초고속 열차 시스템을 위한 튜브 구조물의 기밀성 평가 : II. 시스템 실험 및 파라미터 해석

Air-tightness Evaluation of Tube Structures for Super-speed Tube Railway Systems: II. System Test and Parametric Analysis

박주남[†] · 김이현¹ · 남성원²

Joonam Park · Lee-Hyeon Kim · Seong-Won Nam

Abstract This study performed an experimental study for air-tightness performance evaluation of concrete tube structures with joints. The test specimens consist of a continuous concrete tube, a concrete tube with a joint in the middle, and a segmented concrete tube. The test is performed in such a way that the inner pressure of the tube is dropped down to 0.1atm and the increase of the pressure is monitored with time. An equivalent air permeability is then calculated based on the test results. The results show that, as expected, a structure with more joints or bonds tends to be less air-tight. A sensitivity study shows that the system air-tightness performance level becomes higher as either the diameter or the thickness of the tube increases. Moreover, the increase in the diameter or the thickness of the tube makes an effort to enhance the air-tightness more effective.

Keywords : Vacuum tube with joints, System air permeability, Segmented tube, Air-tightness of joints

초 록 본 논문에서는 시공이음 및 세그먼트 연결부 등 불연속 구간을 포함하고 있는 튜브 구조물에 대한 기밀성 평가를 위해 실험에 기초한 연구를 수행하였다. 실제 진공튜브 시스템을 위해 적용 가능한 콘크리트 라이닝을 최대한 모사할 수 있도록 콘크리트 관 1개로 구성된 일체형 튜브(N1) 1기, 동 콘크리트 관 두 개를 연결시킨 연결식 튜브 시험체(N2) 1기, 그리고 콘크리트 세그먼트형 튜브(S) 1기 등 총 3기의 시험체를 제작하여 각 시험체에 대해 내부 기압을 0.1atm로 낮춘 후 시간에 따른 내부 기압의 변화를 측정하였다. 기밀성 실험 결과 얻어진 흐름 곡선으로부터 시스템의 등가 투기계수를 산출하였는데 이음부가 많을수록 시스템의 등가투기계수는 높아지는 경향을 보였다. 또한 실험 결과를 바탕으로 가정된 튜브 단면 변화에 따른 기밀성의 민감도를 해석적으로 분석하였는데 튜브 구조물의 두께 및 직경이 커질수록 시스템 기밀성이 더 향상될 뿐 아니라 기밀성 보강의 효과가 더욱 커진다는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 진공튜브이음부, 시스템 투기계수, 세그먼트 튜브, 이음부 기밀성

1. 서 론

밀폐된 튜브 형태 구조물 내부의 기압을 낮추어 열차의 빠른 속도를 구현할 수 있는 초고속 튜브 철도 시스템은 인프라 측면에서 볼 때 내부의 기압을 일정시간 유지할 수 있는 기밀성 확보가 무엇보다 중요한 요건이라 할 수 있다. 시스템의 기밀성이 부족하여 외부의 공기가 쉽게 유입된다면 내부의 기압을 낮추기 위해 필요한 진공 펌프의 용량 및 개수가 늘어나 경제성 측면에서 매우 불리해지기 때문이다. 튜브 구조물의 기밀성 확보를 위해서는 첫째로 구조 재료의 기밀성 확보가 선행되어야 하겠지만 실제 진공튜브 시스템을 구축했을 때 재료의 기밀화만으로는 튜브 내부 압력을 유지

하기에 충분치 않다. 먼저 진공튜브는 일반적으로 장거리 노선을 목적으로 한다는 점을 고려할 때 튜브 구조물 시공 시 많은 수의 시공이음이 발생하게 될 것이며 또한 터널에 설치될 경우 세그먼트 및 록볼트 등의 체결장치를 위한 구멍 등 진공튜브 표면 및 단면에 불연속 구간이 발생하게 되는데, 이러한 부분에서 공기유입이 발생할 수 있기 때문이다. 또 한 가지 고려하여야 할 사항은 외부와의 인터페이스인데, 승객 승하차를 위한 에어락(Air-Lock) 시스템, 외부 환기구 등이 이에 속하며 이에 대한 기밀성 확보를 위한 대책 마련이 반드시 필요하다 하겠다. 이상 언급한 세 가지 분야의 기밀성-재료, 이음, 인터페이스 중 첫 번째 재료 측면에서의 기밀성능 평가는 동반논문[1]에서 콘크리트 시편의 투기시험 및 내부 압력 변화의 흐름 해석에서 다루었는데, 이에 따르면 진공튜브 내부 압력을 0.1atm로 낮춘 후 시간 t 의 흐름에 따라 구조물의 표면을 투과하는 공기 유입에 의하여 변화되는 내부 압력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 철도구조연구실
E-mail : joonam.park@gmail.com

