

SMART 냉각재순환펌프 동특성 해석 Dynamic Analysis of SMART Main Coolant Pump

임영빈

한라산업(주)

부산광역시 사하구 다대동 1509-2

박진석, 김동욱, 김지호, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 냉각재순환펌프 구조물의 동특성 해석을 통하여 펌프 운전속도와 구조물 고유진동수의 공진 여부를 조사하여 펌프 운전 중 안전성을 평가하였다. 냉각재순환펌프는 원자로 압력용기의 환형덮개 상단에 수직으로 설치되므로 구조물의 진동측면에서 수직 보(beam)와 유사한 거동을 한다. 이러한 이유로 냉각재순환펌프를 2차원 보(beam)로 단순화시켜 유한요소 모델을 개발하였으며 상용 코드인 ABAQUS를 사용하여 해석하였다. 원자로 운전시 냉각재순환펌프가 받는 가진 주파수는 운전속도와 임펠러의 날개 수에 의해 결정되며 냉각재순환펌프는 저속과 고속의 2 단 운전을 한다. 냉각재순환펌프 동특성 해석으로 구한 고유진동수와 진동모드를 평가한 결과로서 냉각재순환펌프 고유진동수는 운전속도에 대하여 안전성을 확보할 수 있는 것으로 판단되지만 임펠러 가진에 대한 안전성 평가는 정밀한 해석모델을 통하여 이루어져야 할 것으로 고찰되었다.

Abstract

A finite element model was developed to perform the dynamic analysis of the MCP and the structural stability of the MCP was evaluated through comparing the operating speeds with the natural frequencies of MCP. MCP is installed vertically on the annular cover of the reactor vessel and behaves similarly with vertical beam in vibration. So, MCP is simplified with the 2D beam in order to develop FE model. ABAQUS is used to perform the dynamic analysis of the MCP. MCP is designed to be operated at low and high speed when reactor is working. Therefore excitation frequency of the MCP is decided for the working speed and the pulse frequency induced by impeller blade. Results of the dynamic analysis of the MCP are natural frequency and mode shape. The natural frequencies of MCP structure are different from operating ones, which means that the MCP operates stably. But it is considered to develop more detailed analysis model to evaluate the effect of impeller blade pulse frequency.

1. 서론

일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced ReacTor)는 가압기, 증기발생기, 제어봉구동

장치, 그리고 냉각재순환펌프(MCP : Main Coolant Pump) 등과 같은 주기를 원자로 압력 용기 내에 설치하여 대형 배관을 제거할 수 있어 계통과 지지물 구조가 매우 단순하므로 소형으로 제작 할 수 있다[1,2,3]. 이와 같이 대형 배관이 없기 때문에 냉각 계통의 누수와 같은 대형 사고를 근본적으로 방지할 수 있는 장점이 있다.

냉각재순환펌프는 원자로 운전시 고온 고압의 일차 냉각수를 순환시키며 원자로내의 열적 평형을 유지하는 역할을 한다. 따라서, 설계자는 냉각재순환펌프의 기능성과 구조적 건전성을 확보하도록 설계해야 한다. 일체형 원자로 SMART 냉각재순환펌프의 전반적인 구조적 건전성을 평가하기 위해 동특성 해석 모델을 개발하고 유한요소 해석을 수행하였다. 냉각재순환펌프는 원자로 운전시 저속과 고속으로 운전 할 수 있게 설계되었다. 운전 속도 영역에 대한 가진 주파수는 21~60Hz이고 임펠러의 날개로 발생하는 가진 주파수는 105~300Hz이다. 따라서, 냉각재순환펌프의 동특성 해석을 통하여 가진 주파수 영역에 대한 진동수를 비교하여 냉각재순환펌프의 운전중 안전성에 대하여 고찰하였다.

