

받음각이 큰 평판 채널 내의 역류 유동 해석

최승* · 손창현†

Flow Analysis of Reverse Flow in a Channel with High Angle of Attack

Seung Choi and Chang Hyun Sohn

Abstract. Reverse flow occurs in a channel when there is an obstruction at the entry. However it has been shown recently that reverse flow can be realized without an obstruction, by staggering the sides of the channel and placing it at an angle of attack to the oncoming flow. In this study the latter flow is computationally investigated. Studies have been carried out for different widths (gap between the two walls forming the channel), and at an angle of attack of 30. The results have captured all the essential features of this complex phenomenon and show the time dependent pumping mechanism which leads to the occurrence of reverse flow.

Key Words: Reverse flow(역류 유동), Channel with staggered sides(평판 채널 유동), Unsteady Flow(비정상 유동), CFD

1. 서 론

평판 채널의 입구 부에 장애물이 존재하는 경우, Fig. 1에서와 같이 장애물과 채널 입구의 간격(g)을 조정함에 따라 채널 내부에 주 유동 방향과 같은 방향, 정체 유동 또는 반대 방향의 역류유동을 만들 수 있다.

유입구에서 간단한 장애물의 설치로 채널 내부의 유동의 방향을 자유로이 제어 할 수 있다는 점은 매우 흥미 있다. 이러한 유동이 발생하는 예나 응용 예는 낮은 속도가 필요한 흐름제어, 국부적으로 흐름의 방향이 주 유동과 반대방향이 필요한 열전달문제, 각기 다른 거리에서의 전단층의 상호작용, 일정한 생리학적 상태 하에서의 동맥의 흐름에서 폐색/협색 부위를 지나는 흐름 등의 경우가 있을 수 있다.

Gowda and Tulapurkara 는 채널 내부에 역류 유동이 발생하는 것을 처음 보고하였다¹⁾. 평판과 장애물 사이의 거리가 큰 경우에는 역류유동이 관찰되지 않았으나,

입구의 레이놀즈 수에 대해서 채널 폭과 장애물가의 거리 비인 g/W 가 특정 길이 이하로 값이 줄어들면 장애물과 두 평판 사이에서는 주 유동과 반대되는 역류유동이 관찰되었다.

Gowda는 사각, 원, 삼각, 반원 등 장애물 형상에 따른 영향을 연구하였으며²⁾, Tulapurkara 는 장애물을 채널의 앞부분과 뒷부분 모두 설치한 경우를 실험하였다³⁾.

Gowda는 장애물을 채널의 앞부분에만 설치한 경우와 채널의 앞부분과 뒷부분 모두 설치한 경우를 비교하였으며⁴⁾, 역류유동이 장애물에 의한 낮은 압력이 역류를 일으키는 계기를 제공하고 채널 출구에서의 주유

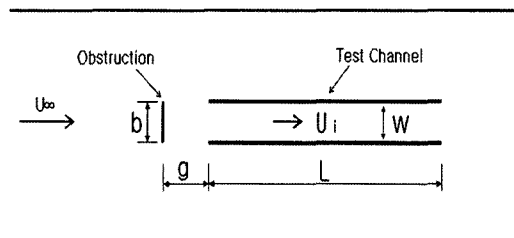


Fig. 1. Realization of reverse flow

†경북대학교 기계공학부

E-mail: chsohn@knu.ac.kr

*경북대학교 기계공학부 대학원

동과 채널내부유동의 속도차이로 생성된 볼텍스 유동에 의해 역류유동이 펌핑되는 메커니즘으로 설명하였다⁵⁾. 그리고 Kabir 는 레이놀즈 수 9000까지 역류 유동을 가시화 하였으며^{6,7)}, Gowda and Tulapurkar의 결과와 유사 하였다. Kabir는 g/W 가 1.5일때 역류 유동이 가장 강하게 나타난다는 Gowda and Tulapurkara의 결과를 확인하였다. 독립적으로 Bhuian은 비뉴턴 유체에서도 역류 유동을 관찰하였으며⁸⁾, Kumar 등은 입구에 장애물이 있는 경우 수치 해석을 통하여 역방향으로 유체가 펌핑되는 현상을 계산하였다⁹⁾.

