

## 콘크리트 진공튜브의 압력 변화에 대한 확률적 평가

### Probabilistic Study on Pressure Behavior in Concrete Vacuum Tube Structures

박주남\*

Joonam Park

**Abstract** In this paper, a reliability analysis is performed where the pressure change inside a concrete tube is probabilistically estimated considering the uncertainties inherent in the material and the system discontinuity. A set of uncertain quantities related to the equivalent system air permeability and the atmospheric pressure, are defined as random variables with specific distribution. The pressure change inside a concrete tube is then probabilistically described using both analytical and simulation approaches. The reliability analysis confirms that the geometric configuration of a concrete tube needs to be changed from the initial configuration obtained from the deterministic analysis.

**Keywords** : Vacuum tube, Reliability analysis, Concrete tube, Air-tightness

**초 록** 본 연구에서는 콘크리트 진공튜브 구조의 설계에 있어서 주어진 재료 및 시스템 구성에서 존재하는 불확실성을 정량화하여 내부기압의 변화를 확률적으로 예측할 수 있는 신뢰성 평가를 수행하였다. 시스템 등가투기계수의 산정 및 외부기압에 영향을 주는 인자들 중 불확실성을 내재하고 있는 인자들을 확률변수로 모델링한 후 수식 유도 및 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 내부기압의 변화를 확률적으로 예측하였으며 확정적 해석과 그 결과를 비교 분석한 결과 적정 수준의 신뢰성을 얻기 위해서는 단면의 변화가 반드시 필요한 것으로 나타났다. 이와 같은 튜브구조의 기밀성능에 대한 확률적 해석 결과는 튜브 내부를 주행하는 열차 또는 다른 운송수단의 추진력과 공기저항, 그리고 펌프의 용량을 복합적으로 고려하여 목표 압력을 정하고 튜브 단면을 결정하는데 필요한 기술적 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

**주요어** : 진공튜브, 신뢰성 해석, 콘크리트 튜브, 기밀성

## 1. 서 론

진공튜브 구조물은 뉴메틱 운송, 초고속 튜브철도 등과 같이 공기저항을 최소화하여 속도와 효율성을 증진시킬 수 있는 미래형 운송시스템에 필수적인 구조 형태이다[1,2]. 튜브 내부의 압력을 진공 또는 아진공으로 조절 및 유지해야 하는 시스템 특성 상 튜브 구조물의 기밀성 확보는 인프라 측면에서 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 콘크리트를 주재료로 한 튜브 구조물의 기밀성능을 실험 및 해석적으로 평가한 최근의 연구[3-5]에 의하면 등가 투기계수로 표현되는 시스템의 기밀성은 콘크리트의 강도가 클수록 좋아지며 튜브 구조물의 직경과 두께에 비례하고 또한 기밀성 향상을 위한 대책 적용 시의 효율성도 증가한다는 것으로 나타난 바 있는데, 이와 같이 정량화된 진공튜브 시스템의 기밀성능은 펌프의 용량, 건설비 및 유지관리 등을 복합적으로 감안하여 설계를 위한 입력 자료로 활용되어야 한다. 하지만 콘크리트는 입자의 크기와 모양을 가진 골재를 다량 함유하고 있

는 비균질성 재료이며 배합 및 양생 시의 환경에 따라 투기성과 직접적 관계가 있는 공극의 편차가 존재하기 때문에 설계단계에서 재료적 기밀성을 일정하게 정하기에는 무리가 따른다. 또한 시스템 기밀성에 영향을 줄 수 있는 시공이음 등의 여러 가지 불연속 이음이 존재하기 때문에 시스템 차원의 기밀성을 예측하기는 더욱 힘들다고 할 수 있다. 이런 측면에서 볼 때 콘크리트의 재료적 특성이나 시공상의 불연속 이음에 의한 기밀성(투기성)의 변화는 설계단계에서 확정적으로 예측할 수 없으며 여러 가지 환경의 영향에 기인한 높은 불확실성을 함유하고 있다고 할 수 있다. 따라서 콘크리트 튜브구조의 단면 및 진공펌프 용량 결정 등 시스템 설계에 있어서 의사결정을 위한 공학적 기본 자료로서의 기밀성능 평가는 불확실성을 정량적으로 고려한 신뢰성 해석을 통하는 것이 합리적일 것이다.

