

오리피스 유동해석에 근거한 배관 감육 특성 분석

Characteristics of Wall-thinned Pipe based on CFD Analysis of Orifice

*장혁수¹, 이상민¹, 장윤석¹, 최재봉¹, #김영진¹, 이준성²

*H. S. Chang¹, S. M. Lee¹, Y. S. Chang¹, J. B. Choi¹, #Y. J. Kim(yjkim50@skku.edu)¹, J. S. Lee²

¹ 성균관대학교 기계공학부, ² 경기대학교 기계시스템디자인공학부

Key words : CFD Analysis, Flow Accelerated Corrosion, Maximum Shear Stress, Orifice, Wall-thinned Pipe

1. 서론

최근 급격히 상승하는 에너지 수요를 충족시키기 위하여 공급을 담당하는 각종 화력·원자력 발전소와 석유·가스 플랜트에 대한 안정적인 운용이 요구되고 있다. 따라서 예측하지 못한 기기 손상으로 인한 발전소의 가동 중단을 미연에 방지하고 대처하기 위한 기술이 중요시 되고 있다. 발전소의 가동을 저해하는 요인 중 배관 시스템에 일어날 수 있는 것이 침식부식(erosion corrosion) 또는 유동가속부식(flow accelerated corrosion)이다. 이 현상은 환경적 요인으로서 배관의 두께가 얇아지는 감육현상을 일으키며 구조물의 건전성을 저하시키고 잠재적인 사고발생 확률을 높이는 주요 원인으로 인식되고 있다. 특히 1986년 미국 Surry 2호기와 일본의 Mihama 3호기의 2차계통 탄소강 배관에서 발생한 대형 파단사고(Fig. 1 참조)는 감육에 의해 발생한 대표적인 사례로서 많은 경제적 손실과 인명 피해를 야기시켰다[1,2].

일반적으로 유동가속부식에 의하여 발생하는 감육현상은 유체와 접촉하는 구조물 내부에 발생하게 되어 손상에 따른 예비정후가 거의 나타나지 않기 때문에 육안으로 감육부를 식별하는 것은 매우 어렵다[3]. 특히 원자력 발전소의 경우 복잡한 배관계통을 가지고 있기 때문에 전체 구조물의 감육 발생과 진행 여부를 판단하는 것은 상당히 어려운 작업이다. 따라서 감육 구조물에 대한 건전성평가에 관한 연구는 1980년대부터 활발히 진행되어 왔으며 국외의 대표적인 연구로서 미국 전력연구소[4]가 유동가속부식에 대한 전반적인 연구를 수행하여 원자력 발전소의 운전 조건, 배관 형상 및 재질로부터 감육률을 예측할 수 있는 평가식과 CHECWORKS 프로그램을 개발한 바 있다.

최근 국내에서도 유동가속부식 등에 기인한 감육 배관의 구조 건전성 평가를 위해 다수의 연구가 수행된 바 있다. 이상민 등[5]은 감육현상을 고려한 가스 배관의 파손확률을 평가하였고, 송기훈 등[6]은 유체유동에 의한 감육 배관의 국부응력 변화를 평가하였으며, 장윤석 등[7]은 유체-구조 상호작용을 고려한 감육 배관 해석을 수행한 바 있다. 이러한 기초적 선행연구는 주로 직관 또는 엘보우와 같이 기하학적 형상변화가 적은 배관에 존재하는 이상화된 감육 결함을 평가 대상으로 다루고 있으나, 실험결과와의 비교를 통해 평가의 타당성을 입증한 바 있다.

한편 유동가속부식은 직관 및 엘보우 뿐만 아니라 T-분기관과 오리피스에서도 자주 발생한다. 특히, 유량조절 및 압력측정 등에 사용되는 오리피스는 보통 원형의 모양을 하고 있으며, 오리피스 삽입부 직후에서 유속이 변화하여 압력이 강해진다. 오리피스의 바로 전과 후에서의 유체의 압력차를 검출함으로써 유량을 구할 수 있으며, 이를 계측하여 배관 내부에 흐르는 유량을 조절한다. 그러나 오리피스 삽입부 전후에서의 유속변화에 따라

배관 벽면에 난류에너지가 증가하게 되어 결과적으로 표면 전단응력이 증가하게 된다. 이는 감육발생의 주요한 원인으로서 벽두께 감소에 따른 파손사고를 미연에 방지하기 위하여 정확한 감육발생 위치를 결정하고, 가동중검사시 집중적인 관리를 시행할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 오리피스의 유동특성과 형상변화를 고려하여 배관의 감육 위치를 평가하는 것이다. 이를 위하여 오리피스 직관의 유동해석을 수행하였으며, 유체의 유동이 오리피스를 지났을 때의 특성과 유동에 따른 배관 벽면에 미치는 전단응력을 확인하였다.