냉각재순환펌프는 원자로 압력용기 덮개 상단에 긴 돌출부를 형성하면서 수직으로 설치된다. 이러한 이유로 동특성 해석을 위하여 냉각재순환펌프를 2차원 보(beam)로 모델링을 하였으며 보 요소(beam element)를 사용하여 유한요소 해석하였다. 유한요소 해석은 ABAQUS(Ver 5.8)을 사용하였으며 구체적인 유한요소 모델 과정과 결과는 다음 장에 제시하였다[4]. 단위는 SI 단위계를 사용하였다.

2. 본론

2.1 유한 요소 모델

그림 1은 일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 3D 모델이다. 그림 1(a)는 냉각재순환펌프의 하단과 원자로 압력용기 덮개, 그리고 원자로 압력용기 덮개 상단으로 돌출된 부분과 냉각재순환펌프의 플랜지 부분으로 구분된다. 그림 1(a)에서 냉각재순환펌프는 원자로 압력용기 덮개 부분에서 수직으로 설치되며 긴 돌출부를 형성한다. 그림 1(a)의 형상으로 냉각재순환펌프를 보(beam)로 단순하게 할 수 있다. 그림 1(b)는 냉각재순환펌프의 내부 구조 형상을 나타낸 것이다.

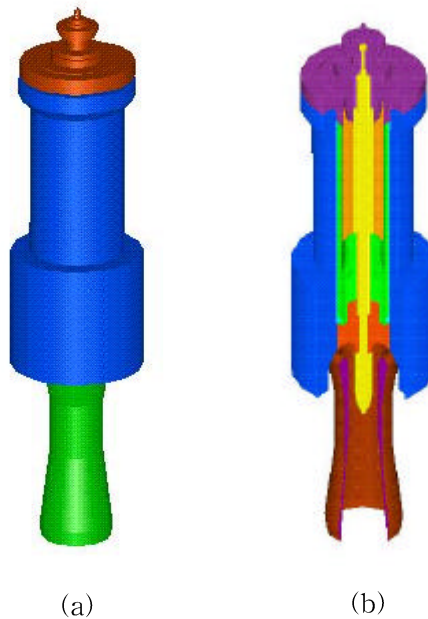


그림 1 SMART 냉각재순환펌프의 3D 모델

냉각재순환펌프의 내부 구조는 회전자, 고정자, 구조용 관으로 복잡하며 이루어져 있으며 해석 모델에 반영하였다.

냉각재순환펌프를 유한요소 해석을 위하여 2차원 보(Beam)로 모델링하여 보 요소(Beam element)를 사용하였다. 그림 2는 본 연구에서 수행한 냉각재순환펌프의 유한요소 모델 개발에 대한 설명을 하기 위한 것이다. 냉각재순환펌프는 그림 1(b)과 같이 복잡한 내부 구조물을 이루고 있다. 냉각재순환펌프는 하나의 보(Beam)로 모델링되었기 때문에 내부 구조물을 고려해야 한다. 그림 2는 그림 1(b)의 냉각재순환펌프의 내부 구조와 원자로 압력용기 덮개 상부를 고려한 유한요소 모델이다. 그림 2는 두 개의 보(Beam)로 구성된다. 그림 2에서 A, B, C, D는 각각 일차냉각수 유로안내관, 회전축, 구조용 관, 고정자 부분이며 하나의 보(Beam)을 구성한다. 그리고, 그림 2의 F부분은 원자로 압력용기 부분으로 하나의 보(Beam)를 구성한다. 이러한 이유로 냉각재순환펌프 부분과 원자로압력용기 덮개 상부는 서로 다른 절점(Node) 번호를 사용하였다. 그림 2의 F 부분은 냉각재순환펌프와 체결되는 부분이 있으며 그림 2와 같이 서로 동일한 절점(Node)를 공유하도록 하였다. 그림 2에서 각 요소(Element)는 두 개의 절점(Node)으로 이루어지며 요소(Element) 2와 3은 동일한 절점(Node) 2와 3으로 구성된다.

