

입구후드가 고속열차 터널의 압력에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

Numerical Simulation for the Effect of Entrance Hood on Pressure of High Speed Railway Tunnel

김 동 현 ¹⁾, 이 재 범 ²⁾, 양 신 추 ³⁾, 이 회 성 ⁴⁾, 오 일 근 ⁵⁾
Dong-Hyeon Kim, Jae-Bum Lee, Sin-Chu Yang, Hisung Lee, Il-Geun Oh

ABSTRACT

A compression wave is generated by the high speed train which enters a tunnel, and it propagates along the tunnel. When the compression wave emerges from the exit of the tunnel, it causes an impulsive noise, and the strength of the impulsive noise depends on the pressure gradient of the first compression wave. So it needs to reduce the pressure gradient for the minimization of impulsive noise. The entrance hood is used for the reduction of the pressure gradient. In the present study, the pressure transients were numerically calculated for three shapes of hood. In order to validate the numerical simulation, the pressure and pressure gradient were compared with the experimental data of moving model rig. The calculation results were well agreed with the experimental data, and also showed that the hood had an effect on the pressure gradient of the tunnel inside.

1. 서 론

고속열차는 주행속도가 200km/h 이상으로서 기존의 열차보다 빠른 속도로 운행된다. 열차가 이와 같이 빠른 속도로 터널에 진입하는 경우, 열차의 피스톤 작용에 의해 열차 앞의 정지 공기를 압축하여 터널 내에 압축파가 형성된다.⁽¹⁾ 이렇게 형성된 압축파는 터널 안에서 음속에 가까운 속도로 전파되며, 터널 출구에서 펄스 형태의 미기압파(micro-pressure wave)로 급격하게 방출되면 충격음에 가까운 소음을 발생시킨다. 이 소음은 주변 민가에 심각한 소음공해 및 저주파 진동의 원인이 된다. 최근 고속열차에 대한 관심이 높아지면서 터널 소음의 저감 대책이 공학적인 문제로 대두되고 있으며, 우리 나라에서도 고속철도의 추가 노선이나 외국으로의 기술 용역 수출시 터널의 설계에 고려되어야 하는 중요한 문제로, 이에 관한 체계적인 연구가 필수적이다. 터널 출구에서 발생하는 미기압파의 강도는 출구에 도착하는 압축파면의 압력구배에 비례하며⁽²⁾, 이에 따라

- 1) 한국철도기술연구원 수송차량연구본부 차량동력연구팀 선임연구원, 정희원
- 2) 한국철도기술연구원 수송차량연구본부 차량동력연구팀 위촉연구원
- 3) 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 선로구축물개발팀장, 정희원
- 4) 한국철도기술연구원 수송차량연구본부 차량동력연구팀장, 정희원
- 5) 한국철도기술연구원 수송차량연구본부 본부장, 정희원

출구 미기압파의 저감대책은 압축파면의 압력구배를 완만하게 하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.⁽³⁾

현재까지 제안된 주요 미기압파 저감대책⁽³⁾으로는 1) 터널 입구에 후드(hood)를 설치하는 방법, 2) 열차의 선두형상을 최적화 하거나, 열차와 터널의 단면적 비를 줄이는 방법, 3) 터널 내부에 압축된 공기가 외부로 빠져나갈 수 있는 구멍(air-shaft)을 설치하는 방법, 4) 터널 내에 액적을 분사하거나 water curtain을 설치하는 방법, 5) 터널 출구에서 소음의 역위상(inverse phase)의 음파와 간섭시키거나, 소음기와 같은 공동(cavity)을 설치하는 방법 등이 있으며, 이 방법들에 대한 연구는 각각의 분야에서 진행되고 있다.

Ogawa와 Fujii⁽⁴⁾는 터널에 진입하는 열차에 의한 압력변화를 압축성 유동에 대한 비점성 Euler 방정식으로 수치해석한 바 있으며, Iida 등⁽⁵⁾은 터널 미기압파의 감소를 위한 열차 선두부의 형태(nose shape)에 대해 연구했다. 김희동과 김태호⁽¹⁾는 터널 내에서 발생하는 파동현상에 관심을 두고 공기역학적 문제를 다양한 속도범위와 열차길이, 터널길이에 대해서 시뮬레이션하였으며, 황재호와 이동호⁽⁶⁾는 터널과 열차의 상호작용 및 열차와 열차의 교행시의 유동장 해석을 위한 비정상 해석기법을 개발하였다. 김희동 등⁽⁷⁾은 입구후드가 터널입구의 압축파에 대한 영향을 조사하기 위해서 Linear, Parabolic, Abrupt hood에 대해 수치해석하여 Abrupt hood가 가장 작은 충격소음을 발생시킴을 밝혔다.

