

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(2), 108-115(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.108

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

고속충돌에 의한 원통형 액체 용기의 유체-구조 연성해석

배홍수*, 우경식**, 김인걸***, 김종현****

Analysis of Fluid-Structure Interaction by High Velocity Impact
for Liquid Filled Cylindrical Container

Hongsu Bae*, Kyeongsik Woo**, In-Gul Kim*** and Jong-Heon Kim****

Department of Civil Systems Engineering, Chungbuk National University*

School of Civil Engineering, Chungbuk National University**

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University****

Agency for Defense Development****

ABSTRACT

In this paper, fluid-structure of interaction behavior of a fluid-filled cylindrical polymer container impacted by a high speed spherical projectile was studied using ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) method. The hydrodynamic ram phenomenon occurred by the impact projectile penetrating through the container was investigated by examining time histories of projectile velocity and fluid pressure and density. The analysis results were agreed reasonably well compared to those by experiments.

초 록

본 논문에서는 유체를 포함하고 있는 원통형 용기에 고속의 충격체가 관통하는 경우에 대하여 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법을 사용하여 유체-구조 연성해석을 수행하였다. 해석모델은 물이 채워진 원통형 폴리머 용기를 고려하였으며, 상용유한요소해석 프로그램 LS-DYNA를 사용하여 연구를 수행하였다. 고속의 충격체가 유체를 포함하고 있는 용기에 충격하여 관통하면서 발생한 수압램 현상에 대해 충격체의 거동 시간이력, 유체의 압력 및 밀도 변화를 통하여 발생하는 유체-구조 상호작용 현상을 분석하였다. 해석 결과는 실험 결과에서 얻은 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

Key Words : Analysis of Fluid-Structure Interaction(유체-구조 연성해석), ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian), Hydrodynamic ram(수압램)

1. 서 론

일반적으로 전투용 비행체는 경량성 및 공력 특성의 저하를 막기 위하여 날개의 외피 안쪽을 연료탱크로 사용한다. 이 경우 연료탱크는 전투환

경에서 외부의 위협을 받으며 외부의 충격에 의하여 심각한 전투 손상을 입을 수 있다. 수압램 현상은 대표적인 전투 손상으로 유체를 포함하는 구조물에 고속의 물체가 관통/폭발과 함께 발생되며, 이 현상은 연료탱크가 있는 날개 구조물에서

† Received : June 23, 2015 Revised : January 25, 2016 Accepted : January 26, 2016

** Corresponding author, E-mail : kw3235@chungbuk.ac.kr

일어날 수 있다. 수압랩 현상으로 인하여 유체 내부에는 최대 약 600기압 이상의 높은 압력을 발생시킬 수 있으며, 이러한 압력은 비행체 날개 구조물에 대하여 심각한 손상을 초래한다[1].

수압랩 현상은 유체와 구조물 사이의 상호작용에 밀접한 관계가 있기 때문에 정확한 수압랩 현상을 규명하는 것은 상당히 어렵다. 그러나 수압랩 현상에 의한 전투기의 심각한 전투손상을 예방하기 위하여 고속충격에 의한 수압랩 현상이 구조물에 미치는 영향을 잘 이해하고 있어야 한다[2].

수압랩 현상은 충격체의 진행과정에 따라 충격, 관통, 공동생성 그리고 탈출의 4단계로 구분할 수 있다[3]. 각 단계에 따라 구조물은 각기 다른 형태와 정도로 구조물에 손상이 발생하게 된다. 충격체가 유체를 포함한 구조물에 고속충돌하여 관통하게 되면 충격체가 가지고 있던 에너지가 유체로 전달된다. 유체로 전달된 에너지는 높은 압력의 반구형태 충격파를 발생하게 된다. 이를 충격단계라고 하며, 주로 충격체가 충돌한 부근에 영향을 주게 되며, 충격파의 크기는 충격체의 충돌에너지에 의하여 결정된다.

관통단계는 충격체가 유체를 관통해 나가는 단계로 충격체는 유체에 의해 항력을 받게 되며 이로 인하여 속도는 감소하게 된다. 또한 충격체가 이동하는 경로 주변의 유체에서는 충격체로 인하여 방사형태의 압력장이 발생하며, 이 압력장은 상당한 크기와 긴 지속시간을 가지고 있기 때문에 구조물 파괴의 주요 원인을 제공한다.

