

히트파이프를 이용한 폴리실리콘 제조용 다중권선 변압기 설계에 관한 연구

A Study on Design of Multi-Winding Transformer for Poly Silicon Production using Heat Pipe

이 춘 배*
(Chun-Bae Lee)

Abstract - This paper reflected the Temperature test value and compare the Computational Fluid Dynamic analysis value on particular characteristics of the multi-winding transformer's cooling apparatus equipped by heat pipe with excellent heat transfer ability on design Particularly if you look at multi-winding transformers that supply high-quality Direct current power to silicon production apparatus, heat generation due to high current supply is excessive thus, an innovative cooling apparatus is required in particular for reduced size transformer.

Key Words : Multi winding transformer, Heat pipe, Computational fluid dynamic analysis, Temperature test,

1. 서 론

최근 신재생 에너지원인 태양광을 이용한 전력 생산 수요가 증가하고 있다. 태양광에너지는 잉곳(Ingot), 웨이퍼(Wafer), 태양 전지(Solar cell), 태양전지모듈, 발전소로 이어지는 가치 사슬로 이루어져 있다. 특히 핵심 소재인 태양전지는 광(光)에너지를 전기에너지로 변환시키는 역할을 한다. 이로 인해 태양전지를 제조하기 위한 실리콘(Silicon) 수요가 지속적으로 증가하고 있어 세계적으로 실리콘 생산 공장을 신설하거나 증설하고 있는 추세이다. 그러나 우리나라는 가공기술만 있고 제조 기술이 없어 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 특히 실리콘 생산을 위한 전원 장치는 선진국인 독일, 미국, 일본에서만 생산되고 있다.

실리콘 전원장치는 높은 역률로 폴리실리콘 제조장치에서 고품질의 직류를 공급하고 대전류가 제조용 로드에서 공급되어 발열이 큰 특징을 보인다. 국내에서는 대용량 전원장치의 경우 일반적인 도금용 저전압 대전류 정류장치이거나 플랜트용 대용량 전원장치가 공급되고 있으며, 핵심요소인 변압기인 경우 Zig-Zag 결선을 이용한 영상분 고조파전류 저감용 변압기가 공급되고 있다[1]. 최근 국내에서도 품질이 우수한 실리콘생산을 위해 부하에서 요구하는 전원특성을 만족하면서 제조원가에 영향을 주는 핵심 멀티컨버터 변압기에 대한 연구가 이루어지고 있다[2].

본 논문은 폴리실리콘 제조용 시스템에 적용되는 변압기의 냉각효과를 높이기 위해 열전달 특성이 뛰어난 히트파이프를 이용하여 폴리실리콘 제조용 다중권선 변압기를 설계하였다. 냉각특

성을 확인하기 위해 CFD (Computational Fluid Dynamic)해석을 수행하였으며, 설계에 반영한 변압기를 제작하여 온도상승 시험을 통해 냉각효과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 태양광 폴리실리콘용 전원 시스템

2.1.1 단상 다중권선 컨버터

그림 1은 다권선 구조로 구성된 AC-DC 컨버터로 단상 다중 권선의 입력에서 수전되는 교류 전원을 폴리실리콘 제조에 적합한 직류전원을 생성하게 된다. SCR 사이리스터로 구성된 정류부는 변압기 2차에서 공급되는 교류전력을 2상 반파정류를 직렬로 결선하여 직류전력으로 변환된다. 그리고 제어회로의 지령에 따라 위상 제어되어 원하는 형태의 전압을 얻게 된다.

기동을 하기 위한 전원은 변압기 1차측에 연결된 양방향 SCR 사이리스터 제어를 통해 변압기 2차측에 전달되는데, 2차측 다이오드 정류기를 통해 직류 900V 이상 출력된다. 또한 공정(Process)에 필요한 전원은 SCR 사이리스터 제어를 통해 그림 2와 같은 형태의 변압기 2차측에 AC-DC컨버터에 의한 정류된 중점전압 파형이 부하에 인가된다.

