

폭발물 및 고체추진제 내의 충격파—화학반응 상호관계

김 기 봉

<한국과학기술원 기계공학과 교수>

1. 머리 말

폭발물 개발시에는 항상 다음과 같은 세가지 요건을 고려해 주어야 한다. 성능 : 주어진 체적 안에 얼마나 많은 화학에너지를 넣어줄 수 있는가?, 가격 : 얼마나 싸게 만들 수 있는가?, 안전도 및 신뢰도 : 얼마나 안전하게 다룰 수 있으며 필요할 때는 꼭 폭발이 된다는 보장이 있는가? 하는 문제들이다. 이들이 차지하는 중요성은 용도에 따라 각각 달라서 어떤 경우에는 가격, 다른 경우에는 성능, 또 다른 경우에는 안전 및 신뢰도가 가장 중요한 요건이 된다.

본 해설에서는 폭발물의 안전 및 신뢰도를 높이기 위하여 폭발물 내에 어떤 충격파가 주어졌을 때 어떠한 화학반응이 어떠한 경로를 통해 일어나는가에 관하여 이론적으로 고찰하고자 한다. 특히 요즘 고체추진제도 이의 성능을 높이기 위하여 추진제 합성에 HMX와 같은 파괴력이 강한 폭발물을 쓰는 연구가 활발하므로 이러한 고성능고체추진제의 안전도 연구도 같이 병행되고 있는 실정이다.

폭발물이 되기 위한 요구조건은, 첫째 필요할 때 외부에서 어떤 자극을 받으면 이에 따라 기계적인 에너지를 즉각 발생, 공급할 수 있어야 한다는 것과, 둘째 필요하지 않을 때에는 외부에서 웬만한 자극이 가해져도 반응하지 말아야 한다는 것이다. 외부에서 가해질 수 있는 자극의 종류에는 여러가지가 있다. 이들의 예로 정

전기, 마찰, 열 및 충격파를 들 수 있는데 이중 열과 특히 충격파만이 실제 폭발물 시스템 설계에 주로 사용되고 있다. 또 사실상 열이 폭발물에 주어진다해도 이로 한하여 일어나는 화학반응이 폭발물 내에 충격파를 유도해 내는 경우가 많다. 따라서 폭발물 시스템설계 시에는 충격파와 화학반응과의 상호작용 관계를 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다. 주어진 기하학적 모양의 폭발물내에 임의의 크기와 모양을 가지는 충격파가 진입하여 전파해 갈때 과연 이 충격파가 이상적인 Chapman-Jouguet(C-J) 폭발로 발전하여가며 이에 수반하는 C-J압력 및 이에 따르는 C-J파 측 Taylor 파를 가지게 될 것인지 혹은 이 충격파가 충분하지 못한 화학반응 때문에 종당에는 그 크기가 감쇠되어 없어져 버릴 것인지에 대한 종합적 체계적인 연구는 굉장히 어렵다. 이는 이 문제에 작용하는 인자(열역학적, 기계역학적, 물리적)가 너무 많기 때문이다. 이에 대한 실험적 연구는 2차대전 당시부터 원자탄내에 쓰이는 폭발물의 안전성을 보장하기 위하여 매우 활발하게 진행되기 시작하였으며 근래에도 수많은 복잡 정교한 무기의 개발과 또 매우 값비싼 이들의 수송체(항공모함, 신예 전투기 등)들의 안전을 위하여 활발히 진행되고 있다.

대표적인 실험방법들을 나열하여 보면 아래와 같다. NOL 간극실험(gap test)⁽¹⁾은 실험하고자 하는 폭발물을 원통형으로 가공한 후 역시 원통형으로 가공한 플라스틱(PMMA) 간극(gap) 위

에 올려 놓은 후 그 밑에 표준 모양의 표준 폭발물을 장치하여 폭발시켰을 때 이 표준 폭발물을 통하여 지나간 2차원적인 C-J 폭발파가 플라스틱을 통하여 가면서 약화되어 실험 폭발물에 도달하여 반대쪽으로 통과하여 나가는 동안 과연 이 실험 폭발물 안에도 C-J 폭발이 일어났는가를 측정하고 이 결과를 플라스틱 간극의 두께와 함수관계를 표시한 것이다.

