

배관감육 관리를 위한 고정식 및 탈착식 보온재 설치 경제성 분석

황 경 모[†]·윤 훈

KEPCO E&C, 경상북도 김천시 혁신로 269

(2016년 12월 13일 접수, 2016년 12월 26일 수정, 2016년 12월 26일 채택)

Economic Analysis of Installing Fixed and Removable Insulation for Pipe Wall Thinning Management

Kyeongmo Hwang[†] and Hun Yun

KEPCO E&C, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, Korea

(Received December 13, 2016; Revised December 26, 2016; Accepted December 26, 2016)

To perform ultrasonic testing (UT) thickness measurement of the secondary side piping installed in nuclear power plants, the insulation for preventing heat loss should be removed. The type of insulation can be divided into fixed and removable insulation. Fixed and removable insulation have their own strengths and weaknesses. Removable insulation has been installed in the components susceptible to wall thinning caused by FAC and erosion from Shin-Kori unit 1, which commenced its commercial operation in 2011. In this paper, the number of repeated inspections of components and the number of replacements of fixed insulation were estimated and a more economical way was identified based on the manufacturing and installation costs for fixed and removable insulation.

Keywords : wall thinning, UT inspection, fixed insulation, removable insulation, economic analysis

1. 서 론

원전 2차계통 배관은 고온, 고압, 고속의 물 또는 증기가 흐르기 때문에 유동가속부식 (flow-accelerated corrosion, FAC)이나 캐비테이션 (cavitation), 플래싱 (flashing), 액적충돌침식 (liquid droplet impingement erosion, LDIE) 과 같은 침식에 영향을 받아 두께가 얇아지는 감육 (減肉, wall thinning) 현상이 발생할 수도 있다^{1,2)}. 이러한 배관감육 현상을 예방하기 위하여 매주기 일정량의 배관을 대상으로 ultrasonic testing (UT) 검사가 수행된다. UT 검사를 수행하기 위해서는 열손실 방지를 위하여 설치된 보온재가 제거되어야 한다. 보온재의 종류로는 고정식과 탈착식이 있다. 고정식 보온재는 대부분 칼슘실리케이트 재질을 주로 사용하고 있기 때문에 일정기간 사용하고 나면 열에 의한 취화와 탈부착시의 충격 및 관리 실수로 인하여 부스러지는 경우가 많다. 보온재 전체를 탈착식으로 설치하지 못하는 이유는 탈착식 보온재의 초기 설치비가 비싸기 때문이다.

국내에서는 2011년에 상업운전에 돌입한 신고리 1호기부터 감육에 민감한 것으로 예측되는 부위를 대상으로 건설 시점부터 보온재를 탈착식으로 설치하고 있다. 기존 원전에서도 가동 중 배관두께 검사의 편의를 위하여 일부 배관 컴포넌트를 대상으로 보온재를 탈착식으로 변경한 발전소도 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 가동원전의 반복검사 횟수와 고정식 보온재 교체 횟수를 분석하고 고정식과 탈착식 보온재의 제작 및 설치비를 감안하여 어떠한 방식이 보다 더 경제적인지를 분석하였다.

2. 고정식과 탈착식 보온재 설치 장단점

고정식과 탈착식 보온재 설치의 장단점을 현장의 배관감육 관리 경험에 따라 분석하였다. 고정식 보온재는 가격이 저렴하고 초기 설치 작업이 용이하다는 장점이 있는 반면, 여러 번 분해조립시 쉽게 손상되고 작업자가 밟고 다닐 가능성 (Fig. 1 참조)도 있다. 또한 손상에 따른 교체빈도가 높으며, 잦은 교체에 따른 역무부담이 가중된다는 단점이 있다. 탈착식 보온재는 분해조립 작업이 용이하고, 여러 번 분해

[†] Corresponding author: hkm@kepc0-enc.com



Fig. 1. Pictures of damaged fixed-insulation.

