

## 원자력 발전소용 쓰나미 댐퍼의 거동특성에 관한 연구

서지환\*, 김병탁#, 진도훈\*\*

(\*,#부경대학교, \*\*(주)지브텍 기술연구소)

### A Study on the Behavior Characteristics of Tsunami Damper for the Nuclear Power Plant

Ji-Hwan Seo\*, Byung-Tak Kim<sup>#</sup>, Do-Hun Chin\*\*

(Received 18 July 2014; received in revised form 7 August 2014; accepted 18 August 2014)

#### ABSTRACT

This study presents the mechanical behavior of a ventilating window (a tsunami damper) on the building wall of a nuclear power plant. The window, which is under development, is used to ventilate a machinery room and the building under normal conditions, but it also provides a safety barrier for critical equipment against a tsunami caused by an earthquake. A finite element analysis was conducted to investigate the deflection and the stress distribution of the window under given loading conditions. With symmetry, a one-quarter portion of one window was modeled, and the pressure due to a great tide is assumed to be 7 bar. A structural analysis of the assembled frame, composed of a blade and casing, was also conducted using contact conditions to find the stress and strain configurations caused by the applied pressure.

**Key Words** : Tsunami Damper(쓰나미 댐퍼), Mechanical Behavior(기계적 거동), Finite Element Method(유한 요소법), Contact Condition(접촉조건), Watertightness(수밀성)

#### 1. 서 론

연구원자력 발전소는 경미한 사고로 인하여 광범위한 지역에 대형 재난을 초래할 수 있으므로 그 운영에 있어 매우 높은 수준의 안전성이 필요하다. 대부분의 사고는 부주의나 기계적 결함에

의한 정지에 기인하지만, 때로는 2004년의 인도네시아나 2012년의 일본에서 보듯이 쓰나미와 같은 불가피한 자연 재해로부터 초래될 수 있다. 일반적으로 원자력 발전소는 냉각을 위해 다량의 냉각수를 필요로 하기 때문에 해변에 위치하고 있다. 현재 원자력 발전소의 외벽에는 많은 창문이 있어 평소에는 기계실의 환기용으로 사용되고 있으나, 지진이나 쓰나미가 발생하면 창문이 오히려 바닷물의 흐름 경로가 되어 기계실이 침수되는 결과를 초래한다. 따라서 발전소의 침수로 인한 대형 사고를 방지하기 위해서는 어느 정도까지 쓰나미에 의한 압력 하중을 충분히 지탱해 줄 수 있는 강도와 강성을 갖는 것이 바람직하다 하겠다.

\* Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Pukyong National University

# Corresponding author : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University  
E-mail : btkim@pknu.ac.kr

\*\* Jibtech Co. Ltd

쓰나미와 지진에 관한 많은 연구<sup>[1~6]</sup>가 진행되어 왔으나, 그 대부분은 원자력 발전소의 안전이나 위험성 평가에 집중되어 있으며, 발전소 설비와 관련된 연구<sup>[7,8]</sup>는 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지진에 의해 높은 쓰나미가 발생하여 원자력 발전소가 침수될 때 주요 설비를 안전하게 보호할 수 있는 새로운 형태의 환기창(댐퍼)에 대한 해석을 수행하고 그 거동특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 댐퍼를 구성하고 있는 블레이드와 케이싱, 힌지의 상호 연결상태를 고려하여 접촉문제로 모델링하였으며, 원전 건물 앞에 설치된 방호벽을 넘어오는 파도의 수압은 7 bar로 가정하여 처짐 및 응력수준 등을 검토하였다. 또한 요구 사양에 부합하는 수밀성<sup>[9,10]</sup> 확보 방안을 모색하기 위하여 수압에 의해 발생하는 블레이드와 케이싱 사이의 접촉 틈새를 계산하였다. 하나의 댐퍼가 좌우, 상하 대칭이므로 전체 댐퍼의 1/4부분을 모델링하였으며 수치해석을 위해 범용 소프트웨어인 ANSYS 15<sup>[11]</sup>를 사용하였다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 해석모델

