

스케일 층의 생성 및 성장을 고려한 가열로 내 슬랩의 승온 특성 해석에 관한 연구

이동은* · 장정현** · 김종민*** · 홍동진**** · 박해두***** · 박윤범***** · 김만영*****

A Numerical Study on the Slab Heating Characteristics in a Reheating Furnace with the Formation and Growth of Scale on the Slab Surface

Dong Eun Lee*, Jung Hyun Jang**, Chongmin Kim***, Dongjin Hong****,
Hae-Doo Park*****, Yun Beom Park***** and Man Young Kim*****

Key Words : Radiative Heat Transfer(복사열전달), Reheating Furnace(가열로), Scale(스케일), Steel Slab Heating(슬랩 가열)

Abstract

In this work, a mathematical heat transfer model of a walking-beam type reheating furnace that can predict the formation and growth of the scale layer, which is produced due to oxidative reaction between the furnace oxidizing atmosphere and the steel surface in the reheating furnace, has been developed. The model can also predict the heat flux distribution within the furnace and the temperature distribution in the slab and scale throughout the reheating furnace process by considering the heat exchange between the slab and its surroundings in the furnace, including radiant heat transfer among the slabs, the skids, the hot gases and the furnace wall as well as the gas convection heat transfer in the furnace. Using the model developed in this work, the effects of the scale layer on the heat transfer characteristics and temperature behavior of the slab is investigated. A comparison is also made between the predictions of the present model and the data from an in situ measurement in the furnace, and a reasonable agreement is founded.

1. 서론

가열로 과정은 압연공정의 전단계로서, 가열로에서는 원활한 압연공정을 위해 슬랩, 블룸 등과 같은 반제품의 가소성을 증가시키기 위한 작업, 즉 반제품의 가열이 이루어진다. 이러한 가열로의 가열 특성은 최종 제품의 생산성 및 품질과 밀접한 관계가 있기 때문에 적절한 연소제어 또는 최적의 가열로 설계를 통하여 슬랩의 추출 목표 온도 및 균열도의 확보가 중요하다. 하지만 실험을 통한 실제 가열로에 대한 접근은 가열로의 크기, 복잡성, 그리고 공정에 차질을 줄 수 있는 점 때문에 극히 제한적이다. 따라서 전산해석을 통해 슬랩의 온도 변화를 파악하는 연구들[1-3]이 활발히 진행되고 있다. 이러한 해석적인 접근은 가열로를 좀 더 세부적으로 관찰할 수 있게 할 뿐만 아니라 가열로 접근의 용이성을 제공한다.

한편, 슬랩이 가열로를 지나면서 슬랩의 온도는 점차 상승하

게 되고 이에 따라 슬랩의 표면에서는 슬랩과 가열로 연소가스와의 산화반응이 일어나며, 그 결과 슬랩 표면에서 금속 산화물인 스케일 층이 생성된다. 스케일 층의 생성은 재료의 손실뿐만 아니라 스케일 층의 낮은 열전도도로 인하여 표면에서 내부로의 열전달을 방해하는 역할을 하게 되어 슬랩의 열적 거동에 영향을 미치게 된다. 그러므로 좀 더 정확한 가열로 해석을 위해 스케일 층의 생성과 그에 대한 영향은 반드시 고려되어야 할 사항들 중 하나라고 할 수 있다. 하지만 과거의 가열로 관련 연구에서는 스케일 층의 영향이 고려된 적이 없었다.

따라서 본 연구에서는 스케일 층의 생성과 슬랩의 승온 특성에 대한 스케일 층의 영향을 확인하기 위해서 가열로 조건에 따른 스케일 층의 생성을 예측하고 이를 고려하여 가열로 내의 각 위치 및 시간에 따른 가열로 내 열유속 분포와 슬랩의 온도 분포를 파악하는 가열로 해석 모델을 제시하고자 한다.