¹한국철도기술연구원 철도구조연구실

²한국철도기술연구원 철도환경연구실

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

여기서,

V = 구조물 내부의 체적 (m^3)

P_o = 외부 압력(Outside Pressure, N/m^2)

P_i = 내부 압력(Inside Pressure, N/m^2)

k = 구조물 재료의 고유투기계수(m^2)

μ = 유체의 점성계수(Viscosity, $N \cdot s/m^2$)

A = 유체 투과 면적(Area to Flow, m^2)

h = 유체 투과 두께(thickness of the structure, m)

위의 식은 밀폐 구조물을 이루고 있는 다공 매체(porous media)의 재료 특성에 따른 투과만을 고려하여 Darcy의 법칙[2]에 의거하여 이론적으로 도출한 식으로 구조물이 시공 이음 등의 불연속면이 없이 전체적으로 균질한 상태로 완벽한 밀폐를 이루고 있을 때 적용된다. 하지만 앞서 말한 바와 같이 실제 구조물에서는 시공이음 등의 불연속면이 존재하게 되는데 이로 인해 시간 당 실제 구조물 내부로 유입되는 공기의 양을 나타내는 j 는 이론식보다 높은 값을 가지게 될 것이다 (Fig. 1 참조). 이 경우 위의 식에서 재료의 고유투기계수 k 를 시스템 특성을 반영한 등가투기계수 k_{eff} ($\geq k$)로 나타낸다면 불연속면에 의한 공기 유입을 포함한 흐름을 묘사할 수 있을 것이다. 불연속면에서의 공기유입을 고려한 등가투기계수는 시스템 구성에 따라 다르며 많은 불확실성을 내재하고 있으므로 이를 이론적으로 구할 수는 없으며 실험을 통하여 자료를 구축해야 할 것이다. 콘크리트 구조물 또는 암반의 누수에 관한 연구나 누기와 관련해서 고압의 기체를 내재한 경우에 대한 연구는 다수 존재하지만[3-7], 내부의 진공을 유지하는 것을 목적으로 하는 기밀성 관련 연구는 수행된 바가 없다.

본 논문에서는 시공 상의 불연속 구간에 대한 기밀성 평가를 위해 실험에 기초한 연구를 수행하였다. 진공 튜브 구조물의 시스템 측면에서의 기밀성능을 예측, 평가하기 위하

여 실제 터널 상태를 최대한 가깝게 모사하기 위해 터널의 형식 별로 시험체를 제작하였는데, 콘크리트 관 1개로 구성된 일체형 튜브 1기, 일체형 튜브 2개를 연결시킨 연결식 튜브 시험체 1기, 그리고 마지막으로 콘크리트 세그먼트형 튜브 1기 등 총 3기의 시험체를 제작하였다. 그 후 각 시험체에 진공펌프를 연결, 가동하여 내부 기압을 낮춘 후 시간에 따른 내부 기압의 변화를 관찰하였으며 실험 결과 얻어진 흐름 곡선으로부터 시스템의 등가 투기계수를 산출하였다.

