

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

SMART 냉각재순환펌프 임펠러의 구조해석

Structural Analysis of Impeller for SMART MCP

유환동, 박진석, 김태완, 김용완, 김종인

한국원자력연구소

요 약

냉각재순환펌프의 임펠러는 고온 고압의 원자로 내부에서 장시간 운전되기 때문에 구조적 건전성을 유지하는 것이 SMART의 안전성과 신뢰성 확보에 중요하다. 본 연구에서는 축류펌프 임펠러의 구조적 건전성을 평가하기 위한 해석모델을 개발하고, 회전에 의한 원심력과 펌핑 매체에 의한 수력적인 힘을 고려한 응력해석을 수행한 후 허용응력과 비교함으로써 건전성이 유지됨을 보였다. 진동해석으로 임펠러의 고유진동 모드해석을 수행하고 회전주파수와의 공진발생 여부를 평가하였다. 또한, 임펠러와 같이 동일 형상의 날개가 반복되는 경우 한 부분만을 대칭모델로 해석함으로써 해석시간을 단축하는 방안을 제안하였으며, 전체 모델에 대한 해석결과와 비교함으로써 반복 대칭모델의 최적 경계조건을 제시하였다.

Abstract

The structural integrity of the MCP impeller is important for the safe and reliable operation of the SMART, since the impeller is operated for long period inside the reactor under high pressure and high temperature. In this study, an analysis model to evaluate the structural integrity of axial pump impeller has been developed and the stress state in the impeller of SMART MCP has been calculated for the applied centrifugal and hydraulic forces. The structural integrity of the impeller has been demonstrated by comparing the analysis results with the allowable stresses. The modal analysis of the impeller has been also performed to investigate the possibility of the resonances of the impeller blades with the rotational frequencies. As a means to reduce the time required for the analysis, a cyclic symmetric analysis model with optimum boundary conditions is proposed by comparing the results from full model analyses.

1. 서론

일차 냉각수를 순환시키는 SMART 냉각재순환펌프[1]는 고온 및 고압의 환경에서 장시간 운전되기 때문에 구조건전성이 요구되며, 펌프의 여러 부품 중에서 임펠러는 직접 냉각수를 순환시키는 가장 중요한 부분으로 임펠러의 구조설계는 매우 중요하다. 임펠러의 구조설계는 응력해석과 진동해석을 통하여 구조건전성을 평가한다. 임펠러 날개에 작용하는 수력학적(hydraulic force)과 원심력은 응력해석을 수행할 때 하중조건으로 입력되며 펌프의 설계자에 의해 펌프의 수두와 회전수가 정해지면 임펠러 날개에 작용하는 하중조건인 수력학적 및 원심력도 결정되기 때문에 임펠러 설계자는 이 하중조건을 사용하여 임펠러 구조해석을 수행한다. 임펠러 날개는 펌프의 회전수와 근접할 때 공진(resonance)이 일어나서 진동과 소음이 발생하고 심하면 파손될 수 있기 때문에 임펠러 날개의 고유진동수 해석을 수행한다. 임펠러 형상은 유체역학적 설계에 의해서 구해진 익형을 3차원 형상설계 전산프로그램인 I-DEAS로 임펠러의 3차원 형상설계를 하며[2], 이 3차원 형상을 이용하여 유한요소 해석 모델링을 수행하였다. 임펠러의 형상처럼 동일한 형상의 여러 개의 날개가 있을 때, 전체 모델을 해석하지 않고, 반복부분만을 해석하는 반복 대칭모델을 사용하

면 해석시간을 줄임과 동시에 전체 해석모델의 결과와 같은 것을 얻을 수 있다. 반복 대칭모델의 해석결과는 경계조건에 따라 조금씩 변하기 때문에 세가지의 다른 경계조건을 갖는 방법으로 구한 결과를 전체 모델의 해석결과와 비교하여 반복 대칭모델을 사용할 때 최적의 경계조건을 제시하였다.

