

소형차 전용 복층터널 분기부에서의 충격손실 계수 결정 연구

노장훈, 이승준, 김진*

A Study on the Determination of Shock Loss Coefficient on the Branch in the Double-deck Road Tunnel for Small Car

Jang-hoon Rho, Seung-jun Lee, Jin Kim*

Abstract In this study, the experiment for determining shock loss at the branch is conducted for the design of network double-deck road tunnel ventilation. The shock loss coefficient that determines the quantity of shock loss has been considered only regarding the constant aspect ratio of circular or rectangular section. However the suggestion of shock loss coefficient is needed since the aspect ratio of double-deck road tunnel for small vehicle is considered around 1:3 with the low height in Korea. The experiment model was made with the scale of around 1:23 applying Reynolds similarity law, so that the shock loss coefficient on the branch of the large aspect ratio was measured. The result of the study showed that shock loss coefficients of both split branch and straight branch were measured two to three times higher than those calculated from the theoretical equation or design values of previous studies. Therefore the study resulted the effect of large aspect ratio on shock loss coefficient was huge, and it is expected that precise design value can be suggested for the design of network double-deck tunnel ventilation.

Key words Network double-deck road tunnel, Small car, Aspect ratio, Shock loss coefficient

초 록 본 연구는 네트워크형 복층터널의 환기설계를 위하여 분기부지점에서 발생할 수 있는 충격손실에 대한 실험연구이다. 충격손실량을 결정할 수 있는 충격손실계수는 현재까지 종횡비가 일정한 원형이나 사각단면에 관한 설계값 및 이론식만이 존재하고 있다. 하지만 현재 국내에서 검토중인 복층터널이 종횡비가 약 1:3 정도로 층고가 낮은 소형차 전용도로이기 때문에 본 조건에 맞는 충격손실계수의 제시가 필요하다. 이를 위하여 Reynolds 상사법칙이 적용된 약 1:23 스케일의 실험모델을 제작하여 큰 종횡비에 따른 분기부 지점 충격손실 계수를 측정하였다. 연구 결과 분기부가 존재할 때 직선구간에 작용하는 충격손실 계수와 분기부에서 작용하는 충격손실 계수 이 선행연구 되었던 설계값 및 이론식보다 2~3배 높게 측정되는 것을 확인하였다. 즉, 큰 종횡비가 충격손실계수에 미치는 영향이 크다는 것을 확인함에 따라서 네트워크형 복층터널의 환기설계 시 보다 정확한 설계값을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심어 네트워크형 복층터널, 소형차전용, 종횡비, 충격손실계수

1. 서 론

지하공간의 활용 및 도심지 교통체증현상 완화를 위

Received: Feb. 9, 2017

Revised: Feb. 21, 2017

Accepted: Feb. 21, 2017

***Corresponding Author:** Jin Kim

(Tel) +82328607558, (Fax) +82328727550

(E-Mail) jinlim@inha.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Inha University 100 inharo, Nam-gu, Incheon

한 도심지 복층터널 운영사례는 이미 다양한 국가에서 성공적으로 운영되고 있다. 복층터널은 대단면으로 굴착된 터널 단면을 복층으로 운영하는 터널공법이기 때문에 층고가 일반적인 도로터널에 비하여 낮다는 특징을 가진다. 이러한 이유로 복층터널은 소형차 전용터널로 운영되는 사례가 많다. 대표적인 소형차 전용복층터널로는 프랑스의 A86터널이 있으며, 스페인 M30을 비롯하여 말레이시아 SMART 터널 등이 있다. 이와 같이 층고가 낮은 단면을 가진 복층터널은 단면의 종횡비가 크다는 것을 의미하는데, A86터널의 경우 3차로 복층