최근 Tulapurkara는 입구에 장애물이 없더라도 역류 유동이 발생하는 것을 실험으로 보여주었다^{10,11)}. 이는 채널의 벽을 엇갈리게 배열하고, 유입되는 방향을 기준으로 일정 받음각을 줌으로써 역류 유동을 발생시킬 수 있음을 보여주었고, 역류유동을 증가시킬 수 있는 각도를 보고하였으며, 엇갈리게 배열한 앞부분의 영향과 뒷부분의 영향을 실험적으로 연구하였다.

본 연구에서는 장애물이 없는 경우, 받음각이 30도로 큰 평판 채널에서의 역류 유동 특성을 전산유동 해석을 통하여 평판의 폭의 변화에 따른 영향과 평판의 앞부분 또는 뒷부분만의 엇갈림 구조에 대한 유동 특성을 파악하고 역류 유동이 생성되는 메커니즘에 대하여 규명하고자 한다.

2. 수치해석

Figure 2 와 Table 1는 본 연구에서 CFD 해석에 사용한 형상과 치수를 보여 주고 있다. 모든 경우에서 양 채널 벽면의 엇갈림(S) 정도는 50 mm로 하였으며, 이는 이전의 실험 연구자의 동일한 실험 형상을 기본으로 하였다. Case 1에서 Case 3는 앞부분과 뒷부분 모두 상판과 하판의 길이를 어긋나게 배열하였고 (Fig. 2(a)), 평판의 폭만을 변화시켰다. Case 4는 평판의 폭이 15 mm의 경우로 뒷부분만 상하 평판이 어긋나게 배열하였으며, Case 5는 앞부분만 상하평판을 어긋나게 배열

Table 1. Detail of test section

	L_1 (mm)	L_2 (mm)	W (mm)
Case1	200	200	10
Case2	200	200	15
Case3	200	200	30
Case4	150	200	15
Case5	200	150	15

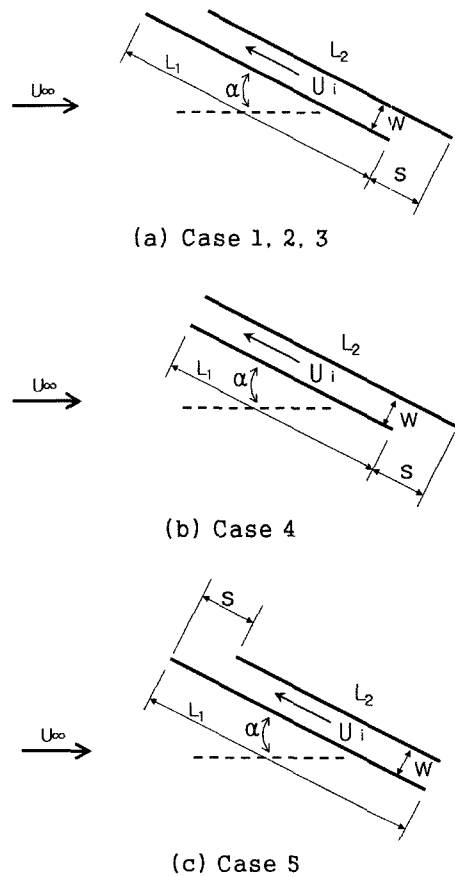


Fig. 2. Configurations considered.

하였다. Fig. 3은 CFD 해석을 수행하기 위한 기본 형상을 나타낸 그림이다.

계산에 사용된 계산 영역의 유입구 위치는 평판길이의 약3배로 하였고, 후류가 생성되는 영역의 길이는 약 7배로 정하였다.

Figure 4는 CFD 해석에 사용된 격자의 예를 보여주

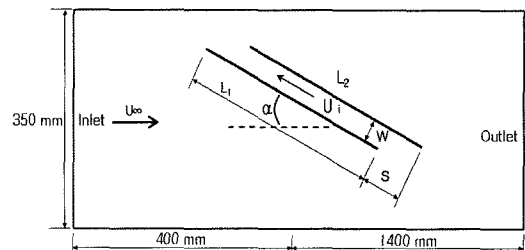


Fig. 3. Computational diagram for CFD analysis.

