

수치해석을 통한 구들의 열 흐름 특성 연구

Heat Flow Characteristics of Traditional Ondol (Gudle) by Numerical Analysis

리 신 호*[†] · 리 광 훈**

Rhee, Shin-Ho · Rhee, Gwang Hoon

Abstract

The heat flow characteristics of the Gudle (traditional Ondol) used a lot at farm houses have been performed with variations of Bunengki (Fireridge) by numerical analysis and field experiment. The Doedon-Gorae (Return-Firetunnel) Gudle is analyzed among the structure of Gudle. The distribution of heat flow in Gorae (Firetunnel) and the temperature distribution in floor of 3 Buneomgi (Fire ridge) was more uniform than that of 1 Buneomgi. The heat efficiency of 3 Buneomgi was higher than that of 1 Bunengki. That is, the 3 Bunengk is more efficient and more uniform temperature.

Keywords : Ondol, Gudle (traditional Ondol), Numerical analysis, Doedon-Gorae (Return- Firetunnel) Gudle, Buneomgi (Fire ridge)

I. 서 론

전통 온돌인 구들은 우리 민족이 고구려 이전부터 사용하여온 난방방식이다(여기서 온돌은 바닥을 따뜻하게 해서 하는 난방 방식을 모두 일컫는 용어로, 구들은 고래가 있어 공기를 데워서 바닥에 열을 저장하는 방식으로 전통 온돌로 정의하였다). 일제 강점기와 독재 시대를 거치면서 구들은 연료의 문제와 관리가 불편하고 윗목과 아랫목의 온도

차가 심하다는 등의 이유로 산업화 이후 온수난방 방식이 그 자리를 대신하게 되었다. 구들은 좌식 생활에 적합하고, 바닥에 저장된 열을 오래 동안 방출하기 때문에 바닥은 따뜻하고 위는 상대적으로 시원하여 쾌적한 실내를 유지되는 장점에 관심이 높아지고 있다. 농촌에서는 농업부산물과 간벌 목재 등의 연료 조달이 쉬워 구들의 활용성이 좋고 관심이 커지고 있으므로 이에 대한 여러 가지 연구가 필요하다.

차종희(1970)는 모형실험을 통해서 개자리, 고래 종류, 아궁이의 개수에 따른 특성을 제시하였고, 이 태식 등(1972)은 모형실험과 실물 가옥 실험을 병행해서 고래의 기울기, 종류에 따른 열 특성을 분석하였다. 정기범(1989)은 고래를 지닌 연탄구들을

* 충북대학교 지역건설공학전공 교수

** 서울시립대학교 기계정보공학과 조교수

† Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2574

Fax: +82-43-271-5922

E-mail address: rhee2574@cbnu.ac.kr

대상으로 모형실험과 수치해석을 수행하였고, 고래 저면의 기울기와 개자리 구조변화에 따른 열 흐름 특성을 분석 하였다. 지금까지 수행된 전통구들에 대한 연구는 주로 실험으로 진행되어 왔다. 그러나 실험적 연구를 통해서서는 실제크기의 모델을 선정하기 어렵고 고래내의 흐름현상을 정확하게 규명하기 힘들다. 최근에는 이러한 고래내의 정확한 흐름현상을 규명하기 위한 방법으로 전산해석이 이용되고 있다.

일반적인 고래의 열 흐름은 아궁이와 부넝기, 고래, 굴뚝의 구조에 따라 영향을 받는다. 이에 따라 방바닥에서의 윗목과 아랫목의 온도차이가 결정 되고, 난방효과에도 영향을 미친다. 고래 구조에 따라 허튼고래 구들, 곧은고래 구들, 부채고래 구들, 대각선고래 구들, 굽은고래 구들, 되돈고래 구들, 복합고래 구들 등이 있다(김준봉, 리신호, 2006). 되돈고래 구들은 아궁이와 굴뚝이 같은 방향에 있

는 경우로서 열 보존이 잘 되고 연료가 적게 들어 가는 것으로 구들 장인 사이에는 알려져 있다.

이 연구는 되돈고래 구들을 대상으로 구들의 열 흐름을 전산해석 하고 실험으로 검증하였다. 그리고 윗목과 아랫목간의 온도차를 해소하고, 열효율을 높이기 위한 방편으로 부넝기의 개수에 변화를 주어, 그에 따른 열 흐름 특성을 알아보았다.

