

## 2 차원 Lagrangian Hydrocode 개발 및 대변형 해석

이 민 형<sup>†</sup>, 김 성 우<sup>\*</sup>

(2002 년 6 월 14 일 접수, 2003 년 1 월 22 일 심사완료)

### Development of 2-Dim Lagrangian Hydrocode and Application to Large Deformation Problems

Minhyung Lee and Sungwoo Kim

**Key Words :** Lagrange Hydrocode(라그랑지 유체동력학코드), Large Deformations(대변형), Contact Algorithm(접촉기법), Defence Node Algorithm(디펜스 질점 기법)

#### Abstract

The purpose of this paper is to develop the 2-Dim Lagrangian Hydrocode for the analysis of large deformations of solids with implementation of the contact algorithm. First, the governing equations are discretized into a system of algebraic equations. For more accurate and robust contact force computation, the defence node contact algorithm was adopted and implemented. For the verification of the code developed, two cases are carried out; the Taylor-Impact test and two bodies impact. The von-Mises criterion is implemented into the code with the Shock equation of state. The simulation results show a good agreement compared with the published experimental data and results from the commercial code. It is necessary to implement several material models and failure models for applications to different impact and penetration problems

#### 기호설명

e	: 질점 내부에너지
G	: shear modulus
m	: 질량
p	: 압력
s	: deviatoric 응력
$\Delta t$	: time step
V	: 부피
x	: 질점의 x 좌표
y	: 질점의 y 좌표

#### 그리스문자

$\epsilon$	: 변형률
$\sigma$	: 내부 응력
$\rho$	: 밀도

#### 1. 서론

고체의 대변형 해석에는 다음의 세 가지 방법이 이용된다. 첫째는 실험에 의한 방법으로 물체에 발생하는 변형을 관찰하는데 있어서 가장 정확한 방법이다. 하지만 극한상황이나 비용이 많이 요구되는 경우 어려움이 존재한다. 둘째는 해석적인 방법(analytic method)이다. 이 방법은 충돌 시 물체의 변형이나 응력을 예측하기 위하여 지배방정식을 간단화하는 모델링 이론을 개발하는 것이다. 셋째는 수치 해석에 의한 방법(simulation)인데, 편미분 지배방정식을 차분화를 적용하여 대수적인 식으로 바꾼 후에 초기조건과 경계조건을 이용하여 충돌시의 시간에 따른 물체의 변형을 예측하는 것이다.

수치 해석은 기본적인 지배방정식, 즉 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존, 구성 방정식들에게 재료의 크기, 모양, 초기조건 및 경계조건, 그리고 EOS(상태 방정식)와 구성방정식을 시간 적

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

Email : mlee@sejong.ac.kr

TEL : (02)3408-3282 FAX : (02)3408-3333

<sup>\*</sup> 세종대학교, 대학원 기계공학과

분하여 풀어야 하기 때문에 상당히 많은 변수를 다루게 된다. 실험 결과와 비교하는 검증 작업이 필요하지만, 실험적 방법이나 해석적 방법에 비하여 짧은 시간 내에 많은 종류의 대변형 충돌 해석을 할 수 있다는 장점이 있어 시간과 비용을 절약할 수 있다. 사용자가 필요로 하는 정보가 있다면, 간단히 몇 개의 정보만을 입력함으로써 충돌하는 물체의 변형, 응력, 에너지, 탄성-소성 변화 등의 다양한 정보를 얻을 수 있다.

최근의 고속충돌과 관련한 연구에서는 다양한 종류의 수치 해석 프로그램이 개발되어 사용되고 있다. 이러한 hydrocode 들은 크게 Lagrange 기법, Eulerian 기법, 또는 혼합형인 ALE(Arbitrary Lagrange Eulerian)가 있다.<sup>(1)</sup> 최근에는 Lagrangian 기법에 기초한 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법이<sup>(2)</sup> 특히 재료의 파괴 (fracture) 해석에 상당히 유용하게 적용되고있는 실정이다. 고체의 대변형해석에는 아직도 Lagrange 기법이 가장 많이 사용되어지고 있다.<sup>(3,4)</sup>

Lagrange 기법은 격자 하나 하나가 물체의 일부분을 나타내며, 이들 격자가 변형을 일으키면서 이를 바탕으로 물체 전체의 상태를 나타내는 것이 목적이다. 따라서 정확한 경계추적을 위한 해석에서는 가장 적합한 기법이다.