본 연구에서는 콘크리트 진공튜브 구조의 설계에 있어서 주어진 재료 및 시스템 구성에서 존재하는 불확실성을 정량화하여 내부기압의 변화를 확률적으로 예측할 수 있는 신뢰성 평가를 수행하였다. 시스템 등가투기계수의 산정에 영향을 주는 인자들 중 불확실성을 내재하고 있는 인자들을 확률변수로 모델링한 후 수식 유도 및 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 내부기압의 변화를 확률적으로 예측하였다.

\*Corresponding author.

Tel.: +82-63-850-6724, E-mail : joonam.park@gmail.com

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.186

## 2. 불확실성 고려

밀폐 튜브의 내부압력변화에 대한 이전 연구에 따르면, 진공튜브 내부압력을 목표치로 낮춘 후 시간  $t$ 의 흐름에 따라 구조물의 표면을 투과하는 공기 유입에 의해 변화되는 내부 압력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $V$  = 구조물 내부의 체적 ( $m^3$ )

$P_o$  = 외부 압력(Pressure outside the structure,  $N/m^2$ )

$P_i$  = 내부 압력(Pressure inside the structure,  $N/m^2$ )

$k$  = 구조물 재료의 고유투기계수( $m^2$ )

$\mu$  = 유체의 동점성도(Dynamic Viscosity,  $Ns/m^2$ )

$A$  = 유체 투과 면적(Area to Flow,  $m^2$ )

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

$C_1$  = 튜브의 초기조건에 따라 결정되는 상수

식 (1)에서 보는 바와 같이 시간에 따른 진공튜브 내부 압력의 변화는 구조물의 단면, 재료의 투기계수, 튜브 내부/외부 압력 등의 인자에 영향을 받는다. 콘크리트 튜브 시스템 기밀성능 평가를 위한 신뢰성 해석을 위해서는 불확실성의 근원을 파악한 후 이와 관계되는 인자를 확률변수로 모델링할 필요가 있다. 진공튜브 시스템의 기밀성능에 관련된 불확실성의 근원에는 튜브구조와 관련된 인자 이외에도 외부의 기압, 진공펌프의 성능, 수송매체의 영향 등이 모두 포함되겠으나 이 중 진공펌프 성능 및 수송매체, 즉 열차의 영향은 따로 설계가 행해져야 하는 별도 요소 시스템이기 때문에 여기서는 튜브 구조물과 외부 기압에 대해서만 생각하기로 한다. 이들 인자들은 상호 의존성이 상대적으로 높지 않아 독립적인 고려가 가능한 것으로 가정할 수 있으므로 향후 펌프 및 수송매체에 대한 설계가 수행될 때 추가로 불확실성을 고려하는 것이 어렵지 않을 것으로 판단된다.

## 2.1 재료

이전 연구에서 콘크리트 재료의 투기계수를 알아보기 위한 실험 수행 시 재료의 불확실성을 고려하기 위해 각 배합 당 다섯 개의 시편을 제작하여 이에 대한 투기계수 실험을 수행한 바가 있는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이 배합별 콘크리트 투기계수의 평균값은 콘크리트 강도에 반비례하는 것으로 나타났지만 각 배합 투기계수의 변동계수는 0.08에서 0.23까지 분포하고 있으며 이 중 한 가지의 배합을 제외하고는 나머지 세 배합에 대해서는 모두 0.2~0.23의 변동계수를 보이고 있다. 관련 연구에 따르면, 콘크리트 압축강도는 대수정규분포를 따른다고 알려져 있으나 투기계수의 경우 확률분포에 대한 자료가 충분치 않고 또한 배합 당 다섯 개의 표본 조사로 예측하는 확률분포의 정확성에는 한계가 있는 점을 감안해 본 연구에서는 재료적 투기계수  $k_m$ 은 실험값 중 불확실성 측면에서 보수적인 0.23의 변동계수를 가진 대수정규분포로 가정하였다.

