

터널에서 列車速度 향상시 微氣壓波 저감대책

李 鍾 得
건설안전기술사
공학박사
철도전문대학 교수

目次

1. 序 言
2. 列車速度向上時 터널의 微氣壓波
3. 터널 微氣壓波의 低減 對策
 - 3.1 入口緩衝工(新設 또는 延長)에 의한 對策
 - 3.2 斜坑·入坑 등을 利用하는 對策
 - 3.3 連續해서 터널의 Slit(開口部)를 갖는 셸터(Shelter)를 만드는 方法
 - 3.4 車輛側의 微氣壓波 低減對策
 - 3.4.1 列車先頭部 形狀의 最適化
 - 3.4.2 車輛斷面積을 縮小하는 方法
 - 3.5 터널壁에 의한 對策
 - 3.6 액티브(active)한 方法
 - 3.6.1 워터커튼(Water Cartain)에 의한 對策
 - 3.6.2 水滴 噴露에 의한 方法
 - 3.6.3 플로어(Floor) 送風에 의한 方法
4. 要約
5. 結論

1. 序 言

터널의 微氣壓波는 列車가 高速으로 터널에 突入할 때 發生하는 壓縮波가 터널內를 傳播하여 터널 出口에 到達할 때 坑口로부터 外部에 放射하는 펄스(Pulse) 狀態의 壓力波이다. 터널의 微氣壓波는 이와 같이 그 實態가 매우 分明하여 入口緩衝工을 施設하여 低減對策法이 實施되고 있다. 日本鐵道の 實例를 보면 列車速度 220km/h에서 240km/h로 速度向上時에 緩衝工의 延長 등 對策을 強化했고, 東芝·上越新幹線에서 列車速度 240km/h 對策이 完了되었다.

이제 우리도 運行 速度 300km/h의 京釜高速 電鐵이 着工된 時點에서 300km/h의 高速運轉의 實現을 위하여는 低減效果가 높고 經濟的인 터널 微氣壓波 低減對策을 開發할 必要가 있다.

여기에 前田達父의 報告書를 參考로 低減對策의 基本的 考慮方法과 速度向上에 대한 對策法을 技術하고자 한다.

2. 列車速度向上時 터널의 微氣壓波

그림 1에서 터널 微氣壓波의 發生 現像을 볼 수 있는 것과 같이 터널 出口로 부터 放射되는 터널 微氣壓波의 크기 P는 低周波로서, 터널 出口에 到達한 壓縮波의 波面의 壓力勾配(dp/dt)에 거의 比例하고, 坑口로부터의 距離 r에 反比例하며, 坑口の 地形(立體角 Ω)에 依存된다.

$$P = \frac{2A}{\Omega Cr} \left(\frac{dp}{dt} \right) \dots\dots\dots ①$$

여기서

A: 터널 斷面積

C: 音速

P: 壓力

t: 時間

列車가 터널에 突入時 터널 入口에서 壓縮波의 波面의 最大壓力勾配(dp/dt)_{ent}는

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{ent} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2}{kd} \frac{1 - (1-R)^2}{(1-V/C)\{V/C - (1-R)^2\}} \dots\dots\dots ②$$

여기서

V: 列車速度

R: 터널 斷面積에 대한 列車斷面積比

k: 壓力上昇에 대한 파라미터

d: 터널의 直徑(=4A/S S: 터널의 周長)

ρ: 空氣의 密度이다

터널이 짧은 경우 터널 內에 傳達되는 壓縮波는 거의 變形되지 않으며, 터널 出口에 있어서 最大壓力勾配((dp/dt)_{exit})는

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{exit} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{ent} \dots\dots\dots ③$$

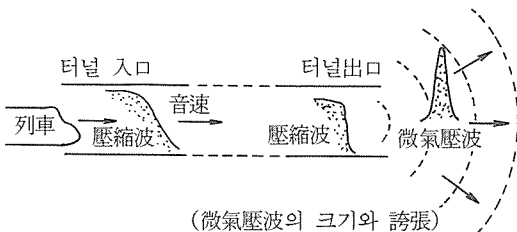


그림 1. 터널에서 微氣壓波 發生

길이가 긴터널의 경우는 軌道種別의 影響을 받아 道床자갈 軌道의 경우

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{exit} < \left(\frac{dp}{dt} \right)_{ent} \dots\dots\dots ④$$

이 된다.

