



유체유동의 영향을 받는 구조물의 동특성에 대한 연구동향

손인수*, 안성진

(동의대학교 기계공학과/대한상공회의소 부산인력개발원)

1. 머리말

비보존력을 받는 계의 동적 안정성에 관한 문제는 기계, 항공, 건축 및 토목공학 등의 여러 분야에서 현재까지 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 이러한 비보존력의 대표적인 예는 유체유동에 의하여 발생하는 파이프 시스템의 중동력을 들 수 있다. 가장 일반적으로 접할 수 있는 유체유동을 갖는 구조물은 송유관으로 파이프 속을 흐르는 유체에 의하여 파이프에 진동을 유발하기도 하며, 유체의 속도가 어떤 임계값에 도달하면 파이프 진동이 불안정하게 되어 파이프가 좌굴되기도 한다. 점성이 작은 유체의 분사력은 파이프의 끝단에 작용하는 집중중동력으로 관계하며, 점성이 큰 유체는 파이프의 내면에 작용하는 등분포접선중동력을 일으킨다. 이러한 중동력들은 비보존력으로서 파이프 시스템의 진동 및 안정성 해석에 중요한 영향을 미친다.

일반적으로 유체유동을 갖는 구조물의 동특성 해석은 파이프 구조물에 국한되었으며 특히, 구조물 내부의 유체유동에 의한 동특성 해석이 대부분이었다. 또한 이러한 연구들은 이론적으로는 다양한 형태의 설계변수에 대한 시스템의 동적 특성을 연구하였으나 실험적으로 증명하기에는 중동력의 구현이 쉽지 않아 실험적 결과가 병

행된 연구결과는 그리 많지 않은 실정이다. 유체유동을 갖는 구조물의 동적특성 해석은 크게 유체유동에 의한 고유진동수 변화와 시스템의 안정성 해석에 기반을 두고 있다.

최근 일본 후쿠시마 원전사고를 통해 대두되고 있는 원자로 내부 구조물의 진동시험에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이며, 원자로 내부에 포함된 여러 형태의 파이프 구조물에 대한 진동특성 해석 및 내진해석은 매우 중요한 연구분야라고 할 수 있다.

따라서 이 글에서는 유체유동을 갖는 기본적인 파이프 구조물의 진동특성 해석 결과에 대하여 간단히 정리하고 앞으로 필요한 연구동향에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 유체유동 파이프의 해석

먼저 유체유동을 갖는 파이프 시스템의 운동방정식을 살펴보면 다음과 같다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + MU^2 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + 2MU \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x \partial t} + (m + M) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, EI , U 는 파이프 탄성계수와 유속을 나

* E-mail : isson92@deu.ac.kr / (051) 890-2239

타내며, M 과 m 은 각각 유체 및 파이프의 단위 길이당 질량이다. 식 (1)에서 일반적으로 고려하는 설계변수는 유체의 속도와 유체 및 파이프의 질량 비 ($\beta = \frac{M}{M+m}$)이다. 먼저 유속 및 질량 비의 영향에 의하여 그림 1과 같이 시스템의 안정 및 불안정 형태를 판단할 수 있다. 일반적으로 유체유동 파이프의 불안정 형태는 플러터(flutter) 및 좌굴(divergence) 불안정으로 나눌 수 있다.

이러한 불안정 형태는 유체의 속도 즉, 유속이 증가하면서 나타나는 현상이며 불안정을 일으키는 때의 유속을 임계유속(critical fluid velocity)이라 한다. 그림 1에서 확인할 수 있는 것처럼 플러터 불안정 형태는 임의의 기준 위치를 중심으로 커졌다 작아졌다를 반복하면서 시간의 흐름에 따라 변위가 지속적으로 커지는 현상이며, 좌굴 불안정 형태는 임의의 한 방향으로 시간에 비례하여 변위가 증가하는 현상이라 할 수 있다.

