JESK J Ergon Soc Korea 2018; 37(2): 155-168
http://dx.doi.org/10.5143/JESK.2018.37.2.155
http://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Performance Evaluation of Experts Predicting the Delay Factors and the Delay Time of the Nozzle Dam Installation and Removal Tasks

Dhong Ha Lee

The University of Suwon, Department of Industrial Engineering, Heaseong, 18323

원전 노즐댐 설치 및 제거 작업의 지연요인 및 지연시간에 대한 전문가 예측 성능 평가

이 동 하

수원대학교 산업공학과

Corresponding Author
Dhong Ha Lee
The University of Suwon, Department of Industrial Engineering, Heaseong, 18323
Mobile : +82-10-5207-9603
Email : dhonghalee@gmail.com

Received : March 12, 2018
Revised : March 13, 2018
Accepted : March 20, 2018

Copyright@2018 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Objective: The aim of this study is to investigate the effectiveness of the expert prediction method for estimating the delay factors and the delay time of the nozzle dam installation and removal tasks.

Background: The radiation managers of nuclear power plants have tried to find the delay factors to reduce the delay time of the nozzle dam installation and removal tasks, one of the highest radiation dose tasks performed during the scheduled preventive overhaul period of nuclear power plants.

Method: Five experts on nozzle dam installation and removal tasks estimated relative weights for delay factors and the delay time of the task using the analytic hierarchy process (AHP) method. In the experiment using the steam generator water chamber mockup simulator the maximum delay time was measured from the difference between the longest and the shortest performance time of the tasks repeated by the three skilled workers.

Results: Some unexpected events during the simulation trial lead to a low statistical correlation between the estimated delay time and the measured delay time of the nozzle dam installation and removal tasks. Expert estimations using the AHP method could not reflect the accidental event such as an unexpected excessively tightening of the bolts on the nozzle dam making the performance time prolonged.

Conclusion: The estimates on the delay time using the AHP method were limited in usefulness but the debriefing results showed that the estimates of the delay factors predicted well the real situation of the nozzle dam installation and removals tasks.

Application: The AHP method for delay factor estimation might be usefully applied to the other high radiation dose overhaul tasks of nuclear power plants such as refueling, reactor water clean-up, works for decommissioning and so on.

Keywords: Nozzle dam, Installation and removal task, Delay factor, Delay time, Decommissioning, Preventive overhaul, Nuclear power plant

1. Introduction

노즐댐 설치 및 제거 작업은 원자력발전소의 주기적인 계획예방정비 작업 기간에 증기발생기 수실에서 수행되는 고피폭선량 작업 중 하나이다(Kim et al., 2000; Kim et al., 2010). 비좁은 작업 수행 공간은 어둡고, 고온 다습하며, 작업장 바닥면이 미끄럽고 곡면으로 구성되어 그 안에서 수행되는 정비 작업을 어렵게 만든다. 노즐댐 작업은 작업자의 개인 피폭이 가장 심한 환경(Kim et al., 2013)이므로 피폭량을 최소화 하기 위한 전신방호복, 방호마스크 및 방호장갑 등을 착용하고 작업장에 투입되는데 고온 다습한 환경으로 인해 방호마스크에 서리는 성애는 시야를 가려 작업자의 시각 성능을 크게 저하시키고, 방호장갑 착용은 작업자의 수공기능(dexterity)을 저하시킬 수 있다(Figure 1). 이러한 방호 조치에도 불구하고 고선량의 작업 환경이므로 수실내에서의 작업은 작업자의 개인 피폭량을 최소화 하기 위해 작업시간을 최소화하는 집중적인 일정관리가 요구된다. 현장의 방사선 관리자들은 이러한 고피폭선량 작업을 지연시키는 지연요인을 파악하기 위해 많은 노력을 해오고 있다(Lee, 2017).

Figure 1. The nozzle dam removal task performed by a subject during a simulation experiment in the steam generator water chamber mockup

노즐댐 설치 및 제거 작업은 Table 1과 Table 2의 순서로 진행된다.

Table 1. The job elements of the nozzle dam installation task

Job element	Motions within the job element
1. Going into the chamber	1.1. Going into the chamber through the manway 1.2. Waiting for dam segments to be handed over from the assistant worker through the manway
2. Installing the center dam segment	2.1. Peeling the protective cloth off the dam segment handed over through the manway 2.2. Moving the segment to the center of the nozzle 2.3. Fitting the segment to the nozzle
3. Installing the left dam segment	3.1. Turning around to get the left dam segment through the manway 3.2. Moving the segment to the left side of the nozzle 3.3. Fitting the segment to the nozzle

Table 1. The job elements of the nozzle dam installation task (Continued)

Job element	Motions within the job element
4. Installing the right dam segment	4.1. Turning around to get the right dam segment through the manway 4.2. Moving the segment to the right side of the nozzle 4.3. Fitting the segment to the nozzle
5. Tightening the bolts	5.1. Moving the bolts to the segments 5.2. Tightening the bolts 5.3. Checking out the bolts
6. Installing the rubber cover	6.1. Turning around to get the sealing rubber cover through the manway 6.2. Moving the rubber cover to the dam segments 6.3. Fitting the rubber cover over the dam segments
7. Going out the chamber	7.1. Going out the chamber through the manway

Table 2. The job elements of the nozzle dam removal task

Job element	Motions within the job element
1. Going into the chamber	1.1. Going into the chamber through the manway
2. Removing the rubber cover	2.1. Turning around to the sealing rubber cover 2.2. Peeling off the rubber cover 2.3. Handing over the rubber cover to the assistant worker through the manway
3. Removing the left dam segment	3.1. Turning around to the left dam segment 3.2. Unrolling the bolts 3.3. Removing the dam segment from the nozzle 3.4. Handing over the dam segment to the assistant worker through the manway
4. Removing the right dam segment	4.1. Turning around to the right dam segment 4.2. Unrolling the bolts 4.3. Removing the dam segment from the nozzle 4.4. Handing over the dam segment to the assistant worker through the manway
5. Removing the center dam segment	5.1. Turning around to the center dam segment 5.2. Removing the dam segment from the nozzle 5.3. Handing over the dam segment to the assistant worker through the manway
6. Leaving the chamber	6.1. Moving to the manway 6.2. Sitting on the edge of the manway 6.3. Leaving the chamber

노즐댐 설치 및 제거 작업에서 작업시간을 연장시키는 작업지연 요소는 작업장 내부의 낮은 조도로 인해 작업대상을 파악해 시간이 소요되는 상황, 보조작업자로부터 댐세그먼트 등을 인계 받는 과정에서의 놓침(fumble), 습기가 많아 수실내에서의 미끄러짐(slip), 볼트를 조이거나 푸는 과정에서의 과소 또는 과대한 힘의 적용으로 쉽게 조이거나 풀지 못하는 경우, 댐세그먼트를 노즐의 정위치에 정확히 맞추는데 시간이 소요되는 경우로부터 기인한다.