본 연구에서는 고속열차가 터널로 진입하는 경우에 터널입구에 설치된 후드가 터널내의 압축파에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압축성 유동해석 전용 프로그램인 CFD-FASTRAN을 이용하여 수치해석 하고자 한다. 수치계산은 299km/h 와 344km/h의 경우에 대하여 수행하였으며, 계산의 타당성을 검증하기 위해 실험결과⁽⁸⁾와 비교하고자 한다. 또한 후드의 유무에 따라 발생하는 압력과 압력구배의 차이를 비교하고자 하며, 극단적인 배열의 후드공을 가진 세 종류의 후드를 적용하여 압력과 압력구배를 비교하고자 한다. 수치해석의 분석결과는 고속철도 터널의 입구후드 공력 설계시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 수치 해석

고속열차가 터널에 진입하게 되면 피스톤효과에 의해 열차 앞쪽의 공기가 압축되어 열차보다 앞서 음속으로 전파한다. 터널의 한 점에서 시간의 흐름에 따라 압력을 측정하면, 먼저 1차 압축파가 지나가면서 압력이 급격히 증가하여 최대 값을 가진 후 열차의 앞부분이 도착하면 압력이 감소하며, 열차가 지나가는 동안에는 상대적으로 속도가 빨라지므로 압력이 감소하여 일정한 압력을 유지한다. 열차의 뒷부분이 지나가면 유동은 박리하고 그 영향으로 압력이 더욱 감소하여 최저 값을 가진 후 대기압으로 복귀하게 된다. 터널의 출구에서 발생하는 미기압파는 입구에서 발생한 1차 압축파의 압력구배와 밀접한 관계가 있으며, 이 압력구배를 완만하게 하면 미기압파의 강도를 줄일 수 있다. 압력구배의 완화를 위한 방법 중에는 입구후드가 있다.

입구후드의 설치는 후드공으로 빠져나가는 압축공기에 의해 열차 진입시에 발생하는 터널내의 압력 상승과정에 영향을 주게 되며, 이에 따라 터널 출구에서의 미기압파도 영향을 받게 된다. 이 현상을 수치해석하기 위해 압축성유동 해석 전용 프로그램인 CFD-FASTRAN을 사용하여 2차원 비정상 유동으로 계산하였으며, 이 수치해석의 타당성을 검증하기 위해서 실험결과와 비교하였다.

열차모델은 TGV열차의 선두부를 확대칭으로 전환하여 적용하였다. 또한 실제 터널 및 열차의 1/167 축척을 사용하여 실험결과와 직접 비교할 수 있도록 하였다. 운행속도는 실험에서의 평균속도인 290km/h와 344km/h의 등속도로 가정하였으며, 지배방정식은 비점성 압축성 방정식인 Euler 방정식을 적용하였다. 본 연구에서는 주요 관심이 열차의 유동저항이 아니라 열차 앞에서 전파되어 나가는 압축파의 형태에 있으므로 점성효과는 고려하지 않았다.⁽⁴⁾ 본 연구에서 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(-p \delta_{ij}) \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(E_i + p)u_j] = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

플럭스 항의 계산은 Roe's FDS⁽⁴⁾를 사용하였으며, 비정상 시간간격은 1.0×10^{-5} 초이다. 열차의 출발은 터널 입구로부터 바깥쪽으로 터널 폭의 3배 떨어진 위치에서 급격출발(impulsive start)을 가정하였다. 경계조건은 터널 벽면과 열차는 단열조건, 미끄럼조건으로 하고, 터널 입구와 출구는 무반사조건으로 하였다. 계산격자는 그림1과 같이 터널은 고정격자계로 두고, 열차는 CHIMERA 격자계⁽⁹⁾를 이용한 등속도 이동격자계를 사용하였다. 열차는 20 509의 격자계를 사용하고, 터널입구에 193×90 , 터널에 723×20 , 터널출구에 25×90 의 격자계를 사용하였다. 전체 계산 영역은 그림 2와 같다.