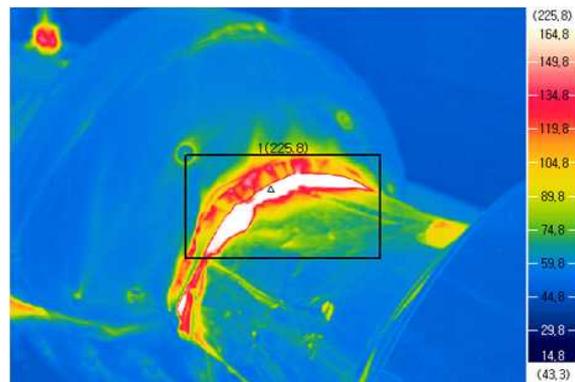
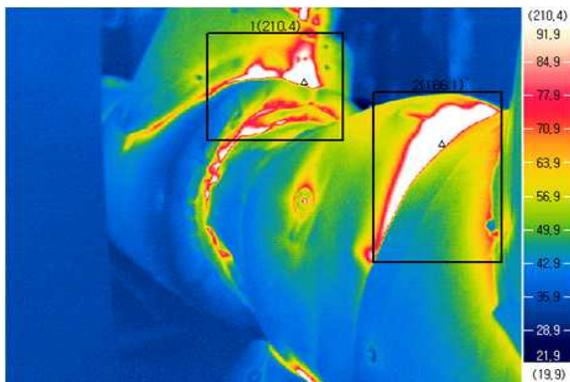


Fig. 2. Thermal imageries of piping with removable insulation.

조립 시에도 쉽게 손상되지 않으며, 작업자가 밟아도 쉽게 손상되지 않는다는 장점이 있다. 반면, 고정식에 비해 가격이 비싸고 연결부 틈새로 열손실 발생이 가능하며(Fig. 2 참조), 직경이 클 경우에는 자체 무게로 인하여 재설치가 용이하지 않다는 단점이 있다. 결과적으로 고정식과 탈착식 보온재 중 어떤 것이 더 나은가에 대해서는 각각의 장단점이 있기 때문에 현장 여건에 따라 결정할 필요가 있다. 그 이유는 손상(고정식)과 열손실 가능성(탈착식)도 현장에서 보온재를 어떻게 관리하느냐가 관건이기 때문이다.

3. 가동원전 주기별 검사 현황

고정식 및 탈착식 보온재 설치와 관련된 경제성을 비교하기 위해서는 현장에서 반복 검사되는 현황을 파악하여야 한다. 배관두께 반복 검사는 보온재 훼손으로 인한 교체횟수와 관련이 있기 때문이다. 이를 위하여 기존 국내에서 운영 중인 4개 원전에 대한 검사현황을 분석하였다. 표 1은 국내 가동원전 4개 호기의 주기별 검사물량(대구경배관 기준)을 제시한 것으로서 매주기 평균 200개소를 검사하고

있다. 가동원전의 전체 검사물량 대비 신규검사 비율은 Fig. 3과 같이 운전 주기 증가에 따라 점차 감소하며, 운전 10주기 이상부터는 반복검사와 신규검사 비율이 약 50 %에 근접하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 가동년수가 한국보다

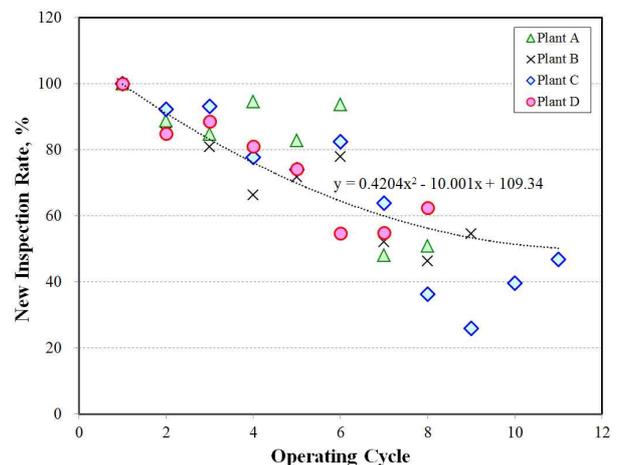


Fig. 3. New inspection rate for a total inspecting number by cycle.