## 2.2 시스템 불연속성

시공이음 등의 불연속면을 통한 공기 유입으로 인한 투기 효과는 재료 자체의 투기성에 비해 더 큰 것으로 알려져 있다. 이 때 식 (1)의 투기계수  $k$ 는 불연속 이음을 가진 시스템의 특성을 반영한 시스템 등가투기계수  $k_e (\geq k_m)$ 로 나타낼 수 있는데 이는 재료적 투기계수  $k_m$ 과 불연속면에서의 공기 유입을 고려한 등가투기계수  $k_d$ 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$k_e = k_m + k_d \quad (2)$$

여기서  $k_d$ 는 시스템 구성에 따라 변동이 되기 때문에 높은 불확실성을 가지고 있다고 말할 수 있다. 시공 형태를 바꾸어 가며 콘크리트 튜브 구조의 등가투기계수를 실험적으로 도출한 결과[5] 시스템 불연속면을 고려한 시스템 등가투기계수는 불연속 이음면이 증가함에 따라 증가하였으며 심한 경우 세그먼트 방식의 접합시공법을 택하였을 때  $k_d$ 와  $k_m$ 의

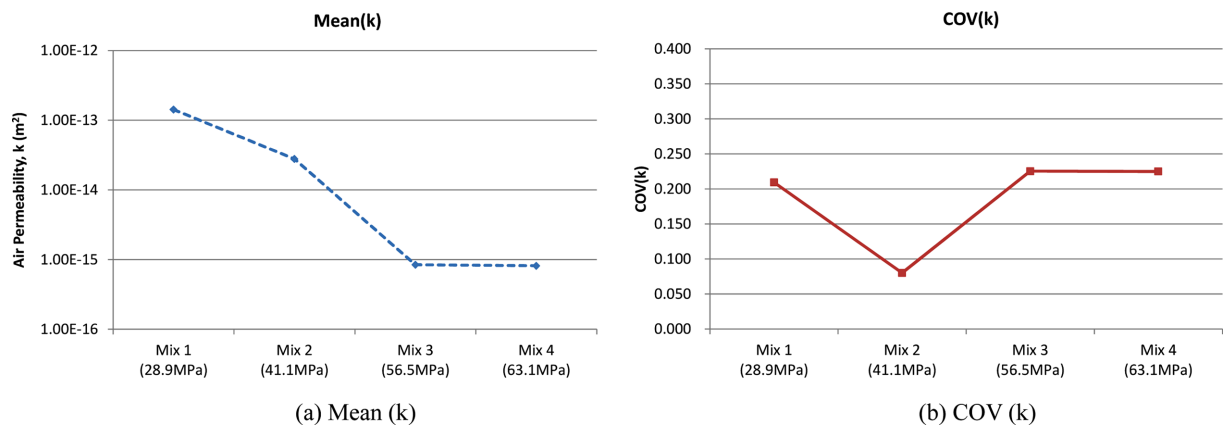


Fig. 1 Air permeability and its COV for different mixtures

비가 9.2까지 증가되는 것으로 나타났다. 다만 실제로 진공 튜브를 건설하게 된다면 기압유지를 염두에 두고 제작할 것이므로 기존의 세그먼트 공법과 같이 불연속면으로 과도한 공기유입이 발생하는 시공방법은 택하지 않을 것이란 전제 하에 단순 시공이음만을 적용했을 경우에 얻어진 투기계수의 비 1.2를 택하였다. 또한 시스템 불연속성에 의한 불확실성은 상대적으로 높을 것으로 판단해  $k_d$ 의 변동계수는  $k_m$  변동계수의 두 배인 0.5를 가진 대수정규분포로 정의하였다.

