

# 원자로냉각재펌프 축밀봉장치에 대한 구조적 건전성 평가

김민수<sup>†</sup>·김민철<sup>\*</sup>·김옥석<sup>\*</sup>·정성호<sup>\*</sup>

## Structural Integrity Evaluation for the Reactor Coolant Pump Shaft Seal Assembly

Minsu Kim<sup>†</sup>, Minchul Kim<sup>\*</sup>, Oaksug Kim<sup>\*</sup> and Sungho Chung<sup>\*</sup>

(Received 27 October 2017, Revised 15 December 2017, Accepted 19 December 2017)

### ABSTRACT

The shaft seal of the reactor coolant pump is installed on the upper side of the rotating shaft of the pump to seal the reactor coolant from flowing out between the rotating shaft and the non-rotating parts. In this study, the loading conditions for the normal operation and faulted conditions are identified and structural integrity evaluation is performed using the finite element stress analysis for the sealing apparatus of the APR 1400 reactor coolant pump. It is confirmed that the stress analysis results satisfy the design criteria at all loading conditions

**Key Words :** Reactor Coolant Pump (RCP, 원자로냉각재펌프), Shaft Seal Assembly(축밀봉장치), Non-contact Seal (비접촉식 실), Hydrodynamic Seal (하이드로다이나믹 실), Advanced Power Reactor 1400 (APR 1400)

### 1. 서 론

원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump, RCP)는 원자력발전소의 핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System, NSSS)의 일차측에 설치되며 원자로냉각재를 강제 순환시켜 핵연료에서 발생된 열을 증기발생기(Steam Generator, SG)의 이차측으로 전달하는 기능을 수행하는 기기로 이러한 RCP의 상세 형상 및 기능은 다음과 같다.<sup>(1,2)</sup>

- 1) RCS 강제순환유량 제공을 통한 노심 일차 열 제거 기능 및 열출력 보충 유량 제공
- 2) 펌프 마찰에너지에 의한 발전소 예열 및 출력 보조기능
- 3) 전원상실사고 시 노심냉각을 위한 충분한 Coastdown Flow 제공

신고리 3/4호기 이후부터 건설 중인 APR1400 노형 원자력발전소에 적용된 원자로냉각재펌프는 신한울 1/2호기를 기점으로 미국 웨스팅하우스사에서 공급한 RCP와 국산화 RCP로 구분된다. 국산화 RCP는 케이싱을 용접 없이 일체형으로 제작하고 임펠러와 디퓨저를 주조가 아닌 단조를 이용하여 가공하는 등 구조물과 부품의 제작 건전성을 개선하였다. 또한 펌프 내부 조립체와 케이싱의 분리설계를 적용하고, Thrust Bearing Assembly(TBA)의 수명 개선 및 예방점검 기능을 추가하였으며, Removable Shaft Section의 적용을 통해 TBA의 분해 없이 Shaft Seal의 교체가 가능하게 하여 펌프의 분해 점검 시간을 단축하고 작업자의 피폭을 줄일 수 있도록 하였다. 축밀봉장치(Shaft Seal Assembly)에는 정지 밀봉 시스템(Standstill Seal System)이 추가로 적용되어, 발전소 정전사고(Station Blackout, SBO)나 RCP정지 시 원자로냉각재 누설을 원천적으로 차단할 수 있도록 하였다. 이렇듯 국산화 RCP는 기존 웨스팅하우스형 RCP 대비 제작 건전성, 운영의 효율성 및 안전성 측면에서 기존 설계를 보완한 더 나은 성능을 보인다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, ㈜두산중공업  
minsu7.kim@doosan.com  
TEL: (055)278-5899 FAX: (055)278-8497  
<sup>\*</sup> ㈜두산중공업

