

철근콘크리트 압력용기에서 시공이음이 가스의 누설저항에 미치는 영향

이성태^{1*}

Effect of Construction Joint on Leakage Resistance of Gas in Reinforced Concrete Pressure Vessels

Seong-Tae Yi^{1*}

Abstract: In the nuclear power plant, the steel or polymer liner plates are adopted to prohibit the inner concrete surface from contacting with gas or liquid materials. If there is an accident, the plate may be damaged, and, in this case, concrete shall have the 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 conditions on the permeability of concrete. The test results showed that, under a construction joint in the wet condition, leakage of gas pressure has been started from 1 kg/cm^2 . However, when there are no construction joints, it is initiated from 2 kg/cm^2 . In addition, under the air dried and unloading condition, regardless of with or without the presence of the construction joint, since the gas passage that exist in concrete is constant, leakage has a constant tendency to increase. Finally, under the loading condition, as described in Reference 1, since leakage is inversely proportional to the thickness of the wall, and, considering the wall thickness of the actual plant, it is found that there will not be no problem in the sealing of the gas.

Keywords: Gas leakage resistance, Construction joint, Pressure vessel, Reinforced concrete

1. 서 론

콘크리트는 원자력발전소를 포함한 각종 토목·건축구조물에서 안전성과 내구성을 갖는 구조재료로 활용됨은 물론, 방사선 차폐재로도 이용되고 있다. 특히, 원자력발전소의 핵심 부위인 원자로를 비롯한 주증기 공급계통을 지지, 보호, 격리 및 차폐시키는 격납용기 등에는 프리스트레스 콘크리트로 만들어진 PCCV (prestressed concrete containment vessel)나 철근콘크리트로 만들어진 RCCV (reinforced concrete containment vessel)가 채택되어 사용되고 있다.

원자력발전소 내의 각종 구조물에서 요구되는 콘크리트의 품질은 일반 콘크리트 구조물에서의 그것과 기본적으로 큰 차이는 없으나, 격납건물 등과 같은 주요 구조물은 안전성, 차폐성 및 누설저항성 등이 특별히 요구되므로, 이러한 구조물에서 콘크리트의 강도는 높고 철근량이 많아야 할 뿐만 아니라 차폐와 누설저항에 대한 성능도 우수해야 한다.

콘크리트의 누설저항성은 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.

이들 시설물에서 철근콘크리트 벽체에는 건조수축, 지진력, 수화열 혹은 다른 요인들에 의해 균열이 발생할 가능성이 높는데, 특히 격납건물과 같은 원통형 부위에서의 누설저항성을 구명하는 일은 매우 중요한 일이다. 이 시설에서 누설저항성이 저하하면 유해한 물질이 밖으로 유출 및 발산될 뿐만 아니라 구조물이 가져야 하는 각종 기능 저하의 원인이 된다. 따라서 구조물의 실제거동을 정확하게 예측하기 위한 안정성 해석 시, 강도와 같은 역학적 특성뿐만 아니라 콘크리트 내부에 발생하는 공극과 균열, 배관관통부와 콘크리트의 접합부 및 시공이음(construction joint, CJ) 등에 의한 누설저항성도 검토해야 한다.

한편, 기존 원자력발전소의 격납건물에서는 그 내부의 가스나 유체와 같은 부산물이 외부로 누설되는 것을 막기 위해 격납건물 내부에 불투수성의 철판이나 폴리머 라이너판(polymer inner plate)을 설치하고 있는데, 불의의 사고로 인하여 내부 철판이나 라이닝이 손상된다면 콘크리트는 안전성 측면에서 최후의 보루가 되어야 하며 이러한 경우 콘크리트에는 누설저항에 대한 안전성이 보장되어 있어야 한다.

¹정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자

*Corresponding author: yist@inhac.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

그동안 원자력발전소와 같은 주요 구조물에 흔히 발생할 수 있는 누설저항의 문제점을 해결하고자 주로 액체나 가스의 누설에 대한 연구(Greimer and Ramm, 1995; Iriya et al., 1992; Mills, 1981; Okamoto et al., 1995; Rizkalla et al., 1984; Sugiyamer et al., 1996; Suzulei et al., 1991; Suzuki et al., 1987; Suzuki et al., 1989; Tiukler et al., 1985)가 국외에서 수행되어 왔다. 본 연구도 가스의 누설저항에 대한 연구이지만 실험체의 모양이 기존의 판형과는 다른 실제 발전소의 격납건물과 유사한 원통형 실험체에 대한 실험을 수행하여 이 분야에 대한 기초 연구자료를 후속 연구자들에게 제시하고자 한다. 즉, 본 연구의 목적은 라이닝이 손상되었을 때 내부의 부산물과 직접 접촉하게 되는 콘크리트 구조물의 대표적 손상부위인 공극, 균열 및 시공이음 중에서, 특히 시공이음의 유·무와 가해진 압력 및 외력이 누설저항에 미치는 영향을 파악하여 내압에 저항하거나 액체를 저장하는 원통형 구조물의 기능 유지에 대한 기술적 판단 자료를 제시하는데 있다.

