

가열로 온도 모델들의 비교 연구

김영일, 강덕홍, 김기홍
포항산업과학연구원

Study on Furnace Temperature Models

Kim Young Il, Kang Deok Hong, Kim Ki Hong
RIST

1. 서론

철강업에서 가열로(reheating furnace)는 슬라브(slab), 빌레트(billet) 등을 균일한 목표온도까지 가열하는 주요한 공정이다. 가열로에 장입된 슬라브는 일반적으로 3~4개의 가열구간을 통과하고, 이때 슬라브는 차후 공정인 압연에 피해를 주지 않도록 최대한 목표온도에 근접해야하고 단면방향의 온도도 균일해야한다.

슬라브의 가열은 가열로내에서 전진하면서 각 가열구간의 특정 위치에 설치된 버너들에 의해서 이루어지며 가열의 불균일은 버너의 위치, nose부의 존재, 유입공기등의 영향을 받는다. 또한 슬라브의 가열로내에서 지지를 위해서 설치되는 skid 시스템의 skid beam의 존재 때문에 복사의 방해와 전도의 상이성이 존재하고 이로 인해 슬라브의 바닥에는 자취(skid mark)가 남게 되고 skid beam의 위치에서는 beam이 없는 부분과의 심한 온도 편차를 보인다.

이러한 시스템 상황에서 슬라브의 내부 온도를 알기 위해서는 실제 조업에서 온라인으로 측정할 수 없으므로, 전열 해석 모델을 이용하고, 이러한 전열해석모델의 정확도는 소재의 물성치와 경계 조건 처리방법에 따라 크게 좌우된다.

본 연구에서는 가열로의 슬라브 온도 예측모델의 경계조건을 처리하기 위하여 필요한 가열로 내부 온도 분포를 길이 방향으로 추정하기 위한 모델을 PCR과 SPLINE 기법으로 접근하는 방법을 제시하고 이를 이용하여 전열 해석 모델의 정확을 확보하는 것을 알아보고자 한다.

2. 이론

2-1. PCR(Principal Component Regression)

PCR는 MLR(Multiple Linear Regression)과 PCA(Principal Component Analysis)에 기초한다. MLR는 한 데이터 샘플에 대해서 다음처럼 수식화된다.

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m + e = \sum_{j=1}^m b_jx_j + e = \mathbf{x}'\mathbf{b} + e$$

이를 다수 데이터 샘플(n)에 대하여 적용하면 $\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e}$ 이고 여기서 회귀계수인 \mathbf{b} 는 익숙한 최소자승법에 의해 $\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}$ 로 구해진다.

다음으로 PCA는 데이터 X 를 scores행렬과 loadings행렬로 분해한다. 이때 구해지는 score 벡터와 loading 벡터는 eigenvalue값의 내림차순으로 구해지고, 이렇게 얻어지는 관계를 outer relation이라고 하고 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T + \mathbf{E} = \sum_{k=1}^a t_k \mathbf{p}_k^T + \mathbf{E}$$

여기서 T 는 X 의 scores 벡터로 이루어진 scores행렬이고, P 는 loadings 행렬이고, E 는 각각의 잔차이다. 위에서 a 는 얻고자하는 주요 인자(principle component)의 개수이고 모든 인자들이 이용되면 $E=0$ 이 된다. 이렇게 얻어지는 관계식을 활용하면 X 는 T 로 근사된다. 즉 $T = \mathbf{X}\mathbf{P}$ 이고 이러한 T 를 MLR에 적용하면

$$y = Tb + e$$

여기서 $b = (T^T T)^{-1} T^T y$ 로 얻어진다.