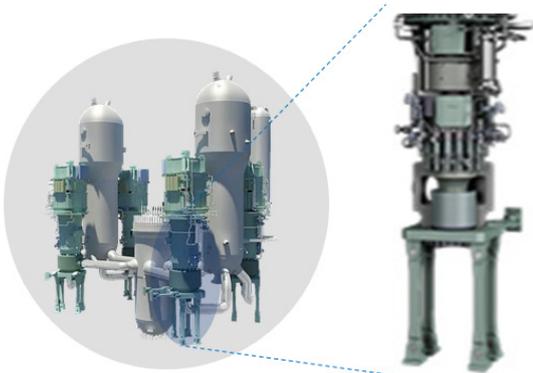


Fig. 1 Main components and reactor coolant pump of nuclear power plants

펌프나 터빈과 같은 회전기기의 회전축에 적용되는 축밀봉체(Shaft Seal)는 축과의 접촉 여부에 따라 접촉 Seal과 비접촉 Seal로 구분할 수 있다. 비접촉 Seal은 접촉 Seal 대비 마찰 저항, 마모 및 동력손실이 적고, 유지보수비용이 절감 되는 물론 발열이 없어 고속운전이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 Hydrostatic seal, Hydrodynamic seal, Labyrinth seal 등의 다양한 비접촉 Seal 기술이 개발 및 적용되고 있다.

국산화 RCP의 Shaft Seal System은 Fig. 2에서와 같이 Pump Shaft의 Removable Shaft Section 하부에 설치되어, 회전축과 비회전 부품 사이로 원자로 냉각재가 유출되지 않도록 밀봉하는 역할을 한다. Shaft Seal에는 3단 Hydrodynamic Seal이 채택되었으며, Fig. 2와 같이 Throttle Pipe를 통해 동일한 감압비로 압력강하가 이루어진 밀봉수(Seal Injection Water)가 3단 Seal에 각각 동시에 공급된다. 밀봉수의 청정도는 Hydrodynamic seal의 수명을 결정짓는 가장 큰 요소 중 하나이다. 국산화 RCP의 Shaft Seal System에서는 Shaft Seal의 각 단에 청정한 밀봉수가 공급되는 시스템이 적용됨으로써 수명기간 동안 Shaft Seal의 안정적인 운전을 보장할 수 있게 된다.

운전 조건의 변화에 따라 Shaft Seal에 과도한 구조적 변형 또는 파손이 발생하게 되면, Shaft Seal의 정상적인 밀봉기능을 상실하게 된다. 이러한 현상은 과도한 밀봉수의 누설로 이어지게 되며 발전소의 운전이 심각한 상황을 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해 정상 및 비정상 운전 조건에서 Shaft Seal의 구조적 건전성에 대한 확인이 필수적으로 요구된다.

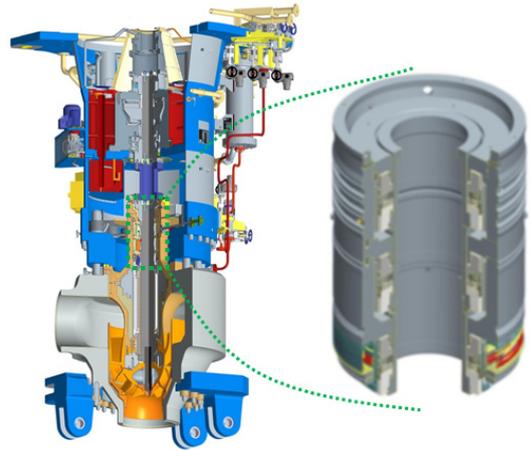


Fig. 2 Reactor coolant pump and shaft seal

본 연구에서는 국산화 RCP의 Shaft Seal에 대한 구조건전성 평가 기준을 수립하고, 해석 결과의 신뢰성을 보장할 수 있는 최적화된 유한요소 모델을 구성하였으며, 정상 및 비정상 운전 조건을 충분히 모사할 수 있는 적용 하중을 결정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 통해 APR1400 노형의 국산화 RCP의 Shaft Seal에 대한 구조적 건전성을 평가 및 입증하였다.