2.1.2 실리콘 제조 시스템

고주파 전원을 이용하는 실리콘 잉곳(Ingot) 제조용 EMCC (Electro Magnetic Continuous Casting)장치의 개념도를 그림 3에 나타내었다[3]. 폴리실리콘 생산 공정상 생산초기에는 매우

* Corresponding Author : Dept. of Railroad System Engineering,
Woo-song University, Korea

E-mail : springadd@chol.com

Received : September 30, 2015 Accepted : October 15, 2015

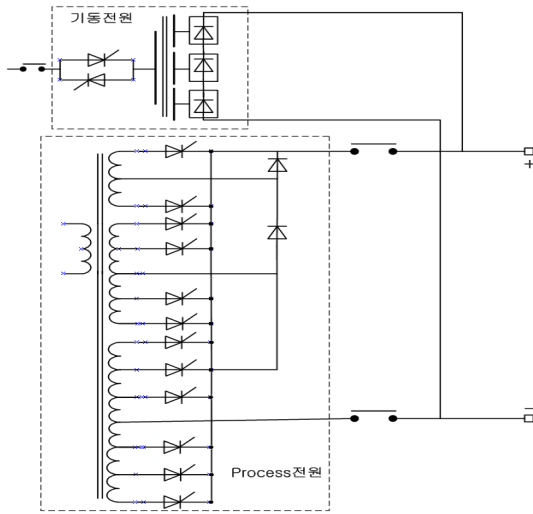


그림 1 단상 다중권선 AC-DC 컨버터
Fig. 1 single-phase multi-winding AC-DC converter

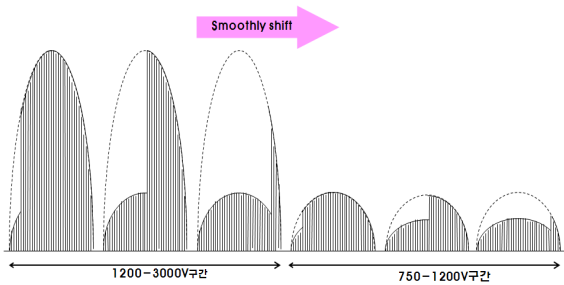


그림 2 부하측 3중 DC Overlap 전압 파형
Fig. 2 Output voltage wave of three level DC Overlap

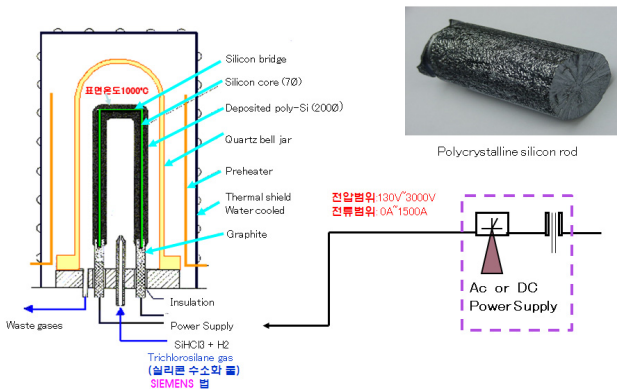


그림 3 실리콘 잉곳 제조용 EMCC 장치 개념도
Fig. 3 EMCC Device for Silicon ingot growth process

높은 3,000[V] 전압을 필요로 한다. 이후 공정이 진행되면서 전압을 강하시켜 최종적으로 130[V]의 낮은 전압과 1,500[A] 정도의 대전류를 자동으로 공급해야 하는 특수 조건이 요구된다. 이와 같이 실리콘 제조 장치에 직류전원을 공급하고 실리콘 제조용

부하에 공급되는 대전류로 인해 발열이 크게 된다. 따라서 특수 조건을 만족하면서 제조비용을 줄이기 위해서는 변압기를 다중권선화하여 역률을 높이고 고조파를 줄이면서 방열효과가 우수한 폴리실리콘 제조 시스템이 요구된다.

2.2 다중권선 고효율변압기 설계

다중권선 고효율변압기 설계를 위해 변압기의 철심은 투자율이 높고 히스테리시스 손실이 적은 Non-aging 규소강판을 사용하고 코어(Core)의 자속밀도는 고조파에 의한 자기포화를 고려하여 결정하였다. 또한 철심 조립방식은 특유의 독자적인 적철심 방법을 적용하였으며, 절연구조로 동선의 평균장을 극소화시켜 전력손실을 저감시켰다. 또한 기존의 건식변압기보다 소음이 저감되도록 철심의 구조를 독자적으로 개발하여 소음원인 철심을 둘러싸 코일이 방음벽이 되도록 설계하였다. 고효율 변압기 제작을 위하여 도체 선정 및 배치와 더불어 무부하 손실을 발생시키는 철손의 감소가 무엇보다 중요하며 이 손실은 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$P_h = \eta \frac{M}{\delta} f B_m^{1.6-2} \quad [W] \quad (1)$$

$$P_e = \epsilon \frac{M}{\delta} f^2 B_m^2 t^2 \quad [W] \quad (2)$$

여기서, M : 전기용 규소강판질량[kg], δ : 규소강판 밀도 [g/cm^3], η : 규소강판 재질 상수, ϵ : 실험적으로 결정되는 상수, f : 주파수[Hz], B_m : 자속밀도, t : 규소강판 두께[mm]

