

HVDC 냉각시스템의 전기전도현상 및 부식현상 기술 분석과 스위칭 소자의 방열판 최적 설계 검토

김찬기¹, 박창환², 김장목[†]

The Analysis of Electrical Conduction and Corrosion Phenomena in HVDC Cooling System and the Optimized Design of the Heat Sink of the Semiconductor Devices

Chan-Ki Kim¹, Chang-Hwan Park², and Jang-Mok Kim[†]

Abstract

In HVDC thyristor valves, more than 95% of heat loss occurs in snubber resistors and valve reactors. In order to dissipate the heat from the valves and to suppress the electrolytic current, water with a high heat capacity and a low conductivity of less than 0.2 uS/cm must be used as a refrigerant of the heat sink. The cooling parts must also be arranged to reduce the electrolytic current, whereas the pipe that supplies water to the thyristor heat sink must have the same electric potential as the valve. Corrosion is mainly caused by electrochemical reactions and the influence of water quality and leakage current. This paper identifies the refrigerants involved in the ionization, electrical conductivity, and corrosion in HVDC thyristor valves. A method for preventing corrosion is then introduced. The design of the heat sink with an excellent heat radiation is also analyzed in detail.

Key words: HVDC, Cooling water, Corrosion, Heat sink, Spiral channel water cooling

1. 서 론

고전압 직류송전(High Voltage Direct Current, 이하 HVDC)에서 AC 입력 전류를 DC로 변환하기 위해 사용되는 Thyristor는 그림 1과 같이 4층(P형/N형/P형/N형)의 반도체 소자가 집합된 구조이다. 초고압송전을 하는 경우, 사이리스터(Thyristor)에서는 대전력의 전력손실이 발생한다. 전력용 반도체에 많은 열이 발생하면 전력용 반도체의 열 저항이 증가하여 소자의 기능이 저하될 뿐만 아니라 임계 접합 온도를 넘어서게 되면 터져버리는 경우가 발생한다. 이 때 전력손실로 인해 발생하는 열을 냉각시켜주

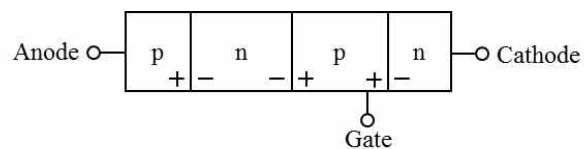


Fig. 1. Typical thyristor.

어야 하며, 이를 위하여 별도 냉각장치를 부착하게 된다.

냉각 장치는 수냉식 방법과 강제 공랭식 방법이 있다. 공랭식 방법의 경우 보수 유지가 간단하기 때문에 많이 사용되나 HVDC 시스템과 같이 용량이 큰 경우에는 방열판의 크기가 커지고 방열 능력이 포화되므로 크기를 최소화 할 수 있고 냉각 효과를 극대화 할 수 있는 수냉식을 사용해야 한다.

수냉식은 앞에서 언급한 장점뿐만 아니라 모든 방열판의 등전위화와 탈이온화에 강점을 보여 이온 부식화를 최소화 할 수 있고 제작 관점에서 모든 밸브에 균일한 발열량을 가지도록 해주므로 불균일한 발열량으로 인해 발생하는 밸브 뒤틀림 현상, 제어백 효과 감소, 순환 전류 억제가 가능하다. 또한 구조적으로 방폭 설계가

Paper number: TKPE-2017-22-6-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. Electrical Eng., Pusan National University.

Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-513-0212

¹ Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institut

² Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

Manuscript received June 27, 2017; revised July 17, 2017; accepted Oct. 19, 2017

가능하고 절연 확보에서 다른 냉각 방식보다 강인한 특성을 가진다.

HVDC 사이리스터(Thyristor) 밸브에서는 95% 이상의 열손실이 스너버 저항, 밸브 리액터 등에서 발생한다. 이 때 발생하는 열을 방출하기 위해 열용량이 큰 물을 냉매로 사용하고 있으며, 효과적인 절연과 페레데이 전류를 억제하기 위해 저 전기전도도($0.2\mu S/cm$ 이하)의 물을 냉매로 사용하게 된다. 이 때 사이리스터(Thyristor) 스택(stack)의 수냉부품들 사이의 페레데이 전류의 흐름을 줄이기 위해 적절한 부품배치 설계와 전극위치를 고려하고, 사이리스터(Thyristor) 방열판에 연결되는 급수 파이프를 가능한 같은 전위를 갖도록 조치하게 된다.

그래서 HVDC의 사용조건의 전압이 인간된 상태에서 구성부품에 접한 냉매의 거동과 이에 따른 구성부품의 부식 등의 영향인자에 대하여 고찰하는 것이 전체 시스템의 수명연장 측면에서 필요하게 된다.

HVDC 시스템에서의 부식 현상을 살펴보면, 부식은 주로 전기화학(Electrochemical)반응에 의해 발생하며, 수질 및 누설전류의 영향이 큰 것으로 발표되고 있다^[1-3]. 특히 사이리스터(Thyristor)의 방열판을 냉각하는 수질과 관여 냉각수의 전기전도도, pH, 이산화탄소, Cl^- 이온 및 산소함량 등이 방열판의 부식에 영향을 주는 것으로 보고되고, 냉각수의 품질관리지표도 함께 보고되고 있다^[4]. 또한 대기 중의 이산화탄소가 냉각수의 pH 및 전기전도도에 영향을 준다는 연구도 발표된 바 있다^[5].

이 외에도, HVDC 시스템의 전기화학적 부식현상에 대해 가속실험을 통한 예측에 대한 연구^[6]도 이루어지고 있으나, 실제 부식현상은 사용조건과 외부환경에 따라 매우 복잡한 양상으로 나타나기 때문에 이의 정확한 예측은 매우 어려운 과제이다. 기본적인 반응은 열역학적 이론에 따르므로, 본 논문에서는 HVDC 사이리스터(Thyristor) 밸브와 관련된 냉각수의 종류, 이온화 현상, 전기전도도 및 부식현상 등의 주요 항목을 중심으로 관련 이론을 설명한다.

그리고 냉각 장치에 사용되는 방열판은 냉각효율을 높이면서도 기계적인 강도를 유지하기 위해서 다양한 구조들이 제안되었는데, 특히 HVDC 시스템에서 사용되는 방열판에서 주로 사용되는 구조에 대한 기술적인 분석을 통해 냉각 특성을 이해하고, 방열효율이 높으면서도 방열면의 온도를 비교적 균일하게 유지할 수 있는 나선 채널(Spiral channel)의 수냉 자켓 형태의 방열판을 대상으로 하여, 냉각수 채널의 형상이 냉각효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 CFD 열유동해석을 수행하였다.

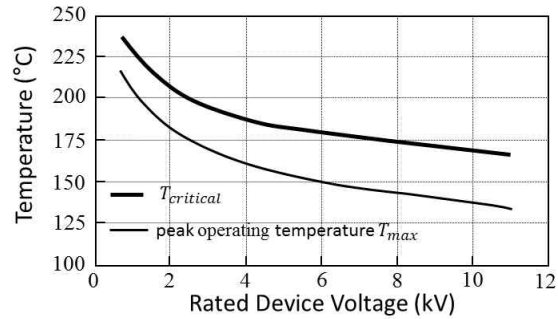


Fig. 2. Operating temperature limit according to applied voltage of silicon device.



