

3차원 형상을 고려한 고속철도에 의한 터널내 압력과 전파의 CFD 해석

신대용,¹ 이상건,¹ 오현주,¹ 김흥근,¹ 윤수환,² 김찬중^{*1}

¹서울대학교 기계항공공학부

²한국철도기술연구원

3D GEOMETRY EFFECTS ANALYSIS ON PROPAGATION OF PRESSURE WAVE GENERATED BY HIGH-SPEED TRAIN TRAVELING IN A TUNNEL USING CFD

D.Y. Shin,¹ S.G. Lee,¹ H.J. Oh,¹ H.G. Kim,¹ S.H. Yoon² and C.J. Kim^{*1}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

²Korea Railroad Research Institute

Research has importance in proposing the design of a tunnel with a vertical vent to secure passengers in a comfortable environment and safe against pressure. Using several analysis methods, the magnitude of the pressure induced by the vertical vent in the tunnel can be analyzed. In addition to the 3-dimensional method, the 2-dimensional method and the 2-dimensional axis-symmetric method are also used to analyze the strong and weak points of each so that the optimum analysis method can be obtained. As a result, it appears that the 2-dimensional axis-symmetric method is the most suitable in analyzing tunnel pressure consider to accuracy and time effective aspect. Also, the 3-dimensional method is disadvantageous in that it takes longer in calculating results, but is more effective in predicting phenomena around the vertical vent in the tunnel.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 고속철도(High speed train), 터널(Tunnel)

1. 서 론

급속히 늘어나는 위성도시 거주자를 수도권으로 연결시키기 위한 교통수요가 급증하고 있으며, 이에 대한 대책의 하나로 수도권을 연계하는 고속급행 열차사업이 추진 중이다. 하지만 고속급행 열차의 빠른 속도는 기존 열차 운행에서 발생하지 않았던 공기역학적 문제점 등을 야기한다. 특히, 고속급행열차가 터널을 통과할 때 터널 내에서 발생하는 압력파나 미기압 현상은 승객의 이명감이나 주변 생활환경에 영향을 줄 수 있기 때문에 각별한 주의가 필요하다. 이에 대한 해결책으로 방음, 방풍벽, 건축물과 선로를 감싸는 구조물, 혹은 열차의 설계를 외부 소음이 전혀 들어오지 않도록 하는 방법

등이 있다. 하지만 이와 같은 방법들이 근본적으로 터널내의 높은 압력을 줄이지는 못하며, 따라서 터널 설계시 수직구를 함께 만들어 압력파를 줄이는 방법이 주목을 받고 있다. 이 방법은 다분히 터널뿐만이 아니라 고속철도가 지하에서 운행될 때에 발생할 수 있는 이명감 현상을 줄이는데도 큰 기여를 할 수 있다. 이러한 전제 하에 수직구를 설계할 때 수직구의 형태나 크기 혹은 위치는 이명감 현상에 대한 불편함을 최소화 할 수 있는 터널 축조의 중요한 설계 요소가 된다.

이러한 수직구 설계와 관련하여, 홍콩과학기술대학교(The Hong Kong University of Science and Technology)의 K.H.Wu은 Fluent를 이용한 수치해석과 실제 크기의 실험을 통해서 터널 내 압력파의 전파에 대한 광범위한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서는 2차원 Fluent 축 대칭 기법을 사용함으로써 터널 형상을 3차원으로 발전시켰다.

하지만 실제 형상을 단순화하여 축 대칭 기법을 사용하면 실제 터널 형상과는 거리가 먼 원기둥 형태의 3차원 형상이 된다. 이는 고속철도가 터널이나 수직구 부분을 통과할 때, 고속철도의 아래쪽 형상이 실제의 막혀있는 형상이 아닌 뚫

Received: December 1, 2011, Revised: November 9, 2012,

Accepted: November 11, 2012.

* Corresponding author, E-mail: kimcj@snu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.4.049>

© KSCFE 2012

려있는 형상을 하기 때문에 압력파의 크기나 전파에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 2차원으로 해석을 수행할 때에는 고속철도의 좌우측 공간이 무시되어짐에 따라 같은 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 수직구의 출구 면적과 고속철도 그리고 터널의 면적비는 같게 설정한 후, 형태상에서의 차이에 따른 해석 결과 차이를 알아보았다.