微氣壓波 P는 짧은 터널에 비해 작아진다.

슬래브 軌道의 경우

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{exit} > \left(\frac{dp}{dt} \right)_{ent} \dots\dots\dots ⑤$$

이 되고, 微氣壓波 P는 짧은 터널에 비해 크게 된다.

列車速度를 270km/h까지 向上시킨 경우의 微氣壓波를 길이가 다른 슬래브 軌道의 터널에서 測定한 結果

(1) 짧은터널(例 길이가 1.5km 以下)에서 微氣壓波 最大値에 관한 V³이 成立한다.

(2) 길이가 긴터널에서는 波面前面이 짧은 듯이 솟아있어 微氣壓波는 꽤 커진다는 것을 알 수 있었다.

길이가 긴터널에 있어서 壓縮波가 짧은듯이 솟아있는 것은, 터널 內의 斜坑·立坑 및 器材 坑 등 枝坑의 影響을 크게 받기때문에 각각의 터널에 있어서 檢討할 必要가 있다.

3. 터널 微器壓波의 低減對策

터널 微器壓波는 터널 出口에 到達하여 壓縮波의 波面의 壓力勾配는 거의 比例하기 때문에, 이 波面의 壓力勾配를 작게 하는 것이 低減對策法의 基本的 考慮 方法이다.

具體的으로 다음과 같은 方法등을 고려해야 한다.

- (1) 入口 緩衝工에 의한 對策
- (2) 斜坑·入坑 등을 利用하는 對策
- (3) 連續해서 터널을 slit(開口部)을 갖는 셸터(Shelter)를 만드는 方法.
- (4) 車輛에 의한 對策

- (5) 터널 壁面에 의한 對策
- (6) 액티브(active)한 方法

3.1 入口緩衝工(新設 또는 延長)에 의한 對策

入口緩衝工은 열차 突入에 의해서 생기는 壓縮波前面의 壓力勾配를 最初의 段階부터 완만하게 하는 對策法이다.

그림 2는 入口緩衝工의 길이에 따른 低減效果를 보여주는 것으로 여기서 入口緩衝工의 效果를 列車突入速度의 低減比로 表示한 것이다.

緩衝工에 의한 低減效果를 길이가 길수록 큰 것을 알 수 있다.

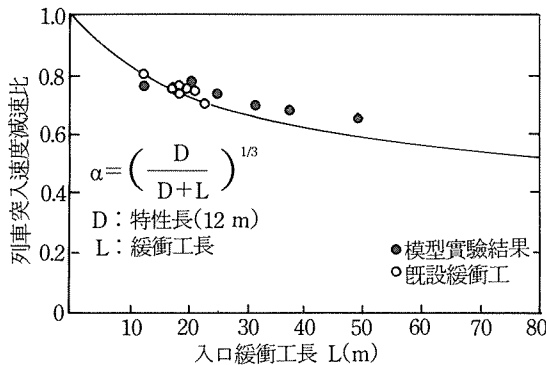


그림 2. 入口緩衝工의 길이와 列車突入速度減速比

緩衝工은 適切한 位置에 適切한 크기의 開口部가 必要하다.

模型實驗에 의해 얻어진 各 길이에 가장 적합한 開口部를 그림 3에서 볼 수 있다.

入口對策의 하나로 (緩衝工을 設置할 수 없는 경우) 坑口부근의 흠뚨개가 작은 부분에 구멍을 뚫어서 壓縮波의 勾配를 적게하는 方法을 생각할 수 있다.

그림 4는 이 方法에 의해 模型實驗을 한 結果의 例이다.

