

관 군 구조물의 유체-구조
연성해석 모델개발
- 최종 보고서 -

Development of the tube bundle structure
for fluid-structure interaction analysis model
- Final Report -

KAERI/RR-3074/2009

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 “관 균 구조물의 유체-구조 연성해석 모델개발”과제의 최종연구보고서로 제출합니다.



과제책임자 : 윤 경 호

참여자 : 김 재 용

요 약 문

I. 제 목

관 균 구조물의 유체-구조 연성해석 모델개발

II. 연구의 목적 및 필요성

본 연구는 원자력 관련 구조물 중 핵연료, 열 교환기 및 증기발생기 등과 같이 일반 산업기계 부분 중 유체와 구조물이 서로 연성되는 경계조건 하에 놓인 관 균 구조물의 구조 동역학적 거동을 유체-구조 연성해석을 통해 구조물의 건전성 분석을 수행하는 것이다. 오늘날 산업 환경 내에 존재하는 대부분의 구조물들은 유체-구조, 열-구조 및 유체-열-구조가 서로 연성된 경계조건 하에서 그 기능을 가져야 한다. 이러한 연성해석을 종래에는 유체에 대해서나 열에 대해서 먼저 해석을 수행하고 이 결과를 구조물의 입력조건으로 설정해 그 결과를 얻어 왔다. 하지만 이러한 서로 독립적인 접근은 유체가 구조물에 변형을 일으키고 이 변형이 다시 유체의 유동에 영향을 주는 것은 모사하기가 힘들다. 따라서 당연히 이러한 각각의 해석은 실제와는 다른 결과를 보이는 문제점을 근원적으로 안고 있다. 본 연구의 근본적인 목적은 이와 같이 다양한 해석분야가 서로 연성된 구조물의 거동을 동일한 영역 내에서 해석을 수행함으로써 보다 실제적인 해석이 가능토록 하는 것이다. 이것은 구조물의 유체에 의한 거동 평가와 이로 인한 구조물의 건전성 제고를 위한 설계변경을 가능하게 하므로 그 필요성은 매우 크다고 할 수 있다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 유체-구조가 연성된 핵연료봉의 유동유발 진동을 유체-구조 연성해석 모델을 개발하고, 이의 타당성을 검증하기 위해 단일 봉의 유동유발 진동 시험을 통해 얻은 결과와의 비교를 통해 신뢰성 있는 해석모델을 정립한다. 이를 관 균 구조물로 확장하여 실제 노심 내에서 핵연료집합체 다발의 유동에 의한 진동 거동을 평가하고 이를 통해 구조적으로 보다 건전한 구조설계를 위한 변수를 도출하는 것이 본 연구의 범위이다.

이를 위해 2년여에 걸쳐 단일 봉에 대한 유체-구조 연성해석 모델을 개발하고 이를 시험결과와의 비교를 통해 그 타당성을 검증하고, 이를 관 균 구조로 확장하여 실제 핵연료가 노심 내에서 유체에 의한 거동을 규명함과 아울러 보다 구조적으로 건전한 설계를 위해 필요한 각 설계인자를 규명하고자 한다.

실험적 부분에서는 단일 봉의 양단을 고정하고 상온의 냉각수를 유동시켜 유체의 유속에 따른 봉의 진동변위를 레이저 변위계를 통해 2차원 적으로 구하고자 하였다. 또한 단일 봉의 중간에 지지 점을 형성시켜 지지조건의 변화에 따른 단일 봉의 진동특성을 규명하고자 하였다.

IV. 연구 결과

연구결과는 단일 봉의 유체-구조 연성해석 실제모델 및 단순모델을 작성하였고, 이를 다양한 난류모델에 따른 유동유발 진동시험의 결과와의 비교를 통해 해석모델의 타당성을 검증하였다.

유체-구조 연성해석을 위해 유일한 단일 도메인 내에서의 해석이 가능한 ADINA를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 시험결과와 상당한 차이를 보였으며, 이를 통해 유체-구조 연성해석 모델의 어려운 점을 확인하였다.

단일 봉의 유동유발 진동 거동은 중앙 부분에서 거의 원형에 가까운 궤적을 얻을 수 있었으며, 이것은 핵연료봉의 일차 고유진동수의 주기를 갖는 변위를 통해 핵연료봉의 프레팅 마멸 시험조건을 제공해 주고 있다.

유체-구조 연성해석 모델의 수렴성을 제고하기 위해서는 어떠한 난류모델을 적용하였는가와 구조물 요소의 가장 작은 크기에 가장 영향이 컸으며, 이것은 실제 해석 시 수렴속도에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

V. 연구결과의 활용계획 및 건의사항

노심 내에서 상당히 큰 난류성분을 갖는 핵연료봉의 유체-구조 연성해석 모델의 개발은 그 어디에서도 시도된 적이 없는 상당히 도전적인 과제이다. 이의 타당성 검증을 통해 해석결과의 정확성을 높여 유체-구조가 연성된 실제 다양한 구조물의 건전성을 분석하기 위해 해석적인 방법을 사용할 수 있을 것이다.

병렬연산을 통해 보다 향상된 해석성능의 구현과 원형 부수로 내에서의 난류 모델링을 통한 압력섭동 성분을 평가함으로써 실질적인 양방향의 유체-구조 연성해석을 지속적으로 수행할 예정이다.

Summary

I. Project Title

Development of the tube bundle structure for fluid-structure interaction analysis model

II. Objective and Importance of the Project

This research focuses on the integrity analysis of a tube bundle structure subjected to a coupled condition of fluid and structure which is a recent issue of the multi-physics problem. Examples of those structure under the fluid-structure interaction are nuclear fuels, heat exchangers and steam generators of a nuclear power plant. Besides, it is not difficult to find such structures in the general industry, which has the interaction between fluid-structure and thermal-structure and fluid-thermal-structure during service. A conventional approach on this kind of multi-physics problem was to solve either a thermal or a fluid problem at first, then its result was applied to a structure. However, this method of independent treatment is not sufficient to analyze an actual condition since the fluid causes deformation of a structure and that causes fluid motion again. In short, the conventional method generically has a problem of insufficient simulation of the actual structure and fluid behavior. Therefore, the intrinsic purpose of present research is to establish a methodology that enables to analyze such a multi-physics problem in a domain for better result. This also enables to evaluate a structural behavior more realistically, through which a design improvement can be achieved for an integrity enhancement. So the importance of present research cannot be underestimated.

III. Scope and Contents of Project

In this research, an analysis model for solving a fluid-structure interaction problem such as a flow-induced vibration (FIV) of a fuel rod is developed. The developed model is to be validated by using the experimental results. The model is expanded for a tube bundle structure to evaluate the fuel assembly FIV behavior inside the reactor. The scope of the present research includes to draw the design parameters to improve the structural integrity of a fuel assembly.

To this end, an analysis model for a fluid-structure interaction of a single rod was developed and the validation could not be carried out due to the

large discrepancy with the experimental result. On the other hand, the model is to be expanded for a tube bundle structure to analyze nuclear fuel assembly's in-reactor FIV behavior.

In the experiment, a vibration amplitude of a single rod during the variation of flow velocity was investigated in the first year. In addition to that, a support is to be installed at the mid point of the single rod in the second year. The variation of vibration characteristics of a single rod corresponding to the variation of the supporting condition was investigated through the experiment.

IV. Result of Project

As a result of the first year's study, the developed fluid-structure interaction model was validated by comparing with the FIV result in the case of a single rod. The analysis was carried out by using the commercial code, ADINA that can analyze the relevant multi-physics problem in a single domain. The experiment was carried out by using the FIVPET, which has been built for an FIV analysis of a partial fuel assembly in the present project team.

It was found that the trace of a single rod was almost a circle at the mid point of the rod. The displacement of the rod's vibration provides an experimental as well as analysis condition for a fretting wear of a fuel rod.

It was also found that the influencing parameters of convergence during the fluid-structure analysis was an applied turbulence model and the size of the smallest element used in the analysis.

V. Proposal for Application

To develop a fluid-structure model for a fuel rod bundle is a challenging task in the nuclear field. It has not been tackled before since the strong turbulence around the rods is very difficult to be dealt with. Therefore, if an accuracy of the analysis result is enhanced, the developing method can be used not only to obtain a more realistic behavior of the relevant nuclear components but also to provide an efficient tool to deal with a more generalized multi-physics problem that can be widely found in the industry.

The realistic two-way fluid-structure interaction analysis will be further studied through evaluating the pressure perturbation by the improved computational enhancement using the parallel computing and the turbulence modelling at the annular sub-channel.

CONTENTS

SUBMISSION

SUMMARY

CONTENTS

LIST OF TABLES

LIST OF FIGURES

CHAPTER 1 Introduction	1
CHAPTER 2 Research Subjects	4
Section 1 Turbulence Modelling	4
Section 2 Fluid-Structure Coupled Analysis	13
CHAPTER 3 Conclusions	29
CHAPTER 4 References	30

A large, light gray watermark of the KAERI logo is centered on the page. The logo consists of three curved lines forming a stylized 'K' shape, with three small circles at the ends of the lines. Below the graphic, the word 'KAERI' is written in a bold, sans-serif font.

KAERI

목 차

제출문

요약문

SUMMARY

CONTENTS

목차

표 목차

그림 목차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 본 론	4
제 1 절 난류모델링	5
제 2 절 유체-구조 연성해석	4
제 3 장 결 론	25
제 4 장 참고문헌	26



KAERI

표 목차

Table 1	Geometrical and material properties for FSI analysis model
Table 2	Measuring displacement data at the each position

그림목차

Figure 1	Fluid-structure interaction analysis model of a unit rod
Figure 2	Fluid model for FSI analysis
Figure 3	Boundary condition of unit cell of single span rod contained the coolant in axial flow
Figure 4	Y and Z-displacements for actual support analysis model
Figure 5	Nodal pressure intensity of the actual model by FSI analysis
Figure 6	Y and Z-displacements for simple support analysis model
Figure 7	Displacement behavior of a rod at $v_i = 5.0$ m/s by FSI analysis
Figure 8	Pressure intensity of the extended model by FSI analysis
Figure 9	Test setup for flow-induced vibration
Figure 10	X displacement of a rod as flow velocity at the each position
Figure 11	Y displacement of a rod as flow velocity at the each position
Figure 12	Displacements behavior as the flow velocity at the each elevation

제 1 장 서 론

오늘날 산업체에서 많은 구조물들은 유체-구조, 열-구조 그리고 유체-열-구조가 연성된 경계조건 하에 놓여 있다. 이러한 구조물에 대해 연성이 고려된 해석기술 및 평가기술을 확보함으로써 원자력 분야뿐 아니라 관련 타 분야의 기술 경쟁력 제고에 활용할 수 있는 기술을 보유하여야 한다. 보일러 또는 열교환기 내의 관군과 같은 구조물들은 유체-구조, 열-구조 그리고 유체-열-구조가 연성된 경계조건 하에 놓이게 된다. 이때 각각의 조건에 대한 해석 시 발생할 수 있는 부정확성을 해결할 수 있도록 각 현상이 연성된 상태의 문제를 해석할 수 있는 방법을 정립함으로써 정확성을 제고하여야 한다. 이러한 기술은 원자력 분야뿐 아니라 타 일반산업 분야의 기술 경쟁력 제고에 활용할 수 있다.

신뢰성이 검증된 유체-구조, 열-구조 및 유체-열-구조가 동시에 연성된 구조물의 해석을 단일 도메인에서 해석할 수 있는 기법 및 모델을 개발함으로써 해석기술은 혁신적으로 제고하게 된다. 유체유동 조건 하에 놓여 있는 관 구조물의 동적거동해석을 통해 구조물의 건전성을 평가할 수 있다. 유체유동 조건 하에 놓여 있는 관 구조물에는 진동이 발생하며, 이로 인해 지지구조물과의 사이에 마멸손상이 발생하게 된다. 따라서 유체유동 기인 진동현상을 정확히 해석할 수 있게 되면 이러한 진동을 억제하기 위한 마멸손상의 분석 및 억제방안을 수립할 수 있다.

본 과제는 이러한 경계조건 하에 놓이게 되는 구조물의 유체-구조 연성(FSI, fluid structure interaction)을 실험에 의존하지 않고 해석할 수 있는 해석기법 및 해석모델을 개발하고 신뢰성을 검증하는 것을 목표로 하고 있으며 아직 세계적으로 성숙되지 않은 기술이므로 이 분야의 기술선점을 달성할 수 있다.