본 논문에서는 고체의 대변형 충돌 해석을 위한 Lagrange 프로그램의 이론을 먼저 기술한다. 그리고 Taylor-impact-test 실험결과와 비교하여 검증하였다. 또한 두 물체간의 대변형 충돌 해석을 위한 접촉처리기법(contact search)과 요소 소진(element erosion)기법을 기술한다. 실험값 및 상용화된 code 인 AUTODYN 과<sup>(5)</sup> 결과값을 비교함으로써 개발된 프로그램의 정확성을 검증하였다. 개발된 코드와 AUTODYN 모두 기본이론은 Wilkins<sup>(6)</sup>에 근거를 두고있으나 가장 큰 차이는 본 코드에서는 가장 최근에 개발된 접촉기법이 적용이 되었다는 점이다.

## 2. 이차원 라그랑지 유체동역학 이론

### 2.1 지배 방정식

이차원 프로그램에서 축대칭 원통좌표계를 직교좌표계와 일관되게 표현하기 위하여 대칭축을 x 축 방향과 일치하게 하였으며 반지름 방향을 y 축 방향에 대응시켰다. 따라서 이차원 평면(plane symmetry) 및 축대칭(axial symmetry) 프로그램에

사용된 지배 방정식은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

#### 2.1.1 질량 보존 방정식

Lagrangian 기법은 한 격자 안의 질량이 일정하다. 따라서 격자가 가지고 있던 초기질량은 체적이 변하여도 계속 유지 되므로 임의의 시간에서의 밀도는 초기밀도( $\rho_0$ ) 및 초기체적 ( $V_0$ ) 을 기준으로 다음 식에 의해 구해진다.

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

#### 2.1.2 운동량 보존 방정식

본 프로그램에 적용된 운동량 보존식은 다음과 같다. 본 식은 응력과 가속도의 관계를 나타낸다.

$$\rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \quad (2)$$

$$\rho \ddot{y} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \quad (3)$$

$$\rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{xy}}{y} \quad (4)$$

$$\rho \ddot{y} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{\theta\theta}}{y} \quad (5)$$

식 (2), (3)은 평면대칭일 때의 식이고, 식 (4), (5)는 축대칭일 때의 식이다. 본식에서의 응력은 다음과 같이 압력 ( $p$ ), 인공점성( $q$ )<sup>(6)</sup> 및 deviatoric 응력으로 표현된다.

$$\sigma_{xx} = -(p+q) + s_{xx} \quad (6)$$

$$\sigma_{yy} = -(p+q) + s_{yy} \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -(p+q) + s_{\theta\theta} \quad (8)$$

$$\sigma_{xy} = s_{xy} \quad (9)$$

탄성체에 대하여 deviatoric 응력 변화률과 변형률속도와의 관계는 Hook's Law 를 적용하면 shear modulus 와 체적변화률의 향으로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{s}_{xx} = 2G[\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \dot{V}/V] \quad (10)$$

$$\dot{s}_{yy} = 2G[\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3}\dot{V}] \quad (11)$$

$$\dot{s}_{\theta\theta} = 2G[\dot{\epsilon}_{\theta\theta} - \frac{1}{3}\dot{V}] \quad (12)$$

$$\dot{s}_{xy} = 2G\dot{\epsilon}_{xy} \quad (13)$$

여기서의 응력은 소성 또는 파괴 등을 기술하는 재료구성방정식에 의해 차후에 수정되어진다.