노즐댐 설치 및 제거 작업의 작업지연 요소를 정확하게 파악하기 위해서는 작업을 요소 작업으로 분리한 다음 각 요소 작업의 수행시간을 반복적으로 측정하여 측정치의 변동값을 구하여야 할 것이다. 그러나 증기발생기 수실 공간은 한 사람이 작업을 수행하기에도 비좁은 공간이므로 실제 수실 내부에서 수행되는 작업을 비디오 촬영 등을 통해 요소 작업 수행시간을 측정하기는 불가능하다. 예방

정비기간 중 실측이 가능한 시간은 수실내 작업자가 진입하는 시간부터 작업을 완수하고 퇴실할 때까지의 시간, 즉 전체 작업시간이다. 만일 전문가들의 의견을 통해 노즐댐 설치 및 제거 작업의 각 요소 작업에서의 지연가능성을 추정할 수 있다면 전체 작업의 지연시간에 각 요소 작업에서의 지연가능성을 곱하여 각 요소 작업의 지연시간을 간접적으로 추정할 수 있을 것이다. 본 연구는 전문가 평정 방법으로 노즐댐 설치 및 제거의 각 요소 작업에 대한 지연가능성을 추정하고 모의실험을 통해 각 요소 작업의 지연시간 실측치를 구하여 이들을 비교 분석하고 전문가 평정에 의한 지연시간 예측 방법의 타당성을 평가하고자 한다.

2. Expert Estimation for the Time Delay Factors of Nozzle Dam Installation and Removal Tasks

불확실한 작업지연 요소를 주관적으로 예측할 수 있는 방법으로 델파이 방법(Noh, 2006)과 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process; AHP)이 있으나 본 연구에서는 작업지연 요소를 정량화하는데 유리한 AHP 방법을 사용하였다. 불확실한 요인을 정량화한 사례로 Jeong and Jeong (2013)은 모바일 네비게이션의 사용성 평가요인의 중요도 산출에 AHP 방법을 사용하였다. Mohammed (2002)는 다양한 프로젝트 인도 방법 간의 우선순위를 정하기 위해 AHP 방법을 적용하였다. Kim (2012)은 제스처 인터랙션을 적용하기 적합한 사용자 인터페이스 방법 간의 우선순위를 정량화하기 위해 AHP를 사용한 바가 있다.

AHP의 적용은 계층설계와 평가의 2단계로 진행된다(Saaty, 1990). 계층설계 과정에서 노즐댐 설치 및 제거 작업의 시간지연요인을 대분류로부터 점차 세부요인으로 분해하여 이원비교를 단순화할 수 있다. 본 연구에서는 노즐댐 설치 및 제거 작업의 시간지연요인을 Table 3과 같은 3수준의 계층구조로 분해하였다.

Table 3. Decomposition of time delay factors of the nozzle dam installation and removal tasks

The first hierarchy	The second hierarchy	The third hierarchy
Managerial factors	1. Lack of communication among working groups	The job elements in Table 1 or 2
	2. Tight work schedule	The job elements in Table 1 or 2
	3. Lack of training or experience	The job elements in Table 1 or 2
Personal factors	4. Fear for radiation exposure	The job elements in Table 1 or 2
	5. Discoordination with the assistant worker	The job elements in Table 1 or 2
	6. Biorhythm	The job elements in Table 1 or 2
	7. Slip	The job elements in Table 1 or 2
	8. Losing balance	The job elements in Table 1 or 2
	9. Fumble	The job elements in Table 1 or 2
Environmental factors	10. Heavy weight of dam segment or tools	The job elements in Table 1 or 2
	11. Difficult position to get the object	The job elements in Table 1 or 2
	12. Lower luminance and blurred visual field	The job elements in Table 1 or 2
	13. Hot and humid environment	The job elements in Table 1 or 2

노즐댐 설치 및 제거 작업에 10년 이상 참가한 원전의 계획예방정비 관리 유경험자 5명을 전문가로 선정하였다. 시간지연 영향력을 요인 간 이원비교하는데 9점 척도를 사용한 AHP 설문지를 사용하였다.

제2수준(Table 3)의 AHP 설문 분석 결과 노즐댐 설치 작업에서 시간지연 역할을 하는 가장 중요한 요인은 증기발생기 수실내의 낮은 조도와 김 서림 등에 의한 시야(visual field) 불량이 지적되었고 다음으로 방사선 피폭에 대한 두려움, 작업일정 촉박으로 인한 시간압

박, 노즐댐세그먼트나 도구 등의 중량물 취급을 지적하였다(Figure 2). 노즐댐 제거 작업에서는 시간지연요인으로 노즐댐세그먼트의 무거운 중량, 어두운 조명과 시야 불량, 촉박한 작업일정, 방사선 피폭에 대한 두려움 순으로 중요성을 지적하였다(Figure 3).