유체가 연성된 구조물의 동적거동을 평가함으로써 구조물의 구조적 건전성을 실험에 의존하지 않음으로써 경제적 이익을 실현할 수 있다. 일반적으로 유체-구조, 열-구조 및 유체-열-구조의 연성이 수반되는 관 구조물의 동적거동 분석을 위하여 실제조건을 모사하도록 실험조건을 설정하여 유체유발 진동시험을 수행한다. 이를 위해 많은 비용과 시간이 소요되게 되며, 구조물의 기하학적 형상이 변하게 되면 다시 동일한 시험을 반복해야 하므로 경제적인 부담이 크다. 따라서 관련 해석기술의 개발로부터 큰 경제적 이득을 가져올 수 있다. 경제성과 안전성이 향상된 원전 운용에 기여하게 되므로 국가 에너지경제에 기여하는 바가 지대하다.

유체-구조 연성 해석방법 및 모델개발을 통해 확보할 고유 원천기술은 우리나라의 중요한 기술수출 항목이 될 수 있다. 원자력기술의 해외진출에 있어 가장 큰 걸림돌은 해당 기술에 대한 원천기술이 확보되어 있지 않기 때문이다. 현재 각국에서 본 기술의 중요성을 인식하여 개발에 노력을 기울이고 있음을 고려할 때, 국내에서도 연성해석모델 및 해석기법에 대한 원천기술을 선점할 때 기술수출을 달성할 수 있다.

본 기술을 원자력 분야의 핵연료나 열교환기 세관의 건전성 평가에 직접적으로 활용할 수 있어 원자력에 대한 국민의 신뢰도가 향상된다. 핵연료봉의 노심 내 축방향 및 횡방향 유체유동 조건 하에서 유체-구조 연성에 의한 거동을 평가할 수 있는 기술은 결국 핵연료의 건전성 제고에 기여할 수 있다. 또한 이러한 유체-구조 연성에 의해 해석적으로 거동을 평가함으로써 실험에만 의존하지 않게 되어 경제성 제고도 동시에 기할 수 있다. 따라서 경제성 및 안전성 제고를 통해 국민의 원자력에 대한 신뢰도가 향상될 것으로 기대된다.

지금까지의 외국에서의 연구현황을 살펴보면 MIT의 K.J. Bathe 등은 구조와 유체 해석을 위한 모듈을 하나로 통합하였다. 이것은 구조와 유체의 mesh가 각각 독립적으로 작성된다는 것을 의미한다. 이것을 위해 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 수식화를 적용하였다. 이렇게 개발한 코드를 사용하여 잠기지 않는 제동 시스템(ABS), 연료펌프, Shock Absorber 및 인공 폐의 유체연성 문제 해석을 수행하였다. L. Anderson 등은 냉각재상실사고 시 원자로심 내부구조물을 유체-구조 연성으로 타당성을 검증하였다. R. Kurihara 등은 토카막 핵융합로에서 Liquid Divertor 자유표면의 열유체해석을 유체-구조 연성문제로 해석하였다. D.L. Tang 등은 협착이 있는 경동맥의 절제에서 혈액흐름을 유체-구조 연성문제로 해석하여 혈관 벽면의 응력과 변형률을 계산하였다. 또한 이들은 경동맥(carotid) 협착들(stenoses)이 있는 경우 혈관에 작용하는 응력 및 변형률의 분포에 대해 지질 덩어리(lipid pool)의 영향을 3차원 유체-구조 연성문제로 적용하여 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 이와 같이 유체-구조 연성문제는 비단 원자력뿐 아니라 자동차, 설비, 및 생체역학 분야에서 적용이 확대되어 가고 있음을 알 수 있다.

한편, 국내에서의 연구현황을 살펴보면 KINS에서 압력용기 및 배관의 유체-구조 연성문제에 대한 연구가 진행 중이며, KOPEC에서는 유체-구조 연성 효과를 고려한 원자로 기기설계에 대해 방법론에 대한 연구를 진행 중에 있다. 또한 KAERI에서는 열교환기 관다발에서의 유체유발 진동문제를 실험을 통하여 건전성 평가를 위한 연구를 수행 중에 있다. 솔리드 형상 및 이중 관 구조를 갖는 구조물의 외부에 유체의 유동이 있거나 구조물의 내/외부에 유체의 유동이 있는 경우에 이를 유체-구조 연성문제로 정의하여 해석을 하고자 하는 연구가 태동단계에 있다.

유체 및 열이 연성된 구조물들을 해석하기 위해서 많은 코드들을 사용하여 도전을 계속하고 있다. 현재까지는 유체나 열을 먼저 해석하고 이를 다시 구조물에 입력 경계조건으로 적용해 구조물에 대한 해석을 수행하고 있는 것이 대부분이다. 또한 유체 유동에 의한 구조물의 거동을 평가하기 위해서 현재까지는 거의 실험에 의존하고 있다. 실험에만 의존하게 될 경우 실험을 위한 비용도 많이 소요되지만 무엇보다도 실제 경계조건을 엄밀히 실험에서 구현하기가 결코 쉽지가 않아 구조적 건전성을 평가하는데 제한이 있게 된다.

본 연구는 2년간 수행하도록 되었으며, 본 보고서는 2차 연구년도(2009. 01. 01. ~ 2009. 12. 31.)에 수행한 연구결과를 수록하고 있다. 본 보고서의 본론은 크게 난

류 모델링에 대한 이론적 배경과 해석적 방법에 의한 내용을 기술하고 있다. 본 유체-구조가 연성된 핵연료봉의 노심 내에서 유동에 따른 봉의 동적 거동 평가를 위한 내용은 향후 이중냉각 핵 연료봉의 유동에 의한 동적거동 평가 연구수행에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.



제 2 장 본 론

제 1 절 난류 모델링

1. 개 요

CFD는 계산유체역학(computational fluid dynamics)의 약자이다. 이것은 유체의 유동현상 분야에서 수치해석의 방대한 부분을 대표한다. CFD모사 분야에서의 진보는 컴퓨터 기술의 발전과 이해의 폭 및 상미분 및 편미분방정식을 푸는 기술에 전적으로 의존한다. 그렇지만 CFD는 컴퓨터만이 아니라 수치과학 분야 이상이다. 이러한 문제에서 실제 복잡한 유동의 직접 풀기에 계산력을 증가하는 조건을 갖는 문제는 적용된 물리적 모델에 달려있다. 이들은 물리적 현상의 이해가 어떤 조건들이 지배적이라는 것에 의해서만 유도되어질 수 있다.

난류가 어떤 유동 내에 존재할 때마다 다른 유동 현상들 모두를 지배하는 것으로 보인다. 그것이 왜 난류의 성공적 모델링이 수치계산의 정확성을 좌우하는지를 결정한다. 단순한 유동에 있어 모든 해석적 및 반-해석적 해들은 1940년대 말까지 이미 알려져 있다. 한편 난류 모델링 및 난류 자체의 특성에 관해서는 여전히 미해결문제로 남아 있다. 아직까지도 범용의 난류 모델은 존재하지 않는다.

우리는 여전히 이 문제에 대해 무지하다. 그것이 또한 CFD 모델링의 분야에 있어 여전히 매력적인 이유가 된다.

2. 일반적 사항

2.1 이상적 난류모델

CFD 문제를 푸는 것은 보통 네 개의 주요 항목들로 구성된다. 기하 및 격자 생성, 물리적 모델의 셋업, 해석 및 계산 데이터의 후처리이다. 기하와 격자가 생성되면, 정의된 문제를 계산하고 데이터를 수집하는 것은 매우 잘 알려져 있다. 정밀한 이론이 유용하다. 불행히, 그것은 난류유동에 대해서는 물리적 모델의 셋업은 참이 아니다. 문제는 가능한 단순한 모델을 통해 매우 복잡한 현상을 모델링하려는 것이다.

따라서 이상적 모델이 관련된 물리적 본질을 잡기 위해 모델 방정식에 최소한의 복잡성이 도입되어야 한다.

2.2 난류모델의 복잡성

다른 난류 모델들의 복잡성은 그러한 수치 모사를 수행을 통해 관찰하거나 조사하기 원하는 것에 따라 달라질 수도 있다. 복잡성은 N-S 방정식의 성질에 의존한다. N-S 방정식은 본래 비선형이고, 시간 의존적이며 3차 편미분 방정식이다.

난류는 고 레이놀즈수에서 발생하는 층류 유동의 불안정성으로 생각되어질 수 있다. 이러한 불안정성은 N-S 방정식에서 비선형 관성 항과 점성 항 간의 상호작용에 기인한다. 이들 상호작용들은 회전적이고, 전적으로 시간에 의존하며, 전적으로

로 3차원이다. 회전적 및 3차원 상호작용들은 볼텍스 신장(stretching)을 통해 상호 연결된다. 볼텍스 신장은 2차원 공간에서는 존재할 수가 없다. 그것은 난류 현상에 대해서는 2차원 근사가 유용하지 않은 이유이다.

게다가, 난류는 시간에서 임의 과정(random process)으로 생각되어진다. 따라서 결정론적 접근은 가능하지 않다. 어떤 성질들은 통계적 방법들을 사용하여 난류에 대해 파악될 수도 있다. 이들은 유동 변수들 간에 어떤 상호관계 함수들을 도입해야 한다. 그렇지만, 이들 상호관계들을 결정하는 것은 불가능하다.

난류 유동에 있어 다른 중요한 특성들은 볼텍스 구조들은 유동을 따라 이동한다는 것이다. 그들(볼텍스)의 생존주기는 보통 매우 길다. 여기서 어떤 난류 크기는 국부적으로 규정되어지지 않을 수 있다. 이것은 단순히 유동의 상류 이력이 또한 중요하다는 것을 의미한다.

2.3 난류모델의 분류

요즘은 난류 유동은 몇몇 다른 접근들을 사용하여 계산될 수 있다. 난류 크기에 대한 적절한 모델들을 갖는 평균화된 레이놀즈수 N-S 방정식(RANS)를 풀거나 직접 그것을 계산할 수 있다. 주요 접근법들을 요약하였다.

RANS 모델

- 에디 점성 모델(eddy-viscosity models, EVM)
난류 스트레스는 변형률의 평균율에 비례한다고 가정한다. 게다가 에디 점성은 난류 전달 방정식으로부터 유도된다(보통 $k +$ 다른 성분의 일).
- 비선형 에디 점성 모델(non-linear eddy viscosity models, NLEVM)
난류 스트레스는 평균 속도 기울기(mean velocity gradient)의 비선형 함수로 모델 된다. 난류 스케일들은 전달 방정식을 풀으로써 결정된다(보통 $k +$ 다른 성분의 일). 모델은 변형률의 어떤 중요한 형태에 난류의 모방 응답으로 규정된다.
- 차분 응력 모델(DSM)
이 영역은 레이놀즈-응력 전달 모델(RSTM)이나 2차 닫힌 모델(SOC)로 구성된다. 하나는 모든 난류 응력들에 대해 전달 방정식들을 푸는 것이 요구된다.

유동 량(fluctuating quantities)의 계산

- 라지 에디 모사(large-eddy simulation, LES)
하나는 시간에 따른 유동을 계산하나, 모델들은 서브-격자-스케일 운동
- 직접 수치 모사(direct numerical simulation, DNS)
적용 가능한 모델은 없다. 하나는 유동의 가장 작은 스케일을 해결하는 것이 요

구된다.

어떤 CFD 접근을 위한 모델의 확장을 그림 2.1에 나타내었다. 이것은 RANS 모델을 푸는 것보다 더 작은 스케일의 요동 크기를 계산하는 것이 명확해 보인다. 여기서 이들은 더 나은 결과들을 제공할 수 있는 능력을 가졌다. 그렇지만 RANS 모델들을 적용할 때보다 훨씬 고 성능의 컴퓨터를 요구한다.

3. 레이놀즈-평균 N-S(RANS) 모델

이번 항에서는 레이놀즈 분리 혹은 레이놀즈 평균의 개념에 대해 기술코자 한다. 레이놀즈 응력 항이 도입되고 간단히 설명된다. 이들 아이디어들을 어떻게 수치 모델들에 적용하는 방법들에 대해서 설명되었다.

3.1 레이놀즈 분리

3.1.1 순간적 유체 운동을 묘사하는 방정식

어떤 수학적 아이디어들을 더 쉽게 이해하기 위해서 초기 순간적 유체 운동을 간단히 수정한 N-S 방정식을 묘사하는 것이 편리하다. 순간적 유체를 묘사하는 모든 변수들은 $\tilde{}$ 로 표기된다. 이들 변수들은 유체의 밀도($\tilde{\rho}$), 속도 성분(\tilde{u}_i), 압력(\tilde{p}) 및 점 응력 텐서($\tilde{T}_{ij}^{(\nu)}$)이다. 여기서 이들 변수들이 시간과 공간에 종속인 변수들임을 지적하는 것이 또한 적절하다.