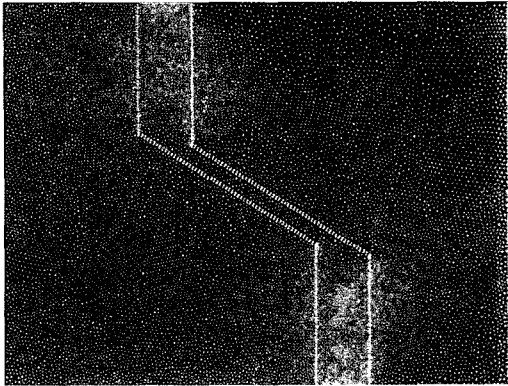
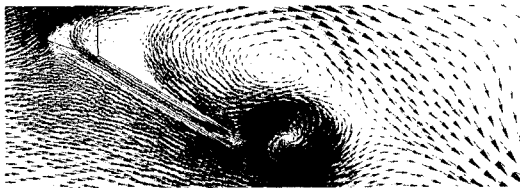
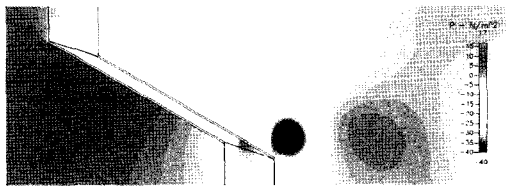


Fig. 4. Typical unstructured grid used.



(a) velocity vector for Case 1



(b) pressure contours for Case 1

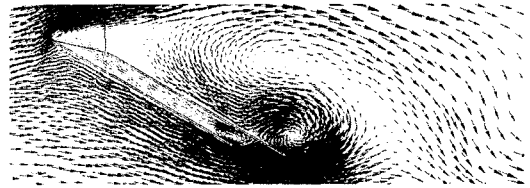
Fig. 5. Velocity vector and pressure contours for Case 1.

고 있다. 비정렬 구조를 사용하였으며, Cell수는 95510~102264 개 이다. 비정상 Navier-Stokes 방정식은 유한 체적 기법을 사용하는 상용프로그램인 CFD-ACE를 사용하였다¹²⁾.

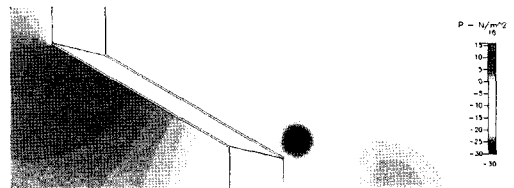
경계조건은 입구에서 0.1 m/s의 균일한 분포의 속도 조건을 주었으며, 출구에서는 대기 조건의 압력 조건을 적용하였고, 벽면에서는 벽면조건(no-slip)을 사용하였다. 계산은 모든 변수들의 오차가 10^{-6} 까지 감소 할 때까지 수행하였고, 격자의 변화에 따른 계산 결과의 독립성을 확인 하였다.

3. 수치해석 결과

유입되는 속도가 모든 경우 0.1 m/s이며, 평판의 간격 W 를 기준 길이로 정의한 레이놀즈수는 1000~3000



(a) velocity vector for Case 2



(b) pressure contours for Case 2

Fig. 6. Velocity vector and pressure contours for Case 2.

의 값을 가진다.

Figure 5는 채널 벽면 사이의 간격이 10 mm 이고, 채널의 받음각이 30도인 경우의 속도 벡터와 압력 분포를 보여 주고 있다. Fig. 5(a)에서 평판 사이의 역류 유동을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 5 (b)의 평판 뒷부분의 상판과 하판의 어긋남으로 인하여 주 유동이 상판 아래 면에 부딪히게 되어 이 부위에서 강한 압력이 생성됨을 볼 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건이지만 평판의 간격이 15 mm로 증가한 경우이다. 유동의 특성은 Fig. 5의 Case 1과 유사하지만 역류 유동의 강도가 더 강하게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 평판 간격이 15 mm인 경우 평균 속도가 0.022 m/s로 계산되었으며, 이는 실험결과 0.02 m/s와 잘 일치한다.

