

# 터널킬른의 설계기술

## Design Technology of Tunnel Kiln

안국영 · 김관태

Kook-Young Ahn, Kwan-Tae Kim

(한국기계연구원 열유체시스템연구부)

### 1. 머리말

터널킬른은 벽돌, 기와, 타일, 도자기 및 위생도기 등을 소성하는 요로(窯爐)를 말하며, 이를 개발하기 위한 기술로는 기계, 요업, 화학, 전자 등 공학적 지식의 바탕위에 현장에서의 경험적 지식이 요구된다. 터널킬른은 연소형식, 피열물의 이송방법, 사용연료 및 설계자에 따라 분류할 수 있으며, 현재에도 고효율·에너지 절약형 등에 초점을 맞추어 발전을 거듭하고 있다.

터널킬른의 효시는 잘 알 수 없으나, 기록에는 1751년 프랑스의 Vincennes가 처음 발명한 것으로 알려지고 있으며 이것은 당시 도자기의 장식 소성에 사용되었다고 한다. 그 후 1840년 덴마크의 Yordt, 1853년 오스트리아의 P. Girard, 1858년 영국의 E. Peter가 각각 특허를 내었으나, 대차와 소성실 사이의 열차단이 되지않아 러닝기어(running gear)가 과열되어 파손되므로서 실용화에는 실패하였다. 이 문제는 1877년 영국의 Otto Bock이 모래실(sand seal)을 이용하여 소성실과 대차사이의 열을 차단하므로써 해결하였으나, 그 당시에는 석탄연료를 킬른 천정에 투입하여 사용하였으므로 온도조절이 곤란하여 큰 어려움이 있었다. 그 후, 터널킬른에 사용되는 연료가 기름과 가스로 대체되고 또한 버너 및 단열재 등의 개발에 따라 큰 발전을 가져왔으며, 1910년 프랑스의 E.G. Faugeron이 Montereau의 식기공장에 만든 터널킬른이 원조로서 현재까지 발전하고 있다. 국내의 경우는 1942년 부산 영도에 발생로 가스 사용의 경질도기 참구이용 터널킬른이 처음 설치되었으며, 국내기술로는 부산 동래구의 삼광연화에 직화식 터널킬른을 세운 것이 처음이었다.[1-2]

터널킬른은 길이가 60-100m정도이며 피열물을 소성온도에 따라 가열·냉각하여야 하며 로 내압의 제어 및 소성분위기 등의 조건을 모두 만족시켜야 하므로, 터널킬른의 구조는 Fig.1에서 보는 바와 같이 복잡하다. 또한, 피열물의 숙성도는 원재료의 선정 및 배합, 건조 등에도 영향을 크게 받게 되며, 최근에는 에너지 절감 및 인력난 등에 따라 터널킬른이 대형화·자동화되어지고 있는 등 소성품의 숙성도 및 소성효율을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 터널킬른의 설계는 선진국의 경우에도 많은 부분 경험에 의존하고는 있으나, 다년간 축적된 경험과 연구개발을 통하여 설계능력을 확보하고 있다. 국내의 경우에도 외국기술에 의한 모방생산으로 부터 터널킬른의 설계가 어느정도 이루어지고는 있으나, 모방생산에

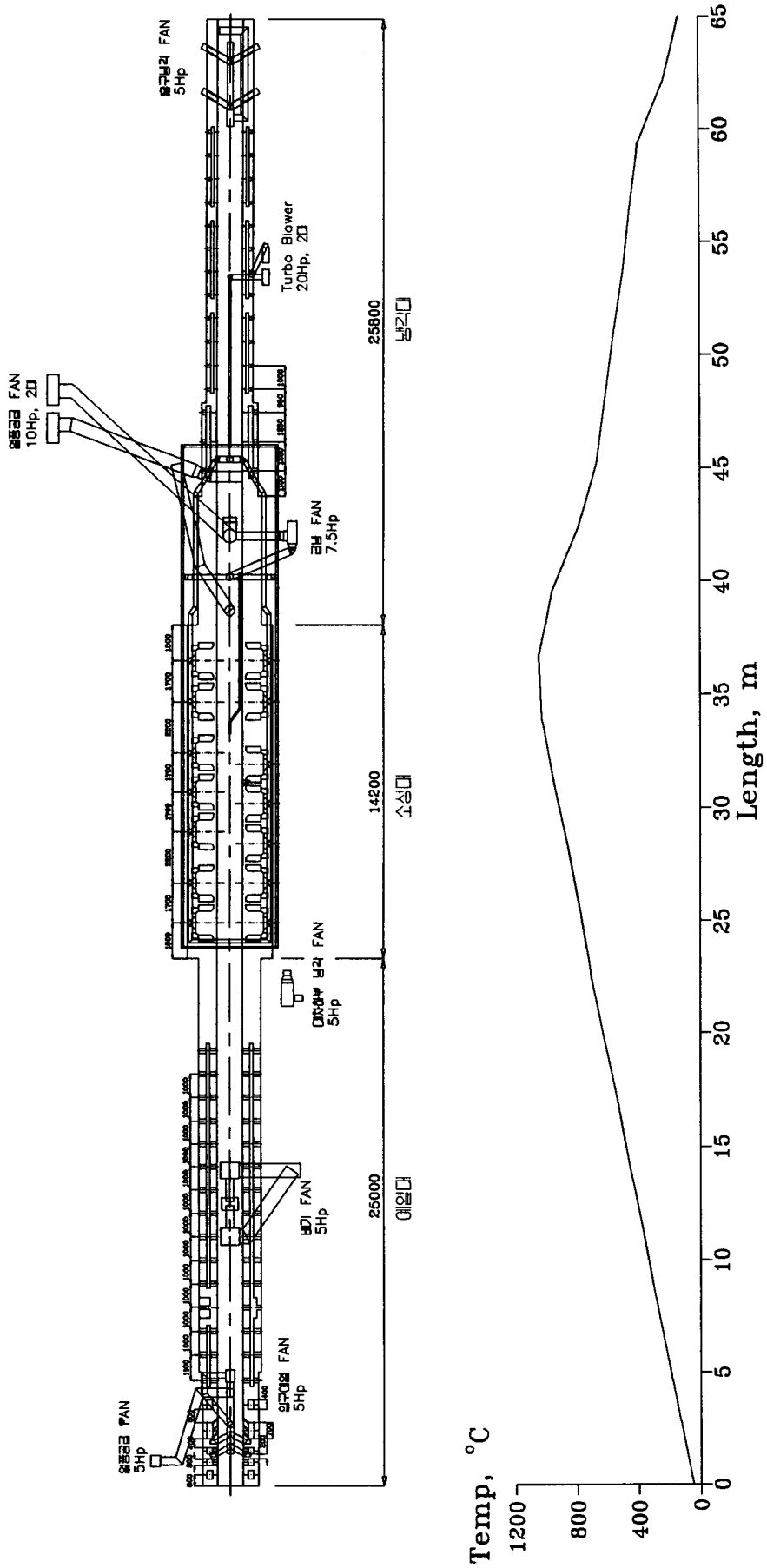


Fig.1 터널킬른의 구조 및 표준 소성온도곡선

Table 1 계산대상 터널킬른의 사양

항	목	설 계 값
버너 관련	사용 연료	병커-C
	연료 사용온도	95 °C
	하루 연료사용량	2,600 liter/day
	연소용 공기온도	200-300 °C
로 길이	예열대 길이	25 m
	소성대 길이	14.2 m
	냉각대 길이	25.8 m
로 내부	로내 폭	1.090 m
	로내 높이	1.506 m
대차 관련	대차의 크기	1.040 * 1.7 m
	대차의 내화물 무게	1,105 kg
	대차의 철구조물 무게	198 kg
소성품 관련	대차당 소성품 장수	1,050 장
	소성품 1장당 무게	1.9 kg
	대차 장입시간	60 min/대

따른 기본적인 설계기술의 부족으로 최근 고효율화·자동화 등의 수요자의 요구를 만족시키지 못하여 국내의 요로업체는 경쟁력을 잃어 외국으로 부터의 수입이 증가하고 있는 실정이다.

