

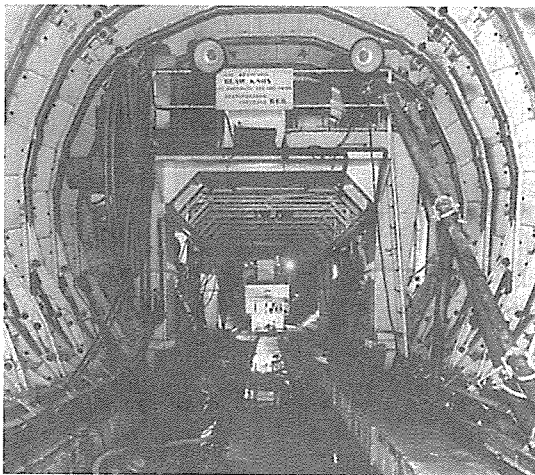
터널에서 列車와 空氣力學的 問題

李 鍾 得

건설안전기술사

공학박사

철도전문대 교수



1. 序論

鐵道가 대도시간 수송에 있어서 다른 교통기
관과 경쟁에서 얻을 수 있는 조건의 하나는
『高速性』이다. 日本의 新幹線 이후 世界鐵道의
高速化는 특히 유럽에서 프랑스, 독일 등이 고
속열차개발에 적극적으로 몰두하고 있다.

世界鐵道의 시험주행속도의 변천을 보면 그림
1과 같다. 1990年 5月 프랑스의 TGV는 시험
주행에서, 레일·차륜방식에 의한 世界最高記錄
515.3km/h를 달성하기에 이르렀다.

또한 日本에서는 東北, 上越, 東海道, 山陽의
各 新幹線에서 괴음, 振動, 微氣壓波등의 환경문
제를 극복하면서 速度 向上을 실시할 수 있었다.
저공해의 超高速鐵道를 목표로 일본, 독일 등에
서는 磁氣浮上式鐵道의 연구개발을 진행하고
있다. JR group이 개발하고 있는 超電導磁器浮
上式鐵道의 개발은 宮崎實驗線(延長 7.0km)의
단계로부터 山梨實驗線(計函延長 42.8km)의 단
계로 비약하게 되었다.

열차속도가 높아지게됨에 따라 공기역학적
현상이 현저하게 되었다. 고속열차의 공기역학적
문제를 표1에서 볼 수 있다.

目 次

1. 序 論
2. 터널内の 壓力變動과 車内壓 變動
 - 2.1 터널내의 壓力變動
 - 2.2 車内壓 變動
3. 터널주행시 列車의 空氣抵抗
4. 터널 微氣壓波
5. 터널内の 溫度上昇
6. 結 論

이제 우리도 설계 속도 350km/h의 경부고속 전철이 착공된 시점에서 터널이 311km의 全延長에 거의 1/3을 차지하고 있는 실정으로 특히 터널에서 열차와 공기역학적 문제는 대단히 중요하다고 생각된다.

표 1. 철도에 관한 주요한 공기역학적 문제

地下 터널	列車風
	微氣壓波
	터널내 溫度上昇과 터널내 換氣 火災對策과 터널내 換氣
	터널내의 壓力, 風速
列車 · 車輛	空氣抵抗
	열차측면의 壓力변동
	車內 換기방식과 車內壓 변동
	列車交行時의 空氣力
	橫風이 車輛에 미치는 空氣力
	터널에 突入, 退出시의 過度現像
	先頭部 後尾部의 空力특성
	팬토히그라프의 空力특성
	車輛空力音

터널과 같이 좁은 공간에서 열차의 고속주행을 지상구간에서 주행에 비해 매우 엄격하게 공기역학적 문제를 제기하지 않을 수 없다. 터널에서 열차와 공기역학적 문제의 연구개발은 이론해부, 數值 simulation, 橫型實驗, 또는 現車實驗 등이 이루어진다.

여기서 數值 simulation의 有利性を 살펴보면

- 1) 터널내의 壓力변동과 차내압 변동
- 2) 터널주행시의 공기저항
- 3) 터널 微氣壓波
- 4) 터널내 溫度上昇

등의 문제를 예로 들 수 있으며 日本鐵道總研에서 연구한 문헌을 소개한다.