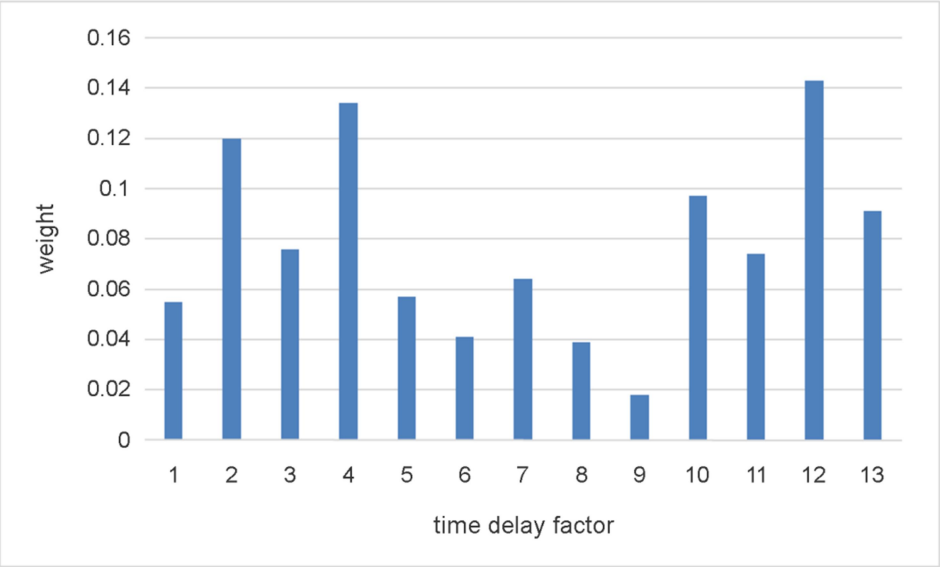

Figure 2. The weights scored from the responses on the AHP questionnaires for the 13 delay factors of the nozzle dam installation task (the number denotes the delay factors in Table 3)

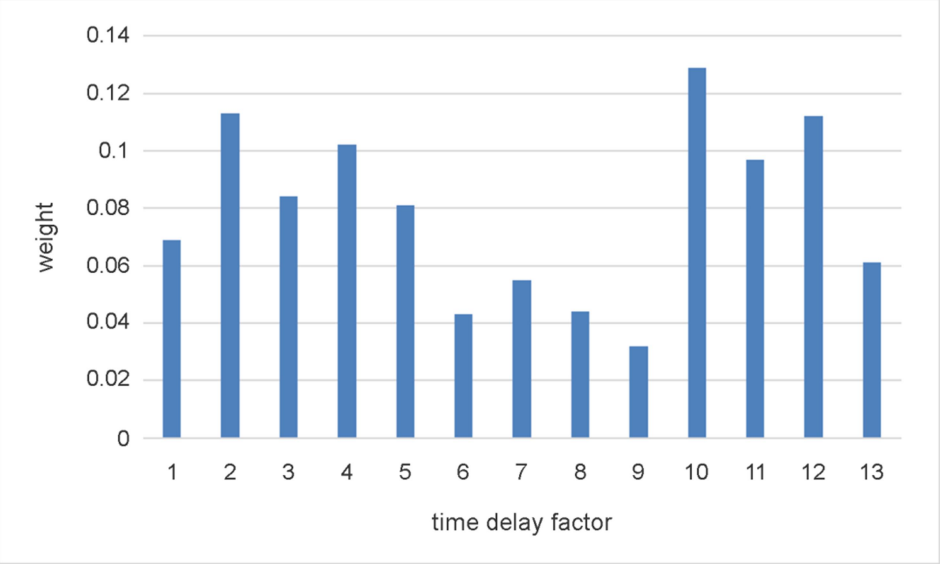

Figure 3. The weights scored from the responses on the AHP questionnaires for the 13 delay factors of the nozzle dam removal task (the number denotes the delay factors in Table 3)

노즐댐 설치 및 제거 작업의 각 요소 작업(job element)에 미치는 시간지연요인의 영향력을 평가하기 위한 제3수준의 AHP 설문 평과

결과로부터 노즐댐 설치 작업에서는 중앙 댐세그먼트 설치과정이 시간지연요인의 영향력이 가장 큰 것으로 나왔고 그 다음이 볼트로 고정하는 과정이 시간지연요인 영향력이 큰 것으로 나왔다(Figure 4).

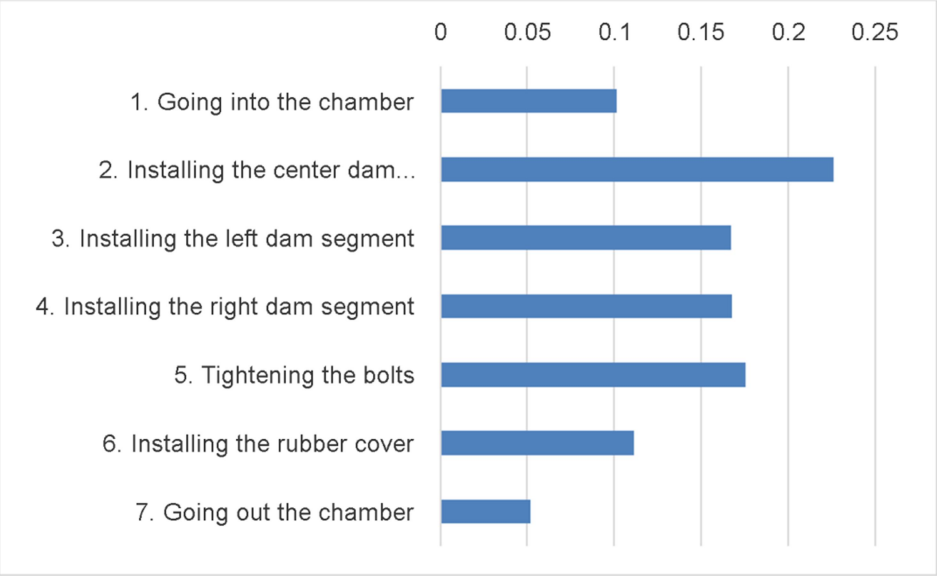

Figure 4. The mean weights of the job elements influenced by the time delay factors of the nozzle dam installation tasks

노즐댐 제거 작업에서도 중앙 댐세그먼트 제거과정이 시간지연요인의 영향을 가장 크게 받는다고 응답했으며 그 다음으로 왼쪽 댐세그먼트 제거과정이 시간지연요인의 영향이 큰 것으로 응답했다(Figure 5).