계산의 결과는 터널 입구로부터 안쪽으로 0.332 , 0.431, 1.149m 떨어진 위치(1/167축척 거리)에서 실험결과와 비교하였으며, 열차의 뒷부분이 1.149m에 도달할 때까지 계산하였다. Workstation Octane CPU R10000을 사용하여 계산에 소요된 시간은 290km/h인 경우에는 1080분, 344km/h인 경우에는 910분이다.

후드의 단면적은 경부고속철도 터널의 내공단면적의 1.3배를 적용하였으며, 그림3과 같이 후드공의 위치를 임의로 변화시키며 압력과 압력구배를 비교하였다. hood1은 두 개의 후드공이 후드의 앞부분에 위치하며, hood2는 후드공이 후드의 앞부분과 뒷부분에 하나씩 위치하고, hood3은 두 개의 후드공이 후드의 뒷부분에 위치한다. 세가지 후드에서 적용된 후드공은 모두 동일한 크기와 형태로 가정하였으며, 열차는 20×509 의 격자계를 사용하고, 터널입구에 193×96 , 터널에 723×20 , 터널출구에 25×90 의 격자계를 사용하였다. 열차의 속도는 290km/h이며, 역시 290km/h일 때 후드가 없는 경우의 수치 결과와 비교하였다. 계산 소요시간은 1100분이다.

3. 결과 및 고찰

그림4는 터널미기압과 저감원리로서 터널입구의 시간에 대한 압력구배를 그림4 (3)과 같이 작게 하면 터널출구에서의 미기압과 강도를 낮출 수 있다. 그림4 (1)은 터널입구후드를 적용하지 않은 경우의 압력상승곡선이며 후드를 적용한 경우는 그림4 (2)나 (3)이 된다. (2)의 경우는 압력구배가 더 상승된 경우이며 후드를 적용한다 하더라도 (3)과 같은 이상적인 압력구배를 얻을려면 후드공의 크기 및 위치선정이 중요하다.

3.1 후드가 없는 경우의 결과

열차가 290km/h와 344km/h의 속도로 후드가 없는 터널에 진입하는 경우에 대해서 비정상모수치 해석하여 동일한 조건의 실험결과와 비교하였다. 특히 1차 압축파면의 시간에 대한 기울기와 최대 압력 값에 관심을 가지고 연구를 수행하였다.

그림5는 290km/h의 속도로 열차가 진입할 때 시간의 경과에 따른 터널입구의 속도벡터를 나타내고 있다. 열차가 터널에 진입함에 따라 단면적이 감소하여 바깥쪽으로 공기가 밀려 나가는 것을

볼 수 있다.

그림6은 열차의 속도가 290km/h이고 후드가 없는 경우의 압력변화이다. 굵은 실선으로 표시한 것이 수치계산에 의한 결과이고, 가는 실선으로 표시한 것이 실험에 의한 결과이다. 점선으로 표시된 세로선의 사이가 열차가 지나가고 있는 시간이다. 열차가 도착하기 전에 최대의 압력 값을 갖고, 열차가 지나가는 동안 일정압력을 유지하다가 열차의 뒷부분이 지나면서 압력의 최소 값을 가진 후 대기압으로 복귀하는 전형적인 터널내의 압력 변화를 보이고 있다. 또한 터널 안의 압축파에 가장 큰 영향을 미치는 1차 압축파면의 기울기와 최대 값을 비교적 정확히 예측하고 있다. 1.149m의 측정 점의 값을 비교할 때 1차 압축파가 길게 늘어지는 현상은 수치계산에서 나타나지 않았다.

그림7은 열차의 속도가 290km/h이고 후드가 없는 경우의 1차 압축파의 압력구배의 변화이다. 실험결과와 정성적, 정량적으로 근사하게 예측하고 있으며, 특히 처음 압력구배가 상승하는 부분의 기울기를 매우 정확하게 예측하고 있다.

그림8은 열차의 속도가 344km/h이고 후드가 없는 경우의 압력변화이다. 빠른 속도로 터널에 진입함에 따라 최대 값이 290km/h일 때의 결과보다 약 500Pa 정도 높은 압력을 가진다. 본 연구에서의 주요 관심인 1차 압축파면의 기울기는 정확하게 예측하고 있으며, 그 이후의 값은 다소 차이를 보이고 있다.

