

원전의 공기조화설비(HVAC) 상실사고 분석방법

송동수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

(2013년 9월 16일 접수, 2014년 2월 26일 수정, 2014년 3월 4일 채택)

Analysis of Loss of HVAC for Nuclear Power Plant

Dong-Soo Song

Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research Institute

(Received 27 September 2013, Revised 26 February 2013, Accepted 4 March 2013)

요 약

본 논문은 원자력발전소의 내환경기기검증(EQ)을 위한 HVAC 과도분석 방법에 대한 내용을 기술하고 있다. 분석 대상 격실은 비안전관련 HVAC 계통에 의해 공급되는 격실 중에 원자로 안전정지를 담당하는 중요기기가 위치한 구역/격실을 선정하였다. 그리고 해당 HVAC 계통이 공급되는 건물별로 HVAC 과도시 온도조건을 분석하였다. 본 분석을 위해서 GOTHIC 전산코드를 사용하였다. 온도분석 결과는 원자로 보조건물 환기계통(DVN)의 W315/W415 격실에서 82.2 °C로 가장 높은 온도값을 나타내며, 제어봉구동장치 전원공급건물 및 보조급수펌프실(DVG) 계통의 W229 (Auxiliary feedwater pump room) 격실에서 57.2 °C, 기기냉각건물 환기계통(DVI)의 전 격실에서 42.9 °C, 전기건물 주환기계통(DVL)의 L207 (Hot workshop) 격실에서 57.3 °C를 각각 나타냈다. 이러한 온도값은 일반적인 원전의 기기검증 제한값인 171 °C이하이므로 내환경검증 요건을 만족하는 온도이다.

주요어 : 내환경기기검증, 공기조화설비상실사고, 내환경검증기기목록, 격실

Abstract - Environmental qualification (EQ) for safety-related equipment is required to ensure that those equipment will perform their required function even under the harsh environment conditions arising from design basis accident in the nuclear power plant. As a part of EQ program, the room temperature analysis in case of a loss of Heating, Ventilation, and Air Conditioning(HVAC) system was carried out to ensure the operability of the safety-related equipment of a nuclear power plant randomly chosen among the Korean nuclear power plants. In this paper, this analysis was performed in the conservative perspective using GOTHIC code. The room temperature analysis includes selecting the rooms in which the safety related equipment are located but not supported by safety related HVAC and determining the temperature of the selected rooms. Target rooms for the analysis consist of W229/W237 (Aux. feedwater pump room), W232 (Aux. feedwater tank room) and W230 (Equipment passageway). The results showed the temperature range from 43°C to 83°C, in 72 hours after a loss of HVAC. Those values are far below of generic EQ temperature(171°C). Therefore, it is satisfied with EQ requirement of temperature limits on safety related equipment.

Key words : Environmental qualification, Loss of HVAC, EQ Master List, Subcompartment

1. 서 론

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research
Institute 25-1, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea
Tel : 042-870-5252 E-mail : dssong@khnp.co.kr

기원전의 내환경검증을 위하여 발전소의 교류전원 상실로 인한 공기조화계통(HVAC) 상실시 격실의 온도상승효과분석을 기존 설계자료와 실사를 통해 확인

한 사항을 토대로 수행하였다. 본 연구에서는 HVAC 상실시 온도조건을 결정해야 하는 주요 격실을 선정하고, 선정된 격실을 보수적인 관점에서 온도상승효과를 분석하였다.

HVAC 과도시 환경조건을 결정하여야 하는 격실의 선정은 1)비안전 전원이 공급되는 안전성관련 HVAC의 공급을 받으며, 2)안전정지 기능을 수행하는 기기가 위치한 격실로 결정되었다. 분석을 위하여 GOTHIC 코드가 사용되었으며, 보수적인 결과를 위해 해당 HVAC 전체의 열원을 분석대상 격실에만 존재한 것으로 가정하였다.

