

地下터널 굴착作業場內 作業環境豫測

박희봉¹⁾

Prediction of the Environmental Conditions in Underground Tunnelling Spaces

Hee-Bong Park

ABSTRACT

A comprehensive, non-steady state, computer simulation program for the environmental conditions in advancing tunnels (the HEADSIM simulation program) is constructed and successfully validated with heat balance amongst all heat sources, and with mass conservation amongst various airflows including the leakage air from ducts, under time-dependent variations of inlet air conditions, which include sudden, diurnal and seasonal changes.

Heat conduction in the wall strata and face strata is simulated with most complicated boundary conditions using the finite difference method, and the climatic conditions in roadway sections which contain air ducts, booster fan, spray cooler, compressed air pipes, cold water pipes, return water pipes, machinery and broken rock are simulated taking into account the variations of face operation and the 'heat storage' mechanism in the strata.

The limitations of simulation time steps and roadway section lengths are defined according to the stability criteria satisfying the principles of thermodynamics. Variations of heat transfer coefficients, which are newly set, and those of wetness factors are taken into account according to the variations of other parameters and the stepwise advance of the face.

Newly-derived formulae are used for computing the air duct leakage and the pressure inside of the duct. A new concept of an 'imaginary duct' is introduced to simulate the climatic conditions in tunnels during holiday periods, which directly affect conditions on subsequent working

* 1992年 6月 接受.

1) 한국자원연구소

days, under the consideration of natural convection.

A subsidiary program (the WALLSIM simulation program) is made to compute the dimensionless tunnel surface temperatures and to compare the results with those from analytical approaches, and to demonstrate the stability, convergence and accuracy of the strata heat conduction simulation, adopting the finite difference method. The WALLSIM also has wide applications, including those for the computation of age coefficients.

1. 序 論

地下空間이 生活空間 乃至 利用空間으로 漸次 擴大開發 됨에 따라, 굴착維持技術과 더불어 地下空間內的 環境豫測技術의 尖端化가 要請되고 있는바, 이는 人間이 周圍環境으로 부터 分離되어 存在할 수 없으므로, 未來의 環境問題를 豫測分析하여, 最適의 制御手段을 導出하여, 建設開始 以前の 設計段階에서 부터 이를 反映시킴으로서, 科學的, 經濟的인 地下空間開發에 寄與하기 爲함일 것이다.

地下空間은, 大規模의 地下都市로 建設되기도 하고, 50km가 넘는 海底터널로 建設되기도 하며, 汝矣島 63빌딩 높이의 拾數倍에 達하는 深度까지 資源開發坑道로 建設되기도 하는바, 이와같은 地下空間 建設에 있어서는, 터널의 굴착이 完了된 以後보다, 굴착이 進行중에 있는동안 더욱 劣惡한 作業環境에 直面하게 되나, 지금까지의 研究는, 주로 굴착이 完了되어 터널自體가 通氣網의 一部로 編入되었을때의 環境豫測 水準에 머물고 있는바, 굴착이 進行중인 터널은, 入口側이 열리고 作業場側이 닫힌 所謂 Blind Tunnel로서, 局部通氣(Local Ventilation)에 依存할 수 밖에 없으며, 여기에서의 氣候環境豫測은, 兩側이 열리어 貫通通氣(Trough Ventilation)가 행해지는 굴착完了 터널內에서 보다, 훨씬 많은 異質的인 要素들의 影響을 받음으로서, 單純히 굴착完了된 터널에 適用되는 理論의 擴張으로는 豫測이 不可

能하기 때문이다.

터널內에서는 熱 및 水分, 粉塵, 가스, 騒音, 振動, 照明 등이 環境問題로 擡頭되나, 이중 騒音, 振動과 照明을 따로 떼어서 生覺하기로 한다면, 나머지들은 地下터널內的 氣候環境에 관한 問題로 綜合하여 考慮할 수 있으며, 이때의 氣候環境에는 氣流內的 溫度, 濕度, 風量과 氣壓 등이 包含되는바, 이중 風量에는 粉塵과 가스를 稀釋시키는데 要하는 風量이 包含되고, 濕度에는 粉塵發生 抑制用 撒水로 因한 濕度에의 影響까지 包含하게 된다.

本稿에서는 筆者에 의해 開發된, 地下터널 굴착作業場內 作業環境을 綜合的이고 動態적으로 豫測할 수 있는, 電算프로그램인 HEADSIM에 對하여 概略的인 說明을 하고자 한다.

