

벌류트 압축기내의 난류유동 수치해석

곽 승 현†

(원고접수일 : 2007년 5월 16일, 심사완료일 : 2007년 8월 27일)

Numerical Analysis of Turbulent Flows in the Scroll Volute of Centrifugal Compressor

Seung-Hyun Kwag†

Abstract : The flow analysis was made by applying the turbulent models in the scroll volume of centrifugal compressor. The $k-\epsilon$, $k-\omega$, Spalart-Allmaras and reynolds stress models are used in which the hybrid grid is applied for the simulation. The velocity vector, the pressure contour, the change of residual along the iteration number, and the dynamic head are simulated by solving the Navier-Stokes equations for the comparison of four example cases.

Key words : Scroll volute(스크롤 벌류트), Numerical analysis(수치해석), Turbulent flow(난류 유동), Centrifugal compressor(원심압축기), Finite volume method(유한체적법)

1. 수치시뮬레이션

복잡한 터보기계 임펠러나 로터의 유동에 비해 벌류트 유동의 수치계산은 그렇지 간단치 않다. 벌류트의 유동은 임펠러로부터 디퓨저를 통해 벌류트의 접선방향 입구로 들어오는 유동을 모아 연소하거나 터빈으로 공급하는 단순한 연결 덕트 시스템으로 볼 수 있지만 사각 덕트, 타원 또는 원 모양의 단면을 가진 스크롤 벌류트는 출구 방향으로 진행하면서 단면적이 넓어지고 중심축이 하나의 원으로 구성된다. 임펠러에 연결된 디퓨저의 출구를 지나 입구로 들어오는 벌류트 입구유동은 유체유동이며 이들 입구 및 출구에서 상호작용으로 인해 매우 불안정한 비정상 상태의 복잡한 유동을 발생하기 때문에 원활한 시스

템의 공급을 위해서는 벌류트 내부유동에 대한 연구가 필요하다. 모델을 제작하고 성능을 평가하기 위해 내부유동을 실험에 의해 직접 측정하는 것은 경제적, 시간적 이유로 인해 상당한 어려움이 있다. 압축기의 벌류트를 개발함에 있어 기존의 연구도 벌류트 내부 형상과 같은 직접적인 연구보다는 여러 가지 형상변수들에 대한 성능평가가 주된 결과이었으며 수치해석 보다는 실험에 의존해 왔다. 실험 또한 원주 방향의 전압의 손실과 정압변동 등에 의해 제한된 것 이었다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

수치계산에서는 Spalart-Allmaras 모형은 1개의 난류 수송 방정식을 풀 때 여러 모델 중에서 가장 경제적으로 알려져 있다. 추가적인 수송방정식이 주어지면 표준화된 $k-\epsilon$ 모형이 Spalart-

† 교신저자(한라대학교 컴퓨터응용설계학과 조선해양전공), E-mail: shkwag@halla.ac.kr, Tel:033)760-1233

Allmaras 모형보다 좀 더 많은 계산상의 노력이 필요한 것이 일반적이지만, 지배방정식의 추가 항과 비선형성의 증가 때문에 k-ε 모형보다도 계산시간에 있어서 10-15%가 더 소요되고 있다. k-ε 모형과 마찬가지로 k-ω 모형은 2차식 모형으로 거의 같은 계산상의 노력이 요구된다. k-ε을 k-ω 모형과 비교하면 Reynolds stress model (RSM)은 보다 많은 기억용량과 계산시간이 요구되는데 이것은 RSM의 수송방정식에 기인한다.

그러나 효율적인 프로그램의 계산구조는 각 반복 계산에 있어 계산시간을 상당히 줄여 RSM은 k-ε이나 k-ω와 비교할 때 계산시간을 50-60% 까지 줄일 수 있었다. 더군다나 기억용량은 15-20% 정도만 필요하게 되었다. 매 계산에 소요되는 시간과는 별도로 난류모형의 선택은 수렴된 해를 얻는데 있어서 높은 효율성을 보여주었다. 예를 들면 표준화된 k-ε 모형은 어떤 상황에서는 약간 과도한 확산을 하는 것으로 알려져 있기 때문에 k-ε 모형은 난류점성이 높은 변형률까지 감소되도록 하였다⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾. 실험으로는 일정한 원형단면을 가지는 벌류트 내 유동을 레이저를 이용하여 측정하여 중심부에서의 유동이 강제 회전을 하는 자유 와류형태의 회전운동임을 보여 주고⁽⁷⁾ 축 방향으로 원형 단면이 증가하는 원뿔형의 관을 이용한 실험을 통해 벽 근처에서의 회전속도는 일정하며 중심부에서는 강제 회전하는 와류형태임을 보여 준다⁽⁸⁾. 벌류트 내의 3차원 유동에 대한 실험은 2차 유동이 압력변화 및 속도에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다⁽⁹⁾.

