

論文

Modified View Factor를 이용한 인공위성 분자오염 역류확률 예측법

이진원*, 이재달**, 이민영**, 한동인***, 이창호***, 이상률***

An efficient method using the modified view factor for estimating the molecular backscattering probability in the space conditions

Jin-Won Lee*, Jae-Dal Lee**, Min-young Yi**, Dong-In Han***, Chang-ho Lee*** and S. R. Lee***

ABSTRACT

Satellite contamination from back-scattered molecules has long been analyzed using the BGK theory or the DSMC technique which are rather inefficient in that they are complicated or take a long time in the analysis. This study presents a new technique of estimating the back-scattering contamination, which is very simple and easy to use like the view factor method and also very accurate. This method, called the modified view factor method, is equivalent to the DSMC in so far as the molecular thermal velocity is much smaller than the satellite velocity and the mean free path much longer than the satellite.

초 록

인공위성의 outgassing 분자에 대한 역류오염 해석에는 BGK 또는 DSMC 등의 방법이 사용되어 왔으나, 이들은 해석이 복잡하고 시간이 오래 걸리는 등의 비효율성이 문제이다. 본 논문에서는 분자들의 충돌간 평균자유행로가 위성체의 크기에 비해 매우 길고, 동시에 위성체의 속도가 분자들의 열속도보다 매우 크다는 점을 이용하여, 간단한 근사모델을 도입함으로써 일반적인 view factor 법과 비슷한 편리성과 간편성을 가지면서 DSMC 법과 정확하게 일치하는 결과를 주는 modified view factor 법을 개발, 제안한다.

Key Words : satellite(인공위성), molecular contamination(분자오염), backscattering probability(역류확률), view factor, reflector(반사면)

1. 서 론

인공위성에는 태양전지판이나 각종 측정기기의 mirror/렌즈와 같이 표면오염에 의해 성능이 민감하게 변하는 장치들이 다수 장착된다. 이 민감표면에의 오염이 증가하면 빛의 세기를 저하

시키거나 상을 찌그러뜨림으로써 성능을 저하시키므로, 오염물질의 축적속도 및 인공위성 수명기간 동안의 최대오염량을 예측하는 일은 인공위성의 성능예측에 무엇보다 중요한 요소이다[1].

우주에 자연존재하는 분자들은 매우 가벼운 분자들로서 표면오염으로 남지 않으며, 위성체에의 오염은 거의 전부가 위성체에서 발생한 물질들의 재부착에 의한 것이다. 위성체에서 발생하는 오염원은 주로 위성체 표면물질의 outgassing과 vent에서 방출되는 effluent들(페인트, 접착제, 기관재료 등)로서, 대개 등방성으로 방출된다.

인공위성 주위의 우주조건에서는 표면이나 vent에서 방출된 오염물질은 직선적으로 방사상

† 2004년 11월 22일 접수 ~ 2005년 2월 1일 심사완료

* 정회원, 포항공대 기계공학과
연락처, E-mail : jwlee@postech.ac.kr
경북 포항시 남구 효자동 산31

** 정회원, 포항공대 대학원 기계공학과

*** 정회원, 한국항공우주연구원

으로 퍼져나가며, 이 과정에서 일부는 위성체의 다른 표면에 직접 충돌하기도 하고 일부는 우주로 퍼져나가다가 주위 분자들과의 충돌에 의해 일부가 다시 위성체로 되돌아오기도 한다. 직접 오염은 등방성 특성을 가지고 있으므로 view factor를 이용하여 쉽게 해석할 수 있지만, 역류 오염(backscattering)은 비등방성 방향분포를 가지기 때문에 해석이 어렵다. 분자간의 충돌을 직접 모사하는 DSMC 방법이 많이 쓰이는데, 실제 분자충돌과정과 유사한 모사를 통하여 엄밀한 결과를 주지만, 계산에 매우 긴 시간이 소모될 뿐만 아니라 약간의 조건변화에 대해서도 전체 계산을 다시 해야만 하는 비효율성이 있다[2-4].