Figure 7은 Case 2경우의 평판 사이 중심선을 따라 압력분포의 평균 값을 구한 것이다. 이 그림을 보면 입구에서 하판의 경사각도로 인하여 유동의 박리가 발생하고 이로 인해 압력이 감소하며, 채널을 따라 일정한 압력으로 유지되다가 평판의 뒷 부분에서 압력이 급격히 변화 함을 알 수 있다. 압력이 최대인 위치는 상판이 주 유동과 부딪히는 위치이며, 가장 낮은 압력 위치는 Fig. 6 (a)에서 볼 수 있는 채널 뒷부분에서 생성된 볼텍스 위치이다. 이러한 압력의 차이는 평판 내부의 역류 유동을 일으키게 하는 힘으로 작용한다.

Figure 8 (a)는 평판간격이 15 mm인 Case 2의 Tulapurkara의 실험 결과로 입자의 궤적을 순간 촬영한 사진이다. 수치 계산한 CFD 속도 벡터 Fig. 8(b)와 비교하면 실험의 유동패턴과 유사함을 확인할 수 있다.

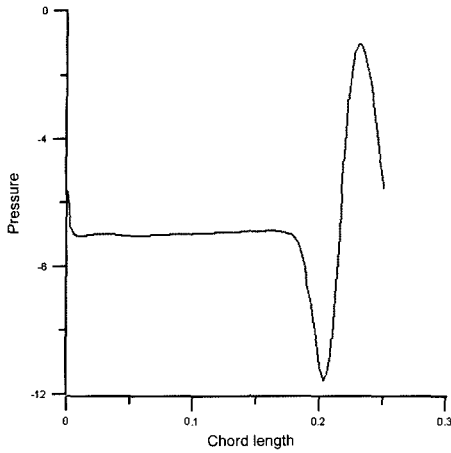


Fig. 7. Magnitude of pressure along center line of channel; Case 2.

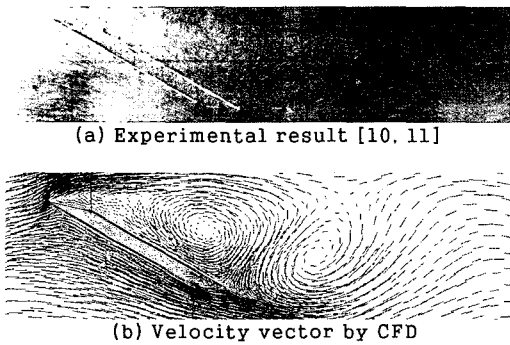


Fig. 8. Velocity vector by CFD and Experimental result; Case 2.

Figure 9는 평판 간격이 30mm로 큰 경우이며, 순간 속도 벡터를 살펴보면 평판 내부에 Case 1과 Case 2와는 달리 복잡한 볼텍스의 형성을 볼 수 있다. 이러한 연속된 볼텍스의 영향으로 평판 내부에서 발생된 역류 유동의 강도는 상당히 미약하였다. Fig. 9(b)의 뒷전 상판에서의 압력크기도 큰 평판 사이의 간격으로 주 유동과의 부딪히는 영향이 약하여져서 작아 짐을 알 수 있다.

Figure 10은 평판의 어긋남이 앞부분에서는 없고 뒷부분에서만 상하 평판이 어긋나게 배열한 것이며, 이 경우에는 역류 유동이 발생하지 않았다. 압력분포를 나타낸 Fig. 10 (b)에서 보면 앞부분의 상판에서 주 유동과 부딪히게 되어 강한 압력이 채널 입구 부위에서 생성되고 이로 인해 주유동 방향과 같은 방향으로 채널

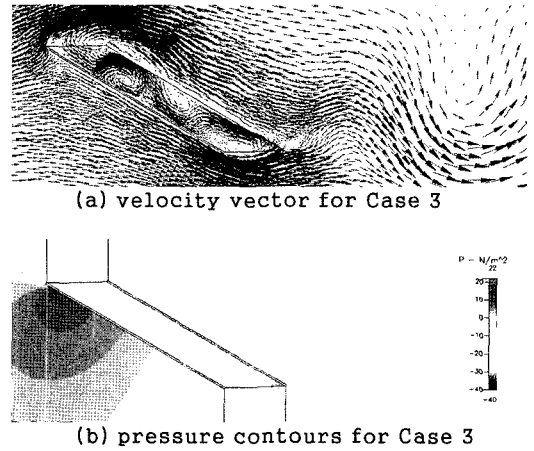


Fig. 9. Velocity vector and pressure contours for Case 3.

