



캔드모터펌프의 성능해석

고 성 호,^{*1} 김 연 태,² 곽 영 균,² 강 민 구,² 한 승 열²

PERFORMANCE ANALYSIS OF CANNED MOTOR PUMP

Sung Ho Ko,^{*1} Yeon Tae Kim,² Young Kyun Kwack,² Min Koo Kang² and Seung Yeul Han²

A numerical study was conducted to predict the performance curve of a canned motor pump for SMART(System Integrated Modular Advanced Reactor). The study used a computational domain which included not only the pump but also a suction pipe and a volute casing with a discharging pipe in order to simulate an experimental setup. The ANSYS CFX program was utilized to obtain flow characteristics inside the pump as well as the overall pressure rise across the pump operating on- and off-design points. Computed results showed that the performance of the pump at off-design points was much lower than expected. Special attention was made to find the cause of the low performance of the pump operating at low flow rate.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 캔드 모터 펌프(Canned motor pump), SMART(System Integrated Modular Advanced Reactor) 성능곡선(Performance curve), 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump)

1. 서 론

일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)의 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump)는 원자로 냉각재를 강제 순환시켜 핵연료에서 발생된 열을 증기발생기로 전달하는 역할을 한다. 이러한 원자로 냉각재펌프는 SMART 원자로가 안정된 상황에서 작동되게 하는 주요요소 중 하나이다. 그러나 냉각수 순환펌프는 원자로에 설치되는 위치적 제약 때문에 한번 설치가 되면 유지 보수가 어려워 설계 시에 많은 주의를 필요로 한다.

이러한 펌프는 작동유체로부터 발생하는 유체력이 축계에 작용하며, 또한 유체기계가 고압, 고속화되면서 펌프의 회전부인 임펠러와 고정부 사이의 틈새에서 발생하는 유체력이 불안정한 진동을 발생시키는 문제점을 가지고 있으나 캔드모터펌프는 회전축이 외부와 단절되어 있어 작동유체가 외부로

누설되거나 펌프 내에 공기가 흡입되는 현상을 막을 수 있어 작동유체의 영향에 의해 발생하는 문제점을 보완할 수 있다 [1].

펌프의 사양이 결정되고 설계가 진행되면 성능테스트를 통한 설계검증이 필요하다. 특히 원자력 발전소의 모든 설비는 안전과 직결되므로 철저한 검증이 요구된다. 이에 따라 원자로에 사용되는 펌프는 유입유량의 변화에 따른 펌프의 성능변화가 원자로 설계시 반드시 고려되어야 하며, 이에 따라 전 유량범위에 해당되는 성능곡선을 필요로 한다[2]. 그러나 설계단계에서 설계의 정확성 및 성능평가를 위해 시제품 제작에 의한 실험적 접근방법을 비용적 측면에서 많은 제약이 따른다. 이에 반해 CFD를 선행적으로 수행함으로써 다양한 DATA에 대한 매개변수 해석을 통해 설계주기를 줄일 수 있다.

본 연구의 목적은 ANSYS CFX 프로그램을 이용하여 캔드모터펌프의 설계점과 탈설계점에서의 유량에 따른 수두를 케이싱(Casing) 전과 후에서 비교하고 펌프내의 유동현상을 관찰하는 데에 있다. 펌프의 성능예측의 정확도를 높이기 위해서 누설유로를 포함한 캔드모터펌프의 모든 구성요소를 계산영역으로 설정하였다.

1 충남대학교 기계설계공학과 (BK21 메카사업단)

2 충남대학교 대학원 (BK21 메카사업단)

