

C형 Diffuser 유동해석

신동신 (홍익대학교 기계공학과)

허남건 (서강대학교 기계공학과)

1. 서론

유체기계의 설계에 있어서 실험에만 의존하는 기존의 법은 시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 많은 비용을 요구한다. 따라서 많은 설계자들은 기하학적 형태 및 부하조건이 다른 경우에 경제적이며 신속하고 용이하게 적용할 수 있는 해석 프로그램을 필요로 한다. 해석 프로그램에 위한 방법은 그 결과를 빠른 시간 내에 알 수 있는 장점이 있으며, 그리고 파라메타 변화에 의한 결과를 쉽게 예측할 수 있어 실험에 소요되는 시간과 비용을 절약할 수 있다는 장점을 가진다. 본 연구는 위와 같은 유체기계 설계자의 요구를 염두에 두고 유체기계의 설계에 적용할 수 있는 유동해석 프로그램을 사용하여 일반적으로 많이 사용되는 C형 Diffuser의 유동을 해석하였다. 한국과학기술원 열-유체공학연구에서 개발된 프로그램인 TURBO-3D¹⁾가 근간을 이루는 본 유동해석 프로그램은 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 일반 비직교좌표계를 사용하여 유한체적법에 근간을 둔 비엇갈림격자계를 사용하며 직교좌표 속도성분을 종속변수로 한다. 대류항의 처리에는 상류차분법을 사용하며 압력항처리는 SIMPLE 또는 SIMPLER algorithm²⁾을 이용하였다. 이산화된 선형대수방정식을 풀기 위하여 압력방정식에는 CGM³⁾을, 그 이외에는 SIP⁴⁾를 사용하며 압력의 decoupling 현상을 방지하기 위하여 Rhie와 Chow의 운동량보간⁵⁾을 사용하였으며 층류 및 난류유동의 해석이 가능하도록 하여 유체기계의 설계에 사용할 수 있도록 하였다.

2. 수치해석

일반 비직교좌표계를 사용하는 본 해석프로그램은 유한체적법에 근간을 둔 비엇갈림격자계를 사용하며 직교좌표 속도성분을 종속변수로 한다. 지배

신동신/홍익대 기계공학과/1960년생/열·유체역학 전산열유체를 전공하였으며, 유체기계에 관심을 가지고 있다.

허남건/서강대 기계공학과/1957년생/전산유체역학, 난류모델링을 전공하였으며, 유체기계에 관심을 가지고 있다.

방정식은 비정상항을 무시한, 밀도가중평균의 질량, 운동량, 스칼라양 보존방정식이다. 난류유동을 해석하기 위하여 응력텐서 T_{mn} 를 표현하는데 사용되는 점성계수 μ 를 난류의 효과를 포함하는 유효점성계수로 사용한다. 이 경우 유효점성계수를 구하는 방법에 따라 여러 가지 난류모델이 존재하나 여기서는 가장 많이 사용되고 있는 표준 방정식 난류모델을 사용한다. 이 난류모델은 난류운동에너지 k 와 그 소산율 ϵ 에 대한 두개의 추가적인 방정식을 해석하여 난류점성계수를 구하는 방법으로 k 방정식은 난류운동에너지의 배분을 나타내며, ϵ 방정식은 에너지 소산율의 배분을 나타낸다. 각 지역에서의 k 와 ϵ 의 값들로부터 국소난류점성계수를 계산하여 난류전단응력을 구하게 된다.

Peric⁶⁾의 기법을 따라 유한체적법을 이용하여 위의 지배방정식을 이산화 한다. 미소검사체적에 대한 체적적분을 Gauss의 이론에 따라 계산 Cell의 여섯 면에 대한 면적분으로 변환하여 차분화된 연속방정식을 구하면 다음과 같다.

$$F_{1e} - F_{1w} + F_{2n} - F_{2s} + F_{3r} - F_{3b} = S_m \quad (1)$$

이는 잘 알려진 질량보존법칙의 적분 공식이며, S_m 은 검사체적에 대한 질량생성 (또는 소멸)을 나타낸다.

