

APR1400 원자로 축소모델 하향유로 수력하중 평가

Assessment of Hydraulic Loads at Downcomer for Advanced Power Reactor 1400 Scale-down Model

고도영* · 김규형*† · 장호철**

Do-young Ko*, Kyu-hyung Kim*† and Ho-cheol Jang**

(Received April 6, 2023 ; Revised June 12, 2023 ; Accepted June 16, 2023)

Key Words : Scale Model Testing(축소모델시험), Hydraulic Loads(수력하중), Downcomer(하향유로), Comprehensive Vibration Assessment Program(종합진동평가)

ABSTRACT

The hydraulic loads of the downcomer here were obtained by installing and testing several dynamic pressure transducers in a 1/7 scale model of the reactor. The downcomer could be divided vertically into five hydraulic load regions based on the measured values. The dynamic pressure of the inner wall of the reactor vessel and the outer wall of the core support barrel at the positions facing each other demonstrated almost the same value. In addition, even when dynamic pressure transducers installed at the same height had a phase difference of 180°, almost the same level of dynamic pressure was measured. The hydraulic loads of this study will be adopted as key data for verifying the integrity of the design of the APR1400 reactor internals.

약어

AIV : acoustic-induced vibration
APR : advanced power reactor
AR : acoustic resonance
BPF : blade passing frequency
CSB : core support barrel
CVAP : comprehensive vibration assessment program
FEI : fluid-elastic instability
FIV : flow-induced vibration
KHNP-STAR : Korea hydro & nuclear power – scale model testing apparatus for reactor

LSS : lower support structure
MIV : mechanical-induced vibration
NRC : nuclear regulatory commission
PSD : power spectral density
RCP : reactor coolant pump
RG : regulatory guide
RMS : root mean square
RV : reactor vessel
SMT : scale model testing
TB : turbulent buffeting
VS : vortex shedding

† Corresponding Author ; Member, Korea Hydro & Nuclear Power Co., - Central Research Institute (KHNP-CRI), Senior Researcher
E-mail : kyuhyung.kim@khnp.co.kr

* KHNP-CRI, Principal Researcher

** NSSS Division, KEPCO Engineering & Construction Co., Inc., Researcher

‡ Recommended by Editor Gunwoo Noh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

1. 서 론

원자로 내부구조물은 U.S. nuclear regulatory commission(NRC), regulatory guide(RG) 1.20⁽¹⁾에 따라 설계 검증이 요구된다. 원자로 내부 주요 응력은 냉각재에 의한 수력하중(hydraulic loads)으로 유동유발진동(flow-induced vibration)을 발생시킨다. 이 논문은 APR1400 원자로 하향유로(downcomer)의 수력하중을 산출하기 위해 원자로 축소모델에서 시험한 결과를 분석 및 평가한 것이다. 원자로 하향유로는 원자로냉각재펌프(reactor coolant pump, RCP)에 의해 강제 순환된 냉각재가 저온관을 통해 원자로 입구로 유입되어 원자로용기(reactor vessel, RV) 내벽과 노심지지배럴(core support barrel, CSB) 외벽 사이로 하부지지구조물(lower support structure, LSS)로 이동하는 곳이다. 원자로 하향유로는 원자로 내부에서 수력하중이 가장 큰 곳 중 하나로 알려져 있기 때문에 이 논문의 평가 대상이 되었다^(2,3). 이 연구는 국내 최초로 원자로 설계 유효원형(valid prototype)을 개발하기 위한 원자로 축소모델시험(scale model testing, SMT) 종합진동 시험평가⁽⁴⁾의 일부로 하향유로의 수력하중을 측정⁽⁵⁾ 및 분석하였다. 이 연구에서 얻어진 원자로 축소모델 하향유로의 수력하중은 향후 신규 건설될 APR1400 원형(prototype)⁽¹⁾ 원자로 내부구조물의 유동 하중함수 예측과 구조 및 응답 해석을 수행하기 위한 입력자료로 활용되는 등 원자로 설계 검증을 위한 주요 자료로 사용될 것이다.

2. 원자로 수력하중 측정 대상 및 센서 설치

2.1 수력하중 측정 조건 및 대상

이 연구에서의 시험조건은 정상운전(4개 원자로냉각재펌프 가동)에서 1회당 최소 5분 동안 5회 반복 측정하였다. 또한, 유동조건은 압력 9.21 bar(133.6 psi), 온도 60.6°C(141.08°F), 밀도 983.271 kg/m³, 유량 120 % 조건이다. 평균유속은 원형 원자로와 동일한 강수부 평균 유속 8.065 m/s이며 Reynolds 수는 원형 원자로대비 1/25.92이다.

