

# 콘크리트의 누설성에 미치는 영향 요인에 관한 실험적 연구

## Experimental Study for the Factors Influenced on the Permeability of Concrete

김진근\* 이상태\*\* 양은익\*\*\* 김민욱\*\*\*\* 이성규\*\*\*\*\* 최강룡\*\*\*\*\*

Kim, Jin-Keun, Yi, Seong-Tae, Yang, Eun-Ik, Kim, Min-Wook, Lee, Sung-Kyu, Choi, Kang-Ryong

### ABSTRACT

In the nuclear power plant, steel or polymer liner plates are adopted to prohibit inner concrete surface from contacting with gas or liquid materials. If there is an accident, the plate will be damaged, and concrete shall have final responsibility to safety requirements.

In this paper, an experimental research was carried out to investigate the effects of construction joint and wet and loading condition on the permeability of concrete.

The test results showed that leakage rate is decreased much more at the following cases than the others : (a) wet condition, (b) without a construction joint case, and (c) case subjected to external loads. It was noted that more reinforcement is required at the latter case.

### 1. 서론

콘크리트는 원자력발전소 및 각종 토목, 건축구조물에서 안전성과 내구성을 갖는 구조재료로 활용되는 물론, 방사선 차폐재로서도 이용되고 있다.

원자력발전소의 각종 구조물에서 요구되는 콘크리트의 품질은 일반 콘크리트 구조물에서의 품질과 기본적으로 큰 차이가 없으나, 격납건물 등과 같은 주요 구조물은 안전성, 차폐성 및 누설 저항성 등이 특별히 요구되므로, 이러한 구조물에서 콘크리트는 강도가 높고 철근량이 많을 뿐만 아

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국전력기술(주) 토목구조기술처 책임기술원

\*\*\* 정회원, 한국해양연구소 선임연구원

\*\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

\*\*\*\*\* 한국원자력안전기술원 원자력안전심사부 실장

\*\*\*\*\* 한국원자력안전기술원 원자력안전심사부 책임연구원

니라 차폐, 누설 저항 성능이 우수해야 한다. 콘크리트의 누설 저항성은 구조물의 사용수명과 기능적 건전성(functional integrity)에 가장 중요한 요인으로서, 구조설계나 재료배합에 의해 결정되는 안전성과는 달리, 콘크리트 시공상의 정밀도와 숙련도, 시공 당시의 환경요인 및 사용환경 등에 의해서도 크게 달라질 수 있다.

한편, 기존 발전소에서는 그 내부의 콘크리트 면과 가스나 유체와 같은 부산물이 직접 접촉하는 것을 막기 위해 불 투수성의 철판이나 폴리머 라이닝(polymer inner lining)을 채택하고 있는데, 불시의 사고로 인하여 격납용기의 내부 라이닝이 손상된다면 콘크리트는 안전성 측면에서 최후의 보루가 되어야 하며 이 경우 콘크리트의 누설저항성에 의해 안전도가 결정되어야 한다.

본 연구의 목적은 이러한 라이닝이 손상되었을 때 내부의 부산물과 직접 접촉하게 되는 콘크리트 구조물의 대표적 손상부위인 공극, 균열 및 시공이음 중에서, 특히 시공이음의 유무와 가해진 압력 및 외력이 누설 저항에 미치는 영향을 파악하여 내압에 저항하거나 액체를 저장하는 구조물의 기능 유지에 대한 기술적 판단 자료를 구하고자 하는데 있다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

실험체 제작에 사용한 콘크리트는 기건 양생을 한  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  실린더의 재령 28일에서의 압축강도가  $290\text{kg/cm}^2$ 인 보통강도 콘크리트로서, 그 배합은 표 1과 같다. 실험체의 벽체에는 연직방향으로  $f_y = 4,000\text{kg/cm}^2$  이상인 D10의 이형철근을 각 공시체 당 8개씩 사용하였는데, 벽체와 플랜지 사이는 응력집중을 배제하기 위하여 이 연직 철근의 단에 갈고리를 추가하였다.

시멘트는 보통(Type 1) 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 강모래를 사용하였고, 굵은 골재는 최대크기 13mm의 쇄석을 사용하였다. 타설 시 작업성을 확보하기 위하여 고성능 감수제로서 super-20을 사용하였다.