식 (1)의 운동방정식에 추가할 수 있는 항은 파이프 구조물에 밸브 등을 수학적으로 형상화 한 부가질량(attached mass)과 끝단질량(tip mass), 그리고 파이프 시스템의 지지 강성(spring support) 등이다. 또한 운동방정식의 경계조건에 의해 단순지지, 고정, 외팔 파이프 등으로 서로 다른 연구 결과들을 얻을 수 있다.

그림 2는 경계조건 및 고려 설계변수에 따른 파

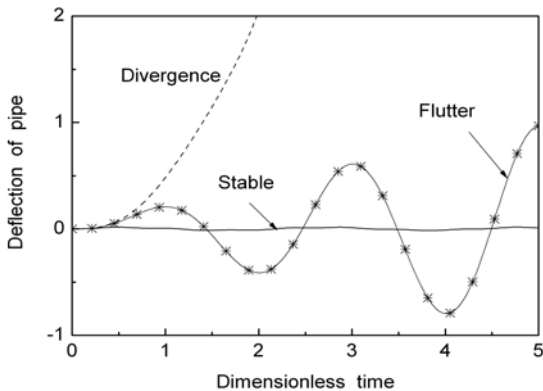
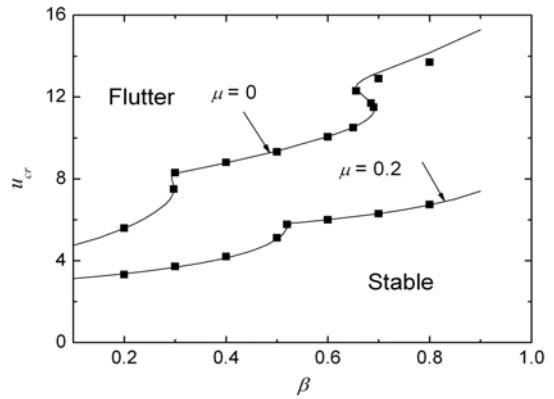
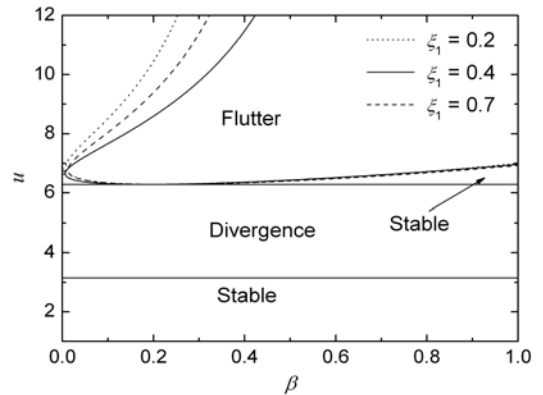


그림 1 파이프 시스템의 안정 및 불안정

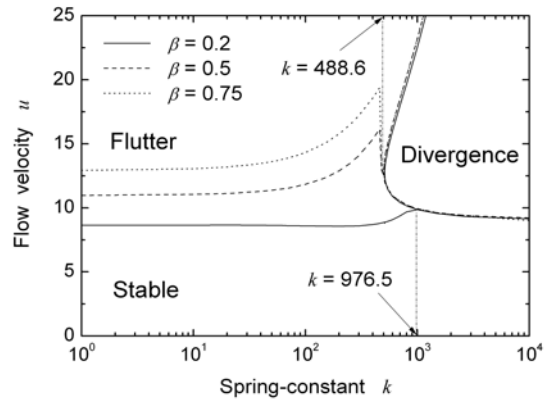
이프 시스템의 안정 및 불안정 형태를 무차원 유속과 질량비에 따라 도시한 것이다. 그림 2(a)는



(a) 유체유동 외팔 파이프



(b) 유체유동 단순지지 파이프



(c) 탄성지지를 가진 유체유동 외팔 파이프

그림 2 경계조건에 따른 시스템의 불안정

유체유동 외팔 파이프의 결과로서 불안정 형태는 오직 플러터 불안정만이 일어난다. 하지만, 그림 2(b)의 단순지지 파이프의 경우에는 좌굴 및 플러터 불안정 현상이 공존하고 있음을 알 수 있다. 특히 단순지지 파이프에서는 질량비가 커짐에 따라 재안정화(re-stable) 영역이 존재한다는 특징을 갖는다. 특히, 그림 2(c)의 외팔 파이프이면서 탄성지지를 갖는 경우에는 지지강성의 크기에 의하여 플러터 불안정 이외에 유속의 증가에 따라 시스템은 좌굴 불안정의 형태도 가진다는 것을 알 수 있다. 그림 2에서 μ , ζ 그리고 k 는 각각 무차원 끝단질량, 부가질량의 위치 그리고 지지 스프링의 강성을 나타낸다.

