



온배수 영향 저감을 위한 친환경 구조물 적용

김영호, 오인근, 김윤식

1. 온배수 영향 저감 필요성

최근 발전소의 단위용량이 대형화되고, 한 부지에 6~8개호기의 설비용량을 갖추는 대규모의 발전단지가 형성됨으로써, 발전소 부지 인근해역에 상당한 규모의 온배수 방출이 예상되고 있다. 이러한 온배수 방류는 해수온도의 상승을 일으키고 발전소 인근 해역의 생태계에 대하여 점차적으로 심각한 영향을 주게 되며, 또한 현재 심화되고 있는 지구 온난화 현상에 의한 해수온도 상승과 맞물려 부지 해양 환경조건이 점점 더 악화되고 있는 실정이다.

온배수를 해양으로 방류하게 되면 온배수는 주위수와의 열교환 및 조류에 의하여 온배수 방류지점을 중심으로 해수 온도 경사가 발생하게 된다. 따라서 기존의 자연상태와는 다른 해수온도 상승영역이 발생하게 되며 이 영역에서 해양환경의 변화가 발생한다. 자연상태의 환경을 최적의 조건으로 볼 경우, 온배수에 의하여 변화된 수온상승영역에서는 예전에 서식할 수 없었던 난류성 어패류가 서식하게 되고 기존에 서식하고 있던 어패류는 그만큼 영향을 받게 되어 해양생태계의 변화가 발생할 수 있다. 우리나라의 경우 신규 발전소에 대한 추가적인 부지확보의 어려움으로 인해 기존호기 인근에 신규호기가 건설되고, 이로 인해 계속적으로 재순환 온도가 상승하고 있다. 재순환 온도의 상승은 기존호기 설계시에 고려되지 못한 사항으로 현재 기존호기 내부기기계통의 설계여유도로는 더 이상의 재순환 온도 상승을 허용하기 어려운 상황이다.

이와 같이 온배수 확산에 의한 해양환경 변화와 재순환 온도 상승으로 인하여, 온배수의 영향을 최소화 하는 설계는

발전소 설계에 있어서 중요한 인자로 부각되고 있다. 따라서 온배수와 주위수와의 열교환 메커니즘, 조류, 해류 및 바람에 의한 온배수의 이동 등을 면밀히 검토하여 온배수의 확산범위를 추정하고 이를 저감시킬 수 있는 설계방안이 요구되고 있다.

2. 온배수 배출현황 및 기준

2.1 원자력 발전소의 온배수 배출현황

원자력 발전소의 전기생산 메커니즘은 원자로 내 핵분열 시 방출되는 열로 증기를 발생시키고, 발생된 증기로 터빈을 회전시켜 전기를 생산한다. 이 때, 냉각수는 터빈을 돌리고 난 후의 증기를 냉각하여 증기체적을 감소시킴으로써 압력차를 유발하여 증기의 순환속도를 빠르게 유지하는 역할을 하게 된다. 이처럼 냉각수는 발전소의 운전에 필수적인 요소로서, 취수된 냉각수가 증기순환계통과 열 교환한 후 방류될 때의 냉각수를 통상적으로 온배수라고 지칭한다. 즉, 온배수란 복수기를 통하여 내부순환계통내의 증기와 열 교환한 후 약 7℃~10℃ 정도 수온이 상승한 채 방류되는 냉각수를 말한다. 일반적으로 100만 kW 원자력발전소 1 개 호기에 필요한 냉각수량은 초당 약 50 톤 이상이며, 현재 가동 중에 있는 국내 원자력 발전소의 취배수는 표 1 에 나타난 바와 같이 대부분 표층취수 및 표층배수방식으로 이루어져 있다.

발전소	호기	위치	형식	용량 (mW)	냉각수량(m ³ /sec)	취수형식	배수형식	상업운전일
고리원자력	1	부산광역시 기장군	PWR 가압경수로	587	38.8	표층취수 (1단취수) /Curtain wall	표층방수	78.4
	2			650	42.7			83.7
	3			950	59.5			85.9
	4			950	59.5			86.4
월성원자력	1	경북 경주군	PHWR 가압중수로	697	42.8	표층취수 (1단취수)	표층방수	83.4
	2			697	42.8			97.6
	3			Curtain wall	700	42.8	표층방수 (저층방류, 유공방파제)	98.6
	4				700	42.8		99.6
울진원자력	1	경북 울진군	PWR 가압경수로	950	62.8	표층취수 (1단취수)	표층방수	88.9
	2			950	62.8			88.9
	3			1000	53.8			98.6
	4			1000	53.8			99.6
	5			1000	54.8			04.5
	6			1000	54.8			05.5(예정)
영광원자력	1	전남 영광군	PWR 가압경수로	950	57.5	표층취수 (1단취수)	표층방수	86.8
	2			950	57.5			87.6
	3			1000	53.8			95.3
	4			1000	53.8			96.3
	5			1000	54.3			02.5
	6			1000	54.3			03.1

표 1. 국내 원자력발전소 취배수 현황



선진 외국에서는 발전소에서 방류하는 온배수에 의한 주변해역의 환경에 대한 영향을 고려하여 온배수 희석효과가 좋은 심층배수형태의 배수구조물을 70년대부터 보편적으로 적용하고 있으며, 미국을 중심으로 유럽에서 적용한 심층배수 방식은 단일확산관 방식 또는 0.5 m 정도의 소구경 노즐을 이용하여 고속으로 해수를 방류하는 수중다공확산관 방식을 이용하고 있고, 일본의 경우에는 절충형으로 유공제 방식, 다중파이프 방식 및 방류탑 방식이 이용되고 있다. 표 2는 일본의 심층배수방식 적용사례를, 표 3 은 캐나다 및 미국의 심층배수방식 적용사례를 보여주고 있다.

