

<技術報告>

화력 발전소 복수기 관의 부식

현 재 창*
홍 성 국**

1. 머릿말

국내에서는 발전소를 운영하고 있는 회사로 한국전력(이하 한전)외에 동해전력, 경인에너지, 호남전력등이 있다. 그러나 실제 복수기 관의 부식의 문제가 대두된 것은 한전과 동해전력 밖에 없고 나머지는 아직 운전 경력이 적기 때문에 그 문제가 대두되지 않고 있다.

몇년 전 까지만 하더라도 발전소 단위용량이 적은 관제로 복수기 관의 부식으로 인한 사고는 그리 심각한 상태에 이르지 않았고, 다만 해수를 사용하는 몇개의 발전소에서 일반적인 부식으로 관을 조금씩 교체하여 왔으나, 군산발전소에서 운전이 시작된지 1년이 채 넘지않은 1969년에 50%(9100개중)이상, 약 10⁵ ft의 관을 교체해야만 하기에 이르렀다. 3년간 관의 직접 재표비판도 16단불 이상이 소모되었다. 그러는 중 증기프진이 임계점에까지 이르는 대단위 용량의 발전소들이 여기 저기에 건설되었고, 관의 부식문제는 발전소 전체통에 영향을 주는 암적 요소로 대두되었다.

이 문제를 해결하기 위하여 외국에서는 1920년 이전부터 지금까지 막대한 경비를 투자하면서 연구노력 해 오고 있는 터이다. 국내에서는 한전에서 이의 문제를 해결하기 위하여 과거 2년 동안 군산발전소를 중심으로 그 정확한 원인과 가장 최적의 대책을 강구하기 위하여 연구하여 왔다.

본보에서는 복수기 관에서의 부식자체에 대한 학술적인 이론의 전개보다는 오히려 몇개의 발전소에서 경험적으로 나타난 부식의 유형과 상태를 증점적으로 다루므로 발전소 복수기 관의 부식에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 일반적 현황

먼저 발전소에 종사하지 않고 다른 분야에 종사하는 사람들을 위하여 복수기 구조와 발전소별 복수기 설계 조건, 사용하는 관에 대한 사양과 재 성질, 냉각수 조건 및 부식을 일으키는 몇가지 요소에 대하여 설명하겠다.

2-1. 복수기의 개요

그림 1은 대표적인 복수기구조이다. 상부 수축부와 터빈이 연결되어 있다. 연결된 저압터빈은 두개의 배기 flange 가 있어 이로부터 터빈에서 일을 다 마친 증기가 증기확산부에서 확산하여 상부관에 높은 속도로 충돌하고 tube bundle로 흘러내려간다. 그러는 동안 관내부를 흐르는 냉각수에 잠열을 전달하고 응축하여 tray를 거쳐 hot well에 도이게 된다. 일부의 증기는 by pass area를 지나 응축된 물을 다시 가열하며 그 때에 탈기 작용도 동시에 하게 된다. 탈기된 기체는 공기 냉각축을 거치면서 전달하고 밖으로 나가게 된다. 냉각수는 관의 내부를 5~8ft/sec의 속도로 흐르며 2중 혹은 단일 경로를 거쳐 열을 받아 다시 밖으로 나간다. 복수기 관의 부식은 주로 증기측에서는 증기가 충돌하는 상부관과 공기 냉각부분에서 일어나고 냉각수측에서는 해수 혹은 강물등에 의한 관부식과 냉각수의 흐름으로 야기되는 기계적인 침식이 있기 된다.

2-2. 발전소별 현황

도표 1은 한전의 각 발전소별 복수기 설계조건이며 도표 2는 관의 사양이다. 도표 3은 각 규격별 화학 성분표이고 도표 4는 ASTM B-111을 중심으로 한 물리적 성질과 기계적 성질이다.