2. 유동 해석 조건

유동 해석을 위한 오리피스 직관은 일본 Mihama 원자력발전소 3호기의 복수계통에 설치된 것을 해석 대상으로 선정하였다. 배관은 외경 558.8 mm, 공칭두께 10 mm, 오리피스 직경 335.6 mm의 형상을 가지며 해석변수로는 배관 내부에 흐르는 유속과 오리피스 직경비를 고려하였으며, 이는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Analysis matrix of a straight pipe with an orifice for CFD

D_i (mm)	t (mm)	d_i/D_i	V (m/s)
539	10	0.40	5
		0.623	10
		0.80	20

전산유체역학해석을 위하여 상용 CAD 프로그램인 Autodesk Inventor Ver 9.0을 이용하여 오리피스 직관을 모델링하였다. 또한 유체유동에 의한 배관 내벽의 표면 전단응력을 계산하기 위하여 범용 유동해석 프로그램인 Fluent 6.2[8]를 사용하였다. 초기경계 조건으로는 유체가 유입되는 입구에 유속을 입력할 수 있는 velocity-inlet 조건을 사용하고 유체의 출구에는 출구 압력을 입력할 수 있는 pressure-outlet 조건을 적용하였다. 유체의 점성으로 인한 배관의 벽면과 유체 마찰은 no-slip 마찰조건을 이용하여 고려하였다. 유체 유동은 정상상태(Steady-state), 비압축성 난류 유동($k-\epsilon$ Turbulence Model)을 가정하였다. 유동해석에 이용된 요소망 생성은 Gambit[9]을 이용하였으며 육면체 체적요소(hexahedral volume mesh)를 사용하였다. 사용된 총 요소수는 12,146개이다. 내부에 흐르는 유체는 밀도 982 kg/m³와 점성 0.001003 kg/m·s를 갖는 물을 가정하였다. 이 모델은 Fig. 2에 나타내었다.



(a) The failure accident at Mihama (b) Wall-thinning pipe due to flow accelerated corrosion

Fig. 1 Example of flow accelerated corrosion(FAC)[1,2]

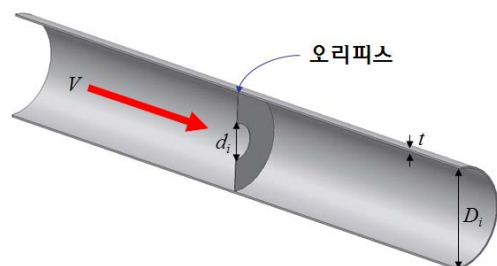


Fig. 2 Scheme of straight pipe with orifice

3. 오리피스 배관의 감속 특성 평가

배관 내부를 흐르는 유체의 유속변화와 배관의 기하학적 형상 변화에 따라 유동가속부식 현상이 발생할 가능성이 높으며, 감속 발생의 가장 주요한 원인은 배관 내벽에 작용하는 표면 전단응력이다. 따라서 오리피스가 존재하는 직관의 전산유체역학해석을 수행하고 배관 내벽에 작용하는 표면 전단응력의 영향을 평가하여 감속부 발생위치를 결정한다. Table 1에 제시한 바와 같이 오리피스 직경비와 유체 유속의 변화에 따라 총 9가지 전산유체역학해석을 수행하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 직경비 0.62를 갖는 오리피스가 설치된 후단부에서 와류가 발달하는 것을 확인하였으며, 오리피스 영향으로 인하여 발달된 와류는 배관 내벽에 표면 전단응력을 발생시킨다. 표면 전단응력이 최대가 되는 지점에서 감속이 발생할 수 있는 가능성이 높아지며, 오리피스 직경비 0.62를 갖는 배관의 경우 발생위치는 Fig. 4(b)와 같이 오리피스에서부터 배관 직경의 0.7배 전후의 거리를 갖는 것으로 평가되었다. 또한 Fig. 4에 나타난 바와 같이 오리피스 직경비가 0.4에서 0.8로 커짐에 따라 예상되는 감속부 발생위치는 배관 직경의 0.3배에서 1.5배 떨어진 곳으로 평가되었다. 이는 일본 Mihama 3호기의 복수계통 배관 파단사고 후 조사한 결과와 유사하므로 본 연구에서 고려하고 있는 유동해석절차는 타당한 것으로 판단된다.