이에 본 연구에서는 좀 더 정확한 해석을 위하여 Table 1 와 같이 미국 고속철도(U.S. Underground Rapid Transit System)의 안정규정을 기준으로 하여 Wu의 논문에서 간과한 형상을 3차원으로 해석함으로써 그 차이를 규명하고자 한다. 이를 위하여 Wu가 수행한 2차원 축 대칭 수치해석기법에 3차원 수치해석기법과 공기역학 이론을 적용하여 연구를 수행하였다.

또한, 3차원 수치해석과 2차원 수치해석의 결과를 비교함으로써 터널이나 지하고속철도 관련 사업시 공기역학적 최적 설계를 할 수 있는 기술을 확보하고자 한다. 이에 본 연구는 2차원 기법, 2차원 축 대칭 기법을 사용했을 경우와 3차원 수치해석 기법을 사용했을 경우의 장단점을 논하고 각 형상에 따른 기법에 적합한 활용법을 찾는 데 그 목적이 있다.

2. 해석 기법

2.1 이동격자 해석

Sliding mesh는 이미 Fluent 안에 내재되어 있는 기술의 하나로서, 두 개의 다른 도메인이 interface를 경계로 미끄러지는 현상을 연구할 때 interface 사이의 유량을 계산하기 위한 도구이다. 특히 격자 안의 움직이는 강체가 단순한 직선운동을 할 경우, sliding mesh와 대응되는 기술인 remesh 기술과 달리 격자의 질을 떨어뜨리지 않으면서 유동해석을 할 수 있는 장점이 있다.

Dynamic mesh layering 기술 또한 Fluent안에 내재되어 있는 다른 기술로써, 일반적으로 sliding mesh와 함께 사용이 되며, 움직이는 도메인 앞부분과 뒷부분의 격자의 소멸 및 생성을 할 수 있게 해주는 도구이다.

이 도구들은 고속철도 해석에 빠져서는 안 될 기법들이다. 전체 형상은 고속철도의 일정 속도를 주어 진행방향으로 이동하게하기 위해 형성되는 도메인과 그 고속철도로 인해 압력파의 전파가 이루어지는 또 다른 도메인으로 나눌 수 있다. 이때, 이 둘 사이의 유량의 상호 교환을 위해서 앞서 언급한

Table 1 Criteria for high speed train: adopted from U.S. Underground Rapid Transit System

Typical Symptom	Pressure Magnitude
The pressure wave gradient	400 Pa/s
Maximum pressure magnitude	690 Pa
Safety issue	10 kPa

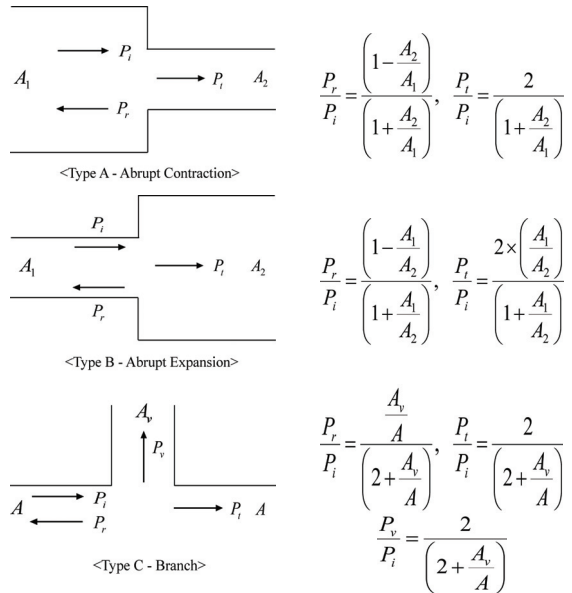


Fig. 1 Summary of relationship of reflection and transmission of pressure wave through tunnel discontinuity

interface가 필요하게 되며, 고속철도가 있는 도메인의 격자 생성 및 소멸을 구현하기 위한 기법이 layering method 라고 할 수 있다.