본 연구에서는, 인공위성의 이동속도가 분자들의 열속도(thermal velocity)보다 매우 크고 분자들의 평균자유행로가 위성체 크기보다 매우 크다는 조건을 이용하여, 위성체 운전조건에 해당하는 방향성 역류오염을 매우 간단하게 구하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 기본특성은 일반 view factor 법과 같으면서 방향성을 고려하여 수정된 view factor를 이용하는 방법이다.

II. 본 론

2.1 방출분자와 주위분자와의 충돌식

위성체에서 방출된 분자는 위성체에 대하여 등방성인 열속도 만큼의 상대속도를 가지고 우주로 퍼져나가며, 위성체 주위 분자들의 평균속도는 0이다. 충돌과 역류를 간단히 보기 위해서는 그림 1과 같이 인공위성에 고정된 좌표계를 이용하는 것이 편하다. 여기에서 보면, 인공위성은 정지해 있고, 방출분자들은 열속도 C_1 을 가지고 등

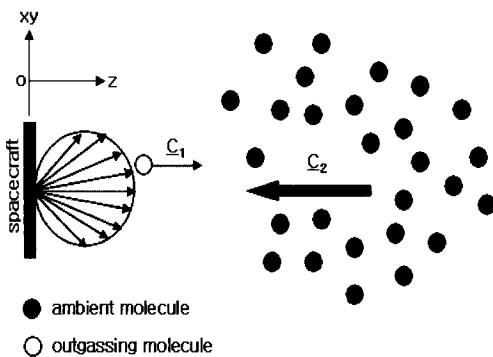


그림 1. Velocity vectors of the outgassed and ambient molecules seen from the satellite coordinate frame

방성으로 퍼져나가며, 주위 분자들은 인공위성 속도 C_2 로 균일하게 위성체로 다가온다. 주위 분자들도 열속도를 가지고 있지만 인공위성 속도가 매우 크므로 열속도는 상대적으로 무시할 수 있다. 그리고 충돌역류확률을 구함에 있어서는 방출분자들의 속도는 그 크기가 C_1 으로 균일하다고 하여도 결과에 전혀 차이가 없고, 방향분포는 대체로 등방성 코사인법칙(diffuse condition)을 가진다고 알려져 있다[5].

오염분자와 주위분자의 평균 질량을 각각 m_1 , m_2 라고 하면, 두 분자의 탄성충돌 후의 속도 C_1^* , C_2^* 는 아래의 식(1), 식(2)와 같이 표현 된다.

$$C_1^* = C_m + \frac{m_r}{m_1} g^* \quad (1)$$

$$C_2^* = C_m - \frac{m_r}{m_2} g^* \quad (2)$$

C_m , $m_r(m_r=m_1m_2/(m_1+m_2))$ 은 질량중심의 속도와 환산질량(reduced mass)이고, g^* 은 충돌 후의 상대속도로서 충돌 전후의 상대속도 크기는 같다.

$$C_m = \frac{m_r}{m_2} C_1 + \frac{m_r}{m_1} C_2 \quad (3)$$

$$g = g^* \quad (4)$$

$C_1 \ll C_2$ 인 경우에는 식(3)과 식(1)은 각각 식(5)와 식(6)으로 근사화하여 간단하게 표현할 수 있다.

$$C_m \sim \frac{m_r}{m_1} C_2 \quad (5)$$

$$C_1^* = (\psi + \chi) \frac{m_r}{m_1} C_2 \quad (6)$$

식(6)에서 ψ 는 C_2 의 방향단위 벡터로서 -z방향의 단방향이며, χ 는 충돌 후 상대속도를 나타내는 단위 벡터이다. 분자들을 강구(hard sphere)라고 가정하면, 충돌 후 분자 속도의 등방조건에 의해서 χ 은 식(7)과 같이 구할 수 있다[6].

$$\chi = A \underline{e}_x + B \cos C \underline{e}_y + B \sin C \underline{e}_z \quad (7)$$

여기서 $A=1-2U_1$, $B=(1-A^2)^{1/2}$, $C=2\pi U_2$ 이고, U_1 과 U_2 는 random number 이다.