최근, 식 (1)의 운동방정식에 회전요소 및 크랙과 같은 결함이 존재하는 파이프 시스템에 대한 연구들도 진행되어지고 있다. 회전요소가 포함된 시스템의 경우에는 유속과 시스템의 회전 속도간의 연성관계에 의하여 전체 시스템의 안정성 변화에 큰 영향을 미치기 때문에 이들 두 속도 사이의 관계를 파악하는 것은 중요한 문제이다. 그림 3은 회전속도와 유속에 의한 파이프 시스템의 안정성을 해석한 결과이다. 세로축은 시스템의 무차원 회전속도를 나타낸다. 이 결과에서 회전요소를 갖는 파이프 시스템에서는 좌굴 불안정 현상은 나타나지 않으며 회전속도가 증가할수록 불안정을 일으키는 임계유속의 크기가 증

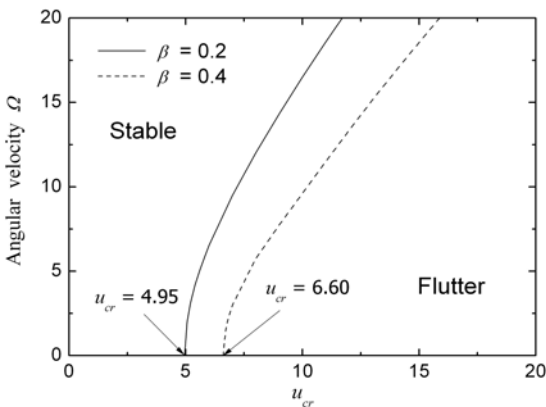


그림 3 회전하는 유체유동 파이프의 안정성

가하는 현상을 보인다. 크랙이 존재하는 경우 유체유동을 갖는 파이프 시스템에 대해서는 다음장에서 자세히 설명하도록 하겠다.

3. 유체유동 파이프 시스템의 해석 예제

그림 4는 실제 유체유동 파이프 시스템의 이론 해석을 위한 수학적 모델을 나타낸 것이다. 2장에서 언급한 부가질량 및 탄성지지 그리고, 크랙과 같은 결함이 존재하는 밸브-파이프 시스템을 나타낸다. 일반적으로 크랙의 존재는 시스템의 강성을 저하시키기 때문에 크랙의 크기가 커질수록 안정성에 미치는 영향은 더 커진다. 그림 4와 같은 시스템의 동특성 및 안정성에 미치는 변수들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 부가질량의 크기 및 위치: m_v, x_v
- (2) 탄성지지의 크기 및 위치: K, x_k
- (3) 유체의 속도 및 질량비: U, β
- (4) 크랙의 크기 및 위치: a_c, x_c

하지만 이들 변수에 대한 연성관계를 모두 해석하는 것은 매우 복잡한 형태가 된다. 따라서 이러한 시스템의 해석을 위해 몇 가지 변수들은 고정하고 몇몇 관심 변수의 변화를 통하여 시스템의 고유진동수 및 안정성을 파악하는 것이 일반적인 해석방법이다.