운동량 및 스칼라양 방정식의 차분화된 확산항을 적분형태로 구하며, 스칼라양 등은 주위의 값을 보간하여 구한다. 운동량방정식에 나타나는 압력항은 생성항으로 처리한다. 대류항의 계산에 사용되는 검사면에서의 값의 선택은 수치해의 안정성과 정확도에 큰 영향을 미치며, 여러 가지 Scheme(Zhu 등⁷⁾참조)이 개발되어 사용되고 있지만 본 연구에서는 현재 가장 널리 쓰이고 있으며 오류확산(fales diffusion)의 문제는 있으나 수치해의 안정성이 뛰어난 상류차분법(upwind differencing scheme)을 사용하도록 한다. 최종 이산화방정식은 다음과 같다.

$$a_p \phi_p = \sum a_m \phi_m + S_c \quad (2)$$

압력장을 풀기 위해서는 연속방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 algorithm이 필요하다. 본 연구에서는 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용

되는 SIMPLE algorithm을 사용하였으며, 또한, 비엇갈림적자 사용시 발생하는 압력의 decoupling 방지를 위하여 Rhie와 Chow의 운동량보간을 사용하였다. 최종적인 이산화방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 속도 및 스칼라량의 계산에는 SIP을, 압력에는 CGM을 사용하였다. 특히, CGM은 TDMA나 ADI에 비하여 속도나 효율 면에서 월등한 것으로 확인되었으며, solver 자체의 특성상 대칭행렬에 대해서만 해를 구할 수 있으므로 압력장 계산 시에만 사용하였다.

프로그램의 범용성을 구형하기 위해서는 경계 및 좌표계의 사용이외에 실제 문제의 해결에 필요한 다양한 경계조건을 계산영역의 경계면에 부여할 수 있어야 한다. 따라서 본 프로그램에서는 유동 해석시 많이 사용되는 경계조건인 입구, 출구, 대칭면 및 벽면조건을 처리가능하게 하며 이들 조건을 경계면 임의의 위치에 부여할 수 있게 된다. 또한 유동내부에 임의의 장애물이 존재하는 경우 그 인접면을 기억하여 이 면을 벽면으로 자동적으로 처리할 수 있도록 한다. 벽면에서는 no-slip 조건을 일반적으로 사용하나, 난류유동의 경우 벽면에서의 $k-\epsilon$ 모델을 사용하면 벽면에서의 전단응력 값에 오차가 커지게 된다. 따라서 이의 개선을 위한 방법으로 wall function, two-layer model, low Reynolds model 등의 방법이 사용되고 있으나 본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 wall function을 이용하였다.

3. 해석결과

본 연구에서는 그림 1과 같은 C형 Diffuser를 고려하였다. 덕트는 40mm의 간격을 가지는 두 평행한 벽으로 구성되며, 양 측벽은 평균곡률반경이 280mm로써 45°의 휨을 가지는 내벽과 외벽으로 구성된다. 단면적은 입구에서 40mm×40mm이며 출구에서 60mm×60mm이며, 휨이 끝나는 곳에 붙어있는 직선형의 덕트도 고려하였다. 유동은 난류로서 입구 평균속도 10m/s와 수력지름 40mm에 기준한 레이놀즈수는 40,000을 사용하였다. 상하벽의 중심부에 대칭면이 존재하므로 전체 덕트의 절반만을 고려하였으며, 계산격자는 그림 2와 같이 24×40×20을 사용하였다. x_1, u_1 는 각각 유동방향 및 속도를, x_2, u_2 는 각각 반경방향 및 속도를, x_3, u_3 는 대칭면에 수직한 방향과 속도를 나타내도록 한다. 입구조건은 u_1 은 입구평균속도를 사용하였고 u_2 와 u_3 는 각각 0으로 가정하였으며, 난류 에너지의 강도는 5%로 가정하였다.