난류 및 비-난류 유동에 대해 일반적 N-S 방정식은 다음과 같다.

$$\tilde{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{T}_{ij}^{(\nu)}}{\partial x_j} \quad \text{및} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x_j} \right) + \tilde{\rho} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

식 (1)은 운동량 방정식(유체에 대한 뉴턴의 2법칙)이라 불린다. 두 번째 방정식 (2)는 연속 방정식으로 알려져 있다. 여기서 점 응력 텐서 $\tilde{T}_{ij}^{(\nu)}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{T}_{ij}^{(\nu)} = 2\mu \left(\tilde{s}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{s}_{kk} \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

여기서 \tilde{s}_{ij} 는

$$\tilde{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

비압축성이라 가정하면 이 방정식들은 단순화할 수 있다. 연속 방정식 (2)에서 $\partial u_i / \partial x_i = 0$ 으로 축소된다. 이러한 결과로 운동량 방정식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \quad (5)$$

인자 μ/ρ 는 종종 동점성계수 ν 로 간주되기도 한다. 점 응력 텐서는 다음과 같이 간단화되기도 한다.

$$\widetilde{T}_{ij}^{(\nu)} = 2\mu s_{ij} \quad (6)$$

3.1.2 레이놀즈 평균

레이놀즈 평균은 레이놀즈에 의해 1895년에 소개되었다. 레이놀즈 평균은 많은 다른 방법에서 고려될 수 있다. 이들은 시간 평균, 공간 평균 혹은 평균의 조합과 같은 세 개의 가장 일반적인 향으로 인식될 수 있다.

시간 평균은 정적 난류를 고려할 때 적절한 개념이다. 그것은 유동이 시간에 따라 평균은 변하지 않는다는 개념이다. 이러한 경우 시간 평균은 다음과 같이 정의된다.

$$F(\bar{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_t^{1+T} f(\bar{r}, t) dt \right) \quad (7)$$

공간 평균은 균질한 난류를 고려할 때 적절한 개념이다. 그것은 난류 유동의 평균이 어떤 방향에서도 변하지 않는다는 것이다. 이러한 경우 공간 평균은 다음과 같이 정의된다.

$$F(t) = \lim_{V \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{V} \iiint f(\bar{r}, t) dV \right) \quad (8)$$

양상블 평균은 레이놀즈 평균의 가장 일반적 개념이다. 이것은 N일치 실험의 평균으로 이해되어야 한다. 양상블 평균은 시간과 공간 종속이다. 이것은 다음과 같이 정의된다.

$$F(\bar{r}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(\bar{r}, t) \quad (9)$$

레이놀즈 평균의 주 아이디어는 유동을 평균 성분과 섭동 성분으로 분리한다는 것이다.

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i \quad (10)$$

$$\tilde{p} = P + p$$

$$\widetilde{T_{ij}^{(\nu)}} = T_{ij}^{(\nu)} + \tau_{ij}^{(\nu)}$$

이 과정은 레이놀즈 분해라 불린다. 상첨자들은 평균치를 의미하며, 하첨자들은 식 (10)의 오른 쪽 항에서의 섭동치를 의미한다. 식 (10)을 N-S방정식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial(U_i + u_i)}{\partial t} + (U_j + u_j) \frac{\partial(U_i + u_i)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial(P + p)}{\partial x_i} + \frac{\partial(T_{ij}^{(\nu)} + \tau_{ij}^{(\nu)})}{\partial x_j} \quad (11)$$

이 방정식은 평균 운동에 대해 운동량 보존으로 표현되는 방정식으로 평균화될 수 있다. 여기서 평균의 계산과 미분을 상호 대체하는 것은 응력에 있어 중요하다. 이것은 또한 섭동 성분의 평균이 영이라고 가정한다. 따라서 평균화된 운동량 방정식은 다음과 같이 축소된다.

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}^{(\nu)}}{\partial x_j} - \rho \left\langle u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\rangle \quad (12)$$

마찬가지로 비압축성 유동에 대한 연속 방정식도 분해될 수 있다. 이러한 연속 방정식은 선형이며, 따라서 순간적 운동에 대해 원래의 형태가 보존된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

식 (13)에서 두 번째 관계식을 사용하면 식 (12)의 오른 쪽 항은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial T_{ij}^{(\nu)}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \langle u_i u_j \rangle) \quad (14)$$

항 $(\rho \langle u_i u_j \rangle)$ 는 점 응력 텐서로서 같은 구조 및 제원을 갖는다. 그렇지만 이 항

이 응력 전부는 아니다. 이것은 단지 평균화된 항의 변화로 섭동 속도에 기여하는 항으로 재생성된 것이다. 한편, 유체의 운동이 멀어질수록 이것은 응력으로 작용한다. 이것의 이름이 레이놀즈 응력이다.

3.2 폐 문제(closure problem)

위의 레이놀즈 분해와 평균화를 갖는 문제는 이들 간에 유용한 관계식이 없는 추가 변수들 ($\langle u_{i=1,2,3}^2 \rangle, \langle u_1 u_2 \rangle, \langle u_1 u_3 \rangle, \langle u_2 u_3 \rangle$)가 도입된다.

레이놀즈 응력은 진정 응력이며, 점 응력에 대한 것과 유사한 구성 방정식을 작성하려 하였다. 그렇지만 이들 두 응력 사이에는 중요한 차이가 존재한다. 점 응력은 유체의 성질이다. 이것은 구성 관계식들과 일치하도록 결정하기 위해 수행될 수 있는 시험들과는 다른 이유이다. 이들 관계식들이 유효하다면 특별한 유동이 관찰되어진다. 한편 레이놀즈 응력은 유동의 성질이다. 여기서 이 레이놀즈 응력은 유동 변수들 자체에 종속된다. 이것이 유동에서 유동으로의 변화와 그리고 일반적 구성 관계식들이 유효하지 않은 이유이다.

3.2.1 층류 유동, 미소 섭동 및 중첩

폐 문제에 대한 하나의 해는 섭동의 중첩을 갖는 층류 유동으로서의 유동을 다룬다. 순간적 운동으로 정의된 것으로부터 평균화된 운동량 방정식이 빠진다. 섭동 운동의 결과는 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^{(\nu)}}{\partial x_j} - \rho \left[u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - \rho \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left\langle u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\rangle \right) \quad (15)$$

식 (15)는 평균화된 N-S 방정식 (14)보다 더 유사한 구조를 갖는다. 단지 차이는 우변에서의 마지막 항이다. 이것의 첫 번째 항은 연장 항을 나타낸다. 이것은 섭동 운동은 평균화된 운동으로부터 운동량을 빼 것을 묘사한다. 식 (14)에서 레이놀즈 응력 항과 유사한 두 번째 항은 그것의 평균이 영이라는 것을 의미한다. 평균화된 식 (15)의 평균은 영이어야 한다.

이것은 섭동이 아주 작아야 한다는 것을 요구한다. 미소 섭동 레이놀즈 응력 항의 제한치는 무시된다. 따라서 평균화된 N-S 방정식은 층류를 만족한다. 게다가 식 (15)는 선형 편미분방정식으로 축소된다. 이 과정의 결과로 관찰된 유동을 설명하는 방정식의 조합은 잘 정의된다.

3.3 레이놀즈 응력 모델

여기에는 많은 다른 개념들이 존재하고 일반적 형태로서 폐 문제를 풀려는 시도가 시도되고 있다. 요즘은 두 개의 개념이 있으며, 레이놀즈 응력 모델의 대부분을 다루고 있다.

하나 및 대부분의 명백한 시도들은 유사한 방법으로 레이놀즈 응력이 점 응력으로 설명하는 것이다. 유체는 다른 성질 - 난류 점성으로 설명될 수 있다. 이 모델은 레이놀즈가 1895년 그의 분해 및 평균화된 접근이 발표되기 훨씬 이전에 Boussinesq에 의해 1877년에 소개되었다. 이 모델을 이해하는 데는 많은 어려움이 있다. 아마도 주요 문제는 특별한 유동을 포함한 실제 실험 없이 어떻게 이 성질을 얻을 수 있는 가이다.

주요 난제는 Prandtl에 의해 1925년에 극복되었다. 그는 기체에서 분자들의 평균 자유 경로를 의미하는 혼합 길이 개념을 도입하였다. 그는 또한 난류 점성에서 혼합 길이를 관계하는 대수 식을 설명하였다. 이것이 대수 혹은 영-방정식 모델의 창시자로 Prandtl이 알려진 이유이다. 영-방정식은 사실에 입각하며, 요구되는 에너지, 질량 및 운동량을 제외한 부가의 전달 함수가 없다.

또 다른 주요한 돌파는 난류 점성의 개념이 난류 운동 에너지의 함수로 도입됨으로써 1945년 Prandtl에 의해 이뤄졌다. 이 개념의 주요 장점은 이전 유동의 이력이 받아들여졌다는 것이다. 그러므로 이것은 더욱 실제적 모델이다. Prandtl은 난류 운동 에너지에 부가의 전달 방정식을 사용하였다. 이 개념에 근거한 모델들은 보통 one-equation 모델이라 불린다.

여전히 난류 길이 스케일을 규정할 필요가 있으며, 이것은 또한 유동 종속 성질이다. 그러므로 연구되는 유동에 대해 여전히 어떤 지식을 가질 필요가 존재한다. 따라서 이러한 모델들은 불완전하다고 불린다. 영 및 하나의 방정식 둘 다 불완전하다.

한편 완전한 모델은 초기 및 경계조건들이 진보되어져야 하는 것 외에 유동의 지식이 없다는 사실에 의해 규정되어져야 한다.

첫 번째 완전한 모델은 1942년 Kolmogorov에 의해 도입되었다. 이 모델의 기본 생각은 난류 운동 에너지 (k) 및 에너지의 소산율(ω) 그리고 이들 양에 관련된 길이와 시간 스케일의 부족한 정보에 근거한다. 두 개의 부가적 방정식들이 k 와 ω 가 도입되어 이것을 두-방정식 모델이라 부른다. 또한 k - ω 모델 또한 언급한다. 이 개념의 변형이 k - ϵ 모델이라 불린다.

이와는 다른 레이놀즈의 시도가 레이놀즈 응력 텐서를 직접 다루는 것이다. 먼저 실제 레이놀즈 응력 방정식을 유도하려는 시도가 있었다. 이러한 생각은 레이놀즈 응력을 그러한 방법으로 섭동 운동량 방정식 (15)을 다시 유도할 필요가 없다. 이 시도의 주요 문제는 구성 방정식이 알려지지 않은 더욱 많은 새로운 미지의 변수들이 도입되어야 한다는 것이다.

1951년 Rotta는 편미분방정식을 사용하여 레이놀즈 응력 텐서를 성공적으로 다루었다. 이 모델은 Boussinesq의 난류 점성 모델보다 더 실제적이다. 그렇지만 이것은 레이놀즈 응력을 묘사하는 여섯 개의 추가 방정식들과 난류 길이 스케일을 설명하는 하나의 추가 방정식을 도입해야 한다.

RANS 모델의 개념적 돌파구는 아직까지 없다. 거기에는 특별한 유동 경우에

모델을 개선할 수 있는 약간의 진전만이 있었을 뿐이다.

4. 섭동 크기의 계산

이번 항에서는 직접적 수치모사 (DNS)와 라지-에디 모사(LES)에 대해 간단히 기술하고자 한다.

4.1 직접 수치 모사 (DNS)

DNS는 N-S 방정식과 연속 방정식을 직접 푸는 것을 의미한다. 난류 유동을 다룰 때 난류 현상을 전체 길이와 시간 스케일에서 N-S 방정식 및 구성 방정식을 수치적으로 풀려는 시도가 있었다. 성공적 모사를 위해서는 가장 작은 길이, 시간 및 속도 스케일이 얼마인지를 아는 것이 필요하다. 이 정보는 적절한 공간격자 크기와 시간의 증분치를 결정하는데 있어 매우 중요하다. 이 데이터는 Kolmogorov 난류 이론을 채용함으로써 쉽게 받아들여질 수 있었다. 이들 데이터로부터 추출코자 하는 것은 전형적으로 필요한 격자의 수 및 시간 증분치이다.

$$N_{uni} = (110 Re_T)^{9/4}, Re_T = \frac{u_T L}{\nu} \quad (16)$$

Re_T 는 난류 레이놀즈수를 나타내며, u_T 는 마찰 속도를, L 은 전형적인 길이, $\epsilon = \mu/\rho$ 는 유체의 동점성계수를 나타낸다. 모든 양들은 난류 스케일의 적분으로 정의된다. 이들 모두는 Kolmogorov 난류 이론에 의해 유도된다.

$$N_{time} = \frac{\Delta t_{total}}{\Delta t}, \Delta t \approx \frac{0.003}{\sqrt{Re_T}} \frac{L}{u_T} \quad (17)$$

4.2 라지-에디 모사 (LES)

LES는 큰 볼텍스들을 직접 계산할 때 유용하다. 여기서 작은 스케일의 에디들이 모사되었다. 이것이 공간격자와 시간의 증분이 DNS에 비해 많아져야 하는 이유이다. LES가 DNS에 비해 계산력에 있어서는 더욱 경제적이다.