본 연구에 사용된 댐퍼의 단면 형상을 Fig. 1에 도시하였다. 평상시에는 댐퍼의 블레이드가 열린 상태로 있으나, 파도가 방호벽을 넘어 올 경우에는 댐퍼의 후면에 장착된 액추에이터(actuator)를 통해

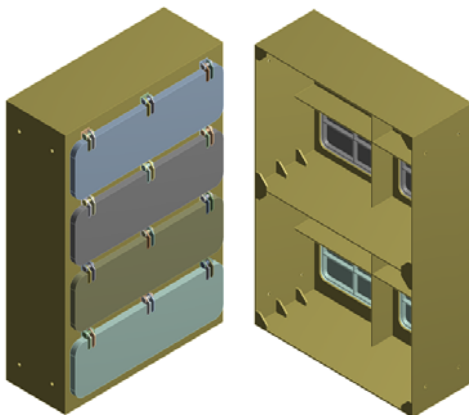


Fig. 1 Geometry of the tsunami damper

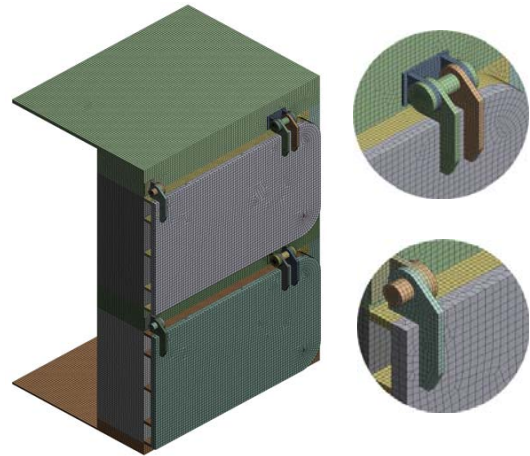


Fig. 2 Finite element model with enlarged views

그림과 같이 닫힌 상태로 유체 압력을 지탱하게 된다. 각 댐퍼는 측면에서 다른 댐퍼와 서로 볼트로 연결되어 있으며, 후방으로 밀려가지 않도록 벽체에 의해 지지되어 있다. 댐퍼의 형상, 하중조건 및 구속조건이 중앙을 중심으로 상하, 좌우 모두 대칭이므로 본 연구에서는 전체 댐퍼에 대한 1/4 영역을 해석대상으로 선정하였으며, 해석을 위해 구성된 유한요소모델을 Fig. 2에 힌지부의 확대도와 함께 나타내었다. 사용된 요소의 수는 197465개, 절점의 수는 900034개로써 대부분 육면체 요소이며, 일부 프리즘 요소를 사용하였다. 댐퍼의 재질은 스테인리스강 SUS304로서 세로탄성계수는 213GPa, 포와송비 0.29, 항복응력 215 MPa, 접선계수는 727 MPa의 값을 갖는다.

### 2.2 접촉조건 및 경계조건

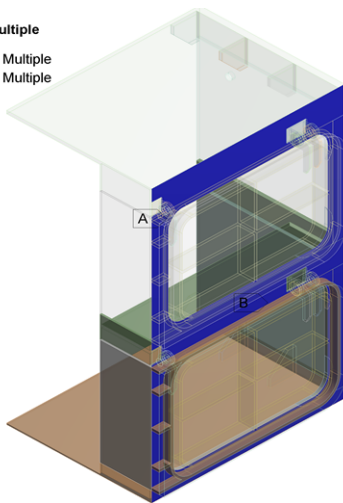
수압의 작용 하에 있는 댐퍼의 거동을 해석하기 위해서는 실제와 부합하는 접촉조건 및 경계조건의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 실제와 유사하게 블레이드는 닫힌 상태에서 케이싱과 단순히 접촉하고 있으며, 이 두 부분을 연결하는 힌지부에도 핀이 자유롭게 회전할 수 있는 접촉조건을 부여하였다.