2.2 오염분자의 역류특성

오염분자가 주위분자와의 충돌 후에 위성체로 역류되는 특성을 알아보기 위해, 먼저 식(6)과 식(7)을 이용하여 $C_1 \ll C_2$ 인 경우에 대한 충돌 후의 z방향 속도성분을 구하면 식(8)이 얻어지는데, 이

식은 모든 분자들이 -z방향, 즉, 위성체 방향으로 역류하며, 동시에 방향분포는 코사인 법칙을 만족시킴을 나타낸다.

$$C_{1z}^* = (-1 + B \sin C) \frac{m_r}{m_1} C_2 \underline{e}_z \quad (8)$$

즉, $C_1 \ll C_2$ 인 조건하에서는 충돌 후의 오염분자의 속도는 충돌 전의 자신의 속도 C_1 의 크기와 방향에 무관하게 항상 $-C_2$ 를 중심으로 코사인법칙을 따르는 랜덤하게 분포된 방향성을 가진다.

일반적인 경우에는 오염분자들이 주위분자들과의 충돌 후에 다시 위성체 방향으로 역류하는 비율과 역류분자들의 방향성 분포는 방출분자와 주위분자 사이의 질량비(m_1/m_2)와 속도비 및 충돌각도에 따라 달라진다. 일반적인 질량비와 속도비의 경우에 대한 역류확률과 역류 방향분포를 알기 위하여, 표면에서 방출되는 10^6 개 분자를 가지고 질량비와 속도비를 변화시켜 가면서 direct simulation을 수행하였다.

그림 2를 보면, 주위분자가 가벼울수록 그리고 오염분자의 열속도가 클수록 역류확률은 줄어들지만, 매우 넓은 조건범위에서 85% 이상의 역류확률을 보이고, 특히 실제와 유사한 조건에서의 역류확률은 90% 이상이다. 충돌각도에 따라서는 인공위성속도에 수직으로 방출되는 입자의 경우에 역류되지 않고 우주로 탈출할 확률이 높다. 정밀해석이 필요한 경우에는 적절한 역류확률을 충돌각도와 질량비 및 속도비의 함수로 고려할 수도 있을 것이고, 대략적인 예측을 위해서는 모든 오염분자가 역류한다고 하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

인공위성 방향으로 역류된 오염분자들이 실제로 인공위성 면에 도달하는 오염부착확률은 충돌

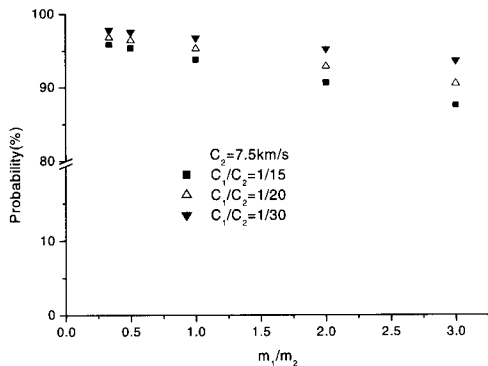


그림 2. Probability of Back-scattering to the spacecraft moving direction after the first collision with ambient molecules

후의 역류분자들의 방향성분포에 의해 좌우된다. 유한한 속도비(C_1/C_2)에서의 방향성분포를 앞서와 마찬가지로 직접 모사에 의해 구한 결과를 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

유한한 속도비에서는, 역류되지 않고 우주로 통과해 가는 분자들로 인하여 오염분자들의 방향 분포가 코사인 법칙을 따르지 않지만, 인공위성 진행방향 축($\theta = 0^\circ$)에서 약간 작고 수직한 방향 성분($\theta = 90^\circ$)이 조금 큰 분포인데, 전체적으로는 코사인분포에 거의 일치하는 분포를 보인다. 또한 같은 θ 에서 방위각에 따른 변화(그림 4)도 거의 균일하여, 전체적으로는 오염분자들이 인공위성 진행 역방을 중심으로 랜덤한 코사인 분포를 가지고 역류함을 알 수 있다. 이 결과에서 명백히 판단할 수 있는 것은, 위성체로의 역류오염을 계산함에 있어서는 인공위성 진행방향으로의 반무한공간만을 고려하면 된다는 점이다.