Fig. 3. Spiral structure of the heat sink.

2. 반도체 소자 냉각시스템의 냉매 이온화 현상 기술분석

2.1 냉각수의 종류(전도도)

사이리스터(Thyristor)의 경우 인가전압에 따른 동작 온도 한계(T_{max})는 그림 2과 같고 $T_{critical}$ 을 초과하면 절연과파괴가 일어나게 된다. 일반적으로 HVDC에서와 같이 초고압을 사용하는 경우 냉각수의 온도는 $90^{\circ}C$ 이하로 관리되고 있으며, 이를 위한 냉각장치는 필수적이다.

열적 임피던스(Thermal Impedance)를 최소화하기 위해 밸브를 그림 3과 같이 고열전달 재질(알루미늄 등)의 나선 구조(Spiral) 또는 플레이트 스택(Plate Stack) 구조로 하거나 냉매와의 접촉면을 최대화하여 열적 임피던스를 최소화 시켜주어야 한다. 또한 냉매로 초순수와 에틸렌글리콜과의 혼합물을 사용한다. 냉매의 유속이 높은 경우 마모가 발생하고, 낮은 경우엔 기포가 발생하게 된다.

냉매의 종류는 물성외에 사용수명과 비용 등을 고려할 필요가 있고, 이의 전기전도도가 주요 관리 항목으로 되어있다. 일반적으로 물의 전기전도도는 물에 녹아 있는 TDS(Total Dissolved Solids : Bacteria 등 유기물, Silica 등 무기물)등에 의해 달라지며, 표 1과 같이 일반 수돗물은 $100\mu S/cm$, 해수는 $50,000\mu S/cm$ 정도이며 산업용으로 사용되는 냉각수의 전기전도도는 $3,000\mu S/cm$ 이하로 관리하여 사용하고 있다.

TABLE I
WATER QUALITY MANAGEMENT STANDARD

Item	Water quality management standard		
	low hardness	middle hardness	high hardness
pH	7.0~8.0	7.0~8.5	8.0~9.0
Ca ion(ppm)	30~100	50~200	100~400
Conductivity(μ S/cm)	$\leq 2,000$	$\leq 3,000$	$\leq 4,000$
Silica(SiO_4 : ppm)	≤ 130	≤ 130	≤ 300
Fe ion(ppm)	≤ 2	≤ 2	≤ 2

(KOPEC, Design Manual of secondary cooling system, KAERI, 1992)

TABLE II
CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY
ACCORDING TO MANUFACTURING METHODS

	Tap water	Distilled water	De-Ionized Water	
			Ion exchange water	Ultrapure water
MANUFACTURING METHOD	Pre-filter	Reverser osmosis filter	Ion exchange filter	UV filter
Mineral dissolution (CaCO_3 , ppm)	170	0.3	0.1~0.005	0.025
Resistivity ($\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$, 5°C) [Conductivity(S/cm)] ⁽¹⁾	0.003 [~330]	2 [0.5]	0.1~10 [10~0.1]	18.2 [0.05]
Silica(ppm)	1	0.005	< 0.01	< 0.01
Heavy metal (ppm)	1	0.005	< 0.01	< 0.01
CDOM(ppm)	12	< 1	< 1	< 1
Microorganism (cfu/mL)	> 100	<10	> 100	
Grain ($\geq 5\mu\text{m}/\text{mL}$)	>10,000	<100	> 10,000	
Price	Low		→	High

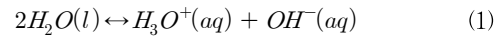
한편 냉각수 시스템은 열 교환 이후에 온도가 상승하며, 증발 잠열을 방출시켜 냉각시킨 후 용수를 보충하여 다시 사용하게 되어 초기 급수보다 수배의 용존 유기물을 함유하게 된다. 또한 부식, 스케일, 미생물 등의 누적에 따른 냉각수 시스템의 각종 기기의 성능저하 및 손상을 가져오게 된다.

냉각수의 온도변화와 함유된 이물질에 의한 부식, 스케일, 미생물 등의 문제 야기는 필연적이므로, 앞서 설명한 냉각수의 전기전도도를 최소화하여 성능저하에 미치는 요인을 감소시킬 필요가 있다.

현재 냉각수의 전기전도도는 원수(原水)로 부터 이후의 추가적인 증류 및 이온여과 등 제조 처리방법에 따라 달라진다. 표 2와 같이 수돗물 및 반도체 세정용으로 사용되는 초순수로 구분되며, 각 사용처의 사용 환경과 비용을 고려하여 사용되고 있다.

2.2 냉각수(H_2O)의 이온화

물 분자(H_2O)는 하나의 산소와 2개의 수소로 이루어져 있으며 전자의 분포가 산소 쪽으로 치우치는 극성공유결합 형태로 되어있다. 전기음성도에 따라 산소원자 쪽으로 전자가 치우쳐 산소는 약간의 (-)전하, 수소는 약간의 (+)전하를 띤 전기쌍극자(Electric Dipole)가 된다. 식 (1)과 같이 냉각수의 조성은 1개의 수소를 인접 물 분자에 빼앗겨 수산화이온(OH^-)과 하이드로늄 이온(H_3O^+)으로 이온화된 상태로 존재하게 되며, 이러한 자동이온화(Auto-Ionization) 반응에 의해 상온의 물에는 H_3O^+ 와 OH^- 이온이 각각 1.0×10^{-7} 몰(mole)로 매우 약한 전해질 상태로 존재하게 된다. 순수한 물은 외부에너지가 없는 상태에서는 $[\text{H}_3\text{O}^+]$, $[\text{OH}^-]$ 이온이 각각 1.0×10^{-7} 몰의 매우 작은 이온농도를 가지고 다음의 평형상태를 유지하고 있으나, 외부로부터의 에너지(전기, 열 등)에 의해 상태가 변화될 수 있다.



물질의 이온화 에너지는 원자 또는 분자에서 전자(e^-)를 빼내어 양이온과 자유전자 또는 음이온으로 완전히 분리하는데 필요한 에너지로 정의되고 열에너지, 즉 온도변화에 따른 분자의 열운동에너지는 식 (2)와 같이 다음과 같은 관계식을 갖으며, 온도증가에 따라 열운동에 의해 물분자들의 운동성이 증가하여 인접분자와의 수소 교환 가능성이 증가함으로써 물의 이온화 경향은 증가하게 된다. 여기서 N 는 열운동에 의한 반응분자 확률 (N_0 는 25°C에서 반응) ΔE^0 는 운동자유에너지, k 는 Boltzman 상수, T 는 온도이다.

