

원자력 발전소에서 쓰나미 방지용 댐퍼 개발을 위한 유동해석

A Fluid Analysis to develop the Damper for Tsunami Prevention in Nuclear Power Plant

진도훈^{1*}

Do-Hun Chin^{1*}

〈Abstract〉

The purpose of this study is to develop a damper that protects against the dangers of tidal waves since there's no function to block the inflow of large amounts of water into the inside When natural disasters such as tidal waves occur. Therefore, it intended to derive the design data by simulating through flow analysis in order to predict the pressure that a damper configured to open and close manually or automatically receives. It examined the preceding researches first and conducted the flow analysis, to predict the force of the damper installed on the bottom of the building's outside to prevent the inflow of seawater into the inside when natural disaster occurring. As a result, it showed that, in the event of a tsunami, it moved about 170m and the time impacting the damper occurred within about eight seconds, and, at the moment, the damper door was pressured about 17bar. Also, it could identify that the load was approximately 900kN and the force by the fluid was applied to the damper door.

Keywords : Nuclear Power plant, Fluid analysis, Volume fraction

^{1*} 정회원, 교신저자, 부산가톨릭대학교 산업보건학과, 조교수

E-mail: chindh@cup.ac.kr

^{1*} Dept. of Industrial Health, Catholic University of Pusan

1. 서론

쓰나미가 발생 할 경우 기계실 내부로 바다물이 유입되어 기계적인 핵심장비 및 계통 장비에 치명적인 결함을 야기 시킬 수 있기 때문에 이로 인한 피해규모는 수치로 따질 수 없이 크며 이를 복구하기 위해서는 오랜 시간과 비용이 소모되어 사고 발생 전 예방하고 방지하는 것이 최우선이며 일본의 대지진과 해일로 인한 전력공급이 중단 되면서 원자력발전소의 냉각이 원활하지 않은 상태가 되었으며 부분적 노심용해가 일어나면서 방사능의 발산수치도 높아졌다. 한국에서 발생하는 해일은 주로 폭풍해일이지만, 드물게 지진해일이 나타나며 국내 연안 구조물을 전면 재점검이 강도되고 있는 추세이다.[1-2]

원전의 특성상 많은 냉각수를 필요로 하기 때문에 대다수의 중국원전이 해안에 위치해 있기 때문에 사고가 일어난다면 우리나라에 직격탄이 될 수밖에 없다.

본 연구는 발전소 외벽에는 통기를 위해 창문과 더불어 댐퍼를 사용하고 있으며, 그 구성은 사각틀 형상의 바디 내측으로 회동판을 기준으로 회동하는 블레이드를 다수개 설치하되, 이들 블레이드는 댐퍼를 닫은 상태에서 단부가 서로 겹쳐지게 구성하고, 블레이드를 고정하고 있는 회동판을 바디측방으로 노출시킨 상태에서 상호 링크 어셈블리로 연결하여 레버 조작에 의해 수동 또는 자동으로 개폐되도록 구성하고 있기 때문에 순간적인 해일로 인해 실내로 대량의 물이 유입되는 것을 차단하는 기능은 없어 해일의 위험으로부터 보호하는 댐퍼를 개발하는데 있다.[3]

Fig. 1은 연안에 위치한 원자력 발전소의 건물에 설치되어 있는 댐퍼위치와 형상을 나타내고 있으며, 댐퍼는 공압식 작동기에 의해 개폐가 가능하다. 따라서 본 연구는 해일 등 자연재해가 발생

할 때 댐퍼에 받는 압력을 예측하기 위하여 유동해석을 통해 시뮬레이션하여 설계 자료를 도출하고자 한다.



Fig. 1 Damper position at nuclear plant

2. 유동해석 방법

본 연구에서 적용되는 수치해석 기법은 쓰나미 영역과 대기 영역으로 2개의 유체가 공존하고 있는 물리적인 현상을 가지고 있다. 일반적으로 유동해석의 경우 단일 유체에 대한 유동해석을 수행하는 것에 비해 밀도가 다른 유체에 대한 유동해석을 수행해야 된다. 따라서 본 쓰나미에 대한 유동해석은 Volume fraction으로 파도와 대기를 구분하는 척도로 활용하였다.