2. 실험 개요

앞서 말한 바와 같이 기밀성능 평가 실험을 위한 시험체는 실제 진공튜브 시스템을 위해 적용 가능한 콘크리트 라이닝을 최대한 모사할 수 있도록 제작하였다(Fig. 2). 먼저 $1,800 \times 160 \times 2,430$ (내경*두께*길이) 콘크리트 관 1개로 구성된 일체형 튜브(N1)는 개착구간에서 적용할 수 있는 형태의 튜브 또는 NATM 터널의 콘크리트 라이닝을 모사하고, 동 콘크리트 관 두 개를 연결시킨 연결식 튜브 시험체(N2)는 이러한 튜브의 시공이음을 모사한다. 그리고 마지막으로 $1,800 \times 150 \times 2,250$ (내경*두께*길이) 콘크리트 세그먼트형 튜브(S)는 TBM 공법 적용 시 쉴드터널의 세그먼트 구조를 모사하기 위해 제작되었다. 각 시험체의 규격 및 기호는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같으며 N1과 N2 시험체의 콘크리트 압축강도는 $68.7MPa$, S 시험체의 압축강도는 $41.2MPa$ 이고 시험체의 중량은 N1이 6ton, N2가 12ton, 그리고 S가 5.1ton 이다. 각 시험체는 전력구 등의 지하 매설용 관으로 사용되는 양산품을 활용하였는데 선택할 수 있는 압축강도의 범위가 넓지 않아 불가피하게 서로 다른 규격 및 압축강도를 가지게 되었지만 각각의 실험에서 구해진 등가투기계수 및 이론식을 활용하여 이를 보정한 후 서로 비교하였다.

실험 수행을 통해 시스템 등가 투기계수를 구하기 위해서는 튜브 구조 재료 및 이음부분에서의 투기만을 허용하여야 한다. 그러기 위해서는 튜브 앞·뒤에서의 공기유입을 철저히 차단할 필요가 있는데 이러한 튜브 단부의 기밀을 위해서 튜브 외경과 같은 직경을 가지는 두께 10mm의 원형 강판을 제작해서 튜브의 전·후면에 부착하였다. 강판과 튜브 접합면에서의 공기 누설을 방지하기 위해 강판과 구조물 면 사이에 두께 10mm의 고무판을 댄 후 강판, 고무판 및 구조면에 실리콘 접합을 하였으며 최종적으로 볼트로 접합 고정하였다. N1 시험체 두 개를 서로 이은 N2 시험체의 경우 각 튜브의 단면에 실리콘 처리를 하여 단순 접합하였으며 S 시험체의 경우 세그먼트끼리 볼트로 접합을 하게 되어 있는데 각 접합면에는 볼트 이외에 지수재 처리가 되어 있어 수분이 유입될 경우 지수재가 팽창하여 유격된 면을 메워주게 되어 있다 (Fig. 3 참조). 하지만 튜브 구조의 특성 상 한 단계 높은 기밀처리가 예상되므로 종방향 및 횡방향 접합면에 추가로 실리콘 처리를 하였다. 또한 본 실험에서는 콘크리트 재료 및 이음부의 영향에 의한 시스템의 기밀성능 평가를 수행한 후 추가로 콘크리트 표면에 방수재 처리를 한 후의 시스템 기밀성능 평가도 실시하여 방수재 적용의 효과 또

Fig. 1 Air leakage at discontinuous regions

(a) N1

NATM터널 시공이음 모사 $\phi 2,120 * 160 * 2,430 * 2EA$ 무게 12ton

(b) N2

Shield 터널 모사 $\phi 2,100 * 150 * 750$ 무게 1.7ton/ring --> 3열 5.1ton

(c) S

Fig. 2 Test structures

한 검증하고자 하였다. 따라서 일차로 방수재 처리를 하지 않은 시험체에 대해 실험 수행 후 내부 표면에 2차 실험을 위한 방수재를 도포할 수 있게 하기 위하여 단부에 설치된 강판에 출입문을 설치하였으며(Fig. 2(a) 참조) 강판과 마찬가지로 출입문의 기밀처리를 위해서 고무판 및 실리콘, 그리고 볼트를 이용하여 접합 고정하였다.

