 축적될 경우, 기체는 주변 기반암 또는 콘크리트 플러그를 통해 배출된다.

핀란드는 Olkiluoto 부지에 VLJ 처분시설을 건설하여 1992 년부터 운영 중에 있다. VLJ 처분시설은 지표면으로부터 60 ~ 100 m 아래 지하에 위치해 있으며, 2 개의 사일로, 운영동굴 및 수직구로 구성되어 있다. 중·저준위 폐기물 드럼은 콘크리트

처분용기에 각각 구분되어 포장된다. 이후 중준위 폐기물은 강화 콘크리트 사일로에, 저준위 폐기물은 숏크리트 사일로에 각각 처분된다. 사일로 상부에는 25 cm 두께의 콘크리트 덮개가 놓이며, 돔 형태의 커버가 콘크리트 덮개 위에 설치된다. 돔 형태 커버의 상부에는 Gas Lock 으로 불리는 기체배출 통로가 설치된다. 최종 폐쇄 이후 발생되는 기체는 돔의 상부로 모이게 되며, 이후 Gas Lock 을 통해 배출된다. 덮개와 돔 형 커버 사이의 공간은 쇄석으로 채워진다[4].

스위스는 LILW 처분시설로 동굴처분 개념을 도입하였으며, Opalinus Clay 층의 지하 300 ~ 400 m 에 건설될 예정이다. 처분시설은 7 개의 처분동굴로 구성되어 있으며, 각 동굴의 크기는 폭 11.0 m, 높이 13.2 m, 길이 약 200 m 이다. 처분동굴의 벽은 콘크리트 라이닝으로 도포되며, 처분용기 사이의 빈 공간은 시멘트질 모르타르로 채워진다. 각 처분동굴은 연결동굴을 통해 운영동굴과 연결된다. NAGRA(National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland)는 밀봉재 및 플러그로 구성되는 공학적 기체수송계통(EGTS: Engineered Gas Transport System) 개념을 동굴 폐쇄에 도입하였다. 밀봉재는 압축 S/B 혼합재 또는 압축 벤토나이트와 콘크리트 블록으로 구성된다. 발생된 기체는 EGTS 를 통해 운영동굴로 이동하여 주변 기반암을 통해 최종적으로 배출된다[5]. 스위스의 처분시설은 사일로를 포함하지 않지만, 운영동굴을 통한 기체배출 및 EGTS 개념을 참조할 수 있다.

1.3 국외 기체이동연구

지하처분시설에서의 기체이동에 관한 연구가 국외의 다양한 기관에서 수행되었다. NAGRA 는 Grimsel Test Site 및 Mont Terri Rock Laboratory 에서 다양한 기체이동 실험연구를 수행하였다. GMT(Gas Migration Test)는 처분시설의 기체이동계통 및 공학적 방벽계통(EBS: Engineered Barrier System)의 성능을 평가하는 프로젝트로, 지하동굴의 전단대에 대규모 실험동굴을 굴착하여 공학적 방벽을 모사하였다[6]. 공학적 방벽은 콘크리트 사일로, S/B 혼합재, 포화상태의 뒷채움재 및 플러그로 구성된다. 기체주입실험 이후 EBS 를 다시 굴착하여 기체와 물의 이동경로를 파악하고, 콘크리트 사일로의 성능 및 S/B 혼합재의 특성을 평가하였다. 또한 실험과 병행하여 다양한 기관에서 CODE_BRIGHT, GETFLOW, MHERLIN, ROCKFLOW, TOUGH2 등과 같은 전산코드들을 활용해 기체이동 모델링을 수행하였다.

NAGRA 는 2010 년부터 GAST(Gas-permeable Seal Test) 프로젝트를 수행 중이다. GAST 프로젝트의 목표는 EBS 의 방사성핵종 포획능력을 유지하고, 뒷채움재의 기체이동능력을 향상시키는 것이다[7]. EBS 는 EGTS 로도 불리며, 모르타르 및 S/B 혼합재로 구성된다. EGTS 의 성능을 평가하기 위해 수치 시뮬레이션이 수행되었으며, 그 결과 EGTS 를 통해 기체가 효과적으로 배출되는 것을 확인하였다. 또한, 1998 년 NAGRA 는 뒷채움재를 통한 기체이동을 연구하기 위해 길이 약 1 m, 직경 약

0.3 m 의 대형 컬럼 실험을 수행하였다[8]. 컬럼 내부는 뒷채움재를 모사하기 위해 모르타르로 채워지며, 컬럼 상부에 플러그를 모사하기 위한 샘플 셀이 연결된다. 기체를 주입하여 컬럼 내부의 압력 및 포화도 변화, 배출되는 기체 유량 등을 측정하였다.

FORGE(Fate of Repository Gases) 프로젝트는 다양한 국제기관들이 참여한 범유럽 프로젝트로, 처분시설의 기체발생 및 기체이동 연구를 주 목적으로 한다. FORGE 프로젝트의 일환으로 스페인의 CIEMAT 은 콘크리트의 투기계수(gas permeability) 측정실험을 수행하였다[9]. 정상상태 측정법과 비정상상태 측정법을 사용하여 측정하였으며, 콘크리트 시편의 gas permeability 는 10^{-17} ~ 10^{-16} m^2 범위로 산출되었다.

스웨덴의 SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)는 Äspö HRL(Hard Rock Laboratory)에서 LASGIT(Large-Scale Gas Injection Test) 프로젝트를 수행하였다[10]. 벤토나이트를 통한 기체이동 메커니즘을 연구하기 위해 지하동굴 바닥에 실규모 처분공을 굴착하여 기체주입실험을 수행하였다.

프랑스 ANDRA(National Agency for Radioactive Waste Management)는 Callovian-Oxfordian 층에서의 기체이동을 연구하기 위해 2004 년 Bure URL 에서 GTPT(Gas Threshold Pressure Test)를 수행하였다[11]. 실험은 현장의 처분공에서 수행되었으며, 실험결과 Callovian-Oxfordian 층의 임계기체압은 약 9.5 MPa 로 산출되었다. 또한 1997 년 포화도에 따른 콘크리트의 gas permeability 를 측정하는 실험연구가 프랑스에서

수행되었다. Hagen-Poiseuille 식을 통해 시편의 apparent gas permeability 를 산출하였으며, Klinkenberg 식으로부터 intrinsic gas permeability 를 산출하였다[12].

1.4 연구목표

현재 국내 LILW 처분시설의 폐쇄 개념은 Figure 1 과 같이 콘크리트 사일로의 운영동굴 및 건설동굴 연결부까지 완전히 콘크리트 플러그로 밀봉하는 개념을 채택하고 있다. 그러나 기체발생에 따른 내압 증가와 관련된 안전성 평가는 아직 미흡한 상태이며, 사일로를 구성하는 콘크리트 고유의 기체이동 관련 특성 또한 확보되지 않았다. 만일 기체 축적으로 인해 콘크리트 사일로의 건전성이 위협받는 것으로 판단될 경우, 효과적으로 기체를 배출할 수 있는 기체배출시스템이 필수적으로 도입되어야 한다. 기체배출시스템은 폐쇄 후 포화상태의 지하에서 장기간 기능을 유지해야 하므로, 전력과 같은 별도의 에너지 공급 없이 수동적으로 기체를 배출할 수 있는 gas permeable seal 개념으로 설계되어야 한다.

효과적인 gas permeable seal 을 설계하기 위해서는 기체발생 및 기체이동 모델링이 필수적이다. 기체발생에 관한 연구는 국내에서 수행 중에 있으며, 특히 2009 년부터 한국방사성폐기물관리공단에서 기체발생 모델링 및 실규모 현장 실험연구를 수행 중에 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이, 기체이동과 관련된 콘크리트 특성인자는 확보되지 않은 실정이다. 이들 특성인자 가운데, gas entry pressure 는 다공성 매질 내부에서 압력에 따른 기체의 거동을 파악할 수 있는 Van Genughten 관계식의 변수를 산출할 수 있는 인자이며, gas

permeability 는 다공성 매질의 공극망을 통한 기체이동 능력을 나타내는 지표이다.

본 연구에서는 폐쇄 후 기체의 거동을 파악하는데 근간이 되는 안전성 분석 모델링 수행에 필요한 핵심자료를 확보하기 위하여 국내 LILW 처분시설의 사일로 콘크리트재와 동일한 조성의 콘크리트 시편을 활용한 실험을 통해 고유의 기체이동 특성인자인 gas entry pressure 및 gas permeability 를 측정하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 다공성 매질에서의 기체이동 메커니즘

낮은 투과성의 암반층을 통한 기체이동은 암반의 수리학적, 역학적 특성뿐만 아니라, 기체가 축적되는 부분의 기체압력에도 영향을 받는다. 다공성 매질에서의 기체이동은 다음 네 가지 기본 메커니즘을 통해 이루어진다[13].

