

# 원자력 발전소 고압터빈의 교축여유(Throttle Margin) 최적화 연구 Study on Optimization of Throttle Margin in High Pressure Turbine of Nuclear Power Plant

고 우 식  
W. S. Ko

(접수일 : 2010년 5월 27일, 수정일 : 2010년 7월 12일, 채택확정 : 2010년 7월 12일)

**Key Words** : Nuclear Power Plant (원자력발전소), Throttle Margin (교축여유), Pressure Drop (압력강하), Power Uprating (출력증강), High Pressure Turbine (고압터빈), Swallowing Capacity (최대 통과유량 용량), Governor Valve (제어밸브)

**Abstract** : In the present study, optimization of throttle margin for high pressure turbine to be retrofitted or partially modified for power uprating or life extension in nuclear power plant, has been performed to increase the electrical output. Throttle margin for high pressure turbine is required to maintain all the time the rated power by opening more of governor valves whenever inlet pressure is decreased due to the tube plugging of steam generator. If throttle margin of high pressure turbine is too much compared to remaining lifetime, loss of electrical output due to pressure drop of governor valves is inevitable. On the contrary, if it is too little, the rated power operation can not be accomplished when inlet pressure of high pressure turbine is dropped after many years operation. So, throttle margin for high pressure turbine in nuclear power plant is compromised considering for the degradation of steam generator, governor valve capacity, manufacturing tolerance of high pressure turbine, future plan of power uprating, and remaining lifetime of power plant.

## 1. 서 론

국내에 원자력발전소가 1978년 처음으로 상업운전을 시작하여 30년이 경과한 지금은 20기 이상이 운전되고 있고 전체 발전량의 40% 이상을 담당하고 있으며, 또한 2010년 5월 현재 6기가 건설 중에 있으며 향후에도 지속적으로 건설할 계획이다.

이와 같이 국내 전력산업에서 원자력발전소가 큰 역할을 담당해오고 향후에도 지속 가능한 이유는, 건설비용이 초기에 다소 많이 들지만 원자력 발전 단가가 상대적으로 저렴하여 산업발전에 기여도가 크며, 또한 최근 지구 온난화에 대한 우려로 국제적으로 이산화탄소 배출량 규제가 현실화되고 있는 시점에서 원자력발전은 이산화탄소를 배출하지 않는 청정에너지 생산이라는 것에 더욱 각광을 받고 있다.

따라서 세계적으로도 원자력발전에 대한 관심이 고조되고 있고, 최근 아랍에미레이트(UAE)로의 원자력발전 수출로 전 세계가 한국의 원자력발전산업 성장에 대한 놀라움을 금치 못하고 여러 국가에서 한국형 원자력발전소 건설을 제의하고 있다.

이렇듯 향후에도 원자력발전의 필요성은 장기간 지속될 것으로 예측되지만, 한국형 원자력발전 기술이 국제 경쟁력에서 우위를 선점하기 위해서는 끊임없는 기술개발로 안전성을 저해하지 않고 건설단가를 감소시키며 전기출력을 극대화하는 노력이 필요하다.

그 일환으로 최근 상업운전 중인 원자력발전소의 안전여유를 활용한 열출력 증강기술을 개발하고 국내에도 성공적으로 적용하였다. 이러한 출력 증강으로 생산한 많은 증기를 터빈에서 최적으로 이용하여야 최대의 전기출력을 생산할 수 있는데 여기에 영향을 미치는 인자 중에 하나가 고압터빈 교축여유(throttle margin)이다.

따라서 본 연구에서는 원자력발전소 출력증강 시

고우식(교신저자) : 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : useoko@kepco.co.kr, Tel : 042-865-7531

고압터빈 교축여유가 전기출력에 미치는 영향을 실제 현장에서 적용결과를 근거로 고찰하고, 최적의 교축여유를 설정함으로써 전기출력 향상을 극대화하여 원자력발전 경제성 향상을 도모하고자 하였다.

## 2. 교축여유 최적화

### 2.1 원자력발전소 특성

#### 2.1.1 계통 개요

원자력발전소는 Fig.1과 같이 원자로내의 연료인 우라늄 핵분열 시 발생하는 열을 냉각수(coolant)에 전달하고, 냉각수는 원자로냉각재 펌프에 의해 증기 발생기를 순환하며 증기발생기에서 열교환으로 증기를 생산하게 된다. 이 증기는 정지밸브(stop valve : SV)와 제어밸브(governor valve : GV)를 거쳐 터빈에서 열에너지를 기계적 에너지로 전환하고 이것을 다시 발전기에서 전기에너지로 전환하여 송전하게 된다.