따라서, 벽돌 등의 피열물을 소성하는 요로시스템을 국내기술로 개발하기 위하여는 재료의 배합, 건조기술, 자동화기술 등과 더불어 소성용 터널킬른의 설계기술의 확보가 시급한 실정이다. 여기서는 열관리 관점에서의 소성용 터널킬른의 설계기술에 대하여 소개하기로 한다.

## 2. 터널킬른의 구조

터널킬른은 Fig.1(계산대상킬른)에서 보는 바와 같이 예열대, 소성대 및 냉각대로 구성되어 있으며, 터널킬른의 길이 및 단면적은 연소형식, 피열물, 생산량, 소성시간 및 연료 등에 의하여 결정된다. 킬른의 길이가 길어지게 되면 생산량의 증가, 연료소비량의 감소, 품질향상 및 축로비의 감소 등 많은 잇점이 있다. 벽돌등의 피열물은 건조실을 거쳐 수분을 제거 시킨 후 터널킬른으로 들어가 Fig.1에서 보는 바와 같은 소성온도를 갖는 예열대, 소성대 및 냉각대를 지나게 된다. 예열대는 건조부와 예열부로 나눌 수 있으며, 건조부에서는 냉각대 입구단의 공기를 회수하여 이용하고 예열부에서는 소성대에서 예열대로 들어오는 연소가스에 의하여 피열물을 가열시킨다. 예열대에서 피열물의 천이점인 600°C가 되면 피열물은 암적색을 띄게되

고 950°C까지 이르는 단계에서 철분은 산화되어 피열물의 색에 영향을 주게 된다. 예열대의 온도가 급격히 상승하거나 상하 온도편차가 심하게 되면 급열균열이 발생하므로 서서히 가열 시켜야 한다. 상하 온도편차를 줄이기 위한 방법으로는 대차판 높이의 양 벽면에서 연소가스를 뽑아 천정을 통하여 강제순환 시키거나, 예열대 저온부에 보조 버너를 설치하거나 또는 양 벽면에 제트를 불어 넣어 순환시키는 방법 등을 생각할 수 있다. 소성대는 다시 균열부와 소성부로 나눌 수 있으며, 균열부에서는 온도를 가급적 오래 유지시켜 피열물을 골고루 소결시키는 것이 중요하며 소성부에서는 최고온도로 소결시켜 소성품의 강도, 품질의 균일화 및 소성색상 등을 부여하게 된다. 소성대에서의 연소방식은 생산량을 증가시키기 위하여 킬른의 내부 폭이 커짐에 따라 긴 화염을 이용한 측면연소 방식으로 부터 고속화염을 이용한 하부연소 방식 또는 버너를 킬른 상단에 설치하는 상부연소 방식으로 전환되고 있다. 한편, 냉각대는 급냉부와 서냉부로 나눌 수 있으며, 급냉부에서는 소성대에서 나온 피열물에 찬 공기를 불어넣어 급격히 냉각시키고, 서냉부에서는 냉각대 출구단에서 불어넣은 공기에 의하여 피열물을 서서히 냉각시킨다. 이 때, 600°C까지는 급냉하여도 급냉균열이 발생하지 않으나, 소성체가 적열체에서 흑체로 변하는 500°C이하에서는 급냉균열이 발생하므로 서서히 냉각하여야 한다.

이 밖에도 연소실의 크기, 에어커튼, 산화·환원염, 벽연도, 예열장치, 폐열회수장치, 소성대차 등 터널킬른을 구성하는 각 부분에 대한 것을 설계에 고려하여야 한다.

### 3. 터널킬른의 열정산 및 열효율

#### 3.1 터널킬른의 열정산

열정산(heat balance)은 열감정 또는 열수지계산이라고도 하며, 에너지 보존법칙인 열역학 제1법칙에 따라 열설비 또는 열발생장치에 있어서 공급·발생되는 에너지양과 소비된 에너지양과의 양적관계를 명백히 규명하여 해석하는 수단을 말한다.[3] 또한, 열정산은 열 또는 연료의 사용상태를 검토하는 것으로 열관리의 목적을 달성하는데 중요한 수단이 되기 때문에 열 및 연료를 사용하는 공업설비에 널리 활용되고 있으며, 이러한 결과는 열설비 또는 공정의 에너지 경제성을 평가하여 합리적인 열설비의 설계, 개조, 조업의 지침으로 활용할 수 있다. 터널킬른의 열정산 방법에 대하여는 KS L0008(도자기, 내화물 등의 소성용 터널가마의 열수지 계산방법)에 상세히 나와 있으므로 참고하기 바라며, 여기서는 일례로서 Fig.1 및 Table 1에 나타낸 터널킬른의 열정산 결과를 Fig.2에 나타내었다. 또한, 열정산은 과잉공기비, 예열공기온도, 외벽온도, 배기가스온도 등의 변화에 대한 연료원단위를 평가하므로써 합리적인 운전관리와 효율증대를 위한 설계자료로 활용할 수 있다. 그러나, 열정산의 결과는 설계자에게 전반적인 설계정보는 제공할 수는 있으나, 구체적인 정보를 제공할 수는 없기 때문에 보다 상세한 계산이 필요하다.