2. 시공이음이 콘크리트의 누설저항에 미치는 영향 및 실험법

기 타설된 기존의 콘크리트 면과 새로 타설될 콘크리트의 접촉 부위에는 온도, 습도 등 환경적 변화 및 시공 시 수화작용에 의하여 응력이 발생하고 균열이 필연적으로 수반된다. 시공이음은 단단히 굳은 콘크리트에 새로운 콘크리트를 쳐서 잇기 위해 만든 이음매로 시공이음에는 그 방향에 따라 수평이음과 연직이음으로 구분되고 있다. 이 부위에는 연속성과 하중전달을 유지하기 위하여 하중전달 장치나 보강철근 등을 설치해야 하는데, 일반적으로 시공준비의 간격은 설계, 현장 타설의 작업과 장비의 능력에 따라 좌우된다.

거푸집의 제작과 같은 시작 단계에서부터 최종 시공단계까지 잘 관리된 시공이음은 기존의 콘크리트와 거의 같은 내구성을 보여준다. 그러나 시공이음이 완벽하지 못한 경우, 모세관 현상에 의해 누수가 생길 수 있다는 사실에 대해 많은 논란이 있어 왔으나 실제로 시공이음이 완벽한 경우에도 약간의 누설은 있다. BS8007의 5.4절에 따르면, 지수판은 시공이 잘된 시공이음에서 필요없지만 액체를 지탱하는 혹은 저장하는 구조에서는 꼭 필요하다. 그러나 시공이음을 통한 누수에서 가장 중요한 요인으로는 시공이음 작업을 직접 수행하는 작업자와 감독자의 기량을 들 수 있다.

일반적으로 콘크리트에 만들어진 시공이음의 경우, 이 결합 부위를 통한 침투성을 낮게 하기 위하여 레이턴스를 고압의 물로 씻어낸 후 모르타르를 이용하여 채우게 된다. 그러나

콘크리트의 누설저항에 시공이음이 미치는 영향을 다루는 연구자료는 현재까지도 거의 존재하지 않으므로 이 연구에서는 실제 발전소 격납건물의 외벽과 유사한 형태인 원통형 실험체를 만들어 시공이음을 주요변수로 한 실험적 연구를 수행하여 그 특성을 파악하고자 한다.

콘크리트의 투기성 실험에 대해 특별히 규정된 실험방법은 없으나 기존의 문헌들로부터 첫째 실험체에 일정한 압력을 가하여 콘크리트를 통해 공기를 투과하게 한 후 그 양을 측정하는 방법(정압법)과 둘째 실험체를 가압 혹은 감압하여 실험체 내의 압력변화를 측정하는 방법(변압법), 그리고 셋째 간이 투기시험법으로서 직접 가압실을 설치하는 방법, 감압법 그리고 천공구멍 내에 공기를 가압하는 방법들을 들 수 있다. 정압법은 투수시험의 out-put 방법과 동일하게 일정한 압력의 공기를 실험체에 작용시켜 가스의 흐름이 정상으로 된 후 유량을 측정하여 Darcy의 법칙으로 투기계수를 구하는 방법으로 이 방법은 비교적 투기성에 대한 해석이 쉽고 합리적인 방법으로 알려져 있다. 반면에 변압법은 실험체를 가압 혹은 감압함으로써 실험체 내부를 일정한 압력으로 유지시킨 후 압력변화와 경과시간을 측정함으로써 콘크리트의 투기성을 평가하는 방법이다. 이 연구에서는 정압법을 이용하여 누설저항에 대한 실험을 실시하였다.

3. 실험 개요

3.1 사용 재료

실험체의 제작에 사용한 콘크리트는 기건양생한 크기 $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체의 채령 28일에서의 목표 압축강도

Table 1 Concrete mixture proportion

W/C (%)	Unit mass(kg/m ³)					fck(MPa)
	W	C	S	G	Ad*(%)	
60	199	331	726	1002	0.5	30

* Superplasticizer(high-range water-reducing admixture), ratio of cement ratio

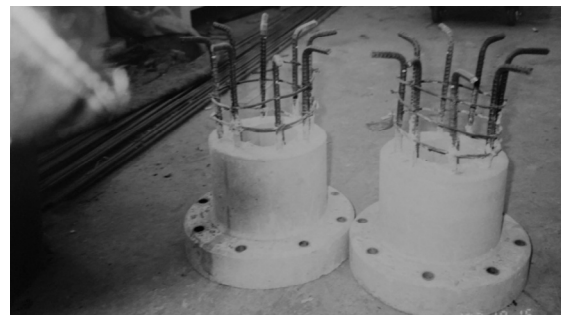


Photo 1 Hook reinforcements in the specimen

(f_{ck})가 30 MPa인 보통중량 콘크리트로서, 그 배합은 Table 1과 같다. 실험체의 벽체부분에는 연직방향으로 항복강도(f_y)가 400 MPa인 D10 이형철근을 8개 사용하였는데, 여기서 벽체와 플랜지 사이는 응력집중을 배제하기 위하여 이 부분에 설치되는 연직 철근의 단부에는 갈고리를 설치하였다(Photo 1 참조).

