

연강 판재에 대한 연강 구의 고속경사충돌 수치해석

유요한[†] · 장순남* · 정동택**

(2001년 9월 21일 접수, 2001년 12월 11일 심사완료)

Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impact of Mild Steel Spheres Against Mild Steel Plates

Yo-Han Yoo, Soon-Nam Chang and Dong- Teak Chung

Key Words : Explicit Time-Integration Finite Element Method(외연적 시간적분 유한요소법), Oblique Impact(경사충돌), Ballistic Limit(방탄한계), Eroding Condition(소진조건)

Abstract

A three-dimensional Lagrangian explicit time-integration finite element code for analyzing the dynamic impact phenomena was developed. It uses four node tetrahedral elements. In order to consider the effects of strain rate hardening, strain hardening and thermal softening, which are frequently observed in high-velocity deformation phenomena, Johnson-Cook model is used as constitutive model. For more accurate and robust contact force computation, the defense node contact algorithm was adopted and implemented. In order to evaluate the performance of the newly developed three-dimensional hydrocode NET3D, numerical simulations of the oblique impact of mild steel plate by mild steel sphere were carried out. Ballistic limit about various oblique angle between 0 degree and 80 degree was estimated through a series of simulations with different initial velocities of sphere. Element eroding by equivalent plastic strain was applied to mild steel spheres and targets. Ballistic limits and fracture characteristics obtained from simulation were compared with experimental results conducted by Finnegan et al. From numerical studies, the following conclusions were reached. (1) Simulations could successfully reproduce the key features observed in experiment such as tensile failure termed "disking" at normal impacts and outwards bending of partially formed plug segments termed "hinge-mode" at oblique impacts. (2) Simulation results for 60 degrees oblique impact at 0.70 km/s and 0.91 km/s were compared with experimental results and Eulerian hydrocode CTH simulation results. The Lagrangian code NET3D is superior to Eulerian code CTH in the computational accuracy. Agreement with the experimentally obtained final deformed cross-sections of the projectile is excellent. (3) Agreement with the experimental ballistic limit data, particularly at the high-obliquity impacts, is reasonably good. (4) The simulation result is not very sensitive to eroding condition but slightly influenced by friction coefficient.

1. 서론

고속 비행하는 금속과 금속, 금속과 비금속 재료간의 충돌 및 파괴현상 연구는 장갑차량 설계,

항공기 설계 등 방위산업, 항공우주산업의 기반이 되는 주요 핵심 기술로서 이에 대한 연구방법은 크게 실험적 방법(experimental method), 해석적 방법(analytical method), 수치모사 방법(numerical simulation method)으로 나눌 수 있다.^(1,2) 이 분야의 연구는 기본적으로 실험적 방법에 주로 의존하여 왔으나 많은 비용과 인력, 시간이 소요되는 단점이 있어 해석적 방법이나 수치모사방법을 활용하고자 노력하여 왔다. 해석적 방법은 에너지나 힘을 평형을 고려하여 1 차원적으로 모델링하는 방

† 책임저자, 회원, 국방과학연구소 제 1 체계개발본부
E-mail : yyh1986@add.re.kr

TEL : (042)821-4629 FAX : (042)821-2221

* 국방과학연구소 제 1 체계개발본부

** 회원, 한국기술교육대학교

법으로 비교 데이터가 존재하고 충돌 및 파괴 메커니즘을 비교적 잘 이해하고 있는 경우에 적용할 수 있는 방법으로 계산량이 적어 시스템의 개념설계 단계에서 잘 활용될 수 있는 방법이다. 그러나 해석적 방법은 주요 특성을 잘 알지 못하는 새로운 영역의 문제해석에 적용하기 곤란한 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 수치모사방법은 실제 물리적 현상을 지배하는 지배방정식을 공간과 시간에 대하여 이산화(discretization)하여 물리적 현상을 컴퓨터 상에서 재현 또는 모사하는 방법으로 충돌 및 파괴 메커니즘의 주요 특징을 미리 파악할 필요없이 새로운 형태의 문제를 비교적 신뢰성 있게 해석할 수 있다. 그러나 실제 상황과 유사한 정도로 모사하기 위하여 많은 계산시간과 컴퓨터 자원을 필요로 하는 단점을 지니고 있다. 그러나 컴퓨터 계산 비용은 지속적으로 감소될 것으로 예상되며 궁극적으로 실제실험에 의존하던 대부분의 연구개발활동을 컴퓨터상에서 수행하는 수치실험(numerical experiment)이 가능해질 것으로 예상된다.

고속 충돌 및 파괴해석에 사용되는 수치해석 방법은 크게 4 가지로 분류할 수 있다.⁽³⁾ 첫째, 재료에 고정된 좌표를 이용하여 시간의 변화에 따라 물체의 유동을 기술하는 라그랑지안(Lagrangian) 방법, 둘째, 공간에 고정된 좌표를 이용하여 시간의 변화에 따라 물체의 유동을 기술하는 오일러리안(Eulerian) 방법, 셋째, 재료에 고정된 요소대신 자유로이 움직일 수 있는 절점을 이용하면서 라그랑지안 방법의 장점을 취하는 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 방법,⁽⁴⁾ 넷째, 라그랑지안 방법과 오일러리안 방법을 혼합하여 사용하는 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법이 있다. 이상 4 가지의 수치해석 방법에는 각각의 장단점이 있으며 적용되는 충돌 속도 범위도 각각 다르다.

고속변형 및 충돌해석에 사용하기 위하여 유 등은 라그랑지안 기반의 외연적 시간적분 유한요소 프로그램 NET2D 를 개발하여 2 차원 고속변형 문제^(5,6) 및 고속충돌에 의한 파괴문제^(7,8)를 해석한바 있다. 본 논문에서는 3 차원 고속충돌 및 파괴 해석이 가능하도록 개선된 NET3D 를 사용하여 연강으로 만들어진 구 관통자와 얇은 판재 표적 사이의 충돌 현상을 해석한 후 실험 결과와 비교, 분석하여 NET3D 의 적용성과 신뢰성을 평가해 보고자 한다. 논문의 구성은 수치해석에 사용된 NET3D 프로그램의 개요, 강구와 강판의 충돌문제 수치해석 모델링 과정, 그리고 수치해석 결과 및 분석 등으로 이루어진다.