Table 1. UT inspection status by cycle for four operating plants

Unit	Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	AVG
A	Cycle	R-15	R-16	R-17	R-18	R-19	R-20	R-21	R-22	-	-	-	-
	Inspection number by cycle	149	143	144	258	128	237	485	110	-	-	-	206.75
	Repeated inspection number	0	16	22	14	22	15	252	54	-	-	-	49.38
	Newly inspected number	149	127	122	244	106	222	233	56	-	-	-	157.38
	Newly inspected rate, %	100	88.81	84.72	94.57	82.81	93.67	48.04	50.91	-	-	-	80.44
B	Cycle	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	R-9	R-10	R-11	R-12	-	-	-
	Inspection number by cycle	77	129	198	151	195	171	148	119	145	-	-	148.11
	Repeated inspection number	0	19	38	51	55	38	71	64	66	-	-	44.67
	Newly inspected number	77	110	160	100	140	133	77	55	79	-	-	103.44
	Newly inspected rate, %	100	85.27	80.81	66.23	71.79	77.78	52.03	46.22	54.48	-	-	70.51
C	Cycle	R-11	R-12	R-13	R-14	R-15	R-16	R-17	R-18	R-19	R-20	R-21	-
	Inspection number by cycle	45	193	117	143	146	387	345	171	259	189	224	201.73
	Repeated inspection number	0	15	8	32	38	68	125	109	192	114	119	74.55
	Newly inspected number	45	178	109	111	108	319	220	62	67	75	105	127.18
	Newly inspected rate, %	100	92.23	93.16	77.62	73.97	82.43	63.77	36.26	25.87	39.68	46.88	66.53
D	Cycle	R-13	R-14	R-15	R-16	R-17	R-18	R-19	R-20	-	-	-	-
	Inspection number by cycle	179	185	244	248	205	203	261	279	-	-	-	225.50
	Repeated inspection number	0	28	28	47	53	92	118	105	-	-	-	58.88
	Newly inspected number	179	157	216	201	152	111	143	174	-	-	-	166.63
	Newly inspected rate, %	100	84.86	88.52	81.05	74.15	54.68	54.79	62.37	-	-	-	75.05

Table 2. Number of inspected components over three times of two operating plants

Unit	Total inspection number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Inspection rate over 3 times, %
C	1,399	R-11	R-12	R-13	R-14	R-15	R-16	R-17	R-18	R-19	R-20	R-21	15.7
		0	0	0	9	19	33	63	96	150	185	219	
D	1,333	R-13	R-14	R-15	R-16	R-17	R-18	R-19	R-20	-	-	-	7.8
		0	0	3	13	27	45	84	104	-	-	-	

훨씬 오래된 미국의 경우도 유사하다.

Table 2는 가동원전 2개 호기(원전 C, 원전 D)를 대상으

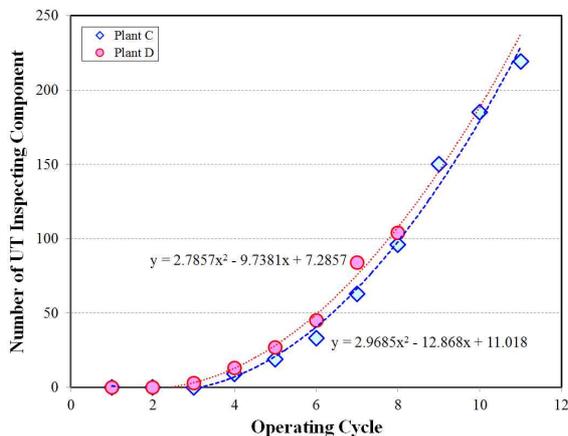


Fig. 4. Distribution chart of inspected components over three times of two operating plants.

