

# 초고속 튜브철도 시스템을 위한 튜브 구조물의 기밀성 평가 :

## I. 해석모델 수립 및 재료 기밀성

### Air-tightness Evaluation of Tube Structures for Super-speed Tube Railway Systems: I. Analytical Modeling and Material Test

박주남<sup>\*</sup> · 남성원<sup>1</sup> · 김이현<sup>2</sup> · 여인호<sup>2</sup>

JoonamPark · Seong-Won Nam · Lee-Hyeon Kim · Inho Yeo

**Abstract** This paper presents a preliminary study for air-tightness evaluation of vacuum tube structures for super-speed tube railway systems. The formula for flow rate of the air caused by the pressure difference of the inside and outside of the tube structure is derived based on Darcy's law. A test is then performed to measure the air-permeability of concrete with various compressive strengths, the result of which is used for analytical simulation of the air intrusion for a tube structure with a preliminarily defined section. It has been shown that concrete with the compressive strength of at least more than 50MPa is recommended for effective operation and maintenance of the vacuum pump systems, as the air-permeability of concrete is inversely proportional to the exponent of its compressive strength.

**Keywords** : Vacuum tube, Ultra high-speed tube, Concrete air-tightness, Concrete air permeability

**초 록** 본 논문에서는 초고속 튜브철도 시스템의 개념설계 단계에 있어 진공튜브 구조물의 기밀성 평가 평가를 위한 기초 연구를 수행하였다. 먼저 Darcy의 흐름법칙에 근거하여 밀폐된 구조물의 내/외부 압력 차에 따른 공기 유입의 흐름식을 유도한 후 콘크리트 재료에 대한 투기성 평가 실험을 수행하여 콘크리트 강도에 따른 투기 계수의 경향을 분석하였으며 이 결과를 바탕으로 가정 단면을 가진 튜브 구조물에 대한 내부 압력 변화를 해석적으로 모사하였다. 수립된 해석모델과 실험결과를 종합적으로 분석한 결과, 콘크리트의 투기성은 압축강도에 기하급수적으로 반비례하며 진공튜브 구조물에 콘크리트 재료를 적용하였을 경우 적어도 50MPa 이상의 압축강도를 갖는 콘크리트를 사용하는 것이 진공펌프의 운용 및 유지관리 측면에서 유리할 것으로 나타났다.

**주요어** : 진공튜브, 초고속 튜브, 콘크리트 기밀성, 콘크리트

## 1. 서 론

최근 들어 저탄소 무공해 교통수단의 필요성 증가에 따라 항공 시스템에 비해 환경성이 우수한 초고속 튜브 철도 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다. 초고속 튜브 철도 시스템은 밀폐된 진공터널 내의 기압을 낮추어 공기저항을 최소화함으로써 기존의 고속철도 시스템이 가지고 있는 속도의 한계를 높일 수 있는 신개념 열차 시스템이라 할 수 있는데(Fig. 1 참조), 초고속 튜브 철도 시스템을 실제로 구축할 경우 열차 주변의 기압을 대기압의 1/10 수준으로 유지하고 자기부상 방식의 추진장치를 이용한다면 700km/h의 열차 속도 확보가 가능한 것으로 알려져 있다[1]. 이러한 초고속 튜브 철도 시스템에 대해서는 현재까지 구체적인 연구나 시공이 이루어진 사례는 아직 없으며 개념 연구 수준의 몇 가지 사례만 있을 뿐이다[2-4].

초고속 튜브 철도 시스템의 구현을 위해서는 열차가 운행하는 튜브 구조물 내부의 기압을 대기압의 1/10 수준인 0.1atm 정도로 유지하는 기술이 필요한데, 이는 열차의 추진시스템과 더불어 속도 확보에 필요한 핵심요소 중 하나라 말할 수 있다. 따라서 튜브 내의 기압을 제한된 시간 내에 0.1atm로 내릴 수 있는 진공펌프 기술 및 하강된 기압을 일정 시간 이상 유지할 수 있도록 외부 공기의 침투를 방지하는 기밀성 유지 능력은 인프라 측면에서 진공 튜브 시스템이 반드시 갖추어야 할 기본 성능 요건이 될 것이다. 진공 튜브 구조물 내의 압력은 튜브 길이를 따라 일정한 간격으로 공기펌프를 설치, 운영하여 조절하게 된다. 하지만 펌프를 이용해 내부의 기압을 낮추더라도 구조물 자체의 기밀성이 확보되지 않는다면 내부 기압을 낮은 상태로 유지하는데 매우 높은 비용이 필요하게 될 것이다. 따라서 튜브 구조물은 외부로부터의 공기 유입을 방지할 수 있도록 기밀성을 최대한 확보하는 것이 유리하게 되는데, 반면 목표 기밀성 수준이 높을수록 그에 따른 시공 비용 또한 증가할 것이다. 따라서 기밀성 확보에 필요한 비용과 그에 따른 펌프 유지비용의 절감을 동시에 고려하는 비용효과분석이 병행되