본 연구에서 수치해석 방법은 잘 정의된 인터페이스에 의해 분리된 두 개의 섞이지 않는 유체의 흐름을 수학적 모델을 통해 예측하고, 두 유체의 흐름과 자유경계 또는 인터페이스를 적용하여 연속체 역학 방정식 모델링 하였다.

유체의 흐름은 일반적으로 세 가지 보존 법칙인 질량 보존, 운동량, 에너지에 대한 보존법칙을 만족해야 된다. 이 법칙은 완전 유체의 물리적 행동을 결정하고 점도, 열전도, 표면 장력 및 압축과 같은 속성에 의해 정의된 유체의 성질이 완전히 독립적이기 때문이다. 유량에 대한 보존 방정식의 일반적인 형태는 다음 식(1)과 같다.[4]-[7]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dV + \oint_{\partial V} F_C \cdot dS - \oint_{\partial V} F_D \cdot dS \quad (1) \\ & = \int_V Q_V \cdot dV + \oint_{\partial V} Q_S \cdot dS \end{aligned}$$

여기서 t는 시간, $F_C = \phi u$ 는 유체운동, u 는 유체속도, F_D 는 확산에 의한 경계에서의 유동, Q_V 는 내부에너지, Q_S 는 경계에서의 에너지, V 는 격자체적을 나타낸다.

연속체 유동과 표면에서의 항들은 가우스 정리에 의해 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dV + \int_V \nabla \cdot F_C \cdot dV - \int_V \nabla \cdot F_D \cdot dV \\ & = \int_V Q_V \cdot dV + \int_V \nabla \cdot Q_S \cdot dV \quad (2) \end{aligned}$$

위의 식(2)는 임의의 체적에 대하여 보존된 식이며, 만일 체적이 한 점으로 축약된다면 식(2)는 아래와 같은 식(3)과 같이 다른 형태로 줄여서 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot F_C - \nabla \cdot F_D = Q_V + \nabla \cdot Q_S \quad (3)$$

유량에 대한 일반적인 수송방정식은 2유체 시스템을 위한 지배방정식의 유도를 스칼라 또는 벡터로 도출가능하다.

질량보존을 위한 수송방정식은 식(3)에서 단위 체적당 질량 $\phi = \rho$ 로 대체되는 것에 의해 유도된다. 이러한 시스템에서 상변화나 화학반응이 없는 비압축성 상태일 경우를 가정하면 아래의 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot \rho u = 0 \quad (4)$$

3. 유동해석 검증

본 연구에서 적용되는 수치해석에 대한 검증을 수행하기 위해 Fig. 2의 Koshizuka등의 선행연구자들의 논문을 참고하여 해석기법에 대한 검증을 수행하였다. Koshizuka등은 아래의 그림과 같은 형상에 대하여 실험을 수행하였고, 이 실험결과를 본 연구에 적용되는 수치해석 기법을 통해 비교검증을 수행하였다.

Free surface 문제에 대한 유동해석을 검증할 경우 전 세계적으로 Koshizuka의 연구논문을 많은 Reference로 활용하고 있으며, 실험결과와 비교하여 유동해석 모델링 검증에 대한 비교를 많이 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서도 수치해석 모델링 기법에 대한 선행연구를 우선 수행하였다.[8]-[11]

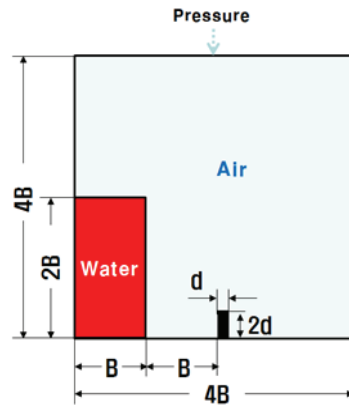


Fig. 2 Koshizuka's Experimental Model

Fig. 3은 Koshizuka의 실험결과에의 경우 시간에 따라 Water의 진행방향을 보여주고 있으며, Water column이 붕괴되면서 하부에 설치된 격판과 충돌하여 발생하는 현상을 보여주고 있다.