2. 굴착進行중인 터널의 主要特徵

地下터널內的 氣候環境을 豫測함에 있어서, 굴착이 完了된 터널에 比하여, 굴착이 進行중인 터널이 가지고 있는 主要特徵 乃至 強調되어야 할 事項은 다음과 같다.

1) 굴착이 進行중인 터널은, 터널 自體가 通氣網의 一部로 編入되지 못함으로 因하여, 不可避하게 局部通氣에 依存하게 된다.

2) 局部通氣時, 風管內部를 흐르는 入氣와 風管外部를 흐르는 排氣의 兩氣流가 存在하게 되며, 그 흐르는 方向은 서로 反對가 된다.

3) 風管內外的 壓力差로 因하여, 또는 風管

管理 疏忽 等으로 因하여, 風管內部的 入氣中 一部分가 漏風되어 風管外部의 排氣와 混合되며, 이에따라 風管內外의 氣候環境이 位置와 時間에 따라 變化하게 된다.

4) 굴착作業은, 一定한 사이클에 따라 反復的으로 遂行되며, 이에따라 터널의 延長距離는 繼續的으로 增加하고, 또한 터널內의 氣候環境도 位置와 時間에 따라 變化하게 된다.

5) 굴착中인 터널入口에서의 入氣狀態는, 一定不變이 아니며, 時間에 따라서, 즉 季節的으로, 晝夜로도 變化하고, 또 急激히도 變化함으로, 이에따라 터널內의 氣候環境도 位置와 時間에 따라 變化하게 된다.

6) 굴착中인 터널內에는, 地熱 및 破碎熱의 存在外에도, 各種 機械類, 파이프類, 風管等이 設置되며, 그 設置位置, 設置時間 및 設置容量等이 任意로 달라질 수 있다.

7) 熱傳達係數(Heat Transfer Coefficient) 및 濕潤率(Wetness Factor)은, 漏風에 따른 風速變化 및 터널延長等에 따라, 位置와 時間에 따라 變化한다.

8) 터널周壁으로 부터의 地熱은, 터널內의 氣流로 一方的으로 흐르기만 하는것이 아니고, 大容量 機械類 等을 使用하여 氣流의 溫度가 周壁의 溫度보다 높아질때에는, 熱이 氣流로 부터 周壁內로 흐르는 逆流現象이 생기며, 熱이 周壁內에 蓄熱(Stored Heat) 된다.

9) 氣候環境 制御를 爲하여, 加壓扇風機(Booster Fan) 및 空氣冷却器(Air Cooler)가 設置될 수도 있으며, 그 設置位置, 設置時間 및 設置容量 等이 任意로 달라질 수도 있다.

10) 公休時의 氣候環境은, 公休直後의 氣候環境에 크게 影響을 끼치며, 公休時에는 特異한 自然對流現象에 依하여, 周壁과 氣流사이의 熱傳達이 이뤄진다.

以上の 主要特徵中 8)에서 言及한 蓄熱現象

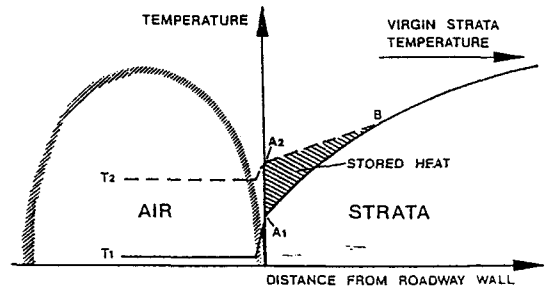


Fig. 1 Strata Heat Storage

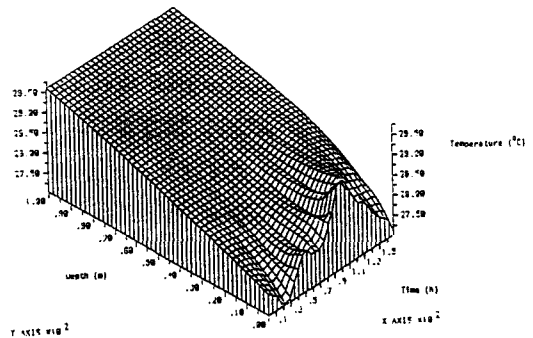


Fig. 2 Strata Temperature Variation with Time

(Heat Storage)에 대하여 Fig. 1 및 Fig. 2에 圖示하였다.

