

# 콘크리트 진공튜브의 균열 발생에 따른 기밀성능 평가 실험

박주남\* · 박형준\*\*

Park, Joonam\*, Park, Hyeong-Jun\*\*

## An Experimental Test for Air-tightness Performance Evaluation of Cracked Concrete Vacuum Tube Structures

### ABSTRACT

Super-speed vacuum tube system, where the air resistance is minimized to obtain high speed of the vehicle, is considered to be a viable alternative transportation system. Air-tightness is one of the most important design requirements of the system, because the internal pressure of the system needs to be maintained significantly lower than the atmospheric pressure. This study performed an experimental test, where a series of concrete tube specimens were applied by external loads to induce cracks and the effective air-permeability of the cracked tube structures were measured. The test results indicates that the information on the length and the width of the load-induced cracks are not enough to anticipate the system air-tightness, whereas the load-induced displacement has higher correlation with the systems air-tightness. Based on these results, a direction of future research for effect of the load-induced cracks on the system air-tightness is suggested.

**Key words** : Super-Speed vacuum tube, Concrete tube, Crack, Air-tightness test

### 초 록

튜브 내부의 공기저항을 최소화해 운송체의 빠른 이동을 가능하게 해주는 초고속 진공튜브 시스템(Super-speed vacuum tube system)은 고효율을 친환경성으로 인해 차세대 운송시스템으로 주목받고 있다. 초고속 진공튜브 시스템은 외부에 비해 튜브 내부의 압력을 매우 낮게 유지할 필요가 있으므로 기밀성의 확보가 무엇보다 중요한 설계 요건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 균열의 발생이 진공튜브 구조물 내부의 압력 변화에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하기 위해 일련의 콘크리트 튜브 구조물에 대해 균열에 따른 내부 압력의 변화를 측정하는 실험을 실시하였다. 실험 결과 균열의 길이 또는 균열폭에 대한 정보만으로는 시스템의 기밀성에 영향을 주는 균열의 성질을 표현하기에 부족한 것으로 나타났으며, 반면에 발생된 구조물의 변위와 등가투기계수와의 관계는 상대적으로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험 결과를 바탕으로 설계 단계에서 시스템의 기밀성을 예측하기 위한 향후 연구방향을 제시하였다.

**검색어** : 초고속 진공튜브, 콘크리트 튜브, 균열, 기밀성 실험

## 1. 서론

기술과 경제의 발달로 인해 현대사회는 인류 역사상 그 어느 때 보다도 도시, 국가 간 교류가 활발히 이루어지고 있으며 그에 따라 교통 인프라 역시 더 빠르고 더 효율적인 운송을 위해 지속적인 발전을 하고 있다. 현재 교통 시스템의 대부분을 이루는 차량, 열차, 항공, 선박 역시 지난 수십 년에 걸쳐 속도, 효율성 및 신뢰성을 높이기 위한 기술발전을 해왔으나 시스템 별 속도 및 경제성의

\* 중신회원·교신저자·원광대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author·member·Wonkwang University·joonam.park@gmail.com)

\*\* 원광대학교 토목환경공학과 (전)석사과정 (Wonkwang University·phj2217@naver.com)

Received January 2, 2018/ revised March 4, 2018/ accepted March 15, 2018

한계, 교통 체증의 증가 등으로 인해 새로운 형식의 교통 시스템에 대한 필요성이 증가하고 있다. 최근 들어, 차량이 운행하는 튜브 구조 내부의 기압을 낮게 유지하여 공기저항을 최소화해 높은 속도를 효율적으로 구현할 수 있는 초고속 진공튜브(Super-speed vacuum tube) 시스템이 차세대 운송시스템으로 주목받고 있다 (Fig. 1). 진공튜브 운송 시스템은 내부 기압을 주변 기압보다 매우 낮게(예를 들어, 대기압의 10% 이하) 유지해야 하는 특성을 가지고 있기 때문에 외부 공기의 튜브 내부로의 유입을 차단할 수 있는 높은 기밀성(Air-tightness)이 요구된다. 시스템의 기밀성을 고려할 때 튜브 구조의 주재료로는 강재가 유리할 것으로 판단되지만 경제성, 시공성, 유지관리 등 종합적 측면을 고려했을 때 콘크리트의 적용성을 검토하는 것은 큰 의미가 있다고 할 수 있다 (Choi et al., 2016; Park et al., 2013). 콘크리트는 다공성 매체로서 어느 정도의 투기성을 가지고 있지만 콘크리트의 투기계수 측정에 관한 기존 연구(Okamoto et al., 1995; Park et al., 2011; So and Soh, 2003)에 따르면 강도가 높을수록 콘크리트의 기밀성은 높아지는 것으로 알려져 있다. 이는 고강도의 콘크리트일수록 함유된 공극이 적어지기 때문에 기밀성이 높아지는 것으로 이를 고려하여 콘크리트를 적절히 제작할 경우 진공펌프의 운용과 더불어 시스템의 기밀성을 효율적으로 유지할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 콘크리트 구조는 일반적으로 사용하중 하에서 균열이 발생하게 되는데 이러한 균열의 발생이 시스템의 기밀성에 큰 영향을 줄 수 있을 것이다. 따라서 내부 압력을 통제할 필요가 있는 진공튜브 시스템 특성 상 균열 발생에 의한 튜브 구조의 기밀성 변화 양상을 이해할 필요가 있으며 이를 통해 진공펌프 및 튜브 구조물의 합리적인 설계가 가능할 것이다. 본 연구에서는 균열의 발생이 진공튜브 구조물 내부의 압력 변화에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하기 위해 일련의 콘크리트 튜브 구조물에 대해 균열에 따른 내부 압력의 변화를 측정하는 실험을 실시하였다. 먼저 균열이 발생하지 않은

