

수치해석기법을 이용한 벤투리 유량계의 파울링 영향 개선 연구

김 왕 현¹, 이 영 준¹, 양 정 승², 김 용 배³, 김 병 수^{*1}

¹충남대학교 항공우주공학과

²(주) 한국유체계통기기

³한국수력원자력 중앙연구원 계통안전연구소

NUMERICAL STUDY ON THE IMPROVEMENT OF VENTURI FLOWMETER WITH FOULING EFFECT

W.H. Kim¹, Y.J. Lee¹, J.S. Yang², Y.B. Kim³ and B.S. Kim^{*1}

¹Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National Univ.

²Fluid System Component Co., Ltd.

³Nuclear System Safety Lab., Central Research Institute, KHNP

In the paper, a study on the analysis of fouling effect of the venturi flowmeter is described. In the research flow field solutions about the venturi flowmeter with fouling are obtained and then the effects on fouling states by inserting a ring into the throat of venturi flowmeter are studied. As the result shows, it is found that the inserted ring reduces the fouling effect due to the flow separation occurring at the ring. Consequently, a venturi flowmeter with ring shows smaller pressure loss differences than the original configuration with no ring on fouling state. This research suggests an efficient and economic method of inserting a ring to reduce the pressure loss effects due to fouling.

Key Words : 주급수(Feedwater), 벤투리 유량계(Venturi Flowmeter), 파울링(Fouling), 링(Ring), 표면 거칠기(Wall Roughness), 축대칭(Axisymmetric), 압력 손실(Pressure Loss)

1. 서 론

국내 원자력 발전소(원전)는 주급수의 유량을 측정하고, 이로부터 원자로의 열 출력을 계산한다. 인허가 출력 감시를 위하여 증기발생기의 주급수 유량을 측정하고, 이를 입력으로 하여 원자로의 열 출력을 계산하게 되기 때문에 정확한 열 출력은 주급수 유량의 정밀한 측정으로부터 얻어지게 된다. 이 때 안정성 측면에서는 열 출력을 안전 관련 법적인 요건에 따라 설계기준보다 낮게 운전하는 것이 필요하지만 최대한 법적인 설계기준에 근접하도록 운전해야 경제적 손실을 막을 수 있다. 따라서 원자로 열 출력을 정확히 측정할 수 있어야 원전의 안정성을 만족하면서 경제성을 보다 더 보장받을 수 있게 된다. 그러나 모든 유량계에서는 배관 벽면에 미

세 입자 부유물 등이 침전되어 배관 벽면의 표면 상태를 변화시키는 파울링 영향을 받게 된다. 이렇게 파울링 영향을 받게 되면 측정 오차가 추가로 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 유량계의 주기적인 세정 및 교정이 필수적이다. 실제로 국내 원전의 운전 시간이 경과되면서 파울링으로 인한 스케일이 생기는 현상이 발생하여 유량의 압력 손실 값이 매년 1%에서 최대 3% 정도 더 증가되어 측정되는 문제가 보고되었다[1,2,3].

유량이 설계기준보다 더 높게 측정되면 안전 관련 법적인 요건을 만족시키기 위해 원자로의 발전량을 줄여야하는 문제가 발생하여 매년 약 80억 원의 경제적 손실을 가져오게 된다. 이렇게 파울링 현상으로부터 유발된 출력 감소 문제를 해결하기 위해 실제로 원전에서 사용되는 벤투리 유량계를 선택하여 파울링 영향으로 인한 출력 감소를 최소화하기 위한 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 파울링 영향의 최소화를 위한 방법으로 유량계의 목 부위에 링을 삽입해보고, 이 경우에 어떠한 효과가 있는지 수치해석기법을 이용하여 비교 및 확인해 보았다.

Received: February 26, 2016, Revised: June 22, 2016,

Accepted: June 23, 2016.