<sup>\*</sup>교신저자 : 한국철도기술연구원 철도구조연구실  
E-mail : joonam.park@gmail.com

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 철도환경연구실

<sup>2</sup>한국철도기술연구원 철도구조연구실

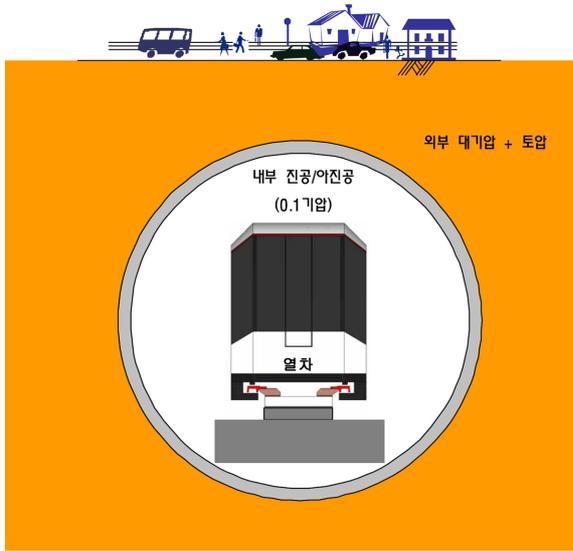


Fig. 1 Super-speed tube railway system

어야 한다.

튜브구조의 기밀성 확보는 세 가지 측면에서 생각할 수 있다. 먼저 구조 재료적 측면에서 본다면 튜브 구조체를 이루는 구조 재료 자체의 투기성에 따라서 진공 튜브 구조물의 기밀성이 결정될 것이다. 두 번째로 시공 및 운영 상의 기밀성이 있다. 진공튜브를 시공하게 되면 시공이음이 발생하게 되며 또한 터널에 설치될 경우 세그먼트 및 록볼트 등의 체결장치를 위한 구멍 등 진공튜브 표면 및 단면에 불연속 구간이 발생하게 되는데 이러한 부분에서 공기의 유입이 일어날 수 있다. 또한 열차 운행 중 발생하는 여러 가지 외부 하중에 의한 크랙이 발생할 수도 있다. 따라서 이러한 불연속 구간 및 균열을 어떻게 조절하느냐가 기밀성 확보에 중요한 요소가 될 것이다. 마지막으로 승객 승하차를 위한 에어락(Air-Lock) 시스템이 있는데, 열차의 정거장 등에서 튜브 구조물 내부로의 공기 유입 없이 진공튜브 외부에서부터 열차로 승차 및 하차를 할 수 있는 시스템이 필요하게 된다.

본 연구에서는 상기 세 가지 측면의 튜브구조 기밀성 중 구조 재료적 측면의 기밀성능 평가에 대한 연구를 수행하였다. 현재 가장 일반적으로 사용되는 구조용 재료로는 강재와 콘크리트가 있는데 이 중 기밀성 확보 측면에서는 강재가 콘크리트보다는 우수할 것으로 판단되나 긴 연장의 노선에 강재를 적용할 때 매우 큰 비용이 들 것으로 예상되며, 한편 콘크리트의 경우 현재 비용 대비 성능이 우수하고 시공도 비교적 쉬워 터널의 라이닝 재료로 가장 많이 쓰이고 있기 때문에 본 연구에서는 콘크리트를 튜브 구조로 사용했을 때 재료 측면에서의 기밀 성능을 분석하고자 한다. 앞서 서술한 바와 같이 콘크리트를 사용했을 경우에는 크랙, 시공이음 등의 문제에서 오는 기밀성 상실효과가 있을 수 있으나 일단은 이런 요소들을 고려하지 않고 콘크리트 재료 자체에 대한 기밀성 분석에 초점을 맞추었다. 먼저 밀폐된 구조물의 내부와 외부의 압력차가 존재할 때 공기의 흐름을 묘사할 수 있는 흐름식을 Darcy의 흐름이론에 기초하여 유도

하였다. 그 후 콘크리트 재료의 투기성 실험을 통해 콘크리트의 강도별 고유 투기계수를 결정하였으며 마지막으로 튜브 구조물의 단면을 가정하여 시간에 따른 내부 압력 변화를 해석적으로 묘사하였다.

## 2. 밀폐 구조물의 유체 투과 흐름식 유도

재료의 기밀성 또는 투기성은 재료 고유의 성질이며 투기계수(Air Permeability)를 이용하여 나타낼 수 있다. 투기계수는 대상 재료에 대해서 특정 기체가 투과할 수 있는 정도를 표현한 것으로 투기계수가 낮을수록 투기성도 낮아지며 반대로 기밀성은 높다고 할 수 있다. 콘크리트 등의 재료에 대한 투기계수는 Darcy의 흐름법칙에 기초하여 구할 수 있는데, Darcy의 흐름법칙은 다공성 매체(porous media)를 투과하는 유체에 대하여 일반적으로 적용되는 것으로 Fig. 2와 같이 유체가 고체를 통과할 때 투과계수(기체의 경우 투기계수)와 유량과의 관계는 다음과 같이 표현된다[5].