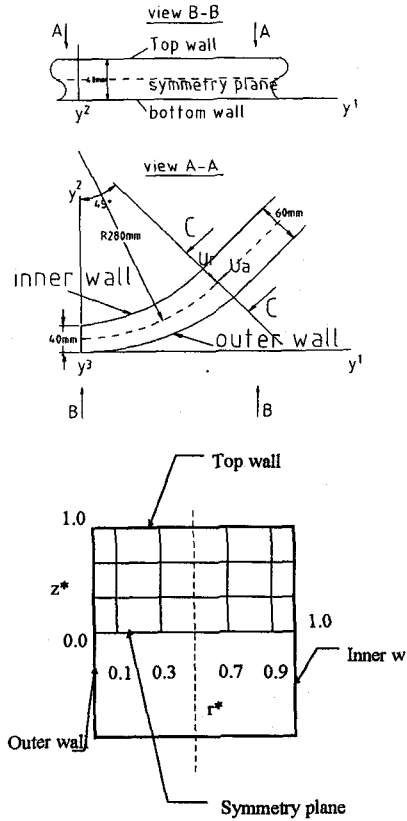


그림 1. C형 Diffuser의 기하학적 형태

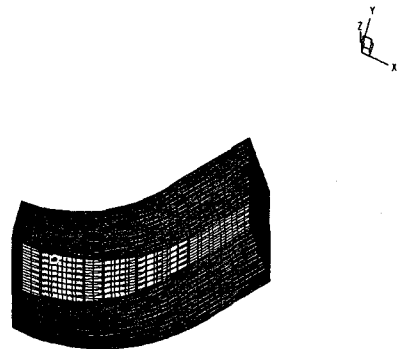


그림 2. C형 Diffuser의 계산격자

그림 3 및 4는 대칭면에서의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림 4의 속도벡터는 디퓨저가 휘어있기 때문에 입구로부터 출구로 진행함에 따라 바깥벽측의 속도가 빨라지고, 안벽측의 속도가 감소하게 됨

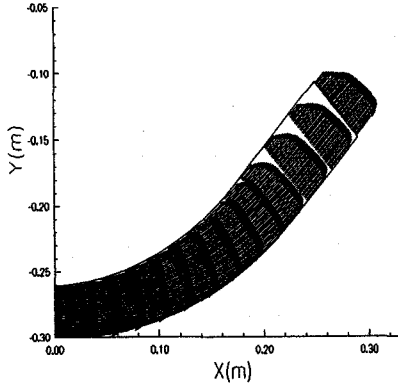
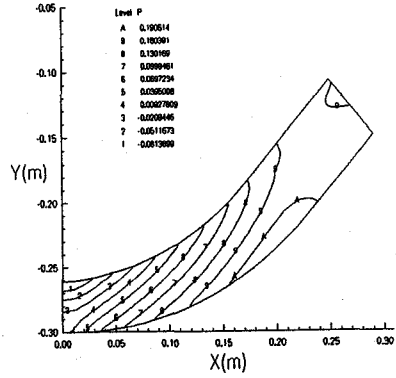


그림 3. 대칭면에서의 속도분포



(a) 대칭면(symmetry plane)

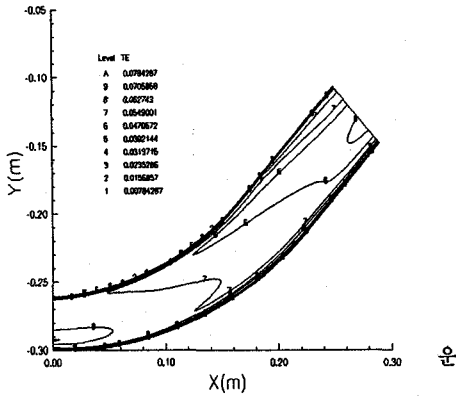
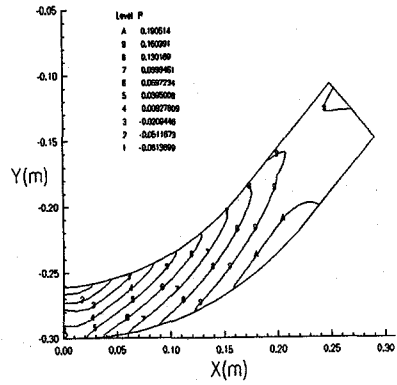


그림 4. 대칭면에서의 난류운동에너지의 강도
(\sqrt{k}/u_{in})