2.2 단면적 변화에 따른 압력 변화

해석 수행 시 2차원 축 대칭을 사용한 형상의 경우 완벽한 원통형 형상을 하고 있어, 실제 형상의 실험에서 진행된 터널과는 거리가 있다. 그래서 기차와 터널과의 단면적 비 및 터널과 수직 구의 단면적 비는 똑같이 조정된 후, 형상을 재구성할 필요가 있다.

한편, Fig. 1로부터 알 수 있듯이 터널의 형상 변화에 따른 여러 종류의 압력파가 생길 수 있다. Fig. 1에 있는 식으로부터 수직구가 있는 터널에서의 반사파의 크기를 알 수 있다.

터널 내 고속철도의 해석 시 면적비의 차이는 승객이 이명감 현상을 느낄 수 있게 하는 중요한 요인 중 한가지이다. 터널과 고속도철의 면적비가 커질수록 터널 내 압력파의 최고 압력 크기는 증가하며, 최고압력의 크기의 증가는 승객의 이명감 현상을 가져온다. 더 나아가, 터널 출구 부분에서 소닉 붐 현상까지 야기할 수 있다. 따라서 터널과 고속철도 그리고 터널과 수직구 사이의 면적비가 터널 설계에 가장 중요한 요인이라고 할 수 있다.

2차원 형상의 그림에서 볼 수 있듯이 2차원 해석방법으로는 Fig. 2 (b)와 같은 수직구의 단면적 변화에 따른 압력 변화를 예측할 수 없다. 이에 이 공기역학적 압력파의 전이를 적

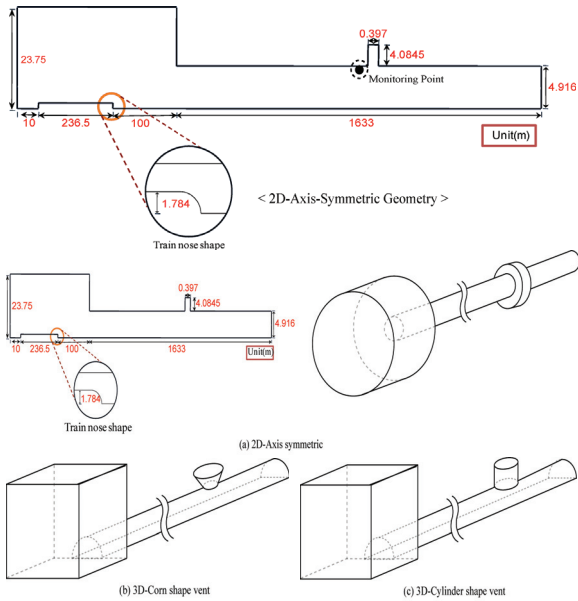


Fig. 1 Summary of relationship of reflection and transmission of pressure wave through tunnel discontinuity

용하여 3차원 형상을 Fig. 2의 수직구 형상과 같이 설계한다 면 좀 더 역학적으로 타당한 연구결과를 얻을 수 있다.

이러한 해석을 가능하게 하기 위해 Table 2에서 언급한 조건들이 사용되었다. 철도가 고속으로 움직이기에 따라 고속철도 표면에 생기는 전단응력에 의한 경계층의 형성을 무시할 수 있기 때문에 Inviscous flow로 해석하였다. 또한 time step의 경우 고속철도의 속도와 이동격자 기술 사용시 새로 생성되는 격자의 질을 고려하여 설정하였으며, 이때 courant number는 10으로 하였다. 해석하고자 하는 유체가 공기임에 따라 압축성을 고려해야하기 때문에 fluent에서 압축성을 가장 효과적으로 해석할 수 있는 density based로 해석을 수행하였다.