2. 임펠러 전체모델의 해석

일반적으로 구조물의 유한요소 해석법[3]은 널리 알려져 있고 유한요소 프로그램을 이용하여 임펠러와 같이 유사한 구조응력을 해석한 것이 많이 있다[4]. 본 연구에서는 유한요소 해석법을 이용하여 현재 개발중인 임펠러(그림 1)의 응력해석을 전체 모델과 반복 대칭모델을 이용하여 수행하였으며, 각 해석에 필요한 경계조건을 연구하고, 진동해석으로 각 모델에 대하여 고유진동수 해석을 수행하였다.

2.1 임펠러의 사양

해석 대상의 냉각재순환펌프의 수두는 6.9 m이며, 임펠러의 크기는 허브(Hub)와 날개를 포함한 전체 외경은 218.7 mm로서, 모터의 힘이 전달되는 허브의 외경은 90 mm이고, 내경은 35 mm이며 날개의 길이는 64.35 mm이다. 그리고 냉각재순환펌프의 분당 회전수는 3600 rpm으로, 이것을 회전각속도와 회전주파수로 계산하면 다음과 같다.

$$3600 \text{ [rpm]} \times \frac{2\pi}{60} = 376.99 \text{ [rad/s]}$$

$$3600 \text{ [rpm]} \div 60 = 60 \text{ [Hz]}$$

임펠러는 허브와 날개가 일체형으로 되어있고, 321계열 스테인레스강으로 다음과 같은 물성치를 갖는다.

탄성계수 : 199 [GPa]

포아송의 비 : 0.27

밀도 : 8027 [kg/m³]

사용 재료의 건전성 평가를 위한 데이터는 ASME의 원자력관련 데이터를 사용하였으며, 실제로 냉각재순환펌프 임펠러의 운전조건으로 냉각재의 온도가 320°C에 이르기 때문에, 임펠러의 재료의 건전성 평가에는 다음과 같은 데이터가 사용된다.

항복응력 : 125 [MPa] (320°C)

허용응력 : 110 [MPa] (320°C)

2.2 유한요소를 이용한 임펠러의 응력해석

2.2.1 임펠러의 경계조건

임펠러의 구속조건과 하중조건은 그림 2와 같다. 임펠러는 전기 모터의 힘이 전달되는 회전축과 키로 연결되며, 임펠러의 앞부분을 너트식으로 고정한다. 그러므로 구속조건으로 임펠러의 고정부분인 허브를 구속시키는 것으로, 구속조건을 설정하기 위하여, 새로운 국부 원통좌표계를 임펠러의 회전중심축 상에 생성하여, 허브의 내부 원통면의 앞 뒤 모서리를 원통좌표계의 세 변위방향인, R-방향, θ-방향과 Z-방향의 변위를 모두 구속하였다.

임펠러에 가해지는 외력으로는 펌프의 회전에 따라서 발생하는 원심력과 펌프의 열수력학적인 힘이 작용한다. 먼저 펌프의 사용 회전수 3600 rpm을 본 프로그램이 요구하는 회전속도 [cycle/time]로 계산하여, 즉 60 [cycle/s]를 입력하여 원심력만 작용하였을 경우를 먼저 계산하고, 다음으로 수력학적인 외력으로 냉각펌프의 수두인 6.9 m를 가지고 임펠러의 입, 출구의 압력차를 계산하여, 임펠러의 날개에 작용하는 압력을 계산하고, 이 압력이 날개의 뒤 표면에 일정한 압력으로 작용한다고 보고 다음과 같이 계산하여 수력학적인 외력을 고려하였다.

$$\omega = 3600 \text{ rpm} = 60 \text{ cycle/s, Hz}$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{H_d}{\eta} \times \rho g \\ &= \frac{6.9}{0.8} \times 703.6 \times 9.81 \\ &= 59532.4755 \text{ Pa} \end{aligned}$$