표 1 콘크리트 배합표

물시멘트비 (%)	물	시멘트	모래	자갈	Ad' (%)	$f_c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )
	(kg/m <sup>3</sup> )					
60	199	331	726	1002	0.5	290

\* 고성능 AE 감수제(시멘트에 대한 중량비)

### 2.2 시험체 제작 및 상세

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80리터의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재 및 시멘트의 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 다음 물과 고성능 유동화재를 동시에 투입하여 3분간 비벼 공시체를 제작하였다. 모든 공시체는 재령 1일째에 탈형하였으며, 습윤포(wet burlap/towel)하에서 28일간 기건 양생을 한 후 실험을 수행하였다.

공시체는 시공이음이 없는 경우와 하반부가 먼저 타설되고 일정기간 양생시킨 후 하반부의 윗면을 치핑에 의해 거칠게 한 후 상반부를 타설하여 시공이음을 만드는 경우로 나뉘었다.

모든 공시체는 5cm의 벽체 두께를 갖는데 실제 발전소 격납건물에서 사용되는 벽체 두께인 120cm 보다는 실험시 제어 등의 문제로 인하여 작은 값을 사용하였다.

### 2.3 실험절차 및 측정방법

공시체의 윗면 및 아래 면에는 5cm 두께의 철판을 부착하였는데 공시체와 철판 사이에는 완전한 밀봉을 위하여 O-ring, 진공 그리스 그리고 공시체와 몰시멘트비가 같은 모르타르를 발랐다. 또한, 철판과 공시체의 연결을 위하여 볼트를 사용했는데, 이들 사이의 누설 가능성을 배제하기 위해 실리콘으로 추가 밀봉하였다. 그리고, 공시체의 벽체를 통해 누설된 가스가 대기 중으로 빠져나가는 것을 막기 위해 공시체의 측면을 고무판, 밴드 그리고 철판으로 둘러쌌는데 이들 사이에는 그리스로 밀봉을 했다.

가스가 주입되는 면에는 압력계를, 가스가 빠져나가는 쪽에는 유량측정계를 각각 설치하였다. 압력은 공시체 안쪽 공간에서 측정하며, 손상부위를 통한 누설량은 유량측정계에서 측정하도록 하는데, 압력계와 유량측정계는 용량이 상당히 크고 정밀도도 높은 것을 사용하였다. 가스로는 화재의 위험과 함유된 수분량을 최소화시키기 위해 고순도 질소를 사용하였다. 공시체의 단면적과 부속품의 배치는 그림 1에 나타나 있다.

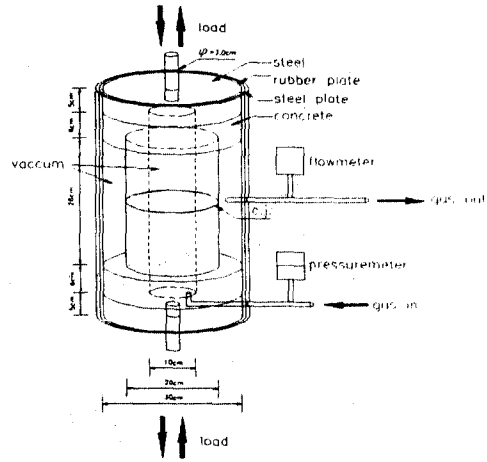


그림 1 공시체의 단면적과 부속품의 배치도

실험 순서로는 우선 공시체를 포화상태가 될 때까지 24시간 이상 수중에서 충분히 담그낸 후, 각종 부품을 설치하고 무재하 상태에서 압력을 가함과 동시에 압력의 저하 및 누설량을 측정한다. 다음 이 공시체를 기건 상태로 만들기 위해 10일 이상 공기중에서 충분히 건조시킨 후, 부품 설치 작업을 마치고 무재하 상태에서 압력을 가하면서 압력저하 및 누설량을 측정한다.

재하상태의 실험을 위해서는 공시체에 미세균열을 발생시키기 위하여 인장강도의 약 15%인 1.0ton의 인장력을 가한 후, 극한 압축력까지 단계적으로 압축하중을 증가시키며 누설량을 측정하였다. 여기서 가해진 압력은  $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었는데, 이는 이 압력에서도 실험결과를 얻는데 문제가 없었기 때문이다.