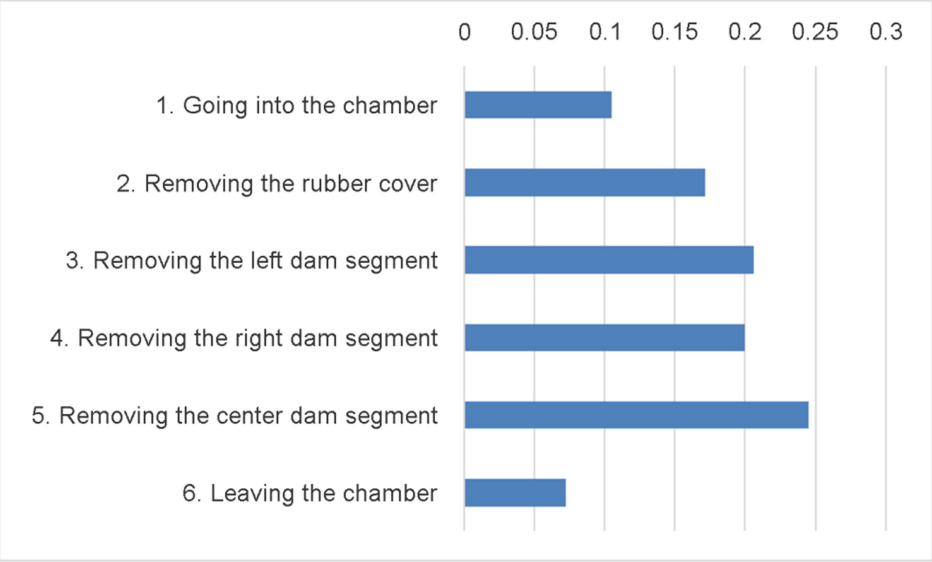

Figure 5. The mean weights of the job elements influenced by the time delay factors of the nozzle dam removal tasks

3. Time Study on the Nozzle Dam Installation and Removal Tasks using the Steam Generator Water Chamber Mockup

AHP 방법을 사용하여 추정한 노즐댐 설치 및 제거 작업의 요소 작업에 대한 시간지연 가중치의 정밀도를 평가하기 위하여 비디오 촬영 방법을 사용하여 각 요소 작업에 소요된 시간을 실측하였고 반복 측정을 통해 가장 늦게 수행된 시간과 가장 일찍 수행된 시간 차이로부터 지연된 시간치를 구하였다.

3.1 Method

실제로 증기발생기 수실에서 수행되는 작업에 대한 시간 측정이 불가능하므로 본 연구에서는 증기발생기 수실 mockup에서 실제와 동일하게 진행되는 작업과정(Table 1 및 Table 2)을 비디오로 촬영하고(Figure 1) 시간을 분석하였다. 원전의 계획예방정비 기간 중 노즐댐 설치 및 제거 작업에 3회 이상 참여한 숙련된 작업자 3인이 노즐댐 설치 및 제거 작업의 재현과정 실험에 피실험자로 참여하였다.

시간 측정 정밀도를 높이기 위하여 요소 작업을 Table 1 및 Table 2와 같이 단위동작으로 세분한 후 각 단위동작분석을 통하여 단위동작에 소요된 시간을 측정하고 이를 합산하여 요소 작업의 소요시간을 구하였다. 판독이 어려운 동작으로 인하여 발생한 실측치(missing data)는 전후의 반복과정에서 측정된 동일한 동작의 평균소요시간을 사용하여 보정하였다.

4. Evaluation of Effectiveness of the AHP Method for the Delay Time Estimates on the Nozzle Dam Installation Task

노즐댐 설치 작업의 경우 3인의 피실험자가 각각 6회, 11회, 7회 반복 측정하였다. 평균 설치시간은 185.72초 였으며 최장 수행시간(397.76초)과 최단 임무완수시간(127.72초)으로부터(Figure 6) 구한 최대 시간지연은 252.04초였다(Table 4). 분산분석 결과 노즐댐 설치 작업에 소요된 시간에 있어서 피실험자간 통계적 유의한 차이는 보이지 않았다(Table 4; p=0.7725).

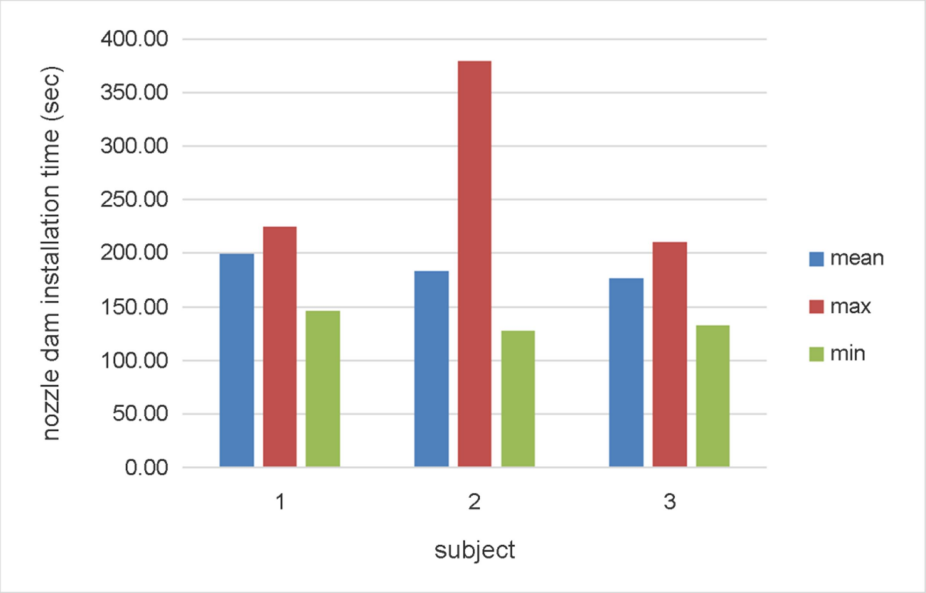

Figure 6. Performance variation of the three subjects performing the nozzle dam installation task

Table 4. The mean, the maximum and the minimum nozzle dam installation time of the subjects

Subject	Mean	Max	Min	Range	*F*	*p*
1	199.89	224.89	146.28	78.61	0.2614	0.7725
2	183.60	379.76	127.72	252.04		
3	176.90	210.17	132.55	77.63		
Total	185.72	379.76	127.72	252.04		

AHP 방법으로 추정한 노즐댐 설치 요소 작업별 시간지연 가중치를 설치에 소요된 최대 지연시간에 곱하여 각 요소 작업의 지연시간을 추정하면 Table 5 및 Figure 7과 같다.