이러한 기본 PCR구조에서 dynamic PCR를 구성하는 방법은 parametric model를 구성하는 기본 구조를 빌려와 아래와 같이 독립변수 및 종속변수를 구성함으로써 얻어진다. 먼저 단 변수에 대한 FIR(Finite Impulse Response)모델 형식은 다음과 같고,

$$y(t) = a_0x(t) + a_1x(t-1) + \dots + a_lx(t-l)$$

이러한 형식을 가지도록 PCR모델을 만들기 위해서 X 블록은 다음처럼 구성되어야 한다.

$$X_{FIR} = [X(t) X(t-1) \dots X(t-l)]$$

자주 이용되는 또 다른 형태의 모델 구조는 ARX(Auto regressive model with exogenous input)을 들 수 있고, 이것을 단 변수에 대하여 적용한다면,

$$y(t) = b_1y(t-1) + b_2y(t-2) + \dots + b_my(t-m) + a_0x(t) + a_1x(t-1) + \dots + a_lx(t-l)$$

처럼 표현되고 이러한 형식을 가지는 PCR를 구성하기 위해서는 X 블록을

$$X_{ARX} = [Y(t-1) Y(t-2) \dots Y(t-m) X_{FIR}]$$

처럼 구성하면 된다. 즉 dynamic PCR는 X 블록에 독립변수나 종속변수의 과거치를 추가하여 일반적으로 구성한다.

2-2.C-SPLINE

가장 일반적으로 사용되는 자유곡면 근사 방식으로 샘플데이터들의 각 구간을 3차 다항식으로 근사하는 것으로 다음의 그림 1로 설명된다. 각 구간의 근사계수를 얻는 과정은 문헌을 참조한다. 우리가 이용하는 것은 "natural cubic spline" 형식이다.

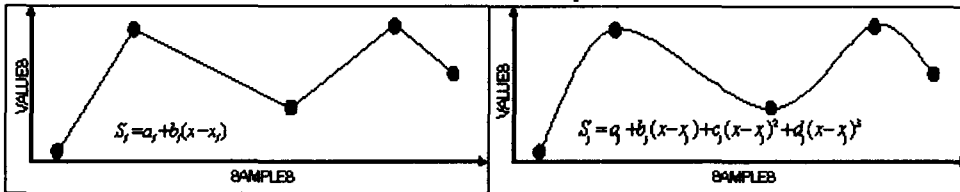


그림 1. Linear(LHS) 와 Cubic spline(RHS) 근사의 비교

3. 적용 및 결과

이러한 모델 형식용 이론을 근거로 가열로 로온분포를 구하는 것의 타당성을 검토하기 위해서 선행되어야 하는 실험이 가열로 깊이 방향으로의 온도 분포가 어떠한가를 검토하고 우리가 얻고자 하는 분포를 가장 잘 표현하는 깊이 방향의 위치를 파악하는 것이 필요하다. 그래서 그림 2(a)와 같은 깊이방향 온도 분포 측정 장치를 이용하여 그림 2(b)처럼 가열로에 설치하여 실험하고 2(c)와 같은 깊이별 온도분포를 얻을 수 있다.