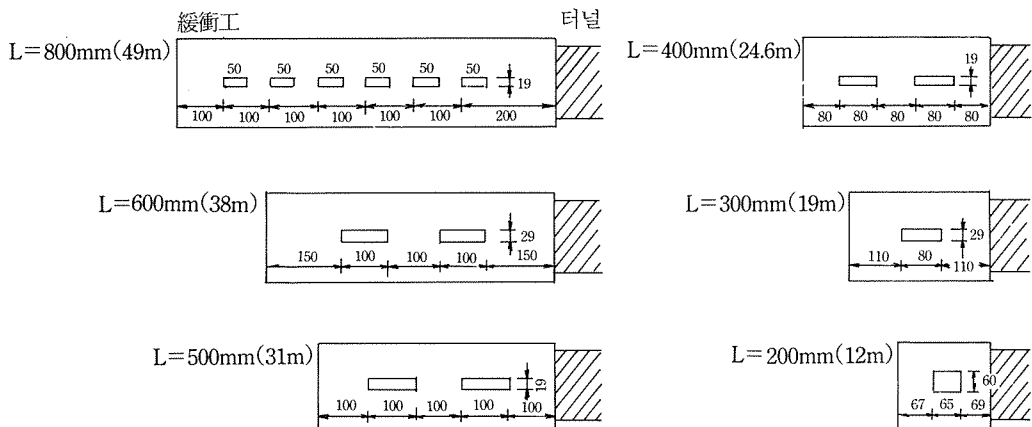
이 方法은 터널 入口에 가장 가까이 있는 구멍길이(토피의 深度)가 깊은 경우에는 充分한 低減效果를 얻을 수 없는 것을 알 수 있었다.

3.2 斜坑·入坑 등을 利用하는 對策

比較的 긴 터널에서는 斜坑들의 枝坑이 있으나, 이것에 의해 本坑에서 傳達되는 壓縮波가 바이패스(bypass) 되어 壓力勾配를 내리는 方法으로, 쓰여지고 있다.

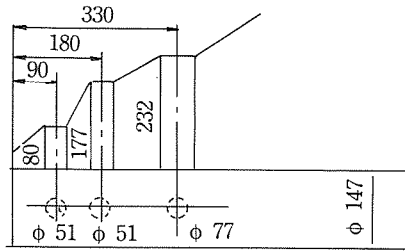
斜坑의 깊이가 어느 정도 (本坑으로부터 30-50m) 이상 있는 것이 有效하다.

微器壓波低減效果를 높이기 위해서는 斜坑扉의 移設 등의 對策이 必要하다.

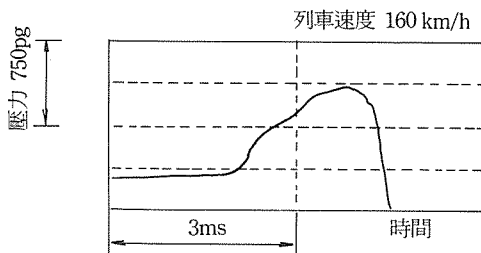


(터널 斷面은 原形, 緩衝工斷面은 正方形: 축척 1/62)

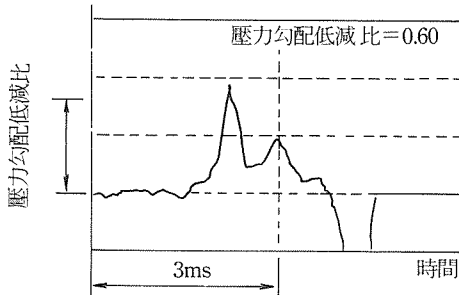
그림 3. 入口緩衝工側面の 開口部 形狀(模型實驗)



(a) 구멍의 위치와 길이(單位mm)



(b) 터널內壓縮波形



(c) 터널內壓縮波形的 微分波形

그림 4. 土皮가 적은 坑口에 있어서 對策(模型實驗)