2.3 외부기압

식 (1)에서 보는 바와 같이 시간에 따른 튜브 내부의 압력변화율은 튜브 구조물 외부의 기압에 따라 달라질 수 있다. 외부 기압은 구조물의 위치, 지상에 설치될 경우 고도, 지중에 매설될 경우 심도에 따라 변화가 발생할 것이며 이 또한 계절과 날씨의 영향도 받기 때문에 확정적으로 예측하기가 어렵다. 고도가 높아질수록 대기압은 감소되어 해발 고도 2000m에서의 대기압은 해수면 기압의 약 80% 정도로 감소된다. 반대로 심도에 따른 기압은 역학적으로 증가하게 되는데, Tan 등에 따르면 심도가 증가함에 따라 온도도 증가하게 되어 이에 따른 공기의 밀도가 감소하여 전체적인 기압은 증가할 수도, 또는 감소할 수도 있게 된다. 이러한 사항들을 종합적으로 고려해 본 연구에서는 튜브구조 외부기압을 표준대기압  $P_s$ (=1013kPa)에서 20%의 변동범위를 가지는 확률변수로 가정하였다. 튜브 외부의 기압  $P_o$ 는 표준대기압  $P_s$ 와의 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_o = \alpha P_s \tag{3}$$

여기서,  $\alpha$ 는 균일분포 U(0.8, 1.2)를 따르는 확률변수이다.

3. 내부압력 변화의 확률적 해석

진공튜브 운송 시스템을 가동하려면 튜브 구조물 내부의 압력을 일정 목표 수준으로 낮추어야 한다. 이러한 목표 압력을  $P_d$ 는 표준대기압  $P_s$ 와의 비를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = \beta P_s \tag{4}$$

여기서  $\beta$ 는 목표압력과 표준대기압과의 비이다. 진공튜브 운송 시스템, 특히 초고속 운송 시스템은 아직 현실적으로 적용된 바는 없지만, 진공튜브 구조물 내부 압력을 조절하는 진공펌프의 용량 및 간격을 결정할 때에는 목표 내부기압  $P_d$ 로 낮추어진 내부 압력이 대기압 수준으로 올라가는 데 소요되는 시간보다는 운송시스템의 운영을 위해 펌프를 재가동 시켜야 하는 한계 시점까지 소요되는 시간이 더욱 중요할 것이다[4,6]. 펌프를 재가동해야 하는 한계압력은 운송 차량의 사양과 공기의 저항, 운행효율 및 비용 등을 종합적으로 고려해 정해야 하겠으나 아직 구체적인 사양이 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 단계별로 한계압력을 정의한

후 각 한계압력에 도달하는 시간을 확률적으로 평가하고자 한다.

펌프 재가동이 필요한 한계압력을  $P_{pr}$ 라고 하고 목표기압  $P_d$ 로 하강된 튜브 내부의 압력이  $P_{pr}$ 까지 상승되는데 소요되는 시간을  $T_{pr}$ 이라고 한다면 목표  $T_{pr}$ 을 단계별로 정의함으로써 튜브 구조의 기밀성 관련 한계상태를 정의할 수 있을 것이다.

먼저 불확실성을 고려하지 않고  $T_{pr}$ 과 시스템 등가투기계수  $k_e$ 와의 관계를 살펴 보면, 식 (1)에서부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$T_{pr} = -\frac{\mu h V}{\alpha A k_e P_s} \ln \left[ \frac{P_{pr} - \alpha P_s}{C_1 (P_{pr} + \alpha P_s)} \right] \tag{5}$$

여기서  $t=0$ 일 때  $P_i = P_d = \beta P_s$ 라는 초기조건을 적용하면  $C_1$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \tag{6}$$