2. 수치시뮬레이션

2.1 기본방정식과 수치조건

기본방정식은 Navier-Stokes 방정식이며 유한체적법의 수치기법으로 혼합격자를 만들어 계산을 수행하였다.

k-ε 을 사용한 수송방정식⁽¹⁰⁾은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

k-ω 을 사용한 수송방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (5)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad \mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (6)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty \cdot \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (7)$$

Spalart-Allmaras을 사용한 수송방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{w2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_\nu \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (9)$$

2.2 격자생성과 경계조건

격자생성은 불린연산(boolean operation)으로 만들었고 혼합체적을 이용하여 굴곡을 주었다. 모든 원천에는 쿠퍼격자법(cooper meshing scheme)을 이용하여 평행을 유지했고 그 밖의 면에는 부도해법(submap meshing scheme)을 사용하였다. 혼합을 해서 만든 면은 쓸기 기능을 이용하여 경사면을 생성하였다. 내부의 격자는 그 래픽 창에서 최종이미지 랜더링 모형(render model)을 사용하였다. 경계조건은 입구면, 출구면, 벽에 속도, 압력 및 구배조건을 부여하였고 공간내부에는 연속형체 조건을 주었다.

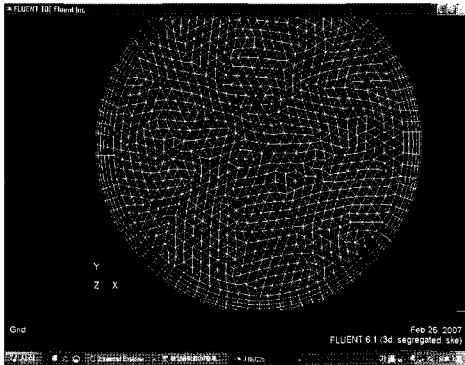
3. 수치해석결과 및 토의

Fig. 1은 벌류트 내부의 격자를 보여준다. 격자는 비구조로 혼합형을 사용하였다. node는

119,123개, cell은 642,156개, 질량유량은 0.6, 레이놀드수는 3×10^5 이다. 격자생성이 매우 복잡해서 쿠퍼 및 부도해 격자법을 사용하였다. 원형단면을 가지는 파배기형태의 원심압축기 벌류트 내부유동을 수치적으로 해석하기 위해 다중블록기법을 사용하였다. 유동의 진행방향에 대해 단면적이 넓어지는 형상의 물체를 단일블록으로 계산하는 것은 계산상 비효율적이다. 그래서 벽 근방에는 사각형(tetra)격자를 단면의 중심에는 육각형(hexa)의 격자를 생성하였다. Fig. 1(a)는 좌표축 및 전체적인 격자형상을 보여주며 Fig. 1(b)는 입구 면에서의 확대된 모양을 보여준다.



(a) grid generation

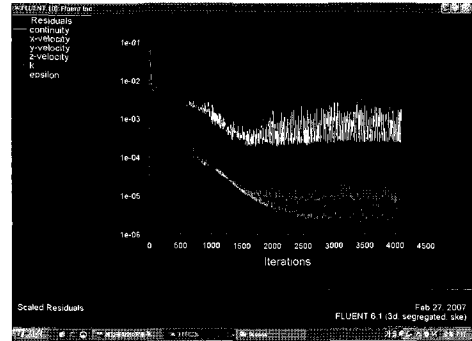


(b) volute

Fig. 1 Grid view of scroll volute

Fig. 2는 $k-\epsilon$ 난류 모형을 사용한 해석결과를 보여주고 있다. 가장 널리 사용되는 2방정식 모델이고 급격한 형상의 변화가 없고 박리가 일어나지 않는 영역에서의 난류유동 모사에는 $k-\epsilon$ 방정식이