쐐기실험(wedge test)⁽²⁾은 실험하고자 하는 폭발물을 쐐기(wedge) 모양으로 가공하며 여기에 위와 비슷한(그러나 커다란) 표준 폭발물 및 간극을 통하여 1차원적인 C-J 폭발을 공급한 후 이 쐐기 위에 역시 1차원적인 C-J 폭발이 발생되는 곳을 측정하여 이것과 입력 압력과의 함수관계를 표시한 것이다.

발달실험(thin foil test)⁽³⁾은 1차원적인 실험 폭발물 위에 얇은 알루미늄막을 고속으로 충돌시켜 이때에 폭발물 속에 전파되어가는 짧은 기간(0.05~0.1μsec)의 충격파의 크기와 시간을 C-J 폭발 발생여부와 함수관계를 표시한 것이다.

이상 열거한 실험들은 두가지 큰 결점을 보유하고 있다. 첫째, 한번 실험에서 하나의 데이터점밖에 얻지 못한다는 것이며 이 결점은 전기한 바와 같이 굉장히 복잡한 충격파-화학반응 상관관계를 자세히 이해하지 못하게 하는 결정적인 요건이다. 또 하나는 위의 실험이 다 어떤 주어진 충격파의 모양 몇 가지만 취급할 뿐 주어지는 충격파의 모양이 조금이라도 달라지면 어떻게 될지에 대해 예측을 불가능하게 한다. 요새에는 망가낸 재지를 사용하여 폭발물내의 충격파의 발달 혹은 쇠퇴현상을 여러 곳에서 시간의 함수를 측정하여⁽⁴⁾ 위의 결점을 보완하고 있으나 경제적인 문제를 만족할만큼 널리 쓰이지 못하고 있다.

약 40여년 동안 이와 같은 실험을 통해 현재는 여러가지 폭발물에 대하여 방대한 자료가 수집되어 있으나 이들 실험결과를 뒷받침하여 줄 이론적 모델의 개발은 그동안 별로 활발치 않았다. 그 주된 이유는 보통 폭발물이 여러가지 재료들로 배합된 복잡한 물질로서 이의 점화 및

화학 반응은 각 재료 입자들간, 입자들과 이들을 붙들어 주고 있는 결합체(binder)와의 사이, 또 이들과 조그마한 기공들과의 기계적인 상호작용, 이에 따르는 열의 생성, 온도의 증가, 열 전달, 초기화학반응 및 계속되는 연소현상을 미시적으로 해석해 주어야 하는만큼 이것이 너무 복잡하기 때문이다. 그러던 중 약 10년 전부터 간단한 모델들이 개발되기 시작하였는데 아래에 이 중 몇가지 대표적인 모델들을 설명하여 이들의 장단점을 간단히 비교하고 최근에 개발된 모델 한가지를 증점적으로 소개하고자 한다.

2. 이론 모델들

2.1. Forest Fire 모델⁽⁵⁾

현재 가장 많이 쓰이고 있는 Forest Fire 모델은 첫째 모델자체가 간단하다는 것과, 둘째 이 모델이 많은 폭발물들에 대하여 개발되어 있다는 장점이 있다.