LES 방법은 DNS방법에 비해 계산시간이 대략 1/10인 것으로 나타났다.

LES의 근원적 생각은 수렴 진전이라 불린다. 큰 스케일 에디들의 거동은 유동에 작용하는 힘과 초기 및 경계조건들에 강하게 종속된다. 이들은 유동에 종속적이다. 한편 작은 스케일 에디는 일반적으로 더욱 큰 스케일에서 발생하는 것과는 독립적이다. 즉 유동에 독립이라는 것이다. 그러므로 큰 에디들은 작은 에디들이 모델 되어질 때 직접적으로 푼다. 작은 에디에 대해 범용 모델을 개발하고자 한다.

또 다른 중요한 개념은 LES의 필터링에 관한 것이다. 해석 시 서브-격자의 섭동을 제거하기 위해 필터링 함수가 적용된다. 서브-격자 섭동들이 모델 되었다. 이것은 평균을 통해 수행된다. 가장 간단한 필터링 함수의 하나는 중앙 차분 근사 자

체이다.

$$\frac{u(x+h)-u(x-h)}{2h} = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} u(\xi) d\xi \right) \quad (18)$$

h의 길이 스케일은 아직 풀리지 않았고, h보다 더 작은 길이 스케일이 모델 되었다. 이들을 서브-격자 스케일(SGS)이라 부른다.

5. RANS 대 LES

난류 유동은 많은 다른 특징들로 구성될 수 있다. 따라서 이것은 가능한 많은 경우를 예측하기 위한 CFD 모델에 있어 매우 중요하다. 난류 모델들은 보통 방해-물체(bluff-body)의 유동을 모사함으로써 시험된다. 사각형 블록의 특별한 예제 유동을 해석하였다.

LES, EASM (특별한 RANS 모델) 및 RANS 모델들에 의해 층류 라인이 예측되었다. RANS 계산에 사용된 모델에 따라 강하게 영향을 받는 것으로 보인다. EASM 모델은 LES처럼 유사한 기하학적 형상을 보이나, 재회전(recirculation) 영역에서는 다르게 나타난다. RANS는 재순환 영역을 크게 예측하고 있으며, 웨이크(wake) 영역이 훨씬 더 신장된 것으로 보였다.

관찰된 모델들 사이의 더욱 정량적인 차이는 실험 데이터와 비교하면 더욱 극명해진다. Wilcox의 RANS 모델은 웨이크 영역에서 난류 운동 에너지를 예측하는데 실패했다. 그렇지만 EASM의 RANS 모델은 더욱 성공적이었다. 이것의 결과를 LES 모델의 결과와 심층 비교하였다.

6. 난류모델링 요약

지난 10년간 CFD는 엔지니어링 분야에서 주요 툴이 되었다. 컴퓨터 기술의 진보로 인해 CFD는 중간의 비용 및 중간 시대의 산업에 적용할 수 있게 되었다. CFD의 미래 전망은 어떻게 정확히 복잡한 유동을 계산할 수 있는가에 달려 있다. 현장에서의 많은 유동은 난류에 관심이 증대되므로 난류의 적절한 모사가 CFD 성공을 좌우하게 될 것이다.

뉴턴 유체의 유동장은 전적으로 N-S 방정식으로 묘사된다. 그렇지만, 난류 유동은 어떤 작은 섭동을 포함하고 있다. 그러한 작은 섭동의 해결은 아주 작은 격자 및 시간 증분을 요구하게 된다. 이러한 직접 모사는 고 레이놀즈수에 대해서는 적당하지 않게 된다.

RANS를 사용하면 계산비용은 통계적으로 평균화된 방정식 조합을 짧으로써 감소될 수 있으며, 이것은 더 큰 운동에 대해서는 단힌 가정들을 요구하게 된다.

LES의 목표는 난류 모델에서 종속변수들을 축소하는 것이다. 그러므로 유동의 주성분은 어떤 모델들 없이 모사해야 하며, 격자에서 풀려야만 한다. 격자의 크기에

비해 더 작은 스케일만이 모델에 필요하다. 결과적으로 LES 접근은 RANS 모델에 비해 더 많은 계산을 요구한다. RANS 모델들은 대략 LES 모델의 5%의 계산시간을 필요로 한다.

EASM과 같은 특정한 RANS 모델들은 유동을 정확히 규정하는 것이 중요하다. 더 낮은 계산 비용이 산업 설계에서 유용한 툴이 되게 하는 인자이다.

제 2 절 유체-구조 연성해석

1. 유체-구조 연성해석 결과

붕 구조물의 저 진폭 진동문제는 공간 간격이 좁으며, 지지체로 지지된 구조물에서 건전성을 해치는 주요 원인이 되어왔다. 오랜 기간에 있어서의 이러한 진동 거동은 프레팅 마멸, 고 주기의 피로 및 응력부식 균열(SCC)을 일으키게 한다. 하지만 이러한 문제가 연료와 같은 장주기 시스템에서는 주요 관심사임에도 해석하기가 까다롭고, 해석 툴이 없다는 이유로 너무 쉽고도 간단히 무시하여 왔다. 따라서 축 방향 유동 하에서의 유동유발 진동을 유체-구조 연성해석을 통해 규명하고자 하였다.

해석을 위한 코드는 유체와 구조물 간의 상호작용을 하나의 해석 도메인 내에서 동시에 해석함으로써 유체가 붕의 주변을 유동함으로써 구조물에 가하는 하중과, 구조물의 변위 혹은 변형에 의해 유체의 거동이 달라지는 상호작용을 모사할 수 있는 양 방향(two way method)법을 채택한 ADINA 코드를 사용하였다.

한편 반복적인(iterative) FSI 법은 직접(direct) 해석법에 비해 적은 메모리를 필요로 하며, 따라서 문제의 크기가 큰 대형 문제에 더 적합하다고 알려져 있어 반복적 해석방법을 적용하였다. 단일 스펠을 갖는 단일 붕을 연성해석 대상으로 고려하였다.

해석모델은 이러한 FSI 해석을 통해 단일 스펠의 입구, 중앙 및 출구 세 개의 지점에서 x 및 y 방향으로의 변위를 구하고 이를 유동유발 진동시험을 통해 구한 동일한 변위와의 비교를 통해 타당성 및 신뢰성을 검증하였다.

● 유체-구조 연성 해석모델

단일 셀을 둘러싸고 있는 유체는 유동유발 진동시험에서 사용한 물인 비압축성 유체로 모델링하였다. 비록 냉각수의 유동이 축 방향 유동이지만 레이놀즈수가 큰 난류유동이라 할 수 있으므로 이러한 난류를 모사하기 위해 K-epsilon (K- ϵ)모델을 선택하였다. 수송방정식을 위한 벽면(wall)의 경계조건은 수정된 에디 점성(modified eddy viscosity) 이라 불리며, 이는 동점성계수(kinematic viscosity)와 동일한 단위를 사용한다.

FSI 모사를 위해서는 구조와 유체가 모두 변형체(deformable body)로 모델링되어야 하므로 단일 붕 및 유체를 사면체 요소를 사용하였고, 단일 붕을 지지하고 있

는 두 개의 지점에서 x 및 y 방향의 지지 점은 스프링 요소를 사용하였다. 이러한 해석모델을 작성하기 위한 기하학적 제원 및 물성을 Table 1 에 요약하였다.

먼저 PB관은 3차원 솔리드 셸 요소(3-D shell)로 모델링하였고, 유체는 3차원 솔리드 유체요소(3-D fluid)로 모델링하였다. 구조의 절점 수 및 요소의 수는 각각 77,358개 및 50,157개이었고, 유체의 절점 및 요소의 수는 각각 26,902개 및 128,478 개로 총 요소의 수는 178,635개이었다. 단일 봉의 양 끝단에서 지지체의 지지부들이 봉과의 마찰력으로 x 및 y 방향에서 지지하고 있다. 봉을 지지하기 위한 지지부는 90도 간격으로 네 개의 위치에서 지지하고 있으므로 1차 년도에서 스프링 요소를 사용하여 모델링한 것과 달리 실제 지지부를 동일하게 모델링하였다.

유체는 상온(40℃), 상압의 순수의 물성을 적용하였다. 유체-구조 연성해석 모델의 개략을 Fig. 1 에 나타내었다. 유속은 관의 한 쪽 끝에서 3.0 에서 7.0 m/s로 1.0 m/s씩 증가 시켜 설정하였다.

Table 1. Geometrical and material properties for FSI analysis model.

l (mm)	1100	E_{PB} (N/mm ²)	99.3×10^{-3}
d (mm)	22.5	ρ_{PB} (kg/mm ³)	6.56×10^{-6}
k_1 (N/mm)	233	ν_{PB}	0.37
k_2 (N/mm)	654	ρ_{water} (kg/mm ³)	9.8×10^{-13}
m (kg)	0.352	μ_{water} (mm ² /s)	2.18×10^{-11}

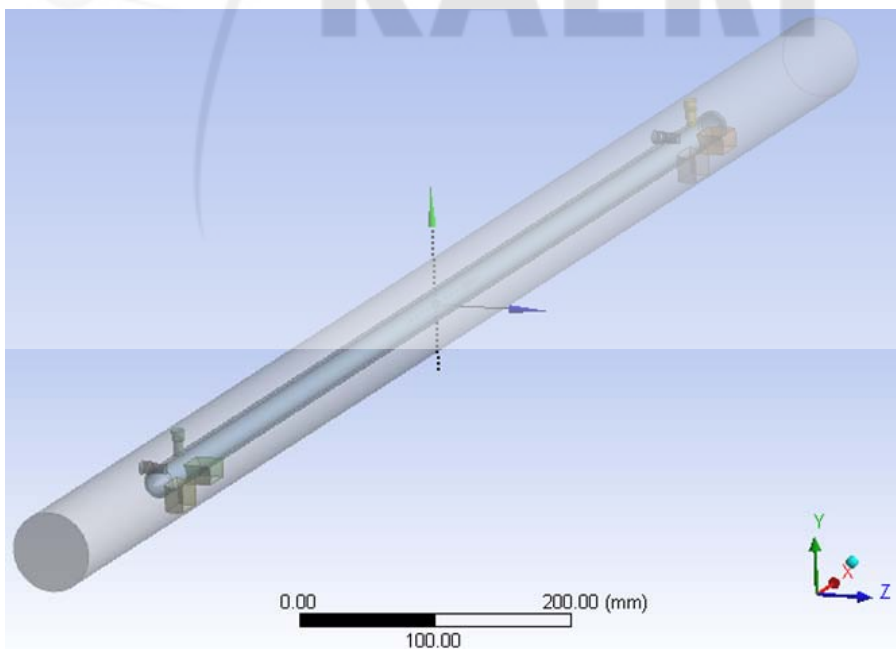


Figure 1. Fluid-structure interaction analysis model of a unit rod.

여기서 유동해석을 위한 격자는 전체 실린더에서 구조를 불린(boolean) 연산으로 추출하여 Fig. 2 와 같다. 유체가 시험 섹션(test section)에서 원통형 실린더 내를 유동하게 되므로 원통의 단면을 좀 더 조밀하게 메쉬를 함으로써 원통을 잘 모사할 수 있도록 하였다.