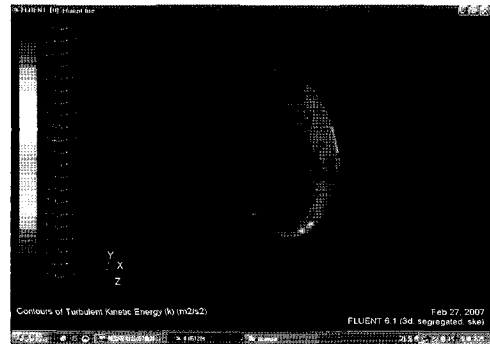
효과적이다. 벌류트 내부유동의 수렴은 Fig 2(a)의 잔류값을 보면 알 수 있는데, k 및 ϵ 잔류값이 10^{-5} 을 유지하고 있다. Fig. 2(b)는 동압을 Fig. 2(c)는 난류운동에너지를, Fig. 2(d)는 $y+$ 분포를, Fig. 2(e)는 z 축 중심의 와분포를 보이고 있다. 동압이나 난류운동에너지의 결과를 보면 단면 전체에 유동박리의 흔적을 보이지 않고 난류경계층이 잘 형성되어 있음을 확인할 수 있다.



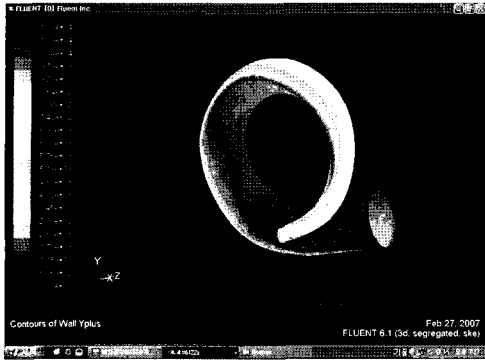
(a) residual values



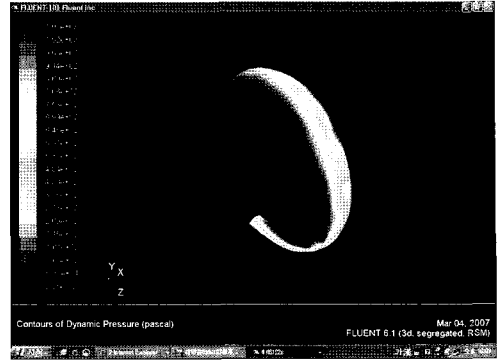
(b) dynamic pressure



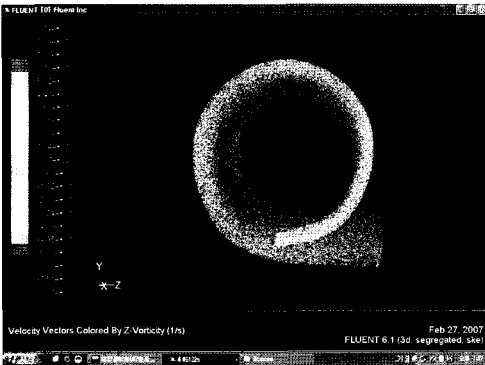
(c) turbulence kinetic energy



(d) wall y+ contour



(b) dynamic pressure



(e) z-vorticity contour

Fig. 2 Computation of $k-\epsilon$ turbulence model

Fig. 3은 Reynolds stress model (RSM)을 사용한 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 잔류값인데 w 응력요소가 큰 진폭을 나타내고 있으나 연속방정식을 제외한 다른 변수들은 수렴과정을 잘 보여 준다. Fig. 3(b)는 동압을, Fig.

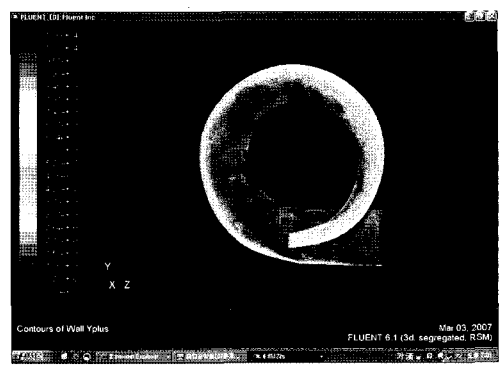
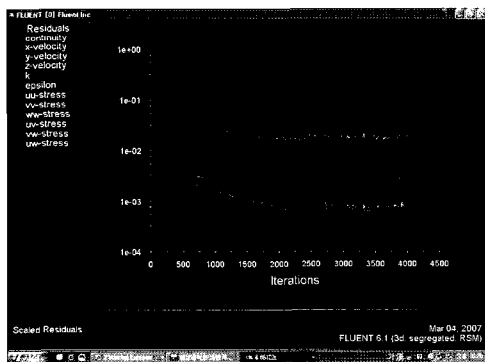