2. 수치해석 프로그램

2.1 유한요소 수식화

대부분의 3 차원 동적 해석 코드(LS-DYNA3D, EPIC3D)에서는 8 절점 6 면체 요소를 많이 사용하고 있다. 이러한 요소는 비압축성인 상태에서 재료의 유동에 의한 대변형을 받을 때 체적잠김(volumetric locking)을 피하기 위해 1 점 적분 방법을 사용한다. 그러나 6 면체 요소에서 1 점 적분을 사용하게 되면 모래시계 모드(hourglass mode)가 발생할 수 있으며 이를 제거하기 위해 모래시계 제어(hourglass control)를 사용하여 요소의 거동을 안정화 시켜야 한다. 그러나 4 면체 요소를 사용하게 되면 이러한 별도의 요소 안정화가 필요하지 않는 장점이 있다. 또한 6 면체 요소는 요소망 생성에 있어 현재 기술로는 요소망 자동 생성이 어렵다는 단점이 있다. 외연적 시간적분 유한요소 프로그램에서는 요소망의 균일한 정도가 결과에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있으므로 요소망 자동 생성이 어려운 6 면체 요소를 사용하게 되면 임의의 형상에 대해 균일한 요소망을 얻기가 곤란한 단점이 있다. 또한 6 면체 요소의 경우 하나의 면을 이루는 4 개의 절점이 한 평면 위에 있지 못하기 때문에 마스터면(master surface)을 정의하고 침투 여부를 결정하기가 어렵게 되어 접촉력 처리에 어려움이 생기게 된다. 4 면체 요소는 3 개의 절점이 한 면을 이루기 때문에 마스터면을 정확하고 쉽게 정의할 수 있으며 침투 여부를 결정하기도 쉬워진다.

이상의 단점 때문에 4 면체 요소를 사용한 3 차원 해석 코드를 개발하려는 노력이 계속되어 왔다. 그러나 4 면체 요소의 표준 수식화 과정(standard formulation)을 따르게 되면 체적잠김이 발생하게 되므로 이를 피하기 위해서 압력(pressure)을 독립 변수로 처리한 속도-압력 혼합정식(velocity-pressure mixed formulation)이 사용되고 있다. 속도-압력 혼합정식을 사용할 때 속도와 압력의 내삽함수(interpolation function)는 Babuska-Brezzi 조건을 만족시켜야 하는데 4 면체 요소에서는 이 조건을 만족시키기 위해서 버블 절점(bubble node)을 사용하는 방법이 쓰여지기도 한다. 그러나 버블 절점을 사용하게 되면 내삽함수에 고차항이 들어가게 되는 문제가 발생한다. 이러한 제약을 피하기 위해서 Zienkiewicz 등⁽⁹⁾은 새로운 혼합정식화 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 Zienkiewicz 가 제안한 방법을 사용하여 4 면체 요소를 사용한 3 차원 해석 코드를 개발하였다.

4 절점 4 면체 요소에 Zienkiewicz 가 제안한 혼합 정식을 적용하면 압력과 속도에 같은 내삽 함수를 사용한다. 이 때 사용되는 내삽 함수는 1 차 함수이기 때문에 적분점이 하나이더라도 의사 모드(spurious mode)가 발생되지 않는다. 속도는 전방 차분 방법(forward difference scheme)으로 적분하고 변위는 후방 차분 방법(backward difference scheme)으로 적분하는 수정 중앙 차분 방법(modified central difference scheme)⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 시간증분(time step) 크기는 모든 요소들의 최대 시간증분 크기를 계산하여 그 중에서 최소값을 사용한다. 요소가 소진된 요소와 소진 중인 요소는 계산에서 제외하였다. 4 절점 4 면체 요소를 사용하게 되면 모래시계 모드 제어와 같은 추가적인 안정화가 필요 없다. 하지만 외연적 시간 적분 해석 프로그램에서 발생할 가능성이 있는 불안정한 거동을 제거시키기 위하여 인공점성(artificial viscosity)을 NET3D 에 적용하였다.

2.2 응력 속도 및 응력 갱신

구성 모델(constitutive model)은 기준 좌표계(reference frame)의 변화에 상관없이 적용되어야 하며 그러기 위해서는 구성 모델의 모든 물리적인 양들은 모두 객관성(objectivity)을 가져야 한다. 객관적으로 변환되기 위해서는 구성 모델에서 응력의 물질 시간 도함수(material time derivative) 대신 객관적인 응력 속도를 사용해야 한다.

객관적인 응력 속도(objective stress rate)에는 Jaumann 속도와 Green-Naghdi 속도 그리고 Truesdell 속도가 있다. 이러한 속도들 중에서 Truesdell 속도는 소성 변형을 기술하기 어려운 면이 있으며 Jaumann 속도는 kinematic hardening 재료의 단순 전단에서 비정상적인 응력의 진동을 발생시키는 단점이 있다.⁽¹¹⁾ 이상의 문제 때문에 NET3D 에 Green-Naghdi 속도를 선택하여 사용하였다. 극분해(polar decomposition)와 Green-Naghdi 속도를 이용한 응력 갱신 알고리즘(stress update algorithm)은 Taylor 와 Flanagan⁽¹⁰⁾의 방법을 사용하였다.

2.3 접촉 알고리즘

고속 대변형 문제의 해석에서 안정적이고 정확한 해석을 위해서는 재료 모델이나 유한 요소 정식과 더불어 접촉력 처리가 매우 중요하다. 특히 요소가 소진되어 외곽면의 형상이 부드럽지 못하고 계속해서 변하게 되는 경우에는 접촉력 처리에 보다 많은 고려를 해주어야 한다. 접촉력 처리는 크게 접촉쌍 검색과 접촉력 계산으로 나뉘어 진다. 접촉쌍 검색은 검색 알고리즘인 position code 알고

리즘⁽¹²⁾과 bucket sorting 알고리즘⁽¹³⁾을 적용하였고 접촉력 계산은 방어 절점 알고리즘(defense node algorithm)을 적용하였다. 사용된 알고리즘은 모두 최근에 많이 사용되고 유용성이 검증된 알고리즘들이다. 방어 절점 알고리즘⁽¹³⁾은 penalty 방법과 predictor corrector 방법 등 다른 접촉력 계산 알고리즘과 달리 사용자가 정해주어야 하는 인자가 필요 없는 접촉력 계산 알고리즘이며 접촉력 계산에 이전 시간의 접촉력 정보를 사용하여 좀더 정확한 접촉력을 구할 수 있는 알고리즘이다.