그림 2와 같은 방법으로 냉각재순환펌프 동특성 해석에 필요한 유한요소 데이터를 표 1과 같이 작성하였다. 표 1은 요소 번호, 요소에 대한 절점 번호, 그리고, 탄성계수, 밀도 및 요소를 구성하는 단면적과 면적 관성모멘트로 구성된다. 보 요소(Beam element)는 단면적과 면적 관성 모멘트등과 같은 데이터를 사용한다[4]. 표 1에서 동일한 단면적과 관성모멘트에 대하여 반복적인 데이터는 생략하였다. 단위는 SI 단위계를 사용하였다.

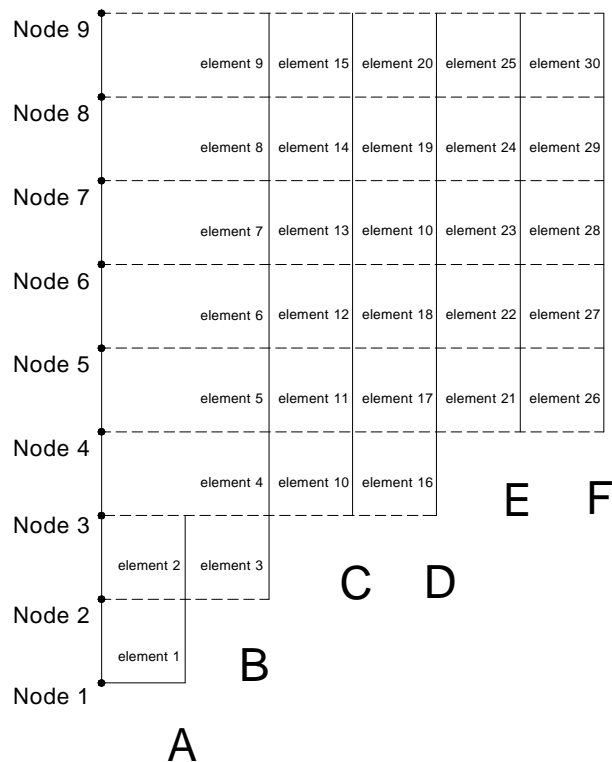


그림 2 동특성 해석을 위한 유한요소 모델

표 1 냉각제순환펌프 동특성 해석 모델의 요소 데이터

1	1	2	199GPa	8027	2.417E-02	6.203E-04
2	2	3	199GPa	8027	2.517E-02	5.067E-04
3	3	4	199GPa	8027	2.072E-02	2.831E-04
4	4	5	199GPa	8027	3.894E-02	4.755E-04
5	5	6	199GPa	8027	3.894E-02	4.755E-04
6	6	7	199GPa	8027	4.966E-02	6.489E-04
7	7	8	199GPa	8027	8.436E-02	1.335E-03
8	8	9	199GPa	8027	1.758E-01	2.602E-03
9	9	10	199GPa	8027	1.758E-01	2.602E-03
10	5	6	199GPa	8027	9.420E-03	7.183E-06
12	7	8	199GPa	8027	9.420E-03	7.183E-06
13	8	9	199GPa	8027	4.946E-03	2.009E-06
20	15	16	199GPa	8027	4.946E-03	2.009E-06
21	16	17	199GPa	8027	2.679E-02	5.747E-05
24	19	20	199GPa	8027	2.679E-02	5.747E-05
25	20	21	199GPa	8027	4.946E-03	2.009E-06
28	23	24	199GPa	8027	4.946E-03	2.009E-06
29	24	25	199GPa	8027	2.748E-03	6.354E-07
30	25	26	199GPa	8027	1.178E-03	1.251E-07
31	11	12	199GPa	8027	1.507E-02	4.343E-04
41	21	22	199GPa	8027	1.507E-02	4.343E-04
42	10	11	199GPa	8027	6.131E-02	9.890E-04
44	12	13	199GPa	8027	6.131E-02	9.890E-04
45	13	14	199GPa	8027	1.036E-01	1.322E-03
46	14	15	199GPa	8027	4.641E+04	6.869E+08
47	15	16	199GPa	8027	4.641E+04	6.869E+08
48	16	17	199GPa	8027	3.359E-02	6.159E-04
49	17	18	199GPa	8027	3.359E-02	6.159E-04
50	18	19	199GPa	8027	1.500E-02	2.972E-04
52	20	21	199GPa	8027	1.500E-02	2.972E-04
53	16	17	55.8GPa	7900	9.601E-02	1.167E-03
56	19	20	55.8GPa	7900	9.601E-02	1.167E-03
57	27	28	174GPa	7900	1.036E-01	3.965E-03
61	31	20	174GPa	7900	1.036E-01	3.965E-03