- 공극수(porewater)에 용해된 기체의 이류-확산 이동
- 점모세관(visco-capillary) 이상 유동(two-phase flow)
- 체적팽창(dilatancy) 제어 기체 유동
- 거시 인장균열(tensile fracture)을 통한 기체 이동

공극수에 용해된 기체의 이류-확산 이동은 세 가지 법칙(Darcy's law, Fick's law 및 Henry's law)을 따른다. Darcy's law는 압력 및 중력의 영향을 받는 지하수의 이류 유동을 설명하며, 다공질 매질을 통과하는 유체의 속도는 수두손실에 비례하고, 유체가 통과한 길이에 반비례함을 나타낸다. 이는 (Eq. 1)을 통해 나타낼 수 있다.

$$Q = -KA\frac{dh}{dl} = -\frac{k}{\mu}A\frac{P_b - P_a}{L} \qquad (Eq.\ 1)$$

Q : total discharge

K : hydraulic conductivity

h : head

l, L : length of porous media

k : permeability

μ : viscosity

P_b : pressure at outlet

P_a : pressure at inlet

Fick's law 는 공극수의 농도구배로 인한 용해기체의 확산을 설명하며, 정상상태에서 단위면적당 확산되는 물질의 유속은 농도 구배에 비례함을 나타낸다. 이는 (Eq. 2)를 통해 표현된다.

$$J = -D_d grad\ (C) \qquad (Eq.\ 2)$$

J : diffusional flux

D_d : effective diffusion coefficient

C : concentration of species

Henry's law 는 공극수의 기체 용해도를 설명하며, 다공성 매질 내에서 기체의 용해 및 용리로 인해 기체와 공극수 간에 질량이 이동하고 기체상 내부의 이상기체 분압은 수상의 기체농도에 비례함을 설명한다. 이는 (Eq. 3)을 통해 표현된다.

$$K_H = \frac{(gas)_{qa}}{P_{gas}} \qquad (Eq.\ 3)$$

K_H : Henry's law constant

P_{gas} : partial pressure of the gas in the gas phase

$(gas)_{aq}$: molar concentration of the gas in solution

다공성 매질 내부 공극의 공극수는 점성력 및 모관력의 영향으로 기체에 의해 밀려나게 된다. 점모세관 이상 유동은 (Eq. 4)를 통해 Darcy's law 를 다상에 적용하여 각 상의 유동을 설명할 수 있다[5].

$$v_\beta = -k \cdot \frac{k_{r\beta} \cdot \rho_\beta}{\mu_\beta} (\nabla \rho_\beta - \rho_\beta \cdot g) \qquad (Eq.\ 4)$$

v_β : Darcy velocity in phase β

k : intrinsic permeability

$k_{r\beta}$: relative permeability to phase β

μ_β : viscosity

p_β : sum of fluid pressure in the phase and capillary pressure

g : gravitational acceleration

체적팽창(dilatancy) 제어 기체 유동은 낮은 장력을 갖는 점토질 매질에서 주요한 메커니즘이다. 점토질 암석은 최소 주응력보다 큰 기체 압력에 대해 장기간 견딜 수 없기 때문에, 압력이 최소 주응력에 도달하기 전에 암반에 미세균열이 발생될 것이다. 전단 응력(shear stress)이 최대 강도보다 큰 경우 또는 응력 상태가 암석 변형에 적합한 경우에는 미세균열을 통해 기체가

이동하게 된다. 미세균열을 통해 기체가 흐름으로써 공극이 커지고 intrinsic gas permeability 가 증가하며, 모세관압-포화도의 관계에 변화가 발생한다.

거시 인장균열(tensile fracture)을 통한 기체 이동은 기체 압력이 암석의 최소 주응력과 인장강도보다 클 때 형성된다. 거시 인장균열 내의 기체 유동은 단상 유동으로 간주되며, 균열 내부의 기체 압력이 최소 주응력보다 작아질 경우에는 유동이 중단된다. 인장강도가 낮은 암석의 경우 기체 압력이 급격히 증가할 때에만 거시 균열이 형성된다. 일반적으로 처분시설은 기체 저장용량이 충분히 크기 때문에, LILW 처분시설의 폐쇄단계는 이에 해당되지 않는다. 또한 시간이 흐름에 따라 기체발생량은 감소하게 되고, 따라서 기반암 및 EGTS 의 기체수송능력은 생성되는 기체를 충분히 수용할 수 있게 된다.

2.2 Gas entry pressure

Gas entry pressure 는 다공성 매질 내에서의 이상 유동 특성에 대한 조절 요인으로, 완전히 포화된 다공성 매질에서 물을 밀어내기 위해 필요한 기체 압력과 수압간의 압력 차를 의미한다. 즉, gas entry pressure 는 기체가 포화상태인 다공성 매질의 공극으로 침투하기 시작하는 압력을 의미하며, Van Genuchten 관계식(Eq. 5)에서 α는 gas entry pressure 의 역수와 동일한 값을 갖는다[14].

$$S_e = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \qquad \textit{(Eq. 5)}$$

S_e : effective saturation

h : pressure head

n, m : empirical parameters

압력이 gas entry pressure 를 초과할 경우, 기체의 이동성은 주로 intrinsic gas permeability, relative gas permeability 및 water retention curve 에 영향을 받게 된다. 특정 모세관에서의 gas entry pressure 는 (Eq. 6)으로 표현할 수 있다[13].

$$p_{ae} = \frac{2 \cdot \sigma_{gw}}{r} \cdot \cos\alpha \qquad \textit{(Eq. 6)}$$

p_{ae} : gas entry pressure

σ_{gw} : surface tension gas/water

r : radius of the capillary tube

α : wetting angle

임계기체압(gas threshold pressure)은 gas entry pressure 와 수압의 합으로 주어지며, gas entry pressure 는 Van Genuchten, Brooks-Corey 등 capillary pressure 관계식에 있어 핵심 인자이다.

2.3 Gas permeability

Permeability 는 다공성 매질에서의 유량을 지배하는 성질로, k (permeability) 는 Darcy's law 에 의해 정의된다. Permeability 는 다공성 매질 고유의 특성이므로, 유체 및 특정 이동 메커니즘의 특성에 영향을 받지 않는다. 기체와 같은 고압축성 유체의 경우 정상상태에서도 매질 내에서의 위치에 따라 압력구배와 용적 유량이 매우 달라지게 된다. 정상상태에서 매질을 통과하는 molecular flux 는 일정하게 유지되어야 하므로, Darcy's equation 은 (Eq. 7)에 의해 molecular flow rate 로 제시될 수 있다[15].

$$\frac{dn}{dt} = \frac{kA\overline{p}}{\mu RT} \cdot \frac{\Delta p}{l} \qquad (Eq.\ 7)$$

p : mean pressure in the medium

Δp : differential pressure between the thickness l

충분히 낮은 레이놀즈수(Re<2100)에서 압력구배를 받는 모세관의 정상상태 점성유동은 Hagen-Poiseuille law 를 따른다. 또한, 특정 압력에서의 effective gas permeability(또는 apparent gas permeability)는 Hagen-Poiseuille 식(Eq. 8)을 통해 산출된다[12].

$$k_g^{eff} = \frac{2QP_{atm}L\mu_g}{A(P^2 - P_{atm}^2)} \qquad (Eq.\ 8)$$

k_g^{eff} : effective gas permeability (m^2)

Q : flow rate of discharge gas (m^3/sec)

A : cross-sectional area (m^2)

L : height of the specimen (m)

μ : viscosity of the gas (N·s/m^2)

P : absolute pressure of the upstream region (N/m^2)

P_{atm} : atmospheric pressure (N/m^2)

k_g^{eff} 는 압력구배, 온도, 포화도 및 매질 구조에 따라 달라지며, Hagen-Poiseuille 식은 laminar flow 를 가정하여 permeability 를 산출한다. 그러나 콘크리트는 미세한 공극을 갖기 때문에 molecular effect 및 Knudsen's effect 로 인한 nonviscous flow 가 빈번히 관측된다. 이러한 부분은 기체 분자의 mean free path 에 따라 변화하는 β 인자를 도입하여 Klinkenberg 식(Eq. 9)으로 관계를 표현할 수 있다[16].

$$k_g^{eff} = k \times k_{rg} \times \beta(P_m) \qquad (Eq.\ 9)$$

P_m : mean pressure applied to the specimen $\left(= \frac{P+P_{atm}}{2}\right)$

k : k_g^{eff} value as $1/P_m$ converges to 0 at 0% saturation

k_{rg} : relative permeability

$\beta = \left(1 + \frac{a}{P_m}\right)$ with constant a

(Eq. 9)에 따라 시편에 가해지는 평균 압력 P_m 이 증가할수록, 측정되는 effective gas permeability 는 감소된다. 또한 무한

압력에서의 gas permeability 는 비압축성 유체의 permeability 와 동일하다. k 및 k_{rg} 는 각각 0% 포화도 시편의 intrinsic gas permeability 및 relative gas permeability 이며, 둘의 곱인 $k \times k_{rg}$ 는 특정 포화도 S_x 에서의 intrinsic gas permeability 를 나타낸다. 따라서 포화도 S_x 에서의 intrinsic gas permeability (k_{Sx})와 k 와의 관계식(Eq. 10)을 통해 각 포화도별 relative gas permeability 를 산출할 수 있다.

$$k_{Sx} = k \times k_{rg} \qquad \textit{(Eq. 10)}$$

k_{Sx} : intrinsic gas permeability at S_x

k : intrinsic gas permeability at 0% effective saturation

k_{rg} : relative gas permeability

Intrinsic gas permeability 는 시편에 가해지는 압력과 무관하며, 매질 다공망(porous network)의 고유 특성이다.

제 3 장 실험장치

3.1 콘크리트 시편

콘크리트 시편은 직경 15 cm, 높이 5 cm 의 원통형이며, 콘크리트 조성은 LILW 처분시설의 콘크리트 사일로와 동일하게 제작되었다. 콘크리트 시편의 조성은 Table 1 에 제시되어 있으며, 시편은 91 일 동안 수중양생 되었다. Figure 2 는 완성된 시편의 모습이며, Figure 3 은 수중양생 중인 시편들의 모습이다.