충격체가 유체를 통하여 이동함에 따라 충격체 뒤에는 순간적으로 유체가 비는 공동(Cavity)현상이 발생하는데 이를 공동생성단계라고 한다. 이 공동은 충격체가 반대쪽 구조물 벽을 통하여 빠져나간 이후에도 압력파에 의하여 계속 확장과 수축을 반복하면서 조금씩 사라지는 진동현상을 보인다. 이후 탈출단계에 이르러 충격체는 초기 충격단계와 유체에서 발생한 충격파에 의하여 응력이 발생한 구조물의 반대편 벽을 빠져나가게 된다.

항공 기술 선진국에서는 1970년대 이래로 수압랩 현상으로 발생하는 전투 손상을 예방하기 위하여 수압랩 현상에 많은 관심을 기울이고 있다. 연구 초기에는 다양한 연구자들[4-6]에 의하여 유체를 포함하고 있는 용기에 충격체를 충돌하여 발생하는 수압랩 현상에 대하여 연구하였다. 한편 Ball[3,7]은 피스톤 이론을 적용하여 수치 해석적으로 현상을 예측하는 방법을 시도하였으나, 구조해석코드에서 획득한 결과와 실험의 결과를 맞추는 것은 실패하였다. 이후, Kimsey[8]

는 연속체 방정식과 재료 구성방정식을 이용하여 수압랩 현상을 예측하는 시도를 하였다. 이 연구에서는 라그랑지(Lagrangian) 유한 요소법을 기반으로 관통이 발생하는 원형 탱크에 대하여 수압랩 현상 연구를 수행하였다. 해석결과 많은 요소들에서 아주 큰 크기의 요소 왜곡이 발생하였지만 획득한 결과를 통하여 현상을 이해할 수 있는 수준이었다.

수압랩 문제에서 라그랑지 방법을 사용하였을 경우 요소의 왜곡이 발생하는 것이 문제이다. 그러나, 오일러(Eulerian) 방법의 경우는 고정된 격자망을 사용하기 때문에 요소의 왜곡 문제에서 자유롭다. 1990년대 초반 라그랑지 방법과 오일러 방법의 단점을 보완하고 장점들을 상황에 맞게 적절하게 결합한 형태의 새로운 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법[9-13]이 개발되었다. 이 방법은 주로 구조와 유체의 연동해석과 같이 요소에서 큰 왜곡이 발생하는 문제에서 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 유체가 채워진 폴리머로 된 원통형 용기에 구형 발사체가 고속으로 충격,관통하는 문제에 대하여 ALE 방법을 채용하여 유체-구조연성해석을 수행하였다. 상용유한 요소해석 프로그램 LS-DYNA를 사용하여 충격체와 용기는 라그랑지 요소로, 그리고 유체는 ALE 고체요소로 모델링 하였다. 해석 결과를 실험의 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였고, 충격체의 거동시간이력, 유체의 밀도 및 압력변화, 에너지 시간이력 등에 대하여 고찰하였다.

II. 해 석

2.1 ALE 방법

ALE 방법의 지배방정식은 요소와 요소사이의 질량 보존식, 운동량 보존식, 그리고 에너지 보존식에 의하여 구성된다. 이러한 3가지 보존식은 물체의 요소 속도 및 변위를 계산하는데 사용되며, 아래의 식 (1)-(3)은 각각 질량 보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙, 그리고 에너지 보존의 법칙에 대한 식을 나타내고 있다. 여기에서 ρ 는 밀도를, x 는 변위를, v 는 물체 속도를, u_i 는 요소 속도를, 그리고 e 는 에너지를 의미한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - (v_i - u_i) \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \sigma_j v_{i,j} + \rho b_i v_i \quad (3)$$

라그랑지 방법에서 보존식은 물체의 속도와 요소에서의 속도가 동일하다고 가정하고 물체에서 발생하는 변형된 메쉬를 계산하게 된다. 이때 요소에서 큰 크기의 왜곡이 발생하게 되는데, 계산을 계속하기 위하여 왜곡이 발생한 요소를 조정하는 복잡한 과정을 통하여 계산을 진행시킬 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 굉장히 큰 계산 용량이 필요하며, 왜곡이 발생한 요소를 조정하는 과정을 통하여 얻은 결과도 신뢰성이 높지 않을 수 있다.