표 2. 일본의 원자력 발전소 심층배수 방식 적용현황 (참고문헌 2)

발전소	냉각수량 및 주변수조건		확산관 특성				
	냉각수량 (m³/sec)	방류수심 (m)	방수구 형식	방류유속 (m/sec)	Pipe 관경 (m)	Pipe 개수	Pipe 배치
川越 화력발전소 2호기	32.0	1.0	다중파이프	2.0	1.3	12	평행식
志賀 원자력발전소 1호기	40.0	14.0	"	4.0	2.52	2	방사식
宮津 energy연구소 2호기	16.6	7.7	"	3.0	1.53	6	"
赤總 발전소 2호기	25.7	6.0	"	3.0	1.56	9	평행식
姫路 제1발전소 5호기	19.0	6.5	"	3.0	1.8	5	방사식
柳井 발전소 4호기	22.0	9.5	"	4.0	1.9	2	평행식
玄海 원자력발전소 4호기	82.0	14.4	"	4.0	4.5	2*	방사식
新小倉 발전소 5호기	28.0	7.5	"	2.0	3.7	4	평행식
新大分 발전소 2호계열	26.3	12.5	"	2.0	2.6	2	"
北 발전소 1호기	33.0	10.0	"	3.1	2.0	2	"
石川 석탄화력발전소 2호기	8.5	7.0	"	2.4	1.5	2	"

표 3. 북미 원자력 발전소 심층배수 방식 적용현황

발전소	냉각수량 및 주변수조건		확산관 특성			
	냉각수량 (m³/sec)	방류수심 (m)	방수구 형식	방류유속 (m/sec)	방류공 직경 (m)	길이 (m)
Calvert Cliffs	76	6	단일확산관	2.7	□4.8 x 4.8	300
Shoreham	37.4	3.7~6.1	다공확산관	3.65	0.44	1,158
Jamesport	114.4	4.9~16.7	"	4.57	0.51	1,434
Northport	40.5	7.9~12.8	"	3.96	0.36	975
Fitzpatrick	23	10	"	4.25	0.77	236
San Onofre	52.5	12	"	4	0.52	768
Seabrook	52	16	"	4.6	0.56	5,000
Nine Mile Point	17	5.2	방류탑	1.4	-	178
Darlington (Canada)	153	10-12	다공확산관	6	0.91	1,800

2.2 온배수 배출기준 및 규제사항

현재 국내에는 온배수에 관련된 명확한 법규가 제정되어 있지 않으나, 1981년에 마련된 수질환경보전법 시행세칙 제8조의 수질기준에 따르면 온배수 방출규제기준을 최대 40℃로 제한하고 있고 영광 원자력 5,6호기에서 처음 적용된 바 있다.

표 4. 수질환경보전법 시행규칙 제8조 (2000.10.23 일부개정)

지역구분	항목	페놀류 함유량 (mg / l)	시안 함유량 (mg / l)	크롬 함유량 (mg / l)	용해성철 함유량 (mg / l)	온도 (℃)	총질소 함유량 (mg / l)
청정지역	환경기준(수질)1등급 정도의 수질을 보존해야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부 장관이 정하여 고시하는 지역	1 이하	0.2 이하	0.5 이하	2 이하	40 이하	30 이하
가 지역	환경기준(수질)2등급 정도의 수질을 보존해야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부 장관이 정하여 고시하는 지역	3 이하	1 이하	2 이하	10 이하	40 이하	60 이하
가 지역	환경기준(수질)3,4,5등급 정도의 수질을 보존해야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경부 장관이 정하여 고시하는 지역	3 이하	1 이하	2 이하	10 이하	40 이하	60 이하
특례지역	환경부 장관이 공단 폐수종말처리 구역으로 지정하는 지역 및 시장·군수가 산업입지 및 개발에 관한 법률 제 8조의 규정에 의하여 지정하는 농공단지	5 이하	1 이하	2 이하	10 이하	40 이하	60 이하

미국의 경우에는 Federal Water Pollution Control Act Amendments 발표 이후 각 주정부 별로 다양한 규제법령이 마련 되어 하천수, 호수 및 해안지역의 조건에 따라 규제조건이 다르며, 발전소 별로 환경 모니터링 자료를 근거하여 필요시 규제사항을 완화하는 시스템을 구축하고 있다 (한국전력공사, 1996). 또한 해양생태계가 많이 서식하고 있는 해안지역의 습지대 보호를 위해 배수온도를 90 ~ 97°F로 제한하고 있으며 임의로 습지대를 매립하여 사용치 못하도록 습지대 훼손방지를 강력히 규제하고 있다.

일본의 경우에는 1970년 법규제정을 시작한 이래 1980년 12월에 자원에너지청이 제정한 온배수 환경영향조사 잠정지침(해양생물·어업영향조사관계)에 따라 전원개발조정심의회 전에 환경조사를 실시하고 이 계획내용에 따라 발전소의 건설을 진행하고 있다 (일본전력 토목기술협회, 1995). 온배수 배출 규제기준은 일반적으로 최대표면온도와 최대표면상승온도를 규정하고 있으며, 각국의 규제치는 표 5와 같다.



표 5. 각국의 온배수 배출온도 규제사항 (참고문헌 3,9))

