

# 원전구조물용 플라이애시 콘크리트의 시공이음 형태에 따른 투기특성 분석

이호재<sup>1</sup>, 김지현<sup>2</sup>, 최유진<sup>3</sup>, 서은아<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부, <sup>2</sup>부경대학교 융복합인프라기술연구소, <sup>3</sup>부경대학교 건축·소방공학부

## An Experimental Study of Gas Permeability of Fly Ash Concrete Based on Construction Joint Shape for Nuclear Power Plant Structures

Ho-Jae Lee<sup>1</sup>, Ji-Hyun Kim<sup>2</sup>, Yu-Jin Choi<sup>3</sup>, Eun-A Seo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology

<sup>2</sup>Multidisciplinary Infra-technology Research Laboratory, Pukyong National University

<sup>3</sup>Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University

**요약** 이 연구는 원전 콘크리트 구조물의 기체 투과성을 분석하기 위해 시공이음 형태와 압력조건에 따른 콘크리트 투기유량 측정을 통하여 투기계수를 평가하였다. 두께 30, 50 mm의 콘크리트 시험체에 0~300 psi 범위, 7단계로 압력을 가압하였다. OPC와 FA20 시험체의 300 psi에서의 평균 투과 유량은 0.42 L/min과 0.59 L/min으로 유사한 투기 성능을 나타내었다. 이음부에서 별도의 처리없이 제작한 FA20-CJ(s)의 시험체의 누설량은 1 L/min 이상으로 일체타설 시험체 대비 1.7~2.4배 높았다. 반면, 시공이음부의 면처리를 적용한 FA20-CJ(r) 시험체의 투기 유량은 FA20-CJ(s) 시험체 대비 60% 수준으로 낮게 측정되었다. 특히, FA20-CJ(r)의 두께 50 mm 시험체는 동일한 두께의 일체타설로 제작한 FA20 시험체와 유사한 투기 유량을 나타내었다. 결과적으로 시험체의 두께가 건전한 콘크리트의 투기성능에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 결합재의 영향은 시험체 두께가 증가되면서 점차 작아지는 것으로 예측됐다. 또한 시공이음부가 있는 경우에는 이음부 처리방법에 현저한 영향을 받았다.

**Abstract** In this study, the gas permeability coefficient of concrete structures in a nuclear power plant was evaluated by measuring the concrete permeation flow rate according to the construction joint type and pressure conditions. The pressure conditions for evaluating the concrete gas permeability characteristics were 0 to 300 psi, a total of 7 levels, and test specimen thicknesses of 30 mm and 50 mm. The average permeation flow rates at 300 psi for the OPC and FA20 specimens were 0.42 L/min and 0.59 L/min, showing similar air permeability performance. The permeation flow rate of the FA20-CJ(s) test specimen manufactured without any additional treatment at the joint was over 1 L/min, which was 1.7 to 2.4 times higher than that of the fully cast test specimen. The permeation flow rate of the FA20-CJ(r) test specimen with surface treatment applied to the construction joint was 60% lower compared to the FA20-CJ(s) test specimen. The most influential factor on the air permeability performance of sound concrete was the thickness of the test specimen, and in cases where there were construction joints, the method of processing the joints was significantly affected.

**Keywords** : Nuclear Power Plant, Concrete, Flow Rate, Permeability Coefficient, Construction Joint

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00143120)

\*Corresponding Author : Eun-A Seo(Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology)

email: sea0524@kict.re.kr

Received September 26, 2023

Revised October 31, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

## 1. 서론

원자력 발전소의 격납건물은 원자로와 원자로 냉각재 계통 등으로 구성되며, 원전 가동에 따라 발생하는 방사선을 차폐하기 위한 대표적인 재료로 콘크리트가 사용되고 있다[1]. 원자력 발전소에서는 중성자와 감마선으로 대표되는 방사선을 차폐하기 위해 콘크리트와 함께 철, 납 등의 재료를 주로 사용하고 있다. 방사선 차폐성능은 차폐재료의 밀도에 가장 큰 영향을 받으며, 차폐재료의 밀도가 높을수록 차폐성이 향상되는 특성이 있다[2]. 원전 콘크리트 구조물은 방사성 기체의 외부 누설을 방지하기 위한 누설 저항성이 필수로 확보되어야 한다. 원전 격납건물은 내부 벽면에 두께 6 mm의 탄소강 재질의 금속 라이너 플레이트가 부착되어 있는 고밀도의 철근 콘크리트 구조로 기밀성능을 확보하였다[3].