터널로서 높이 2 m, 폭 8.72 m의 약 1:4.3의 종횡비를 나타내고 있다. 또한 SMART 터널의 경우 높이 2.55 m, 폭 8.72 m의 약 1:3.47의 종횡비가 나타난다¹⁾. 최근 국내에서도 복층터널의 운영을 위한 사전 연구들이 활발하게 이루어지고 있는데, 계획하고 있는 복층터널의 단면을 살펴보면 높이 3 m, 폭 9.25 m로서 약 1:3의 종횡비를 가진 단면을 고려하고 있다. 뿐만 아니라 국내에서 계획 중인 복층터널은 앞서 언급한 국외의 복층터널과 달리 네트워크를 가지는 구조이기 때문에, 다양한 분기부가 존재할 것으로 예상되는 터널이다. 분기부가 존재한다는 것은 차도 환기설계에 있어서 분기구조에 따른 충격손실과 같은 압력손실이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 일자형의 Airway에서 발생할 수 있는 압력손실은 마찰에 의한 손실만을 고려하기 때문에 단순한 이론식으로 적용이 가능하지만, 분기부가 존재하는 경우 두 개의 Airway가 존재하기 때문에 계산식이 복잡하고 난해하다²⁾. 이러한 이유로 충격손실에 대한 연구는 실험을 통하여 설계값을 제시하거나 CFD 해석을 활용하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다⁶⁾.

광산의 경우 충격에 의한 압력손실은 전체 압력손실의 5~25%까지 차지할 수 있다고 보고하였으며^{3,4)}, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers)에서는 파이프 혹은 덕트를 대상으로 실험을 수행하여 다양한 형상구조에 의한 충격손실계수들을 제시하였다⁵⁾. 현재 충격손실에 대한 설계값을 적용할 때 ASHRAE에서 제안한 값들을 주로 사용하고 있고, 다양한 연구자들에 의하여 실험 및 CFD 해석을 바탕으로 설계 값들이 꾸준히 보완되고 있다. 하지만 이는 대부분 파이프관이나 덕트와 같은 작은 단면이거나, 종횡비가 일정한 원형 혹은 사각단면을 대상으로 한 결과들이다. 이로 인하여 본 연구에서 대상으로 하는 복층터널에서의 대단면이나 높은 종횡비의 단면에 위와 같은 선형 연구자료를 적용하는 것에는 무리가 있을 것으로 판단되어 계획하고 있는 복층터널의 설계단면을 참고하여 Scaled model을 제작함으로써 네트워크를 가지는 복층도로터널 분기부 지점에서의 충격손실계수를 도출하고자 한다.

2. 충격 손실 연구 이론

충격손실은 공기의 흐름에 방해를 줄 수 있는 단면적의 변화나 구조적인 변화에 따라 발생할 수 있는 압력손실로서 식 (1)로 표현된다⁷⁾. 여기서 P_x 는 충격에 의한 총압력손실[Pa]을 의미하며, P_v 는 속도압[Pa]을 나타낸다. K 는 충격손실을 정의하는 충격손실계수이며,

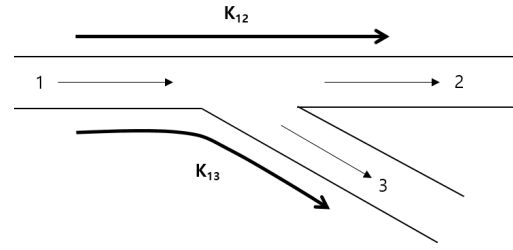


Fig. 1. Schematic of the split flow

무차원의 수로 표현한다. 즉, 충격손실계수를 도출함으로써 충격에 의한 최종 압력손실을 계산할 수 있다는 것을 의미하기 때문에 충격손실계수를 결정하는 것이 중요하다 할 수 있다.

$$P_x = K \cdot P_v \quad (1)$$

식 (1)을 Fig. 1과 같은 분기흐름에 적용하여 계산할 수 있도록 다시 나열하면 식 (2)와 식 (3)으로 각각 표현할 수 있다.

$$K_{12} = \frac{(P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2) - (P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2)}{\frac{1}{2}\rho v_1^2} \quad (2)$$

$$K_{13} = \frac{(P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2) - (P_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2)}{\frac{1}{2}\rho v_1^2} \quad (3)$$

