한국군사과학기술학회지 제13권 제3호, pp. 493～502, 2010년 6월

학술논문 에너지 부문

충격 압축에 의한 제논 가스의 이온화 특성 연구

A Study of the Ionization Characteristics of Xenon Gas by Shock Compression

이 대 성* 신 재 렬* 최 정 열* 최 윤 수** 김 형 원**
D.-S. Lee J.-R. Shin J.-Y. Choi Y.-S. Choi H.-W. Kim

In this paper, the ionization characteristics of noble gases are studied numerically behind strong shock waves. As a first step, the equilibrium ionization mechanism of noble gases is modeled in wide ranges of temperature and pressure. As a next step the equilibrium ionization model is coupled with fluid dynamic equations to analyze the local thermodynamic equilibrium(LTE) ionization process at high temperature and pressure conditions behind the strong imploding shock waves. The ionization characteristics of xenon gas is studied in a wide range of test conditions with thermal radiation effects. Hence, the results give optimal conditions of maximum ionization and radiation behind the imploding shock waves.

Keywords : Ionization(이온화), Xenon Gas(제논 가스), Shock Wave(충격파), Local Thermodynamic Equilibrium(국부 열평형)

1. 서 론

광학적 비살상 무기 체계는 고출력의 빛을 순간적으로 방출하여 상대방의 시각을 마비시켜 기동력을 상실케 하거나 광학장비를 무력화하는 무기 체계로서, 군용, 테러 및 소요 진압 등의 용도로 고려되고 있으며, 현재 미국 캐나다 등 여러 나라에서 연구가 진행되고 있다. 이에 대한 개발 방법으로 레이저를 이용한 방법이 고려되었으나, 휴대성 등의 이용의 편의성을 고려하여 Fig. 1과 같은 단원자 분자인 희유기체를 고폭제로 압축하여 발광시키는 비교적 간단한 방법의 연구가 진행되고 있다[1]. 그러나 이에 대한 연구결과 및 자료는 각국에서 고도의 보안사항이기에 얻을 수 있는 데이터는 극히 제한적이며 국내에서도 이에 대한 자체적인 연구가 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 광학적 비살상 무기 체계에 대한 연구의 기초과정으로 전산 해석을 이용하여 고출력 섬광 발생 장치의 충격압축에 의한 희유기체의 이온화 특성을 연구하고자 한다.

이온화의 물리적 과정을 정확하게 해석하기 위해서는 화학 반응 속도를 고려한 비평형 해석이 수행되어야 한다. 그러나 비평형 해석은 각 이온의 보존 방정식을 고려해야 하기에 방정식의 수가 증가하여 계산시간의 부담이 커진다. 더불어 각 성분의 반응 속도를 예측하기 위해서는 적절한 반응 속도 메커니즘을 이

† 2010년 3월 12일 접수～2010년 5월 13일 게재승인
* 부산대학교(Pusan National University)
** 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 최정열(aerochoi@pusan.ac.kr)

용하여야 하는데, 여러 실험 자료와 이론을 종합하여 얻어지는 반응 메커니즘에는 검증된 범위와 정확도에 제약이 존재하며, 희유기체 이온화 과정에 대한 데이터는 극히 제한적이다. 특히 실험이 고폭제로 인해 압력이 수만 기압이라는 특정한 조건에서 수행되는 경우라면 검증된 데이터를 얻기는 더욱 힘들다. 따라서 본 연구에선 이온화 반응특성 시간이 지속시간에 비해 매우 짧다는 가정 하에 반응의 순 효과(net effect)만을 고려하는 화학 평형을 이용하여 국부 열평형 이온화 해석을 수행하였다.

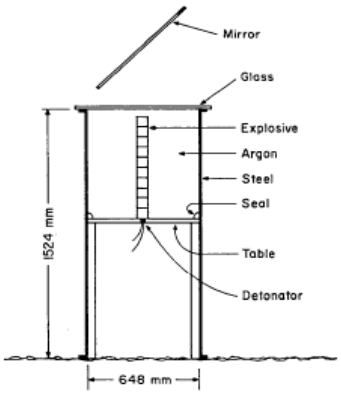

Fig. 1. Los Alamos의 시험모델

2. 이온화 기법

가. 이온화된 희유기체의 열역학적 물성

본 연구에선 이온화 에너지가 상대적으로 큰 희유기체를 해석 대상으로 고려하였다. 이는 이온화 이후 에너지 환원 과정에서 더 큰 빛에너지를 얻기 위함이다. 희유기체의 열역학적 상태를 구하기 위해서는 각 기체에 대한 열역학적 물성을 필요로 하는데 이에 필요한 물성으로는 분자량, 표준 생성열, 정압 비열 등이 있다. 본 연구에서 고려된 각 기체의 물성 가운데 분자량과 표준 생성열은 NASA CEA 코드에서[2] 이용한 데이터를 이용하였다. 희유기체의 정압 비열은 온도의 함수로서 아래와 같이 7차 함수 형태로 보간된 식 (1)을 이용하였다[3].

$$\frac{C_p^o(T)}{R} = a_1 T^{-2} + a_2 T^{-1} + a_3 + a_4 T + a_5 T^2 + a_6 T^3 + a_7 T^4 \quad (1)$$

각 기체의 엔탈피, H와 엔트로피, S는 정압 비열로부터 적분형태로 계산가능하며, 평형 상수의 계산에 필요한 Gibbs 자유 에너지, G는 다음의 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\frac{G}{RT} = \frac{H}{RT} - \frac{S}{R} \quad (2)$$