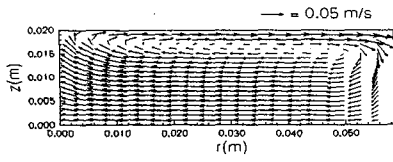
(b) 윗벽면(top wall)

그림 5. 무차원화한 압력분포 ($p/\rho u_{in}^2$)

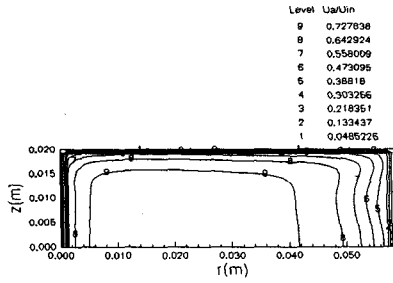
을 보여준다. 속도는 바깥쪽벽으로부터의 무차원화된 반경길이 r^* 가 약 0.2인 부근에서 최고값을 갖는다. 그림 4의 난류운동에너지의 강도 (\sqrt{k}/u_{in})는 높은 값을 가지는 영역이 안쪽벽에서부터 점차 중심쪽으로 옮겨가는 것을 보이고 있다. 이 지역이 속도구배가 큰 영역에 해당하게 된다. 그림 5(a), (b)의 ρu_{in}^2 으로 무차원화한 압력분포는 대칭면과 윗벽면에서 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 반경 방향의 압력구배는 전체영역에 걸쳐 안쪽벽을 향하고 있는데 이는 나중에 알 수 있는 바와 같이 diffuser의 휨에 의한 2차 와류가 존재하기 때문이다. 안쪽벽과 바깥쪽벽사이의 압력차는 약 $0.1 \rho u_{in}^2$

이며, 휘어지기 시작한 면으로부터 출구까지의 압력회복은 약 $0.2 \rho u_{in}^2$ 로서 Rojas et al.⁷⁾의 실험결과와 잘 일치하고 있다.

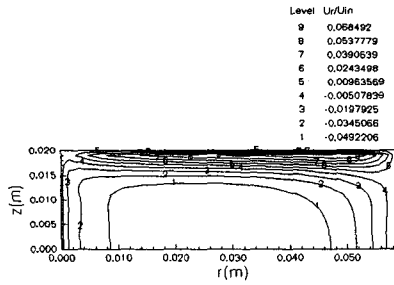
그림 6은 C-C 단면에서의 속도벡터 및 각 속도성분의 contour를 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 속도벡터는 디퓨저가 휘기 때문에 생기는 2차 속도벡터 및 와류(vortex)를 나타내고 있다. 2차 와류의 중심은 약 r^* 가 0.5이고, 대칭면으로부터 윗벽까지의 길이로 무차원화된 z^* 가 약 0.85인 곳에 위치하고 있다. 유동방향 속도성분의 contour는 Rojas et al.의 실험결과와 비슷한 형태를 나타내고 있다.



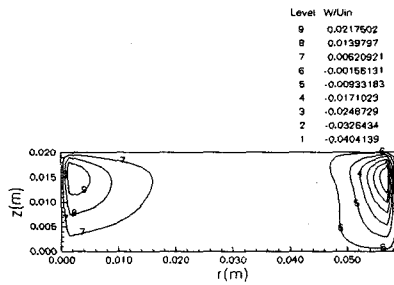
(a) 속도 벡터



(b) 유동방향속도성분의 Contour

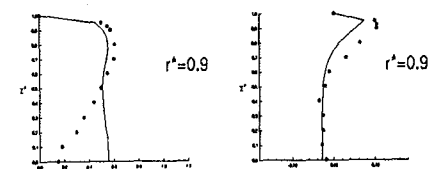
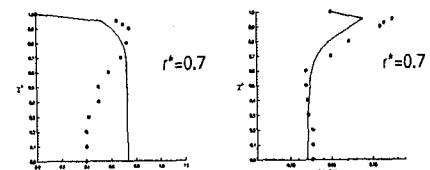
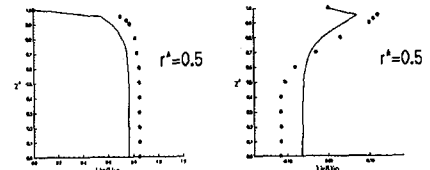
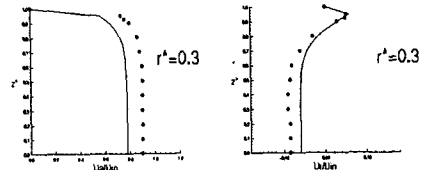
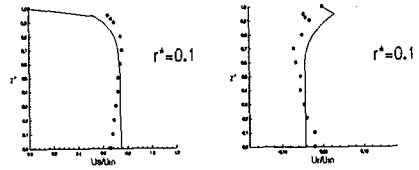