원전 콘크리트 구조물 라이너 플레이트의 부식과 사고로 인한 파열 등의 문제가 발생했을 경우에는 콘크리트의 누설저항성능의 확보가 필요하다[4]. 시공시 다짐 불량량을 비롯한 콘크리트 품질 저하는 콘크리트의 불균질성, 재료분리 등의 문제를 야기시키고 방사성 기체 누설에 영향을 미친다. 또한 콘크리트 구조물의 시공 시에 발생하는 시공이음의 관리가 미흡할 경우 사고 시 방사성 기체 누설 문제가 유발될 수 있다. 또한 시공이음에 따른 투과성 증가는 콘크리트의 탄산화와 염소이온 확산 촉진 및 철근 부식 유발 등의 내구성 저하 현상을 발생시킬 수 있다. 따라서 원전 콘크리트는 내부의 공극발생여부와 시공이음에 따른 누설저항성의 검토가 필수적으로 요구된다[4].

국내·외의 기존연구에서는 콘크리트의 밀도와 흡수율 및 시공이음 방식에 따른 역학적 특성과 콘크리트 투수 및 투기특성 평가를 수행하였다[5-7]. 대부분의 기존 연구에서 수행된 투기 실험은 비교적 낮은 압력에서의 투기 특성을 평가하였다. 하지만 원자력 발전소의 경우에는 사고시의 내압을 견딜 수 있도록 설계되어 있으며, 노형에 따른 설계내압과 극한내압을 고려하여 압력증가에 따른 누설저항성능 검토가 필요하다[8]. 실제 원전 구조물의 사고 발생 시에는 금속 라이너 플레이트와 구조물 내부의 철근 등으로 외부로의 기체 누설을 방지 할 수 있다. 하지만 이 연구에서는 라이너 플레이트와 내부 철근을 배제하고 압력증가에 따른 콘크리트 자체의 투기특성을 평가하였으며, 콘크리트 투기성에 대한 시공이음의 영향도를 분석하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 배합설계

원전 콘크리트의 기체 누설량 평가를 위하여 기존 연구 분석을 통하여 2종의 원전 콘크리트 배합을 선정하였다[9-11]. 콘크리트 배합은 1종 보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)만을 사용하는 OPC 배합과 플라이애시(fly ash, FA)를 총 결합재 중량 대비 20% 치환한 FA20 배합을 사용하였다. 사용된 OPC의 밀도와 비표면적은 3.13 g/cm<sup>3</sup>과 3,542 cm<sup>2</sup>/g이며, FA의 밀도와 비표면적은 2.25 g/cm<sup>3</sup>과 3,232 cm<sup>2</sup>/g이다. OPC와 FA의 구성성분비는 Table 1에 나타내었다. 원전 콘크리트를 모사한 시험체의 투기특성 평가를 위하여 4종의 시험체를 제작하였으며, 배합설계는 Table 2에 나타내었다. OPC 시험체와 FA20 시험체는 일체 타설하여 제작하였다.

시공이음 모사시험체는 시공이음부에서의 면의 거칠기를 달리하여 두 종류의 시험체를 제작하였다. 1차 타설 시험체 제작 후 시공이음면의 조도를 달리하기 위한 후가공 처리를 실시하였다. FA20-CJ(s) 시험체는 절반을 타설 후 1일간 양생한 뒤 추가적인 전처리 없이 흠손으로 마무리하여 부드러운 표면(smooth surface, s)으로 작업한 후 2차 타설하여 제작하였다. FA20-CJ(r) 시험체는 분할 타설면을 쇠 솔로 긁어내어 거친 표면(rough surface, r)을 만들고 물을 뿌린 후에 2차 타설을 진행하였다. 실험변수에 따라 압축강도 측정용 시험체와 투기특성평가용 시험체를 제작하였다.

Table 1. Chemical composition of binder

Binder	Chemical composition (%)						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig.loss
OPC	62.4	21.5	5.2	3.2	2.7	3.0	0.79
FA	2.7	60.0	25.76	5.0	1.4	0.5	3.0

Table 2. Mix proportion

Mix	W/B	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
		Water	OPC	FA	Fine aggregate	Coarse aggregate
OPC	0.4	158	400	-	718	1,006
FA20		157	316	79	710	995
FA20-CJ(s)						
FA20-CJ(r)						

항온항습실은 온도  $20 \pm 2$  °C, 상대습도 60 RH%로 설정하여 모든 시험체를 양생하였다. 압축강도 측정용 시험체는  $\varnothing 100 \times 200$  mm 크기로 일체타설 시험체 2종과 분할타설 시험체 2종을 제작하였으며, 재령 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다(Fig. 1).