표 1 재질에 따른 규소강판의 코어 손실

Table 1 Core loss of Silicon steel plate on materials

자속밀도 (T)	Coreloss(W/kg) @ 60Hz		
	30PH139	20PH090	%DEV [%]
1.4	0.88	0.72	22.2
1.5	0.98	0.80	22.5
1.6	1.14	0.94	21.3
1.7	1.34	1.12	19.6

표 1은 일반적으로 적용하고 있는 30PH139의 Core와 개발하고자 하는 변압기에 적용된 20PH090의 Core를 자속밀도 크기별로 비교하였다. 동일한 설계를 가정할 경우 두께에 따라 상이한 손실이 발생하며, 20PH090의 코어를 길이 408[mm], 척중 181t의 크기로 하였을 때, 표 1의 결과에서 제시된 것과 같이 자속밀도의 크기에 따라 철손이 감소된다.

그림 4는 개발하고자 하는 다중권선 변압기의 구조를 보여준다. 유리섬유에 에폭시가 함침 되어 경화된 고체절연물로 덮고 1차 권선과 2차 권선 사이에는 냉각 덕트가 설치되어 있다. 또한 절연층에는 유리섬유 보강재를 도입함으로써 절연층이 부하변동에 의한 내부응력이 높고 절연층에 크랙 등의 손상이 없으며 장

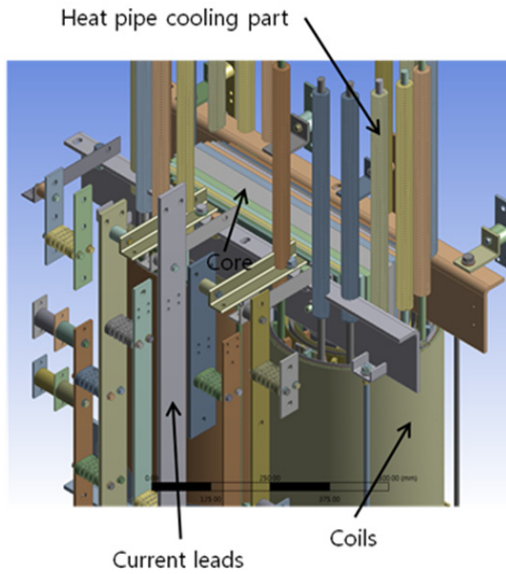


그림 4 다중권선 변압기의 구조 설계
 Fig. 4 Structure design of the multi-winding transformer

시간 안정된 특성을 얻는다. 절연내압이 높은 에폭시 수지로 특수 절연시켜 절연물의 크기를 최소화하고 독자적인 철심 설계를 통해 소형 경량화 된다. 특히 1차 코일과 2차 코일의 다중화로 구성된 다중권선 변압기는 대전류 용량으로 기존보다 소형화가 가능하지만 방열면적의 감소로 인한 열적문제를 해결하는 것이 중요하다.

2.3 냉각장치 설계

금속파이프 내부 유체의 상변화 열전달을 통해 길이방향 열전달율이 극대화되는 장치인 히트 파이프(Heat Pipe)는 일반적으로 히트 파이프의 길이방향 상당 전도 열전달계수는 2,300 [W/m/K]에 이른다. 따라서 본 논문에 적용된 히트 파이프식 변압기 냉각장치는 변압기 권선에서 발생된 열의 일부가 히트 파이프 증발부에 전달되고 이 열은 히트 파이프의 응축부에 전달된 후 핀에서 공기와의 대류 열전달에 의하여 소산되는 열적 경로를 갖는다[4].

권선은 원통형 구조이고 권선 사이마다 절연테이프가 삽입된다. 그러므로 권선의 축 방향과 접선방향 전도 열전달계수는 구리의 열전달계수와 같고 권선의 반경방향 전도 열전달계수는 삽입된 절연물에 의해 낮아진다. 따라서 냉각장치의 열적부하는 허용 최대 온도와 외기의 온도 및 이 온도차로부터 가능한 열 부하를 계산하여 결정하였다. 본 논문에 적용된 변압기 냉각용 히트파이프 냉각장치의 설계 사양은 표 2와 같다[5].