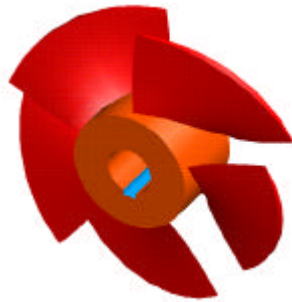


그림 1. 임펠러

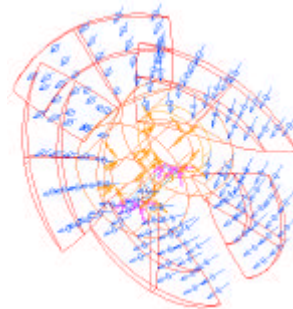


그림 2. 경계조건

2.2.2 임펠러의 유한요소(FE) 모델링

유체역학적으로 설계된 임펠러는 하나의 볼륨으로 되어있는데, 이것을 이산화과정을 통하여 결점(Node)과 요소(Element)로 이루어진 유한요소 모델을 만든다. 본 연구에서는 프로그램내의 Free Mesh 기능을 이용하여, 이산화작업을 수행하였는데, 사용한 요소는 그림 3과 같은 10개의 결점을 갖는 사면체 곡면요소(Parabolic 3D Solid Element)를 사용하였으며, 이 요소는 임펠러와 같이 형상이 복잡하고 임펠러 날개와 같이 뾰족한 부분을 이산화하기에 용이하고, 세변위방향(X, Y, Z)으로의 자유도를 가지고 있다. 이런 사면체 요소를 가지고 각 부위별 요소 개수와 요소 길이를 조절하여 Auto Meshing을 하여 유한요소 모델을 생성하였다.

본 연구에서 사용한 임펠러의 유한요소 모델은 날개와 허브가 만나는 부분에서 최대응력의 발생이 예상되므로, 세분하여 15개의 요소를 사용하였고, 나머지부분은 일괄적으로 한 변의 길이가 15 mm인 요소를 사용하였다. 위의 요소를 이용하여 이산화시킨 임펠러의 모습은 다음 그림 4와 같다.

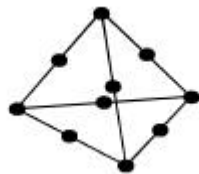


그림 3. 사면체 곡면요소

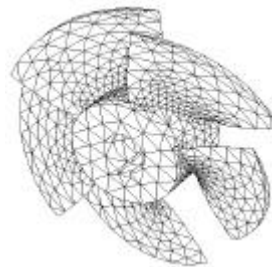


그림 4.
유한요소 모델링

2.2.3 임펠러의 전체모델 응력해석 및 그 결과

위와 같은 유한요소 모델을 가지고 해석에 필요한 경계조건으로, 먼저 구속조건을 적용하고 하

중조건으로는 원심력만 작용하는 경우, 수력만 작용하는 경우, 원심력과 수력이 함께 작용하는 경우의 세 가지 형태의 하중조건으로 나누어 I-DEAS의 Solver[5]를 이용하여 임펠러의 응력해석을 실시하고, 그 결과를 최대의 응력값(Von-Mises Stress)과 변위값으로 다음과 같이 표 1에 나타내었고, 응력분포도와 변위분포도는 그림 5와 그림 6과 같다.

표 1. 정적 응력의 해석결과

하중조건	Von-Mises 응력	변위
	최대 [MPa]	최대 [mm]
원심력	13.1	5.21×10^{-6}
수력	33.7	5.75×10^{-5}
원심력+수력	40.3	6.25×10^{-5}