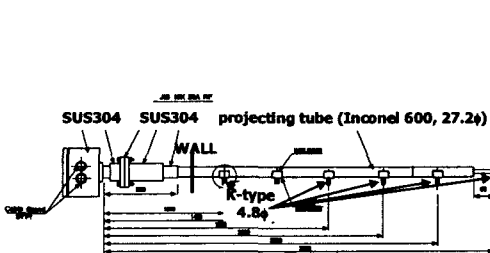


그림 2(a) 깊이방향온도 분포측정장치

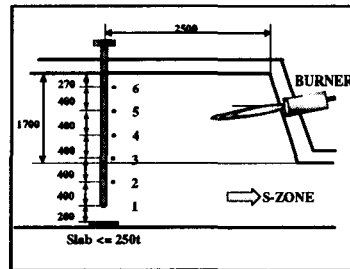


그림 2(b) 가열로 설치 개념도

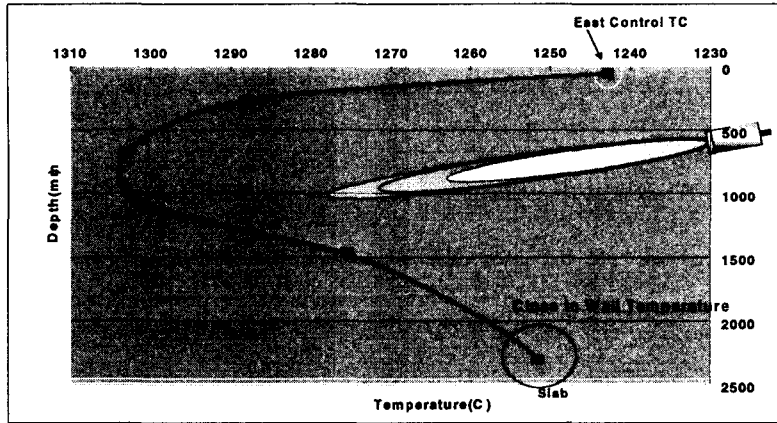


그림 2(c) 깊이 방향 측정 결과

결과에서 볼 수 있듯이 최대점 과 최소점의 온도차가 60C 정도이고, 우리가 제어에 이용하는 열전대와 유사한 온도(~1252C)를 얻을 수 있는 지점은 슬라브 상부에 가까운 점(200mm)이라는 것을 확인 가능하다. 접근 방법에 따라 깊이 방향의 평균온도를 이용한 가스 평균온도 기준의 모델을 만들거나, 우리가 접근하는 방법인 벽면 근사온도 기준의 모델이 가능하고, 혹은 이 두 가지를 각각 이용하는 모델 방식을 생각할 수 있다. 그러나 가스평균온도 근사를 위해서는 깊이 방향으로 더 낮은 지점의 온도를 측정 가능해야 하지만 다음에서 다룰 슬라브 측온실험에서 알 수 있듯이 가열로 구조상 더 낮은 지점의 가열로 길이방향의 연속측정이 어려움으로 여기서는 벽면근사온도를 이용한 접근법을 이용한다.

3-1. 실험

이러한 전 단계 실험 결과를 바탕으로 새롭게 적용하고자하는 모델들을 구하기 위한 측온 실험을 위한 가열로 형상은 다음과 같다. 그림 3의 가열로는 pusher형식으로 소재 온도 및 재료시간 관리에 제약이 많은 형식이다. 슬라브는 이러한 가열로 장입되어 가열로를 전진하면서 다른 온도 환경에 노출되고 이러한 과정에서 가열되어 목표온도에 도달한 후 추출되어 압연 공정으로 이송된다. 실험에서는 먼저 그림 4에서처럼 측온용 소재 내부의 온도를 측정하기 위하여 필요한 부위(SKID, NONSKID, EDGE)들에 깊이별로 홀을 가공하고 이곳에 측온용 열전대를 삽입하고, 우리가 연구자하는 분위기온도 검출을 위하여 별도로 슬라브의 표면 상부(ABOVE),하부(BENEATH)에도 열전대를 설치한다. 설치된 열전대의 검출온도를 저장하기 위한 DATA LOGGER가 슬라브의 측면 가공부에 장착된다. 이렇게 준비된 슬라브는 일반 생산재와 마찬가지로 가열로에 장입되어 가열로 내 위치별 온도를 측정하게된다.