국명	회사명	규정	비고
미국	Diablo Canyon 원전 (California 소재)	1. California Thermal Plan : - 기존의 온배수 규정 : 발전소 시설물들은 생물학적으로 중요한 지역과 공공 목적을 위한 대상들을 보호해야 한다. - 새로운 온배수 규정 : 배수구조물은 수직확산이 발생할 수 있도록 해안 선에서 멀리 떨어져야 한다. 배수온도가 수역온도보다 평균 20 °F(11.1 °C) 이상 초과해서는 안된다. 온배수가 해안선, 해수저층(Substrate) 수면 또는 배수계통으로부터 1000 ft 떨어진 곳의 해수면에서, 조류 주기의 적어도 50 % 이상의 시간 동안 자연 해수온도를 4 °F (2.2 °C) 이상 증가 시켜서는 안된다.	해수사용
	James A, Fitz Patric 원전 (New York 소재)	- 호수면에서의 수온이 배수되기 전 수온보다 3 °F 이상 상승해서는 안된다. 단, 반경 300 ft 이내에서는 이 온도를 초과해도 된다.	담수사용
	James A, Fitz Patric 원전 (New York 소재)	- 배수온도가 취수온도보다 평균 20 °F (11.1 °C)를 초과하지 않도록 한다. - 온배수가 해안선, 해수저층(Substrate) 수면 또는 배수계통으로부터 1000 ft 떨어진 곳의 해수면에서, 조류주기의 적어도 50 % 이상의 시간 동안 자연해수온도를 4 °F (2.2 °C) 이상 증가 시켜서는 안된다.	해수사용
이태리		- 배수구에서의 방출수온을 35 °C 이하로 규제 - 수역의 상승온도를 배수구 위치로부터 반경 1000 m 에서 3 °C 이하로 규제	

온배수에 관련된 명확한 규제법규 제정과 온배수 영향 저감방안 수립 시 요구되는 국내 발전소 온배수 배출온도 제한치 결정을 위해 상기와 같은 외국의 규제사항을 검토하여 이를 적절히 반영하여야 할 것으로 판단된다.

3. 온배수 영향 저감 방안으로서의 심층배수

3.1 냉각수 계통의 형식

현재 여러나라에서 적용하고 있는 발전소의 복수기 냉각방식을 살펴보면, 연안에 위치한 발전소의 경우에는 해수를 이용한 일회냉각방식을 주로 채택하고 있으며, 내륙에 위치한 발전소의 경우에는 대체로 냉각용수의 확보가 곤란하여 한번 취수한 냉각수를 재순환하여 사용하는 방식을 채택하고 있다. 우리나라의 경우에는 하천수를 이용하는 발전소도 있으나 원자력 발전소의 경우는 모두 다 해수를 냉각수로 이용하는 일회냉각방식을 적용하고 있다.

3.1.1 일회냉각방식 (Once-Through Cooling System)

온배수 방출에 따른 주변해역의 환경 수온상승을 저감시키기 위해 다음과 같은 방안들이 적용 또는 연구되고 있다.

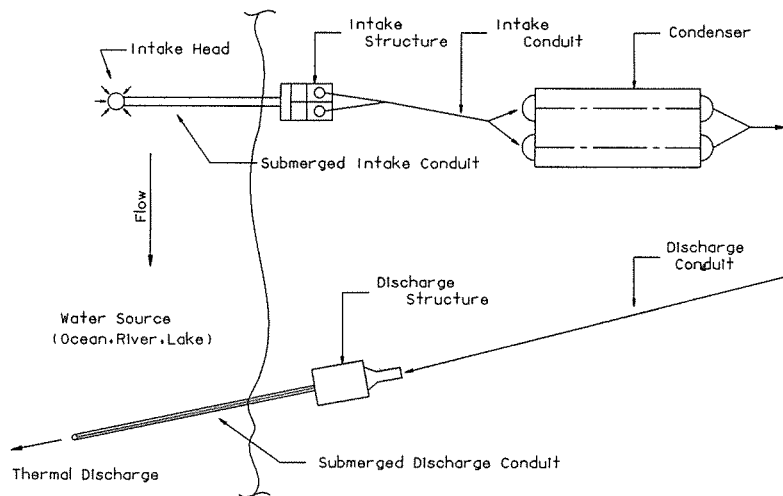


그림 1. 일회냉각방식의 순환계통도

심층취수방안 (Submerged Intake)

취수관로를 평균해수면 10 m 이상의 심층까지 연장설치하여 심층의 저온수를 취수함으로써 배출시 배수의 수온과 주변해역의 환경수온간의 차이를 줄이고자 하는 방안으로, 표층수에 비해 심층수의 수온이 낮을수록 효과가 있다.

미국 캘리포니아주의 San Onofre 원자력발전소 1호기의 경우 취수구를 연안에서 약 1 km까지 연장하여 17m 수심의 심층수를 취수하고 있는데, 여름철의 경우 취수되는 해수의 온도가 표층수에 비해 5℃ 가량이 낮다.

일반적으로, 연안의 수심이 얇아 저온심층수 취수를 위해 취수관로를 연장설치해야 될 경우 해저관로 설치비용이 막대하며, 해저에 직경 4~6 m의 콘크리트 취수관을 매설하는 것도 기술적으로 어려움이 있을 뿐더러, 관로설치에 따른 탁도발생 및 저서생태계 파괴 등 환경상의 문제점이 있다. 지반조건이 좋은 지역에서는 해저터널을 건설하면 관로설치에 따른 탁도발생 및 저서생태계 파괴 등 환경상의 문제점들을 상당부분 감소시킬 수 있다.

심층배수방안(Submerged Discharge)

연안의 표층방류시 해양생물이 주로 밀집되어 있는 조건대나 표층에 서식하는 생물들이 입게 되는 영향을 고려하여, 배수관로를 연장설치하여 온배수를 심층에 방류토록 하는 방안으로, 온배수를 심층에서 방류함에 따라 난류확산효과 (온배수와 저온 심층수간의 밀도차에 의한 부력발생)에 의한 초기 희석률을 증가시킴으로써 표층의 고온수 영향범위를



줄일 수 있는 방안이다. 난류확산효과를 증대시키기 위해 일반적으로 배수구에 확산기(Diffuser)를 설치하여, 분산방류에 따른 확산 영역감소 효과를 위해 관로내에 여러개의 배수구(Multi-port)를 설치하기도 한다.

· 해양생물이 온배수에 노출되는 시간과 표층의 고온수 영향범위가 표층배수에 비해 크게 줄어들고, 국내의 경우와 같이 신규호기 인근에 기존호기가 배치되어 있는 경우 온배수 재순환으로 인한 기존호기의 냉각수 계통에 미치는 영향을 최소화하기 위한 가장 확실한 대안으로 판단된다. 배수관로 설치에 따른 비용발생, 기술적 난점 및 환경영향 등은 앞서 언급된 심층취수방안과 같다.