Fig. 2는 직경 5m, 외벽의 두께 0.3m인 튜브 구조물(기본구성)을 대상으로  $\alpha=1.0$ ,  $\beta=0.1$ ,  $P_{pr}=0.2P_s$ 를 적용했을 때(다시 말해 외부압력은 표준대기압과 같고 목표 내부압력은 표준대기압의 10%이며 진공펌프 재가동 한계압력이 표준대기압의 20%일 경우. 표준대기압 및 튜브 외부기압은 1013.25kPa, 목표 튜브기압은 101.33k을 이용했음) 시스템 등가투기계수와  $T_{pr}$ 과의 관계를 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 진공튜브 구조물 및 진공펌프의 설계를 위한 입력자료로 이용될 수 있는데, 예를 들어 주어진 튜브 구조에 대해서  $T_{pr}$ 을 20시간 이상으로 유지하고 싶으면 등가투기계수를  $2 \times 10^{-16} \text{m}^2$  이하의 수준으로 확보하여야만 한다는 것을 알 수 있다. 하지만 이는 외부압력, 재료의 투기계수 및 불연속면의 등가투기계수를 확정적으로 예측할 수 있을 경우에만 유효한 결과가 될 것이며 앞서 논의된 바와 같이 시스템 기밀성과 관련하여 높은 불확실성이 존재하며 이를 정량적으로 표현하는 것이 필요하다. 이전 절에서 논의한 바와 같이  $k_m$ 과  $k_d$ 는 불확실성을 내재한 확률변수이다. 식 (5)에서 시스템 등가 투기계수  $k_e$ 는  $k_m$ 과  $k_d$ 의 함수이며 또한 외부기압과 관련된 변수  $\alpha$  역시 불확실성을 가지고 있다. 시스템 기밀성에 대한 성능은 정의된  $P_{pr}$ 에 도달하는 시간  $T_{pr}$ 이 한계상태 별로 미리 정