Figure 2. Concrete Specimen

Table 1. Composition of Concrete Specimen

Source of aggregate		Daejong and Jinae Area
Mix Type		E-1-40
W/(C+F) (%)		40
S/a (%)		38.4
Proportion (kg/m^3)	Water	206
	Cement	412
	Fly-ash	103
	3/4"	961
	Coarser	357
	Finer	241
	WRA	2.3193
	AEA	0.1287

W: Water C: Cement F: Fly-ash S/a: Sand/aggregate

WRA: Water Reducing Admixture AEA: Air-Entraining Admixtures

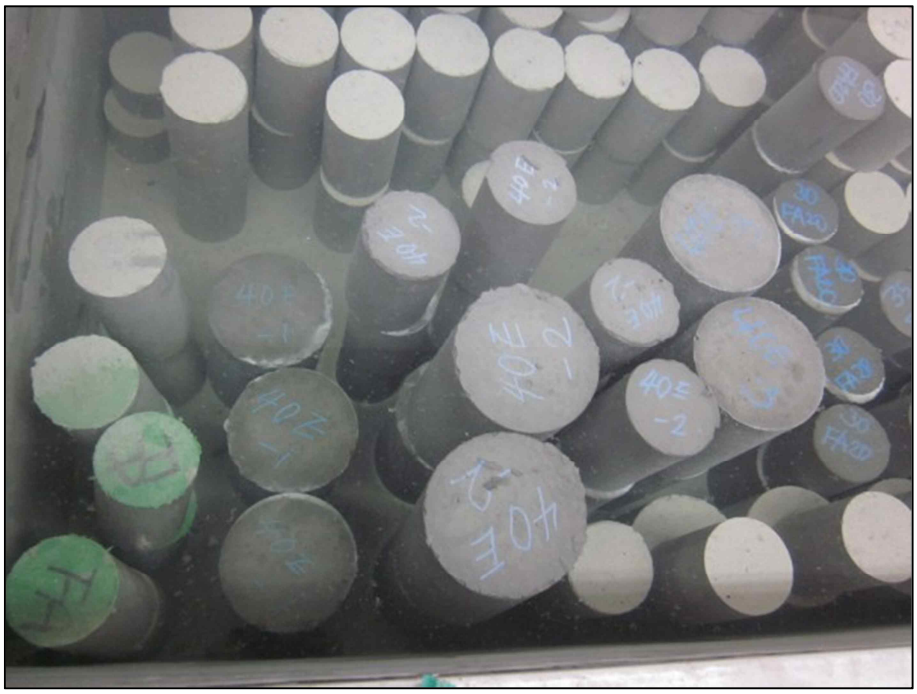

Figure 3. Water Curing of Concrete Specimens

3.2 실험장치

실험장치는 압력용기, 질소탱크, pressure regulator, flow regulator, 기체유량계, 차압계 및 밸브들로 구성된다. Figure 4 는 실험장치 계통의 개요도이다.

실제 처분시설 폐쇄 후 발생될 것으로 예상되는 기체는 수소, 이산화탄소, 메탄 등이며, 그 중 수소가 가장 많은 비중을 차지한다. 수소를 고압 실험에 사용하는 것은 안전성 측면에서 적합하지 않고, 이산화탄소 및 메탄 또한 수용성이 높아 고압 실험에서 적절하게 압력효과를 보여주기 어렵다. 본 실험에서는, 수소와 달리 압력 상태에서 안정적이고 물에 잘 녹지 않아 기체 상태의 압력효과를 보여주는데 적합한 질소를 실험기체로 활용하였다.

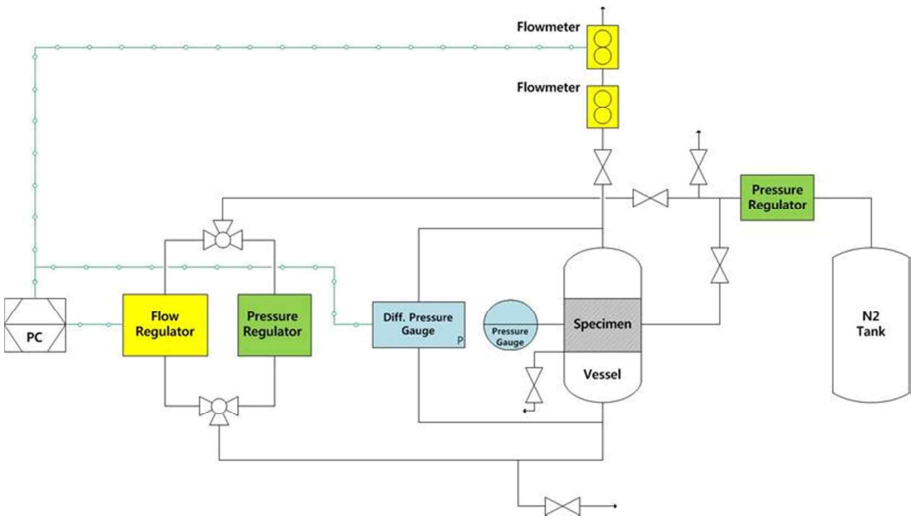

Figure 4. Layout of Experimental Apparatus

3.2.1 압력용기

압력용기는 원통형의 콘크리트 시편 옆면을 Viton 재질의 슬리브로 감싸고, 그 외부에 고압을 가하여 시편 옆면과 슬리브를 밀착시킴으로써 시편 옆면을 따라 흐르는 질소의 누설을 방지하도록 고안하였다.

압력용기 본체(Figure 5)는 속이 비어있는 원통형의 스테인리스 강으로 제작되었으며, 내부에 콘크리트 시편을 거치한 이후 슬리브에 가하는 압력 및 시편 하단(inlet)에 질소를 주입하여 축적되는 압력을 견디도록 설계되었다(설계압력: 60 bar). 압력용기 본체는 질소 주입/배출 노즐부, Viton 슬리브 및 덮개와 결합되어 콘크리트 시편을 고정하고 질소를 주입하는 압력용기를 구성한다. 노즐부(Figure 6)는 주입 및 배출되는 기체가 시편 표면에 고르게 압력을 가할 수 있도록 방사형 홈이 형성되어 있으며, 시편의 상, 하부에 동일한 형태의 노즐부가 대칭으로 위치하게 된다.

Figure 5. Pressure Vessel Cylinder

Figure 6. Inlet/Outlet Nozzle

콘크리트 시편 및 노즐부 옆면을 Viton 재질의 슬리브로 감싸고, 슬리브와 압력용기 본체 사이에는 시편 옆면에 고압을 가할 수 있도록 질소를 주입하는 외부 공간이 존재한다. 노즐부 상, 하부에 압력용기 본체와 결합하는 덮개(Figure 7)를 체결하여 최종적으로 시편을 고정하게 된다.

Figure 8 ~ 10 은 압력용기 내부 시편거치 및 결합과정을 나타낸다.

Figure 7. Lid of Pressure Vessel

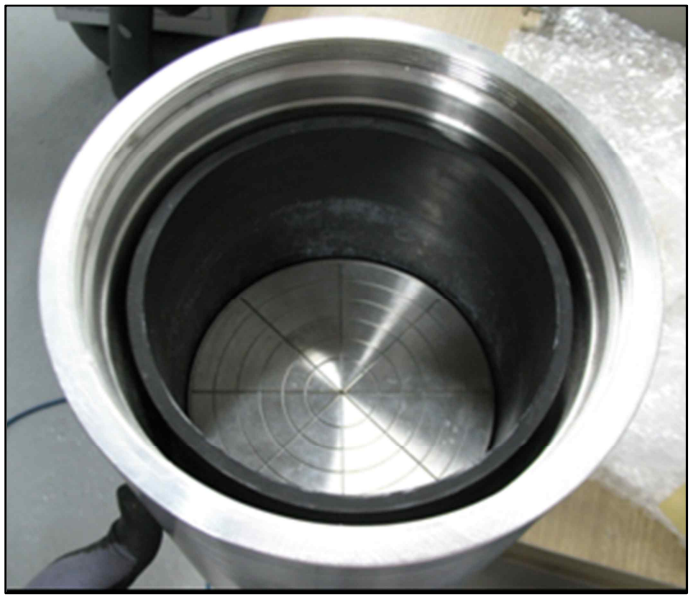

Figure 8. Pressure Vessel Combined with Lid, Nozzle and Viton Sleeve

Figure 9. Emplacement of Concrete Specimen

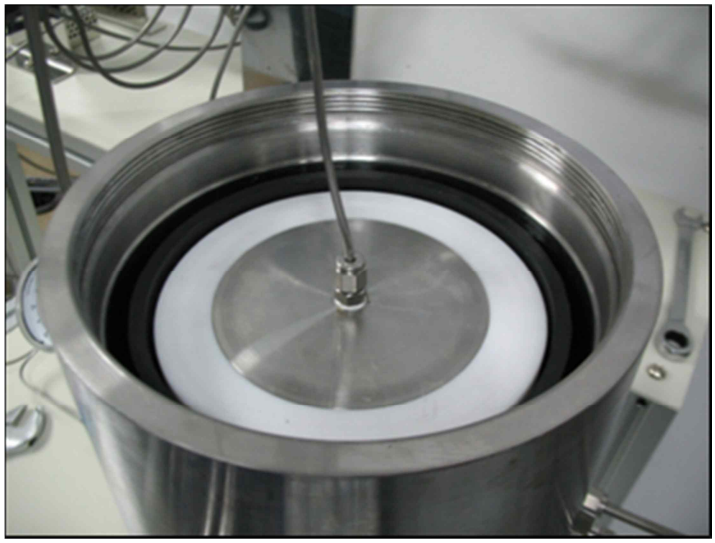

Figure 10. Combination of Outlet Nozzle

3.2.2 기타 계통

질소탱크에서 나오는 질소는 1 차 pressure regulator 를 통해 압력이 조절되며, 이후 밸브를 통해 시편 하단의 주입 노즐부로 연결되는 배관 및 Viton 슬리브 외부 공간으로 연결되는 배관으로 선택하여 질소를 주입할 수 있다. 주입 노즐부로 향하는 배관은 다시 T 형 밸브를 통해 flow regulator 또는 pressure regulator 을 거치도록 선택하여 주입할 수 있으며, gas entry pressure 실험 및 gas permeability 실험은 각각 flow regulator 및 pressure regulator 배관을 사용하였다. 주입 노즐부를 통해 압력용기 내부로 들어가는 질소는 시편을 통과하여, 시편 상부의 배출 노즐부를 통해 배관을 따라 아날로그 및 디지털 유량계를 거쳐 최종 배출된다. 주입 및 배출 노즐부 배관은 차압계와 연결되어 있으며, 차압 및

유량 데이터는 PC 로 전송된다. Figure 11 은 실험장치 계통 전경이다.