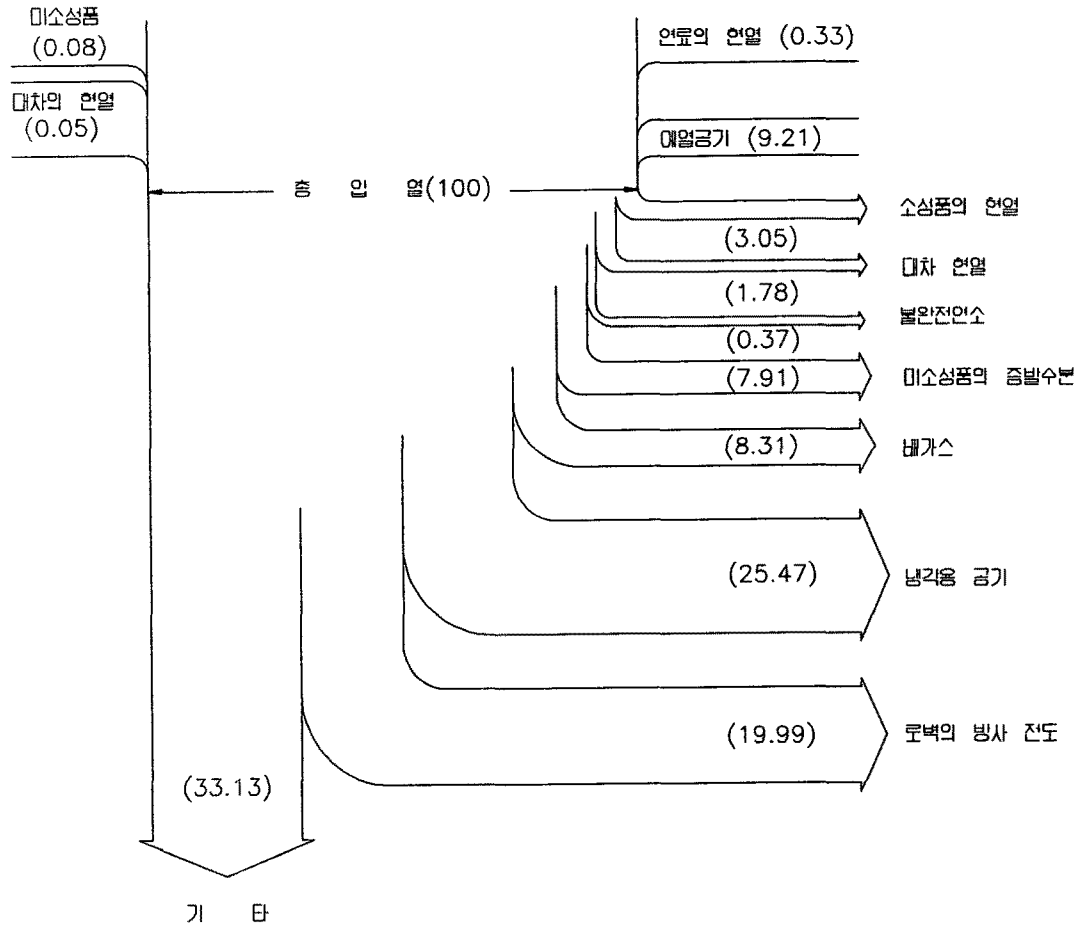


Fig. 2 열감정도

### 3.2 터널킬른의 열효율

열·전기 등의 에너지를 소비하는 장치에 있어서 에너지가 어느정도 유효하게 사용되고 있는가를 평가하는 것이 열효율이다. 일반적으로 열효율은 전 입열량 또는 연료발열량에 대한 유효열량의 비로 나타내어지며, 열정산의 결과를 이용하면 열효율값은 쉽게 계산되어 지지만 실제로는 어떤항목을 유효열량으로 취급하느냐에 따라 열효율의 정의는 달라질 수 있다. 터널킬른의 경우, 대상이 되는 피열물은 상온으로 들어가 예열대, 소성대, 냉각대를 거쳐 거의 상온으로 나오기 때문에 열정산에서는 피열물에 대한 입출열은 없게되나, 킬른의 목적이 피열물을 소성하는 것이기 때문에 이것을 유효열량으로 취급하여야 한다. 열효율을 계산하는 목적은 얻어진 열효율의 결과로부터 대상 킬른을 개조하여 고효율의 킬른을 설계하고자 하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 관점에서 킬른내의 전열상태를 정량적으로 파악하여 각 전열과정의 열효율을 검토하는 것이 열효율 향상을 위하여 필요한 평가방법이라 여겨진다. 이를 위하여 킬른의 연소가열실에서의 총체열효율을 구하기 위하여 전열과정에 따라 총체열효율을 소효율로 나누어 다음의 4단계로 나타낼 수 있다.

$$\eta_1 = \frac{\text{이론화염온도} - \text{피열물의 온도}}{\text{이론화염온도}} \quad : \quad \text{연소가열실에 도달할 수 있는 최대효율}$$

$$\eta_2 = \frac{\text{실제 입열량}}{\text{이론적 입열량}} \quad : \quad \text{연소가열실의 전열효율}$$

$$\eta_3 = \frac{\text{피열물에 주어진 열량}}{\text{실제입열량}} \quad : \quad \text{피열물에의 전열효율}$$

$$\eta_4 = \frac{\text{이론적으로 필요한 유효열량}}{\text{피열물에 주어진 열량}} \quad : \quad \text{피열물의 유효열량효율}$$

여기서,  $\eta_1$ 은 피열물이 상온으로 들어가서 상온으로 나온다고 생각할 수 있으므로  $\eta_1=1$  이 되고,  $\eta_4$ 는 실제로 평가하기 어렵지만 피열물에 주어진 열량과 이론적으로 필요한 유효열량이 거의 같다고 보면  $\eta_4=1$ 이 되므로 터널킬른에서는  $\eta_2$ 와  $\eta_3$ 를 이용하여 열효율을 평가할 수 있다. 또한, 소효율을 예열대, 소성대 및 냉각대에 각각 적용하면 보다 구체적으로 효율을 평가할 수 있으며, 각각의 소효율은 Fig.3 및 Table 2에서 보는 바와 같은 전열상태를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{예열대} : \quad \eta_2 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad , \quad \eta_3 = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

$$\text{소성대} : \quad \eta_2 = \frac{Q_1' - Q_2'}{Q_1'} \quad , \quad \eta_3 = \frac{Q_1'}{Q_1' - Q_2'}$$

$$\text{냉각대} : \quad \eta_2 = \frac{(Q_1'' + Q_5'' + Q_6'') - Q_2''}{Q_1'' + Q_5'' + Q_6''} \quad , \quad \eta_3 = \frac{Q_3''}{(Q_1'' + Q_5'' + Q_6'') - Q_2''}$$

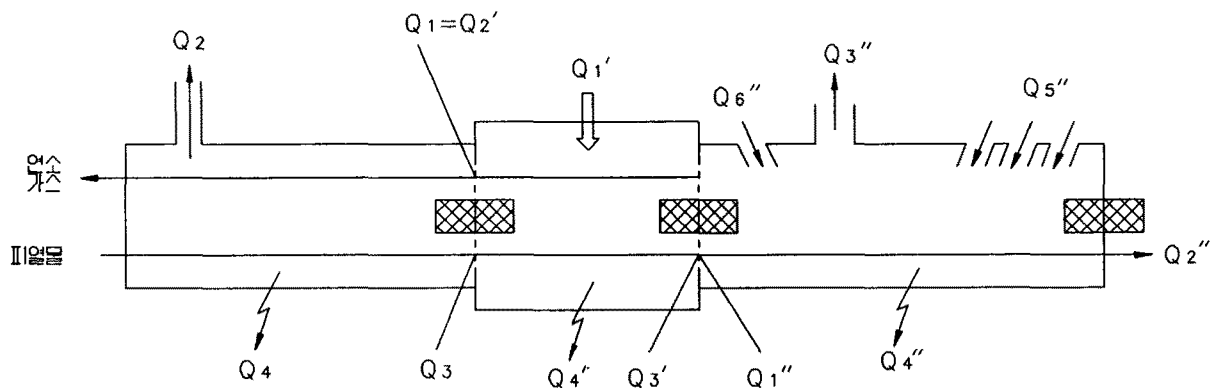


Fig.3 각 zone별 전열상태

Table 2 각 zone별 전열상태표

구 간	항 목	내 용
예열대 (I)	Q <sub>1</sub>	입구연소가스 현열
	Q <sub>2</sub>	배기가스 현열
	Q <sub>3</sub>	피열물 예열
	Q <sub>4</sub>	로벽손실
소성대 (II)	Q <sub>1'</sub>	연료발열량 + 예열공기량 + 연료의 현열
	Q <sub>2'</sub>	예열대로 주는 열
	Q <sub>3'</sub>	피열물의 가열에 사용된 열
	Q <sub>4'</sub>	로벽손실
냉각대 (III)	Q <sub>1''</sub>	피열물의 현열
	Q <sub>2''</sub>	피열물, 대차가 가지고 나가는 열
	Q <sub>3''</sub>	냉각용 공기가 가지고 나가는 열
	Q <sub>4''</sub>	로벽손실
	Q <sub>5''</sub>	서냉공기 현열
	Q <sub>6''</sub>	급냉공기 현열

이와같은 방법으로 계산한 각 zone별 소효율을 Table 2에 나타내었으며, 이 결과로부터 단열재의 선정, 폐열회수 등과 같은 방법을 열효율 향상을 위하여 유용하게 적용할 수 있다.[4-5]

Table 3 각 zone별 소효율 [%]

항 목	예열대(I)	소성대(II)	냉각대(III)
$\eta_2$	78.7	61.0	87.6
$\eta_3$	85.5	42.7	74.6
소효율( $\eta_2 * \eta_3$ )	67.3	26.0	65.3
총체 열효율	$(\eta_I + \eta_{II} + \eta_{III}) / 3 = 52.9$		

## 4. 터널킬른의 설계

열정산은 킬른의 전체적인 열평형에 의한 열량의 입출력 또는 효율을 평가하는 것으로, 킬른내의 각 부분에 대한 열량의 입출력 상태를 필요로 하는 설계에 적용하기에는 부족하다. 예로서, 피열물의 경우 열정산에서는 예열대로 들어가는 피열물의 온도와 냉각대로 빠져나가는 피열물의 온도만이 입력데이터로 들어가면 계산이 가능하나, 설계를 위하여는 킬른내부 각 영역에서의 피열물이 갖는 열량에 대한 정보가 필요하게 된다. 이와 같이 설계에 요구되는 각 부분에 대한 구체적인 정보는 피열물뿐만 아니라 연료에 관한 정보, 벽면손실, 흠배기구의 열량교환, 대차 하부냉각에 의한 열량교환 등 열량교환이 있는 모든 부분에서 계산되어야 한다.