오일러 방법에서는 고정된 요소망을 사용하기 때문에 요소에서의 속도를 0으로 두고 계산을 진행하게 된다. 첫 번째 단계에서 발생하는 왜곡의 크기가 허용된 구간 안에서는 라그랑지 방법을 통하여 계산을 진행하게 되며, 계산 중 요소에서 큰 왜곡이 발생하게 되면 오일러 방법으로 전환하여 계산을 계속 하게 된다. 오일러 방법에서는 발생한 요소의 속도를 0으로 재설정하고, 변형된 요소의 절점을 원래의 요소 절점으로 복원하여 계산을 진행하게 된다.

ALE 방법은 앞서 서술한 오일러 방법과 비슷한 과정을 걸쳐서 계산이 진행되게 된다. 그러나, 변형이 발생한 요소의 절점을 원래의 요소 절점이 아닌, 스무딩 알고리즘(smoothing algorithm)을 통하여 보간된 요소의 절점으로 재설정을 하게 된다. 또한, 스무딩 알고리즘에 의하여 재설정된 요소망에 물체의 유동(flux)이 적용되며, 이러한 유동의 크기는 스무딩 알고리즘에 의하여 결정된다. 이러한 반복적인 과정을 통하여 ALE 방법에서는 발생하는 요소의 왜곡과 계산상의 오차를 최소화하면서 계산을 진행해 나가게 된다. 그러나, 스무딩 알고리즘에 의해 요소망을 재설정하는 과정에서 비교적 큰 크기의 계산 시간이 요구되는 단점도 있다.

2.2 유한요소모델링

Figure 1은 본 연구에서 고려한 해석형상의 개략적인 모습을 보여주고 있다. 원통형 용기는 약 0.6 mm 두께의 일반 PET(polyethylene terephthalate)병 용기로 길이는 260 mm 이다. 투명한 PET 폴리머 용기를 선택한 이유는 수압램의 주요현상(충격, 관통, 공동생성 그리고 탈출단계)을 실험적으로 관측하고 이를 해석결과와 비교하기 위한 것이다. 충격체가 충돌, 관통하는 용기의 입구부분의 지름은 85 mm, 충격체가 관통한 후 용기를 빠져나가는 출구의 지름은 25 mm이다.

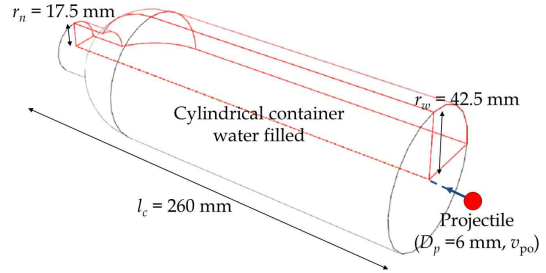


Fig. 1. Schematic of fluid filled container

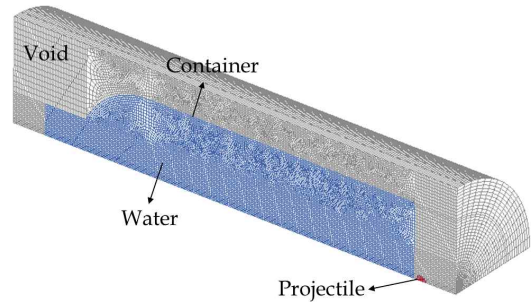


Fig. 2. Mesh of analysis model

용기에는 물이 가득 차 있으며, 지름이 6 mm 인 원형 강철 충격체를 사용하여 초기 속도(v_{pi}) 200 m/s 으로 고속 충돌하도록 하였다. 고려한 해석형상은 충격체의 경로를 기준으로 대칭인 형태이므로 전체의 1/4만을 대칭 경계조건을 이용하여 모델링하였다. 또한 충격체가 빠져나오는 용기의 좁은 끝 부분에서 축방향의 변위를 구속하였다.