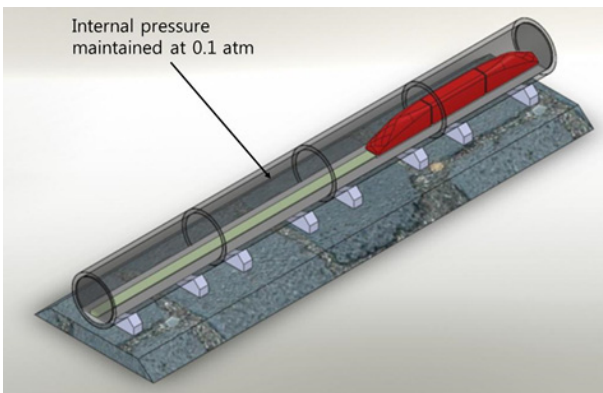


Fig. 1. Super-Speed Vacuum Tube Transportation System (Park et al., 2013)

튜브 구조물에 대해 기밀성 평가 실험을 수행하여 시스템의 등기투 기계수를 산정하였다. 그 후 구조물에 외부하중을 가해 단계별 균열을 발생시킨 후 기밀성 평가 실험을 수행해 발생한 균열의 정도에 따른 튜브 구조의 기밀성능 변화를 관찰하였다. 마지막으로 추후 시스템 설계 시 균열 요건 수립을 위한 자료로 쓰일 수 있도록, 균열이 발생한 튜브 구조에 대해 정량적으로 평가된 기밀성능과 그 때 발생한 균열과의 관계를 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 시험체는 Fig. 2와 같이 원형 단면을 가진 콘크리트 원형관 구조이다. 애초에는 7개의 시험체에 대해 실험을 수행할 예정이었으나, 이 중 3개의 시험체는 하중 가력 시 갑작스런 균열의 전파로 인해 투기성 실험이 불가하였기 때문에 나머지 4개 시험체에 대해서만 투기성 실험을 진행하였으며 각각 CIR-01, CIR-02, CIR-03, CIR-04로 표기하기로 한다. 시험체의 길이는 각 2.0m이며 시험체에 사용된 콘크리트의 제원 상 압축강도는 40MPa인데, 슈미트 해머를 이용한 측정 결과 압축강도의 평균치가 40.65MPa로 측정되었다.

먼저 경간장 1.8m의 단순보 형태로 거치된 튜브 시험체의 양단을 원형 강관으로 밀봉 후 진공펌프를 가동해 내부의 기압을 목표 초기기압, 즉 0.1기압으로 하강 시킨다. 그 후 펌프 가동을 중단하고 시간에 따른 튜브 내부의 압력 변화를 관찰하여 균열 전 기밀성능을 확인하였다(Fig. 3). 구조물의 기밀성능은 시스템의 등기투기계수를 산정함으로써 확인할 수 있다. Park et al.(2013)에 따르면 다공성 매체로 제작된 내부 압력을 낮춘 밀폐된 튜브 구조의 시간에 따른 내부 압력의 변화는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

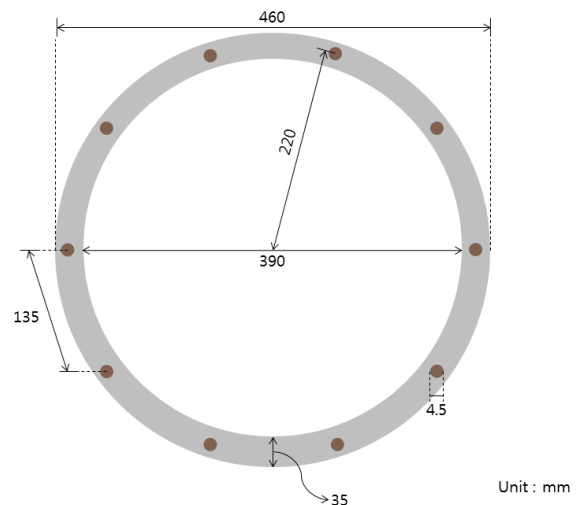


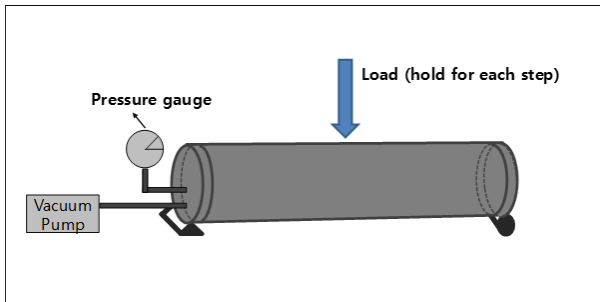
Fig. 2. Cross Section Dimensions of Tube Specimens

$$P_i(t) = P_o \cdot \frac{1 + C_1 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)}{1 - C_1 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)} \quad (1)$$