각 경우, 측정은 압력을 가한 시점과 이로부터 10, 20, 30, 40, 50초, 1분, 1분 30초, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10분 후에 이루어 졌다.

## 3. 실험 결과의 분석 및 고찰

### 3.1 무재하 상태의 경우

하중을 가하지 않는 경우에 대한 습윤상태와 기건상태의 실험결과를 요약하면 다음과 같다. 그림 2에서 (a)와 (b)는 시공이음이 없으며 습윤상태에서의 압력차와 유량의 누적치이고, (c)와 (d)도 같은 경우 기건상태에서의 압력차와 유량의 누적치를 각각 나타내고 있다.

습윤상태에서는 초기에 기공이 습기로 닫혀 있는 관계로  $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서는 측정 가능한 정도의 압력저하 및 유량의 누설이 발생하지 않았으나,  $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 부터는 이에 대한 자료를 구할 수 있었다.

3kg/cm<sup>2</sup>, 특히 4kg/cm<sup>2</sup>의 경우에는 2kg/cm<sup>2</sup>일 때 이미 습기의 상당량이 빠져나간 관계로 통로가 더 많이 확보되어 압력저하가 매우 빨랐으며 유량의 누적치도 매우 큰 값을 가졌다. 기건상태에 있어서는 1kg/cm<sup>2</sup>일 때부터 이들 값을 구할 수 있었는데 통로의 막힘이 없는 관계로 습윤상태의 경우 보다 압력이 빨리 안정화되고 유량의 누적치가 큼을 그림 2의 (c), (d)에서 알 수 있다.

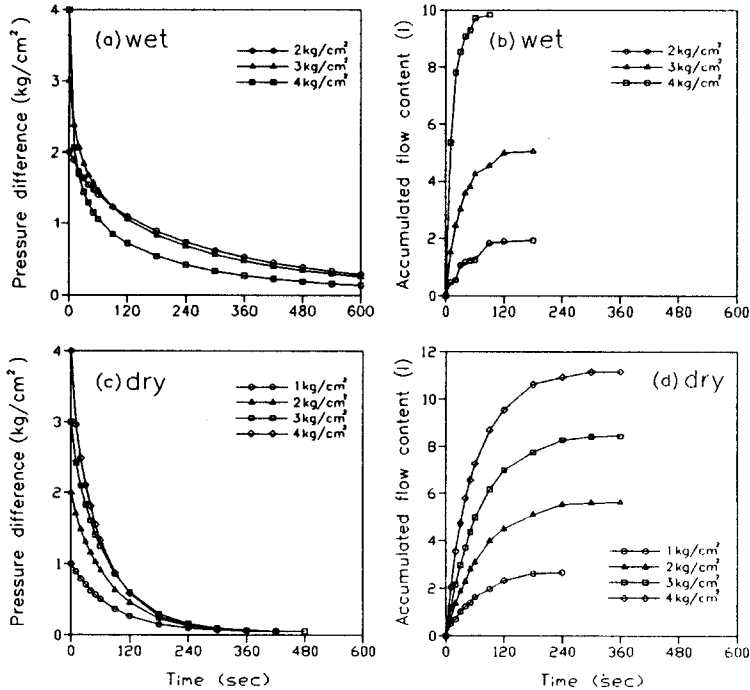


그림 2 시공이음이 없는 경우의 실험결과(무재하 상태)

그림 3의 (a)와 (b)는 시공이음이 있는 공시체의 습윤상태에서의 압력차와 유량의 누적치를 나타내고 있는데, 위의 그림 2와 비교해 보면 시공이음이 없는 경우 보다 압력저하가 더 빠르며 유량의 누적치도 더 큼을 알 수 있다. 그림 3(a)에서 2kg/cm<sup>2</sup>일 때의 값은 시간이 지나도 1kg/cm<sup>2</sup> 때의 값 밑으로 떨어지지 않는데, 이는 그림 3(b)에서 알 수 있는 바와 같이 1kg/cm<sup>2</sup>일 때 습기가 많이 빠져나가지 않았으므로 누설에 저항을 받아 초기상태와 같은 조건을 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 3kg/cm<sup>2</sup>일 때는 2kg/cm<sup>2</sup>에서 습기가 많이 빠져 나갔기 때문에 그림 2(a)와 같은 경향을 나타내고 있다. 또한, 이 그림의 (c)와 (d)는 기건상태에서의 값들을 나타내고 있는데, 시공이음이 없는 경우와 비교해 보면 습윤상태의 경우보다 압력저하와 유량의 누적치에 있어서 조금 더 큰 값을 가짐은 사실이나 습윤상태의 경우 보다는 그 차이가 작음을 알 수 있다.