혼합희석 방류방안

냉각수 취수량을 2배 이상 증가시켜 일부만 복수기의 냉각용수로 이용하고 나머지는 Bypass시켜 복수기로부터 배출되는 온배수와 합류되게 하므로써 결국 방류수의 수온을 낮추고자 하는 방안이다. 이 방안의 경우, 냉각수 순환계통의 설비용량이 커지게 되며, 별도의 Bypass수로의 신설과 취배수로의 확장에 따라 공사기간의 연장과 부지활용도가 저하되는 단점이 있다. 또한 취수량 증가에 따라 취수구로 연행되는 생물량이 많아지게 되며, 연행된 생물들은 고온수에 직접적인 열영향을 받게 되는 문제점이 있다.

혼합희석 방류방안을 채택하고 있는 발전소로는 미국의 Oyster Creek 발전소가 있으며, 배수온도가 일정한 설정치를 초과하면 순차적으로 펌프를 가동하여 취수구 냉각수를 복수기로부터 유출되는 온배수와 합류시켜 배수온도를 제한치 이하로 유지하고 있다.

3.1.2 재순환방식 (Closed Cooling System)

지상에서 냉각지를 조성하거나 냉각탑을 설치하여 대기와의 열교환 작용에 의해 냉각시키고 냉각된 물을 다시 재순환 이용하는 방식으로 온배수를 직접 해역으로 방류하지 않기 때문에 해양에서의 생태계나 환경에는 거의 영향을 미치지 않는다. 이 방식의 경우, 증발로 인한 소모 수량이나 재순환에 따라 냉각수의 고형물질 농도가 높아질 경우 교환해 주는 수량만을 보충해주면 된다. 하지만 국내의 기상조건과 지형특성상 담수원이 부족하여 다량의 냉각수를 해수에 의존하여야 하므로 대기중에 염분을 포함한 수증기를 방출함으로써 안개가 발생하는 등의 기상변화로 주변환경이 크게 훼손되며 송변전 시설물에 대한 부식문제를 발생시킨다. 또한 국토개발정책과 입지확보 측면을 감안 거의 모든 발전소가 해안에 위치하며 한 부지에 여러 호기가 집합되어 있으므로 외국의 경우와 달리 일회냉각방식에 비해 경제성이 떨어진다고 볼 수 있다. 또한 초기건설비용, 운영비용, 시설유지비 등이 다른 냉각형식에 비하여 훨씬 많이 소요되므로 발전단가의 상승요인이 되며 전력수요가 가장 큰 여름철에 외기온도가 높아 냉각효율이 극히 저하되는 단점이 있다.

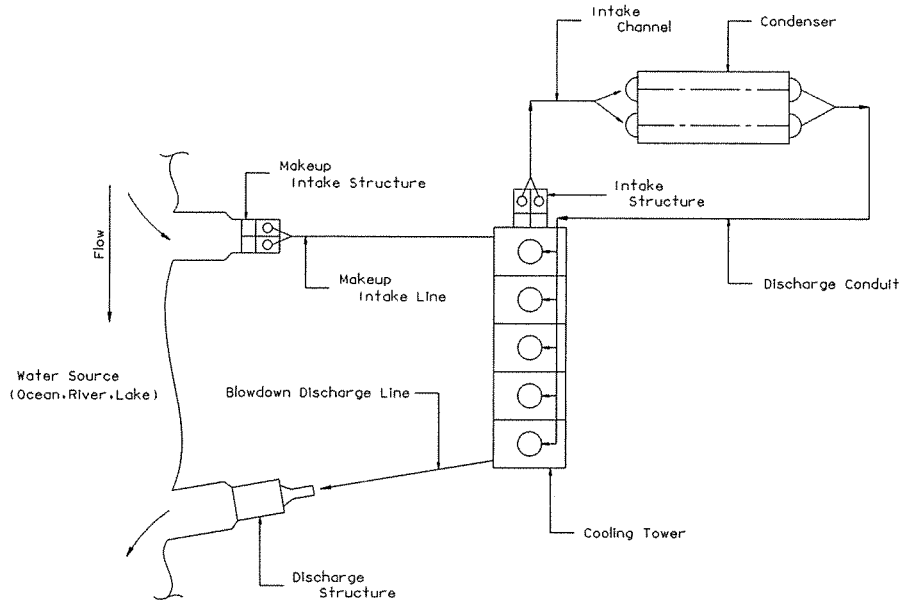


그림 2. 재순환방식 순환개념도 (냉각탑 이용)

냉각지(Cooling Pond) 방안

배수구 주변에 인공 냉각지를 조성하여 여기에 온배수를 방류시키며, 대기와의 열교환(Heat Exchange)에 따라 냉각되어진 물을 다시 취수하여 냉각용수로 재이용하는 방안이다. 이 방안을 적용하기 위해서는 넓은 냉각지 조성이 선행되어야 하는데, 일반적으로 1 MW당 0.5~3.0 에이커의 냉각용지가 소요된다. 또한 대기와의 열 교환작용을 이용한 냉각 방식이므로 부지의 기후조건이 중요한 조건이 되는데, 외기의 온도가 높은 경우(예를들면, 온배수보다 외기온도가 높은 여름철의 경우) 실효성이 없다. 이 외에도 냉각지로부터 대기로 증발된 수증기로 인한 안개형성 빈도의 증가, 가시거리 감소 및 겨울철 동결현상을 환경상의 주요 문제점으로 들 수 있다.

한편, 냉각용지의 확보가 곤란한 경우, 배수구에 노즐(Spray Nozzle)을 설치하여 온배수를 분사 방류함으로써 대기와의 접촉면적을 넓혀 열 교환작용이 빨리 일어나도록 하는 방안도 있으나, 환경상의 영향이 더욱 커지게 되며, 이 경우에도 냉각지의 1/10에 해당하는 용지가 확보되어야 한다.