* 한국전력부식회사
기술개발연구소 제 2연구실 금속연구주무
** 기술개발연구소 제 2연구실 연구원

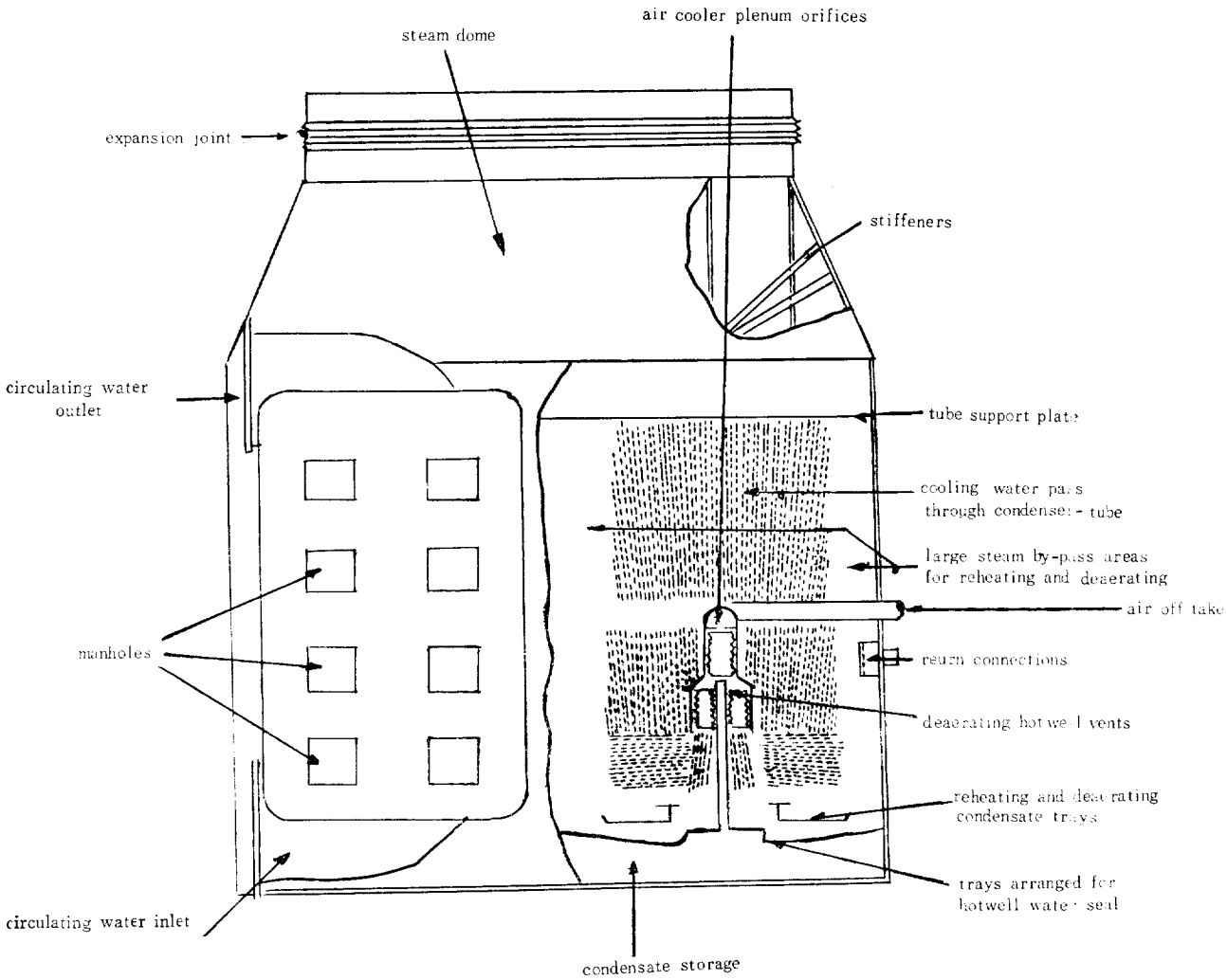


그림 1. Condenser 구조

도표 1. Condenser 설계조건

발전소	내 용 Unit	Turbine	Exhaust	Exhaust	Exhaust	냉각수	냉각수	냉각수	냉각수	복수기 구경	
		출력 MW	steam 량 lb/hr	steam Enthalpy Btu/lb	steam 온도 °F	표면적 ft ²	수량 GPM	수온 °F	수도 °F		관속 유속 fps
서울	#3	25	180,000	1,016	108.7	16,000	32,000	85° F	95.57	6.82	2.5''
	#4	137.5	682,726	1037.5	101.7	65,500	58,200	70° F	92.9	7	2''
	#5	250	488,420	560.8	33.2	13,000	3,156	21° C		2.0	38mm
			kg/hr	kcal/kg	°C	m ²	m ³ /hr			mps	Hg

부 산	#1, 2	66	402, 050 lb/hr		108. 7° F	40, 000 ft ²	58, 200 GPM	85° F	97. 9° F	6. 3fps	2. 5'' Hg
	#3, 4	105	261, 000 kg/hr			6, 460m ²	15, 300 m ³ /hr	20° C			38mm Hg
인 천	#1	250	478, 520 "	583. 9 kcal/kg	33. 2° C	14, 500 m ²	25, 680 "	"		1. 99mps	"
군 산	#1	75	45, 200 lb/hr	976 Btu/lb	100. 4° F	45, 800 ft ²	47, 000 GPM	75° F	92. 35° F	7fps	1. 953'' Hg
영 월	#1, 2	55	148, 700 kg/hr			4, 250m ²	9, 800 m ³ /hr	21° C			0. 056 ata
삼 척	#1	25	180, 000 lb/hr	1, 016 Btu/lb	108. 7° F	16, 000 ft ²	32, 000 GPM	85° F	95. 57° F	6. 82fps	2. 5'' Hg
	#2	33	88, 110 kg/hr	560 kcal/kg	33. 2° C	1, 600m ²	9, 300 m ³ /hr	21° C		2. 2mps	1. 5'' "
마 산	#1, 2	25	180, 000 lb/hr	1, 016 Btu/lb	108. 7° F	16, 000 ft ²	32, 000 GPM	85° F	95. 57° F	6. 82fps	2. 5'' Hg