따라서, 콘크리트가 함유하고 있는 습기가 많은 경우에는 시공이음을 통한 가스의 누설량에 차이가 많아 이 조건을 정량화 할 필요가 있다. 그러나, 실험의 어려움과 실제 발전소 격납건물의 콘크리트 벽체가 항상 대기압에 노출되어 있는 점을 고려하면 대부분의 경우를 기건상태로 보아도 무방하며, 위 양자의 경우, 누설량의 차가 크지 않으므로 시공이음의 영향이 작다고 판단해도 무방하다고 사료된다.

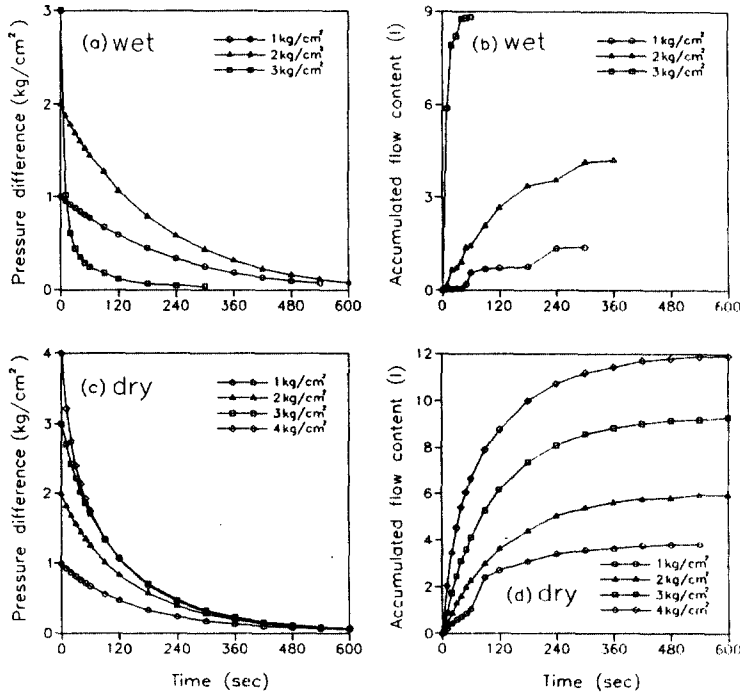


그림 3 시공이음이 있는 경우의 실험결과(무재하 상태)

### 3.2 재하 상태의 경우

재하 상태의 실험은, 실제로 발전소에 가상의 사고가 발생했을 때 콘크리트 벽체에 걸릴 수 있는 인장하중 및 이 이후에 걸릴 압축하중 효과를 고려하기 위해 수행되었다. 그림 4에서 (a)는 시공이음이 없는 경우에 하중을 가해 얻은 실험결과를 나타내고 있는데 파괴시의 하중은 90.9ton이었다.

하중을 재하한 초기 단계에는 누설량의 정도가 시간에 비례하여 증가하나 몇 분 후부터 이 양의 증가가 조금씩 줄어들어 거의 일정하게 되는데 이는 상대적으로 큰 공극이나 이미 생성된 미세균열이 압축하중으로 인하여 닫히거나 압밀되기 때문인 것으로 사료된다. 극한강도의 약 30%의 응력수준부터는 누설량이 급격히 증가함을 알 수 있는데, 이는 이때부터 기존의 미세균열이 서로 연결되기 시작하여 더 큰 균열이 생성되기 때문이다.