여기서, P 는 각 지점에서의 Total Pressure[Pa], ρ 는 공기밀도[kg/m^3], v 는 공기속도[m/s]를 의미한다. 즉, 충격손실계수를 계산하기 위해서는 각 지점에서의 Total Pressure와 Velocity Pressure를 측정해야만 하고, 위 식을 바탕으로 실험적 연구를 통해 다양한 형상에 대한 충격손실 계수를 도출하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다⁸⁾. 하지만 모든 형상에 대한 실험 연구를 수행하는 것은 시간 및 실험모형을 제작해야 하는 문제점 때문에 CFD 해석을 수행하여 충격손실 계수를 도출하기도 한다^{9,10)}.

또한 위에서 언급한 방법 외에 식 (2)와 같은 기본개념과 각 Airway로 흐르는 공기의 분율을 바탕으로 종횡비가 일정한 사각단면이나 원형에 대한 충격손실계산식이 제시되기도 하였다. Fig. 1에서 나타난 두 개의

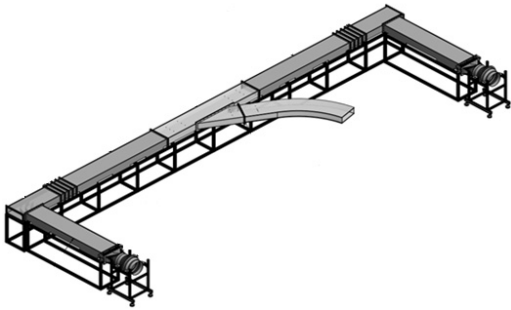


Fig. 2. Design for scaled model test

충격손실에 대하여 가장 최근에 제시된 이론식은 식 (4)와 식 (5)와 같다⁶⁾.

$$K_{12} = q^2 - \frac{3}{2}q + \frac{1}{2} \quad (4)$$

$$K_{13} = q^2 \psi^2 + 1 - 2q\psi \cos\left(\frac{3}{4}\theta\right) \quad (5)$$

위 식은 모멘텀 방정식을 사용하여 이를 식 (1)과 식 (2)에 적용하여 정리된 이론식으로서, 여기서 q 는 유량비를 나타낸다. 예를 들어 식 (4)에서의 q 는 Q_2/Q_1 이며, 식 (5)에서의 q 는 Q_3/Q_1 이다. 또한 일정한 각도(θ)에 따라 분기되는 경우인 K_{13} 의 경우 면적이 달라질 수 있기 때문에 면적비 ψ 가 적용되었는데 이는 A_1/A_3 를 의미한다. 위 식에 따르면 직선방향의 K_{12} 의 경우 유량비에만 의존한다는 것을 확인할 수 있지만, K_{13} 의 경우 유량비, 면적비 및 분기각도에 영향을 받을 수 있음을 보여주고 있다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 단면의 중형비에 대한 적용이 되지 않은 식이기 때문에 실제로 중형비가 클 경우 이론식 및 ASHRAE 제시값과 어떠한 차이점이 있는지에 대한 연구를 실제 실험 연구를 통해 확인하고자 하였다.

3. 연구 방법

3.1 Scaled Model

충격손실계수를 측정해보기 위한 실험 모델은 최근 국내 복층터널 예상 설계단면을 참고하여 중형비를 1:3으로 설정하여 약 1:23의 Scaled model을 Fig. 2와 같이 제작하였다. 제작된 터널의 단면은 폭 0.4 m, 높이 0.13 m, 길이 10 m이며, 중간 지점에 30도로 분기되는 터널을 추가하였다. 또한 터널 내부에서 송풍기에 의해