Figure 2는 본 연구에서 고려한 해석 유한요소 모델을 보여주고 있다. 용기는 4336개의 쉘요소를, 충격체는 112개의 강체요소를 사용하여 모델링 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 유체는 용기 안은 물로, 밖은 보이드(Void)로 되어 있다. 유체 요소는 ALE 방법을 채택한 238672개의 고체 요소(ELFORM=12)를 사용하였으며, 물과 보이드 사이에는 동일한 접촉면을 공유하여 흐름을 표현하였다. 이러한 문제와 같이 충격체와 용기의 고속 충돌, 그리고 충격체의 이동에 따른 유체의 거동을 잘 표현하기 위해서는 충격체가 지나가는 주변으로 높은 밀도의 격자망을 사용하여 유체와 구조물 상호작용을 고려하는 것이 유리하다. 본 연구에서는 사전 연구를 통하여 충돌과 유체의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있는 격자망을 사용하였다(현재 모델보다 상세한 요소망을 사용한다면 충격체 거동시간이력 등에 대하여 더 유사한 결과를 얻을 수 있으나, 계산자원의 한계와 상세한 요소망의 ALE 요소의 경우 해석에서

불안정성을 야기할 수 있기 때문에 적절한 요소망을 사용하는 것이 중요하다[12]).

2.3 구성요소 모델링

유체인 물은 프로그램 내 물의 점성 구성 방정식을 정의하여 모사하였다. 점성 구성 방정식은 응력 텐서(σ_{ij})를 동적 점성계수(ν_d), 평향변형률속도($\dot{\epsilon}_{ij}$), 그리고 압력(P)의 함수로 되어있다. 여기에서 압력은 Mie-Gruneisen 방정식으로 압축을 받는 경우와 인장을 받는 경우에 대하여 다음과 같이 구할 수 있다. 아래의 식 (4)은 압축을 받는 경우이며, 식 (5)는 인장을 받는 경우이다. 여기에서 $u_s - u_p$ 곡선의 절편(intercept)을, S_1, S_2, S_3 는 $u_s - u_p$ 곡선 기울기의 계수를, γ_0 는 Gruneisen 감마를 의미한다. 본 연구에서 고려한 물성치 및 상태변수는 참고문헌[12,14]을 참조하였으며, Table 1에 자세히 나타나 있다.

$$P = \rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right] \left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (4)$$

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (5)$$

용기와 충격체의 재료는 각각 강철과 PET이며 물성치는 Table 2에 정리되어 있다. 여기서 PET의 물성치는 Buchar 등[15]과 PLASTECH [16]에서 제공하는 정보를 참조하였다. PET는 폴리머 재료의 대표적인 종류의 하나로, 큰 소성 변형률과 변형률 속도에 따른 거동이 달라지는 재료의

Table 1. Material property for water

ρ (Kg/m ³)	1000	S_2	0
ν_d (Pa·s)	0.89×10^{-3}	S_3	0
C(m/s)	1448		0.11
S_1	1.979	A	3.0

Table 2. Material property for solid

	PET	Steel
E (GPa)	2.25	207
ν	0.39	0.28
ρ (Kg/m ³)	1380	7830
σ (MPa)	41.5	-
σ_{ult} (MPa)	60	-
ϵ_f	0.153	-

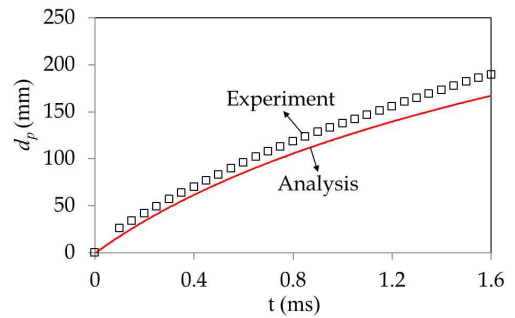
특성을 가진다. 또한, 수압람 현상은 높은 변형률 속도를 일으키기 때문에 PET 용기 내부에서 발생하는 현상을 고려할 수 있는 폴리머 재료 모델링에는 한계가 존재한다.

유체-구조 연성해석과 같이 유체와 구조사이의 상호작용을 다루는 문제에서는 각각의 모델링 요소들 사이의 상호접촉 조건을 정의하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 구조와 구조(충격체와 용기) 사이의 접촉 조건은 벌칙함수 방법(Eroding_Surface_to_Surface)을 적용하였다. 유체와 구조(물과 충격체, 알루미늄 용기 및 아크릴 벽)사이의 상호 작용은 벌칙함수를 기본으로 하는 Constrain_Lagrange_in_Solid (CTYPE=4, penalty coupling)결합을 적용하였다.