제작된 시험체는 강판 위에 연결구를 제작하여 Fig. 4과 같이 진공펌프 및 내부압력 계측기와 연결하게 하였다. 단 진공펌프를 가동하여 튜브 내부의 기압을 급격히 낮출 경우 진공튜브 내부에 있던 공기가 흡입구를 통해 빠져 나가면서

튜브 내부 공기의 유동이 생길 수 있으며 이에 따라서 계측기에서 읽는 내부 압력의 값이 영향을 받을 수 있다. 따라서 이에 따른 오차를 줄이기 위해 계측기는 각 단부에 하나씩 총 두 개를 설치하여 두 군데에서의 계측값의 평균을 택하도록 하였으며 계측은 내부 압력의 변화를 매 10초마다 기록하게 하였다. 실험에 사용된 진공펌프는 기계식 용적형 수봉식 펌프이며 1.0atm부터 0.1atm까지의 압력 범위 내에서 약 340m³/h의 유량을 생성할 수 있는 용량을 갖추고 있다(Fig. 5 참조).

이와 같이 시험체 제작 및 세팅 완료 후 실험을 수행하였

Fig. 3 Connection of segment structure (S)

Fig. 4 Test set-up

는데, 기밀처리된 각 시험체에 진공펌프와 계측센서를 연결시킨 후 진공펌프를 가동시켜 내부 공기를 빼 기압을 낮추고 내부 기압이 0.1atm 이하로 떨어지면 진공펌프를 끄고 시험체 흡입구 밸브를 잠근 후 시간에 따른 내부 기압의 변화를 측정하였으며 모든 실험은 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도 범위 내에서 수행되었다. 또한 각 시험체에 대해 1회 실험 후 앞서 말한 바와 같이 방수재의 기밀효과를 평가하기 위해 시험체 내부에 방수재를 도포한 후 실험을 반복하였는데 실험에 쓰인 방수재는 에폭시 수지를 주전색제로 한 폴리아마이드 에폭시 도료로서 콘크리트 시설물의 방수에 주로 쓰이는 제품이다.

3. 실험 결과

Fig. 6은 실험 결과에 따른 각 시험체의 내부 기압 변화를 나타낸 그래프이다. 내부 기압이 0.1atm일 때부터 시간영점을 잡아 계측을 하였으며 최대한 내부기압이 대기압에 가까울 때까지 기록을 하였으나 실험 장소의 현장 여건 상 충분한 시간을 확보 못해 0.7atm 정도까지 계측한 경우도 있었다. 하지만 도출된 이론식과 병행하여 전반적인 경향을 분석에는 충분할 것으로 판단된다. 또한 앞서 말한 바와 같이 시험체 양단에 각 하나씩 총 두 개의 압력 계측기를 설치하여 압력을 측정했는데 두 값의 차이는 1% 미만으로 거의

Fig. 5 Capacity and power of vacuum pump used for test

동일한 값을 보였다. 이는 진공펌프의 가동으로 인한 튜브 내부의 공기 유동이 거의 없었다는 것을 보여주며 진공펌프가 공기 유동을 일으키기에 필요한 용량을 갖추지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

3.1 N1 시험체

N1 시험체의 경우 방수처리 전 시험체에 대한 실험 결과를 보면 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 외부 공기의 침투로 인해 내부 기압이 0.1atm에서 0.8atm까지 상승하는데 약 60시간이 소요되었다. 이와 비교하여 N1 시험체에 방수처리를 한 후에 실험을 수행한 결과 60시간 경과 후 내부 기압이 약 0.65atm까지 상승하는 데 그쳤다. 이는 방수처리로 인하여 시스템의 기밀성능이 향상되었다는 것을 의미한다. 두 시스템의 기밀성능은 앞서 언급한 바와 같이 시스템의 등가투기계수를 통해 정량적으로 비교할 수 있는데, 실험 결과 얻은 그래프로부터 시스템 등가 투기계수를 구하기 위해 시험체 구성에 해당하는 입력값을 식(1)에 대입한 후 투기계수를 변화시켜 가면서 실험 결과 그래프와 곡선적합(curve fitting)을 시행하였다. 그 결과 Fig. 6(a), (b)에서 보는 바와 같이 N1 시험체의 등가투기계수는 비방수시험체가 $1.18 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 방수 시험체가 $8.40 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 로 산정되었다. 투기계수만 생각을 해보면 방수처리를 함으로 인해서 투기계수가 약 28.8%가 감소되었다. 투기계수는 시스템의 기밀성능과 밀접한 관계가 있는데, Fig. 7은 N1 시험체와 같은 치수를 가지는 구조물 내부의 압력을 0.1atm로 내린 후 내부 압력이 0.2atm까지 상승하는데 소요되는 시간을 투기계수 값에 따라 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 보면 투기계수와 상승 소요 시간이 반비례 관계를 가지며 투기계수가 낮을수록 그래프의 기울기가 급격히 높아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 투기계수가 낮을수록 투기계수가 시스템의 기밀성에 미치는 영향이 크다는 것을 나타낸다. N1 시험체에 대한 실험에서 산출된 투기계수를 적용해 보면 내부 압력이 0.2atm까지 상승하는데 소요되는 시간은 비방수시험체가 6.25시간

