

냉각수 유속 변화에 따른 고주파 용접기용 가변 리액터 / 커패시터의 변형에 관한 연구

국정한¹, 박광진², 김기선^{3*}

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²공주대학교 기계공학과,
³공주대학교 기계자동차공학부

A study on the Deformation of Variable Reactor / Capacitor for High-frequency Welder Due to the Change on the Velocity of Coolant

Jeong-Han Kook¹, Gwang-Jin Park² and Key-Sun Kim^{3*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

³Div. of Mechanical &Automotive Engineering, Kongju University

요 약 본 논문에서는 고주파 용접기의 가변 리액터 및 커패시터를 해석하여 최적화 설계 하였다. 고주파 용접기의 극판 부분은 콘덴서의 역할을 하기 때문에 큰 정전 용량의 콘덴서를 만들기 위해서는 유전율이 큰 재료의 선택과 극판의 면적을 크게 하고, 극판의 간격을 얇게 하여야 한다. 하지만 많은 전류가 흐르기 때문에 저항이 발생하여 열이 발생하게 된다. 이러한 극판의 열 변형을 막기 위하여 냉각수 등을 이용한 방법으로 극판의 열을 식힌다. 이때 극판의 변형 및 온도에 따른 냉각수의 속도를 최적화 하였다.

Abstract In this paper, variable reactor and capacitor for high-frequency welder are analyzed by optimum design. As the polar panel of high-frequency welder has the role of condenser, the material with the high rate of induced electricity has to be selected in order to manufacture the condenser with the great power cut. And the area of polar panel must be large and the gap between panels must be thin. On the contrary, the resistance is generated and the heat is happened because the large current is flown. To prevent the thermal deformation of this polar panel, the temperature can be lowered by using cooling water and so on. At this point, the speed of cooling water due to deformation and temperature of polar panel can be optimized.

Key Words : Variable Reactor, Capacitor, Welder, High-frequency, Coolant

1. 서 론

1.1 연구 배경

최근 자동차, 조선 및 항공 등 운송 및 기계 제조 산업이 발달되고 이에 대한 부품의 내구성 향상이 증대 되면서 구조물의 다항성이 이루어지고 있다. 그중 많은 양산 부품이 고주파 용접으로 이루어지고 있으며 고주파 가열은 이미 많은 산업 분야에서 놀라운 유용성이 증명 되어

왔고, 미래의 생산 디자인과 제조 공정에 적용되고 있다 [1,2].

고주파 가열의 방법은 다양성있게 발전하고 있으며, 유도가열의 원리가 경제성 생산 이득 면에 있어 잠재적인 중요한 분야이다[3]. 고주파 용접은 고주파 전류에 의한 유도 가열의 원리를 이용하는 접합 방법으로 고주파 전류가 흐르는 코일의 중간에 위치한 유도체가 전자 유도 작용으로 일어나는 와전류 및 일부의 Hysteresis의 열

*교신저자 : 김기선(keysun@kongju.ac.kr)

접수일 11년 08월 30일

수정일 11년 10월 05일

게재확정일 11년 10월 06일

손실에 의해서 급속으로 가열되는 현상을 이용한 용접 방법이다[4,5]. 고주파 열처리의 특징은 매우 좁은 열 영향부를 만들며, 성능 개선을 위한 잔유 열처리 부분이 미소하다. 또한 각종 용접 제한이 거의 없으며 국부 가열로 인하여 용접부의 산화나 변형의 위험성이 적다는 장점을 가지고 있다. 발생된 고주파를 조절하는 부분이 가변 리액터 및 커패시터이며 이 부품은 전도성이 강한 구리판에 표면 코팅으로 제조된다[6]. 고주파 용접기의 극판 부분은 콘덴서의 역할을 하기 때문에 큰 정전 용량의 콘덴서를 만들기 위해서는 유전율이 큰 재료의 선택과 극판의 면적을 크게 하고, 극판의 간격을 얇게 하여야 한다. 하지만 많은 전류가 흐르기 때문에 저항이 발생하여 열이 발생하게 된다. 이러한 극판의 열 변형을 막기 위하여 냉각수 등을 이용한 방법으로 극판의 열을 냉각하여야 한다. 이를 위하여 극판 표면에 냉각라인을 설치하고 냉각수를 순환시킨다. 이에 대한 연구는 냉각수의 속도 및 라인 설계에 따른 가변 리액터 및 커패시터의 간극에 대한 실험적 논문은 발표되었으나[7] 이에 대한 해석적 연구가 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 냉각수의 열 유체유동을 구하고 이를 연동 해석을 통하여 냉각수가 극간 간격에 미치는 영향을 해석적으로 수행하였다. 이 결과로 극판의 변형 및 온도에 따른 냉각수의 속도 분포를 구하였으며 이는 고주파 용접기의 가변 리액터 및 커패시터의 최적화 설계 변수를 선정하는데 중요한 인자가 될것이다.