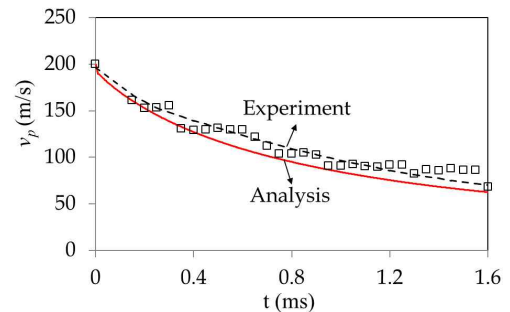
III. 결과 및 고찰

3.1 충격체 거동시간이력

Figure 3은 본 연구에서 수행한 유체-구조연성 해석으로 얻은 충격체의 거동시간이력을 실험을 통하여 얻은 결과와 비교하여 보여주고 있다. 여기서 실험결과는 유체를 포함하는 원통형 용기에



(a) displacement



(b) velocity

Fig. 3. Time history of projectile behavior

고속의 충격체가 초기속도 200 m/s로 충돌, 관통하는 경우에 대한 것으로 참고문헌 [17]에서 수행된 결과이다. 초기 속도 200 m/s로 용기의 입구 벽면을 고속으로 충돌한 충격체는 입구 벽면을 관통하여 유체 내부로 진행하면서 충격체의 속도가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그림에서 나타나듯이 실험과 전산해석 결과는 상당히 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나, 시간이 지나감에 따라 전산해석과 실험에서의 이동거리, 속도 시간이력이 약 5% 정도의 차이를 보이는데, 이는 전산해석상에서 유체-구조 상호작용의 한계를 고려하였을 때 비교적 정확한 결과라고 할 수 있다.

3.2 유체 압력 분포 및 시간이력

Figure 4는 충격체가 유체를 지나가면서 발생하는 유체 압력 분포를 시간에 따라 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 고속의 충격체가 용기의 입구 벽면을 충돌하게 되면 충격체가 가지고 있던 높은 운동에너지를 용기의 벽면을 통하여 유체로 충격파를 전달하게 되며 이로 인하여 반구형태의 압력이 유체내부에 발생하게 된다. 용기의 입구 벽면을 충돌, 관통해 유체로 들어온 충격체는 유체와 접촉하여 상호작용을 하며 반대쪽 벽을 향하여 이동한다. 충격체가 유체내부로 진행하면서 충격체는 유체에 의하여 항력을 받게 되고, 충격체 주변으로 유체에 방사형 압력장이 발생하였다. 또한, 충격체가 이동함에 따라 충격체 뒤에는 유체가 비는 공동현상이 발생하였는데 이는 Fig. 4.(b) ~ (d)에서 볼 수 있다. 이후 충격체는 앞서 발생한 충격파에 의하여 응력이 발생한 구조물의 반대편 벽을 관통해 나가게 되며, 구조물 벽근처의 유체에서는 압력파가 확장과 수축을 반복하는 진동현상이 발생하게 된다.

수압랩 현상으로 유체에 발생하는 압력은 구조물의 파손의 원인이 되므로, 유체 내부에서 발생하는 압력을 파악하는 것은 수압랩 현상을 이해하기 위하여 필수적이다. Fig. 5는 유체에서 발생하는 압력의 크기를 알아보기 위하여 Fig. 4.(a)에서 나타낸 바와 같이 유체 내부의 두 위치(P_1 , P_2)에서 발생하는 압력을 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 용기의 충격 벽면과 가까운 위치에 있는 P_1 에서의 압력시간이력에서 0.05 ms와 그 이후로 주요한 두 개의 유체내부의 압력상승이 나타나는데, 이는 충격단계에서 발생한 충격파(shock wave)와 관통단계에서 발생한 압력파(drag wave)를 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 발생하는 압력이 시간에 따라 증가하고 감

