

# 입자 추적 방법을 이용한 원자력발전소용 증기발생기 스월베인 습분분리기 해석 Numerical Analysis of Swirl-Vane Separator Using Particle Tracking Method

전준호\* · 조굉무\*\* · 박영규\*\*\* · 이연원\*†  
Jun-Ho Jeon\*, Hong-Wu Zhao\*\*, Young-Kyu Park\*\*\* and  
Yeon-Won Lee\*†

(Received 24 October 2019, Revision received 06 February 2020, Accepted 07 February 2020)

**Abstract :** The steam generator in a nuclear power plant should provide high quality steam to the turbine for better efficiency and stability. For this purpose, a steam separator is installed in the steam generator to manage the quality of the steam. In this study, computational fluid dynamics (CFD) technique was carried out to analyze the flow phenomenon of the swirl-vane type steam separator. When the steam enters the swirl-vane separator with droplets, it is affected by the centrifugal force. Some of the droplets are attached to the riser wall, some pass through the outlet (bypass and the downstream pipe) and the remaining droplets enter the next separator. A Lagrangian particle model was used to simulate the behaviors of steam and water droplets. The results show that the removal of the droplets depend on the size of the droplets. When the droplet size is small, it is removed by the outlet. In particular for the droplet size of 0.01 micron, over 75% of them are removed. When the droplet size is large, it is collected on the wall. In particular for the droplet size of 50 micron, over 95% of them are collected on the wall. Thus, the performance of the separator decreases as the droplet enters the next separator directly before being collected on the walls or on the outlet if the length of the riser above the swirl-vane is short.

**Key Words :** Swirl-vane, Steam separator, Droplet, Quality

— 기 호 설 명 —

- |        |       |         |
|--------|-------|---------|
|        | $U_p$ | : 입자 변위 |
|        | $x_p$ | : 입자 속도 |
| $2m_p$ |       | : 입자 질량 |
|        | $t$   | : 해석 시간 |

\*† 이연원(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3749-8119) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과  
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6162

\*전준호(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9801-6251) : 학생, 부경대학교 대학원 기계설계공학과

\*\*조굉무(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7839-4172) : 학생, 부경대학교 대학원 기계설계공학과

\*\*\*박영규(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2938-6456) : 과장, (주) 에콤

\*† Yeon-Won Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3749-8119) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6162

\*Jun-Ho Jeon(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9801-6251) : Graduate School Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

\*\*Hong-Wu Zhao(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7839-4172) : Graduate School Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

\*\*\*Young-Kyu Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2938-6456) : Manager, ECOM.

- $F_D$  : 항력
- $F_B$  : 중력에 의한 부력
- $F_R$  : 구심력 및 코리올리 힘
- $F_{VM}$  : 입자가 차지하는 체적에서 유체의 가상질량을 가속시키는 힘
- $F_P$  : 압력구배에 의한 힘
- $F_{BA}$  : 레깅 경계층에 의한 바셋 힘
- $F_c$  : 원심력
- $\omega$  : 각속도
- $R_L$  : 회전 반지름

## 1. 서 론

원자력 발전용 증기발생기는 하단부의 원자로와 연결된 세관다발에서 이루어지는 열교환으로 물을 증기로 만들고 이를 발전을 위해서 터빈으로 보내는 역할을 한다. 이때 높은 효율 및 발전용 터빈의 안전성을 위하여 1차 및 2차 습분분리기를 장착하여 일정 이상 건도를 유지해 준다. 이중 스월베인 습분분리기는 주로 1차 습분분리기로 많이 사용된다. 스월베인 습분분리기의 기본적인 원리는 스월베인을 통과한 증기에 포함된 액적이 원심력에 의해 습분분리기의 벽면에 부착되어 액막을 형성하고 그 액막은 습분분리기 상단의 홀을 통해 제거되는 것이다.

이러한 1차 습분분리기에 관련하여 해외에서는 많은 연구들이 진행되어 왔는데, Toshiki 등<sup>2)</sup>은 습분분리기 내에서 환형 흐름(Annular flow)에 대한 스월베인의 형상에 대한 효과를 실험적으로 연구했으며, 개선된 스월베인이 높은 분리 성능을 유지하면서 압력 강하를 효과적으로 감소시키는 것을 확인하였다. Xiong 등<sup>3)</sup>은 스월베인 습분분리기의 분리 성능에 대한 슬롯의 영향을 실험적으로 연구했으며 대규모 작동 조건에서 우수한 분리 성능을 위해 슬롯 사용을 권장했다. Tian and Yang<sup>4)</sup>은 CFD를 사용하여 가압 수형 원자로에서 2단계 습분분리기의 분리 효율과 압력 강하를 연구했다.