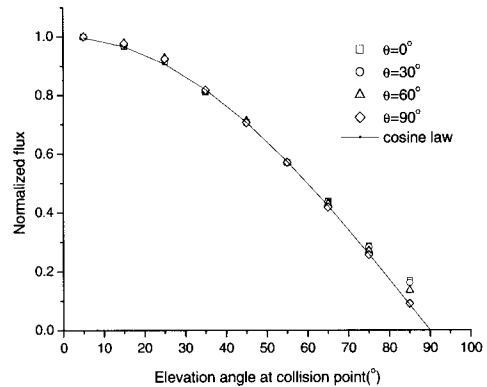


그림 3. Directional distribution of the back-scattered flux : $C_2=7.5\text{km/s}$, $C_1/C_2= 1/20$, $m_1/m_2= 1$

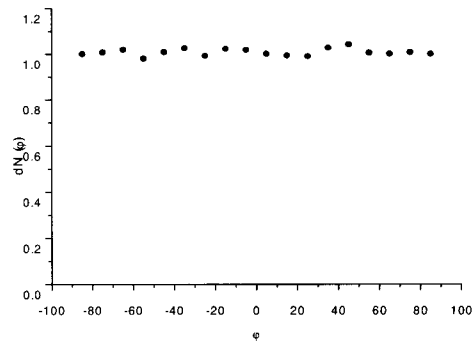


그림 4. Azimuthal variation of back scattered flux : $C_2=7.5\text{km/s}$, $C_1/C_2= 1/20$, $m_1/m_2= 1$

2.3 View Factor 법의 적용

우주로 나가던 오염입자들은 각기 다른 위치에서 주위분자들과 충돌하게 되는데, 첫 충돌거리의 평균치는 평균자유행로(λ)이며, 일반적인 우주선 조건에서 위성의 특성길이(L)는 λ 에 비해 무시할 만큼 작다($L/\lambda \ll 1$). 먼저 인공위성 표면에서 방출되는 분자들은 코사인법칙에 맞추어 방사(radial)방향으로 방출되고, 오염분자들의 역류확률이 100%라고 가정하면, 위성체에서 방출된 후 거리 λ 에서 충돌역류하는 과정은 인공위성을 중심으로 하면서 위성체의 운동방향으로 형성된 반지름 λ 인 반구반사면(hemispherical reflector)으로부터의 방향성 반사와 같다.

그림 5는 view factor 법을 이용한 모델링 절차를 설명한 개략도 이다. 인공위성의 미소면 dA_s 에서 θ_2 방향으로 방출된 오염분자가 역류되는 경우를 고려할 때, 역류/반사의 방향분포가 위성체 운동방향을 중심으로 하는 코사인 분포이므로, 반사면은 역류중심방향에 수직인 dA_2 이어야 한다. 그러나 충돌위치마다 반사면을 이렇게 형성한다면 반사면의 정의와 이를 기초로 한 해석이 매우 복잡하므로, 반사면을 하나의 잘 정의된 반구면으로 하고 대신 각 반구면으로부터의 반사를 방향성으로 처리하는 것이 편리하다. 이 경우 반사면은 dA_2 를 반구면상에 투영한 dA_1 ($\sim dA_2 \cos\theta_2$)으로서, 이 두 면은 위성체로부터의 입체각(solid angle)이 같아서 위성체에서 방출된