방어 절점 알고리즘 적용시 접촉면이 넓고 두 물체의 밀도차이가 큰 경우에는 접촉처리가 다소 불안정해지는 경향이 있으며 이러한 문제를 보완하기 위해서 박 등⁽¹⁴⁾이 사용한 수정 방어 절점 알고리즘(modified defense node algorithm)을 NET3D 에 적용하였다. 수정 방어 절점 알고리즘은 인접한 여러 절점이 동시에 접촉을 일으키는 경우와 접촉력의 크기의 차이가 큰 고속 충돌 해석의 경우 우수한 해석 성능을 보여 주었다.

2.4 요소 소진 알고리즘

요소 소진 알고리즘(element eroding algorithm)은 해석 도중 주어진 파괴 조건을 만족하거나 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 해석 기법⁽¹⁵⁾이다. 판통 해석 등에서 심하게 변형된 요소는 시간증분의 크기를 감소시켜 해석 시간이 증가하게 되며, 해석을 중단시키는 경우도 있으므로 심하게 변형되어 더 이상 물리적으로 영향을 주지 않는다고 생각되는 요소는 소진시키게 된다.

요소가 소진되게 되면 요소망의 외곽면이 없어지고 새로운 면이 생기게 된다. 이럴 경우 접촉력이 계산되는 면과 절점이 계속 변화하게 되므로 접촉력 처리에서 이를 고려해 주어야하며 NET3D 프로그램은 이러한 요소망의 변화를 고려할 수 있는 데이터 구조를 가지고 있다. 요소를 소진시킬 때는 소진된 요소 주위의 불안정한 거동을 방지하기 위해 지정된 조건에 도달한 요소를 한번에 제거하지 않고 일정 시간 동안 요소의 강성을 단계적으로 감소시킨 후에 요소를 소진시켰다. 강성을 단계적으로 감소시킬 때는 요소 변수들의 값은 변화시키지 않았다.

2.5 전처리 및 후처리

NET3D 의 수치해석을 수행하기 위하여 주어진 해석 영역을 유한요소로 분할하기 위한 전처리와 해석 결과의 분석을 위한 후처리 과정이 필요하다. 본 논문에서는 전처리와 후처리를 위하여 3 차원 모델러인 I-DEAS 를 사용하였다.

3. 수치해석

NET3D 코드의 신뢰성과 적용성을 평가하기 위하여 시험결과와 함께 다른 3 차원 하이드로 코드를 사용한 해석 결과가 존재하는 금속재 사이의 충돌 및 관통 문제⁽¹⁶⁾를 선택하여 NET3D 코드를 이용한 시뮬레이션을 수행한 후 결과를 분석해 보고자 한다. Finnegan 등⁽¹⁷⁾은 파편 충돌 시 표적의 거동에 대한 연구의 일부로 연강으로 만들어진 구 및 육면체 파편 모의탄과 금속(알루미늄, 스테인레스 강, 연강) 박판 표적의 경사 충돌에 대한 시험과 CTH 코드⁽¹⁸⁾를 이용한 수치해석을 수행하였다. 또한 충돌 경사각의 변화에 따른 방탄한계 속도(ballistic limit velocity)와 관통(perforation) 또는 도탄 ricochet된 파편의 형상을 관찰하여 보고하였다. 충돌 각도 및 충돌 속도에 따라 관통 여부와 파편 형상이 민감하게 변화되는 Finnegan 등의 시험 내용이 NET3D 코드의 정확성과 신뢰성 평가에 적합하다고 판단되어 수치해석 모델로 선택하였다. 본 논문에서는 Finnegan 등의 시험 내용 중 연강 재료 사이의 충돌문제에 대해서만 수치해산 및 분석을 수행하였다.

3.1 수치해석 모델

Finnegan 등⁽¹⁷⁾이 파편 충돌시 표적의 거동에 대한 연구를 위하여 시험에 사용한 강구는 지름 6.35mm(무게 1.04g)이고 강판은 폭 76mm, 길이 305mm 이고 두께는 1.5mm 이다. 해석에 사용된 모델은 대칭성을 고려하여 전체 모델의 절반만을 계산에 사용하였고 과도한 요소의 생성을 방지하기 위하여 충돌에 의한 변형이 미치는 범위를 고려하여 강판의 크기를 폭 40mm, 길이 50mm 로 줄여서 모델링하였다. 충돌에 의하여 심한 변형이 발생하는 강판의 중앙과 강구 전체는 조밀한 요소를 사용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 유한 요소 격자로 강구와 강판을 포함하여 24,789 개의 4 절점 사면체 요소와 5,905 개의 절점으로 구성되어 있다. 충돌 속도와 충돌 각도에 관계없이 모두 Fig. 1에 나타낸 요소망을 이용하여 해석하였다.

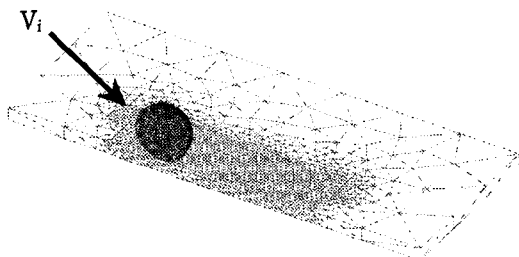


Fig. 1 Three-dimensional view of initial mesh

3.2 재료 모델링

금속재료의 고속 충돌시 정적변형에서 고려되는 변형을 경화 이외에 변형률 속도 경화 현상과 단열변형에 따른 열적 연화 현상이 동반된다. 이러한 현상들을 동시에 고려하기 위하여 아래식으로 표현되는 JC 모델(Johnson-Cook model)을 사용하였다.⁽¹⁹⁾

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*\right) \left(1 - (T^*)^m\right) \quad (1)$$

여기서 σ_y 는 항복응력, ε 는 소성변형률, $\dot{\varepsilon}^*$ 는 무차원 소성 변형률 속도(dimensionless plastic strain rate), 그리고 T^* 는 상응온도(homologous temperature)이며 A, B, n, C, m은 재료 상수들이다. 상응온도는 다음과 같이 정의된다.