구속조건은 대칭면에서 그 면에 수직한 방향의 변위를 고정하였으며, 볼트 연결부의 변위는 세 방향 모두 완전히 구속하였고, 케이싱의 뒷부분은 벽

체에 의해 지지되므로 하중에 수직인 방향(전후 방향)의 변위를 구속하였다.

하중조건은 현재 개발 중인 제품의 사양에 따라 수압을 7 bar로 가정하여 댐퍼의 전면에 동일하게 작용토록 하였으며, 비선형 접촉문제를 풀기 위하여 시간함수와 시간간격을 부여하여 매 하중 증분에 따른 댐퍼의 기계적 거동을 파악하였다. Fig. 3 과 Fig. 4는 본 해석에 적용된 접촉조건과 구속조건을 각각 도시한 것이다.

Frictionless - blade To Multiple  
**A** Frictionless - blade To Multiple  
**B** Frictionless - blade To Multiple



Contact Region 4

- A** Contact Region
- B** Contact Region 2
- C** Contact Region 3
- D** Contact Region 4

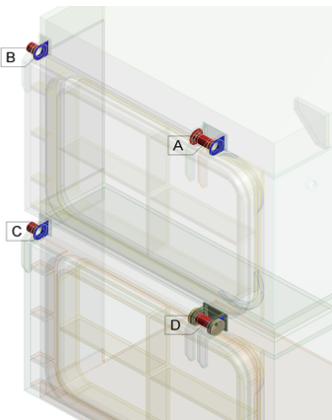


Fig. 3 Applied contact conditions

**A:** Static Structural  
 Frictionless Support 2  
 Time: 1. s  
**A** Fixed Support  
**B** Frictionless Support  
**C** Frictionless Support 2

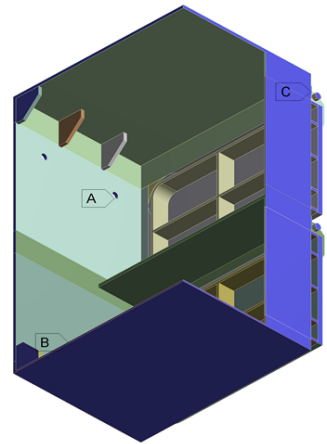


Fig. 4 Applied boundary conditions

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 5는 최대 수압이 작용할 시점에 발생하는 댐퍼의 변위를 나타낸 그림이다. 최대변위는 댐퍼의 위쪽 블레이드 중앙부에서 발생하였으며, 그 크기는 1.6mm로 나타났다. 전체적인 변형특성은 두 블레이드 사이의 케이싱 부분도 뒷부분이 보강되었음에도 중앙에는 1mm 이상의 처짐이 발생하며, 각 면에 발생하는 변위는 중앙 부분에서 가장 큰 값을 나타내고, 중앙에서 반경방향으로 멀어질수록 거의

**A:** Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1

- 1.6021 Max
- 1.424
- 1.246
- 1.068
- 0.89003
- 0.71202
- 0.53402
- 0.35601
- 0.17801
- 0 Min

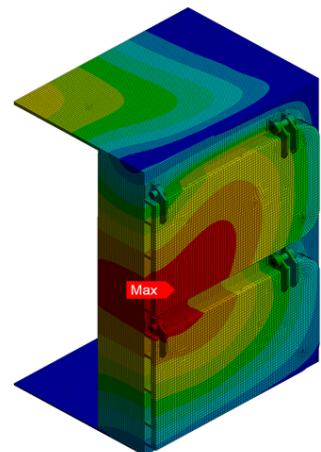
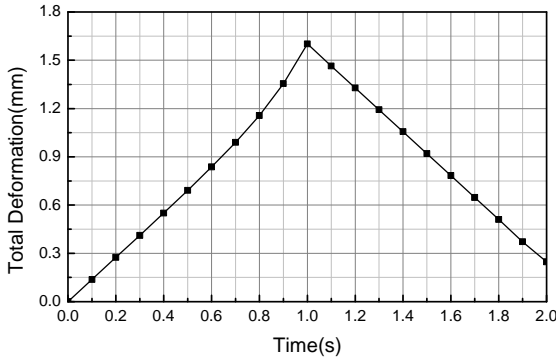