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC, Type 1)를 사용하였고, 잔골재는 강모래를, 그리고 굵은 골재는 최대크기(G_{max}) 13 mm의 쇄석을 사용하였다. 또한, 타설 시 작업성을 확보하기 위하여 고성능 AE감수제(super-20)를 사용하였다.

3.2 실험체 제작 및 상세

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80 L의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재 및 시멘트의 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 후 물과 고성능 AE감수제를 동시에 투입하여 3분간 추가로 비벼 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 재령 1일째에 탈형하였으며, 습윤포(wet burlap/towel)하에서 28일간 기건양생을 수행한 후 실험을 수행하였다. 습윤포하에서 기건양생을 실시한 이유는 100°C 이상의 건조기에서 일정시간 동안 무게변화가 일정량 이하가 될 때까지 건조시킨 후, 실험을 실시할 수도 있으나 건조장비의 용량 등에 문제가 있기 때문이다.

실험체는 시공이음이 없는 경우와 하반부가 먼저 타설되고 일정기간 양생시킨 후 하반부의 윗면을 치핑작업에 의해 굵은 골재가 보일 때까지 거칠게 한 후 상반부를 타설하여 시공이음을 만드는 경우로 나뉘었다.

모든 실험체의 벽체 두께는 50 mm로 제작하였는데 이는 실험시 제어 등과 같은 다양한 문제가 예상되어 실제 발전소 격납건물에서 일반적으로 사용되는 벽체 두께인 1200 mm 보

다는 작은 값을 사용하였다. 실험체의 크기와 각종 부속품의 배치는 Fig. 1에 나타나 있다.

실험체의 윗면과 아래 면에는 50 mm 두께의 원통형 철판을 부착하였는데 실험체와 철판 사이에는 완전한 밀봉을 위하여 O-ring을 설치한 후, 진공 그리스 그리고 실험체와 물시멘트비가 같은 모르타르를 발랐다. 또한, 철판과 실험체의 연결을 위하여 볼트를 사용했는데, 이들 사이의 누설 가능성을 배제하기 위해 사이 공간을 실리콘으로 추가 밀봉하였다. 실험체의 벽체를 통해 누설된 가스가 대기 중으로 빠져나가는 것을 막기 위해 실험체의 측면을 고무판, 밴드 그리고 철판의 순으로 둘러쌌는데 이들 사이의 틈은 진공그리스로 밀봉을 했다.

3.3 측정방법 및 실험절차

실험시 가스가 주입되는 면에는 압력계를, 가스가 빠져나가는 쪽에는 유량측정계를 각각 설치하였다. 압력은 실험체의 안쪽 공간에서 측정하며 시공이음을 통한 누설량은 밖에 설치된 유량측정계에서 측정하도록 하는데, 압력계와 유량측정계는 용량이 상당히 크고 정밀도가 높은 것을 사용하였다. 투기실험에 사용하는 가스로 탄산가스와 수분이 함유된 가스를 사용하는 경우, 수산화칼슘의 화합물인 탄산칼슘이 생성되어 콘크리트 중의 공극이 채워져서 실험결과에 오차가 발생하기 때문이다. 따라서 이 논문에서는 가스로 화재의 위험을 줄이고 함유된 수분량을 최소화시키기 위해 고순도의 질소를 사용하였다. 여기서, Photo 2는 실험체를 가압기에 설치하고 실험을 수행 중인 광경을 나타낸다.

실험 순서로는 먼저 실험체를 포화상태가 될 때까지 24시간 물속에 침수시킨 후, 실험결과와의 측정을 위한 각종 부품을 설치하고 무재하 상태에서 압력을 가함과 동시에 압력의 저하 및 누설량을 측정하였다. 다음으로 이 실험체를 기건상태

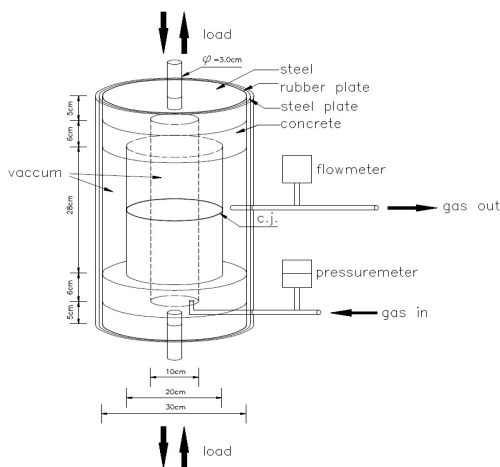


Fig. 1 Specimen's size and schematic drawing of various accessories

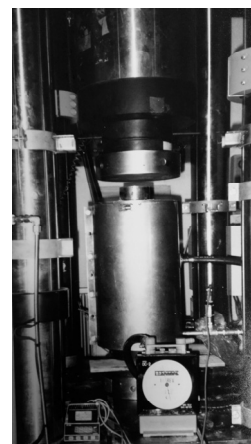


Photo 2 Test set-up under loading condition

로 만들기 위해 10일 이상 공기 중에서 충분히 건조시킨 후, 부품의 설치 작업을 마치고 무재하 상태에서부터 압력을 가하면서 압력저하 및 누설량을 측정하였다.