Table 5. The estimated time using AHP and the measured time for each job element delay of the nozzle dam installation task

Job element of nozzle dam installation	Estimates using AHP method		Measured time (sec)		
	Weight	Weighted delay time (sec)	Max	Min	Range
1. Going into the chamber	0.10	25.61	9.78	4.37	5.41
2. Installing the center dam segment	0.23	56.91	94.56	13.43	81.13
3. Installing the left dam segment	0.17	42.14	40.87	5.83	35.04
4. Installing the right dam segment	0.17	42.19	32.99	7.02	25.97
5. Tightening the bolts	0.18	44.21	305.22	52.03	253.19
6. Installing the rubber cover	0.11	28.03	41.94	14.60	27.34
7. Going out the chamber	0.05	13.01	9.96	3.81	6.15

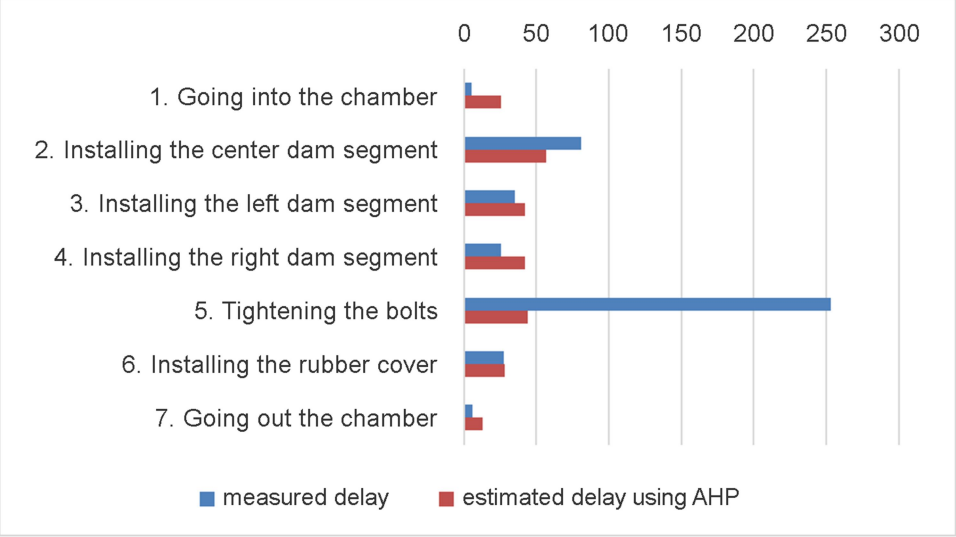

Figure 7. Comparison between the estimated and the measured time for each job element delay of the nozzle dam installation task

5명의 전문가가 AHP를 사용하여 추정한 결과로는 노즐댐 설치 요소 작업 중 중앙 댐세그먼트 설치, 볼트 조임, 좌측 댐세그먼트 설치, 우측 댐세그먼트 설치, 고무커버 설치, 입실, 퇴실 순(이 중 좌우측 댐세그먼트 설치는 동일 순서)으로 시간지연이 클 것으로 예측하였다. 반면 실험을 통해 3명의 숙련작업자로부터 실측된 시간지연은 볼트 조임, 중앙 댐세크먼트 설치, 좌측 댐세그먼트 설치, 고무커버 설치, 우측 댐세그먼트 설치, 퇴실, 입실 순서였다. 실험 후 수행된 디브리핑 과정을 통해 볼트 조임과정에서의 시간지연은 어두운 조명과 시야 불량으로 인해 볼트를 제대로 조이지 못해 재작업하는 과정에서 발생하였음을 확인하였다. 이는 AHP를 사용하여 추정한 시간지연요인 중 낮은 수준의 조명과 흐려진 시야가 가장 높은 가중치(14.3%)를 받은 것과 관련이 있다고 할 수 있다. 디브리핑 과정에서 중앙 댐세그먼트 설치과정에서의 시간지연은 주로 중앙 댐세그먼트의 무거운 중량에 기인하는 것으로 확인되었다. 이는 AHP를 사용하여 추정한 시간지연요인 중 댐세그먼트나 도구의 무거운 중량요인(9.7%)과 관련이 있다(Figure 2).

노즐댐 설치 작업에 있어서 AHP를 사용한 지연시간 추정치는 실측된 지연시간과의 선형 상관관계가 낮고 통계적 유의성(R^2=0.23, p=0.277)도 부족하였다(Figure 8). AHP를 사용한 시간지연 추정치는 전문가들의 오랜 경험을 통해 축적된 평균화된 시간지연요인에 대한 판단을 근거로 하는 반면 실험에서 관측되는 우발적인 지연(예를 들면 피실험자2의 5번째 반복 실험에서 관찰된 볼트조임 재작업에 소요된 시간 305.22초)과 같은 예외 상황은 반영할 수 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고 시간 지연의 주요 요인으로 추정한 낮은 조도와 김 서림 등에 의한 시야 불량, 방사선 피폭에 대한 두려움, 작업일정 촉박으로 인한 시간압박, 노즐댐세그먼트나 도구의 무거운 중량물 취급 등과 같은 요인이 시뮬레이션 과정에서 관찰된 시간지연 현상(예를 들면 볼트 조임이나 중앙 댐세그먼트 설치)의 실제 요인으로 작용했음이 판명되어 지연요인의 중요도 파악에는 유용했다고 할 수 있다.

