

누설 모양에 따른 파이프 누수 특성에 대한 수치 해석 연구

이현민^a, 김정우^{a*}

Numerical Investigation of the Effect of Crack Shape on Leak Flow Characteristics in Pipelines

Hyunmin Lee^a, Jungwoo Kim^{a*}^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	29	March	2017
Revised	14	April	2017
Accepted	14	April	2017

Keywords:

CFD
Pipe
Leak
Crack shape
Aspect ratio

ABSTRACT

The effect of crack shape on the leak flow characteristics in pipelines is investigated using computational fluid dynamics (CFD) simulations. In the present study, two different crack shapes are considered: axial crack and circumferential crack. The present simulation results showed that under the same crack area, the aspect ratio influences the leak rate. When the aspect ratio is 1, the leak rate reaches the minimum value. Moreover, the leak rate in the circumferential crack is slightly larger than that in the axial crack. The change in the leak rate according to the crack shape could be explained by the different velocity distributions at the leak position depending on the aspect ratio.

1. 서론

누수(leak)는 보통 파이프 시스템에서 의도적이지 않은 유체의 흐름이 발생하는 것을 의미한다. 누수는 잘못된 일처리 또는 압력의 급격한 변화, 누설(crack), 파이프 제작상의 미비 등에 인한 원인으로 발생한다고 알려져 있다^[1,2].

누수 확인은 여러 가지 분야에서 중요하게 간주되고 있다. 예를 들어 냉각재 상실로 인한 사고 위험이 중요한 설계 인자가 되는 원자력 발전소에서는 파단으로 인한 냉각재 상실을 예측하기 위한 LBB(leak before break) 해석이 중요하다. LBB 해석에서 누설 모양이나 누설 면적 등 기하학적 조건에 따른 누수량(leak rate) 예측은 필수적이라고 알려져 있다^[3-5].

또한 누수 확인은 수도관 공급 관련해서도 많은 관심을 받는 중

요한 문제이다. 우리나라에서 전국적으로 누수율을 살펴보면 서울은 3%, 부산은 4%를, 반면 강원은 22.3%, 경남은 23.2%를 보이고 있다. 높은 누수율은 상수관 노후가 중요한 원인이며, 상수도 시설 노후문제는 최근 사회적으로 논란이 되고 있는 싱크홀과 동공의 원인 중 하나로도 생각되고 있다.

이런 이유들로 인해 오랜 전부터 실험 또는 이론적인 방식을 이용하여 파이프 시스템에서 누수 특성에 대한 연구가 이루어져 왔다^[6,7].

그러나 기하학적 형상 등 누설 차이로 인한 누수량 변화를 완벽히 이해하기에는 한계가 있다. 특히 Ferrante et al.^[8]과 Fox et al.^[9]에 따르면 누수량에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 연구가 여전히 부족한 실정이다.

예를 들어 누수량을 산정할 때 누설 형상(crack shape)은 누설

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6856

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: kimjw@seoultech.ac.kr (Jungwoo Kim).

면적(crack opening area)과 함께 중요한 인자들 중 하나로 고려될 수 있으나, 보통은 타원형상으로 가정하였다^[10]. 비록 누설 면적이 같더라도 누설 모양에 따라 누수 특성이 달라질 수 있기에 이에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.

이와 같이 실험과 이론적인 접근의 한계로 인하여 여전히 누수량 등 누수 유동 특성에 대해 불확실도가 크다. 이런 점을 보완하기 위하여 최근 CFD를 이용하여 연구가 진행되고 있다^[11-13].

따라서 본 연구에서는 전산수치해석방법을 이용하여 누설 모양에 따라 누수 특성을 파악하고, 누수량을 예측할 때 많이 사용되는 유량계수(discharge coefficient) 등에 대해서도 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 파이프 시스템 내 누수 현상을 난류모델링을 이용하여 수치해석하였다. 따라서 본 연구에서 고려한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

여기서 x_i 는 좌표계 방향이며, u_i 는 각 방향 속도 성분이다. 또한 p 는 압력이다. $\tilde{\cdot}$ 는 Reynolds 평균된 값들을 의미하며, τ_{ij} 는 난류 응력항이다. 본 논문에서는 난류응력항 τ_{ij} 을 모델링하는데 표준 $k-\epsilon$ 방법을 고려하였다. 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 아래와 같은 k, ϵ 방정식을 풀게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - \rho \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