여기서,  $t$ =목표 내부압력 도달 후 펌프를 중단시킨 직후부터 측정된 시간(sec),  $V$ =구조물 내부의 체적( $m^3$ ),  $P_o$  = 외부 압력(Pressure outside the structure,  $N/m^2$ ),  $P_i(t)$ = 시간  $t$ 시의 내부 압력 (Pressure inside the structure,  $N/m^2$ ),  $k$ = 구조물 재료의 고유투기 계수( $m^2$ ),  $\mu$  = 유체의 점성도(Dynamic Viscosity,  $N \cdot s/m^2$ ),  $A$  = 유체 투과 면적(Area to Flow,  $m^2$ ),  $h$  = 유체 투과 두께(thickness of the structure, m),  $C_1$  = 튜브의 초기조건에 따라 결정되는 상수이다. 기밀성 실험을 통해 얻어진 시간에 따른 내부압력 변화의 그래프를 바탕으로 Eq. (1)을 적용하여 시스템의 등가 투기계수  $k$ 를 산정할 수 있다. 그 후 시험체에 균열 발생을 유도하기 위해



(a) Test Set-Up



(b) Schematic View

Fig. 3. Test Set-Up

Table 1. Definition of Crack Levels

Crack levels	Crack width ( $w_{ck}$ )
Level 1	Hair crack (assumed as 0.05mm)
Level 2	$0.05mm < w_{ck} \leq 0.1mm$
Level 3	$0.1mm < w_{ck} \leq 0.2mm$
Level 4	$0.2mm < w_{ck} \leq 0.5mm$
Level 5	$0.5mm < w_{ck}$

Fig. 3과 같이 보의 중앙에 집중하중을 가해 구조물에 일정량의 균열이 발생한 상태에서 내부 압력의 변화를 관찰한다. 이후 하중의 세기를 조금씩 늘려 가면서, 즉 균열의 전파를 조금씩 늘려 가면서 각 단계별로 기밀성능을 확인한다. 여기서 중요한 것은 균열의 측정인데, 중공 단면을 가진 튜브 구조의 특성 상 휨, 전단변형 이외에 단면의 일그러짐에 의해 구조물 표면 전반에 걸쳐 균열이 산재되기 때문에 균열의 발생 위치를 특정하기 힘들어 균열센서 설치가 현실적으로 적절하지 않다. 따라서 실제로 발생된 균열의 폭을 모두 정확히 재기에는 어려움이 있기에 본 연구에서는 발생된 균열의 관찰을 통해 균열 폭의 정도를 Table 1에서 보는 바와 같이 1) 실균열(0.05mm로 가정), 2) 0.05mm 초과 0.1mm 이하, 3) 0.1mm 초과 0.2mm 이하, 4) 0.2mm 초과 0.5mm 이하, 5) 0.5mm 초과 의 5단계로 나누어 분류하였다. 시험체에 가한 하중의 단계 별로 균열의 총 개수, 발생 길이, Table 1의 기준에 따른 균열폭을 측정 후 기밀성 실험을 통해 그에 해당하는 등가투기계수를 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 미가력 상태의 투기성 실험 결과

먼저 튜브 시험체에 하중을 가하지 않은 상태에서 진공펌프를 가동해 튜브 시험체 내부의 기압을 대기압의 10%, 즉 0.1atm까지 하강시킨 다음에 진공펌프와 연결된 밸브를 잠근 후 시간에 따른 튜브 내부 압력의 변화를 기록하였다. Fig. 4는 4개의 시험체에 대해 기록된 시간-내부압력 곡선을 나타내고 있는데, 각 시험체에 대한 실험 결과 곡선에 부합되도록 Eq. (1)을 적용해 산정된 등가투기계수를 이용하여 그런 이론적 곡선을 동시에 보여주고 있다. 각 시험체에 해당하는 등가투기계수를 산정해 본 결과  $2.3 \times 10^{-17} m^2$ 에서  $1.05 \times 10^{-15} m^2$ 까지 비교적 넓은 범위에 산재하는 것으로 나타났다. 이는 튜브 시험체가 동시에 같은 품질로 만들어진 것이 아니기 때문에 제작 및 양생 시의 여러 가지 조건에 의해 콘크리트 품질의 변화가 있었기 때문이라고 추정되며 또한 시험체의 이동, 운반 시 초기균열이 발생해 등가투기계수의 변동을 초래했을 가능성도 있다. 그리고 건조수축에 의한 균열 발생 가능성도 존재하며 또한 균열이 발생하지 않은 표면에서 공기 유입 소리가 감지된 경우도 있었던 것으로 볼 때 제작 시 콘크리트의 충분한 다짐이 되지 않았을 가능성도 있다고 판단된다.

#### 3.2 균열 발생 시험체의 투기성 실험 결과

균열 발생에 따른 기밀성능 평가 실험을 위해 Fig. 3과 같이 보 중앙부에 수직 집중하중을 가해 구조물에 균열을 발생하게 하였다. 집중하중을 점차 증가시키다가 눈에 띠일 만큼의 균열이