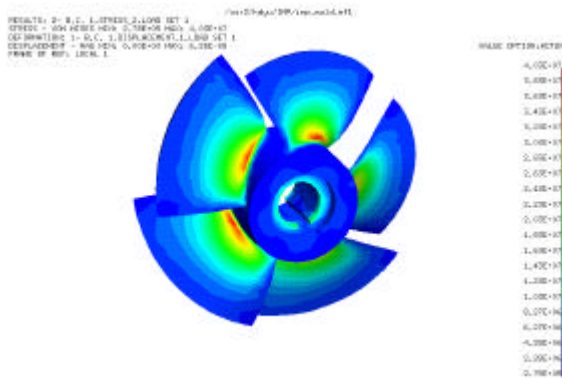


그림 5. 응력분포도

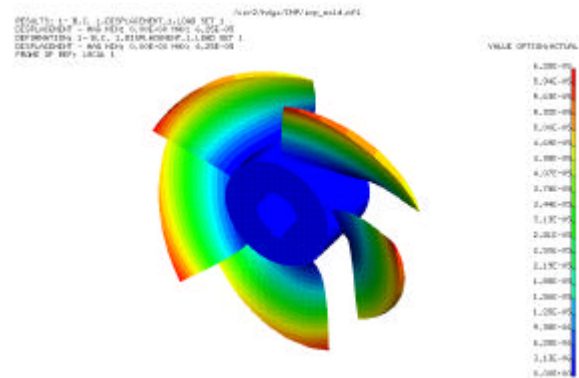


그림 6. 변위분포도

최대 응력의 발생 위치는 세 경우 모두 허브로부터 약간 떨어진 날개가 Twist되기 시작하는 부분에서 발생하였다. 이는 수력에 의해 날개의 뒷면에 압력이 가해지고, 날개가 앞으로 힘을 받아 날개 앞, 뒷면에서 최대응력이 발생하는데, 원심력으로 인해 날개 앞면에서 발생하는 최대응력을 상쇄하는 역할을 하여, 이에 원심력과 수력이 모두 작용하는 경우에는 날개의 뒷면에서 최대응력이 발생하는 것으로 본다. 임펠러에서 발생하는 최대응력값 40 MPa는 임펠러 재질의 허용응력 110 MPa의 약 36%에 해당하므로 안전하다고 판단된다.

2.3 임펠러 전체모델의 진동해석

냉각재순환펌프는 3600 rpm의 회전수로 고속 운전하므로, 그 임펠러는 구조적으로 작용하중에 대한 건전성 확보와 더불어, 회전주파수와 공진으로 인한 진동 문제가 발생하지 않아야 한다. 그래서 임펠러의 고유진동수를 해석함으로써, 임펠러의 진동문제를 예측하고 안정성을 점검하여 본다.

고유진동수 해석에서는 응력해석과는 달리, 경계조건으로 하중조건은 필요하지 않고, 구속조건만 필요하다. 여기서 사용한 구속조건은 응력해석에서 사용한 구속조건과 동일한 구속조건을 사용하였으며, 위의 응력해석에서 사용한 것과 같은 방법으로 임펠러의 유한요소 모델을 만들고 임펠러의 고유진동수를 해석하였다. 여기서 고유진동수를 계산하는 방법으로 LANCZOS Method를 이용하여 1차 모드에서 10차 모드까지 각 모드의 고유진동수를 계산하여, 다음 표 2와 같은 결과를 얻었다.

표 2. 각 모드에서의 고유진동수

모드	고유진동수 [Hz]	모드	고유진동수 [Hz]
1	1075,4494	6	2261,8930
2	1087,6499	7	2262,2969
3	1089,9391	8	2264,2725
4	1091,7157	9	2265,7449
5	1092,4312	10	2270,8351

위 표 2에서 보는 것과 같이, 1차 모드에서 5차 모드까지 고유진동수의 값이 변화가 매우 적다가, 6차 모드에서 크게 증가하고, 다시 6차 모드에서 10차 모드까지 고유진동수의 값이 변화가 적다. 이것은 임펠러의 날개의 진동으로 5개 날개의 각각의 진동을 나타내는 것으로 보이며, 펌프의 회전주파수인 60 Hz와 공진으로 인한 진동문제는 야기되지 않는다고 본다.