한편 히트 파이프의 냉각장치의 설계는 일반적으로 각 열전달 구성 요소들의 열저항 해석을 통하여 히트 파이프 증발부, 응축부, 내부구조, 길이 및 핀의 크기와 수량 등의 사양을 결정한다. 본 논문은 변압기 구조로부터 표 2와 같은 설계 인자를 결정하였으며, 냉각장치는 냉각성능을 만족하기 위한 히트 파이프의 열

표 2 히트파이프식 냉각장치의 설계사양

Table 2 Design Specification of heat pipe cooling apparatus

구분	크기		성능	
히트 파이프	작동유체 : HFE-7100 재료 : 구리		지름 [mm]	온도 [°C]
	증발부 (알루미늄핀)	길이: 600 [mm]	37	36
	응축부	길이 : 600 [mm]	15.88	45
허용 온도차	외기 : 24 [°C]		증발부 : 15~20[°C]	
열 부하	6.1kW/1상 (U, V상), 610 [W/EA]			

적 성능과 히트 파이프 수 및 핀의 사양을 고려하여 히트 파이프 구조를 설계하였다. 그리고 히트 파이프 설계를 위한 작동유체의 선정은 몇 가지 제한 조건을 만족해야 한다. 본 논문에서 적용된 변압기는 고전압이 인가되기 때문에 작동유체의 유출에 대비하여 전기적 절연성 및 화재에 대비하여 가연성을 회피한다. 혹한의 겨울철에 냉각 시동 상태에서 정상작동을 할 수 있도록 작동유체의 3중점이 예상되는 최저 외기 온도보다 낮은 값을 가져야 한다. 이 외에도 작동유체가 오존층 파괴와 같은 환경저해 요인이 없어야 한다. 따라서 본 논문에서는 제한적 조건에 따라 히트 파이프의 작동유체로는 PFC(과불화 탄소) 계열 물질이 주로 사용하고 있으나 지구 온난화 지수(GWP)가 높기 때문에 사용이 제한되고 있다. 따라서 유사한 물리적 성질을 가지면서 지구 온난화지수가 낮은 HFE-7100 (C₄F₉OCH₃)을 작동유체로 선정하였다.

3. 열 유동 해석 및 실험 결과

히트 파이프는 발열량이 집중되는 부분의 열을 냉각하기 용이한 곳으로 이동시켜 냉각하기 위한 열의 통로로 응용된다. 변압기 권선의 경우 상대적으로 도체의 길이가 단면적에 비해 매우 길기 때문에 도체를 실제와 똑같이 모델링하여 해석하는 것은 거의 불가능하다[6]. 본 논문에서 히트 파이프가 완전한 대칭성을 갖지 않지만, 비대칭성이 작고 대부분 대칭성을 가지므로 전체적으로 대칭모델로 가정하고 1/4 대칭모델을 가지고 열해석을 수행하였다.

또한 권선 냉각을 위해 히트 파이프를 적용하는 건식 변압기의 냉각해석을 수치해석 기법을 적용하였다. 권선은 구리도선과 절연물(Nomex tape)의 복합체로 모델링하였다. 건식 변압기는 열적으로 취약할 수 있는 저압권선의 외부에 히트파이프를 부착하였다. 이때, 히트 파이프의 방열부는 히트 파이프의 상부이며, 히트 파이프 냉각부의 냉각효율을 높이기 위해 히트 파이프 냉각부에 알루미늄으로 제작된 냉각핀이 부착된다. 히트 파이프의 상단의 상당 대류 열전달계수를 계산하는 수식은 식 (3)~식 (5)와 같다.

$$R_{cond} = \frac{L}{A_c k}, \quad R_{condv} = \frac{1}{h_{fin} A_{fin}} \quad (3)$$

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv} \quad (4)$$

$$h_{ep} = \frac{1}{R_{total} A_c} \quad (5)$$

여기서, R_{cond} : 히트 파이프 전도 열저항, R_{conv} : 히트 파이프 냉각부 대류 열저항, R_{total} : 히트 파이프 전체 열저항, h_{ep} : 히트 파이프 상단 상당 대류 열전달계수, h_{fin} : 히트 파이프 냉각핀 대류 열전달계수, A_{fin} : 히트 파이프 냉각핀 대류 면적, A_c : 히트파이프 단면적, L : 히트 파이프 냉각부 중심과 모델 상단과 떨어진 거리, k : 히트파이프 전도 열전달계수.