그림 5는 위에서 나열한 전체 변수에서 부가질

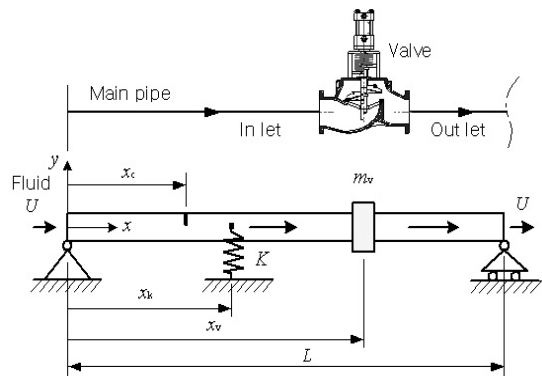
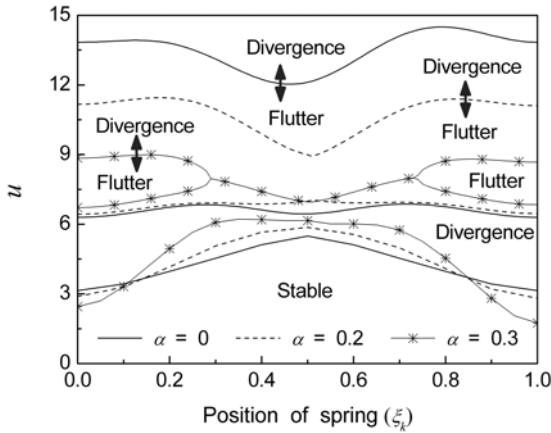
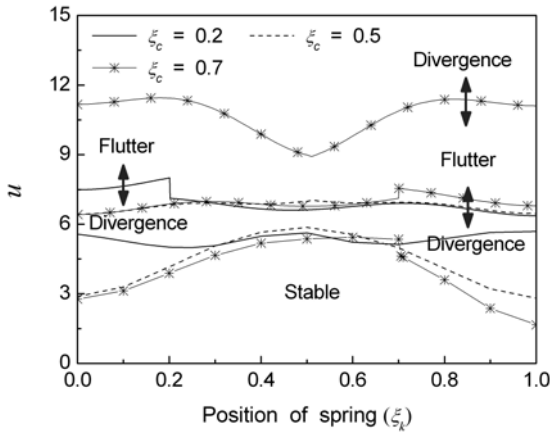


그림 4 크랙을 갖는 밸브-파이프 시스템



(a) 크랙 크기에 의한 영향

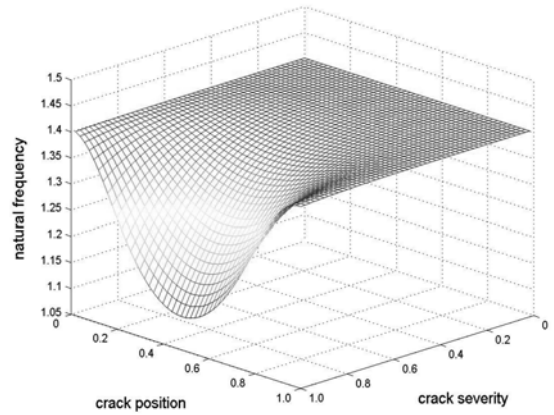


(b) 크랙 위치에 의한 영향

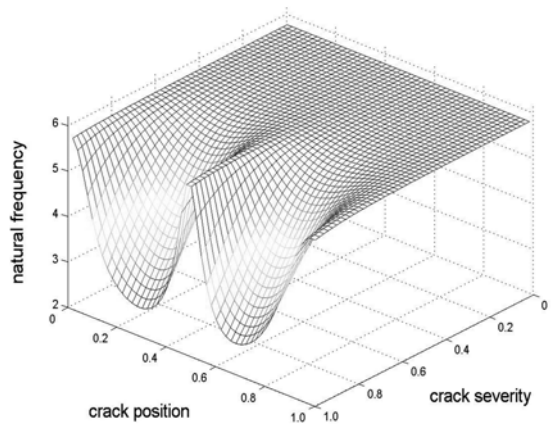
그림 5 크랙을 갖는 밸브-파이프 시스템의 안정성

량의 크기와 위치, 탄성지의 크기, 그리고 질량비를 일정 값으로 고정하고 유속, 크랙의 크기 및 위치, 그리고 탄성지의 위치에 따른 시스템의 안정성을 해석한 결과를 보여준다. 여기서 α 와 ξ_c 는 각각 무차원 크랙의 크기 및 위치를 의미한다. 그림 5(a)에서는 크랙의 크기와 스프링의 지지 위치에 따른 시스템의 임계유속 및 불안정 상태를 확인 할 수 있다. 만약, 크랙의 위치 변화에 따른 시스템의 안정성을 판단하기 위해서는 그림 5(b)와 같이 크랙의 크기 또는 스프링의 지지 위치를 고정하는 방법을 선택하여야 한다.