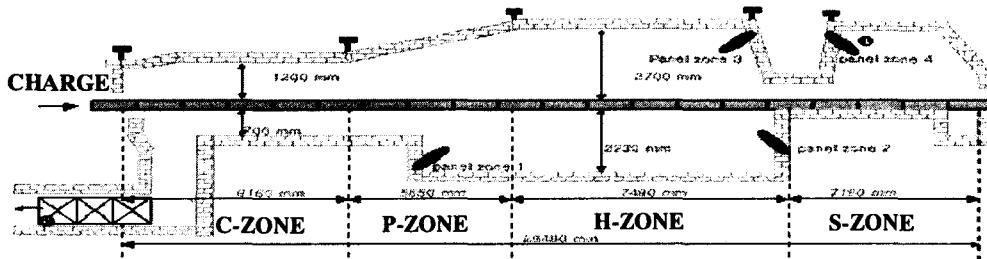


그림 3. pusher형 가열로의 개념도

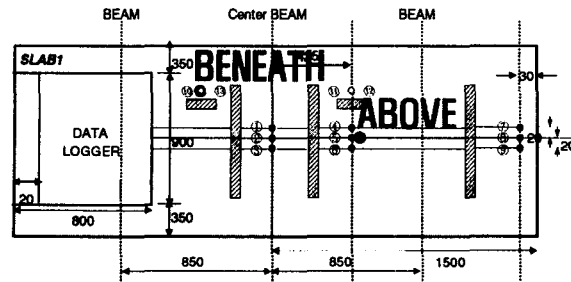
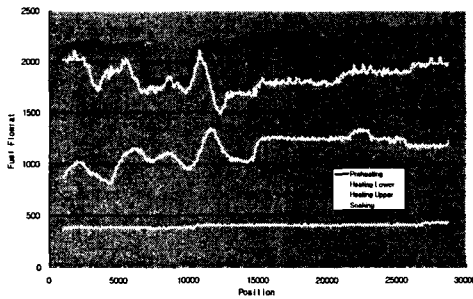
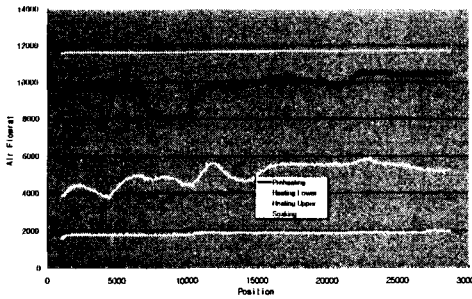


그림 4. 축은용 소재의 가공도면

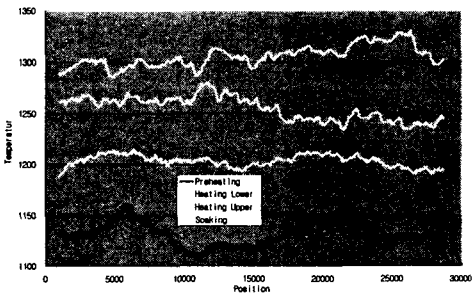
이러한 슬라브 축은 실험에서 얻어지는 데이터들을 그래프로 표시한 것이 그림 5이다. 그림 중 (a-c)는 DCS에서 수집하는 데이터들이고, (d)는 장입된 소재에 위치한 DATA LOGGER가 측정한 각 위치별 온도 데이터들이다. 우리가 얻고자하는 모델은 (a-c)의 데이터들로부터 (d)의 분위기온도 프로파일을 계산할 수 있는 강건하고 적절한 모델이다.



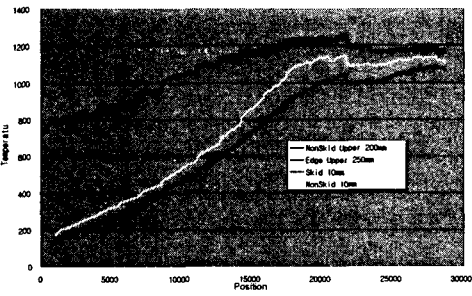
(a) 연료량 변화



(b) 공기량 변화



(c) 제어용 열전대 온도 변화



(d) 데이터로그의 측정온도 값

그림 5. 축은 실험에서 얻어지는 데이터들

3-2 PCR 형식모델과 결과

먼저 PCR형식 모델들을 만들고 이들의 예측정도를 평가하였다. 그림 6(a-c)에는 시도된 형식들의 결과를 도시한 것으로 좌측에는 측정값과 해당모델의 예측값을 도시하였고, 우측에는 사용된 PC들의 eigenvalue값을 도시하였다. 그림 6(d)에는 예측검증을 위한 결과로 우측에는 시계열에 따른 측정값과 예측 값을 도시하고, 우측에는 오차를 도시한다. 모델들에서 이용된 세부형식과 PC개수에 대한 설명은 캡션에 있다. 그림에서 알 수 있는 것은 더 많은 정보를 이용하더라도 그 정확도는 확연히 향상되지 않는다는 것이다. 특히 그림 (d)의 예측에서는 우측의 그래프에서 발견되는 것은 오차가 선형성을 가지고 나타나는 문제가 발생하여 향후 온라인 적용 시에 추정온도의 비틀림에 의해서 슬라브 온도모델의 결과도 비틀림 현상이 나타날 수 있는 문제점을 지닌다.