## 2. Shaft Seal 구조 및 성능요건

국산화 RCP의 Shaft Seal 구조는 Fig. 3과 같다. 총 3개 단으로 구성되며, Throttle Pipe를 통해 각 단에서 동일한 감압비로 감압된 밀봉수가 공급된다. 마지막 단에서 Seal Face를 통과하여 대기압으로 최종 감압되는 밀봉수의 유량을 저압누설유량(LP Leakage Flow)이라 하며, 5~10 l/h가 되도록 설계되었다. 각 단의 Seal Face를 통과하지 않고 회수되는 밀봉수의 유량을 고압누설유량(HP Leakage Flow)이라 하며, 그 유량은 1,000 l/h로 설계되었다. 고압의 밀봉수는 별도의 Throttle Pipe를 통해 대기압으로 감압되어 저장탱크로 이동한다. Shaft Seal의 가장 중요한 역할은 축을 따라 누설되는 냉각재와 밀봉수를 적정량으로 제한하는 것이다. 이는 Shaft Seal의 비정상적인 운전 상황에도 요구되어 과도한 누설이 발생하거나 회전축의 회전에 지장을 초래하지 않으며 안정적으로 정비가 가능하도록 설계되어야 한다.

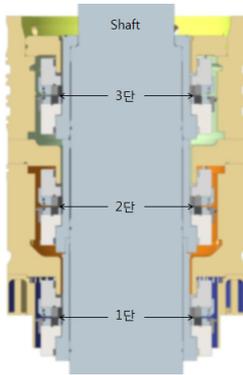


Fig. 3 Structure of shaft seal

Fig. 4는 국산화 RCP Shaft Seal의 구조 및 구동 원리에 대한 이해를 돕기 위해 회전부와 비회전부를 구분한 단면도이다. 회전부는 RCP Shaft와 함께 회전하며 비회전부는 RCP Seal Housing을 비롯한 연계 부품에 의해 고정된다. Shaft Seal의 회전부와 비회전부의 경계인 Seal Face는 정지 시 서로 접촉하고 있다가, Shaft를 포함한 회전부가 회전하는 즉시 Hydrodynamic force의 발생으로 이격되며, 구조적으로 복원력 및 압력 차에 의한 하중과 균형을 이루면서 Shaft Seal의 기능을 수행한다.



Fig. 4 Cross section of shaft seal

### 3. 구조건전성 평가

#### 3.1 평가기준 수립

RCP의 Shaft Seal은 밀봉수의 누설량을 적정량으로 제한하기 위해 정상운전 조건뿐만 아니라 비정상적인 운전 상황에서도 과도한 누설이 발생하지 않아야 한다. 이를 위해서는 정상 및 비정상 운전 조건에서 Shaft Seal의 구조건전성이 유지되는지 확인되어야 한다.

이를 평가하기 위해서는 세가지 기준이 사전에 수립되어야 한다. 첫번째는 정상 운전 조건에 대한 기준이며, 두번째는 비정상 운전 조건에 대한 기준, 그리고 세번째는 구조건전성 유지의 판단 기준이다. 본 연구에서는 관련 기준을 다음과 같이 정의하였다.

- 1) 정상 운전 조건은, 냉각재의 압력이 설계기준 압력으로 유지되고 밀봉수가 정상 압력 상태로 주입되며, 각 단계에서의 감압이 설계된 바에 따라 이루어지는 경우이다.
- 2) 비정상 운전 조건은, 냉각재의 압력은 설계기준 압력으로 유지되나, 1개 또는 2개의 단계에서 Seal의 기능이 정상적으로 작동하지 않는 경우의 조합이다.
- 3) 구조건전성의 판단기준은 정상 및 비정상 운전 조건에서의 하중 조건을 반영하여 응력 평가를 수행하고, 그 결과를 KEPIC MNB-3200, 해석에 의한 설계의 기준을 준용하여 비교 평가하는 것으로 한다.

#### 3.2 유한요소 모델

국산화 RCP Shaft Seal은 40여개 이상의 복잡한 부품으로 구성되며 전체적으로 원통형 구조를 가지고 있다. 이에 따라 해석의 수렴성 및 경제성을 위해 2차원 축 대칭 모델로 단순화하여 해석을 수행하였다. 해석 모델을 2차원 모델로 단순화하였으나, O-Ring Groove 등의 세부 단면 형상을 Fig. 5와 같이 모두 반영함으로써 해석 결과의 신뢰도를 보장할 수 있도록 하였다.