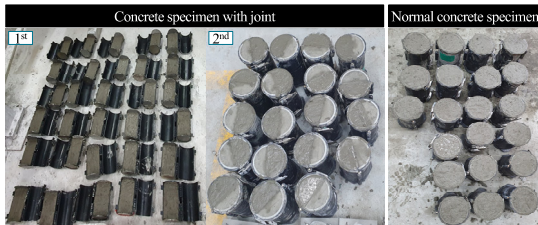


Fig. 1. Manufacturing method of compressive strength test specimen

## 2.2 투기특성 평가용 시험체 제작

원전 콘크리트를 모사한 콘크리트 시험체의 투기특성 평가를 위한 실험변수는 배합설계와 시공이음여부 및 투기성 평가용 시험체의 두께로 설정하였다. 투기성 평가용 시험체는 직경 60 mm의 원주형 시험체이며, 시험체의 두께는 30, 50 mm로 제작하였다. 콘크리트 투기특성 평가 시에는 콘크리트를 투과하는 유량의 측정이 필요한데 기체의 가압 시 가압용기 내부와 맞닿는 콘크리트 시험체 표면의 미세한 공극들로 인해 누설이 일어나 콘크리트의 투기특성 평가가 어렵다. 이에 따라 콘크리트 시험체와 용기 계면에서의 기체 누설을 방지하기 위하여 콘크리트 시험체의 측면에 약 5 mm 두께로 에폭시를 타설하였다. 또한 콘크리트 시험체와 에폭시 타설부분의 일체화 거동을 위하여 콘크리트 시험체는 측면에 요철이 있는 형태로 제작하였다.

투기성 평가용 콘크리트 시험체의 제작 절차는 Fig. 2에 나타내었다. 콘크리트 시험체는 전용 몰드에 타설한 후 재령 1일에 탈형하여 7일까지 항온항습실에 양생하였다. 탈형한 콘크리트 시험체는 에폭시 타설용 몰드에 넣어 시험체 측면부에 에폭시를 타설하여 제작하였다.

에폭시 타설 시 콘크리트 바닥면의 에폭시 침투를 방지하기 위하여 콘크리트 바닥면에 방수 테이프를 부착하였으며, 에폭시 경화 후에 방수테이프를 제거하였다. 에폭시는 약 3일간 경화한 후 시험체를 탈형하였으며, 배합일로부터 재령 28일까지 항온항습실에서 양생하여 재령 28일의 콘크리트 투기특성을 평가하였다.

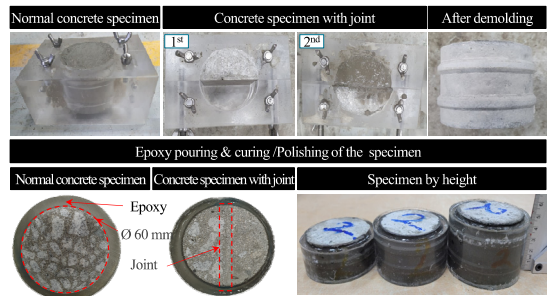


Fig. 2. Method of manufacturing specimens for permeability

## 2.3 투기특성 평가 방법

투기성 평가 방법의 국내 기준이 마련되었지 않아서 측정장비는 본 연구에서 자체 개발하였다. 장비의 Inlet에는 압력계를 설치하여 가압조건에 맞는 압력을 셋팅한 후 밸브를 열어 질소 가스를 투과시켜 실험을 진행하였으며, Outlet에는 기체 유량측정센서를 설치하여 콘크리트 시험체를 투과한 기체의 유량을 데이터로거를 이용하여 실시간으로 측정 및 수집하였다(Fig. 3). 이 연구의 투기특성 평가에는 질소가스를 사용하였으며, 0~300 psi의 압력 범위에서 콘크리트 시험체의 기체 투과 유량을 측정하였다.

가압조건은 총 7단계로 10, 20, 30, 60, 120, 180, 300 psi의 압력을 각각의 구간에서 약 3분 유지하고 다음 단계의 가압을 진행하였다(Fig. 4). 또한 투기성 평가 실험 시 Outlet에 설치된 유량센서의 측정한계로 인하여 센서의 최대 측정한계치인 1 L/min 이상의 유량이 측정될 경우에는 실험을 종료하였다. 실험변수에 따른 각 시험체의 투기특성평가 시 투과되는 유량과 투기계수는 동일한 3개의 시험체를 측정하여 평균값을 사용하였다.

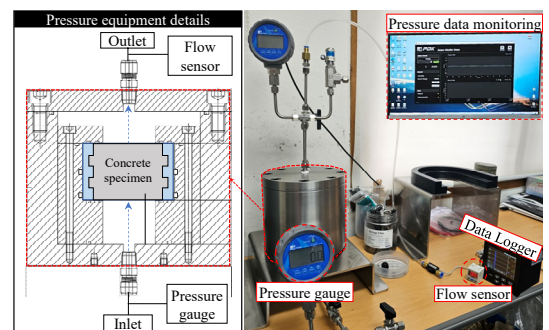


Fig. 3. Pressure equipment and sensor details

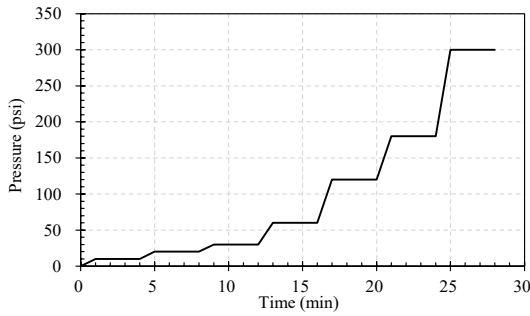


Fig. 4. Pressurized condition

### 2.4 투기계수 산정방법

이 연구에서는 콘크리트의 투기계수( $K$ ) 산정을 위하여 Hagen-Poiseuille relationship 식을 사용하였다. 투기계수 산정을 위한 최대 압력은 300 psi로 설정하였으며 기준에 미치지 못한 시험체의 경우, 최대 유량 압력에 해당하는 압력을 기준으로 산출하였다.