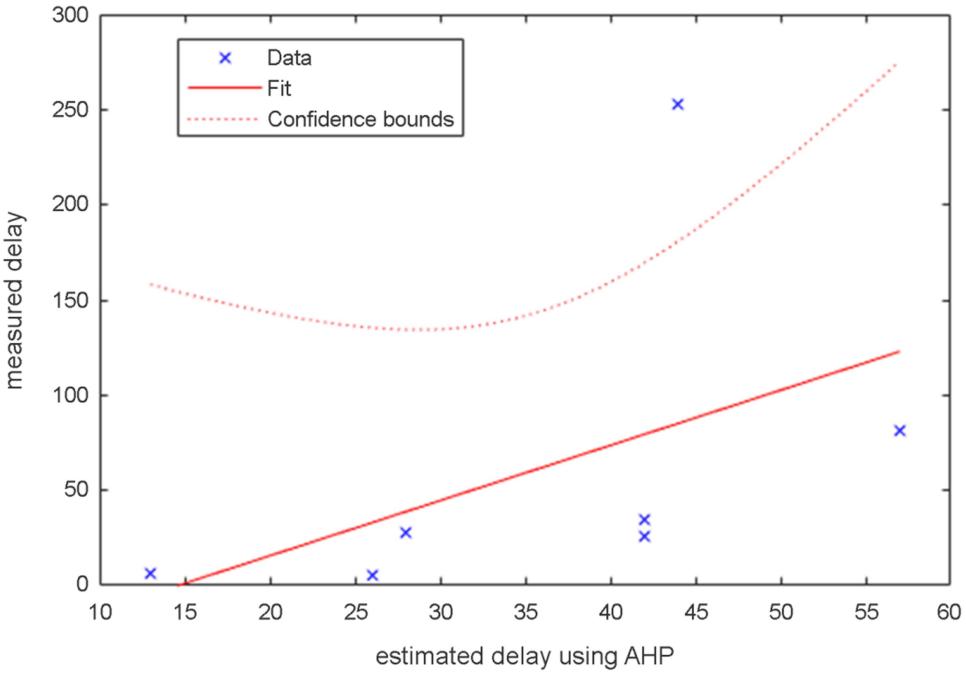

Figure 8. Low correlation between the estimated time using AHP and the measured time for each job element delay of the nozzle dam installation task

5. Evaluation of Effectiveness of the AHP Method for the Delay Time Estimates on the Nozzle Dam Removal Task

노즐댐 제거 작업의 경우에는 3인의 피실험자가 각각 6회, 8회, 7회 반복 측정하였다. 노즐댐 제거에 소요된 평균시간은 85.52초였으

며 최장 소요시간(127.98초)과 최단 소요시간(59.64초)의 차이로부터 구한 최대 지연시간은 68.34초였다(Figure 9). 분산분석 결과(Table 6) 노즐댐 제거 작업에 소요된 시간에 있어서 피실험자간 통계적 유의한 차이가 있었다(p=0.0071).

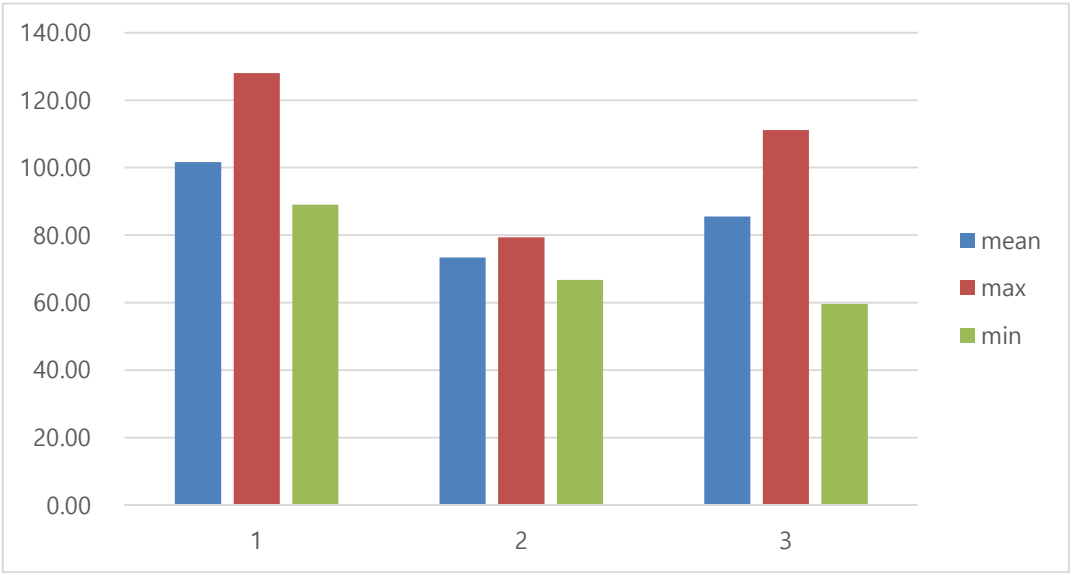

Figure 9. Performance variation of the three subjects performing the nozzle dam removal task

Table 6. The mean, the maximum and the minimum nozzle dam removal time of the subjects

Subject	Mean	Max	Min	Range	F	p
1	101.66	127.98	89.04	38.94	6.5926	0.0071
2	73.42	79.35	66.78	12.57		
3	85.51	111.13	59.64	51.49		
Total	85.52	127.98	59.64	68.34		

AHP 방법으로 추정한 노즐댐 제거 요소 작업별 시간지연 가중치를 노즐댐 제거에 소요된 최대 지연시간에 곱하여 각 요소 작업의 지연시간을 추정하면 Table 7 및 Figure 10과 같다.

Table 7. The estimated time using AHP and the measured time for each job element delay of the nozzle dam removal task

Job element of nozzle dam removal	Estimates using AHP method		Measured time (sec)		
	Weight	Weighted delay time (sec)	Max	Min	Range
1. Going into the chamber	0.10	7.16	7.72	2.59	5.13
2. Removing the rubber cover	0.17	11.73	16.71	7.49	9.22
3. Removing the left dam segment	0.21	14.09	34.83	14.83	20.00

Table 7. The estimated time using AHP and the measured time for each job element delay of the nozzle dam removal task (Continued)

Job element of nozzle dam removal	Estimates using AHP method		Measured time (sec)		
	Weight	Weighted delay time (sec)	Max	Min	Range
4. Removing the right dam segment	0.20	13.64	46.58	15.56	31.02
5. Removing the center dam segment	0.25	16.77	22.20	7.11	15.09
6. Leaving the chamber	0.07	4.95	12.97	3.88	9.09