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \quad (2)$$

여기서 T_{ref} 는 기준온도, T_{melt} 는 재료의 용점이다

고속충돌시 연강 재료의 파괴 기구(fracture mechanism)이 자세히 알려져 있지 않고 파단 조건(failure criterion)이 해석 결과에 민감한 영향을 주며 잘못된 파단 조건 설정이 해석결과에 나쁜 영향을 줄 것이라고 판단되어 연강에 대한 파단 조건을 설정하지 않고 등가 소성 변형률을 이용한 요소 소진만을 계산에 고려하였다. 요소 소진 조건에 사용된 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain) 값은 별다른 언급이 없는 경우 2.0으로 설정하였으며 요소소진 조건이 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1.5와 2.5인 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

시험에 사용된 연강의 물성이나 재료 모델의 상수 값이 Finnegan 등의 논문에 제시되어 있지 않으므로 자체 시험으로 획득한 연강의 물성치를 해석에 사용하였다. 연강의 JC 모델 상수 값은 국방과학연구소가 보유한 MTS와 압축 흡킨슨봉 장비를 사용한 정적 압축 시험과 고속 압축 시험결과를 이용하여 결정하였으며 기타 나머지 물성은 재료 물성 핸드북의 내용을 참고하여 사용하였다.

고속 변형중 발생된 소성변형 에너지가 열에너지로 바뀌는 비율을 나타내는 Taylor-Quinney 상수 값은 1.0으로 설정하였다. Hodowany 등의 연구결과⁽²⁰⁾를 고려하면 대변형을 동반한 고속충돌문제에서 Taylor-Quinney 상수값은 1.0으로 설정하는 것이 타당하다.

Table 1 Material constants of mild steel for computations

Material constant	Material constant value
Young's modulus(Gpa)	200.1
Poisson's ratio	0.3
Density(g/cm ³)	7.87
A(Gpa)	0.532
B(Gpa)	0.229
C	0.0274
n	0.3024
m	1.0

4. 수치해석 결과 및 토의

4.1 충돌속도와 각도의 영향

NET3D 를 이용하여 충돌 경사각이 60° 인 경우 610 m/s, 910 m/s, 1220 m/s 의 충돌속도에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 2, 3, 4 는 해석결과 얻어진 대칭 단면의 형상을 나타내고 있다. Fig. 5, 6, 7 은 동일한 조건으로 해석하여 얻어진 CTH 코드의 변형형상을 나타내고 있다. CTH 코드의 해석 결과와 비교를 용이하게 할 수 있도록 CTH 해석 결과가 도시된 시점의 형상을 Fig. 2, 3, 4 에 나타내었다.

CTH 와 NET3D 의 해석결과를 비교해보면 많은 부분에서 차이를 보여준다. 가장 큰 차이는 610 m/s 충돌시 충돌 반대 방향으로 형성되는 CTH 의 꼬리 부분 형상이다. Fig. 5 에 점선으로 표시된 부분인데 충돌 후 40 μs 경과된 NET3D 의 변형형상은 반대로 충돌 방향으로 작은 돌기가 형성된다. 또 다른 차이는 1220 m/s 충돌시 20 μs 에서 관찰되는 강구의 변형 형상이다. CTH 의 해석결과와는 비교적 완만하게 길게 늘어진 한 몸체의 형상에 반해 NET3D 의 해석결과는 표적의 윗면을 따라 움직이는 강구의 상부와 표적을 관통한 후 진행하고 있는 강구의 하부로 분리되어 있는 것을 관찰할 수 있다. Finnegan 등은 충돌 경사각이 큰 경우 연강 표적 및 스테인레스 강 표적과 강구 관통자 사이의 충돌시험에서도 이러한 현상이 관찰된다고 보고하였다. NET3D 의 해석 결과 강구와 강판의 60° 경사 충돌시 610 m/s, 910 m/s 속도에서는 관통되지 않고 1220 m/s 속도에서는 강판이 관통되는 것으로 나타났는데 이것은 Finnegan 등의 시험결과에서 강판의 방탄한계속도가 1000 m/s 정도로 나타난 사실과 잘 부합된다.

CTH 와 NET3D 의 해석결과 차이는 많은 부분이 오일러리안과 라그랑지안으로 서로 다른 수치화 방법과 재료 모델 입력 물성의 차이 등에 기인하는 것으로 추정된다. 그러나 접촉하는 충돌 계면의 정확한 추적이 불가능한 오일러리안 방법보다 라그랑지안 방법을 사용한 NET3D 가 좀 더 정확한 변형 형상을 예측하는 것으로 나타났다.

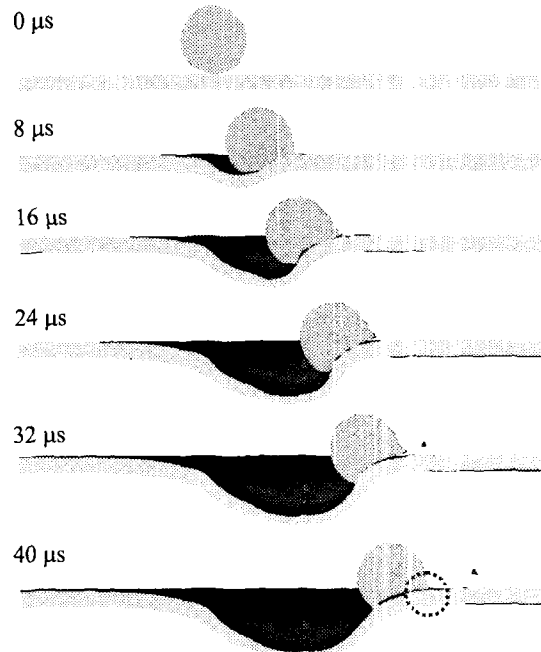


Fig. 2 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 610 m/s (NET3D)