로 검사주기별 3회 이상 검사된 컴포넌트의 수를 제시한 것이며, Fig 4는 이를 그래프로 나타낸 것이다. 3회 이상 검사된 컴포넌트의 수를 분석한 이유는 고정식 보온재를 3회 이상 분해, 조립할 경우에는 고정식 보온재를 교체해야 한다는 가정을 수립하기 위함이다. 동일 부위를 3회 검사하는 데는 평균 10년 정도가 소요되며, 약 10년 정도 운전시 열과 외부충격, 반복 분해·조립 등으로 인하여 보온재를 교체해야 하는 경우가 많다.

4. 보온재 설치 경제성 비교

경제성 분석을 위해서는 고정식 보온재가 몇 회 탈부착하였을 경우에 부스러져 더 이상 사용이 불가능한지, 탈착식 보온재는 얼마 만에 교체하는지, 반복 검사하는 물량과 횟수는 어떠한지, 신규로 검사하는 물량은 어느 정도인지 등을 파악하여야 한다. 따라서 가동년수가 오래된 4개 발전소

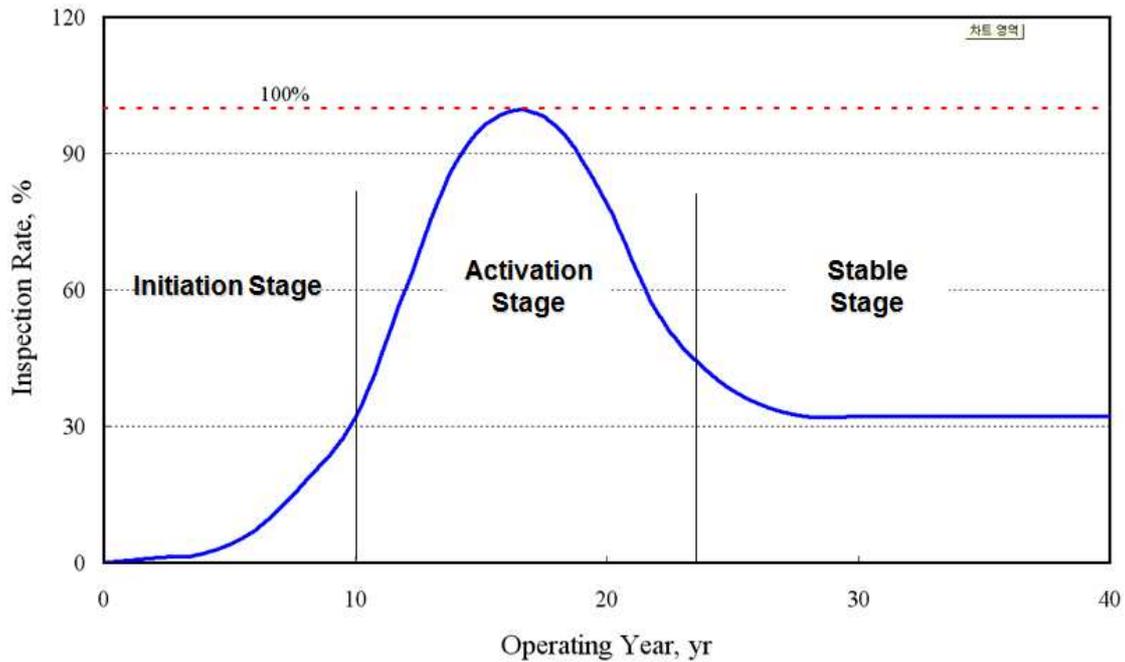


Fig. 5. UT inspection quantity during operation.

의 두께검사 및 보온재 운영 현황을 바탕으로 아래와 같은 가정 조건을 설정하였다.