* Corresponding author, E-mail: kbskbs@cnu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2016.21.2.040>

© KSCFE 2016

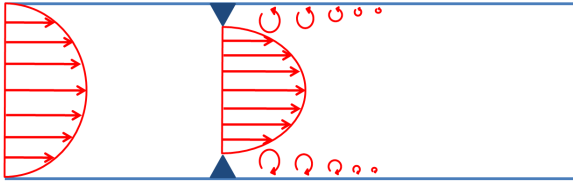


Fig. 1 Schematic pipe flow across the inserted ring

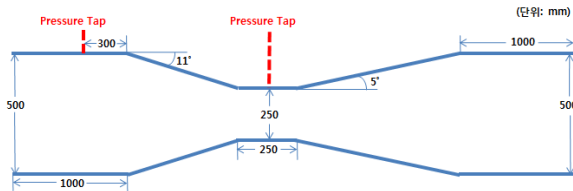


Fig. 2 Venturi flowmeter geometry

2. 연구 방법

2.1 링 삽입 원리

벤츄리 유량계의 목 부위에 링을 삽입할 경우 유동이 링을 지나면서 박리가 되어 벽면으로부터 떨어져 흐르게 된다. 특히 원전 주급수 유량계와 같이 레이놀즈수가 큰 경우에 더욱 효과적이다. 이렇게 링을 삽입함으로써 배관 벽면의 파울링으로부터 유동이 받는 영향을 최소화 할 수 있고, 파울링이 증가되더라도 그에 따른 압력 손실의 증가를 최소화 할 수 있게 된다. 즉, 파울링이 발생하지 않은 초기에 측정된 압력 손실 값과 파울링이 발생한 후에 측정된 압력 손실 값의 차이를 최대한 줄여서 파울링에 상관없이 유량의 압력 손실 변동 및 원자로의 출력이 손실을 미치는 영향을 최소화 하는 것이다. Fig. 1은 링 삽입에 대한 원리를 개략적으로 가시화하여 보여 주고 있다.

2.2 유량계 형상 및 격자 생성

해석에 사용된 벤츄리 유량계는 직경 500 mm의 원통형 배관으로 Fig. 2는 링이 삽입되지 않았을 때의 벤츄리 유량계 단면에 대한 형상 수치를 보여준다. 두 개의 Pressure tap에서 각각 압력이 측정되고, 측정된 두 압력의 차이로 압력 손실을 알 수 있다. 유량계의 직경이 처음 수축하기 시작하는 지점에서 서부터 앞쪽으로 300 mm 떨어진 부분에 첫 번째 Pressure tap이 위치하고, 유량계의 목 정 중앙에 두 번째 Pressure tap이 위치하게 된다. 본 연구에서 파울링 영향을 최소화하기 위한 방법으로 고안한 링은 Fig. 3와 같이 가로와 세로 각각 2 mm의 길이를 가진다. 링의 형상은 유동이 링을 지나면서 효과적으로 박리가 되도록 끝이 뾰족한 삼각형 모양으로 결정하였다.

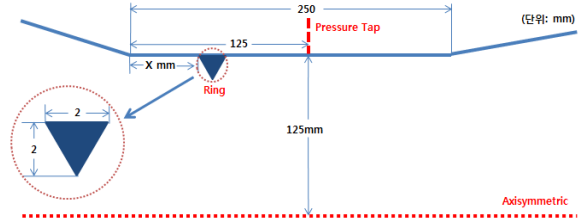


Fig. 3 Ring inserted at the throat of venturi flowmeter

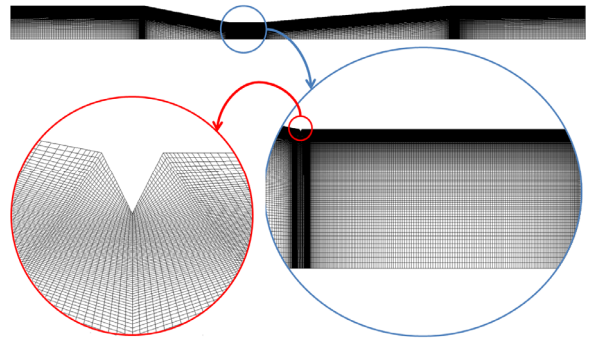


Fig. 4 Grid shape with ring

다. 링의 기본 위치는 유량계에서 배관 직경이 가장 작아 유동의 속도가 빠르기 때문에 링의 효과가 가장 클 것으로 예상되는 목 부위의 가장 앞쪽이며, 링의 위치가 이동함에 따라 파울링에 의한 영향으로 압력 손실이 어떻게 변화하는지 확인하였다.

격자는 상용 격자생성 프로그램인 Pointwise를 이용하여 생성하였다. 축대칭 해석을 고려하여 Fig. 4와 같이 벤츄리 유량계 형상의 절반을 정렬격자로 생성하였고, 난류 모델에 적합한 y+를 가지도록 첫 격자 간격을 결정하였다. 격자에 대한 자세한 정보는 Table 1에 명시하였다.