이 모델은 화학반응식을 다음과 같이 표시한다.

$$\frac{1}{(1-\lambda)} \frac{d\lambda}{dt} = \exp(C_0 + C_1 P + C_2 P^2 + \dots + C_n P^n) \quad (1)$$

여기서 λ 는 화학반응도로써 반응이 전혀 없을 때 $\lambda=0$ 이고 반응이 끝났을 때 $\lambda=1$ 이 된다. t 는 시간이고 P 는 폭발물내의 압력이며 C_0, \dots, C_n 는 실험상수로서 쐐기 실험의 결과를 이용하여 구한다. 식 (1)에서와 같이 이 모델은 어떤 주어진 폭발물안의 어떤 곳의 어떤 때의 화학반응속도는 그곳의 그때 당시의 압력에만 의존한다는 몹시 간단한 가정(예를 들어 그곳의 온도의 영향을 무시하였고, 또 그 압력이 그러한 크기로 증가 내지 감소한 과정이 폭발물에 미치는 영향을 전혀 무시)이 기초가 되고 있으며 이 기초 위에 실험상수들을 도입한 것이다.

따라서 이 모델의 단점은 어떤 주어진 폭발물이 여러가지 다른 종류의 압력과 혹은 충격파를 받을 때 이들을 다르게 취급하여 줄 능력이 없는 것이다. 예를 들어 Setchell⁽⁶⁾은 실험에서 같

은 크기의 충격파(5.1 Gpa)라 할지라도 그 충격파의 앞부분의 경사가 급한가 완만한가에 따라 PBX-9404*의 화학반응이 달라짐을 보였는데 위 Forest Fire 모델은 이 현상을 설명할 수 없다.

2.2. IAG 모델⁽⁷⁾

상기 Forest Fire 모델의 부족한 점을 보완하기 위하여 Lee와 Tarver는 화학 반응속도를 미시적인 관점으로부터 기술하여야 하겠다는 취지 아래 고온부위(hot spot)의 개념⁽⁸⁾을 도입하였다. 즉, 충격파하의 폭발물내에서는 화학반응이 모든 곳에서 균등하게 일어나는 것이 아니고 특별한 기계적 변형에 의하여 다른 곳보다 일찍 뜨거워지는 곳(고온 부위)이 있으며 이 곳에서 점화가 먼저 일어나면 이 곳을 중심으로 연소현상이 전파해 나갈 것이라는 개념이다. 따라서 IAG 모델은 화학 반응 속도식을 두개의 다른 항(점화항과 연소전파항)으로 나누어 취급하였다.

이에 따르면 화학반응속도는

$$\frac{d\lambda}{dt} = A(1-\lambda)^{2/3}\eta r + B(1-\lambda)^{2/3}\lambda^{2/3}Pz \quad (2)$$

로 표시될 수 있다. 여기서 $\eta = V_0/V_1 - 1$, V_0 는 폭발물의 초기 비체적, V_1 는 압축된 폭발물의 비체적이며 A , r , B , z 는 망가닌 게이지 실험결과에 의해 선택 결정되는 상수들이다. 식 (2)의 첫번째 항은 초기 점화현상을 대표하고 둘째 항은 이에 따르는 연소전파 현상을 대표한다.

이들의 모델의 부족점은 다음과 같다. 첫째, 점화항(첫째항)의 표기에 대한 이론적인 근거가 불충분하다는 것이다. 둘째, 충격을 받은 폭발물의 η 가 P 에만 의존한다는 것[고체내의 등엔트로피선과 충격선(hugoniot 선)은 낮은 압력하에서(10만 기압이하) 거의 일치하기 때문]을 감안하면 이 모델 역시 화학반응속도는 압력에만 의존한다는 결론을 내릴 수 있고 따라서 위에 언급한 Setchell의 실험결과를 설명할 수 없는 것이다.