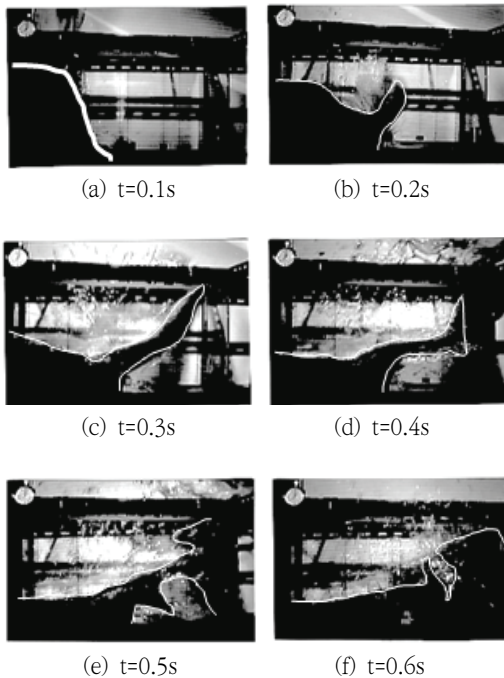


Fig. 3 Results of Koshizuka's experimental data

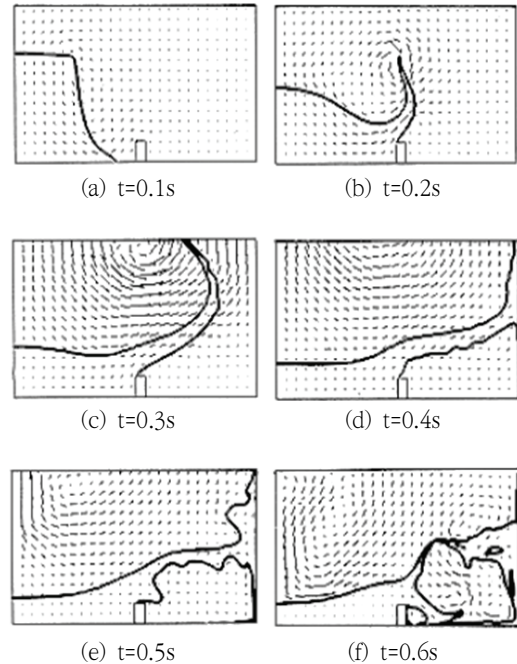


Fig. 4 Results of Onno Ubbink's CFD data

Fig. 4는 Onno Ubbink의 유동해석결과를 보여주고 있다. 이 유동해석 모델 또한 Koshizuka의 실험 모델을 모델링하여 유동해석을 수행하였으며, 그 결과 전반적으로 Koshizuka의 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 반면 0.3s 일 경우 격판과 충돌 후 Water의 거동을 살펴보면 위쪽으로 치우치면서 Curl을 이루고 있는 형상을 볼 수 있다.

Koshizuka의 실험결과와 비교할 때 다소 상이한 결과이며, 본 연구에서 검증한 결과와 비교할 때 본 검증결과가 Koshizuka의 실험결과와 보다 유사한 것으로 판단된다. 그러나 0.4s 이후는 Onno와 본 검증결과가 거의 유사하였고, Koshizuka의 실험결과와도 거의 유사함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 앞서 선행연구자인 Koshizuka의 실험결과와 Onno Ubbink의 유동해석 결과를 바탕으로 동일한 실험모델과 해석조건을 부여하여 해석 모델을 검증한 결과이다.