터빈에서 열에너지의 일부를 잃은 증기는 복수기에서 응축되어 집수정(hotwell)에 모였다가 복수 및 주급수 펌프에 의해 급수가열기를 거쳐 증기발생기로 공급하게 된다.

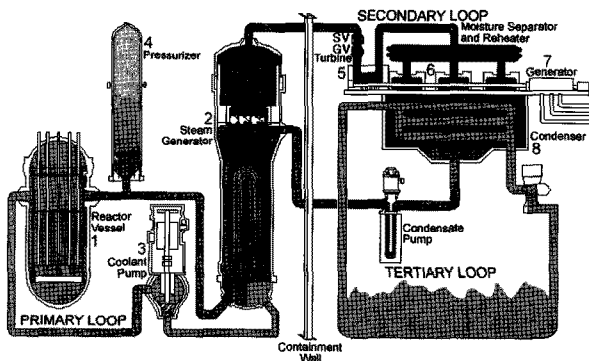


Fig. 1 Diagram of Nuclear Power Plant System

#### 2.1.2 정격 열출력

원자력발전소는 원자로 내에 핵연료를 장전하여 핵분열 시 발생하는 열을 이용하여 증기발생기에서 증기를 생산하고, 이 증기로 터빈-발전기에서 전기를 생산한다. 이 과정에서 원자력 안전을 위해 어떤 경우라도 원자로 내의 핵연료가 용융되는 사고가 발생하지 않도록 충분한 안전여유를 갖고 운전할 수 있는 정격 열출력을 정하였다. 따라서 정격 열출력을 초과하지 않도록 다중으로 잠금장치(interlock)가 되어 있어, 이차측에서 터빈 제어밸브를 정격위

치 이상으로 개방하여 증기유량을 증가시키더라도 일차측 열출력이 정격이상으로 상승하지 않는다.

그러나 현재 운전하고 있는 대부분의 원자력발전소는 30~40년 전에 설계한 것으로 당시 설계기술의 한계로 불확실성을 고려한 안전여유를 많이 적용하였으나, 최근 설계기술의 발달 및 프로그램 개발로 계산이 정확해지면서 안전성을 해치지 않는 범위에서 열출력을 증가시키는 출력증강 연구를 완료하고 현장 적용을 완료하였다.

이와 같이 원자력발전소 정격 열출력을 증가시킬 경우 증기유량이 증가하게 되는데 고압터빈의 최대 통과유량 용량에 따라 고압터빈을 부분적 또는 전체를 교체하기도 한다.

#### 2.1.3 증기발생기 성능

원자력발전소는 용량이 커서 증기유량이 많아 복수기에서 응축 시 해수를 순환시키게 된다. 이때 해수는 복수기 튜브 내부를 흐르는데 간혹 복수기 튜브의 마모나 손상 등으로 복수기 내부로 해수가 유입되는 경우가 있다. 이렇게 해서 유입된 해수는 급수와 혼합되어 증기발생기로 공급될 수 있는데, 해수에 포함된 염소성분이 증기발생기 튜브 부식을 촉진시켜 건전성을 저해하게 된다.

따라서 원자력발전소를 장기간 운전하게 되면 건전성을 확보하기 위해 주기적으로 증기발생기 튜브의 마모나 손상을 점검하고, 누설 가능성이 있는 곳은 관막음(tube plugging)을 하게 된다. 또한 증기발생기의 장기간 사용에 따른 튜브 내부에 크러드(crud)가 침적되어 열전달 성능이 떨어지게 된다. 이렇듯 증기발생기의 장기간 사용에 따른 관막음이나 크러드의 침적으로 열전달 성능이 일정 한도 이상을 초과하여 감소하면 증기압력이 감소하게 되어 이차측 터빈으로 공급하는 증기 압력 및 유량이 감소되고 전기출력이 감소하게 된다.

## 2.2 교축여유(throttle margin)

### 2.2.1 교축여유 정의

원자력발전소에서 고압터빈에 공급하는 증기를 제어하기 위하여 전단에 정지밸브와 제어밸브가 설치되어 있다. 정지밸브는 비상 시 차단기능만 갖고 있지만 제어밸브는 터빈속도 및 출력을 제어하는 기능을 갖고 있다.