Table 2 Boundary condition and Fluent solver

Solver condition	2nd order roe flux-difference-splitting (FDS) scheme
	Green-gauss node based for gradient interpolation
	Inviscous flow & ideal gas law to cater for the air compressibility (relationship between absolute pressure, temperature and density)
	Density based, spatial and temporal implicit solver
	Courant number = 10 (not related to numerical stability)
Calculation	Sliding mesh model with dynamic mesh layering to model the train movement.
	First order temporal discretization & Second order discretization
	time step = 0.002s (1step -> 0.11m) total run time = 20s

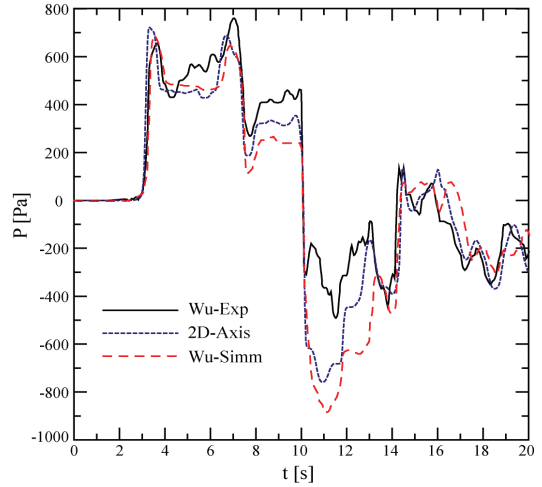


Fig. 3 Comparison of site measurement data and Fluent prediction

2.3 경계조건 및 해석 기법

Wu의 실험결과를 인용한 본 연구는 수치해석 경계 조건이나 해석기법을 기본적으로 Wu의 해석 조건들과 동일하게 사용하였다. 이 때 고속철도의 속도는 200km/h, 온도는 300°C로 설정하였으며, 비점성으로 환경을 설정한 이유는 레이놀즈수가 큰 고속철도 해석의 경우에 점성계수의 크기는 무시될 수 있다.

또한, Fig. 2에 각기 다른 형상들은 Table 3과 같이 면적비를 고려하여 설계하였다.

Fig. 2의 (b)와 (c)는 수직구의 모양이 원뿔과 원기둥이라는 데에 차이가 있다. 이는 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 면적비에 따른 해석 결과 차이를 알아 보기위해서이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 (b)와 (c)의 수직구 입구 부분의 면적비가 다른 것을 알 수 있다. 이외의 다른 면적은 서로 다른 형상임에도 같은 면적비를 나타내며, 이는 타당한 해석 조건의 바탕이 된다.

3. 해석 결과

3.1 실험값과의 결과비교

수치해석 방법을 이용한 해석결과와 실제 실험을 통한 결과

Table 3 Cross-sectional area

	Type (a)	Type (b)	Type (c)
A_{train}	9.9986	9.9982	9.9982
A_{Tunnel}	75.8999	75.8996	75.8996
$A_{v-inlet}$	12.2607	12.2598	22.4489
$A_{v-outlet}$	22.4490	22.4489	22.4489

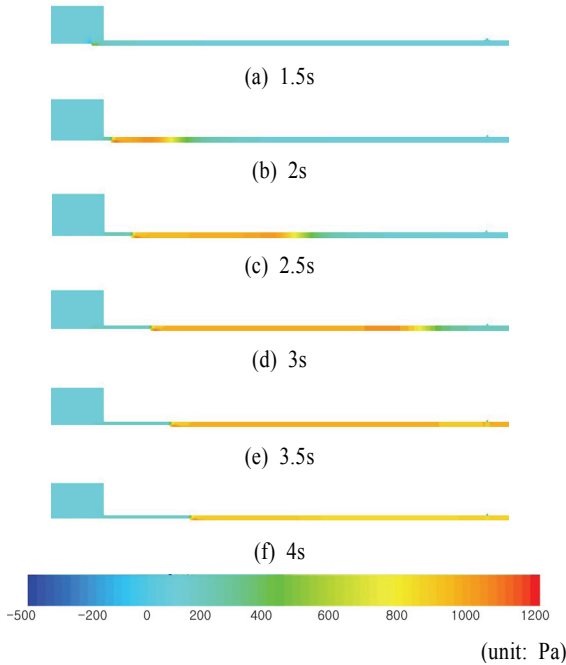


Fig. 4 Pressure wave analysis induced by the vertical vent in the tunnel with 3-dimensional method

와 얼마나 잘 맞는지에 대한 검증이다. 위 Fig. 3은 Wu의 논문에서 인용한 실험값과 2차원 축 대칭 해석기법을 이용해서 3차원으로 구현한 수치해석 값을 비교한 것이다. Fig. 3의 경우 0.5m 당 격자 하나의 크기로 설정하여 해석하였다. 철도차량이 통과할 때 발생하는 압력파의 해석을 구하기 위하여 Fig. 2와 같이 수직구 바로 앞인 터널 입구로부터 540m 위로는 4.9m 떨어진 위치에서 압력파의 추이를 계측하였다. 2차원 축대칭 수치해석법으로 해석한 결과와 실제 실험 결과와 비교했을 때, 최고 압력이나 압력의 추이가 유사한 경향성을 갖는 것으로 나타났다.