그림9는 열차의 속도가 344km/h이고 후드가 없는 경우의 압력구배의 변화이다. 실험결과와 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있다.

이상의 결과에서 수치계산이 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 후드의 유무 또는 후드공의 위치에 따른 압력 및 압력구배의 변화를 예측하기에 타당하다고 생각된다.

3.2 후드가 있는 경우의 결과

터널의 입구에 후드를 설치하고 열차를 290km/h의 속도로 터널에 진입하도록 하였으며, 앞서 수행한 후드가 없는 경우의 290km/h의 결과와 압력 및 압력구배를 비교하였다. 또한 세 가지의 후드공의 배열에 따라서 압력 및 압력구배를 비교하여 어떤 배열의 후드가 효과적인지 조사하였다.

그림10은 열차의 속도가 290km/h이고 후드가 있는 경우의 1차 압축파이다. 등근 모양으로 표시된 것이 후드가 없을 때의 압력이며, 네모, 마름모, 세모 모양으로 표시된 것이 후드가 있을 때의 압력이다. 후드가 있을 때의 결과들이 더 급한 기울기를 가지며, 더 높은 최대압력을 보이고 있다. 후드공의 위치에 따른 결과를 비교하면, 1차 압축파면의 기울기는 no hood, hood3, hood2, hood1의 순서로 급해지며, 최대압력도 이와 동일한 순서로 높은 값을 가진다. 본 연구에서 적용된 극단적인 3가지 후드공 배열에서는 후드가 없는 경우보다 더 높은 압력구배를 보이고 있으나, 마지막 후드공의 위치가 1차 압축파면의 기울기를 낮추는 데에 작용하고 있음을 알 수 있다.

그림11은 열차의 속도가 290km/h이고 후드가 있는 경우의 1차 압축파의 압력구배의 변화로서 그림10의 압축파면 기울기 결과를 나타낸다. 본 연구의 후드공 배열은 후드공 위치와 크기에 있어서 조정이 되지 않은 극단적인 3가지 배열의 효과를 파악하기 위한 것이며, 축척모델 실험을 위한 기초 분석이다. 실험을 통해 후드공 배열 및 크기를 조절하면 후드가 없는 경우보다 더 나은 결과를 도출할 것이다.

이상에서 후드공의 배열은 터널 안의 압력변화에 영향을 주고, 후드공의 위치에 따라서 다른 압력변화를 보이게 됨을 알 수 있다. 또한 본 연구에 적용된 후드의 형태 중에서는 후드공이 후드의 뒤쪽에 가까이 위치한 hood3이 가장 완만한 1차 압축파 기울기를 가진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속열차가 터널로 진입할 때의 압력 및 압력구배를 수치해석 하였으며, 터널 입

구에 세 종류의 극단적인 후드공 배열을 적용하여, 후드공의 배열이 터널내의 압축파에 미치는 영향을 조사한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치계산으로 실험과 동일한 경향의 압력변화를 얻었으며, 특히 주 관심점인 1차 압축파면의 기울기와 최대 압력 값은 정확하게 예측하였다. 또한 압력구배도 정성적으로 동일한 경향을 보여 주었다.

(2) 후드의 유무와 후드공의 위치는 터널내의 압력과 압력구배에 영향을 미치며, 특히 마지막 후드공의 위치가 가장 큰 작용을 한다.

(3) CFD-FASTRAN을 이용한 본 연구의 후드공 배열 중에서는 hood3이 가장 작은 압축파 기울기와 가장 큰 강도 완화의 효과를 보였다.

(4) 단순히 후드를 설치하는 것만으로는 압축파 강도 완화에 충분한 효과를 얻을 수 없으며, 완만한 압력 증가를 위한 최적의 후드공의 위치와 크기를 설계하는 노력이 필요함을 알았다.