### 2.1.3 에너지 보존 방정식

본 프로그램에 적용되어 연립하여 같이 풀어지는 에너지보존 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho}(\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{\theta\theta}\dot{\epsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}) \quad (14)$$

### 2.1.4 상태 방정식 (Equation of state)

격자 내부의 상태 (압력이 밀도 및 에너지와의 관계식)를 기술하기 위한 상태방정식은 적용범위에 따라 다양한 형태의 식들이 알려져 있다. 현재 프로그램에 사용된 식은 “Shock Equation of State” 이나 필요 시 새로운 상태방정식의 수치화가 가능하다. 이 식은 Shock Hugoniot 에 기초한 Mic-Gruneisen 식의 형태로 표현되어 있다.

$$p = p_H + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (15)$$

여기서  $\Gamma$  는 Gruneisen 상수이며  $p_H$  와  $e_H$  는 각각 기준값이며 압축계수  $\mu = 1 - \rho_0/\rho$  를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (16)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left( \frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (17)$$

### 2.1.5 재료 강도모델 (Strength model)

재료의 탄성-소성 거동을 나타내는 강도모델의 종류는 다양하게 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 이중에 실제 실험 재료의 거동과 유사한 거동을 나타내는 모델을 사용해야만 실험결과와 유사한 결과가 얻어진다.

본 논문에서 프로그램의 검증에 사용할 실험 재료는 7075-T6 알루미늄과 OFHC (Oxygen Free High Conductivity) 구리이다. 이 두 재료는 완전 탄성소성<sup>(8)</sup> 변형을 나타내므로 이에 적합한 강도

모델로 다음과 같이 주응력으로 표현되는 Von Mises Model 을 선정하였다.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2 \quad (18)$$

## 2.2 수치해석이론

### 2.2.1 변수표현 방법

밀도, 내부에너지, 압력, 응력과 변형률 등은 cell 의 내부에서 정의가 되고 변위, 속도변위, 속도, 가속도는 mesh 의 꼭지점 즉 node 에서 정의가 된다.

### 2.2.2 시간적분 간격

적절한  $\Delta t$  를 결정하기 위해 다음과 같은 방법을 이용하였다. 우선, 다음식이 적용된다.

$$dt_1 \leq d/c \quad (19)$$

여기서  $d$  는 특성 길이이며 mesh 의 면적을 대각선의 길이 중 긴 쪽으로 나누었을 때의 길이를 나타낸다. 그리고  $c$  는 고체에서 발생한 충격파의 속도이다.  $\Delta t_1$  을 결정하는 이러한 조건을 CFL 또는 Courant 조건이라 한다. 두번째와 세번째는 Von Neumann 과 Richtmeyer 가 제안한 것으로 인공점성 응력에 의해 고려되어야 하는 조건들이다.

$$\Delta t_2 \leq \frac{1}{\left[ 4C_0^2 \frac{|\dot{V}|}{|V|} \right]}, \quad \Delta t_3 \leq \frac{d}{2C_L c} \quad (20)$$

여기서  $C_0$  와  $C_L$  은 각각 pseudo-viscous 응력의 이차항과, 일차항의 계수이다. 이렇게 구해진 세가지 조건 중에서 최소인  $\Delta t$  를 구한 후, 거기에 상수  $k$  를 곱하며 일반적으로  $k$  는 2/3 을 사용한다.

### 2.2.3 Node 에서의 힘

적절한 응력이 초기 조건으로 주어지거나 또는 계산되어 주어지면 그 값을 이용하여 각 node 에 작용하는 힘을 구할 수 있다. 식 (2, 3)을 이용하여 적분을 하면 각 node 에 작용하는 힘을 구할 수 있다. Green's Theorem 이 이용하면 다음식이 된다.

$$\ddot{x} \sum_{k=1}^4 \frac{m}{4} = \frac{1}{2} \int_S [\sigma_{XX} dY - \sigma_{XY} dX] \quad (21)$$

$$\ddot{y} \sum_{k=1}^4 \frac{m}{4} = \frac{1}{2} \int_S [\sigma_{XY} dY - \sigma_{YY} dX] \quad (22)$$

축대칭의 경우에는 이보다 좀더 복잡한 형태를 띤다. 앞서서와 마찬가지로 Green's Theorem 를 이용하여 식 (4, 5)를 적분한다. 이 때 양변에  $2\pi y dx dy$  를 곱하여 적분하면,

$$\ddot{x} \sum_{k=1}^4 \frac{m}{4} = \iint \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) \pi y dx dy + \iint \sigma_{xy} \pi dx dy \quad (23)$$

$$\ddot{y} \sum_{k=1}^4 \frac{m}{4} = \iint \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) \pi y dx dy + \iint (\sigma_{yy} - \sigma_{\theta\theta}) \pi dx dy \quad (24)$$