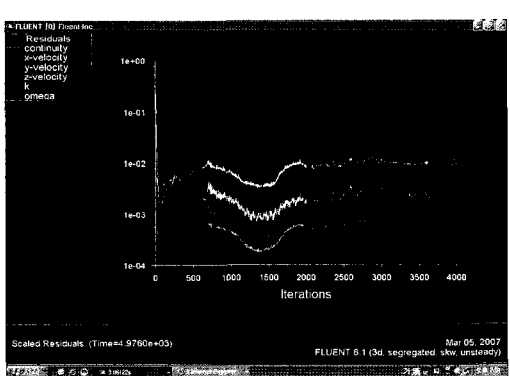
Fig. 3 Computation of RSM turbulence model

3(c)는 $y+$ 분포를 보여주는데 동압의 결과는 $k-\epsilon$ 해석결과와 유사한 결과를 보인다. $y+$ 분포를 보면 난류경계층이 적절히 형성되어 있음을 재확인할 수 있다.

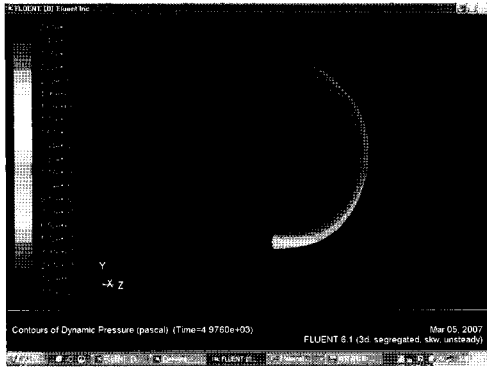
Fig. 4는 $k-\omega$ 모형을 사용한 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 잔류 값이 10^{-2} 와 10^{-3} 사



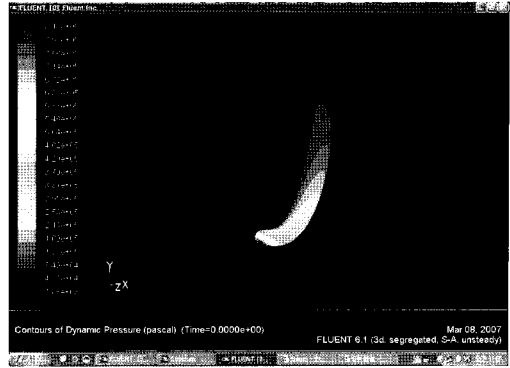
(a) residual values



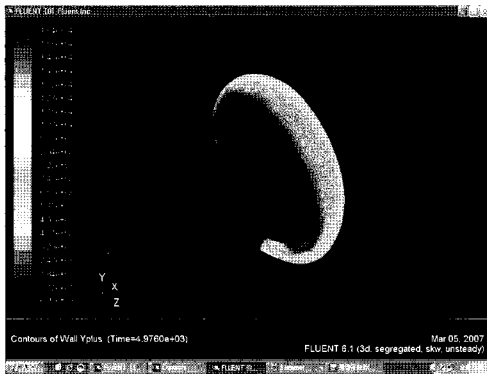
(a) residual values



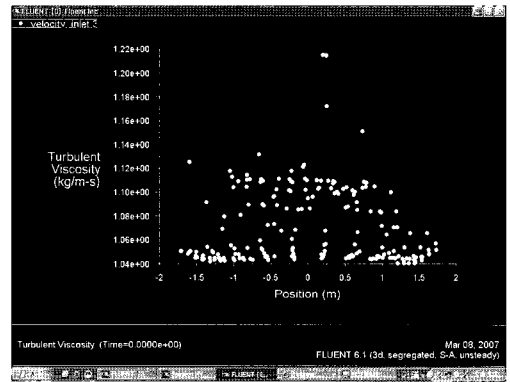
(b) dynamic pressure



(b) dynamic pressure



(c) wall y+ contour

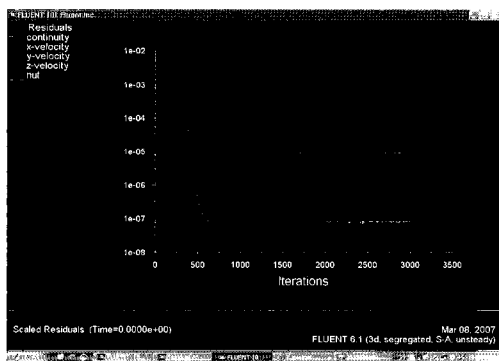


(c) turbulence viscosity

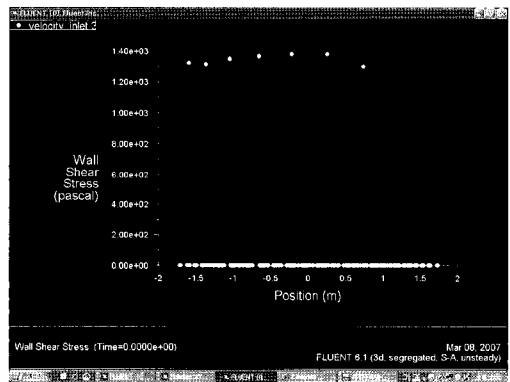
Fig. 4 Computation of RSM turbulence model

이를 보인다. Fig. 4(b)는 동압, Fig. 4(c)는 y^+ 분포를 보여준다. 동압 및 y^+ 해석결과는 RSM과 유사함을 보여준다.