재하상태의 실험을 위해서는 실험체에 미세균열을 발생시키기 위하여 실험체 극한압축력의 약 15%인 10 kN의 인장력을 가한 후, 극한상태까지 단계적으로 압축하중을 증가시키며 누설량을 측정하였다. 여기서 가해진 압력은 1 kg/cm²이었는데, 이는 이 압력에서도 유효한 실험결과를 얻는데 문제가 없었기 때문이다.

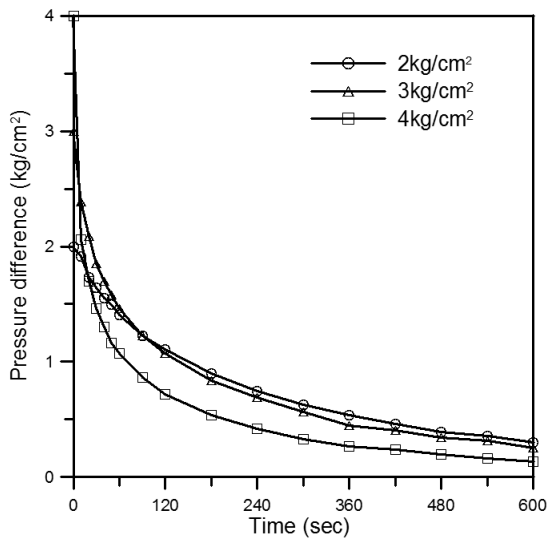
각 실험체의 압력저하와 누설량의 측정은 압력을 가한 시점과 이로부터 각각 10초, 20초, 30초, 40초, 50초, 1분, 1분30초, 2분, 3분, 4분, 5분, 6분, 7분, 8분, 9분 그리고 10분 후에 실시하였다.

4. 실험결과와 분석

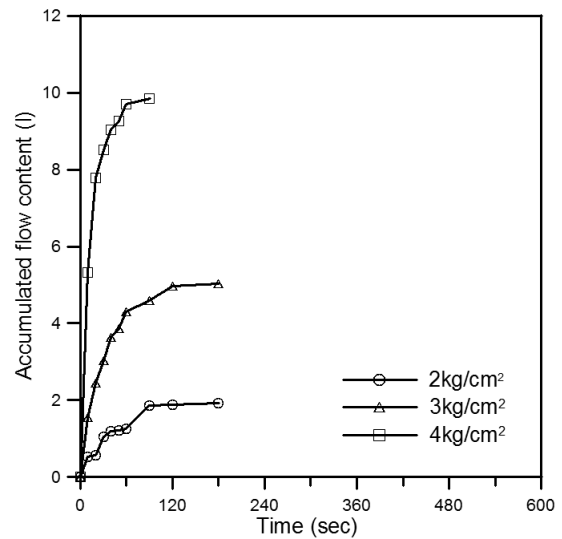
4.1 무재하상태의 경우

하중을 가하지 않는 그리고 시공이음이 없는 경우의 습윤상태와 기건상태에 대한 실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 중 습윤상태에서 압력의 변화와 누설된 유량의 누적량을 Fig. 2(a)와 (b)에, 기건상태는 Fig. 2(c)와 (d)에 나타내었다.

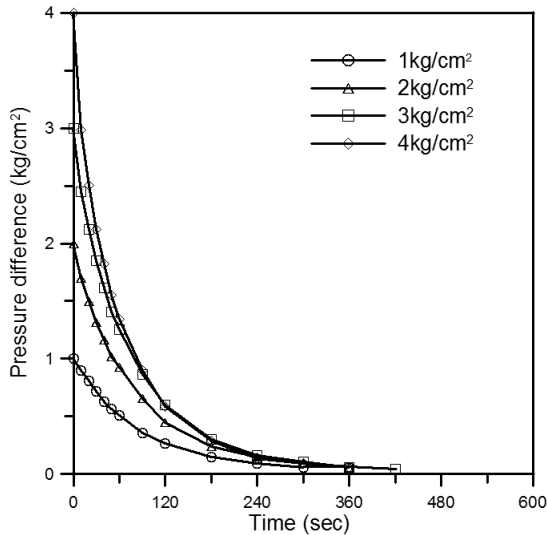
습윤상태에서는 초기에 기공이 습기로 닫혀 있어 1 kg/cm²에서는 측정 가능할 정도의 압력저하 및 유량의 누설이 발생하지 않았으나, 2 kg/cm²부터는 이에 대한 자료를 구할 수 있었다. 3 kg/cm²인 경우에도 유사한 경향을 보이지만 특히 4 kg/cm²의 경우에는 2 kg/cm²일 때 이미 습기의 상당량이 빠져나간 관계로 누설 통로가 더 많이 확보되어 압력저하가 더욱 빨랐으며 누설