II. 전산해석 및 실험방법

전산해석을 수행하기 위해 상용 열·유체 해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다. 구들 고래 내부를 통과하는 비압축성 3차원 정상상태 흐름에 대한 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식은 다음과 같다(Alexandrou, 2001 과 Incropera and DeWitt, 2002).

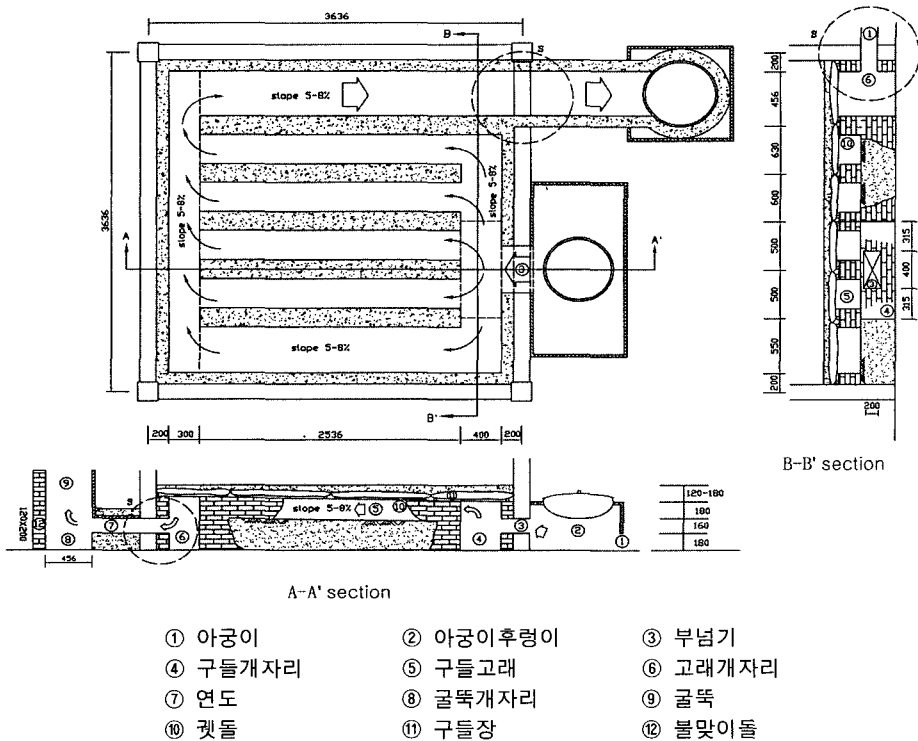


Fig. 3 A schematic diagram of Doedon-Gorae Gudeul.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\rho V \cdot \nabla u_i = \rho g_i - \nabla P + \mu \nabla^2 u_i \dots\dots\dots(2)$$

$$\rho c_p (V \cdot \nabla) T = k \nabla^2 T \dots\dots\dots(3)$$

- 여기서, u, v, w : x, y, z 방향 속도 (m/s)
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 V : 속도벡터
 u_i : i 방향 속도성분
 g_i : i 방향 중력가속도성분
 P : 압력 (N/m²)
 μ : 점성계수 (N·s/m²)
 c_p : 정압비열 (J/kg·K)
 T : 온도 (K)
 k : 열전도율 (W/m·K)

전산해석 모델로 선정된 되돈고래 구들의 형상은 Fig. 1과 같다. 방의 크기는 3636 mm×3636 mm이고, 방바닥의 재질은 화강암이며 두께는 120 mm~180 mm로 아랫목에서 윗목으로 가면서 얇아진다. 불이 들어가는 아궁이의 크기는 400 mm×200 mm 이고, 부넝기 3개인 경우 가운데 아궁이의 크기는 기본형상과 같고, 양옆에 40° 각도로 200×200 mm 크기의 아궁이를 더한 형상이다(Fig. 3-a).

전산해석 방법에서 지배방정식의 차별화는 유한체적법을 적용하였으며, 대류항 처리는 상류차분도식을 사용하였다. 압력 보간은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며 수렴 판정은 잔류량이 10⁻³ 미만 이 될 경우로 하였다.