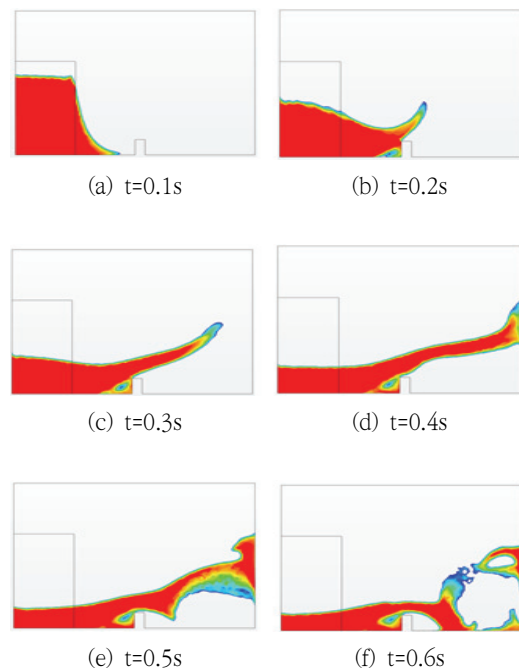


Fig. 5 Results of present CFD data

본 연구에서 실험과 동일한 형상으로 수치해석에 적용하여 그림과 같이 유동해석을 수행한 결과 실험과 거의 유사한 유동형태가 발생됨을 확인할 수 있었다. 시간변화에 따른 유동분포를 실험과 비교할 경우 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었고, 특히 격판과 충돌 후 작동유체인 Water의 거동을 살펴보면 실험에서 나타나는 현상과 아주 유사한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에 적용될 쓰나미에 대한 Damper의 영향을 분석할 수 있는 수치검증이 이루어졌으며, 동일한 수치해석 기법을 적용해도 무방할 것으로 판단된다.

4. Damper 유동해석 모델

본 연구에서 적용되는 수치해석 대상은 Fig. 6과 같이 구성되어 있으며, 해석대상의 특성상 좌우 대칭으로 이루어져 있기 때문에 Damper의 한 Module만 수치해석 대상으로 선정하였다. 본 연구의 목적인 쓰나미가 발생할 경우 Damper에 받는 압력을 계산하는 것이 목적이며, Sine Wave를 강제로 부여시켜 VOF(Volume of Fluid) 기법을 적용하여 수치해석을 수행하고자 한다.

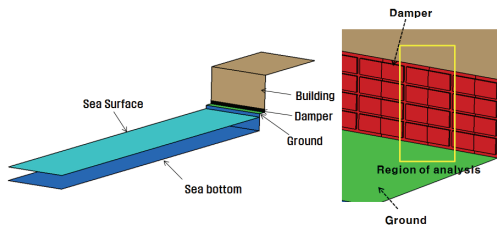


Fig. 6 Initial condition of tsunami wave

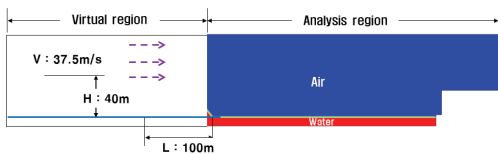


Fig. 7 Initial condition of tsunami wave

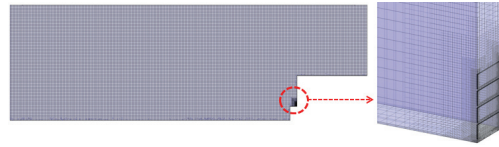


Fig. 8 Initial condition of tsunami wave

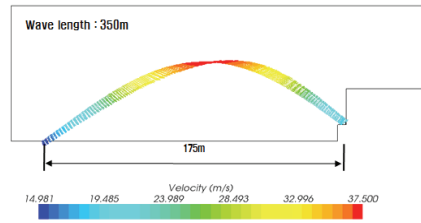


Fig. 9 Initial condition of tsunami wave

본 연구를 위해 Fig. 7과 같이 경계조건을 부여하였다. 경계조건을 살펴보면 초기조건에서 Sine wave 위치를 좌측 끝부분으로 옮겨서 계산이 될 수 있도록 하였다. 파도의 높이는 40m로 설정하였고, 이 때 바람속도와 파도속도가 동일하게 37.5m/s로 가정하였다. 또한 해석격자는 Fig. 8과 같이 Trimmed Cell을 적용하였고, 사용된 격자수는 약 30만개가 소요되었다.