Fig. 1에서 斜線친 部分은 蓄熱(Stored Heat)을 概念的으로 表示한 것으로서, 氣流의 溫度가 T_1 에서 T_2 로 上昇됨에 따라, 터널周壁의 溫度도 A_1 에서 A_2 로 上昇되며, 이에따라 周壁內에 蓄熱이 생기게 된다. 同 蓄熱은 氣流內의 溫度가 下降하면 다시 氣流內로 放出될 수 있다.

Fig. 2에서는 터널周壁內의 岩盤溫度가 時間에 따라 變化함을 三次元으로 例示하고 있는바, X-軸은 時間, Y-軸은 深度, Z-軸은 岩盤溫度를 나타낸다. 蓄熱現象에 依하여, 터널周壁 낮은 深度의 岩盤溫度變化가 특히 큼을 알 수 있으며, 氣流의 溫濕度 變化가 클 경우에는, 깊은 深度의 岩盤溫度까지 影響을 받게된다. 특

히 留意하여야 할 點은, 時間軸인 X-軸에 따른 岩盤溫度變化의 樣相을 보면, 時間이 經過하면서 岩盤溫度가 圓滑한 曲線을 따라 減少하는 것이 아니고, 커다란 起伏을 보인다는 點이며, 이는 굴착完了된 터널內 氣候環境의 近似的 豫測에 널리 쓰이는, 所謂 經時係數(Age Coefficient, 一名 經過係數 또는 K值)의 單純한 適用으로는, 굴착 進行中인 터널內의 氣候環境을 適切하게 豫測할 수 없음을 보여주고 있다.

Fig. 3은 參考로 經時係數(K)를 그래프로 圖示한 것이다.

經時係數란, 無次元熱傳達係數(Dimensionless Heat Transfer Coefficient, 一名 Biot 數)와 無次元時間(Dimensionless Time, 一名 Fourier 數)의 函數로서, 터널周圍 岩盤으로 부터 氣流內로 流入되는 地熱流量計算時, 熱傳達係數別로 時間이 經過함에 따라 地熱流量이 減少되는 率을 表示하는 係數로 使用되기도 하는 것이다.

그래프에서 보는바와 같이, 特定 熱傳達係數를 가질 경우, 經時係數(K)의 값은 圓滑한 曲線을 그리고 있다. 그러나 前述한 바와 같이, 設使 熱傳達係數가 同一하게 維持된다고 할지라도, 터널 周壁內의 蓄熱現象(Heat Storage)을 考慮할 때, 地熱流量은 圓滑한 曲線을 따라 흐르지 않는것을 알 수 있는바, 따라서 單純한 經時係數에 依存해서는, 適切한 氣候豫測을 할 수 없음을 알수있다.

3. HEADSIM

3-1. 새로운 接近方法

굴착進行中인 터널內의 氣候環境豫測 研究에 있어서, 從前까지 歐, 美, 日 各國의 研究成果가 滿足할만한 水準에 이르지 못함은, 前述한 모든 特徵들을 完全히 受容하는일이 容易한 일

이 아니며, 또한 이를 解決하기 爲해서는, 새로운 理論 및 테크닉에 의한, 새로운 接近方法들이 要請된다는 事實을 雄辯으로 말해주고 있는바, 이제 筆者에 의해 完成된, 滿足할만한 水準의, 氣候環境豫測 電算 시뮬레이션 프로그램인 HEADSIM에 使用된, 새로운 接近方法들의 主

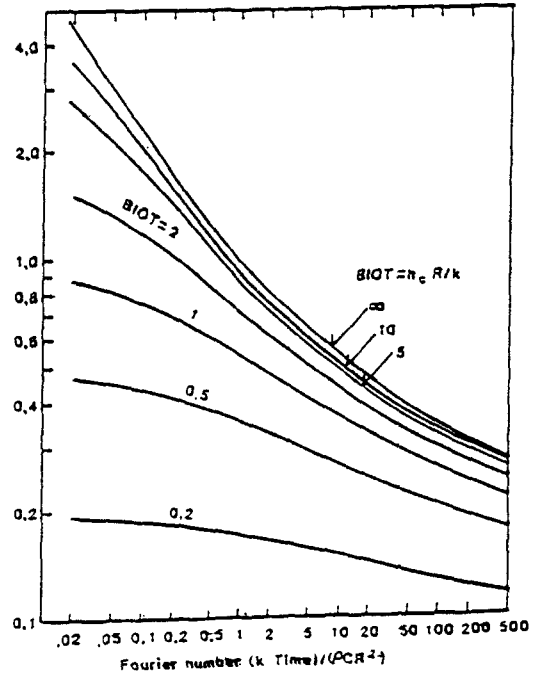


Fig. 3 Age Coefficient(K)

要한 骨子を 說明하면 다음과 같다.