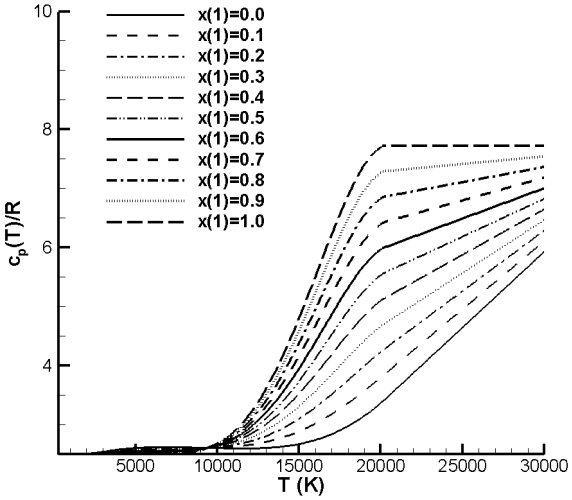

Fig. 2. 제논의 온도에 따른 정압 비열

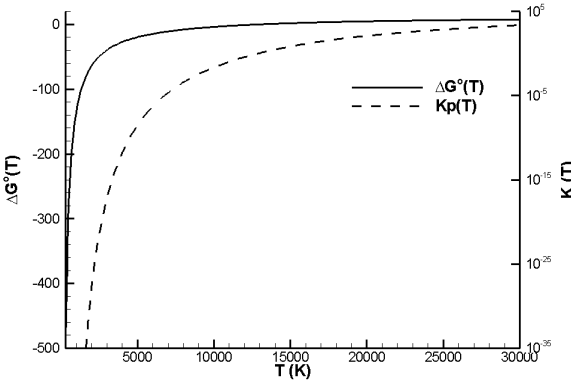

Fig. 3. 대기압 조건에서 제논의 Gibbs 에너지 및 평형 상수

본 연구에선 이온화 경향을 쉽게 파악하기 위해서, 단원자 기체 가운데 분자량이 크고 이온화 에너지가 작으면서도 방사성 원소가 아니어 취급이 상대적으로 용이한 제논(Xe)을 중심으로 해석을 수행했다. Fig. 2는 제논의 정압 비열을 도시한 그림으로써, 제논 원자

의 몰분율, x(1)로 표시한 이온화 정도에 따른 비열의 변화 추이를 살펴 볼 수 있다. 이온화 된 단원자 기체의 물성치는 20,000K까지 신뢰 범위가 주어져 있지만, 전산 유체 해석 상에서 나타날 수 있는 20,000K 이상의 순간적인 고온 영역에서도 수치적 안정성을 가질 수 있도록 데이터를 선형적으로 확장시켰으며 그에 따른 평형상수, K_p 및 Gibbs 에너지, G는 Fig. 3에 나타나 있다.

나. 희유기체의 평형 이온화 해석

화학 평형 조성을 구한다는 것은 주어진 상태에서 엔트로피가 최대가 되는 조성비를 구하는 것이며 이는 Gibbs 에너지가 최소인 조건과 동일한 열역학적 의미를 가진다. 본 연구에선 화학적 평형 조성을 구하는 방법으로 식 (3)과 같은 Gibbs 에너지 최소조건으로부터 유도되는 평형상수, K_p를 이용하는 방법을 사용한다.

임의의 희유기체 A에 대한 1차 이온화 반응만을 고려 할 때, A, A^+, e^-의 3개의 성분이 고려된다. 이 경우 희유기체 A의 1몰의 이온화 반응은 다음의 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$K_p(T) = \exp(-\Delta G(\chi, T)) = \frac{(\chi_{A^+})(\chi_{e^-})}{\chi_A} \quad (3)$$

$$A \rightarrow \chi_A A + \chi_{A^+} A^+ + \chi_{e^-} e^- \quad (4)$$

희유기체 A는 중성이기에 A^+, e^-의 몰분율은 같으며 전체 몰분율의 합은 1이 되어야 한다. 여기에 평형상수와의 관계식을 적용하면 식 (5)~(7)과 같이 3개의 식이 구해지며, 이를 통해 3개의 미지수인 이온화 조성을 구할 수 있다.

$$\chi_{A^+} = -K_p + \sqrt{K_p^2 + K_p} \quad (5)$$

$$\chi_{e^-} = \chi_{A^+} \quad (6)$$

$$\chi_A = 1 - \chi_{A^+} - \chi_{e^-} \quad (7)$$

평형 해석 방법을 이용하여 헬륨, 네온, 크립톤, 제논 및 라돈의 5가 희유기체의 상압에서 온도에 따라 이온화에 의한 전자 몰분율을 Fig. 4에 도시하였다. 전자의 몰분율 0.5는 완전한 이온화 상태를 의미한다. 기호로 나타낸 것이 이온화 평형 해석 결과이며, 선으로 나타낸 것이 CEA 코드의 결과로써, 평형 해석에 필요한 열역학 데이터를 CEA와 같은 NASA Polynomial Fit Data를 사용하였기에 거의 동등한 결과를 나타내고 있다.