히트 파이프 냉각부의 하부를 강제 냉각할 경우, 일반적으로 전도 열저항에 비해 대류 열저항은 매우 작다. 예를 들어 냉각핀의 대류 열전달계수가 50 [W/m²/K]일 경우 R_{condv} 는 0.0689이지만, 히트 파이프 냉각중심과 히트 파이프 모델 상단간의 거리가 0.378[m]인 경우 R_{cond} 는 0.941이다. 본 논문에서 히트 파이프 상단 상당 대류 열전달계수는 5,283 [W/m²/K]를 사용하였다.

열 해석 모델에서 권선부 냉각채널의 대류 열전달계수는 18~20 [W/m²/K]을 적용하고, 클램프와 코어는 5~7 [W/m²/K]의 대류 열전달계수를 적용하였다. 권선부의 코일 끝단은 터미널과 연결되므로 코일과 터미널간의 도체 외부를 통해 냉각이 일어난다. 따라서 권선부의 코일 끝단의 상당 대류 열전달계수를 300 [W/m²/K]을 열 해석 시 고려하였다.

모델링 해석을 통해 히트 파이프를 적용한 다중권선 건식 변압기의 온도상승 예측 결과를 그림 5에 나타내었다. 온도상승 해석 결과에서 저압 권선부의 히트파이프가 부착되지 않은 부분에

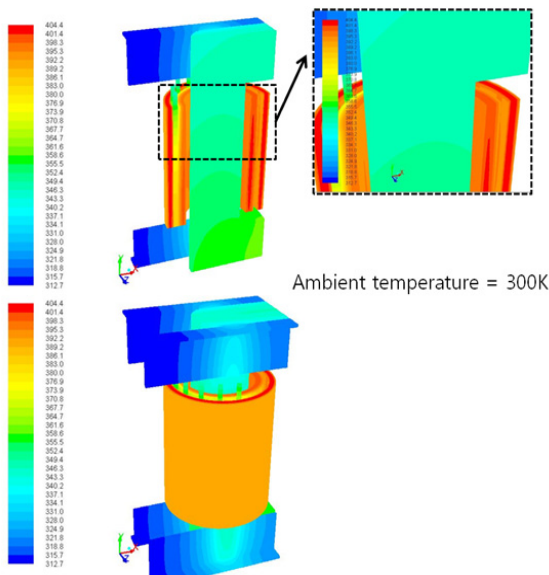
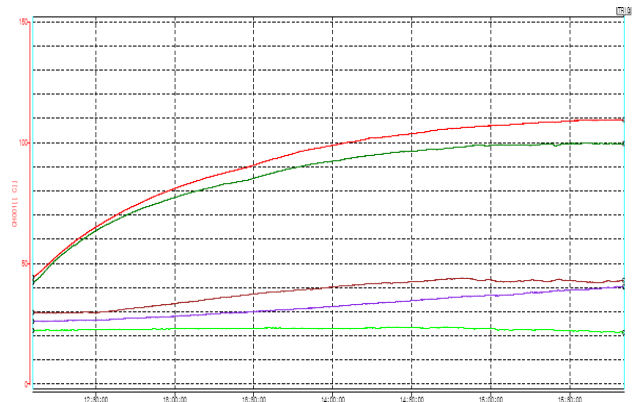


그림 5 변압기 온도 분포
Fig. 5 temperature distribution of Transformer

서 129K의 온도상승이 예상되었다. 평균온도상승은 철심, 고압권선(1차Coil), 저압권선(2차Coil)에서 각각 50K, 115K, 120K로 예측되었다.

그림 6은 모델링 해석을 통해 얻은 결과를 토대로 제작 후 변압기 온도 시험결과를 보여준다. 히트 파이프 변압기가 내장된 다중권선 변압기의 열적 안정성 검증을 위해 CFD(Computational Fluid Dynamic) 해석을 수행하여 히트 파이프의 설치유무에 따른 1차 및 2차 코일부의 온도를 비교하였다. 그림 6의 (a)는 시간에 따른 각 권선위치의 온도 변화와 데이터를 나타내고, 각 권선의 온도는 110K 이내에 있으며 이는 모델링 값과 큰 차이가 없음을 보여준다.



