

균열 발생에 의한 진공튜브 구조의 공기 유입 해석모델 개발

Development of Analytical Model for Air Flow into Cracked Vacuum Tube Structures

프러카시 데브코타*, 박주남*†

Prakash Devkota*, Joonam Park*†

Abstract Vacuum tube transportation system is considered to be one of the most effective alternative transportation systems that can substitute the existing aviation system. Ensuring the airtightness of the vacuum tube system is therefore the most critical requirement of the infrastructure. This study proposes a model for airtightness performance evaluation of concrete vacuum tube structures with cracks. Several crack models are reviewed first and a simplified model for estimation of the total crack area is established. A hypothetical model that describes the pressure behavior inside a concrete vacuum tube subjected to cracks due to external loadings is developed. The model developed is expected to provide a basis for an experimental study to be performed in the near future. Based on both the experimental test and the analytical model developed, the relationship between the crack propagated in the concrete vacuum tube structures and its equivalent system air permeability is established.

Keywords : Vacuum tube, Super-speed transportation, Crack, Air-tightness

초 록 진공튜브 구조를 이용한 운송 시스템은 운송체에 작용하는 공기저항을 낮추어 초고속 운행을 가능하게 하는 고효율 친환경 시스템으로서 미래의 대체 운송수단으로 주목을 받고 있다. 진공튜브 구조물의 주 재료를 정할 때에는 기존에 고려사항인 안전성, 사용성, 시공성, 경제성, 이외에 조절된 내부 기압의 유지를 가능하게 하는 기밀성을 추가로 고려해야 하는데, 장거리 운송을 목적으로 하는 시스템의 특성 상 강재보다는 콘크리트가 경제성이 뛰어나는 것으로 판단되지만 적용에 앞서 다공성 매체인 콘크리트의 기밀성능에 대한 검증이 필요하다. 특히 콘크리트 구조는 균열에 취약하기 때문에 균열로 인한 기밀성능 변화에 대한 고찰이 충분히 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 균열 발생에 의한 진공튜브 외부에서 내부로의 공기유입 흐름을 예측하는 해석 모델을 개발하였다. 베르누이 원리를 적용하여 공기의 흐름식을 수립하고 이에 대한 미분방정식을 풀어 시간에 따른 튜브 내부의 기압 상승을 해석적으로 예측하였다.

주요어 : 진공튜브, 초고속 운송, 균열, 기밀성

1. 서 론

초고속 진공튜브 열차 시스템은 튜브 내부의 기압을 아진공(대기압의 10%수준) 상태로 유지하여 열차에 작용하는 공기저항을 줄여 운행속도를 높이는 신개념 운송시스템이다(Fig.1 참조). 최근 연구[1,2]에 의하면 내부 기압을 대기압의 10%로 유지하면 700km/h의 운행속도가 가능한 것으로 알려져 있다.

† 교신저자: 원광대학교 창의공과대학 토목환경공학과(jjoonam@wku.ac.kr)

* 원광대학교 창의공과대학 토목환경공학과

진공튜브 시스템의 효율을 높이기 위해서는 튜브 구조물의 기밀성이 확보되어야 하는데,

강재와 같이 조직이 조밀한 재료를 사용한다면 높은 수준의 기밀성을 기대할 수 있으나 시공성과 경제성이 떨어질 수 있다. 반면에 콘크리트를 재료로 쓴다면 반대로 시공성과 경제성은 좋아지지만 콘크리트는 기체를 통과시킬 수 있는 다공성 매체이기 때문에 기밀성이 저하될 수 있다. 최근 연구에 따르면, 콘크리트의 강도가 높을수록 기밀성이 향상되는 경향이 있다고 보고된 바 있다[3]. 본 연구에서는 균열 발생 콘크리트 튜브 구조물의 기밀성능 평가 모델을 수립, 제안하였다. 베르누이 방정식을 적용하여 시간에 따른 내부압력의 변화를 미분방정식의 형태로 유도한 후 초기조건을 대입하여 내부 압력을 시간에 대한 함수로 표현하였다.

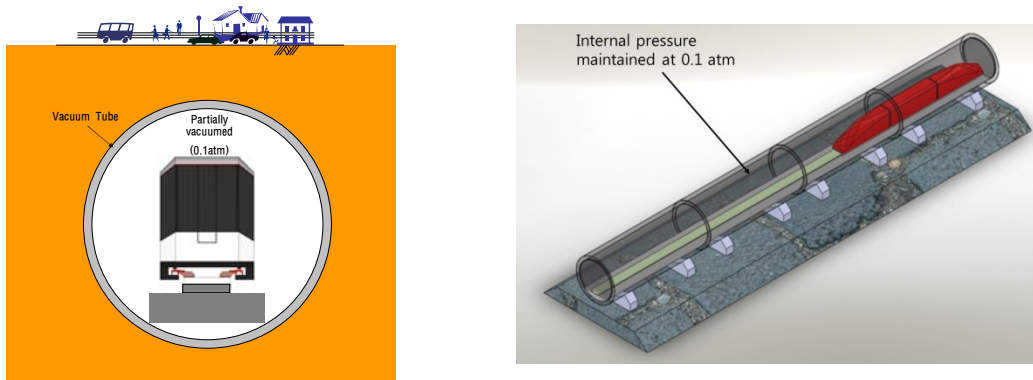


Fig. 1 Super speed tube train (SSTT) system

2. 균열에 의한 내부압력 변화식

Fig.1은 진공튜브 구조물에 발생한 균열을 통해 외부 공기가 유입되는 것을 개념적으로 나타낸다. 여기서 베르누이의 정리를 적용하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_0^2 = p(t) + \frac{1}{2}\rho \cdot (v(t))^2 \quad (1)$$