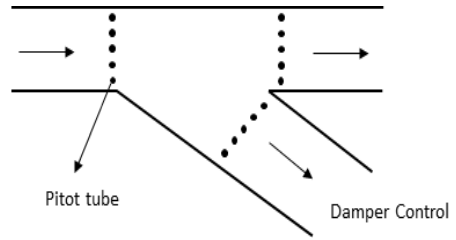
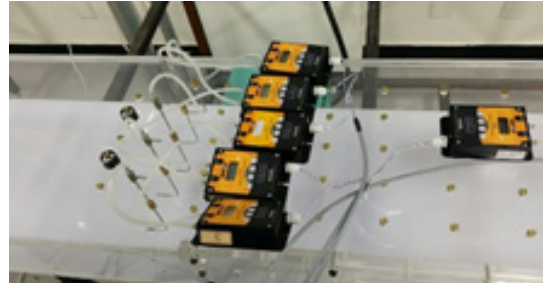


Fig. 3. Location of the pitot tube for measurement

발생되는 난류를 최대한 억제하기 위하여 송풍기 장착 부위 상단에 직각으로 터널을 제작하였고, 가이드베인과 허니콤을 설치하였다. 이론식에 근거하여 유량비에 따른 충격손실계수를 측정하기 위하여 각 출구부에 댐퍼를 설치하여 공기량을 조절할 수 있도록 하였다. 식 (1)을 기본으로 하여 충격손실계수를 측정하기 위하여 각 측정점에 Fig. 3과 같이 Pitot관을 일정 간격으로 5개씩 설치하였고, 각각 Total Pressure와 Velocity Pressure를 측정하였다. Pitot관을 통해 측정된 값들은 제작된 프로그램을 통하여 1초에 2회 데이터를 취득할 수 있도록 하였으며, 총 10분간 측정된 값을 산술평균하여 측정점의 최종 Total Pressure와 Velocity Pressure를 결정하였다.

3.2 상사 법칙

Scaled model내에 흐르는 공기속도를 실제크기의 터널과 일치시키기 위하여 Reynolds 상사법칙을 적용하였다. Reynolds 상사법칙은 유체의 점성력이 전체 흐름에 매우 중요한 영향을 미칠 때 사용하는 상사법칙이다. 일반적으로 Airway같은 유체흐름에 사용되는 법칙으로 알려져 있기 때문에 Wind tunnel과 같은 실험 연구에 사용되어져 왔다¹¹⁾. Reynold 수를 일치시키는 방법이 기 때문에 Scaled model과 실제크기의 터널과의 관련식은 식 (6)으로 표현할 수 있다. 여기서 첨자 S 는 Scaled model을 의미하며, R 은 실제크기의 터널을 의미한다.

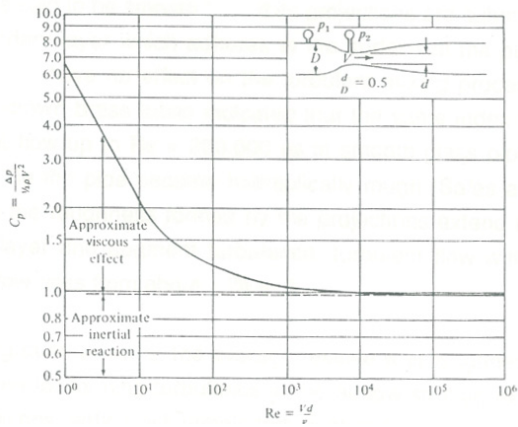


Fig. 4. Pressure coefficient remains constant for Re > 50,000

$$\left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_S = \left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)_R \quad (6)$$

식 (6)을 다시 해석하면 공기의 점성력과 밀도가 같다는 가정하에 1:23의 스케일은 23배의 공기속도가 Scaled model에 발생되어야 한다는 것을 의미한다. 실제 터널 내부의 공기속도를 1 m/s로 가정한다면 Scaled model에서는 23 m/s가 되어야 한다. 하지만 본 연구에서 측정하고자 하는 Pressure loss는 Fig. 4와 같이 Reynolds 수 40,000~50,000이상에서는 유체의 흐름에 크게 영향을 주지 않는다고 연구되어져 있기 때문에 본 연구에서도 Reynold수 50,000을 기준으로 Scaled model 내 흐르는 공기속도를 최소 4 m/s이상으로 구현 할 수 있는 송배풍기를 장착하였다¹²⁾. 사용된 송배풍기는 Fig. 5와 같은 특성곡선(동건공업, Model DJF-50)을 가지고 있으며 실험장치 내에서 최대 9 m/s정도까지 속도가 측정됨으로써 상사법칙에 의한 최소 공기속도 4 m/s를 만족하였다.