이를 위하여는 킬른내의 열량교환이 있는 각 부분에 대한 계산이 선행되어야 하고, 이러한 각 단위 프로그램들이 조합되어 전체적인 킬른을 설계하기 위한 하나의 프로그램으로 통합·활용되어야 한다. 한편으로는, 이러한 단위 프로그램 또는 통합 프로그램을 설계자가 손쉽게 운용하기 위한 입출력 데이터 작성용 프로그램, 설계된 프로그램의 검증을 위한 그래픽 처리 등 별도의 부프로그램 개발도 이루어져야 한다.

### 4.1 설계용 단위 프로그램

설계용 단위 프로그램은 사용연료에 관한 정보, 피열물이 갖는 열량계산, 로벽으로의 열손실 계산, 연소배기가스에 의한 열손실 계산, 대차 하부냉각에 의한 열량계산 등으로 나눌 수 있으며, 본 절에서는 피열물이 갖는 열량계산과 대차하부 냉각에 의한 열량계산에 대하여 소개하기로 한다.

#### 1) 피열물이 갖는 열량계산

피열물, 즉 소성대상이 되는 벽돌 등이 킬른내부를 이동하면서 받는 열량은 궁극적으로 킬른의 효율과 숙성도에 밀접한 관계가 있고 또한 피열물을 여하한 방법으로 소성시키고자 하는 것이 터널킬른의 목적이기 때문에 보다 정확히 계산할 필요가 있다. 간단하게는 피열물이 이동하면서 킬른내의 연소가스온도와 같은 온도를 갖는다고 가정할 수 있으나, 킬른내의 온도분포가 균일하지 않거나 소성시간이 빠른 경우는 적재된 피열물의 온도분포가 고르지 않게 되므로 이를 설계시 고려하여야 한다. 본 절에서는 소성온도곡선을 기준값으로 피열물의 내부온도분포를 고려한 수치계산 방법에 대하여 설명하기로 한다.

수치계산에는 피열물이 예열대로 부터 소성대로 진행함에 따라 피열물과 킬른내벽 사이를 흐르는 연소용공기에 의한 대류의 영향과 피열물과 킬른내벽간의 복사의 영향을 고려하였으며, 복사해석은 다유속법인 구분중좌법을 사용하였다.

피열물은 적재된 벽돌로서 다공성 물질로 가정하여 해석하였으며 피열물의 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q \quad (1)$$

피열물 표면에서의 경계조건은

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = h (T_\infty - T_w) + q_w^R \quad (2)$$

이다. 요로내벽으로부터 피열물 표면으로의 표면 복사량  $q_w^R$  을 구하기 위한 직각좌표계에서의 복사 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial I}{\partial x} + \eta \frac{\partial I}{\partial y} = -xI + xI_b = 0 \quad (\because x=0) \quad (3)$$

구분종좌법에 의한 복사열전달방정식을 유도하기 위하여 전체 입사각을 유한개의 방향으로 나누고 Carlson과 Lathrop이 제시한 방향각 미분에 관한 유한차분법을 도입한 후 미소 체적에 대하여 적분하면 다음식을 얻는다.

$$I_i^b = \frac{|\mu_i| A_x I_i^{wR} + |\eta_i| A_y I_i^{rR}}{|\mu_i| A_x + |\eta_i| A_y} \quad (4)$$

각 복사 강도에 대한 경계조건은 다음과 같으며,

$$I_i^w = \varepsilon_w I_b^w + \frac{(1-\varepsilon_w)}{\pi} \sum_{j=1}^{\frac{M}{2}} w_j \mu_j I_j^w \quad (5)$$

이렇게 각 방향에서 구하여진 복사강도는 적분가중치를 곱한 후 합하여 주면 피열물 표면으로의 복사열을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_w^{r_w} = \sum_{i=1}^M w_i \left( \frac{\mu_i}{\eta_i} \right) I_i^w \quad (6)$$

피열물의 에너지 방정식을 완전 내재적 방법(fully implicit method)으로 차분하여 시간에 따라 해를 계산하였으며, 계산영역을 여러영역으로 나누어 복사강도를 구하고 이를 다음 영역의 경계조건으로 이용하는 방법으로 계산하였다. 대류 열전달계수는 관내 흐름으로 가정하여 20으로 하여 계산하였다.

Fig.4는 피열물 각 표면의 온도 분포를 시간에 따라 도시한 것으로 소성 온도 곡선과 같은 경향을 나타내고 있다. Fig.5는 피열물의 각 표면에서 열유속을 도시한 것으로 대류 열유속은 완만하지만 전체 열유속은 요로 벽면의 온도가 높아질수록 피열물 표면의 중간 부위가 위로 볼록한 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 온도가 높아질수록 복사 열전달의 영향이 커지고 있음을 의미하며, 특히 형상계수(shape factor)가 큰 중간지점의 열유속이 크게 나타

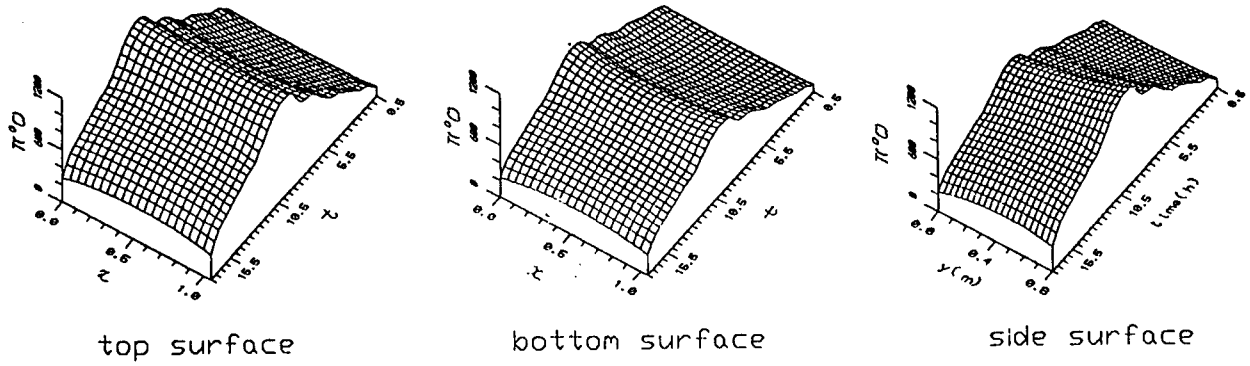


Fig.4 피열물 각 표면의 온도

나고 있다. 이와같이 얻은 결과로부터 피열물의 속성도를 예측할 수 있으며, 구하여진 열유속은 설계용 프로그램에서 사용하게 된다.[6]

## 2) 대차 하부냉각에 의한 열량 계산

대차는 피열물과 함께 킬른내부를 이동하기 때문에 피열물과 유사한 형태로 주위 연소가스와 열량교환이 있으나 열량교환은 대부분 대차상면에서 이루어지고, 대차하부에서는 베어링의 파손을 방지하기 위한 냉각용 공기와의 열량교환이 이루어지게 된다. 대차하부의 냉각용 공기량은 대차 및 대차하부 공기에 대하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

