

크기가 다른 평행한 두 채널 간의 맥동유동에 관한 수치해석

서정식* · 신종근** · 안득균*** · 최영돈†

Numerical Investigation on the Flow Pulsation of Two Parallel Channels with Different Cross-section Areas

Jeong-Sik Seo*, Jong-Keun Shin**, Deuk-Kuen Ahn*** and Young-Don Choi†

Key Words: Flow pulsation(맥동유동), Sub-channel(부수로), Gap(협소유로), Turbulent mixing(난류혼합)

Abstract

The flow pulsation of two parallel channels is investigated using RANS and URANS approaches. The parallel channels are connected with a small gap and have different cross section areas. The ratio of a right side area and a left side area (A_R / A_L) is 0.5. Computations are conducted using a CFX code. Turbulence models adopted for RANS are Reynolds stress model and Shear Stress Transport (SST) model. The bulk Reynolds number is 60,000. Predicted results are compared with the experimental result of Lee et al. and show the flow pulsation with the frequency of about 100 Hz at the center of the gap.

기호설명

H	사각채널의 높이 (m)
h	협소유로의 높이 (m)
W	유로 폭 (m)
x, y, z	사각유로의 좌표계
U_b	단면평균 유속 (m/s)
t_s	수치해석시간
t_d	시간간격 (time duration, H/U_b)
St	스트로할 수 (Strouhal number)

1. 서론

원자로의 노심은 열원이 되는 연료봉(fuel rod)과 이를 제어하는 제어봉(control rod)으로 구성되어 있는 연료봉 집합체(fuel rod assembly)로 구성되어 있다. 연료봉으로 둘러싸인 유로 면을 부수로라고 하며 이들 부수로(sub-channel)에서 2차 유동(secondary flow)과 난류혼합(turbulent mixing)을 증가시켜 연료봉 집합체를 흐르는 냉각수(coolant)와 연료봉 간의 열전달 효과를 증진시키는 연구들이 많이 진행 중이다. 부수로는 상호 작은 유로를 통해 연결되어 있으며, 이러한 작은 유로를 협소유로(gap)이라고 한다. 부수로에서 열전달의 촉진하기 위해서는 부수로간의 협소유로에서 횡방향 유동(lateral flow)이 발생하게 된다. 이러한 횡방향 유동은 축방향을 따라 흐르면서 주기적인 유동형태를 띠며 부수로간의 열전달을 촉진하게 된다.

이러한 주기적인 유동형태를 맥동유동(flow pulsation)[1]이라고 하며, 부수로 단면에서 발생하는 횡류와 교차류에 의해서 발생한다고 알려져 있다.

부수로간의 혼합현상에 관한 연구는 초창기에는 연료봉 부수로의 형상을 단순화하여 연구를 수행하였다.

L. Meyer and K. Rehme [2]는 부수로를 단순화한 평행한 사각유로의 협소유로의 특성에 대하여 레이놀즈 수 25,000의 유동조건을 가지고 열전대(hot wire)를 이용하여 측정하는 실험을 수행하였다. 협소유로 단면 유동장에 대하여 축방향 평균속도, 벽 전단응력(wall shear stress), 레이놀즈 응력결과를 가지고 축방향 난류유동 성분이 협소유로 근처로 가까이 가면서 급격히 증가하는 현상을 확인하였다.

Lee et al. [3]은 단면적이 다른 사각단면을 가지는 평행한 사각유로의 단면유동에 대하여 레이놀즈 수 60,000의 유동조건에서 LDV를 이용해서 축방향으로 25Dh, 50Dh에서 축방향 평균속도 분포 및 난류유동성분을 측정하였다.

현재까지 진행된 부수로에 관한 연구들은 부수로 단면의 유동장을 분석하여 열전달 특성을 분석하는 방법으로 이루어져 왔다. 따라서 부수로 단면에서 발생하는 교차류(cross flow)와 횡방향 유동(lateral flow)가 축방향 따라 이동하면서 발생하게 되는 맥동유동에 관한 연구는 현재까지 미비한 실정이다. 단면방향의 횡류혼합과 축방향의 맥동유동의 특성은 부수로에서 열전달 메커니즘과 유체유동에 의한 진동발생의 원인을 이해하는 데 큰 도움이 되리라 생각된다.

본 연구는 부수로에서의 맥동유동에 관한 선행연구로서 단순화된 두 개의 다른 단면적을 가지는 평행한 채널유동에 관해서 RANS 기법과 URANS 기법을 이용하여 수치해석을 수행하고자 한다. 수치해석 결과를 실험결과[3]와 비교하여 수치해석의 타당성을 평가하고 협소유로(gap)에서 발생하는 맥동유동의 특성을 분석하고자 한다.