해 상	#1, 2	"	100, 000 "		91. 8° F	9, 200ft ²	20, 000 "	68° F "	77. 5 "	6. 55 "	1. 5 "
영 남	#1	200	882, 750 "	1022. 4 "	91. 8 "	127, 180 ft ²	117, 600 "	71. 2 "	86. 2 "	8. 0 "	"
	#2	"	378, 000 kg/hr	561. 3 kcal/kg		10, 000 m ²	24, 100 m ³ /hr	16° C	24. 3° C	2. 09fps	0. 038 ata

도표 2. Condenser tube 사용별 사양

발전소	내 용 Unit별	Tube 재질		Tube 사양				제작회사	가 년	동 일
		재 질	규 격	외 경	두께	길 이	수 량			
서 울	#3	admiralty metal	ASTM B-111	7/8''	18BWG	22'	3, 176	미 국 Elliot	1956. 3. 15	
	#4	"	"	1''	"	30'3''	8, 340	미 국 Delavel		
	#5	aluminum brass	JIS BsTF ₃	"	"	15, 240mm	10660	일 본 미쓰비시	1969. 4. 25	
부 산	#1, 2	"	ASTM B-111	7/8''	"	28'3''	6, 242	미 국 Wheeler	1964. 3. 20	
	#3, 4	"	DIN SoMs 76	23mm	1mm	6, 400mm	14, 000	서 독 M. A. N.	1969. 6. 4	
인 천	#1	"	JIS BsTF ₃	25. 4mm	18 BWG	10, 438mm	17, 412	일 본 Toshiba	1970. 5. 29	
군 산	#1	"	ASTM B-111	7/8''	"	22'5 1/2''	9, 100	미 국 Maryland	1968. 4. 26	
영 월	#1/2	admiralty metal	DIN SoMs 71	22. 7mm	1. 5mm	6, 970mm	8, 940	서 독 M. A. N.	1965. 9. 15	
삼 척	#1	aluminum brass	ASTM B-111	7/8''	18BWG	22'	3, 176	미 국 Elliot	1956. 4. 15	
	#2	"	JIS BsTF ₃	22. 2mm	"	6, 000mm	3, 840	일 본 Toshiba	1963. 10. 8	
마 산	#1/2	"	ASTM B-111	7/8''	18BWG	22'	3, 176	미 국 Elliot	1956. 4. 15	