경계조건으로는, 아궁이 입구에서는 압력 경계조건을 적용하여 공기가 유입되도록 하였고, 아궁이에서 나무가 연소함으로써 발생하는 열량은 기존의 실험적 연구에서 사용한 값에서 길이를 상사하여 얻어진 일정 열 유속 19,000 W/m² 을 적용하였다(정기범, 1989, 1990, 1992, 1993). 또한 방안에서도 열 흐름이 나타나므로 실내온도를 20 °C로 가정하고 방바닥에 Convection Boundary를 적용하

였다.

현장 실험은 구들개자리(Fig. 2-b의 α 지점)와 고래개자리 좌측 끝(Fig. 2-b의 β 지점), 굴뚝 시점에서 300 mm 안쪽(Fig. 2-b의 γ 지점)에서 방바닥 온도를 측정하였다.

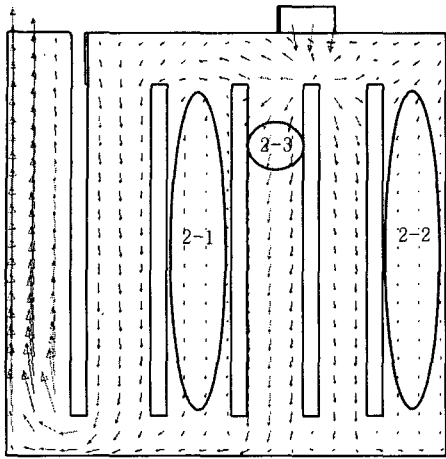
III. 결과 및 고찰

되돈고래 구들을 해석 모델로 선정하여 먼저 전산 해석을 하여 고래 내부의 열 흐름과 방바닥의 온도를 파악하고 방바닥 온도 실측값과 비교하였다. 부넝기 하나인 기본 형상과 부넝기 3개인 경우에 대한 비교를 통하여 부넝기의 개수에 따른 영향을 평가하였다.

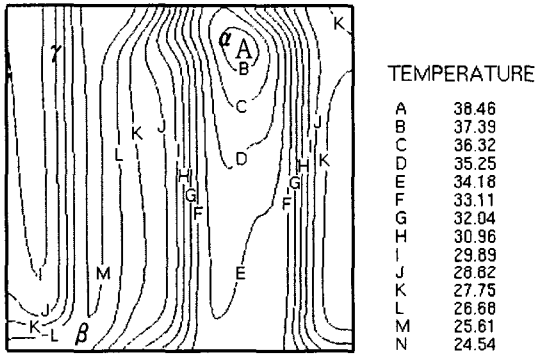
1. 기본 형상에 대한 해석

되돈고래 구들의 기본적인 열전달효과를 알아보기 위하여 고래기울기가 2°인 모델에 대하여 기본 형상을 전산 해석한 결과, 속도분포와 온도분포는 Fig. 2와 같다. Fig. 2-(a)는 열 흐름의 속도분포로서 일반적인 되돈고래 구들의 흐름현상을 알 수 있다. 아궁이에서 부넝기로 들어온 더운 공기는 고래에 퍼지면서 방바닥을 데우고 굴뚝을 통해 구새로 빠져나간다. 이때 대부분의 더운 공기는 부넝기 앞의 좌우 고래(Fig. 2-(a)의 2-3)로 흐르게 되기 때문에, 상대적으로 바깥 고래(Fig. 2-(a)의 2-1, 2-2)에서는 더운 공기가 적을 수밖에 없다. 따라서 Fig. 2-(b)와 같이 방바닥에서 위치에 따라 29 °C에서 39 °C의 범위로 10 °C 정도의 온도차가 있다.

현장 실험은 나무에서 발생하는 열량을 측정할 수 없어 측정 α 의 온도가 38 °C로 될 때까지 불을 켜고 후 각 측정점의 온도를 구들방의 방바닥에서 측정하였다. 그 결과 Table 1과 같이 구들개자리 측정점 α 는 36 °C~40 °C, 고래개자리 좌측 끝 측정점 β 는 29 °C~31 °C, 굴뚝 시점에서 300 mm 안쪽 측정



(a) Velocity vector plot in Gorae



α, β, γ : measuring points

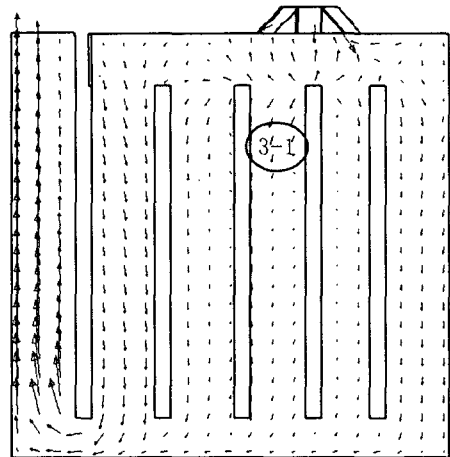
(b) Temperature contour in floor

Fig. 2 Velocity vector and temperature contour on basic condition.