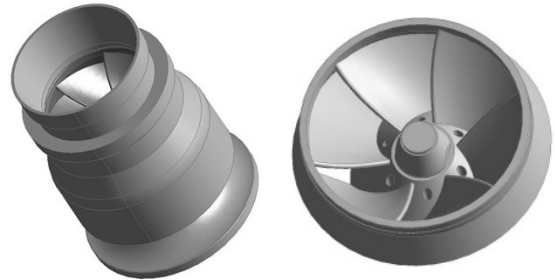
* TEL : 042) 821-6650

* Corresponding author, E-mail: sunghoko@cnu.ac.kr

2. 수치해석 방법

2.1 해석 모델

해석에 사용된 캔드모터펌프의 전체형상을 Fig. 1의 (a)에 나타내었고, (b)에는 임펠러의 형상만을 따로 나타내었다. 비속도가 $1,060 \text{ rpm} \cdot \text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}$ 인 이 사류펌프는 6개 블레이드의 임펠러와 7개 블레이드의 디퓨저로 구성되어 있다. 고체형상을 기초로 ANSYS Design modeler 프로그램을 통하여 모델링된 유동해석영역을 Fig. 2에 나타내었다. 해석의 정확성을 높이기 위해서 누설유로를 포함한 원주방향 전체유로를 해석영역으로 지정하였고, 설계도면에 제시되어있는 디퓨저 출구방향의 케이싱을 모델링 하였으며, 펌프의 입구와 출구에서의 유동을 안정시키기 위하여 유동의 입구에서 임펠러 직경의 2.2배의 입구관을, 출구에서는 케이싱 직경의 3.5배의 출구관을 모델링하여 도메인 내로 유동이 나가거나 들어오는 것을 방지하였다. 해석에서 임펠러부분을 회전체로 정의하고 그 나머지 도메인을 비회전체로 정의하였으며, 격자구성과 각 단계별 압력의 변화를 측정하기 위해서 도메인을 입구부분, 임펠러부분, 디퓨저부분, 케이싱 부분, 출구부분으로 5개의 도메인으로 나누어 해석을 진행하였다.



(a) Solid part of pump (b) Impeller of pump

Fig. 1 Solid part of the modelled pump

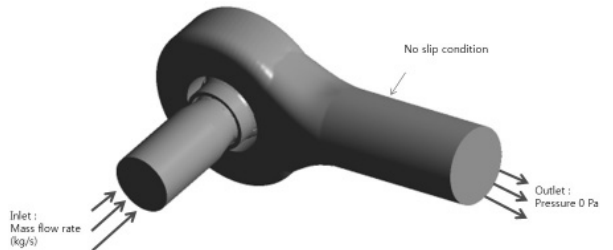


Fig. 2 Boundary conditions of the computational domain

2.2 격자구성

해석에 사용된 모델의 격자형상을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 윗부분이 유동의 입구 부분이고 우측이 출구 부분이다. 격자 구성에는 ANSYS Mesh와 ICEM CFD 프로그램이 사용되었다. 전체 유동 영역에서 임펠러부분과 디퓨저부분은 ANSYS Mesh 프로그램을 이용하여 테트라격자를 구성하였고 ICEM CFD 프로그램을 이용하여 입구 방향으로 연장된 부분을 정렬격자로, 케이싱 부분을 테트라 격자로 구성하였다. 전체 유동해석영역의 격자는 노드수로는 235만개, 요소수로는 760만개가 소요되었고 임펠러와 디퓨저 영역에서 190만개의 노드, 640만 요소의 격자를 집중시켜 해석의 정밀도를 높였다.

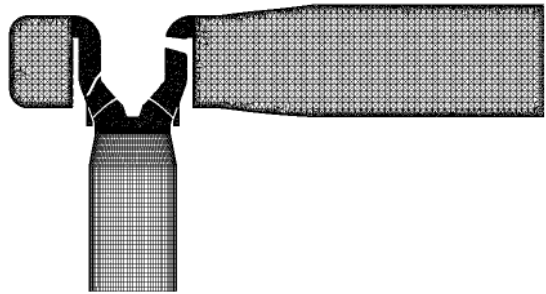


Fig. 3 Multi-block grids of the computational domain

2.3 경계조건

해석에 사용된 유체는 4°C 의 물로써 기준기압은 1기압이다. 해석모델은 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였고, 열전달의 영향은 크지 않을 것이므로 고려하지 않았다. 유동해석에서 입구에서는 유량조건, 출구에서는 상대압력 0 Pa로 하였다. 입구, 출구, 인터페이스를 제외한 모든 벽면에서는 점착조건(No-slip condition)으로 하였다. 입구도메인-임펠러도메인, 임펠러도메인-디퓨저도메인 사이의 인터페이스에서는 프로즌 로터 기법을 적용하였다.