원자로 내부구조물의 가진원은 유동유발진동(flow-induced vibration, FIV), 음향유발진동(acoustic-induced vibration, AIV), 음향공진(acoustic resonance, AR),

그리고 기계유발진동(mechanical-induced vibration, MIV) 등이다. FIV는 TB(turbulent buffeting), VS(vortex shedding), FEI(fluid-elastic instability) 등으로 알려져 있다. Au-Yang 등^(2,3)의 연구에서도 원자로 내부구조물의 수력하중 평가는 하향유로에서 수행되었다. 하향유로는 RV 내벽과 CSB 외벽 사이에 위치하여 냉각재가 원자로 내부구조물과 가장 먼저 부딪혀 유로가 변경되는 곳으로 수력하중이 가장 큰 곳 중 하나이다. 이 연구에서는 기존 연구와 달리 APR1400 원자로 축소모델 전체의 수력하중을 산출하기 위하여 광범위한 측정을 시행하였으나, 이 논문에서는 하향유로 수력하중의 측정, 분석 및 평가에 대하여 기술한다.

2.2 센서 위치 선정 및 설치

이 연구는 국내 최초로 원자로 설계 유효원형을 개발하기 위해 APR1400 원자로의 1/7 선형 척도해석법을 적용하여 설계 및 제작된 KHNP-STAR(Korea hydro & nuclear power – scale model testing apparatus for reactor)에서 수행되었다. KHNP-STAR는 원자로 냉각재 유속을 실제 원전과 동일하게 구현한 원자로 축소모델시험 장치이다. KHNP-STAR는 원자로 축소모델, 냉각재펌프, 수조, 열교환기, 냉각탑, 배관계통, 인버터 등의 제어계통, 센서 등의 계측제어 및 자료 취득계통, 전원공급계통 등으로 구성되었다⁽⁴⁾. Fig. 1은 KHNP-STAR 3D 구성도이고, Fig. 2는 KHNP-STAR 하향유로 수력하중 측정을 위해 설치된 센서 배치도이다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 RV 내벽과

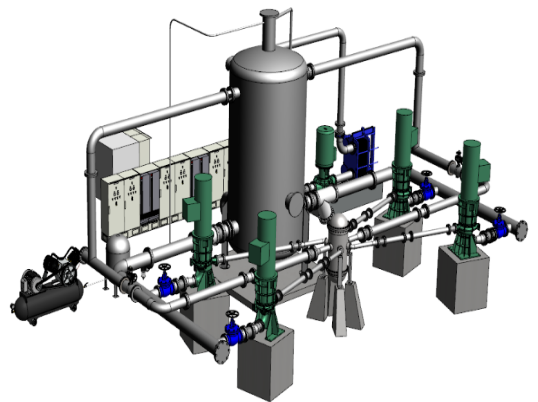


Fig. 1 KHNP-STAR 3D diagram

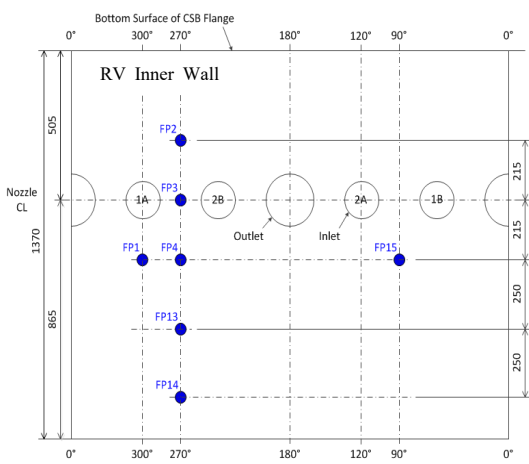
CSB 외벽에 설치된 동압계를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 센서는 하향유로에 총 5개의 높이로 설치되었다. 기존 국내 원자로 하향유로의 수력하중은 높이를 세 부분으로 산출하여 설계에 적용해 오고 있는데, 이 연구에서는 기존보다 구역을 더 세분하여 산출하기 위해 5개 구역으로 나누었다. FP15는 FP04와 180° 위상차를 두어 FP04의 측정 실패에 대비하기 위한 백업 센서이다. 한편, 원자로 하향유로 수력하중 측정을 위한 센서는 Fig. 2(a)와 같이 RV 내벽에 센서를 설치한 배치도로 충분할 것으로 판단된다. 그러나, 이 연구에서는 마주보는 구조물의 동일 위치에서 동압이 동일한지를 실험으로 확인하기 위해