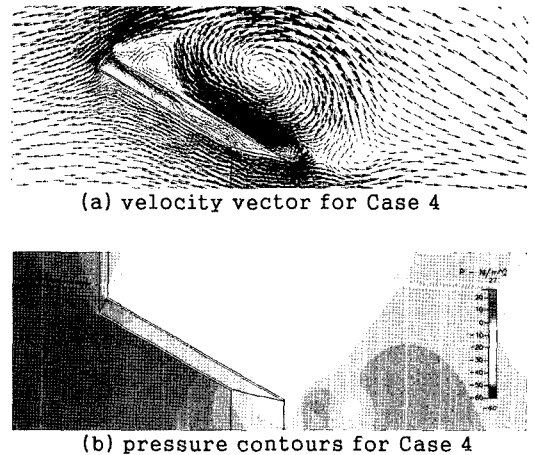
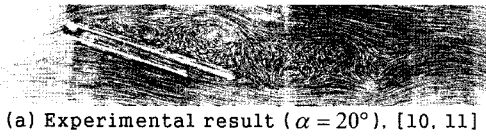


Fig. 10. Velocity vector and pressure contours for Case 4.

내부 속도가 형성되었다. 이러한 결과는 선행 연구자의 실험과 유사한 결과이다.

Figure 11 (a)는 Cases 4의 경우와 유사하며, 단지 평판의 받음각이 20°인 Tulapurkara의 실험 결과로 입자의 궤적을 순간 촬영한 사진이다. 수치 계산한 속도 벡터의 결과는 받음각이 30°로 다르지만 실험의 유동패턴과 비교를 위해 나타내었다.

Figure 12는 뒷부분은 상하평판이 어긋나지 않으며, 앞부분에서만 어긋나게 한 Cases 5의 속도 벡터와 압력분포를 나타낸 것이다. Cases 5에서는 이전 연구자의 실험 결과와 같이 역류 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 뒷전에서의 상하 평판의 어긋남에

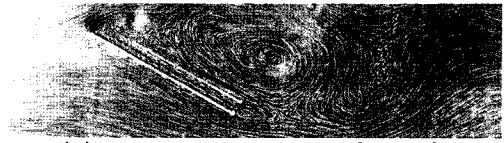


(a) Experimental result ($\alpha = 20^\circ$). [10, 11]

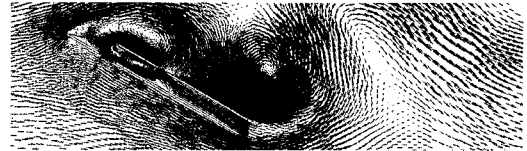


(b) Velocity vector by CFD ($\alpha = 30^\circ$)

Fig. 11. Velocity vector by CFD and Experimental result; Case 4.

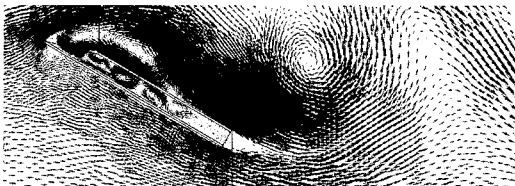


(a) Experimental results [10, 11]

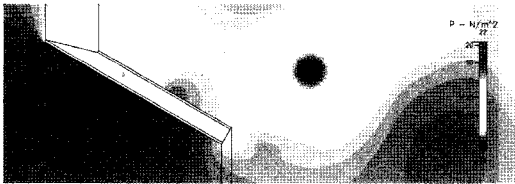


(b) Velocity vector by CFD

Fig. 13. Velocity vector by CFD and Experimental result; Case 5.



(a) velocity vector for Case 5



(b) pressure contours for Case 5

Fig. 12. Velocity vector and pressure contours for Case 5.

의해 발생하는 압력의 영향보다 앞부분에서 박리로 인해 발생하는 압력의 저하가 역류를 발생하게 하는 주요한 원인임을 말해주고 있다.