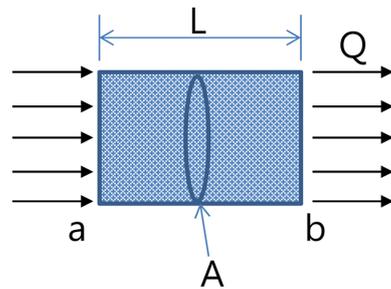


Fig. 2 Flow of fluid into porous media

$$\frac{dq}{dt} = \frac{kA}{\mu} \frac{P_a - P_b}{L} \quad (1)$$

여기서,

$dq/dt$  = 유체의 흐름 량 ( $m^3/s$ )

$k$  = 유체의 고체에 대한 고유투과계수 (intrinsic permeability,  $m^2$ )

$A$  = 유체가 통과하는 단면적( $m^2$ )

$P_a$  = 유입 압력( $N/m^2$ )

$P_b$  = 유출 압력( $N/m^2$ )

$L$  = 유체가 통과하는 다공성 매체의 두께( $m$ )

$\mu$  = 유체의점성계수(Viscosity,  $N \cdot s/m^2$ )

일정 재료로 만들어진 임의의 형상의 밀폐된 구조물이 있고 이 구조물 내부 및 외부에 유체가 있을 때 만약 구조물의 내부 압력과 외부의 압력차가 존재한다면 이로 인해 유체의 흐름이 발생할 것이며 이럴 경우 시간에 따른 유체의 흐름량을 Darcy의 법칙을 이용하여 수학적으로 예측할 수 있다. 다만 구조물 내부의 압력이 시간에 따라 변할 것이므로 식(1)에서의  $P_b$ 는 시간에 따른 함수가 될 것이다. 먼저 Fig. 3과 같이 임의의 형태의, 두께가 일정한 밀폐된 구조물이 있을 때 그 두께를  $h$ , 내부 공간의 체적을  $V$ , 구조물의 표면적을  $A$ 라 하고 구조물 내부의 압력을  $P_i$ , 외부의 압력을  $P_a$ 라고 하

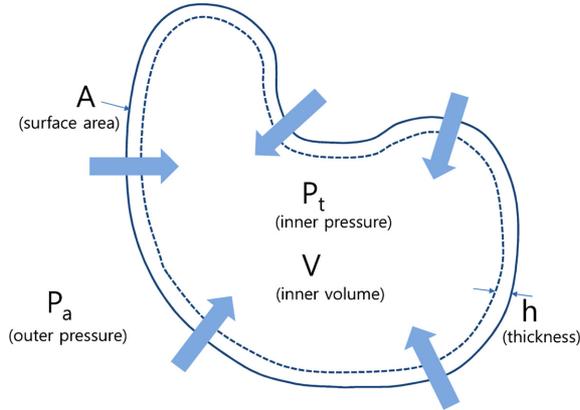


Fig. 3 Flow of fluid into closed structure due to pressure difference

자. 튜브 외부의 압력이 튜브 내부의 압력보다 크다고 가정하면 유체(공기)는 튜브 외부에서 내부로 유입될 것이다. 초고속 튜브의 경우 외부에서 내부로 흐르는 유체는 공기, 즉 기체가 되는데 기체는 압력에 따라서 부피가 변하는 압축성 유체이므로 위치에 따라 유량이 다르게 나올 수 있다. 따라서 공기와 같은 압축성 유체에 대해서는 다음의 식을 적용한다[5].

$$\frac{dq}{dt} = \frac{kA(P_o^2 - P_t^2)}{2P_o\mu h} \quad (2)$$

여기서,

$P_o$  = 외부 압력(Outside Pressure, N/m<sup>2</sup>)

$P_t$  = 내부 압력(Inside Pressure, N/m<sup>2</sup>)

구조물 내부 및 외부의 온도가 같다고 가정했을 때 구조물 내부의 압력 상승은 유입되는 기체의 양에 비례할 것이다 (즉,  $P_o \frac{dq}{dt} = \frac{dp}{dt} V$ ),  $V$ 는 구조물 내부의 체적). 따라서 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP_t}{dt} = \frac{kA(P_o^2 - P_t^2)}{2V\mu h} = \frac{kAP_o^2}{2V\mu h} - \frac{kA}{2V\mu h} \cdot P_t^2 \quad (3)$$

위 식(3)은 형태  $y' = b - a \cdot y^2$ 의 미분방정식이 되며 이에 대한 해를 구하면 구조물 내부로 유입되는 유체의 양, 즉 구조물 내부의 압력 변화를 묘사할 수 있다. 식(3) 미분방정식의 해는,

$$P_t(t) = P_o \cdot \frac{1 + C_1 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)}{1 - C_1 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)} \quad (4)$$

여기서 시간이 0일 때 내부 기압이 0.1atm이라는 초기조건을 적용하면,  $P_t(0) = 0.1P_o = \frac{1+C_1}{1-C_1}P_o \rightarrow C_1 = -0.8182$  이므로 결과적으로 튜브 내부의 압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_t(t) = P_o \cdot \left[ \frac{1 - 0.8182 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)}{1 + 0.8182 \cdot \exp\left(-\frac{kAP_o}{\mu h V} \cdot t\right)} \right] \quad (4)$$