냉각탑(Cooling Tower) 방안

냉각탑은 열전달 방식에 따라 건식과 습식으로 나누어지며, Fan의 설치유무에 따라서도 자연통풍식과 강제통풍식으로 구분할 수 있다. 건식냉각탑 방식은 일종의 공냉식으로 외기와의 현열교환에 의해 냉각시키는 것이며, 습식냉각탑 방식은 온배수와 외기와의 직접접촉에 의해 냉각시키는 방식이다.



- 자연통풍식 습식냉각탑(Natural Draft Wet Cooling Tower)

냉각탑 상부에서 분사되는 온배수가 자유낙하하는 동안 밀도차에 의해 자연 유동하는 대기와의 열교환으로 냉각시키는 방안이다. 이 냉각탑은 지역의 기후조건에 따라 다소의 차이는 있으나 일반적으로 높이가 120~150 m, 직경 90~120 m 규모로 냉각탑 설치에 소요되는 비용(Capital cost)이 엄청나 발전소 총 건설비의 5~10% 를 차지한다.

이 방안이 효과적이기 위해서는 부지의 기상조건이 고려되어야 하는데, 대체로 낮은 외기온도와 높은 상대습도를 갖는 지역에서 유리한 것으로 보고되고 있다. 대기중으로 증발(Evaporation), 비산(Drift)되는 증기로 인해 국지기상의 변화와 발전소내 기기의 작동장애 유발, 인근지역의 농작물피해 및 경관훼손(Aesthetic impact) 등 환경상의 문제점도 있다. 설치위치도 이러한 환경상의 영향을 고려하여 넓은 주변면적확보가 요구되어 많은 용지가 소요되며, 냉각수 보충수의 확보에도 신중한 고려가 요구된다.

- 강제통풍식 습식냉각탑(Mechanical Draft Wet Cooling Tower)

온배수 냉각에 이용되는 공기를 Fan을 이용하여 강제 주입시킴으로써 냉각효과를 높이고자 하는 방안으로, 일반적으로 높이 12~18 m, 직경 10 m 의 냉각탑을 여러개 배열하게 된다. 냉각탑 설치비용은 자연통풍식에 비해 1/2~1/3 정도 이나, 열교환 후 증발되는 공기가 재유입되지 않도록 각 냉각탑간의 간격을 충분히 유지해 주어야 하므로 소요면적은 더 넓다. 증발, 비산되어 소모되거나 재순환에 따른 고형물의 농도증가로 냉각수를 보충 또는 교환해 주어야 하는 수량은 1,070 MW급 발전소의 경우 약 3 m³/sec(1일 약 10,700톤)로 일회냉각방식에 비해 3 ~ 5% 에 불과하다. 냉각탑으로부터 증발, 비산되어 소모되는 수량은 전체 냉각수의 0.006~0.01% 정도이나, 해수를 냉각수로 이용하는 경우 증기 중의 용존 염(Dissolved salt)이 비산되어 주변지역에 쌓이게 되므로써(27 ~ 250 g/m²-yr) 농작물 피해를 비롯하여 지하수로 침출된 염분에 의해 지하수 이용 등에도 많은 장애를 일으키게 한다.

앞에서의 자연통풍식 습식냉각탑의 경우와 같이 환경상에도 영향이 많아 안개형성일수의 증가(미국의 Maine Yankee 원자력발전소의 경우 년중 350 시간의 안개일수 증가가 보고됨), 겨울철 주변지역으로 비산된 증기의 동결현상, 그리고 Fan의 작동에 따른 소음발생(미국의 San Onfre 발전소의 경우 약 80 dB)을 유발한다.

- 건식냉각탑(Dry Cooling Tower)

복수기를 통과한 온배수가 별도 설치된 여러개의 Fin Tube를 통과하는 동안 외기와의 열교환 작용에 따라 냉각되게 하는 공냉식의 일종이다. 습식냉각탑 방식과는 달리 증발, 비산되는 물이 없으므로 이로 인한 환경상의 영향이 없으며, 냉각수 보충수의 수량도 적게 소요된다. 설치조건으로 외기의 온도(Dry bulb temperature)가 낮은 지역, 계절이어야 효과가 있다. 기능상 터빈의 배출압(Discharge pressure)을 높여주어야 하므로 기존의 터빈과는 다른 Type의 터빈설치가 요구되며, 강제통풍식 습식냉각탑에 비해 4~5 배의 공기가 소요되므로 Fan 설치비용의 증가와 소내전력소모의 증가가 발생된다. 습식냉각탑에 비해 초기투자비(Capital investment)가 훨씬 많으며, 부지소요면적도 더 많이 요구된다.

이러한 여러 형태의 냉각탑 방식을 검토한 결과, 냉각탑 방식은 초기투자비와 운전유지비가 다른 냉각방식에 비해 엄청나게 소요되어 발전단가의 상승요인이 될 뿐더러 전력수요의 Peak가 나타나는 여름철에 외기온도가 높아 냉각효율이 극히 저하되는 문제점이 있다. 따라서 우리나라에서는 적절한 방안으로 채택하기 곤란한 것으로 판단된다.

3.2 심층배수의 수리적 특성

심층배수 방식은 주로 대기와의 열 교환을 통해 서서히 온배수가 냉각되는 표층방류방식과 달리 온배수를 수심 10 m 이상의 수중에서 고속방류하므로써 주위 해수와와의 빠른 혼합을 통해 초기회석효과를 높이고자 하는 방식이다. 더욱이 온배수를 수중방류할 경우 방류제트가 갖는 운동에너지(초기 모멘텀) 외에 주위수와의 밀도차로 인한 수직 상방으로의 부력을 갖게 되어 표층방류 온배수에 비해 주위수와의 난류 혼합효과를 높일 수 있다 (한국전력기술, 1992).