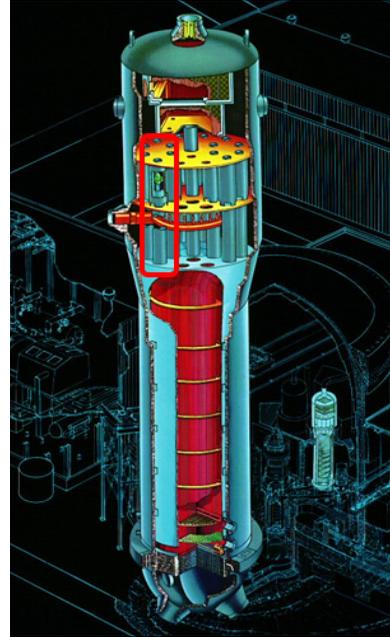


Fig. 1 Westinghouse type steam generator<sup>1)</sup>

이러한 연구결과들은 스월베인 습분분리기의 원리를 이해하고 개선시키기 위한 노력으로, 일본 및 중국을 중심으로 진행되어 왔다. 그에 비하여 한국의 경우 원자력 발전소를 제작함에도 불구하고 이러한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문의 목표는 스월베인 습분분리기 국산화 작업의 일환으로 Lagrangian Particle Tracking Method를 이용하여<sup>5,6)</sup> 습분분리기 내부 유동현상 및 여러 조건에서의 액적 제거율을 확인하고, 스월베인 습분분리기의 작동원리를 이해하여 액적제거효율에 영향을 미치는 변수들을 확정함으로써 스월베인 습분분리기의 국산화 및 성능개선을 하는 것이다.

## 2. 수치해석

Fig. 2는 스월베인 습분분리기의 개략도이다. 습분분리기에 들어오는 액적은 스월베인에 의해 원심력을 얻고 벽에 부딪혀 액막을 형성한 후 천공을 통해 빠져나가 제거되거나 그 위의 탄젠트

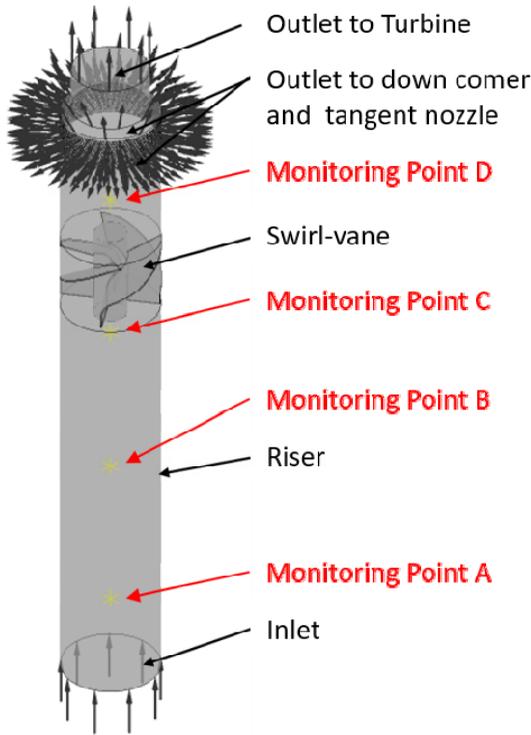


Fig. 2 Swirl-vane steam separator domain

노즐을 통해 제거된다. 이에 본 논문에서는 다운코머 및 탄젠트노즐로 빠져나간 액적과 벽에 부착된 액적을 제거된 것으로 판단하였다.

Fig. 3의 스월베인 형상 및 해석격자를 나타낸 것으로, 형상은 웨스팅하우스타입 습분분리기 및 두산중공업 실무진의 의견을 고려하여 결정하였다. 계산에 이용된 격자는 ICEM툴을 사용하여 Tetra&Prism 격자를 제작하였다.