앞으로 차세대 한국형 고속철도에 적용할 수 있는 최적의 후드 설계를 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김희동, 김태호, 1996, "터널 내를 주행하는 고속열차의 공기역학 해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), pp.434~439.
2. Ozawa, S., 1979, "Studies of Micro- pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit," Railway Technical Research Report, No.1121.
3. 김희동, 1997, "고속철도의 공기역학(5)," 대한기계학회지, 제37권, 제3호.
4. Ogawa, T. and Fujii, K., 1994, "Numerical Simulation of Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel," *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.3, No.1, pp.63~82.
5. Iida, M., Matsumura, T., Nakatani, K., Fukuda, T. and Maeda, T., 1997, "Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom," *QR of RTRI*, Vol.38, No.4, pp.206~211.
6. 황재호, 이동호, 1998, "고속전철 비정상 해석을 위한 이동격자기법 개발에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp.607~610.
7. 김희동, 김태호, 김동현, 1998, "입구후드가 고속철도 터널입구의 압축파에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B, pp.478~483.
8. NLR, 1998, "The test data of the pressure measurements in-and outside a model-scale railway tunnel for SNU and KRRI," KRRI 내부자료.
9. Steger, J. L., Dougherty, F. C. and Benek, J. A., 1983, "A Chimera Grid Scheme," *Advances in Grid Generation*, ASME FED-5, pp.59~68