2.2.4 Node 의 가속도, 속도, 변위

각 node 의 힘이 계산이 되면 가속도, 속도 및 변위는 다음의 유한차분 식에서 계산된다.

$$\ddot{x} = \frac{F_x}{m} + g_x, \quad (25)$$

$$\dot{x}^{n+1/2} = \dot{x}^{n-1/2} + \ddot{x} \Delta t^n, \quad (26)$$

$$x^{n+1} = x^n + \dot{x}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (27)$$

2.2.5 압력과 응력의 계산

충돌시 변형이 일어나게 되면, 변형에 의한 에너지가 발생하게 되는데 그 에너지의 크기는,

$$\Delta e_z = [s_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + s_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + s_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + 2s_{xy} \dot{\epsilon}_{xy}] \frac{V}{m} \Delta t \quad (28)$$

압력은 상태 방정식에서 얻어진다. 이제 에너지 방정식은 다음과 같이 완성된다.

$$e^{n+1} = e^n + \Delta e_z^{n+1/2} - \left[ \frac{p^{n+1} + p^n}{2} + q^{n+1/2} \right] \frac{\Delta V^{n+1}}{m} \quad (29)$$

상태 방정식과 연립을 해야  $e^{n+1}$  과  $p^{n+1}$  을 구할 수 있다. 이제 지금까지 얻어진 편향응력과 압력, Pse 인공점성힘을 더하면 최종적인 응력식이 완성된다

2.3 Taylor-impact test

여기까지 기술한 모델링을 적용하여 개발된 프로그램의 정확성 검정을 위하여 Taylor impact test

실험 결과와<sup>(8,9)</sup> 상용코드 AUTODYN 을 사용한 수치결과를 사용하였다. Taylor 충돌실험에서는 강체의 벽 (rigid wall)에 충돌하는 고체의 대변형 해석이므로 단일물체만을 다룬다. 충돌면에서의 경계 조건은 충돌방향으로의 변위 구속이며 나머지 면에서는 모두 traction-free 경계조건으로 설정한다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 초기 길이와 반지름이 모두 31.2mm 와 2.08mm 그리고 항복응력 0.8GPa 의 알루미늄 7075-T6 가 초기충돌속도 154m/s 와 219m/s 에서의 최종변형 상태이다. Fig. 3 은 항복응력 0.6GPa 의 OFHC 구리에 대한 것으로 초기길이 및 반지름은 각각 31.4 mm, 2.08 mm 이고 초기충돌속도는 145m/s 이다.<sup>(9)</sup>

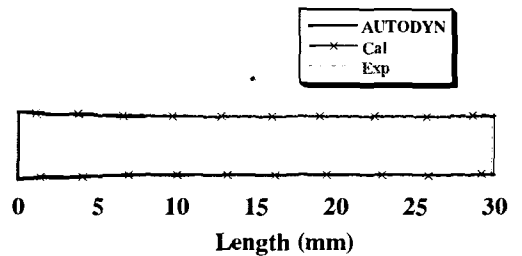


Fig. 1 Taylor test comparison between calculation and AUTODYN for Al 7075-T6 at 154m/s

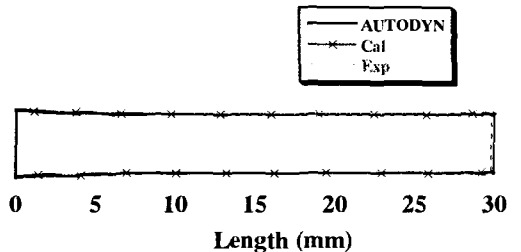


Fig. 2 Taylor test comparison between calculation and AUTODYN for Al 7075-T6 at 219m/s

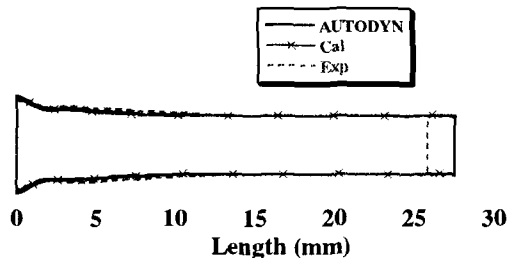


Fig. 3 Comparison of calculation and Taylor test for Al 6061-T6.