2. 이론적인 모델

2.1 가열로 공정 및 해석 모델

Fig. 1에서 본 연구에 사용된 가열로 모델을 도시하였으며, 가열로는 길이방향으로 5개의 영역으로 구분되어 진다. 즉, 노입구(non-firing zone)로 유입된 슬랩은 장입대(charging zone), 예열대(preheating zone), 가열대(heating zone), 그리고 균열대(soakingzone)를 차례로 지나면서 목표 추출온도에 도달하게 된다. 한편, 슬랩은 가열로 내부에 존재하는 고정지지대(fixed beam)와 이동지지대(moving beam)에 의해 지지되고 이동된다.

* 포스코 기술연구소, easthill@posco.com

** 전북대학교 대학원, alfo20@chonbuk.ac.kr

*** 전북대학교 대학원, peergynt74@chonbuk.ac.kr

**** 한국기계연구원 환경기계연구본부,

null25@naver.com

***** 포스코 기술연구소, hdpark@posco.com

***** 제주산업정보대학 자동차과, pyb2514@jeju.ac.kr

***** 책임저자, 전북대학교 항공우주공학과, 전북대학교

부설 공학연구원 공업기술연구센터

manykim@chonbuk.ac.kr

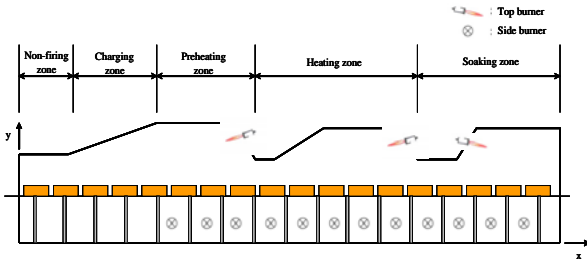


Fig. 1 Geometry of the reheating furnace

한편, 가열로 내부의 슬랩 표면에서는 슬랩과 버너를 통해 가열된 고온의 가열로 가스 및 가열로 벽, 그리고 스킨드 빔 사이의 복사 및 대류 열전달을 통하여 열교환이 발생하고, 슬랩 표면에서 흡수된 열에너지는 전도열전달을 통하여 슬랩 내부로 전달된다.

2.2 금속의 고온 산화

대부분의 금속은 공기와 같은 산화성 분위기 중에서 고온으로 가열하면 금속표면이 산화작용을 받아 산화물로 변질된다. 생성된 산화물의 두께는 가열시간, 온도, 산화대기의 종류 등에 따라 결정되어질 수 있으며 어떤 일정 온도에 대한 금속의 산화속도는 산화속도에 관한 세가지 법칙, 즉 포물선 법칙(parabolic law), 직선법칙(linear law), 그리고 대수법칙(logarithmic law)으로 설명할 수 있다[4]. 하지만 많은 금속들의 고온산화속도는 대부분 포물선속도법칙을 따르기 때문에 본 연구에서는 산화물의 성장이 식(1)과 같이 표현되는 포물선속도법칙을 따른다고 가정하였다. 즉,

$$x^2 = k_p t \quad (1)$$

여기서 x 는 산화물의 두께, t 는 시간, 그리고 k_p 는 포물선속도상수를 나타낸다. 한편, 포물선 산화의 온도 의존성은 다음과 같이 Arrhenius 타입의 관계식을 따른다.

$$k_p = k_0 \exp^{-Q/RT} \quad (2)$$

여기서 k_0 는 상수, Q 는 활성화에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

2.3 지배방정식

스케일 및 슬랩의 내부 온도분포를 예측하기 위한 2차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

윗 식의 해석을 위한 경계조건은 식 (4)와 같이 기체장에서의 대류열유속, q_{slab}^{conv} 과 복사열유속, q_{slab}^{rad} 의 합으로 표현되는 전체 열유속, q_{slab}^{total} 으로 주어진다.

$$q_{slab}^{total} = q_{slab}^{conv} + q_{slab}^{rad} \quad (4)$$

Table 1 Temperature conditions [$^{\circ}\text{C}$]

zone	$T_{g, upper}$	$T_{g, lower}$	T_{skid}
Non-firing	950	930	730
Charging	950	930	730
Preheating	1000	980	780
Heating	1200	1170	970
Soaking	1180	1160	960