심층방류 온배수는 빠른 제트유속과 주위수와의 밀도차에 따라 방류구 주변에서는 부력을 동반한 강한 제트포획연행 현상을 나타내며, 주위수를 연행하여 혼합·회석되면서 수표면으로 부상한다. 이를 중력 분류라 하며 이러한 과정에 중력분류는 주위수의 유동과 수온성층 등에 영향을 받게 되어 3차원적 확산운동을 나타내게 된다. 수표면(성층해역에서는 분류와 동일한 밀도를 갖는 층)에 도달한 후에는 성층류를 형성하면서 연안류에 의한 이류(移流)와 난류에 의한 확산으로 수평방향으로 확장하여 대기와의 열 교환 과정을 거치게 된다.

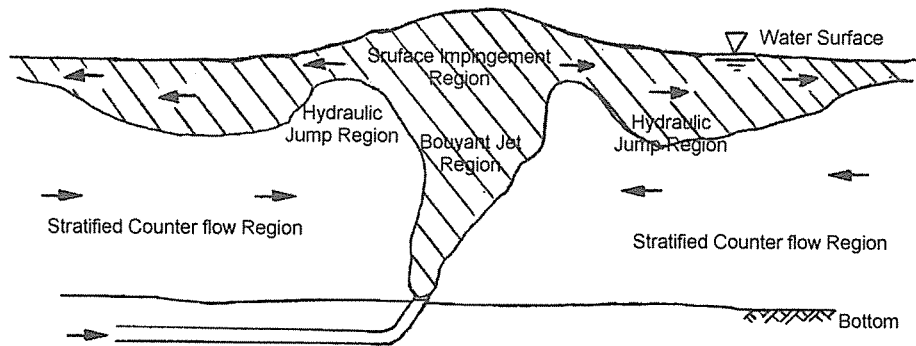


그림 3. 심층배수 온배수의 확산 모식도 (안정상태)

그림 3 은 Jirka & Harleman(1973)이 제시한 2차원 수로에서의 심층방류 온배수의 확산 모식도이다. 이들은 심층방류 온배수의 이동·확산형태를 그 작용력을 기초로 크게 4구역 즉, 방출 온배수의 제트운동량과 부력에 의해 주위수가 연행되면서 강한 난류혼합이 발생하는 부력영역(Buoyant jet Region), 부력제트의 상방 분출력에 의해 자유 해수면이 상승하여 수평방향으로 확장되는 표면혼합영역(Surface Impingement Region), 강한 수평 확장력에 의해 내부도수가 일어나는 도수영역(Hydraulic Jump Region), 그리고 부력 우세의 성층류를 형성하며 수평 확장하는 표층흐름과 이와 반대방향으로 주위수가 연행되어지는 성층역류영역(Stratified Counter-flow Region)으로 구분하여 방류구 부근 온배수의 물리적 운동특성을 설명하였다.

수중에서 방류되는 부력제트의 혼합거동은 육안으로는 관측하기 어려우나 그림 4 에 보여지는 방류플룸은 본 장에서 설명되는 부력제트의 혼합거동을 극명하게 묘사하고 있다.



그림 4. 부력제트 혼합의 실제적 묘사

수중 확산관에서 방류된 부력제트는 주변류와의 유속차로 인해 전단흐름을 유발하게 되고 전단흐름은 난류를 유발한다. 전단흐름으로 인한 난류강도의 증가는 주위수를 제트의 궤적에 유입시키게 되어 제트의 농도는 희석된다. 부력제트에서는 초기방류 모멘텀 플럭스와 부력 플럭스가 난류혼합(Turbulent Mixing)을 유발한다. 모멘텀 플럭스만을 가지고 방류되는 경우를 단순제트(Pure Jet)라 하고 부력 플럭스만을 가지고 방류되는 경우를 단순플룸(Pure Plume)이라고 한다(Jirka 등, 1996).

부력제트는 방류되는 수심, 초기부력과 방류모멘텀의 관계에 의해 안정상태(Stable Condition; 그림 3)와 불안정상태(Unstable Condition; 그림 5)로 분류된다. 안정상태는 초기부력이 방류모멘텀과 비교해 상대적으로 크고 수심이 깊은 경우에 발생하며, 반대로 불안정상태는 방류모멘텀이 부력에 비해 상당히 크고 수심이 얇은 경우에 발생된다.

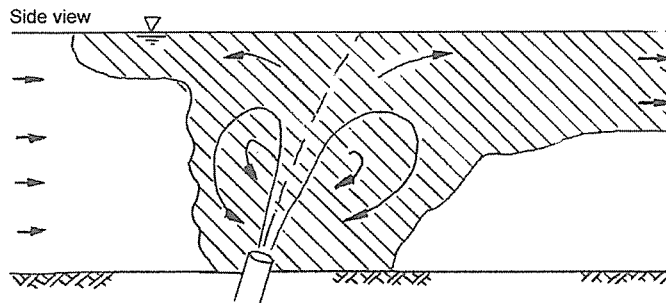


그림 5. 심층배수 온배수의 확산 모식도 (불안정상태)



그림 6. 폐수방류로 인한 표면 밀도류 생성

그림 6은 담수폐수를 바다로 방류하는 경우에 발생하는 밀도차로 인한 부력확산 과정을 선명하게 보여주고 있다. 이는 온배수 방류 시 발생하는 밀도차로 인한 부력확산과 동일한 거동을 나타낸다.

3.3 심층배수 방식의 종류

심층배수방식은 여러 개의 관을 배치한 다중관 방식(그림 7), 방류탑을 이용하는 방식(그림 8), 관을 따라 여러 개의 방류공을 설치하는 다공확산관 방식(그림 9) 등이 있으며, 표 7에 각 방식의 특성을 비교하였다. (한국전력공사, 1999) 다공확산관 방식이 초기회색효과가 가장 크고 방류지점과 방류유속 조절이 비교적 용이하나, 수심이 깊은 경우 방류공 설치비용이 크게 증가하며 시공성 또한 불리하다.