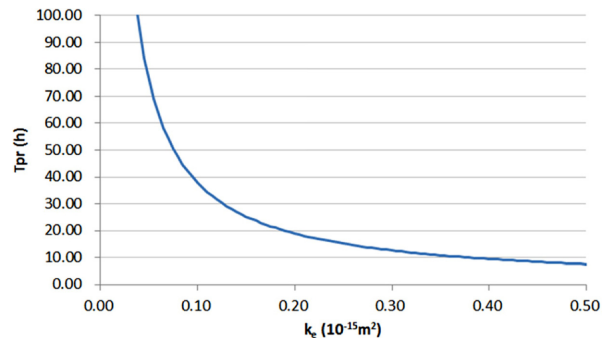


Fig. 2  $T_{pr}$  vs.  $k_e$  for baseline configuration



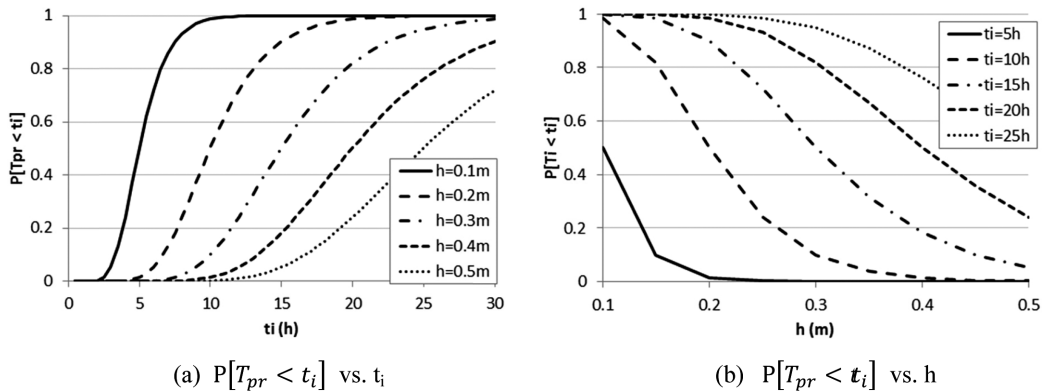


Fig. 4 Probability of exceeding limit states with different tube thicknesses

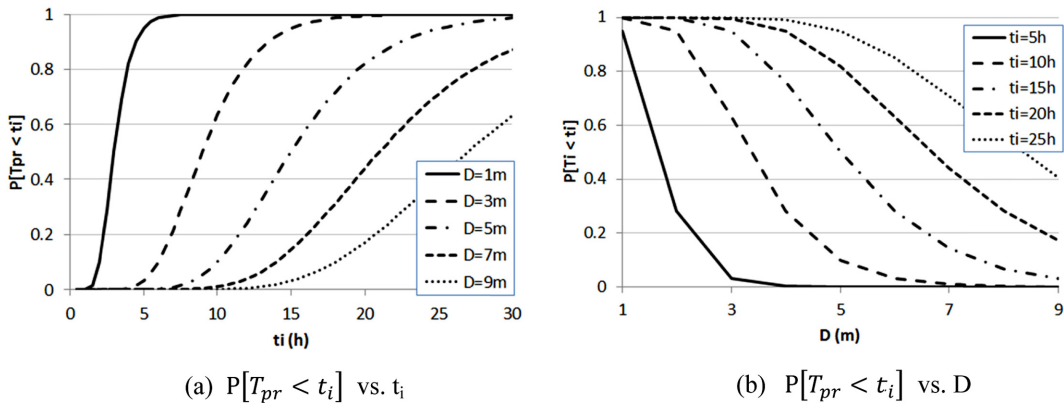
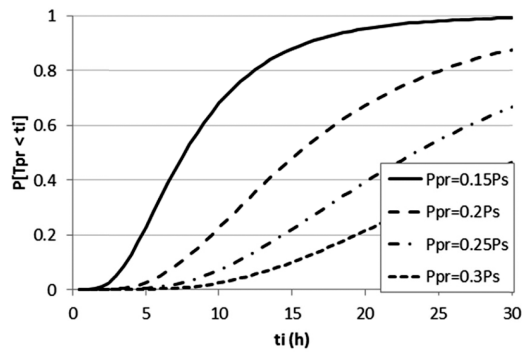


Fig. 5 Probability of exceeding limit states with different tube diameters

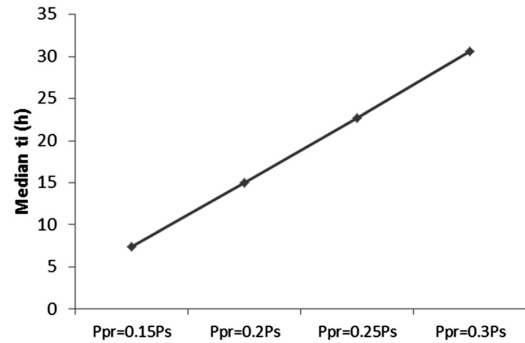
감소함을 볼 수 있다. 마찬가지로 Fig. 5는 튜브 직경의 변화에 따른 한계상태 초과확률을 나타내는데, D=1m, 2m, 3m, 4m, 5m 순으로 튜브 직경이 증가함에 따라 한계상태초과확률은 1.0, 0.9476, 0.5013, 0.1440, 0.0315로 감소한다. 3절에서 보인 바와 같이 불확실성을 고려하지 않은 상태에서는 튜브 기본구성에 대해 시스템 등가투기계수가  $k_e=2.4 \times 10^{-16}m^2$ 의 경우 내부압력이 펌프재가동압력  $P_{pr}$ 에 도달하는 시간이 15.79시간으로 산정되었으나 확률적 해석을 수행한 결과인 Fig. 4에서 보면, 시스템 등가투기계수의 평균값은  $2.4E-16m^2$ 로 동일하나 펌프재가동 압력 도달시간  $T_{pr}$ 이 15.79시간보다 더 적어질 확률, 즉 한계상태 초과확률은 54% 이상에 달하는 것으로 나타났으며, 초과확률이 20%보다 적어지기 위한 한계상태인 펌프재가동 압력 도달시간은 11.5시간, 10%보다 적어지기 위한 한계상태는 10시간으로 각각 나타나 확정적 해석과 비교할 때 27%에서 37%까지 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 진공튜브의 기밀성능 평가에 있어서 확률적 해석의 중요성을 나타낸다고 말할 수 있는데, 확정적 해석에 따라 산정된  $T_{pr}$ 값은 확률해석을 통해서 볼 때 그 신뢰성이 매우 낮은 수준이며 적절한 수준의 신뢰성을 확보하기 위한 펌프 재가동 압력 수준은 확정적 해석의 경우와 비교할 때 뚜렷한 차이가 존재하기 때문이다. 불확실성을 고려한 신뢰성 중심의 설계를 할 경우에는 한계상태 초과확률을