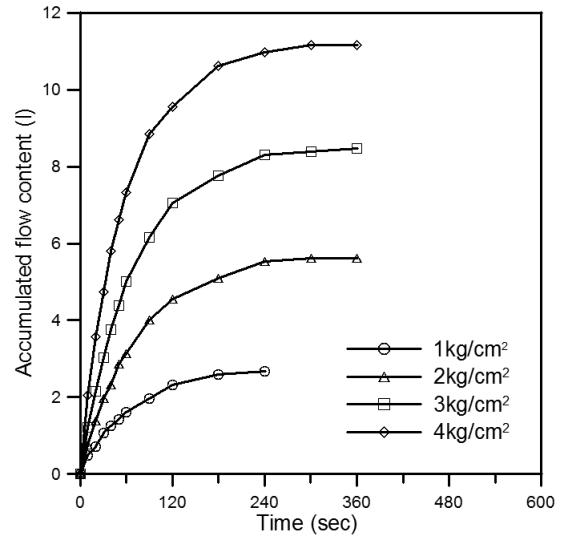
(a) Pressure difference in wet condition



(b) Accumulated flow content in wet condition



(c) Pressure difference in air dry condition



(d) Accumulated flow content in air dry condition

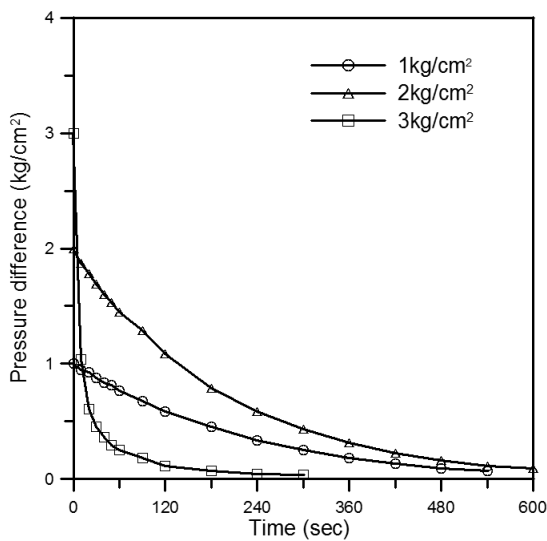
Fig. 2 Test results of the case having not a construction joint(no loading, 1 kg/cm²=102 kPa)

된 유량의 누적량도 상당히 큰 값을 나타냈다. 기건상태에 대해서는 1 kg/cm^2 일 때부터 이들 값을 구할 수 있었는데, 통로의 막힘이 없어 습윤상태보다 압력이 빨리 안정화되고 누설된 유량의 누적량이 더 크게 됨을 Fig. 2의 (c)와 (d)에서 알 수 있다.

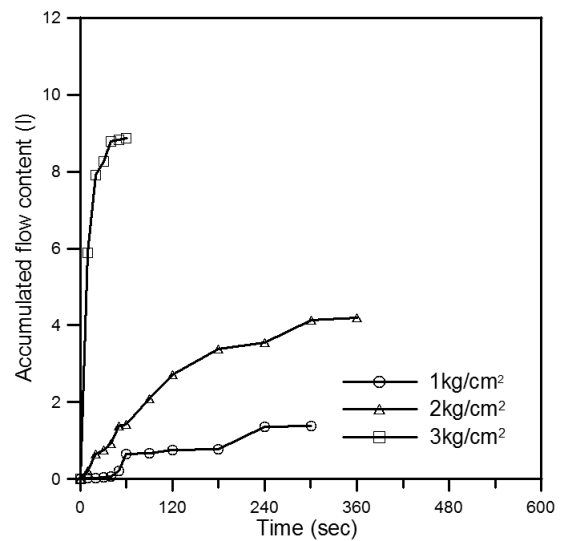
Fig. 3의 (a)와 (b)는 하중을 가하지 않는 경우와 시공이음이 있는 실험체의 습윤상태에서의 압력차와 누설된 유량의 누적량을 나타내고 있는데, Fig. 2의 (a) 및 (b)와 비교해 보면 시공이음이 없는 경우보다 압력저하가 더 빠르며 누설된 유량의 누적량도 더 큼을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 2 kg/cm^2 일 때의 값은 시간이 지나도 1 kg/cm^2 때의 값 밑으로 떨어지지 않는데, 이는 Fig. 3(b)에서 알 수 있는 바와 같이 1 kg/cm^2 일 때 습기가 많이 빠져나가지 않았으므로 누설에 저항을 받아 초기 상태와 같은 조건을 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 3

kg/cm^2 일 때는 2 kg/cm^2 에서 습기가 많이 빠져 나갔기 때문에 Fig. 2(a)와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한, Fig. 3의 (c)와 (d)는 기건상태에서의 값들을 나타내고 있는데, 시공이음이 없는 경우와 비교해 보면 습윤상태의 경우보다 압력저하와 누설된 유량의 누적량에 있어서 조금 더 큰 값을 가짐은 사실이나 습윤상태의 경우보다는 그 차이가 적음을 알 수 있다.