고속철도로 인한 압력파가 처음 monitoring point에 도착해서 약 700Pa의 압력파를 3.5초 정도에 확인할 수 있다. 그 후 수직구의 영향으로 처음 도달한 압력파가 팽창파와 중첩되면서 400Pa 까지 떨어지는 것을 알 수 있다.

이는 Fig. 4로부터도 확인할 수 있다. 2초경에 고속철도가 터널에 진입하여 처음 압력파를 만들어 내며 3.5초 때 수직구의 영향을 받아 4초 때 고속철도 앞의 압력파의 크기가 그 이전시간에 고속철도가 만들어낸 압력파보다 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있다.

이를 토대로 3가지 (2차원, 2차원 축대칭, 3차원) 다른 방법으로 수치해석을 수행하였다.

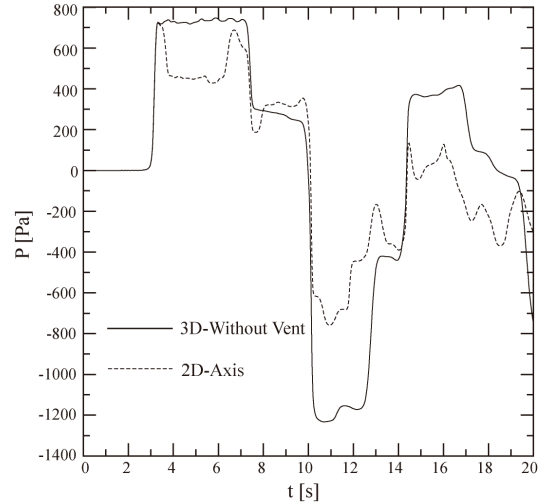


Fig. 5 Comparison of 2D-Axis-symmetric data and without vent data

3.2 수직구의 유무에 따른 터널내의 2차원 압력파수치해석

2차원 축 대칭 형상에 수직구가 있을 때와 없을 때를 구분하여 해석을 수행하였다. Fig. 2와 같이 2차원 형상으로 격자를 생성하고 경계조건을 변화시켜 3차원 형상과 같이 해석하였다. 이때 사용한 방법은 앞서서와 같이 2차원 축 대칭 기법을 사용하였다. 두 형상 모두 0.5m 당 한 개의 격자로 상당히 조밀한 격자계로 설계하였다.

수직구의 유무에 따른 변화는 Fig. 5에서 가장 잘 볼 수 있다. 최고 압력에 도달한 후 수직구가 있을 경우 수직구의 영향으로 인해 압력이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 반면, 수직구가 없을 경우 고속철도의 속도와 터널, 고속철도의 단면적 비로 인한 최고 압력이 700Pa에서 유지되는 것을 알 수 있다. 그 후 터널 출구로부터 돌아온 팽창파로 인해 압력이 줄게 된다. 두 그래프의 공통점으로 열차가 monitoring point를 통과할 때 압력이 급격하게 낮아지며, 그 후 고속철도로 인한 압력파의 변화량은 상대적으로 매우 낮아짐을 알 수 있다.

앞서 제시한 미국 고속철도(U.S. Underground Rapid Transit System)의 안정규정인 최고압력 690Pa 과 비교했을 때, 그 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 압력구배 측면에서, 10초대의 급격한 압력 강하는 고속철도가 monitoring point를 지나는 시점이므로 고려 대상으로 고려하지 않아도 된다. 하지만, 최고 압력을 형성하는 3초대의 압력구배는 미국 고속철도의 안정규정인(U.S. Underground Rapid Transit System) 400Pa/s의 압력구배와 300Pa/s의 오차가 있음을 알 수 있다.