Figure 13 (a)는 Tulapurkara의 실험 결과로 입자의 궤적을 순간 촬영한 사진이다. 수치 계산한 평판 중심의 평균속도는 이전 연구자의 실험값과 유사하였다.

4. 결 론

본 연구는 평판을 엇갈리게 배열한 채널 내부에서 발생하는 역류유동의 복잡한 유동특성을 CFD 해석을 통해 역류 유동이 일어나는 메커니즘을 규명하고자 수행하였다. 수치 계산한 결과들은 기존의 실험결과와 비교하여 잘 일치하였다. 어긋난 두 평판에서의 역류 유

동은 앞부분에서 발생한 박리로 인한 저압과 뒷전에서 발생한 주 유동과의 충돌로 발생된 고압의 차이로 발생함을 알 수 있었다. 두 평판의 간격이 커지면 뒷부분에서 발생하는 주 유동과의 충돌 현상이 감소하여 역류유동의 세기가 감소한다. 앞부분에 상하 평판의 어긋남이 없고 뒷부분에만 평판의 어긋남이 있는 경우는 상부 평판에서의 유동의 정체로 인해 채널 입구에 고압이 생성되어 순방향 유동이 발생된다. 이와는 반대로 앞부분에만 상하평판의 어긋남이 있는 경우는 역류유동이 발생하여 뒷부분의 압력의 영향보다 앞부분에서 박리로 인해 발생하는 압력의 저하가 역류를 발생하게 하는 주요한 원인임을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Gowda, B.H.L., Tulapurkara, E.G , 1989, "Reverse Flow in a Channel with an Obstruction at the Entry", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 204, pp. 229-244.
- 2) Gowda, B.H.L., Tulapurkara, E.G, Swain, S. K., 1993, "Reverse Flow in a Channel-Influence of Obstruction Geometry, *Experiments in Fluids*", vol.16, pp. 137-145.
- 3) Tulapurkara, E.G, Gowda, B.H.L. , 1994, Swain, S. K., 1994, "Reverse Flow in a Channel-Effect of Front and Rear Obstructions", *Phys. Fluids*, vol. 6, pp. 3847-3853.
- 4) Gowda, B.H.L., Tulapurkara, E.G, Swain, S. K., 1997, "Influence of Splitter Plate on the Reverse Flow in a Channel", *Fluid Dynamics Research*, vol.21, pp. 319-330.
- 5) Gowda, B.H.L., Tulapurkara, E.G, Swain, S. K., 1998,

- “On the Mechanism of Reverse Flow in a Channel with an Obstruction at the Entry, *Fluid Dynamics Research*”, vol.23, pp. 177-187.
- 6) Kabir, M.A., Kabir, M.M.K., Bhuiyan, M.A., 2003, “A study of the flow phenomenon of water in a channel with flat plate obstruction geometry at the entry”, *KSME Int. J.*, vol.17, pp.879-887.
 - 7) Kabir, M.A., Kabir, M.M.K., Bhuiyan, M.A., 2004, “Flow phenomenon in a channel with different shaped obstructions at the entrance”, *Fluid Dynamic Research*, vol.35, pp.395-408.
 - 8) Kabir, M.A., Kabir, M.M.K., 2000, “Reverse flow of a non Newtonian fluid in a channel, *Rheology Congress*”, Cambridge UK, vol.3, pp.417-418
 - 9) Kumar S. K., Tulapurkara E.G, Biswas G and Gowda B.H.L., 2005, “Reverse flow in a channel with obstruction at entry, *Fluid Dynamic Research*”, vol.37, pp.387-398.
 - 10) Tulapurkara, E.G, Gowda, B.H.L., Nijith N., 2004, “Manath, Experimental Study of Reverse Flow in a Channel without Obstruction at the Entry, *Proceedings*”, 31st National Conference on FMFP, December 16-18, pp. 1-8.
 - 11) Tulapurkara, E.G, Gowda, B.H.L., Manath, Nijith N., Sohn, C.H., “Experimental Study of Reverse Flow in a Channel without Obstruction at the Entry”, *J. of Flow Visualization and Image Processing*, vol. 13, No. 4, pp.1-14.
 - 12) Huntsville, Alabama, 2004, “Modules Manual”, ESI US R&D Inc, CFD-ACE(+) V2004.