쓰나미에 대한 초기조건은 Fig. 9와 같이 파도 높이가 40m로 동일한 가운데 Wave length에 따라 파도 최고 위치에서 파도속도가 37.5m/s가 될 수 있도록 설정하였다.

쓰나미에 대한 유동해석을 수행한 결과 Wave length 350m일 경우 Air와 Water에 대한 Mass fraction을 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있었다. 0초부터 17초 까지 계산결과를 보여주고 있다.

해석결과를 고찰하면 쓰나미가 좌측에서 서서히 몰려오고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 건물이 위치한 곳 까지 도달시간은 약 8초 전 후에 쓰나미가 건물을 덮치는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 10초가 경과하면 건물 상단부에 부딪쳐서 건물 뒤쪽으로 빠져나가는 유동분포를 보여주고 있었다.

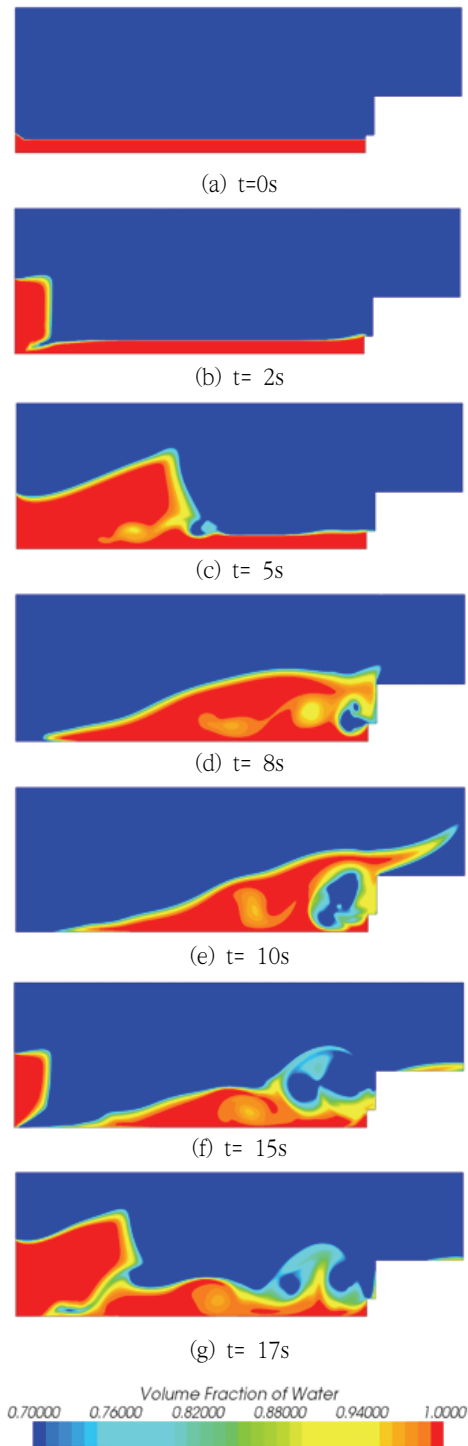


Fig. 10 Results of mass fraction distribution

건물 앞쪽에는 쓰나미가 건물과 부딪치면서 건물 상부로 이동하는 유동과 건물 하부로 이동하는 유동으로 나누어지게 되며, 하부로 이동되는 유동은 건물 앞의 파도와 부딪쳐서 유동재순환 구간이 발생하였다가 시간이 경과된 후 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11는 댐퍼가 해일에 의해 받는 압력을 나타내고 있다. Wave length가 증가할수록 댐퍼에 해일이 빨리 도달하였고, 댐퍼에 받은 압력도 감소함을 확인할 수 있었다. 해석결과 댐퍼에 받은 압력과 해일의 도달시간은 7.09초였다. 이때 댐퍼 도어에서 받은 압력은 약 17bar로 압력이 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 댐퍼 도어에서 받은 압력을 하중으로 변환한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 쓰나미 파도에 의해 1차 충격이 생한 후 약 0.4초 후 2차 충격이 발생하였다. 이때 발생한 유체 유동에 의한 하중은 약 900kN이 발생함을 확인할 수 있었다.