요로내에서 대차로의 열전달은 비정상 1차원 에너지방정식으로 부터

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 경계조건은

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h(T_g - T_0) + \sigma \epsilon (T_g^4 - T_0^4) \quad (8)$$

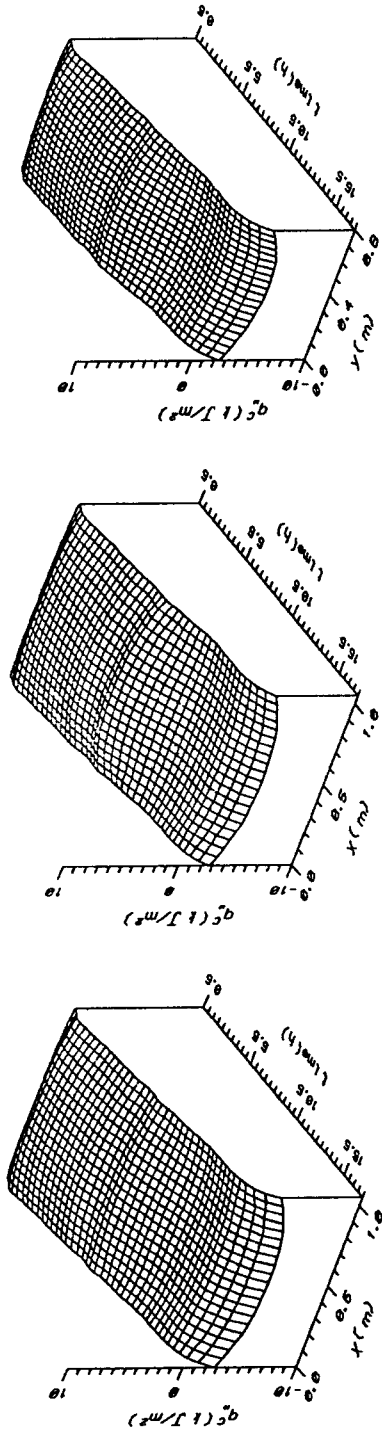
$$k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T_L - T_a) \quad (9)$$

와 같이 표시된다. 여기서,  $T_g$ 는 킬른내의 연소가스온도,  $T_0$ 는 대차상부면의 온도,  $T_L$ 은 대차하부면의 온도,  $T_a$ 는 대차하부 공기온도를 나타낸다.

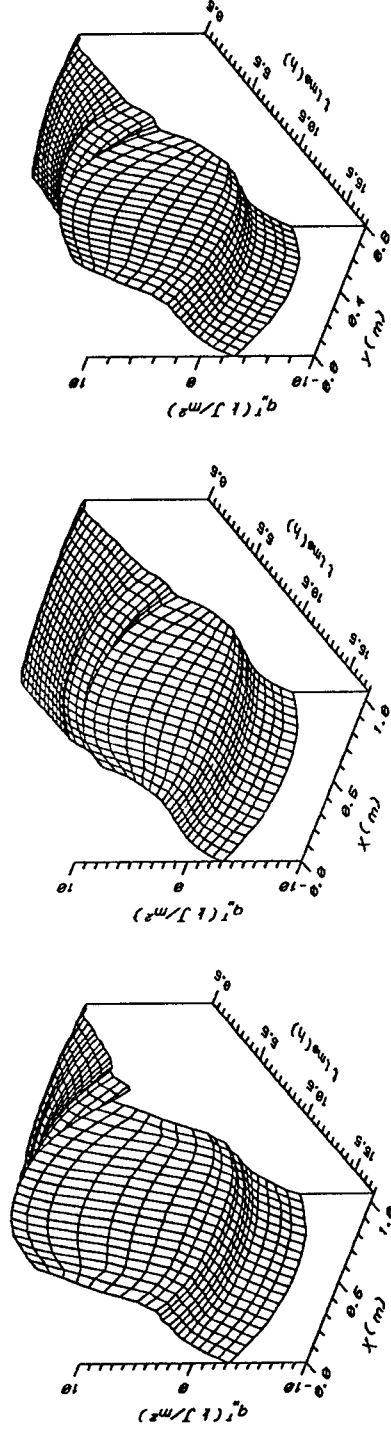
계산은 식(7)-(9)와 식(10)을 이용하여 대차하부 공기온도가 변하지 않을 때까지 반복 한다.

$$\dot{m}_{air} C_p (T_{i+1} - T_i) = hA(T_L - T_a) \quad (10)$$

convective heat flux



total heat flux



side surface

bottom surface

top surface

Fig.5 퍼열물 각 표면의 열유속

여기서,  $\dot{m}_{air}$ 는 대차하부를 흐르는 냉각용공기의 질량유량이다.

Fig.6은 대차하부 냉각공기를 거의 불어 넣지 않은 경우의 대차 송차시간에 따른 대차하부 공기온도를 나타낸 것으로, 송차시간이 늦어질 수록 대차하부의 공기온도는 소성곡선에 근접하여감을 알 수 있다. 이 경우 대차하부의 공기온도가 150°C이상으로 상승하기 때문에 대차하부 베어링의 파손이 예상된다. 이것은 1840년 덴마크의 Yordt 등이 대차와 소성실 벽사이의 열차단에 실패한 원인의 근거를 뒷받침하여 줄 수 있다.

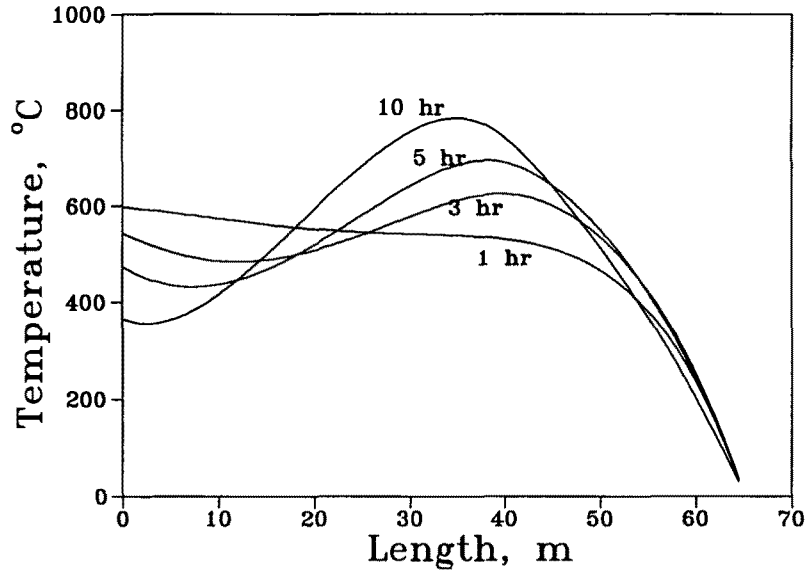


Fig.6 대차의 송차시간에 따른 대차하부 공기온도 (냉각용 공기를 불지 않은 경우)

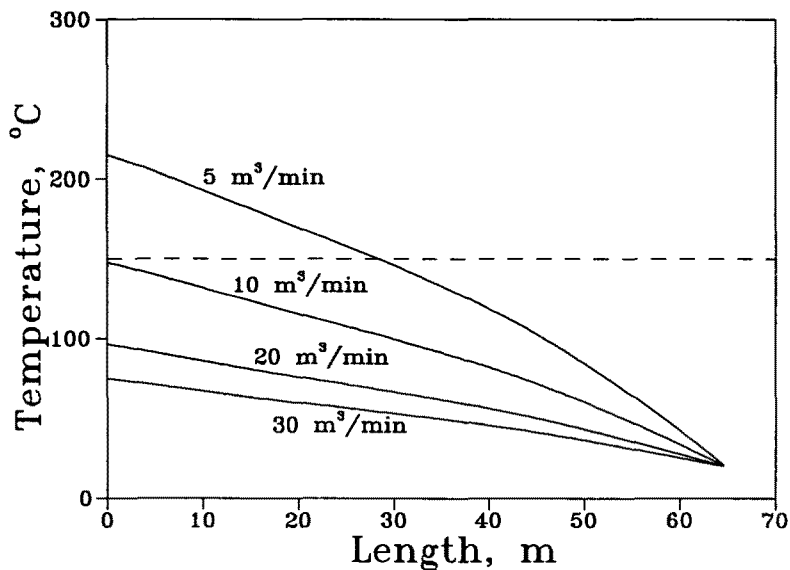


Fig.7 냉각용 공기량에 따른 대차하부 공기온도 (송차시간 : 1 시간)