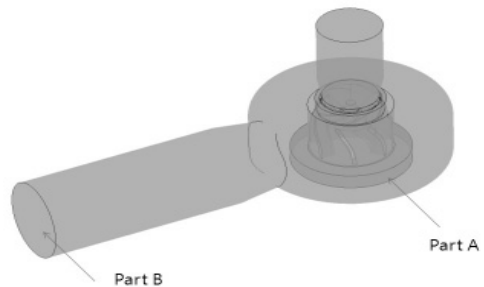


Fig. 4 Two different outlet points for measuring pressure head rise

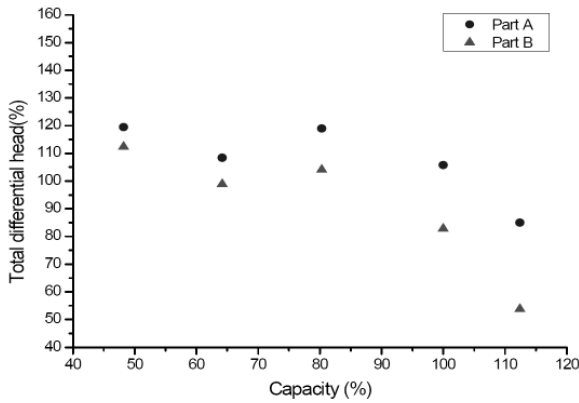


Fig. 5 Computed total differential heads for various flow rates

2.4 해석방법

해석은 작동유량을 100%으로 하여 48.2%, 64.2%, 80.3%, 100%, 112.4%에서 해석을 수행하였다. 펌프의 해석에서의 수두 측정위치를 Fig. 4에 나타내었다. 수두 측정은 입구-디퓨저 출구부분 사이의 차압에 의한 수두(Part A), 입구-출구 부분 사이의 차압에 의한 수두(Part B)로 펌프의 수두와 케이싱에 의한 압력 손실을 측정하였다. 수치해석은 상용프로그램인 ANSYS CFX 프로그램을 사용하였으며 CPU-Intel Xeon X64 X6560a QC One Processor 외 5대, 32 core로 구성되어있는 병렬컴퓨터로 수행되었으며, 각 해석에서는 2000 cycle을 진행하였으며, 각각 9 core를 사용하여 29시간 소요되었다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

작동조건에서의 실험값과 CFD 해석값의 비교는 CFD 해석 값이 펌프 성능을 검증하고 설계를 하는 데에 피드백을 줄 수 있는지를 판단하는 척도가 될 수 있다. 그러나 본 연구는 펌프의 실험적 연구에 앞서 선행되었기 때문에, 유량의 변화에 따른 펌프의 수두변화와 각각의 유량에서의 유동만을 관찰하였다. Figure 5에는 앞서 말한 Part A와 Part B에서 유량의 변화에 따른 수두를 그래프로 비교하였다. 유량은 작동조건을 100%으로 하여 상대적인 %로 나타내었고, 수두도 작동조건에서의 Part A에서의 100%유량에서의 수두를 100%로 하여 상대적인 수두를 나타내었다.

유량에 따른 수두의 변화를 보았을 때 작동유량보다 고유량이 되면 수두가 감소하고, 작동유량보다 저유량이 되면 수두가 증가한 것을 확인할 수 있다. 그러나 유량이 80.3% 이하에서는 유량의 감소에 따른 수두의 상승이 발생하지 않는 결과를 확인할 수 있다. 또한 Part A와 Part B에서의 수두를 비

교하였을 때 Part B에서 Part A와 비교하여 낮은 수두를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Part B가 Part A보다 수두가 떨어지는 것은 디퓨저출구에서 유동 출구로 나가는 데에 있어서 케이싱을 통과할 때 발생하는 손실로 볼 수 있다. Part A와 Part B의 결과를 비교하였을 때 고유량조건보다 저유량에서 Part A와 Part B의 차이가 더 작은 것으로 보아 저유량에서 디퓨저 출구에서 유동출구사이에서 손실이 더 작은 것을 알 수 있다.