1.2 관련이론

일반적으로 공진 회로에서 주파수가 점점 높아지면 유도 리액턴스는 커지고 이와는 반대로 용량 리액턴스는 작아지며 이 두값이 같아지는 점이 존재하게 된다. 이때 유도 리액턴스와 용량 리액턴스가 같아지는 공진 주파수로 주파수에 따라 그 크기가 변하며 관계식은 다음과 같다.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$X_C = 1 / \omega C = 1 / (2\pi fC) \quad [\Omega] \quad (2)$$

여기에서 R:저항, L:인덕터, C:커패시터, X:리액턴스, ω :주파수, 인덕터의 리액턴스는 X_L 이며 커패시터 리액턴스는 X_C 로 표현된다. L과 C로 조합되는 회로에서 그 회로의 고유 주파수와 전원의 주파수가 일치하면 공진 현상을 일으켜 전류 또는 전압이 최대가 될 때의 주파수인 RLC 회로에서의 공진 주파수가 된다. 이식은 발전 주파수가 결정되는 중요한 식으로 이것은 코일과 콘덴서의

값으로 결정됨을 알 수 있다. 한편 콘덴서의 정전 용량이 C이고 인가하는 전압이 V라 하면 축적되는 전기량 Q 콘덴서 정격 용량 C는 다음과 같이 된다.

$$Q = CV \quad (3)$$

$$C = \frac{\epsilon S}{3.6\pi d} \times 10^{-12} (F) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터 큰 정전용량의 콘덴서를 만들기 위해서는 유전율(ϵ)이 큰 재료의 선택, 극판의 면적(S)을 크게 하고, 극판의 간격(d)을 얇게 하여야만 한다. 코일 설계시 Wheeler의 식이 사용되며 다음과 같다.

$$L(\mu H) = \frac{R^2 \times N^2}{9R + 10H} \quad (5)$$

R : 코일의 반지름(Inch)

N : 코일의 횟수

H : 코일의 폭(Inch)

다음으로 설계시 단면적을 결정하여야하며 고려해야 할 기준은 주파수에 따른 표피효과, 탱크회로는 리액티브 전류, 양극코일은 진공관의 양극전류 및 그릿드 전류이다. 여기에서 극판의 폭이 콘덴서 용량 변화에 지대한 영향이 있으며 극간의 평행도가 요구된다.

2. 모델링 및 해석

2.1 모델링 및 해석 조건

본 연구에 적용한 용접기는 Solid State 방식의 파이프 제조용 고주파 용접기로 그 사양은 표 1과 같다.

[표 1] 용접기 사양

[Table 1] Welding Specifications

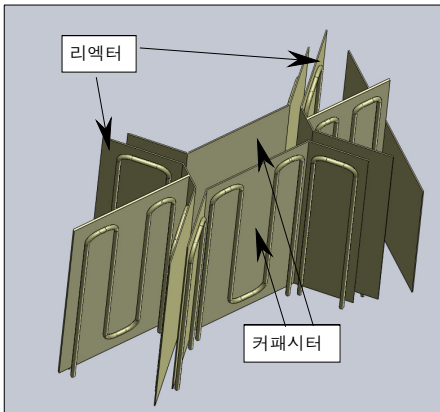
구분	값
주파수범위	100KHz - 200KHz
제어 방법	MOSFET 병렬구동방식
출력 전력	100 Kw

가변 리액터 및 커패시터의 크기는 500 mm(w) * 770 mm(h) * 3 mm(t)이며 재질은 6:4 Brass(ASM 37700)이고 그 기계적 성질은 표 2와 같다.

[표 2] 재료의 기계적 성질

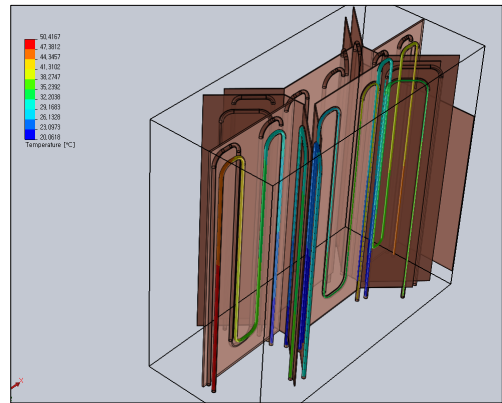
[Table 2] The mechanical properties of materials

spec.	unit	value
tensile strength	MPa	310
yield strength	MPa	160
modulus of elasticity	GPa	80
hardness	H _B	70
density	g/cm ³	8.54