2. 터널내의 壓力變動과 車內壓變動

2.1 터널내의 壓力變動

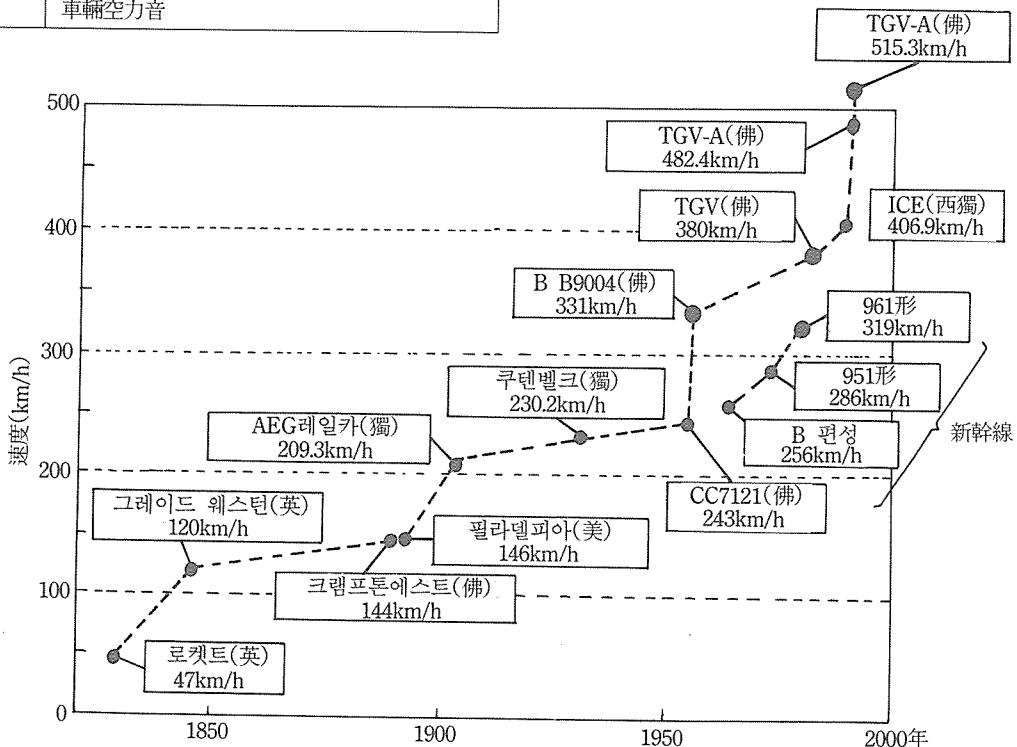
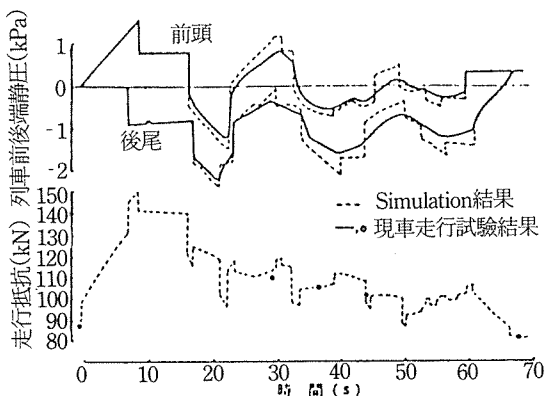


그림 1. 世界鐵道の 시험주행속도 변천

열차의 터널 돌입에 의해 발생한 터널내의 압력변동은 객실내에 침입하여, 승객은 귀에 통증을 느낀다. 이런 현상은 東海道新幹線開通前, 綾瀬~小田原間の Model線에 명백히 나타났다. 新幹線 最初の 空氣力學의 問題였다.

터널내의 압력변동은 차체에 비해 반복되는 하중, 터널내의 작업환경의 문제 등에도 관계된다. 열차가 터널내에 돌입하면, 열차전방의 대부분의 공기는 열차측면과 터널벽면과의 간격을 통해서 터널의 외부로 불어 나오나, 일부의 공기는 압축되어 그 신호가 압력파로서 터널내를 전파한다. 原朝茂는 1次元 Model(터널단면내에 물리량은 똑같은 Model)에 의거, 열차가 터널에 돌입한 직후의 열차전방의 공기압력상승은 열차속도, 열차 터널 斷面積比의 계수로써 처음으로 이론적으로 구했다.