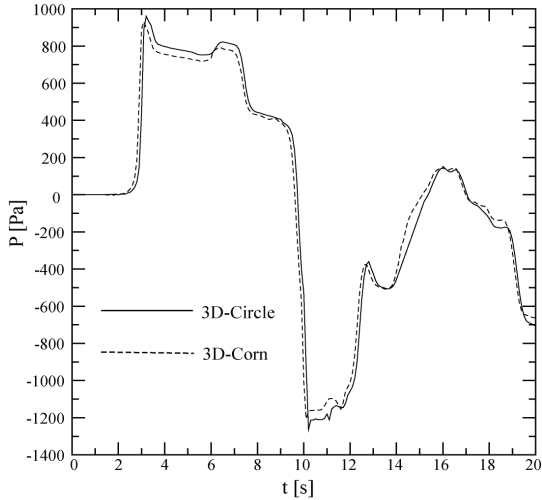


Fig. 6 Effect of 3D-circle shape vent tunnel data and Corn shape vent tunnel data

3.3 수직구의 형태에 따른 터널내의 3차원 압력파 수치해석

3차원 수직구 형태를 설계할 때 형상 변화에 따른 압력 변화(Fig. 1)를 고려해야 할 필요가 있다. 단순히 수직구 출구의 단면적만을 고려할 경우에 수직구의 입구 크기의 단면적 변화에 대한 압력변화를 간과하게 된다. 이에 따라 다른 모든 조건은 똑같이 놓고, 수직구 입구의 단면적만 터널과 수직구의 단면적 비를 고려하여 설계한 Fig. 2 (b)와 이를 고려하지 않은 형상 Fig. 2 (c)를 비교 분석하였다. 이에 따라 2차원 형상과 2차원 축대칭 형상 그리고 3차원 형상과 더불어 수직구의 형상 차이에 의한 압력파의 크기 및 전파에 대한 영향을 알아볼 수 있다.

위의 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 수직구 입구의 형상 변화에 의한 차이는 있지만 그 차이가 압력파의 크기 및 전파에 있어서 매우 미세하다는 것을 알 수 있다. 터널 내 고속철도에 대한 수직구의 압력 저감 효과만을 정밀 측정할 목적이라면 충분히 고려할 필요가 있지만 전반적인 압력파의 추이와 기준치 내 압력파 평가를 위해서는 굳이 고려하지 않아도 된다.

3.4 격자수에 따른 터널내의 3차원 압력파 수치해석

격자수에 따른 해석결과와의 차이는 수직구에 얼마나 많은 격자계가 형성 되었느냐에 달려 있다. 이 해석은 앞선 형상에 대한 논의가 아닌 수치해석 기법에 대한 접근으로서, Fig. 7의 실선의 경우 160만개의 격자계로, 점선의 경우 20만개의 격자계로 계산한 결과이다. 전반적인 압력파의 전이현상은 같지만 서로 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 4초에서 7초 사이

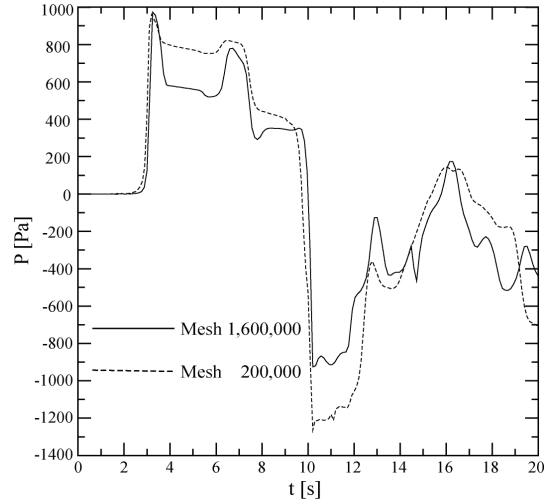


Fig. 7 Result of the grid dependency test

두 결과의 차이가 심한 것을 알 수 있는데, 그 이유로 20만 개 격자의 경우 수직구의 영향을 160만개 격자보다 성긴 격자로 인해 상대적으로 적게 계산되기 때문이다.