여기서 $G_k (= -\overline{\rho u'_i u'_j} (\partial u_j / \partial x_i))$ 는 평균 속도 구배로 인한 난류 운동에너지의 생성항이다. 또한, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 와 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 는 모델링 상수이다. 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모델 해석을 위하여 ANSYS Fluent를 이용하였다 또한 본 연구에서는 방정식 (1)-(2)을 풀기 위하여 시간에 대한 차분 방법은 1차 정확도의 implicit Euler 방법을 적용하였다. 또한 공간적으로는 1차 정확도의 상류도식법을 선택하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 누설이 있는 파이프 시스템을 보여 준다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 누설 위치는 파이프 중간에 위치한다. 파이프 직경은 0.1 m, 길이는 2 m를 고려하였으며, 입구와 출구 조건은 각각 일정 속도 조건($V=1$ m/s)과 대기압 조건으로 하였다. 또한 누설 위치에서의 조건은 대기압 조건으로 가정하였다. 파이프 내압은 2 bar로 게이지 압력으로는 1 bar에 해당한다. 본 연구에서 고려한 계산 영역과 조건은 Ben-Mansour et al.^[11] 경우와 기본적으로 유사하다.

본 논문에서는 Ben-Mansour et al.^[11] 논문을 참고하여 주어진 누설 면적에 대해 누설 모양에 따른 영향을 살펴보고자 한다.

본 연구에서 고려된 누설 면적은 $5 \text{ mm}^2, 10 \text{ mm}^2, 20 \text{ mm}^2$ 세 경우이며, 각 경우에 대하여 누설 모양에 따른 영향을 확인하기 위하여 종횡비(b/a , a 는 유동방향으로의 누설 길이, b 는 유동에 대한 수직방향으로의 누설 폭)를 $1/10, 1/5, 1/3, 1/1, 3/1, 5/1, 10/1$ 로 다르게 하였다. Fig. 2에 본 연구에서 고려된 leak에 대한 개념도가 제시되어 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, $a > b$ 인 경우는 축방향 누설(axial crack), $a < b$ 인 경우는 원주방향 누설(circumferential crack)에 상응한다. 참고로 Bariha et al.^[14]에 따르면 누설 길이가 20 mm보다 작은 경우를 leak, 20 mm보다 큰 경우를 small release 또는 rupture로 정의하였으며, 이에 따라 본 연구에서 고려한 누설 크기는 leak로 간주될 수 있다.

본 연구에서는 누설 면적에 따라 누설 주변 격자 등 구체적인

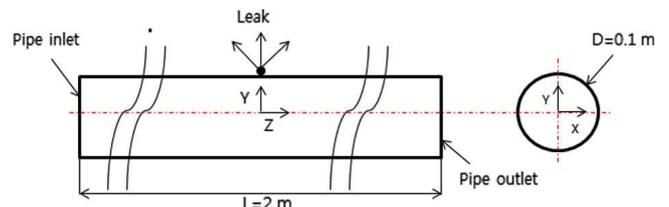


Fig. 1 Computational domain considered in the present study

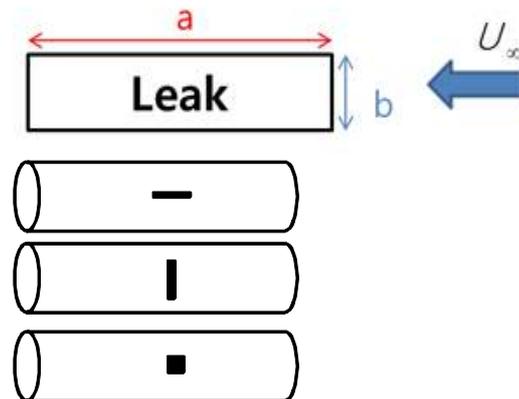


Fig. 2 Crack shape considered in the present study (Here, U_∞ is the bulk velocity of the pipe flow)

격자수는 경우에 따라 약간씩 차이가 있지만, 전반적으로 육면체 격자를 이용하여 150만개 격자를 구성하여 계산을 수행하였다. 참고로 Ben-Mansour et al.^[11]는 54만개의 격자를 사용하였다.

2.2절에서 수치해석 결과를 제시하기 전에, 본 계산 방법의 정확도를 검증하기 위하여 Fig. 3과 같이 본 계산 결과를 Ben-Mansour et al.^[11] 결과와 비교하였다. 본 계산 결과는 내압 게이지 압력 1 bar이고, 누설 면적은 5 mm²을 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 본 연구 결과는 Ben-Mansour et al.^[11] 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 이를 기반으로 2.2절에서 누설 면적에 따른 누수 특성에 대해 살펴보려고 한다.