해 상	#1, 2	"	"	3/4"	"	21 ^{16'} / ₄ "	2930	미 국	1932. 1. 19
영 남	#1	90-10 Cu-Ni	DIN SoMs 76	7/8"	20BWG	30'	18504	미 국 Delavel	
	#2	Aluminum brass		23mm	1mm	7500mm	18460	서 독 M. A. N.	

도표 3. 각 재질의 화학성분

규격	재질	성분(%)								
		Cu	Zn	Sn	Al	Ni	Mn	As	Pb	Fe
ASTM B-111	Admiralty Metal	70~73.0	간	0.9~1.2					0.07	0.06
	Aluminum brass	76~79	"		1.8~2.5			0.02~0.10	"	
	90~10Cu-Ni	786.5	1.0			9.0~11.0	1.6		0.05	0.5~2.0
JIS H3632	BsTF ₁	70~73.0	간	1.0~1.5					0.07	0.15
	BsTF ₂	76~80	"		1.8~2.5			0.23. 02~0.10	"	0.05
	CnTF ₃	간	1.0			29.0~33.0	1.0		0.05	0.4~1.0
DIN 1785	SoMs 71	70.0~72.5	간	0.9~1.3			0.5	0.1	0.07	0.07
	SoMs 76	76.0~79.0	"		1.8~2.5		"	"		0.07

도표 4. 각 재질의 물리적, 기계적 성질

Tube	성질	밀도(20°C) (비 중)	열전도율(Btu/ hr ² F ft ² /in)	AM에 대한 전도율비	인장강도 10 ³ psi	항복점 10 ³ psi	연신율 0.2%	경도(HB)
Admiralty metal		0.308 lb/in ³ 8.53 S.G	770	1.00	48	20	65	78
Aluminum brass		0.301 " 8.33	696	0.90	52	20	55	82
70-30 Cu-Ni		0.323 8.94	2.04	0.26	55	22	45	90
90-10 Cu-Ni		"	312	0.40	40	22	42	78

2-3. 몇가지 부식형태

발전소 복수기관에서 일어날 수 있는 부식형태는 해수에 의한 균일부식, 전지부식, 점식, 원소탈리에 의한 부식, 침식 또는 직접적 원인은 아니지만 부식을 촉진시키는 미생물에 의한 부식으로 분류할 수 있으나 실제적으로는 몇가지 형태가 복합하여 일어나는 경우가 대부분이기 때문에 부식당한 관을 보면 어느 형태의 부식이라고 단정하기가 거의 불가능하고 다만 기계적 원인에서 오는 침식 혹은 전기화학적 원인에 의한 어떠한 형태의 부식이라고 판단하게 된다.

3. 복수기 부식의 실제 예

그림 2는 발전소별 사고현황이다. 그림에서 보는

바와 같이 거의 대부분이 부식으로 인한 사고를 경험했고 그로 인한 경제적 손실은 어마어마한 것이다. 이들 발전소중에서 몇개의 발전소에서 경험한 전형적인 부식유형을 복수기 관의 부식이 일어나는 주 위치별로 분류하고 주 원인을 해석하며 가능한 범위내에서 그 사고에 대한 방지책을 설명하겠다.

3-1. 증기측 부식

전술한 바와 같이 증기측 사고에는 먼저 증기측들로 인한 관의 침식현상과 긴 관의 중간 중간을 지지하고 있는 support plate에서 진동 혹은 물의 정체상태로 인한 틈 부식이 일어나는 경우와 공기냉각측에서의 공기와 암모니아가 합하여 발생하는 부식이 있으며 이들에 대하여 발전소에서 경험한 사실은 다음과 같다.