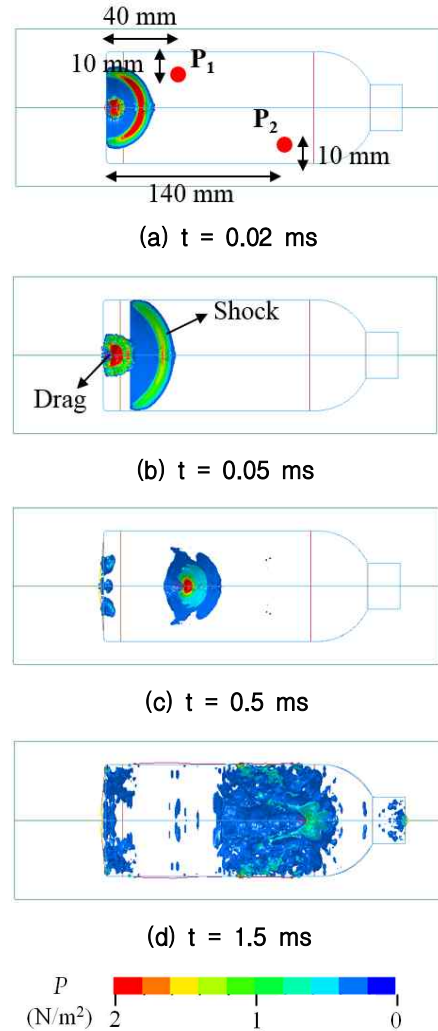


Fig. 4. Timeline of pressure distribution

소하는 경향은 비교적 유사하게 나타나고 있으나, 발생하는 압력의 크기는 차이를 보이고 있다. 이는 발생하는 압력은 유체를 포함하고 있는 구조물(용기)의 변형과 밀접한 영향이 있는데, 본 연구에서 고려한 용기의 재료 물성치 모델링의 문제로 인하여 전산해석과 실험사이에서 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 일반적인 구조재료와 달리 폴리머는 수습에서 100% 이상의 매우 큰 소성변형을 하는 특징이 있는데 이 정도의 소성변형을 정확히 모사하기는 매우 어렵다. 또한 탄성-소성의 경계도 불확실하며 큰 변형률속도 (high strain rate) 상태에서 폴리머 재료의 점성도 영향이 있는데(eg., [18]) 모든 변형률속도에 대해 물성치 선도를 구하는 것은 현실적으로 불가능 하므로 본 연구에서는 응력-변형률 선도에

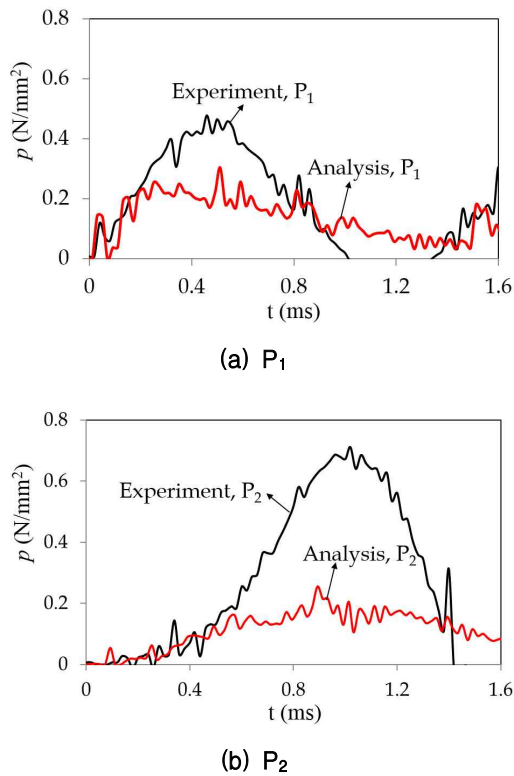


Fig. 5. Time history of pressure variation

대해 민감도 해석 등 다양한 방법을 시도하였으나 완전히 일치하는 결과를 얻지는 못하였다. 이와 더불어 구조의 변형이 클수록 구조-유체 상호작용의 오차가 증가하게 되는데 구조의 강성이 증가하여 변형이 작을수록 압력의 크기와 최대압력 발생시점의 시간지연이 실험결과와 보다 더 잘 일치하는 것으로 알려져 있다[19]. Fig. 5의 비교에서 초기에는 구조변형의 크기가 상대적으로 작으므로 유체와의 상호작용도 상대적으로 작으므로 오차가 작게 나타나나, 점차 구조변형이 크게 발생함에 따라서 상호작용의 크기가 증가하고 따라서 이에 의한 오차도 증가하는 것으로 판단된다.

이러한 폴리머 재료의 재료 물성치 모델링의 한계 등으로 인하여 기존의 연구에서는 폴리머 용기 내부에서 발생하는 수압램 현상을 예측하지 못하였으나, 본 연구에서는 폴리머 용기 내부에서 발생하는 수압램 현상을 정성적으로 분석할 수 있음을 보였다.