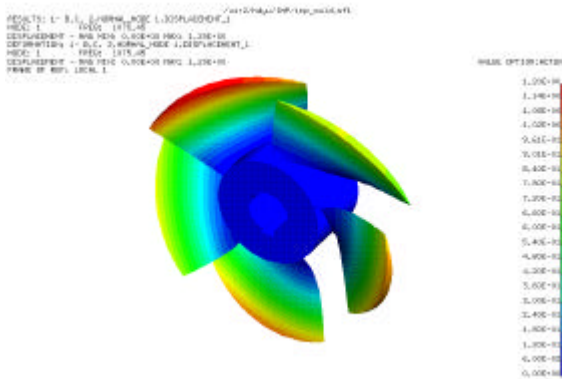


그림 7. 1차 모드 형상

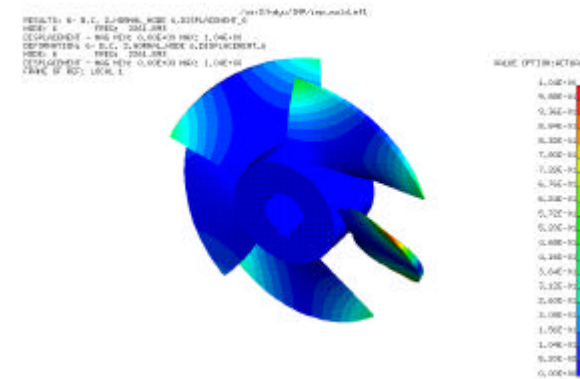


그림 8. 6차 모드 형상

3. 반복 대칭모델의 해석

임펠러와 같은 회전체의 해석에 있어서, 임펠러 전체 모델을 모델링하고 해석하는 방법은 많은 시간이 소요된다. 그래서 임펠러와 같이 회전 중심축을 기준으로 같은 모양의 날개가 반복적으로 허브몸통에 붙어있는 회전체에서는, 반복되는 부분만을 절단하여, 하나의 날개만을 갖는 반복 대칭모델을 가지고 해석할 수 있다. 전체 임펠러에서 반복되는 날개부분을 절단하는 경우에는 날개와 날개사이를 날개의 형상대로 곡선을 이용하여 절단하는 것이 바람직하다. 이와 같은 방법으로 절단하여 만든 반복 대칭모델의 형상은 그림 9와 같다.



그림 9. 반복 대칭모델



그림 10. 유한요소 모델링

이 반복 대칭모델은 모델링하는 시간도 절약할 수 있으며, 사용 유한요소의 개수와 절점의 개수를 줄일 수 있어서, 해석상에도 많은 시간을 단축할 수 있다. 이런 단축모델을 이용하여 해석한

해석결과를 가지고, 전체 모델의 해석결과를 예측할 수 있다.

3.1 반복 대칭모델의 응력해석

유한요소 모델링에서는 전체모델의 해석결과와 비교하기 위해서, 요소의 사이즈와 개수를 동일하게 만들었다. 반복 대칭모델을 유한요소로 이산화한 형태는 그림 10과 같다.

이 반복 대칭모델을 사용하는 경우에는 허브의 절단면에 대한 경계조건을 실제 전체모델의 조건에 가깝게 설정하여 주는 것인데, 다음의 세 가지 경계조건방법을 가지고 해석하여 그 결과를 비교하여 보았다.

3.1.1 절단면의 θ -방향의 변위를 구속

임펠러의 회전중심축에 원통좌표계를 정의하고, 이 원통좌표계를 이용하여 허브의 절단면에 대한 경계조건을 회전방향의 자유도, 즉 θ -방향의 변위를 구속하였으며 그림 11과 같다. 나머지 구속조건과 하중조건은 위의 전체 모델의 해석에서 사용한 것을 그대로 적용하였다.

3.1.2 절단면의 CP(Coupled DOF) 구속

이 방법은 허브의 절단면의 변위를 Couple시키는 방법으로, 이 방법을 사용하기 위해서는, 먼저 임펠러 허브의 양쪽 절단면의 요소와 절점을 같은 모양과 개수로 Mesh하여야 한다. 그래서 Face dependency를 사용하여 양쪽 절단면을 같은 수의 요소와 절점으로 Mesh하고, 양쪽 절단면 위의 같은 위치에 있는 절점을 1:1 연결하여 Coupled DOF를 설정하여 준다. 여기서는 회전 중심축상에 있는 국부 원통좌표계의 R-, θ -, Z-방향의 변위를 모두 Couple 시켰다. 이것은 변위를 구속(변위=0)하는 것이 아니고, 양쪽 절단면의 각 방향으로의 변위의 크기를 서로 같다고 정의해주는 것으로, 그림 12에 나타내었다.