그림 3은 부산 발전소 #1,2 복수기에서 증기 측들

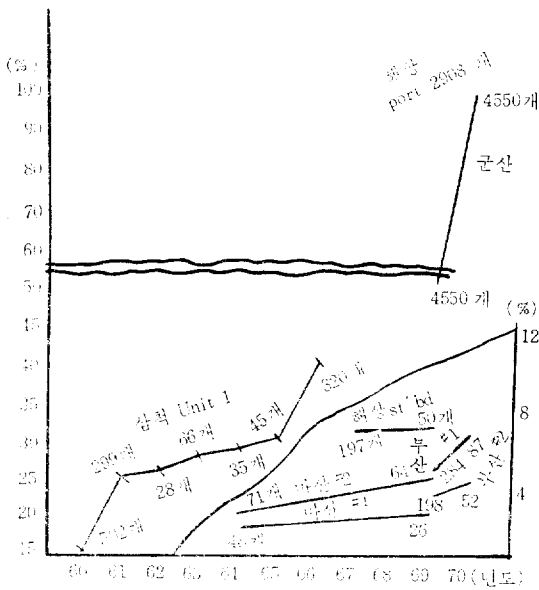


그림 2. 발전소별 사고 현황

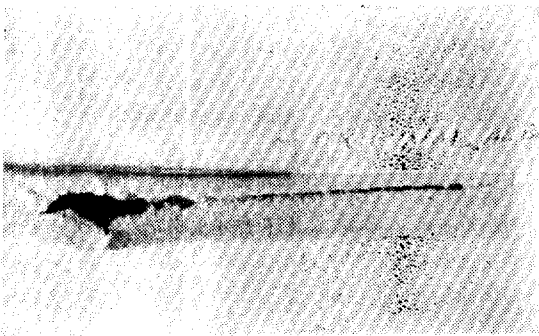


그림 3. 상부관의 증기 충돌로 인한 침식 현상



로 일어난 침식현상이다. 이와같은 현상은 영월발전소는 1, 2에서도 나타났었다. 각 발전소에서 유사한(같은 정도) 경험을 하고 있다.

그림 4는 군산발전소에서 공기 냉각수축에서의 압드니아와 다른 불 응축성 기체에 의하여 부식된 것으로

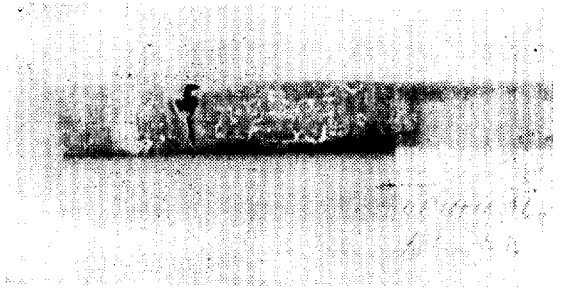


그림 4. 공기 냉각수축에서의 부식

이 기체들이 그 부분을 거쳐 밖으로 추출되는 경로가 그대로 부식표면에 나타나 있으며 파열된 관의 두께는 0.1mm(1.25 mm 에서)까지 얇아져 있다. 이 관의 운전 시간은 1년이 넘지 못하다. 이러한 현상은 부산 #1, #2에서 군산발전소처럼 심하고 다른 발전소에서도 전반적으로 일어나고 있는 실정이다.