2.3 유동 조건 및 해석자 설정

유동 조건은 실제 원전과 유사하도록 설정하였다. 배관을 흐르는 물의 압력 및 온도는 각각 82.7 bar와 232.22 °C이며, Steam table을 이용하여 온도에 맞는 물의 밀도와 점성계수를 얻었다.

Table 1 Grid system

Program	Pointwise
X range	0 ~ 4.32
Y range	0 ~ 0.25
y+	30 < y+ < 100
Total cell(without ring)	140,000
Total cell(with ring)	148,000

유동 해석은 Navier-Stokes equation을 사용하는 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하였고, 2차원 축대칭 해석을 진행하였다. 난류 모델은 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하였고, 벽 함수는 Standard wall function을 이용하였다. 파울링으로 인하여 배관 벽면에 스케일이 생기는 현상을 고려하기 위해 FLUENT에서 제공하는 벽면 경계조건 기능 중에 표면 거칠기 값을 변경하는 방법을 이용하였다. 이 때, 모든 조건에서 질량 유량의 값을 모두 동일하게 설정하기 위하여 유입부의 경계 조건을 Mass flow inlet으로 설정하였고, 출구에서의 경계 조건은 Pressure outlet으로 설정하였다. 유동 조건과 해석자 설정에 대한 세부 내용은 각각 Table 2, 3에 명시하였다.

3. 연구 결과

3.1 파울링 영향

링이 삽입되지 않았을 경우 파울링이 유동에 얼마나 영향을 주는지 확인해 보았다. 먼저 파울링이 없을 때의 압력 손실을 측정하고, 파울링의 크기가 증가함에 따라 압력 손실이 어떻게 변화하는지 Table 4를 통해 확인하였다. 파울링이 없을 때는 스테인리스강의 표면 거칠기인 0.00001 mm를 적용하였다. 해석 결과, 파울링을 의미하는 표면 거칠기 값이 증가함에 따라 압력 손실 또한 같이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 0.5 mm의 파울링 상태에서는 파울링이 없는 상태와 비

Table 2 Flow condition

Material	Water(Single phase)
Mass flow rate	809.424 kg/s
Reynolds number	18,000,000
Temperature	232.22 °C
Density	824.39 kg/m ³
Viscosity coefficient	0.00011472 kg/m.s
Pressure	82.7 bar

Table 3 Solver setting

Code	FLUENT
Type	Pressure-based
Time	Steady
2D Space	Axisymmetric
Viscous model	Realizable $k-\epsilon$
Near-wall treatment	Standard wall function
Discretization scheme	Second order upwind

Table 4 Pressure loss without ring

Roughness	ΔP (Pa)	ΔP (%)
0.00001 mm	157,154	-
0.1 mm	161,175	2.56
0.2 mm	162,368	3.32
0.5 mm	164,415	4.62

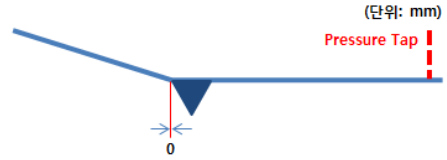


Fig. 5 Ring Position = 0 mm(Ring 0)

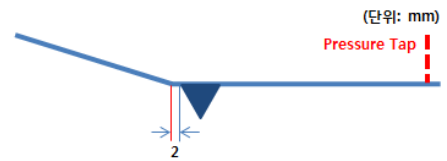


Fig. 6 Ring position = 2 mm(Ring 2)

교하여 약 4.62% 정도의 압력 손실 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.2 링 삽입 효과

파울링에 의한 압력 손실의 증가로 인해 원자로의 발전량이 줄어드는 것을 막기 위해 벤튜리 유량계의 목 부위에 링을 삽입하여 어떤 효과가 있는지 확인해 보았다. 실제 원전에서는 주기적인 세정으로 인하여 파울링이 0.2 mm 이상으로 발달하지 않기 때문에 0.5 mm의 파울링 조건은 제외하고 해석을 수행하였다.

