김일성종합대학학보 JOURNAL OF **KIM IL SUNG** UNIVERSITY
(자연과학) (NATURAL SCIENCE)
주체105(2016)년 제62권 제3호 Vol. 62 No. 3 JUCHE105(2016).

다공성매질을 통한 열과 습기의 전파에 대한 연구

박선웅, 최창호

일부 금속들은 적열상태에서 수증기에 의하여 산화될수 있다.

$3Fe+4H_2O=Fe_3O_4+4H_2$과 같은 과정들은 낮은 온도에서도 일어날수 있는데 그것은 금속겉면에 흡착된 물이 화학반응, 부식과 같은 다양한 현상들을 일으킬수 있기때문이다. 이런 현상들은 Cu(100)[1], Fe(100)[2, 3], Pd(100)[4]들에서 많이 연구되였다.

물이나 수증기에 의한 금속겉면의 산화는 온도뿐만아니라 수증기의 분압 즉 습도에도 관계된다. 그러므로 금속이 산화되는것을 막으려면 해당 금속이 있는 위치에서 온도와 습도를 될수록 낮추어야 하며 외부(대기)의 온도와 습도가 높은 경우에는 그것의 전파를 차단하여야 한다.

우리는 차단매질이 주어졌을 때 열과 습기의 전파특성을 연구하였다.

금속은 밀페된 공간에 놓여있고 벽은 다공성매질로 되여있다고 하자.(그림)

열전도와 습기전파는 모든 방향에서 같은 속도로 진행된다는것을 고려하여 밀페된 공간을 구로, 차단벽을 구각으로 모형화한다.

먼저 외부온도가 금속의 온도보다 높을 때 밀페된 공간에로의 열전도과정을 보자.

이 과정은 밀페된 공간의 중심에 원점을 둔 구자리표계에서의 열전도방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k}{C_1\rho_1}\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right] \tag{1}$$

에 의하여 표시되기때문에 해당한 초기 및 경계조건에서 그것을 푸는 문제로 된다. 여기서 $T(r,\ t)$는 t순간에 r위치에서의 온도, C_1과 ρ_1은 각각 차페물질의 비열과 밀도, k는 열전도결수이다.

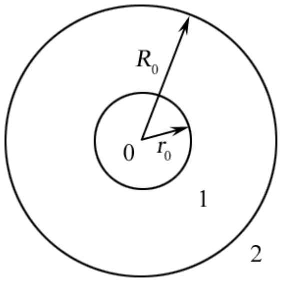

그림. 금속의 위치모형
0－금속이 있는 밀페된 공간, 1－차페물질, 2－외부

방정식 (1)에 대한 초기조건은

$$T(r,0)=T_0\,(r_0\le r\le R_0)\,, \tag{2}$$

경계조건은 0과 1, 1과 2사이의 열교환을 반영하여

$$-\int_0^t \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_0} dt=\frac{C_0\rho_0 r_0}{3k}(T-T_0) \tag{3}$$

과 같이 줄수 있다. 여기서 C_0과 ρ_0은 각각 밀페된 공간물질 즉 공기의 비열과 밀도이다.

이제 방정식 (1)을 풀기 위하여

$$v(r,\ t)=rT(r,\ t) \tag{4}$$

와 같이 함수를 변환하면 방정식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \nu}{\partial t}=\frac{k}{C_1\rho_1}\cdot\frac{\partial^2\nu}{\partial r^2} \tag{5}$$

초기조건은 $\nu(r, 0)=rT(r, 0)=rT_0$ 이고 경계조건은

$$\int_0^t\left[-\frac{1}{r_0}\frac{\partial \nu}{\partial r}\bigg|_{r=r_0}-\frac{1}{r_0^2}\nu\big|_{r=r_0}\right]dt=\frac{C_0\rho_0 r_0}{3k}\left(\frac{\nu}{r_0}-T_0\right) \tag{6}$$

으로 된다. 방정식 (5)의 풀이를 구하면

$$\nu(r,\, t)=Ce^{-(\lambda a)^2 t}e^{\lambda r} \tag{7}$$

로 된다. 여기서 $a^2=\dfrac{k}{C_1\rho_1}$ 이다.

경계조건 (6)을 만족시키는 λ를 구하면

$$\lambda^2=\frac{3C_1\rho_1}{C_0\rho_0}\cdot\frac{r_0-1}{r_0^2} \tag{8}$$

과 같다.

한편 상수 C 는 초기조건

$$\nu(r, 0)=Ce^{\lambda r}=rT_0 \tag{9}$$

으로부터 임의의 r에 대하여 성립하므로 $r=r_0$ 이라고 하면

$$C=r_0 e^{-\lambda r_0}T_0. \tag{10}$$

따라서 풀이 (7)은

$$\nu(r,\, t)=T_0 r_0 e^{-(\lambda a)^2 t}e^{\lambda(r-r_0)}$$

이고

$$T(r,\, t)=T_0\frac{r_0}{r}e^{-(\lambda a)^2 t}e^{\lambda(r-r_0)} \tag{11}$$

으로 된다. 여기서 a^2은 $r=r_0$에서의 경계조건

$$k\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_0}=-h[T_2-T(r_0,\, t)] \tag{12}$$

로부터

$$e^{-(\lambda a)^2 t}=\frac{R_0}{T_0 r_0}\cdot\frac{hT_2R_0}{a^2C_1\rho_1(1-\lambda R_0)-hR_0}e^{\lambda(r-r_0)} \tag{13}$$

을 수값풀이나 그라프적풀이를 하여 구할수 있다. 빠르게는 실험적으로도 구할수 있다.