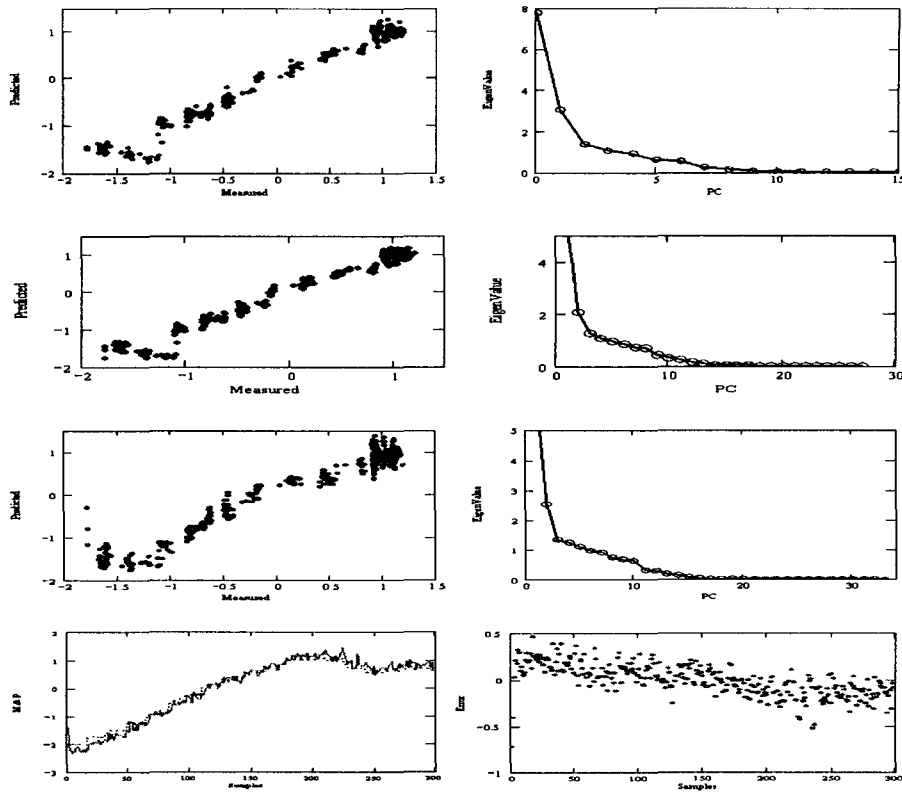


그림 6. (a)FIR model result using no lagged w/ 15 PCs(M1), (b)FIR Model Result using 1 time lagged w/ 27 PCs(M2), (c)ARX result using 2 time lagged X and 1 time lagged y w/ 34PCs(M3), (d)Prediction result using M3 w/ 15PCs

물론 이러한 비틀림 현상은 실험에서 얻는 데이터들만으로는 실 운전상황의 전체 공간 정보가 모두 포함되지 못하는 경우이므로 많은 실험을 통하여 이를 보정하는 것이 가능할 것으로 본다. 또 다른 문제점은 가끔 나타나는 추정치의 hunting 문제로 실 측정데이터는 안정적으로 나타나는데 예측데이터는 심하게 hunting하는 것으로 소재온도 계산에 문제를 야기할 가능성이 존재한다.

3-3. C-SPLINE 형식모델과 결과

위에서 언급한 심한 hunting을 완하시킬 수 있는 형태이면서 적절한 로온 프로파일을 추론하는 방법으로 spline 근사에 대해서 알아본다. 이 방법을 위해서는 가열로의 많은 위치의 제어용 열전대의 온도가 있으면 더욱 실 조업과 일치하는 모델을 만들 수 있지만 일반적으로 각대별 4개의 열전대만이 존재하므로 이들만으로 spline 곡선을 근사하는 것은 측온실험에 의한 온도를 추정하기가 어려움으로 "특정점"이라는 가열로 위치를 측온실험의 분위기 온도데이터에서 찾고 이들 특정점의 온도를 근사하기 위해서 제어용 열전대의 온도와 가스량을 고려하는 1단계 근사함수를 만들고, 이렇게 얻어지는 특정점의 온도들로 구성하는 데이터에 대하여 spline interpolant를 만들어 예측에 활용하는 방법을 이용한다. 이러한 것을 수식으로 정리하면 먼저 특정점의 온도 예측은 다음 식으로 정리된다. 즉,

$$T_i^C = \alpha_i T_j^Z + \beta_i G_k^Z + \gamma_i$$

이고, 여기서 T^C 는 특정점 온도, T^Z 는 제어용 열전대온도, G^Z 는 해당 영역의 연료유량이고, α, β, γ 는 fitting인자이다. Fitting 인자들을 찾기위해서는 그림5의 데이터들이 이용된

다. 이렇게 어더지는 특정점 온도들은 그림 1의 근사법에 의해서 매 측정시 interpolant들이 얻어지고 가열로 길이 방향 온도 추정이 가능해진다. 그림 7에는 이렇게 얻어진 추정온도를 이용한 수식모델의 NONSKID부 추정치를 측정치와 비교하였다.