Fig. 6은 본 연구에 적용된 유한요소 모델에 대한 격자 민감도 평가 결과이다. 정상운전 조건에서 격자의 수를 달리하여 해석을 수행하고 최대응력강도 결과를 기준으로 분석하였으며, 그 결과에 따라 최적화된 유한요소모델을 선정하여 해석 및 평가를 수행하였다.



Fig. 5 FE model for shaft seal

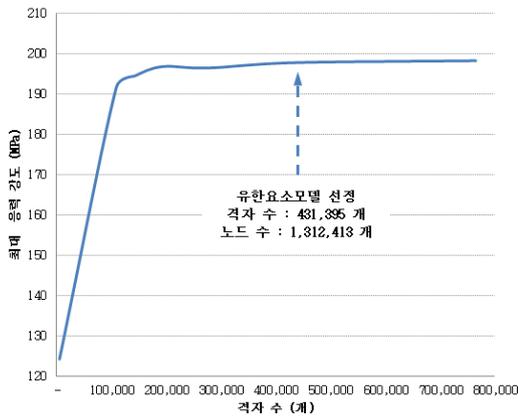


Fig. 6 Results of FE mesh sensitivity analysis

Shaft Seal의 부품들은 억지 끼워 맞춤, Pin 체결, Screw 체결 등의 다양한 체결 방식이 적용되고 있어 해석 결과의 수렴과 정확한 해석 결과 도출을 위해서는 관련 사항을 잘 모사할 수 있는 경계 조건을 부여해야 한다. 더불어 인접 부품간의 구조적 영향이 필수적으로 고려되어야 하므로 적절한 물리적 계수의 설정 또한 매우 중요하다.

### 3.3 하중의 설정 및 적용

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 국산화 RCP의 Shaft Seal에 대해 정상 및 비정상 운전 조건에서의 구조적 건전성을 평가한다. 비정상 운전 조건은 Shaft Seal의 3개 단 중 1개 또는 2개의 단에서 Seal의 기능이 정상적으로 작동하지 않는 경우를 기준으로 하고 있다. 이에 따라 정상 및 비정상 운전 조건에서의 Load Case를 아래와 같이 7가지로 분류할 수 있다.

- 1) Load case 1: All Stage working with Design Pressure
- 2) Load case 2: Stage 1 and 2 working, Stage 3 failed
- 3) Load case 3: Stage 2 and 3 working, Stage 1 failed
- 4) Load case 4: Stage 1 and 3 working, Stage 2 failed
- 5) Load case 5: Stage 1 working, Stages 2 and 3 failed
- 6) Load case 6: Stage 2 working, Stages 1 and 3 failed
- 7) Load case 7: Stage 3 working, Stages 1 and 2 failed

Shaft Seal의 해석에 고려되는 주요 하중은 압력 하중이다. 정상 운전 조건에서의 압력 하중은 각 단에서 감압되어 적용되는 밀봉수 압력이 고려되었다. 비정상 운전 조건의 압력하중은 Fail 조건으로 설정되는 단에서 Seal의 기능이 완전히 상실되어 100%

누설을 허용하는 극단적인 상황을 가정하여 계산된 값을 적용하였다. Shaft Seal의 설계압력 조건은  $175.75\text{kg/cm}^2\text{ A}$  (2500 psia) 이다. 실제 운전 시 작동 압력을 고려하면, 게이지 압력으로 16.4 MPa이 적용되어야 하나, SBO 조건에서 계통수 압력을 직접적으로 받는 상황을 고려하여 설계압력 조건인 17.14 MPa을 보수적으로 적용하였다. Fig. 7은 단별 압력 하중의 적용을 나타내고 있다.