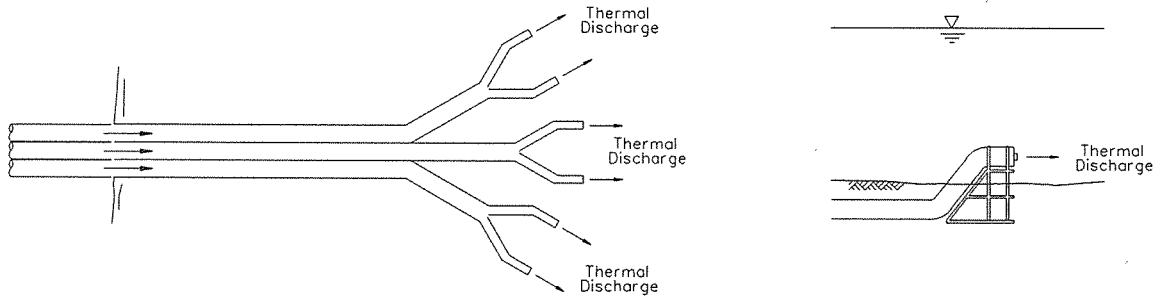


그림 7. 다중관 (Branch-out Discharge Pipe)



그림 8. 방류탑 (Multi-Nozzle Discharge Tower)

방류선단 노즐 : 2.5 m × 2
 본관(本管)에서 노즐 중심까지 높이 : 7.25 m
 지반에서 노즐까지 높이 : 3.75 m
 중량 : 135 ton / 호기
 방수량 : 41 m³/sec

www.kyuei.co.jp 참고

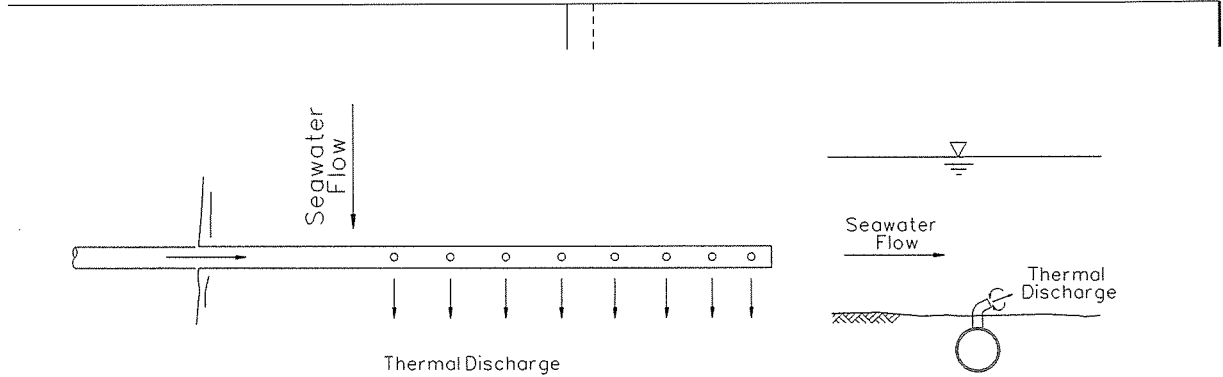


그림 9. 다공확산관 (Multi-Port Diffuser)

표 6. 심층배수 방식별 특성비교

배수방식	다중관 방식 (Branch-out Discharge Pipe)	방류탑 방식 (Multi-Nozzle Discharge Tower)	다공확산관 방식 (Multi-Port Diffuser)
개요	확산관에서 수평으로 방수하고, Jet가 표층에 도달할 때까지는 주위수를 연행시키면서 큰 혼합회석에 의한 확산을 한다. 해수면에 도달한 이후는 표층방수 방식과 같이 밀도류가 되어 수평확산이 행해진다. 단일확산관(Single Port Diffuser)을 분산 배치한 방식이다.	설치장소, 확산의 기본구조 등은 단일노즐방식(수평방류관)에 준한다. 다만, 멀티노즐로 함으로, 유량상황에 따라 확산 구조를 최적으로 하는 노즐직경, 노즐수를 설계할 수 있다. 일반적으로 대형 구조물이므로 관로에 비해 굴착깊이가 깊고, 기초 굴착면으로부터 연직관 형태로 방수탑을 해저상에 설치하고, 방류수의 분배 및 노즐설치를 위해 상부에 헤더 또는 헤드 탱크 등을 갖는다. 개념적으로 대구경 방사형 다공확산관에 준한다.	방류관에 다수의 확산관을 설치하여 수평방향으로 방류하는 방식. 확산·회석 구조는 수평방류관 방식에 준한다. 수심이 얇은 해역용으로 고안된 것이며, 방수관 선단부의 개수를 조절함에 따라, 천해에서도 수평방류관 방식과 동일한 양상의 기능을 확보할 수 있다.
방류유량	노즐직경을 조절함으로써 소용량에서 대용량까지 가능	노즐직경을 조절함으로써 소용량에서 대용량까지 가능	방류관의 구경, 개수의 변화에 의해 소용량에서 대용량까지 가능
수심	방류점이 깊을수록 유리	방류점이 깊을수록 유리	수심이 얇은 해안에 유리하며, 온배수 확산효과를 보장하기 위한 최소수심 이상의 수심이 요구되나, 수심이 깊게 되면 시공성 측면에서 불리하다.
방류유속	방류플룸으로 인한 표면유속이 제한된 값 이하까지는 방류유속을 크게 할 수 있다.	방류플룸으로 인한 표면유속이 제한된 값 이하까지는 방류유속을 크게 할 수 있다.	방류수심이 극히 얇은 경우에는 해면에서의 유속을 억제하기 위해 방류유속을 줄이는 경우가 발생한다.
초기 회석효과	초기회석효과가 타 방식에 비해 작은 편이다.	초기회석효과는 다공확산관 방식 다음으로 좋다.	확산관의 개수가 많으므로 초기회석 효과가 크다.
확산범위	확산범위는 외해측으로 길고, 해안선에 연하여는 좁다. 연안으로부터 떨어져 형성된다.	외해방향의 확산역은 다중관 방식보다 적지만 해안선방향으로는 다소 넓다. 확산범위를 억제하는 효과는 다중관 방식보다 크다.	설치수심 부분에는 확산범위가 좁게 되나, 해안선 방향으로는 넓게 되고, 연안에 접할 가능성이 있다.