콘크리트 진공튜브의 균열 발생에 따른 기밀성능 평가 실험

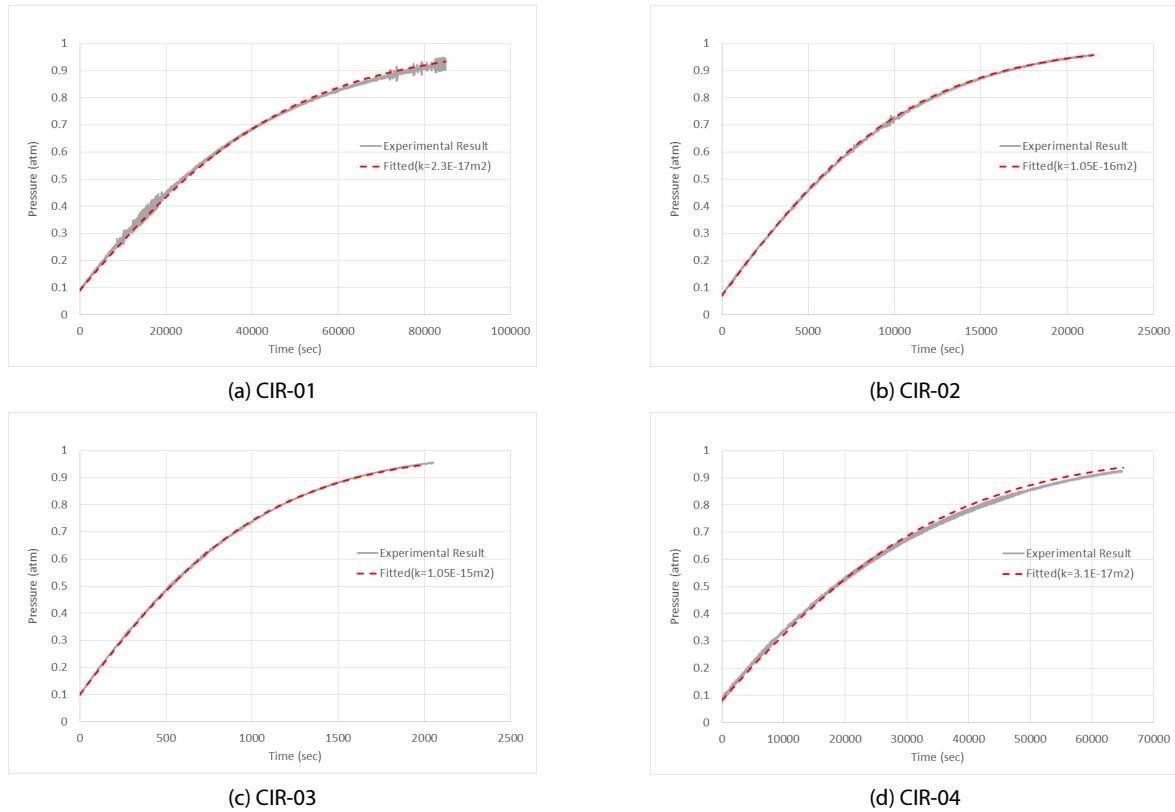


Fig. 4. Pressure Change with Time for Uncracked Test Specimens

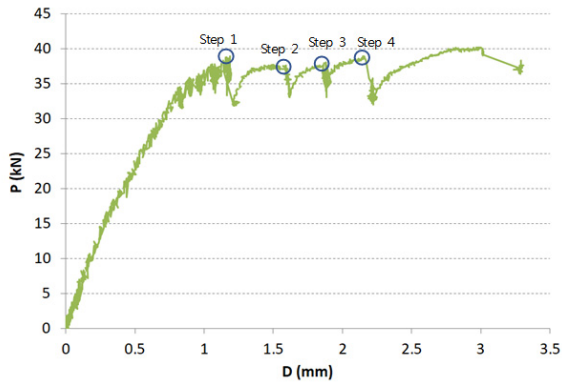


Fig. 5. Force-Displacement Curve for CIR-03 Test Structure

발생되면 가력을 멈추고 중앙부 수직 변위를 유지하도록 하중을 유지하면서 기밀성 실험을 수행했다. 그 후 다시 하중을 증가시킨 후 균열의 추가 전파가 확실히 관찰되면 다시 하중을 멈추고 기밀성 실험을 수행하였다. 예를 들어, Fig. 5는 CIR-03 시험체에 대해 이런 방식으로 실험을 수행했을 때 생긴 하중-변위 곡선을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 해당 시험체에 대해서는 총 4단계의 균열 단계(Step 1~Step 4)에 대해 기밀성 실험을 수행하였다.

하중-변위 곡선에서 각 단계에서 가력을 멈추었을 때 하중의 세기가 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 그 상태에서 보 중앙부 변위를 유지하기 위해 액추에이터(actuator)가 하중을 조절하면서 생긴 현상이다. 다만 각 균열 단계에서 실험에 쓰인 펌프를 가동해 구조물 내부 압력을 하강할 수 있어야 기밀성 실험이 가능한데, 취성재료인 콘크리트의 특성 상 4개의 시험체에 대해 실험을 수행했을 때 시험체 별로 균열의 갑작스런 진전 등의 이유로 기밀성이 급격히 떨어져 내부 압력을 하강할 수 있는 균열 단계가 많지 않았다. 결과적으로 CIR-01은 2 단계, CIR-02는 1단계, CIR-03은 4단계, CIR-04는 1단계의 균열 발생에 대해 각각 기밀성 실험을 할 수 있었다.