해석을 위한 경계조건으로 입구에는 건포화증기와 물 액적의 유량조건이 설정하였고 출구는 압력경계조건을 주었다. 난류모델로는 회전류 해석에 적합한 SST난류모델을 사용하였다.<sup>7)</sup>

증기와 물 액적 거동의 CFD해석을 위해서 Lagrangian Particle Model을 사용하였다. Lagrangian Particle Model의 경우 먼저 연속체의 유동장을 해석한 이후에 입자의 유동을 계산하게 되는데 다음의 식과 같이 입자의 변위를 유동장 내에서 받는 합력을 통하여 계산하게 된다.<sup>8)</sup>

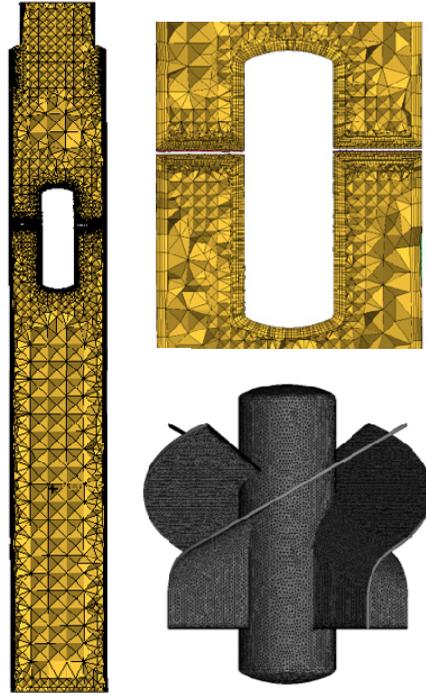


Fig. 3 Steam separator and analysis grid

Particle translation :

$$U_p = dx_p / dt \quad (1)$$

Particle momentum :

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F} \quad (2)$$

with

$$\vec{F} = \vec{F}_D + \vec{F}_B + \vec{F}_R + \vec{F}_{VM} + \vec{F}_P + \vec{F}_{BA} \quad (3)$$

Lagrangian Particle Model은 특별한 모델을 제외 하면 연속유체와 입자 간의 커플링이 되어 있지 않아 입자의 유동이 연속체에 영향을 미치지 않고, 액적과 스팀의 체적비를 따져 액적의 볼륨비가 작을 때 사용하여야 한다.<sup>7)</sup> 이는 물액적 크기가 작고, 증기와 물의 밀도차이가 커서 대부분의 볼륨이 증기로 차 있는 습분분리기 내 해석에서 사용 가능하다. Lagrangian Particle Model의 장점은 액적의 크기 등을 조정이 용이하여 그 영향을 판단할 수 있고 유선 및 흡착 제거율 등이 명확히 나타난다.

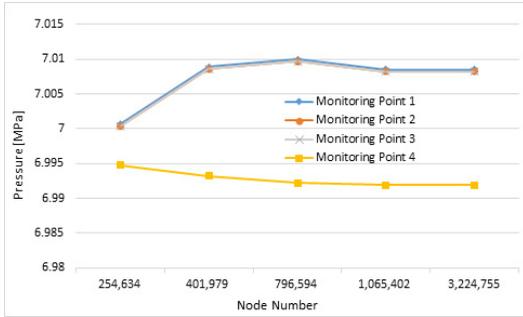


Fig. 4 Pressure at monitoring points

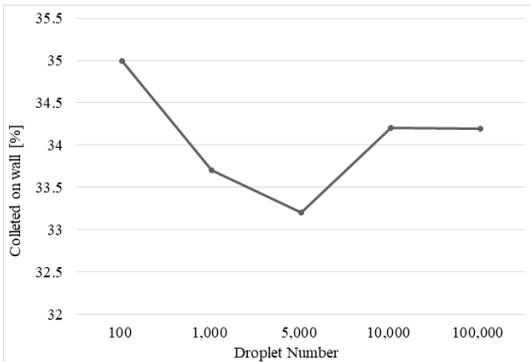


Fig. 5 Rate of particles collected on the wall

Fig. 4는 Monitoring point에서의 압력을 나타낸 그래프이다. 격자 의존성을 테스트하기 위하여 대표 해석조건을 가지고 5가지 격자를 통해 해석을 진행하였다. 그 결과, 약 1,000,000노드 이상에서 격자수 증가에 따른 압력값 변화가 없음을 확인하였고, 이후 1,065,402노드 모델을 사용하여 해석을 진행했다.