(a) 시간에 따른 각 부의 온도 변화

```
File Message      :
File Name         : 000167_120828_120602.DAE
Device Type      : MV1000
Serial No.       : S51910587
Time Correction   : None
Starting Condition : Manual
Dividing Condition : Manual
Meas Ch.         : 5
Math Ch.         : 0
Ext Ch.          : 0

Printed Group    : GROUP 1
Printed Range    : 2012/09/28 12:06:02.000 ~ 2012/09/28 15:50:34.000
Comment         :
```

연산구간 ~

채널	최소	최대	P-P	평균치	실측치
CH001 (C)	44.2	109.5	66.3	92.1	93.7
CH002 (C)	42.1	99.9	57.8	88.1	87.4
CH003 (C)	29.3	49.9	14.6	38.2	38.5
CH004 (C)	26.9	40.5	14.6	32.4	32.7
CH005 (C)	21.3	29.7	2.4	22.8	22.8

(b) 각 부의 온도 데이터

그림 6 변압기 온도시험 결과
Fig. 6 temperature test results of Transformer

표 3 변압기 수치해석과 실험의 온도 데이터

Table 3 Temperature data between modeling analysis and Experiments result on transformer

구 분	온 도(°C,K)			
	Heat Pipe 설치 후		Heat Pipe 설치 전	
	CFD	실 험	실 험	
권 선	1차 Coil	127(100.7K)	86.1K	108.8K
	2차 Coil	132 (105.8K)	98.6K	121K
철 심	77	69	78	
주위온도(°C)	27			

표 3은 변압기 각 부의 수치해석과 온도상승 실험결과를 Heat Pipe 설치 전과 후를 비교한 값이다. 권선과 철심의 온도는 히트파이프 설치 전 2차 권선 121K와 설치 후 실험값 98.6K 그리고 CFD 시뮬레이션 값인 105.8K를 비교할 때 냉각 효과가 있음을 알 수 있었다.

여기서 수치해석 값과 온도상승 실험결과 값의 차이는 수치해석을 위한 모델링의 정밀도에 의한 차이가 있으며, Heat Pipe 설치 전과 후의 차이는 히트파이프의 특성인 냉매의 상 이동에 의해 자연냉각 효과가 크기 때문이다.

한편 본 논문에서 제작한 다중권선 변압기에 대해 공인인증기관을 통해 성능시험을 한 결과 소음은 62[dB], 효율은 97.8[%]를 보였다.

4. 결 론

본 논문은 저전압 대전류 용량의 실리콘 제조용 다중권선 변압기 개발을 위해 발열을 최소화하기 연구를 수행하였다. 냉각효과를 얻기 위해 히트파이프를 이용한 변압기의 설계와 열적안정성 검증을 위하여 모델링 수치해석과 온도 시험을 수행하였다. 해석결과로부터 히트 파이프가 내장된 건식변압기가 일반건식 변압기에 비하여 권선온도의 평균온도가 약 22.7K 낮게 나왔다. 또한 소음은 62[dB], 효율은 97.8[%]을 얻을 수 있었다.

따라서 권선의 발열밀도에 따라 적절하게 히트 파이프를 적용하면 효과가 클 것으로 보인다. 발열량이 큰 변압기에 히트 파이프를 사용하여 냉각성능을 검증하고 소형화 적용가능 타당성을 확인하였다.

References

[1] Sung-Ho Lee, "New harmonic drop device develop take advantage of Zig-zag TR line and Open Delta mode", The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers journal, Vol.19, No.1, 2005. 1
 [2] Cheon-Sik Kim, "A Study on Transformer Design of Multi-Level Converter", The Transactions of the Korean

Installation Engineers journal, 2003

[3] Byung-Moon Moon, "Design and utilitation of non-contact type crucible for high productive multicrystalline Si inert growth process for the fabrication of solar cell wafer", New Renewable Energy journal, Vol.1. No.4, 2005. 12
 [4] John E. Graebner, "Heat Pipe Fundamentals", Electronics Cooling Online, 1999, May_Articles2
 [5] Chun-Bae Lee, "Study on Cooling System of Multi-layer Winding Transformer with Heat Pipes", The Transactions of the Korean Installation Engineers journal, 2014. 10
 [6] W. Jerry Bowman, "Numerical Modeling of Heat Pipe Transient", J. Thermophysics, Vol.5 No3, pp373-379, 1990

저 자 소 개



이 춘 배 (Chun-Bae Lee)

(주)배산엔지니어링 대표이사
 우송대학교 철도대학원 박사과정
 전기안전기술사