Fig. 2(b)의 FP17를 설치하여 Fig. 2(a)의 FP03과 비교하였다. 또한 저온관으로부터 입력되는 냉각재가 직접 부딪히는 CSB 위치에서의 수력하중이 매우 클 것으로 가정하고 이를 확인하기 위해, FP16 및 FP18을 180° 위상차를 두어 이중 배치하여 두 개 중 한 개의 센서의 측정 오작동에 대비하였다. 따라서, Fig. 2(b)와 같이 CSB 외벽에 추가적으로 세 개의 센서가 설치되었다. 이 연구에서 원자로 하향유로 수력하중 측정을 위해 5개 높이로 구분하였고, 주요 센서는 백업을 반영하여 모두 10개의 동압계가 배치되었다.

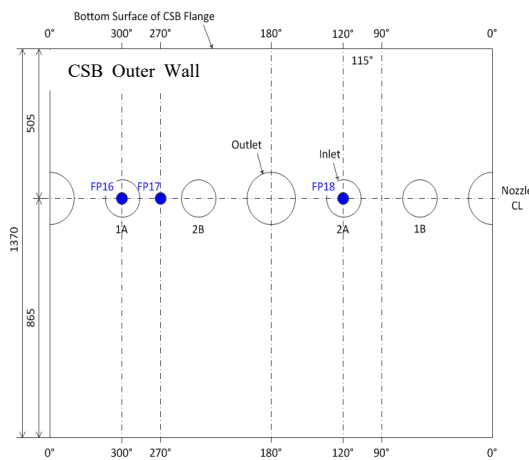
3. 원자로 하향유로 수력하중 분석 및 평가

3.1 마주보는 두 구조물에서의 동압 분석

원자로 하향유로 수력하중 측정을 위한 시험장치의 온도는 60.6°C(141.08°F), 압력 9.21 bar(133.6 psi), 유량 120 % 조건에서 5회 반복 측정하였다. Fig. 3은 KHNP-STAR 하향유로 수력하중 측정결과 중 FP03과 FP17을 각각 PSD(power spectral density)로 나타낸 것이다. 두 센서는 각각 RV 내벽 상부로부터 505 mm 아래에 있는 270° 위치와 CSB 외벽 마주보는 위치에서의 동압을 측정하여 신호 처리한 것이다. 샘플링