Fig. 5는 Particle 개수에 따른 벽면에 의한 제거율을 나타낸 것이다. Lagrangian Particle modle을 이용할 경우 실제 Particle 수로 해석하는 것이 아니라 가상의 Particle 균집으로 해석한다. 이경우 해석격자의 경우와 같이 의존성 테스트를 진행하여 적정수의 가상 Particle로 해석을 진행하여야 한다. 본 연구에서는 10,000개의 Particle수를 이용하여 해석을 진행하였다.

입자의 크기는 원심력을 이용한 다양한 분리기에서 제거효율에 영향을 주는 중요 변수이다. 스월베인 습분분리기에서도 마찬가지로 액적 크기

가 클수록 증가된 질량에 의해 원심력을 많이 받을 뿐 아니라 벽면 고압을 극복하여 벽면에 닿기 쉬워진다. 원심력의 식은 아래와 같고 액적의 크기가 커질수록 액적의 질량이 커져 같은 각속도를 가질 때 원심력이 커진다.

$$F_c = m_p \omega^2 R_L \quad (4)$$

이에 본 연구에서는 습분분리기 내부의 유동현상을 관찰하고 액적 크기의 변화 따른 액적 제거율 해석을 진행하였다. 이를 통해 습분분리기 국산화 및 향후 개선모델을 개발하고자 한다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 유동현상

Fig. 6은 해석된 액적 중 일부를 무작위로 추출한 그림이다. 입구에서 들어간 액적은 스월베인을 통과한 후 회전하며 진행하고 일부 액적은 속도가 줄어들며 벽면에 부착되어 제거된다. 벽면에 부착되지 않은 액적의 경우 천공 및 출구를 통해 제거된다. 터빈방향 출구로의 나가는 액적은 존재하지 않았다.

Fig. 7은 습분분리기 내의 속도등고선을 나타낸 것으로 증기의 최고 속도 및 스월베인 전후의 유동 현상을 확인하고자 하였다. 스월베인 전까지는 일반적인 관내 유동을 보여 준다. 스월베인 이후에는 벽면 유속이 라이저(Riser) 내부 중심의 유속보다 빨랐다.

Fig. 8은 속도벡터를 확인한 것으로 측정 위치는 날개가 시작되는 위치를(0 mm 지점) 기준으로 y방향 스월베인 이전(-200 mm)과 스월베인 통과 중(+200 mm), 스월베인 통과 후(+400 mm) 지점을 측정위치로 하였다. 스월베인 전의 유동은 거의 균일한 속도로 y방향 속도 성분만을 가지고 있다. 이는 (b)에서 -300 mm와 0 mm 지점 속도벡터가 거의 보이지 않는 것으로 확인가능하다. 스월베인 통과 중인 유동과 통과 한 유동은 y방향뿐 아니라 회전방향 속도성분을 가지게 되는데, 스월베인 통과 중인 경우 날개와 허브에 의해 유로가 제한되기 때문에 평균적인 속도가 통과 후보보다 빠르다.