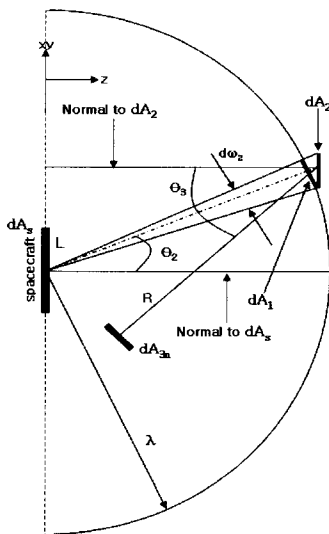


그림 5. Schematic diagram for modified view factor analysis for back-scattered probability

오염분자가 dA_1 과 dA_2 로 도달할 view factor는 동일하다.

dA_3 을 재오염을 고려할 위성체 표면의 한 부분이라 하자. 그러면 dA_s 에서 방출된 오염분자들이 반사면 dA_2 에 도달할 확률은 두 면 사이의 view factor인 F_{s2} 이고, 다시 dA_2 에서 반사역류된 분자가 dA_{3n} 으로 역류하는 확률은 F_{23} 이므로, 전체적으로 위성체에서 방출된 오염분자가 다시 위성체로 돌아와 오염으로 남게 될 확률인 F_{bs} 는 식(9)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F_{bs} &= F_{s2} \cdot F_{23} \\ &= F_{s2} \cdot F_{13} \cdot \cos(\theta_2) \end{aligned} \quad (9)$$

윗 식에는 $L/\lambda \ll 1$ 인 조건을 이용하여 $\theta_2 \sim \theta_3$, $R \sim \lambda$ 라는 근사를 사용하였고, 또한 잘 알려진 view factor 사이의 reciprocity 관계식과 $F_{31} = F_{32}$ 의 조건을 결합한 $dA_2 F_{23} = dA_1 F_{13}$ 이라는 관계식을 사용하였다. 식(9)는 위성체에서 방출된 오염입자의 역류에 의한 재오염확률을 방출면과 반구형 반사면 사이 및 반사면과 오염도달면 사이의 view factor의 곱을 방향성을 고려한 $\cos(\theta_2)$ 로 보정함으로써 얻을 수 있음을 나타내고 있다. 따라서 위성체면과 가상적 반구반사면을 면적요소들로 나누고 각 요소면적들간의 view factor와 방향코사인 값이 주어지면 위성체에서 방출된 오염분자의 역류 재오염량을 쉽게 구할 수 있다. 그리고 100%가 아닌 역류확률을 고려하고자 하면 식(9)에 방향에 따른 역류확률을 곱하면 된다.

2.4 역류위치의 불균일분포를 고려한 보정계수

위성체에서 방출된 오염분자들이 모두 일정한 거리에서 충돌을 하고 역류된다면, 역류되는 오염량을 위의 식들로부터 완벽하게 계산할 수 있다. 그러나 실제로는 방출분자들이 주위 분자들과 충돌을 할 확률이 방출 후의 이동거리에 따라 지수함수적으로 감소하는 분포를 가지고 있으므로, 이러한 충돌 및 역류시작 위치의 분포를 고려해 주어야 한다. 위성체로부터 출발한 오염분자가 평균자유행로가 λ 인 조건에서 거리 x 까지 주위분자들과 충돌하지 않고 생존할 확률인 생존확률(survival probability, P_s)은 식(10)과 같다. 엄밀한 의미에서 위성체 부근의 평균자유행로는 오염분자때문에 우주공간의 그것과는 다르지만, 그 범위가 작아서 전체역류에 미치는 영향이 작으므로, 본 연구에서는 λ 가 균일하다고 가정한다.