2.2 수치해석 결과

Fig. 4는 누설 형상에 따른 누수량 변화를 보여준다. 참고로 Olsen and Skjetne^[15]은 누수량에 따라 누수 형태를 분류하였는데, Fig. 4에서 보이는 누수량이 0.1-1 kg/s인 경우를 minor leak

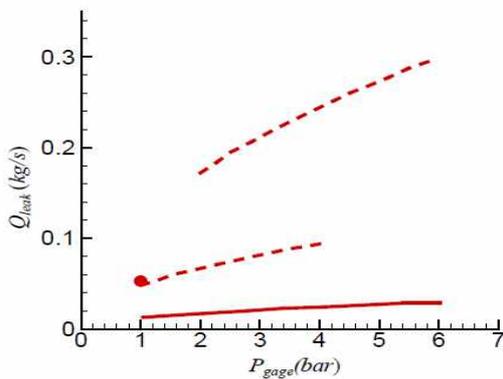


Fig. 3 Comparison of the present simulation results with those of Ben-Mansour et al.'s (Solid line; 1 mm×1 mm, dashed line; 2 mm×2 mm, dash-dotted line; 10 mm×1 mm. Circle symbol; Present result, 5 mm², b/a=1/1)

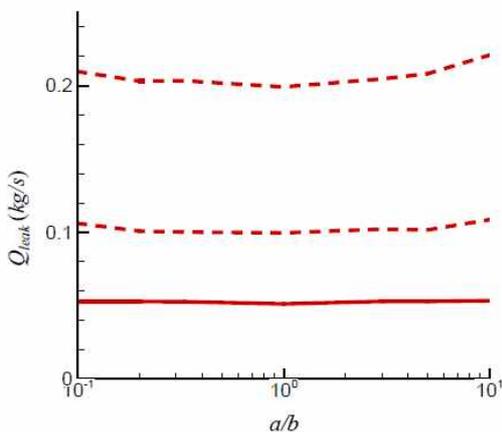


Fig. 4 Dependence of crack shape on leak flow rate (Solid line; crack area=5 mm², dashed line; crack area=10 mm², dash-dotted line; crack area=20 mm²)

로 분류하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 본 논문 계산을 통해 같은 면적이더라도 종횡비가 1인 경우보다 종횡비가 1이 아닌 경우가 누수량이 큰 것을 알 수 있다. 또한 종횡비가 1이 아닌 경우라도 원주방향 누설보다는 축방향 누설이 존재할 때 누수량이 다소 큰 경향이 보인다. 또한 누설 면적에 따라 거의 비례해서 누수량은 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 4에 제시된 조건은 10 mm²일 때 Re_{leak}=13,000~23,000 (여기서, Re_{leak}=VD_H/ν, V는 누설면을 통한 누설 속도, D_H는 누설면에 대한 수력학적 직경)으로 난류영역에 속한다고 할 수 있다. 따라서 Beck et al.^[16]이 제시된 바에 따라 점성 효과보다는 관성 효과가 크다고 말할 수 있다.

Fig. 5는 누설 형상에 따라 발생하는 누수량 차이를 보다 자세히 살펴보기 위하여, 면적이 동일하면서 종횡비가 다른 누설 지점에서의 누수 속도 분포를 비교하였다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이, 누설 모양이 정사각일 때가 직사각일 때보다 벽 근처에서 속도가 더 완만하게 증가하고 가운데 지점에서 속도가 큰 것을 알 수 있다. 이런 결과는 Xing et al.^[17] 결과와 정성적으로 일치한다. 또한 반경방향 누설일 때는 반경방향에 대해서 대칭으로 나오지만, 축방향 누설일 때는 작은 차이이지만 1누수 속도가 누설 앞 부분에서 누설 끝부분보다 약간 속도가 큰 것을 볼 수 있으며, 이로 인해 그림 4에서 확인되는 바와 같이 축방향 누설일 때 반경방향 누설일 때와 비교하여 누수량이 큰 것을 정성적으로 이해할 수 있다.