Figure 11. Complete Experimental Apparatus

제 4 장 실험방법

4.1 Gas entry pressure

국외 실험연구의 경우(Skoczylas, F., Davy, C. A.), gas breakthrough pressure 를 측정하여 이를 gas entry pressure 로 가정하는 간접적인 방법을 통해 gas entry pressure 를 산출하였다[17]. 낮은 유량으로 기체를 주입하더라도 두 값의 차이는 오차를 보이게 되며, 특히 콘크리트의 경우 permeability 가 낮기 때문에, 실제 gas entry pressure 보다 큰 값을 gas entry pressure 로 산출하게 될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 gas entry pressure 를 실제 값에 가깝게 산출하기 위해 새로운 실험방법을 고안하였다.

우선 100% 포화도의 시편을 압력용기 내에 거치하고, flow regulator 를 통해 시편 하단으로 낮은 유량(0.1 mL/min)의 질소를 일정하게 주입하였다. 시편 상단의 배출 노즐부는 대기압 상태로 유지시켜 시편 상, 하단의 차압을 서서히 증가시켰다. 특정 차압(0.5 bar)에 도달할 경우, 질소 주입을 중단하여 차압을 일정하게 유지시켰다. 이후 일정기간(1 시간) 동안 차압의 변화를 관측하여 차압이 감소하지 않을 경우, 동일한 유량으로 다시 질소를 주입하여 0.1 bar 간격으로 차압을 증가시켰다. 1 시간 동안 차압이 감소하는 경향을 보인 경우, 질소가 압력에 의해 콘크리트 시편의 공극으로 침투하기 시작한 것으로 가정하여 해당 차압을 gas entry

pressure 로 산출하였다. 차압이 감소할 때까지 0.1 bar 간격으로 관측을 반복하고, 총 3 개의 시편에 대해 반복 수행하였다.

초기 차압은 예비실험을 거쳐 공학적 판단에 의해 0.5 bar 로 선정하였다. 차압을 장시간 유지하게 될 경우 질소의 용해 등 기타 요인에 의해 차압이 감소할 수 있으므로, 상대적으로 짧은 기간인 1 시간으로 관측시간을 선정하여 순수하게 차압에 의한 질소의 침투를 고려하였다.

4.2 Gas permeability

4.2.1 시편 전처리

포화도 100%인 6 개 시편의 초기 질량을 측정한 이후, 100℃ 오븐에 넣어 건조를 시키며 질량 변화를 측정하였다. 약 8 주의 기간 동안 시편의 질량변화가 없을 때까지 건조를 시켰으며, 더 이상 질량변화가 없는 상태를 0% effective saturation 으로 가정하였다. Effective saturation 은 (Eq. 11)과 같이 표현 가능하다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad (Eq.\ 11)$$

S_e : effective saturation

θ : volumetric water content

θ_s : saturated water content

θ_r : residual water content

한편, θ_s 는 공극률과 동일한 값으로 정의되므로 측정을 통해 산출된 콘크리트 시편의 공극률인 0.21 을 적용하였다. 위 가정에 의해 질량변화가 없는 상태의 water content 가 residual water content 로 정의되므로, θ_r 은 6 개 시편의 평균값인 0.066 을 사용하였다.

건조에 의해 감소되는 시편의 질량은 증발되는 물의 질량과 동일하므로 (Eq. 12)와 같은 관계를 가지며, 목표 effective saturation 을 만족시키는 질량 M_s 에 도달할 때까지 시편을 건조시켜 해당 포화도의 시편을 확보하였다.

$$\rho(\theta_s - \theta_r)V(1 - S_e) = M_0 - M_s \quad \textit{(Eq. 12)}$$

ρ : water density

V : volume of specimen

M_0 : initial weight of specimen at 100% effective saturation

M_s : weight of specimen at effective saturation S

4.2.2 실험수행

Effective saturation S_x 의 시편을 압력용기 내에 거치한 후, pressure regulator 를 통해 시편 하부에 일정한 압력으로 질소를 주입하였다. 이후 시편 상, 하부의 차압을 일정하게 유지하며 시편을 통과해 상부로 배출되는 질소의 유량을 측정하였다.

충분한 시간이 지난 뒤 정상상태의 배출유량을 기록하고, Hagen-Poiseuille 식(Eq. 8)을 활용하여 특정 P_m(시편 상, 하부 압력의 평균)에서의 effective gas permeability(k_g^{eff})를 산출하였다. 질소의 점성계수 μ 는 20℃ mole fraction 1.0 에서의 값인 1.7568×10^{-5} N.s/m^2를 사용하였다[18].

시편 상, 하부의 차압을 2, 3, 4 bar 로 달리하여 각 차압에서의 effective gas permeability 를 산출하고, $1/P_m$ 과 k_g^{eff} 의 관계를

그래프로 나타내어 MATLAB 코드의 Fitting Tool 을 통해 선형관계식을 산출하였다. 예상 실험결과는 Figure 12 와 같다.

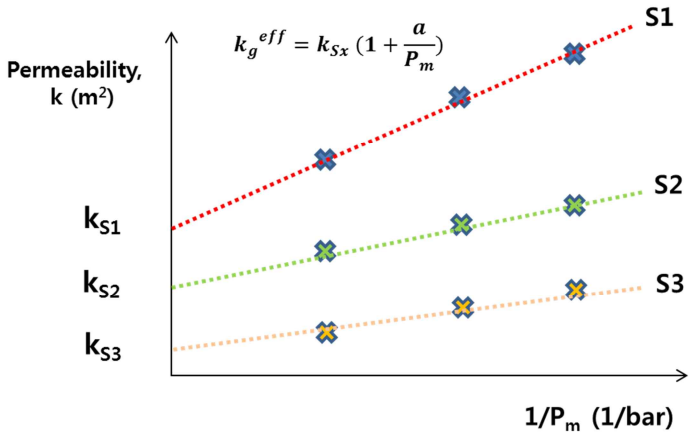

Figure 12. Presumed Data of Permeability Measurement

Klinkenberg 식(Eq. 9)에 따라 선형관계식의 Y 축 절편이 특정 effective saturation 에서의 intrinsic gas permeability 로 정의된다. 또한 Eq. 10 에 의해 각 effective saturation 에서의 relative gas permeability 를 산출할 수 있다.

5 가지 effective saturation(0, 10, 30, 50, 70%)의 시편에 대해 실험을 수행하였으며, 0%를 제외한 나머지 케이스는 각 3 회 반복 수행하였다. 0% effective saturation 의 경우 다른 effective saturation 케이스에서의 relative gas permeability 를 산출하는 기준점이 되므로, 오차를 최소화 하기 위해 4.2.1 절에 기재된 바와 같이 6 회 반복 측정하여 최대, 최소값을 제외한 결과를 사용하여 평균을 산출하였다.

제 5 장 실험결과

5.1 Gas entry pressure

4.1 절에 기술된 실험방법에 따라 3 개의 시편에 대해 반복수행하였으며, 그 결과 평균 gas entry pressure 는 0.97 bar 로 산출되었다. Table 2 는 gas entry pressure 실험결과를 나타낸다. 실험결과 gas entry pressure 이하의 차압에서는 압력이 일정하게 유지되었으며, gas entry pressure 에 도달할 경우 짧은 시간 내에 차압이 감소하기 시작하는 것을 관측할 수 있었다.

Figure 13 ~ 15 는 각 반복 케이스별로 시간에 따른 차압 관측 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Measurements of Gas Entry Pressure

Case	Gas entry pressure (bar)	Average (bar)
1	1.0	0.97±0.12
2	0.8	
3	1.1	

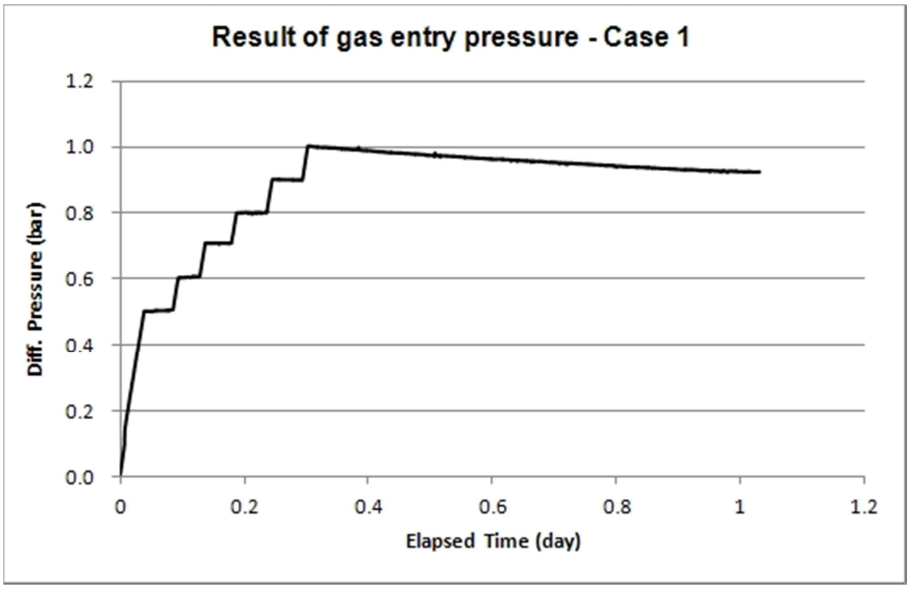

Figure 13. Observations in Case 1 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures

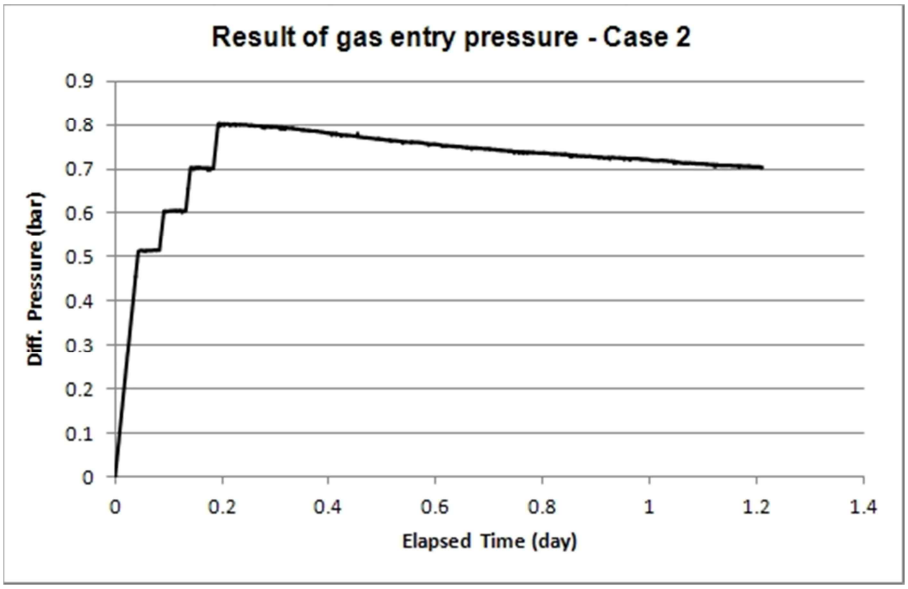

Figure 14. Observations in Case 2 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures

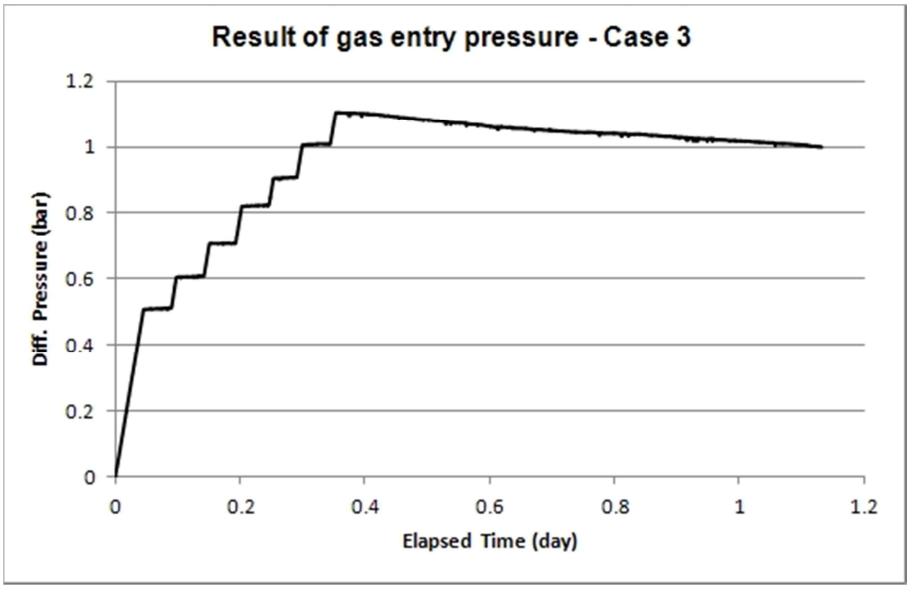

Figure 15. Observations in Case 3 of Change in Differential Pressure with an Elapsed Time after Serial Application of New Gas Entry Pressures

5.2 Gas permeability

4.2.1 절에 기재된 방법에 의해 전처리 된 시편의 gas permeability 를 측정하였으며, 4.2.2 절에서 언급한 실험케이스별로 배출유량을 기록하였다. 배출유량 결과는 Table 3 과 같다.

Table 3. Measurements of Discharge Flow (mL/min)

Effective Saturation	Specimen	Pressure (bar)		
		2	3	4
0%	R1	30.0	47.0	68.0
	R2	80.0	117	220
	R3	28.0	45.0	63.0
	R4	36.0	60.0	86.0
	R5	30.0	49.0	73.0
	R6	36.0	58.0	84.0
10%	R1	19.0	32.0	42.0
	R2	21.0	33.0	47.0
	R3	25.0	40.0	58.0
30%	R1	10.0	17.0	24.0
	R2	9.00	16.0	22.0
	R3	18.0	30.0	42.0
50%	R1	11.0	19.0	28.0
	R2	4.50	8.20	12.5
	R3	5.80	9.30	14.0
70%	R1	3.90	6.30	9.30
	R2	3.50	5.70	8.50
	R3	2.30	3.90	5.80

Table 3 의 배출유량 결과로부터 Hagen-Poiseuille 식(Eq. 8)을 통해 산출한 effective gas permeability 결과는 Table 4 와 같다.

Table 4. Measurements of Effective Gas Permeability (m^2)

Effective Saturation	Specimen	Pressure (bar)		
		2	3	4
0%	R1	6.25×10^{-17}	5.23×10^{-17}	4.74×10^{-17}
	R2	1.67×10^{-16}	1.30×10^{-16}	1.53×10^{-16}
	R3	5.84×10^{-17}	5.01×10^{-17}	4.39×10^{-17}
	R4	7.51×10^{-17}	6.68×10^{-17}	5.99×10^{-17}
	R5	6.25×10^{-17}	5.46×10^{-17}	5.08×10^{-17}
	R6	7.51×10^{-17}	6.46×10^{-17}	5.85×10^{-17}
10%	R1	3.96×10^{-17}	3.56×10^{-17}	2.93×10^{-17}
	R2	4.38×10^{-17}	3.67×10^{-17}	3.27×10^{-17}
	R3	5.21×10^{-17}	4.45×10^{-17}	4.04×10^{-17}
30%	R1	2.08×10^{-17}	1.89×10^{-17}	1.67×10^{-17}
	R2	1.88×10^{-17}	1.78×10^{-17}	1.53×10^{-17}
	R3	3.75×10^{-17}	3.34×10^{-17}	2.93×10^{-17}
50%	R1	2.29×10^{-17}	2.12×10^{-17}	1.95×10^{-17}
	R2	9.38×10^{-18}	9.13×10^{-18}	8.71×10^{-18}
	R3	1.21×10^{-17}	1.04×10^{-17}	9.75×10^{-18}
70%	R1	8.13×10^{-18}	7.01×10^{-18}	6.48×10^{-18}
	R2	7.30×10^{-18}	6.35×10^{-18}	5.92×10^{-18}
	R3	4.79×10^{-18}	4.34×10^{-18}	4.04×10^{-18}

각 포화도별 평균 effective gas permeability 결과는 Table 5 와 같다. Relative gas permeability 산출시 오차를 최소화 하기 위하여 0% effective saturation 결과 중 최대, 최소값인 R2, R3 시편의 결과는 배제하고, 나머지 4 개의 케이스에 대한 평균을 산출하였다.

Table 5. Mean Estimates of Effective Gas Permeability (m^2)

Effective saturation (%)	Average k_g^{eff}		
	at 2 bar	at 3 bar	at 4 bar
0	6.88×10^{-17} $\pm 6.25\times10^{-18}$	5.96×10^{-17} $\pm 6.22\times10^{-18}$	5.41×10^{-17} $\pm 5.22\times10^{-18}$
10	4.52×10^{-17} $\pm 5.20\times10^{-18}$	3.90×10^{-17} $\pm 3.96\times10^{-18}$	3.41×10^{-17} $\pm 4.65\times10^{-18}$
30	2.57×10^{-17} $\pm 8.40\times10^{-18}$	2.34×10^{-17} $\pm 7.10\times10^{-18}$	2.04×10^{-17} $\pm 6.26\times10^{-18}$
50	1.48×10^{-17} $\pm 5.85\times10^{-18}$	1.35×10^{-17} $\pm 5.40\times10^{-18}$	1.27×10^{-17} $\pm 4.86\times10^{-18}$
70	6.74×10^{-18} $\pm 1.42\times10^{-18}$	5.90×10^{-18} $\pm 1.14\times10^{-18}$	5.48×10^{-18} $\pm 1.04\times10^{-18}$

0% effective saturation 시편의 평균 k_g^{eff} 는 2, 3, 4 bar 에서 각각 6.88×10^{-17}, 5.96×10^{-17}, 5.41×10^{-17} m^2 으로 산출되었으며, linear fitting 을 통해 산출된 intrinsic gas permeability 는 2.43×10^{-17} m^2 이다. 0% effective saturation 에서의 relative gas permeability 는 1 이며, 따라서 콘크리트 시편의 absolute gas permeability 는 2.43×10^{-17} m^2 이다. Figure 16 은 0% effective saturation 에서의 실험결과를 나타낸다.