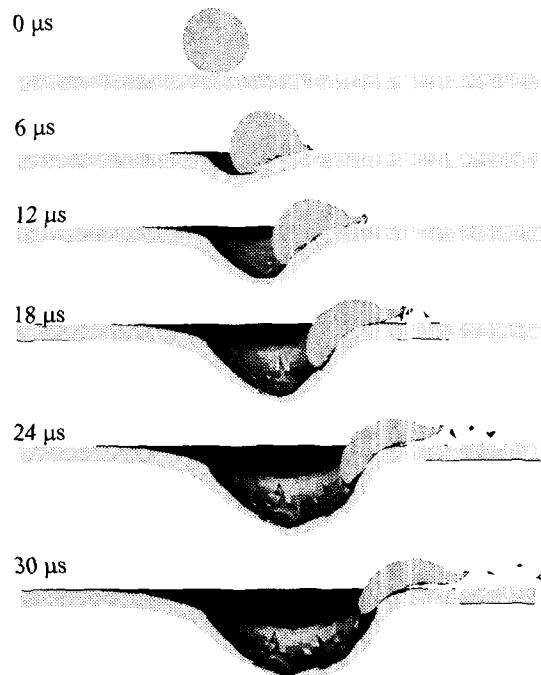


Fig. 3 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s (NET3D)

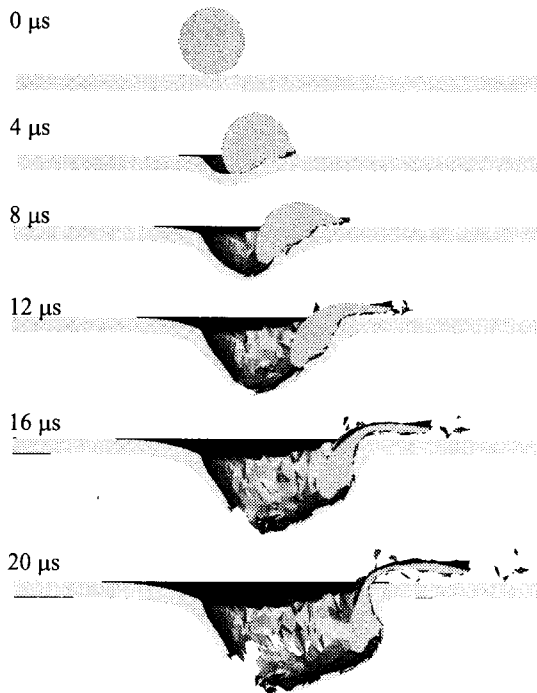


Fig. 4 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 1220 m/s (NET3D)

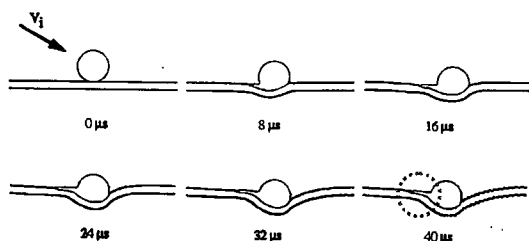


Fig. 5 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 610 m/s (hydrocode CTH)⁽¹⁷⁾

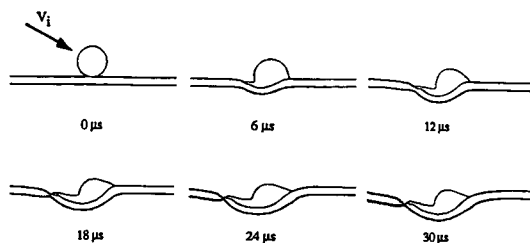


Fig. 6 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s (hydrocode CTH)⁽¹⁷⁾

Fig. 8 과 9 을 살펴보면 610 m/s 속도로 60° 경사 충돌 후 40 μs 경과된 강구의 형상과 910 m/s 속도로 60° 경사 충돌 후 30 μs 경과된 강구의 형상은

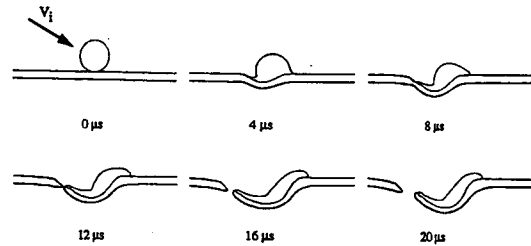


Fig. 7 Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 1220 m/s (hydrocode CTH)⁽¹⁷⁾

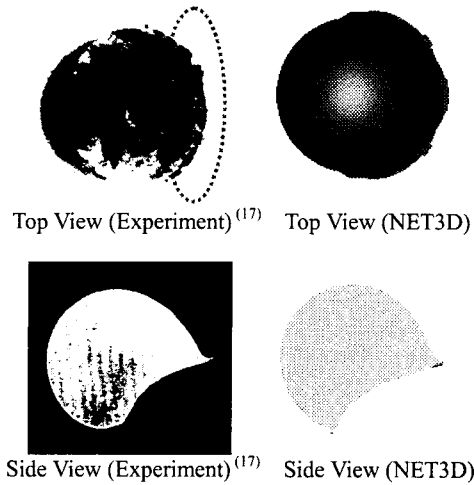


Fig. 8 Final deformed pattern parallel (top) and perpendicular (bottom) to the impact surface configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 610 m/s

Finnegan 등⁽¹⁷⁾에 의하여 동일 조건에서 시험 후 회수된 강구의 형상과 거의 정확하게 일치한다. 상면의 형상을 비교해보면 시험에서 회수된 시편의 앞부분(Fig. 8 과 9 의 점선 표시 부분)이 인장력에 의해 찢어지면서 얇게 변형된 형상임에 비해 해석의 동일 부분 형상은 큰 변형에 동반되는 소진 조건에 의해 해석에서 배제되므로 이 부분이 넓게 퍼지지 못하고 다소 작게 나타났다. 그러나 강구의 측면 형상은 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.2 방탄한계속도

충돌 경사각의 변화에 따른 방탄한계속도의 변화를 살펴보기 위하여 0°, 30°, 45°, 52.5°, 60°, 70°, 80°의 충돌 경사각을 갖는 문제를 여러 가지 초기 속도에 대하여 해석하였다. 충돌 경사각 변화에 따른 방탄한계속도의 변화를 살펴보기 위하여 NET3D 해석 결과와 Finnegan 등의 시험 결과를 정리하여 Fig. 10 에 도시하였다.