2.3. Sandia 모델⁽⁹⁾

위 IAG 모델의 장점(점화와 후속반응을 분리

하여 고려한 점)을 취하고 단점을 보완하기 위하여 Sandia 모델이 개발되었다. 이 모델은 화학반응이 일어나고 있는 폭발물을 미시적으로 관찰하면 이 안에 세계의 각각 다른 상(phase)이 존재한다고 가정하였다. 즉, 폭발물 자체, 폭발물을 붙들고 있는 결합제 및 이들의 화학반응으로 인하여 생겨난 기체들이다. 이 모델은 각각의 상이 각각 다른 온도와 압력을 가지고 서로 질량, 모우멘텀 및 에너지를 교환한다는 이론하에 개발되었는데 이 모델의 계산은 PBX-9404에 행하여진 여러가지 실험결과와 상당히 잘 일치한다. 특히 변형을 거치는 폭발물내의 기계역학적, 열역학적인 고려가 되어 있으므로 위에 언급된 Setchell의 실험결과도 설명할 수 있다. 그러나 이 모델이 가지는 큰 단점은 각 상내에 공간적으로 균일한 온도가 존재한다는 가정을 사용함으로써 국소 고온부위의 개념을 흐리게 만들었다는 것이다. 즉 폭발물 자체내의 온도 분포를 고려하지 않고 있어서 이에 따르는 점화 및 화학반응을 고려해 줄 수 없다는 것이다. 가령 극단적인 경우를 가상하여 이 모델에 의하면 결합제가 없는 폭발물에서는 고온부위가 생길 수 없다는 결론이 나온다.

이 외에도 DAGMAR 모델⁽¹⁰⁾ 등이 알려져 있으나 잘 사용되지 않고 있다.

3. 새로운 모델

상기 여러 모델들을 비교해 보면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 충격하의 폭발물 내의 화학반응을 기술하는 이론적인 모델은 고온부위의 개념을 물리적으로 설명해 줄 수 있어야 하겠다는 것이다. 다시 말하면 폭발물내의 기계적 변형을 미시적으로 고려해야 하고(점소성변형 포함) 이에 따르는 시간적 공간적 온도분포를 정확히 기술할 수 있어야 한다. 그러면 이 모델을 두항으로 나누어 (IAG 모델과 같은 개념) 온도증가에 따르는 화학반응의 시작을 점화항으로 표시하고 일단 화학반응이 진행된 후에는 표면 연소현상항을 추가하는 것이 좋은 방법이 될 것이다.

이러한 근본 개념하에 개발된 모델(11)(12)을 다음에 제시한다.

3.1. 고온부위의 기하학적 모델

어떤 폭발물에 충격파가 주어지면 폭발물내의 비균일지역(non-uniform region, 기공주위 포함)에서 기계적인 변형이 일어나는데 이 기계적인 변형에는 여러가지가 있다. 폭발물 입자들의 분쇄, 분쇄된 소형입자들의 이동, 마찰, 이들 소형입자들의 기공내로의 분사(microjetting), 기공반대면 표면에서의 충격, 기공주위의 탄, 점소성 변형등이다. 이 복잡한 형상에서 일어나는 현상을 매 기공마다 계산하여 폭발물 전체의 기공을 모두 합친다는 것은 불가능하므로 이것을 간단화하는 다음과 같은 가정들이 필요하다.

첫째, 각 기공들은 폭발물내에 균일하게 분포되어 있고 크기가 일정하다. 이 가정에 의한 한 개의 기공주위의 기계적 변형현상만 올바르게 계산하면 그것으로 근접지역의 폭발물 전체의 행동을 대표할 수 있을 것이라는 것이다.

둘째, 각 기공을 반경 r_i 의 구(sphere)로 가정하고 그 기공 주위의 폭발물은 그 기공을 둘러싸는 반경 r_o 의 동심구(concentric sphere)로 가정한다. 그러면 폭발물의 기공도 ϕ 는 $(r_i/r_o)^3$ 으로 표시할 수 있다(그림 1 참조).

셋째, 기공 주위의 변형은 등방성이다.

넷째, 기공 주위 폭발물의 기계적 변형은 탄, 점소성변형을 하는 것으로 표시된다.

