

D/T μ CF 촉매 반응에 관한 연구

김학금*

서남대학교 환경화학공학과
(hgkim@tiger.seonam.ac.kr*)A study of the D/T μ CF catalytic reaction

Hag-Geum Kim*

Department of Environmental & Chemical Engineering, Seonam University
(hgkim@tiger.seonam.ac.kr*)서론

음 뮤온은 원자내부로 쉽게 도입되며 궤도 전자와 교환이 이루어진다. 음 뮤온은 질량이 전자 질량의 207배 정도 되므로 원자의 크기가 줄어들며 두 원자 핵 간 간격이 매우 좁아진다. 따라서 원자 간의 Coulomb 반발력이 상쇄되고 핵력에 의한 핵융합이 쉽게 일어난다. 융합 후 뮤온은 분리되어 다른 μ CF(muon catalyzed fusion)반응에 참여한다.

뮤온 촉매 융합 반응의 문제점으로는 반응에서 뮤온 분자이온의 생성속도는 상대적으로 느린데 비하여 생성된 이온의 융합 속도는 빠르다. 뮤온입자의 생존 기간이 매우 짧으며, 뮤온 빔을 만드는데 많은 에너지가 요구된다.

장점으로는 낮은 온도에서 융합반응이 가능하고, 자연계에 많이 존재하는 D₂만으로도 융합이 가능하다.

본 연구에 있어서는 D/T혼합물에서 μ CF반응의 반응 기구를 분석하고, 반응에 있어서 속도 식을 유도한 다음, 속도 식의 해를 구하여 반응거동을 해석하였다.

이론 및 고찰

1) 뮤온과 D/T혼합물과의 반응에 있어서 반응 기구

D/T혼합물에 도입된 뮤온 빔에서 뮤온은 소멸하거나 중수소나 삼중수소와 결합하여 뮤온 원자를 만들게 된다. 생성된 뮤온중수소는 중수소와 결합하여 뮤온중수소 분자를 만들며, 뮤온삼중수소는 삼중수소와 결합하여 뮤온삼중수소 분자를 만들거나, 중수소와 결합하여 뮤온중수소 삼중수소 분자를 만든다. 만들어진 뮤온형 분자들은 융합이 쉽게 일어난다. 생성물로서 헬륨과 중성자 그리고 뮤온을 만든다. 반응 중 일부의 뮤온은 α 입자에 포획되거나 소멸하여 더 이상 반응에 참여할 수 없다. 반응에서 나온 뮤온은 다시 순환 촉매 융합반응에 참여하게 된다.

반응의 전 과정을 반응식으로 나타내면 다음과 같다.



2) 뮤온과 D/T혼합물과의 반응에 있어서 속도식

위 반응을 속도식의 형태로 나타내면 아래 식들과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_m(t)}{dt} &= S_m - (\phi\lambda_a + \lambda_0)N_m(t) + (1 - \omega_{tt})\lambda_{m\mu t}^f N_{m\mu t}(t) \\ &+ P_1(1 - \omega_{ddh})\lambda_{m\mu d}^f N_{m\mu d}(t) + P_2(1 - \omega_{ddt})\lambda_{m\mu d}^f N_{m\mu d}(t) \\ &+ (1 - \omega_s)\lambda_{m\mu t}^f N_{m\mu t}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{dN_{\mu t}(t)}{dt} = -(\lambda_0 + \phi C_t \lambda_{m\mu t} + \phi C_d \lambda_{m\mu t})N_{\mu t}(t) + \phi C_t \lambda_{dt} N_{\mu d}(t) + \phi C_t \lambda_a N_m(t) \quad (7)$$

$$\frac{dN_{\mu d}(t)}{dt} = -(\lambda_0 + \phi C_d \lambda_{m\mu d} + \phi C_t \lambda_{m\mu d})N_{\mu d}(t) + C_d \phi \lambda_a N_m(t) \quad (8)$$

$$\frac{dN_{m\mu t}(t)}{dt} = -(\lambda_0 + \lambda_{m\mu t}^f)N_{m\mu t}(t) + C_d \phi \lambda_{m\mu t} N_{\mu t}(t) \quad (9)$$

$$\frac{dN_{m\mu d}(t)}{dt} = -(\lambda_0 + \lambda_{m\mu d}^f)N_{m\mu d}(t) + \phi C_d \lambda_{m\mu d} N_{\mu d}(t) \quad (10)$$