- 1) 에너지 方程式을 基礎로, 全體 熱源들間의 完全한 熱的平衡을 期함.
- 2) 風管內外의 空氣質量은 完全히 保全됨.
- 3) 潛熱의 熱傳達에 關한 새로운 關係式을 誘導함.
- 4) 風管의 漏風 및 風壓計算을 위해 새로운 公式들을 誘導함.
- 5) 休日의 自然對流現象(Natural Convection)을 시뮬레이션 하기위해 “想像風管”(Imaginary Duct)이라는 새로운 概念을 創案함.

6) 處女岩盤溫度(Virgin Rock Temperature)에 이르는 最小穿孔長計算을 위한 새로운 關係式을 誘導함.

7) 터널周壁 또는 管壁의 거칠기(Roughness Factor)를 考慮하여, 새로운 熱傳達係數 算出公式들을 誘導함.

8) 굴착이 進行됨에 따라, 터널周壁의 濕潤率(Wetness Factor)이 繼續的으로 變化하도록 함.

9) 風管 및 各種파이프의 內外表面 및 管自體를 통한 各種 熱傳達現象을 모두 包含하도록 함.

10) 굴착作業을, 穿孔發破와 硬石處理作業 등으로 構成되는 規則的인 싸이클을 이루도록 함.

11) 터널入口의 入氣狀態는, 季節的 및 晝夜間 變化와 急激한 變化를 모두 受容하도록 함.

12) 岩盤內 熱傳達現象을 시뮬레이션함에 있어 FDM을 適用하되, 터널周壁과 氣流間 對流, 蒸發, 凝縮, 輻射形態의 모든 熱傳達現象을 勘案한 境界條件下에서 解釋함.

13) FDM 適用時, Time Step 및 터널 Section 길이의 最大許容限界를 熱力學法則에 따라 誘導함.

14) 水蒸氣가 凝縮될시, 이에 包含된 熱까지도 熱的平衡計算에 包含됨.

15) 氣候制御를 爲하여, 風管사이에 任意時點과 任意位置에서, 任意容量의 加壓扇風機(Booster Fan) 및 空氣冷却器(Air Cooler)를 設置 可能하도록 하여, 事前計劃段階에서 이미 그들의 費用效果를 分析하여, 最適制御手段을 導出하도록 함.

3-2. Flow Chart

HEADSIM의 Flow Chart는 Fig. 4에 보이

는 바와 같다.

터널內 氣候環境豫測은, 平常作業時와 休日로 大別되어 遂行되며, 터널入口의 入氣狀態變化, 굴착作業場內의 作業싸이클 變化, 機械類의 稼動狀況 變化 등이 Event로서 Time Table에 따라, 그 變化되는 氣候環境을 시뮬레이션 한다.

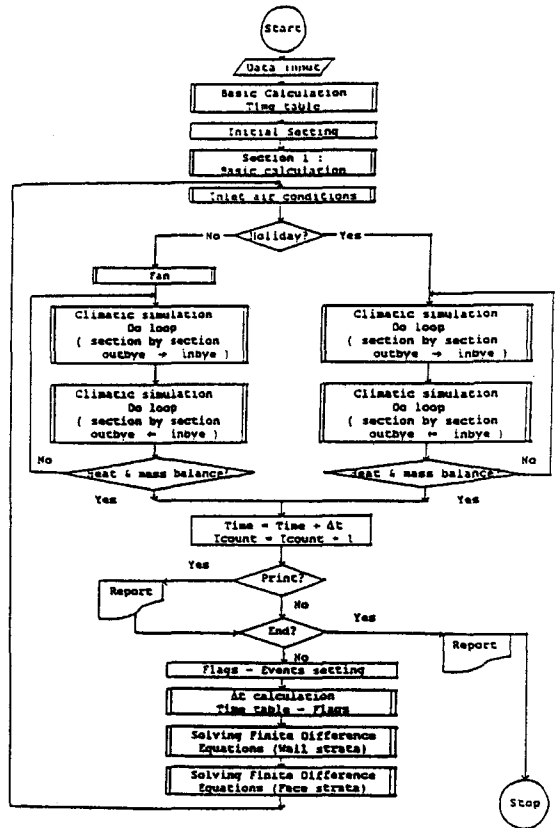


Fig. 4 Flow Chart of HEADSIM

3-3. 豫測結果分析

HEADSIM과 같은 시뮬레이션 프로그램의 Validation을 爲해서는, 두가지 方法을 生覺할 수 있다.