3-2 냉각수축 부식

냉각수축 부식으로는 냉각수와 관사이에 일어나는 제반 부식과 또 냉각수 흐름 상태에 따라 일어나는 침식현상으로 나눌수가 있다. 복수기 관의 부식으로 설계상의 문제와 관련하여 가장 중요한 것으로 냉각수 입구측에서 약 15 cm 가량에서 일어나는 이른바 inlet failure 가 있다. 그림 5는 인천 발전소에서 1년반 운전후 발생한 입구에서의 공기의 분리와 그의 충돌로 말미암아

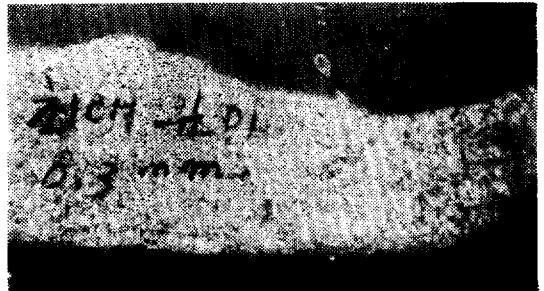


그림 5. Inlet failure의 형태; ×50배

침식당한 형태로 입구에서 약 60 mm 까지 관 내면의 약 3/4에 걸쳐 침식당해 있다. 다음 도표 5는 입구측 침식에 따른 Al. Brass와 Cu-Ni(70-30) 두재질간의 내식성 비교를 위해 시험관을 입구에서 약 80 mm 정도로 끼워서 주기적으로 측정한 무게감량표이다. 1971년 9월 18일 측정된 결과로 볼 때 Cu-Ni과 Al. Brass의 감소량이 그리 차이가 많지 않다는 것을 알 수 있

다. 부산 #1, #2에서 이러한 현상이 발생하여 곧 전체적으로 이들을 교체하기에 이르렀다.

또 입구측의 어느 부분 혹은 전체적으로 전기화학적 부식이 아닌 침식현상이 종종 발생하는데 특히 군산에서는 입구측 침식뿐만 아니라 관 전장에 걸쳐 냉각수에 포함되어 있는 토사류를 포함하고 있는 벨류에 의해 아주 심한 침식을 당하여 1969년 이래 매년 50%

도표 5. 시험관의 무게 감량예(gr)

측정 시험관	1970. 3. 24	1970. 5. 15		1971. 4. 18		1971. 9. 18		
	Original	측 정 치	감 소 량	측 정 치	감 소 량	측 정 치	감 소 량	감 소 량 계
S-1	70.5410	70.4248	0.1162	67.3168	3.2242	64.3242	2.9926	6.2168
-2	71.0728	71.0648	0.0080	68.3235	2.7493	66.2441	2.0794	4.8287
-3	71.2310	71.0483	0.1827	68.0890	3.1420	65.8040	2.2850	5.4270
-4	72.2340	72.0724	0.1616	68.6160	3.6180	66.4227	2.1933	5.3113
-5	71.2440	70.9890	0.2554	67.8589	3.3855	65.1225	2.7364	6.1219
B-1	65.4917	64.0770	1.4147	60.9699	4.5218	59.0336	1.9364	6.4581
-2	63.0990	62.6180	0.4810	59.1302	3.9688	57.1422	1.9880	5.9568
-3	66.9668	65.9841	0.9827	62.1297	4.8371	59.9926	2.1371	6.9742
-4	66.6510	65.7458	0.9052	62.1414	4.5096	60.5687	1.5727	6.0823

범에 S: Cupro-Nickel(70-30) B: Al. Br. ass

의 관을 교체하지 않으면 안되게 되었다. 다음 그림 6은 그 침식된 상태를 보여주고 있고 그림 7은 그 단면을 보여주고 있다. 이들은 미국 제품의 Al. Brass tube로서 1년에서 2년 사이에 그러한 현상이 일어나고 있다.

그림 8과 그림 9는 울산에 자리잡고 있는 동해전력의 울산발전소 #1, #2, 복수기의 관 입구에서 약 200~400 mm 사이에서 발생한 국부침식 형태이다. 그 원인은 냉각수의 단면이 이물질 특히 조개로 덮여있

아 장애를 받아 바로 그 지점에서 침식이 일어난 것이다. 탈아 현상이나 secondary phase의 선택적 용해등 금속학적 사고원인이 아님이 판명되었다.