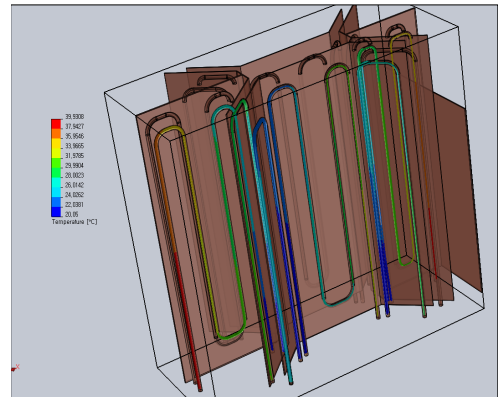


[그림 1] 가변 리액터 및 커패시터의 3D모델링
[Fig. 1] The system modeling of the variable reactor/capacitor

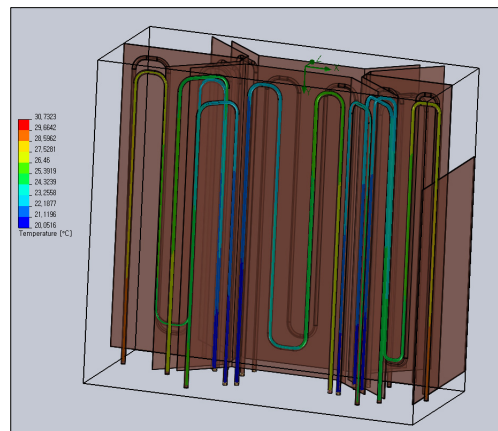
본 연구에서는 기구 해석 및 설계 사용코드인 미국의 Solidworks을 이용하여 모델링 및 해석을 수행하였으며 그림 1 와같이 3차원 모델링한 후 요소 분할하였다. 냉각수 유동 해석의 조건으로는 8mm 내경 파이프에 20 °C의 물을 사용하였으며, 메인부에 실측으로 측정된 8 Kw의 열원을 인가하고 600 초 후 전극을 가열한 열의 평형이 이루어지는 시점에 냉각수의 유동 속도에 따른 전극 부분의 온도, 열응력, 열변형을 열-고체 연성 해석하여 그 결과를 도출하였다. 그림 2는 전극 부분에서 냉각관 내부에서 통과하는 냉각수의 속도에 따른 온도 변화를 해석한 결과이다. 여기에서 초기 냉각수의 온도가 20 °C에서 유속이 0.2 m/s 일 경우 50.4 °C에서 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s, 1 m/s의 유속으로 변화를 주었을 경우 냉각수의 온도는 급격히 냉각되었으며 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 속도 따른 냉각수의 온도 변화는 0.2 m/s에서 50.4 1 °C, 0.6 m/s의 경우 30 °C 로의 온도 변화를 보여 직선적인 냉각이 이루어졌지만 0.8 m/s 이후는 완만한 냉각이 이루어져 1 m/s에서의 변화는 25.5 °C의 온도 변화를 보여주었다.



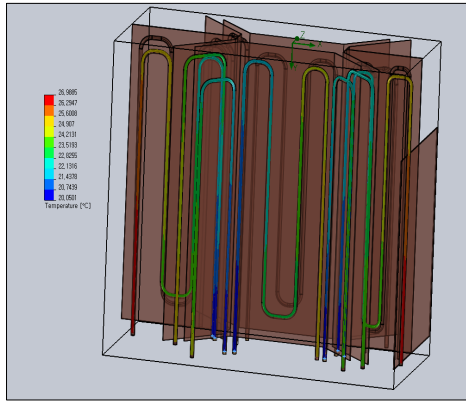
(a) 유속시(0.2 m/sec)
(a) Fluid velocity(0.2 m/sec)



(b) 유속시(0.4 m/sec)
(b) in case of fluid velocity(0.4 m/sec)

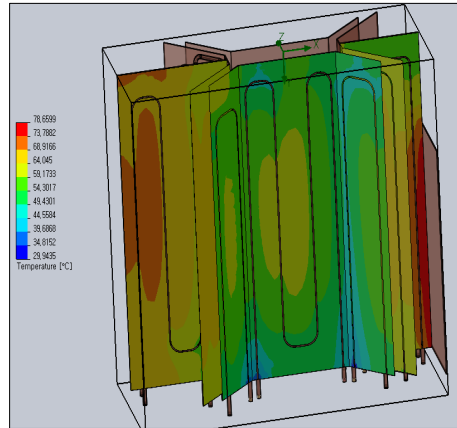


(c) 유속시(0.6 m/sec)
(c) in case of fluid velocity(0.6 m/sec)