3.4 국내 연안해역의 심층배수 적용성 검토

온배수 영향 저감 방안으로 심층배수를 적용하기 위해서는 심층배수 구조물이 설치되는 해역의 수온분포(표 7), 조류·조석 등의 물리환경, 해저면의 경사, 해저지질조건 등의 여러 가지 조건들을 검토해야 한다.

표 7. 동해안과 서해안의 계절별 수온분포

배수방식	서 해 (전역)	동 해 (남한)
겨울철	대륙성 기후의 영향으로 표층, 저층 모두 균일하게 2 ~ 8℃ 정도로 분포	복상하는 대마난류(對馬暖流)에 의해 10℃ 이상
여름철	표면 수온은 전 해역에 걸쳐 24 ~ 28℃ 이며, 10 ~ 30 m 층에서 수온약층이 발달함 (수온경도 10℃/15 m)	표층수온은 최고 26 ~ 27℃ 이며, 10℃ 이상의 난수층이 수심 100 m 정도에서 형성. 수심 15 ~ 20 m 에서 11 ~ 13℃ 의 수온분포

현재 운영중인 발전소 주변의 입지조건 및 해역특성을 분석하여 온배수 방류수심으로 적절한 수심 15 m 이상을 확보할 수 있는 지점까지의 거리와 방류수의 특성 및 확산관이 설치될 지역의 지배적인 주변류의 특성을 감안한 적정 확산관의 제원은 표 8 과 같다 (한국전력공사, 1998).

표 8. 해역별 수심 15 m 지점까지의 거리와 적정 확산관의 제원

배수방식	수심 10 ~ 15 m 까지의 거리	적정 확산관 제원	지반상태	비고
서해안	1,000 ~ 2,000 m	측방향 확산관 : LF=1,500 m	연약지반	(조차가 크므로) 펌프장 필요
		양방향 확산관 : LF=1,500 m		
남해안	500 ~ 1,000 m	측방향 확산관 : LF=700 m	연약지반	펌프장 생략 가능
		T형 확산관 : LF=700 m		
동해안	300 ~ 400 m	측방향 확산관 : LF=400 m	사질토 및 암반	펌프장 생략 가능
		T형 확산관 : LF=400 m		

* LF : 공급관 길이(수심 15 m 기준)

서해안의 경우 동해안과 달리 방류수심으로 적합한 15 m 이상 수심까지의 거리가 1500 m 이상으로 해안으로부터 너무 멀고, 조석의 차가 크며, 갯벌 등으로 인해 지반의 상태 또한 좋지 않는 등의 불리한 조건을 가지고 있다.

신규 원자력 발전소의 대부분이 건설될 예정인 동해안의 경우에는 적정 방류수심까지의 거리가 400 ~ 800 m 로 비교적 짧고 조석의 차가 크지 않는 등 심층배수 구조물을 설치하기에 양호한 조건들을 갖추고 있다. 따라서 심층배수방식은 추후 건설 예정인 동해안 신규 발전소에 매우 적합한 것으로 판단된다.



4. 결론

본 고에서는 온배수 영향 저감을 위한 심층배수방안의 특성 및 적용성에 대하여 검토하였다. 검토결과, 국내의 경우 심층배수방식은 주변 해안환경과 발전소 운영측면에서 적용성 및 효율성이 가장 좋은 온배수 영향 저감방안으로 판단되며, 이미 신고리 1,2호기에 최초로 적용될 예정이다.

심층배수 구조물의 경우 한번 시공이 이루어지고 나면 노선변경이나 구조물의 유지·보수가 극히 제한적으로 이루어지기 때문에 지진 등의 외부하중에도 구조물이 견딜 수 있도록 하는 내진설계와 적절한 온배수 확산예측 기법을 적용하는 것은 심층배수 구조물 설계에서 매우 중요한 요소이다. 따라서, 실제 발전소에 대한 심층배수방안의 성공적인 적용을 위해서는 이러한 분야에 대한 좀 더 많은 관심과 노력이 요구되고 있으며, 이와 함께 온배수 저감방안과 관련하여 외국 의 실제 운영사례에 대한 조사도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 수질환경보전법 시행세칙 8조, 1981
- 2) 일본 전력토목기술협회, 화력·원자력 발전소 토목구조물의 설계, 1995.
- 3) 한국전력공사 원자력건설처, 원자력 발전소의 온배수 영향 저감방안 연구, 1996.
- 4) 한국전력공사 전력연구원, 발전소 온배수 심층방류 기술연구, 1999
- 5) 한국전력공사 전력연구원, 호암·비학 신규원전 최적 취배수 방안(기술지원 보고서), 1998.
- 6) 한국전력공사, 해외발전소(화력·원자력냉각탑 자료조사(公務海外旅行 歸國報告書), 1995.
- 7) 한국전력기술 주식회사, 심층배수 관련 구조물 설계기준 및 절차확립, 2000
- 8) 한국전력기술 주식회사, 심층배수에 관한 연구, 1992.
- 9) BHRA (British Hydromechanics Research Association), Thermal Discharges; A Guide to Power and Process Plant Cooling Water Discharges into Rivers, Lakes and Sea, 1984.
- 10) Jirka, G.H. and Harleman, D.R.F. "The Mechanics of Submerged Multiport Diffusers for Buoyant Discharges in Shallow Water", Technical Report No. 169, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics Mar., 1973.
- 11) Jirka, G.H., Doneker, R.L., Hinton S. W., "User's Manual for CORMIX", Defrees Hydraulics Laboratory School of civil and Environmental Engineering Cornell Univ., 1996