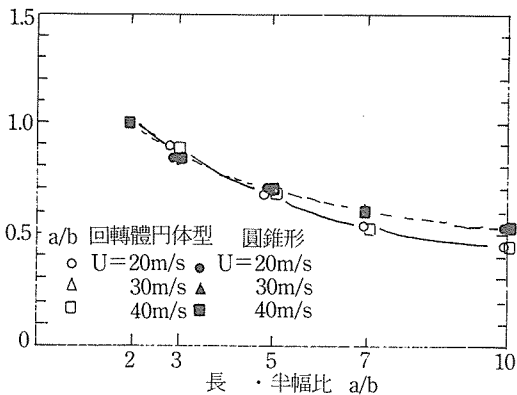


그림 5. 列車先頭部 길이와 壓力勾配低減效果

3.3 連續해서 터널의 slit(開口部)를 갖는 셸터 (Shelter)(待避壕)를 만드는 方法

는待避壕등의 適切한 開口部를 設置하여 微器壓波 對策을 할 수가 있다. 즉 앞의 터널에서 發生하는 壓力波를 開口部로 부터 逃避시키는 方法이 있다.

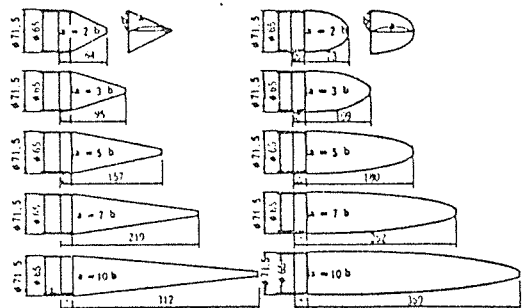
3.4 車輛側의 微器壓波 低減對策

車輛側의 微器壓波低減對策으로는 터널 突入 時의 壓縮波 形成에 影響을 주는 列車의 先頭部 形狀을 最適化하는 것으로, 열차 단면적을 축소 시키는 것이다. 今後 車輛의 新製作에 있어서는 微器壓波對策을 考慮하여 設計하는 것이 바람 직하다.

3.4.1 列車先頭部形狀의 最適化

그림 5는 先頭部의 길이와 微氣壓波低減效果의 關係를 조사한 模型實驗의 結果이다. 先頭部의 形狀은 圓錐와 回轉橢圓體로 半徑의 10배까지의 길이에 관해서 實驗을 했다. 이것에 의하면 列車先頭部는 基本的인 길이 方向이 微氣壓波의 低減效果가 컸다.

다음으로, 實際의 列車에 있어서는 先頭部를 그렇게 길게하지 않으므로, 그림 5에서 보여준 先頭部의 先端을 끊은 경우로 實驗을 한 것이다. 그 結果, 그림 6과 같이 回轉橢圓體에서는 低減



(a) 圓錐形先頭部 (b) 回轉橢圓體形先頭部 先頭部

효과가 작아지고 있으나 圓錐形에서는 先端을 끊더라도 低減效果를 얻을 수가 있음을 알 수 있었다.

그림 7은 新幹線電車 0系 및 100系の 先頭部의 斷面積(床下 포함)의 變化를 보여주는 것이다.

100系の 斷面積變化를 0系の 것과 點線으로 포개면, 壓縮波의 形成에 關係하는 部分에 關係해서 兩자가 거의 差가 없는 것을 알 수 있다.

微氣壓波 低減을 위해서는 壓縮波의 形成에 關與하는 列車 線頭部의 斷面積變化를 완화할 必要가 있다.

3.4.2 列車斷面積을 縮小하는 方法

列車斷面積을 어느 정도 작게하는 對策에 關係해서는, 터널斷面積에 대한 列車斷面積比 R을 變化시키는 경우 微氣壓波에 대한 影響을 그림 8에서 볼 수 있다. 計算式은 ①, ②를 使用했다.

3.5 터널 壁面에 의한 對策

도상자갈軌道의 긴터널에서는, 壓縮波가 터널 內를 傳播하는 것이 波面の 壓力勾配가 작게 되며, 微氣壓波도 작게 된다.