따라서 증기발생기에서 생산된 증기는 모관(header)을 거쳐 이 두개의 밸브를 통과한 후 고압

터빈에 공급되어 일을 하게 되는데 밸브 및 배관에서 마찰손실이 발생하게 된다. 밸브 및 배관에서의 마찰손실은 주로 밸브 및 배관의 형상, 그리고 증기 속도의 제곱에 비례하는데 밸브를 완전히 개방 (valve wide open)하더라도 어쩔 수 없이 발생하는 고유 마찰손실이 있어서 고압터빈 입구의 증기압력은 주증기 모관 압력보다 감소되어 공급된다. 그러나 정격출력에서 제어밸브를 완전히 개방하여 운전하는 것은 계통외란, 증기 압력변화 등과 같은 비정상 상태에 대응하기 곤란하여 제어밸브를 어느 정도 닫힘 상태(throttling)로 운전한다. 이렇게 정격출력에서 제어밸브를 부분적 닫힘 상태를 유지할 때 완전개방 시보다 밸브에서 마찰손실이 증가하여 고압터빈 입구에서 증기압력은 더욱 감소하게 되는데 밸브를 부분적으로 닫음으로서 발생한 추가압력 감소분은 계통압력 감소 시 밸브를 향시라도 개방하여 복구할 수 있으므로 교축여유라고 하고 밸브를 완전개방 시 고압터빈 입구 압력에 대한 백분율로 나타낸다.

$$TM(\%) = \frac{P_{atHPin, VWO} - P_{atHPin, reqdFlow}}{P_{atHPin, VWO}}$$

TM : Throttle margin(%)

$P_{atHPin, VWO}$  : Pressure at HP turbine inlet when valve fully opened (bar)

$P_{atHPin, reqdFlow}$  : Pressure at HP turbine inlet to pass the required flow (bar)

- ○○ 3,4호기 85년 설계 교축여유

$$\frac{61.967 - 61.547}{61.967} = 0.68\%$$

고압터빈 교축여유와 밀접한 관련이 있는 최대 흡입유량 용량(swallowing capacity)이 있는데, 이것은 제어밸브를 완전개방(교축여유 0%)할 경우 고압터빈 입구 증기조건에서 터빈으로 유입되는 최대 유량을 의미하며, 일차적으로 고압터빈 입구압력에 영향을 받으며 이차적으로 추기의 양과 배기압력에 영향을 받는다.

- 증기유량 공식

$$Q = AV, V = \frac{Q}{A}, V \propto Q = vW$$

- 압력손실( $\Delta P$ ) 계산식

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{V^2}{v} \propto \frac{v^2 W^2}{v} \propto v W^2$$

Q : 증기체적유량( $m^3/s$ )

A : 단면적( $m^2$ )

V : 증기속도( $m/s$ )

v : 증기비체적( $m^3/kg$ )

W : 증기질량유량( $kg/s$ )

### 2.2.2 교축여유의 필요성

원자력발전소를 장기간 운전하게 되면 증기발생기 튜브의 마모나 손상이 발생하여 누설 가능성이 있는 곳은 관막음을 하게 된다. 또한 증기발생기의 장기간 사용에 따른 튜브 내부에 크러드가 침적되어 열전달 성능이 떨어지게 된다. 이와 같이 증기발생기의 관막음이나 크러드의 침적으로 열전달 성능이 일정 한도 이상을 초과하여 감소하면 증기압력이 감소하게 되어 이차측 터빈으로 공급하는 증기압력 및 유량이 감소하여 출력이 감소하게 된다.

이 경우에 감소된 출력을 복구하기 위해 교축여유가 있을 때는 제어밸브를 더욱 개방하여야 정격출력 유지가 가능하나, 교축여유가 적거나 없을 경우는 정격출력으로의 복구가 불가능하다.

### 2.2.3 최적 교축여유

고압터빈에 공급되는 증기유량은 고압터빈 입구 압력과 관련이 있는데 고압터빈 입구압력은 다음의 네 가지 사항과 직접적인 관련이 있다.