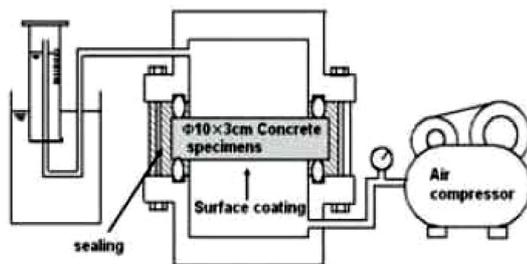
진공튜브 철도의 개념 설계에 따르면 튜브 구조물 외부의 압력은 대기압(1atm 또는 100kPa)이고 튜브 내부의 압력은 대기압의 0.1배, 즉 10kPa이 될 것이기 때문에 공기가 흐름 유체가 될 것이며 외부에서 내부로 유입될 것이다. 튜브 구조물 재료의 고유투기계수를 알고 있다면 식(5)를 이용하여 진공튜브 내부의 기압을 0.1atm으로 낮춘 후 진공펌프 가동을 중단시켰을 때 튜브 구조물 표면을 통해 유입되는 공기에 의한 튜브 내부 압력의 시간에 따른 변화를 예측할 수 있다. 만약 0.1atm이 아닌 다른 초기 압력조건이 주어진다 면 식(4)에서 초기조건을 달리하여 그에 맞도록 식을 수립하여 사용하면 된다.

### 3. 콘크리트 투기성 시험

앞서 서술한 바와 같이 본 연구에서는 콘크리트를 진공튜브 구조물의 재료로 사용했을 때의 기밀성 분석이 목적이므로 먼저 콘크리트 재료 자체에 대한 기밀성 실험을 수행하였다. 재료의 기밀성 또는 투기성은 재료 고유의 성질이며 투기계수(Air Permeability)를 이용하여 나타낼 수 있다. 투기계수는 대상 재료에 대해서 특정 기체가 투과할 수 있는 정도를 표현한 것으로 투기계수가 낮을수록 투기성도 낮아지며 반대로 기밀성은 높다고 할 수 있다.

#### 3.1 시험 방법

현재까지 국내의 투기계수에 관한 시험방법은 표준화되어



(a) schematic view of test



(b) air permeability test

Fig. 4 Air permeability test

Table 1 Concrete mix table

	Nominal strength (MPa)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )						Slump (mm)	W/C ratio	No. of specimens		
		Cement (Reg. Portland)	W	Fine Agg.	Coarse Agg. (Max. size)		Admixture (W-R)			Concrete	Water-proof (paint type)	Water-proof (sheet type)
Mix1	24	335	166	763	1032 (25mm)	-	1.005	150	49.6%	5	2	2
Mix2	30	391	154	829	946 (25mm)	-	3.91	140	39.4%	5	2	2
Mix3	42	448	129	858	907 (20mm)	-	5.37	180	28.8%	5	2	2
Mix4	50	514	135	808	895 (15mm)	-	6.17	160	26.3%	5	2	2

있지 않으며, 각 연구자별로 다양한 방법들이 적용되고 있다[6,7]. 현재 국내에서 많이 적용되고 있는 투기계수 실험 방법으로는 수중치환법을 들 수 있는데, 본 연구에서는 수중치환법[8]을 이용해 콘크리트 시편의 투기계수를 측정하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 내부직경 7cm의 실린더에 시험체를 고정하고 실링한 후 2kgf/cm<sup>2</sup>의 압축공기를 주입하여 메스실린더를 이용하여 투기량을 측정하게 되는데 투기계수는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$K = \frac{2P_2 h \gamma}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (6)$$

여기서,

$K$  = 투기계수(m/s)

$P_1$  = 재하압력 (kgf/m<sup>2</sup>)

$P_2$  = 대기압 (1.0332×104 kgf/m<sup>2</sup> = 100 kPa)

$h$  = 시험체 두께 (m)

$Q$  = 투기량(m<sup>3</sup>/s)

$A$  = 투기면적(m<sup>2</sup>)

$g$  = 기체의 단위용적질량(1.205 kg/m<sup>3</sup>)

식(6)에서 주의할 것은, 투기계수  $K$ 는 식(1)의  $k$ 와는 다른 것으로 두 계수는 다음과 같은 상관관계가 있다.

$$k = \frac{K \mu}{\gamma g} \quad (7)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도(9.81m/s<sup>2</sup>)이다. 본 연구에서는 편의상 식(1)의  $k$ 를 고유투기계수로, 그리고  $K$ 를 투기계수로 부르기로 한다.

### 3.2 콘크리트 배합 및 실험

여타 재료와 마찬가지로 콘크리트 역시 조적이 치밀할수록 투기성 또한 저감될 수 있을 것이다. 콘크리트의 배합은 목표 압축강도, 현장여건, 온도 등에 따라서 탄력적으로 정하기 때문에 편차가 많이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 배합 및 강도 별 투기계수의 경향을 알아보기 위하여 24MPa, 30MPa, 42MPa, 50MPa 등 4 단계의 호칭강

도(목표강도)에 대하여 배합을 결정한 후 각 경우마다 투기계수 실험을 하였다. 4 단계의 배합은 Table 1에 나타나 있다.