먼저 Fig. 5와 같이 유량계의 수축이 모두 끝나고 배관의

Table 5 Pressure loss with ring(ring position = 0 mm)

Roughness	ΔP (Pa)	ΔP (%)
0.00001 mm	170,109	-
0.1 mm	170,917	0.47
0.2 mm	171,349	0.73

Table 6 Pressure loss with ring(ring position = 2 mm)

Roughness	ΔP (Pa)	ΔP (%)
0.00001 mm	168,335	-
0.1 mm	169,644	0.78
0.2 mm	170,197	1.11

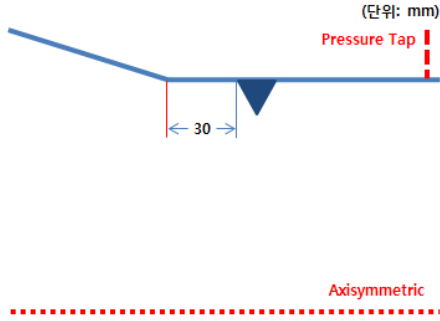


Fig. 7 Ring position = 30 mm(Ring 30)

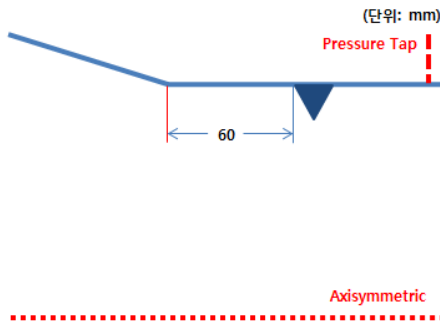


Fig. 8 Ring position = 60 mm(Ring 60)

직경이 가장 작은 부분이 시작되는 곳을 기본 위치로 하여 링을 삽입하였다. Table 5를 통해 알 수 있듯이, 링이 삽입되지 않았을 때와 비교하여 파울링에 의한 압력 손실의 증가가 확연하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

이번에는 링의 위치에 따른 효과를 확인하기 위하여 링의 위치를 조금씩 뒤로 이동시켜가며 해석을 수행하여 비교하기로 하였다. 먼저 Fig. 6와 같이 기본 위치에서 링을 뒤쪽으로 2 mm 만큼 아주 조금 이동시켜 해석을 수행하였다. 그 결과, Table 6를 통해 알 수 있듯이 링을 기본 위치에 설치했을 때보다 조금 더 큰 압력 손실의 증가를 보였다.

다음으로 Fig. 7, 8과 같이 기본 위치로부터 더욱 뒤쪽으로

Table 7 Pressure loss with ring(ring position = 30 mm)

Roughness	$\Delta P(\text{Pa})$	$\Delta P(\%)$
0.00001 mm	163,364	-
0.1 mm	165,772	1.47
0.2 mm	166,642	2.01

Table 8 Pressure loss with ring(ring position = 60 mm)

Roughness	$\Delta P(\text{Pa})$	$\Delta P(\%)$
0.00001 mm	163,044	-
0.1 mm	165,903	1.75
0.2 mm	166,825	2.32

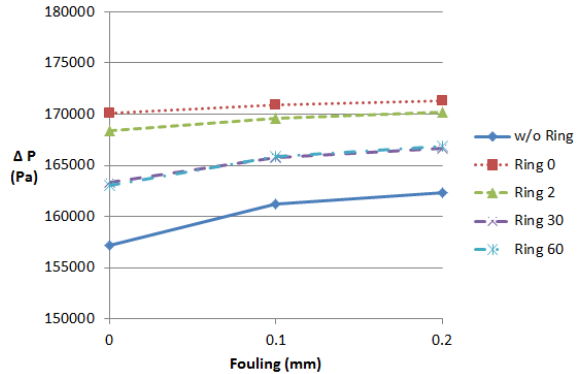


Fig. 9 Comparison of absolute pressure loss(Pa)

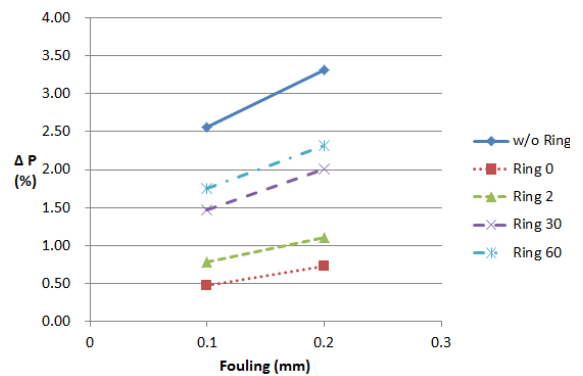


Fig. 10 Comparison of relative pressure loss(%)

링을 위치시켰을 때 압력 손실이 어떻게 변화하는지 확인해 보았다. 그 결과 링이 기본 위치로부터 뒤쪽으로 이동할수록 파울링에 의한 압력 손실의 증가가 점점 더 커지는 것을 Table 7, 8을 통해 알 수 있었다.