3.3 유체의 공동생성

고속의 충격체가 유체 내부를 지나가면서 유

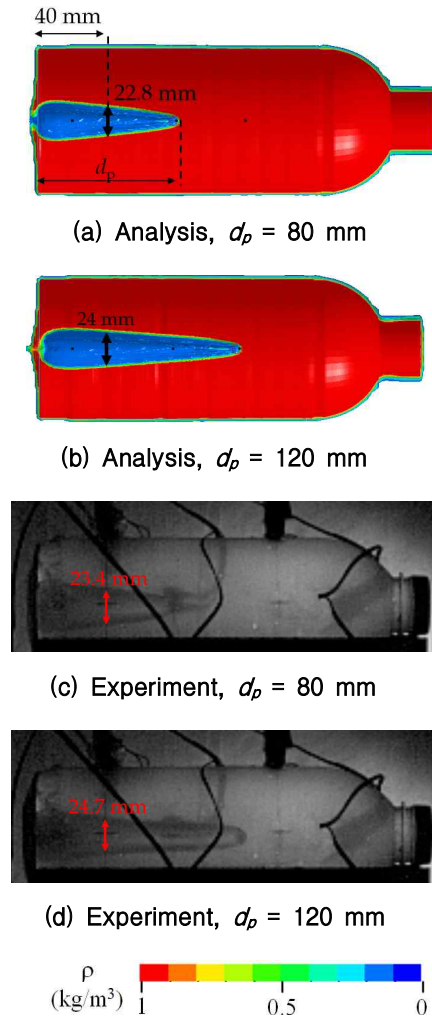


Fig. 6. Timeline of cavity evolution obtained from analysis and experiment

체는 충격체에 의하여 주변으로 밀려나게 되며, 충격체 뒤로는 원뿔 형태의 공동이 생성된다. 생성된 공동은 충격체의 운동에너지 크기에 따라서 형태와 크기가 영향을 받게 되며, 충격체의 이동에 따라서 공동의 형태와 크기가 변화한다. Fig. 6은 충격체의 이동거리가 80 mm, 120 mm일 때 발생한 공동의 크기를 충격면에서 40 mm 떨어진 지점에서 전산해석과 실험을 통하여 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전산해석을 통하여 충격체의 이동거리(d_p)가 80 mm일 경우 22.8 mm 크기의 공동이, 120 mm일 경우 24 mm 크기의 공동이 생성되었으며, 실험에서는 이동거리 이동거리(d_p)가 80 mm일 때 23.4 mm 크기의 공동이, 120 mm일 때 24.7 mm 크기의 공동이 발생하였다. 전산해석과 실험에서 발생한 공동의 크

기는 약 2.5%와 2.8%의 차이를 보이고 있지만, 발생한 공동의 형태가 매우 유사할 뿐만 아니라 발생한 오차 역시 전산해석을 통하여 실제 발생한 공동의 생성을 적절하게 예측할 수 있는 수준이라고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유체를 포함하고 있는 폴리머로 된 원통형 용기에 원형 충격체가 관통하는 문제에 대하여 ALE 방법을 채용하여 유체-구조 연성해석을 수행하였다. 충격체와 용기는 라그랑주 요소로, 그리고 유체는 ALE 고체 요소로 모델링하였다. 해석결과를 실험을 통하여 얻은 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였고, 충격체의 거동시간이력, 유체의 밀도 및 압력변화 분포 등에 대하여 고찰하였다.

해석 결과, 충격체가 용기에 충돌, 관통하여 들어가 유체 내부에서 진행하면서 보이는 충격체의 거동은 실험결과와 상당히 유사한 경향을 보였다. 시간이 지남에 따라서 실험결과와의 약간의 오차를 보이는데, 이는 폴리머의 비선형 재료 모델링의 문제 및 발생하는 오차의 누적에 기인한 것으로 판단된다. 충격체가 유체 내부를 진행함에 따라 유체 내부에서는 알려진 수압램 현상이 발생하였다. 충격체가 용기를 관통하여 유체와 충돌하면서 유체에서는 충격파가 발생되었으며, 충격체가 유체 내부에서 진행하면서 충격체 주변으로 유체에 방사형태의 압력장이 생성되었다. 충격단계와 관통단계에서 발생하는 압력과는 실험과 비교하였을 때, 압력파가 발생하는 시점과 기간은 두 위치에서 정성적으로 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 그러나, 압력파의 크기를 정확하게 예측하는 것에는 한계가 있었는데, 이는 압력파에 밀접한 영향이 있는 용기의 변형이 실제 발생하는 용기의 거동을 예측하는데 재료 모델의 불확실성을 포함하고 있기 때문이라고 판단된다. 진행되는 충격체 뒤로는 유체가 비는 공동현상이 발생하여, 공동의 형태와 크기는 해석과 실험의 결과가 상당히 유사하였으며, 이를 통하여 폴리머 용기의 재료모델에서 야기하는 해석의 한계를 제외한 수압램 현상의 기본적인 현상을 유체구조 연성해석을 통하여 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 : ADD-13-01-08-23).