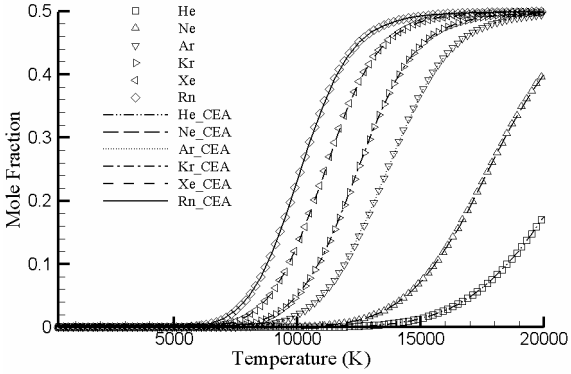

Fig. 4. 대기압에서 온도와 압력에 따른 희유기체의 전자 몰분율 분포

충격파 후방에서 희유기체의 상태량을 구하기 위해선 일반적으로 수직 충격파 관계식을 이용할 수 있다. 그러나 수직 충격파 관계식은 낮은 마하 수에서 적용되는 일반식으로 본 연구와 같이 높은 마하 수에서 발생 가능한 해리 및 이온화 반응이 고려되어야 하는 경우 부적합 하다. 따라서 식 (8)~(10)과 같이 Rankine-Hugoniot 관계식을 이용하여 충격파 후방에서의 압력 및 온도를 보정해야 할 필요가 있다.

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (8)$$

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2 \quad (9)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h(\chi, T) + \frac{1}{2} u_2^2 \quad (10)$$

이 관계식을 이용하여 충격파 후방에서의 압력 및 온도를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 5가지 희유 기체에 대한 이온화 해석 결과를 CEA GUI 결과와 비교를 통해 검증을 시도하였다.

Fig. 5에 그 결과를 나타내었으며 초기 상태는 표준

대기 상태로 가정하였다. 기호로 표시된 평형 해석 결과에 비해서, 선으로 표시된 CEA GUI의 경우 결과 데이터가 부족한데 이는 20,000K을 넘어가는 결과에 대해선 열화학 데이터의 제약으로 인해 결과를 제시하지 못하기 때문이다. 역시 같은 열화학 데이터를 사용 했기에 거의 동등한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

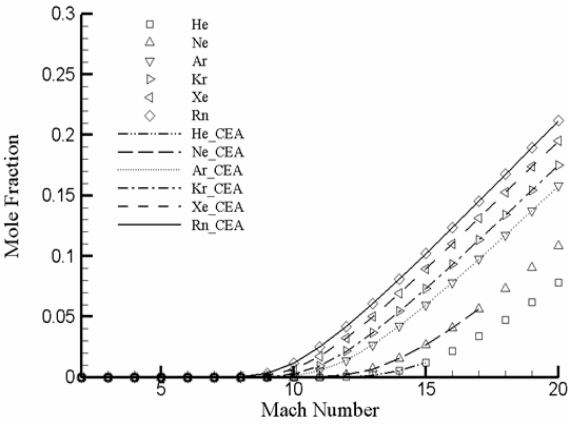

Fig. 5. 충격파 후방 희유기체의 전자 몰분율 분포

3. 충격 압축에 의한 이온화 유동 해석 기법

가. 희유기체 충격 압축 이온화 장치의 모델링

희유기체의 이온화를 이용한 광학 장치를 설계하기 위해서는 다양한 변수들을 결정하여야 한다. 여기에는 희유기체의 종류, 양, 장치의 크기 및 형상, 고폭 화약의 종류 및 형태 등이 포함될 것이다. 이러한 다양한 변수들 가운데 기본적인 이온화 경향성을 파악하기 위한 본 연구에서는, 전산 유체 해석의 대상으로써 방사성 기체인 라돈을 제외하고 가장 이온화에 용이한 제논을 대상 기체로 선정하였다. 희유기체의 초기 조건은 보관 및 작동 조건을 고려하여 대기압의 약 10배에 해당하는 1MPa에 상온 상태를 기준으로 하였으며 이에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 연소 가스의 상태는 고폭 화약의 종류에 따라 다양하게 달라 질 수 있으나 특정하기 곤란한 부분이 있으므로 편의상 100GPa의 압력에 상온의 10배에 해당하는 연소 온도를 가지며 희유기체와 동일한 물성을 가지는 경우를 기준으로 하여, 이에 대한 매개 변수 연구를 수행하였다. 장치의 형상은 Fig. 6과 같은 원통형 튜브 형태의 형상을 고려하였다.

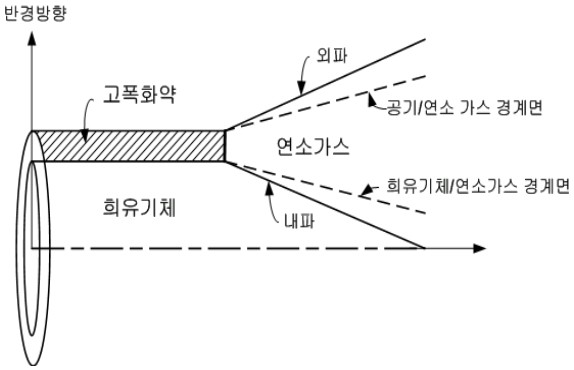

Fig. 6. 본 연구에서 사용된 실험 모델

가운데 원통은 희유기체로 채워져 있으며 이를 둘러싸고 있는 원통은 폭발성 물질인 고폭 화약으로 채워져 있는 형태이다. 고폭제가 점화됨과 동시에 화약이 채워져 있던 부분은 순간적으로 높은 압력 및 온도의 가스로 기화된다. 동시에 원통 중심축을 기준으로 안쪽으로 내파(implosion)가 전파되며 바깥쪽으로 외파(explosion)가 전파된다. 이 경우 고폭 화약의 데토네이션 파는 거의 일정한 Chapman-Jouguet 속도 진행하므로 길이 방향으로 정상 상태 가정을 하면 반경 방향으로 파가 전파되는 원통형 좌표계의 비정상 문제로 대체하여 해석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 형태를 가지눈 축대칭 1차원 충격파관 문제로 모델링하여 해석을 수행하였다. 고폭 화약의 폭발 후 생성되는 연소 생성물은 고체 피스톤과 같이 희유기체를 압축하는 구동 기체(driver gas)의 역할을 하며 이온화와는 직접 관련은 없기에 해석의 편의를 위해 연소 생성물을 희유기체와 동일한 물성을 가지는 기체로 해석을 수행하였다.