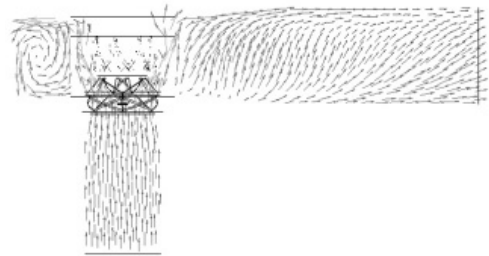
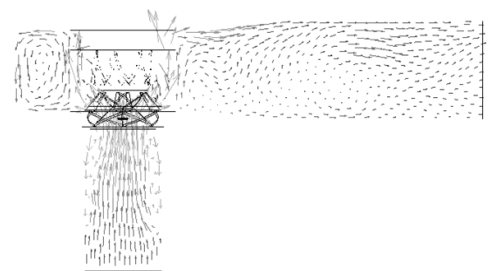
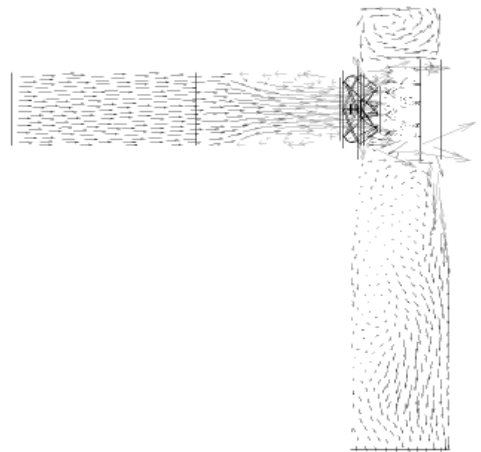


Fig. 6 Flow inside the pump operating at design point



(a) short suction pipe



(b) long suction pipe

Fig. 7 Flow inside the pump operating at low flow rate



Table 1 Predicted differential heads for the pump operating at low flow rate

	short suction pipe	long suction pipe
Part A head	119.4 %	120.0 %
Part B head	112.4 %	113.8 %

고유량과 저유량에서의 유동흐름을 비교하기 위해서 작동유량과, 48.2%의 유량에서의 해석결과를 비교하였다. Figure 6과 Fig. 7에서는 로 나타내었다. 작동조건에서의 유동흐름을 보았을 때 임펠러 입구쪽에서 유동이 불안정한 현상 없이 임펠러로 유입되는 데에 반하여, 저유량조건에서의 유동을 벡터로 나타내었을 때 입구부분에서 임펠러로 유입될 때 유동의 역류가 발생함을 확인할 수 있다. 이에 입구길이가 임펠러 입구의 2.2배일 때는 역류가 입구 근처까지 발달되었기 때문에 역류의 정도를 정확히 판단하고 입구길이에 따른 속도벡터의 변화를 관찰하기 위해서 입구길이를 5배로 늘려 해석을 수행하였고, Fig. 7의 (b)에 입구길이가 5배일 때 유동의 벡터를 나타내었다. 이에 따른 결과를 비교해 보았을 때 입구길이에 따른 벡터의 변화는 크지 않은 것으로 볼 수 있다. Table 1에는 저유량 조건에서의 입구길이에 따른 수두를 비교하였는데 입구길이에 따른 수두의 오차가 1% 내외인 것으로 확인되었다. 해석의 오차를 고려하였을 때, 2.2배의 입구길이에서 해석을 수행하였을 때에도 충분히 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

저유량조건에서 설계 수두와 수치해석 결과의 수두차이에 유동의 역류의 발생이 얼마나 영향을 끼치는지 확인하기 위해서 작동조건에서 유동입구, 임펠러입구, 디퓨저출구, 유동출구에서 단면의 평균압력을 Table 2에 나타내었다. 여기서 각각의 압력은 디퓨저 출구면의 평균전압과 입구면의 평균 전압의 차이에 대한 %로 나타내었다. Table 3에는 저유량조건에서의 압력변화를 나타내었다. 여기서의 압력도 저유량조건에서의 디퓨저출구면의 평균전압과 입구면의 평균 전압의 차이에 대한 %로 나타내었다. 이 해석결과를 비교하였을 때 작동조건에서는 유동 입구-임펠러 입구 사이에서 전압의 변화가 거의 없지만, 저유량조건에서는 유동입구-임펠러 입구에서 전압 상승이 큰 것을 확인할 수 있다. 유동입구와 임펠러 입구 사이에서는 동력이 생성되는 개체가 없기 때문에, 저유량조건에서 유동입구와 임펠러 사이의 전압상승은 임펠러에서 발생하는 동력이 역류되는 유동과 함께 입구방향으로 전달된 것으로 볼 수 있다.