Fig. 5 Total deformation of damper assembly



**Fig. 6 Maximum deformation according to the applied pressure**

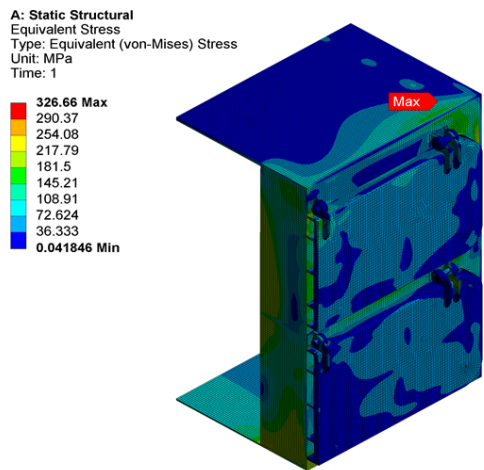
일정하게 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

쓰나미 댐퍼의 용도상 처짐이 과다하면 구성품 사이에서 누수가 발생하게 되고, 그 양이 과다하면 기계실의 설비 및 장치가 침수되지 않도록 조치하는데 시간이 부족하게 된다, 또한 압력이 7 bar 이하인 경우의 최대 처짐도 살펴볼 필요가 있으므로, Fig. 6에 시간증분에 따른 댐퍼의 최대 처짐을 그래프로 도시하였다. 이 그래프에서 시간 1초는 최대 압력이 작용하는 시점이며, 2초는 하중이 점점 감소하여 소멸되는 시점을 나타낸다. 압력 증가에 따른 최대 처짐은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 하중이 제거된 후에도 0.25mm 정도의 영구 변형량이 잔류함을 관찰할 수 있다.

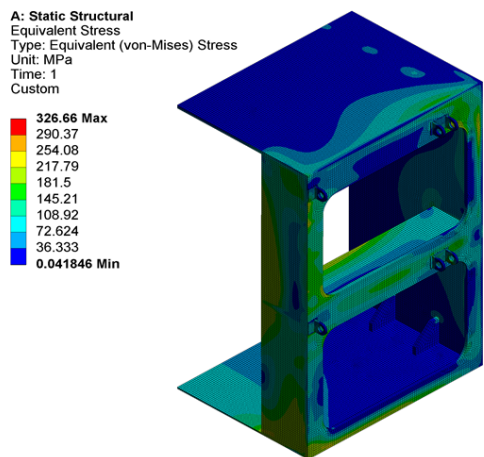
Fig. 7은 최대 압력 작용 시 댐퍼에 발생하는 등가응력을 도시한 것으로 최대응력은 케이싱 후면의 보강 브래킷 연결부에서 발생하였다. 최대응력의 크기는 327 MPa로서 항복응력을 상회하고 있으나, 그 영역이 아주 작은 부분에 국한됨을 알 수 있었다. 댐퍼에 발생하는 응력은 비록 재료가 항복하여 소성거동을 한다할지라도 그 소성영역이 작은 경우에는 기능상 별 문제가 없다고 볼 수 있다. 왜냐하면 대형 파도가 방호벽을 넘어와서 원자력발전소의 기계실이 침수될 위기에서 대형 참사를 방지하기 위한 응급조치를 취할 수 있는 시간을 확보하는 것이 주목적이기 때문이다. 댐퍼를 구성하고 있는 부품에 대한 응력분포를 좀 더 상세하게 살펴보기 위하여, 케이싱과 블레이드에 발생하는 등가응력을

Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시하였다.