그림에서 알 수 있듯이 예측된 최종변형 형태가 Taylor 충돌실험 및 AUTODYN 결과와도 거의 일치함을 알 수 있다. 특히 이미 다양하게 검증되어 사용되고 있는 AUTODYN 결과와는 정확히 일치하는 결과를 나타내고있다. 이는 두 수치해석에 사용된 재료의 구성방정식이 완전히 일치하기 때문이며 실험결과와의 미세한 차이는 실험에 사용된 재료를 표현하는 구성방정식에서의 오차로 판단된다.

### 3. 접촉처리기법

실제로 두 가지 이상의 물체가 충돌할 경우에는 현재까지 기술한 이론에 추가적으로 물체들간의 경계에서 발생하는 접촉면의 효율적인 추적기법과 정확한 접촉력을 예측할 수 있는 기법이 필요하다. 따라서 충돌현상을 기술하기 위하여 수치적으로 다음의 3 단계가 요구된다. 첫째, 접촉면의 검색(contact search)이 그리고 접촉력 (contact force)의 계산이, 마지막으로요는 요소소진 (element erosion)기법의 그것이다. 이러한 기법들에 사용된 이론을 아래에 간단히 설명한다.

#### 3.1 접촉검색(contact search) 알고리즘

물체간의 충돌 시 충돌체를 slave 로 지정하고 목표(target)가 되는 대상체를 master 로 구분한다 (Fig. 4). Slave 에 해당하는 물체가 master 의 Detection zone(충돌유효 거리를 기준으로 만들어진 영역)에 들어오게 되면 충돌이 발생하는 것으로 간주한다.<sup>(10)</sup> 구체적으로 말하면 Master 의 경계면을 기준으로 하여 Slave 의 모든 node 들에 대하여 거리를 구하고 이 값이 충돌유효거리 보다 작으면 충돌이 발생한 것이다. 이러한 방식으로 충돌이 발생하는 master 의 충돌면과 Slave 의 node 를 찾아내어 접촉력 계산에 이용한다.

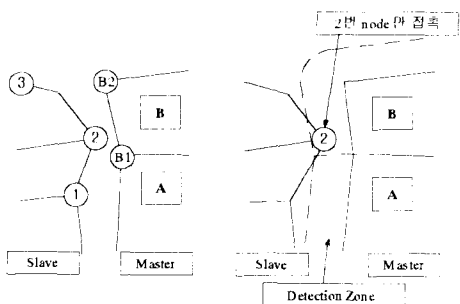


Fig. 4 Detection of contact node

#### 3.2 접촉력 계산

접촉력을 계산하는 알고리즘에는 Wilkins 가 제안한 Sliding Interface<sup>(9)</sup>나 Hallquist 가 제안한 penalty method<sup>(11)</sup>가 있다. 이외에도 여러가지 계산 방법이 있는데 여기서는 defence node 알고리즘<sup>(12)</sup>을 이용하려고 한다. Defence node 알고리즘은 기존의 다른 방법들과는 달리 사용자가 정해주어야 하는 인자가 없이 계산 과정에 사용되는 변수들만으로 계산이 가능한 질점 대 질점 사이의 접촉력 계산 방법이다.

Defence node 알고리즘의 원리는 다음과 같다. 먼저 충돌이 발생하는 master 의 경계면과 slave 의 node 를 접촉 검색을 이용해서 찾으면, Slave 의 node 에서 master 의 경계면에 수직으로 선을 긋는다. 이때 경계면과 수직선이 만나는 점을 가상질점을 만든다 (Fig. 5). 가상질점은 인접해 있는 Master 의 node 들을 이용하여 구한다. 가상질점이 결정되면 가상질점과 Slave 의 node 사이에 운동량 보존 식을 이용하여 접촉력  $f$  를 구한다. 이 힘  $f$  가 구해지면 인접한 master 의 node 들에 힘을 분배해 준다. 이런 과정을 충돌이 발생한 전체의 slave 의 node 에 대하여 반복하면 충돌 계산이 마쳐진다.