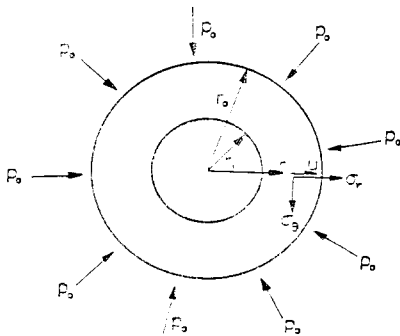


그림 1 동심구 모델(P_0 는 외부 충격파의 크기, r_o 는 동심구 외부반경, r_i 는 내부반경, r 는 공간좌표, u 는 변위, σ_r 는 반경방향응력, σ_t 는 원주방향응력이다)

다시 말하면 충격파하의 폭발물내의 고온부위 생성과정은 그림 1과 같은 동심구가 충격파 크기 P_0 를 외부로부터 받았을때 탄, 점소성 축소 변형을 일으키는 것을 기술함으로써 설명할 수 있으며 이 변형에 의하여 얻어지는 기계적 에너지가 곧 온도증가와 직결된다고 가정한다. 변형 시간이 짧으므로 열전도 효과는 무시한다.

이 결과를 식으로 표시하면 다음과 같다. (11)

$$\Delta T_{M.D.} = \frac{9}{4\rho C_p} \int_0^t \frac{\gamma(P_0 - P_e - 2/\sqrt{3} k \ln \frac{1}{\phi})^2 \gamma_i^6}{(1-\phi)^2 \gamma^6 k} dt \quad (3)$$

여기서 $\Delta T_{M.D.}$ 는 기계적 변형에 의한 시간과 공간의 함수로 표시되는 동심구 내의 온도 증가 분포이고, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, γ 는 γ_i 에 비례하는 상수, P_e 는 기공내의 기체 압력, k 는 전단항복응력이다. 이 온도증가는 점소성변형에 의한 것이며 동심구 내경에서 가장 크고 외경에서 가장 작으며(γ^6 에 반비례), 시간에 따라 증가하는 단조함수임을 알 수 있다. 동심구 내경의 온도가 가장 크다 함은 그곳에서 기계적 변형이 제일 컸음을 뜻하며, 고온부위의 개념과 일치한다. 식 (3)이 내포하는 뜻은 다음과 같다. 즉 충격하의 폭발물내에 일어나는 기계적 변형에 의한 온도증가는 시간과 공간의 함수로서 완전히 표시되며 이에 따라 부수적으로 일어나는 열전도 및 화학반응을 계산할 수 있고 또 이에 따라서 일어나는 온도변화 영향까지 고려하여 준다면 전체적인 온도증가까지도 시간과 공간의 함수로써 표시할 수 있다는 것이다. 왜냐하면 열전도 및 화학반응 역시 온도만의 함수이기 때문이다.

동심구내의 초기(열전도무시) 화학반응율의 분포를 나타내는 $\dot{\alpha}(r, t)$ 는 따라서 Arrhenius 화학 반응식에 의해 표시될 수 있으며 또 이에 따라 하나의 동심구 전체(따라서 수많은 기공을 포함하는 주위의 폭발물 전체)의 개괄적인 화학 반응율은 $\dot{\alpha}(r, t)$ 를 공간에 따라 적분함으로써 얻을 수 있다. 이것이 바로 우리가 원하는 점화 항 $\dot{\lambda}(t)_{ign}$ 이 된다.

$\dot{\lambda}(t)_{ign}$ 을 다시 설명하면 폭발물이 충격파를 받았을 때 초기에 일어나는 기계적 변형에 의한 온도증가와 이에 따르는 화학반응율을 하나의 기공 주위에 표시하고 이를 공간적분하여 그 기공 주위의 개괄적 화학반응율로 나타내었으며 이미 제시한 가정에 의하여 이것이 그 근처 폭발물 전체의 화학반응(점화)을 표기한 것으로 대표되는 것이다.