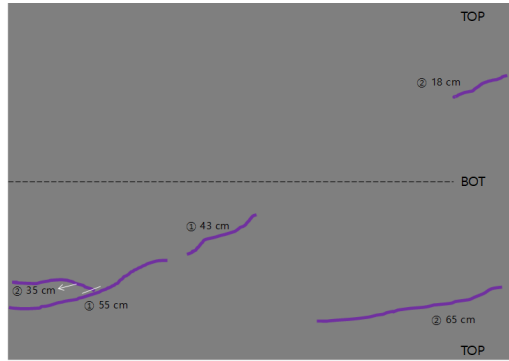
Figs. 6~9는 각 시험체에 대해 단계별 균열양상을 보여준다. 나타낸 그림은 원형관 형태의 튜브 구조물에 발생한 균열을 전개도 형식으로 보인 것이며 각 단계별로 발생한 균열의 분포와 각 균열의 길이, 그리고 Table 1에 의거해 정의된 균열폭 단계가 나타나 있다. CIR-01 시험체는 하중을 가하면서 측면 지점부에 축방향으로 초기 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 수직하중을 받으면서 원형 단면의 수직 상대변위가 줄어들고 수평 방향으로 상대변위가 늘어나면서 발생한 것으로 구조체의 휨 균열 발생에 앞서 발생한



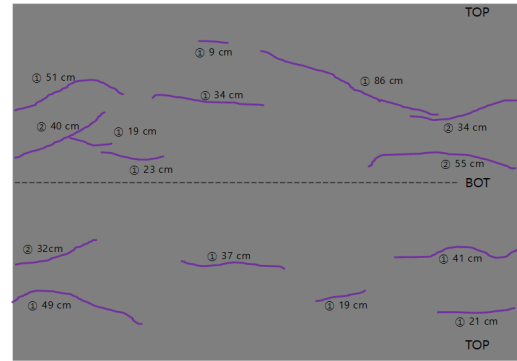
(a) Step 1



(a) Step 1



(b) Step 2



(b) Step 2

Fig. 6. Crack Development for Each Step for CIR-01

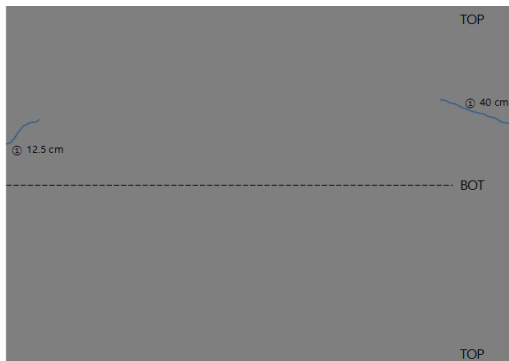
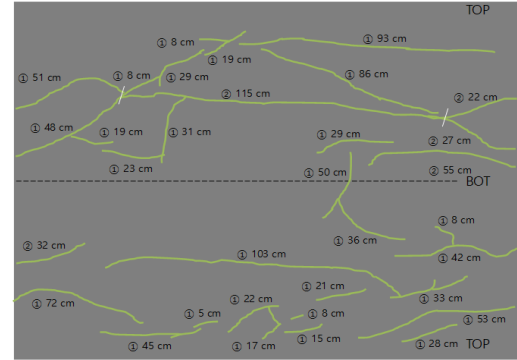
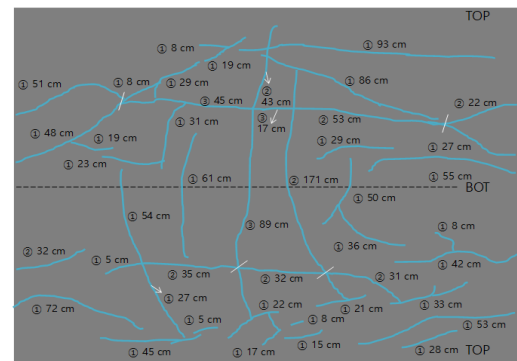


Fig. 7. Crack Development for Step 1 for CIR-02

것이다. 이는 CIR-02 시험체에서 발생한 균열과도 비슷한데 CIR-02 시험체는 단면의 좌우 양 쪽이 아닌 한 쪽에만 균열이 발생하였다. 이는 하중 가력 시 미세한 편심의 발생 때문일 수도 있지만 앞서 기술한 바와 같이 시험체의 재료적 불확실성에 기인할 수도 있다. 4단계까지의 균열 단계에 대해 기밀성 실험을 한 CIR-03의 경우 2단계까지는 튜브관 측면의 축방향 균열이 주를 이루었으나 3단계에 휩균열이 발생하기 시작해 4단계에는 수직방향의 휩균열이 많이 발생한 것을 볼 수 있다. CIR-04 시험체는 측면 균열의



(c) Step 3



(d) Step 4

Fig. 8. Crack Development for Each Step for CIR-03

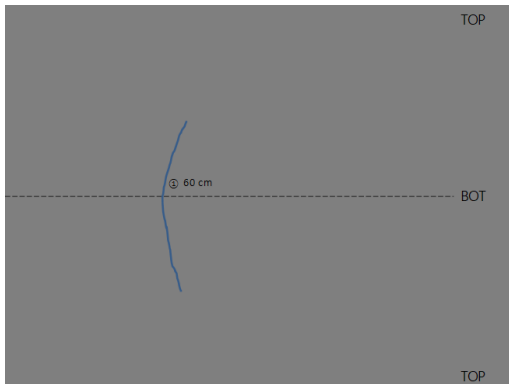


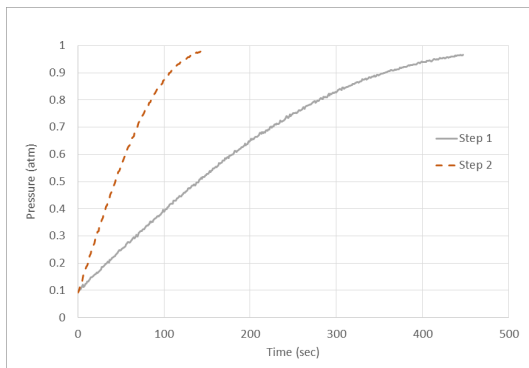
Fig. 9. Crack Development for Step 1 for CIR-04

발생 없이 휨균열만이 발생했으며 초기균열임에도 불구하고 균열 폭이 상대적으로 크게 나타났다.

