

외연 유한요소 프로그램을 이용한 고체-액체 조합 구조물의 변형해석 Deformation Analysis of Solid-Liquid Coupled Structure using Explicit Finite Element Program

최형연*
Choi, Hyung-Yun

ABSTRACT

In this study, deformation analysis for solid-liquid coupled structure has been performed using explicit finite element program. In order to model the behavior of liquid, SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) algorithm was adopted. Crash test and simulation for the hydro-type impact energy absorber were given as an example of industrial application. The obtained good correlation between the test results and simulation reveals that the proposed method could be used effectively for the structural analysis of solid-liquid coupled problems

1. 서 론

유체 특히 비압축성인 액체의 거동해석은 최근 들어 비약적으로 발전을 거듭해온 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램으로 인하여 그 정확성과 적용범위가 크게 향상되었다. 하지만 이러한 CFD 프로그램은 아직도 경계면이 움직이는 이른바 "Moving boundary condition" 문제에는 그 한계성을 보이고 있다. 변형체인 고체와 연계된 액체의 변형해석과 같은 것이 그 전형적인 일례라고 할 수 있다. 이러한 문제해결에 도움을 줄 수 있는 수치 기법이 최근 들어 관련 분야에 소개되어 그 활용이 크게 기대 되고 있어 본 논문에서 소개코자 한다. "Gridless" 유한요소법중의 하나인 SPH는 이미 오래 전에 천체물리분야에서 은하계의 생성기구를 규명하기 위하여 개발되어 사용되기 시작하였다. 현재는 유체역학을 비롯하여 재료과학(material science) 분야 등에서도 취성파괴 등의 거동해석에 이용하고 있다. SPH기법에서는 액체를 유체역학의 영향력에 의하여 지배되는 입자들 (particles)의 집합으로 간주하며 이러한 각각의 "가성(pseudo)" 입자들은 질량, Lagrangian 위치 및 속도, 그리고 내부에너지를 지닌다. 반면 그 밖의 물리량들은 구성방정식으로 부터 보간되어 유도된다.

본 논문에서 이러한 SPH 기법을 이용한 고체-액체 연계 구조물의 변형해석 일례를 소개하고자 한다. 변형해석 대상은 물을 이용한 충격완화시설이며 고속도로의 분기부 또는 요금소 앞에 설치되어 사고 시 차량의 충돌에너지 흡수를 목적으로 하고 있다. 본 해석의 목적은 충돌에너지 흡수 효과 정도의 정량적인 분석이며 이를 바탕으로 한 시설물의 최적 설계변수 도출에 있다. 여기서는 해석기법의 소개에 일차적인 목적이 있는 만큼 시설물의 최적설계과정은 생략토록 하겠다.

* 홍익대학교 기계공학과 교수

2. SPH (Smooth Particle Hydrodynamics)

최근들어 그 활용도가 확대되고 있는 "gridless" 공간 분할법 중에 하나로써 변형이 매우 심한 고체, 유체 및 기체 해석에 적합하다. SPH는 Lagrangian 기법을 사용함으로써 일반적으로 전체적인(global) 거동해석에 사용되는 Eulerian 기법이 갖는 국부해석의 어려움이 없으며 또한 grid가 필요치 않아 재료의 대변형 시 요소가 심하게 변형하는 수치해석상의 문제를 근본적으로 피할 수 있다. 1977년 천체 물리에 적용키 위하여 Lucy 등에 의하여 소개된 SPH기법은 1983년 Monaghan과 Gingold가 기체동역학(Gasdynamics)에 있어서의 shock 해석 그리고 1990년 Libersky 와 Petschek등이 구조물의 동적 해석 영역으로 확장하였다. 따라서 SPH는 기존의 수치기법으로는 해석이 어려운 초고속 충돌 및 관통 현상 등의 시뮬레이션에 적합한 기법이다. SPH기법의 계략적인 원리[1,2]는 아래와 같으며 보다 자세한 설명은 본 논문에서 생략하기로 한다.