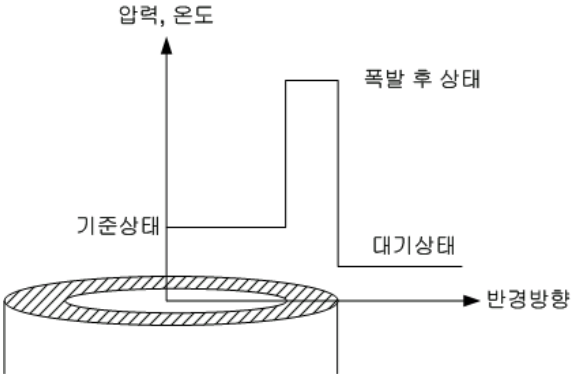

Fig. 7. Shock Tube 문제로 가정된 모델

나. 지배방정식 및 수치기법

실험 모델의 형상을 고려한 평형 이온화 유동의 원통형 1차원 Euler 방정식을 축대칭 좌표계에서 벡터형태로 간단히 적으면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial r} + \alpha H = 0 \tag{11}$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix},\ F_i = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ (e+P)u + q_R \end{bmatrix},\ H = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ (e+P)u + q_R \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서 Q는 보존 변수 벡터이며 q_R은 복사항이다. 플럭스 벡터 F와 축대칭 항 H는 보존 변수의 함수이다. 본 연구에선 복사 효과를 고려한 압축성 유동과 이온화 반응 유동의 연계 해석을 중심으로 설명하기 위해서 점성 효과는 생략한다.

유동장의 이온화 평형 해석은 (11)식의 유동 해석에서 얻어진 온도와 압력 조건을 이용하여 이온화 조성을 구한 후 다시 유동장을 해석하는 반복적 계산이 이루어진다. 유동 해석의 수렴 과정에서 각 단계에서 이온화 평형의 Newton 해석을 완전히 수렴시키는 것보다는 한 단계의 반복 계산만 수행하는 것이 최종적으로 수렴된 해를 얻는데 훨씬 안정적이며 효율적이었다.

본 연구는 고폭제로 인해 임계조건에서 작동하기에 (11)식의 해법을 구하기 위해서 표준 Sod's 문제를 확장시킨 조건을 이용하여 약 30가지의 Flux Scheme에 대해서 검증을 시도 하였다[3~6]. Analytic Solution에 가장 근접한 결과 값을 나타낸 기법으로는 Roe, RoeM2, AUSMDV 등이 거의 대등한 결과를 보여 주었다. 본 연구에서는 공간차분에 Roe의 Riemann 근사 해법을 사용하였으며 시간 적분은 Runge-Kutta 4th 해법을 이용하였다. Fig. 8은 선정된 해석 기법을 적용한 원통형 1차원 Euler 방정식을 해석하는 과정을 나타낸 순서도이다.

다. 복사효과

충격파 후방의 온도는 매우 고압인 상태에서도 희유기체의 이온화가 가능할 정도의 엄청난 고온으로 상승한다. 따라서 본 연구에선 타당한 결과를 위해선 복사의 효과를 고려해야할 필요가 있다. 복사 열전달 해석에 많은 방법들이 제시되어 있지만, 본 연구에서는 유동 해석 코드를 간단히 수정하여 복사 열전달의 전반적인 효과를 해석하기 위하여, 기체의 광학적인 두께가 두껍다고 가정하여 평균 흡수 계수를 이용하는 Rosseland 모델을 이용하였다[7]. 이때 식 (12)의 복사 열전달 플럭스는 다음과 같이 정의가 되며,

$$q_R = -\frac{4\sigma}{3\beta_R}\frac{\partial(n^2T^4)}{\partial r} \tag{13}$$

여기서 σ는 Stefan-Boltzmann 상수이며 5.670×10^{-8}W/(m^2 · K^4)의 값을 가진다. β_R는 Rosseland-mean extinct coefficient를 나타낸다. 위의 식은 흔히 Rosseland 근사 또는 확산 근사로 알려져 있다. β_R의 값이 4/3인 경우 흑체 모델을 의미한다.