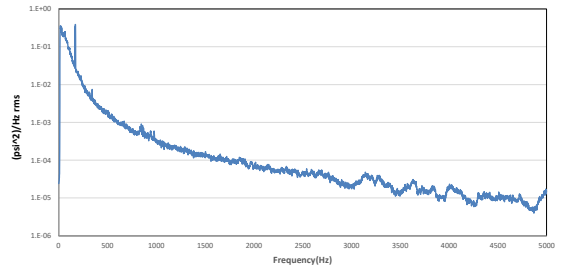


(a) Dynamic pressure transducers on RV inner wall

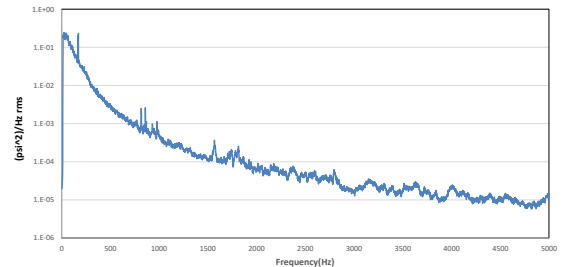


(b) Dynamic pressure transducers on CSB outer wall

Fig. 2 Arrangement of dynamic pressure transducers for hydraulic loads



(a) PSD of FP03



(b) PSD of FP17

Fig. 3 Measurement results of FP03 and FP17

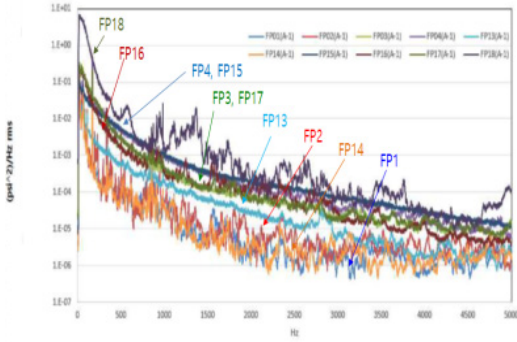


Fig. 4 Pressure PSD at downcomer

Table 1 Pressure RMS at downcomer

Pressure transducer	Pressure RMS [psi]	Pressure transducer	Pressure RMS [psi]
FP1	1.40	FP13	1.97
FP2	2.27	FP14	1.32
FP3	5.08	FP17	5.02
FP4	3.78	FP15	3.64

주기는 0.000078초, 최대 주파수 범위는 5000 Hz, 밴드폭 1 Hz, 윈도우는 Hamming 기법을 적용하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 피크값은 각각 212.4 kPa과 258.3 kPa이고, RMS(root mean square)는 각각 34.83 kPa과 34.59 kPa로 매우 유사한 값을 보였다. 이를 통해 원자로 하향유로에서 마주보는 두 구조물의 동일한 위치에서의 동압은 시험전 예상과 같이 거의 일치함을 확인하였다.

3.2 하향유로 위치별 수력하중 평가

Fig. 4는 KHNP-STAR 하향유로에 설치된 전체 10개의 동압계로부터 측정된 수력하중을 신호 처리하여 보인 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 가장 큰 값을 나타낸 동압계는 CSB 외벽에 설치된 FP18로 분석되었으나 FP16과 FP18은 동일한 높이의 180° 위상차를 갖는 위치로 이론적 및 경험적으로 유사한 값이 나와야 한다. FP18이 FP16보다 10배 정도 큰 값을 나타내었고, 이는 유체의 충돌, 계측기 설치 오류 등의 영향으로 적절하게 측정되지 않은 것으로 보임에 따라 FP18은 제외하였다.

RV 내벽에 동위한 높이와 180° 위상차를 갖도록 설치된 FP04와 FP15 그리고 RV 외벽의 FP03과 동일한 높이에서 마주보는 CSB 내벽의 FP17은 각각 예측한 바와 같이 매우 유사한 수력하중을 나타내었다.

총 10개의 동압계 중 FP16과 FP18을 제외한 8개의 동압계로부터 측정 및 분석된 압력 PSD 크기는 $FP4, FP15 > FP3, FP17 > FP13 > FP2 > FP14 > FP1$ 순으로 나타났고, 압력 RMS(root mean square)값으로 비교하면 Table 1과 같이 $FP3, FP17 > FP4, FP15 > FP2 > FP13 > FP1 > FP14$ 으로 나타났다. RMS값과 PSD선도와 다른 이유는 저주파수에서 높은 피크들의 영향이 크기 때문이다.

시험결과를 통해 흥미로운 점은 가장 큰 압력 PSD가 측정될 것으로 예상된 위치 즉, 두 개의 저온관 사이 FP3 및 FP17의 동압계보다 약간 아래에 위치한 FP4와 FP15에서 가장 큰 압력 PSD가 나타났음을 알 수 있다. 즉, 원자로 하향유로에서 가장 큰 수력하중은 저온관 입구 사이에서 215 mm 아래에 위치한 곳이다. 그러나, FP3와 FP15의 압력 PSD를 하향유로 전체에 적용하는 것은 매우 보수적인 수력하중의 적용이 된다. 측정된 압력 PSD를 다음과 같이 5개 영역으로 FP2 상부, FP2 ~ FP3, FP3 ~ FP13, FP13 ~ FP14, 그리고 FP14 하부로 구분하여 적용하면, 측정값에 기반한 보수적인 하향유로 수력하중을 적용할 수 있다고 판단된다. 기존 원자로 하향유로의 수력하중은 상부, 중부 그리고 하부의 세 부분으로 산출하여 구조 및 응답 설계에 적용해왔다. 이 연구결과를 통해 기존의 과도한 보수성을 개선하고 수력하중 적용 구역을 세 부분에서 다섯 부분으로 세분할 수 있는 근거를 마련하였다.