$$P_s = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (10)$$

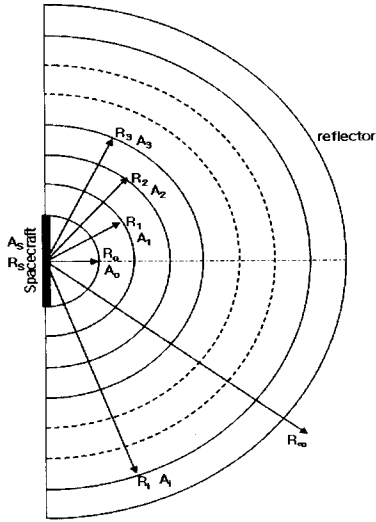


그림 6. Schematic diagram for distributed collision

각기 다른 위치에서 충돌반사되는 분자들을 고려하기 위해서는, 각기 다른 위치에 반구 반사면(hemispherical reflector)을 설치하고(그림 6), 각 반사면에 대하여 오염분자가 바로 그 반사면에서 충돌반사될 확률과 충돌반사되는 오염분자 중에서 위성체로 되돌아오는 확률을 곱하여 모든 반사면에 대한 결과를 합하면 분포된 충돌반사에 대한 총오염확률을 구할 수 있다. 이 과정을 아래에 정리하였으며, 그 결과 역류의 분포지점에 따라 역류 계산을 일일이 다시 할 필요가 없이, 앞에서 구한 동시역류를 기준으로 한 역류확률에 하나의 보정계수만을 곱하면 됨을 알 수 있다.

특정 반구로부터 모두 반사되는 경우에 대한 분포된 반사의 경우의 역류확률의 비가 보정계수이고, 이 계수는 방향에 무관하므로, 계산을 단순화하기 위하여 위성체 운동방향 전면의 반경 \$R_s\$ 인 disk를 대상으로 식을 유도하고자 한다.

각기 다른 위치 \$R_i\$에 설치된 반구반사면들의 면적을 \$A_i\$로 하면, \$A_i \sim R_i^2\$이다. 위치 \$R_i\$에 설치된 반사면에서 반사되는 분자들이 위성체 표면으로 되돌아올 확률은 view factor 관계식을 이용하면 식(11)과 같다.

$$F_{is} = \left(\frac{A_s}{A_i} \right) \cdot F_{si} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_s}{R_i} \right)^2 \quad (11)$$

그리고 \$0 \le R_i \le R_0 (=R_s)\$인 경우는 \$(R_0/\lambda) \ll 1\$임을 고려하여 \$F_{is}=1.0\$로 단순화해도 물리적 의미는 크게 변함이 없을 것이다.

각 반사면에서 반사될 확률은 식(10)의 생존확률의 미분치와 같으므로, 분포반사를 고려한 총 역류확률은, 각 반사면에서의 반사확률과 반사된 분자의 도달확율인 식(11)을 곱하여, 모든 반사면에 대해 합하면 아래의 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{R}{\lambda}\right) \frac{dR}{\lambda} \\ &= \int_0^{R_0} \exp\left(-\frac{R}{\lambda}\right) \frac{dR}{\lambda} \\ &\quad + \int_{R_0}^\infty \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right) \cdot \exp\left(-\frac{R}{\lambda}\right) \frac{dR}{\lambda} \\ &\approx \frac{R_0}{\lambda} + \int_{R_0}^\infty \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right) \cdot \exp\left(-\frac{R}{\lambda}\right) \frac{dR}{\lambda} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 식(12)의 두 번째 식의 첫 번째 항의 적분을 수행함에 있어서는, \$R_0 \ll \lambda\$임을 고려하여 \$P_s = \exp(-R/\lambda) \approx 1 - R/\lambda\$로 단순화하였다.