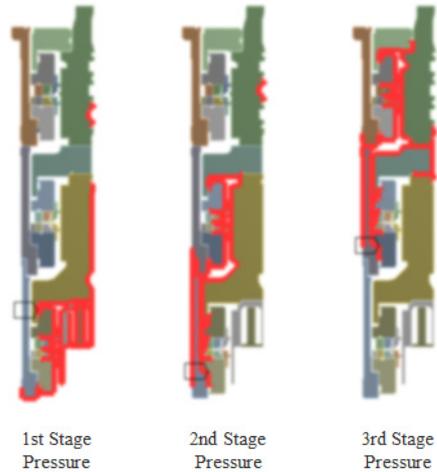


Fig. 7 Applying pressure load at each stage

## 4. 평가 결과

국산화 RCP의 Shaft Seal에 대한 정상 및 비정상 운전 조건에서의 구조적 건전성을 평가하기 위해 총 7가지 Load Case를 설정하였고 각 Case 별로 도출된 하중을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 8은 각 Load Case 별 최대응력강도(Maximum Stress Intensity) 해석 결과를 모아 놓은 것으로 하중 조건 별로 최대응력지점에 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Load Case 별 최대응력강도 결과를 나타내었다. 1단과 3단의 고장으로 인한 2단 Seal 단독 운전 상태인 Load Case 6에서 최대 응력이 발생함을 알 수 있다.

Shaft Seal의 해석 결과에 대한 평가는 KEPIC MNB-3200, 해석에 의한 설계의 기준을 준용하여 수행하였다. Shaft Seal은 DIN 규격의 소재로 제작되어 KEPIC 규격에서는 별도의 설계응력강도(Design Stress Intensity,  $S_m$ )가 제시되지 않음에 따라, 아래의 KEPIC MDP 3000 철강재료 및 비철 금속재료의 설

계응력강도 설정기준을 적용하여 246 MPa로 설계응력강도를 선정하였다.<sup>(4,5)</sup>

각 해당온도에서 최대 설계응력강도는 다음의 값 중 가장 작은 값 이하이다.

- 1) 상온에서 규정된 최소 인장강도의 1/3
- 2) 각 해당온도에서 인장강도의 1/3
- 3) 상온에서 규정된 최소 항복강도의 2/3
- 4) 각 해당 온도에서 항복강도의 2/3

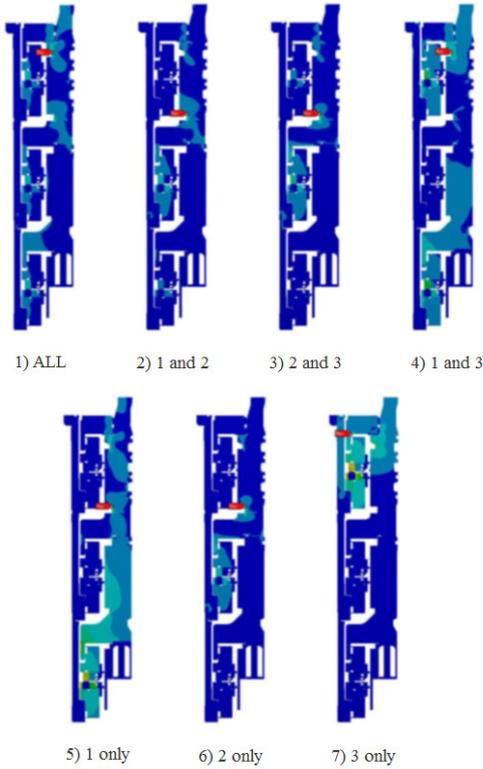


Fig. 8 FE analysis results (Max. Stress Intensity)