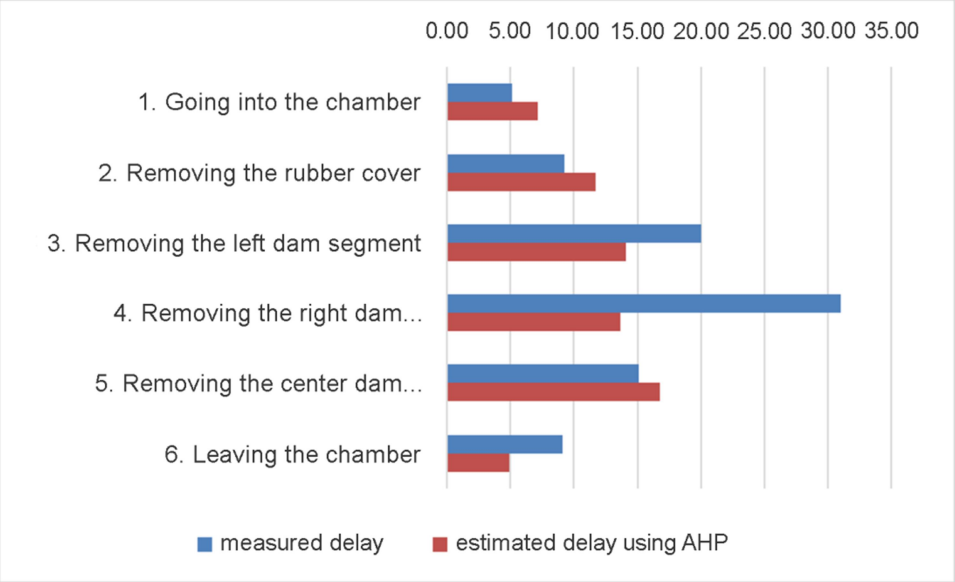

Figure 10. The estimated time using AHP and the measured time for each job element delay of the nozzle dam removal task

5명의 전문가가 AHP를 사용하여 추정한 노즐댐 제거 작업의 지연이 큰 순서는 중앙 댐세그먼트 제거, 좌측 댐세그먼트 제거, 우측 댐세그먼트 제거, 고무커버 제거, 입실, 퇴실이었다. 실제로 실험을 통해 측정된 지연시간이 큰 순서는 우측 댐세그먼트 제거, 좌측 댐세그먼트 제거, 중앙 댐세그먼트 제거, 고무커버 제거, 퇴실, 입실의 순서였다(Figure 10). 우측 댐세그먼트의 지연시간이 늘어난 것은 피실험자1이 첫 번째 반복 실험에서 우측 댐세그먼트의 체결 상태를 풀지 못해 여러 번 반복 시도를 하느라고 평균(24.80초)보다 훨씬 지연된 46.58초가 소요되었기 때문이었다. 실험 후 해당 피실험자는 전면마스크가 부착된 방호복 착용으로 시야 불량의 어려움이 있었고 이전 실험에서 우측 댐세그먼트의 볼트가 과도한 힘으로 체결되어 푸는데 어려웠다고 디브리핑하였다. 전면마스크 착용으로 인해 시야가 작업하기 불편하다는 반응은 AHP 분석으로 통해 밝혀진 노즐댐 제거 작업의 지연요인 중 낮은 조도와 흐려진 시야가 세 번째로 높은 가중치(11.2%)를 받은 것과 관련이 있다(Figure 2).

노즐댐 제거 작업의 경우에도 요소 작업의 지연시간에 대한 AHP를 이용한 추정치와 실측치 사이의 상관관계는 낮았고(R^2=0.363) 통계적 유의성(p=0.206)도 부족하였다(Figure 11). 피실험자1의 첫 번째 반복 실험에서 지체한 경우(실측치 31.02초; 예측치 13.64초)와 같은 우발적인 지연 발생 사건이 AHP 방법에 의한 지연시간 추정치의 정밀도를 저하시켰다. 따라서 AHP 방법은 우발적 사건에 의한 지연시간을 예측하기에는 적합하지 않다고 할 수 있다.

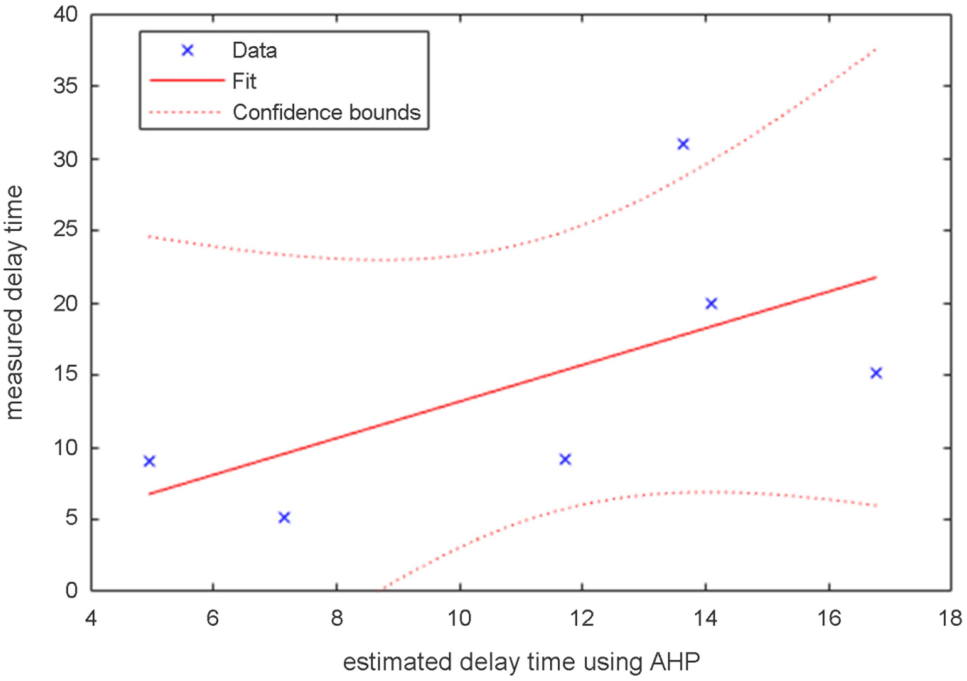

Figure 11. Low correlation between the estimated delay time using AHP and the measured delay time for each job element delay of the nozzle dam removal task

6. Conclusion

노즐댐 설치 및 제거 작업은 원자로 예방정비작업 중에서 가장 피폭선량이 높은 작업 중 하나이다. 피폭선량 증가에 영향을 미치는 요인으로는 작업인원, 작업시간, 차폐후공간선량율, 공간선량율, 최대방사선량율 등이 있지만 이 중에서 작업시간의 영향력이 가장 크다(Lee, 2017). 따라서 예방정비작업의 관리자들은 노즐댐 설치 및 제거 작업의 작업시간을 줄이기 위해 작업지연요인을 찾는 노력을 해오고 있다. 예방정비작업 시기의 증기발생기 수실은 고온 다습하며 비좁고 어두워서 수실 내부에서 이루어지는 노즐댐 설치 및 제거 작업의 지연요인을 직접적인 관찰을 통해 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 AHP 방법을 이용하여 전문가 5인의 평정으로 노즐댐 설치 및 제거 작업 지연에 영향을 주는 요인들을 간접적으로 파악하고 이로부터 추정한 노즐댐 설치 및 제거 요소 작업의 지연시간을 예측하였다.