만약 동시충돌의 반사면을 평균자유행로 위치에 설정한다면, 평균자유행로에서 동시충돌 후 단일반사의 역류확률은 \$F_{\lambda_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{\lambda} \right)^2\$ 이므로, 평균자유행로에서의 동시충돌에 대한 분산충돌시의 역류확률 보정계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Br &= \frac{\bar{F}}{F_{\lambda_0}} \\ &= \frac{\frac{R_0}{\lambda} + \int_{R_0}^\infty \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right) \cdot \exp\left(-\frac{R}{\lambda}\right) \frac{dR}{\lambda}}{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_0}{\lambda} \right)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

윗 식에서 명백한 바는 이 보정계수가 위성체 크기와 평균자유행로의 비(\$R_0/\lambda\$)에 따라서만 변하며, \$R_0/\lambda\$의 값이 커질수록 보정계수 값은 작아진다. 그림 7은 어느 경우에도나 적용되는 universal한 결과이다.

만일 단일충돌확률이 임의의 위치 \$L_a\$에 대한 값이고 평균자유행로에 대한 \$Br\$의 값이 주어지는 경우에도 별도의 \$Br\$을 구할 필요가 없이 식(14)와 같이 총 역류확률을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{F} &= F_{\lambda_0} \cdot Br(R_0/\lambda) = F_{L_{a_0}} \cdot \frac{F_{\lambda_0}}{F_{L_{a_0}}} \cdot Br(R_0/\lambda) \\ &= F_{L_a} \cdot \left(\frac{\lambda}{L_a} \right)^2 \cdot Br(R_0/\lambda) \end{aligned} \quad (14)$$

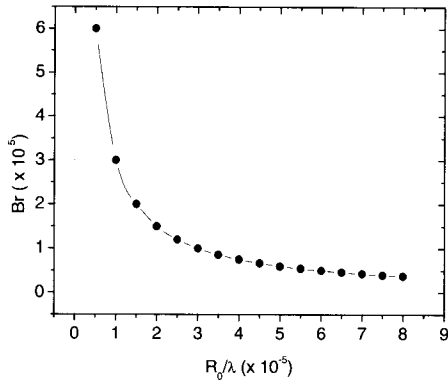


그림 7. Ratio of back-scattering probability (Br) between simultaneous and distributed collision

III. 결 론

이 논문에서는 인공위성의 속도가 오염분자들의 열속도보다 매우 크고 오염분자와 주위 분자들 간의 충돌에 대한 평균자유행로가 위성체 크기보다 매우 크다는 조건만을 이용하여, 일반적으로 잘 알려진 view factor 법으로 매우 정확하게 오염역류를 계산하는 방법을 개발제시하였다. 이러한 조건하에서는 충돌반사되는 역류오염 분포가 거의 cosine 분포에 가까우며, 또한 충돌후에 위성체 방향으로의 역류확률이 거의 1.0에 가까운 정도로 높고, 위성체 표면으로의 역류오염은 적절한 수정 view factor로 계산되며, 분포된 충돌위치의 영향은 단일 보정함수로 보정될 수

있음을 보였다. 이 계산법은 DSMC의 계산과정을 이론적으로 단순화한 것으로서, 제시된 보정값들을 사용하는 경우 이론적으로는 DSMC와 동일한 결과를 주는 것이다.

참고문헌

- 1) Alan C. Tribble, "The Space Environment implications for Spacecraft Design", Princeton University Press, Princeton New Jersey(1995).
- 2) S. J. Robertson, "Bhatnagar-Gross-Krook Model Solution of Backscattering of Outgass Flow From Spherical Spacecraft", Progress in Astronautics and Astronautics, Vol.51, Pt.1, AIAA, New York, pp.479-489, 1977.
- 3) S. J. Robertson, "Spacecraft Self-Contamination due to Backscattering of Outgass Product", LMSC-HREC TR D496676, Jan. 1976.
- 4) Charles R. Justiz, "DSMC- and BGK-Based Calculations for Return Flux Contamination of an Outgassing Spacecraft", J. THERMOPHYSICS. Vol.8, NO.4: TECHNICAL NOTES, pp.802-803.
- 5) H. K. Alan Kan, "Desorptive Transfer: A Mechanism of Contaminant Transfer in Spacecraft", J.SPACECRAFT, 12, no.1, p.62(1975).
- 6) G.A. Bird, "Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows", Oxford University Press, New York(1994).