#### 3.3 요소소진(Element erosion)

특히 얇은 판재를 다루지 않고 두꺼운 물체를 다루는 경우 충돌이 발생하여 침투과정이 발생하는 대변형 해석 시에 접촉부분에서는 요소가 찌그러지게 된다. 이때 그 모양이 심하게 왜곡되어 (distorted) 적분시간스텝이 줄어들어 더 이상의 충돌 계산을 수행하지 못하게 된다. 따라서 심하게

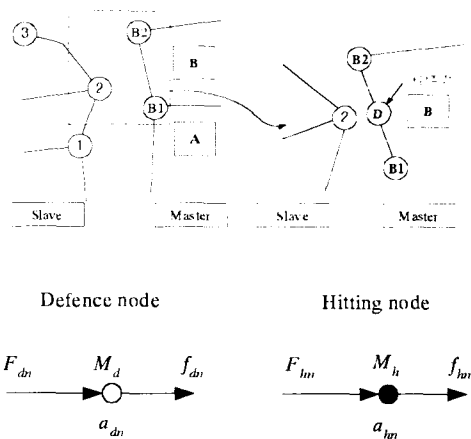


Fig. 5 Interactive force between slave and defence node

왜곡된 mesh 의 경우에는 더 이상 물리적으로 영향을 주지 않는다고 생각되는 요소는 소진시켜 계산에서 제외시켜야 하는데 이를 요소소진이라 한다.

요소소진의 조건으로는 등가 소성 변형률 (effective plastic strain) 또는 등가 기하 변형률 (effective geometry strain) 등이 있으며 현재 본 프로그램에는 등가 소성 변형률의 값이 150%에서 200%사이면 요소소진이 발생한 것으로 한다. 식 (19-21)은 등가 소성 변형률을 계산하는 식이다.

$$\epsilon_{eff}^p = \int \Delta \epsilon_{eff}^p dt \quad (30)$$

$$\bar{\epsilon}_{eff} = \int \Delta \bar{\epsilon}_{eff} dt \quad (31)$$

$$\Delta \bar{\epsilon}_{eff} = \Delta t \left[ \frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

### 3.4 접촉처리기법의 검증

접촉처리 기법의 검증을 위해서는 상용프로그램인 AUTODYN 을 사용하였다. 먼저 축대칭 경우를 고려하였기에 x-축 이외의 면은 traction-free 로 설정된다. Fig. 6 는 각각 Al 7005-T6 와 Al6061-T6 의 충돌을 Fig. 7, Fig. 8 은 OFHC 구리와 Steel V250 의 충돌을 비교하여 나타낸 그림이다. Al6061-T6 의 항복응력은 0.4GPa 로 그리고 다른 재질은 앞에서와 동일한 물성이 사용되었다.

Fig. 7 은 충돌하는 Slave 의 항복응력이 Master 보다 작은 경우로 Slave 쪽에만 심한 변형이 발생하는 경우이다. Fig. 8 은 Fig. 7 과 반대의 경우로 Slave 의 항복응력이 Master 보다 훨씬 크기 때문에 Master 의 변형이 크게 나타남을 본 계산에서도 잘 예측이 되고 있다.

두 가지의 경우를 살펴보면 AUTODYN 과 비교한 결과에서 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 다소 메쉬의 형상에서 hourglass instability 가 조금 나타남을 관찰가능한데 해석에는 큰 차이를 보이지 않는다. 결국 본 연구를 통해 개발된 접촉처리 기법 프로그램의 정확성을 잘 보여주고 있다.

## 4. 결론

유한차분을 이용하여 평면대칭 및 축대칭 2 차원해석을 위한 Lagrangian hydrocode 를 개발하였다. 두 물체이상의 충돌처리를 위하여 접촉면의 추적과 접촉력의 계산을 위하여 defense node 알고리즘

을 사용하였다. 재료의 구성방정식이 단순한 Von-Mises 모델을 사용하여 Taylor-impact test 실험결과와 상용 프로그램인 AUTODYN 수치결과와 비교하여 비교적 우수한 성능을 가지고 있음을 검증하였다. 또한 두 물체간의 대변형 충돌문제를 다루어 AUTODYN 결과와 유사한 결과를 얻었다.