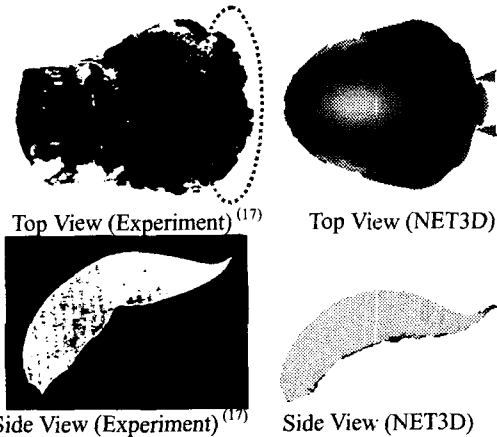


Fig. 9 Final deformed pattern parallel (top) and perpendicular (bottom) to the impact surface configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

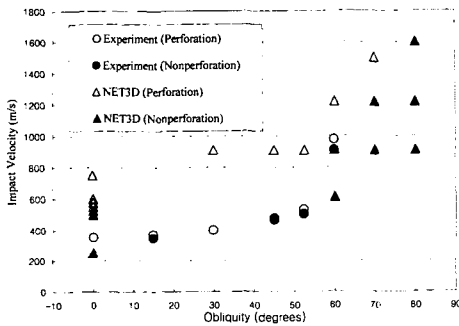


Fig. 10 Ballistic limit as a function of impact obliquity for mild steel target impacted by mild steel sphere

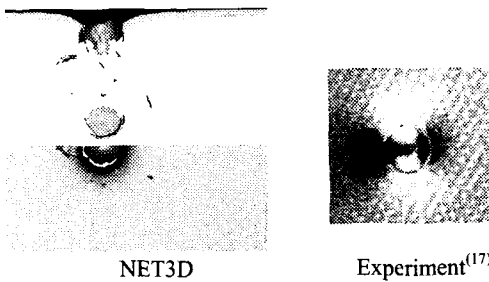


Fig. 11 Final deformed pattern perpendicular (NET3D-top) and parallel (NET3D-bottom, Experiment) to the impact surface configurations for a 0° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 750 m/s

관통된 경우 Finnegan 등의 시험 결과에서 얻어진 시편의 하부 변형 형상과 NET3D의 해석결과를 비교하여 Fig. 11(충돌 경사각 0°), Fig. 12(충돌 경사각 30°), Fig. 13(충돌 경사각 45°), Fig. 14(충돌 경사각 52.5°), Fig. 15(충돌 경사각 60°)에 도시하였다.

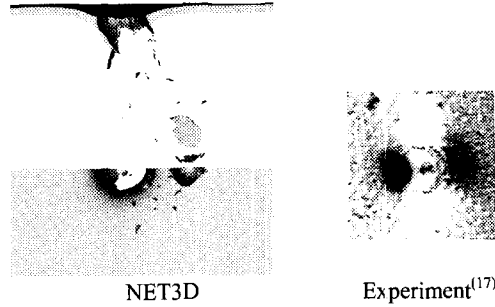


Fig. 12 Final deformed pattern perpendicular (NET3D-top) and parallel (NET3D-bottom, Experiment) to the impact surface configurations for a 30° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

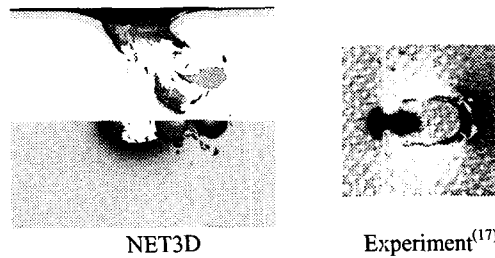


Fig. 13 Final deformed pattern perpendicular (NET3D-top) and parallel (NET3D-bottom, Experiment) to the impact surface configurations for a 45° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

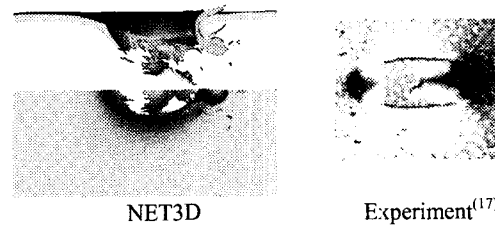


Fig. 14 Final deformed pattern perpendicular (NET3D-top) and parallel (NET3D-bottom, Experiment) to the impact surface configurations for a 52.5° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

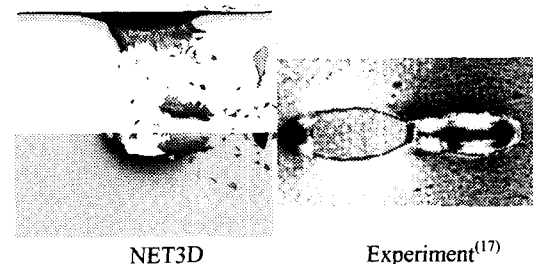


Fig. 15 Final deformed pattern perpendicular (NET3D-top) and parallel (NET3D-bottom, Experiment) to the impact surface configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 1220 m/s

충돌 경사각 0°의 경우 정확한 방탄한계속도를 알아보기 위하여 많은 계산을 수행하였다. 충돌 경사각 0°인 경우 시험결과는 300 m/s 정도의 방탄한계속도를 가지나 NET3D 해석 결과는 537 m/s 정도로 추정된다. 시험에서 표적재료는 인장 파괴에 의하여 발생하는 “disking”이라 부르는 원형 plug 파편을 형성하며 파괴되지만 해석 시 인장 파괴 조건을 설정하지 않고 등가 소성 변형에 의한 소진 조건만을 설정하였기 때문에 실제 관통시 보다 더욱 많은 변형에너지를 필요로 하게 되어 방탄한계속도가 높아진 것으로 추정된다. 그러나 충돌 경사각 60°의 경우 방탄한계속도가 910 m/s와 1220 m/s 사이에 존재하는데 이것은 시험에서 얻어진 수치와 대략 일치하는 값이다. 이런 현상이 발생하는 이유는 충돌 경사각이 증가할수록 국부적 변형 모드에 크게 의존하는 인장 또는 전단에 의한 파괴보다 충돌 부위에 큰 소성변형을 동반하는 파괴 모드로 파괴 양상이 변하기 때문이다. 등가 소성 변형 조건에 의한 소진 알고리즘을 사용하는 NET3D의 경우 이러한 현상을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 시험에서 관찰된 충돌 경사각 52.5°와 60°사이에서의 방탄한계속도 증가 현상도 같은 이유 때문이라고 생각된다.