Fig.7은 대차하부에 냉각용공기를 불어넣은 경우의 대차하부 공기온도를 나타낸 것으로, 냉각 공기량이 증가함에 따라 대차하부 공기의 온도는 떨어지고 있다. 이 경우 설계값인 150°C 이하를 만족하려면 10m<sup>3</sup>/min이상의 냉각용 공기가 필요하다. Fig.8은 대차하부의 온도를 나타낸 것으로 대차하면으로 부터의 열전도에 의하여 베어링의 온도가 상승될 수 있기 때문에 설계값인 150°C이하가 되도록 하려면 30m<sup>3</sup>/min이상의 냉각용 공기를 불어 넣어 주어야 한다.

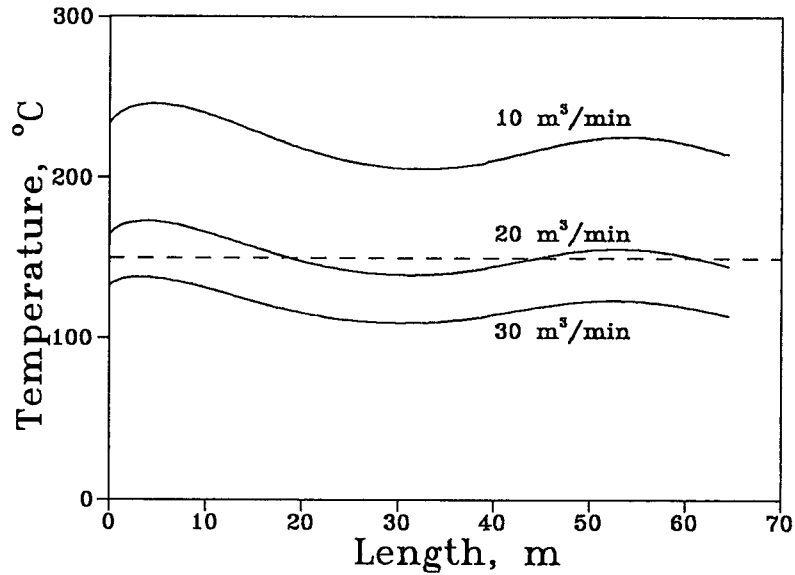


Fig.8 냉각용 공기량에 따른 대차하부의 공기온도 (송차시간 : 1 시간)

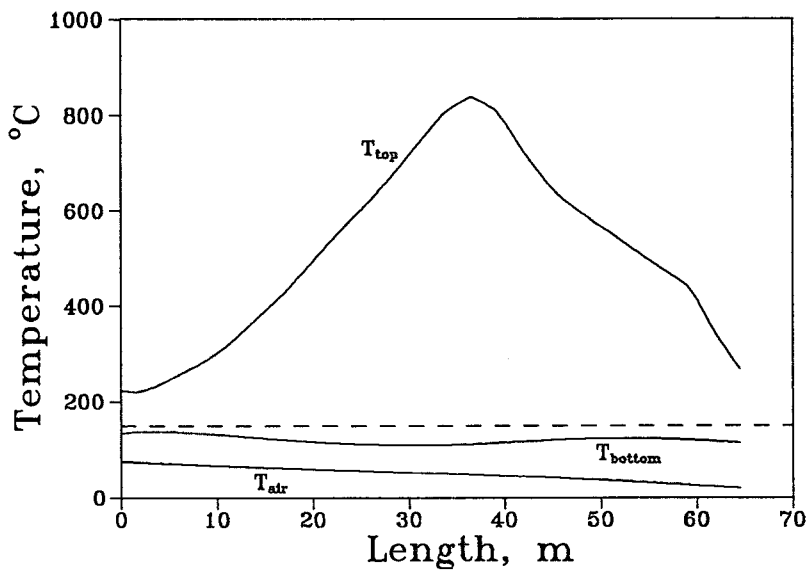


Fig.9 대차의 상면, 하면 및 대차하부 공기온도 (냉각용 공기량 : 30 m<sup>3</sup>/min)

Fig.9는 냉각용공기가 30m<sup>3</sup>/min, 대차의 송차시간이 1시간인 경우의 대차상면, 대차하면 및 하부공기의 온도를 나타낸 것으로 대차상면의 온도는 거의 로내의 온도와 같은 분포를 갖고 있다. 이상과 같은 계산을 통하여 대차하부의 냉각용 공기량을 결정할 수 있으며, 로내에서 대차로의 열전달량은 설계 프로그램에서 활용하게 된다.

#### 4.2 설계용 프로그램

설계용 프로그램은 단위 프로그램들을 바탕으로 킬른의 부분적인 설계에 일차적으로 활용되어지고, 이 들이 조합되어지면 버너의 용량, 급배기 송풍기의 용량을 비롯하여 버너의 위치, 급배기구의 위치, 피열물의 적재, 하부냉각용 공기량 등 일련의 설계 정보를 산출할 수 있다. 터널킬른의 설계는 예열대, 소성대 및 냉각대의 각 부분에 대하여 실시한 후 이 들을 조합하여 전체 킬른으로 확장하는 것이 바람직하다. 프로그램에는 소성온도곡선을 예측하여 주어진 표준 소성온도곡선을 만족하는 조건을 구하므로써 설계에 활용할 수 있도록 되어 있다. 계산은 전체킬른을 작은 체적으로 나누어 각각의 체적에서 열평형이 만족되도록 하여 분위온도를 구하게 되며, 열평형의 계산에는 앞서 계산된 단위 프로그램들이 활용된다. 유동은 대상킬른의 흐름도에 따라 구하여지며, 기존에 설치된 킬른에 적용하거나 수치계산에 의하여 수정·보완되어진다. 여기서는 Fig.1에서 보는 바와 같은 터널킬른을 대상으로 설계 프로그램을 적용한 일례를 살펴보기로 한다.

킬른내의 상하온도 편차를 줄이기 위하여 예열대 측벽에 위치한 배기구의 배기량을 조절하는 경우는 일반적으로 Fig.10과 같이 A형, V형, 평행형 등이 널리 사용되고 있으며, Fig.11에 그 영향을 나타내었다.