HVAC의 허용기준은 안전성에 중요한 구조물, 계통 및 기기는 정상운전, 보수, 시험 및 예상사고 발생시 온도, 압력, 습도, 침수 등 환경영향을 수용할 수 있어야 하며 이를 반영하여 설계하여야 한다. (10CFR50, App. A, GDC 4)

2. HVAC 상실시 환경조건(온도) 분석 대상지역 선정방법

2-1 안전성관련 공기조화계통의 설계기준

공기조화를 필요로 하는 안전성관련 기기들을 위하여 안전성관련 공기조화계통이 설치되어 있다. 안전성관련 기기가 설치된 지역들은 독립성을 위해 분리되며, 각각 별개의 공기조화계통을 갖는다. 즉 단일 상실사고 기준에 의한 한 분할구획에서 계통의 기능 상실에 의해 나머지 분할구획에서 계통의 기능에 영향을 주지 않으며 따라서 그 계통의 안전기능을 보장되어야 한다. [1,2]

2-2 분석대상 구역(격실)의 선정

원전의 HVAC 상실시 과도상태 분석과 HVAC의 설계기준을 종합해 볼 때, 해당 격실의 선정 방법은 비안전등급 전원을 받는 공기조화계통에 의해 공조를 공급받지만, 안전정지기능을 갖는 안전성관련 기기들이 설치된 구역을 선정하였다. 단, 모든 안전등급 전원을 공급받는 공기조화계통은 단일상실사고 기준에 의해 기기가 안전기능을 수행할 수 있음을 보장하므로 분석에서 제외하였다.

상기 방법에 따라 당해 원전의 안전성관련기기들의 설치위치를 모두 파악하기 위해 내환경검증 기기 목록(EQML)을 참고하였다[3]. 이렇게 선정된 대상격실은 총 52개의 격실로, 아래와 같이 5개의 계통으로

분류되었다.

- 제어봉구동장치 전원공급건물 및 보조급수펌프실 HVAC(DVG): 4개
- 기기냉각건물 HVAC (DVI): 4개
- 1호기 전기건물 HVAC (DVL): 16개
- 2호기 전기건물 HVAC (DVL): 13개
- 원자로 보조건물 HVAC (DVN): 15개

3. 분석코드 선정 및 분석방법론

3-1 격실온도 상승효과

주요 기기실에서의 격실 공조기기의 기능이 상실되었을 때, 격실 내에 설치된 기기가 주어진 임무시간 동안 정상적인 기능을 수행할 수 있는지와 정상적인 기능 수행이 불가능한 경우, 허용되는 운전시간을 구하기 위하여 격실 온도 상승효과 분석을 수행한다.

본 격실 온도 상승효과 분석의 대상 격실은 다음과 같다.

- 전기건물 주환기계통 (DVL)
- 기기냉각건물 환기계통 (DVI)
- 제어봉구동장치 전원공급건물 및 보조급수펌프실 환기계통 (DVG,)
- 원자로 보조건물 환기계통 (DVN)

3-2 분석방법론

격실 내 압력/온도 분석은 GOTHIC 전산프로그램을 사용하였다. 해당 체적을 노드로 구분할 때는 다음 사항을 고려하고 노드수를 변화 시키면서 나타나는 영향을 평가함으로써 노드화의 타당성 검토를 병행하였다.

- 구조물의 기하학적 경계면과 형상
- 임계 유속이 발생하는 지점
- 유동방향의 직각인 유로면적
- 실제 물리적인 유동현상이 반영되도록 연결점 고려
- 매우 체적이 큰 노드와 상대적으로 매우 작은 노드의 직접적인 연결을 피함.

유로면적은 인접한 두 제어체적간의 최소 유로 단면적이 되도록 한다. 때문에 경우에 따라서는 유체가 임계조건이 될 수도 있다. 최소 유로면적에서 수두손실계수를 계산한다. 노드간 유동을 계산하기 위해서

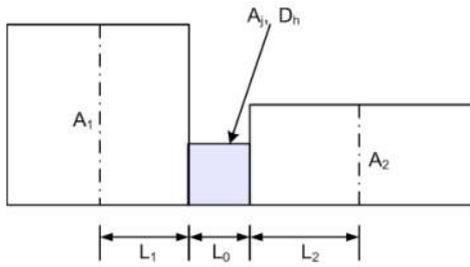


Fig. 1. 관성계수 계산 시 필요인자

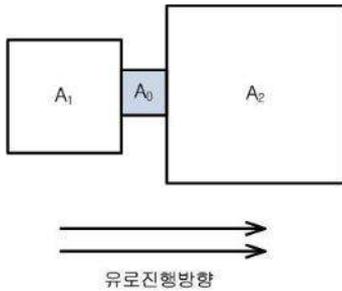


Fig. 2. 감손계수 계산 시 필요인자

는 노드의 중심에서 다음 노드의 중심까지 형성되는 관성항을 고려한다. 유로에서의 관성계수는 그림 1과 식 1과 같이 계산한다.