- 증기발생기 출구압력
- 증기발생기에서 고압터빈 밸브 전까지 압력손실
- 고압터빈 밸브 고유손실
- 필요한 교축여유

이와 같이 고압터빈에 유입되는 증기의 압력은 조건에 따라 달라지는데, 배관 및 밸브의 마찰손실은 설치 이후에 거의 변화가 없지만 증기발생기 출구압력은 운전시간 경과에 따라 증기발생기 관막음이나 크러드 침적에 의해 열전달이 불충분해져 이차측 증기압력이 감소하게 된다. 이런 경우 고압터빈 제어밸브를 더욱 개방하여 정격출력을 유지할 수 있도록 교축여유를 적용하지만 교축여유가 필요 이상으로 클 경우는 제어밸브의 마찰손실이 증가하여 출력이 감소하게 되므로 비경제적이다.

교축여유는 일차적으로 고압터빈 설계 및 제작공차에 따라 결정한다. 원자력발전소를 최초로 건설할 경우에는 원자력발전소 수명(30~40년)을 고려하여 제작사마다 다르지만 3~5% 내외의 교축여유를 적

용한다. 그러나 원자력발전소를 장기간 운전 후 출력증강 수용이나 수명연장(10~20년)을 위해 고압터빈을 교체할 경우 잔여수명이 얼마 남지 않았을 때는 증기발생기의 노후화 정도를 고려하는데 많은 교축여유를 적용하는 것은 과도한 제어밸브 마찰손실에 의한 전기출력 손실이 발생하므로 바람직하지 못하다.

따라서 고압터빈 교체 시 교축여유는 지금까지의 증기발생기 성능저하 정도, 발전소 잔여수명 및 출력증강 계획 및 고압터빈 제작공차 등을 종합적으로 반영하여 결정하는 것이 좋다.

2.2.3.1 증기발생기 성능저하와 발전소 잔여수명

증기발생기 성능저하는 증기발생기 형식, 급수 수질관리, 복수기 튜브 전선성 등과 같이 여러 가지 요인에 의해 성능저하는 다르게 나타난다. 최근에 출력증강을 실시한 원자력발전소의 사례를 비교해 보면 ○○ 1,2호기는 약 15년 운전시간 경과 후 주증기 압력이 거의 동일한 반면에 ○○ 4호기는 11년 운전시간 경과 후 1.8kg/cm<sup>2</sup>(2.53%)가 감소한 것으로 나타났다.

Table 1 The pressure change from start-up in ○○ unit 1&2

○○ Unit 1,2	Design	Accept. perform. test		Performance test	
	AB379	#1(86)	#2(87)	#1(02)	#2(02)
Electrical output(MWe)	996.8	994.4	985.1	990.6	986.8
Thermal power(MW)	2785.0	2774.6	2790.8	2785.0	2778.1
S/G pressure(bar)	66.47	67.47	67.22	67.68	67.63
Throttle press.(bar)	64.05	66.79	66.41	66.43	66.38

Table 2 The pressure change from start-up in ○○ unit 3&4

○○ Unit 3,4	Design	Accept. perform. test		Performance test	
		#3(85)	#4(86)	#3(98)	#4(97)
Electrical output(MWe)	992.9	997.2		1002.8	1003.8
Thermal power(MW)	2785.0	2785.0	2785.0	2785.0	2785.0
S/G pressure(bar)	66.47		68.05		66.33
Throttle press.(bar)	64.05	65.07	66.67	65.88	64.90

- ○○ 4호기 86년 인수 성능시험 시 교축여유

$$\frac{64.542 - 61.942}{64.542} = 4.03\%$$

85년 설계 교축여유는 0.6%~0.7% 이며 86년 인수 성능시험 시 교축여유는 증기발생기 출구 압력 증가로 인하여 약 4%로 나타났다.