Fig. 8의 케이싱에 대한 응력 발생 양상을 살펴보면 전면의 작용하중으로 인해 하중방향과 평행한 판재에서의 굽힘 응력이 상대적으로 크게 나타남을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 특히 중앙부분에 설치된 후면의 보강 강판에서 두드러지게 나타나는데, 그 이유는 처짐에 대한 결과에서 예측할 수 있듯이 보강 강판은 양단지지 형태로 설치되어 있으므로 중앙부에서 하중에 의한 굽힘 모멘트를 가장



**Fig. 7 Stress distribution of damper assembly**



**Fig. 8 Stress distribution of damper casing**

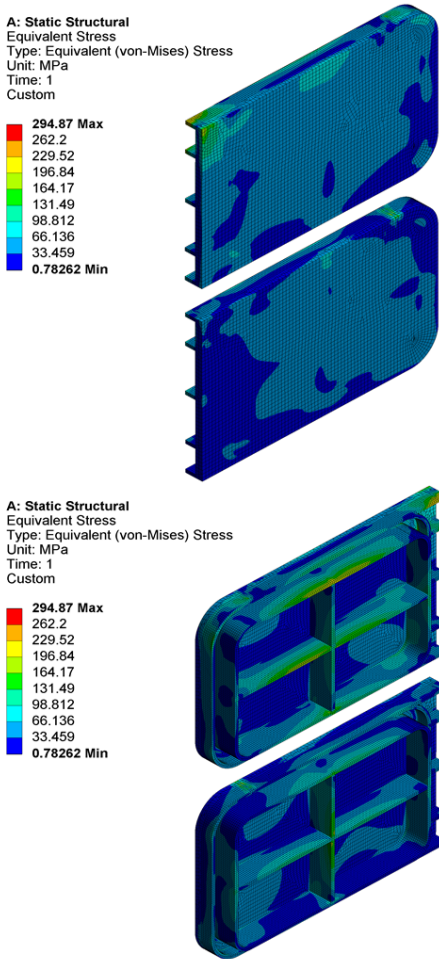


Fig. 9 Stress distribution of damper blade

크게 받기 때문으로 풀이된다.

Fig. 9의 블레이드에서는 압력을 직접적으로 받는 전면부의 응력보다 후면의 보강판에서 더 큰 응력이 발생함을 관찰할 수 있다. 이는 블레이드 외곽의 웹(web) 부분은 케이싱과 접촉하고 있는 반면 안쪽의 보강판은 지지부 안쪽에 위치하고 있어 면압에 의한 굽힘모멘트가 크게 발생하기 때문으로 파악된다. 블레이드에 발생하는 최대응력은 295 MPa로서, 이 값 또한 항복응력을 초과하고 있으나 케이싱보다는 32 MPa 정도 더 작은 값을 나타내었다. 작용압력에 따른 두 구성품의 최대응력을 서로

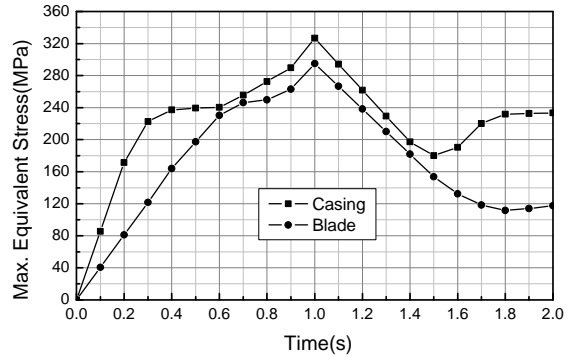


Fig. 10 Maximum equivalent stress according to the applied pressure

비교해 보기 위하여 시간 증분에 따른 최대응력을 Fig. 10에 도시하였다.