따라서 도상자갈과 같은(넓은 意味로) 吸音材를 터널 거의 全長에 걸쳐서 敷設하는 것이 보다 低減對策으로 생각된다. 이것은 設置區間이

짧을 경우 效果가 없다.

3.6 액티브(active)한 方法

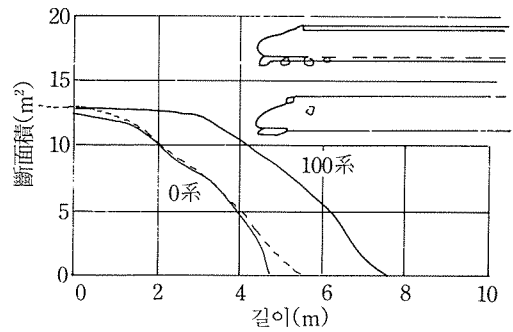


그림 7. 現行新幹線 電車先頭部의 斷面積 變化

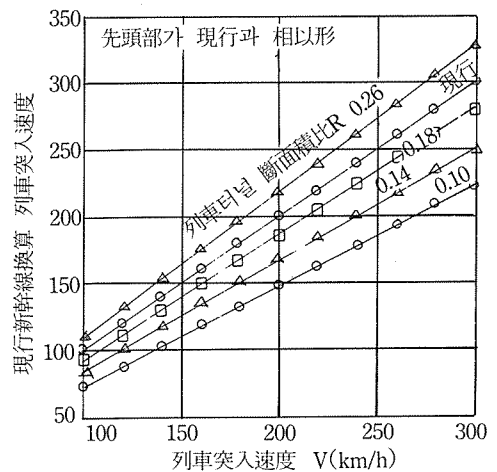


그림 8. 列車斷面積을 縮小하는 方法(수직計算結果)

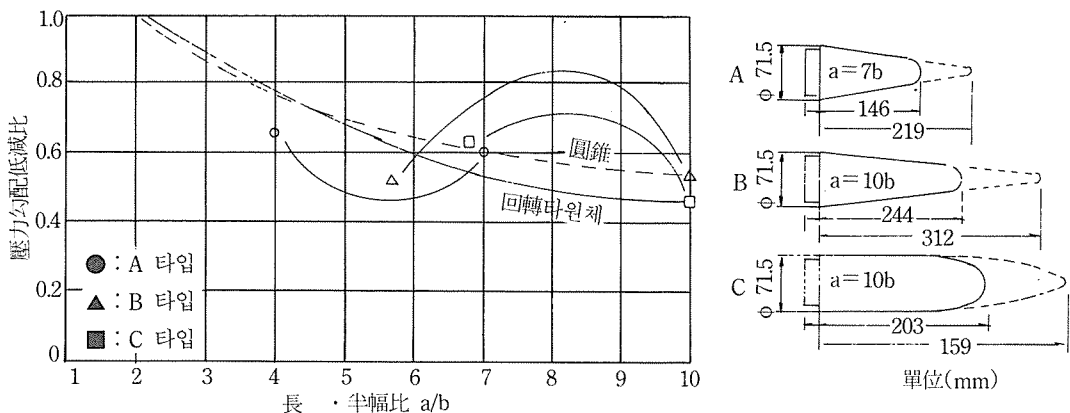


그림 6. 列車先頭部形狀에 關한 實驗結果

지금까지 實施해온 對策은 소극적인 보수를 요하지 않는 方法이었으나, 액티브한 方法에 관해서 檢討한 例로는

(1) 터널내에 워터 커튼(Water Curtain)을 設置하는 方法

(2) 터널내에 水滴을 噴露하는 方法

(3) 터널入口에 플로어(floor)를 設置하는 方法

등을 생각할 수 있다. 이것은 施工性, 經濟性, 安全性등 새로운 問題를 發生시키지 않도록 考慮하여 檢討할 必要가 있다.