(c) 반경방향속도성분의 Contour



(d) Spanwise 속도성분의 Contour

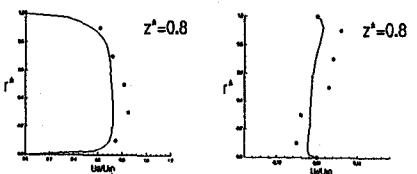
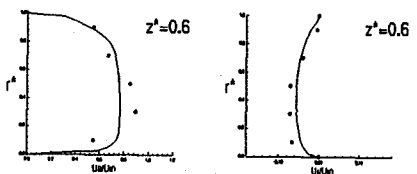
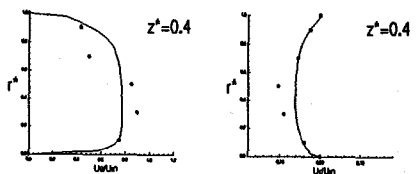
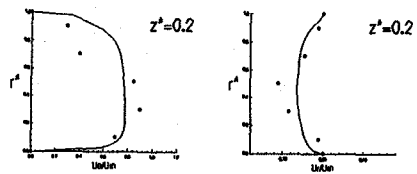
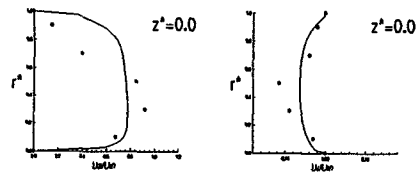
그림 6. 단면 C-C에서의 속도벡터 및 속도분포



(a) u_a/u_{in}

(b) u_r/u_{in}

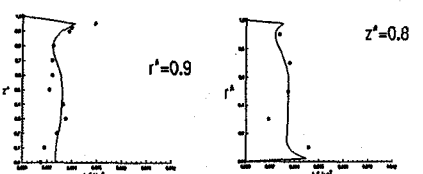
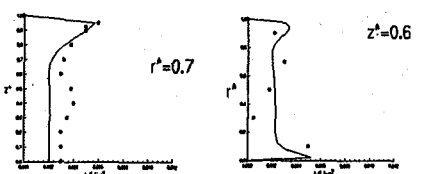
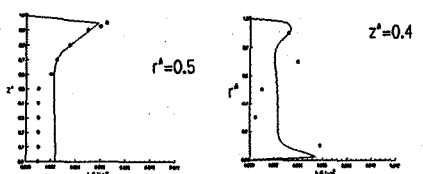
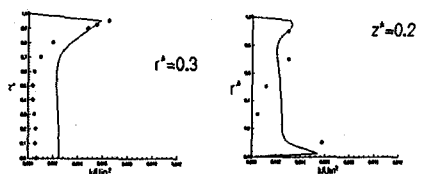
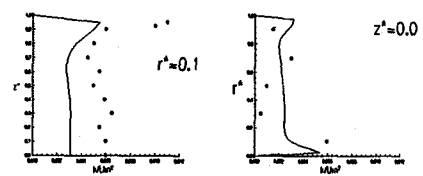
그림 7. C-C 단면에서의 Z^+ 에 따른 속도분포