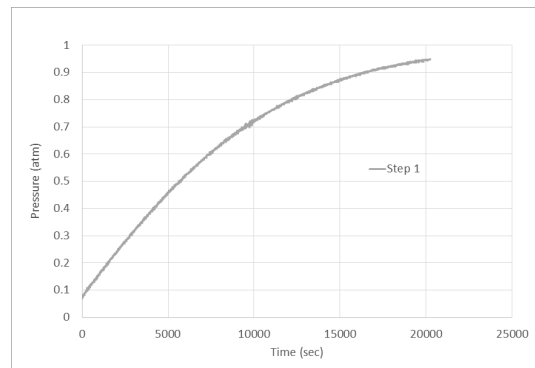
각 시험체의 하중 단계 별로 기밀성 실험을 수행한 결과 시간에 따른 내부 기압의 변화 그래프를 Fig. 10과 같이 얻었다. 균열 발생 전의 기밀성능을 나타낸 Fig. 4의 결과와 비교해 볼 때 내부 기압의 변화 기울기가 급격히 커진 것을 볼 수 있으며, 예상한 바와 같이 같은 시험체에 대해 균열의 양상이 커질수록 기압의 변화도 더욱 가파르게 변하는 것을 알 수 있다. 각 그래프를

이용하여 균열 발생 구조물에 대한 등가투기계수를 Eq. (1)을 적용하여 산정할 수 있는데, 그 결과는 Table 2에 나타나 있다. 앞서 언급한 바와 같이 균열 발생 전(하중단계 Step 0)에 대해 산정된 등가투기계수는 시험체 별로 큰 편차가 존재하였다. 하지만 균열의 진파로 인한 등가투기계수의 증가는 초기 편차와 비교해 훨씬 더 커지는 것을 알 수 있다. 한 가지 특이한 점은 CIR-02 시험체에 대해 산정된 등가투기계수는 균열 발생 전과 균열 발생 후가 같게 나왔다는 점이다. 이는 하중 가력 상태에서 균열이 새롭게 발생하겠지만 기존에 존재하는 균열이 닫힐 수도 있기 때문인 것으로 생각되며, 산정된 등가투기계수의 값이 비교적 작으며 또한 발생된 균열 또한 매우 적다는 점에서 초기 균열 상태에서 발생할 수 있는 현상인 것으로 판단된다.

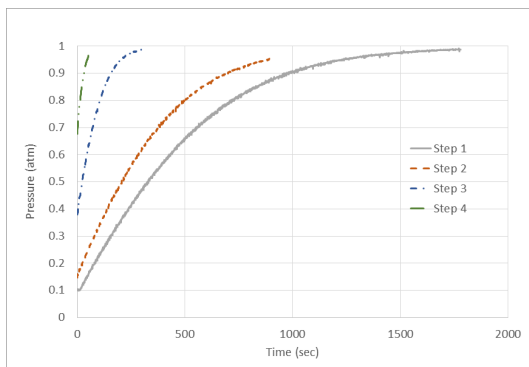
Fig. 11은 균열의 진전에 따라 산정된 등가투기계수의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 11(a)는 단순히 하중 단계별로 등가투기계수를 나타낸 것이고, Fig. 11(b)는 각 단계별로 발생된 총 균열 길이와 그에 해당하는 등가투기계수와 관계를 나타낸 그래프이다. 균열의 진전이 한정된 범위에서 이루어진 CIR-02와 CIR-04의 두 가지 시험체의 경우를 제외하더라도 CIR-01과 CIR-03 시험체를 비교할 때 균열 길이와 등가투기계수와 관계가 통일성을 보이고 있지 않다. 이는 발생된 균열의 총 길이만으로는 시스템의