Table 2 Relative pressure inside the pump operating at design point

	Static pressure	Total pressure
inlet of suction pipe	-7.30	0.00
inlet of impeller	-13.96	-0.23
outlet of diffuser	89.28	100.00
outlet of discharge pipe	74.90	78.27

Table 3 Relative pressure inside the pump operating at low flow rate

	Static pressure	Total pressure
inlet of suction pipe	-1.50	0.00
inlet of impeller	-14.01	26.30
outlet of diffuser	93.65	100.00
outlet of discharge pipe	93.40	94.12

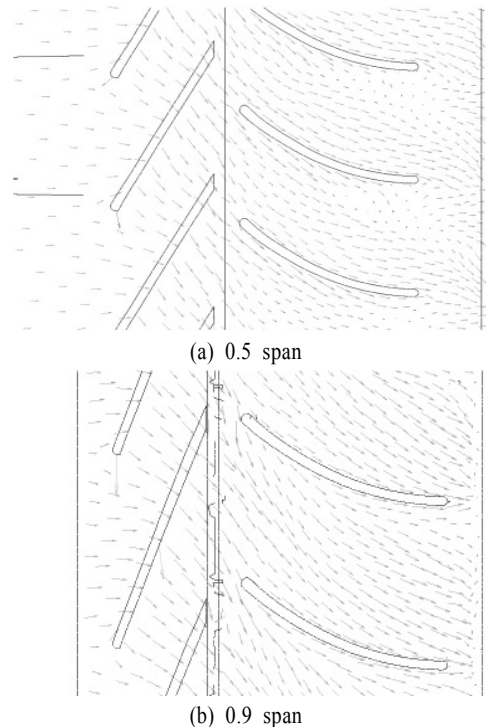


Fig. 8 Absolute velocity vectors inside the impeller and the diffuser of the pump operating at design point

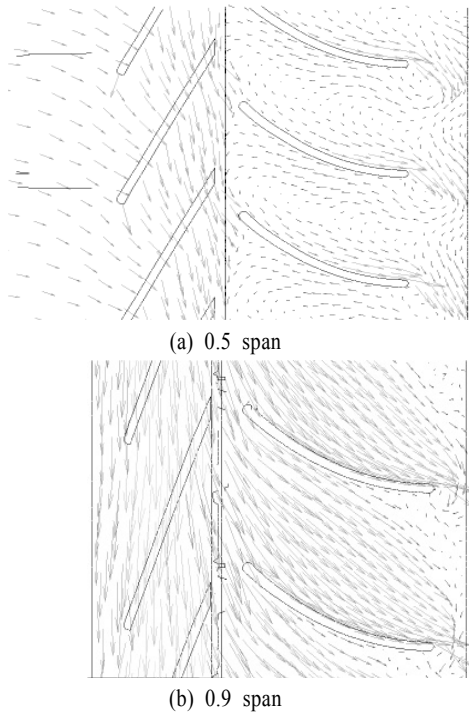


Fig. 9 Absolute velocity vectors inside the impeller and the diffuser of the pump operating at low flow rate

펌프의 단면을 펌프의 축을 기준으로 같은 반경으로 잘랐을 때 허브를 0 span, 슈라우드를 1 span으로 하여 0.5 span과 0.9 span에서의 작동유량과 저유량조건에서의 유동을 절대좌표계로 보았을 때의 흐름을 Fig. 8과 Fig. 9에 벡터로 나타내었다. 이 그림에서의 벡터는 절대좌표계로 보았을 때의 벡터이다. 작동유량의 0.5 span과 0.9 span에서의 벡터를 보았을 때 작동유량에서는 유동이 유동 방향으로 들어오다가 임펠러 부분부터 일정한 각도로 부드럽게 움직이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 9의 (a)를 보았을 때 디퓨저 후연부에서 박리가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 (b)에서 보았을 때 저유량조건에서는 임펠러로 유입되는 유동의 입사각이 증가하여 압력변화가 큰 임펠러 블레이드의 흡입면에서 경계층 박리가 발생하였다. 경계층의 박리는 수두를 생성하는데 필요한 흐름의 굴절각 감소에 영향을 주어 수두를 감소시킨다[2] 또한 박리영역이 유로를 막아 성능을 저하시키고 블레이드에 압력변화를 주기 때문에 블레이드에 많은 응력이 작용하여 시스템 전체를 불안정하게 한다[4].