콘크리트는 모양이 일정치 않은 골재 등을 함유하고 있기 때문에 강재 등의 재료와 비교하여 재료의 균질성이 떨어진 다. 또한 배합 시 여러 가지 여건에 따라서 공극의 편차도 존재하기 때문에 결과적으로 투기성 또한 구조물 전반에 걸쳐 균질하지 않을 확률이 높다. 따라서 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 각 강도(배합) 별로 5개의 시편을 제작해 각각의 시편에 대하여 수중치환법을 이용하여 투기계수를 측정 한 후 평균값을 구하였다. 또한 방수재 적용 시 투기성 향상 효과를 관찰하기 위하여 터널 라이닝 등에 쓰이는 방수재의 대표적 종류인 도막방수(우레탄 도막방수)와 시트방수(고무 아스팔트계 시트방수)에 대해서도 각각 강도별 2개씩의 시편을 제작하여 실험하였다. 먼저 시편의 물성치를 조사하기 위하여 콘크리트 배합 후 공기량, 슬럼프 플로우 시험을 수행하였으며 28일 양생 후 압축강도 시험을 수행하였다. Table 2는 실험 결과를 보여주는데, 시편의 재령 28일 압축강도는 원래 목표 강도(24~50MPa)보다 다소 높게 (28.9~63.1 MPa) 나타났다.

Table 2 Concrete compressive strength

	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )				
	1	2	3	Mean	
Mix1	29.17	28.29	29.32	28.9	KS F 2405
Mix2	41.37	38.84	43.00	41.1	
Mix3	50.84	60.19	58.54	56.5	
Mix4	62.71	63.27	63.26	63.1	

Table 3과 Table 4는 이와 같은 투기계수 실험 결과를 나타낸다. 이러한 실험결과를 바탕으로 강도에 따른 투기계수의 경향을 그려보면 Fig. 5와 같은데, 투기계수는 압축강도의 지수에 반비례하므로 압축강도가 높을수록 투기계수는 기하급수적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 콘크리트 투기계수에 대한 타 연구[8]와도 부합하는 결과이다. 추세 분석으로 얻은 콘크리트 압축강도에 따른 투기계수의 식

**Table 3** Air permeability test results

		P1 (kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (kgf/cm <sup>2</sup> )	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	Q (cm <sup>3</sup> /s)	K (cm/s)	k (m <sup>2</sup> )
Mix 1	Con.	2	1.0332	4.1	38.5	0.9009	8.150E-08	1.242E-13
		2	1.0332	4.1	38.5	0.8482	7.632E-08	1.163E-13
		2	1.0332	4.2	38.5	0.8953	8.252E-08	1.258E-14
		2	1.0332	4.8	38.5	1.1614	1.223E-07	1.865E-13
		2	1.0332	4.6	38.5	1.0449	1.055E-07	1.608E-13
	Paint sheet	2	1.0332	4.9	38.5	0	0	0
Mix 2	Con.	2	1.0332	4.2	38.5	0.1947	1.805E-08	2.751E-14
		2	1.0332	4.1	38.5	0.2270	2.054E-08	3.130E-14
		2	1.0332	4.3	38.5	0.1842	1.748E-08	2.664E-14
		2	1.0332	5.0	38.5	0.1513	1.669E-08	2.544E-14
		2	1.0332	4.7	38.5	0.1815	1.882E-08	2.869E-14
	Paint sheet	2	1.0332	4.9	38.5	0	0	0
Mix 3	Con.	2	1.0332	4.8	38.5	0.0042	4.412E-10	6.725E-16
		2	1.0332	4.9	38.5	0.0042	4.489E-10	6.843E-16
		2	1.0332	4.3	38.5	0.0062	5.915E-10	9.106E-16
		2	1.0332	4.1	38.5	0.0082	7.451E-10	1.136E-15
		2	1.0332	4.9	38.5	0.0050	5.392E-10	8.219E-16
	Paint sheet	2	1.0332	4.7	38.5	0	0	0
Mix 4	Con.	2	1.0332	5.0	38.5	0.0040	4.404E-10	6.713E-16
		2	1.0332	4.8	38.5	0.0040	4.223E-10	6.437E-16
		2	1.0332	4.9	38.5	0.0058	6.252E-10	9.530E-16
		2	1.0332	3.9	38.5	0.0081	6.937E-10	1.057E-15
		2	1.0332	4.9	38.5	0.0047	5.061E-10	7.714E-16
	Paint sheet	2	1.0332	4.8	38.5	0	0	0

**Table 4** Mean and dispersion of each mixture

	Mix1	Mix2	Mix3	Mix4
$f_c'$ (mPa)	28.9	41.1	56.5	63.1
k Mean (m <sup>2</sup> )	1.43E-13	2.79E-14	8.45E-16	8.19E-16
k STD (m <sup>2</sup> )	2.99E-14	2.23E-15	1.90E-16	1.79E-16