3.3 결과 비교 및 분석

링의 삽입 위치에 따라서 파울링으로 인한 압력 손실이 어떻게 변화하는지 비교하기 위하여 각각의 링 위치에 따른 압력 손실 값을 그래프로 나타내었다. Fig. 9에서는 각 케이스들의 파울링에 따른 압력 손실 값을 절대적인 수치로 나타내었고, 파울링이 없을 때와 비교하였을 때 파울링 상태에서 얼마나 압력 손실의 증가가 발생하는지 한 눈에 알아볼 수 있도록 그 차이를 백분율로 나타내어 Fig. 10을 통해 그래프로 나타내었다. 그래프의 기울기가 가장 작은 것이 파울링으로 인한 압력 손실의 증가량이 가장 적다는 것을 의미하고, 이는 파울링이 없을 때와 측정된 압력 손실 값의 차이가 가장 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 그래프의 기울기가 작을수록 그만큼 효율이 좋다고 할 수 있다. 본 연구에서 해석한 케이스들

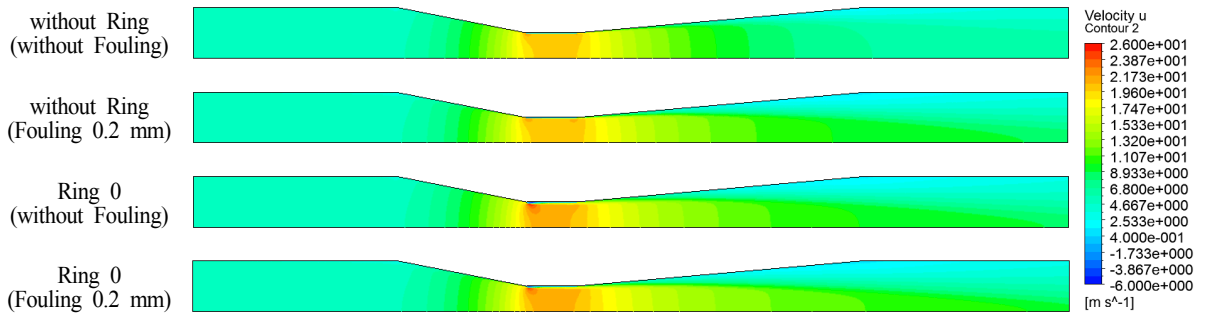


Fig. 11 Axial velocity contour

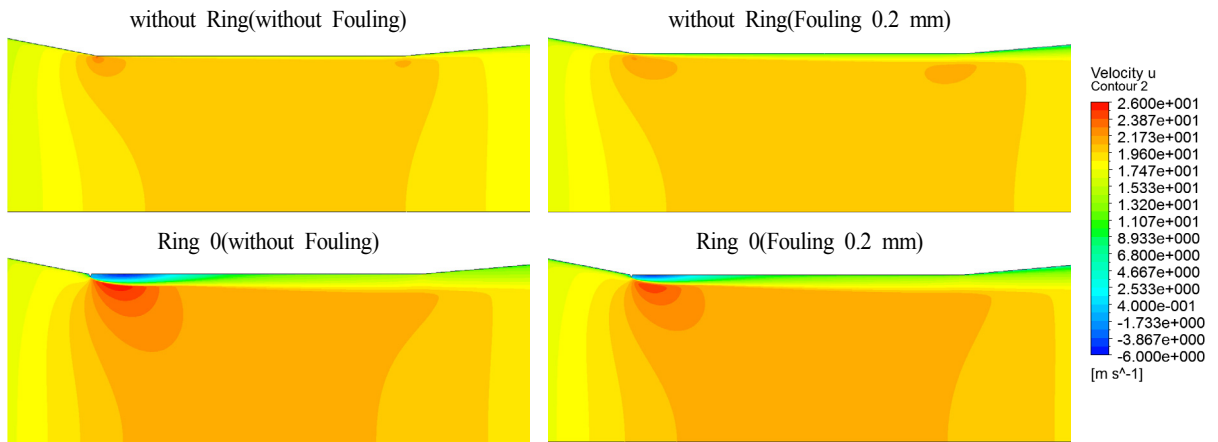


Fig. 12 Axial velocity contour (Close-up around the throat)

