

# FSI 기법을 이용한 유연관의 해석에서 Mooney-Rivlin 물성방정식의 활용에 관한 연구

## A Study using FSI Method on the effect of Modified Mooney-Rivlin Model in Elastic Pipe Flow Characteristics

\*성문현<sup>1</sup>, 김승욱<sup>2</sup>, 조성욱<sup>2</sup>

\*M. H. Seong<sup>1</sup>, S. W. Kim<sup>2</sup>, S. W. Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>중앙대학교 기계공학부, <sup>2</sup>중앙대학교 기계공학부

Key words : Flexible Pipe, Modified Mooney-Rivlin, Hyper-Elastic, Fluid-Structural Interaction

### 1. 서론

일반적으로 고무재료의 거동은 비선형, 비압축성, 대변형의 특성을 지니고 있으며 그 양상이 고무의 성분에 따라 큰 차이를 나타내고 있어 유연관(Flexible Pipe)과 같은 재료의 유한요소해석을 위해서는 재료와 동일한 배합조건을 갖는 시편의 물성 데이터를 얻는 것이 필수적이다. 또한 인장, 단축 압축 및 순수전단 물성시험으로 얻어진 응력-변형률 관계를 적절하게 표현할 수 있는 변형률 에너지 함수(Strain Energy function)를 찾는 일이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 고탄성 데이터 값을 이용하여 고탄성 모델이 유연관에 미치는 영향에 대해서 알아보고 대변형이 일어나는 비선형 유연관 구조물에 유체-구조물 상호작용 기법(FSI)을 적용하기 위해 최적화된 변형된 Mooney-Rivlin 모델을 User Subroutine 을 이용하여 구현하였다.

### 2. 고탄성 이론

고탄성 재료는 고무나 폴리머를 이용한 모델에 사용된다. 특히 Mooney-Rivlin 모델은 비압축성 재료에 적합하며 고무재료는 변형률이 작은 영역 내에서 전단 계수는  $a_{10}+a_{01}$  값에 2 배, 탄성계수는 6 배로 알려져 있다. Possion's Ratio 값은 비압축성의 경우 0.45 에서 0.499 까지 사용하며 본 연구에서는 수치해석의 수렴성을 고려하여 0.475 를 사용하였다. 고무는 거동이 변형률 에너지 함수(Strain Energy Function)로 표현되는데 이런

$$W = a_{10}(I_1 - 3) + a_{01}(I_2 - 3) + a_{20}(I_1 - 3)^2 + a_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + a_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

Table 1 Modified Mooney-Rivlin Coefficient

Coefficient	Signiorini	James Green Simpson
$a_{10}$	-734.625kPa	-499.666kPa
$a_{01}$	941.074kPa	552.018kPa
$a_{20}$	3468.790kPa	-460.294kPa
$a_{11}$	0	645.681kPa
$a_{30}$	0	399.228kPa
Absolute Error	0.836	2.980

이러한 고무의 거동 특성화를 위해 다양한 형태의 변형률 에너지 함수가 보고되고 있다. 본 연구에서는 고차 전개를 가지는 Jame-Green-Simpson 모델을 적용하였고 다음과 같이 정의된다. 여기서  $a_{10}$ ,  $a_{01}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{30}$  은 재료상수이고  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  은 Cauchy-Green 변형텐서의 주 불변량을 나타낸다.

### 3. 해석방법 및 수치모델

본 연구에서는 상용 해석 프로그램인 ANSYS 와 ANSYS CFX 를 이용하여 순차적 양방향 유체-구조물 상호작용 기법(FSI)을 사용하였으며 수치해석의 수렴성을 고려해 총 2 주기(2s) 시간에 대해 수치해석을 수행하였다. 유연관 모델생성의 경우 정상 유연관과 비정상 유연관으로 구분한다. 정상 유연관의 경우 Fig. 1 과 같이 대칭형 파이프를 모사하였고 길이 160mm, 직경, 8mm, 두께, 0.8mm 로 선정하였다.

비정상 유연관의 경우 Young 의 모델을 이용하여 Fig. 2 와 같이 협착부를 2.8mm 로 선정, 격자 모델을 생성하였다. 유연관 내부의 유체 모델은 유동특성을 표현하기 위하여 뉴턴점성과 맥동성 유동을 적용하였고 경계조건으로 점성계수 0.0035 kg/m·s, 유체밀도 1050 kg/m<sup>3</sup>을 사용하였다. 유연관 입구의 속도는 Fig. 3 의 속도 프로파일을 적용하였다.

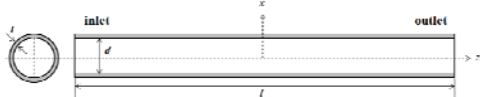


Figure 1 정상 유연관 모델

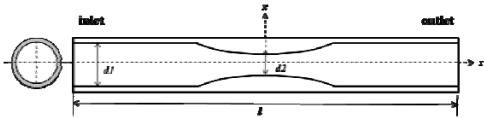


Figure 2 비정상 유연관 모델

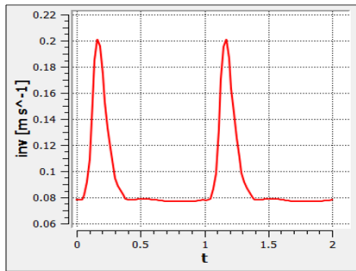


Figure 3 유연관 입구 속도 프로파일

#### 4. 결과 및 고찰

정상 및 비정상 유연관에 변형된 Mooney-Rivlin 모델을 적용한 경우와 Mooney-Rivlin 상수를 이용하여 탄성계수를 계산한 경우에 대해 FSI 해석을 수행하여 비교분석 하였다. Fig. 4 는 정상 유연관의 입구에 적용된 총 2 주기 시간에 대해 최대 속도가 발행하는 1.2s 구간에서의 유연관 벽의 움직임을 나타낸 것이며 최대 움직임은 중심부에서 각각 0.046mm, 0.045mm 가 발생하였다. 비정상 유연관의 경우는 Fig. 5 와 같이 유연관 중심부의 협착부를 통과한 이후에 각각 0.094mm, 0.155mm 의 최대 변위가 발생한 것으로 나타났다.



Figure 4 정상 유연관 벽의 Displacement



Figure 5 비정상 유연관 벽의 Displacement

Table 2 각 모델의 변위 비교

Pipe Model		Third Order	
정상	탄성 모델	0.046mm	2%
	고탄성 모델	0.045mm	
비정상	탄성 모델	0.094mm	64%
	고탄성 모델	0.155mm	

#### 5. 결론

본 연구에서는 비선형 재료 물성을 고려한 유체-구조물 상호작용 기법(FSI)을 이용하여 유연관의 형상에 따른 수치해석을 수행하였다. 정상 유연관에서 Mooney-Rivlin 변형 모델의 재료 물성을 사용한 경우 탄성 모델을 사용한 정상 유연관의 변위와 비교 분석한 결과 차이점이 미미하였다. 하지만 비정상 유연관에서는 비선형 물성방정식을 사용한 고탄성 모델의 유연관 벽에서 약 64%의 더 큰 움직임을 나타내어 고탄성 모델이 비선형 유연관에 더 적합한 재료 물성인 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- Xiao-Yan Gong and Riyad Moe, 1999 "On Stress Analysis for a Hyperelastic Material"
- S.Daly, P.J.Prendergast, F. Dolan, T. C. Lee, 2000 "Use of Finite Element Analysis to Simulate The Hyperelastic Behavior of Cardiovascular Tissue"
- Jorge Octavio Virues Delgado, 2001, "Mechanical Properties of Arterial Wall"