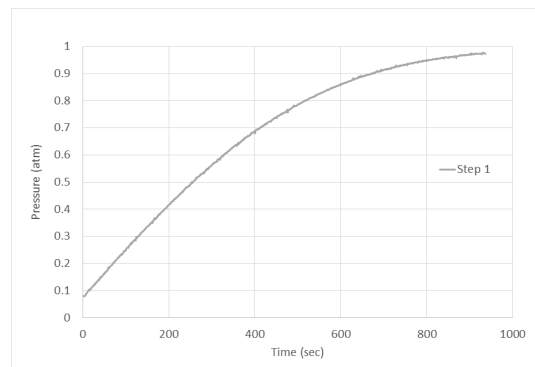
(a) CIR-01



(b) CIR-02



(c) CIR-03



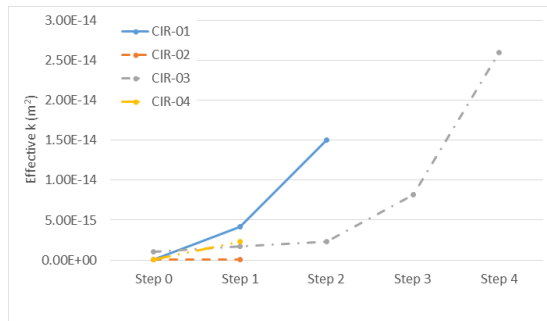
(d) CIR-04

Fig. 10. Pressure Change with Time for Test Specimens Under Cracks

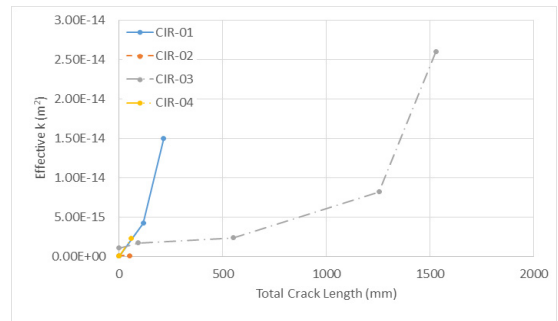
Table 2. Test Results

Test structure	Load level	Load (kN)	Displacement* (mm)	Total crack length (mm)	Number of cracks	Average crack width (mm)	Effective $k$ ( $m^2$ )
CIR-01	Step 0	-	-	-	-	-	2.30E-17
	Step 1	38.16	1.59	1180	3	0.050	4.20E-15
	Step 2	42.28	2.38	2160	5	0.064	1.50E-14
CIR-02	Step 0	-	-	-	-	-	1.05E-16
	Step 1	42.20	1.20	525	2	0.050	1.05E-16
CIR-03	Step 0	-	-	-	-	-	1.05E-15
	Step 1	31.98	1.22	930	3	0.050	1.70E-15
	Step 2	33.06	1.62	5500	15	0.057	2.34E-15
	Step 3	33.35	1.88	12530	31	0.055	8.20E-15
	Step 4	32.08	2.22	15270	31	0.064	2.60E-14
CIR-04	Step 0	-	-	-	-	-	3.10E-17
	Step 1	32.47	0.74	600	1	0.050	2.30E-15

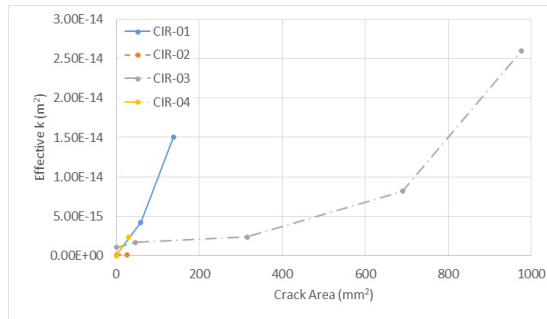
\* measured at the location of the actuator



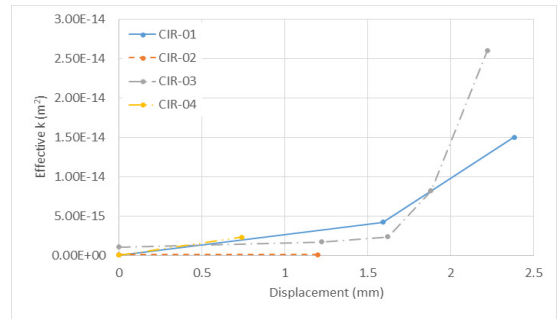
(a) Effective  $k$  for Each Step



(b) Effective  $k$  vs. Crack Area



(c) Effective  $k$  vs. Total Crack Length



(d) Effective  $k$  vs. Displacement

Fig. 11. Effective Air Permeability of Test Specimens with Cracks

기밀성을 적절히 예측할 수 없다는 것을 뜻한다. 외부 공기의 유입이 균열을 통해서 이루어진다고 할 때 기밀성과의 상관성을 고찰할 때 균열의 길이만을 생각하기보다는 균열의 길이와 균열폭을 동시에 고려하는 것이 보다 더 합리적인 판단이 될 것이다. 각각의 균열의 길이와 그 균열에 해당되는 균열폭(Table 1의 균열폭 범위의 중간값을 곱한 값)의 곱을 구한 후 발생된 모든 균열에 대해 이

값을 모두 더한 총합을 균열면적으로 정의할 때, Fig. 11(c)는 균열면적과 등가투기계수와의 관계를 나타낸다. 하지만 이 그래프 역시 균열 면적과 등가투기계수와의 관계는 시험체 별로 다른 양상을 보이고 있는데, 이는 두 가지 측면에서 볼 필요가 있다. 먼저 균열폭의 정확성이다. 본 실험에서 관찰된 균열의 정보에 있어서 균열의 길이는 어느 정도의 정확성을 확보하고 있다고