3.6.1 워터 커튼(Water Curtain)에 의한 對策

Water Curtain은 列車突入에 의해 생기는 壓縮波를 차단해서 透過波의 壓力勾配를 작게 하기 위한 것이다(그림 9 참조).

그림 10은 워터커튼을 設置한 경우의 터널내의 壓縮波(模型實驗結果)을 보여 준다. 워터커튼

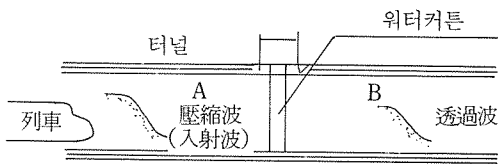
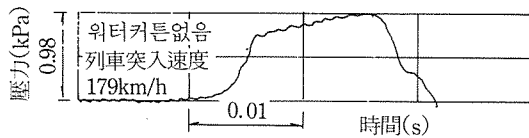
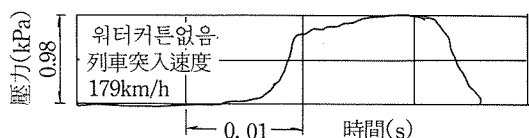


그림 9. Water Curtain에 의한 方法

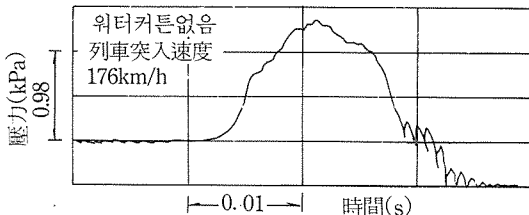


(a) 測定点 A



(b) 測定点 B

워터커튼없는 경우의 壓力波形



(a) 測定点 A : 入射波 + 反射波



(b) 測定点 B : 透過波

워터커튼 있는 경우의 壓力波形

그림 10. Water Curtain에 관한 模型實驗

에 의한 壓力勾配의 低減效果를 그림 11에서 볼 수 있다.

또한, 低減效果는 音響近似를 이용하여 計算할 수 있다. 壓力波에 의한 워터커튼의 移動, 變形이 없다고 判定하여, 入射波形을 $f(t)$, 透過波形을 $g(t)$ 라고 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$g(t) = \frac{4}{(\alpha+2)} \left\{ f(t-\beta) + \left(\frac{\alpha-2}{\alpha+2} \right) f(t-3\beta) + \dots + \left(\frac{\alpha-2}{\alpha+2} \right)^2 \right.$$

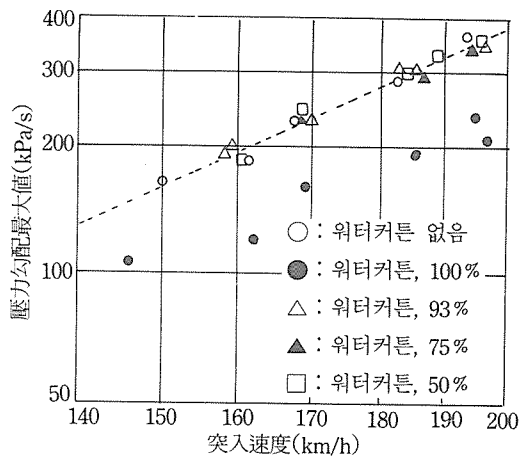


그림 11. Water Curtain의 效果(模型實驗)

$$f\{t-(2n+1)\beta\}+\dots\} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

이때

$$\alpha = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}$$

$$\beta = l/C_2$$

여기서

ρ_1 : 空氣의 密度

C_1 : 空氣中の 音速

ρ_2 : 물의 密度

C_2 : 水中의 音速

l : Water Cartain의 幅

t : 時間

入射波形을 模型實驗과 同一하게 Water Cartain의 두께를 변화시켜 透過波를 計算한 結果를 그림 12에서 보여준다.

模型實驗으로써는 Water Cartain의 두께가 下方에서는 흘러내려 얇게 되기 때문에 模型實驗에서는 低減效果는 數直計算에 의한 것보다 低減效果가 비교적 작다.