Fig. 6 Pressure change with time for each test structure

인데 비해 방수 적용 시험체가 8.78시간으로 약 40% 정도 증가하는 것으로 나타난다. 다시 말하면 내부 압력 0.2atm 까지의 상승 소요 시간을 기준으로 볼 때 방수재의 적용으로 시스템의 기밀성이 약 40%정도 향상된다고 할 수 있다.

N2, S 시험체와 달리 N1 시험체는 구조적 이음이 없는데, 이는 앞, 뒤 격벽의 기밀처리가 완벽하다는 전제 하에 시스

템의 기밀성은 구조재료 자체의 기밀성으로 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 실험에서 얻은 투기계수는 콘크리트 재료의 투기계수와 같다고 할 수 있다. 동반 논문에서 수행한 콘크리트 재료 투기계수 실험에서 얻어진 결과와 N1 시험체에 대한 투기 실험의 결과로 얻은 투기계수를 하나의 그래프 상에서 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는

Fig. 7 Pressure change with time for the test structure

Fig. 8 Trend of intrinsic air permeability

바와 같이 N1 시험체 실험에서 산정된 투기계수는 시편 실험에서 도출된 콘크리트 강도에 따른 투기계수 경향과 일치하는 것을 볼 수 있다.

3.2 S 시험체

S 시험체의 경우 방수 처리 전의 시스템 투기계수가 $1.20 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 로 N1에 비해 상당히 높게 나타났는데 이는 세그먼트 터널 구조의 특성 상 이음부가 많아 예상이 가능했던 부분이었다. 방수처리를 한 후에는 등가투기계수가 $6.80 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 로 방수처리 전에 비해 43% 정도 감소되어 역시 기밀성능 향상 효과를 볼 수 있었으며 내부 기압 0.2atm 도달 소요 시간을 보면 비방수시험체가 0.61시간, 그리고 비방수 적용 시험체가 1.08시간으로 약 76% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 도달 소요 시간 증가율만을 볼 때에는 N1 시험체에 비해 방수처리 효과가 더 큰 것으로 보이지만 내부 기압 상승 소요 시간의 값 자체를 보면 N1 시험체의 값이 절대적으로 크며 기밀효과가 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. N1과 S 시험체의 기밀성의 차이는 이음부의 존재여부 이외에도 제작된 콘크리트 강도가 다르므로 이 두 가지 요인이 복합적으로 작용했기 때문이다.

그런데 N1 시험체의 경우 투기계수를 조정하여 이론 곡선을 실험곡선과 거의 일치하게 할 수 있었던 것과 비교하면 S 시험체에 대한 실험 결과로 나온 압력상승곡선은 곡선적합을 통해 맞춘 이론곡선과 정확히 일치하지 않는다는 것을 볼 수 있다. 이는 튜브 내부 압력 상승 경로가 공기의