$$K = \frac{2QP_{atm}L\mu}{A(P^2 - P_{atm}^2)} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 콘크리트를 투과한 유량( $m^3/sec$ )이며, 각 시험체별로 유량센서로 측정된 유량을 사용하였다.  $A$ 는 기체가 투과되는 콘크리트 시험체의 단면적( $m^2$ )으로  $0.0016 m^2$ 을 사용하였다.  $L$ 은 기체가 투과되는 시험체의 두께이며, 실험변수에 따라 30, 40, 50 mm를 사용하였다.  $\mu$ 는 가스의 점도 계수( $N \cdot s/m^2$ )로 질소의 점도 계수인  $1.75 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2$ 을 적용하였다.  $P$ 는 적용한 절대 압력(Pa)로 Inlet의 압력계에서 측정된 값을 사용하였으며,  $P_{atm}$ 은 대기압력인  $4.10 \times 10^{10} Pa$ 을 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도

투기특성에 대한 압축강도 영향을 검토하기 위하여 재령 28일과 56일에 압축강도를 측정하였다(Fig. 5). 원전 콘크리트 배합 2종의 설계강도는 재령 91일에서 37.9 MPa(5,500 psi)로 설계되었다. 재령 28일 압축강도 측정결과, 실험변수와 관계없이 모든 시험체의 재령 28일 압축강도는 설계강도와 비교하여 1.3배 이상의 압축강도 성능을 나타내었다.

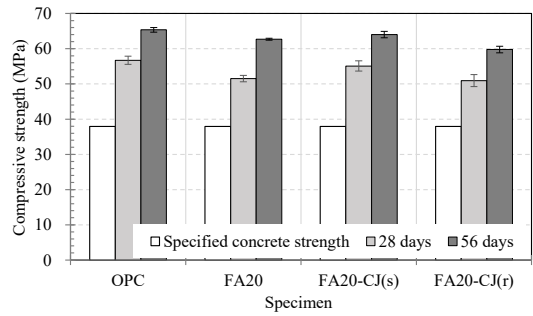


Fig. 5. Compressive strength based on permeability characteristics

OPC 시험체는 FA20 시험체와 비교하여 재령 28일과 56일의 압축강도가 각각 1.1배와 1.04배 높았지만, 재령이 증가함에 따라 압축강도의 차이가 줄어드는 경향을 나타내었다. FA20 시리즈 시험체들은 동일한 콘크리트 배합에 대하여 시험체 제작 방식에 따라 3종의 시험체를 제작하였다. FA20 시험체는 일체 타설로 제작하였으며, FA20-CJ(s) 시험체는 1차 타설면의 가공없이 2차 타설을 하여 제작하였다.

반면, FA20-CJ(r) 시험체는 1차 타설면을 가공한 후 2차 타설을 진행하여 제작하였다. 시공이음이 적용된 시험체의 압축강도는 일체타설 시험체와 비교하여 유사하게 나타났으며, 시공이음에 따른 압축강도 영향을 미미하였다. 일반적으로 분할타설 콘크리트는 1차 타설 콘크리트와 2차 타설 콘크리트의 부착력 확보여부와 건조 수축 등의 차이로 인한 균열 발생과 같은 문제가 발생할 수 있으며 이는 압축강도 저하를 야기할 수 있다[12,13]. 하지만 이 연구의 시공이음 시험체는 1차 타설과 2차 타설의 간격이 24시간으로 비교적 짧은 시간 안에 수행되어 시공이음의 영향이 낮아진 것으로 판단된다. 또한 1차 타설면의 가공방법에 따른 시공이음 시험체의 압축강도의 차이는 미미하였으며, 모든 재령에서 일체타설과 유사한 강도특성을 나타내었다.

### 3.2 콘크리트의 기체투기 유량 분석

이 연구에서는 콘크리트의 투기특성을 평가하기 위하여 10~300 psi의 범위에서 총 7단계의 압력조건에서 콘크리트 시험체를 투과하는 질소가스의 유량을 실시간으로 측정하였으며, 시험체 두께에 따라 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