4. 연구 결과

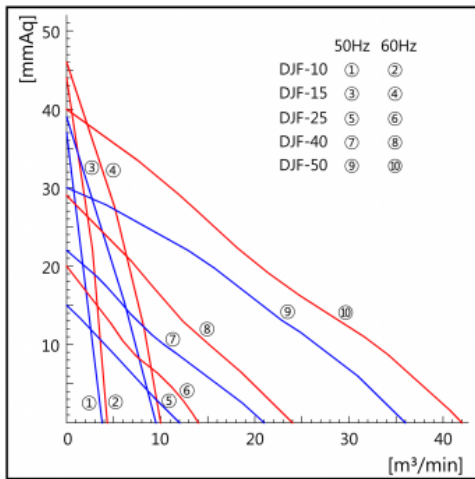


Fig. 5. Fan characteristic curve (Model DJF-50)

Scaled model 실험장치를 통해 분기부의 충격손실계수를 측정하기 위한 장치의 세팅은 Fig. 6과 같고, 선풍기의 출력은 항상 최대로 설정하였다. 1번지점과 2번지점 사이의 충격손실계수 K_{12} 를 측정하기 위해서 2번 댐퍼는 100% 개방시켰으며 3번 댐퍼를 단계별로 개방하면서 유량비에 따른 충격손실계수 K_{12} 를 측정하였다. 반대로 1번지점과 3번지점에서의 충격손실계수 K_{13} 은 3번 댐퍼를 100% 개방시켜놓고, 2번 댐퍼를 단계별로 개방함으로써 측정하였다. 측정된 데이터를 바탕으로 한 충격손실계수 계산과정을 Table 1에 나타내었다.

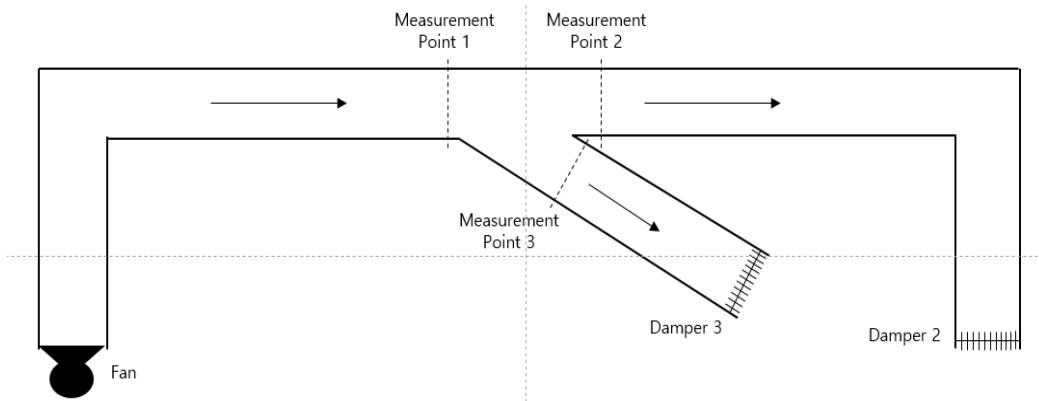


Fig. 6. Measurement setting schematic

Table 1. Process of calculation on shock loss coefficient

	Point 1	Point 2
Total Pressure $P_t [Pa]$	50.1	46.04
Velocity Pressure $P_v [Pa]$	25.31	9.89
Velocity $v [m/s]$ $= \sqrt{\frac{2P_v}{\rho}}$ $\rho = 1.2kg/m^3$	6.49	4.06
Air Quantity $Q [m^3/s]$ $= Area \times v$	0.34	0.21
Shockloss Coefficient K $= \frac{P_{t1} - P_{t2}}{P_{v1}}$	0.16	
Q_2/Q_1	0.62	