배관 내부에 작용하는 유체 유속과 오리피스 직경비 변화에 따라 내벽의 표면 전단응력 값을 평가해 보았다. 유체유속이 5 m/s에서 20 m/s 증가함에 따라 표면 전단응력은 최대 7.5배 증가하였다. 동일한 오리피스 직경비를 갖는 경우 유속 증가에 따른 감속 발생 위치는 비슷하였다. 또한 오리피스 직경비가 0.4에서 0.8로 증가함에 따라 표면 전단응력은 최대 10배 정도 감소하였으나, 동일한 유속을 갖는 경우 오리피스 직경비가 증가에 의한 감속 발생위치는 점차 오리피스 설치부 방향으로 가까워지는 것으로 평가되었다. 따라서 오리피스가 설치된 직관의 경우 감속의 발생 가능성이 높은 위치는 유체 속도와 관계없이 오리피스 직경비에 지배적인 영향을 받는 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 논문에서는 오리피스 직관의 전산유동해석을 통해 오리피스 전후의 유동특성을 확인하고 배관 내벽에 미치는 전단응력을 살펴보았다. 이를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 오리피스 직경비 0.62를 갖는 배관의 경우 발생위치는 오리피스에서부터 배관 직경의 0.7배 전후의 거리를 갖는 것으로 평가되었으며, 이는 일본 Mihama 3호기의 복수계통 배관 파단부위와 잘 일치하는 결과이다.
- (2) 오리피스 내에 흐르는 유체유속이 5 m/s에서 20 m/s 증가함에 따라 표면 전단응력은 최대 7.5배 증가하였다.
- (3) 오리피스가 설치된 직관의 경우 감속의 발생 가능성이 높은 위치는 유체 속도와 관계없이 오리피스 직경비에 지배적인 영향을 받는 것으로 평가되었다.

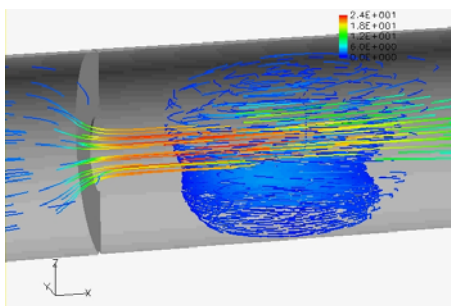


Fig. 3 Fluid flow in straight pipe with orifice

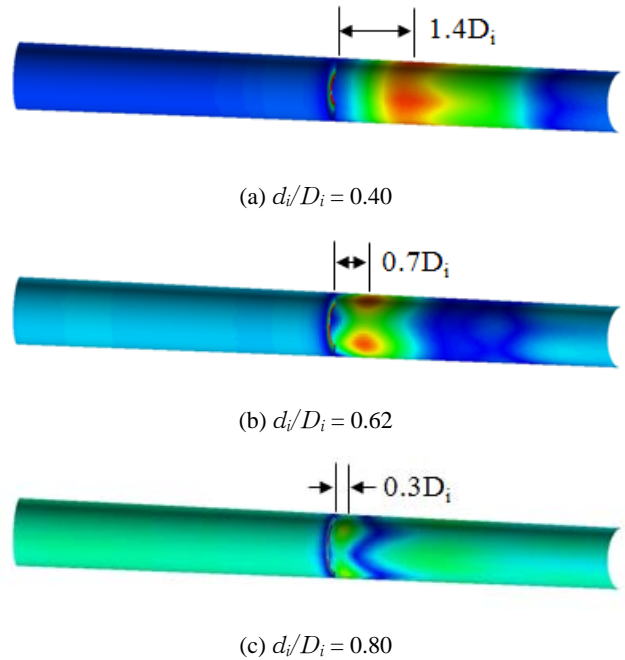


Fig. 4 Maximum shear stress of pipe wall

참고문헌

1. Bush, S.H., "Failure Mechanism in Nuclear Power Plant Piping Systems," Journal of Pressure Vessel Technology, 114, 389-395, 1992
2. <http://www.meti.go.jp/press/0005524/>, Results of the 3rd Meeting of the Investigative Subcommittee on Secondary System Pipe Rupture in Unit 3 of Mihama Nuclear Power Station, Japanese Nuclear and Industrial Safety Subcommittee, Advisory Committee for Natural Resources and Energy
3. Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C. and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R1, 1998
4. Electric Power Research Institute, CHECWORKS Computer Program User Guide, EPRI/TR-103496, 1994
5. Lee, S.M., Yun, K.O., Chang, Y.S., Choi, J.B. and Kim, Y.J., "Failure Probability Assessment of Gas Pipelines Considering Wall-thinning Phenomenon," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 22(10), 158-166, 2005
6. Song, K.H., Lee, S.M., Chang, Y.S., Choi, J.B. and Kim, Y.J., "Estimation of Local Stress Change of Wall-thinned Pipes due to Fluid Flow," Journal of the Korean Institute of Gas, 10(3), 670-673, 2006
7. Chang, Y.S., Song, K.H., Lee, S.M., Choi, J.B. and Kim, Y.J., "Fluid Structure Interaction Analysis on Wall-thinned Pipes," Key Engineering Materials, 321-323, 158-166, 2006
8. ATES, Fluent 6.2 User's Guide, Fluent Inc., 2004
9. ATES, Gambit 2.0 User's Guide, Fluent Inc., 2004