또한 Water Cartain은 터널 斷面의 全面을 덮는 경우에는 低減效果가 있으나, 數%의 膜이 파괴된 상태에서는 效果가 크게 減少하는 것을 模型實驗을 통해서 알 수 있었다.

3.6.2 水滴噴露에 의한 方法

攄널내에 水滴을 噴露하는 區間을 設置하는

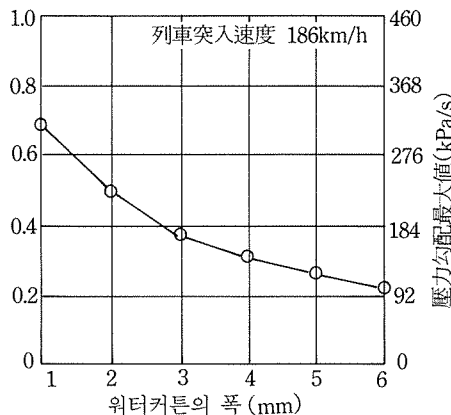


그림 12. Water Cartain의 效果(數直計算)

경우의 低減效果에 關係서 數直計算을 으며, 計算時 아래와 같은 假定을 사용했다.

(1) 空氣의 粘性과 熱前途性은 無視하고 그 比熱은 一定

(2) 水滴은 球狀으로, 크기가 一定, 非壓縮性, 比熱一定, 水滴內的 溫度는 똑같다.

(3) 水滴은 터널內的 噴露區間에 똑같이 分布한다.

(4) 흐름은 1次元的으로 흐른다. 또한 터널 壁의 境界層의 效果 및 熱傳達은 無視한다. 다만 水滴의 抵抗과 水滴과 空氣間的 熱傳導의 計算은 空氣의 粘性과 熱前途性을 考慮한다.

(5) 抵抗係數와 너셀트數(Nusselt number)는 水滴의 레이놀즈數(Reynolds number)에 함수가 된다.

入射波의 壓力勾配로 9,730m의 슬래브 軌道 터널에 있어서 列車速度 270km/h 때 터널 出口에 있어서 壓縮波의 測定例는 $dp/dt=73080$

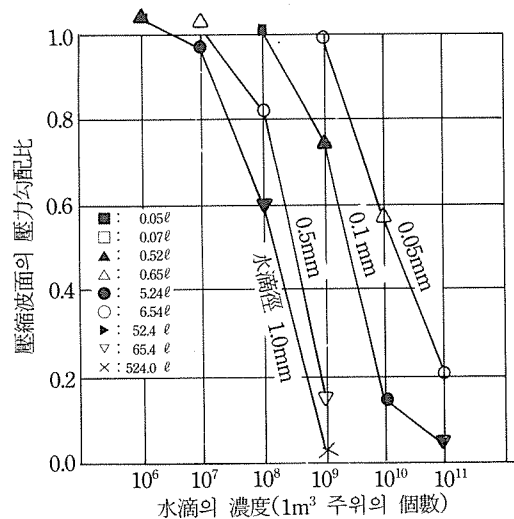
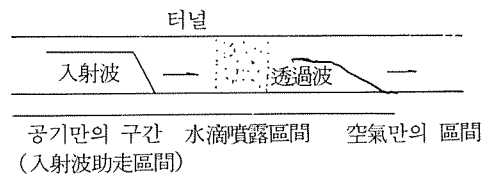


그림 13. 水滴噴露에 의한 方法(數直計算結果)

Pa/s($\Delta P = pa$, $\Delta t = 0.013s$: 直線에 近似)을 사용했다. 水滴區間을 10m로 했을 때 計算結果를 그림 13에 나타냈다.

數直計算結果

(1) “噴露區間이 긴데서는 터널내 壓縮波의 波面의 壓力勾配低減效果가 크게 되었다. 다만, 水滴의 量이 작은 경우에는, 噴露區間을 크게 해도 低減效果는 거의 크지 않았다.