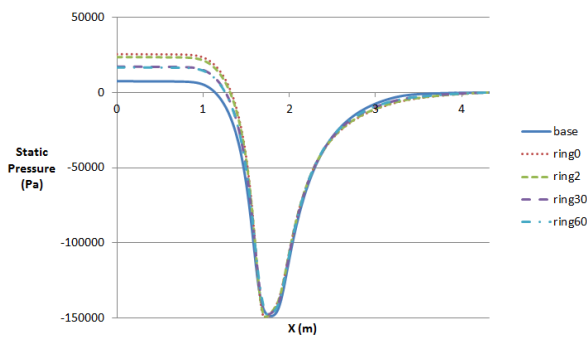


Fig. 13 Static pressure distribution along the centerline

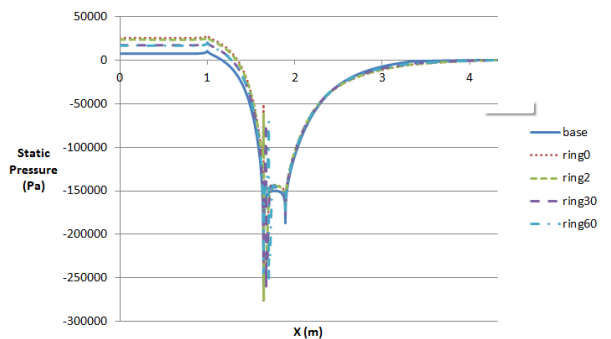


Fig. 14 Static pressure distribution along the wall surface

을 비교해본 결과, 링이 가장 앞부분에 위치한 경우에 가장 좋은 효율을 보였다. 링이 유량계의 목 앞쪽에 위치할수록 유동의 박리가 조금 더 앞쪽에서 발생하여 링 뒤쪽의 벽면에서 파울링으로 인한 영향을 가장 적게 받게 되기 때문에 이 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

링의 존재 유무에 따라 유동이 어떻게 변하는지 직접 확인하기 위해 Contour를 그려 서로 비교해 보았다. 파울링이 없을 때와 0.2 mm만큼 발달했을 때, 그리고 각각 링이 없을 때와 기본 위치에 삽입하였을 때를 비교해 보았다. 먼저 Fig. 11은 벤츄리 유량계의 전체적인 유동에 대한 축 방향의 속도