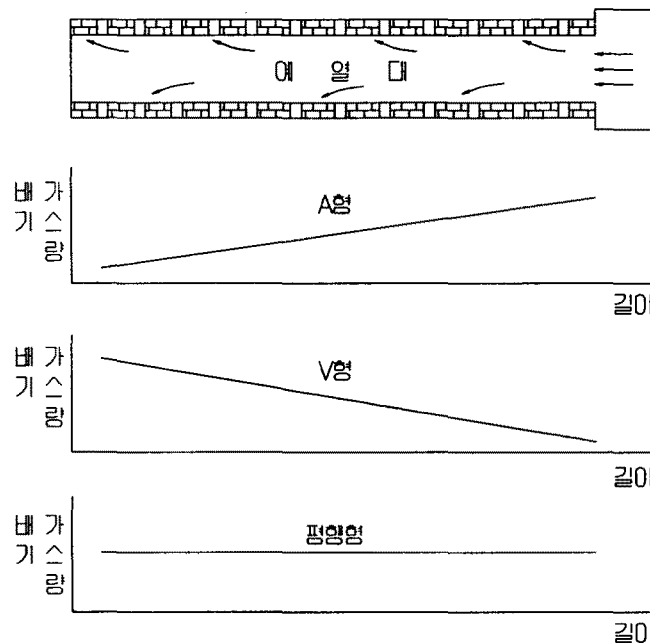
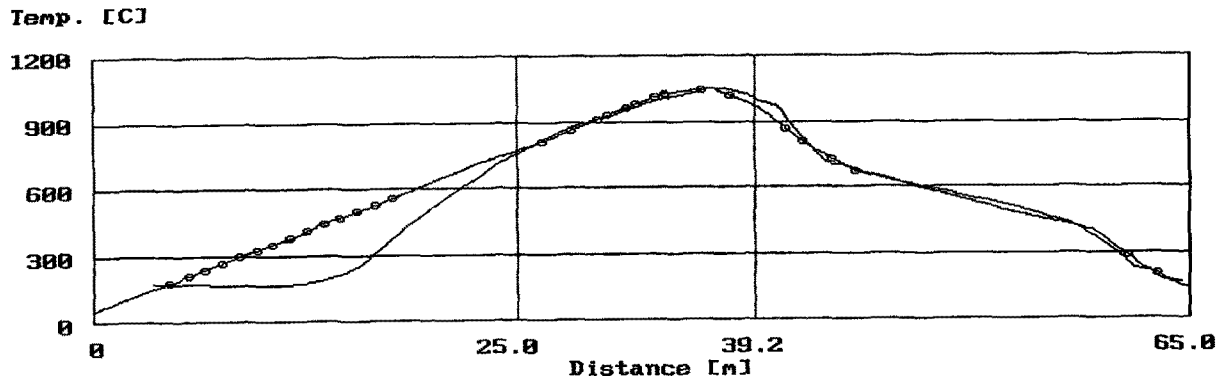
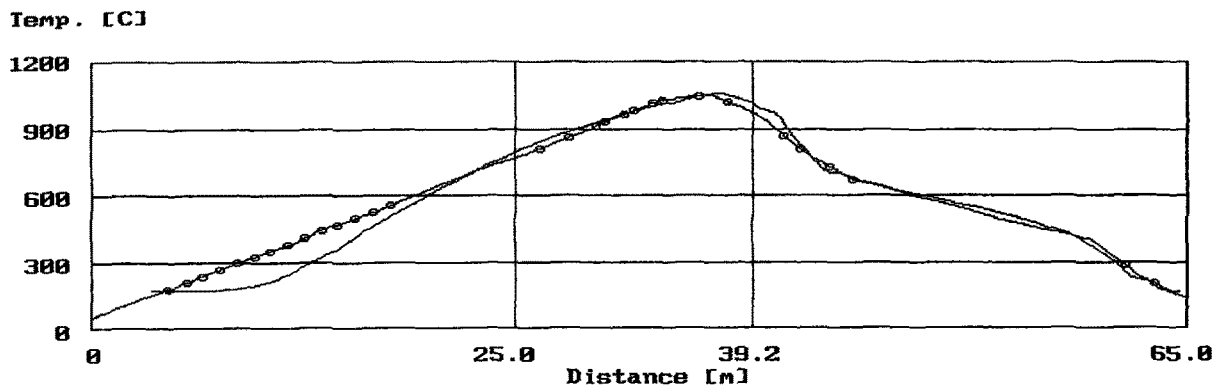


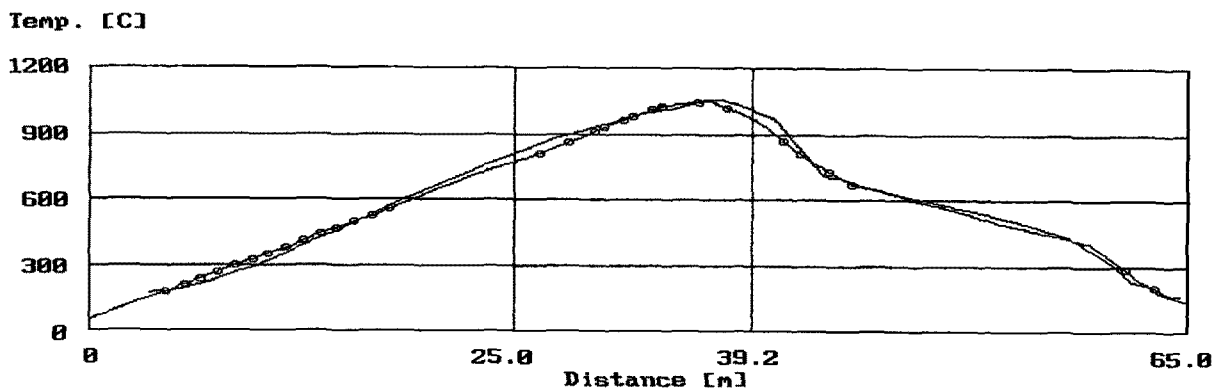
Fig.10 예열대 배기구의 사용 예



(a) A형 배기



(b) 평행형 배기

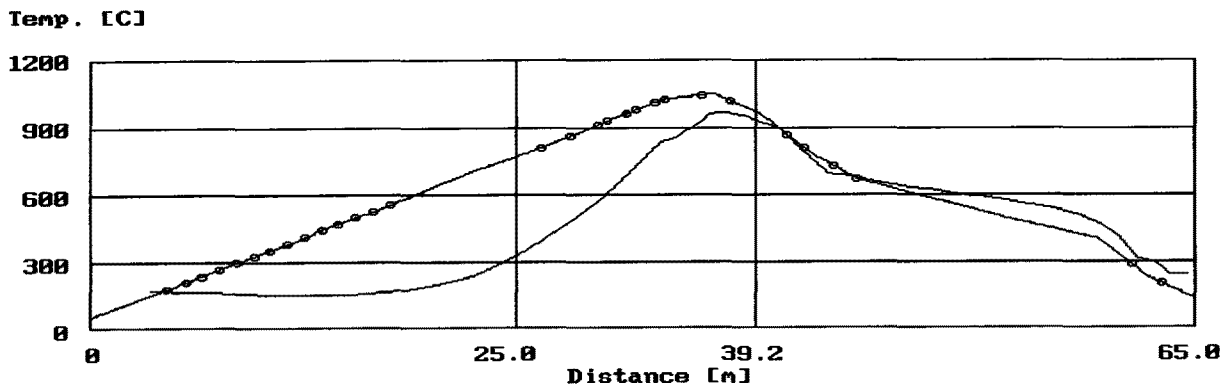


(c) V형 배기

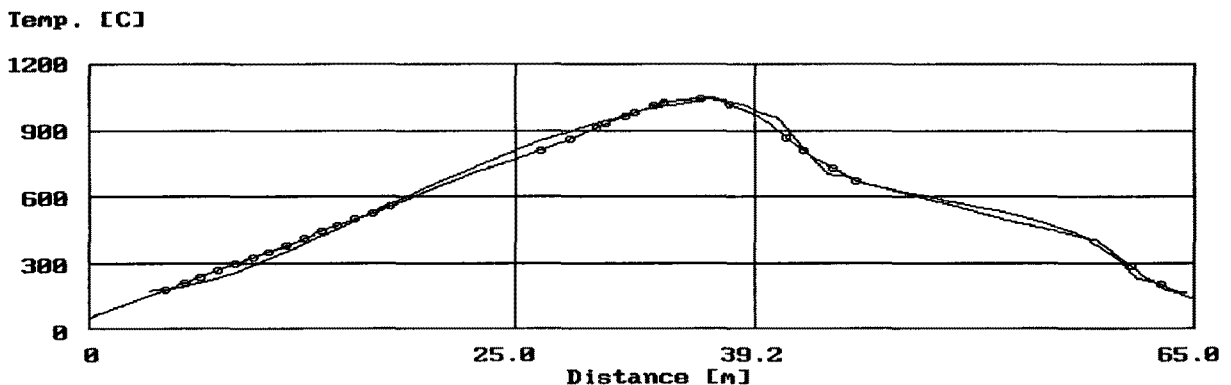
Fig.11 예열대 배기구의 배기가스량에 따른 킬른내 온도

그림에서 보는 바와 같이 A형의 경우는 예열대 출구부분에서 많은 양의 연소가스를 배기시키기 때문에 킬른내의 분위기 온도는 현저히 떨어지게 되며, 평행형의 경우는 다소 분위기 온도가 상승하기는 하나 소성온도곡선과는 A형이 잘 일치하고 있다.