노즐댐 설치 작업의 경우 수실내의 낮은 조도와 높은 습도로 인한 시야 흐려짐, 촉박한 작업일정, 고선량의 방사선 피폭에 대한 두려움, 댐세그먼트의 무거운 중량 등이 작업을 지연시키는 주요 요인으로 지적되었다. 노즐댐 제거 작업의 경우에는 댐세그먼트의 무거운 중량, 촉박한 작업일정, 낮은 조도 및 흐려진 시야, 피폭에 대한 두려움의 순으로 지연요인의 중요도가 평가되었다.

3인의 피실험자가 증기발생기 수실 mockup을 이용하여 수실 mockup 내에서 수행되는 노즐댐 설치 및 제거 작업을 재현하여 각 요소 작업의 지연시간을 실측하고 이를 AHP 방법을 사용한 추정치와 비교하였다. 노즐댐 설치 및 제거 작업의 시뮬레이션 과정에서는 요소 작업의 작업동작은 실제 작업과 동일하게 구성되었지만 높은 습도로 인한 시야 흐려짐 현상이나 고온, 낮은 조도, 고방사선장 형성 등의 환경은 실제 상황과 동일하게 구현 할 수 없었다. 따라서 AHP 분석과정에서 도출된 낮은 조도와 시야 흐려짐, 방사선 피폭에 의한 두려움, 촉박한 작업일정과 같은 지연요인은 mockup에서 측정된 작업 지연시간에는 반영되지 않았다고 할 수 있다. 그 결과 노즐댐 설치 및 제거 작업의 요소 작업 지연시간 실측치와 AHP 방법을 사용한 추정치와의 상관관계는 낮았고 통계적 유의성도 부족하였다. 특히 볼트 조임과정에서 작업대상 놓침이나 이전 실험에서 과도한 힘으로 체결된 볼트를 푸는 일과 같은 우발적인 지연 유발 사건은 AHP 분석과정에서 사전 예측하기 어려웠기 때문에 지연시간 예측의 정밀도가 저하될 수 밖에 없었다. 그럼에도 불구하고 노즐

댐 설치 및 제거 작업과 같이 직접적인 관찰을 통해 지연요인을 파악하기 어려운 작업을 전문가의 경험을 근거로 간접적으로 추정하는 경우에 일반적이고 대략적 요인을 추정하는 범위 내에서는 AHP 방법이 어느 정도 유용했다고 할 수 있다. 피실험자와의 디브리핑 과정에서도 시뮬레이션 실험 상황에서는 느낄 수 없었지만 실제 상황에서는 피폭에 대한 두려움, 작업일정 촉박으로 인한 스트레스, 중량물 취급의 어려움, 작업 자세의 불안정으로 인한 심리적 압박감 등이 실재한다고 지적했는데 이들은 대부분 전문가 평정에서 중요 요인으로 파악된 내용이었다(Figure 2 및 Figure 3).

노즐댐 설치 및 제거 작업이 원전의 계획예방정비 작업 중에서도 특수한 분야여서 자주 수행되지 않고 종사자도 많지 않아 숙련된 작업자를 구하기가 어려웠고 관련된 전문가를 섭외하는데도 어려움이 많았다. 지속적인 반복 연구를 통해 자료를 축적하면 통계적 유의성이 향상된 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 피폭량이 많아 지연시간을 최소화하여야 하는 원전 계획예방정비 작업의 다른 분야 예를 들면 원자로 해체, 조립, 증기발생기 세관 와전류 탐상시험, 핵계측계통 작업, 냉각재펌프 등(Lim, 2015) 방사선 안전관리 작업에도 확장 적용하면 작업시간 단축을 위한 지연요인 파악에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

Jeong, Y.S. and Jeong, B.Y., Usability evaluation criteria for mobile navigation using AHP, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 32(5), 443-448, 2013.

Kim, H.G., Kong, T.Y., Jeong, W.T. and Kim, S.T., An effects of radiation dose assessment for radiation workers and the member of public from main radionuclides at nuclear power plants, *Journal of Radiation Protection*, 35(1), 12-20, 2010.

Kim, J.I., Lee, B.I. and Lim, Y.K., Analysis of a lead vest dose reduction effect for the radiation field at major working places during refueling outage of Korean PWR nuclear power plants, *Journal of Radiation Protection*, 38(4), 237-241, 2013.

Kim, S.H., Jung, S.H., Lee, S.S. and Lee, Y.S., "Nozzle Dam Design Improvement using Composite Material of the Steam Generating Nuclear Power Plants", *Proceedings of the Spring Conference of Korean Nuclear Society*, 2000.

Kim, S.W., An outlook for interaction experience in next-generation television, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 31(4), 557-565, 2012.

Lee, D.H., Managerial factors influencing dose reduction of the nozzle dam installation and removal tasks inside a steam generator water chamber, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 36(5), 559-568, 2017.

Lim, Y.K., Radiation exposure on radiation workers of nuclear power plants in Korea: 2009-2013, *Journal of Radiation Protection and Research*, 40(3), 162-167, 2015.

Mohammed, I.A.K., Selecting the appropriate project delivery method using AHP, *International Journal of Project Management*, 20, 469-474, 2002.

Noh, S.Y., Delphi technique: prediction of future by experts' insight, *Gukto*, 299, 53-62, 2006.

Saaty, T., *Multicriteria Decision Making: the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, 1990.

Author listings

Dhong Ha Lee: dhonghalee@gmail.com
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, the University of Suwon
Areas of interest: Human Factors in Nuclear Power Plant, Risk Management, System Analysis