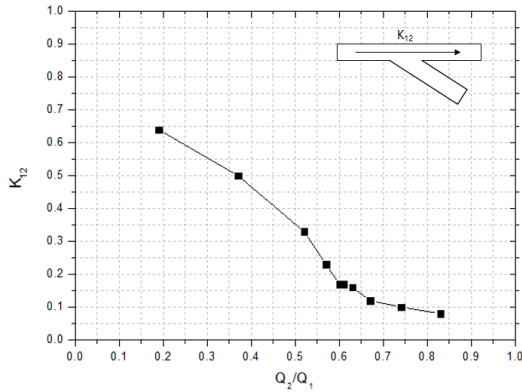


Fig. 7. Shock coefficient K_{12} depending on air quantity ratio

Fig. 6의 충격손실계수 K_{12} 를 Table 1의 계산과정을 거쳐 유량비에 따른 값을 Fig. 7에 나타내었다. Point 2에 흐르는 공기량이 많아질수록 충격손실계수는 전반적으로 작아지고 있다. 이는 기존에 연구된 원형이나 사각단면의 충격손실계수와도 비슷한 경향을 보여주고 있지만, 일정한 종횡비의 기존 연구 데이터들에 비하여 높게 계산이 되었다. Fig. 8은 선행 연구되었던 ASHRAE 측정값 및 식(4)와 같은 이론식과 함께 판단해보기 위하여 비교한 그래프이다. 여기서 ASHRAE값은 1:1 종횡비의 사각단면에서 30도로 분기되는 실험결과를 나타낸다. 즉 본 실험내용과 종횡비만 다른 실험결과값이다. 비교 결과 ASHRAE에서 제시한 사각단면 충격손실계수 값과 식 (4)에 의한 값과는 어느 정도 비슷한 수준의 값을 나타내고 있다. 하지만 1:3의 종횡비를 가지는 사각단면의 경우 값이 확연하게 높게 측정된 것을

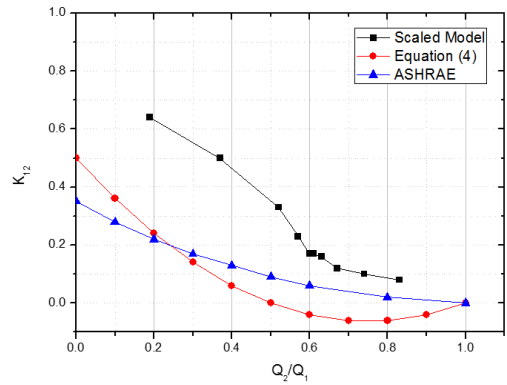


Fig. 8. Compare shock loss coefficient K_{12} for scaled model test and other values

확인할 수 있으며, 유량비가 작아질수록 그 차이는 최대 3배까지 높게 나타났다. 이러한 결과는 충격손실계수가 종횡비에 따라 커질 수 있다는 것을 의미하며, 이러한 단면에서의 충격손실계수 적용 시 반드시 충분한 고려가 이루어져야 한다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9는 위의 실험과 동일한 방법으로 30도로 분기되는 곳에서의 충격손실 계수 K_{13} 을 측정할 결과이다. K_{12} 와 비슷하게 유량이 작아질수록 충격손실계수는 높아지는 결과를 나타내었지만 30도로 꺾어지는 구조로 인하여 값은 더 높게 측정이 되었다. K_{12} 와 마찬가지로 ASHRAE 측정값과 식 (5)의 제시값을 함께 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 앞서 이론 연구에서 언급한 것처럼 K_{13} 은 면적비, 각도, 유량비에 영향을 받기 때문에 유량비에만 영향을 받는 K_{12} 와 달리 다양한 조건에