$$\frac{dN_{m\mu t}(t)}{dt} = -(\lambda_0 + \lambda_{m\mu t}^f)N_{m\mu t}(t) + \phi C_t \lambda_{m\mu t} N_{\mu t}(t) \quad (11)$$

$$\frac{d\chi_m(t)}{dt} = \lambda_{m\mu t}^f N_{m\mu t}(t) + \lambda_{m\mu t}^f N_{m\mu t}(t) + \lambda_{m\mu d}^f N_{m\mu d}(t) \quad (12)$$

$$\omega^{eff} = \frac{\omega_s \phi C_d \lambda_{m\mu d}}{\phi C_d \lambda_{m\mu d} + \phi C_t \lambda_{m\mu t} + \lambda_0} + \frac{\omega_{tt} \phi C_t \lambda_{m\mu t}}{\phi C_d \lambda_{m\mu d} + \phi C_t \lambda_{m\mu t} + \lambda_0} + \frac{P_1 \omega_{dd} \phi C_d \lambda_{m\mu d} C_d q_{1s}}{\lambda_0 + \phi C_t \lambda_{dt} + \phi C_d \lambda_{m\mu d}} \quad (13)$$

$N_m, N_{\mu t}, N_{\mu d}$ 그리고 $N_{m\mu t}, N_{m\mu d}, N_{m\mu t}$ 는 각각 뮤온의 수밀도, 뮤온 원자의 수밀도 뮤온

분자의 수밀도이다. ϕ 는 매질의 상대밀도, C_t, C_d 는 삼중수소와 중수소의 농도비이며, χ_m 은 묶은 순환계수, ω^{eff} 는 유효포획계수이다.

계산에 사용되는 융합인자들의 값은 다음과 같다.

$$\lambda_a = 4 \times 10^{12} (\text{s}^{-1})^1, \quad \lambda_0 = 4.545 \times 10^5 (\text{s}^{-1})^1, \quad \lambda_{pt} = 0.93 \times 10^{10} (\text{s}^{-1})^2$$

$$\lambda_{mdt} = 0.71 \times 10^{10} (\text{s}^{-1})^3, \quad \lambda_{mtt} = 3 \times 10^6 (\text{s}^{-1})^3, \quad \lambda_{mpp} = 3.2 \times 10^6 (\text{s}^{-1})^4, \quad \lambda_{mpt} = 7.5 \times 10^6 (\text{s}^{-1})^3$$

$$\lambda_{mdt}^f = 1.1 \times 10^{12} (\text{s}^{-1})^1, \quad \lambda_{mtt}^f = 1.5 \times 10^7 (\text{s}^{-1})^1, \quad \lambda_{mpt}^f = 7 \times 10^4 (\text{s}^{-1})^3$$

$$\omega_{dt} = 0.0035^1, \quad \omega_{pt} = 0.94^3, \quad \omega_{tt} = 0.14^1$$

계수들을 속도식에 대입하여 3K, $\phi = 1.46$ LHD에서 연립미분 방정식 초기치문제의 수치해를 구하였다. 연립미분 방정식의 수치해는 BDF방법을 이용하여 계산하였다. 초기값은 다음과 같다.

$$N_m(0) = 1, \quad N_{mt}(0) = N_{md}(0) = 0 \quad (14)$$

$$N_{mdt}(0) = N_{mdd}(0) = N_{mtt}(0) = 0, \quad \chi_m(0) = 0 \quad (15)$$

계산으로부터 얻어진 여러 가지 초기치 해들들 중 시간에 따른 묶은, 묶은삼중수소원자, 묶은중수소 삼중수소분자의 밀도의 거동을 Fig.1, Fig.2 에 나타내었다.

결론

D/T혼합물에 입사된 묶은에 대한 μCF 반응 기구와 반응속도 식을 나타내었다. 속도식에 문헌의 융합인자들과 반응 초기조건을 대입하여 수치 해석적인 방법으로 계산하였다. 반응계는 계산이 가능하였으며 결과를 얻을 수 있었다. D/T혼합물 묶은 계에서의 묶은, 묶은삼중수소원자, 묶은중수소 삼중수소분자의 시간에 따른 밀도 거동을 계산 결과로부터 볼 수 있었다.

