

연료탱크의 유탄성 해석을 위한 적응적 FSI 기법에 관한 연구

Study on Adaptive FSI Technique for Hydroelastic Analysis of Liquefied Fuel-Storage Tank

구준효* · 정의봉† · 조진래** · 안세진*** · 김당주****

Junhyo Koo, Weuibong Jeong, Jinrae Cho, Sejin Ahn and Dangju Kim

1. 서 론

오늘날 액화 천연가스의 수요가 급증하고 있는 가운데 특히 차량용 에너지로 크게 부각되고 있다. 천연가스의 경우 액화상태로 연료탱크 내에 저장되기 때문에 차량의 가속 시에 슬로싱이라 불리는 탱크 내부의 연료의 출렁임 현상은 자동차의 주행 안정성을 저해할 수 있을 뿐만 아니라 내부 액화 연료의 시간에 따른 동수압(hydrodynamic pressure) 변동으로 인해 차량자체에도 소음과 진동을 유발할 수 있다. 본 논문에서는 FEM-FVM 기법을 사용하여 유체-구조 연성 문제를 풀 때 발생할 수 있는 과도한 해석시간을 줄이기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 적응적 FSI 기법에 대한 소개

연료탱크가 강체일 경우와 탄성체일 경우 내부 유체의 동수압은 상당히 달라질 수 있다. 또한 탱크를 탄성체로 가정하여 유체-구조 연성문제를 풀 경우에는 단순한 유동해석과 달리 연성 알고리즘의 사용에 따른 해석시간이 현저하게 증가한다. Fig.1 은 이를 해결하기 위한 적응적 FSI 기법의 개략도를 보여준다. 해석은 두 단계로 나뉘며, 첫 번째 해석은 탱크를 강체로 가정하여 속도를 가하게 되면, 오일러 요소에서 유속, 압력, 체적분율의 정보를 산출할 수 있다. 이 정보들은 탱크를 탄성체로 가정한 두 번째 해석에서 유체의 초기조건으로 작용하며 탱크 내 유체의 동수압뿐만 아니라 탱크 구조물의 절점에서 가속도, 변위 등의 시간이력을 산출해 낼 수 있다. 즉, 관심의 대상이 되는 시점에 유체-구조 연성 해석을 사용함으로써 매우 짧은 해석시간 내에 구조물의 동적응답을 효과적으로 계산할 수 있다.

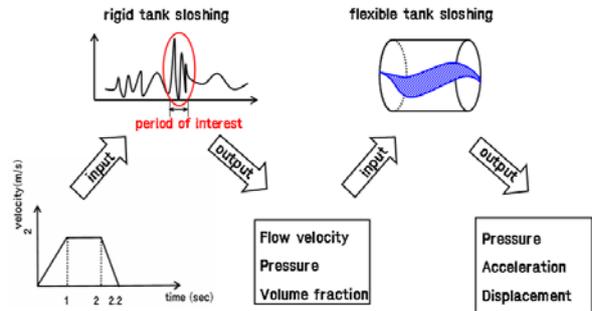


Fig. 1 Schematic diagram on adaptive FSI scheme

2.2 해석 모델 정의

Fig. 2(a)는 유체가 차있는 직사각형 연료 탱크 모델이며 유체는 Fig. 2(b)는 탱크에 진행방향(X방향) 으로 가해지는 속도 데이터이다. 탱크의 밀도는 $7,850\text{kg/m}^3$, 탄성 계수는 $2.0 \times 10^{11}\text{Pa}$, 프아송비는 0.3으로 설정하였다. 탱크의 두께는 2mm로 설정하였다. 내부 유체는 오일러 요소로 이루어져 있으며, 유체의 채움률은 탱크 내부 체적의 2/3이며 나머지 1/3은 void요소로 처리하였다. 유체의 밀도는 $1,000\text{kg/m}^3$, 체적계수(bulk modulus)는 $2.2 \times 10^9\text{N/m}^3$ 로 설정하였다.

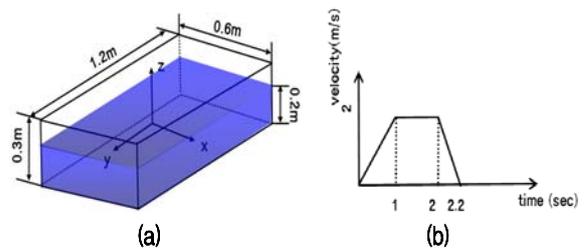


Fig. 2 Illustration:(a) liquefied fuel-storage tank model (b) time-velocity input data

2.3 강체 탱크 내 유체의 슬로싱 해석

적응적 FSI의 첫 번째 단계로 먼저 연료탱크가 강체일 경우에 대해 수치해석을 수행하였으며 전체 오일러영역에서 유속, 압력, 체적분율의 정보를 산출하고 저장하였다. Fig. 3은 2.5sec 동안에 발생한 탱크의 전면부에서 동수압 변동을 나타낸다. 동수압의 크기와 변동은 탱크가 급감속 하는 구간을 포함하는 2.1~2.4 sec의 시간대에서 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

† 교신저자; 정희원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2337, Fax : (051) 510-3805
* 부산대학교 대학원 기계시스템설계
** 부산대학교 기계공학부(주)마이다스아이티
*** 르노 삼성
**** (주) 로커스