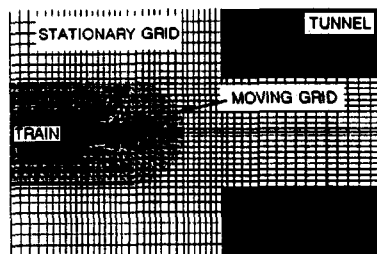


그림1. 수치해석 격자계

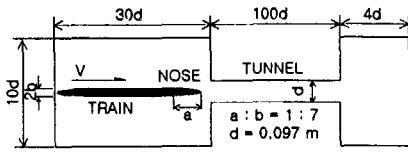


그림2. 유동장에 대한 개략도

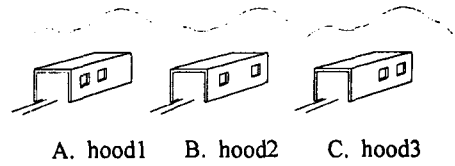


그림3. 후드공 형상

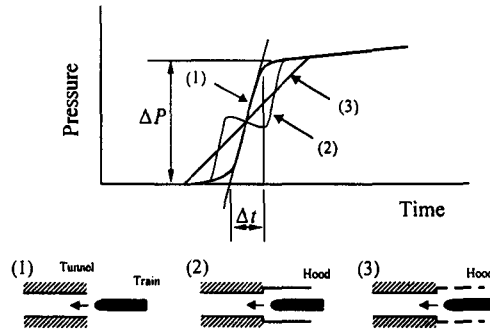


그림4. 압력구배 저감원리

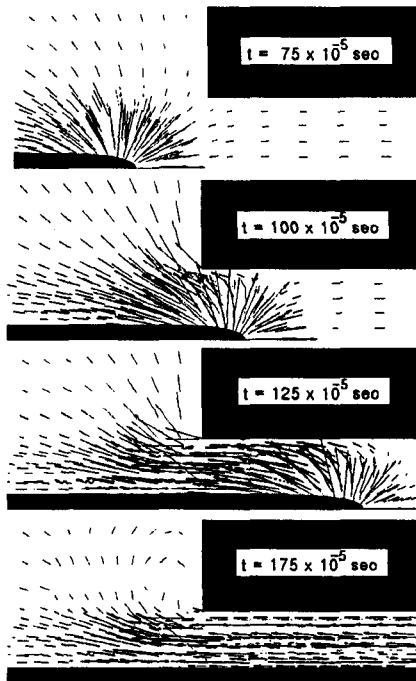


그림5. 후드가 없는 경우 유동속도벡터

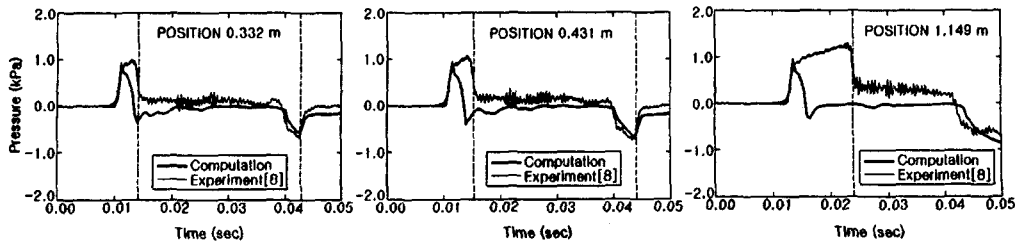


그림6. 후드가 없는 경우의 터널 진입속도 290km/h에서의 압력변화

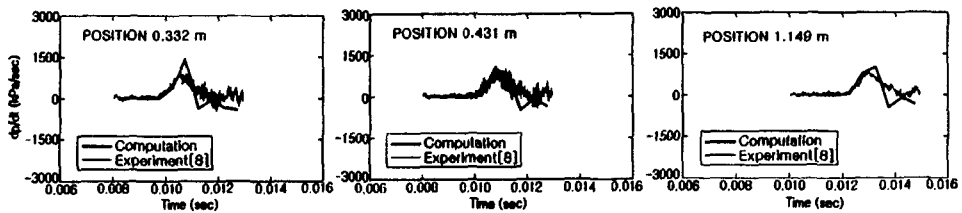


그림7. 후드가 없는 경우의 터널 진입속도 290km/h에서의 압력구배

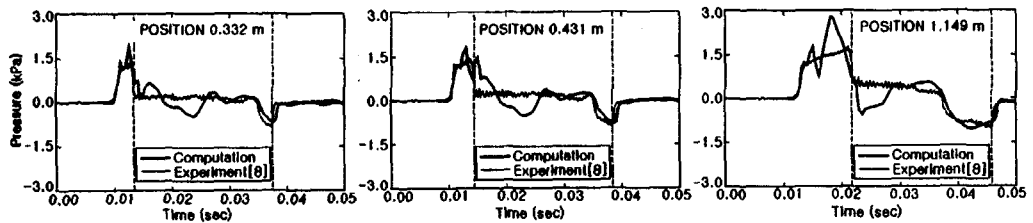


그림8. 후드가 없는 경우의 터널 진입속도 344km/h에서의 압력변화

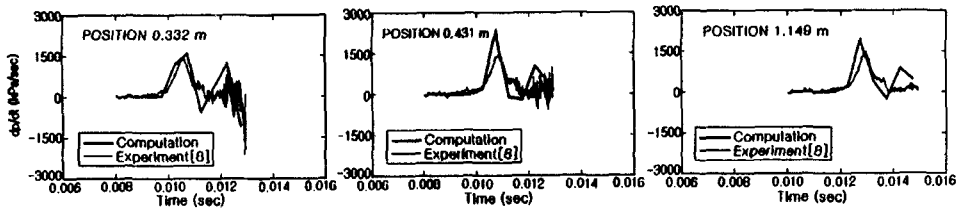


그림9. 후드가 없는 경우의 터널 진입속도 344km/h에서의 압력구배

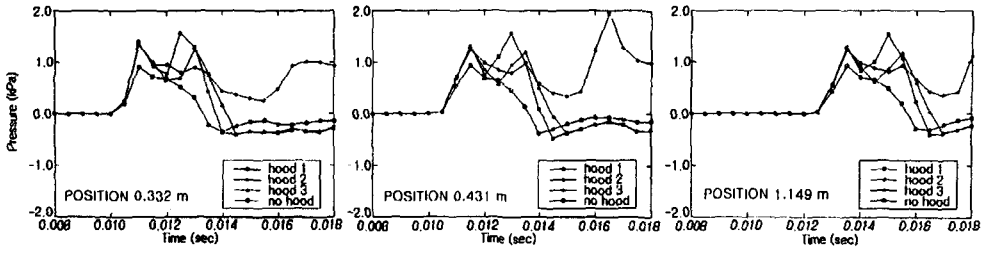


그림10. 압력변화 비교

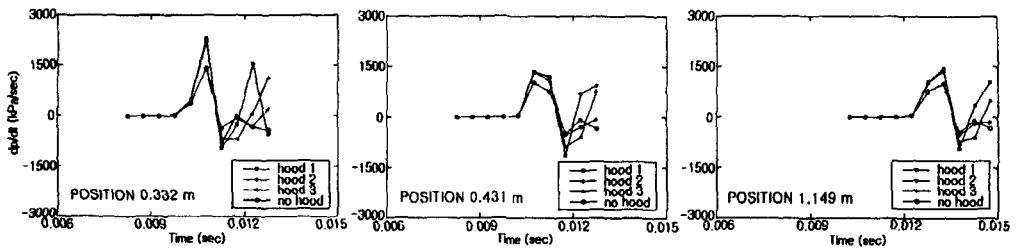


그림11. 시간에 대한 압력구배 비교