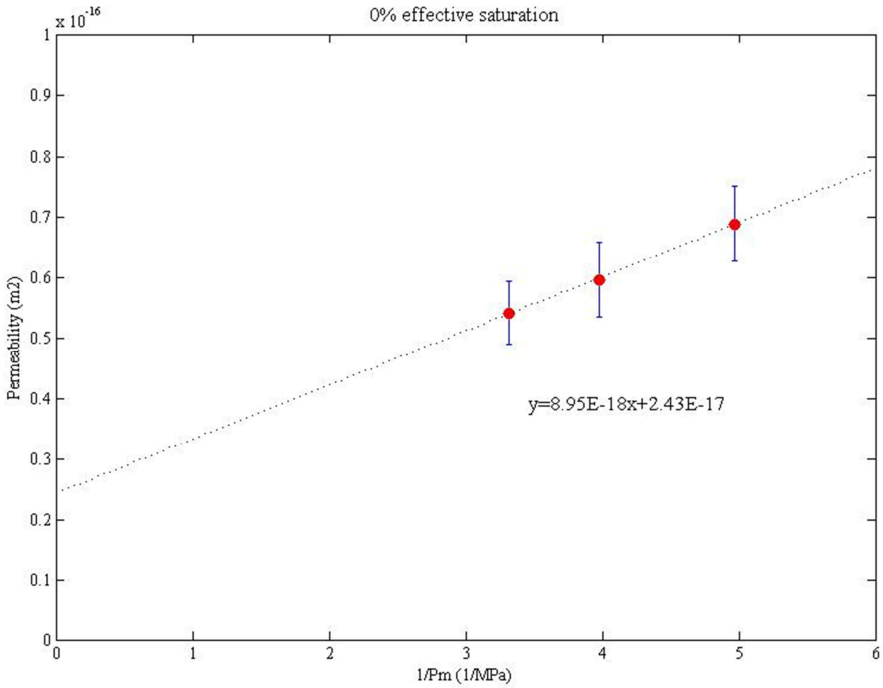

Figure 16. Estimates of Gas Permeability at 0% Effective Saturation

10% effective saturation 시편의 평균 k_g^{eff} 는 2, 3, 4 bar 에서 각각 4.52×10^{-17}, 3.90×10^{-17}, 3.41×10^{-17} m^2 으로 산출되었으며, linear fitting 을 통해 산출된 intrinsic gas permeability 는 1.20×10^{-17} m^2 이다. k 와의 비를 통해 산출된 10% effective saturation 에서의 relative gas permeability 는 0.49 이다. Figure 17 은 10% effective saturation 에서의 실험결과를 나타낸다.

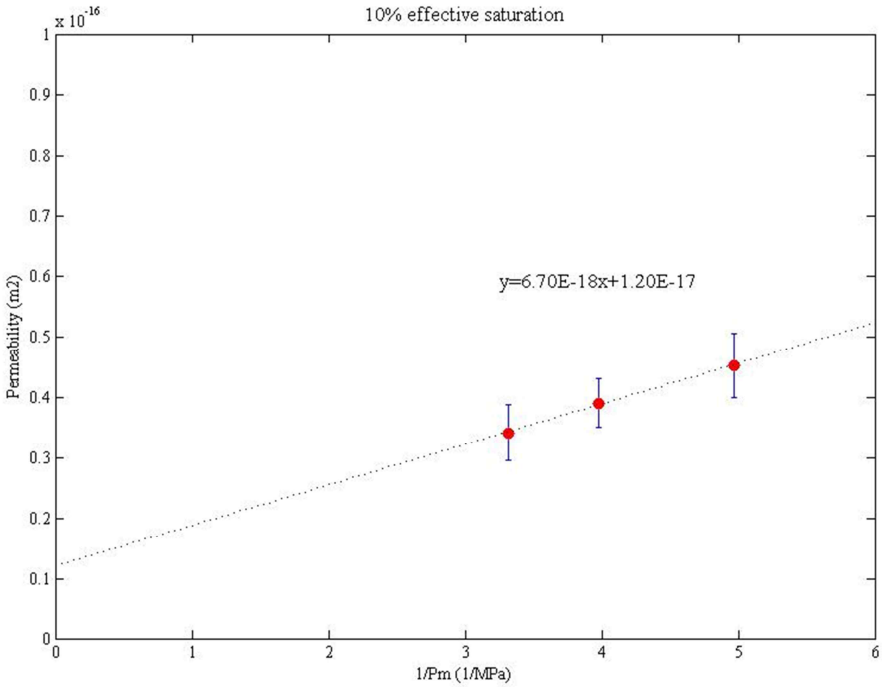

Figure 17. Estimates of Gas Permeability at 10% Effective Saturation

30% effective saturation 시편의 평균 k_g^{eff} 는 2, 3, 4 bar 에서 각각 2.57×10^{-17}, 2.34×10^{-17}, 2.04×10^{-17} m^2 으로 산출되었으며, linear fitting 을 통해 산출된 intrinsic gas permeability 는 1.03×10^{-17} m^2 이다. k 와의 비를 통해 산출된 30% effective saturation 에서의 relative gas permeability 는 0.42 이다. Figure 18 은 30% effective saturation 에서의 실험결과를 나타낸다.

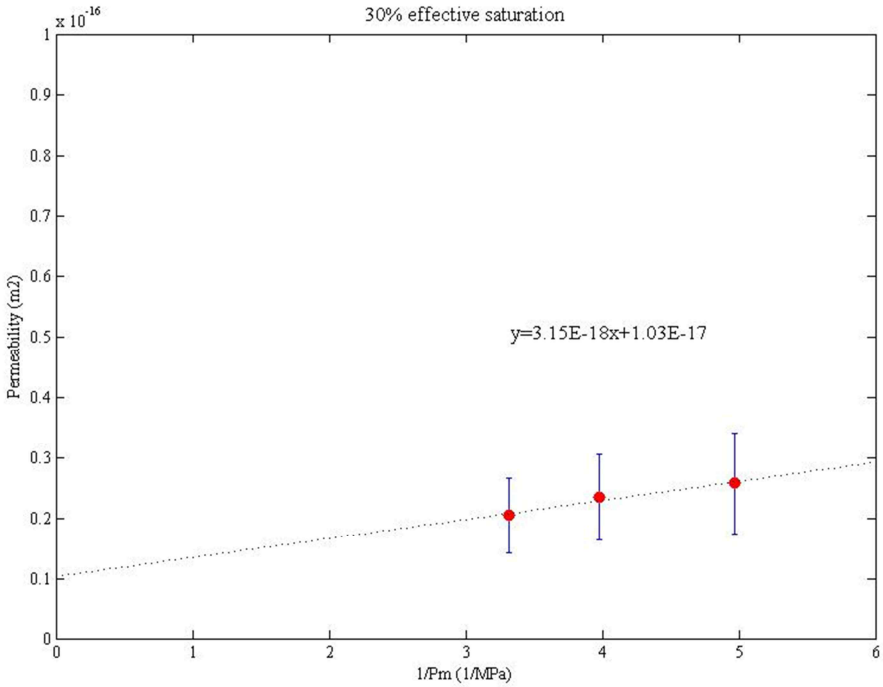

Figure 18. Estimates of Gas Permeability at 30% Effective Saturation

50% effective saturation 시편의 평균 k_g^{eff} 는 2, 3, 4 bar 에서 각각 1.48×10^{-17}, 1.35×10^{-17}, 1.27×10^{-17} m^2 으로 산출되었으며, linear fitting 을 통해 산출된 intrinsic gas permeability 는 8.45×10^{-18} m^2 이다. k 와의 비를 통해 산출된 50% effective saturation 에서의 relative gas permeability 는 0.35 이다. Figure 19 는 50% effective saturation 에서의 실험결과를 나타낸다.

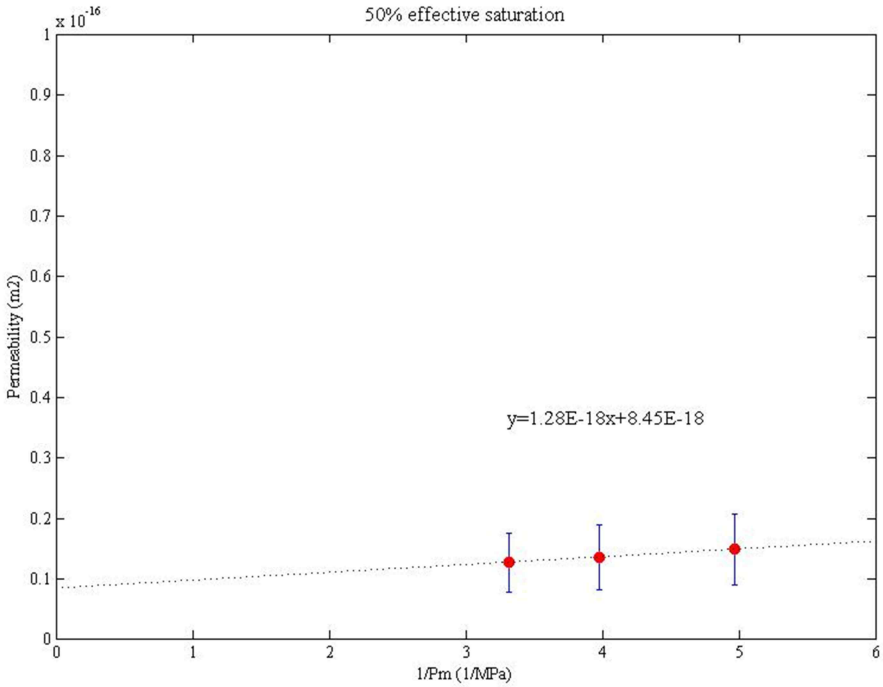

Figure 19. Estimates of Gas Permeability at 50% Effective Saturation

70% effective saturation 시편의 평균 k_g^{eff} 는 2, 3, 4 bar 에서 각각 6.74×10^{-18}, 5.90×10^{-18}, 5.48×10^{-18} m^2 으로 산출되었으며, linear fitting 을 통해 산출된 intrinsic gas permeability 는 2.89×10^{-18} m^2 이다. k 와의 비를 통해 산출된 70% effective saturation 에서의 relative gas permeability 는 0.12 이다. Figure 20 은 70% effective saturation 에서의 실험결과를 나타낸다.