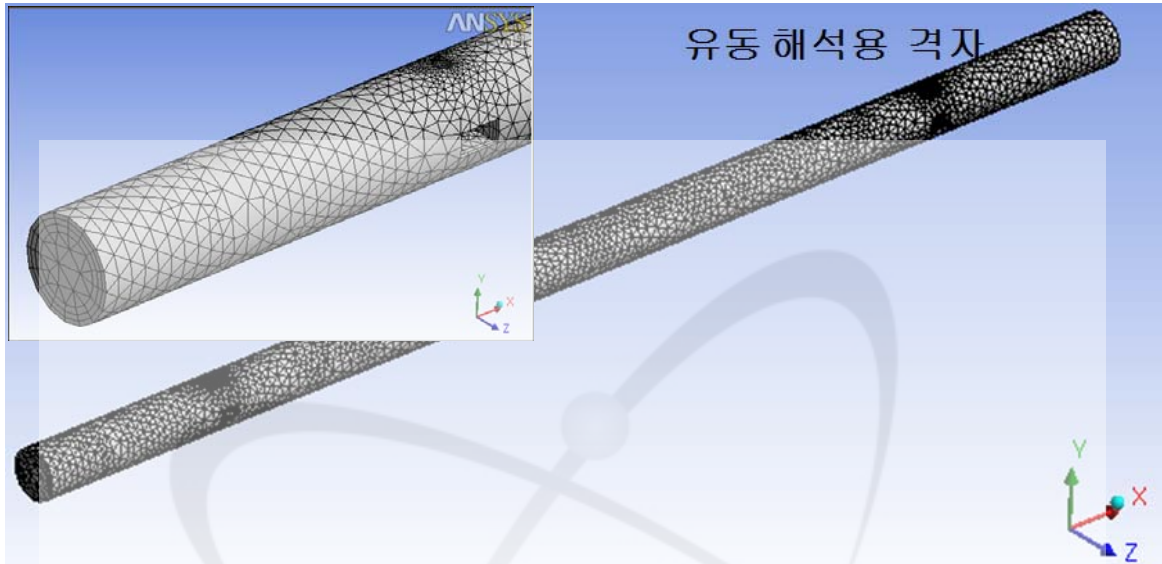


Figure 2. Fluid model for FSI analysis model.

- 해석에 적용된 경계조건

해석을 위해 작성된 유체-구조 연성해석 모델을 Fig. 3 에 나타내었다. 단일 셀 벽면, 즉 유체가 계속적으로 유동하는 것을 모사할 수 있도록 미끄럼 벽(sliding wall)로, 그리고 봉과 지지부가 접촉하고 있는 결면은 유체-구조 인터페이스(FSI interface) 경계조건이 적용되었다.

시험 관(test section) 을 지지하고 있는 8개의 스프링 요소는 x 및 y 방향으로 고정 경계조건을 적용하였고, 시험관과는 접촉면을 정의하여 구조의 구속조건으로 적용하였다.

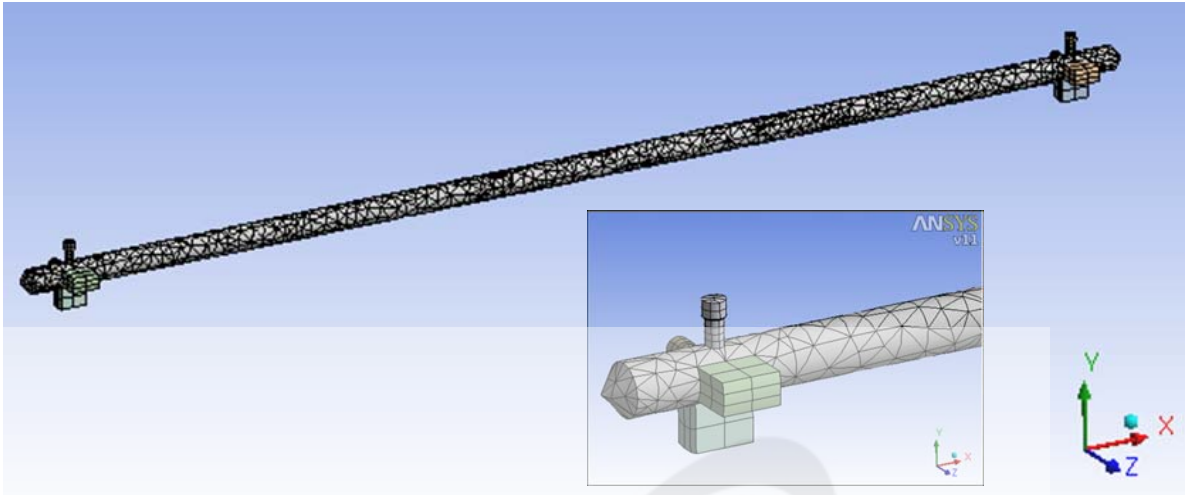


Figure 3. Boundary condition of unit cell of single span rod contained the coolant in axial flow.

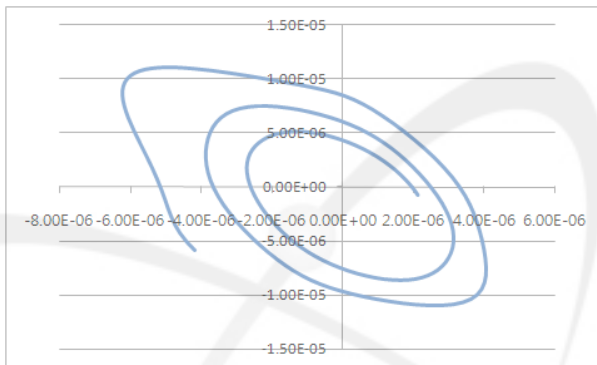
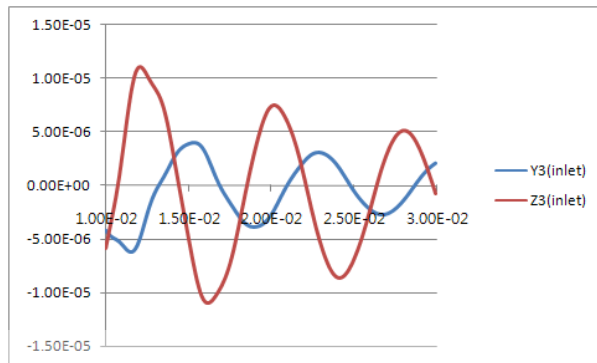
냉각수 입구에서의 축 방향 유속(v_i)은 3.0 m/s로부터 7.0 m/s까지로, 1.0 m/s의 증분을 갖도록 변화시켰으며, 레이놀즈수는 약 30,000이다. 전체 해석시간은 5.0 초까지 해석을 수행하였으며, 시간의 증분은 1.0×10^{-4} 로 하였다. 출구 쪽에서의 압력설정은 유체가 계속적으로 유동하는 것을 모사하기 위해 냉각수가 유입되는 반대 출구 쪽에서 일정한 압력(p_o)을 설정해 줌으로써 냉각수의 유동을 모사하였다.

● 단일 스패를 갖는 단일 봉의 FSI 해석결과

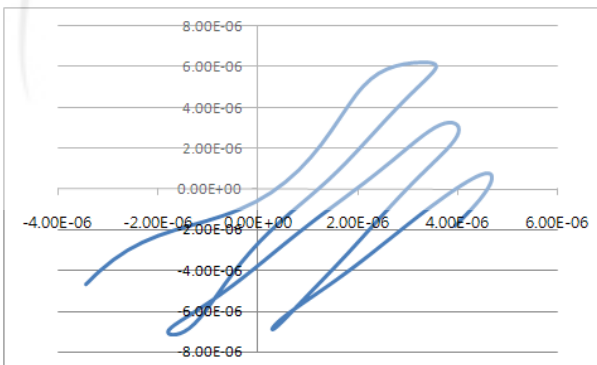
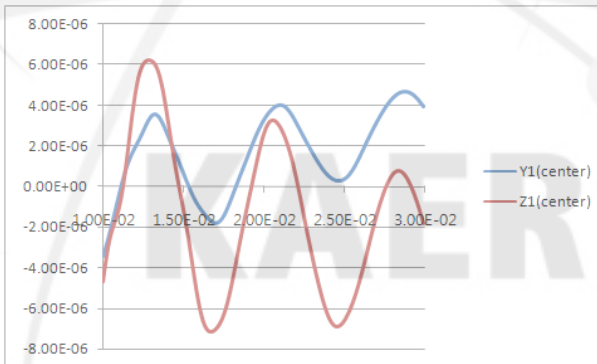
단일 스패를 갖는 단일 봉의 유체-구조 연성해석 모델을 사용하여 유속 5.0 m/s의 조건에서 해석을 수행한 결과 중 관의 유동유발 진동에 의한 변위거동을 Fig. 4 에 나타내었다. 관은 중앙을 중심으로 입구, 중앙 및 출구 지점의 변위 거동이 단순지지 보의 일차모드와 같은 형상을 나타내었다. 즉 관의 중앙에서 가장 큰 변위를 나타내었고, 관의 양 끝단 지지부로 갈수록 변위가 작아지는 일차모드와 같은 변형형상을 나타내었다.

✓ 실제 지지부를 사용한 모델의 결과

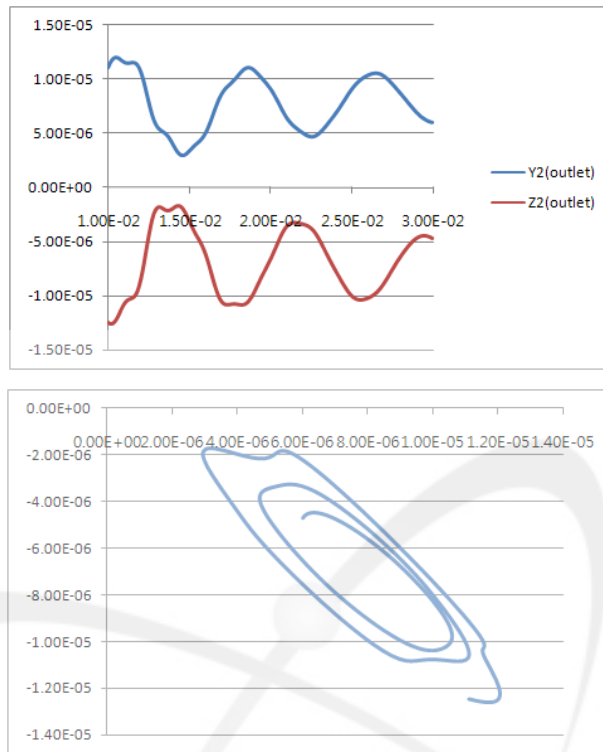
봉을 지지하고 있는 플런저와 지지부를 그대로 모델링한 초기 해석모델을 통한 관의 거동을 살펴보았다. 먼저 유체의 입구에서의 y 및 z 축의 변위를 살펴보면 봉의 진폭이 출렁이는 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 유체의 입구 축에서는 약간의 위상차를 가지고 변위가 진행되다가 중앙 절점에서는 y 및 z 축의 변위가 같은 위상을 갖고 출렁이다 출구 축에서는 서로 반대의 위상을 가지고 유체가 빠져나가는 것으로 보인다. 이것을 Fig. 4 에서는 2차원 평면에서와 시간의 영역에서 봉의 각 절점에서의 변위거동을 도시하였다.



(a) inlet



(b) center



(c) outlet

Figure 4. Y and Z-displacements for actual support analysis model.

또한 시험 관 내에서의 시간에 따른 압력성분을 Fig. 5 에 나타내었다. 해석을 천이해석(transient analysis)을 수행하였으므로, 시간의 변화에 따른 유체의 압력성분을 도시하였다. 압력성분은 유체의 난류 유동으로 인해 양과 음의 값으로 섭동하게 되고 이로 인해 관의 진동은 횡 방향으로 진동함을 알 수 있었다. 하지만 시간이 흐를수록 압력 세기(intensity)가 이 작아지며, 관의 출구 측으로 갈수록 압력이 작아지는 현상은 해석시간을 좀 더 길게 하여 좀 더 면밀한 검토가 필요한 것으로 보인다. 입구압력 결과는 유동유발 진동시험으로부터 얻은 결과에 비해 수십(24 ~ 60) 배 정도 크게 나타났다. 각 위치에서의 압력 결과 역시 해석시간을 연장하여 검토해야 할 것으로 보인다.