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(\frac{-\Delta E^0}{k \cdot T}\right) \quad (2)$$

물은 평형상태에서 $\text{H}_2\text{O}(l) \leftrightarrow \text{H}^+(aq) + \text{OH}^-(aq)$ 의 수식에 따라 일부의 H^+ 와 OH^- 이온이 존재하며, 그림 4와 같이 물속에 전극(음극, 양극)을 구성하고 전압을 인가함에 따른 각 전극에서의 반응과정은 양극에서는 OH^- 이온이 전자를 잃고 산소기체가 발생하는 산화반응이 식 (3)와 같이 일어나고, 반대로 전자를 공급되어지는 음극에서는 초기 상태 전해질의 H^+ 이온이 전자를

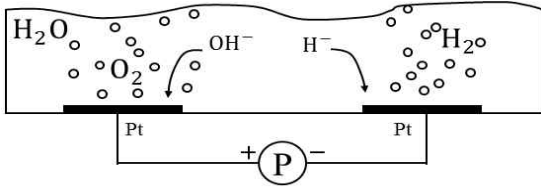
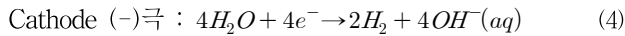
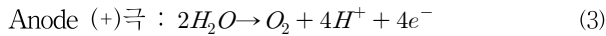
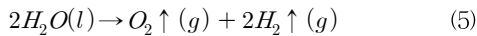


Fig. 4. Electrolysis diagram of H_2O .

받아 수소기체로 반응하는 환원반응이 식 (4)과 같이 일어난다.



위의 반응을 전체 반응으로 최종 정리하면 식 (5)로 표현된다.



물의 경우 전류에 의해 표준상태(1기압, 25°C)에서 양이온(H^+)과 음이온(OH^-)으로 이온화될 수 에너지는 $\Delta G^0 = -237.2 \text{ kJ/mole}$ (표준상태의 전극전위 E^0 는 1.23 Volt)로 나타난다.

HVDC 시스템에서 냉각수에 흐르는 누설전류($I=V/R$) 등으로 인한 물(H_2O)의 전극전위가 증가하여 전류의 크기가 증가함에 따라 이온화되는 경향은 증가하게 된다. 또한, 임계전압을 초과할 경우, 전자의 이동에 의하여 각 전극에서 식 (3)과 (4)와 같이 H_2 (양극) 및 O_2 (음극) 기체가 발생하게 되며 이에 따른 부식현상이 증가하게 된다.

초순수는 전도성이 매우 낮지만 전도성은 0이 되지 않는다. 왜냐하면 H_2O 분자는 온도에 따라 H^+ 및 OH^- 이온으로 해리하기 때문이다. 따라서 잔류 전도율은 $0.1 \mu S/cm$ 정도이며, 이는 제거 될 수 없다. 그러한 작은 전도성조차도 부식 및 가스 생성과 같은 전기 화학적 문제를 일으킬 수 있다. 필연적으로 일부 물은 H_2 와 O_2 로 전기 분해되고, 그 양은 적지만 냉각 시스템은 이러한 가스를 없애고 시스템의 저압지점에서 안전하게 제거해야 한다.

이상의 순수한 물에서의 이온화에 미치는 요인은 온도, 전류 등이 있으나, 외부로 부터의 이물질에 의한 전해질의 증가, 즉 반응물의 농도에 따라서 전극전위의 변화가 변화할 수 있으며 이는 다음의 식 (6)과 (7)의 Nernst 방정식을 통해 계산할 수 있다. 반응물에 대한 생성물의 비를 K 로 표현하면, 외부로 유입된 이물질에 의한 전해질의 증가로 반응이 촉진되며, 생성물이 증가($K>0$)함에 따라 반응을 일으키는 전위(E)는 낮아지게

TABLE III
RELATIVE IONIZATION TENDENCY OF METALS

	Metal-metal ion balance (Unit Activity)	Electrode potential to hydrogen electrode (25°C, volts)
↑ Noble direction	Au-Au ⁺³	+1.498
	Pt-Pt ⁺²	+1.2
	Pd-Pd ⁺²	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ⁺²	+0.788
	Cu-Cu ⁺²	+0.337
	H ₂ -H ⁺	+0.000
↓ Active direction	Pb-Pb ⁺²	-0.126
	Sn-Sn ⁺²	-0.136
	Ni-Ni ⁺²	-0.250
	Co-Co ⁺²	-0.277
	Cd-Cd ⁺²	-0.403
	Fe-Fe ⁺²	-0.440
	Cr-Cr ⁺³	-0.744
	Zn-Zn ⁺²	-0.763
	Al-Al ⁺³	-1.662
	Mg-Mg ⁺²	-2.363
Na-Na ⁺	-2.714	
	K-K ⁺	-2.925

된다. 즉, 이온화 정도가 증가함을 나타낸다.

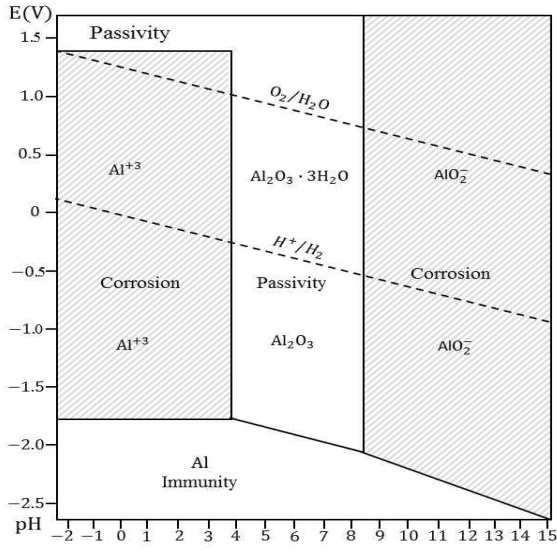
어떠한 물질군(1몰의 물질 L, m몰의 물질 M...)이 전압인가에 의해 반응하여 생성물군(q몰의 물질 Q, r몰의 물질 R...)이 형성될 때, 반응을 일으키는 전위(E)는 식 (7)과 같이 표현된다. 여기서 a 는 농도(활동도), T 는 절대 온도, R 는 기체상수(8.314 J/K·mole), Z 는 반응에 참가한 전자수, F 는 Faraday상수(96.487 C/mole), E^0 는 표준상태 전위를 의미한다.

$$K = \frac{a_Q^q \cdot a_R^r \cdot \dots}{a_L^l \cdot a_M^m \cdot \dots} \quad \begin{matrix} > 0 : \text{이온화 증가} \\ < 0 : \text{이온화 감소} \end{matrix} \quad (6)$$

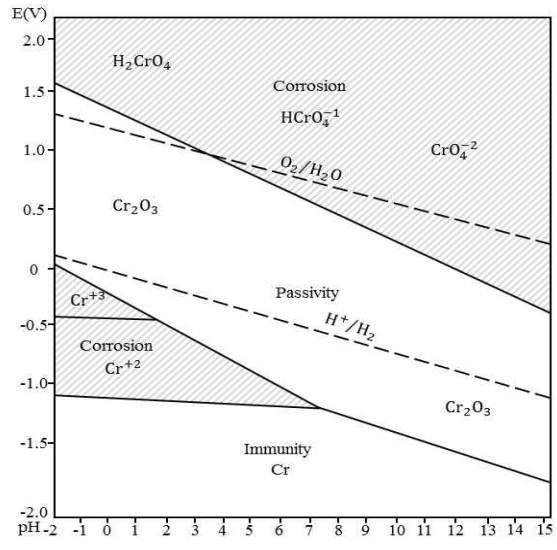
$$E = E^0 - \frac{RT}{ZF} \cdot \ln \frac{a_Q^q \cdot a_R^r \cdot \dots}{a_L^l \cdot a_M^m \cdot \dots} \quad (7)$$

대부분의 금속은 물이나 공기 등 주위 환경과 접하게 됨으로써 부식되는 경향이 있는데, 이 때 열역학적으로 불안정하게 되고, 산화물(oxide) 또는 함수산화물로 변하면서 에너지를 방출하려는 경향을 가진다.