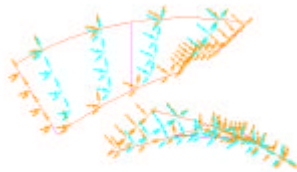


그림 11. 절단면의 θ -방향의 구속조건

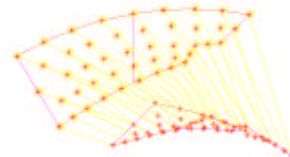


그림 12. 절단면의 CP 구속방법

3.1.3 절단면의 CE(Constraint Equation) 구속

세번째 방법은 위에서와 같이, 양쪽 절단면을 같은 수의 요소와 절점으로 Mesh하고, 양쪽 절단면 위의 같은 위치의 절점을 1:1 연결하여 Constraint Equation을 설정하여 주는 것으로, 양쪽 절단면의 절점의 θ -방향의 변위를 각각 u_1 , u_2 라고 할 때, $u_1 + u_2 = 0$ 의 형태로 정의하여 주었다. 이는 각 변위의 크기는 같지만 방향은 반대임을 정의해 주는 것이다. 경계조건을 그림으로 나타내면 그림 13과 같다.

3.1.4 반복 대칭모델의 해석결과

위의 경계조건에 따른 구속조건과 하중조건을 반복 대칭모델의 유한요소모델에 적용하여 응력 해석을 각각의 하중조건으로 실시하고, 그 결과를 최대의 응력값과 변위값으로 나타내면 다음의 표 3과 같다.

표 4. 구속조건에 따른 고유진동수

모드	θ 구속	CP 구속	CE 구속
	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	1097,0139	1095,1563	1090,0098
2	2274,2689	2266,1562	2258,6959
3	3548,8337	3530,1202	3529,2764
4	4457,7762	4162,8967	4364,7982
5	6007,3276	5944,6318	5944,7543
6	6925,4060	6521,9980	6702,4600

RESULTS: 1 - B.C. 1, NORMAL MODE 1, DISPLACEMENT, 1
 MODE 1: 1097.0139 Hz
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 MODE OF REF: 1, MODE 1

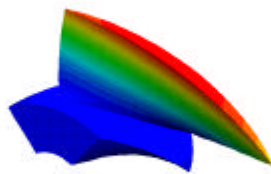
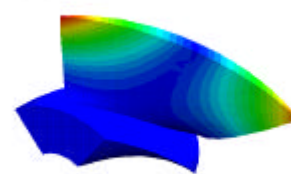


그림 16. 날개의 1차 모드 형상

RESULTS: 2 - B.C. 1, NORMAL MODE 2, DISPLACEMENT, 2
 MODE 2: 2274.2689 Hz
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 MODE OF REF: 1, MODE 1



RESULTS: 3 - B.C. 1, NORMAL MODE 3, DISPLACEMENT, 3
 MODE 3: 3548.8337 Hz
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MAX: 0.00000000E+000
 DISPLACEMENT - MIN: 0.00000000E+000
 MODE OF REF: 1, MODE 1



그림 17. 날개의 2차 모드 형상

4. 결론

임펠러에 작용하는 원심력과 수력학적인 힘에 의해 임펠러에 발생하는 최대응력은 40 MPa 로서 재료의 허용응력 110 MPa 에 미치지 못하므로 임펠러는 구조적으로 안전하다. 그리고 임펠러의 고유진동수 해석을 통하여 얻어진 저차 진동수는 1080 Hz 로서 임펠러의 회전주파수인 60 Hz 보다 매우 높으므로 임펠러의 운전속도에 의한 공진은 일어나지 않는다.

임펠러에서 동일한 형상의 날개가 반복적으로 이루어진 회전체의 응력해석을 위하여 반복 대칭 모델을 제시하였다. 허브 절단면의 경계조건 중에서 회전방향의 θ -변위를 구속하는 방법이 반복 대칭모델로서 가장 적절하며 이모델을 사용하면 해석 시간을 줄이면서 전체모델로 구한 해석 결과와 같은 결과를 얻을 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종민 외, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1 단계 최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- [2] 김민환 외, I-DEAS의 프로그램 파일을 이용한 축류펌프 임펠러의 3차원 형상설계 기법개발, SDRG User's Conference, 1998.
- [3] K, J, Bathe, Finite Element Procedure, Prentice-Hall International, 1996
- [4] 민경탁, 유환동, 유한요소 프로그램을 이용한 축류송풍기의 구조해석, 인천대학교 공업개발연구 소논문집, 1998.
- [5] Advanced Simulation, ICCON Conference, SDRG, 1998.