(2) 충분한 水滴의 量이 있는 경우에는 噴露區間이 작아도 큰 低減效果를 갖는다.

(3) 水滴의 直徑이 작고, 水適의 濃度가 높은 경우 低減效果는 커지는 것을 알았다.

3.6.3 플로어(Floor) 送風에 의한 方法

그림 14는 터널 坑口에 플로어를 設置하여 列車突入時에 進行方向에 바람을 보내는 것으로 列車의 相對速度를 低下시키는 對策에 關於하여 數直計算을 한 結果가 있다. 플로어에 의한 風速: U , 列車速度를 V 라 하면, 列車突入速度를 V

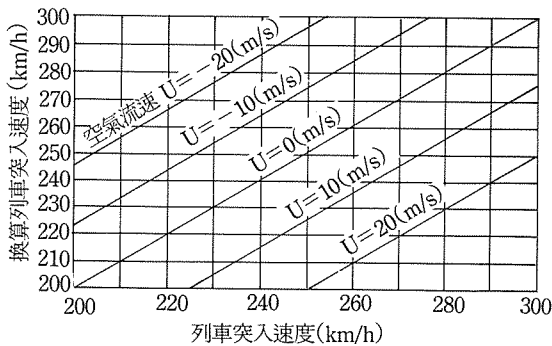
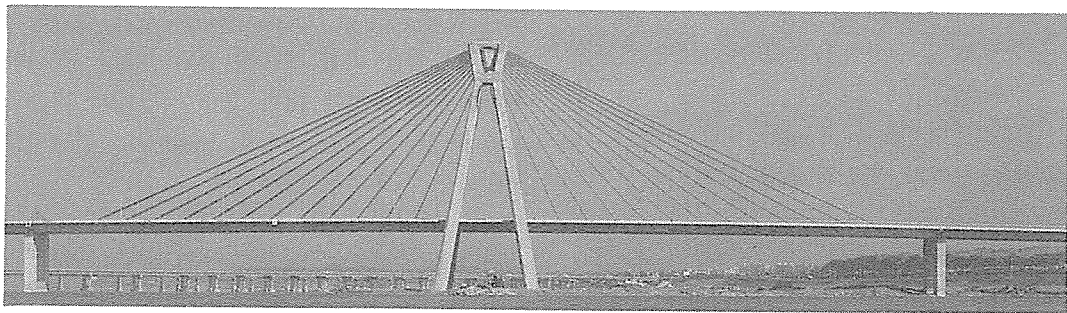


그림 14. 플로어(floor) 送風에 의한 方法 (數直計算 結果)



$\{(V-U)/V\}^{2/3}$ 로 減速시키는 效果를 갖고 있다.

4. 要 約

速度向上에 의해, 여기까지 行한 對策을 強化할 必要가 있다고 생각하나 220~240km/h의 速度로서는 거의 問題를 일으키지 않았다. 터널에 있어서도 微氣壓波의 問題를 뚜렷이 나타내도록 생각되었다. 따라서 新幹線의 速度向上에 對해서는 各 터널의 實狀에 따라서

(1) 入口緩衝工을 延長 또는 新設한다.

(2) 車輛先頭形狀을 最適化, 斷面積縮小 등의 車輛側 對策

(3) 斜坑·入坑等を 利用하여 低減效果를 가리게 한다

등의 對策을 세울 必要가 있다.

微氣壓波가 특히 크게 되는 坑口에 對해서는 몇개의 對策을 併用하는 것도 생각된다.

또한 몇 개의 액티브(active)한 方法에 對해서 檢討한 結果, 設置 및 裝置의 機能에 關於한 條件이 滿足한 경우에는 低減效果를 갖는 것을 알았다.

5. 結 論

今後의 研究事項으로서는 各種의 새로운 對策法의 實現性 檢討, 速度向上時의 長大터널에 있어서 터널 微氣壓波의 把握, 微氣壓波 對策으로 보아 바람직한 列車先頭部 形狀의 具體化등을 추진해야 할 것이다. ⊗