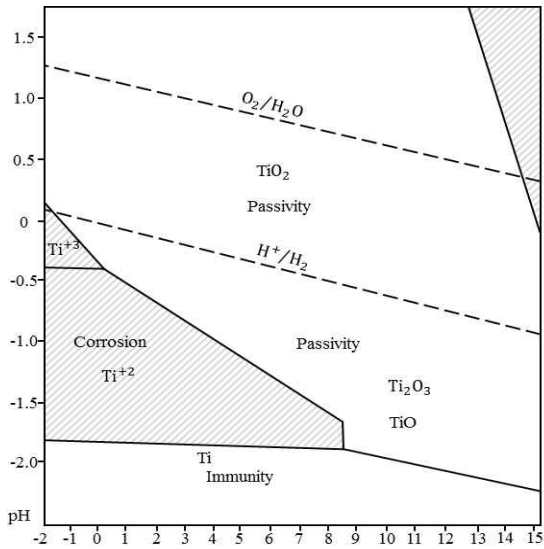
그럼 5(a)는 HVDC 시스템의 방열판소재로 사용되는 알루미늄의 pH-전위도표(25°C, Al이온농도 10^{-6} mole)로, X축에 pH를 Y축에 전극전위를 표시하고 있다. 도표에서와 같이 알루미늄은 pH가 4~8.5영역에서는 안정한 영역임을 보여주고 있으며, 알루미늄 금속이 아닌 산화



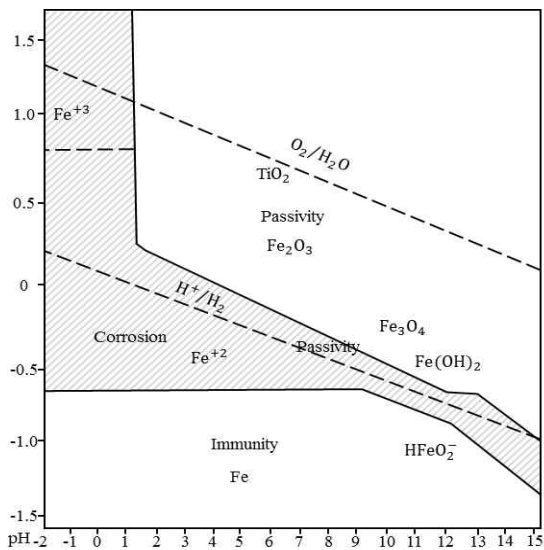
(a) Al



(d) Cr



(b) Fe



(c) Ti

Fig. 5. pH-potential diagram of Al, Fe, Ti, and Cr

물(Al_2O_3)의 피막 형태로서 부동태로 되어 있음을 보여 준다. 그 외의 금속의 경우 그림 5(b), (c) 그리고 (d)와 같다.

식 (6)과 (7)에서 계산된 물의 표준전위를 기준으로 실제 사용되는 금속의 상대적인 이산화 경향을 나타내는 전극전위 값은 표 3과 같다. 부식방지대책으로서의 전극재료의 선정에는 이 표의 값들을 활용하게 된다. 특정 전극재료에 대한 전극전위의 차이가 작은 소재를 상대 전극재료로 사용하거나 제3의 희생전극을 선택하여 구성함으로써 사용 전극의 수명을 증가시킬 수 있다.

2.3 냉각수(H_2O)의 전기전도도

HVDC 시스템의 경우 사용되는 물은 초순수를 사용하므로 미량의 불순물이 존재하는 약전해질의 특성을 갖는다. 용액의 전도도는 식 (8)의 Kohlrausch 실험식에 따라 일반적으로 이산화 된 정도의 제곱근에 비례하여 감소한다. 여기서 A 는 몰전도율[S·cm/mole], c 는 이온농도[mole/m³]이다.

$$A = A^0 - c^{1/2} \tag{8}$$

또한 농도이외에 이온과 전자의 이동(점성도) 등을 이론적으로 고려한 전도율과 농도의 관계는 식 (9)와 같이 Debye-Huckel-Onsager식이 있다. 여기서 z 전하수, c 농도, η 점성도 계수, ω 열운동 현상에 의한 인자이다.

$$A = A^0 - \left[\frac{z^2 e F^2}{3\pi\eta} \cdot \left(\frac{2}{\epsilon RT} \right)^{1/2} + \frac{z e^2 F \omega}{24\pi \omega k T} \right] \cdot c^{1/2} \tag{9}$$

TABLE IV
ION CONDUCTIVITY IN THE WATER AT 25°C

Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	OH ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
50.9	74.5	74.5	350	198	75.5	70.6	79

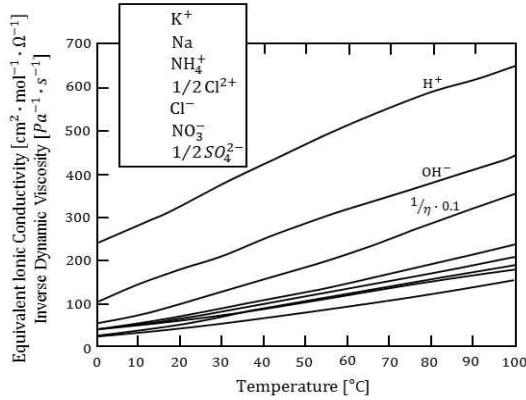


Fig. 6. Temperature dependency of Ion conductivity.

이온들의 이동도는 열운동 이외에 전기장 세기 및 전하의 크기에 비례하고, 이온의 반지름과 점성도 계수에 반비례한다. 표 4는 25°C에서 물 내에서의 이온의 전도도를 나타내며, 그림 6은 주요이온 전도도의 온도 의존성 관계를 보여준다.

3. 부식방지를 위한 기술방안

부식의 종류에는 표면전체에 걸쳐 균일하게 발생하는 균일부식과 두 가지 이종금속이 전해질속에 있을 경우 이들 사이의 전위차에 의해 전자의 이동이 일어나므로써 부식되는 Galvanic부식이 있다. 이외에 국부적인 부식으로는 공식, 입계부식, 응력부식 및 틈 부식(Crevice corrosion) 등이 있다.