여기서, p_0 와 v_0 는 각각 대기압(외부기압)과 균열 외부에서의 공기의 속도이고, ρ 는 공기의 밀도, $p(t)$ 는 시간 t 에서의 튜브 내부의 기압, 그리고 $v(t)$ 는 균열 내부에서 측정 한 공기의 유입속도이다. 또한 균열 외부에서의 공기 흐름은 없는 것으로 가정하면, $v_0=0$ 이므로 $v(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = \sqrt{\frac{2(p_o - p(t))}{\rho}} \quad (2)$$

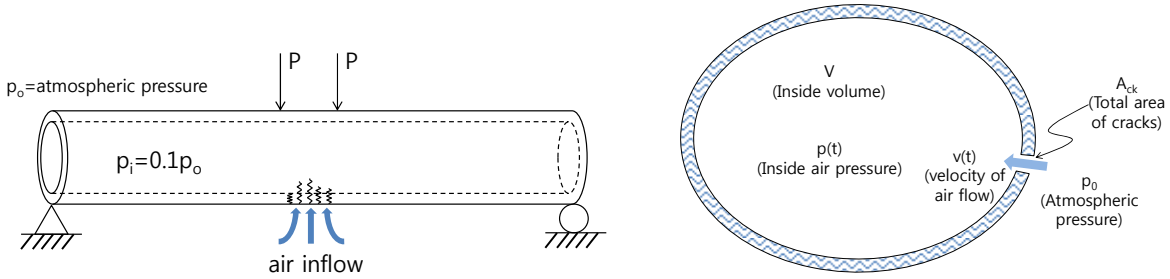


Fig. 2 Schematic view of air inflow into vacuum tube through cracks

튜브 내부와 외부의 온도가 같다고 가정한다면 공기의 유량 $Q(t)$ 와 튜브 내부의 기압 $p(t)$ 는 다음의 관계를 가지게 된다.

$$p_o \cdot Q(t) = \frac{dp(t)}{dt} V \quad (3)$$

여기서, V 는 튜브 내부의 체적이며 균열의 총 면적을 A_{ck} 라고 한다면 $Q(t) = A_{ck} \cdot v(t)$ 이다. 그러면 식(3)은 다음과 같은 미분방정식의 형태가 된다.

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{p_o}{V} \cdot Q(t) = \frac{p_o \cdot A_{ck}}{V} \cdot v(t) = \frac{p_o \cdot A_{ck}}{V} \cdot \sqrt{\frac{2(p_o - p(t))}{\rho}} \quad (4)$$

식(4)의 미분방정식을 초기 조건 $p(0) = 0.1p_o$ 을 대입해서 풀면,

$$p(t) = p_o - \left[\sqrt{0.9p_o} - \frac{p_o \cdot A_{ck}}{\sqrt{2\rho} \cdot V} \cdot t \right]^2 \quad \left(v \cdot t \leq \frac{V \cdot \sqrt{1.8p_o \cdot \rho}}{p_o \cdot A_{ck}} \right) \quad (5)$$

따라서 식(5)는 균열이 발생할 경우에 튜브 구조물 내부 압력의 시간에 따른 변화를 나타내며 튜브 내부의 압력은 시간의 제곱에 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 균열 발생 콘크리트 튜브 구조물의 기밀성능 평가 모델을 수립, 제안하였다. 베르누이 방정식을 적용하여 시간에 따른 내부압력의 변화를 미분방정식의 형태로 유도한 후 초기조건을 대입하여 내부 압력을 시간에 대한 함수로 표현하였다. 수립된 식에 따르면 균열이 발생하여 외부 공기가 균열을 통해 유입될 경우에 튜브 내부의 압력은 시간의 제곱에 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다. 제안된 해석모델은 진공튜브의 균열에 대한 한계상태 정의를 위한 기술적 배경을 제공할 것으로 기대되며 균열실험과 병행하면 콘크리트 균열모델[4,5]의 보정에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Cassat A., Bourquin V., Mossi M., Badoux M., Vernez D., Jufer M., Macabrey N., and Rossel P. (2003) SWISSMETRO - Project Development Status, International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003 (STECH '03), pp. 453-410, Tokyo, Japan.
- [2] Korea Railroad Research Institute (2009) Development of New Infra-structure Technology for Ultra High Speed Tube Train (PK09001C), Project Report.
- [3] 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, 65(9), pp. 535-545, DOI: 10.1680/mac.12.00161
- [4] Frosch R.J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete. ACI Struct J 1999;96(3):437-42.
- [5] Gilbert R.I. Time-dependent cracking and crack control in reinforced concrete structures. In: Serviceability of concrete, SP-225. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2005. p. 223-40.