이 차이가 차후 전반적인 압력 추이에 오차로 누적되게 되며 위와 같이 약간은 서로 틀린 그래프가 형성되게 된다. 이에 따라 격자 생성 시, 수직구와 그 주변 격자를 다른 부분과 비교하여 조밀하게 생성할 필요가 있다.

3.5 해석 방법에 따른 종합 비교

2차원 수치해석법, 2차원 축 대칭 수치해석법, 3차원 수치해석법, 실험 결과를 종합 비교했을 때, 2차원 축 대칭 수치해석법이 가장 정확한 결과를 예측한 것으로 나왔다. 3차원 수치해석법의 경우 비교적 실험 결과와 비슷한 결과를 예측하였지만, 수치해석에 소요되는 시간이 상대적으로 다른 수치해석법보다 길다는 단점이 있었다.

Table 4에서 압축파와 팽창파의 영향으로 인해 형성되는

Table 4 Error estimation

	Magnitude				Gradient	
	Max 3.3s	4.3s	7s	Min 11s	3s	4.3s
① Wu-Exp	655	430	758	-490	655	224
② Wu-Sim	690	484	631	-885	690	206
③ 2D	976	-59	61	-837	976	1035
④ 2D-Axis	722	455	619	-756	722	266
⑤ 3D-Circle	934	787	783	-1180	934	146
①-②	35	54	127	395	35	18
①-③	321	489	697	347	321	811
①-④	67	25	139	266	67	42
①-⑤	279	357	25	690	279	78

(unit: Pa, Pa/s)

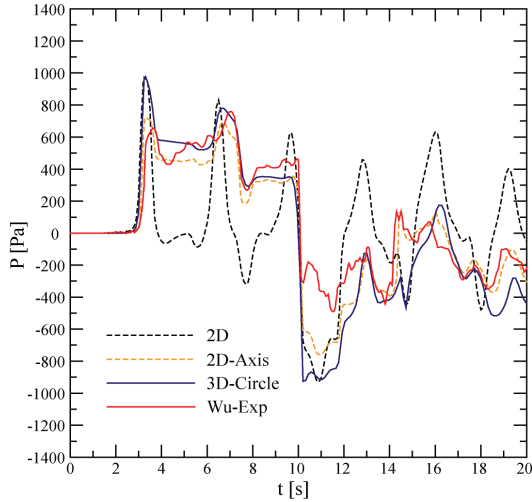


Fig. 8 Total comparison of data result

압력과의 오차에 대해서 알아보았다. 시간과 압력에 대한 그래프에서 최대, 최소점과 수직구로 인한 팽창과의 영향이 뚜렷한 3.3초, 4.3초, 7초, 11초의 오차를 Wu 논문에서의 실험과 2차원 축대칭, 2차원, 3차원에 걸쳐 Table 4를 통해 확인했다.

그 결과, 2차원 해석결과와 실험결과의 차이가 가장 두드러지게 나타났으며, 2차원 축대칭을 통한 해석과 3차원 해석의 경우 실험값과 상대적으로 적은 차이를 보임을 알 수 있다.

앞에서 언급한 여러 해석기법에 따른 해석결과와 미국 고속철도(U.S. Underground Rapid Transit System)의 안정규정과 비교해 보았을 때, 2차원 해석결과가 가장 큰 차이를 나타냈다. 압력구배 측면에서는 고속철도가 터널 진입 시 만들어낸 최초 압력파가 측정될 때, 안정규정을 크게 상회하였지만 그 이후 monitoring point에서 측정된 결과에서는 2차원 해석결과를 제외한 다른 해석결과에서 모두 안정규정에 부합되는 결과를 갖았다.

4. 결 론

3차원 수치해석을 할 때 터널과 고속철도의 단면적 비를 고려하는 것은 매우 중요하나 형상의 변화에 의한 수직구 단면적 비는 압력과의 추이에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 하지만, 2차원기법 사용 시 간과했던 고속철도의 좌우측 형상은 2차원 축대칭 기법 사용 시 간과했던 고속철도의 아래쪽 형상보다 압력파의 크기 및 전파에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 실험값과 매우 비슷한 2차원 수치해석의 해와 3차원 수치해석의 해(Fig. 8)를 통해 알 수

있듯이, 고속철도 압력파의 추이를 알기 위한 목적이라면 굳이 3차원으로 해석함으로써 많은 시간을 들일 필요가 없음을 알게 되었다.