공식은 부식이 금속표면의 국부에만 집중하여 이 부분의 부식속도가 빨라 금속내로 깊이 뚫고 들어가는 현상으로 스테인레스강(SUS)이나 알루미늄 등과 같이 금속표면에 부동태피막(산화물)이 형성하는 금속에서 일반적으로 영향이 크다. 소재측면에서 스테인레스강에 Cr, Ni 첨가량을 증가시켜 Noble 전위(비활성)로 이동시키고, 알루미늄은 Fe, Si와 같은 불순물의 함량이 많을수록 공식에 대한 저항성이 나빠지므로 각 소재별로 성분관리가 필요하다. 또한 보호피막 표면에서 기체발생에 의해 Cavitation 생성되면 기포가 소멸되면서 높은 압력에 의해 국부적으로 피막을 파괴하고 다시 생기더라도 이러한 현상이 반복되면 공식부식이 증가 될 수 있다.

틈 내부에는 이온이나 산소의 공급이 힘들기 때문에 틈과 바깥과의 농도 차이 및 pH증가에 의해 틈 부식이

TABLE V
EFFECT OF THE FLOW RATE ON THE CORROSION

Material	Corrosion speed, mdd		
	1 ft/sec	4 t/sec	27 ft/sec
Carbon steel	34	72	254
Aluminium brass	2		105
70 Cu-30Ni(0.5% Fe)	< 1	< 1	39
Monel	< 1	< 1	4
Stainless steel-316	1	0	< 1
Hastelloy C	< 1		3
Titanium	0		0

발생할 수 있는데 스테인레스강, 티타늄 등 부동태 금속의 경우 수화(Hydration)발생이나 금속표면에 생성된 부동태산화피막이 Cl⁻이온, H⁺이온 등에 의해 국부적으로 파괴되어 금속용해속도가 빨라질 수 있으므로 이에 대한 용접 등 틈새를 제거하는 관리도 필요하다.

이외에 스테인레스강과 같이 소재의 제조과정에서 결정입계영역에서 Cr 결핍으로 입계가 양극으로 작용하여 내식성이 저하되는 입계부식과 냉각수와 금속표면 사이의 상대적인 운동(Turbulence 등)으로 마모가 촉진되는 침식부식(Erosion Corrosion)이 있는데 표 5와 같이 TiO₂의 안정성으로 티타늄이 침식부식에 유리한 것으로 알려져 있다. 이와 같이 침식부식에 저항력이 있는 소재 선택과 표면조건의 균일화, 유속 등의 최적 설계가 필요하다

HVDC 송전 모듈(transmission modules)에서 사용되는 알루미늄 방열판 부식에서 전도도가 0.15 uS/cm 초순수를 사용하여 사용하는 Platinum Grading 전극(20~35 kV, 8 mA)에 알루미늄 방열판으로부터 용해된 Al 이온이 양성자의 중화에 의해 애노드에 Hydrated Alumina로 퇴적되며 TMAT(tetramethylammonium-p-toluenesulfonate)와 같은 불활성 전해질을 첨가하거나 용해된 Al이온 농도에 비해 낮은 CO₂ 기체를 냉각수에 Pulse Doping함으로써 수화알루미늄의 석출을 방지할 수 있다^[7].

개방형 및 폐쇄 내부 냉각수 시스템에서 대기 중의 이산화탄소가 냉각수의 pH와 전도도에 큰 영향을 끼치며 따라서 내부 냉각수 시스템의 기밀성을 강화하거나 내부 냉각수 탱크에 방오 마스크를 설치할 것이 가능하다.

설계 시 냉매, 사용조건(온도), 누설전류 억제 등 주요 고려 사항을 살펴보아야 한다. 초순수는 온도에 따라 오염물, 전위차 등에 의해 H⁺, OH⁻로 이온화 분해하여 미세하게나 전도도가 발생할 수밖에 없으며, 이 경우 전

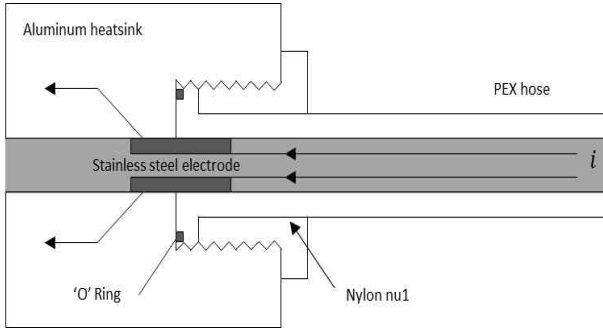


Fig. 7. Alstom grid coolant hose termination system (Thyristor Valve).

기화학적 부식이 발생을 하게 된다. 따라서 냉매가 접하는 부품의 부위별로 재료선정이 중요하게 되겠다. 또한 고열전달이나 고전기전도도로 사용 시 그림 7과 같이 내식성 금속제(스테인리스강 SUS316)을 사용하며, 저열전달이나 저전기전도도로 사용 할 때는 ABS, PTFE, PVDF, PEX, Polypropylene, EPDM 등을 사용하여야한다.

4. 반도체 스위칭 소자 방열판의 최적 설계 기술

반도체 스위칭 소자의 방열판 설계 시 냉각수 흐름에 따라 열전달 면적이 넓어지고 냉각효율 극대화가 가능하므로 냉각수의 흐름이 방열에 최적화 되도록 설계를 한다. 그림 8은 냉각수 채널의 유로(流路) 형상이 평활한 경우(이하 플레인 채널)이며, 그림 9은 지그재그인 경우(이하 지그재그 채널)이다. 이에 채널 형상이 냉각효율에 미치는 영향은 CFD 열유동 해석을 통해 정량적으로 비교가 가능하다.

그림 10과 같이 우선 해석 조건을 설정하기 위하여 냉각수의 입출구 직경을 15mm로 하였으며, 냉각수의 유로단면적을 입출구 단면적과 동일하게 맞추기 위해 폭 13 mm, 깊이 13.5mm 로 설정하여 모델링하였다. 그리고 각 형상의 상대적인 냉각효율만을 평가하기 위하여 냉각수의 압력손실과 냉각수의 압력손실과 온도를 전형적인 사례와 동일하게 고정하고, 수차례의 예비계산을 통하여 발열면의 온도가 100℃를 넘지 않도록 냉각수 유량과 발열량을 표 6과 같이 설정한다. 냉각수는 물을 사용하고 방열판의 재료는 가볍고 열전달 계수가 큰 알루미늄을 사용하며, CFD 해석에 사용한 물과 알루미늄의 물성치는 표 7과 같다.

CFD 해석 결과 그림 11에서와 같이 지그재그 채널 방열판의 발열면 온도가 플레인 채널 방열판보다 더 낮다. 수냉자켓 전체표면에서의 공기에 의한 냉각은 약1% 정도로 무시할 수 있을 만큼 작고, 거의 모든 발열량은 냉각수에 의해서 제거되고 있다.