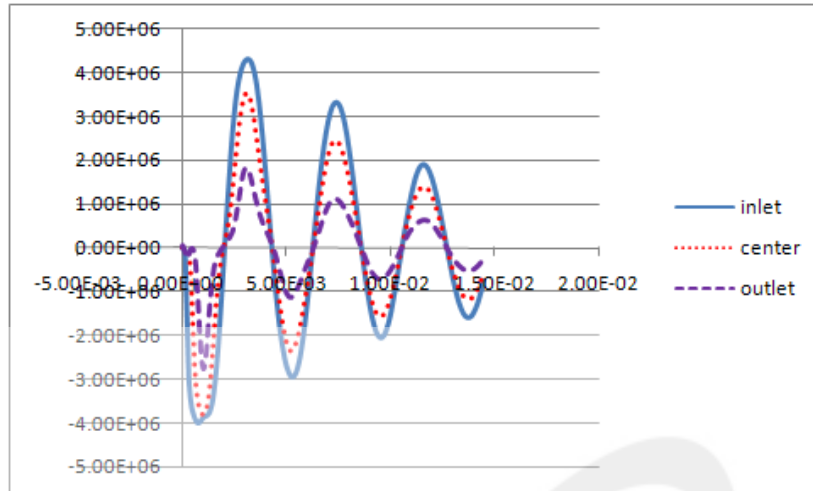
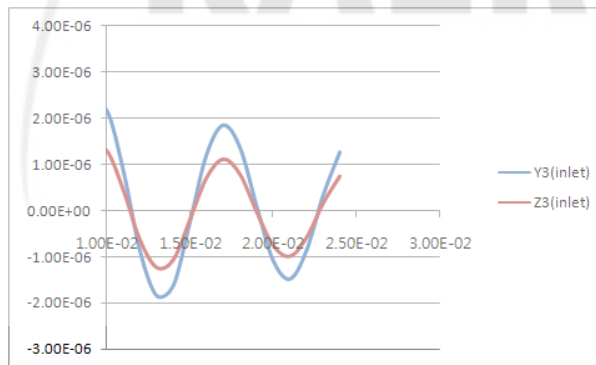
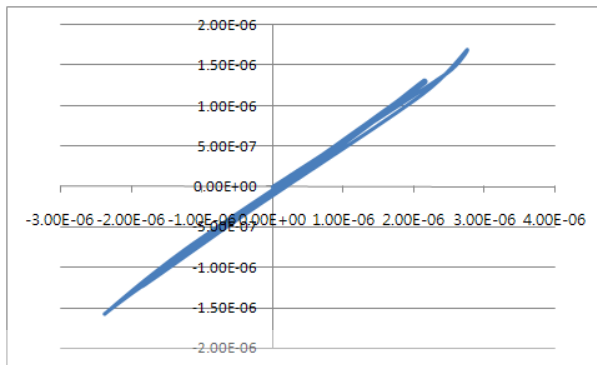


Figure 5. Nodal pressure intensity of the actual model by FSI analysis.

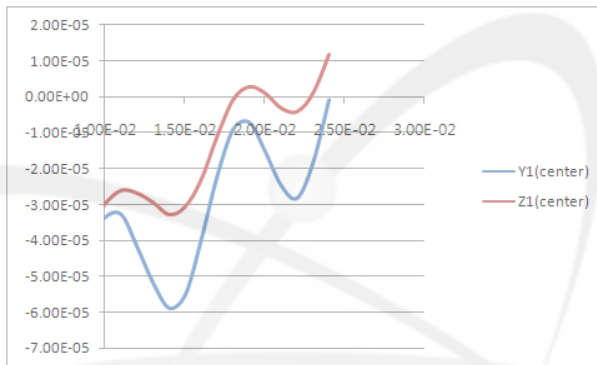
✓ 지지부를 단순화한 모델의 결과

봉을 지지하고 있는 플런저와 지지부를 실제모델과는 다르게 네 개의 지지부 모두를 덤플형상으로 모델링하고 이를 봉과의 접촉으로 정의한 단순화 해석 모델을 통한 관의 거동을 살펴보았다. 먼저 유체의 입구에서의 y 및 z 축의 변위를 살펴보면 봉의 진폭이 출렁이는 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 유체의 입구 측에서는 약간의 위상차를 가지고 변위가 진행되다가 중앙 절점에서는 y 및 z 축의 변위가 같은 위상을 갖고 출렁이다 출구 측에서는 서로 반대의 위상을 가지고 유체가 빠져나가는 것으로 보인다. 이것을 Fig. 6 에서는 2차원 평면에서와 시간의 영역에서 봉의 각 절점에서의 변위거동을 도시하였다.

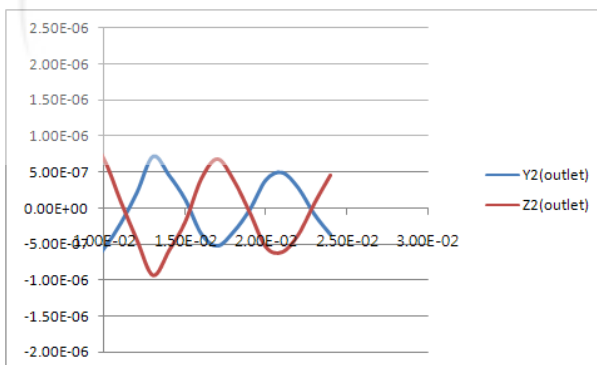


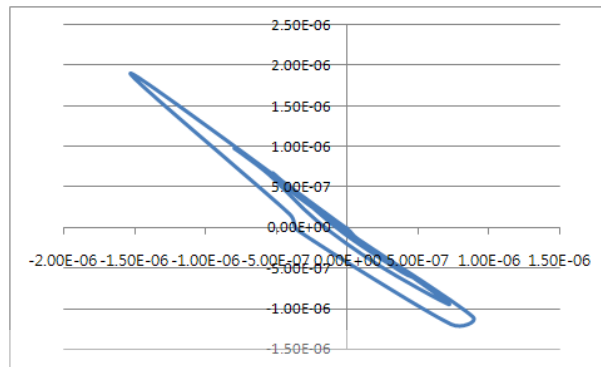


(a) inlet



(b) center

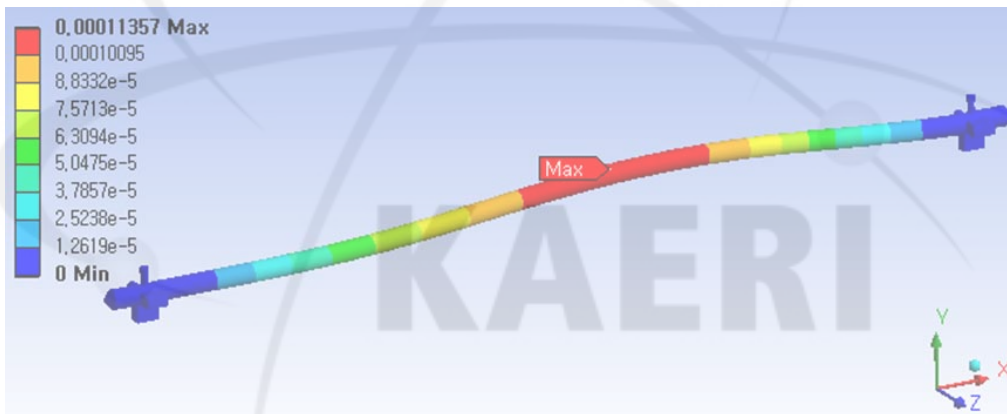




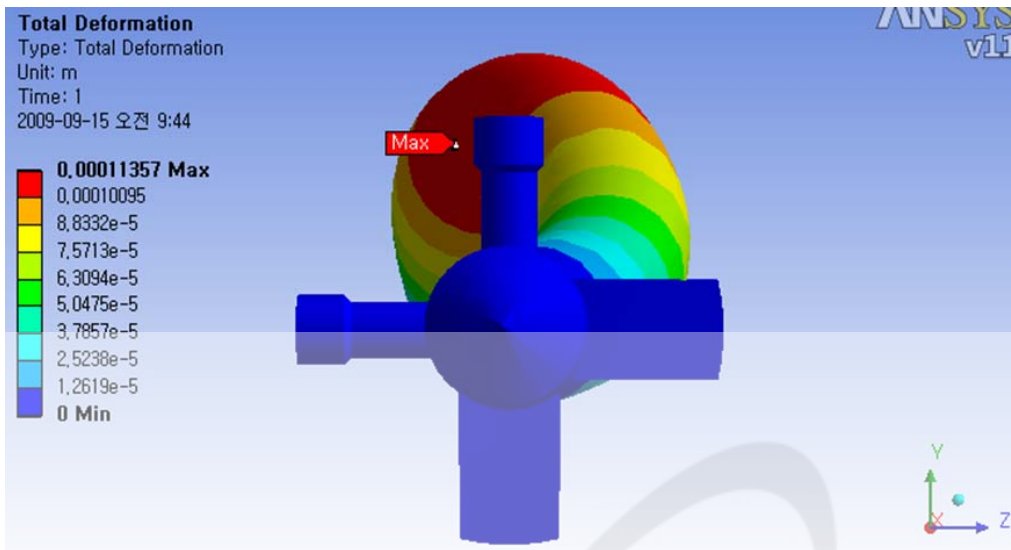
(c) outlet

Figure 6. Y and Z-displacements for actual support analysis model.

최종적으로 유체-구조 연성해석에 의한 변위의 거동을 Fig. 7 에 나타내었다. 중앙에서의 변위거동이 비록 유체의 주 유동성분이 축류임에도 횡방향의 변위가 발생함을 알 수 있다. 최대 변위는 약 0.11357 mm로 나타났으며, 그 궤적은 주로 원형이 아닌 대각선 운동을 하는 것으로 나타났다.



(a) isometric view



(b) front view

Figure 7. Displacement behavior of a rod at $v_i = 5.0$ m/s by FSI analysis.

또한 시험 관 내에서의 시간에 따른 압력성분을 Fig. 8 에 나타내었다. 해석을 천이해석(transient analysis)을 수행하였으므로, 시간의 변화에 따른 유체의 압력성분을 도시하였다. 압력성분은 유체의 난류 유동으로 인해 양과 음의 값으로 섭동하게 되고 이로 인해 관의 진동은 횡 방향으로 진동함을 알 수 있었다. 하지만 시간이 흐를수록 압력 세기(intensity)가 이 작아지며, 관의 출구 측으로 갈수록 압력이 작아지는 현상은 해석시간을 좀 더 길게 하여 좀 더 면밀한 검토가 필요한 것으로 보인다. 유체는 관 하단 부의 원뿔형상에 의해 입구에서 부딪히게 되고 이로 인해 관 입구에서부터 와류(vortex)가 생성되게 된다. 이러한 와류들은 관 구조물의 횡방향 진동을 증폭시키는 것으로 나타났다. 지지부를 단순히 네 개의 덤플로 모델링하여 유체의 입구 부분을 연장한 해석모델의 경우 출구 측에서의 압력 성분이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 모델의 경우에 비해 상당히 작아지나 시간이 지남에 따라 압력의 세기가 감소하는 경향은 실제 지지부로 모델링한 경우와 거의 유사한 것으로 나타났다.

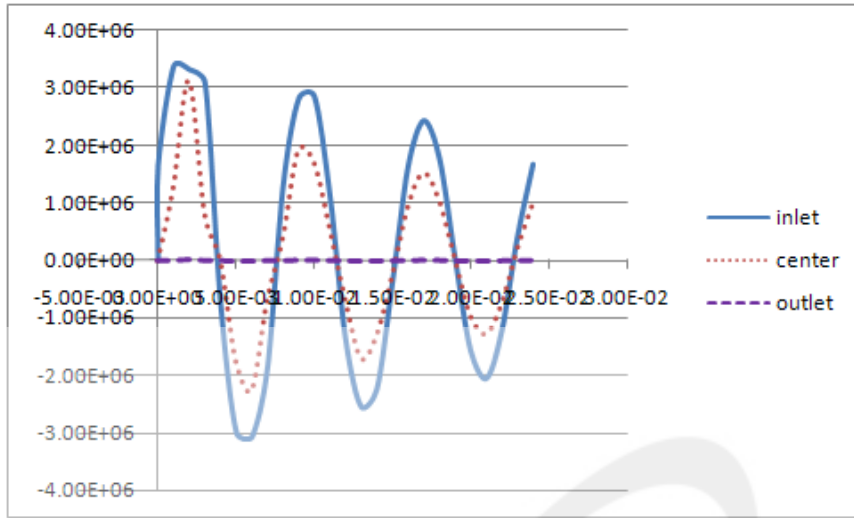


Figure 8. Pressure intensity of the extended model by FSI analysis.

난류모델을 K- ϵ 모델을 사용한 모델의 해석결과를 살펴보면 유동이 관 구조물을 따라 유동할 때 주로 축류 성분이 주류를 이루고 있는 것을 확인하였다. 즉, 이러한 난류모델은 실제 유동유발 진동시험에서 확인하였던 과도한 난류 유동을 모사하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 축 방향 유동이 주류(main stream)를 이루고 있으므로, 관 구조물이 횡 방향의 진폭이 크게 나타나지 않은 것으로 보인다.

유체가 관 외벽에 부딪히어 하류로 흐르는 속도성분을 살펴보면 일정 시간이 경과하고 나면 거의 층류인 것처럼 보인다. 물론 관의 외벽과의 마찰로 인해 속도 성분이 관의 외벽에서의 속도성분이 유체-구조 인터페이스 경계조건이 설정된 시험관 표면에서의 속도성분에 비해 큰 것은 타당해 보인다.

해석결과들을 고찰해 보면 역시 유체의 난류모델을 어떻게 정의하느냐가 유체-구조 연성해석 모델의 신뢰도 제고에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 현재 연구에 사용된 코드는 여러 난류모델들을 제공하고 있지만 해석에 사용된 난류모델들이 노심 내에서의 유체의 유동을 잘 모사하지 못하는 것으로 보인다.