2.1 기본 개념.

SPH의 본질적인 개념은 물질 내부에 자리하고 있는 임의의 점의 국부적인 성질을 그 점을 둘러싸고 있는 체적의 가중 평균값(weighted average)으로 개산(estimation)하며 연속체를 외력 또는 상호간에 작용하는 힘으로 인하여 자유로이 움직이는 유한한 갯수의 미소입자(particle)로 나누어 모델링 한다는 것이다. 보다 엄밀한 의미로 보면 이러한 미소입자는 단지 적분점 들에 불과하나, 해당 점들의 질량, 밀도, 운동량, 그리고 내부에너지 등이 조합되어 있으므로 재료의 균집과 같다고 할 수 있다.

2.2 기본 수식.

SPH 기법에서는 Fig. 2.3에서와 같은 "smoothing kernel" 또는 가중 함수, W를 사용하여 임의의 r 점에서 가중된 평균값, A(r)을 다음과 같은 수식을 통하여 정의한다.

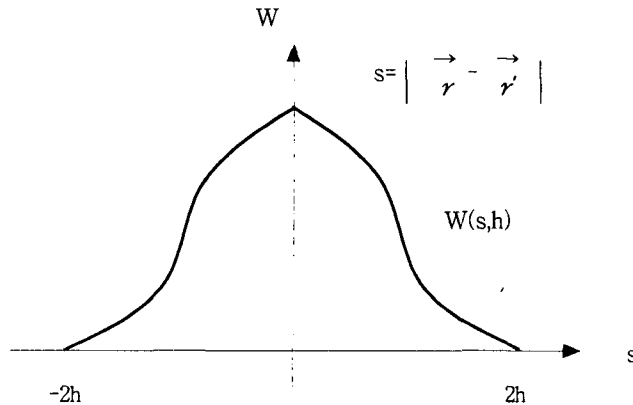


Fig. 2.1 Example of smoothing kernel function

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(r - r', h) dr'$$

여기서 A(r) : 임의의 스칼라, 벡터 또는 텐서 성분

r : 입자의 위치 벡터
 Ω : 적분 영역
 h : Smoothing 길이,

"Smoothing kernel" 또는 가중 함수, W 는 다음과 같은 세가지 조건을 만족하여야 한다.

- Normalization condition

$$\int_{\Omega} W(\vec{r}-\vec{r}', h) d\vec{r}' = 1$$

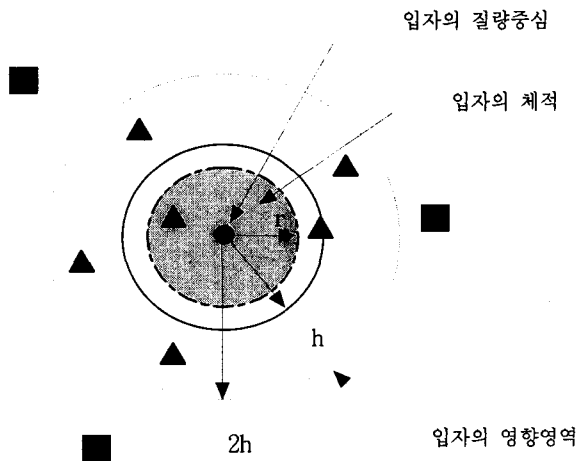
- Dirac delta function condition

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r}-\vec{r}', h) = \delta(\vec{r}-\vec{r}') = 1$$

- Locality condition

$$W(s, h) = 0 \quad \text{where, } |\vec{r}-\vec{r}'| > 2h$$

Fig. 2.4는 위에서 언급한 Smoothing 길이(또는 체적)의 개념을 보여주는 개략도 이다.



- ▲ : particles used at the calculation of weighted average value for particle, P1
- : particles not used at the calculation of weighted average value for particle, P1

Fig. 2.2 Concept of smoothing length and volume

3. 물을 이용한 충격완화시설의 충돌 시험 및 해석

Fig. 2.3과 같은 물통을 이용한 충돌 시험을 수행하였다. 대차를 이용한 충돌 시험으로부터 충돌 시 물통의 변형과 물의 거동을 고속 촬영하였으며 대차의 무게 중심에서 감속도 파형을 측정하였다.