Fig. 10의 최대응력 발생지점은 하중의 변화에 따라 접촉상태가 변화하므로 한 절점에서 나타나는 것은 아니며, 전체적으로 최대 압력이 작용할 때 최대응력이 발생하는 지점과 인근한 부분에서 발생하였다. 전체적으로 블레이드의 최대응력이 케이싱의 최대응력보다 낮게 나타나며, 하중이 증가할수록 그 격차는 줄어들다가 하중이 제거된 후에는 116 MPa 정도의 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 블레이드의 보강효과가 케이싱보다 더 커서 상대적으로 케이싱에 소성변형이 더 심하게 발생하기 때문으로 사료된다.

쓰나미 댐퍼의 경우 원전 빌딩의 침수를 막기 위해서는 접촉하고 있는 블레이드와 케이싱 사이의 수밀성이 매우 중요한 파라미터라 할 수 있다. 이를 검토하기 위해서는 먼저 구조해석에 의한 접촉 틈새를 파악해 볼 필요가 있으며, 그 후 개스킷(gasket)을 사용하여 추가적으로 밀봉하는 방법을 모색해 볼 필요가 있다. Fig. 11은 최대 압력이 작용할 때 블레이드와 케이싱의 접촉부에 발생하는 틈새(gap)를 나타낸 것이다. 최대 틈새의 크기는 0.31mm로 위쪽 블레이드의 힌지 인근 영역에서 발생하였으며, 그 이외 접촉부에서의 틈새는 비교적 작게 나타났다. 따라서 사양을 만족하는 수밀성을 확보하기 위해서는 블레이드와 케이싱 사이에 개스킷을 사용한 적절한 밀봉이 추후 필요할 것으로 판단된다. Fig. 12는 압력의 변화에 따라 접촉부에서

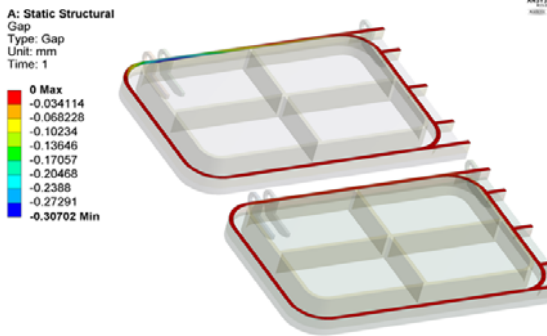


Fig. 11 Contact gap between the blade and the casing

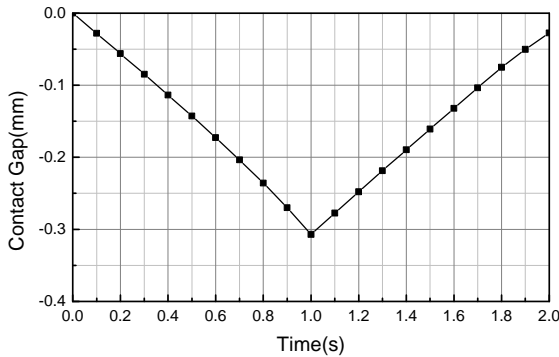


Fig. 12 Maximum contact gap according to the applied pressure

발생하는 최대 틈새를 도시한 그래프이다. 틈새는 변위와 밀접한 관계가 있으므로, 그 변화의 양상이 서로 유사함을 알 수 있다. 즉 압력이 증가하여 1 초의 최대압력에 도달할 때까지 접촉 틈새는 거의 선형적으로 증가하며, 그 후 압력 감소로 인해 틈새도 줄어들게 되고 하중이 완전히 제거된 후에는 영구변형으로 인하여 약간의 틈새가 존재함을 관찰할 수 있다.