유한요소 해석은 2차원으로 고려하였기 때문에 경계조건에 대한 자유도는 x방향에 대한 변위, y방향에 대한 변위, 그리고 z방향에 대한 회전성이 있다. 그림 1의 하단부와 그림 2 A의 하단부분은 원자로 압력용기 내부에 설치되는 부분으로 x에 대한 변위를 구속하였다. 그리고, 그림 2 A의 상단 부분은 냉각제순환펌프가 원자로 압력용기 덮개 부분에 접촉하는 부분이므로 x방향의 변위를 구속하였다. 그리고, 그림 2 F 부분은 원자로 압력용기 덮개에 연결된 부분이다. 이 부분은 원자로 압력용기 덮개 부분에 구속되어 있다. 따라서, 그림 2 F 하단에 대한 경계조건은 모든 자유도를 구속하였다. 그리고, 냉각제순환펌프 플랜지 부분은 부가질량을 고려하여 500kg을 적용하였다. 그림 2와 같은 방법으로 표 1를 구성하였으며 해석을 수행하였다.

2.2 해석 결과

본 논문은 냉각제순환펌프의 전체적이고 거시적인 구조적 건전성을 평가하기 위한 방법으로 동특성 해석을 수행하였다. 동특성 해석은 위에서 제시한 모델을 적용하여 수행하였다. 본 장에서 SMART 냉각제순환펌프 동특성 해석 결과를 제시하였다.

그림 4, 5, 6, 7은 냉각제순환펌프에 대한 모델과 유한요소 데이터를 적용하여 해석한 결과이다.