- (1) 한 주기 운전 기간은 16 개월이며, 60 년 동안 45 회 의 계획예방정비를 수행한다.
- (2) 신규 원전의 가동중 배관두께 검사는 Fig. 5 와 같은 경향에 따라 수행한다.
- (3) 주기별 검사물량은 6 주기부터 19 주기까지는 200 개를 검사하고, 이후는 150 개씩 한다(Table 3 참조).
- (4) 11 주기부터는 신규검사 및 반복검사 물량은 5 : 5 이다.
- (5) 3 회 검사시 고정식 보온재는 교체해야 하고 탈착식 보온재는 전체 가동기간 동안 1 회 또는 2 회만 교체 한다. 고정식 보온재를 교체한 후 3 회 검사시에는 또 교체한다.
- (6) 3 회 이상 반복검사 경향은 Fig. 4 를 따른다.
- (7) 경제성 분석은 비교 대상이 동일해야 하므로 60 년 동안 신규 검사물량으로 추정된 60 년 동안의 3,776 개 컴포넌트를 대상으로 한다.
- (8) 비용 계산을 위한 기준 물량은 신규 원전의 초기 배관 두께 취득 부위로 결정된 1,230 개이며, 기준 비용은 다음과 같다³⁾.

○ 고정식 보온재 설치비 = 보온소재 비용 + 덮개 비용 + 노무비 = 368,542,737 원

○ 탈착식 보온재 설치비 = 재료비 + 노무비 = 980,269,353 원

상기와 같은 가정조건과 1,230 개를 기준으로 한 경제성 분석 내용은 다음과 같다⁴⁾.

○ 60 년 운전기간 동안 분석결과

- 고정식 보온재 설치비

= 초기 설치비(3,776 개) + 60 년 동안 교체비(21,831 개)
 = 368,542,737 원/1,230 개 × (3,776 개 + 21,831 개) = 7,672,580,379 원

- 탈착식 보온재 설치비(60 년 동안 1 회 교체할 경우)

= 초기 설치비(3,776 개) + 60 년 동안 교체비(3,776 개)
 = 980,269,353 원/1,230 개 × (3,776 개 + 3,776 개/회 × 1 회) = 6,018,694,434 원

- 탈착식 보온재 설치비(60 년 동안 2 회 교체할 경우)

= 초기 설치비(3,776 개) + 60 년 동안 교체비(3,776 개)
 = 980,269,353 원/1,230 개 × (3,776 개 + 3,776 개/회 × 2 회) = 9,028,041,651 원

결론적으로 탈착식 보온재를 60 년 동안 1 회 교체할 경우에는 탈착식이 고정식에 비해 16.5 억원 이득이고, 60 년

Table 3. Estimated number for inspection and replacement of fixed-insulation during operation of new plants