* 고려대학교 대학원 jsseo@korea.ac.kr
 ** 한중대학교 자동차공학과 jkshin@hanzhong.ac.kr
 *** 고려대학교 대학원 stay24@korea.ac.kr
 † 고려대학교 기계공학과 ydchoi@korea.ac.kr

2. 수치해석

2.1 해석격자 및 경계조건

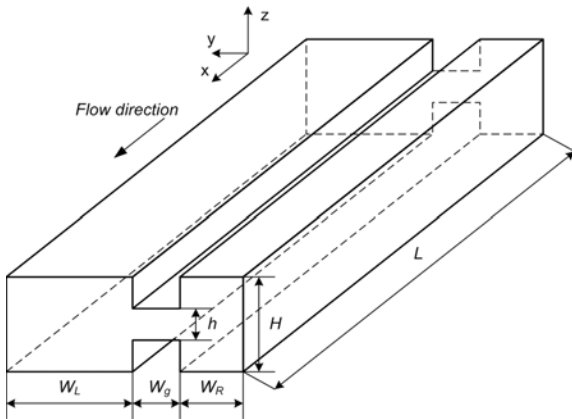


Fig. 1 Schematic of a computational domain

실제 부수로의 형상은 기하학적인 형상이 매우 복잡하여 설계 인자를 찾기 어렵기 때문에 단순화된 형상에 대한 연구를 진행해왔다.[2,3] Fig. 1는 수치해석에서 사용된 계산 영역을 개략적으로 나타낸 것이다. 이 형상은 원자로 사고발생시 부수로 간의 유로의 크기가 차이가 나는 경우를 모사한 것으로 수치 결과를 비교하기 위한 실험[3]에 사용된 형상과 동일하게 설정하였다. 두 사각유로(rectangular channel)의 면적 비는 2:1이며, 동일한 채널의 높이(H)를 가지고 있으며 두 채널은 폭(W_g) 5mm 높이(h) 2mm의 협소유로(gap)로 연결되어 있다. 두 개의 채널의 수력직경은 0.0106 m로 실제 연료봉다발의 수력직경과 유사하게 설계되었다. Table 1은 세부적인 기하학적인 변수들을 정리한 것이다.

본 연구에서 사용된 격자계는 x, y, z방향에 대하여 Δx , Δy , Δz 의 최소격자의 크기는 약 0.002H, 0.001H, 0.001H를 가지고 있으며 육면체 격자계를 사용하여 구성하였다.

작동유체는 물로 25도를 기준으로 밀도와 점성계수를 주었으며, 유동조건은 레이놀즈 수 60,000에 맞추어 계산하였다.

입구와 출구에 질량유속을 이용하여 주기조건(periodic condition)으로 설정하였다. 모든 벽에서는 비활조건(no slip condition)을 주었다. 본 연구에서 RANS시 사용된 두 가지 모형(SST, SSG model)에 대하여 평균유속의 결과값을 비교하였을 때 두 결과는 일치하는 것을 보여주었다.

Table 1 Geometrical parameters

Parameter	Notation	Unit	Dimension
Hydraulic diameter	D_h	m	0.0106
Width of a left channel	W_L	m	0.016
Width of a right channel	W_R	m	0.008
Width of a gap	W_g	m	0.005
Height of channels	H	m	0.010
Axial length	L	m	0.636, 0.318

2.2 수치해석 방법

본 연구에는 수행된 계산은 상용 CFD 코드인 CFX 10.0과 CFX 11.0을 사용하여 슈퍼컴퓨터(IBM 690)과 병렬컴퓨터에서 이루어졌다.[4]

수치해석 기법으로는 RANS 기법과 URANS 기법을 이용하여 계산을 수행하였다. 난류모형으로 RANS 기법에서는 SST (Shear Stress Transport model) 모형과 레이놀즈 응력 모형인 SSG(Speziale, Sarkar and Gatski model) 모형을 사용하였다. URANS 기법에서는 SAS-SST(Scale Adaptive Simulation model) 모형을 이용하였다. Menter[5]가 제시한 SAS-SST 모형은 박리 유동 비정상해석을 잘 예측한다고 알려져 있다.

계산 시간간격(time duration)은 $0.05 \sim 0.1H/U_b$ 으로 설정하여 계산을 수행하였다.