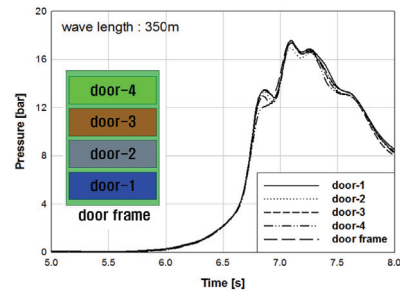


Fig. 11 Results of pressure distribution at damper door

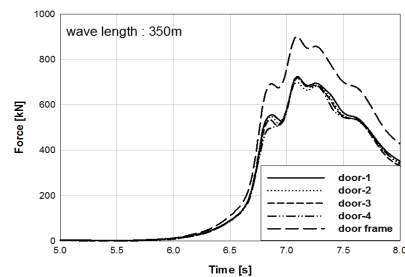


Fig. 12 Results of force distribution at damper door

5. 결 론

원자력 발전소 건물 외곽 하단에 설치되어 쓰나미가 발생할 때 건물 내부로 해수의 유입을 방지하기 위해 설치된 댐퍼에 받는 힘을 유동해석을 통해 예측하기 위하여 선행연구자들의 연구결과를 우선 검증한 후 유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

쓰나미가 발생할 경우 약 170m 이동하여 댐퍼에 충격을 가하는 시간이 약 8초 이내에 발생하였고, 이 때 댐퍼 도어는 약 17bar의 압력을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 하중은 약 900kN으로 유체의 의한 힘이 댐퍼 도어에 가해짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Kim. B. T., Koh. S. W. and Kim. K. H., "Stress Analysis on the Profile of Blast Wall with Finite Element Method" Journal of the Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 130-137, (2012).
- [2] Park. J. Y., Yi. C. S., Chin. D. H., "Numerical Analysis on the Development of Shut off Damper for a Tsunami at a Nuclear Plant "Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 23, No. 5, pp. 471-477, (2014).
- [3] Seo. J. H., Kim. B. T., Chin. D. H., Yoon. M. C. Kwak. J. S., "Comparison of the Contact Characteristics for Sealing strips of the Tsunami Damper", Journal of Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 21-28, (2015).
- [4] Nam. K. S., Choi. K. K., Choi. H. M., Kim. J. K., Yeum. S. H., Lee. S. S., "Study on the Improvement of Strength of Excavator Attachments Considering the Field Environment", Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 15 No. 1, pp. 122-128, (2016).
- [5] Yi. C. S., Chin. D. H., "Numerical Analysis on the Development of a Ventilation Opening Louver for Marine" Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 30-35, (2017).
- [6] Yi. C. S., Chin. D. H., "Numerical Analysis of the Development of an Air Conditioning Duct for Marine and Oil Drilling Ships", Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 50-55, (2017).
- [7] Yi. C. S., Lee. B. H., Chin. D. H., "A Study on the Flow and Structural Analysis in Air Conditioning Duct for Marine Offshore", Journal of the Korean Society of Manufacturing process engineers, Vol. 18, No. 3, pp. 88-93, (2019).
- [8] Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y., "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation", Journal of Computational Fluid Dynamics 4(1) 29-46, (1995).
- [9] Onno Ubbink, "Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces", Doctorate Thesis, London University, (1997).
- [10] Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., "A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow", Journal of Computational physics 114 146-159, (1994).
- [11] Chin. D. H., "A Study on the Numerical Analysis of Internal Flow in a Cone Type Valve", Journal of KSIC, Vol. 23, No. 2, pp. 199-207, (2020).

(접수: 2021.01.08. 수정: 2021.01.26. 게재확정: 2021.01.27.)