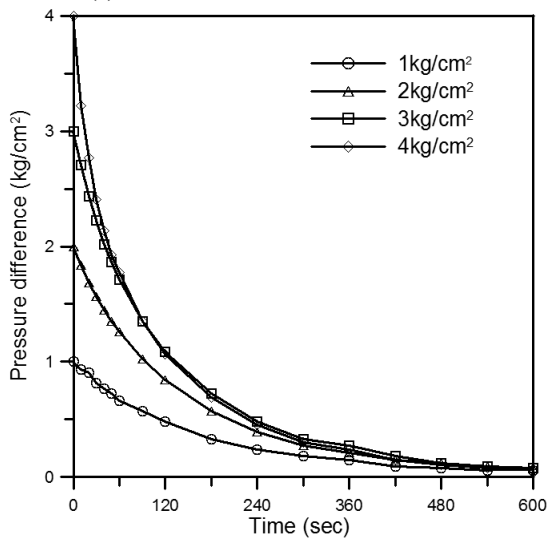
따라서, 콘크리트가 습기를 많이 함유하고 있는 경우에는 시공이음을 통한 가스의 누설량에 차이가 많아 습윤 조건에 대한 정량화가 필요하다. 그러나 실험의 어려움과 실제 발전소 격납건물의 콘크리트 벽체가 항상 대기에 노출되어 있는 점을 고려하면 대부분의 경우를 기건상태로 간주해도 무방하며, 기건상태에서는 시공이음의 유·무에 따른 누설량의 차가 크지 않으므로 시공이음의 영향이 적다고 판단된다.



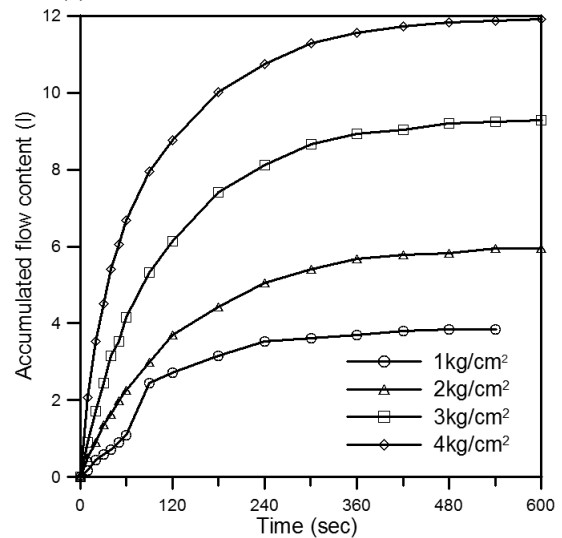
(a) Pressure difference in wet condition



(b) Accumulated flow content in wet condition

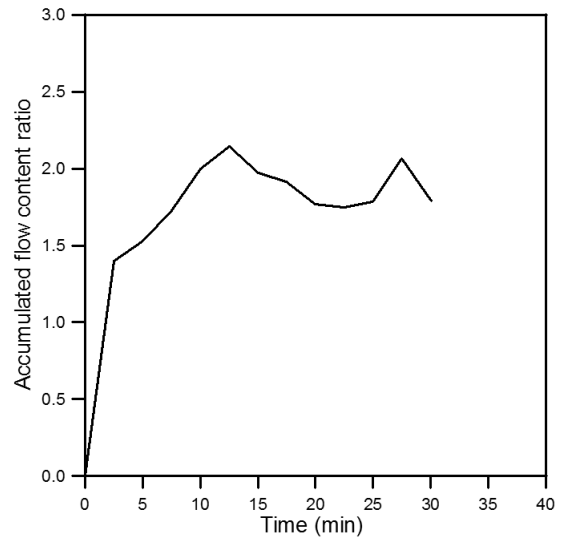
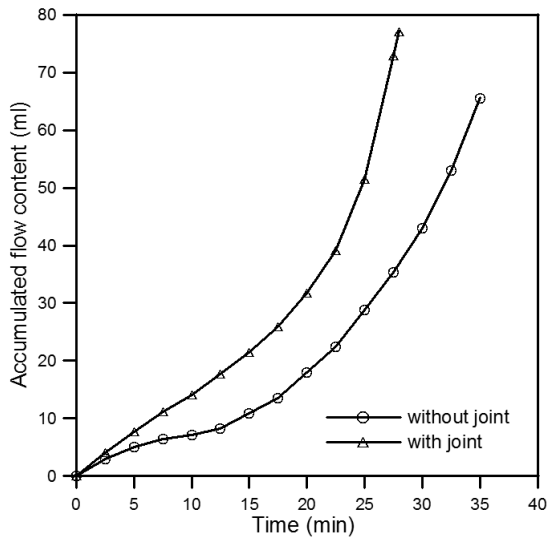