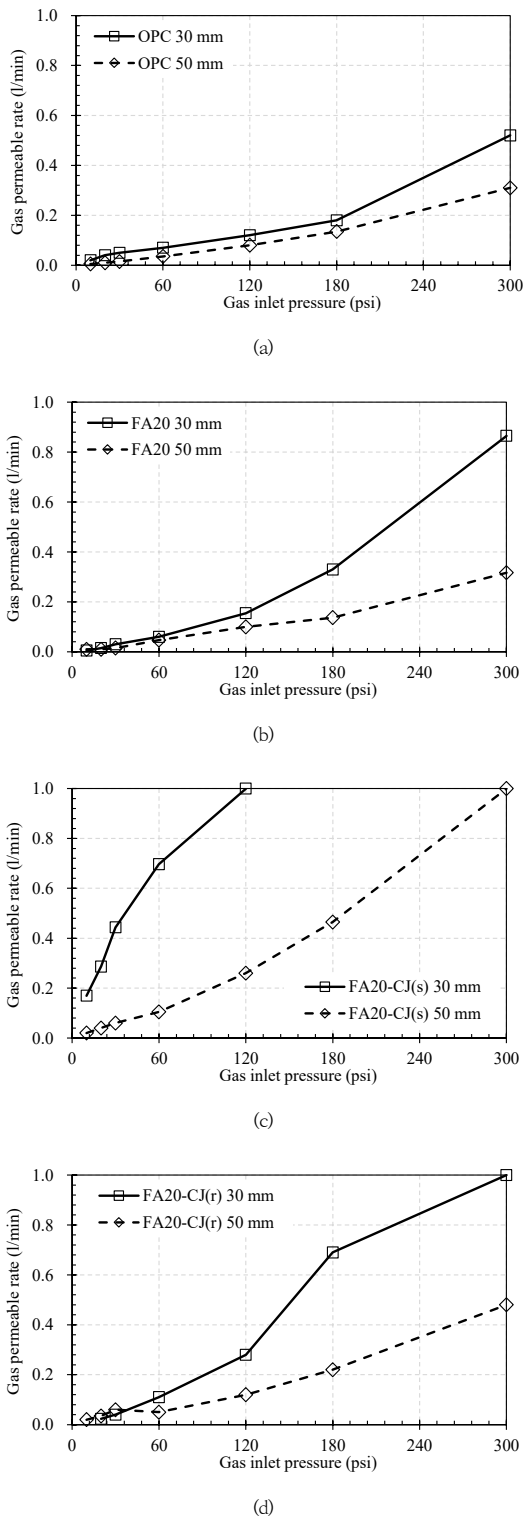


Fig. 6. Gas permeable rate by gas inlet pressure (a) OPC (b) FA20 (c) FA20-Cj(s) (d) FA20-Cj(r)

OPC 시험체는 시험체 두께 30 mm, 50 mm 두 케이스 모두에서 180 psi까지는 압력이 증가함에 따라 투과되는 유량이 선형적으로 증가하였으며 그 경향은 유사하게 나타났다. OPC 배합의 두께 30 mm 시험체는 180 psi 압력에서의 유량은 0.18 L/min 이었지만, 압력이 300 psi일때 투과 유량은 0.52 L/min으로 약 3배 증가하였다. OPC 배합의 두께 50 mm 시험체는 300 psi 일때의 투과 유량이 0.31 L/min으로 상대적으로 투과성능이 낮았으며, 시험체 두께가 30 mm인 경우 대비 두께가 50 mm 일때의 유량은 전 압력구간에서 평균적으로 약 53% 낮게 나타났다.

FA 시험체의 경우, 두께 50 mm 시험체의 최대 압력에서 투기유량은 0.32 L/min으로 동일한 두께의 OPC 시험체와 유사한 유량을 나타내었다. 하지만 두께 30 mm의 FA 시험체는 60 psi 이하에서의 유량은 OPC 시험체와 유사한 경향을 나타내었으나, 압력이 120 psi 이상에서 기체투기 유량이 증가하여 300 psi 에서는 OPC 시험체 유량인 0.52 L/min 대비 1.7배 높은 0.87 L/min으로 측정되었다. FA 시험체의 유량이 OPC와 비교해 상대적으로 높게 나타난 이유는 상대적으로 낮은 밀도로 인한 것으로 유추할 수 있다.

분할타설면의 전처리없이 제작된 FA20-CJ(s) 시험체의 경우, 두께 30 mm 시험체는 120 psi의 압력에서 유량센서의 측정 한계인 1 L/min 이상의 투기유량이 측정되었다. 두께 50 mm 시험체의 투기 유량은 30 mm 시험체 대비 26% 이하의 수준으로 측정되었으나 최대 압력에서의 투기유량은 약 1 L/min으로 상대적으로 높은 투기 특성을 나타내었다.

반면, 시험체의 분할타설면을 가공하여 제작한 FA20-CJ(r) 시험체는 FA20-CJ(s) 시험체와 달리 최대 압력에서 1 L/min 이하의 유량이 측정되어 투기 저항성이 높았다. 또한 FA20-CJ(r) 시험체는 60 psi 이하의 투기유량은 일체로 제작한 FA20 시험체와 유사하였으며, 120 psi 이상에서의 투기유량은 1.2~1.7배 높게 측정되었다. 두께 50 mm의 FA20-CJ(r) 시험체는 동일한 두께의 FA20 시험체와 비교하여 다소 높은 투기유량이 측정되었지만 전 압력구간에서 유사한 투기특성을 나타내었다.