은 다음과 같다.

$$k = 2.0 \times 10^{-11} \cdot \exp(0.165f_c') \quad (8)$$

여기서  $k$ 는 콘크리트의 투기계수(m<sup>2</sup>) 이고  $f_c'$ 는 콘크리트의 압축강도(MPa)이다. 여기서 주의할 점은 식(8)은 강도에 따

른 투기계수의 경향만을 설명하는 것으로 콘크리트 제작 시 배합의 특성에 따라서 강도 이외에 물/시멘트 비, 혼화재의 영향, 골재의 크기 및 함량 등 여러 가지 요인에 의해 투기성이 변할 수 있기 때문에 이에 의한 불확실성이 존재할 가능성을 염두에 두어야 할 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 콘크리트의 압축강도가 낮아짐에 따라 그에 따른 투기계수가 급격히 높아지므로 튜브 구조물의 기밀성능 향상을 위해서는 일정 수준 이상의 강도를 가진 콘크리트를 사용하는 것이 매우 중요하다 할 수 있는데 다만 높은 배합강도로 인한 시공성의 감소 및 제작비용 등의 단점을 동시에 고려하여야 하겠다. 콘크리트 투기계수에 따른 진공튜브 구조 기밀성능의 정량적인 검증은 다음 장에 해석적 시뮬레이션으로 볼 수 있는데 그 결과와 진공펌프의 용량을 동시에 고려하여 가장 경제적인 결과를 낼 수 있도록 목표 투기계수

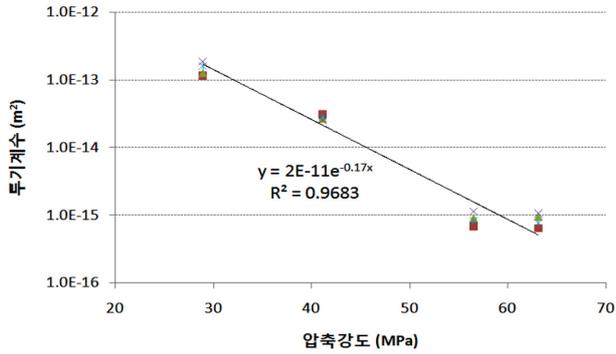


Fig. 5 Trend of intrinsic air permeability

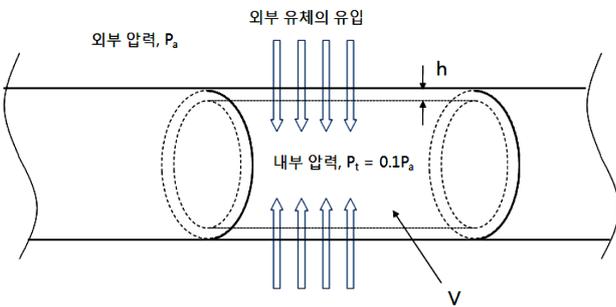


Fig. 6 Air intrusion into the vacuum tube structure

를 설정하여 콘크리트 제작을 하여야 할 것이다. 한 가지 특이할 점은, 두 가지 방수재(우레탄형 및 도막형) 처리를 한 시편의 경우에는 앞서 말한 바와 같이 강도 별로 2개씩의 시편을 제작하여 실험을 하였지만 모든 경우에 있어서 실험 오차 범위 내에서 공기가 전혀 투과가 안된 것으로 나타났다는 것이다. 따라서 기밀성 확보의 측면에서 볼 때 방수재의 적용이 매우 효과가 있다고 하겠다. 하지만 실제 튜브구조물을 건설할 때에는 방수재의 적용으로 인한 경계성 및 시공성, 그리고 시간 및 사용에 따른 방수재 표면 마모 등 기밀 효과의 감소와 같은 문제를 동시에 고려하여야 할 것이다.

#### 4. 튜브 구조물의 내부압력 변화 시뮬레이션

개념연구가 진행되고 있는 현 시점은 아직 진공튜브 구조

Table 5 Parameters definition for simulation [8]

Parameter	notation	unit	value
Viscosity	$\mu$	kg/m·s	$1.8 \times 10^{-5}$
Unit weight of air	$\gamma$	kg/m <sup>2</sup>	1.205
thickness of tube	$h$	m	0.3
Diameter of tube	$D$	m	5.0

물의 단면이 확정되지 않은 상태이다. 차량의 규모, 가이드 웨이의 종류 및 상세, 단/복선 여부, 시공 상의 문제 등에 대한 연구가 선행된 후에야 진공튜브 구조물의 단면을 결정할 수 있기 때문에 이러한 사항들이 결정되지 않은 현재로서는 진공튜브의 단면을 가정하여 그에 대한 예비해석을 수행할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 튜브 구조물에 대하여 단면을 가정하여 해석을 수행하고자 한다. 가정 단면에 대해 해석을 수행할 경우 추후 실제 설계될 단면과는 격차가 있을 수도 있지만 진공튜브의 기밀성능 요건 및 펌프의 필요용량의 예측하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 5는 공기 및 튜브 구조물의 단면과 관련된 계수[8]를 나타낸다. 공기 흐름에 따른 기밀성을 해석하기 위해, 튜브 구조물의 측면 벽을 통해서만 외부 공기가 유입되며 종방향으로의 공기 유출 또는 유입은 없는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 이와 같이 결정된 단면에 대한 튜브 구조물 내부 압력의 시간에 따른 변화를 위에서 유도된 식(5)와 콘크리트 시편의 투기계수 실험 결과를 이용해 예측을 하였으며 또한 투기계수에 따른 펌프 재가동 압력 도달시간의 관계도 산정하였다.