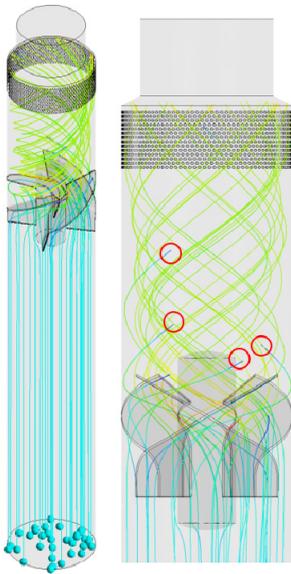


Fig. 6 Water droplet pathline

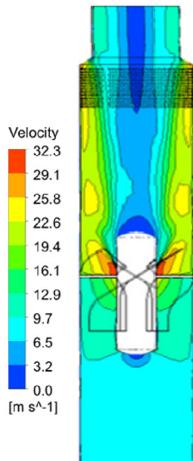
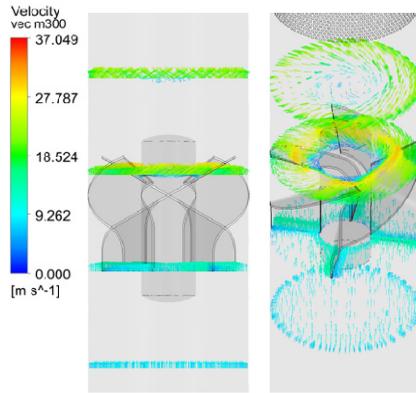
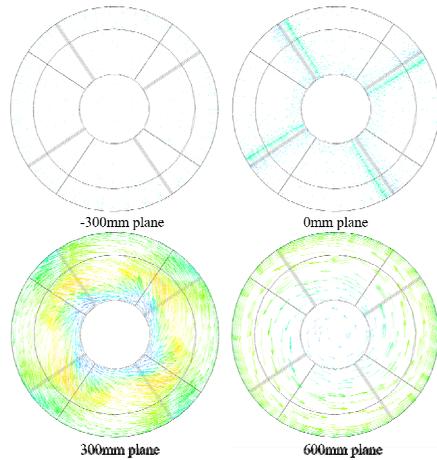


Fig. 7 Velocity contour



(a)



(b)

Fig. 8 Velocity vector

Fig 9는 습분분리기 중심에서 압력을 측정 한 그래프로 습분분리기에 의한 압력강하 및 경향성을 확인하고자 하였다. 입구에서 출구까지의 압력 차이는 6.89 kPa로 스윙베인을 기준으로 압력강하가 크게 나타나므로 스윙베인을 개선한다면 에너지 손실을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 습분분리기 내부의 압력등고선을 나타낸 것이다. 스윙베인 이후 벽면에서의 압력이

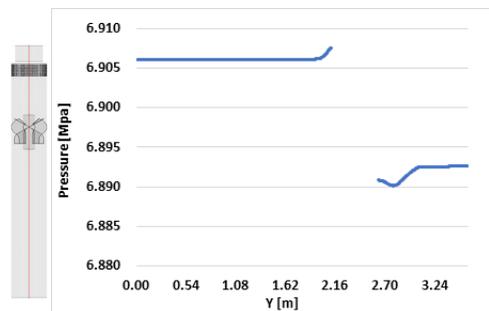


Fig. 9 Pressure distribution along the centerline

중심에서의 압력보다 최대 3 kPa 정도 높았다. 이러한 벽면 고압은 스윙베인을 통과한 액적이 벽면에 도달하지 못하게 하는 요인이다.

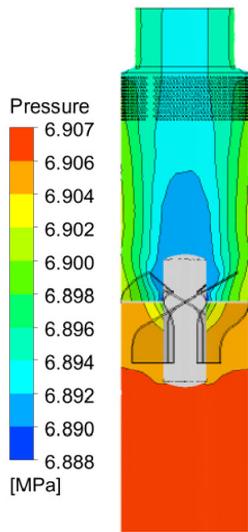


Fig. 10 Pressure contour

### 3.2 액적 크기에 따른 변화

Fig. 11은 액적 크기에 따른 제거율을 나타낸 그래프이다. 액적의 크기가 10 micron의 경우 77%의 액적이 출구에 의해(Removed by down comer and tangent nozzle outlet) 제거되었고 나머지 23%가 벽면 흡착에 의해(Collected on wall) 제거되었다. 액적 크기가 1 micron보다 커질수록 점점 출구에 의한 제거율보다 벽면 흡착에 의한 제거율이 증가하였고, 액적 크기가 50 micron에서는 96%의 액적이 벽면흡착에 의해 제거되고 단 4%만이 출구에 의해 제거되었다. 해석 결과, 보여 주는 총 8가지 케이스에서는 출구를 통해서든, 벽면 흡착을 통해서든 모두 100%의 제거율을 나타내었다. 이는 홀 및 바이패스 출구로 빠져나간 액적이 증기에서 제거된 것으로 판단하였기에 보여 주는 수치로 향후 바이패스와 홀 통과 이후의 영역을 고려한 연구를 진행할 것이다.

Fig. 12는 10 micron 액적유동을 세분화한 것으로 라이저상단부에 접촉하거나 터빈방향 출구로 나간 액적은 전무하였다. 허브 및 날개와 접촉한 액적도 1% 정도로 매우 적고 대부분의 액적은 라이저 상단과 접촉하거나 출구를 통해 빠져나갔을 알 수 있다.