그후에 山本杉也는 압력파의 터널내 왕복을 고려해서 열차가 터널에 돌입해서부터 터널을 빠져 나갈 때까지 터널내의 압력, 유속의 변동 및 열차의 공기저항의 시간적 변화를 구하기 위해 기초이론(1次元 Model)을 확립하여 기초 방정식을 특성곡선법에 의해 수직적으로 해를 구하기 위한 simulation program을 개발했다. 이



高塚山터널 3264m 斷面積 60.4m² 마찰계수 $\lambda=0.020$
 新幹線列車 400m 斷面積 13.7m² 마찰계수 $\lambda'=0.018$
 壓力抵抗係數 $C_{dp}=0.15$ 速度 200→190km/h 列車質積 869t

그림2. 터널을 통과하는 列車 側面의 압력변동과 走行抵抗變化의 예

program을 터널내 단독열차주행의 경우에 대해서만 적용할 수 있다. 여러사례에 대한 simulation결과와 現車走行試驗結果의 예를 그림 2에서 볼 수 있다.

그림2에서 列車의 空氣抵抗 變化를 볼 수 있으며, 압력변동에 대한 空氣抵抗이 변화하는 것을 알 수 있다.

터널내에서 對何列車가 있는 경우에는 對何列車가 없는 경우에 비해 압력변동이 크게 되며 또한 변동의 모양도 복잡하게 된다. 최근 飯田雅宣은 상술한 simulation을 발전시켜 對何列車가 있는 경우에 대해서도 적용할 수 있는 simulation program을 개발했다. 이 program은 열차 및 터널의 諸元, 進行列車, 對何列車의 속도와 터널돌입 시간을 지정해서

- (1) 터널내의 압력 및 風速
- (2) 進行列車와 對何列車의 車輛側面에 작용하는 압력
- (3) 터널내 주행시 공기저항

등을 계산하기도 한다. 종래 터널내에서 對何列車가 있는 경우의 압력변동의 最大値 예측은 단독열차주행의 경우 simulation결과를 기초로 이론적 고찰로부터 구하는 방법을 이용해 왔다.

터널내 압력변동의 simulation에 쓰여지는 諸元중에는 열차단면적, 열차단면의 水力的 摩擦

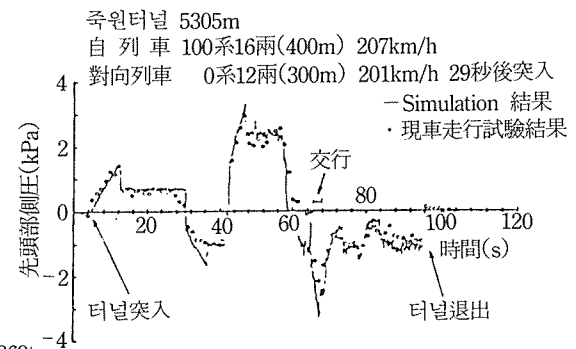


그림 3. 터널내에서 對何列車가 있는 경우 선두차 측면의 압력변동의 예

係數 등 공기저항에 密接한 관계가 되고 있다. 前田達夫는 열차측면의 水力的 摩擦係數를 열차가 터널에 돌입할 때 차량측면의 압력상승으로부터 구하는 방법이 있다. 형식이 다른 新幹線 전차에 대한 그것의 수치는 비교시켜 확장했다.

100系 전차가 山陽型 터널에서 0系전차와 交行하는 경우 100系 전차 선두차 측면의 압력변화의 simulation의 결과와 열차시험주행결과의 예를 그림 3에서 볼 수 있다.

양자는 부분적으로는 좋지 않은 곳도 있으나 전체적으로는 잘 어울리는 것을 볼 수 있다.