Table 2 Conductivity and specific heat of the slab

Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
30	26.89	299.0
400	25.44	401.6
600	22.70	512.0
800	20.89	542.8
1000	23.69	478.9

가열로 연소가스와 슬랩 표면사이의 대류열전달은 식 (5)로부터 계산되어진다.

$$q_{slab}^{conv} = H_c (T_g - T_{slab}) \quad (5)$$

여기서 H_c 는 대류 열전달계수를 의미하며, 슬랩 표면에서의 복사열유속은 다음 식으로부터 계산된다.

$$q_{slab}^{rad} = \int_{\Omega = 4\phi} I(\vec{r}_w, \vec{s}) (\vec{s} \cdot \vec{n}_w) d\Omega \quad (6)$$

여기서 $I(\vec{r}_w, \vec{s})$ 는 복사강도를 나타내며, 임의의 위치, \vec{r}_w 에서 경로, \vec{s} 를 따라 흡수, 방사 및 산란하는 회체 매질의 복사강도는 다음의 복사전달방정식(Radiative Transfer Equation, RTE)을 따른다.

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -I(\vec{r}, \vec{s}) + (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\phi} \int_{\Omega' = 4\phi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega' \quad (7)$$

여기서 β_0 는 소멸계수, ω_0 는 산란알베도, $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$ 는 입사방향, \vec{s}' 로부터 산란방향, \vec{s} 로의 복사에너지 전달을 나타내는 산란위상함수를 나타낸다. 윗 식의 경계 조건으로는 확산 방사와 반사하는 임의의 온도를 갖는 벽면조건을 적용한다.

2.4 해석 방법

식 (3)의 비정상 열전도 방정식과 식 (7)의 복사전달방정식은 유한체적법(FVM)을 이용하여 차분하였으며, 확산항의 차분에는 중앙 차분법을 적용하였고, 비정상 항의 차분에는 내재적 방법을 적용하였다. 열전도 방정식의 최종 차분식은 TDMA 알고리즘을 이용하여 다음과 같은 수렴조건을 만족할 때까지 반복적으로 계산된다.

$$\max(|T_{i,j}^m - T_{i,j}^{m-1}| / T_{i,j}^m) \leq 10^{-6} \quad (8)$$

여기서 $T_{i,j}^{n-1}$ 는 같은 시간에서 $T_{i,j}^n$ 의 이전 값이다. 본 연구에서 적용된 유한체적법에 대한 자세한 내용은 참고문헌[5-7]에서 찾을 수 있다.

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구의 해석대상 가열로의 형상이 Fig. 1에 도시되어 있다. 가열로 내부에는 총 29개의 슬랩이 위치하며 26.8°C의 차가운 상태로 가열로 입구로 유입되며 유입된 슬랩이 출구에서 추출될 때까지의 운전시간은 180분으로서 슬랩의 평균 이동속도는 11.6 m/hr이다.

Table 1에 본 연구에 적용된 가열로 내 가스의 온도분포 및 스킨드구조물(Skidbutton+Skidpipe)의 온도를 나타냈으며 가열로 벽면의 온도는 각 영역의 연소가스와 같은 값으로 설정하였다. 한편, 슬랩의 밀도, ρ_{slab} 은 7,778 kg/m³으로 일정하지만 열전도도와 비열은 Table 2와 같이 온도에 따라 변하는 값을 적용하였다. 스케일의 밀도, 열전도도, 비열은 각각 7,750 kg/m³, 3.2 W/mK 그리고 725 J/kgK으로 일정한 값으로 설정하였다[8-9].