$$I \cong \text{Min} \left[L_1, L_1 \frac{A_j}{A_1} + \frac{0.45D_h}{1 + \frac{A_j}{A_1}} \right] + L_0 + \text{Min} \left[L_2, L_2 \frac{A_j}{A_2} + \frac{0.45D_h}{1 + \frac{A_j}{A_2}} \right] \quad (1)$$

그리고 격실 온도 또는 압력 분석의 대상이 되는 구조물은 보통 순간적으로 변하는 유로면적을 가지고 있다. 이러한 유로형태는 주로 기기운반통로, 구조물의 틈, 일반적인 문, 차폐를 위한 구조물, 공기조화계통의 통로 등이며 이들 특성이 반영된 유동 감손계수가 계산되어야 한다. 식 2는 정방향의 감손계수를 나타낸다.

$$L.C. = 0.5 \times \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) + \left(1 - \frac{A_0}{A_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(1 - \frac{A_0}{A_2}\right) \quad (2)$$

3-3 GOTHIC 전산프로그램에 사용한 가정사항

GOTHIC 전산 프로그램에 사용된 일반 가정사항은 다음과 같다.[4]

- 배관과 단 부위를 통한 유체의 질량 및 에너지 방출량은 파단지점에서 방출 유체의 열수력학적 상태에 상응하는 임계유량(Critical flow)을 가정하여 계산된 값을 사용한다.
- 배관 배치구역 내 초기 온도, 압력, 습도 조건은 사고 시 온도, 압력이 최대가 되도록 가정한다. 즉, 정상운전 시 최대온도, 최대압력 및 최소습도를 사용한다.
- 온도방출 유로는 현 발전소 설계 및 시공 자료를 기준으로 결정한다. 공조기의 상실 시 격실의 출입문(Door) 또는 개구부(Opening) 만을 압력 방출 유로로 사용한다. 공조기 상실 시 공조기를 통한 유로의 방출은 없음을 가정한다.
- 노드와 노드사이 유로에서의 흐름은 관성을 고려한 비압축성 유동모델을 사용한다.
- 해당 격실의 열원은 HVAC의 냉방기 용량을 역산하여 적용하며 총 용량을 해당 격실의 체적비로 입력하여 사용한다. 보수적 분석을 위해 각 계통별 열원은 해당 격실에만 존재한다고 가정한다.

4. 분석 및 결과고찰

민감도 분석결과 가장 높은 온도를 나타낸 원자로 보조건물 HVAC계통(DVN) 상실에 대한 분석을 대표적으로 언급하고자한다.

4-1 격실 구조 분석

본 분석의 DVN 계통이 공급하는 격실은 총 15개이며, 원자로 보조건물 전체를 하나의 공조계통이 담당하고 있어 냉각용량이 타 계통에 비해 상대적으로 크므로 해당 격실에서 나머지 격실로 덕트를 통한 전파를 가정하였다. 각 격실내의 열발생량은 해당 계통의 공조설비의 냉각용량 설계치를 이용하여 각 격실의 부피비율로 열 발생량을 계산하여 적용하였다. 각 열발생원에서 발생한 열은 모두 격실 내의 공기와 벽체가 흡수하는 것으로 가정하였으며, 각 격실별 열원 및 상세정보는 표 1과 같다.[5] 그림 3은 15개 격실에 대한 GOTHIC 코드의 노달을 나타낸다.

Table 1. DVN 계통의 각 격실 입력정보

Room	Bottom Level (m)	Height (m)	Area (m ²)	Volume (m ³)	Heat Source (kW)
NA213	0.0	5.0	21.9	87.6	12.79
NB223	0.0	5.0	21.9	87.6	12.79
NA214	0.0	5.0	150.5	601.9	87.87
NB224	0.0	5.0	150.5	601.9	87.87
NF230	0.0	5.0	38.0	152.0	22.18
NB385	5.0	6.5	85.5	444.6	64.90
NA312	5.0	6.5	63.8	331.9	48.44
NA313	5.0	6.5	63.8	331.9	48.44
NB322	5.0	3.0	63.8	153.2	22.35
NB323	5.0	3.0	63.8	153.2	22.35
NB325	5.0	6.5	19.6	102.0	14.89
NA311	2.8	5.2	80.0	333.0	48.60
NB321	2.8	5.2	80.0	333.0	48.60
W315	5.0	6.5	114.7	596.5	87.07
W415	5.0	6.5	114.7	596.5	87.07
W515	11.5	4.0	127.0	406.4	59.32
W555	11.5	4.0	139.7	447.1	65.26