2.2 차내압 변동

東海道 新幹線에서는 귀가 멍해지는 대책으로써 車體를 氣密構造로 하는 것과 함께 열차가 터널에 돌입할 때 外氣가 들어가는 입구를 막아 締切하는 방식이 채용되었다. 그러나 그후에 개통된 山陽新幹線의 경우에는 터널구간이 매우 많이 이 방식으로는 필요한 환기량을 확보할 수 없기 때문에 給氣 및 排氣送風機를 사용하여 車內壓變動을 완화시켜주는 연결환기방식을 채용하게 되었다.

터널내의 압력변동은 열차속도에 거의 2乘에 비례해서 커지기 때문에 열차속도가 향상되면 환기용송풍기의 성능에 대한 요구가 더욱더 심해진다. 善田康夫는 급배기용송풍기의 풍량을

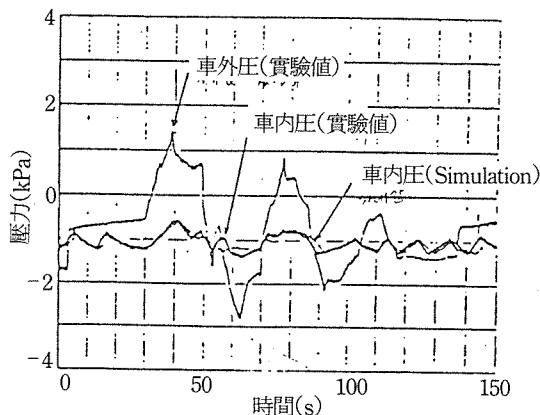


그림 4. 제어시의 차내압 simulation 결과의 예

제어해서 차내압변동을 제어하는 다음 3가지 simulation에 대해 검토했다.

(1) 차내외의 압력차의 변화에 대한 환기용 송풍기의 조절율을 변화시킴

(2) 조절율을 고정하고 조절작용의 on off에 의한 風量을 제어함

(3) 송풍기의 운전, 정지에 의한 풍량을 제어함.

귀가 멍해지는 대책으로는 유효한 환기 시스템을 검토하기 위해서는 simulation이 이루어져야 한다. 小林實은 상술한 (2)의 방법에 의한 차내압제어의 효과를 100系新幹線電車の 주행 시험에 의해 확인했다. simulation결과와 現車 시험주행결과의 예를 그림 4에서 볼 수 있다. 전체적으로는 양자가 잘 합치하는 것을 보여주고 있다.

전철의 터널내 압력변동의 simulation과 本simulation을 동시에 시행하므로 어느 線區에 열차 Dia를 상정할 때 차내변동을 예측할 수 있다.

3. 터널주행시 열차의 공기 저항

일반으로 터널 주행시의 열차의 공기저항은 지상구간의 열차주행에 비해 크다. 공기저항에 관한 simulation을 터널내의 압력변동의 simulation program에 공기저항을 계산하는 부분을 부가해서 할 수가 있다.(두 개의 simulation은 같은 program으로 할 수 있다).

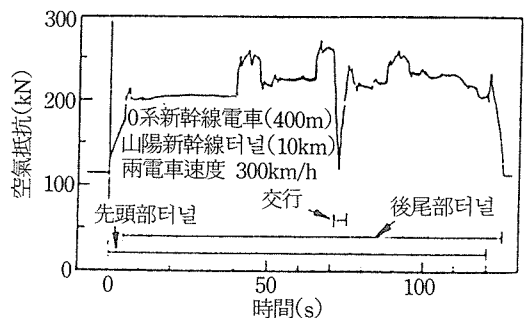


그림 5. 터널내에 對何列車가 있는 경우의 공기저항 변화의 simulation 결과에

압력파의 터널내 왕복에 따른 공기저항의 변동을 평균화한 공기저항의 값은 비압축파의 근사값을 써서 구할 수 있다. 터널주행시의 공기저항을 허가하기 위해서는 이 방법으로 구한 수치도 상당히 유력하다. 그러나 최근에는 simulation program에 의해 터널주행시의 공기저항(터널내 열차 交行이 있는 경우와 없는 경우)을 압력파의 터널내 왕복의 영향까지 고려하여 계산할 수 있도록 되었다. 터널내에 對何列車가 있는 경우에 공기변화의 예를 그림 5에서 볼 수 있다.