(c) Pressure difference in air dry condition



(d) Accumulated flow content in air dry condition

Fig. 3 Test results of the case having a construction joint(no loading, $1 \text{ kg/cm}^2=102 \text{ kPa}$)



(a) Without and with construction joint

(b) Accumulated flow content ratio

Fig. 4 Test results of loading cases

4.2 기건 및 재하상태의 경우

기건 및 재하상태의 실험은, 원자력발전소에 가상의 사고가 발생했을 때 콘크리트 벽체에 작용할 수 있는 인장하중 및 인장하중 후에 공시체가 원상태로 복귀하기 위해 발생할 압축하중 효과를 고려하기 위해 수행되었다. 시공이음 유·무에 따른 누설량을 Fig. 4(a)에 같이 나타내어 비교하였다. Fig. 4(a)에는 시공이음이 없는 경우에 하중을 가해 얻은 실험결과가 나타나 있는데 파괴시의 하중은 약 900 kN이었다. 하중을 가한 초기 단계에는 누설량의 정도가 시간에 비례하여 증가하나 몇 분 후부터 이 양의 증가가 조금씩 줄어들어 거의 일정하게 되었다. 이러한 이유는 상대적으로 큰 공극이나 이미 생성된 미세균열이 압축하중으로 인하여 닫히거나 압밀되기 때문인 것으로 판단된다. 그 후, 극한강도의 약 10% 응력수준부터는 누설량이 급격히 증가하였다. 이러한 현상은 이때부터 기존의 미세균열이 서로 연결되기 시작하여 더 큰 균열이 생성되기 때문으로 사료된다.

Fig. 4(a)는 시공이음이 있는 경우에 대한 결과를 나타낸다. 파괴시의 하중은 약 1000 kN이었으며, 시공이음이 없는 경우와 비교해 보면 시공이음이라는 손상부위의 영향으로 누설이 더 많이 발생되어 시공이음이 없는 경우에서와 같은 수평에 가까운 영역이 없으며 시간이 지남에 따라 누설량이 급격히 증가하고 그 양도 시공이음이 없는 경우보다 많음을 알 수 있다. 여기서 시공이음 부위를 잘 처리하면 시공이음이 없는 경우와 비교하여 인장강도 측면에서 큰 손실이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)는 시공이음이 없는 경우의 누설량에 대한 시공이음이 있는 경우의 누설량의 비를 나타낸다. 이 그림에서 알 수



Photo 3 Crack pattern after testing under air dry and loading condition

있듯이 누설량의 비는 초기에 급격히 차이가 증가하다가 약 12분 경과 이후 그 비는 1.7배에서 2.2배 정도로 비교적 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

따라서 재하상태에는 시공이음의 유·무가 가스의 누설량에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 그러나 이 연구에서 사용된 벽체의 두께인 50 mm의 값으로부터 전체 누설저항에 대한 경향을 평가하기에는 무리가 있지만 Okamoto et al.(1995)의 연구 내용과 실제 발전소에서 사용되는 벽체 두께(1200 mm)를 고려한다면, 누설량이 벽체의 두께에 반비례하므로 가스의 밀봉에 문제가 없을 것으로 판단된다. 한편, Photo 3은 기건 및 재하상태에 대한 실험 후, 대표 실험체에서 발생한 균열의 양상을 나타낸다.