분석된 압력 PSD로부터 수력하중의 대부분은 FIV의 TB에 의한 하중으로 저주파수 영역에서 큰 에너지를 나타내며 고주파수 영역으로 갈수록 에너지량이 기하급수적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 AIV에 의한 하중은 RCP에 의한 블레이드 통과 주파수(blade passing frequency, BPF)에 의한 것으로 전체 주파수 영역에서 피크로 나타났고 FP02의 압력 PSD를 보여주는 Fig. 5에서 명확하게 확인할 수 있다.

이러한 특성은 선행 연구에서도 동일한 경향으로 나타나, 이 연구의 시험 및 결과분석이 타당하며 성공적으로 수행되었음을 뒷받침한다.

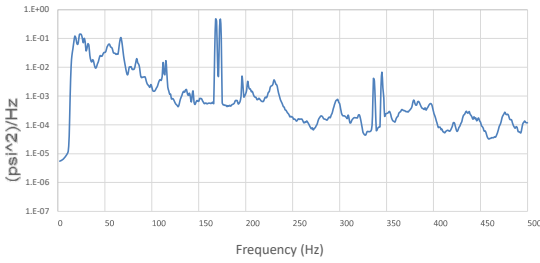


Fig. 5 Pressure PSD measured by FP02

4. 결 론

원전 1차 계통의 냉각재 주 유로에서 RCP로부터 저온관을 통과한 냉각재는 원자로 내부구조물에 부딪혀 방향이 전환된다. 이 때 하향유로의 수력하중을 연구하기 위해 APR1400 원자로의 1/7 축소모델 시험장치로 제작된 KHNP-STAR에서 시험 및 측정결과를 비교하고 분석하였다. 기존 APR1400 원자로 하향유로의 CSB는 세 부분의 영역으로 구분한 수력하중을 구조적 건진성 평가를 위한 입력자료로 활용하였다. 이 연구를 통해 원자로 하향유로의 수력하중은 더 현실적인 다섯 영역으로 구분할 수 있었다. 또한, 공학적 판단에 의해 예상된 두 가지, 즉 하향유로에서 RV 내벽과 CSB 외벽이 서로 마주보는 위치에서의 동압계들의 압력은 거의 동일하고, RV 내벽에서 동일한 높이에 180° 위상차를 갖는 위치에서의 압력계들도 거의 동일한 압력임을 확인하였다. 다만, CSB 외벽에서 동일한 높이에 180° 위상차를 갖는 위치에서의 일부 압력계는 특이값을 보여 수력하중 산출에서 제외하였다.

국내 최초로 원형 원자로 내부구조물 종합진동평가(comprehensive vibration assessment program, CVAP)를 위해 수행된 이 연구결과의 하중은 향후 건설 원전에서 원형 크기로 환산하여 활용될 것이다.

후 기

이 연구는 한국수력원자력(KHNP)의 중장기 연구개발 과제로 수행되었다(A19LP08).

References

(1) U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of

Nuclear Regulatory Research, 2017, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Startup Testing, Revision 4 of Regulatory Guide 1.20.

(2) Au-Yang, M. K. and Jordan, K. B., 1980, Dynamic Pressure inside a PWR - A Study Based on Laboratory and Field Test Data, Nuclear Engineering and Design, Vol. 58, No. 1, pp. 113~125.

(3) Au-Yang, M. K., Brenneman, B. and Raj, D., 1995, Flow-induced Vibration Test of an Advanced Water Reactor Model Part 1: Turbulence-induced Forcing Function, Nuclear Engineering and Design, Vol. 157, No. 1-2, pp. 93~109.

(4) Ko, D., Kim, K. and Jang, H., 2023, Correlation Length for Structural Analysis of Advanced Power Reactor 1400 Scale-down Model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 135~140.

(5) Ko, D., Kim, K. and Jang, H., 2022, Measurement of Hydraulic Loads at Downcomer Based on Scale Model Testing for Reactor, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2022 Plant Division Spring Conference, pp. 111~112.



Do-Young Ko got the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Computer Engineering from University of Seoul, Korea in 2003 and 2007, respectively. He has studied as a principal researcher in Korea Hydro & Nuclear Power - Central Research Institute (KHNP-CRI). His main research interest is verification and validation of reactor design.



Kyu-hyung Kim received Master degree in mechanical engineering from Chungbuk National University. He is a senior researcher at Korea Hydro & Nuclear Power Company - Central Research Institute (KHNP-CRI). His research interests include small modular reactor design and vibration and stress analysis for nuclear reactor vessel internals.