FA20-CJ(s) 시험체의 투기량이 FA20-CJ(r) 시험체와 비교하여 현저히 높게 나타난 것은 FA20-CJ(s) 시험체에서 신-구 콘크리트의 타설계면의 부착성능이 충분히 발휘되지 않았기 때문에 시공이음부를 따라 기체 투기가 촉진된 것으로 판단된다. FA20-CJ(r) 시험체는 1

차 타설면을 거칠게 가공하고 1차 타설 콘크리트의 2차 타설 콘크리트의 배합수의 흡수를 방지하기 위하여 타설면에 물을 뿌린 상태에서 2차 타설을 하였기 때문에 일체타설 콘크리트와 유사한 계면의 부착성능을 확보할 수 있었다.

따라서 압축강도 측면에서는 시공이음 방식에 따른 압축강도 성능의 영향도는 미미하였으나, 투기성능 측면에서는 시공이음 방식에 따라 현저한 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 시험체의 두께가 높을수록 투기 특성에 대한 시공이음의 영향도가 낮았다. 결과적으로 시공이음 방식으로 콘크리트를 제작 시 1차 타설면의 적합한 면처리 후 2차타설을 진행할 경우에는 일체로 제작한 시험체와 비교하여 유사한 투기성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 투기계수 분석

원전 콘크리트 모사 시험체의 투기계수를 식 (1)을 이용하여 산정하여 Fig. 7에 나타내었다. 압력 조건에 따른 콘크리트 시험체의 투기계수( $K$ )를 산정한 결과, 모든 시험체는 시공이음 여부와 관계없이 120 psi 이상의 압력 조건에서 투기계수가 수렴하는 경향을 나타내었다. 따라서 각 시험체의 투기계수는 투기계수가 수렴하는 120 psi 이상의 범위의 투기계수의 평균값으로 산정하였으며, Fig. 8에 시험체의 두께에 따라 구분하여 나타내었다. 모든 시험체의 투기계수는 배합과 관계없이 시험체의 두께가 높아짐에 따라 반비례하여 낮아지는 경향을 나타내었다.

두께 30 mm, 50 mm OPC 시험체의 평균 투기계수는 모두  $0.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 동일했다 (Table 3). Fig. 8에서 볼 수 있듯이, FA20 시험체에서 두께 30 mm의 투기계수는  $0.71 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 이었으며, 두께 50 mm의 투기계수는  $0.56 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 산정되어 두께 30 mm 시험체 대비 1.3배 높았다. FA20-CJ(s) 시험체의 경우, 시험체의 두께가 30 mm일때의 투기계수는  $4.51 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 산정되어 동일한 두께의 OPC 시험체와 비교하여 약 10배 이상의 투기계수가 나타났다. 두께가 50 mm인 FA20-CJ(s) 시험체는 투기계수가  $1.82 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 산정되어 동일한 두께의 시험체 중에서 가장 높은 투기계수를 나타내었다.