Table 2 Description of cases

Case name	Turbulence model	Simulation type
SST	SST model	Steady
SSG	SSG model	Steady
URANS(SST)	SST model	Transient
URANS(SAS-SST)	SAS-SST model	Transient

3. 결과 및 고찰

3.1 축방향 평균 속도성분 (U_x/U_b) 분포

먼저 수치해석 결과를 LDV로 측정된 결과[3]와 비교하여 그 수치해석결과의 타당성을 살펴보고자 한다. Lee et al.의 측정결과는 단면에 수직방향인 z방향에 대해서 좌측유로, 협소유로, 우측유로에 각각 3개의 지점, 총 9개 지점에서 실험값을 측정하였다. Fig. 2은 실험값과 동일한 $x/H=26.5$ 인 지점에서 좌측 유로(left channel)에 해당하는 지점(zL1, zL4와 zL7)에서 실험결과와 RANS(SSG)와 URANS (SAS-SST) 계산된 결과와 비교한 것이다. zL1, zL4와 zL7은 좌측 유로에서 유로 단면의 수직방향인 z방향을 나타내고 있으며 zL7이 협소유로(gap)에서 가까운 지점을 나타낸다. 전체적인 평균 축방향속도 분포는 zL1과 zL4 지점에서는 측정값과 계산값이 일치하고 있음을 보여주고 있다. 협소유로에 가까운 zL7에서는 실험값의 경우 중심부에서 오목하게 축방향 속도성분이 감소한다.

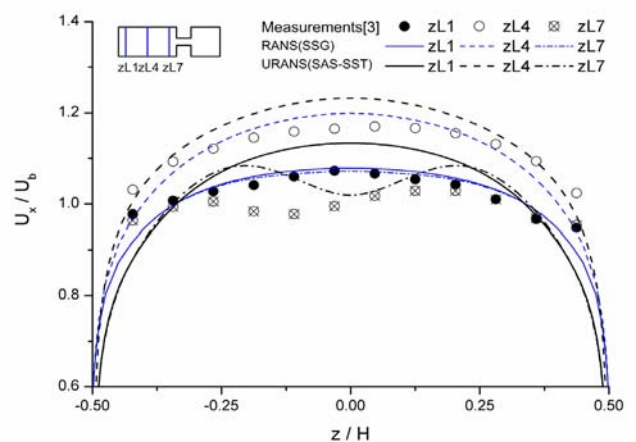


Fig. 2 Axial velocity component distribution (U_x/U_b) at the position of $x/H=26.5$

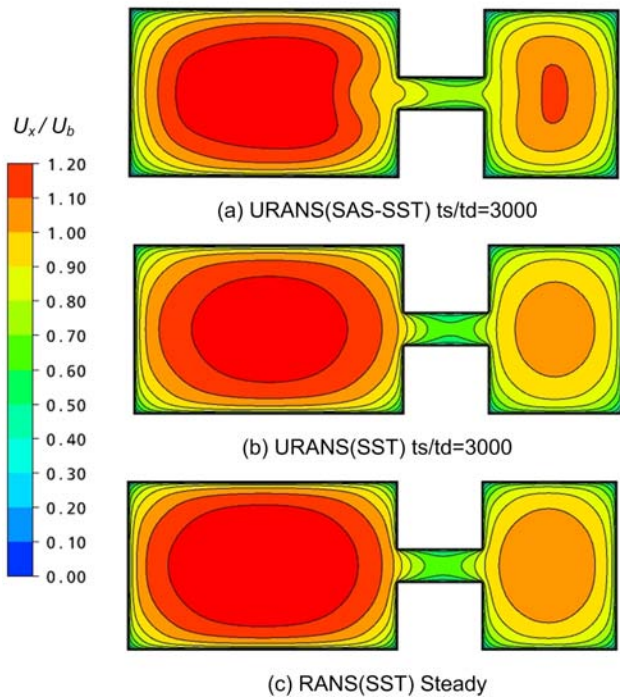


Fig. 3 Normalized axial velocity component contour (U_x / U_b) of URANS(SAS-SST) at the plane with $x/H = 25.6$

이러한 현상은 협소유로(gap)로 인하여 횡방향속도 성분의 증가함에 따라 축방향 속도성분이 감소하여 오목하게 나타나게 된다. 횡방향 속도성분은 협소유로를 중심으로 주기성을 가지고 진동하기 때문에 RANS(SSG) 결과에서는 횡방향 속도성분이 0이 되어 이러한 결과를 예측할 수 없었다. URANS(SAS-SST) 결과는 실험결과에 비해 약간 높게 예측하고 있으나, 협소유로 근방 지점인 zL7에서 오목하게 나타나는 현상을 예측하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 3은 축방향으로 동일 위치의 유로단면에서 축방향 속도의 분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 횡류속도성분의 영향으로 협소유로 주위에서 좌측 유로의 축방향 속도성분이 감소한 것을 보여주고 있다. Fig. 3(b)와 (c)는 유사한 속도분포를 보이고 있으며 RANS(SSG)와 마찬가지로 횡방향 속도성분 영향을 예측하지 못하고 있다.