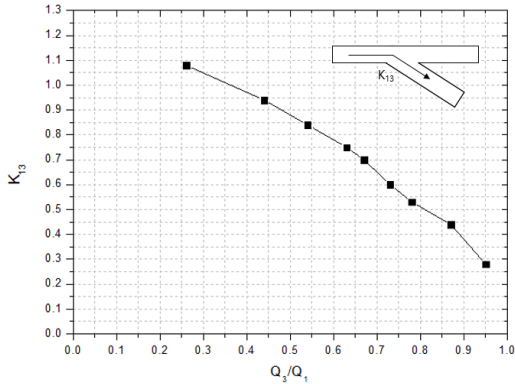


Fig. 9. Shock coefficient K_{13} depending on air quantity ratio

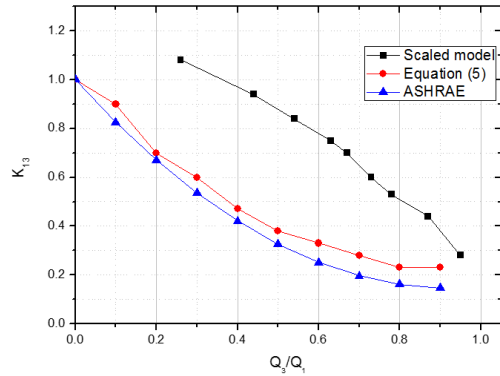


Fig. 10. Compare shock loss coefficient K_{13} for scaled model test and other values

서의 충격손실값들이 제시되어져 있다. ASHRAE에서는 분기각도를 15도부터 90도까지 변화시키고, 면적비 A_3/A_1 역시 0.1부터 1까지 다양한 조건에서 값들을 제시하였다^{4,5)}. 또한 식 (5)를 제안한 Bassett은 Miller의 실험데이터를 바탕으로 분기각도 45도, 60도, 90도 및 120도에 해당하는 값들을 분석함으로써 이론식을 검증하였고, 면적이 3배 작아지는 경우까지 함께 검증하였다⁶⁾. 이와 같이 K_{13} 을 면밀하게 검토하기 위해서는 다양한 조건의 결합이 필요하지만 본 연구에서는 종합적인 연구를 수행하기 위한 선행연구단계이기 때문에 분기각도 30도와 면적비 1에 해당하는 단일조건에서만 비교를 실시하였다. 비교 결과 식 (4)와 ASHRAE값은 거의 비슷한 결과를 보여주고 있지만 Scaled model은 약 2배정도 높은 값들을 나타내고 있다. 원형이나 사각 단면에 의한 충격손실의 차이는 거의 없다고 연구되어 졌지만^{13,14)} 본 연구를 통해 종횡비에 따른 차이는 존재할 수 있다는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 네트워크를 가질 수 있는 국내 소형차 전용 복층터널의 환기설계를 위하여 분기부 지점에서의 충격손실계수 도출을 목표로 Scaled model 실험연구를 수행하였다. 지금까지 연구된 충격손실계수는 파이프나 덕트를 대상으로 하였기 때문에, 종횡비가 일정한 사각단면이나 원형을 대상으로 제시된 설계값이었다. 하지만 본 연구의 대상이 되는 복층터널은 소형차 전용 터널로서 1:3정도의 종횡비를 가지는 사각단면이기 때문에, 충격손실계수에 큰 차이가 있을 것으로 판단되어 Scaled model을 제작하여 사전 연구를 수행하였다. 연