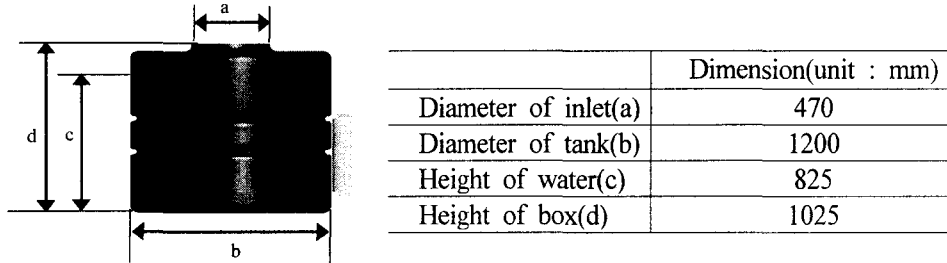


Fig. 2.3 Test specification of dynamic crash of water tank

대차의 중량과 충돌 속도는 각각 1067 kg 그리고 30 km/h이다. 물통의 재질은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)이며 기계적 물성치는 Table 2.1과 같다

Table 2.1 Mechanical properties of water tank (HDPE)

Mass density, ρ (kg/m ³)	958
Elastic modulus, E (GPa)	2.2
Poisson ratio	0.3
Yield stress, σ_0 (MPa)	29.9
% elongation	800

Fig. 2.4는 충돌 시 물통의 변형모습과 물의 거동을 해석결과와 함께 보여 주고 있다. 해석에는 서론 및 전절에서 언급된 SPH 알고리즘이 내재된 고속충돌해석 전용프로그램인 Pam-ShockTM[3,4]을 사용하였다. 해석결과가 시험결과와 매우 유사함을 Fig. 2.2로부터 볼 수 있다. 시험 시 촬영한 고속필름과 해석결과와의 분석으로부터 물통의 충돌 방향 최대 변형량은 충돌 후 180msec. 정도에서 약 650mm (55%) 이며 통속의 물은 충돌 후 80msec. 정도 부터 분출 되기 시작 하였음을 알 수 있었다. 초기에는 후상방으로 향하던 물의 분출 방향은 충돌이 진행되며 전방으로 방향을 바꾸어 솟구치게 되며 또한 최고 분출 속도는 약 12m/s 정도 였다. Fig. 2.5는 계산된 물통의 변형 곡선과 대차 무게중심점의 감속도 파형을 시험으로부터 측정된 결과와 함께 보여주고 있다. 계산된 결과와 측정치가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