다음 냉각수와외의 전기화학적 부식형태에 대한 예를 들어보겠다. 군산발전소에서의 냉각수측에는 관 전장에 걸쳐 침식과 아울러 갈색의 hydrated iron oxide의 넓은 층으로 되어 있으며 간혹가다가 푸른색의 copper carbonate가 산화물의 넓은 층위에 나타나 있다. 침식은 나타나 있지 않았다.

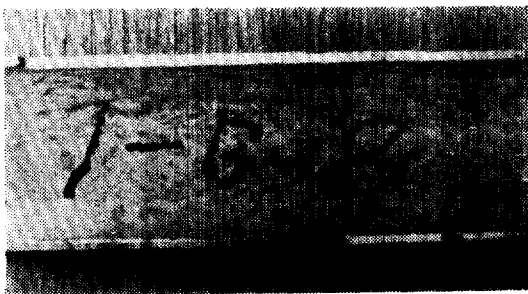


그림 6. 냉각수측 내면 침식 형태



그림 7. 침식 형태의 단면 : ×50배

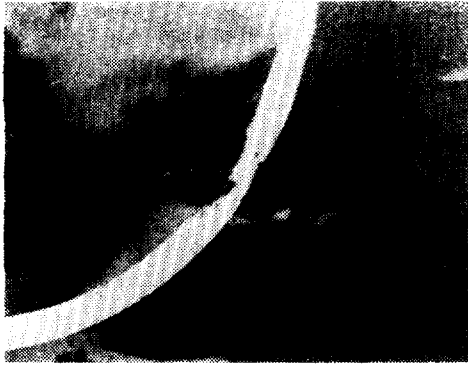


그림 8. 냉각수측 내면의 국부침식 상태(일본제품인 Al. Brass)



그림 9. 침식형태의 단면(일본제품인 Al. Brass)

부산발전소 #1, #2 복수기의 관내부는 특별히 부식당한 흔적은 없었으며, #4 복수기는 얇은 층의 slime 만 있을뿐 slime 밑에 부식형태는 찾아 볼 수가 없었다.

인천발전소는 굉장히 두터운 slime 이 끼어있을 뿐만 아니라 그 밑에는 전장이 걸쳐 점식과 전지부식이 일

어나 있다.

동해전력의 울산 발전소에서는 반점처럼 생긴 부식이 나타나 있는데, 이른바 경계층부식으로 불명되었다. 그리고 짙은 색깔의 우화물이 약간 식출되었는데 이는 냉각수중의 유기물질로 기인된 것이었다. 이 유화수소는 광범위하게 관을 부식시켰다.

또 동함금계통에서는 눈에 띄만한 점식(pitting)현상이 일어나지 않는데 반하여 stainless steel tube 에서는 그림 10 과 같은 침식현상이 발견되었다. 이는 전형적인 형태로서 군산발전소에서 시험용 튜브로 일년간 운전후 나타난 것이다. 이 점식현상은 S. S. 과 같은 passive 재료의 불행한 성질로서 특히 고농도의 염분을 함유하고 있는 해수에서 염분과 공기의 영향으로 일어난다. 그림 10의 S. S. 는 TP 304 이며 TP 316 등 보다 높은 침식저항을 가진 재료에 대하여는 아직 확실한 자료(시험중)를 갖고 있지 못하다. 그러나 외국의 예로 보건데 적절한 운전조건만 유지시킨다면 이는 쉽게 방지될 것으로 보고 되어있다.



그림 10. S. S. tube 의 점식현상

4. 부식 방지 대책

위와같은 여러가지 부식 유형에 대하여 일률적인 부식 방지대책을 논의하거나 수립한다는 것은 매우 어렵고 또 바람직한 일도 아니라고 믿으며 다만 어느 범위 내에서 일반적인 방안을 검토해보는 것은 유익한 일이라고 생각한다. 또 부식유형이 비슷한 경우라도 발전소마다 설계와 운전 혹은 계층이 다르기 때문에 각 발전소의 특성에 따라 가능한 방지대책을 수립하여야 하겠다. 여기서는 일반적으로 생각할 수 있는 몇가지 방

안을 소개할 것이며 각 발전소별 사고 대책은 아직 발표할 단계가 못됨을 유감스럽게 생각한다. 먼저 각 발전소마다 uniform attack(균등부식)에 대하여는 설계시부터 냉각수 조건을 충분히 고려하여 그 조건에 가장 합당한 재질을 선택하고 그 두께도 결정하였기 때문에 그것 자체는 고려할 필요가 없다. 또 galvanic corrosion(전지부식)에 대하여도 설계시부터 음극방식 혹은 양극방식등의 방법을 채택하고 있다.