구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1:3의 종횡비를 가지는 터널의 모형을 약 1:23의 스케일로 제작하여 Reynolds 상사법칙을 만족할 수 있는 Scaled model을 구축하였다. 터널 내 흐르는 풍속이 최소 4 m/s이상이라면 상사법칙을 만족할 수 있는 것으로 확인하였고, 이를 바탕으로 출구부의 댄퍼를 활용하여 유량비를 제어하면서 실험연구를 수행하였다. 실험연구를 통해 측정되고 계산된 충격손실계수는 선행 연구된 ASHRAE 설계값과 Bassett에 의해 제시된 이론식으로 비교·검토를 실시하였다.
- 분기부가 존재할 때 직선차로에 해당하는 충격손실 K_{12} 는 ASHRAE 설계값 및 이론식보다 최대 3배정도 높은 값들로 측정되었다. 또한 분기부에 해당하는 충격손실계수 K_{13} 도 2배정도 높게 측정되는 것을 확인하였다. 이는 충격손실계수가 종횡비에 따라 달라질 수 있다는 것을 의미하며, 종횡비가 커짐에 따라서 발생하는 충격손실압력은 높아진다는 것을 확인하였다. 이러한 기초연구를 바탕으로 다양한 종횡비에 따른 충격손실 연구를 바탕으로 그 상관성에 대한 연구가 필요할 것이다.
- 분기부가 존재하는 터널에서 직선차로에서는 충격손실계수가 유량비에만 의존하지만, 분기부의 경우에는 유량비 이외에 단면적비와 분기각도가 중요하게 작용할 수 있다. 이러한 이유로 Scaled model 실험 장치를 꾸준히 보완하여 다양한 각도와 면적비에 따른 충격손실계수 도출 연구가 계속 진행되어야 할 것이다. 또한 본 연구를 통해 도출한 충격손실계수는 실제 복층터널 환기설계 시 보다 정확한 설계

값으로 활용되어 환기기의 용량선정에 있어 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Kim, Hyun-Soo, and Hong-Moon Kim. "A study on cross sectional characteristics and available area for using the lower space in TBM road tunnels." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association* 14.2 (2012): 141-157.
2. Wood, Don J., L. Srinivasa Reddy, and J. E. Funk. "Modeling pipe networks dominated by junctions." *Journal of Hydraulic Engineering* 119.8 (1993): 949-958.
3. Hartman, H. L. "Pressure changes at splits and junctions in mine ventilation circuits." *TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERS* 217 (1960): 163-170.
4. Hartman, Howard L., et al. *Mine ventilation and air conditioning*. John Wiley & Sons, 2012.
5. Handbook, ASHRAE Fundamentals. "American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers." Inc.: Atlanta, GA, USA (2009).
6. Bassett, M. D., D. E. Winterbone, and R. J. Pearson. "Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions." *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 215.8 (2001): 861-881.
7. McElroy, George Edward. *Engineering Factors in the Ventilation of Metal Mines*. No. 385. US Government Printing Office, 1935.
8. Serre, Marc, A. Jacob Odgaard, and Rex A. Elder. "Energy loss at combining pipe junction." *Journal of Hydraulic Engineering* 120.7 (1994): 808-830.
9. Kuo, Tang-Wei, and Shengming Chang. Three-dimensional steady flow computations in manifold-type junctions and a comparison with experiment. No. 932511. SAE Technical Paper, 1993.
10. Kuo, Tang-Wei, and Bahram Khalighi. "Numerical study on flow distribution in T-junctions and a comparison with experiment." *ASME, NEW YORK, NY (USA)*. 23 (1995): 31-38.
11. Matsuda, K., et al. "An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1: 10 scale bridge deck section model." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89.7 (2001): 619-632.
12. Tien, Jerry C. *Shock losses around underground overcasts*. Missouri Univ., Rolla, MO (USA), 1988.
13. Miller, Donald S. "Internal flow: a guide to losses in pipe and duct systems." *Internal flow: a guide to losses in pipe and duct systems*. British Hydromechanics Research Association, 1971.
14. Kuo, Tang-Wei, and Shengming Chang. Three-dimensional steady flow computations in manifold-type junctions and a comparison with experiment. No. 932511. SAE Technical Paper, 1993.



노 장 훈

2009년 인하대학교 공과대학 환경공학과
공학사
2012년 인하대학교 대학원 에너지자원
공학과 공학석사

Tel: 032-860-7551
E-mail: iglord2@naver.com
현재 인하대학교 대학원 에너지자원공
학과 박사수로



이 승 준

2017년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학사

Tel: 010-3232-0887
E-mail: Seungjun91@inha.edu
현재 인하대학교 공과대학 자원공학과
석사과정



김 진

1987년 인하대학교 공과대학 자원공학
공학사
1990년 미국 University of Kentucky 공
학석사/환기시스템
1995년 미국 University of Missouri-Rolla
공학박사/지하환경

Tel: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 공과대학 에너지자원
공학과 교수