Fig. 5는 Spalart-Allmaras 모형의 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 잔류 값이 10^{-7} 부



(a) residual values



(d) wall shear stress

Fig. 5 Computation of Spalart-Allmaras model

근으로 수렴과정을 쉽게 확인하였다. Fig. 5(b)는 동압, Fig. 5(c)는 난류점성, Fig. 5(d)는 벽 전단응력을 보여준다.

4. 결 론

1) 스크롤형 압축기 벌류트 내부의 3차원 유동을 다중블록 격자를 사용해서 수치해석 하였다. 급격한 형상변화에 의한 유동박리가 없는 내부유동을 확인하였고 난류경계층이 잘 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 모형은 $k-\epsilon$, RSM, $k-\omega$, Spalart-Allmaras 로서 난류를 생성하였고 동압, 잔류 값, y^+ , 난류점성, 벽 전단응력 등을 상호 비교하였다.

2) 내부유동을 고찰하면 입구를 통과한 유동은 벌류트내 초기유동에서 단면의 중심축에 대해 2차원의 회전유동 특성을 보이지만 출구로 진행하면서 점점 더 3차원의 회전특성을 나타낸다. 벌류트로 유입되는 유동의 성질과 벌류트내 유동의 회전특성에 따라 벌류트 내의 압력 분포가 큰 영향을 받는다. 유량이 너무 많으면 단면에 대한 2차원 회전 유동 특성이 커져서 출구로의 유체수송이 줄어드는 반면 압력분포의 크기가 낮아지게 된다. 반면 유량이 너무 적으면 단면에 대한 2차원 회전유동 특성이 줄어들고 출구방향으로 진행하면서 압력분포의 크기가 급하게 높아지게 된다.

3) 복잡한 3차원 구조를 가지는 벌류트 내부유동에 대한 전산유체해석은 유동성능 향상과 기본설계에 긴요하다. 열병합 발전을 위한 마이크로 터빈에 적용된 원형단면을 가진 원심압축기 벌류트에 대한 3차원 유동해석을 통해 성능향상을 위한 수치연구를 수행하였다.

참고문헌

[1] H. Mishima and I. Gyobu, "Performance Investigations of Large Capacity Centrifugal Compressors", ASME Paper No 78-GT-3, 1978.

[2] W. Siefert, "Experiences in the Development of Radial Compressors," in Advanced Radial compressors, von Karman Institute Lecture Series 50, 1972.

[3] M. Sideris, and Van den R. Braembussche, "Influence of a Circumferential Exit Pressure Distortion on the flow in an Impeller and Diffuser," ASME Journal of Turbo Machinery, Vol 109, No 1, pp 48-54, 1987.

[4] J. H. Ferziger, M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, 1997.

[5] S.F. Hoerner, "Fluid Dynamics Drag", published by the author, Midland Park, New Jersey, 1965.

[6] H. Schlichting, "Boundary Layer Theory", Graw-Hill, New York, 1979.

[7] M. Escudier, "Estimation of Pressure Loss in Ring-type Exit Chambers", ASME Jour. of Fluids Eng., Vol.101, pp 511-516, 1979.

[8] Van den Braembussche and B. M. Hande, "Experimental and Theoretical Study of the Swirling Flow in Centrifugal Compressor Volute", ASME Journal of Turbomachinery, Vol 112, pp 38-43, 1990.

[9] E. Ayder and Van den Braembussche, "Experimental Study of the Swirling Flow in the Internal Volute of a Centrifugal Compressor", ASME paper No 91-GT-7, 1991.

[10] B.E. Launder, D.B. Spalding, "Lecture in Math Models of Turbulence, Academic Press, London, England, 1972.

저자 소개



곽승현(郭承鉉)

1953년 7월 생, 1979년 서울대학교 조선공학과 졸업, 1985년 Univ. of Michigan 석사, 1991년 Hiroshima Univ. 공학박사, 현대중공업 근무(1980-95), 현재 한라대학교 컴퓨터응용설계학과 조선전공 교수