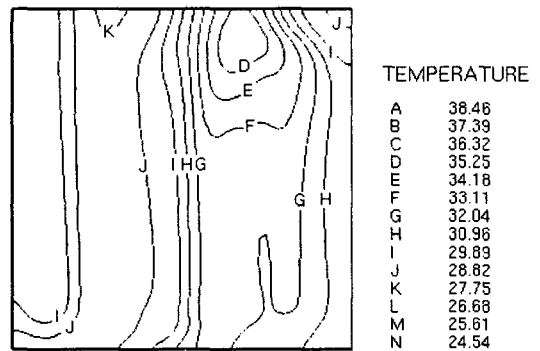
γ 는 30 °C ~ 31 °C의 범위로 나타났다. 측정점 α 에서 온도가 38 °C에서 40 °C까지 올라갔다가 36 °C로 내려오기 까지 측정된 결과, 측정점 β 와 γ 는 전산해석 결과 보다 1 °C에서 4 °C 까지 높게 나타났다. 실측값과 해석 결과의 평균 차이는 측정점 최대 온도 대비 약 11% 이내에 있으므로 전산해석 모형은 신뢰할 수 있다.

Table 1 Comparison of numerical analysis with the measured in temperature of floor

site	(unit: °C)		
	analyzed (A)	measured (B)	difference (B)-(A)
α	38	38(36~40)	0(-2~+2)
β	27	30(29~31)	+3(+2~+4)
γ	29	31(30~31)	+2(+1~+2)



(a) Velocity vector plot in Gorae



(b) Temperature contour in floor

Fig. 3 Velocity vector and temperature contour on 3 Buneomgi condition.

2. 부넝기 3개인 경우의 해석

부넝기가 여러 개 있으면 방바닥이 고르게 따뜻

하다는 구들 장인의 경험을 연구에 적용한 것이다. 즉, 열유량이 고르게 분포하고 방바닥의 온도 편차가 줄어지는지 부넙기 개수를 3개로 하여 연구를 수행하였다.

Fig. 3는 부넙기 3개인 경우를 대상으로 전산해석을 수행한 결과이다. Fig. 3-(a)에서 보면 기본형상과 비교해서 열 흐름이 고르게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 부넙기가 3개로 늘어남에 따라 한곳으로 집중되던 열 흐름이 3곳으로 분산되어 나타난 것으로 판단된다. Fig. 3-(b)에서는 이렇게 분산된 더운 공기가 방바닥을 고르게 데우는 것을 볼 수 있다. 온도 분포를 보면, 32℃~35℃의 범위로 3℃정도의 온도차가 있고 차게 느끼는 30℃ 이하의 부분이 없었다.

Table 2는 방바닥의 평균온도, 방바닥온도의 표준편차, 중앙 고래 부분의 열 흐름 비율, 고래에 유입되는 전 열유량(Q) 등을 나타낸 값이다. 여기서 중앙 고래 부분의 열 흐름 비율은 중앙 고래 부분(Fig. 2-a의 2-3지점과 Fig. 3-a의 3-1지점)의 열유량(Q_D)을 전 열유량(Q)으로 나눈 값이다.

Table 2로부터 방바닥의 평균온도는 비슷하나 표준편차는 부넙기 1개인 경우가 3개인 경우보다 3배 정도 큰 것을 볼 수 있다. 표준편차가 크다는 것은 윗목과 아랫목 사이의 온도차가 크다는 것을 의미한다. 이렇게 부넙기 1개인 형상에서 윗목과 아랫목 사이의 온도차가 크게 나는 이유는 중앙 고래(Fig. 2-a의 2-3지점)로 지나가는 유량이 많기

때문이다. 전체 열유량의 약 40%가 중앙 고래로 지나가는 것을 볼 수 있었는데 많은 열유량이 한곳을 지나가는 현상이 온도를 불균일하게 만드는 것으로 판단된다.