부식의 실제예를 다룰 때에 위치별 부식에 대하여 상세한 다 있다. 첫째 증기측 부식으로 증기총돌에 의한 상부관의 침식과 공기냉각측에서의 불용축성 기체에 의한 부식은 설계시에 동형금보다 내식성이 높은 다른 재질로 사용하도록 하는 것이 보통이고, 그렇지 않은 경우 증기총돌에 의한 침식은 증기의 직접 상부관에 대한 증돌을 피하는 방법 이외에는 별다른 방안이 없고 공기냉각측은 급수계통내에 hydrazine 주입을 하고 있는 한 피할 수 없다. 이 부분에 대하여 적절한 기회에 다른 재질로 교체해야 할 것이다. 냉각수측 사고에 대하여는 다음과 같은 방안 중 가장 적절한 방안을 취사 선택하여야 할 것이다.

1. 순환수 계통의 점검
 - ① 냉각수 속도를 점검한다.
 - ② 워수 스크린을 점검하여 유해한 해조등이 복수기내에 유입되지 못하도록 할것.
 - ③ 공기가 침투할 수 있는 요소를 점검한다.
 - ④ 공기가 분리될 수 있는 요소를 점검한다.
 - ⑤ water box 내의 냉각수 유동상태를 관찰
2. 복수기 세정 방법을 개선시킨다.
3. 열소 주입어부에 관하여 면밀히 검토
4. 중산화 장치의 설치에 대하여 검토
5. 유화현 주입에 대하여 검토
6. 관의 재질을 보다 내식성이 높은 재질 특히 stainless

steel tube 로 응용하는 문제를 검토한다.

5. 맺는 말

발전소에서 복수기 관의 부식으로 인한 관의 사도로 말미암은 영향은 고순도의 급수를 절대적으로 필요로 하는 대용량의 보이라에 치명적인 요인의 하나인 급수계통의 오염뿐만 아니라 터빈 계통의 사고의 원인이 되며, 부식으로 말미암아 관내부에 부식생성물이 끼게 되며 그것은 절연피막의 상태로 열전달 저항을 높이게 된다. 심한 경우에는 복수기 성능이 50~60%까지 떨어지게 된다. 그리하여 발전소의 효율을 1% 이상 감소시키는 결과를 초래한다. 또 부식으로 인해 사고를 당한 관들을 교체해야 하므로 관의 직접재료비는 물론 부대 공사비의 지불을 강요 당한다. 마지막으로 보수를 위한 감발운전 혹은 정지로 인한 발전산의 중단으로 인한 순이익의 상대적 손실이 뒤 따르게 된다. 이러한 부식형태로는 ① 증기측에서의 증기총돌에 의한 침식과 불용축성 기체에 의한 부식 ② 냉각수측으로는 기계적인 요인으로서 입구측에서의 공기분리와 총돌도인한 침식 또 관 전장에 걸친 균부적인 위치나 전지적으로 일어나는 침식과 전기화학적 원인으로 점식(pitting) 전지부식(galvanic corrosion), 경계층부식(intergrain corrosion), 원소탈리(dealloying corrosion) 등이 있으며 해수를 사용하는 발전소에서는 미생물 혹은 조개등에 의한 부식축진 현상이 특히 문제가 되고 있다.

<참 고 문 헌>

현재창, 홍성국, 김정부, "화력발전소 복수기 관의 사고원인, 결과 및 방지에 관하여," 한전 시험소보 Vol. 5, No. 7, pp. 104—115, 1971, Vol. 6, No. 9, 1972.