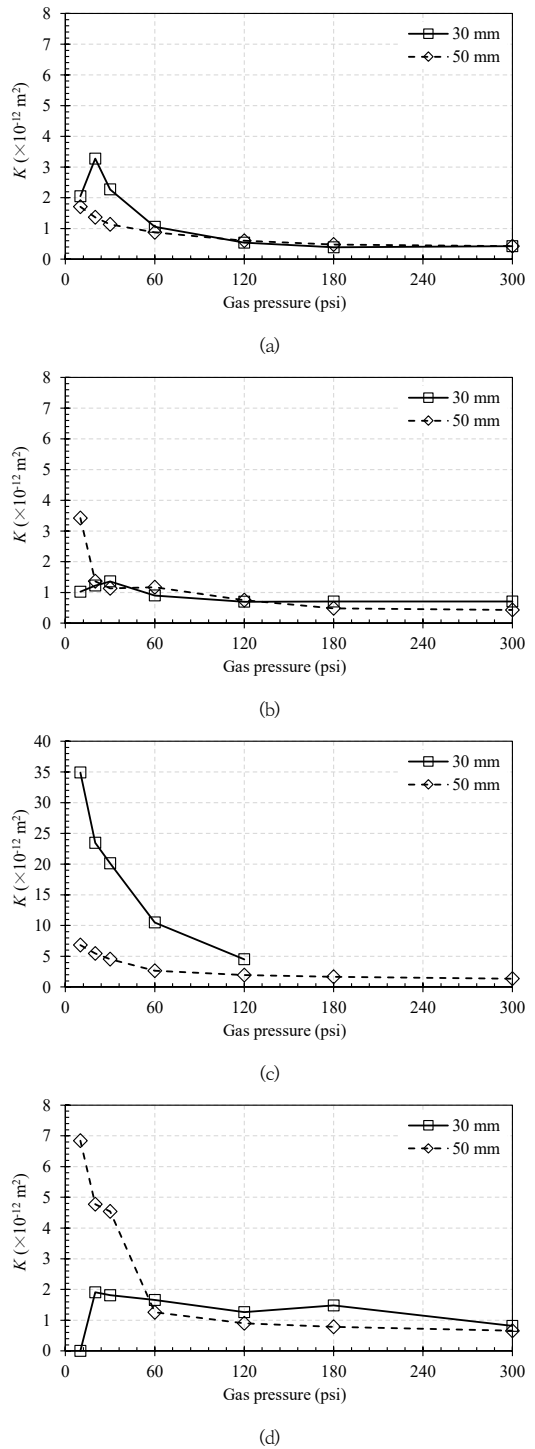


Fig. 7. Coefficient of concrete permeability (a) OPC (b) FA20 (c) FA20-Cj(s) (d) FA20-Cj(c)

Table 3. Coefficient of concrete permeability by specimen thickness

Unit ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )	Specimen thickness (mm)	
	30 mm	50 mm
OPC	0.45	0.45
FA20	0.71	0.56
FA20-CJ(s)	4.51	1.81
FA20-CJ(r)	1.19	0.78

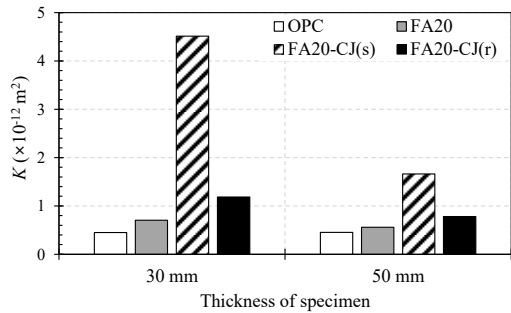


Fig. 8. Coefficient of concrete permeability by specimen thickness

FA20-CJ(r) 시험체의 평균 투기계수는  $0.98 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 이었으며, 시험체 두께가 증가함에 따라 투기계수가 낮아졌지만 FA20-CJ(s) 시험체와 다르게 시험체 두께에 따른 투기계수 영향도가 비교적 낮게 나타났다. 결과적으로 가압조건 하에서 콘크리트 시험체의 투기계수는 시험체의 두께에 가장 큰 영향을 받았으며, 시공이음부의 처리 방법에 따라 투기계수가 현저히 영향을 받았다. 이에 따라 시공이음부의 처리 방법에 따라 일체타설 콘크리트와 유사한 누설저항성능 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 원전 콘크리트 구조물의 경우, 콘크리트 이외에 철근과 텐돈 및 라이너플레이트 등의 재료로 구성되어 있지만, 콘크리트 재료 자체만의 누설 저항성능의 향상을 통하여 사고 발생 시 방사성 기체의 누설에 대한 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 원전 콘크리트 구조물에서 차폐재료로 사용되고 있는 콘크리트 배합설계를 사용하여 시공이음의 여부와 이음방식에 따라 시험체를 제작하였으며, 각 시험체는 0~300 psi의 압력조건에서의 기체 투기성능을 평가하였다. 특히, 이 연구에서는 콘크리트 구조물의 기체 투과성을 분석하기 위해 콘크리트 투기유량 측정

을 통한 투기계수를 평가하여 그 결과를 비교 분석하였다.

OPC와 FA20 시험체의 최대 압력 300 psi에서의 평균 투과 유량은 0.42 L/min과 0.59 L/min으로 유사한 투기성능을 나타내었다. FA20 배합 중 이음부에서 별도의 처리없이 제작한 FA20-CJ(s)의 시험체의 누설량은 1 L/min 이상으로 일체타설 시험체와 비교하여 1.7~2.4 배 높았다. 반면, FA20 배합 중 시공이음부의 면처리를 적용한 FA20-CJ(r) 시험체의 투기 유량은 FA20-CJ(s) 시험체 대비 60% 수준으로 낮게 측정되었다. 특히, FA20-CJ(r)의 두께 50 mm 시험체는 동일한 두께의 일체타설로 제작한 FA20 시험체와 유사한 투기 유량을 나타내었다.

OPC와 FA20 시험체의 평균 투기계수는  $0.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 과  $0.63 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 이었으며, FA20-CJ(r) 시험체의 평균 투기계수는  $0.98 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 유사하였다. 하지만 FA20-CJ(s) 시험체의 평균 투기계수는  $3.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 으로 동일한 배합의 일체타설 시험체 대비 약 4배 높게 산정되었다. 이음부 유무에 따른 콘크리트의 강도 차이가 크지않은 이유는 동일한 배합을 이용하여 동일한 면적을 갖기 때문에 강도차이는 없었기 때문으로 해석된다. 반면, 시공이음부에서의 기체투과가 가능한 공간이 존재하여 투기성에서는 큰 차이가 보이는 것으로 사료된다.