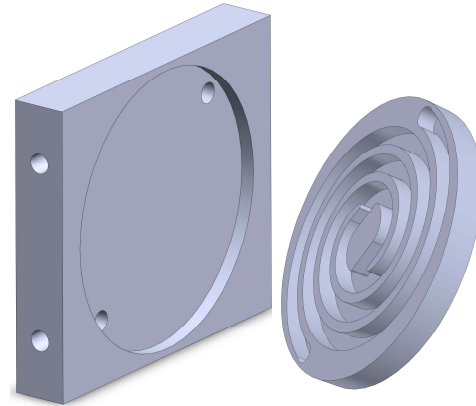


Fig. 8. Plain channel water cooling jacket.

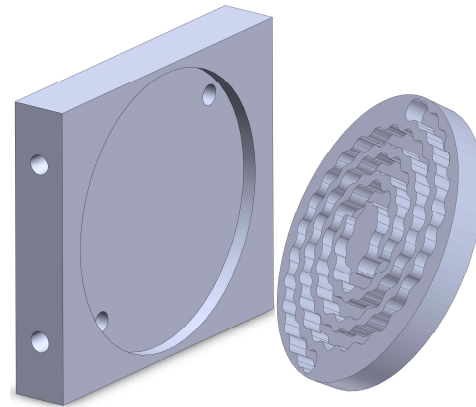


Fig. 9. Zigzag channel water cooling jacket.

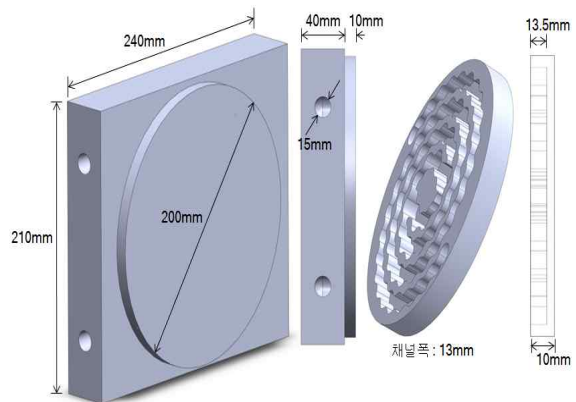


Fig. 10. Size of the heat sink model.

TABLE VI
BOUNDARY CONDITIONS OF CFD ANALYSIS

Boundary conditions	
Heat source	18 kW
Mass flow rate	1 kg/s
Input temperature	49.5 °C
Room temperature	30 °C
Boundary surface	Natural convection cooling



Trimmed mesh : 102,823 개
(a) Plane channel type



Trimmed mesh : 186,659 개
(b) Zigzag channel type

Fig. 11. Trimmed mesh of solid area.

TABLE VII
PHYSICAL PROPERTIES OF WATER AND ALUMINUM

	Water	Aluminum
Density	997.6 kg/m ³	2702.0 kg/m ³
Specific heat	4181.7 J/Kg-K	903 J/Kg-K
Thermal conductivity	0.620 W/m-K	237 W/m-K
Dynamic viscosity	0.00088871 Pa-s	
Turbulent Pr Number	0.9	

그림 13은 해석결과로 얻어진 수냉자켓 방열판 표면의 온도분포를 나타낸 것이다. 동일한 발열량(18kW)을 인가하고, 동일한 온도(49.5°C)의 냉각수를 동일한 유량(1kg/s)으로 흘려준 경우에 지그재그 채널 방열판의 발열면 온도가 플레인 채널 방열판보다 더 낮게 나타난다. 수냉자켓 전체표면에서의 공기에 의한 냉각은 약1%정도로 무시할 수 있을 만큼 작고, 거의 모든 발열량은 냉각수에 의해서 제거되고 있다.

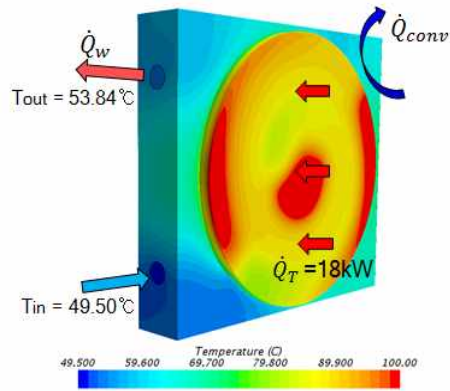


Polyhedral mesh : 678,171 개
(a) Plane channel type

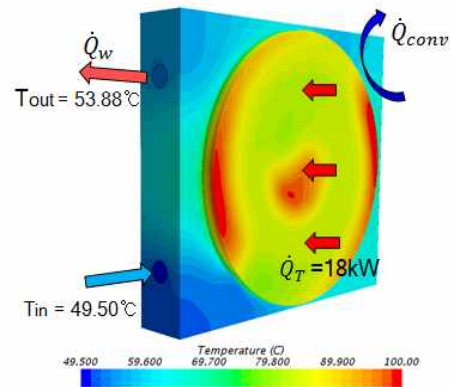


Polyhedral mesh : 658,307 개
(b) Zigzag channel type

Fig. 12. Trimmed mesh of solid area.

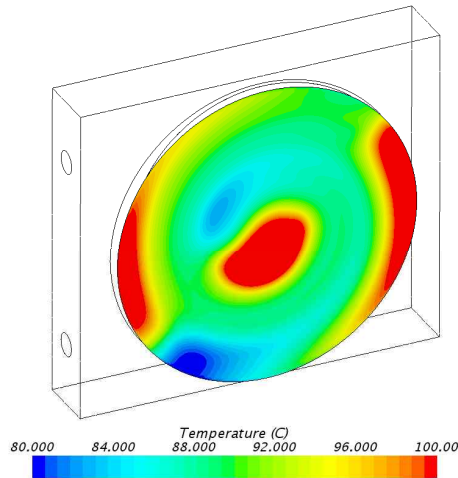


(a) Plane channel type

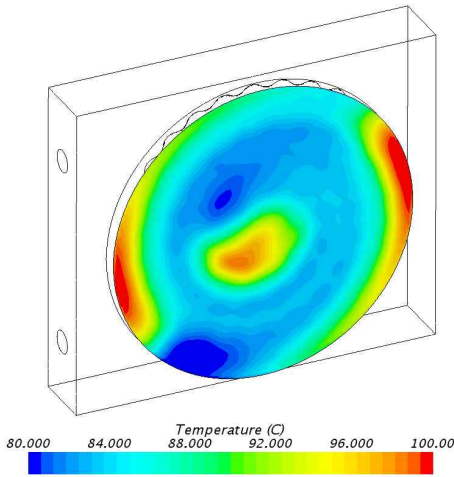


(b) Zigzag channel type

Fig. 13. Temperature distribution of the surface of the water cooling head sink.



(a) Plane channel type



(b) Zigzag channel type

Fig. 14. Temperature distribution of the heating side.