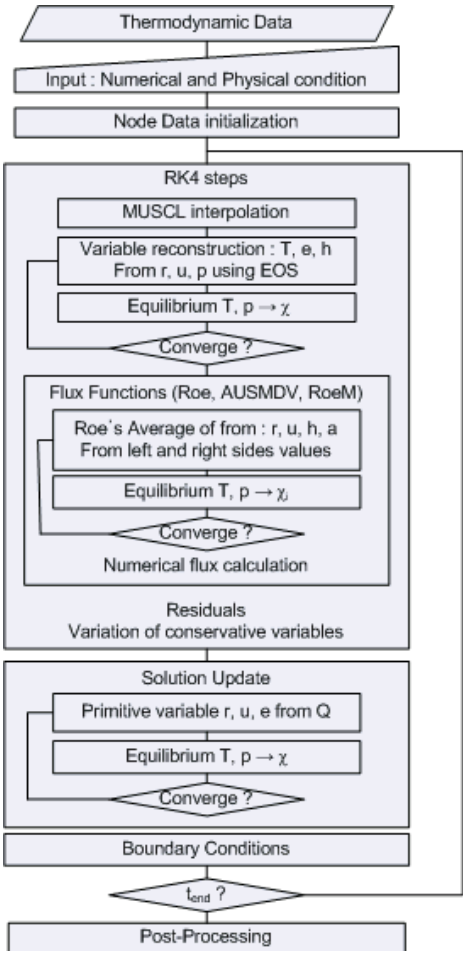

Fig. 8. 희유기체 유동의 이온화 해석 순서도

4. 충격 압축에 의한 이온화유동 해석

가. 충격 압축에 의한 이온화 과정

기준 조건에서 제논(Xe)의 이온화 과정을 알아보기 위한 해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 초기에 상온, 1MPa인 조건으로 제논 가스가 폭발 후의 생성가스의 압력을 100GPa, 상온의 10배 조건인 구동 기체에 의하여 압축되는 상황을 가정하였다. 즉 고온, 고압 부분은 압력 비 10^5배, 온도 비는 10배인 조건이다. Fig. 9~11은 기준 상태에서 시간에 따른 온도, 압력 그리고 제논의 전자몰분율 분포를 보여주고 있다. 그림에서 δt는 약 2.86×10^{-9}s의 시간이다. 중심부에서의 이온화 특성을 자세히 보기 위하여 반경 발향의 길이는 지수 척도로 나타내었다.

초기 사각 펄스 형태로 주어지 고압부에 의하여 바깥쪽 및 중심부로 전파하는 충격파가 발생하는데, 바깥쪽으로 향하는 충격파는 시간이 지나며 강도가 약해지는 반면, 중심부로 향하는 충격파는 내폭(implosion) 효과에 의하여 희유기체를 약 230GPa, 20,000K 이상 온도로 가열하는 것을 알 수 있다. 한편, 이상 기체로 가정한다면 중심부에서의 온도는 20,000K 이상 상승할 수 있지만, 이온화에 의하여 중심부의 온도는 약 20,000K 수준으로 제한됨을 알 수 있다. 이후 충격파는 중심에서 반사되어 바깥쪽으로 팽창하며 압력과 온도가 감소하며 이온화 된 플라즈마 상태도 서서히 소멸하여 가는 것을 볼 수 있다.

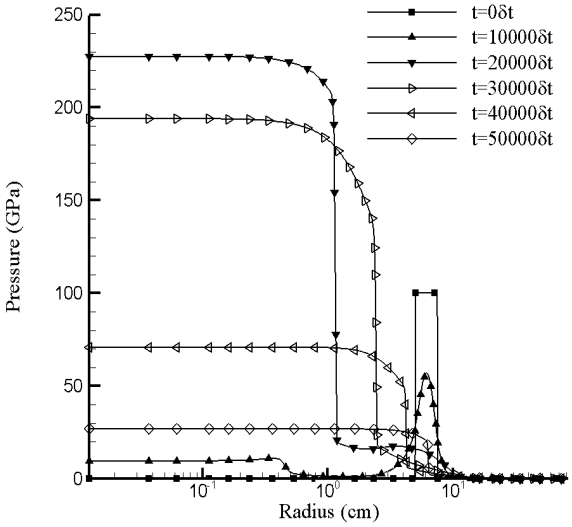

Fig. 9. 시간에 따른 압력 분포

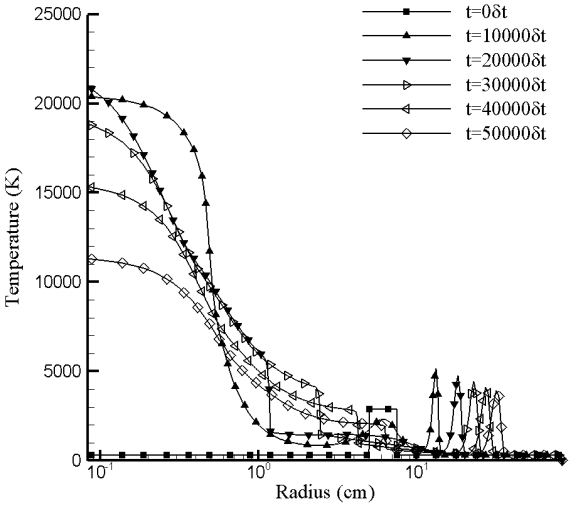

Fig. 10. 시간에 따른 온도 분포

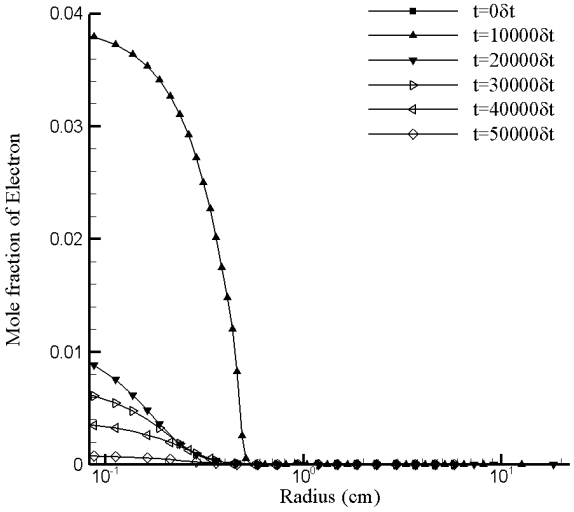

Fig. 11. 시간에 따른 전자의 몰분율 분포

나. 중심부의 시간에 따른 변화 특성

기준 조건에서 중심부에서의 시간에 따른 이온화 과정을 살펴보았다. Fig. 12는 모델 중심에서 시간에 따른 온도, 압력 그리고 최대 복사 에너지 플럭스를 나타낸 그림이다. 충격 압축으로 인해 0.1ms 이내에 온도가 최대가 되며, 온도의 영향에 민감한 최대 복사 에너지 플럭스 역시 유사한 경향을 나타낸다. 압력의 경우 약간의 차이를 보이지만 대체로 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig. 13은 모델 중심에서의 시간에 따른 제논과 전