그림 6은 8개의 변수에서 (1)~(3)의 변수들을 고



(a) 1차 모드



(b) 2차 모드

그림 6 크랙의 영향에 의한 시스템의 고유진동수 변화

정하고 (4)의 변수인 크랙의 크기와 위치에 따른 시스템의 횡진동에 대한 1, 2차 고유진동수 변화를 도식한 결과이다. 이처럼 많은 변수들을 가지고 있는 유체유동 파이프 시스템에서 설계자 혹은 연구자의 목적에 따라 3차원 형태의 결과들을 도출할 수도 있다. 이 또한 고정되어지는 변수들이 존재하기 때문에 전체 변수들의 연성관계를 한꺼번에 표현하는 것은 쉽지 않다. 하지만 이러한 방법들을 이용하여 필요한 변수에 대한 시스템의 동적특성을 충분히 얻을 수 있으며 연구자의 목적에 맞게 결과를 정리하여 활용할 수 있다고 판단된다.

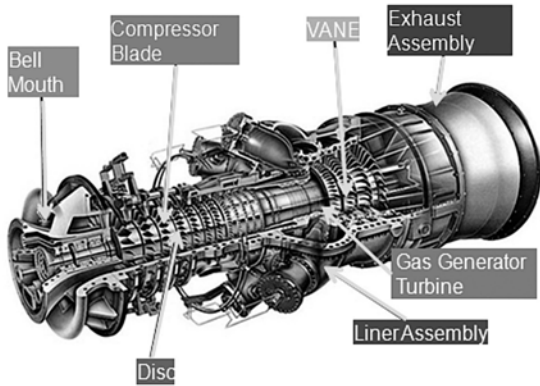


그림 7 가스 터빈

4. 맺음말

이 글에서는 유체유동을 갖는 구조물 즉, 유체 유동 파이프 시스템의 동적특성에 대한 여러 가지 일반적인 결과들을 언급하였다. 특히 기본 운동방정식으로부터 추가할 수 있는 부가질량, 끝단질량, 탄성지지 및 회전요소들이 시스템의 진동특성에 미치는 영향에 대한 연구결과에 대하여 간단히 소개하였다. 특히 최근 연구되어지고 있는 크랙과 같은 결함이 존재하는 유체유동 파

이프 시스템의 해석 예제를 이용하여 진동특성 즉, 시스템의 안정성 및 고유진동수 변화에 대한 결과들을 살펴보았다.

머리말에서 언급한 바와 같이 현재 연구되어져야 할 부분들은 이상에서 설명한 내용보다는 그림 7의 가스터빈과 같이 구조물 외부에 유체가 작용하는 경우 그 구조물의 동적특성을 파악하는 것이라고 할 수 있다. 특히, 구조물과 유체(물)의 상호작용으로 인하여 그 진동특성이 변하기 때문에 원자로 내부 구조물의 동적특성을 파악하는 것은 매우 중요한 연구내용이라 할 수 있다. 원자로 내부는 물로 채워져 있기 때문에 원자로 내부 구조물과 유체유동에 의한 상호 작용에 의하여 변화하는 진동특성을 해석하기 위한 해석 모델 개발 및 방법에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

또한 원자로 등의 특수 부분에 사용되어지는 파이프 시스템은 다양한 복합재료로 제작되어지고 있기 때문에 복합재료의 기계적 특성과 사용 환경에 대한 변수들을 고려하여 유체유동에 대한 구조물의 동적특성을 파악하는 것이 중요하다. **KSNVE**