(a) sensitivity to tube diameter

(a) sensitivity to tube thickness

Fig. 9 Sensitivity plot of pressure change to tube parameters

재료 자체 투과 이외에 이음부 누설도 존재하기 때문으로 판단되는데, 이러한 이음부는 구조물 내부의 압력수준에 따라서 밀착성이 달라질 수 있기 때문이다. 즉, 초기에 내부압력이 낮은 수준에서는 상대적으로 이음부의 밀착성이 높지만 내부의 압력이 서서히 높아지면서 이러한 이음부의 밀착성이 차차 낮아지며 그에 따라 누설 경향도 달라진다는 것이다. 실제로 실험 도중 낮은 내부압력에서는 공기의 누설음이 들리지 않다가 압력이 높아져 대기압 수준에 가까워짐에 따라서 공기 누설음이 들리기 시작하는 이음부가 다수 관찰되었다. 이러한 현상은 비교적 작은 규모인 본 실험의 특성 상 나타난 것일 수도 있으며 실제 터널시공을 통해 튜브 구조물이 제작된다면 여러 가지 현장 여건에 따라서 이러한 압력에 따른 이음부의 밀착성 변화가 다른 양상으로 나타날 수 있을 것이다. 이러한 내부 압력 조건에 따른 이음부의 밀착성 변화 및 투기성의 변화는 식(1)에서 투기계수 k 가 더 이상 상수가 아닌 변수가 된다는 것을 의미한다. 이 경우 k 는 내부 압력에 따른 변수가 될 것이며 식(1)의 적용을 위해서는 k 와 내부 압력과의 관계 수립이 선행되어야 하는데, 이를 일반화하기 위해서는 구조물의 구성, 체형, 시공 상태 등이 복합적으로 고려되어야 할 것이기에 향후 추가 연구행이 필요한 분야라 판단된다. 본 연구에서는 이를 고

려하지 않고 계측된 데이터에 최대한 가까운 곡선을 제시하는 등가 k(상수)를 구했다는 점을 밝혀둔다.

3.3 N2 시험체

N2 시험체에 대한 실험 결과 얻은 등가 투기계수는 $2.60 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 로 N1 시험체에 비해서는 높은 수준으로 나타났으며 N1 시험체에 비해 약 120% 정도 증가가 되었다. 이는 기밀성의 저하를 뜻하며 역시 이음부의 존재로 인한 것으로 판단된다. 방수처리를 한 후에는 등가투기계수가 $2.22 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 로 방수처리 전에 비해 14.6% 정도 감소되어 역시 기밀성 향상 효과를 볼 수 있었으며 내부 기압 0.2atm 도달 소요 시간을 보면 비방수시험체가 2.84시간, 그리고 비방수 적용 시험체가 3.32시간으로 약 17.1% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 실험 결과를 분석하면 N1 시험체에 비해 방수처리의 효과가 비교적 적은 것을 볼 수 있는데, 이는 방수처리는 재료의 투기성만을 감소시키며 이음부의 누설은 방지를 못하기 때문이다. 또 한 가지 특이할 만한 사항은 N2 시험체도 S 시험체와 같이 이음부의 존재로 인하여 압력 수준에 따라서 기밀경향이 다소 달라지는 것을 볼 수 있었는데 이러한 경향은 N2 방수 시험체에 더 심하게 나타났다. 이는 내부 방수 시공을 위해서 격벽 문을 열고 사람이 출입을 하면서 거치목에 올려져 있는 시험체에 휨하중이 발생해 가운데 이음부의 일부에 유격이 생겼기 때문인 것으로 추측된다. 실제로 실험 도중 내부 압력을 낮추었을 때 이음부의 밀착력이 강화되어 이음부에 도포한 실리콘이 밖으로 밀려나오는 현상이 관찰되었다. 앞서 언급한 바와 같이 이런

현상은 실험 여건의 특수성에 영향을 많이 받으며 실제 시공 시에는 현장 여건 및 시공 방법에 따라 그 정도가 달라질 수 있을 것이다.

위에서 실험을 수행한 N1, N2, S 시험체의 방수 전 및 방수 후의 내부압력 변화 그래프에서 보이는 바와 같이 내부압력 상승 속도는 N1_WP가 가장 낮게 나타났으며 그 다음으로 N1, N2_WP, N2, S_WP, S의 순서로 나타났다. 또한 모든 시험체에 대해 방수처리를 할 경우 기밀성 향상 효과를 볼 수 있었다.