원전 콘크리트를 모사한 시험체의 투기특성 평가결과, 건전한 콘크리트의 투기성능에 대한 가장 큰 영향요인은 시험체의 두께였으며, 결합재의 변동에 의한 영향은 시험체 두께가 증가되면서 점차 작아지는 것으로 예측할 수 있다. 또한 시공이음부가 있는 경우에는 이음부 처리 방법에 현저한 영향을 받았다. 하지만 콘크리트 투기성능에 대한 시공이음부의 처리방법의 상세한 영향도를 분석하기 위해서는 이음부 계면의 이미지 분석과 공극량 분석 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] J. S. Lee, J. Y. Min, J. H. Lee, "Manufacturing Technology of Low-activation Cement Binder Considering Decommissioning", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.28, No.5, pp.21-26, Sep. 2016.
- [2] J. Y. Min, B. N. Lee, J. S. Lee, J. H. Lee, "Neutron Shielding Performance of Mortar Containing Synthetic High Polymers and Boron Carbide," *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol.28, no.2. Korea Concrete Institute, pp.197-204, Apr. 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.2.197>

- [3] J. S. Lee, W. B. Kim, D. R. Kwak, "Development of Inspection Technique for Filling or Unfilling of Containment Liner Plate Backside Concrete in Nuclear Power Plant," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, vol.16, no.1, pp.37-41, Jun. 2020.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.1.037>
- [4] S. T. Yi, "Effect of Construction Joint on Leakage Resistance of Gas in Reinforced Concrete Pressure Vessels," *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, vol.21, no.2, pp.87-94, Mar. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.2.087>
- [5] C. Zhijun, L. Wenpei, F. Pengxian, and Z. Ning, "Experimental Study on the Impermeability of Concrete Construction Joints with Different Geometric Shapes," *The Open Civil Engineering Journal*, vol.7, no.1. Bentham Science Publishers Ltd., pp. 109-115, Aug. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.2174/1874149520130708005>
- [6] S. W. Yoo, S. J. Kwon, "Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS," *Construction and Building Materials*, vol.115. Elsevier BV, pp.247-255, Jul-2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.010>
- [7] J. N. Park, S. W. Nam, L. H. Kim, I. H. Yeo, "Air-tightness Evaluation of Tube Structures for Super-speed Tube Railway Systems: I. Analytical Modeling and Material Test," *Journal of the Korean society for railway*, vol.14, no.2. Korean Society for Railway, pp.143-150, Apr. 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2011.14.2.143>
- [8] I. H. Moon, T. Y. Kim, T. A. Jeong, "Design and Durability of Concrete Structure in Nuclear Power Plant," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, vol.22, no.6, pp.44-49, Nov. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2010.22.6.44>
- [9] Y. S. Yoon, S. J. Kwon, "Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient and Surface Chloride Contents of FA concrete Exposed Splash zone Considering Crack Width," *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, vol.23, no.6, pp.18-25, Nov. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.6.18>
- [10] H. J. Lee, E. A. Seo, "Experimental Study for Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of Concrete Mix for Nuclear Power Plant Water Distribution Structures," *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, vol.26, no.5, pp.112-118, Oct. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2022.26.5.112>
- [11] J. O. Ukpata, O. R. Ogirigbo, L. Black, "Resistance of Concretes to External Chlorides in the Presence and Absence of Sulphates: A Review," *Applied Sciences*, vol.13, no.1. MDPI AG, p.182, Dec. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app13010182>
- [12] H. O. Jang, B. S. Kim, H. S. Lee., "An Experimental Study on the Bonding Shear Performance Evaluation of the UHPC According to an Bonding Interface Treatment of the Construction Joint," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, vol.16, no.3, pp.237-245, Jun. 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2016.16.3.237>
- [13] B. D. Cho, S. H. Kim, S. J. Jeon, "Assessment of Bond Characteristics between New and Old Concrete in Various Mixtures and Joint Conditions," *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol.26, no.4. Korea Concrete Institute, pp.507-515, Aug. 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.507>

이 호 재(Ho-Jae Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원
- 2020년 8월 : 연세대학교 건설환경학과 (공학박사)

<관심분야>

3D 프린팅, 원전구조물, 콘크리트 재활용

김 지 현(Ji-Hyun Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 부경대학교 건축공학과 건축공학전공 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 2017년 8월 : 부경대학교 공학연구원 산업과학기술연구소 전임연구원
- 2017년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 융복합인프라기술연구소 연구교수

<관심분야>

CO<sub>2</sub> 저장, 원전구조물 및 폐기물, 나노소재 (그래핀, 탄소 나노튜브)



최 유 진(Yu-Jin Choi)

[준회원]



- 2022년 8월 : 부경대학교 건축공학과 (공학사)
- 2024년 2월 : 부경대학교 건축·소방공학부 학·석사연계과정 재학중 (공학석사 졸업예정)

<관심분야>

원전구조물 및 폐기물, 재생시멘트

---

서 은 아(Eun-A Seo)

[정회원]



- 2015년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원
- 2023년 2월 : 경기대학교 건축공학과 (공학박사)

<관심분야>

3D 프린팅, 원전구조물, 콘크리트 재료