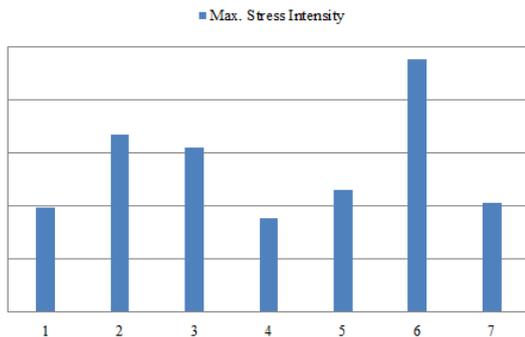


Fig. 9 Maximum stress intensity for each load case

Fig. 10에서 Fig. 13은 정상운전조건인 Load Case 1과 최대응력이 발생하는 2단 Seal 단독운전 조건인 Load Case 6에 대한 일차응력 분석 위치 및 결과를 보여준다. Fig. 10과 Fig. 12에서와 같이 최대응력이 발생하는 부위의 단면에 대해 일차일반막응력(General primary membrane stress,  $P_m$ )과 일차굽힘응력(Primary bending stress,  $P_b$ )이 분석되었다. Fig. 11과 Fig. 13은 분석 결과가 아래의 KEPIC MNB-3200, 해석에 의한 설계의 평가 기준을 모두 만족함을 보여준다.<sup>(3)</sup>

- 1)  $P_m < S_m = 246 \text{ MPa}$
- 2)  $P_m + P_b < 1.5S_m = 369 \text{ MPa}$

Fig. 14는 모든 Load Case에 대한 일차응력강도를 분석한 결과로 모든 Load Case에서 평가 기준을 만족하고 있음이 확인되었다. 최대응력이 발생한 Load Case 6 기준으로 보면, 최소 77%에서 최대 87%의 설계 여유도가 확보되어 있음을 알 수 있다.