Fig. 7은 콘크리트 시편 실험에서 사용된 4가지 배합 콘크리트에 대하여 실험 결과로 얻은 투기계수를 바탕으로 식(5)를 이용해 가정 단면 튜브 구조물의 시간에 따른 내부 압력 변화를 예측한 곡선이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 배합 1( $k=1.22 \times 10^{-13} \text{m}^2$ , 압축강도 28.9MPa)과 배합 2( $k=2.85 \times 10^{-14} \text{m}^2$ , 압축강도 41.1MPa)의 경우 불과 몇 분 이내에 내부 압력이 0.2atm로 증가되며 그 중 투기계수가 낮은 배합 2의 경우에도 한 시간 이내에 내부 기압이 0.6atm 이상으로 상승되는 것을 볼 수 있다. 그에 비해 배합 3( $k=6.78 \times 10^{-16} \text{m}^2$ , 압축강도 56.5MPa) 및 배합 4( $k=6.49 \times 10^{-16} \text{m}^2$ , 압축강도 63.1MPa)의 경우 내부 압력이 0.2atm로 증가되기까지는 약 4-5시간

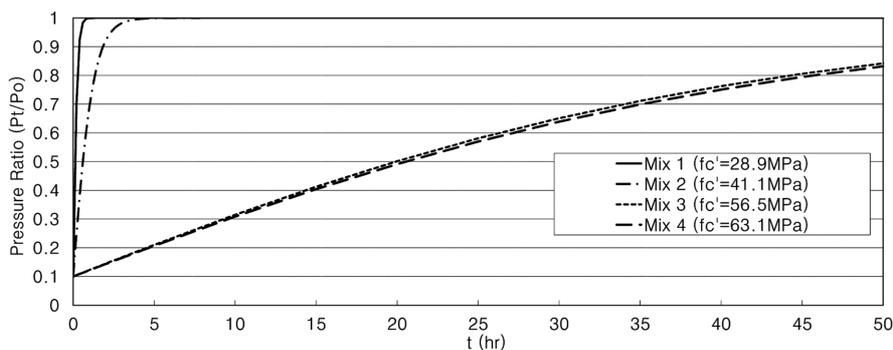


Fig. 7 Inside pressure change with time for assumed section

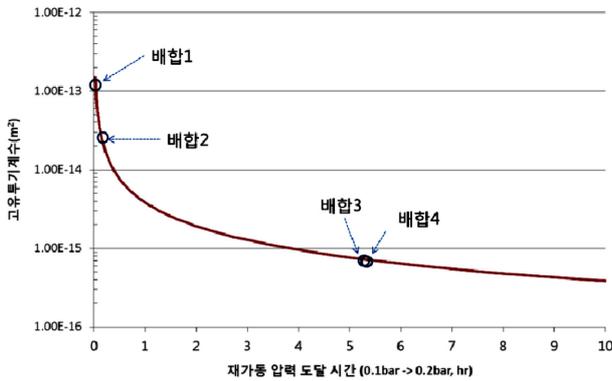


Fig. 8 k vs. time to pump operation

이 소요되며 0.5atm까지 상승하는데도 약 20시간이 소요되는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 5에서 보여준 바와 같이 강도의 증가에 따라 투기계수는 기하급수적으로 감소하기 때문으로 판단된다. 진공펌프의 사용과 함께 생각해 본다면, 만약 진공튜브 재가동 압력이 0.2atm라 할 때 Fig. 8에서 보는 바와 같이 배합 1 또는 배합 2로 제작된 콘크리트 튜브의 경우 수 분 마다 펌프를 재가동시킬 필요가 있는 반면에 배합 3 또는 배합 4로 제작된 콘크리트 튜브의 경우에는 약 5시간에 한 번씩 펌프를 재가동시키면 되므로 후자의 경우가 유지보수 및 펌프 설치 측면에서 훨씬 유리하다 할 수 있다. 이를 콘크리트의 투기계수로 설명한다면, 가정된 튜브 단면(D=5.0m, h=0.3m)에 대해 재가동 압력 도달 시간이 5시간 이상이 되게 하기 위해서는 투기계수가 적어도  $7.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  이하인 콘크리트를 사용해야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초고속 진공튜브 구조물의 기밀성능 평가를 위해서 콘크리트 시편에 대한 투기계수 실험을 수행하여 콘크리트 배합 및 강도에 따른 투기계수 경향을 분석하였으며 또한 밀폐된 구조물의 내/외부 압력 차이에 따른 내부 기압 변화의 식을 유도하여 이를 실험 결과와 결부시켜 예상 튜브 구조물 단면에 대해 내부 압력 변화의 추이를 시뮬레이션으로 분석하였다. 실험 및 해석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트 시편에 대한 투기계수 실험 수행 결과 콘크리트의 투기계수는 압축강도의 지수에 반비례하는 경향을 보였는데 압축강도가 높을수록 투기계수는 기하급수적으로 감소하였다. 따라서 튜브 구조물의 기밀성능 향상을 위해서는 일정 수준 이상의 강도를 가진 콘크리트를 사용하는 것이 매우 중요하다 할 수 있으며 다만 높은 배합강도로 인한 시공성의 감소 및 제작비용 등의 단점을 동시에 고려하여야 할 것이다.