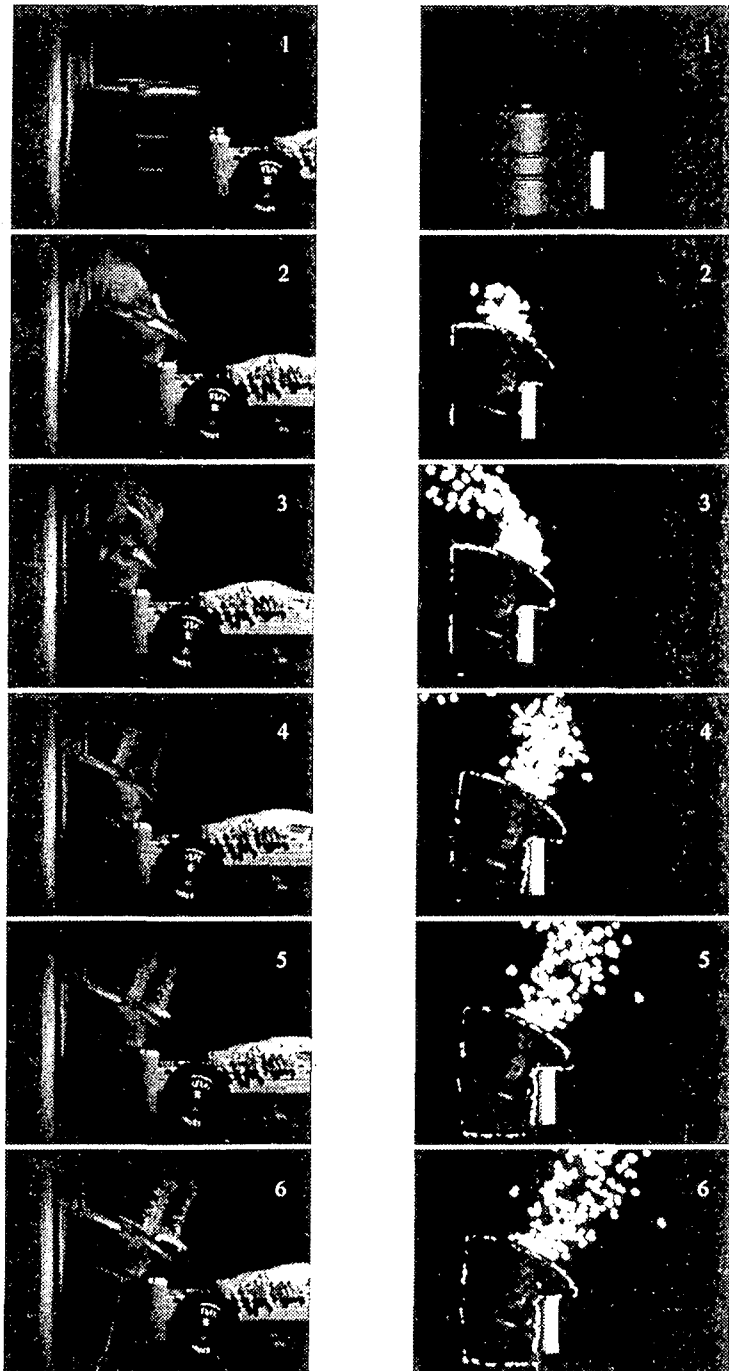
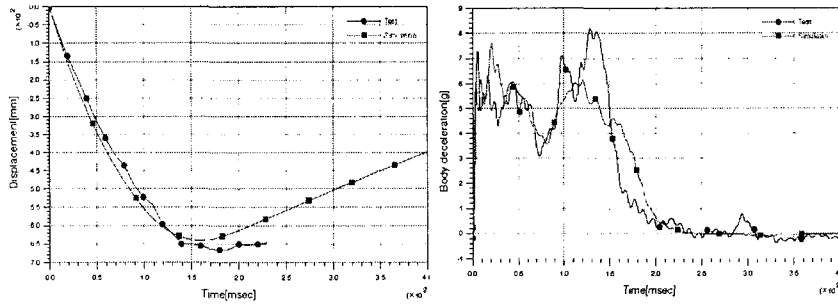


Fig. 2.4 Water tank deformation and splash due to the moving barrier impact
(left: experiment, right: simulation)



(a) Displacement of water tank (b) Body deceleration of moving barrier

Fig. 2.5 Displacement and body deceleration curves

4. 결 론

SPH기법을 이용한 고체-액체 연계구조물의 변형해석을 수행하여 이를 시험 결과와 비교, 분석하였다. 변형모습이나 하중의 크기 모두에서 만족할 만한 해석 결과를 볼 수 있었다.

5. 참고문헌

- [1] Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., "Kernel Estimates as a Basis for General Particle Methods in Hydrodynamics", J. Comput. Phys., 1982
- [2] E. Haug, P. Groenenboom, A. Kamoulakos, M. Przybylowicz and A. Tremecon, "Application of SPH Techniques in the PAM-SCLTM Code Family", PUCA 97, NIHON ESI KK. 1997
- [3] PAM-SHOCKTM solver notes user's manual, PSI, 1998
- [4] PAM-SHOCKTM solver reference user's manual, PSI, 1998