이상의 결과를 종합하면 현재 개발 중인 쓰나미 댐퍼가 7 bar의 수압을 받을 경우 처짐 및 응력의 측면에서는 상당한 강성과 강도를 확보한 것으로 사료된다. 또한 블레이드와 케이싱 사이의 최대 접촉틈새도 최대 0.31 mm로 그리 크지 않아 적절한 형태의 개스킷을 삽입하면 요구되는 사양을 만족할

수 있는 수밀성 확보가 가능할 것으로 생각되며, 이를 위하여 여러 가지 형태의 개스킷과 밀봉효과에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 지진에 의한 쓰나미로 원자력발전소가 침수되는 것을 방지하고, 필요한 조치를 취할 수 있는 시간을 확보하기 위하여 개발 중인 댐퍼에 대한 구조해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작용압력이 증가함에 따라 댐퍼의 최대변위는 거의 선형적으로 증가하며, 최대 수압 7 bar가 작용할 시점에서 최대변위는 1.6mm로 나타났다.
2. 최대응력은 케이싱의 후면 브래킷 연결부에서 발생하며, 최대 수압 작용 시 그 크기는 327 MPa로 나타났다. 블레이드의 최대응력은 전 압력범위에서 케이싱보다 작게 나타났으며, 최대 수압 작용 시 그 값은 295 MPa로 나타났다.
3. 블레이드와 케이싱 접촉부의 틈새는 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며 최대수압 작용 시의 최대 틈새는 0.31 mm로 나타났다.
4. 최대압력 작용 시 누수에 대한 요구 사양을 만족하기 위하여, 틈새에 대한 자료를 바탕으로 여러 가지 형태의 개스킷과 밀봉효과에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음”

## REFERENCES

1. Kim, M. K., Choi, I. K. and Kang, K. S., “Tsunami Hazard Evaluation for the East Coast

- of Korea by using Empirical Tsunami Data”, EESK, Col.14, No.4, 2010.
2. Ken. Y., Fumihiko. I., Tsutomu. S.O., Tadashi. A., Tomoyoshi. T. and Nobuo. S., “Tsunami Assessment for Risk management at Nuclear Power Facilities in Japan,” Pure and applied geophysics, Vol.164, No.2-3, pp.565~576, 2007.
  3. Kim. J. Y. and Kang. K. S., “Assessment of the Safety of ULCHIN Nuclear Power Plant in the Event of Tsunami Using Parametric Study,” KSN, Vol.43, No.2, pp.175~186, 2011.
  4. Lovholt, F. and Harbitz, C., “Fundamental mechanisms for tsunami generation by submarine mass flows in idealised geometries”. Marine and Petroleum Geology, Vol.22, No.1, pp.209~217, 2005.
  5. Bernard, E.N. and Titov, V. V., “Improving tsunami forecast skill using deep ocean observations”, J. of Mar. Tech. Soc., Vol.40, No.3, pp.23~26, 2007.
  6. Synolakis, C.E., Bernard, E.N., Titov, V.V., Kânoğlu, U., and González, F.I., “Validation and verification of tsunami numerical models”, Pure Appl. Geophys., Vol.165, No.11, pp.2197~2228, 2008.
  7. Jeon, J. Y., Seo, D. Y., Chin, D. H., Bae, W. J. and Kim, B. T., “Stress Analysis for Tsunami Damper Blades with Various Plate Thickness”, Proc. of the KSME Spring Conference, pp. 251~252, 2013.
  8. Jeon, J. Y., Seo, D. Y., Chin, D. H., Cho, J. Y. and Kim, B. T., “Finite Element Analysis for Tsunami Damper Blades with Different Stiffeners”, KSME, pp. 22~23, 2013.
  9. Jeon, J. Y., Kim, B. T., Chin, D. H. and Seo, D. Y., “Comparison of the Watertightness according to the Shape of Sealing Strip in a Tsunami Damper”, Proc. of the KSMPE Spring Conference, p.55, 2013.
  10. Seo, D. Y., Kim, B. T., Chin, D. H., Kim, J. G., Yoon, M. C., Kim, K. H. and Kwak, J. S., “A Study on the Contact Characteristics for the Seal of a Tsunami Damper”, Proc. of the KSMPE Spring Conference, p.127, 2014.
  11. ANSYS, 2014, ANSYS User's Manual Version 15.0, ANSYS Inc.