충분한 초기 에너지를 가진 강구가 강판에 충돌하는 경우, 충돌 경사각에 따라 강구는 크게 3가지 모드로 거동한다. 수직 충돌에 가까운 경우 강구 몸체 전부가 강판을 관통한 후 비행하고 수평에 가까운 각도로 충돌하는 경우 강구 몸체가 모두 튕겨나가게 된다(Fig. 16 참조). 수직과 수평충돌 중간각도에서는 강구 몸체가 강판과의 충돌 때문에 둘로 나뉘어 일부는 강판 아래로 관통하고 나머지는 강판 위로 튕겨나가게 된다(Fig. 4 참조). 그러나 강구의 초기 에너지가 충분하지 못한 경우 중간 경사각 또는 수직 충돌시에도 튕겨나가게 된다(Fig. 2 참조).

시험 결과의 분석으로부터 30° 이상의 충돌 각도를 가지면 수직 충돌시 발생하는 완전히 분리된 plug에 의한 disking 대신 강판의 일부가 바깥쪽으로 굽힘력을 받아 일부는 강판에 붙어있는 plug가

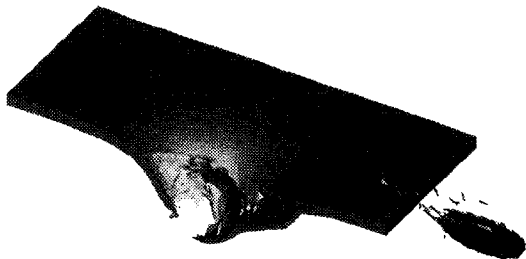


Fig. 16 Three-dimensional view of final deformed pattern for a 70° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 1600 m/s

형성된다. 이를 “hinge mode”라 부른다. 해석 결과를 살펴보면 충돌 각도가 작으면 시험 결과와 유사한 형상을 재현하지만 충돌 각도가 커질수록 시험 결과에서 관찰되는 뚜렷한 형태의 “hinge mode”를 형성하지 못하고 일부는 소진 메커니즘에 의해 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 그러나 강판의 관통 구멍 크기 및 형상은 비교적 잘 일치한다. 전단 또는 인장력에 의한 국소 파괴 조건을 NET3D에 추가하여 해석을 수행하면 “hinge mode”의 생성과 앞서 언급된 수직 충돌시 방탄한계속도 증가 현상에 따른 시험과 해석의 차이를 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 소진 조건의 영향

강판과 강구의 충돌 시뮬레이션에 사용된 모든 재료 입력 상수는 재료의 동적 및 정적 시험을 통하여 확보할 수 있으나 이러한 방법으로 얻을 수 없는 유일한 입력 상수가 있으니 그것은 바로 소진 조건이다. 무한한 자유도를 가진 실제 문제를 유한개의 라그랑지안 요소로 해석할 때 발생하는 요소의 뒤집힘과 과도한 변형에 의한 해의 부정확성을 회피하기 위하여 소진 알고리즘이 반드시 필요하다. 그러나 소진 조건은 물리적 개념 위에 정의되지 못하므로 사용자의 경험에 의존해야 한다. 그러므로 소진 조건의 변화가 해석 결과에 미치는 영향을 분석하는 것이 중요하다. 대부분의 해석에 사용된 2.0 대신 1.5와 2.5를 사용하여 형상을 비교한 결과 현저한 차이를 발견할 수 없었으며 소진 조건이 해석결과에 민감한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

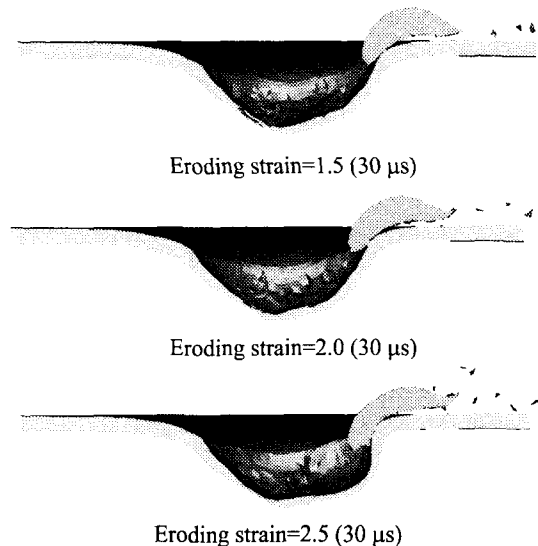


Fig. 17 Effect of eroding strain: Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

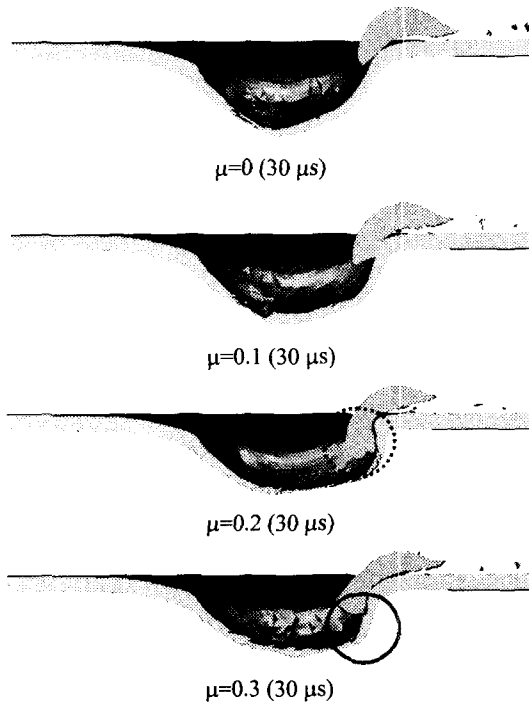


Fig. 18 Effect of friction coefficient: Deformed configurations for a 60° impact of a mild steel sphere on a mild steel plate at 910 m/s