이와 같이 3차원 해석기법은 터널 전반적인 경향성을 해석하는 측면에서 시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만, 수직구가 단순히 고압의 압력파의 방지만을 위해서 설계되지 않고 환기구뿐만 아니라 탈출구 역할도 한다는 점도 고려되어야 한다. 이에, 3차원 해석기법은 수직구 근방의 보다 정확한 해석이 요구되는 조건에서는 반드시 고려해야 할 기법이라고 할 수 있다. 또한, 형상이 다소 복잡하거나 축 대칭 기법을 사용할 수 없을 경우에는 3차원 해석을 수행하되 격자 생성을 다소 성긴 격자로 생성하고 수직구 주위의 격자를 조밀하게 생성하면 해석 시간이 오래 걸린다는 단점을 보완할 수 있으며, 일반적인 3차원 해석 결과와 큰 차이가 없는 실험 결과를 얻을 수 있다.

2차원 축대칭을 통한 3차원 해석이 아니라 면적 비를 길이 비로 맞춘 완전 2차원 해석은 그 정확도가 다른 두 가지 해석에 비해 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 2차원 형상의 경우 고속철도의 좌우측면과 터널사이의 형상을 간과함에 따른 결과로서 최고 압력과 최저 압력뿐 아니라 전반적으로 크게 진동하는 경향성이 2차원 축대칭 기법과 3차원 기법을 사용한 해석결과와 비교적 큰 차이가 있었다. 그에 반해 고속철도의 좌우측 형상을 고려한 2차원 축대칭 형상과 3차원 형상은 실험결과와 비교적 잘 부합되는 것을 알 수 있다.

결론적으로, 단순한 터널 내 고속철도의 압력파의 최고 압력이나 그 추이를 위한 해석이라면 2차원 축대칭 수치 해석으로도 충분히 해석 가능하며, 수직구 주변의 압력 변화의 보다 정확한 해석을 위해서는 수직구의 입구와 출구 단면적 비를 고려한 3차원 수치해석 법이 더 적합하다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업 중 ‘고속철도 터널 주행 3차원 해석코드 개발’ 과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며, 또한 2001년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- [1] 2008, Wu, K.H "Aerodynamic aspects of high-speed railway underground station with adjoining tunnels," pp.7, pp.21~41.
- [2] 2006, D.H Kim, Y.J Jang "The comparative analysis of slipstream phenomena by high-speed and traditional train," *Transaction of the KSME B*, pp.1~2.

- [3] 2010, Fluent manual, ver. 13.0, Modeling flows using sliding and dynamic meshes.
- [4] 1997, Rudolf, A., EPFL "Simulation of compressible flow phenomena in the Swiss metro tunnel network," *Swiss Federal Institute of Technology*, 9th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Organized by BHRA Fluid Engineering, Aosta, Valley, Italy, pp.263.
- [5] 1985, MM Lancien, "Trains Running at High Speed in Railway Tunnels –Field Measurement and Simulation," *5th International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicles Tunnel*, Lille, France.
- [6] 2000, Klaver, E.C., "Dimensioning of tunnels for passenger comfort in the Netherlands," *10th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Organized by BHRA Fluid Engineering, Boston, USA, pp.737.
- [7] 2001, Fahy, F., published by Academic Press, "Foundation of Engineering Acoustics," chapter 8, *Sound in Wave guides*.
- [8] 1997, Matsyo, K. "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel," *Proceedings of 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy, pp.925-934.
- [9] 1997, Gregorie, R., "Experimental study (scale 1/70th) and numerical simulations of the generation of pressure waves and micro-pressure waves due to high-speed train-tunnel entry," *Proceedings of 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy, pp.877-902.
- [10] 1999, Lee, H.S.H., "Assessment of Potential Aerodynamic Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High-speed Train Operations," U.S. Department of Transportation.
- [11] 2000, Wu, D.K.H., "Prediction of pressure wave generation by high-speed train entering tunnel using a commercial CFD code – a simplified approach," *10th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Organized by BHRA Fluid Engineering, Boston, USA, pp.767.