5. 결 론

콘크리트의 누설저항성에 시공이음이 미치는 영향에 대하여 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 습윤 및 무재하상태의 초기에는 시공이음의 유·무에 관계없이 콘크리트 중에 포함된 기공이 폐쇄되어 있어 가스의 누설량이 적어나 일단 이 기공이 열리고 나면 누설량이 급격히 증가하였다. 습윤상태에서 시공이음이 있는 경우, 가스의 누설은 압력이 1 kg/cm^2 부터 시작되었으나 시공이음이 없는 경우는 2 kg/cm^2 부터 시작되었다. 따라서 실험체가 함유하고 있는 습기의 양에 대한 정량화가 필요하다.
- 2) 기건 및 무재하 상태에는 시공이음의 유·무에 관계없이 콘크리트에 존재하는 가스의 통로가 일정하므로 누설량이 일정한 경향을 가지고 증가함을 알 수 있다. 또한 시공이음이 있는 경우에 가스 누설량이 더 많아 보이나, 이음이 없는 경우와 그 차이가 크지 않다. 따라서 이 상태에서 시공이음을 통한 누설량의 증가는 다른 요인에 비해 적음을 알 수 있다.
- 3) 시공이음이 없는 경우의 기건 및 재하상태 실험에서는 극한 강도의 약 10%까지는 누설량이 증가하다가, 그 후 증가의 정도가 줄어들어 거의 일정하게 된다. 그러나 그 이상의 압축하중이 가해지면 누설량이 다시 급격히 증가함을 알 수 있다. 시공이음이 있는 경우의 기건 및 재하상태 실험에서도 앞의 시공이음이 없는 경우와 유사한 결과를 얻었으나 수평에 가까운 영역이 없었으며 시간이 지남에 따라 누설량이 더욱 급속히 증가하고 그 양도 시공이음이 없는 경우보다 많았다.
- 4) 기건 및 재하상태에는 시공이음의 유·무에 대한 고려가 있어야 하지만 Okamoto et al.(1995)의 연구에서 설명하는 바와 같이 누설량이 벽체의 두께에 반비례하고 실제 발전소에서 설치되는 벽체 두께(1200 mm)를 고려하면 가스의 밀봉에는 문제가 없을 것으로 판단된다.
- 5) 추후 수행될 콘크리트의 누설저항에 영향을 미치는 인자에 대한 연구에서는 더 많은 영향인자(물시멘트비, 공극과 균열의 특성 등)를 고려하여 다양한 실험을 실시하고 누설특성을 정확하게 예측할 수 있는 모델식을 제시하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

- British Standards Institution (1989), Code of Practice for Design of Concrete Structures for Retaining Aqueous Liquids, BS8007.
- Greiner, U., and Ramm, W. (1995), Air Leakage Characteristics in Cracked Concrete, *Nuclear Engineering and Design*, 156, 167-172.
- Iriya, K., Itoh, Y., Hosoda, M., Fujiwara, A., and Tsuji, Y. (1992), Experimental Study on the Water Permeability of a Reinforced Concrete Silo for Radioactive Waste Repository, *Nuclear Engineering and Design*, 138, 165-170.
- Mills, R. H. (1987), Gas and Water Permeability of Concrete for Reactor Buildings - Prototype Scale Specimens, A research report prepared for the atomic energy control board Ottawa, Canada.
- Okamoto, K., Hayakawa, S., and Kamimura, R. (1995), Experimental Study of Air Leakage from Cracks in Reinforced Concrete Walls, *Nuclear Engineering and Design*, 156, 159-165.
- Rizkalla, S. H., Lau, B. L., and Simmonds, S. H. (1984), Air Leakage Characteristics in Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 110(5), 1149-1162.
- Sugiyama, T., Bremner, T. W., and Holm, T. A. (1996), Effect of Gas Permeability in Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 443-450.
- Suzuki, T., Takiguchi, K., and Hotta, H. (1991), Leakage of Gas through Concrete Cracks, *Transactions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, H, 187-192.
- Suzuki, T., Takiguchi, K., Hotta, H., and Kojima, N. (1989), Experimental Study on the Leakage of Gas through Cracked concrete walls, *Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Q, 145-150.
- Suzuki, T., Takiguchi, K., and Ide, Y. (1987), Leakage of Gas through Cracked Concrete Walls, *Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, H, 181-186.
- Tinkler, J., Frate, R. D., and Rizkalla, S. H. (1985), The Prediction of Air Leakage Rate through Cracks in Pressurized Reinforced Concrete Vessels, *Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, J, 25-30.

Received : 12/08/2016

Revised : 12/20/2016

Accepted : 12/23/2016

요 지 : 원자력발전소에서 철판이나 폴리머 라이너 판은 가스나 액체가 격납건물 외부로 누설되지 않도록 하기 위하여 채택되었다. 만일 어떤 사고가 발생하여 이 판이 손상을 입는다면 콘크리트는 안전성 요구 측면에서 최후의 보루가 되어야 한다. 그 능력을 구명하기 위하여 본 논문에서는 시공이음의 유·무와 습윤조건 및 하중상태가 콘크리트의 누설저항성에 미치는 영향을 검토하기 위한 연구가 수행되었다. 실험결과로부터, 습윤상태에 시공이음이 있는 경우, 가스의 누설은 압력이 1 kg/cm^2 부터 시작되었으나 시공이음이 없는 경우는 2 kg/cm^2 부터 누설이 시작됨을 알 수 있었다. 또한, 기진 및 무재하 상태에는 시공이음의 유·무에 관계없이 콘크리트에 존재하는 가스의 통로가 일정하므로 누설량이 일정한 경향을 가지고 증가하였다. 최종적으로 재하상태에는 Okamoto et al.(1995)의 연구에서 설명하는 바와 같이 누설량이 벽체의 두께에 반비례하므로 실제 발전소에 설치되는 벽체 두께를 고려하면 시공이음에 있어도 가스의 밀봉에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 가스 누설저항, 시공이음, 압력용기, 철근콘크리트