(2) 진공튜브의 단면을 가정하여 그에 대한 예비해석을 수행한 결과, 펌프 재가동 압력을 0.2atm라고 할 때, 가정된 튜브 단면(D=5.0m, h=0.3m)에 대해 재가동 압력 도달 시간이 5시간 이상이 되게 하기 위해서는 투기계수가 적어도  $7.0 \times 10^{-16}$

$\text{m}^2$  이하인 콘크리트를 사용해야 하는 것으로 나타났다. 콘크리트 강도와 투기계수와의 경향을 볼 때 진공펌프 운용 측면에서는 강도 50MPa 이상의 고강도 콘크리트 재료를 쓰는 것이 훨씬 유리할 것으로 판단되며 콘크리트 강도 이외에도 이러한 요구조건에 맞출 수 있는 콘크리트의 배합특성을 고려하여 콘크리트를 제작해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 콘크리트의 재료 측면에서의 기밀성만을 대상으로 하였으나 실제 튜브 구조물을 설계 및 시공할 때에는 전체 튜브 구조물을 일체형으로 시공할 수는 없으며 시공이음 등이 존재하게 된다. 또한 TBM공법을 이용한 쉘터 터널 형식의 시공법을 택한다면 터널 라이닝 자체가 세그먼트 터널의 형식을 취하게 될 것이며 이에 따른 이음부에서의 누설 가능성이 매우 높다고 할 수 있는데, 이러한 시공이음을 고려한 진공튜브 구조물의 기밀성에 대해서는 동반 논문[9]에서 다루기로 한다. 언급한 사항 이외에 일반 터널과 별도로 진공튜브 설계 및 해석 시 보다 깊이 고려해야 할 사항 중 첫 번째는 콘크리트의 균열 조절이다. 초고속 진공튜브 시스템에서의 구조물 균열은 곧 내부 압력의 빠른 상승을 의미하며 이는 열차의 고속 추진에 큰 영향을 미치게 되므로 콘크리트 균열을 제어할 수 있어야 할 것이다. 또한 콘크리트의 현장 폭로 상태에 따른 콘크리트의 함수 정도, 그리고 콘크리트 구조물의 기밀성 향상을 위한 방수재의 처리(방수재의 원래 목적은 투수를 방지하는 것이지만 진공튜브의 경우에는 투기 방지를 목적으로 할 수 있으며 이는 실험 결과에서도 확인할 수 있다)등에 따른 투기성의 변화를 고려해야 하며, 마지막으로 진공펌프의 설치에 대한 고려가 필요할 것이다. 이와 같은 사항들에 대해서는 보다 자세한 설계요건의 수립을 위해 추가 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구과제 (PK11005D)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] A. Cassat, V. Bourquin, M. Mossi, M. Badoux, D. Vernez, M. Jufer, N. Macabrey, P. Rossel (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] J. Lee, K.S. Kim, D. Nam, H. Kwon, J.Y. Kim (2008) Performance Requirement and Economic Efficiency for Tube Transportation System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(5), pp. 513-518.
- [4] J. Park, I. Yeo (2009) Air-tightness of Vacuum Tube High-Speed Railway System, *Proceeding of the Autumn Confer-*

- ence for Railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea
- [5] Mehta, P. and Monteiro, P. (2005) Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill.
- [6] S-K. Oh, K-S. Bae, Y-S. Kim (2004) A Study on the Evaluation of Composite Coatings of Cement and Powder used as Waste Tire and Glass, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 20(3), pp. 47-52.
- [7] H-S. So, Y-S. Soh (2003) Permeability of Water, Oxygen and Chloride Ion of Concrete Containing Pozzolanic Admixture, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 19(11), pp. 117-124
- [8] Y-J. Kwon, M-H.Kim, S-P.Kang, J-K.Yoo (2001), An Experimental Study on the Air Permeability Effect on Concrete Carbonation, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 13(3), pp. 277-284.
- [9] J. Park, L-H. Kim, S-W. Nam (2011), Air-tightness Evaluation of Tube Structures for Super-speed Tube Railway Systems: II. System Test and Parametric Analysis, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(2), pp. 151-159.
- 접수일(2010년 12월 17일), 수정일(2011년 2월 15일),  
게재확정일(2011년 3월 20일)