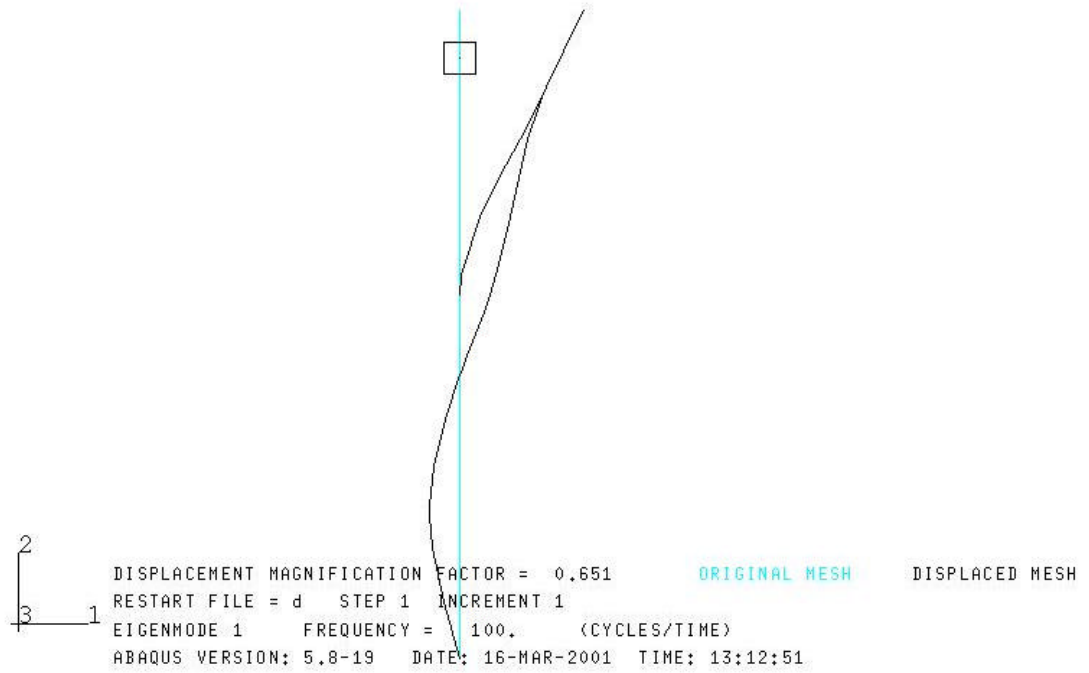


그림 4 냉각재순환펌프 1차 모드형

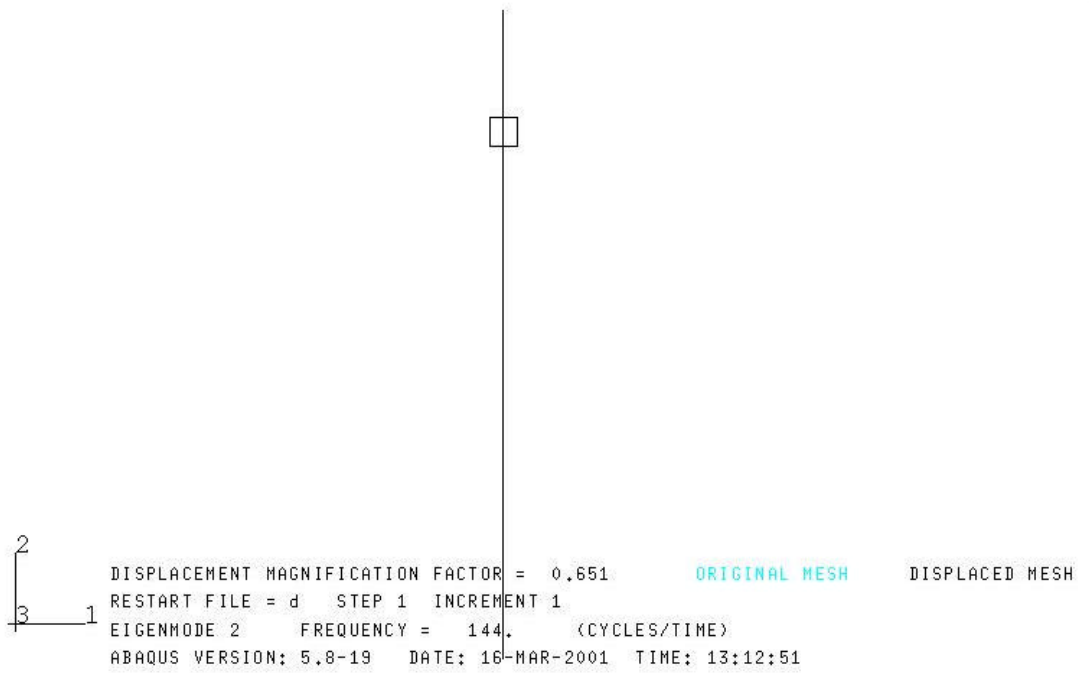


그림 5 냉각재순환펌프 2차 모드형

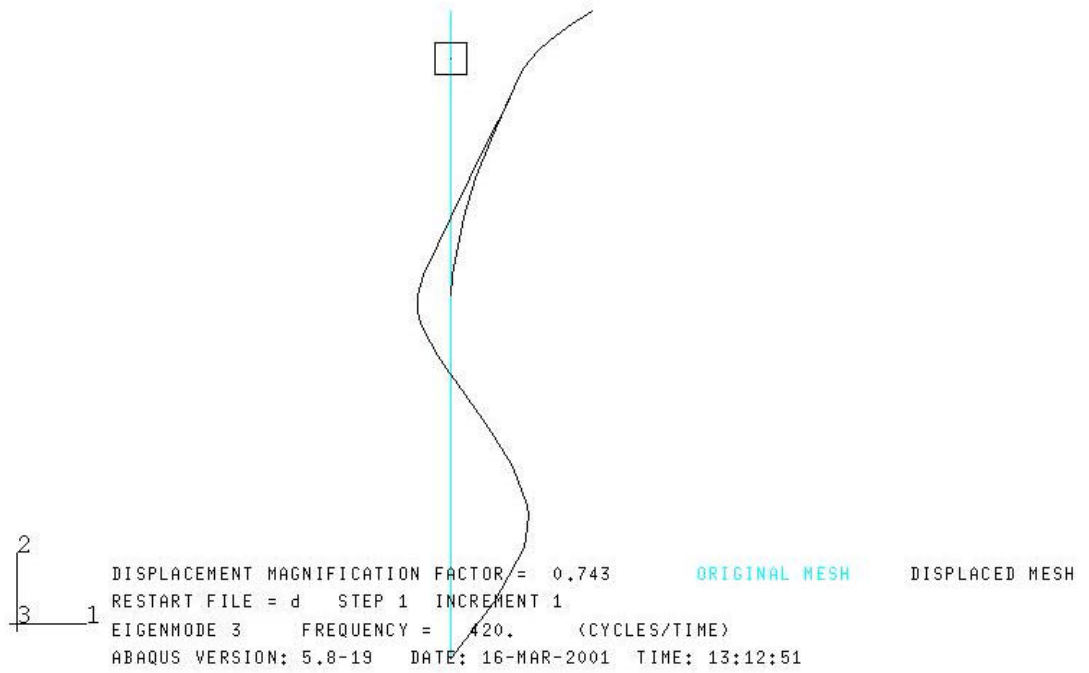


그림 6 냉각재순환펌프 3차 모드형

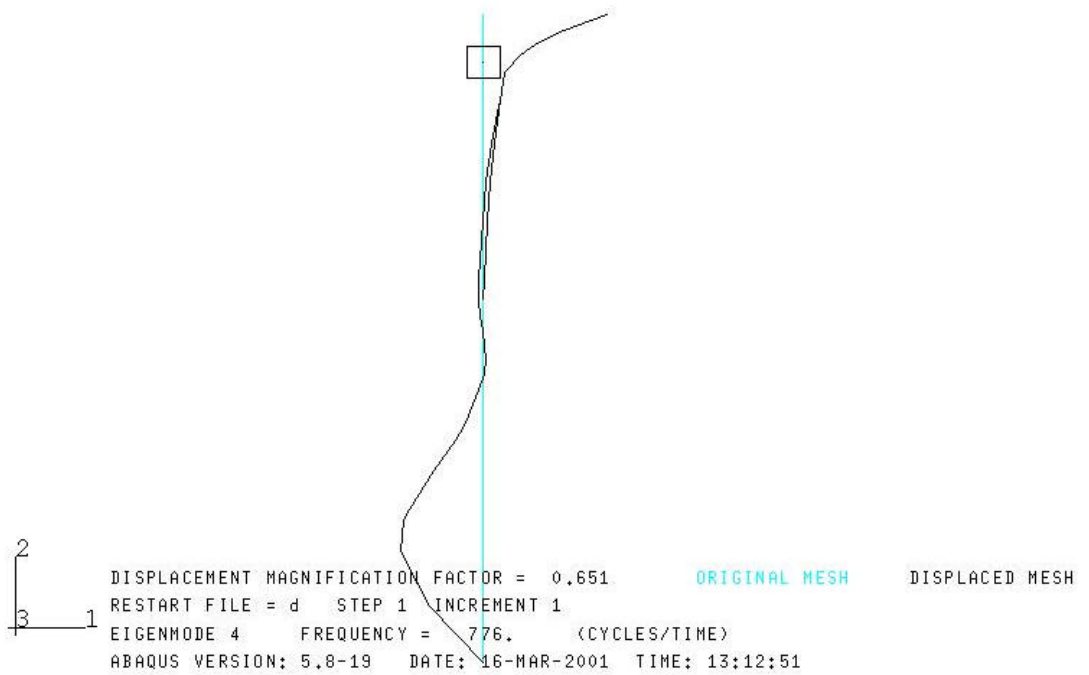


그림 7 냉각재순환펌프 4차 모드형

각 그림에서 보(beam)의 굽힘 진동에 형상이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 2의 A, B, C, D, E 부분과 F부분이 서로 다르게 거동하는 것을 볼 수 있다. 각 그림의 상단부에서 서로 붙어 있다. 이것은 냉각재순환펌프와 원자로 압력용기 덮개 상단 부분이 체결되는 것을 고려한 것이다. 각 그림의 상단에 작은 사각 상자 부분은 부가질량을 적용한 것이다. 그림 4, 5, 6, 7은 각각의 고유 진동수에 대한 모드이다.