3.1 스케일 층의 두께

산화물의 두께는 가열로 재로시간과 온도 그리고 가열로 연소가스의 조성 등에 따라 달라진다. 본 연구에서는 산화속도가 포물선법칙을 잘 따른다고 가정하였다. 또한, 산화속도의 온도의존성을 표현하기 위해 포물선 속도상수를 식 (2)와 같이 나타냈으며, Chen and Yuen[13]의 연구로부터 포물선 속도상수를 다음

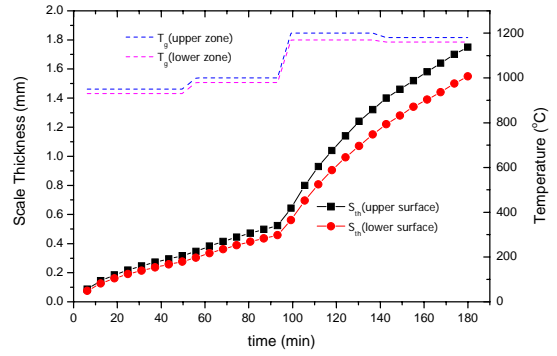


Fig. 2 The scale growth on the top and bottom surfaces of the slab

과 같이 표현하였다.

$$k_p = 6.1 \exp(-169,452/RT) \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (9)$$

Fig. 2는 시간에 따른 슬랩 상부와 하부 표면에서 생성된 산화물의 두께를 보여준다. 가열로 상부와 하부의 온도 차이로 인하여 슬랩 상부면 스케일 층의 두께가 하부면 스케일 층의 두께보다 크다는 것을 확인할 수 있으며, 가열로 출구에서 상부면과 하부면의 스케일 층의 최종 두께는 각각 1.75mm와 1.55mm이다.