4.4 마찰조건에의 영향

소성가공과 같은 정적변형에서 마찰계수의 크기에 따라 최종 변형 형상이 크게 달라진다는 사실은 잘 알려져 있다. 강판과 강구의 충돌 시뮬레이션과 같은 고속변형 과정에 미치는 마찰의 영향을 살펴보기 위하여 마찰 계수를 바꿔가며 해석하였다. 마찰의 지속적인 영향 때문에 마찰 계수가 큰 경우 강구의 꼬리쪽으로 강구의 재료가 이동하고 (Fig. 18의 점선 표시 부분) 강판의 단면 형상이 충돌 방향 쪽으로 쏠리는 모습 (Fig. 18의 실선 표시 부분)을 볼 수 있다. 또한 마찰계수가 클수록 강판과 강구 사이의 마찰에 의한 변형이 증대되어 강판이 얇아지는 경향이 있다. 이상의 결과로부터 고속충돌 해석에서 적절한 마찰 계수의 선정이 중요하다라는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

3 차원 고속충돌 및 파괴 해석이 가능하도록 개선된 NET3D를 사용하여 연강으로 만들어진 구관통자와 얇은 판재 표적 사이의 충돌 현상을 해석한 후 실험 결과와 비교, 분석하여 NET3D의 적용성과 신뢰성을 평가해 보았다. 해석결과 얻어

진 방탄한계속도를 시험결과와 비교하던 전체적으로 높게 나타나고 특히 충돌 경사각이 작은 경우 더 큰 차이를 보여준다. 이것은 파단 조건을 설정하지 않고 소진 알고리즘만 사용했기 때문이며 전단 또는 인장력에 의한 국소 파괴 조건을 추가하여 해석을 수행하면 계산결과가 개선될 것으로 예상된다. NET3D 해석결과 얻어진 강구의 최종 변형형상과 강판의 파괴 형상은 동일 조건의 시험 후 회수된 강구와 강판의 형상과 거의 정확하게 일치하는 것으로 나타났으며 오딜러리안 코드인 CTH 보다 변형 형상 예측 능력이 우수한 것으로 나타났다. 소진 조건에 사용된 등가 소성 변형률 값을 변화시켜가며 계산된 변형형상을 상호 비교한 결과 현저한 차이가 발견되지 않았으며 소진 조건이 해석결과에 민감한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 강판과 강구 사이의 마찰 계수를 바꿔가며 해석한 결과 분석에서 마찰 계수는 해석 결과에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Zukas J. A., 1990, *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Meyers M. A., 1994, *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- (3) Benson D. J., 1992, "Computational Methods in Lagrangian and Eulerian Hydrocodes," *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.* 99, pp. 235-394.
- (4) Randles P. W. and Libersky L. D., 1996, "Smoothed Particle Hydrodynamics: Some Recent Improvements and applications," *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.* 139, pp. 375-408.
- (5) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속 성형 해석-I," 대한기계학회논문집, 제 15 권, 제 1 호, pp. 1-10.
- (6) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한요소법을 이용한 고속 성형 해석-II," 대한기계학회논문집, 제 15 권, 제 5 호, pp. 1551-1562.
- (7) 유요한, 전기영, 정동택, 1992, "단열전단밴드의 유한요소해석," 대한기계학회논문집, 제 16 권, 제 8 호, pp. 1519-1529.
- (8) 정동택, 유요한, 1991, "Plate Impact 에 의한 Spall 현상 해석," 대한기계학회 '91년도 추계학술대회 논문집, pp.129-132.
- (9) Zienkiewicz O. C., Rojek J., Taylor R. L. and Pastor M., 1998, "Triangles and Tetrahedral in Explicit Dynamic Codes for Solids," *Int. J. Numer. Methods Engng.* 43, pp. 565-583.
- (10) Taylor L. M. and Flanagan D. P., 1987, *PRONTO2D, A Two-Dimensional Transient Solid Dynamic Problems*, Sandia National Laboratories.

- (11) Johnson G. C. and Bammann D. J., 1984, "A Discussion of Stress Rates in Finite Deformation Problems," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 725~737.
- (12) Oldenburg M. and Nilsson L., 1994, "The Position Code Algorithm for Contact Searching," *Int. J. Numer. Methods Engng.* 37, pp. 359~386.
- (13) Zhong Z. H., 1993, *Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*, Oxford University Press.
- (14) 박동운, 정동택, 오수익, 1996, "Explicit 유한요소 코드를 위한 접촉 처리 방법연구," 대한기계학회 96 추계학술대회 논문집.
- (15) Sewell D. A., Ong A. C. J. and Hallquist J. O., 1990, "Penetration Calculation Using an Erosion Algorithm in DYNA," *Proc. of 12th Int. Symp. on Ballistics*.
- (16) Goldsmith W., 1999, "Non-ideal Projectile Impact on Targets," *Int. J. Impact Engng.*, 22, pp. 95~395.
- (17) Finnegan S. A., Dimaranan L. F., Heimdahl O. E. R. and Pringle J. K., 1993, "A Study of Obliquity Effects on Perforation and Ricochet Processes in Thin Plates Impacted by Compact Fragments," *Proc. of 14th Int. Symp. on Ballistics*, Quebec, Canada, pp. 661~670.
- (18) McGlaun J. M., Thompson S. L. and Elrick M. G., 1988, *CTH User's Manual and Input Instructions*, SAND88-0523, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- (19) Johnson G. R. and Cook W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain Rates and High Temperatures," *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, pp. 541~547.
- (20) Hodowany J., Ravichandran G., Rosakis A. J. and Rosakis P., 2000, "Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals," *Exp. Mech.*, 40, pp. 113~123.