- ○○ 4호기 97년 성능시험 시 교축여유

$$\frac{62.679 - 61.478}{62.679} = 1.92\%$$

그러나 위의 주증기압력 변화에서 보듯이 운전경과기간에 따라 일정비율로 감소하지 않으므로 그 비율을 그대로 적용하는 것은 큰 손실을 가져올 수 있다. 예를 들면 ○○ 4호기의 경우 11년 동안 주증기압력이 2.53% 감소하였고 교축여유가 2.11% 감소하였는데, 97년 성능시험 시점에서 고압터빈을 교체하였다면 발전소 잔여수명을 대략 30년 정도로 했을 때 증기발생기 성능저하만을 고려하여 교축여유를 약 6% 정도를 적용하여야하나, 그 이후 주증기압력변화가 크지 않아 전기출력 손실이 매우 컸을 것이다. 실제 ○○ 4호기는 2009년에 출력증강을 적용하였는데 향후 MUR(measurement uncertainty recapture, 2% 이내) 출력증강 적용을 고려하여 고압터빈 교축여유를 3% 적용하였다. 3% 교축여유 적용 시 전기출력은 Fig.2에서와 같이 0% 교축여유 적용 시보다 4.8 MWe(at 63.57 bar, 2912 MWt) 손실이 있는 것으로 분석되었으므로, 약 6%의 교축여유를 적용하는 것은 9~10 MWe의 전기출력 손실을 초래하는 것이다.

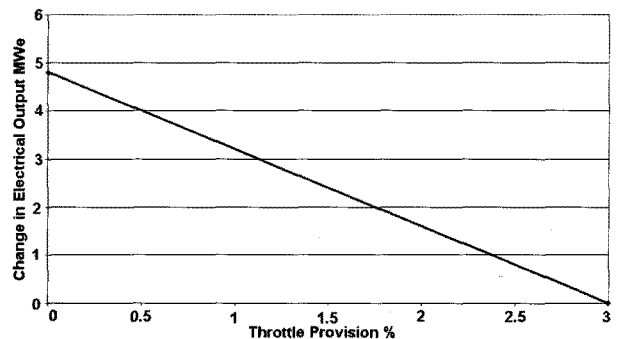


Fig. 2 Effect of throttling provision on electrical output

Fig. 3은 증기발생기가 구형 모델인 ○○ 2호기의 주증기 압력변화로, 약 18년 동안 약 5% 정도가 감소하여 상대적으로 크게 성능이 저하되어 현재 교체를 추진 중이다.

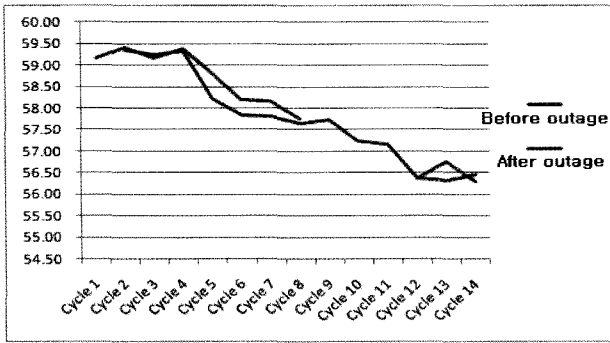


Fig. 3 The pressure change from start-up in ○○ unit 2

그러므로 증기발생기의 성능저하 원인을 정밀 분석하여 사고에 의한 것인지, 지속적으로 저하되어 누적된 것인지를 파악하고, 또한 증기발생기 교체 계획이 있는지를 종합하여 교축여유를 결정하는 것이 좋다.

### 2.2.3.2 발전소 출력증강

현재 국내에서 운영 중인 원자력발전소는 30~40년 전의 설계로서, 이후 설계기술 발달과 프로그램 개발로 안전여유 계산이 더욱 정확해졌다. 따라서 원자력 안전을 저해하지 않는 범위에서 열출력을 증가시키는 출력증강 연구 및 적용이 활발히 진행되고 있고, 실제로 ○○ 3,4호기는 4.56%의 출력증강 적용을 완료하였다.

원자력 출력증강을 적용할 경우 출력증강 비율 및 증기발생기 증기압력 조건에 따라 증기유량이 크게 증가한다.

Table 3에서와 같이 4.56% 출력증강 시 증기압력이 감소하여 증기체적 유량이 10~12% 정도 증가하게 되면 기존설비의 교축여유로 감당하기 곤란하므로 고압터빈을 부분개조하거나 교체하여야 한다. 이때 교축여유는 향후에 적용 가능한 출력증강 등을 고려하여 증기체적 증가량을 예측하여 결정한다.