4. 시뮬레이션을 통한 민감도 해석

개념 연구가 진행되고 있는 현 시점은 아직 진공튜브 구조물의 단면이 확정되지 않은 상태이며 차량의 규모, 가이드 웨이의 종류 및 상세, 단/복선 여부, 시공 상의 문제 등에 대한 연구가 선행된 후에야 진공튜브 구조물의 단면을 결정할 수 있을 것이다. 따라서 실제로 초고속 튜브 시스템을 위해 진공펌프의 용량 및 설치 간격을 결정할 때에는 0.1atm로 낮추어진 튜브 내부의 기압이 1.0atm까지 올라가는 시간보다는 펌프를 재가동 시켜야 하는 시점까지 소요되는 시간이 더욱 중요하다고 할 수 있다. 펌프 재가동 시점을 어느 수준으로 정해야 하는 것은 열차의 추진력과 공기 저항, 그리고 그에 따른 에너지 소비량을 종합적으로 고려하여 판단하여야 할 문제일 것이다. 따라서 본 연구에서는 초고속 튜브 시스템의 단면을 가정한 후 실험 결과로 얻은 콘크리트 튜브 구조물의 기밀성능(또는 투기성)을 바탕으로 초고속 튜

Fig. 10 Estimated time for pressure change upon different diameters

Fig. 11 Estimated time for pressure change upon different thicknesses

브 시스템의 기밀성능을 평가하였으며 내부 직경 5m, 두께 30cm의 원형 단면을 기본 가정 단면으로 정의하였다. 그 후 실제 설계 시 단면의 변화를 고려하여 단면 인자를 변화시켜가며 그에 따른 시스템 기밀성능 변화의 민감도를 관찰하였는데 Fig. 9는 N1 시험체에 대해 튜브 두께 및 두께를 변화시켰을 때 시간에 따른 내부 압력 증가의 추이가 어떻게 변화하는지를 나타낸 그래프이다. 보는 바와 같이 직경이 커질수록, 그리고 두께가 두꺼워질수록 기압 상승 속도는 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 방법으로 모든 시험체에 대하여 민감도 해석을 수행하였는데, Fig. 10은 튜브 두께를 30cm로 고정된 채 튜브 내부 직경을 1m에서 10m까지 변화시켜 가면서 그에 따라 각 실험 결과로 얻어진 등가투기계수를 적용한 시스템의 내부 기압이 일정 수준 도달하는데 소요되는 시간을 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과 튜브 내부 직경이 증가함에 따라서 내부 기압의 일정 수준 도달 소요 시간도 대체로 선형 비례 증가하는 것으로 나타났다. 이는 내부 직경이 커짐에 따라서 내부 체적은 직경 증가의 세제곱으로 증가하지만 외부 공기의 유입 경로인 튜브 표면의 면적은 제곱 비례하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 다른 조건이 동일할 경우 튜브의 내부 직경이 클수록 기밀성능 향상에 유리하다 할 수 있다. 또 한 가지 흥미로운 사실은 투기계수가 낮은 경우일수록 내부직경의 변화에 따른 기밀성 변화의 민감도가 더 크게 나타났다는 것이다. 따라서 내부 직경이 클수록 투기계수 감소에 따른 기밀성 향상 효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 튜브 내부 직경은 5m로 고정시킨 채 튜브의 두께를 10cm에서 60cm까지 증가시켜 가면서 그에 따른 시스템의 내부 기압 변화 소요 시간을 나타낸 그래프이다. 튜브 내부 직경에 대한 민감도 분석과 마찬가지로 튜브의 두께와 내부 기압 변화 소요 시간은 대체로 선형 비례하는 것으로 나타났다. 또한 두께가 두꺼울수록 기밀성 변화의 민감도가 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 10과 함께 생각해 보면 내부 직경이 클수록, 그리고 두께가 두꺼울수록 기밀성이 더 향상될 뿐 아니라 기밀성 보강을 위한 대책을 적용할 때의 효과, 즉 투기계수 감소의 효과가 더욱 커진다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 시공이음 및 세그먼트 연결부 등 불연속 구간을 포함하고 있는 튜브 구조물에 대한 기밀성 평가를 위해 실험에 기초한 연구를 수행하였다. 진공 튜브 구조물의 시스템 측면에서의 기밀성능을 예측, 평가하기 위하여 실제 터널 상태를 최대한 가깝게 모사하기 위해 터널의 형식 별로 시험체를 제작하여 기밀성 실험을 수행한 후 실험 결과 얻어진 흐름 곡선으로부터 시스템의 등가 투기계수를 산출하였다. 또한 이를 바탕으로 튜브 단면의 변화에 따른 기밀성의 민감도를 해석적으로 분석하였으며 실험 및 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 기밀성 평가 실험 결과 예상했던 바와 같이 일체형 튜