개발된 2차원 프로그램은 앞으로 3차원 프로그램으로의 확장 연구가 요구된다. 또한 Eulerian 수치기법의 개발된다면 문제의 적용범위에 따른 최적의 연계해석(Lagrangan-Eulerian Coupling)을 이용한 수치해석이 가능하리라 판단된다.

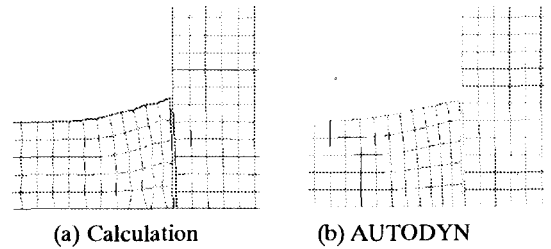


Fig. 6 Al 7005-T6 impact into Al 6061-T6,  $t = 20 \text{ us}$

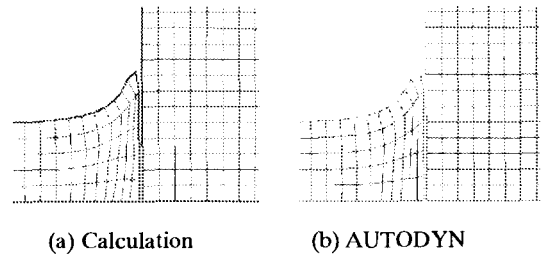


Fig. 7 OFHC copper impact into Steel V250,  $t = 20 \text{ us}$

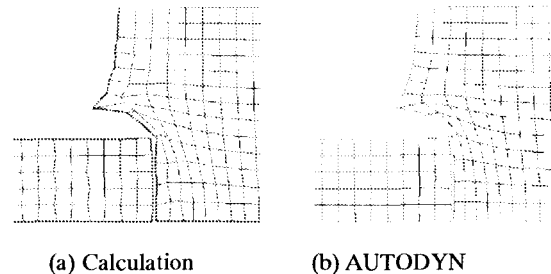


Fig. 8 Steel V250 impact into OFHC copper,  $t = 20 \text{ us}$

## 후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음 (KRF-2001-041-E00019).

## 참고문헌

- (1) Jukas, J. A., 1992, *Impact Dynamics*, Krieger Publishing Company.
- (2) Gingold, R. A. and Monagan, J. J., 1977, "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical stars," *Mon. Not. R. astr. Soc.* Vol. 181, pp. 375~389.
- (3) Wilkins, M. L., 1973, "Calculation of Elastic-Plastic Flow" Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-7322, revision1.
- (4) Chung, D. T., Chung, S. N. and Yoo, Y. H., 2002, "Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impact of Mild Steel Spheres Against Mild Steel Plates," *Transactions of the KSME A*, Vol. 26(3), pp. 576~585.
- (5) AUTODYN-2D, 1999, Century Dynamics.
- (6) Wilkins, M. L., 1980, "Use of Artificial Viscosity in Multidimensional Fluid Dynamic Calculations" *J. of Computational Physics*, Vol. 36, pp. 281~303.
- (7) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures" *Proc. Seventh Int. Symposium on Ballistics*, April.
- (8) Jones, S. E., Jeffrey, A., Dinkard, W. K. and Wilson, L. L., 1986, "An Elementary Theory for the Taylor Impact Test" *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 21(1-2), pp. 1~13.
- (9) Madium, P. J., Bingert, J. F., House, J. W. and Chen, S. R., 1999, "On the Modeling of the Taylor Cylinder Impact Test for Orthotropic Textured Materials: Experiments and Simulations," *Int. J. of Plasticity*, Vol. 15, pp. 139~166.
- (10) Wang, F., Cheng, J. and Yao, Z., 2001, "FFS Contact Searching Algorithm for Dynamic Finite Element Anaysis," *Int. J. Numer. Meth. Engng*, Vol. 52, pp 655~672.
- (11) Hallquist, J. O., Goudreau, G. L. and Benson, D. J., 1985, "Sliding Interface with Contact-Impact in Large-Scale Lagrangian Computations" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 51, pp. 107~137.
- (12) Zhong, Z. H., 1993, *Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*, Oxford University Press.