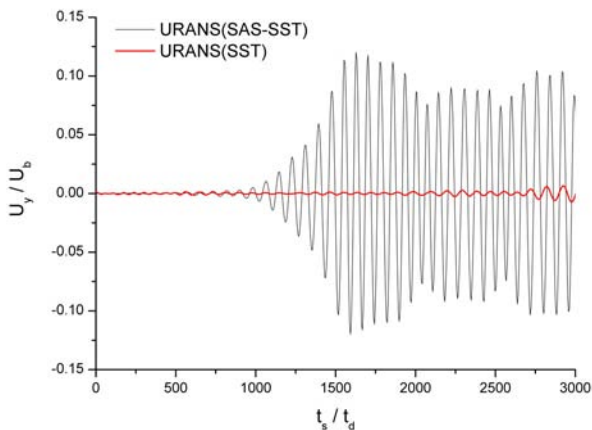


Fig. 4 Normalized lateral velocity profile at the center of a gap

3.2 횡방향 속도성분 (U_y / U_b)

Fig. 4는 축방향으로 x/H 가 26.5이고 횡방향으로는 협소유로 중심($y/H=0, z/H=0$)인 지점에서 URANS(SST)와 URANS(SAS-SST)에 의해서 계산된 횡방향 속도성분을 무차원화하여 시간변화에 따라 나타낸 것이다.

시간은 수치계산시간(simulation time, t_s)을 시간간격(t_d)으로 무차원화하여 나타냈다. 입구와 출구가 주기조건이므로 약 1200~1500에서 축방향 유동이 RANS시와 유사해졌으며, 그 이후 횡방향 속도성분이 발견되었다. URANS(SST)의 경우 횡방향 속도성분의 크기가 URANS(SAS-SST)의 결과에 비해서 매우 작게 나타나고 있다. 이러한 결과는 유로단면 전체로 보면 Fig. 3(b)와(c)의 축방향 속도분포 결과와도 잘 일치한다. 따라서 횡방향 속도성분에 대한 맥동유동분석을 위해서 URANS(SAS-SST)의 결과를 이용하여 나타내고자 한다.

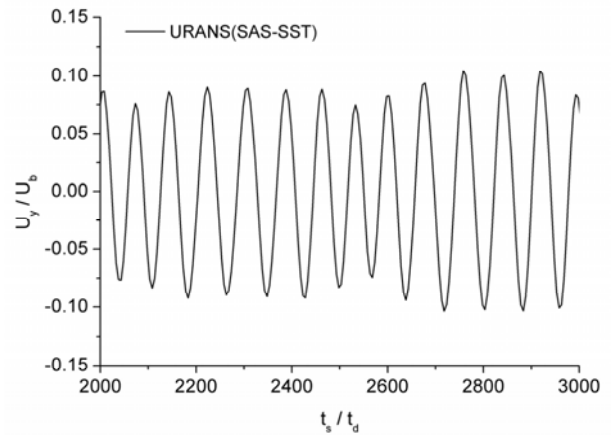


Fig. 5 Normalized lateral velocity profile at the center of a gap

Fig. 5는 협소유로에서 시간 간격 (t_s / t_d) 2000~3000까지 횡방향 속도성분을 나타낸 것이다. 축방향 평균속도의 20%정도 값을 가지고 진동하는 것을 보여준다.

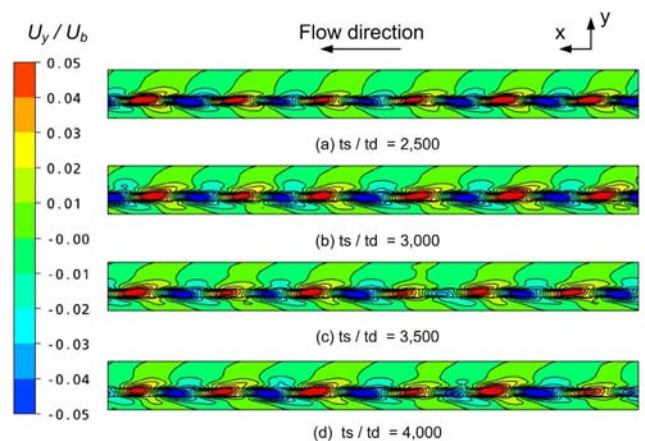


Fig. 6 Instantaneous lateral velocity component contour (U_y / U_b) of URANS(SAS-SST) at the plane with $z/H = 0$

Fig. 6은 x-y 평면($z/H=0$)에서 횡방향 속도성분의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 협소유로 주위를 따라 축방향으로 계속 방향이 변화하는 것을 보여주고 있다.