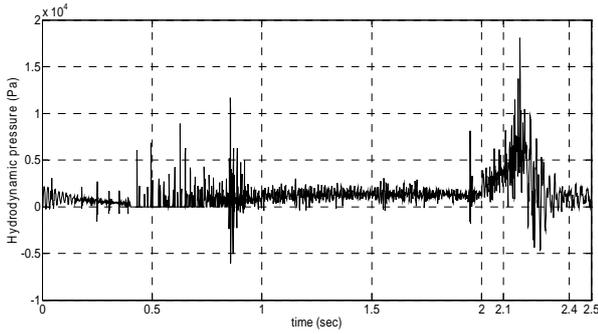


Fig. 3 Time history of hydrodynamic pressure at the front of tank

2.4 적응적 FSI 기법의 적용 및 수치해석 결과

적응적 FSI의 두 번째 단계로 동수압의 변동이 큰 시간대에 대해 탱크를 탄성체로 바꾸어 해석한다. 이 때 첫 번째 수치 해석을 통해 산출된 유체정보는 두 번째 해석의 초기 조건으로 작용하게 된다.

Fig. 4는 동수압의 변동이 큰 2.1~2.4 sec의 시간대에서 탱크의 탄성 유무에 따른 탱크 전면부에서 산출한 동수압의 시간 변화를 나타낸다. 전반적으로 서로 다른 경향을 보이며 탱크가 탄성체 일 때 동수압의 변동이 현저하게 크다. 또한 2.1sec에서 2.15sec 사이에서 시간이력을 보면 강체 일 때 동수압의 변동이 매우 작음을 알 수 있다.

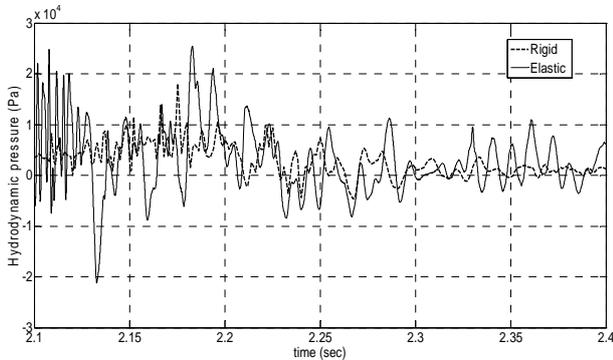


Fig. 4 Time history comparison for hydrodynamic pressure between rigid and elastic tank sloshing

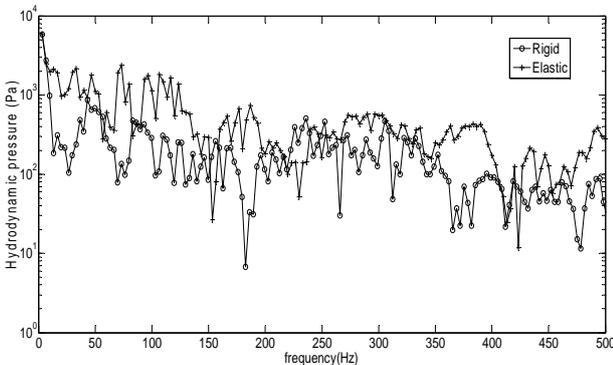


Fig. 5 Frequency domain comparison for hydrodynamic pressure between rigid and elastic tank sloshing

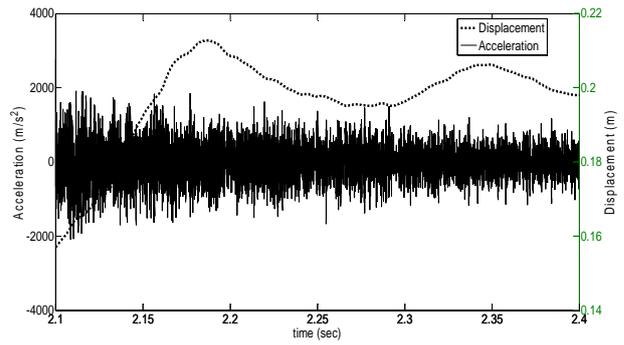


Fig. 6 Time history of acceleration and displacement of the front of tank

Fig. 5는 Fig.4의 시간이력 데이터를 주파수 도메인에서 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 두 데이터의 경향의 차이가 뚜렷하며 거의 전 주파수 영역에서 탱크가 탄성체일 때 더욱 큰 동수압이 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 적응적 FSI의 두 번째 해석결과 산출된 탱크 전면부의 변위와 가속도를 나타낸다. 이처럼 적응적 FSI는 두 번째 해석을 통해 강체탱크에서는 산출할 수 없는 정보를 계산해 낼 수 있는 장점이 있다.

3. 결 론

연료탱크와 내부 유체의 연성문제를 해결하는데 있어서 과도한 해석시간의 요구는 큰 문제점 중의 하나이다. 이러한 문제점은 앞에서 제시한 적응적 FSI를 사용함으로써 해결할 수 있다. 즉, 전 구간을 연성문제로 여기지 않고 시스템의 동적안정성이 크게 저해될 수 있는 시간대에 유체-구조 연성을 적용하여 해석시간을 크게 단축시키는 것이다. 본 연구에서는 먼저 탱크를 강체로 가정한 단순한 유동해석을 통해 탱크 전면부에서 동수압을 산출하여 변동이 심한 구간을 지정하였다. 이 구간에서 탱크를 탄성체로 가정하여 해석한 결과와 비교해 보았을 때 동수압의 수치가 거의 모든 시간대에서 큰 경향을 보였다. 또한 주파수대에서도 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.