반면에 부넙기 3개인 경우는 온도가 균일하게 분포되는데 이러한 이유는 중앙 고래(Fig. 3-a의 3-1지점)를 통과하는 유량이 부넙기 1개인 경우보다 상당히 적은 양인 약 25%가 지나가는 것을 볼 수 있다. 고래가 5개라는 것을 감안하면 25%라는 수치는 이상적인 수치이다. 이러한 균일한 열유량분포 때문에 부넙기 3개인 방바닥에서 더 균일하게 온도분포를 보이게 된다.

전 유량을 살펴보면, 부넙기 1개인 경우가 3개인 경우보다 유량이 많음을 볼 수 있다. 유량이 많다는 것은 열 흐름이 원활이 이루어지는 것을 의미한다. 열 흐름이 더 원활하다 함은 열 손실이 많음을 의미한다. 고래에서는 더운 공기를 오랫동안 가두어야 열의 저장에 많이 장시간 난방이 가능하므로, 부넙기 3개인 경우가 열을 더 많이 저장할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

농촌주택에 많이 활용되고 있는 구들의 열 특성 연구로서, 실제 크기의 되돈고래 구들을 전산 해석하여 열 흐름 특성을 살펴보고, 현장 실험에 의하여 검증하였다. 열효율을 높이기 위한 방법으로 부넙기 개수를 3개로 늘려서 그 효과에 대하여 알아보았다. 상용 열·유체해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 전산 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 부넙기 3개인 경우가 기본 형상(부넙기 1개)보다 방바닥의 온도분포가 더 균일하였다. 기본형상보다 부넙기 3개인 형상에서 유량이 더 균일하게 분포되었기 때문으로 판단된다.

2. 전 열유량을 비교해 본 결과, 기본형상이 부넙기 3개인 경우보다 유량이 더 많았는데 이에 따

Table 2 Comparison 1 Buneomgi with 3 Buneomgi about temperature and heat flow.

kinds	1 Buneomgi	3 Buneomgi
average of temp. in floor, ℃	33.42	33.76
standard deviation of temp. in floor	2.28	0.80
flow rate of center Gorae(Q_D/Q)	0.39	0.25
total heat flow(Q), m^3/s	1.38	0.77

라 기본형상에서 흐름이 더 잘 일어나게 되므로 열 손실이 많아 열효율은 더욱 떨어지게 되는 것으로 판단된다.

3. 되돈고래 구들은 부넝기를 3개 설치하는 것이 윗목과 아랫목의 온도를 균일하게 하는 효과를 볼 수 있었고, 열효율에서도 뛰어난을 알 수 있었다.

“이 논문은 2005학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2005)”

References

1. Kim, June Bong and Shin-Ho Rhee, 2006, Ondol, the Brilliant Culture of Gudle(온돌 그 찬란한 구들문화), Cheonghong, p. 345.
2. Lee, Taik Sik, Kyung Kook Cho and Soon Suk Kwon, 1972, An Experimental Study on Thermal Performance of Ondol, Transactions of the KSME, 12(3): 209-222.
3. Jung, Ky Bum, 1989, Thermal Characteristics by the Alteration of Flue Structure, Journal of the Architectural Institute of Korea, 5(1): 145-151.
4. Jung, Ky Bum, 1990, Study for the Improvement of Thermal Efficiency on Coal-Heated Ondol, Journal of the Architectural Institute of Korea, 6(4): 199-206.
5. Jung, Ky Bum, 1992, Thermal Characteristics by the Alteration of Cavity Structure, Journal of the Architectural Institute of Korea, 8(8): 149-157.
6. Jung, Ky Bum, 1993, A Flow Distribution of Traditional Ondol, Journal of the Architectural Institute of Korea, 9(4): 81-87.
7. Cha, Jong Hee, 1970, Thermal Characteristics of Ondol Heating System with its Geometry, Transactions of the KSME, 10(4): 213-226.
8. Alexandrou, A., 2001, Principles of Fluid Mechanics, Prentice Hall, New Jersey, pp. 175-208.
9. Incropera, F. P. and D. P. DeWitt, 2002, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Ed., WILEY, New York 534-54.