다음으로 습기가 차단재료를 통하여 내부로 침투하는 과정을 보자.

구자리표계에서의 확산방정식

$$C\frac{\partial n}{\partial t}=-D\left[\frac{2}{r}\frac{\partial n}{\partial r}-\frac{\partial^2 n}{\partial r^2}\right] \tag{14}$$

을 리용할수 있는데 여기서 n은 수증기립자의 밀도이고 립자의 크기는 꼭같다고 보았다. 그리고 D는 차단물질에서 수증기립자의 확산곁수, C 는 차단재료의 다공성곁수이다.

수증기의 립자밀도를 측정하기 어려우므로 그것을 거시적인 측정량인 상대습도 η 로

바꾸어놓으면

$$\eta = \frac{P(r,t,T)}{P_0(T)}.$$

수증기를 리상기체로 모형화하면

$$P(r,\ t,\ T) = n\eta(r,\ t,\ T)kT\ ,$$
$$P_0(T) = n_0(T)kT$$

인데 여기서 $n_0(T)$는 온도가 T일 때 포화증기압에 대응하는 수증기립자밀도, k는 볼츠만상수이다.

$n(r,\ t,\ T) = n_0(T)\eta(r,\ t,\ T)$를 고려하면 방정식 (14)는

$$C\frac{\partial\eta}{\partial t} = -D\left[\frac{\partial^2\eta}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial\eta}{\partial r}\right] \tag{15}$$

로 넘어간다. 이제

$$\nu(r,\ t,\ T) = r\eta(r,\ t,\ T) \tag{16}$$

로 함수변환하고 풀이를

$$\nu(r,\ t,\ T) = A(T)e^{-(\lambda' a')^2 t}e^{\lambda' r} \tag{17}$$

의 형태로 구하자.

초기조건과 경계조건은 풀이를 간단하게 하기 위하여

$$\left.\begin{aligned} \nu(r,\ 0,\ T) &= r\eta(r,\ 0,\ T) = r\eta_0 \\ \nu(r_0,\ t,\ T) &= r_0\eta(r_0,\ t,\ T) = r_0\eta_1 \\ \nu(R_0,\ t,\ T) &= R_0\eta(R_0,\ t,\ T) = R_0\eta_2 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

로 줄수 있다. 여기서 η_0은 초기습도, η_1은 주어진 온도에서 밀폐된 공간의 습도, η_2는 외부대기의 습도이다.

방정식 (17)에서 λ'는 경계조건으로부터

$$\lambda' = \frac{1}{R_0 - r_0}\left[\ln\frac{R_0}{r_0} + \ln\frac{\eta_1}{\eta_2}\right] \tag{19}$$

이며 결수 $A(T)$는

$$A(T) = r_0 e^{-\lambda' r_0}\eta_0(T) \tag{20}$$

이다. 따라서

$$\left.\begin{aligned} \nu(r,\ t,\ T) &= r_0\eta_0(T)e^{-\lambda' r_0}e^{\lambda r}e^{-(\lambda' a')^2 t} = r_0\eta_0(T)e^{-(\lambda' a')^2 t}e^{-\lambda(r_0 - r)}\eta_0 \\ \eta(r,\ t,\ T) &= \frac{r_0}{r}\eta_0(T)e^{-(\lambda' a')^2 t}e^{\lambda'(r_0 - r)} \end{aligned}\right\}. \tag{21}$$

식 (11)과 (21)에서 시간 t를 소거하면

$$\eta(r,\ t,\ T) = \eta_0(T)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\left(\frac{\lambda' a'}{\lambda a}\right)^2}\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\left(\frac{\lambda' a'}{\lambda a}\right)^2 - 1} e^{-(r - r_0)\left[\lambda' - \lambda\left(\frac{\lambda' a'}{\lambda a}\right)^2\right]}. \tag{22}$$

식 (22)를 리용하면 온도가 T일 때 금속이 산화되는 림계습도 η_c에 해당하는 두께 r를 구할수 있다. 그리고 차단벽의 두께가 주어졌을 때 $\eta_c > \eta$가 만족되는 T도 구할수 있다.

맺 는 말

1) 밀페된 공간에 있는 금속의 산화를 막기 위한 차단벽의 두께와 온도를 결정할수 있는 관계식을 얻었다.

2) 주어진 온도에서 다공성차단벽을 통하여 전파되는 습기의 습도는 벽의 두께와 주위매질의 온도에 관계된다.

참 고 문 헌

[1] S. Wang et al.; Phys. Rev., B 70, 205410, 2004.
[2] S. C. Jung et al.; Phys. Rev., B 81, 115460, 2010.
[3] W. H. Hung et al.; Surf. Sci., 248, 332, 1991.
[4] S. Zhy et al.; Phys. Rev., B 76, 235433, 2007.

주체104(2015)년 11월 5일 원고접수

On the Propagation of Heat and Moisture through the Porous Medium

Pak Son Ung, Choe Chang Ho

We analytically investigated the process that heat and moisture are propagated through the airtight space by porous medium. Under the given temperature the humidity of moisture propagated through porous wall depends on the thickness of the wall and temperature of the surrounding medium complicatedly.

Key words: porous medium, heat, moisture