일정 수준 이하로 조절하는 것이 필요한데, 목표한 펌프 재가동 압력수준을 유지하면서  $P[T_{pr}<t_i]$ 을 20% 미만으로 유지하기 위해서는(즉, 신뢰성을 80% 이상으로 유지하기 위해서는) 기본구성에서 튜브두께  $h$ 를 0.4m 이상으로 유지하거나(기본구성에서 33% 증가) 또는 튜브의 직경을 7m 이상으로(기본구성에서 40% 증가) 해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 주어진 재료를 사용한 튜브구조 기밀성에 관련된 신뢰성을 높이기 위해서는, 즉 한계상태 초과확률을 일정수준 이하로 조절하기 위해서는 위와 같이 튜브 단면 치수를 기밀성능 향상에 유리한 방향으로 변화시켜야 할 것이며 이는 확정적 해석의 결과로 얻어진 단면 치수와 비교할 때에 무시할 수 없는 차이가 존재하므로 신뢰성 중심의 설계가 반드시 필요하다고 할 수 있다. 덧붙여 경우에 따라 건설비용 및 유지관리를 위해 단면치수 변화가 실질적으로 어려울 수가 있는데, 이런 경우에는 단면의 치수를 변화하는 대신 재료의 재선정, 또는 건설품질 향상을 통해 연관된 불확실성의 정도를 낮추는 것을 대체안으로 고려하여야 할 것이다.

튜브구조의 한계상태 초과확률은 한계상태 수준을 어떻게 정의하느냐에 따라 다르게 산정될 것이다. Fig. 5의 경우  $P_{pr}=0.2P_s$ 을 진공펌프 재가동을 위한 한계상태로 정의하여  $P_{pr}$ 에 도달하는데 소요되는 시간을 확률적으로 산정한 것인



(a) Probability of exceeding various levels of limit states



(b) Relation of median( $t_i$ ) and different levels of  $P_{pr}$

Fig. 6 Trend with different levels of limit states  $P_{pr}$

데, 기본구성 튜브에 대해 한계상태의 수준을 바꾸어 가며 ( $P_{pr}=0.15P_s, 0.2P_s, 0.25P_s, 0.3P_s$ ) 한계상태 초과확률의 그래프를 그려 보면 Fig. 6(a)와 같게 된다. Fig. 6(b)는  $P_{pr}$  증가에 따른  $t_i$ 의 추세를 살펴보기 위한 것으로  $P_{pr}$  값이 증가함에 따라  $t_i$  분포의 중간값은 대체적으로 선형비례하는 것으로 나타났는데,  $P_{pr}$  값의 증가에 따른  $t_i$ 의 증가율은 대략  $15.47hr/0.1P_s$  정도인 것으로 산정되었다. 이러한 해석결과는 튜브 내부를 주행하는 열차 또는 다른 운송수단의 추진력과 공기저항, 그리고 펌프의 용량을 복합적으로 고려하여 목표  $P_{pr}$  값을 정하는데 필요한 기술적 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 진공튜브 구조의 설계에 있어서 주어진 재료 및 시스템 구성에서 존재하는 불확실성을 정량화하여 내부기압의 변화를 확률적으로 예측할 수 있는 신뢰성 평가를 수행하였다. 시스템 등가투기계수의 산정에 영향을 주는 인자들 중 불확실성을 내재하고 있는 인자들을 확률변수로 모델링한 후 수식 유도 및 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 내부기압의 변화를 확률적으로 예측하였으며 시뮬레이션을 위해 Latin Hypercube Sampling 기법을 적용하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 튜브구조의 기본구성 단면을 가정한 후 펌프 재가동 시간  $T_{pr}$ 을 정의된 입력변수에 의해 산정한 결과  $T_{pr}$ 의 확률분포는 대수정규분포 가정시 가장 높은 일치성을 보였다.