벽돌 등을 생산하는 요로업체에서는 피열물의 송차시간을 가능한 한 줄여(피열물을 빠르게 이송) 대량의 소성품을 얻고자 하나, 피열물의 송차시간이 줄어들게 되면 소성에 필요한 열량을 추가로 공급하여야 한다. Fig.12(a)는 피열물의 송차시간을 10분 감소시킨 경우의 온도곡선을 나타낸 것으로, 피열물의 소성에 필요한 열량을 공급하기 위하여는 피열물에는 같은 시간동안 열량을 많이 주어야 하므로 즉, 단위시간당 피열물에 주어야 하는 열량은 같다고 가정하여 계산하면 분위기 온도는 감소하게 되고(실제로는 피열물이 열량을 적게 받기 때문에 분위기 온도는 상승되나 설계의 관점에서 추가열량을 구하기 위하여 가상적으로 계산한 것임) Fig.12(b)와 같은 온도분포를 얻기 위하여는 약 17%의 열량을 더 공급하여야 하며 급냉공기와 서냉공기량도 증가시켜야 함을 알 수 있다.



(a) 송차시간을 감소시킨 경우의 온도



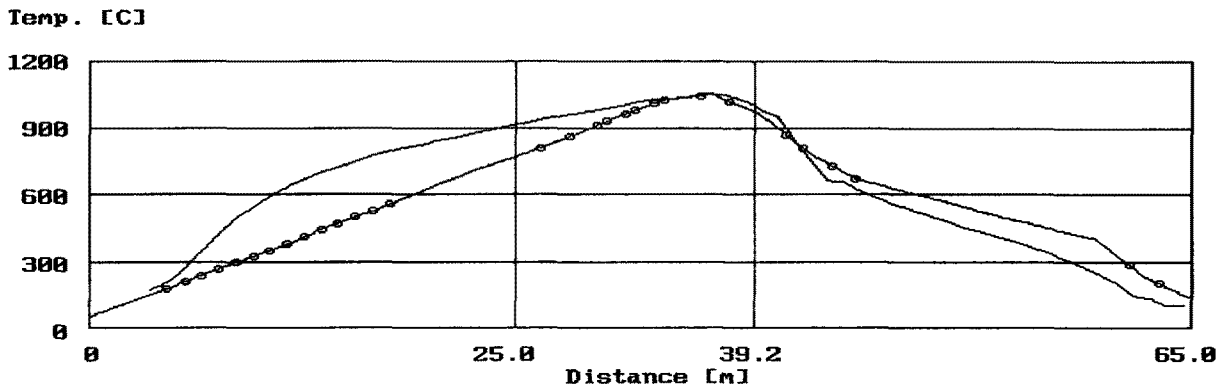
(b) 조건 변화후의 온도 (입열량 16.6%, 급냉공기 23.3%, 서냉공기 21.7% 증가)

Fig.12 송차시간에 따른 킬른내의 온도 (송차시간 = 50분)

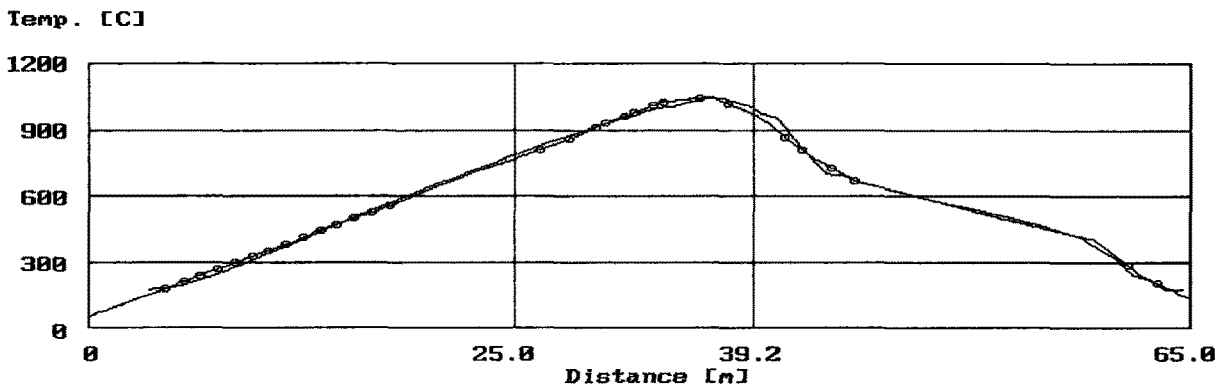


Fig.13은 송차시간을 10분 증가시킨 경우의 킬른내 온도를 나타낸 것으로, 이 경우는 피열 물이 충분한 열량을 받고 있으므로 열량을 약 12% 감소하여도 소성이 가능하며 급냉공기와 서냉공기량은 감소시켜야 함을 알 수 있다. 이 때, 두 경우 모두 예열대의 배기량은 A형을 사용하였다.

이외에도 급냉공기량 및 서냉공기량, 로벽의 구성 등에 따른 영향을 평가할 수 있으며, 이와 같이 얻은 결과를 통하여 터널킬른을 설계할 수 있다. 그러나, 킬른내의 압력 및 연소용공기의 흐름 등에 대한 보다 정확한 계산이 고려된 설계를 위한 노력이 필요하다.



(a) 송차시간을 증가시킨 경우의 온도



(b) 조건 변화후의 온도 (입열량 12.1%, 급냉공기 16.7%, 서냉공기 17.4% 감소)

Fig.13 송차시간에 따른 킬른내의 온도 (송차시간 = 70분)

## 5. 맺음말

터널킬른은 공업의 제조·가공분야에서 광범위하게 사용되는 에너지 다소비 열설비 중의 하나로서, 국내의 자원사정을 감안할 때 효율적인 에너지절약형 터널킬른의 개발은 시급한 실정이다. 그러나, 터널킬른은 킬른내의 유동이 복잡하고 많은 부분 경험적 요소를 필요로 하기 때문에 기반기술이 취약한 국내의 기업은 대부분 외국기술의 모방에 의존하고 있고, 또한 킬른을 생산하는 업체의 영세성 등으로 말미암아 설계기술을 비롯한 자체 생산능력은 미약하다. 따라서, 터널킬른 설계기술의 확보차원에서 설계방법 및 결과의 일부를 소개하였으며, 결과가 실제 현장에 조금이나마 도움이 되길 바란다. 끝으로, 터널킬른을 비롯한 산업용 요로와 같이 국내기술이 취약한 부분에 관련 연구자들의 많은 관심을 바란다.

## 참고 문헌

1. 송재선, 1986-1987, 터널킬른에서의 벽돌소성기술, 요업회보.
2. 김환외 3인, 1989, 窯爐工學, 경문사.
3. 오신섭외 2인, 1974, 연소와 열관리, 중앙경제사.
4. 國井大藏, 1958, 爐와 燃燒裝置, 科學技術社.
5. 안국영외 2인, 1992, 터널킬른에서의 열효율 및 소성품의 숙성도 평가, 제 7 회 에너지 절약기술 워킹숍 논문집, pp.115-130.
6. 안국영 외, 1994, 에너지절약형 건축자재 소성용 요로 개발(II), 한국기계연구원 보고서