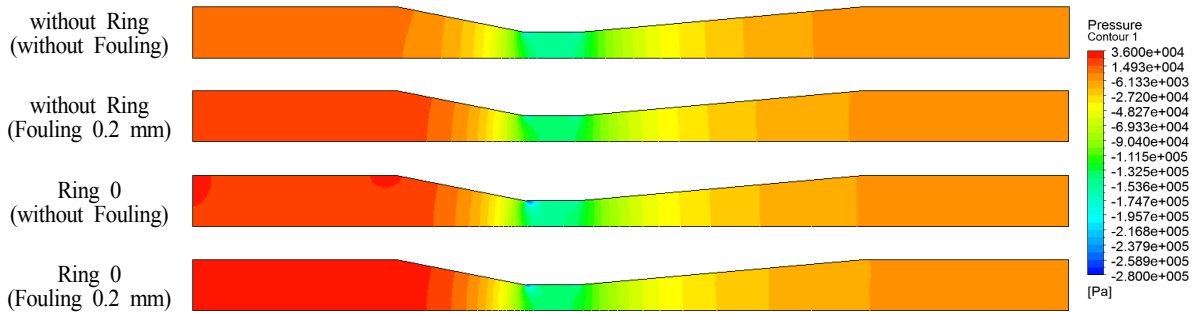


Fig. 15 Static pressure contour

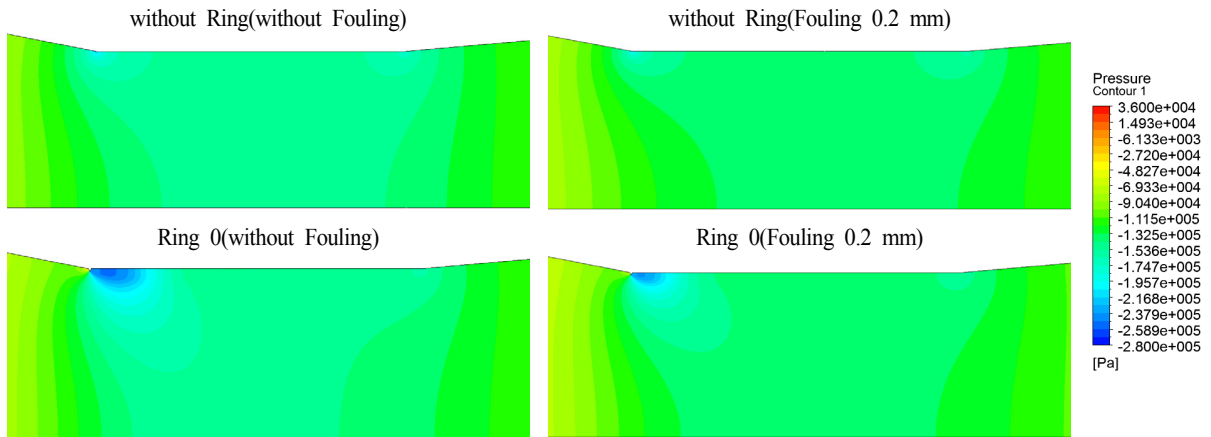


Fig. 16 Static pressure contour(Throat)

Contour를 나타낸 것이다. 더욱 자세한 확인을 위하여 Fig 12 를 통해 유량계 목 부근에서의 유동을 확대하여 비교해 보았다. 그 결과, 링이 없는 경우에는 벽면의 파울링이 0.2 mm로 증가하면서 파울링으로부터 영향을 많이 받아 목 주위의 벽면 부근에서 유동이 변한 것을 확인할 수 있었다. 반면에 링을 삽입한 경우에는 유동이 링을 지나 박리되면서 벽면의 파울링 영향을 거의 받지 않게 되고, 따라서 유동의 변화 또한 거의 없는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 위에서 예상했던 링 삽입 원리와 일치한다고 볼 수 있다.

다음으로 유량계의 중심 부분과 배관 벽면 부분에서 정압이 어떻게 분포하는지 자세하게 알아보기 위하여 Fig. 13, 14 을 통해 축 방향에 따른 정압을 Plot으로 그려 확인하였다. Fig. 13, 14에서 보여주듯이 유량계 내부의 압력은 중심축에서 보다는 파이프 벽면에서 더 낮은 값을 보이고 있고, 계산 대상 케이스들 중에서 가장 낮은 압력은 기준 압력(82.7 bar) 대비 약 -280,000 Pa (-2.8 bar)로 나타났다. Fig. 15, 16은 각각 유량계 전체와 목 부근에서 대해서 정압 Contour를 확인하고 있다. 마지막으로 파울링 효과와 링 삽입 등으로 인하여 유동

의 Streamline 특성에 어떤 특이한 변화가 생기거나 유량계 목 중앙에 위치한 Pressure tap에 악영향을 미치지 않는 것인지 확인하기 위하여 유동의 Streamline 특성을 확인하였다. Fig. 17에서는 유량계의 목 부근에서 속도 크기에 따라 색깔로 표현된 Streamline을 보여주고 있다. 링이 삽입된 경우에 링 뒤쪽에 박리된 영역이 나타남을 알 수 있으나 재부착을 통하여 중앙의 Pressure tap부분에서는 안정된 축방향 유선을 보이고 있다. 정상유동으로 충분히 수렴된 계산 결과들로서 출구 부분에서의 유선들 또한 Fluctuation이나 재순환 등이 없이 안정적으로 빠져나가고 있음을 출구 부분의 유선을 보여주는 Fig. 18에서 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Pointwise로 격자를 생성하고, FLUENT를 이용하여 2차원 축대칭 유동 해석을 진행하였다. 벽면 경계조건에서 표면 거칠기 값을 변경하여 파울링 효과를 고려하였고,