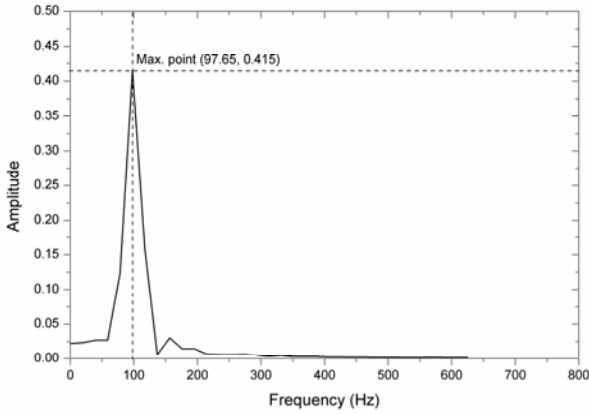


Fig. 7 Spectra on the lateral velocity component (U_y) of URANS (SAS-SST) at the position with $x/H=26.5$, $y/H=0$ and $z/H=0$

Fig. 7은 협소유로의 중심($y/H=0$)인 위치에서 URANS (SAS-SST)의 횡방향 속도성분(U_y)에 대하여 시간에 대한 주파수분석(FFT)를 한 결과를 나타낸 것이다.

시간에 대한 대표 주파수(frequency) 값은 97.65Hz을 나타내고 있다. 일반적으로 주기유동에 관한 대표적인 무차원수로 스트로할 수(Strouhal number)를 사용한다. 스트로할 수는 식(1)과 같이 표현되며, f 는 주파수, L 은 특성길이, V 는 특성속도를 의미하게 된다. 주파수 분석에 의해서 구한 주파수 값을 이용하여 현재 기하학적인 형상에 대한 스트로할 수를 하고자 한다.

$$St = f \frac{L}{U_b} \quad (1)$$

본 연구에서는 속도척도(V)는 단면 평균 속도 값 U_b 을 사용하였다. 길이척도에 대해서는 맥동유동의 제한하는 특성길로서 협소유로의 높이(h), 평균 폭 넓이로 설정하면 협소유로를 지나는 맥동유동의 스트로할 수는 0.03, 0.193을 가지게 된다. 하지만, 시간에 따른 유동분포를 보면 협소유로는 맥동 유동의 생성에 관계하고 맥동유동의 자체에 대해서는 횡방향 유로 길이인 폭의 넓이가 더 지배적일 수 있다고 생각된다. 기하학적인 형상에 대한 변수는 다양하게 표현될 수 있으므로 이 부분에 관한 연구는 추가적으로 진행되어야 할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다른 단면적을 가지는 평행한 두 채널에서 발생하는 맥동유동에 대하여 RANS와 URANS를 이용하여 수치 해석을 수행하였고, 그 계산된 결과를 실험결과[3]와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 축방향 평균속도 분포의 경우 RANS와 URANS 모두 잘 예측하였으나, RANS 경우 협소유로 근처로 갈수록 오목하게 나타나는 현상을 예측하지는 못했다.
- (2) 협소유로를 따라 발생하는 맥동유동은 약 100Hz의 주파수를 가지는 주기유동임을 확인하였다.
- (3) 사각유로와 협소유로의 기하학적인 특성을 조사하기 위해서 기하학적인 변수를 변화시켜 수치해석연구가 추가적으로 진행되어야 한다. 또한 협소유로에서 발생하는 맥동유동은 난류혼합특성에 의해서 발생한 것이라 예측되며 대형와기법과 같은 비대칭난류 해석기법을 사용한 추가연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터(KSC-2007-S00-1023)의 지원을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] S.V. Möller, 1992, "Single-phase turbulent mixing in rod bundles", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.5, No.1, pp. 26~33
- [2] L. Meyer and K. Rehme, 1992, "Large-scale turbulence phenomena in compound rectangular channels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 286~304
- [3] C.M. Lee, S.K. Yang, S.Y. Chun, M.K. Chung and Y.C. Rhim, 1998, "Experimental study on turbulent mixing in two parallel channels", *Proc. of the KSME(B)*, pp. 604~609
- [4] CFX-11 Solver Theory, Ansys Inc., 2007
- [5] F.R. Menter and Y. Egorov, 2006, "SAS turbulence modeling of technical flows", *ERCOFTAC SERIES 06*;10:687.