첫째는 豫測結果와 他 研究者들의 널리 認定 받고 있는 研究結果와 對比해 보는 것이고, 둘째는 豫測結果와 現場豫定結果와 對比해 보는

것이다.

많은 變數에 의해 左右되는 터널內 氣候環境 豫測은, 解析的方法으로는 不可能하다. 그러나 數値解析에 의한 畧作進行中인 터널內의 氣候環境豫測모델을 縮小시키면, 畧作完了後의 터널內의 氣候環境豫測모델을 만들 수 있으며, 이를 다시 縮小시키면, 解析的인 解를 求할때와 同一한 單純모델을 만들 수 있는바, 이와같이 他 研究者들에 의한 解析結果와 對比하기 위하여, HEADSIM을 縮小시킨 WALLSIM을 만들었다.

經時係數란, 前述한 바와 같이 無次元熱傳達係數와 無次元時間의 函數이며, 또 달리 定義하면 無次元熱傳達係數와 無次元터널周壁表面溫度(Dimensionless Tunnel Surface Temperature)의 單純한 積이 된다. 研究者에 따라서는 經時係數보다, 上記 無次元터널周壁表面溫도를 즐겨쓰는바, 이제 他 研究者들에 의해 發表된 同 無次元터널 周壁表面溫度값들과 WALLSIM에 의한 값들을 對比하면 Table 1과 같다. 同 Table에서 'J & C'는 Jaeger and Clamalaun을, 'S'는 Starfield를, 'N & S'는 Notter and Sadée를 뜻하며, 'Seg. 5'는 터널半徑의 32倍 範圍內의 岩盤을 60個의 Element로 나누어, WALLSIM으로 計算한 結果를 뜻한다.

Table은 無次元熱傳達係數가 0.1일때의 計算結果로서, 他 研究者들의 解析結果와 잘 一致하고 있다.

參考로 말하면, 經時係數 또는 無次元터널周壁表面溫도의 값에 對하여 他 研究者들이 發表한 結果는, Table로 주어지는 境遇, 制限된 數에 그치고, 또 그래프로 주어지는 境遇, 正確한 값을 찾기가 어려운데, WALLSIM을 利用하면 어떤 範圍의 값도 正確히 計算할 수 있다.

HEADSIM에 의한 豫測結果와 現場測定結果

Table 1 Comparison between the Values of Dimensionless Tunnel Surface Temperatures in the case of Biot Number = 0.1

Fo	J & C	S		N & S		Seg. 5	
	Value	Value	t	Value	t	Value	t
0.02	0.9851	0.988	100.3	0.986	100.1	0.9849	100.0
0.04	0.9796	0.982	100.2	-	-	0.9796	100.0
0.06	0.9755	0.977	100.1	-	-	0.9754	100.0
0.08	0.9722	0.974	100.2	0.973	100.1	0.9721	100.0
0.10	0.9694	0.971	100.2	-	-	0.9693	100.0
0.20	0.9590	0.960	100.0	0.960	100.0	0.9589	100.0
0.30	0.9518	0.952	100.0	-	-	0.9517	100.0
0.40	0.9441	0.947	100.1	-	-	0.9460	100.0
0.50	0.9414	0.942	100.1	-	-	0.9413	100.0
0.60	0.9373	0.938	100.1	-	-	0.9373	100.0
0.70	0.9337	0.934	100.0	-	-	0.9337	100.0
0.80	0.9305	0.931	100.0	0.931	100.0	0.9305	100.0
0.90	0.9276	0.928	100.0	-	-	0.9276	100.0
1.00	0.9250	0.925	100.0	-	-	0.9249	100.0
2.00	0.9062	0.906	100.0	0.907	100.1	0.9062	100.0
3.00	0.8943	0.895	100.1	-	-	0.8943	100.0
4.00	0.8856	0.886	100.0	-	-	0.8855	100.0
5.00	0.8786	0.879	100.0	-	-	0.8786	100.0
6.00	0.8729	0.873	100.0	-	-	0.8729	100.0
7.00	0.8680	0.868	100.0	-	-	0.8680	100.0
8.00	0.8638	0.864	100.0	0.865	100.1	0.8637	100.0
9.00	0.8600	0.860	100.0	-	-	0.8600	100.0
10.00	0.8566	0.857	100.0	-	-	0.8566	100.0
20.00	0.8343	0.835	100.1	0.835	100.1	0.8343	100.0