그림 14는 발열면의 온도분포를 자세히 나타낸 것으로 지그재그 채널 방열판의 발열면 평균온도가 플레인 채널 방열판보다 4.8°C만큼 더 낮게 나타나고 있고, 이는 냉각효율이 더 우수함을 의미한다. 원주부근의 붉은 색 고온부분은 채널의 나선 분포로 냉각수가 흐르지 않는 곳이며, 중앙부의 붉은 색 고온부분은 현재의 유로설계에서 냉각수가 흐르지 않는 곳이 존재함을 나타낸다.

지그재그 채널에서의 냉각수의 대류열전달 계수가 크고 열전달면적이 증가하므로, 그림 15와 같이 열저항 개념을 도입하여 설명할 수 있다. 식 10과 같이 발열량(Q_h)는 냉각수 냉각(Q_c)과 공기 냉각(Q_n)합으로 나타낼 수 있고, 공기 냉각이 약 1%로 매우 작아 식 11과 같이 나타낼 수 있다. 발열량(Q_h)은 식 12와 같은 같이 표현 가능하다. 여기서 전체 저항(R_{total})은 R_{cond} 와 R_{conv} 의 합, T_{water} 는 냉각수의 온도, 그리고 $T_{s,heat}$ 는 발열면 표면의 온도이다.

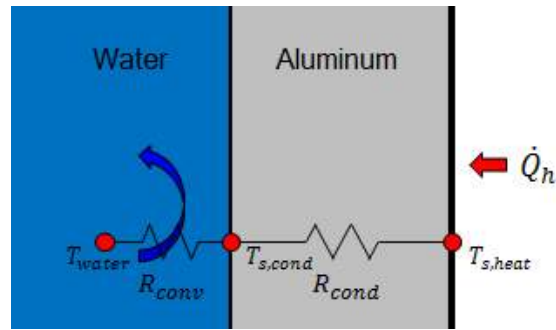
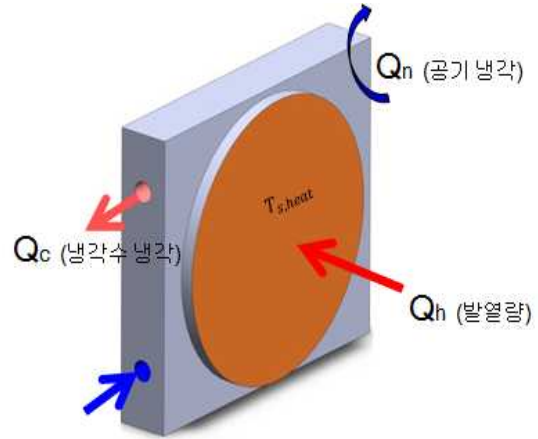


Fig. 15. Thermal modeling of the heat sink.

$$Q_h = Q_c + Q_n \quad (10)$$

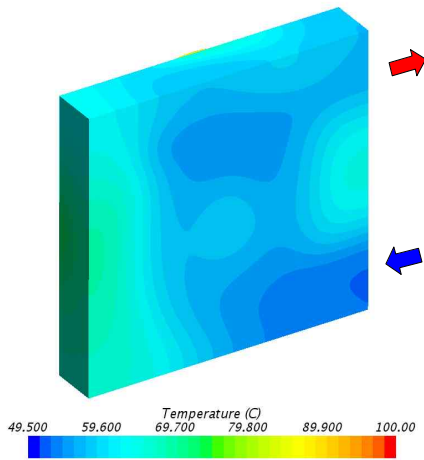
$$Q_h \approx Q_c \quad (11)$$

$$Q_h = \frac{1}{R_{total}} (T_{s,heat} - T_{water}) \quad (12)$$

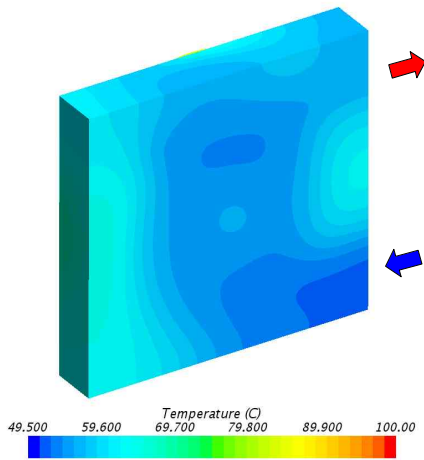
그림 16은 수냉자켓 방열판 뒷면의 온도분포를 나타낸 것이다. 지그재그 채널에서의 온도가 약간 더 낮게 나타나지만, 발열면의 온도분포에서와는 다르게, 수냉자켓의 뒷면의 온도분포에서는 큰 차이가 없다. 수냉자켓 전체표면에서의 공기에 의한 냉각은 약 1%정도로 무시할 수 있을 만큼 작고, 거의 모든 발열량(18kW)를 냉각수가 가지고 나가기 때문이다.

그림 17은 채널의 중앙단면에서의 온도분포를 자세히 나타낸 것으로 두 가지 형태 모두에서 하부의 냉각수 입구에서 저온의 냉각수가 유입되어 채널을 통해 흘러가면서 발열면을 냉각시키고 점점 고온이 되어 상부의 냉각수 출구로 빠져나가고 있는 것을 알 수 있다.

그림 18은 채널의 내부를 흐르는 냉각수의 속도분포를 나타낸 것이다. 붉은 색에 가까울수록 속도가 빠른 것을 의미한다. 플레인 채널에 비해, 지그재그 채널의 경우에는 채널의 돌기부근에서 냉각수가 요동을 치며 빠른 난류분포를 형성하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 속도분포가 냉각효율의 향상에 기여한 것으로 판단할



(a) Plane channel type



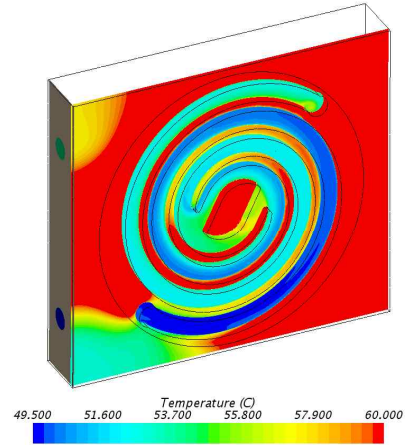
(b) Zigzag channel type

Fig. 16. Temperature distribution of the back side of the water cooling.

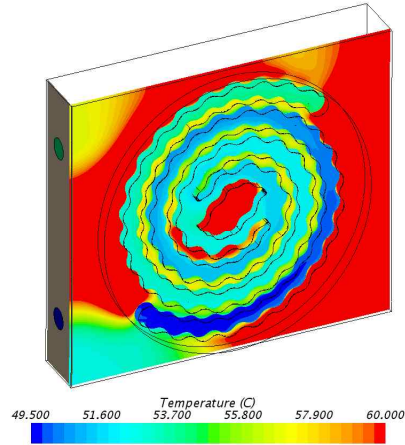
TABLE VIII
SUMMARIZATION OF CFD ANALYSIS

	Plain channel	Zigzag channel
Heat source	18 kW	18 kW
Mass flow rate	1 kg/s	1 kg/s
Input temperature	49.5 °C	49.5 °C
Output temperature	53.84 °C	53.88 °C
Channel pressure loss	0.122 Mpa	0.288 Mpa
Average temperature of the heating surface	91.54 °C	86.71 °C

수 있다. 현재 채널의 설계에서는 중앙부에 섬(island)이 존재하여 두 개의 유로로 갈라지고 있다. 이러한 경우에, 그림에서와 같이 압력손실이 작은 하나의 유로로만 거의 모든 냉각수가 흐르게 되므로 중앙부의 냉각능력이 크게 저하되게 된다. 그래서 성능 저하 방지를 위하



(a) Plane channel type



(b) Zigzag channel type

Fig. 17. Temperature distribution of the refrigerant.