그러면, 일단 이러한 점화가 일어난 다음에는 어떠한 현상이 뒤따를 것인가? 위의 모델을 계속하여 사용하면 다음과 같은 물리적 현상을 생각할 수가 있을 것이다. 초기에 기계적 변형에 의한 온도증가($\Delta T_{M.D.}$)에 크게 의존하였던 온도분포는 시간이 흐름에 따라 화학반응에 의한 온도증가($\Delta T_{C.R.}$)에 더욱더 의존하게 되며 따라서 온도 구배가 급격히 증가하게 되어 그 이후부터는 온도분포의 계산에는 앞에서 누락되었던 열전도항이 포함되어야 하며 결국에는 열전도와 화학반응이 서로 경쟁하게 되고 결국 $\Delta T_{M.D.}$ 는 중요하지 않게 될 것이다. 열전도를 적절히 고려하면서 화학반응율을 계산하는 것은 컴퓨터 시간을 엄청나게 소비하는 것으로서 간단한 모델형성에 부적합하다. 따라서, 현 모델에서는 IAG 모델과 같이 이러한 현상을 종합하여 간단한 실험식으로 표기한 표면연소(surface burning, or surface regression) 현상으로 대체하여 표기하였다. 이 항을 $\dot{\lambda}(t)_{growth}$ 라 부르면 전체 화학반응률 $\dot{\lambda}(t)$ 는

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{\lambda}(t)_{ign} + \dot{\lambda}(t)_{growth} \quad (4)$$

으로 표시된다.

상기 모델을 사용하여 충격파의 폭발물내의 화학반응 진행과정을 수치적으로 계산하기 위하여 1차원 수력학(hydrodynamic) 컴퓨터 코드를 사용하였다.

3.2. 계산결과 및 고찰

상기 모델은 네개의 미지상수를 포함하고 있다. 이들 네 상수는 실험치와 비교하여 얻어질 수 있다. 이들을 구하기 위하여 쓰여진 실험결과가 그림 2에 주어졌다. 그림 2는 평판모

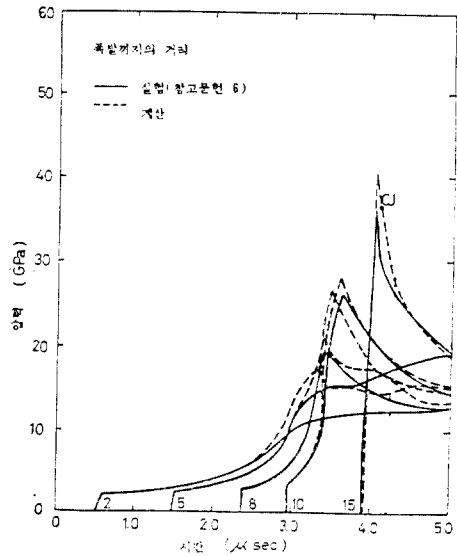


그림 2 2.5 GPa로 들어온 충격파의 발전 경향, 들어온 면으로부터 2mm, 5mm, 8mm, 10mm와 15mm 지점에서의 압력변화가 시간의 함수로 표시되어 있다(15mm 지점에서는 이미 C-J detonation이 보인다)

양의 폭발물 PBX-9404에 2만 5천기압(2.5 GPa)의 수직 충격파가 가해졌을 때 폭발물 내 각 점에서의 압력을 시간에 따라 구한 결과와 상기 모델을 사용하여 계산한 결과를 비교한 것으로 2.5GPa의 충격파가 이상적인 C-J 폭발로 성장해 가는 과정이 나타나 있다. 그림을 보면 충격파가 들어온 곳에서 제일 앞에서 가깝게 (2mm) 위치해 있는 곳의 화학반응 속도는 느리고