Table 3 The change in volumetric steam flow when uprating

구 분	○○ Unit 3,4		○○ Unit 1,2	
	Baseline	Uprate	Baseline	Uprate
Elect. output(MWe)	999	1033	996	1046
S/G pressure(bar)	66.3	63.6	67.7	64.7
S/G flow(kg/s)	1554	1630	1548	1632
S/G flow increasing rate(%)	Ref.	4.89	Ref.	5.43
Volumetric flow(m <sup>3</sup> /s)	46.2	50.9	44.8	49.9
Volumetric flow increasing rate(%)	Ref.	10.18	Ref.	11.47

그러나 MUR과 같은 소용량(2% 이내) 출력증강 시는 증기압력 조건에 따라 다를 수 있지만 통상적인 교축여유(3% 정도) 범위에서 가능하므로 고압터빈을 소용량 출력증강 적용보다 먼저 교체할 경우 출력증강 시기를 검토하여 반영하여야 설비에 이중 투자를 방지할 수 있다.

### 2.2.3.3 고압터빈 제작공차

출력증강 상세분석으로 교축여유를 최적으로 도출하였을지라도 실제 제작된 고압터빈 용량과는 차이가 있다. 고압터빈에 필요한 교축여유나 최대 흡입유량 용량에 정확히 일치하는 고압터빈을 제작하는 것은 다음과 같은 이유로 불가능하다.

- 계산의 불확실성
- 제작 공차
- 다른 계통의 영향

위의 인자들에 의한 차이는 인위적인 제어가 거의 불가능하지만, 제작공차는 공차범위내에서 하한치와 상한치를 어떻게 적용할 것인지를 결정해야 한다.

다음은 특정 제작사의 고압터빈 고정익의 제작공차로 설계대비 -1~+2% 이내에서 제작됨을 나타낸다.

- 1단 고정익 유량 용량 공차 : -0%~+1%
- 후단 고정익 유량 용량 공차 : ± 1%

예를 들면 교축여유를 0%로 했을 때 이론적으로는 정격출력 운전이 가능하지만 실제로는 제작과정에서 -1%로 제작되면 정격출력이 불가능하고, 제작과정에서 +2%로 제작되면 약 3.2MWe 정도의 전기출력 손실을 가져온다. 또한 MUR을 고려하여 2%의 교축여유를 적용할 경우 실제로는 제작공차 때문에 1% 정도 부족하게 제작될 수도 있어 MUR 적용을 수용하지 못할 경우도 있다.

최근에는 제작기술의 발달로 실제 설치된 고압터빈 최대 흡입유량 용량은 설계와 비교하여 ±1% 이내가 가능한 것으로 알려져 있다.

그러므로 교축여유를 결정할 때 제작과정에서 나타날 수 있는 하한치와 상한치를 고려하여 최적의 교축여유를 적용해야 손실을 줄일 수 있다.

### 2.2.4 교축여유의 적정성 분석

고압터빈 교축여유는 증기발생기 노후화, 출력증강 적용계획, 고압터빈 제작공차 등에 따라 최적으로 적용해야지만 경제적 손실을 최소화할 수 있다.

교축여유 결정 시 증기발생기 노후화는 장기간에

걸쳐 서서히 진행되므로 30~40년 운전을 고려하여 3% 이상 많은 교축여유를 적용하는 것은, 첫째는 증기발생기 노후화가 예측보다 낮으므로 장기간 전기출력 손실이 발생하고, 둘째는 경험적으로 볼 때 원자력 터빈은 약 20년 운전 전후로 건전성 및 성능 향상 또는 수명연장 등의 이유로 교체하고 있고, 교체 시 지속적인 기술발전으로 효율이 향상되어 전기출력이 향상되어 경제적 이익이 크게 증가하게 되므로, 초기에 많은 교축여유를 적용하는 것은 비경제적이다.

또한 출력증강 적용 시기는 한꺼번에 증기유량이 크게 증가하므로 교축여유 결정에 중요한 역할을 한다. MUR 출력증강을 5년 이내에 적용할 경우, 현재 원자력 전기 판매단가 및 고압터빈 개조 비용을 고려할 때, 출력증강을 포함하여 교축여유를 결정하여야 설비에 대한 이중투자를 방지하여 손실을 최소화 할 수 있다.

그러나 출력증강 적용시기가 정해지지 않았거나 고압터빈 교체시기로부터 약 5년을 초과할 경우는 최소한의 교축여유만 적용하고 출력증강 적용시점에서 고압터빈을 부분 개조하는 것이 경제적인 수 있다.