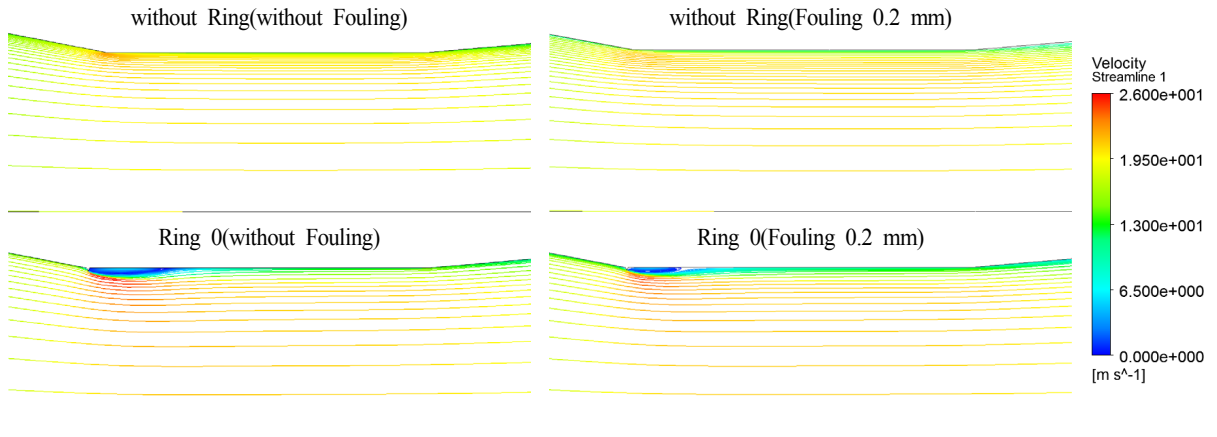


Fig. 17 Color-coded streamlines according to velocity(Throat)

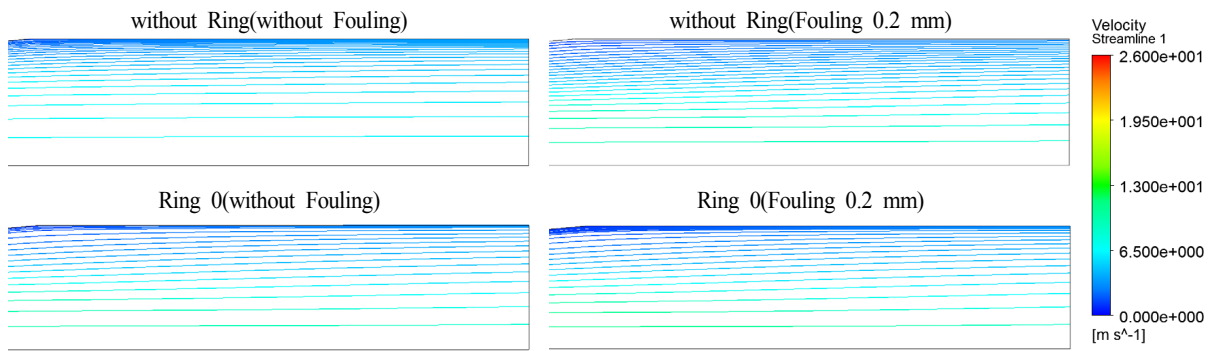


Fig. 18 Color-coded streamlines according to velocity(Exit)

파울링 상태에서 벤투리 유량계에 링을 삽입함으로써 어떠한 효과가 있는지 확인해 보았다. 그 결과, 링을 삽입한 경우에서 그렇지 않은 경우보다 약 5분의 1 정도의 훨씬 더 작은 압력 손실 증가를 보였다. 이렇게 링을 삽입함으로써 파울링 상태에서도 보다 정확하게 압력 손실을 측정할 수 있는 이유는 유동이 링을 지날 때 박리 현상으로 인하여 벽면과 분리되어 흐름으로써 벽면의 파울링 영향을 거의 받지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 벤투리 유량계의 목 부위에 적절한 크기의 링을 삽입한다면 파울링 상태에서 압력 손실의 증가를 훨씬 줄일 수 있게 되고, 원전의 발전량 감소로 인한 경제적 손실을 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스 · 교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2014M3C1A6045113)

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the 9th ANSYS Seminar on Nuclear field, Daejeon, Apr. 2, 2015.

References

- [1] 1992, Chan, A.M.C. and Ahluwalia, A.K., "Feedwater Flow Measurement in U.S. Nuclear Power Generation Stations," EPRI TR-101388, Ontario Hydro Research Division.
- [2] 2010, Park, J.H., "A Study on Feedwater Venturi Fouling and Its Countermeasure," Master's Thesis, Chosun University, Gwangju, Republic of Korea.
- [3] 1998, Jung, B.S. and Lee, S.G., "Measurement of Steam Generator Main Feedwater Flow of Wolsong Unit 1 using Tracer," Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Annual Meeting, pp.351-356.