브, 시공이음 포함 튜브, 세그먼트 튜브의 순서로 기밀성능을 가지고 있는 것으로 나타났다. 재료의 투기성(기밀성) 이외에도 구조물의 시스템 구성에 따라서 시스템 수준의 투기성이 결정되며, 이음 및 연결부의 개수가 많을수록 시스템의 기밀성은 감소되는 경향이 있었으므로 세그먼트 터널과 같이 이음매가 많은 형식을 택할 경우 이음매 부분의 주의 깊은 기밀처리가 요구된다. 또한 시공이음 및 접합부 등의 이음부가 존재하는 구조물의 경우 구조물 내부의 압력수준에 따라서 이음부의 밀착성이 달라져 내부 압력이 누기에 다소 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 이는 시스템의 등가투기계수가 내부 압력에 따른 변수가 된다는 것을 의미하는데 이러한 현상을 일반화하기 위해서는 구조물의 특성 및 불확실성 등을 복합적으로 고려하는 향후 추가 연구수행이 필요할 것으로 사료된다.

(2) 방수재 시공 시 튜브 구조물의 기밀성능이 약 17%에서 76%까지 향상되는 것으로 나타났으므로 시공성 및 내구성을 고려하여 방수재를 선택, 적용하는 것이 권유되며, 이와 더불어 기밀성 향상을 위해 방수 멤브레인 등의 추가 재료를 콘크리트와 함께 적용하는 방안에 대한 고려가 필요하다.

(3) 구조물의 내부 직경 및 두께가 클수록 기밀성능이 향상되지만 이는 열차의 속도에 따른 공기저항 및 필요 추진력의 함수이기도 하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 큰 내경은 공사비의 증가를 초래하므로 콘크리트 구조물의 내경을 결정할 때에는 이러한 여러 가지 영향을 고려한 종합적 평가가 선행되어야 할 것이다.

(4) 튜브 내부 직경 및 두께에 대한 민감도 분석 결과 내부 직경이 클수록, 그리고 두께가 두꺼울수록 기밀성이 더 향상될 뿐 아니라 기밀성 보강을 위한 대책을 적용할 때 그 효과가 더욱 커진다는 것을 알 수 있다.

(5) 본 연구에서 수행된 실험은 시공 후 단기간 내에 시행된 것으로 콘크리트의 장기적인 사용 및 건조수축 등에 따른 균열 발생에 대한 영향은 고려되지 않았다. 따라서 향후 연구 수행에 있어서 이러한 장기영향에 따른 기밀성 감소 효과를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] J. Park, S-W. Nam, L-H. Kim, I, Yeo (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*, 14(2), pp. 143-150.
- [2] Mehta, P. and Monteiro, P. (2005) Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill.
- [3] K-M, Chang (1998) Numerical Experiments on the Evaluation of Effective Permeability and Tunnel Excavation in the Three

- Dimensional Fracture Network Model, Tunnel & Underground, 8(4), pp. 275-286.
- [4] A. Ziari, M.R. Kianoush, (2009) Investigation of flexural cracking and leakage in RC liquid containing structures, Engineering Structures, 31(5), pp. 1056-1067.
- [5] Y. Billard, G. Debicki, L. Coudert (2005) Leakage rate through a non-cracked concrete wall, comparison between two situations: Air pressure test and accident conditions, Nuclear engineering and design, 235(17-19), pp. 2109-2123.
- [6] X.F. Song, J.F. Wei, T.S.H. He (2009) A method to repair concrete leakage through cracks by synthesizing super-absorbent resin in situ, Construction & Building Materials, 23(1), pp. 386-391.
- [7] K. Okamoto, S. Hayakawa, R. Kamimura (1995) Experimental study of air leakage from cracks in reinforced concrete walls, Nuclear engineering and design, 156(1/2), pp. 159-165.
- 접수일(2010년 12월 17일), 수정일(2011년 3월 1일),
게재확정일(2011년 3월 20일)