유동의 흐름을 3차원적으로 확인하기 위해서 유동의 입구에서 원심을 기준으로 반경으로 0.53%, 0.69%, 0.77%에 위치해있는 3개의 점에서 출발한 스트릭선을 Fig. 10에 나타내었다. 설계점에서 스트릭선은 모든 점에서 임펠러와 디퓨저를 지나갈 때에 방해받지 않고 케이싱으로 토출되지만, 저유량 조건에서는 반경이 53%일 때는 뒤로 나가는 유동이 없지만, 반경이 69%일 때는 디퓨저 부분에서 박리가 생성되었고, 77%의 반경에서 출발한 유체는 임펠러에서 튕겨져 나오는 유동을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소용 캔드모터펌프의 유량에 따른 수두의 변화를 케이싱의 통과하기 전과 후로 나누어 비교하였다. 두 부분에서의 수두를 비교하였을 때 디퓨저 출구에서의 압력이 유동 출구보다 높았는데 이를 통하여 케이싱을 통과하는데 발생하는 손실을 예측할 수 있었다. 작동조건보다 고유량이 되면 수두가 떨어지고 저유량이 되었을 때 수두가 올라갔으나 유량이 80.3%이하에서는 더 이상 수두가 올라가지 않았다. 해석의 유량이 낮아졌음에도 수두가 올라가지 않아 저유량과 작동조건의 해석값을 비교하였다. 이에 작동조건과 저유량조건에서의 속도벡터를 비교해본 결과 작동조건에서는 입구에서 불안정한 현상 없이 임펠러로 유입되는 데에 반하여, 저유량조건에서는 임펠러 입구에서 역류가 발생하여 펌프의 성능을 저하시키는 것을 확인 할 수 있었다.

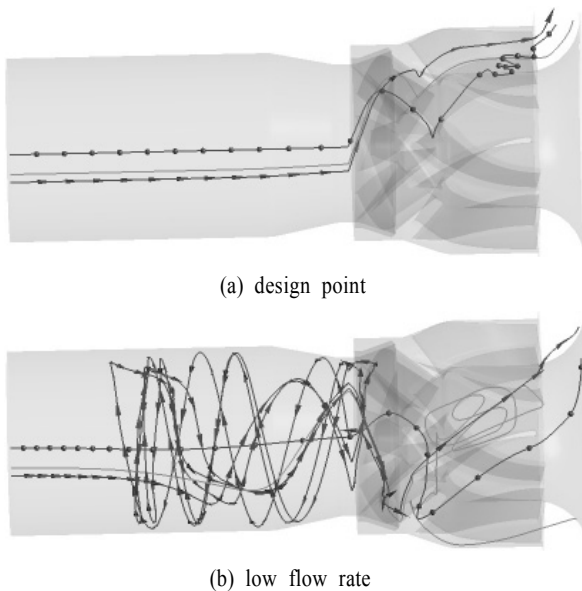


Fig. 10 Streaklines of the pump



참고문헌

- [1] 2001, 구대현, 외5인, “Can손실이 고려된 등가회로도를 이용한 SMART용 Canned-motor 설계 및 해석에 관한 연구,” *대한전기학회*.
- [2] 2005, 김민환, 외4인, “SMART 연구로의 주냉각재펌프 개발과제 소개,” *유체기계공업학회*.
- [3] 2009, 이명수, 외4인, “원자력 발전소용 순환수 펌프의 성능해석,” *한국전산유체공학회지*.
- [4] 2006, 백제현, 외3인, “축류 압축기에서의 선회실속에 관한 3차원 수치해석,” *대한기계학회 춘계학술대회*.