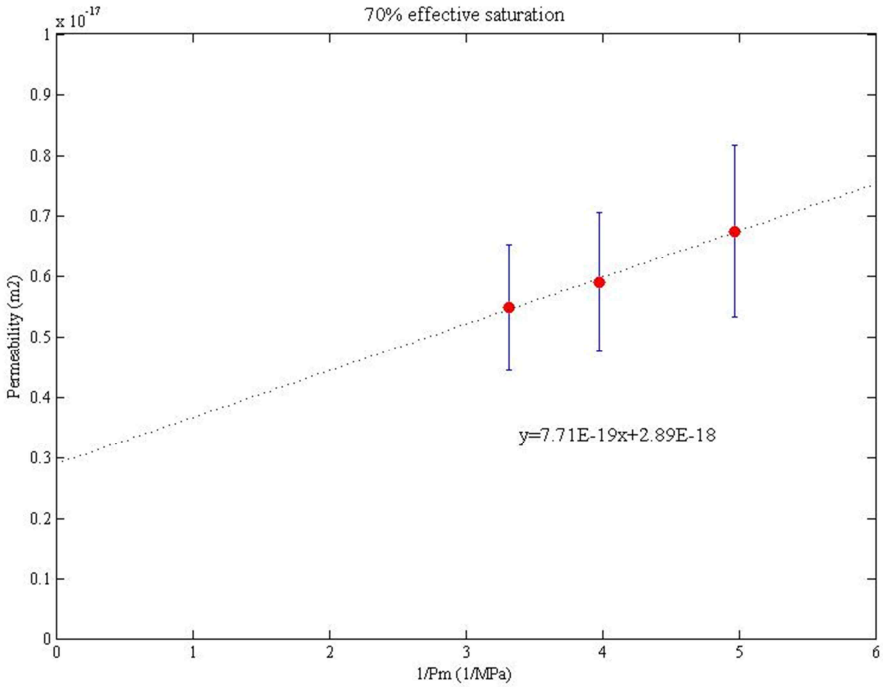

Figure 20. Estimates of Gas Permeability at 70% Effective Saturation

각 effective saturation 의 gas permeability 결과를 종합하면 Figure 21 과 같다. 예상 실험결과와 동일한 양상을 보이지만, 각 평균의 오차가 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 다공성 매질에서의 기체이동은 주로 직경이 가장 큰 공극에 의해 영향을 받게 되며, 콘크리트는 시편에 따라 공극 크기와 구조가 매우 상이하다. 따라서 이러한 콘크리트 매질의 특성에 의해 평균값의 표준편차가 크게 산출된 것으로 판단된다. 여러 시편에 대한 추가적인 반복 수행을 통해 오차를 최소화 할 수 있을 것이다.

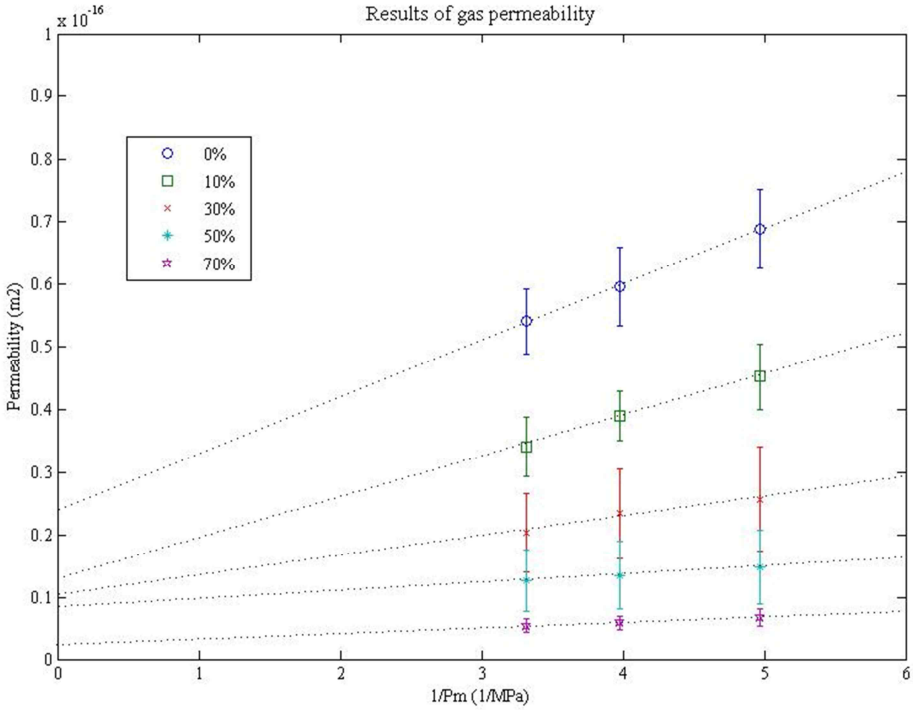

Figure 21. Estimates of Gas Permeability for Various Levels of Effective Saturation

각 effective saturation 의 intrinsic gas permeability 및 relative gas permeability 결과는 Table 6 과 같다.

Table 6. Representative Estimates of Intrinsic Gas Permeability and Relative Gas Permeability

Effective saturation (%)	Intrinsic Gas Permeability (m^2)	Relative Gas Permeability
0	2.43×10^{-17}	1.00
10	1.20×10^{-17}	0.49
30	1.03×10^{-17}	0.42
50	8.45×10^{-18}	0.35
70	2.89×10^{-18}	0.12

각 effective saturation 에서의 평균 relative gas permeability 결과를 그래프로 나타내면 Figure 22 와 같다.

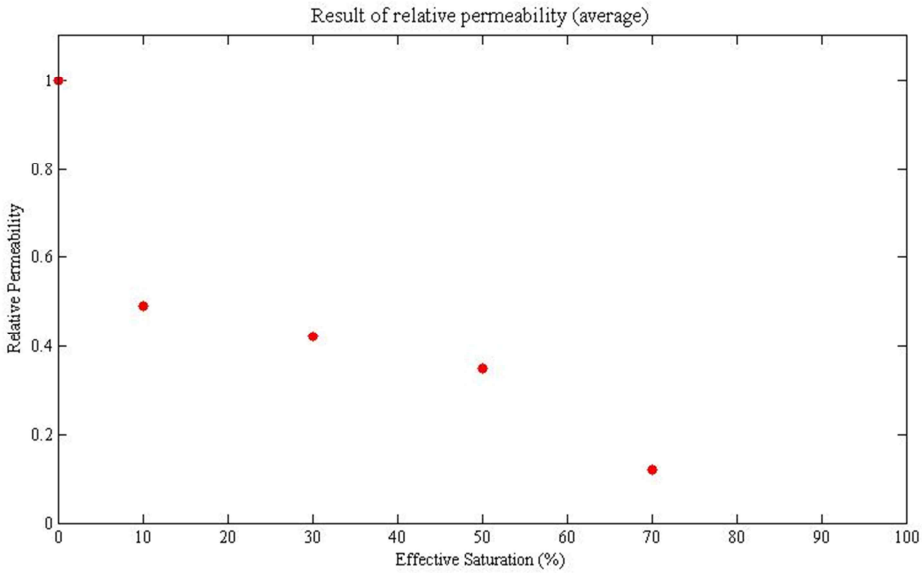

Figure 22. Representative Estimates of Relative Gas Permeability (average)

제 6 장 결론

국내 LILW 처분시설에서의 기체이동현상 파악 및 모델링에 필요한 콘크리트 사일로 고유의 특성을 확인하기 위해서, 사일로와 동일한 조성의 콘크리트 시편을 활용하여 gas entry pressure 및 gas permeability 실험을 수행하였다.

Gas entry pressure 실험은 100% 포화상태의 콘크리트 시편을 사용하여 3 회 반복 수행 하였으며, 그 결과 평균 gas entry pressure 는 0.97 bar 로 산출되었다. 결과의 표준편차는 0.12 bar 로, 평균값의 10%가 넘는 상당한 편차를 보였다. 이는 다공성 매질인 콘크리트의 특성으로 인해 각 시편의 내부 공극망 크기 분포가 수십 ㎚에서 수백 ㎛까지 매우 넓고, 형태 또한 다양하기 때문인 것으로 해석된다. Van Genuchten 관계식에서 α는 gas entry pressure 의 역수인 1.03 bar^{-1} 로 산출되었다. 처분시설 사일로의 경우 거대한 콘크리트 구조물이므로, 위치에 따라 내부 공극망의 구조가 매우 다양할 것으로 예상된다. 따라서 기체가 침투하기 시작하는 압력은 사일로 위치에 따라 달라질 것이므로, 보수적으로 모델링을 수행하고자 하는 경우에는 가장 높은 gas entry pressure 결과를 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Gas permeability 실험은 0, 10, 30, 50, 70%의 effective saturation 을 갖는 시편에 대해 2, 3, 4 bar 의 압력에서 각 3 회 반복 수행 하였으며, 그 결과는 Table 3 ~ 6 및 Figure 16 ~ 22 와 같다. 배출유량 결과는 gas entry pressure 실험과 마찬가지로 동일한 조건에서 시편에 따른 편차가 상당히 컸으며, 이는 앞서

언급한 바와 같이 시편에 따라 내부 공극망의 구조가 상이하기 때문으로 판단된다. 각 포화도에서의 gas permeability 실험결과(Figure 16 ~ 20)는 예상 결과와 동일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 시편에 가해지는 압력이 높을수록 effective gas permeability 가 낮아졌다. 포화도별 실험결과를 종합하면(Figure 21), 시편의 포화도가 낮을수록 intrinsic gas permeability 가 증가함을 확인할 수 있었다. Relative gas permeability 실험결과는 Figure 22 와 같이 산출되었다.