볼 수 있으나 균열폭에 있어서는 앞서 언급한 바와 같이 균열개이지 설치의 어려움 때문에 정확한 폭을 측정하지는 못하고 다섯 개의 단계로 나누어 균열 단계를 부여하였기 때문에 실제의 폭과는 어느 정도 오차가 생길 수 있다. 또한 발생한 균열의 폭은 눈으로 관찰된 결과이기 때문에 눈에 보이지 않는 미세 균열의 발생은 고려하지 못하게 될 것이다. 그리고 또 하나의 요인은 균열을 나타내는 균열지수(Crack Index)인데, 콘크리트 균열을 통한 기체의 누출률을 모델 관련 연구(Rizkalla et al., 1984; Soppe and Hutchinson, 2012; Suzuki et al., 1992)를 살펴보면, 균열이 발생한 콘크리트의 누출률을 산정할 때 균열의 길이와 균열의 폭 이외에도 균열의 개수, 균열면의 조도계수(roughness coefficient) 등의 변수들도 누출률에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 콘크리트 진공튜브의 균열과 기밀성과의 관계를 고찰하기 위해서는 이러한 누출률 모델을 바탕으로 합리적인 해석모델을 수립해야 할 필요가 있다고 판단된다. 이와 같이 본 실험의 결과를 이용해서 균열과 기밀성과의 직접적인 관계를 수립하는 것은 어렵지만 튜브의 구조적 거동과 기밀성과의 관계를 간접적으로 나타내 볼 수는 있다. Fig. 11(d)는 각 시험체에 대해 하중 재하 지점의 수직 변위와 그에 해당하는 등가투기계수와의 관계를 나타낸 그래프이다. 각 시험체 별 하중 재하 지점의 수직 변위 변화에 따른 등가투기계수의 변화 양상을 보면, 높은 투기계수 범위의 실험 결과를 가진 CIR-01과 CIR-03 시험체를 비교할 때 균열 길이와 균열폭에 대한 결과인 Fig. 11(b)와 Fig. 11(c)에 비해 상대적으로 높은 일치성을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 외부 하중에 의한 구조물 전체의 거동, 특히 구조물의 변위가 구조물에 발생하는 균열의 정도와 밀접한 관계가 있으며 그에 따른 시스템의 기밀성에도 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다. 따라서 구조물의 변위와 그에 해당하는 기밀성과의 관계를 고찰한다면 진공튜브 시스템의 설계 단계에서 기밀성을 예측할 수 있을 것이며, 이를 위해서는 보다 일반적인 하중이 적용되는 다양한 상황에서의 시스템 기밀성능에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 다만 실험 연구만을 수행하기에는 시스템에 내재된 재료적, 구조적 불확실성과 균열 측정의 어려움이 존재하므로 실험과 병행하여 유한요소법을 이용한 균열 해석 연구가 동반되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 균열의 발생이 진공튜브 구조물 내부의 압력 변화에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하기 위해 일련의 콘크리트 튜브 구조물에 대해 균열에 따른 내부 압력의 변화를 측정하는 실험을 실시하였다. 일련의 원형 콘크리트 튜브 구조의 양단을 밀봉하고 액추에이터(actuator)로 횡하중을 가해 균열 발생을 유도

한 후 균열의 진전 정도에 따른 기밀성능을 측정하였다. 먼저 미가력 상태의 시험체에 대한 투기성 실험 결과 산정된 등가투기계수는  $2.3 \times 10^{-17} \text{m}^2$ 에서  $1.05 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 까지 비교적 넓은 범위에 산재하는 것으로 나타났는데, 이는 시험체의 제작 상 존재하는 불확실성, 그리고 이동 및 운반 과정에서의 초기 균열 발생 등이 그 원인으로 판단된다. 균열 발생 시험체에 대한 기밀성 실험 결과 균열이 진전될 수록 구조물의 기밀성능은 급격히 떨어지는 것으로 나타났는데, 균열의 길이와 균열면적(균열길이와 균열폭의 곱)의 경우 등가투기계수와의 관계가 시험체 별로 다르게 나타났다. 이는 시스템의 기밀성에 영향을 주는 균열의 성질을 표현하기에는 균열의 길이 또는 균열폭만으로는 부족하다는 것을 의미하며 기밀성과의 상관성을 가지고 있는 합리적인 균열지수의 정의를 위해서는 균열과 관련된 보다 다양한 변수를 고려해야 할 필요가 있다고 사료된다. 반면 가력된 하중에 의해 발생한 구조물의 변위와 등가투기계수와의 관계는 상대적으로 상관성이 높은 것으로 나타났는데, 이는 균열의 발생 정도가 구조물의 변위와 밀접한 관계가 있다는 것을 의미하며 보다 일반적인 하중 상황에서의 구조물의 변위와 그에 해당하는 기밀성과의 관계를 고찰한다면 진공튜브 시스템의 설계 단계에서 기밀성을 예측할 수 있을 것이다. 다만 실험 연구만을 수행하기에는 시스템에 내재된 재료적, 구조적 불확실성과 균열 측정의 어려움이 존재하므로 실험과 병행하여 유한요소법을 이용한 균열 해석 연구가 동반되어야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016R1D1A1B03932109).

#### References

- Choi, J., Han, O. and Park, J. (2016). "Development of air inflow model for airtightness performance evaluation of concrete tube structures with cracks." Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 7-11 August 2016. Las Vegas, USA.
- Frosch, R. J. (1999). "Another look at cracking and crack control in reinforced concrete." *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 437-442.
- Okamoto, K., Hayakawa, S. and Kamimura, R. (1995). "Experimental study of air leakage from cracks in reinforced concrete walls." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 156, No. 1/2, pp. 159-165.
- Park, J., Kim, L. H., Nam, S. W. and Yeo, I. (2013). "Performance evaluation of airtightness in concrete tube structures for super-speed train systems." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 65, No. 9, pp. 535-545.



- Park, J., Nam, S. W., Kim, L. H. and Yeo, I. (2011). "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, pp. 143-150 (in Korean).
- Rizkalla, S. H., Lau, B. L. and Simmonds, S. H. (1984). "Air leakage characteristics in reinforced concrete." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 5, pp. 1149-1162.
- So, H. S. and Soh, Y. S. (2003). "Permeability of water, oxygen and chloride ion of concrete containing pozzolanic admixture." *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 11, pp. 117-124 (in Korean).
- Soppe, T. E. and Hutchinson, T. C. (2012). "Assessment of gas leakage rates through damaged reinforced-concrete walls." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 560-567.
- Suzuki, T., Takiguchi, K. and Hotta, H. (1992). "Leakage of gas through concrete cracks." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 133, No. 1, pp. 121-130.
- Ziari, A. and Kianoush, M. R. (2009). "Investigation of flexural cracking and leakage in RC liquid containing structures." *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 5, pp. 1056-1067.