2. 유동유발 진동시험 결과

● 개 요

원자로의 냉각재 유동조건은 3.0 ~ 7.0 m/s이며, 난류유동에 의해 진동을 일으킨다. 구조물과 평행한 방향의 축류에 의한 여기진동은 횡류에 의한 진동에 비해 유동과 구조물과의 상호작용(interaction)에 의한 에너지가 작아 구조물의 불안정을 일으키는 임계유속이 매우 크고, 진동변위도 상대적으로 작은 특성을 갖는다. 이 때문에 축류에 의한 유동유발 진동은 주요 관심영역이 되지 않았다. 하지만, 핵연료의 노심조건과 같이 가혹한 환경 하에서는 구조물의 미소한 진동이라도 프레팅 현상에 의한 손상발생 가능성이 높기 때문에 유동유발 진동에 있어서 관심이 증대되고 있

다.

따라서 이러한 단일 봉 단일 스팬을 갖는 관 구조물의 유동유발 진동 현상을 규명하기 위하여 상온 및 상압의 축 방향 유동유발 진동시험을 수행하였다. 이러한 시험을 통한 결과로는 x 및 y방향에서의 진동변위, 진동 궤적 및 진동특성 등을 측정하여 해석모델의 개발과 타당성 검증에 활용하였다.

시험 부와 전체 센서들의 구성을 Fig. 9 에 나타내었다. 특히 레이저 변위계를 사용하여 변위를 측정할 때 입구 및 출구 지점의 측정은 변위계의 헤드부가 수평면을 기준으로 각도를 갖기 때문에 시험 시 얻은 관의 변위 데이터들을 보정해 주어야 한다.

레이저 변위계는 정면을 기준으로 45° 및 135° 에 설치하였고, 입구, 중앙 및 출구 지점에서 측정하여야 하므로 두 대의 Tripod를 사용하였다.

데이터들의 측정 및 저장을 위해서는 T-DAS 프로그램을 사용하였고, 이를 후처리 프로그램인 MTS Reporter Ver. 10.0을 사용하여 실제 시험 중 관의 궤적을 도출하도록 하였다.



Figure 9. Test setup for flow-induced vibration.

● 시험결과

단일 봉을 사용한 유동유발 진동시험의 유동조건으로 냉각재 온도는 $30 \sim 52^\circ\text{C}$, 루프 내 압력은 $2.0 \sim 8.0 \text{ bar}$, 유속은 $3.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 로 시험을 수행하였다. 시

험결과는 세 지점(입구, 중앙, 출구)에서 x 및 y 방향으로의 변위를 80초간 저장하였고, 이 시간영역에서의 변위 중 최대 변위(peak to peak)를 측정 유속에서의 값을 요약하였다.

원통형 실린더에서 목표 유속 (3.0 ~ 7.0 m/s) 일 때의 측정 데이터들을 Table 2 에 요약하였다.

Table 2. Measuring displacement data at the each position.

(단위 : mm)

목표유속 (m/s)	측정유속 (m/s)	입구압력 (kPa)	inlet		center		outlet	
			x	y	x	y	x	y
3	2.98	50.94	0.402	0.431	0.855	1.01	0.536	0.517
4	3.97	63.33	0.733	0.842	1.386	1.698	0.873	0.917
5	4.96	79.17	1.059	1.240	2.115	2.358	1.301	1.307
6	6.01	99.65	1.649	1.901	3.206	3.214	1.622	1.782
7	6.96	123.47	2.058	2.157	3.882	4.742	2.114	2.474

목표유속을 정하고 이를 유량을 통해 시험조건을 맞춤에 따라 실제 측정유속이 정확히 목표유속이 되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 유량의 증가에 따라 유체의 온도가 급격한 변화는 없었으며, 실제 x 축과 y 축의 변위가 거의 비슷한 것으로 시험 관 및 봉이 유체의 유동조건을 대칭으로 유지함을 확인하였다.

Fig. 10 을 살펴보면, 관의 x 축 변위가 유체의 유속증가에 따라 변위가 거의 선형적으로 증가하였으며, 입구 측과 출구 측의 변위는 거의 유사하였다. 하지만 중앙에서의 변위는 선형적으로 증가하지만 입구 유속이 약 5.0 m/s 보다 큰 유속에서는 상대적으로 크게 증가하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 11 에는 관의 y 축 변위를 나타내었고, x 축 변위와 유사하지만 유속이 6.0 m/s 이상에서 변위가 급격히 증가하는 비선형 거동을 나타내었다. 입구 측과 출구 측의 유동현상이 상당히 유사한 것으로 보아 시험 섹션 내의 유동은 상당히 균일한 유동을 유지한 채로 시험이 수행되었음을 알 수 있다.

이러한 경향은 x 및 y 축 변위가 유사하지만 특히 y 축 변위가 x 축에 비해 상대적으로 크기 때문에 봉의 궤적은 원형에 가까우나 타원에 가까운 원형인 것을 알 수 있었다.

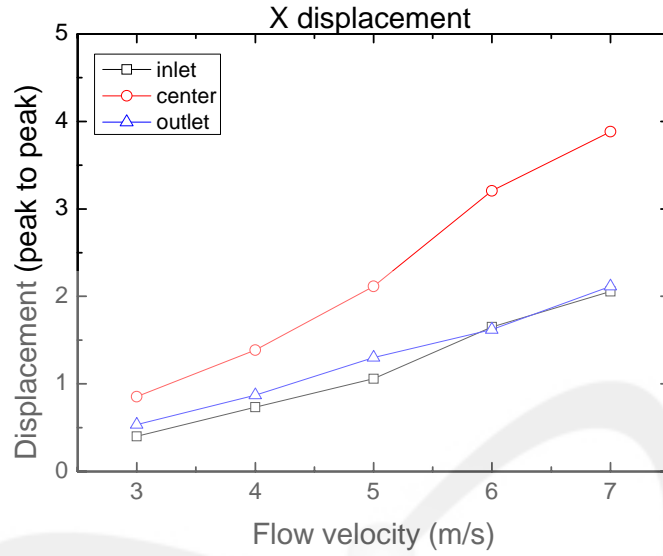


Figure 10. X displacement of a rod as flow velocity at the each position.

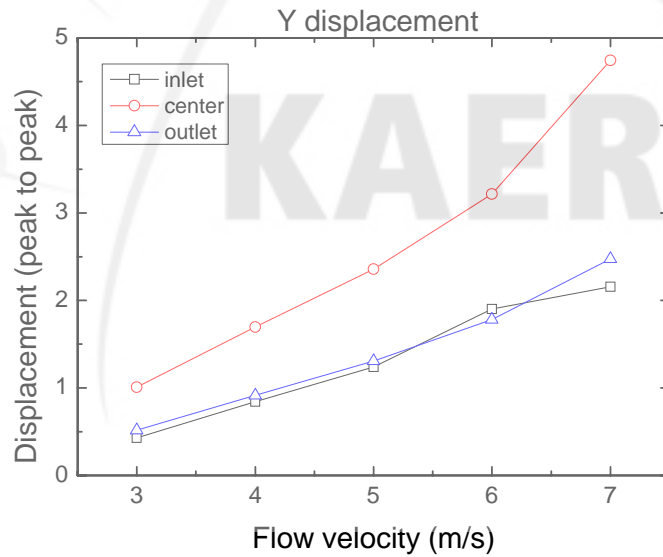


Figure 11. Y displacement of a rod as flow velocity at the each position.

단일 봉의 유속에 따른 변위를 Fig. 12 에 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 봉의 진폭이 커짐을 알 수 있으며, 축 방향 위치의 중앙을 기준으로 거의 축 대칭을 이룸을 알 수 있었다. 이것은 단일 봉이 축류 하에 놓이게 될 때 봉의 유동유발 진동특성 중 변위는 대략적으로 선형거동을 나타냈으며, 유속이 증가함에 따라 급격한 변위증가는 나타내지 않았다.

이러한 거동으로부터 관 구조물의 설계 시 스펠 간격을 결정하는 것이 관의 진동에 매우 중요한 인자이며, 이것이 결국에는 관의 구조적 건전성에 영향을 미쳐 프레팅 마멸 손상을 일으키게 되는 것으로 나타났다.

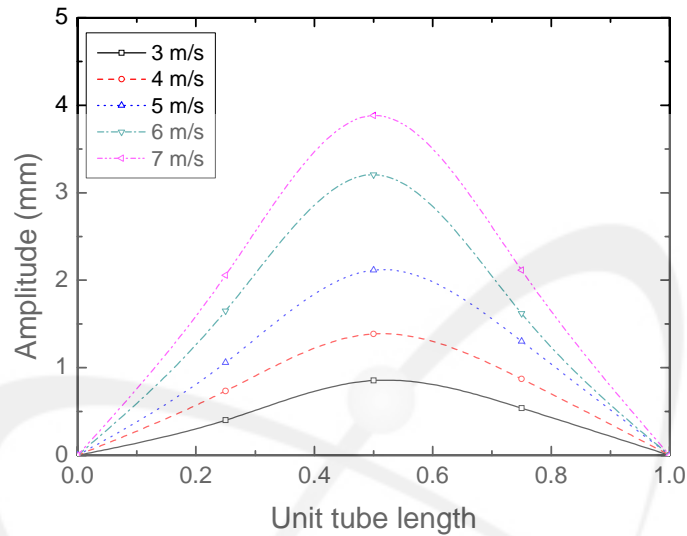


Figure 12. Displacements behavior as the flow velocity at each axial position.

● 결과 및 고찰

단일 봉이 축 방향 유동 하에 놓이게 될 때 봉의 거동을 유체-구조 연성해석 방법을 사용하여 해석하였다. 노심의 유동조건은 레이놀즈수가 큰 난류 유동이며, 이로 인해 유체의 유동이 관 구조물의 횡 방향 진동을 일으키게 한다. 비록 유체의 유동이 축 방향 유동이 주류(main stream)이지만 심한 난류 상태의 유동에서 횡 방향의 압력성분은 관 구조물의 유동유발 진동거동에 큰 영향을 끼침을 파악할 수 있었다.

이러한 유체-구조 연성해석 모델의 타당성 및 신뢰성을 확보하기 위해 원내에서 보유하고 있는 유동유발 진동시험 설비를 사용하여 동일한 대상의 유동유발 진동시험을 수행하였다. 시험은 반복시험을 통해 엄밀한 시험조건을 확인하였으며, 이 시험결과를 토대로 해석모델의 비교/검증을 실시하였다. 현재 코드 내에서 사용할 수 있는 난류모델이 몇 가지 있으나 이러한 난류 모델이 노심 내에서 유체의 난류 거동을 모사하기에는 미흡함을 확인하였다. 노심 내에서의 난류거동을 잘 모사할 수 있는 난류모델의 부재로 인해 정확한 해석모델의 타당성 및 신뢰성을 확보하기는 어려웠다. 또한 난류의 세기도 변화를 주어 다양한 해석을 수행하였으나 이러한 인자의 변화가 시험결과와의 정성적인 유사성은 보였으나 해석모델의 타당성을 검증하기에는 그 절대적인 값에서 차이를 보여 추후 좀 더 고찰 및 해석모델에 대한

연구가 필요함을 알 수 있었다.

아직까지는 해석을 위한 코드가 레이놀즈수가 매우 큰 난류 유동을 잘 모사하지 못하는 것을 알 수 있었으며, 이것은 실제 노심에서 냉각수의 유동이 난류의 세기가 매우 큰 난류 유동임을 고려한다면 해결해야 할 난제가 여전히 존재함을 알 수 있었다.

그럼에도 불구하고 유체-구조 연성해석 모델을 양 방향 연성해석 방법으로 접근했던 것은 큰 의의가 있다고 생각하며, 이러한 연구결과를 토대로 더욱 엄밀하고도 신뢰성이 확보된 유체-구조 연성해석 모델 개발을 진행하여야 함을 확인할 수 있었다.

실제 현장의 많은 문제들은 유체, 구조, 열 등이 단일 영역에 국한한 것은 거의 없다. 많은 대상물이 유체-구조, 유체-구조-열 등의 다양한 연성을 갖는다. 이렇게 유체나 열과 연성된 구조물들은 이러한 매개체에 의해 그 거동이 달라지고 이로 인한 영향을 정확히 파악할 수 있다면 보다 건전성이 제고된 구조물의 설계가 가능해진다. 본 해석모델은 유체에 의한 영향만을 고려하였지만 타당성이 검증되고 이를 실제 산업체에서 마주하게 되는 다양한 문제에 이러한 해석기법을 적용함으로써 시험에 의존하던 많은 부분을 대체할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized, light gray graphic of a satellite or probe orbiting a central point, with two circular nodes on the orbit. Below this graphic, the word "KAERI" is written in a large, bold, sans-serif font, also in light gray.