3.2 스케일 층의 영향

Table 2와 Table 3에서 알 수 있듯이, 슬랩과 스케일의 열전

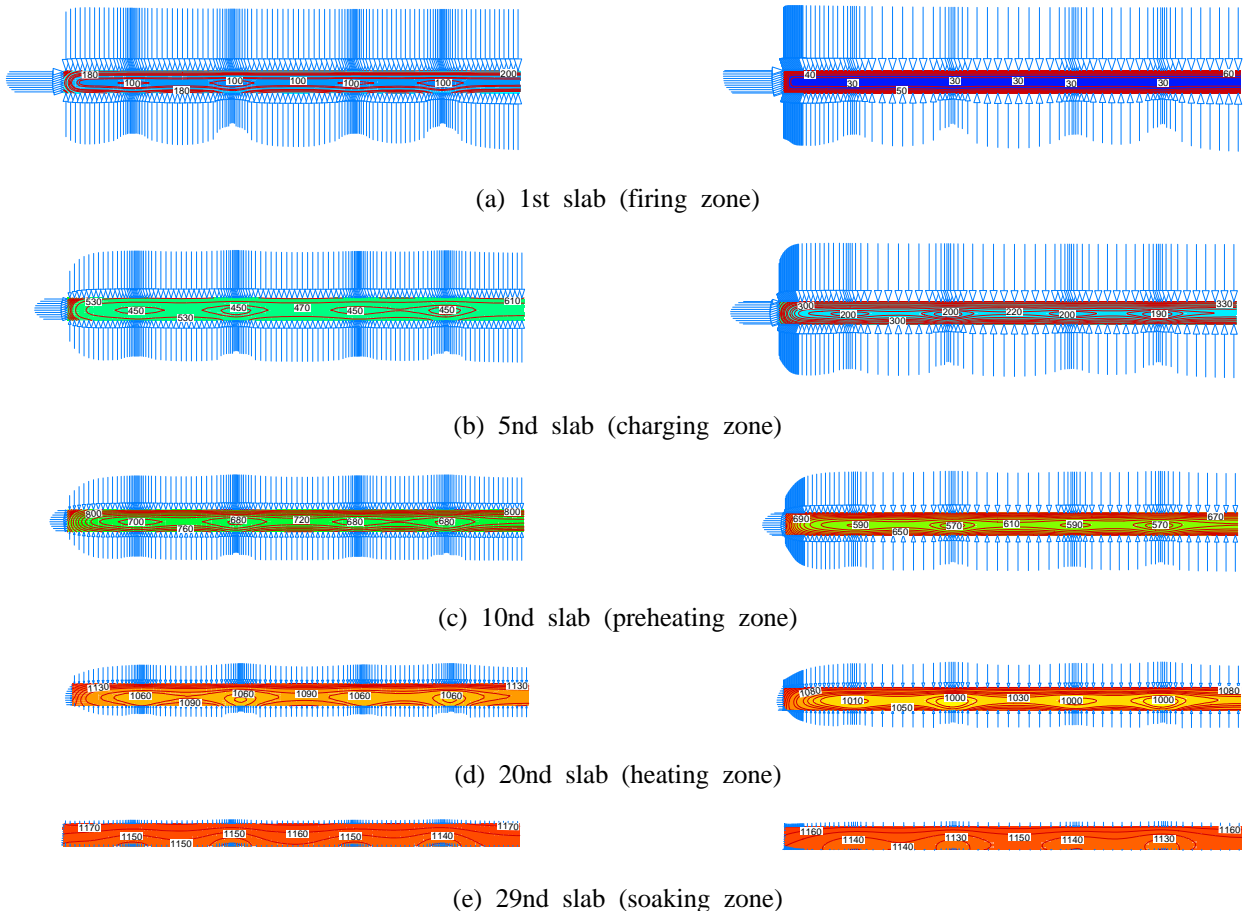


Fig 3. Predicted slab temperature contours at various locations of the slab for two cases (without Scale(left), with Scale(right))