를 對比하기 爲하여, 國內 某炭鑛에서 現場測定을 實施하였으며, 豫測結果(Pred.)과 實測結果(Meas.)는 다음 Table 2와 같다. 여기서 'Td'는 乾球溫度, 'Tw'는 濕球溫도를 나타내며, 120M地點에서 1630~1750 Min사이의 濕球溫도의 差異 0.76°C를 除外하고는, 모든 地點 모든 時點에 걸쳐 差異가 0.5°C 未滿으로서, 터널內 條件의 複雜性과, 人力資料로서 몇가지 推定値를 使用한 것을 勘案하면, 大端히 滿足스러운 結果를 보여주고 있다.

Table. 2 Comparison between the Values of the Predicted and Measured Temperatures in Domestic Coal Mine

		190 - 110 (Min)		1670 - 1750 (Min)		3070 - 3190 (Min)	
		Pred.	Meas.	Pred.	Meas.	Pred.	Meas.
120	Td	30.16	30.08	28.83	28.87	30.56	30.40
(M)	Tv	28.25	28.32	26.86	26.10	28.66	28.83
220	Td	30.08	30.11	29.28	29.25	30.53	30.47
(M)	Tv	28.17	28.03	27.61	27.79	28.61	28.65
320	Td	29.86	30.15	29.53	29.55	30.39	30.52
(M)	Tv	27.95	27.84	28.12	28.23	28.43	28.17
420	Td	29.57	29.56	29.76	29.78	30.23	30.32
(M)	Tv	27.51	27.62	28.56	28.75	28.02	28.10
454	Td	28.75	28.76	29.81	29.80	29.40	29.28
(M)	Tv	27.11	27.30	28.67	28.77	27.62	27.83
469	Td	28.57	28.55	29.86	29.83	29.24	29.17
(M)	Tv	26.98	26.87	28.74	28.81	27.49	27.34
531	Td	28.09	27.84	30.16	30.05	28.80	28.82
(M)	Tv	26.40	26.02	29.04	28.85	26.91	26.45
576	Td	27.17	27.19	30.28	30.30	27.97	27.61
(M)	Tv	25.63	25.22	29.19	29.05	26.16	26.37

4. 結 論

豫測結果 分析에서 본바와 같이, HEADSIM 은 굴착중인 터널內的 氣候環境豫測에 가장 適合한 Computer Simulation Program임이 立證되었다. 現在의 HEADSIM은, 터널굴착方法으로서 穿孔·發破作業을 모델로 하였으나, 이 프로그램을 一部 Modify함으로서, TBM 使用 터널內的 氣候環境豫測에도 使用할 수 있다.

Fig. 5는 英國에서 Kielder 導水터널 굴착시

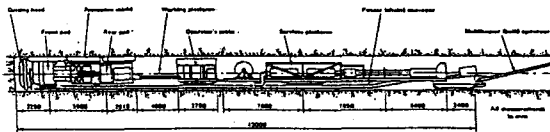


Fig. 5 Tunnel Boring Machine Demag TVM 34-38

에 使用된 Demag TVM 34-38로서, 直徑이 3.5m이고, Cutting Head先端으로부터 Belt Conveyor直前까지의 길이가 43m가 된다. 直徑 3.5m인 TBM의 Nominal Power는 500~1,000 kW로서, 이와같은 TBM使用時, 그 稼動時間中에 前述한 터널 周壁內的 蓄熱現象(Heat Storage)의 典型을 보게되며, 따라서 HEADSIM에서와 같이, 蓄熱現象까지도 綜合的, 動態的으로 考慮하지 않고서는, TBM作業場內는 勿論이고, 一般터널(굴착進行中 또는 굴착完了后 共히)內에서도 適切한 氣候豫測을 할 수 없다.

參 考 文 獻

- 1) PARK, HEE BONG, 1991, Non-steady State Computer Simulation of the Climate in Advancing Headings : Ph.D. Thesis, Department of Mining and Mineral Engineering, The University of Leeds, U.K.
- 2) 朴熙奉 外 1989, 深部炭鑛 作業環境 改善 研究(1), 科學技術處 特定研究問題, 韓國 資源研究所.
- 3) 朴熙奉, 1991, 굴착중인 坑道內的 動態的인 氣候環境豫測, 第 57回 學術發表會, 韓國資源工學會.