4-2 온도분석 결과

DVN 계통 HVAC 상실시 온도분포 계산결과는 그림 4와 같으며 최대 72시간까지 해당하는 온도분포를 나타낸다. 온도는 초기 15분 동안 급격히 증가하며 이후 72시간동안 점진적으로 증가하는 추이를 보인다. DVN 계통의 냉각용량이 타 계통에 비해 상대적으로 크기 때문에 전반적인 격실 온도도 타 계통에 비해 높게 나타났다. 격실의 최대온도는 82.2 °C로 나타났다.

5. 결론

원전의 내환경기기검증의 한 분야로서, 공기조화계통(HVAC)의 상실시 주요 격실의 온도조건 분석을 수행하였다. 대상 격실의 선정을 위해 우선적으로 전체의 HVAC계통의 설계를 조사하고, 이를 통해 안전 관련 HVAC과 비안전관련 HVAC 계통을 분류하였다. 비안전관련 HVAC 계통이 공급되는 격실 중에서 안전정지기기가 위치한 격실을 대상격실로 선정하였다. DVN 계통에 5개의 HVAC 계통별로 온도분석을 수행하였고, 분석결과 HVAC 상실로 인한 온도 상승 효과로 인해 각 격실의 72시간 이후의 온도는 약 43°C에서 83°C까지의 분포를 보였다. 이 분석결과

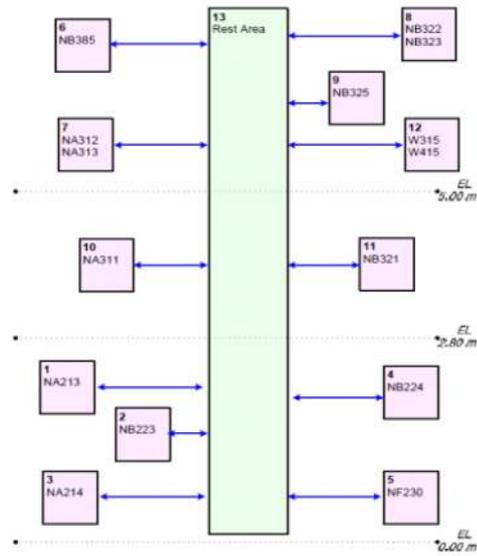


Fig. 3. GOTHIC 코드 노드 분할도

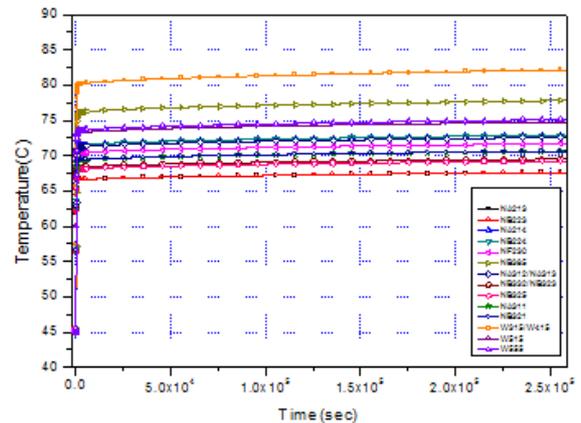


Fig. 4. DVN 계통 HVAC 상실시 최대온도 분포(72시간)

일반적인 원전의 기기검증 온도인 171°C에 비해 충분히 여유가 있는 온도이다.

References

1. 울진 1,2호기 최종안전성분석보고서, 3.2절, 3.11절, 9.4절. 한국수력원자력(주)
2. 울진 5,6호기 최종안전성분석보고서, 3.11절. 한국수력원자력(주)
3. 울진1,2호기 내환경검증 대상기기 목록, 한국수력원자력(주)

4. Frank Rahn, “GOTHIC Containment Analysis Package, Technical Manual, Version7.2a(QA)”, NAI 8907-06 Rev. 16, January (2006)
5. 울진 1,2호기 확률론적안전성평가 (성공기준 분석 보고서) (Probabilistic Safety Assessment for Ulchin Units 1&2 (Success Criteria Analysis)), 한국수력원자력(주), (2005)