Fig. 6은 유량계수를 보여준다. 본 논문에서 유량계수는 $C_d = Q / (A_L \sqrt{2\Delta p / \rho})$ (여기서 Q는 누수량, A_L은 누설 면적, Δp는 파이프 내압과 누수면 압력사이의 차이, ρ는 밀도)로 정의하였다. 문헌상에서는 보통 0.3~0.6의 값을 많이 보고하고 있다^[6, 18]. 또한 Wolf et al.^[19]에 따르면 crack 모양에 따라 0.5~0.8까지 다양한

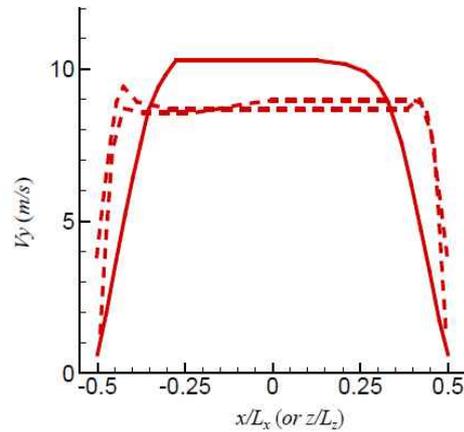


Fig. 5 Distribution of velocity profiles at the leak position (Solid line; b/a=1, dashed line; b/a=1/10 (axial leak); dash-dotted line; b/a=10/1 (circumferential leak))

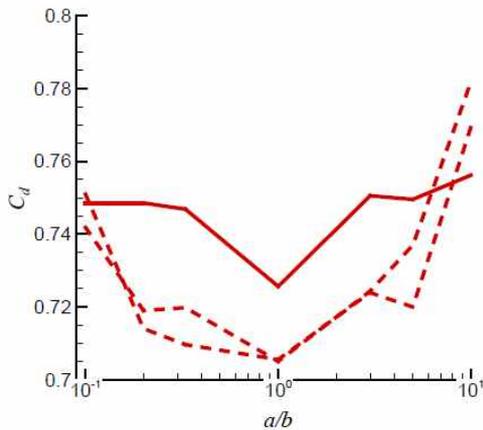


Fig. 6 Discharge coefficient (Solid line; crack area=5 mm², dashed line; crack area=10 mm², dash-dotted line; crack area=20 mm²)

값을 가지게 된다. 유량계수는 임계 유동 모델(critical flow model)에서 중요한 인자이다^[20]. 보통 이론적으로 유도된 누수 모델과 실제 실험 사이의 간격을 줄이기 위하여 조정된다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 본 연구결과에서는 유량계수는 0.7~0.8이며, 정사각 누설 모양일 때가 유량계수가 가장 작고 종횡비가 커질수록 커지는 경향을 보임을 알 수 있다. 이런 경향은 그림 4에 보여지는 누수량과 일치하는 것이다. 또한 $C_d A_I / A$ (여기서, A 는 파이프 단면적)는 누설 면적에 따라 대략적으로 0.000471, 0.000943, 0.001885이며, 이 값은 Lee et al.^[21]에서 제시된 0.002와 유사하다.

3. 결론

본 논문에서는 원형 파이프시스템에서 사각형 모양의 누설이 생겼을 때 누설 모양에 따른 누수 특성을 CFD 해석을 통하여 연구하였다. 본 계산 결과 누수량은 같은 누설 면적이더라도 누설의 형태가 정사각형일 때 가장 작고, 종횡비가 커질수록 누수량이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이는 누설 위치에서 속도 분포를 통해 정성적으로 설명될 수 있다.

누수 특성을 이해하기 위하여 많이 고려하는 유량계수를 계산해 보면, 본 계산 조건을 통해 결정되는 유량계수는 기존값과 유사하게 나온다. 또한 유량계수도 종횡비에 따라 다르게 나오며, 이는 누수량과 밀접한 관련을 가지게 된다.