제 3 장 결 론

관 균 구조물이 유체의 유동 하에 놓인 복잡한 경계조건 하에서 붕의 진동특성을 규명하기 위한 “관 균 구조물의 유체-구조 연성해석 모델개발” 과제를 총 2년의 과제를 수행하였다. 본 연구는 경수로 핵연료집합체 중 핵 연료봉이 냉각수의 유동에 따른 진동특성을 규명하고 이를 통해 보다 기계/구조적 성능이 개선된 핵연료집합체 설계를 위해 시작된 것이다. 특히 본 연구에서 수행 중에 있는 유체-구조 연성해석을 하나의 도메인 내에서 수행함으로써 실질적인 유체-구조의 연성작용을 해석하는 것은 아직까지 연구발표가 없었던 분야이다.

유체-구조의 연성해석 모델을 사용하여 단일 핵연료봉의 진동을 해석하였고, 그 결과는 어떤 난류모델을 적용하느냐에 따라 그 결과가 시험결과와의 차이에 민감한 것으로 나타났다. 현재까지는 모델의 개발과 방법론 개발에 중점을 두고 있으나 2차년도까지 연구가 수행되고 나면 보다 신뢰성이 검증된 유체-구조 연성해석 모델을 정립할 수 있을 것이다. 이러한 연성해석 모델의 개발은 비단 핵 연료봉뿐 아니라 다양한 산업기기 분야에도 그 적용성을 확장하여 현장에서 접하게 되는 복잡한 경계조건을 갖는 구조물의 건전성 제고에 활용될 수 있을 것이다.

하지만 연성해석을 위한 3차원 모델이 비교적 모델의 크기가 크며, 유체와 고체를 동시에 해석하기 위해서는 수렴을 위해 상당히 시간이 많이 소요되는 문제점도 여전히 미해결 과제로 남아 있다.

이러한 하드웨어의 문제는 근래 들어 활용성이 높아지고 있는 병렬연산을 위해 비약적으로 계산 성능이 개선되고 있는 클러스터 컴퓨터를 사용하여 극복할 수 있다. 또한 프로그램의 지속적인 개발 및 개선을 통해 보다 수렴성이 획기적으로 제고하기 위해 다양한 옵션을 제공하고 있는 상용 유동해석 프로그램과 난류해석을 위한 in-house 코드의 접목을 통해 다양한 시도들이 진행 중에 있다.

참고문헌

- [1] Doyle MG, Tavoularis S, Bourgault Y, "Simulation of close-loop flow in a ventricular assist device coupled with a circulatory system model," Third MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier, 1: 972-974 JUNE 2005.
- [2] Tang DL, Yang C, Zheng J, Woodard PK, Sicard GA, Saffitz JE, Yuan C, "3D MRI-based multicomponent FSI models for atherosclerotic plaques," *Annals of Biomedical Engineering*, 32 (7): 947-960 JUL 2004.
- [3] Tang DL, Yang C, Kobayashi S, Ku DN, "Effect of a lipid pool on stress/strain distributions in stenotic arteries: 3-D fluid-structure interactions (FSI) models," *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the ASME*, 126 (3): 363-370 JUN 2004.
- [4] Shangguan WB, Lu ZH, "Modeling of a hydraulic engine mount with fluid-structure interaction finite element analysis," *Journal of Sound and Vibration*, 275 (1-2): 193-221 AUG 6 2004.
- [5] Shangguan WB, Lu ZH, "Experimental study and simulation of a hydraulic engine mount with fully coupled fluid-structure interaction finite element analysis model," *Computers & Structures*, 82 (22): 1751-1771 SEP 2004.
- [6] Chatila J, Tabbara M, "Computational modeling of flow over an ogee spillway," *Computers & Structures*, 82 (22): 1805-1812 SEP 2004.
- [7] Bathe KJ, Zhang H, "Finite element developments for general fluid flows with structural interactions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 60 (1): 213-232 MAY 7 2004.
- [8] Kroyer R, "FSI analysis in supersonic fluid flow," *Computers & Structures*, 81 (8-11): 755-764 MAY 2003.
- [9] Kaazempur-Mofrad MR, Bathe M, Karcher H, Younis HF, Seong HC, Shim EB, Chan RC, Hinton DP, Isasi AG, Upadhyaya A, Powers MJ, Griffith LG, Kamm RD, "Role of simulation in understanding biological systems," *Computers & Structures*, 81 (8-11): 715-726 MAY 2003.
- [10] Zhang H, Zhang XL, Ji SH, Guo YH, Ledezma G, Elabbasi N, deCougny H, "Recent development of fluid-structure interaction capabilities in the ADINA system," *Computers & Structures*, 81 (8-11): 1071-1085 MAY 2003.
- [11] Andersson L, Andersson P, Lundwall J, Sundqvist J, Nilsson K, Veber P, "On the validation and application of fluid-structure interaction analysis of reactor vessel internals at loss of coolants accidents," *Computers & Structures*, 81 (8-11): 469-476 MAY 2003.

- [12] Deserranno D, Popovic ZB, Greenberg NL, Kassemi M, Thomas JD, "Axisymmetric fluid-structure interaction model of the left ventricle," Second MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier, 2: 1669-1672 JUNE 2003.
- [13] Younis HF, Kaazempur-Mofrad MR, Chung C, Chan RC, Kamm RD, "Computational analysis of the effects of exercise on hemodynamics in the carotid bifurcation," Annals of Biomedical Engineering, 31 (8): 995-1006 SEP 2003.
- [14] Sussman T, Sundqvist J, "Fluid-structure interaction analysis with a subsonic potential-based fluid formulation," Computers & Structures, 81 (8-11): 949-962 MAY 2003.
- [15] Kurihara R, "Thermo-fluid analysis of free surface liquid divertor in Tokamak fusion reactor," Fusion Engineering and Design, 61-2: 209-216 NOV 2002.
- [16] Guo YH, Bathe KJ, "A numerical study of a natural convection flow in a cavity," International Journal for Numerical Methods in Fluids, 40 (8): 1045-1057 NOV 20 2002.
- [17] Younis HF, Chung CI, Kamm RD, "Challenges in developing an accurate model for carotid bifurcation blood flow and wall mechanics," First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier, 2: 1434-1439 JUNE 2001.
- [18] Tang DL, Yang C, Huang Y, Ku DN, "Wall stress and strain analysis using a three-dimensional thick-wall model with fluid-structure interactions for blood flow in carotid arteries with stenoses," Computers & Structures, 72 (1-3): 341-356 JUL-AUG 1999.
- [19] Wang, XD, "Analytical and computational approaches for some fluid-structure interaction analyses," Computers & Structures, 72 (1-3): 423-433 JUL-AUG 1999.
- [20] Wang, XD, "Simulation of a deformable ball passing through a step diffuser," Computers & Structures, 72 (1-3): 435-456 JUL-AUG 1999.
- [21] Moore WI, Donovan ES, Powers CR, "Thermal Analysis of automotive lamps using ADINA-F coupled specular radiation and natural convection model," Computers & Structures, 72 (1-3): 17-30 JUL-AUG 1999.
- [22] Wang XD, Feng ZF, Forney LJ, "Computational simulation of turbulent mixing with mass transfer," Computers & Structures, 70 (4): 447-465 FEB 1999.
- [23] Andersson L, Andersson P, "Some experiences in the use of ADINA in the

- Swedish nuclear industry," *Computers & Structures*, 64 (5-6): 893-907 SEP 1997.
- [24] Yoon KH, "Control rod drop analysis by finite element method using fluid-structure interaction for a pressurized water reactor power plant", *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 239, pp 1857-1861, Sep. 2009.
- [25] 윤경호 외 4인, "FSI해석에 의한 축 방향 유동에서 단일 봉의 유동유발진동", 한국압력기기공학회 연차학술대회 논문, 2008.
- [26] Yoon KH et. al., "Dynamic behavior analysis of a cylindrical rod bundle structure by considering a fluid-structure interaction", *International conference on computational structure & technology*, 2008.
- [27] 윤경호 외 4인, 연구보고서, "관 군 구조물의 유체-구조 연성해석 모델개발", KAERI/RR-3020/2009, 2009.



KAERI

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/RR-3074/2009					
제목 / 부제		관 군 구조물의 유체-구조 연성해석 모델개발			
연구책임자 및 부서명		윤경호 (선진핵연료기술개발부)			
연구자 및 부서명		김재용 (선진핵연료기술개발부)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010
페이지	32 p.	도표	있음(<input checked="" type="checkbox"/>), 없음(<input type="checkbox"/>)	크기	27 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(<input checked="" type="checkbox"/>), 대외비(<input type="checkbox"/>), _ 급비밀		보고서종류	연구보고서	
연구위탁기관				계약 번호	
초록 (15-20줄내외)		<p>보일러 또는 열교환기 내의 관 군과 같은 구조물들은 유체-구조, 열-구조 그리고 유체-열-구조가 연성된 경계조건 하에 놓이게 된다. 이러한 복합적인 경계조건 하에서 구조물의 거동을 평가하기 위해서는 각 해석영역을 독립적으로 나누고, 선행 조건을 해석한 결과를 다른 해석영역의 입력조건으로 적용하여 그 거동을 평가하여왔다. 하지만 유체-구조 연성의 경우 유체의 작용력은 구조물의 거동에 영향을 미치고, 또 구조물의 거동이 다시 유체의 거동에 영향을 미치는 상호작용에 의한 영향을 반드시 평가하여야 한다. 이를 유체와 구조물을 별도로 해석모델을 작성하고 연성 경계조건을 설정하여 하나의 도메인 내에서 동시에 해석을 수행하는 해석모델을 정립하고자 하였다.</p> <p>해석결과는 실제 경계조건을 모사할 수 있는 시험시설에서 시험을 수행하여 모델의 타당성을 검증하고자 하였다. 유동유발 진동시험은 단일 봉으로 수행하였고, x 및 y축 진동변위를 동시에 측정할 수 있도록 레이저 진동 변위계를 사용하였고, 냉각수는 상온의 물을 사용하였다. 해석결과가 시험결과와 비교하여 아주 엄밀한 결과를 얻을 수는 없었으나 그 경향은 상당히 유사함을 알 수 있었다.</p> <p>유체-구조 연성해석의 경우 난류모델이 해석결과의 신뢰도에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며, 이러한 난류모델은 좀 더 면밀한 연구가 필요할 것으로 관찰되었다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)		유체-구조 연성, 열교환기, 난류모델, 진동변위, 유동유발 진동, 핵연료봉, 노심 유동조건, 프레팅 마멸, 손상, 연성해석			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-3074/2009			
Title / Subtitle	Development of the tube bundle structure for fluid-structure interaction analysis model		
Project Manager and Department	Yoon, Kyung-ho (Advanced Nuclear Fuel Division)		
Researcher and Department	Kim, Jaeyong (Advanced Nuclear Fuel Division)		
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
Page	32 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input checked="" type="checkbox"/>), No (<input type="checkbox"/>)
Publication Date			2010
Size			27 Cm.
Note			
Classified	Open(<input checked="" type="checkbox"/>), Restricted(<input type="checkbox"/>), ___ Class Document	Report Type	Research Report
Sponsoring Org.			Contract No.
Abstract (15-20 Lines)	<p>Tube bundle structures within a Boiler or heat exchanger are laid the fluid-structure, thermal-structure and fluid-thermal-structure coupled boundary condition. In these complicated boundary conditions, Fluid-structure interaction (FSI) occurs when fluid flow causes deformation of the structure. This deformation, in turn, changes the boundary conditions for the fluid flow. The structural analysis have been executed as follows. First of all, divide the fluid and structural analysis discipline, and then independently analyzed each other. However, the fluid dynamic force effect the behavior of the structure, and the vibration amplitude of the structure to fluid. FSI analysis model was separately created fluid and structure model, and then defined the fsi boundary condition, and simultaneously analyzed in one domain.</p> <p>The analysis results were compared with those of the experimental method for validating the analysis model. Flow-induced vibration test was executed with single rod configuration. The vibration amplitudes of a fuel rod were measured by the laser vibro-meter system in x and y-direction. The analyses results were not closely with the test data, but the trend was very similar with the test result.</p> <p>In fsi coupled analysis case, the turbulent model was very important with the reliability of the accuracy of the analysis model. Therefore, the analysis model will be needed to further study.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	Fluid-structure coupling, Heat exchanger, Turbulence model, Vibration amplitude, Flow induced vibration, Fuel rod, Flow condition, Fretting wear, Failure, Coupling analysis		