자의 몰분율 및 단위체적당 전자의 몰수를 나타낸다. 전자의 몰분율과 몰수의 경우 온도와 압력에 영향을 받기에 대체로 비슷한 경향을 보이지만, 압력 감소에 비하여 온도가 지속되는 시간이 다소 길어 전체 몰수의 경우 최대 위치 및 지속 시간이 다소 길게 나타남을 볼 수 있으나, 전체 이온화 시간이 0.2ms에 미치지 못함을 알 수 있다.

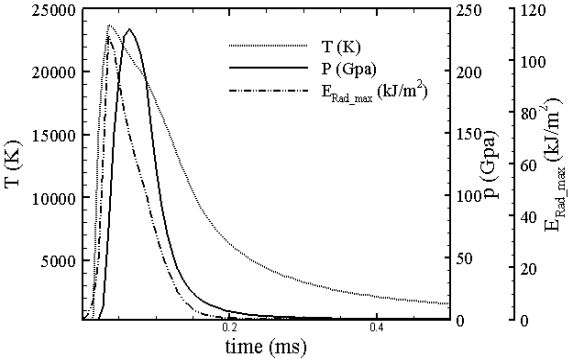

Fig. 12. 시간에 따른 온도, 압력 및 최대 복사 에너지 플럭스

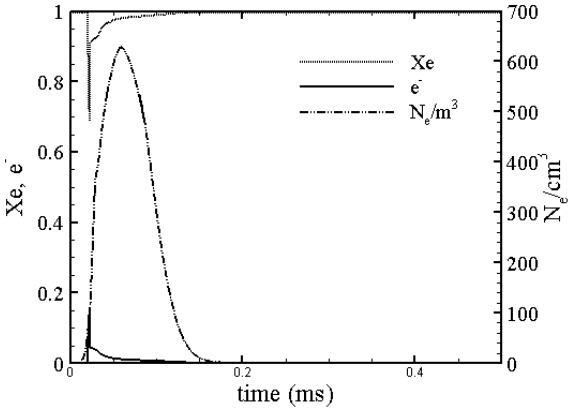

Fig. 13. 시간에 따른 제논, 전자의 몰분율 및 단위체적당 몰수

다. 희유기체의 이온화 특성

본 연구에서 구동 기체의 초기 압력을 100GPa로 가정한 경우, 설계 변수가 될 수 있는 값은 폭발 후의 온도 및 희유기체의 초기 압력이다. 따라서 이 값들의 변화에 따른 이온화 특성을 살피기 위하여, 앞서 기술한 내용과 같은 해석을 여러 온도 및 압력 조건에 대하여 반복적으로 수행한 후 주요 변수의 경향성을 살피는 매개변수 연구를 수행하였다.

온도 및 압력에 따른 이온화 특성을 살피기 위하여 본 연구에서는 아래와 같이 정의한 이온화 한계, 전체 전자 몰 수, 플라즈마 상태의 지속 시간과 그 시간 동안 몰분율의 변화율 등의 의존성을 살펴보았다. 온도 및 압력은 초기에 급격히 최대에 도달하며 전자 몰분율 또한 최대 상태에 도달한다. 이후 온도는 상대적으로 높은 상태를 유지하는 반면 압력은 급격하게 감소하며 이온화가 지속된다는 것을 알기에 식 (14)와 같이 전자의 몰분율이 최대인 상태에서 최소가 될 때까지를 플라즈마 지속시간으로 정의하였다. 한편, 식 (15)와 같이 최대 전자 몰분율을 플라즈마가 지속되는 시간으로 나누어 전자 몰분율의 변화율을 살펴보았다.

$$t_P = t_{\chi_{\min}} - t_{\chi_{\max}} \tag{14}$$

$$\nabla \chi_{\max_e} \equiv \frac{\chi_{\max_e}}{t_P} \tag{15}$$

여기서 $t_{\chi_{\max}}$는 실험 모델의 중심에서 전자의 몰분율이 최대일 때의 시간이며, $t_{\chi_{\min}}$은 전자 몰분율이 최소일 때의 시간이다. 본 연구에선 몰분율이 0.005 이하(=이온화 경향이 1%이하)인 지점을 최소 몰분율 지점으로 정의하였다. 이온화 한계 값은 모델 중심축에서 전자의 몰분율 최댓값으로 정의하였다.

라. 초기압력에 따른 이온화 특성

본 연구에서 폭발 후의 생성가스의 압력을 100GPa로 고정시킨 상태에서 초기 압력을 Table 1과 같은 조건으로 변화시키며 이온화 특성을 살펴보았다.

Table 1. 희유기체 초기 압력에 따른 의존도 해석 조건

	압력	온도
Product Gas	100GPa	2981.5K
Xenon Gas	1～10MPa	298.15K

Fig. 14, 15는 초기 압력에 따른 제논(Xe)의 이온화 특성의 변화를 보여주고 있으며, $T_{\max}$, $\chi_{\max_e}$는 각각 최대 온도와 최대 전자 몰분율을 나타내고, N_e/m^3와 $E_{Rad_\max}$는 단위부피당 전자 몰수와 최대 복사 에너지

플럭스를 의미한다. Fig. 14에서 초기 압력이 증가함에 따라 전반적인 압력 차이가 감소하기에 이온화 한계 값이 감소함을 알 수 있으며, 최대 온도의 경우 초기압력이 50 bar인 경우에 최대가 됨을 볼 수 있다.