누수 특성을 살펴보기 위해 본 연구에서 고려한 CFD 연구 방법이 확장된다면, 다양한 조건에서의 누수 특성에 대해서도 이해하는데 크게 도움이 될 것으로 기대된다. 나아가 CFD 연구 결과를 활용하여 다양한 누설 조건에서 누수량을 결정할 수 있는 상관식을 도출하는 연구도 향후 진행할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Grebner, H., 1995, Results of a Benchmark Test on the Crack Opening and Leak Rate Calculation, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 61 35-39.
- [2] Nasir, M. T., Mysorewala, M., Cheded, L., Siddiqui, B., Sabih, M., 2014, Measurement Error Sensitivity Analysis for Detecting and Locating Leak in Pipeline using ANN and SVM, *11th Int. Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, SSD14-1569847013*.
- [3] Hong, C., Asako, Y., Lee, J.-H., 2009, Estimation of Leak Flow Rates through Narrow Cracks, *J. Pres. Ves. Tech.*, 131 051405.
- [4] Li, X., Shi, L., Zhang, Z., Li, X., 2010, Leak Rate Calculation for LBB Analysis in High Temperature Gas-Cooled Reactors, *Nucl. Eng. Des.*, 240 3231-3237.
- [5] Wang, M., Qiu, S., Su, G., Tian, W., 2014, Research on the Leak Rate Characteristics of Leak-Before-Break (LBB) in Pressurized Water Reactor (PWR), *Appl. Thermal Eng.*, 62 133-140.
- [6] Yano, T., Matsuhima, E., Okamoto, A., 1988, Leak Flow Rate from a Through-Wall Crack in a Pipe, *Int. J. of JSME*, 31 494-504.
- [7] Narabayashi, T., Fujii, M., Matsumoto, K., Nakamura, S., Tanaka, Y., Horimizu, Y., 1991, Experimental Study on Leak Flow Model through Fatigue Crack in Pipe, *Nucl. Eng. Des.*, 128 17-27.
- [8] Ferrante, M., Brunone, B., Meniconi, S., Capponi, C., Massari, C., 2014, The leak Law: from Local to Global Scale *Proc. Eng.*, 70 651-659.
- [9] Fox, S., Collins, R., Boxall, J., 2015, Traditional Leakage Models for Leakage Modelling: Effective or Not?, *Proc. Eng.*, 119 35-42.
- [10] Matsumoto, K., Nakamura, S., Gotoh, N., 1991, Study on Crack Opening Area and Coolant Leak Rates in Pipe Cracks, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, 46 35-50.
- [11] Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Khalifa, A., Youcef-Toumi, K., Chatzigeorgiou, D., 2012, Computational Fluid Dynamic Simulation of Small Leaks in Water Pipelines for Direct Leak Pressure Transduction, *Comput. Fluids*, 57 110-123.
- [12] Shehadeh, M., Shahata, A. I., 2013, Modeling the Effect of Incompressible Leakage Patterns on Rupture Area in Pipeline, *CFD Letters*, 5 132-142.
- [13] Liu, C., Li, Y., Meng, L., Wang, W., Zhao, F., Fu, J., 2015, Computational Fluid dynamic Simulation of Pressure Perturbations

- Generation for Gas Pipelines Leakage, *Comput. Fluids*, 119 213-223.
- [14] Bariha, N., Mishra, I. M., Srivastava, V. C., 2016, Hazard Analysis of Failure of Natural Gas and Petroleum Gas Pipelines, *J. Loss Prev. Proc. Indu.*, 40 217-226.
- [15] Olsen, J. E., Skjetne, P., 2016, Current Understanding of Subsea Gas Release: a Review, *The Canad. J. Chem. Eng.*, 94 209-219.
- [16] Beck, S. B. M., Bagshaw, N. M., Yates, J. R., 2005, Explicit Equations for Leak Rates through Narrow Cracks, *Int. J. Pre. Ves. & Piping*, 82 565-570.
- [17] Xing, D., Yan, C., Wang, C., Sun, L., 2013, A Theoretical Analysis about the Effect of Aspect Ratio on Single-Phase Laminar Flow in Rectangular Ducts, *Prog. Nucl. Eng.*, 65 1-7.
- [18] Revankar, S. T., Riznic, J. R., 2009, Assessment of Steam Generator Tube Flaw Size and Leak Rate Models *Nucl. Tech.*, 167 157-168.
- [19] Wolf, B., Revankar, T., Riznic, J., 2012, Experiments on Choking Flow of Subcooled Liquid through a Simulated Steam Generator Tube Crack, *ICONE20-POWER2014-54080*, 41-50.
- [20] Kim, Y. S., Kwon, T.-S., Bae, S.-W., Euh, D.-J., Park, H.-S., Cho, S., Yi, S.-J., Kang, K.-H., Choi, K.-Y., 2016, Comparison of Critical Flow Models for SBLOCA Tests of the ATLAS Facility, *Ann. Nucl. Eng.*, 87 435-442.
- [21] Lee, P. J., Vitkovsky, J. P., Lambert, M. F., Simpson, A. R., Liggett, J. A., 2005, Leak Location using the Pattern of the Frequency Response in Pipeliens: a Numerical Study, *J. Sound Vib.*, 284 1051-1073.