Cyc le	Mon ths	Year	Inspec tion No.	New Inspec tion %	New Inspec tion No.	Repeat ed Inspec tion No.	Number of repeated inspection over 3 times															Replac e number of fixed Insulation
							R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	
1	16	1.33	30	100	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	32	2.67	60	91	55	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	48	4.00	90	83	75	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	64	5.33	120	76	91	29	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
5	80	6.67	150	70	105	45	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
6	96	8.00	200	64	129	71	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
7	112	9.33	200	60	120	80	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
8	128	10.67	200	56	112	88	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
9	144	12.00	200	53	107	93	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
10	160	13.33	200	51	103	97	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76
11	176	14.67	200	50	100	100	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95
12	192	16.00	200	50	100	100	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113
13	208	17.33	200	50	100	100	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138
14	224	18.67	200	50	100	100	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	162
15	240	20.00	200	50	100	100	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	186
16	256	21.33	200	50	100	100	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	217
17	272	22.67	200	50	100	100	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	247
18	288	24.00	200	50	100	100	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	277
19	304	25.33	200	50	100	100	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	314
20	320	26.67	150	50	75	75	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	347
21	336	28.00	150	50	75	75	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	377
22	352	29.33	150	50	75	75	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	0	414
23	368	30.67	150	50	75	75	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	0	447
24	384	32.00	150	50	75	75	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	0	477
25	400	33.33	150	50	75	75	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	0	514
26	416	34.67	150	50	75	75	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	0	547
27	432	36.00	150	50	75	75	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	0	577
28	448	37.33	150	50	75	75	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	0	614
29	464	38.67	150	50	75	75	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	0	647
30	480	40.00	150	50	75	75	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	0	677
31	496	41.33	150	50	75	75	2,038	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	0	714
32	512	42.67	150	50	75	75	2,138	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	0	747
33	528	44.00	150	50	75	75	2,238	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	0	777
34	544	45.33	150	50	75	75	2,338	2,038	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	0	814
35	560	46.67	150	50	75	75	2,438	2,138	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	0	847
36	576	48.00	150	50	75	75	2,538	2,238	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	0	877
37	592	49.33	150	50	75	75	2,638	2,338	2,038	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	0	914
38	608	50.67	150	50	75	75	2,738	2,438	2,138	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	0	947
39	624	52.00	150	50	75	75	2,838	2,538	2,238	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	0	977
40	640	53.33	150	50	75	75	2,938	2,638	2,338	2,038	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	0	1,014
41	656	54.67	150	50	75	75	3,038	2,738	2,438	2,138	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	0	1,047
42	672	56.00	150	50	75	75	3,138	2,838	2,538	2,238	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	0	1,077
43	688	57.33	150	50	75	75	3,238	2,938	2,638	2,338	2,038	1,738	1,438	1,138	838	565	345	179	66	7	0	1,114
44	704	58.67	150	50	75	75	3,338	3,038	2,738	2,438	2,138	1,838	1,538	1,238	938	650	413	229	98	21	0	1,147
45	720	60.00	150	50	75	75	3,438	3,138	2,838	2,538	2,238	1,938	1,638	1,338	1,038	741	486	284	136	41	0	1,177
Sum	-	-	-	-	3,776	3,374	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,831

동안 2회 교체할 경우에는 탈착식이 고정식에 비해 13.6억원 손해로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 가동원전의 배관에 대한 반복검사 횟수와 보온재 교체 횟수를 분석하고 고정식과 탈착식 보온재의 제작 및 설치비를 감안하여 일정 수량을 대상으로 할 때 어떠한 방식이 보다 더 경제적인지를 분석하였다. 고정식과 탈착식 보온재 설치에 따른 경제성 분석은 기존 가동원전의 신규 및 반복검사 경향을 고려하여 3,776개를 대상으로 하였다. 고정식 보온재는 3회 반복검사 수행 후에 교체하고 탈착식 보온재는 60년 동안 1회 교체한다고 가정할 경우(30년 시점 교체), 탈착식이 고정식에 비해 16.5억원 이득인 것으로 나타났다. 반면, 탈착식 보온재를 60년 동안 2회 교체할 경우(20년, 40년 시점 교체)에는 탈착식이 고정식에 비해 13.6억원 손해인 것으로 나타났다. 본 경제성 평가

에는 고정식 보온재를 빈번하게 교체하는데 소요되는 담당 직원의 노력과 인건비는 반영하지 않았으며, 보온재 종류 결정과 관련된 경제성 역시 보온재를 어떻게 관리하느냐와 밀접하게 연관됨을 확인하였다.

References

1. K. M. Hwang and D. Y. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 218 (2012).
2. EPRI, TR-1011231J, Horowitz, Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement Erosion, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems, Final Report (2004).
3. K. M. Hwang, Technical Review Report on the Installation of Removable Insulation for the pipes needed to be Managed Wall Thinning, TPS TR 2013-007, KEPSCO-E&C (2013).
4. K. M. Hwang, *Proceedings of the 2014 The CSSK Spring Meeting on the Comparison of Economic Feasibility Between Removable and Fixed-Insulation for Pipe Wall Thinning Management*, p. 18, CSSK, Gwangju (2013).