- 전기출력 손실에 의한 경제적 손실

교축여유 4.8MW/3%(원자력 1000MW급, 증기압력 63.6 bar) × 1000kW/MW × 24 × 365 × 이용율(0.9) × 예상 운전년수 × 원자력 전기 판매단가

- 설비 부분개조 또는 교체 비용

개조/교체 범위, 부품 재질, 시기에 따라 다르므로 종합적으로 고려하여 결정한다.

- 교축여유의 적정범위

교축여유(%)에 따른 전기출력 손실 비용 ≤ 개조/교체 비용

경제성 평가는 NPV(net present value) 방법으로 수행하며, 미래의 가치를 현재의 가치로 평가하여 경제적 손실이 가장 적은 교축여유의 범위를 산출한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 교축여유 결정 시 고려사항

원자력발전소 고압터빈의 교축여유는 증기발생기의 장기적인 노후화(tube plugging)를 고려하여 결정하였으나, 최근 장기간 운전에 따른 건전성 확보, 성능 향상, 수명 연장 및 출력 증강 등의 목적으로

고압터빈을 교체(retrofit)하므로, 향후 변화가 예상되는 증기조건에 맞도록 적정 교축여유를 적용하는 것이 경제적 손실을 최소화하는 것이다.

따라서 고압터빈 교체시점에서 교축여유 결정은,

- 증기발생기 향후 노후화 반영 : 1%/10년,
  - 증기발생기 교체예정 : 1%/잔여수명 10년
  - 출력증강 계획 : 5년 이내 출력증강 반영, 5년 이후 출력증강 경제성검토
  - 발전소 잔여수명 : 1%/10년
- 등이 적당하다.

#### 3.2 적정 교축여유 결정

원자력발전소 고압터빈의 교축여유는 수명기간 30~40년 동안 증기발생기의 노후화를 고려하여 초기에 3~5%로 설계하였으나, 실제로는 항상 설계이상으로 나타나며 다음과 같은 모순점이 나타났다.

- 증기발생기 노후화가 설계보다 크지 않다.
- 고압터빈 원설계 수명 이전에 교체/개조한다.
- 고압터빈 초기 교축여유로 인한 전기출력 손실에 따른 경제적 손실은 약 300억(교축여유 3%, 20년 운전 기준) 정도이다.

따라서 향후 고압터빈 교체 시 교축여유는,

- 계통 외란에 대응하고 증기발생기 노후화를 고려하여 최소 1~2%가 적당하다.
- 고압터빈 제작공차를 고려하면 교축여유는 2%±1%를 적용하는 것이 이상적이다.
- 소규모 출력증강(MUR)이 5년 이내에 적용계획이라면 2% 정도를 추가하는 것이 적정하다.
- 출력증강 적용시기가 5년을 훨씬 초과하는 경우는 적용시기에 고압터빈을 부분적으로 개조하는 것이 경제적이다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 고압터빈 교축여유의 적정성에 대해 실제 현장에서 적용결과를 근거로 고찰하였다.

초기 원자력발전소의 고압터빈 교축여유는, 발전소 수명기간 동안 증기발생기 노후화를 고려하여 3~5%를 적용하였지만, 전기출력 손실에 의한 경제적 손실이 매우 커서 비경제적이다.

따라서 향후 고압터빈 교체 시 교축여유는 계통 외란 및 증기발생기 노후화를 고려하여 최소 1~2%가 적당하지만 제작공차 ±1%를 고려하면 교축

여유는  $2\% \pm 1\%$ 가 적당하다. 만약 5년 이내 출력증강 적용이 예정되었다면 이것을 고려한 교축여유를 결정해야 하고, 그 이후에 적용한다면 교축여유를 최소화하고 출력증강 적용시기에 고압터빈을 부분적으로 개조하는 것이 경제적이다.

## 후 기

본 연구는 원자력 고압터빈 교체 시 교축여유로 인한 경제적 손실을 최소화하기 위한 것으로, 동종의 업무를 담당하는 기술자들이 교축여유를 결정하는데 도움이 되기를 바라면서 이것을 작성하게 되었다.

## 참고 문헌

1. 고우식, 김계연, 이우광, 2006. 7, "○○ 1,2호기 터빈 교체 타당성 기술검토 용역 보고서", 한국전력공사 전력연구원.
2. 고우식, 김계연, 이우광, 2007. 8, "가동원전 출력증강 기술개발 터빈-발전기 분야 보고서", 한국전력공사 전력연구원.