여 중앙부의 섬(island)을 없애도록 설계를 변경할 필요가 있다. 앞에서 분석한 내용을 표로 정리하면 표 7과 같다.

5. 결 론

HVDC 시스템은 이를 구성하는 반도체 스위치가 동작온도 한계로 인하여 절연 파괴가 되지 않고 지속적으로 운전되기 위해서는 냉각 시스템이 필수적이다. 하지만 냉각시스템의 여러 조건에 의하여 시간이 지남에 따라 부식이 발생하여 시스템의 수명을 짧게 만들게 된다. 본 논문에서는 냉각시스템의 냉매 이온화 현상과 부식 현상을 세밀하게 분석을 진행하였다. 냉각수는 온도변화와 함유된 이물질에 의한 부식, 스케일, 미생물 등의 문제 야기는 필연적이므로, 냉각수의 전기전도도를 최소화하여 성능저하에 미치는 요인을 감소시켜야한다. 그리고 특정 전극재료에 대한 전극전위의 차이가 작은 소재를 상대 전극재료로 사용하거나 제3의 희생전극을 선택하

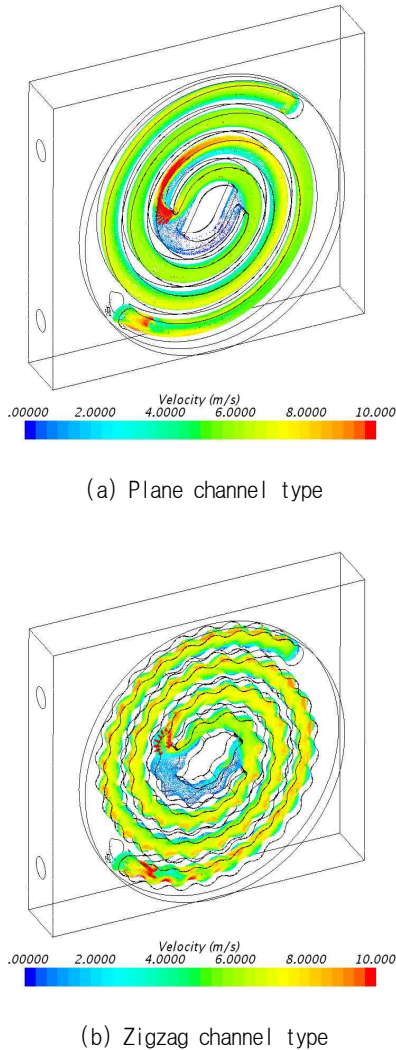


Fig. 18. Speed distribution of the refrigerant.

여 구성함으로써 사용 전극의 수명을 증가시킬 수 있고, 침식부식에 저항력이 있는 소재 선택함으로써 시스템의 수명 연장이 가능하다.

냉각장치의 방열판 최적 설계는 냉각효율을 높이고 기계적인 강도를 유지하기 필수적인 작업이다. 본 논문에서는 방열면의 온도를 낮게 유지할 수 있는 나선 채널의 수냉자켓 형태의 방열판에 대한 CFD 열유동해석을 수행하였다. 동일한 발열량(18kW)을 인가한 경우에 지그재그 수냉자켓의 방열면 평균온도가 4.8°C만큼 더 낮게 나타나고 있어서 냉각효율이 더 우수함을 알 수 있고 플레인 채널에 비해 채널의 돌기부근에서 냉각수가 요동을 치며 빠른 난류분포를 형성하고 있으며, 이러한 속도분포가 냉각효율의 향상에 기여한 것으로 판단할 수 있다. 하지만 압력손실은 지그재그 채널이 플레인 채널 보다 약 2.3배 높아서 냉각수 펌프의 동력이 그만큼 더 커지게 된다. 현재 채널 설계에서는 중앙부에 섬이 존재하여 두 개의 유로로 갈라지고 있다. 이러한 경우에, 압력손실이 작은 하나의 유로로만 거의 모든 냉각수가 흐르게 되므로 중앙부의 냉각성

능이 크게 저하되게 되므로 중앙부의 섬(island)을 없애도록 설계를 변경할 필요가 있다.

나선형 지그재그 채널을 사용할 경우 냉각수의 온도를 기존보다 낮게 유지할 수 있으므로 냉매의 용존 무기물 함유량을 적게 유지할 수 있다. 따라서 냉매의 전기전도도를 기존보다 낮게 유지가능하며 부식현상 또한 감소하므로 시스템 유지보수가 용이하다.

References

- [1] P. O. Jackson, B. Abrahamsson, D. Gustavsson, L. Igetott, "Corrosion in HVDC valve cooling systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12 No. 2, pp. 1049-1052, 1997.
- [2] W. Xuan, C. Xiaolong, X. Man, "Study and test of electrolytic corrosion for HVDC support insulator," *High Voltage Engineering*, Vol. 32 No. 3, pp. 31-33, 2006
- [3] P. Girdinio, P. Molfino, M. Nervi, M. Rossi, A. Bertani, S. Malgarotti, "Technical and compatibility issues in the design of HVDC sea electrodes," *Electromagnetic Compatibility(EMC EUROPE), International Symposium 2012*, pp. 1-5, Sep. 2012.
- [4] Z. Wenliang, Y. Aijun, F. Jihua, D. De, G. Jipu, J. Dan, "Study on quality control index of inner cooling water of HVDC converter valve," State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute.
- [5] X. Wang, X. Man, X. Cao, "Study of corrosion for high voltage direct current support insulator," 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials.
- [6] Xiao Zidan¹, Wang Su¹, Yang Daowu¹, Han Huihui¹, Mo Ye, "Influence of carbon dioxide on pH and conductivity of inner cooling water in generators," Changsha University of Science and Technology, Power Bureau of Yiyang, Industrial Water Treatment, 2011.
- [7] W. Immo, M. Bert, S. Matthias, K. Sabine, P. Ralph, V. E. Rudi, "Behavior of highly diluted electrolytes in strong electric fields—prevention of alumina deposition on grading electrodes in HVDC transmission modules by CO₂ induced pH control," *European Chemistry Journal*, Vol. 20 No. 38, pp. 12091-12103, 2014.



김찬기(金燦起)

1968년 12월 17일생. 1991년 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 전력연구원 부장.



박창환(朴昶寬)

1968년 8월 28일생. 2012년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2017년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2017년~현재 동 대학원 박사과정.



김장목(金張睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트제어 센터장. 당 학회 연구사업이사.