참고문헌

1. L.I. Ponomarev, C. Petitjean, Fus. Tech. 20, 1022(1991).
2. F. J. Hartman, Hyp. Int. 82, 259(1993).
3. S. Eliezer, Z. Henis, Fus. Tech. 26, 46(1994).
4. F. Mulhauser et al., Phys. Rev. 53, 3069(1996).
5. F. Mulhauser et al., Hyp. Int. 138, 41(2001).

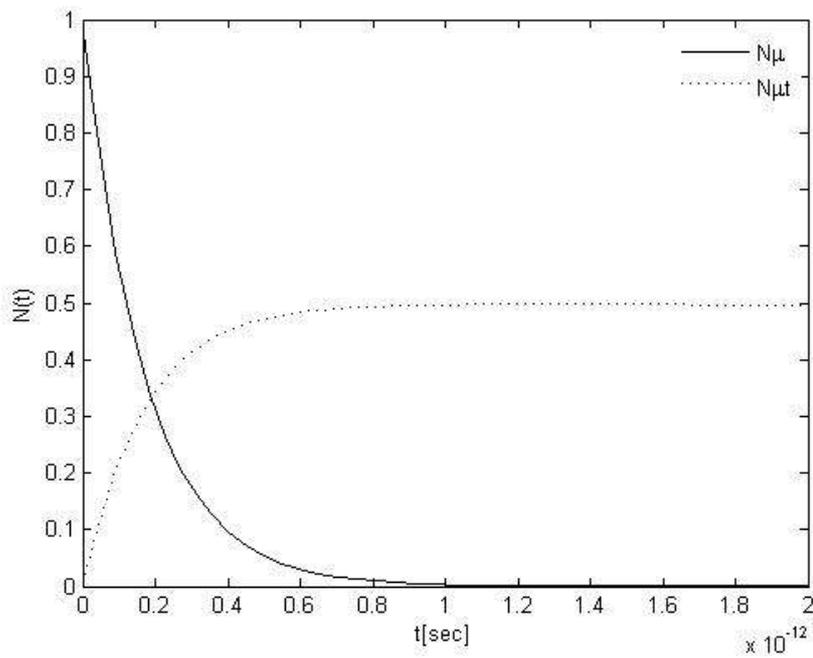


Fig. 1. Example of f muon and μt time distributions with $C_t=0.5$ for the D/T system.

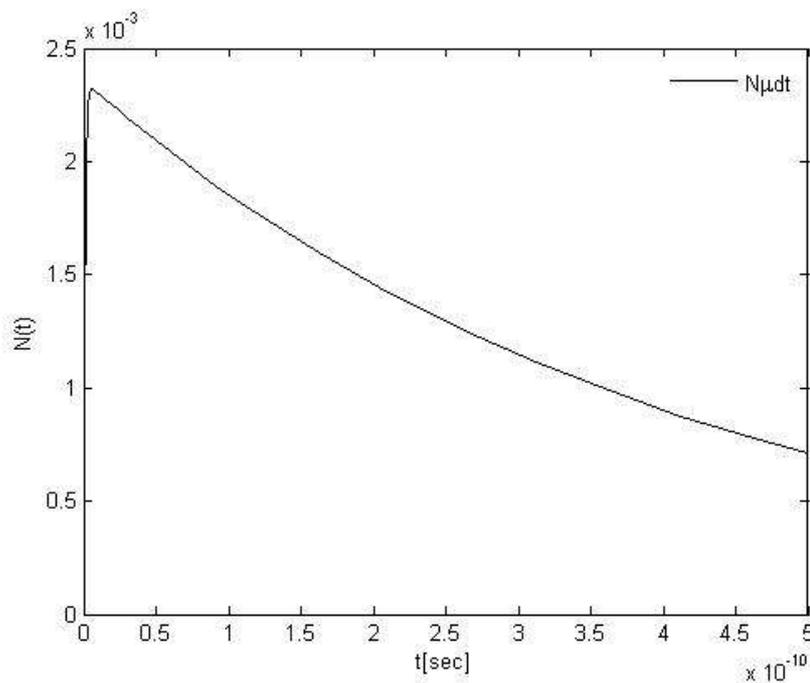


Fig. 2. Example of μdt time distribution with $C_t=0.5$ for the D/T system.