4. 터널 微氣壓波

1975년 3월 新幹線의 岡山~博多開索에 수반하여 비교적 긴 터널(슬래브 軌道)의 출구에서 공기압음이 발생하거나 坑口부근의 가옥의 창이나 문이 들연 움직이는 음을 일으키는 새로운 환경문제가 발생했다. 이것은 열차의 터널돌입에 의해 생기는 압력파가 터널내를 전파하여 터널 출구에 도달할 때 坑口로부터 외부에 펄스장의 압력파(터널 微氣壓波)를 방사하기 때문에 일

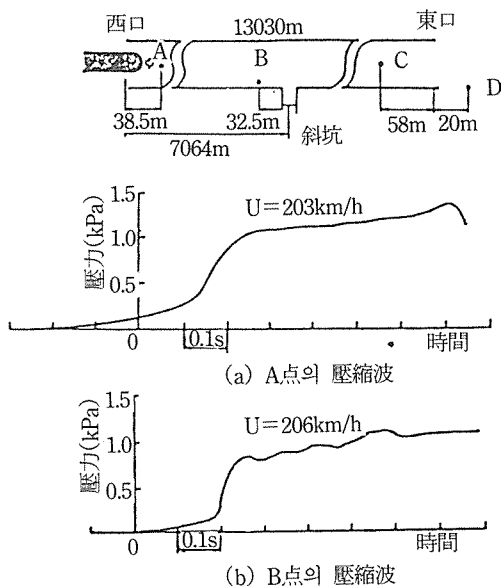


그림 7. 터널내 압력파와 微氣壓波의 波形 例

어난다(그림 6).

미기압파의 파형은 근사적으로 터널출구에 도달한 압력파의 波形的 시간미분으로 표시된다. 즉, 압력파의 전면이 터널 내 전파중에 끊어진 경우에 微氣壓波는 커진다. 山陽新幹線岡山以西의 비교적 긴터널에서 이 문제가 발생한 것을 슬래브 궤도의 채용에 의해 터널 벽면의 주위 전체가 매끄럽게 되어 압력파의 전면이 끊겨 波의 非線形效果가 나타나게 된다. 微氣壓波低減對策의 원리는 터널출구에 도달한 압축파의 前面句配를 작게 하는 것도 있다. 그를 위한 방법은 여러가지를 생각할 수 있다. 現在 山陽 및 동북 山越新幹線에서는 터널입구에 긴 수십미터의 후드(터널내의 공기를 서서히 압축하기

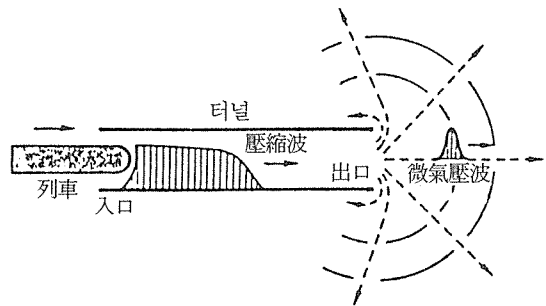
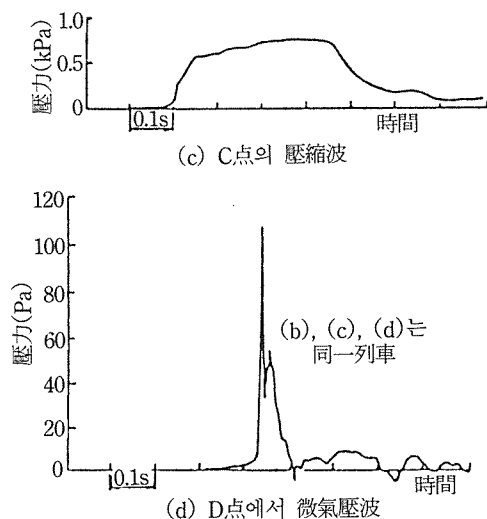


그림 6. 터널 微氣壓波



위한 완화구간)을 설치하는 방법, 또한 上越新幹線에 있어서는 터널내에 있는 枝坑을 압력파를 모으는 길로써 이용하는 방법 및 연속하는 터널을 snow shelter의 측면 slit(꺾고 깊음)로부터 압력파를 도피시키는 방법이 채용되고 있다.