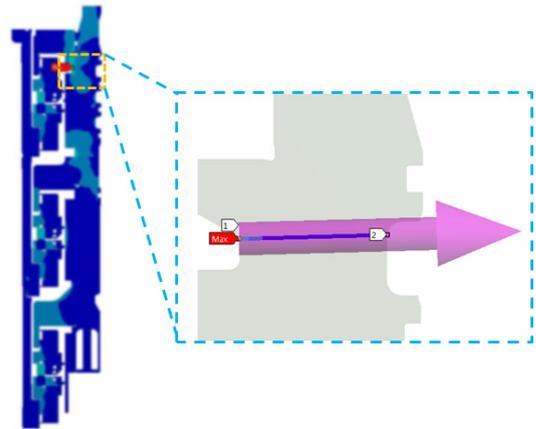


Fig. 10 Primary stress analysis location for Load Case 1

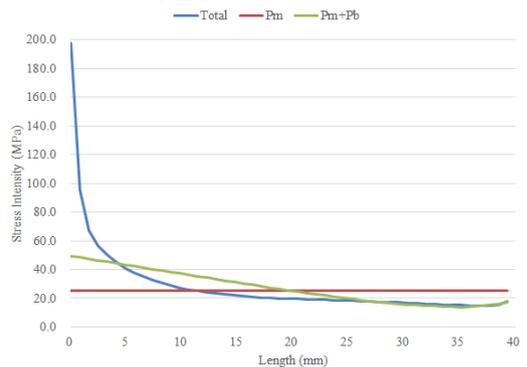


Fig. 11 Primary stress distribution for Load Case 1

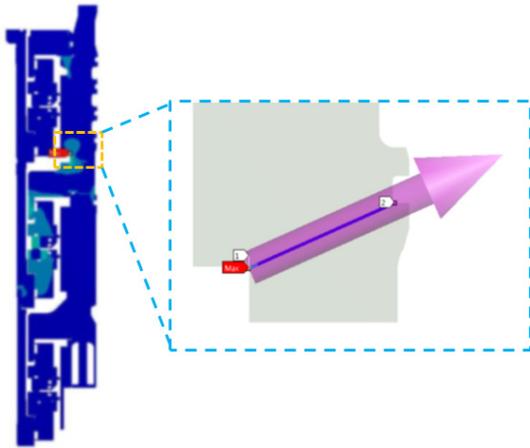


Fig. 12 Primary stress analysis location for Load Case 6

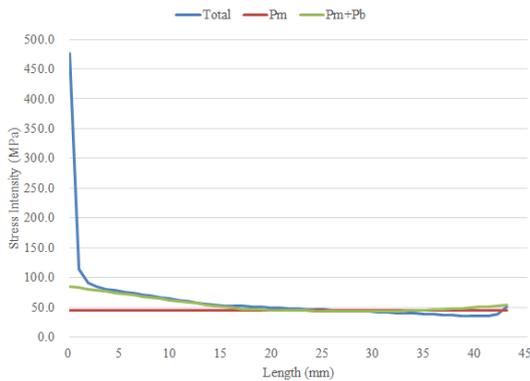


Fig. 13 Primary stress distribution for Load Case 6

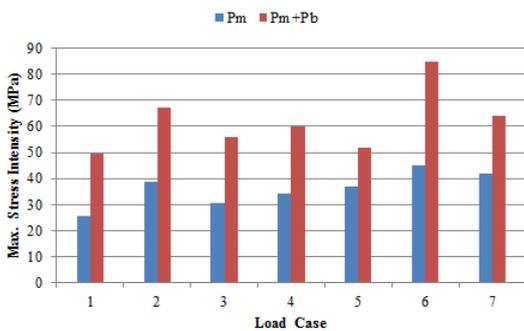


Fig. 14 Summary of primary stress intensity

## 5. 결론

본 연구에서는 APR1400 노형 원전의 국산화 RCP에 사용되는 Shaft Seal에 대하여 정상 운전 조건과 각 단별 고장 조건을 가정한 비정상 운전 조건 하에서

의 구조적 건전성을 유한 요소 해석으로 평가하였다.

유한 요소 해석의 수행을 위해 Shaft Seal의 구조적 특성과 조립 및 설치 조건을 고려하여 유한 요소 모델을 구성하였다. 또한 격자 민감도 분석을 통하여 해석결과의 적합성을 확보하였다. 6가지의 비정상 운전 조건을 정의하였으며, 정상 운전 조건을 포함한 총 7가지의 하중 조건에 대하여 평가하였다. Shaft Seal의 구조 건전성 평가는 각 하중 조건에 따른 응력 해석을 통하여 수행되었으며, 이에 대한 평가는 KEPIC MNB-3200, 해석에 의한 설계의 기준을 준용하여 일차 응력 강도에 대해 진행하였다.

평가 결과, 모든 하중조건에서 일차응력강도 기준을 만족하는 것으로 확인되었으며, 최대응력이 발생하는 하중 조건에서도 위치별로 분포된 응력이 최소 77%에서 최대 87%의 설계여유도가 확보되어 있음이 확인되었다. 이에 따라 APR1400 노형 원전의 국산화 RCP에 적용된 Shaft Seal이 구조적으로 건전함이 확인되었으며, 향후 Shaft Seal 사용 중에 발생할 수 있는 다양한 상황에 즉각적으로 대응할 수 있는 구조적 건전성 평가 기술이 확보 되었다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, KETEP) RCP Seal 계통의 SBO 안전성 평가 및 핵심 기술 개발 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, M. C., Bang, S. Y., Lee, K. W., Choi Y. J. and Kim, Y. S., 2010, "Structural Integrity Assessment of the Pump Shaft Assembly of the APR1400 Reactor Coolant Pump," Proc. of ASME PVP2010/KPVP Conference, Vol. 9, Bellevue, Washington, USA, pp. 45~50.
- (2) Kim, I. J., Lim, D. H., Kim, M. C. and Bang, S. Y., 2014, "Introduction of Vibration Evaluation for APR 1400 Reactor Coolant Pump Shaft," Proc. of the KSNVE Conference, pp. 110 ~ 115.
- (3) KEPIC, 2000, "원자력안전등급기기에 대한 설계, 제작, 시공," KEPIC MNB, 2001, 2002 and 2003 Add..

- (4) KEPIC, 2000, "원자력안전등급기기에 대한 설계, 제작, 시공," KEPIC MNZ, 2001, 2002 and 2003 Add.
- (5) KEPIC, 2000, "원자력 및 화력발전 압력용기 제작 재료," KEPIC MNZ, 2001, 2002 and 2003 Add.
- (6) Mayer, E., 1982, *Mechanical Seals*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, pp. 1~34.