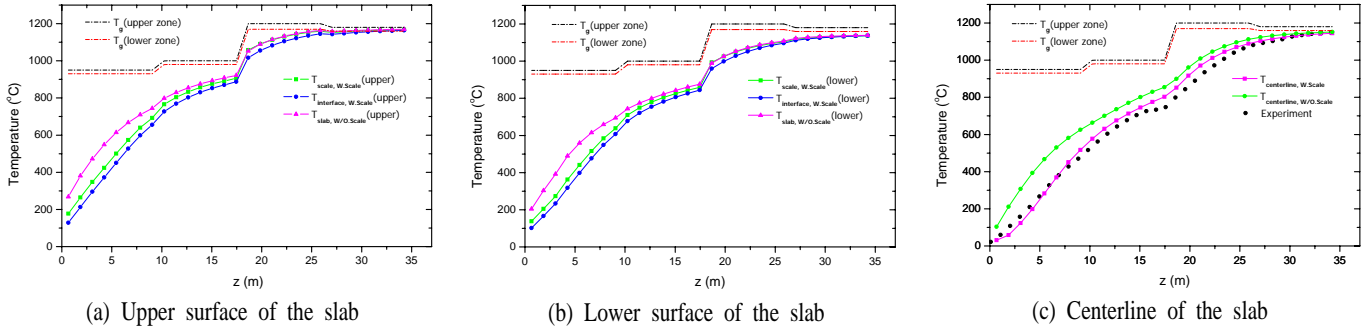


Fig. 4. Predicted temperature profiles along the axial direction of the furnace

도도는 밀도와 비열에 비해 크게 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 스케일의 열전도도는 슬랩의 열전도도에 비해 상대적으로 매우 낮으며, 열전도도가 낮다는 것은 전도에 의한 열전달이 잘 일어나지 않는다는 것을 의미한다. Fig. 3은 스케일 층의 유무에 따른 가열로 각 위치에서의 슬랩 표면에서의 열유속과 슬랩 내부의 온도분포를 보여주고 있다. 고온의 연소가스와 가열로 벽면으로부터 열을 받아 슬랩의 표면 온도가 먼저 상승한 후 열전도에 의하여 슬랩 내부로 열전달이 이루어지는 슬랩의 가열특성 상 슬랩표면에 발생한 스케일 층은 그것의 낮은 열전도도로 인하여 가열과정에서 슬랩 내부의 온도편차를 증가시키고, 이에 따라 최종 추출 온도 또한 감소시킨다는 것을 확인할 수 있다. 이는 슬랩 내부온도의 균일도와 최종 추출목표 온도 확보가 중요한 가열로 공정의 질을 떨어뜨리는 것으로서 적절한 연소제어를 통해 스케일 층의 생성을 억제하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 슬랩의 상부면과 하부면에서 스케일 표면온도와 스케일과 슬랩의 계면온도 그리고 스케일이 고려되지 않은 경우의 슬랩 표면온도를 도시하였다. 가열 초기에는 스케일 표면의 온도가 스케일이 고려되지 않은 경우의 슬랩 표면온도보다 낮게 예측이 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 2에서와 같이 가열초기에는 슬랩의 온도가 낮기 때문에 스케일의 비열이 슬랩의 비열보다 크고 그 차이가 상대적으로 크기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 점차 가열이 진행됨에 따라 비열의 차이가 작아질 뿐만 아니라 온도 균일화가 이루어지게 되고 이에 따라 스케일과 슬랩 표면온도뿐만 아니라 스케일과 슬랩의 계면온도 또한 거의 같아진다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)는 가열로 길이방향에 따른 슬랩 두께중심에서의 온도변화와 실측 실험결과 사이의 비교를 보여준다. Fig. 3의 결과와 유사하게 스케일이 존재하는 경우의 온도가 스케일이 존재하지 않은 경우보다 상대적으로 온도가 낮다는 것을 확인할 수 있으며 실험 결과와 비교했을 때도 스케일 층이 고려된 경우가 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 가열로 내 슬랩 표면의 스케일 생성 및 성장을 예측하고 이를 고려하여 가열로 내 열유속 분포 뿐만 아니라 스케일을 포함한 슬랩의 온도분포를 예측하기 위한 2차원 열전달 모델을 제시하였다. 또한 본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 슬랩의 승온 특성에 대한 스케일 층의 영향을 확인하였고, 스케일 층의 생성은 재료의 손실뿐만 아니라 슬랩의 열적 거동

에도 크게 영향을 끼치기 때문에 보다 정확한 가열로 해석을 위해 스케일 층의 생성을 반드시 고려되어야 한다는 결론을 내릴 수 있었다. 끝으로 본 연구에서 개발된 모델로부터 얻은 결과를 실측 실험결과와 비교하였고 비교적 서로 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Chapman, K. S., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., "Modeling and Parametric Studies of Heat Transfer in a Directed-Fired Continuous Reheating Furnace," Metallurgical Transactions B, 22B, (1991), pp.513-521.
- [2] Maki, A. M., Osterman, P. J. and Luomala, M. J., "Numerical Study of the Pusher-Type Slab Reheating Furnace," Scandinavian Journal of Metallurgy, 31, (2002), pp.81-87
- [3] Kim, M. Y., "A Heat Transfer Model for the Analysis of Transient Heating of the Slab in a Direct-Fired Walking Beam Type Reheating Furnace," Int. J. Heat and Mass Transfer, 50, (2007), pp.3740-3748.
- [4] Birks, N. and Meier, G., H., Introduction to High Temperature Oxidation of Metals, Edward Arnold, London, (1998).
- [5] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill, New York, (1980).
- [6] Chui, E. H. and Raithby, R. D., "Computation of Radiant Heat Transfer on a Nonorthogonal Mesh using the Finite-Volume Method," Numer. Heat Transfer, Part B, 23, (1993), pp.269-288.
- [7] Baek, S. W., Kim, M. Y. and Kim, J. S., "Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure," Numer. Heat Transfer, Part B, 34, (1998), pp.419-437.
- [8] Tseng, A. A., "Thermal Modeling of Roll and Strip Interface in Rolling Processes : Part 2-Simulation," Numer. Heat Transfer, Part A, 35, (1999), pp.135-154.
- [9] Akiyama, T., Ohta, H., Takahashi, R., Waseda, Y. and Yagi, J., "Measurement and Modeling of Thermal Conductivity for Dense Iron Oxide and Porous Iron Ore Agglomerates in Stepwise Reduction," ISIJ Int., 32, (1992), pp.829-837.