그림 4의 (b)는 시공이음이 있는 경우에 대한 결과를 나타내고 있는데 파괴시의 하중은 100.5ton이었으며, 동 그림의 (a)와 비교해 보면 시공이음이라는 손상부위의 영향으로 누설이 더 많이 발생되어 (a)에서의 수평에 가까운 영역이 없으며 시간이 지남에 따라 누설량이 기하 급수적으로 더욱 급히 증가하고 그 양도 (a) 보다 많음을 알 수 있다.

따라서 재하 상태에는 시공이음의 유·무가 가스의 누설량에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 그러나 벽체의 두께로 사용된 5cm의 값으로부터 전체 누설경향을 평가하기엔 무리가 있지만 참고문헌 1)과 실제 발전소에서 사용되는 벽체 두께를 고려하면, 누설량이 벽체의 두께에 반비

레하므로 가스의 밀봉도는 지켜질 것으로 판단된다.

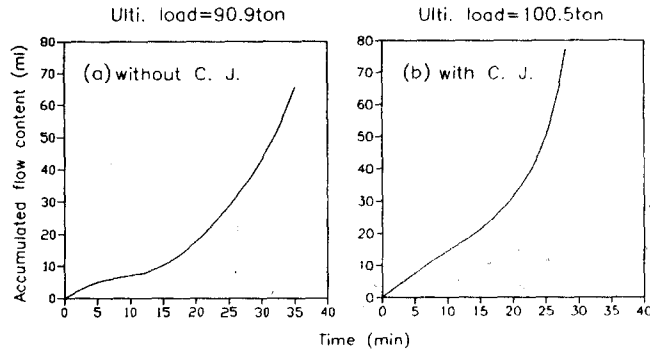


그림 4 재하 상태의 실험결과

#### 4. 결 론

콘크리트의 누설성에 미치는 영향인자에 대하여 본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 습윤·무재하상태의 초기에는 시공이음의 유·무에 관계없이 콘크리트 중에 포함된 기공이 배제되어 있어 가스의 누설량이 적어나 일단 이 기공이 열리고 나면 누설량의 증가가 급격히 발생한다. 습윤상태에서 시공이음이 있는 경우, 가스의 누설은 압력이  $1\text{kg/cm}^2$ 부터 시작되었으나 시공이음이 없는 경우는  $2\text{kg/cm}^2$ 부터 시작되었다. 따라서 공시체가 함유하고 있는 습기의 양에 대한 정량화가 필요하다.
- 2) 기건·무재하 상태에는 시공이음의 유·무에 관계없이 콘크리트에 존재하는 가스의 통로가 일정하므로 누설량이 일정하게 증가함을 알 수 있다. 또한 시공이음이 있는 경우의 가스 누설량이 많아 보이나, 없는 경우와 그 차이가 크지 않다. 따라서 이 상태에 시공이음을 통한 누설량의 증가는 다른 요인에 비해 작음을 알 수 있다.
- 3) 시공이음이 없는 경우의 기건·재하상태 실험에서는 극한강도의 약 30%까지는 누설량이 증가하다가, 그 증가의 정도가 감소하여 거의 일정하게 된다. 그러나 이 이상의 압축하중이 가해지면 누설량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 시공이음이 있는 경우의 기건·재하상태 실험에서도 앞의 시공이음이 없는 경우와 유사한 결과를 얻었으나 수평에 가까운 영역이 없었으며 시간이 지남에 따라 누설량이 더욱 급속히 증가하고 그 양도 시공이음이 없는 경우 보다 많았다.
- 4) 재하 상태에는 시공이음의 유·무에 대한 고려가 있어야 하지만 참고문헌 1)에서 설명하는 바와 같이 누설량이 벽체의 두께에 반비례하므로 실제 발전소의 벽체 두께를 고려하면 가스의 밀봉에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) K. Okamoto, S. Hayakawa and R. Kamimura, "Experimental Study of Air Leakage from Cracks in Reinforced Concrete Walls", Nuclear Engineering and Design 156(1995) pp159-165.
- 2) T. Sugiyama, T. W. Bremner and T. A. Holm, "Effect of Gas Permeability in Concrete", J. of ACI Materials, V.93, No.5, Sep.-Oct., 1996, pp443-450.
- 3) S. H. Rizkalla, B. L. Lau and S. H. Simmonds, "Air Leakage Characteristics in Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol.110, No.5, May, 1984, pp1149-1162.