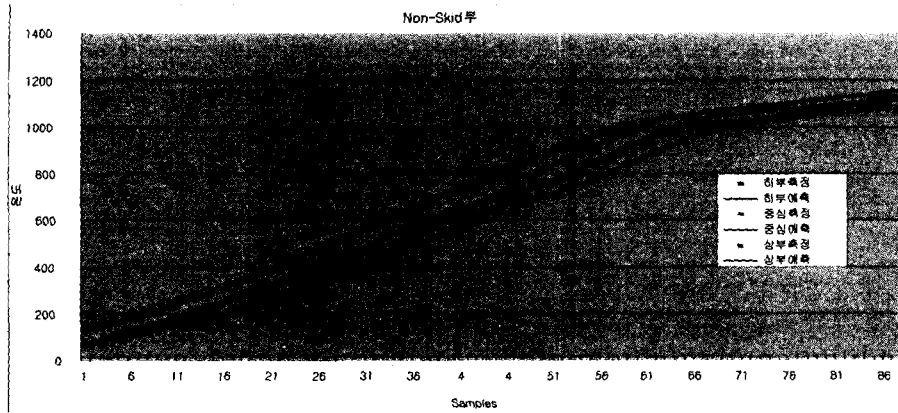


그림 7. SPLINE 근사에 의한 분위기온도모델을 이용한 NONSKID부 온도 이렇게 추정되는 분위기 모델의 결과를 분석하기위해서 당시의 분위기 추정온도와 측정값을 그림 8에도시하였다.

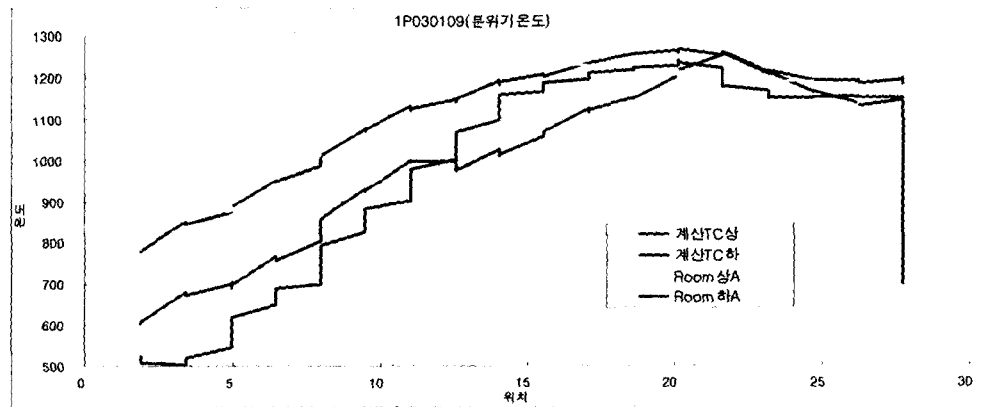


그림 8. 검증용 위한 추정치와 실측 분위기 온도의 비교 그래프

4. 결론

기존의 단순 선형 근사에 의한 온도모델을 대체하기위한 새로운 방식의 분위기 온도모델들을 개발하였으면 이들은 실 가열로 내의 온도프로파일을 적절히 근사하는 결과를 도출하였다. 여전히 로 폭방향의 프로파일 기능과 장시간 휴지에 대한 프로파일 보정 기능이 없는 관계로 더 나은 모델을 위해서는 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. Fred Shenvar, "Walking beam furnace supervisory control at Inland's 80-in. hot strip mill," Iron and Steel Engineer, July, 1994
2. F.R. Steward and Y.S. Kocaeefe, "Total emissivity and absorptivity models for carbon dioxide, water and their mixture," Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf.
3. B. Leckner, "Spectral and Total emissivity of water vapor and carbon dioxide," Combustion and flame 19, 33-48, 1972