微氣壓波 대책을 실시하지 않는 경우의 터널내의 壓力波의 波形과 微氣壓波의 波形 예를 그림 7에서 볼 수 있다.

터널을 통과하는 승객의 귀가 멍해지는 현상은 압력파의 크기(直流成分)가 관계되는 微氣壓波의 현상은 압력파의 전면 形(交流成分)과 관계된다.

압력과 전면의 상세한 形이 문제가 된 이유이다.

미기압파의 현상은 다음의 3단계로 된다.

- (1) 열차의 터널 돌입에 의한 壓力波의 形成
- (2) 압력파의 터널내 전파에 수반한 壓力波 形의 變形
- (3) 터널출구로부터의 微氣壓波의 反射에 따라서 미기압파의 simulation도 상술한 3단계가 필요하다.

小澤智는 터널돌입시의 압력파의 파형을 주고 압력파가 슬래브 궤도 터널내를 전파할 때의 압력파의 변형을 터널내에 있는 器材坑의 영향 등도 고려해서 계산하고 터널출구에 도달한 壓力波의 파형으로부터 微氣壓波를 계산하는 방법을 제안했다. 압력과 전면의 변형을 의논하는 (2)의 단계의 해석에서는 슬래브 궤도터널과 같은 터널 주위전체가 콘크리트벽면과 같은 것이

있는 경우에는 압력파의 전파는 일차원적인 평면파로써 취급이 가능하다. 그러나 자갈道床 궤도터널과 같은 터널단면 주위의 일부가 다른 音響的 성질을 갖는 경우에는 일차원 model에 의한 기초방정식의 도출시에는 특별한 배려가 필요하다.

simulation의 적용에으로써 上越新幹線의 榛名 터널의 경우를 볼 수 있다. 이 터널의 兩坑口에는 微氣壓波 對策用的 후드가 없고 터널내 6개소의 큰 斜坑, 入坑을 미기압파 대책으로 이용하고 있다(그림 8).

兩坑口の 微氣壓의 실측결과를 그림 9에서 보여준다.

대책 후에 열차가 주행을 시작하기 위해서는 대책전의 실측결과는 없다.

simulation에 의한 대책전의 예상 微氣壓波를 그림 11 (a) 또한 simulation에 의한 대책후의 微氣壓波를 그림 11(b), (c)에서 보여준다.

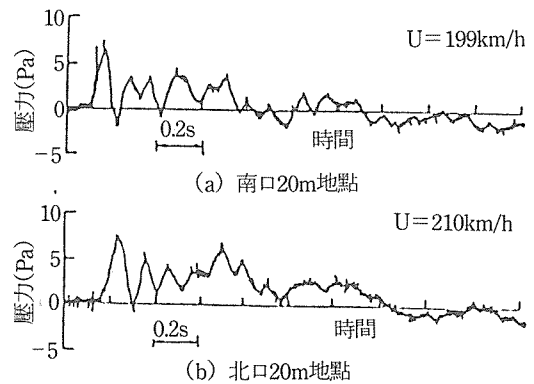


그림 9. 榛名터널 兩坑口の 微氣壓波의 測定 예

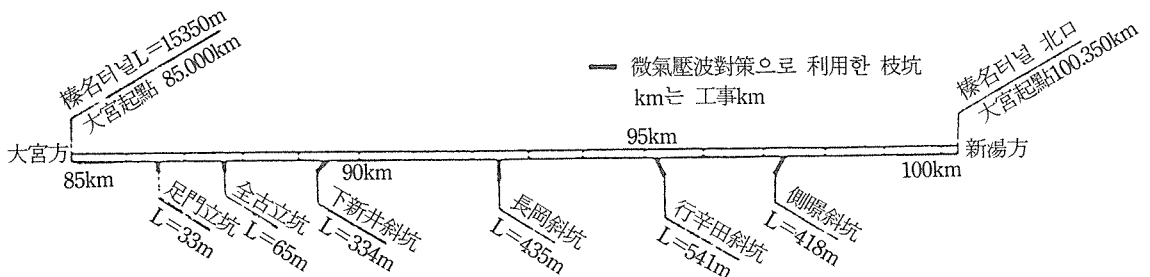


그림 8. 上越新幹線 榛名터널의 斜坑과 入坑

계산결과와 실측결과를 비교하면 어떤 坑口의 경우도 크기는 약간 다르나(坑口의 지형의 영향을 표시하는 파라미터를 적당히 선정하는 것에 따라 맞출 수가 있다.) 파형은 꽤 좋게 합치됨을 알 수 있다.