(a) u_a/u_{in}

(b) u_r/u_{in}

그림 8. C-C 단면에서의 r^* 에 따른 속도분포



(a) 유동방향 분포

(b) 폭방향 분포

그림 9. 난류운동에너지 강도 (k/u_{in}^2)의 분포

그림 7은 C-C 단면에서 다섯 개의 다른 r^* 에서 유동방향속도 및 반경방향의 속도를 z^* 의 함수로 나타낸 것이다. 실선은 계산치를 나타내며, 기호는 Rojas et al.의 실험치이다. 반경방향의 속도인 u_r 은 전 구간에서 걸쳐 계산치가 실험치와 잘 맞는 결과를 보이고 있다. 유동방향의 속도 u_a 는 바깥쪽벽쪽에서는 정성적 및 정량적으로 비슷한 경향을 나타내고 있지만 내벽쪽에서는 예측치가 실험치로부터 벗어남을 보이고 있다. 특히 r^* 가 0.7보다 큰 구간에서 대칭면에 가까운 영역에서 잘 맞지 않고 있는데 이는 입구영역에서 r 과 z 방향으로의 속도분포가 알려져 있지 않아 유동속도방향의 일정속도만을 사용한 데에 기인하는 것으로 생각된다.

그림 8은 C-C 단면에서 다섯 개의 다른 z^* 에서의 유동방향속도 및 반경방향의 속도를 r^* 의 함수로 나타낸 것이다. 계산치와 실험치가 정성적 및 정량적으로 일치하는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 C-C 단면에서의 난류운동에너지의 강도(k/u_m^2)를 r^* 와 z^* 의 함수로 나타낸 것이다. 속도분포와 마찬가지로 난류운동에너지도 실험치와 계산치가 정성적 및 정량적으로 비슷한 경향을 나타냄을 볼 수 있다. 특히 r^* 가 0.9인 경우와 z^* 가 0.8인 경우의 결과는 매우 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

비직교 일반좌표계를 사용하는 유동해석 프로그램인 프로그램을 개발하여 C형 Diffuser 내부의 유동을 해석하였다. 본 프로그램에서는 유한체적법에 근간을 둔 비엇갈림격자계를 사용하며 직교좌표 속도성분을 종속변수로 사용하며, 대류항의 처리에는 상류차분법을 사용하고 압력항처리는 SIMPLE algorithm을 이용하였다. 이산화된 선형대수방정식을 풀기 위하여 압력방정식에는 CGM을, 그 이외에는 SIP을 사용하며 압력의 decoupling 현상을 방지하기 위하여 Rhie와 Chow의 운동량보간법을 사용하였다. C형 Diffuser의 입구조건으로서는 균일한 속도조건을 사용하였다. 내부의 속도벡터 및 난류운동에너지는 디퓨저의 휨에 따른 영향을 잘 나타내고 있으며, 휨이 끝나는 단면에서 2차 순환류 및 와류가 존재함을 알 수 있었다. 단면에서의 속도 및 난류운동에너지는 실험결과와 잘 일치하였다.

본 연구는 교육부학술연구구성비(기계공학분야)에 의한 연구(과제번호 ME95-F-12)로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, 1994, "일반 비직교좌표계를 사용하는 3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발," 대한기계학회논문집, 제 18권, 제12호, pp. 3345~3356.
- [2] Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, DC, pp. 120~125.
- [3] Baeder, J. D., McCroskey, W. J., and Srinivasan, G. R., 1986, "Acoustic Propagation Using Computational Fluid Dynamics," Proceedings of the 42th Annual Forum of the American Helicopter Society, Vol.1, pp.551-562.
- [4] Farassat, F. and Brentner, K. S., 1987, "The Uses and Abuses of the Acoustic Analogy in Helicopter Rotor Noise Prediction, AHS Specialist's Meeting on Aerodynamics and Aeroacoustics, Arlington, TX, pp.25-27.
- [5] Rhie, C. M. and Chow, W. L., 1983, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past and Airfoil with Trailing Edge Separation," AIAA, Vol. 21, pp. 1525~1535.
- [6] Peric, M., 1985, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph. D. Thesis, Imperial College.
- [7] Demirdzic I., Gosman A.D., Issa R.I. and Peric M., 1987, "A Calculation Procedure for Turbulent Flow in Complex Geometries" , Computers & Fluids, Vol.15, No.3, pp.251-273.
- [8] Rojas, J., Whitelaw, J. H. and Yianneskis, M., 1984, "Inlet Condition Effects on Incipient Separation in Curved diffusers," Fluid Section Report, FS/84/31, Mech. Eng. Dept., Imperial College.