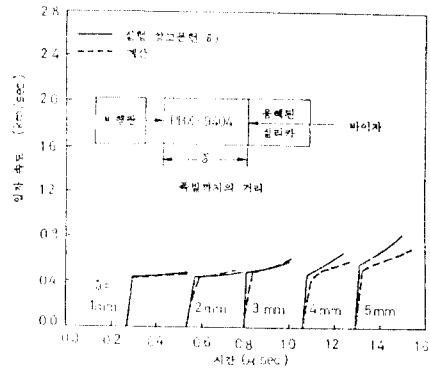


그림 3 3.7 GPa의 수직충격파가 주어졌을 때 PBX-9404와 fused silica 사이의 경계면이 움직이는 모습(PBX-9404의 두께 δ 가 변수이다)

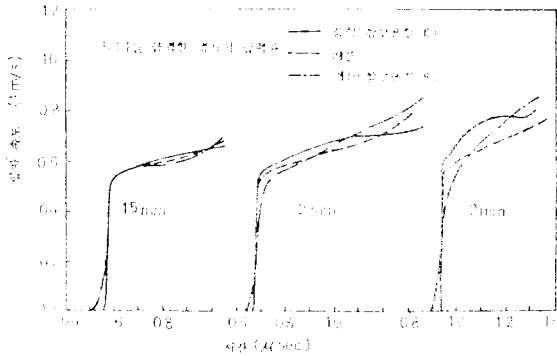


그림 4 그림 3과 비슷한 실험장치에 5GPa의 급격한 경사파가 주어졌을 때의 경우

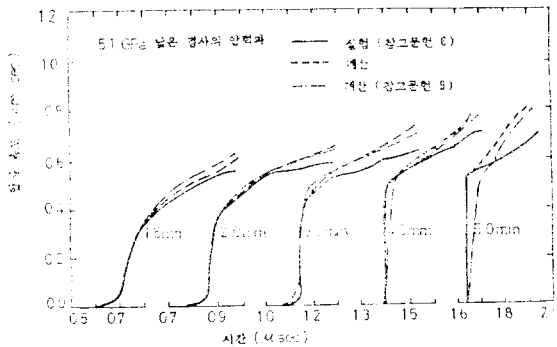


그림 5 그림 3과 비슷한 실험장치에 5.1GPa의 완만한 경사파가 주어졌을 경우

(충격파가 들어온 후 압력증가 속도가 느림), 뒷 쪽으로 가면 갈수록 앞쪽에서의 화학반응의 결과가 조금씩 뒷쪽으로 전달되어감에 따라 안쪽에도 달한 충격파의 크기가 점차 증가하면서 화학반응속도(압력증가율)가 커지는 것을 볼 수 있다.

이 모델을 사용하여 다른 실험결과를 얼마나 잘 예측할 수 있는지 비교한 것이 그림 3~5에 나타나 있다.

그림 3은 PBX-9404에 3.7GPa의 수직 충격파를 1.1μsec 동안 가할때 충격파를 받는 면에서 δ만큼 떨어진 지점의 입자의 속도를 바이자(VISAR) 측정장치를 이용하여 시간에 따라 실험한 결과를 계산결과와 함께 표시한 것이다. 이 그림을 살펴 보면 충격파의 도달 시간 및 형태가 초기에는 근사하게 비교되고 있는 것을 알 수 있으며 일단 화학반응이 얼마 진행한 후에는 (4.5mm 지점) 실험치가 이론치보다 약간 커지

는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 PBX-9404에 최대압력 5.0GPa, 상승시간 0.3μsec의 급격한 경사 압력파(ramp wave)가 주어졌을 때 폭발물 내부의 1.5, 2.0, 3.0mm 지점의 입자의 속도를 시간에 따라 측정 한 Setchell의⁽⁶⁾ 실험결과와 상기 모델의 계산 결과를 비교한 것이며 그림 5는 상승시간 0.8μsec의 완만한 경사 압력파가 주어졌을때 1.5~5.0mm 사이의 입자의 속도를 비교한 것이다. 그림 4와 5 모두 실험과 이론의 결과가 특히 초기 부분에서 잘 일치함을 알 수 있으며 후기 부분에 약간 오차가 생기는 것을 알 수 있다. 특히 주의할 것은 그림 3의 경우와는 반대로 이론치가 실험치보다 커지는 것이 보인다.