콘크리트 사일로의 기체이동 관련 특성을 측정한 결과 gas entry pressure 는 1 bar 미만의 값으로 산출되었으며, 이는 상대적으로 직경이 큰 공극들을 통해 기체가 비교적 낮은 압력에서도 쉽게 콘크리트 내부로 침투를 시작함을 의미한다. 그러나 gas permeability 는 10^{-18} ~ 10^{-17} m^2 로 다른 매질에 비해 상대적으로 낮은 값으로 산출되었다. 두 결과를 종합해보면, 콘크리트 사일로 내부에 기체가 축적될 경우 상대적으로 빠르게 기체가 콘크리트 공극으로 침투를 시작하지만, 이후 공극을 통한 이동은 상당히 느리게 진행되는 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 기체가 콘크리트 사일로를 통과하여 외부로 빠져나가기 전까지 사일로 내부에 상당한 기체압력이 축적될 것으로 예상되므로, 콘크리트 사일로의 건전성 확보를 위해 gas permeable seal 개념의 기체배출시스템을 설치할 필요가 있다. Gas permeable seal 은 콘크리트 사일로보다 기체이동 성능이 우수한 물질로 구성되어야 한다. 즉, 콘크리트 사일로보다 gas entry pressure 가 낮고 gas permeability 가 높은 물질을 사용해야 하며, 폐기물과 물의 접촉을

최대한 차단하려는 처분시설의 설계를 고려하여 water permeability 는 가능한 낮게 설계되어야 할 것이다.

콘크리트 사일로의 안전성 측면에서 기체가 최초로 축적되는 사일로 최상단에 기체배출시스템을 설치할 경우에 가장 효과적으로 기체를 배출할 수 있으나, 국내 LILW 처분시설의 경우 폐기물과 물의 접촉을 차단하기 위해 콘크리트로 완전히 밀봉하는 개념을 도입하였다. 따라서, 기체배출시스템은 콘크리트 사일로와 운영동굴 연결부에 위치할 수 밖에 없으며, 이를 통해 운영동굴로 기체가 배출되어 최종적으로는 기반암으로 배출되는 시나리오를 고려할 수 있다(Figure 23). 기체의 배출로 인해 콘크리트 사일로 내부의 압력 축적이 방지되고, 따라서 처분시설의 안전성을 확보할 수 있다.

본 연구를 통해 확보한 콘크리트 사일로 고유의 특성으로부터 폐쇄 후 기체발생 및 축적에 따른 공학적 방벽의 건전성 손상 가능성을 확인하였으며, 그에 따라 기체배출시스템의 필요성에 대한 근거를 확보하였다. 또한 실험결과를 활용하여 처분시설에서의 기체이동 모델링을 수행할 수 있을 것이며, 다양한 모델링 분석을 통해 기체배출시스템의 상세설계 및 폐쇄 후 안전성 분석이 가능할 것이다.

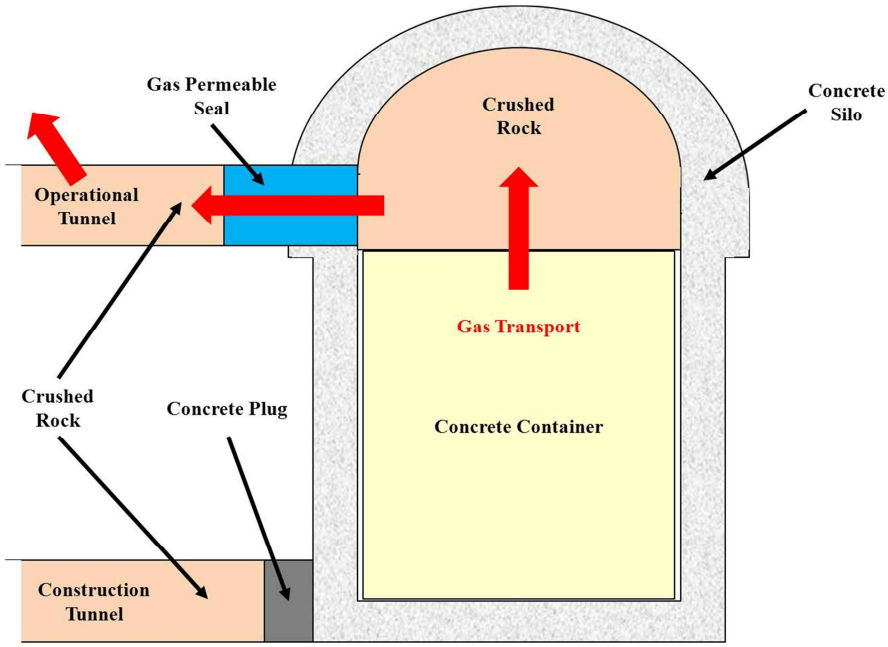

Figure 23. Concept of Gas Transport Pathway and Gas Permeable Seal

참고문헌

1. 박진백, 이선정, 김석훈, 김주열, “중.저준위 방사성폐기물 처분을 위한 국외 기체발생 실증실험시설 운영사례 분석,” *한국방사성폐기물학회지*, 8(3), pp. 229-238 (2010)
2. SKB, "Safety analysis SFR 1 - Long-term safety," SKB Report R-08-130 (2008)
3. SKB, "PROJECT SAFE - Gas related processes in SFR," SKB Report R-01-11 (2001)
4. Vieno, T., Nordman, H., "VLJ Repository Safety Analysis," Report TVO-1/98 (1998)
5. NAGRA, "Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland," NAGRA Technical Report 08-07 (2008)
6. Yamamoto, S., "Overview of Gas Migration Test (GMT) at Grimsel Test Site," Technical meeting for Gas Generation Research at KRMC (2010)
7. NAGRA, "Gas-Permeable Seal Test (GAST) at Grimsel Test - Experiment Concept," Aktennotiz AN /10-388 (2010)
8. Mayer, G., Moetsch, H. A., Wittmann, F. H., "Large-scale Experiment for Water and Gas Transport in Cementitious Backfill Materials (Phase 1) COLEX I," NAGRA Technical Report 98-03 (1998)
9. Villar, M. V., Martin, P. L., Romero, F. J., "RESULTS OF THE TESTS ON CONCRETE (PART 1)," FORGE Report D3.6 (2010)
10. Cuss, R. J., Harrington, J. F., Noy, D. J., "Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Äspö Hard Rock Laboratory-Summary report 2008," SKB Technical Report TR-10-38 (2010)
11. Senger, R., Enachescu, C., Doe, T., Distinguin, M., Delay, J., Frieg, B., "DESIGN AND ANALYSIS OF A GAS THRESHOLD PRESSURE TEST IN A LOW-PERMEABILITY CLAY FORMATION AT ANDRA’S UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY," BURE (FRANCE), PROCEEDINGS, TOUGH Symposium 2006 (2006)
12. Abbas, A., Carcasses, M., Ollivier, J. -P., "Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation," *MATER STRUCT*, Vol. 32, pp. 3-8 (1999)

13. Marschall, P., Horseman, S., Gimmi. T., "Characterisation of Gas Transport Properties of the Opalinus Clay, a Potential Host Rock Formation for Radioactive Waste Disposal," *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, Vol. 60 (2005), No. 1, pp. 121-139 (2005)
14. Van Genuchten, M. Th., Nielsen, D. R., "On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils," *Annales Geophysicae*, 1985, 3, 5, pp. 615-628 (1985)
15. Harris, A. W., Atkinson, A., Claisse, P. A., "Transport of Gases in Concrete Barriers," *WASTE MANAGE*, Vol. 12, pp. 155-178 (2000)
16. Monlouis-Bonnaire, J. P., Verdier, J., Perrin, B., "Prediction of the relative permeability to gas flow of cement-based materials," *Cement and Concrete Research 34*, pp. 737-744 (2004)
17. Skoczylas, F., Davy, C. A., "Measurement of gas entry pressure," FORGE Report D3.13 (2011)
18. Cole, W. A., Wakeham, W. A., The Viscosity of Nitrogen, Oxygen, and Their Binary Mixtures in the Limit of Zero Density, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 14, No. 1, pp. 209-226 (1985)

Abstract

Experimental Study on Gas Migration Characteristics Factor of Silo Concrete in Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility

Juyub Kim
Department of Nuclear Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste (LILW) disposal facility is under construction in Korea as of 2012. The LILW disposal facility in Korea used underground disposal with the concrete silo. After final closure of the disposal facility, the concrete silo will be saturated with ground water and various gases could be generated. As the generated gases are accumulated, internal pressure of the silo would increase and integrity of the concrete silo could be damaged by overpressure. Therefore, an effective gas permeable seal is necessary to prevent the overpressurization of the concrete silo.

For designing of the gas permeable seal, experimental study and computer modeling on the gas migration through the concrete should be performed. In this study, in order to obtain the specific characteristics of the concrete silo which are necessary for computer modeling, gas entry pressure and gas permeability of the concrete silo were measured by using specimens which have a same composition with the concrete silo. The results of this study could be utilized to the simulation of gas migration in the LILW disposal facility and design of the gas permeable seal.

Keywords: LILW disposal facility, Concrete silo, Gas migration, Gas permeable seal, Gas entry pressure, Gas permeability

Student Number: 2011-21092