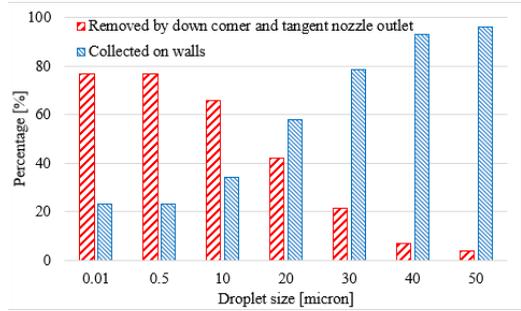


Fig. 11 Particle removal rate

### MASSFLOWRATE OF DROPLET

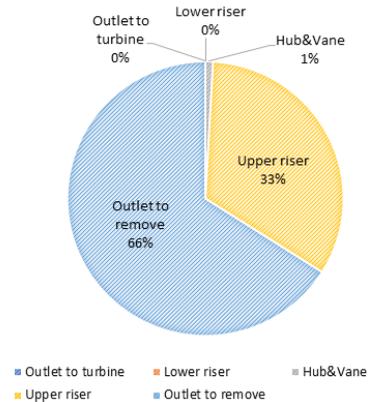


Fig. 12 Mass flowrate of water droplet of 10micron

## 4. 결 론

스월베인 습분분리기를 해석한 결과, 대부분의 물 액적은 벽면 흡착(Collected on walls) 및 출구(Remove by outlet)에 의해 제거되었다. 스월베인 후단 흐름을 살펴보면, 벽면에서의 속도와 정압이 중심부보다 더 높았다. 이는 액적 크기가 커질수록 벽면 흡착에 의한 제거율이 높았던 결과와 연관이 있는 것으로 판단된다. 벽면 흡착에 의해 제거된 액적 중 어디에서 제거되었는지 확인하여 보면 대부분 스월베인 상단부의 라이저에서 제거되었고, 스월베인에서 흡착에 의해 제거되는 정도는 1% 정도이다. 이는 스월베인 상단부 라이저의 길이가 액적 제거율에 중요한 변수가 될 수 있음을 시사한다.

## 후 기

본 논문은 동일저자의 2019년 동력기계공학회 춘계학술대회 발표논문 ‘파티클 모델을 이용한 스월베인 습분분리기 해석’을 기초로 하여 작성하였습니다.<sup>5)</sup>

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술개발사업에서 지원받아 수행하였습니다. (No.20181510102390) 또한 본 연구는 2019년도 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184010201700)

## Author contributions

J. H. Jeon; Conceptualization, Methodology, Writing-original draft. H. W. Zhao; Software, Validation, Formal analysis. Y. K. Park; Writing-review & editing. Y. W. Lee; Supervision, Project administration.

## References

1. <http://www.nucleartourist.com/images/sg-c.jpg>.
2. M. Toshiki, K. Kenichi, H. Kosuke, and T. Akio, 2012, "Effects of swirler shape on swirling annular flow in a gas-liquid separator", Nuclear

Engineering and Design, 249, pp. 63-70.  
(<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.05.036>)

3. Z. Xiong, M. Lu, Y. Li, H. Gu, X. Cheng, 2013 "Effects of the slots on the performance of swirl-vane separator", Nuclear Engineering and design, Vol. 265, pp. 13-18.  
(<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.08.050>)
4. Z. Tian, and L. Yang, 2017, "Numerical Investigation on a New Type of Two-Stage Steam Separator in Pressurized Water Reactors", Energy Procedia, 142, pp. 3962-3967.  
(<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.304>)
5. J. H. Jeon, H. W. Zhao, Y. K. Park and Y. W. Lee, 2019, "Analysis of Swirl-vane Separator Using CFD Particle Model", Proceedings of the 2019 KSPSE Spring Conference, pp. 156-157.
6. B. E. Lee, J. I. Kim, M. Y. Kim, 2004, "Moisture Removal Performance of the Steam Generator Applied to Korean Standard Nuclear Power Plants", Proceedings of the KSME, pp. 85-88.
7. H. Kataoka, Y. Shinkai, A. Tomiyama, 2009, "Effects of Swirler shape on Two-Phase Swirling Flow in a Steam Separator", Journal of Power and Energy Systems, Vol 33, pp. 347-355.  
(<https://doi.org/10.1299/jpes.3.347>)
8. ANSYS CFX- Solver Theory Guide.