References

- 1) Ball, R., *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, 2nd Ed., *AIAA*, 2003
- 2) Hinrichsen, R., Kurtz, A., Wang, J., Belcastro, C., and Park, S., L., "Modeling Projectile Damage in Transport Aircraft Wing Structure", *AIAA Journal*, Vol. 46, 2008, pp. 328~335.
- 3) Ball, R., "A Computer Program for The Geometrically Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Arbitrary Loaded Shells of Revolution", *Theory and User's Manual, NASA:CR-1987*, 1972.
- 4) Mcmillen, J., Harvey, E., "A Spark Shadowgraphic Study of Body Waves in Water", *J. Applied Physics*, 1946.
- 5) Vasudev, A. and Meehlma, J., "A Comparative Study of The Ballistic Performance of Glass Reinforced Plastic Materials", *J. SAMPLE Quart*, 1987.
- 6) Cantwell, W. and Morton, J., "Influence of Target Geometry on The High Velocity Impact Response of CFRP", *J. Composite Structure*, 1988.
- 7) Ball, R., "Aircraft Fuel Tank Vulnerability to Hydraulic Ram: Modification of the Northrup Finite Element Computer Code BR-1 to Include Fluid-structure Interaction", *Theory and User's Manual for BR-1HR*, 1972.
- 8) Kimsey, K., "Numerical Simulation of Hydrodynamic Ram", *Technical report, ARBRL-TR-02217, US Army Ballistic Research Laboratory*, 1980.
- 9) Santini, P., Palmieri, D., and Marchetti, M., "Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction in Aircraft Fuel Tanks Subjected to Hydrodynamic Ram Penetration", *21st ICAS Congress*, 1998.
- 10) Souli, M., Olovsson, L., and Do, I., "ALE and Fluid-Structure Interaction Capabilities in LS-DYNA", *7th International LS-DYNA User Conference*, 2002, pp. 27~36.
- 11) Seddon, C., Moodie, K., Thyer, A., and Moatamedi, M., "Preliminary Analysis of Fuel Tank Impact", *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9, 2004, pp. 237~244.

- 12) Varas, D., Lopez-Puente, J., and Zaera, R., "Numerical Modeling of The Hydrodynamic Ram Phenomenon", *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 36, 2009, pp. 363~374.
- 13) Varas, D., Lopez-Puente, J., and Zaera, R., "Numerical Analysis of The Hydrodynamic Ram Phenomenon in Aircraft Fuel Tank", *AIAA J.*, Vol. 50, 2012, pp. 1621~1630.
- 14) Boyd, R., Royles, R., and El-Deeb, K. M. M., "Simulation and Validation of UNDEX Phenomena Relating to Axisymmetric Structures", *6st International LS-DYNA Users Conference Simulation*, 2000, pp. 21~36.
- 15) Buchar, J., Rolc. S., Lazar, M., and Starek, M., "The Development of The Glass Lamincates Resistant to The Samll Arms Fire", *19st International Symposium of Ballistics*, 2001, pp. 1439~1445.
- 16) <http://www.mtplastech.com/Product-Pet-Physical-Mechanical.aspx>
- 17) E. S. Go, I. G. Kim, S. H. Park, J. W. Park, J. H. Kim, "Measurement of Dynamic Strains on Cylindrical Vessel Subjected Hydrodynamic Ram Using PVDF Sensors", *2015 KSAS Annual Spring Conference*, 2015, pp. 264~267.
- 18) Mulliken, A.D. and Boyce, M.C., "Mechanics of the Rate-Dependent Elastic-Plastic Deformation of Glassy Polymers from Low to High Strain Rates", *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 43, Iss. 5, 2006, pp. 1331~1356.
- 19) Kim, J.H., Kim, C.G., and Jun, S., "Analysis and Test of Hydrodynamic Ram in Welded Metallic Water Tank", *Int. J. Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 16, No. 1, 2015, pp. 41~49.