표 2는 냉각재 순환 펌프 동특성 해석 결과인 그림 4, 5, 6, 7에 대한 고유 진동수 값과 모터로 인한 운전 영역에 대한 가진 주파수와 임펠러의 5개의 날개로 발생하는 가진 주파수를 비교하기 위하여 제시한 것이다. 냉각재순환펌프의 고유진동수는 운전속도에 대한 가진 주파수 보다 큰 값을 가지며 운전속도범위로부터 충분히 떨어져 있어 운전 중 모터에서 발생하는 가진으로 인한 심각한 진동은 없을 것으로 판단된다. 그러나 임펠러에 의한 가진 주파수와 냉각재순환펌프의 저차 고유진동수는 근접해 있기 때문에 임펠러에 의한 가진은 운전 중 안전성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 임펠러 날개에서 발생하는 가진력은 냉각재순환펌프의 진동방향과 일치하지 않으므로 심각한 진동을 유발하지는 않을 것이다.

표 2 냉각재순환펌프의 고유진동수

모드	고유진동수
1	100 Hz
2	144 Hz
3	420 Hz
4	776 Hz

3 결론

본 연구에서는 냉각재순환펌프의 동특성 해석을 위한 유한요소모델을 개발하고 해석결과를 바탕으로 냉각재순환펌프의 운전 중 안전성을 평가하였다. 냉각재순환펌프의 고유진동수가 운전속도범위로부터 충분히 떨어져 있어 운전 중 모터에서 발생하는 가진으로 인한 심각한 진동은 없을 것으로 판단된다. 그러나 임펠러에 의한 가진은 운전 중 안전성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되지만 임펠러 날개에서 발생하는 가진력은 냉각재순환펌프의 진동방향과 일치하지 않으므로 심각한 진동을 유발하지는 않을 것이다. 그러나 고유진동수와 가진력의 주파수가 근접하다는 것은 바람직한 설계방향이 아니다. 본 연구에서 구성한 냉각재순환펌프의 유한요소모델은 많은 단순화 과정을 거쳐 작성한 것이므로 이를 이용한 해석의 결과는 실제구조물의 동특성과 다소 차이가 있을 것이다. 그러므로 보다 정밀한 모델을 개발하고 상세한 동특성 해석을 수행하여 고유진동수와 각종 가진력 사이의 관계를 분석할 필요가 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- [2] 박진석 외 다수, 일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 개념설계, KAERI/TR-1447/99, 1999.

[3] 정군석 외 다수, 냉각재순환펌프 제작기술 개발 및 원형제작, KAERI/CM-249/98, 1999.

[4] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8.

[5] *I-DEAS Master series*, Version 7.0, SDRC Korea.