Fig. 15에서 단위부피당 전자의 몰수의 경우 초기압력이 증가함에 따라 전체 제논(Xe)의 몰수가 증가하기에 이온화 경향이 작아지더라도 증가함을 알 수 있으며 최대 복사 에너지 플럭스의 경우 초기 압력에 비례하여 급격히 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 16에서 초기 압력에 따라 이온화 한계에 도달하는 시간, $t_{\chi_{max}}$의 상승에 비해 이온화 최소 지점에

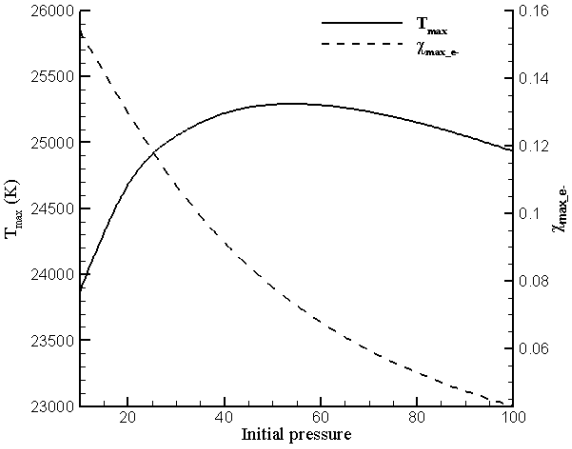

Fig. 14. 제논(Xe)의 압력(bar)에 따른 최대 온도 및 이온화 한계 분포

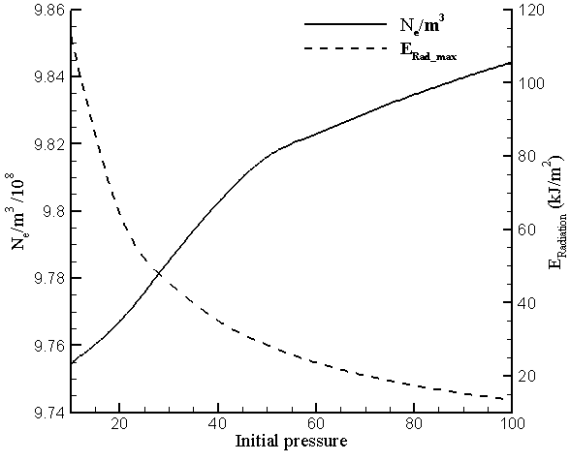

Fig. 15. 제논(Xe)의 압력에 따른 단위부피당 전자 몰수 그리고 최대 복사 에너지 플럭스 분포

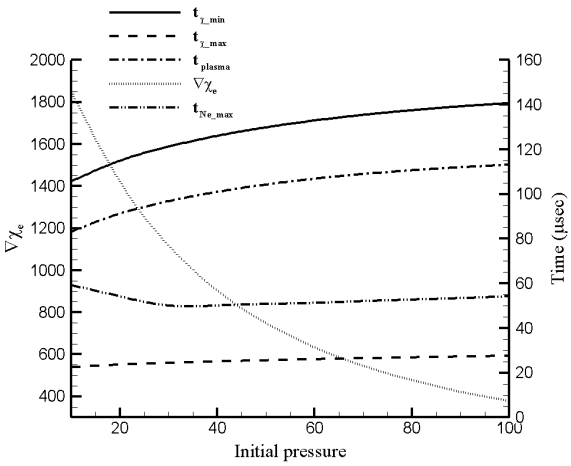

Fig. 16. 제논(Xe)의 압력에 따른 전자 몰분율의 변화율 및 이온화 특성 시간 분포

도달하는 시간, $t_{\chi_{min}}$의 상승이 크기에 플라즈마 지속시간이 증가함을 알 수 있다. 즉 초기 압력이 증가함에 따라 이온화 정도는 약해지지만 그 유지 시간은 길어짐을 의미한다. 그리고 플라즈마 유지 시간은 소폭 상승하는 반면 이온화 한계 값은 현저히 줄어들기에 전자몰분율의 변화율은 작아짐을 볼 수 있다.

마. 온도 비에 따른 이온화 특성

본 연구에서 폭발 후의 최종 압력과 초기 압력을 고정시킨 상태에서 폭발 후의 온도를 Table 2와 같은 조건으로 변화시키며 이온화 특성을 살펴보았다.

Fig. 17, 18은 폭발 기체와의 온도 비에 따른 제논(Xe)의 이온화 특성의 변화를 보여주고 있다. Fig. 17에서 온도 비가 증가함에 따라 전반적인 온도가 증가하기에 이온화 한계 값 및 최대 온도 값이 증가함을 알 수 있다. Fig. 18에서 단위 부피당 전자의 몰수의 경우 온도 비에 따라 전체 제논(Xe)의 몰수는 일정하지만 이온화 경향이 커지기에 증가함을 알 수 있으며, 전반적인 온도의 상승으로 최대 복사 에너지 플럭스 또한 증가함을 볼 수 있다.