- 그 후 튜브의 직경 및 두께, 그리고 펌프재가동압력  $P_{pr}$ 의 값을 변화시켜가며 각각의 경우에 따라  $T_{pr}$ 의 확률분포를 대수정규분포를 이용해 예측하여 특정  $P_{pr}$  도달시간을 초과하는 한계상태초과확률의 추이를 검토하였는데 이와 같이 불확실성을 정량적으로 고려한 확률적 해석을 수행한 결과, 불확실성을 고려하지 않은 확정적 해석과 비교해 볼 때 펌프 재가동 압력도달시간이 주어진 한계상태 시간 이하가 될 확률, 즉  $P[T_{pr} < t_i]$ 이 20% 이하가 되기 위해서는 한계상태수준  $t_i$ 가 확정적 해석의 경우보다 27% 감소되어야 하고 또 10% 이하가 되기 위해서는 37%까지 감소해야 하는 등 일

정 수준의 신뢰성을 확보하기 위한 한계상태의 차이가 뚜렷이 나타났다.

- 확정적 해석과 비교했을 때, 일정한 한계상태  $t_i$ 에 대해서  $P[T_{pr} < t_i]$ 이 20% 이하가 되기 위해서는 단면을 최대 40%까지 변경해야 하는 등 확률적 해석의 도입으로 인한 구조물 구성 변화가 필수적인데, 이와 같은 결과를 분석해 보면 튜브구조 기밀성능 관련 설계를 위해서는 신뢰성 중심의 설계가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

- 또한 주어진 기본구성에서 펌프 재가동압력  $P_{pr}$ 의 수준을 변화시켜 가며 한계상태 초과확률의 추이를 검토해본 결과  $P_{pr}$ 과  $t_i$  분포의 중간값은 선형비례하는 것으로 나타났다.

튜브구조의 직경 및 두께 등 물리적 구성은 일차적으로 수송시스템의 규모와 내부시설의 요건에 따라 결정되겠지만[3-5] 동시에 진공튜브의 성능유지를 위해 일정 수준 이상의 기밀성능을 갖추어야만 한다. 본 연구에서 수행된 튜브구조의 기밀성능에 대한 확률적 해석 결과는 튜브 내부를 주행하는 열차 또는 다른 운송수단의 추진력과 공기저항, 그리고 펌프의 용량을 복합적으로 고려하여 목표  $P_{pr}$  값을 정하고 튜브 단면을 결정하는데 필요한 기술적 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 논문은 2012년 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## Refernces

- [1] T.K. Kim, K.H. Kim, H.B. Kwon (2011) Aerodynamic characteristics of a tube train, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(12), pp.1187-1196.
- [2] A. Cassat, V. Bourquin, M. Mossi, M. Badoux, D. Vernez, M. Jufer, N. Macabrey, P. Rossel (2003) SWISSMETRO - Project Development Status, *Proceeding of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003*, Tokyo, Japan, pp. 453-410.
- [3] KRRI (2009) Development of New Infra-structure Technol-

- ogy for Ultra High Speed Tube Train, Korea Railroad Research Institute, PK09001C Project Report
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] S.W. Nam (2010) Parametric study on the capacity of vacuum pump for tube structure, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(5), pp.516-520.
- [7] A. Singhal, A.S. Kiremidjian (1996) Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage, *Journal of structural Engineering*, 122(12), pp.1459-1467.
- [8] A. Tan, T.X. Zhang, S.T. Wu (2008) Pressure and density of air in mines, *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 37, pp.64-67.
- [9] R.L. Imam, W.J. Conover (1980) Small sample sensitivity analysis techniques for computer models, with an application to risk assessment, *Communications in Statistics*, 9(17), pp.1749-1842.
- [10] J. Park, E-S. Choi (2007) Fragility Analysis for Evaluation and Comparison of Seismic Performance of Building Structures, *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, 11(3), pp.11-21.
- [11] J. Park, E-S. Choi (2008) Optimal Seismic Rehabilitation of Structures Using Probabilistic Seismic Demand Model, *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, 12(3), pp.1-10.
- [12] J. Park, P. Towashiraporn, J.I. Craig, B.J. Goodno (2009) Seismic Fragility Analysis of Low-Rise Unreinforced Masonry Structures, *Engineering Structures*, 31(1), pp.125-137.
- 접수일(2014년 3월 13일), 수정일(2014년 6월 16일),  
게재확정일(2013년 6월 24일)
- 
- Joonam Park** : joonam.park@gmail.com  
Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan, Jeonbuk, Korea