5. 터널내의 온도상승

열차가 터널내를 주행할 때 소비하는 energy는 최종적으로 열로 변하여 터널내의 온도를 올라가게 한다. 터널이 짧은 경우에는 열차주행에 의한 터널내의 誘起된 흐름에 의해 환기 혹은 터널내의 자연풍에 의한 환기에 의해 터널내의 온도상승을 억제한다.

長大터널에서는 상기의 환기만으로는 터널내부의 발생열을 충분히 배출시키지 못하므로 터널내 온도상승을 크게 하는 문제가 된다. 터널내

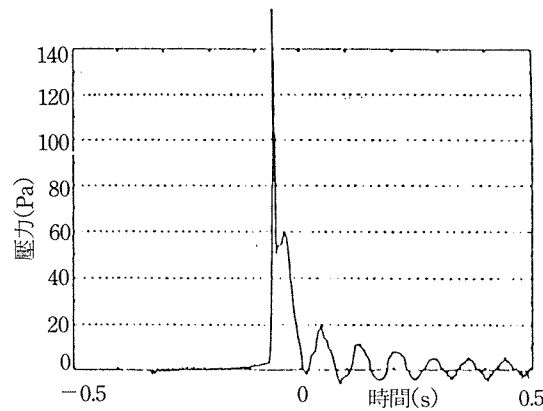
온도상승의 simulation은 청함터널(깊이 약 54 km)을 대상으로 福地合一, 井口에 의해 이루어졌다. 열이동에 관한 井口의 simulation model을 그림 10에서 볼 수 있다.

터널내의 換氣溫度, 水蒸氣壓, 岩盤溫度, 流水의 質量, 流量, 溫度, 岩盤中の 流水溫度, 排水管의 溫度 등에 대한 미분방정식을 풀어 터널내의 공기온도상승을 구하게 된다. 靑函터널의 simulation결과와 예시 그림 11에서 볼 수 있다.

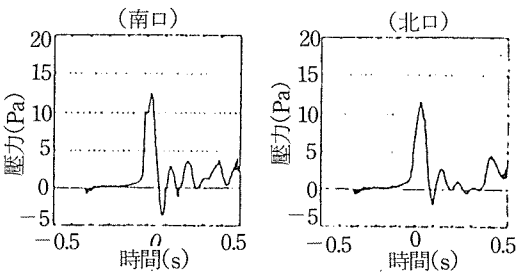
발열량 200w/m(新幹線電車 100本/日에 상당)에 대해서, 풍속 1m/s의 상용환기로 온도상승을 억제할 수 있는 것을 보여준다. 또한 이러한 simulation으로부터 온도상승에 대한 流水의 영향이 커지는 것을 알았다.

장래의 온도상승철도에서는 長大터널에 있어서 온도상승의 문제는 중요하다.

simulation法에 관해서는 앞으로 검토할 필요가 있다.

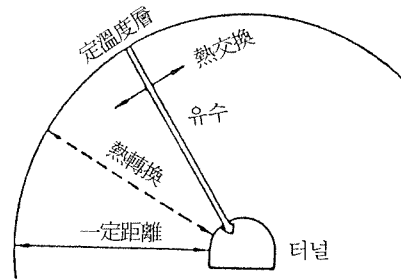


(a) 對策前의 豫想微氣壓波

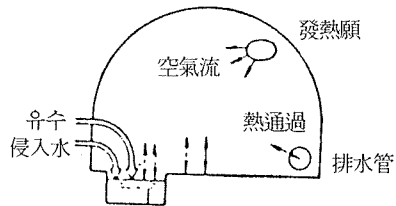


(b) 對策後의 微氣壓波

그림 10. 榛名터널 微氣壓波 對策前後의 微氣壓波의 simulation결과(20m지점)