Table 2. 구동 기체 온도에 따른 의존도 해석 조건

	압력	온도
Product Gas	100GPa	298.15～2981.5K
Xenon Gas	1MPa	298.15K

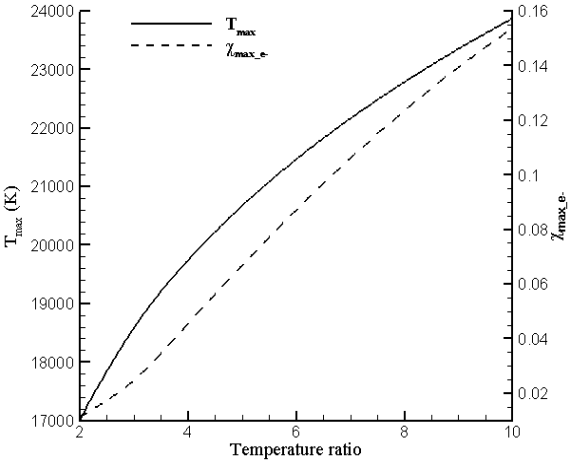

Fig. 17. 생성 기체와의 온도 비에 따른 최대 온도 및 이온화 한계 분포

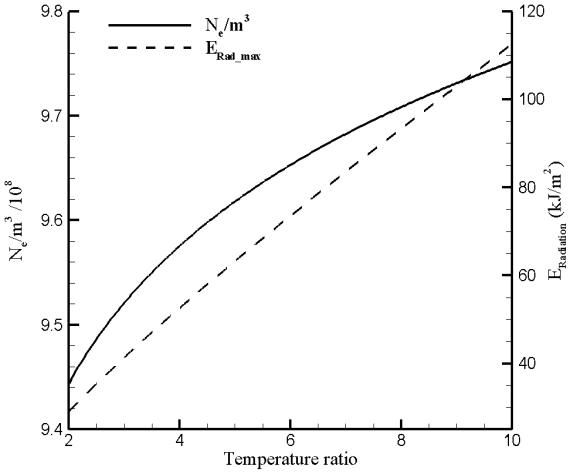

Fig. 18. 온도 비에 따른 단위부피당 전자 몰수 그리고 최대 복사에너지플럭스 분포

Fig. 19에서 온도 비에 따라 이온화 최소 지점에 도달하는 시간, $t_{\chi_{\min}}$은 상승하는 반면 이온화 한계에 도달하는 시간, $t_{\chi_{\max}}$은 감소하기에 플라즈마 지속시간은 증가함을 알 수 있다. 즉 온도 비가 증가함에 따라 이온화 경향이 크면서 그 유지 시간 또한 길어짐을 의미한다. 그리고 플라즈마 유지 시간의 상승률에 비해 이온화 한계 값의 상승률이 크기에 전자 몰분율의 변화율은 커짐을 볼 수 있다.

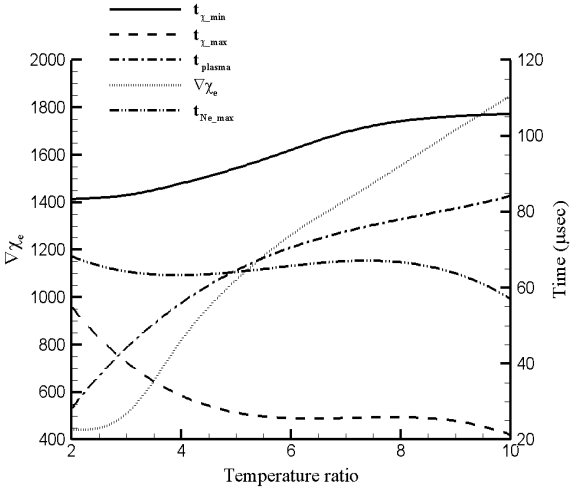

Fig. 19. 온도 비에 따른 전자 몰분율의 변화율 및 이온화 특성 시간 분포

5. 결 론

본 연구에서는 충격파 후방에서의 이온화 특성을 살펴보기 위해서 복사 효과가 고려된 1차원 압축성 유동 방정식과 국부 열평형 이온화 해석을 결합시켜 해석을 수행하였다. 연구는 실험 조건을 고려하여 제논의 초기 압력과 폭발 기체와의 온도 비를 통해 제논의 이온화 특성을 살펴보았다. 초기 압력이 증가함에 따라서 이온화 경향은 줄어들지만 약한 플라즈마 상태의 지속시간이 증가함을 알 수 있었으며, 폭발 기체와의 온도 비가 증가함에 따라선 전반적인 이온화 경향이 커짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 고에너지물질특화센터 연구과제(과제번호 HM-22)의 일부로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

Reference

[1] William C. Davis, Terry R. Salyer, “Explosive-driven Shock Waves in Argon”, Los Alamos National

Laboratory, Los Alamos, NM 87545 USA.

[2] McBride, B. J. and Gordon, S., "Computer Program for Calculating and Fitting Thermodynamic Functions", NASA/RP-1272, 1992.

[3] Gordon, S. and McBride, B. J., "Thermodynamic Data to 20 000 K for Monatomic Gases", NASA/TP -1999-208523, 1999.

[4] Roe, P. L. "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes", J. of Computational Physics, Vol. 43, pp. 357～372, 1981.

[5] Kim, S., Kim, C., Rho, O.-H and Hong, S. K., "Cures for the Shock Instability : Development of Shock-Stable Roe Scheme", Journal of Computational Physics, Vol. 185, pp. 342～374, 2003.

[6] Wada, Y and Liou, M.-S., "An Accurate and Robust Flux Splitting Scheme for Shock and Contact Discontinuities", SIAM Journal of Scientific Computing, Vol. 18, No. 3, pp. 633～657, 1997.

[7] Michael F. Modest, "Radiative Heat Transfer 2nd" Academic Press, 2003.