종합하여 보면 그림 2의 비교도는 IAG 모델의 비교도에 비해 낮거나 같다고 할 수 있으며 그림 3~5의 비교도는 Sandia 모델의 비교도와 같다고 할 수 있다.⁽¹²⁾ 화학반응 후기에 보이는 오차는 표면연소항에 기인하는 것으로 추정할 수 있으며 IAG, Sandia, 그리고 현 모델 모두가 앞으로의 연구해야 할 과제로 남아 있다.

4. 맺음 말

충격파에 의해 폭발물에 일어나는 화학반응 진행현상을 Forest Fire 모델과 함께 고온 부위에 의한 점화와 표면연소자는 현상학적인 근거 위에 개발한 모델 두가지(IAG, Sandia)를 설명 하였고 이 위에 고온부위 개념에 물리적인 설명을 부여한 새로운 모델을 소개하였다. 나중 세 가지 모델들을 PBX-9404에 대한 여러가지 실험결과와 비교하였는 바 화학반응 초기의 압력 증가현상은 주로 점화항(고온 부위에 의한)에 기인하는 것으로써 모두 만족할만한 결과를 보여주고 있으며 후기의 현상은 실험치와 약간 달라지는 것(크거나 혹은 작거나)이 보인다. 이 오차가 과연 어느만큼 실험 오차이며, 또 어느만큼이 모델 오차인지에 대하여는 아직 자료의 불충분으로 확정지어 말할 수 없다. 예를 들어 그림 4에서는 실험결과가 이론결과 보다 압력을

더 큰 것으로 나타내고 있으며 그림 5에서는 그 반대 현상을 보인다 앞으로 이 방면에 더 연구가 진행되어야 하리라고 고려되며 연후에 이 모델들을 다른 폭발물에 적용시켜 일반화시키는 일이 남아 있다.

참 고 문 헌

- (1) T.P. Liddiard and J.W. Forbes, "Initiation of Burning and Detonation in Cast H-6 and Cast PBXW-109," Proceedings of 7th Symposium on Detonation, p. 308ff, 1981
- (2) C.L. Mader, *Numerical Modeling of Detonations* Univ. of Calif. Press, p. 211, 1979
- (3) E.F. Gittings, "Initiation of a Solid Explosive by a Short-Duration Shock," 4th Symposium on Detonation, p. 373ff, 1965
- (4) A.B. Anderson, M.J. Ginsberg, W.L. Seitz and J. Wackerle, "Shock Initiation of Porous TATB," Proceedings of 7th Symposium on Detonation, p. 385 ff, 1981
- (5) C.L. Mader, *Numerical Modeling of Detonation*, Univ. of Calif. Press, p. 208ff, 1979
- (6) R.E. Setchell, "Ramp-Wave Initiation of Granular Explosives", *Combustion and Flame*, 43, p. 255ff, 1981
- (7) E.L. Lee and C.M. Tarver, "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives," *Phys. Fluids*, 23(12), p. 2362ff, 1980
- (8) F.P. Bowden and A.D. Yoffe, *Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids*, Cambridge Univ. Press, 1952
- (9) M.E. Kipp, J.W. Nunziato and R.E. Setchell, "Hot Spot Initiation of Heterogeneous Explosives", Proceedings of 7th Symposium on Detonation, p. 394 ff, 1981
- (10) J. Wackerle and A.B. Anderson, "On the Shock Initiation of Heterogeneous Explosives," *Bull. APS Series II*, 24, p. 718, 1979
- (11) K. Kim, "Shock Sensitivity of Energetic Materials" Proc. of JANNAF Propulsion Systems Hazards Meeting, p. 277ff, 1980
- (12) K. Kim and C.H. Sohn, "Modeling of Reaction Buildup Process in Shocked Porous Explosives," to be Presented at 8th Symposium on Detonation, 1985, Albuquerque, N.M.