(a) 터널 周圍의 熱移動Model



∴ 熱傳達
∴ 發熱

(b) 터널 斷面內의 熱移動 Model

그림 11. 터널의 온도상승에 관한 simulation을 위한 열이동 model

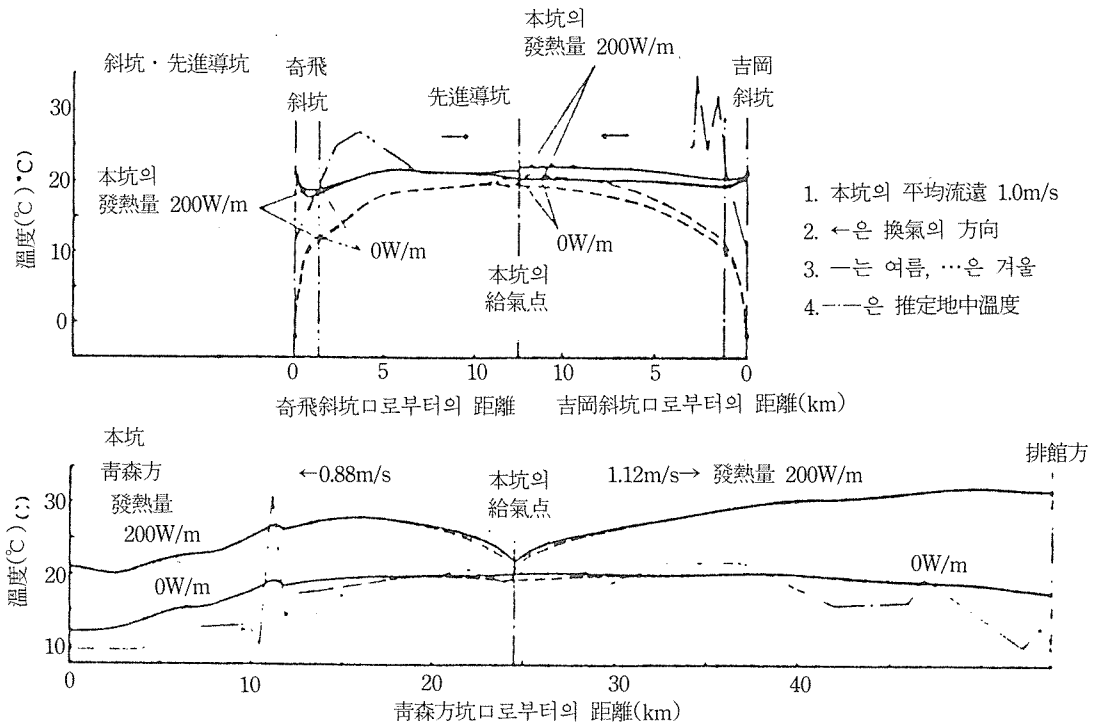


그림 12. 靑函터널의 온도상승에 관한 simulation결과의 예

6. 結論

터널에서 열차와 공기역학적 문제는 터널 단면내에서 물리량이 똑같다고 하면 1차원 model이 유력하나 여기서 기술한 것과 같은 문제는 이범위에 들어간다. 이와같은 문제이외에 2차원 또는 3차원의 흐름을 해석할 필요가 있는 문제 (예를 들면 열차가 터널에 突入, 退出時, 車輛에 작용하는 공기역학적 문제)가 있다.

이와 같은 2차원 또는 3차원의 흐름을 해석하는 데에는 슈퍼컴퓨터가 위력을 발휘한다.

현재 항공기, 자동차의 분야에서는 슈퍼컴퓨터를 이용한 수직 simulation이 성행하고 있다.

철도분야에서도 그 유효성이 변해가고 있다고 생각된다.

지금부터 열차속도는 더욱 더 향상될 것이다. 터널내의 壓力波의 直流成分의 문제(귀가 멍해지는 현상)후에 교류성분의 문제(터널 微氣壓波)가 나타난 것과 같이 새로운 문제가 다시 속도향상과 함께 나타날 가능성이 있다. 여러가지 數値simulation수법을 몸에 배게하는데는 취급할 수 있는 공기역학적 문제의 폭은 넓어졌다.

공기역학적 문제로부터 철도의 『高速化』에 기여할 수 있는 것이 우리 공기역학관계자의 목표이다. ()