(d) 유속시(0.8 m/sec)

(d) in case of fluid velocity(0.8 m/sec)

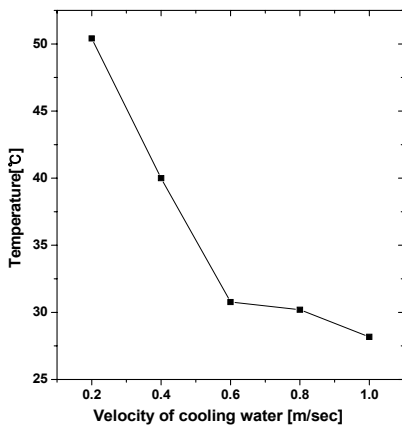


(a) 유속시(0.2 m/sec)

(a) in case of fluid velocity(0.2 m/sec)

[그림 2] 냉각수의 온도 분포

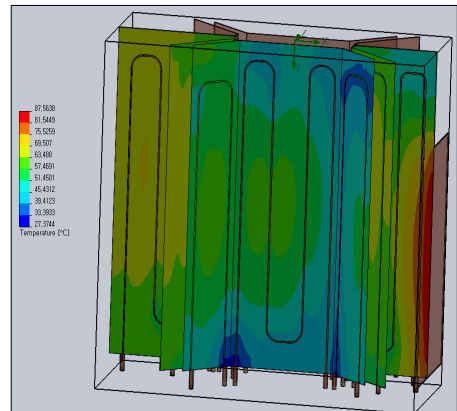
[Fig. 2] Temperature distribution of the coolant



[그림 3] 냉각수의 온도

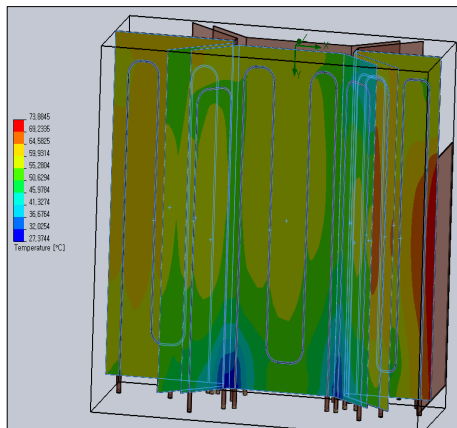
[Fig. 3] Coolant temperature

다음으로 냉각수의 유속 변화에 따른 가변 리액터와 커패시터 극판의 온도 변화는 그림 4와 같다. 여기에서 최대 온도의 변화는 리액터 상단 끝에서 발생하며 냉각수 유속이 0.2m/s의 경우 78.66 °C의 온도 변화를 보이고 유속이 빨리 집에 따라 점차 극판의 온도가 하강하여 1.0m/s일 경우 온도가 68.91 °C를 나타낸다. 유속 변화에 따른 전극판의 온도 분포 비교가 그림 5에 도시되었으며 유량 증가에 따라 거의 선형적으로 온도가 감소함을 보이고 있다. 다만 속도 따른 냉각수의 온도 변화는 0.2 m/s에서 0.6 m/s까지는 가파르게 직선적으로 냉각이 이루어졌지만 0.8 m/s 이후는 완만한 냉각이 이루어짐을 확인하였다.



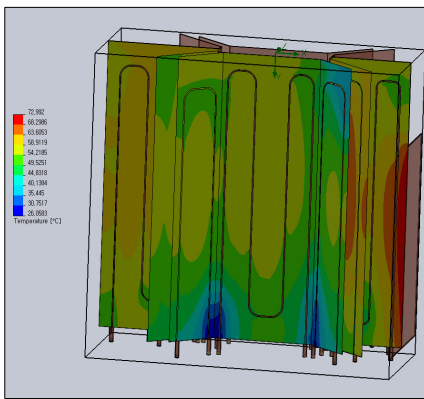
(b) 유속시(0.4 m/sec)

(b) in case of fluid velocity(0.4 m/sec)

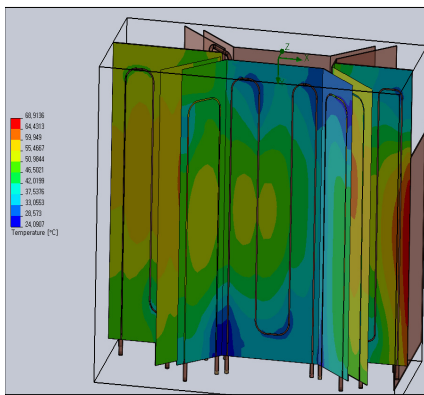


(c) 유속시(0.6 m/sec)

(c) in case of fluid velocity(0.6 m/sec)

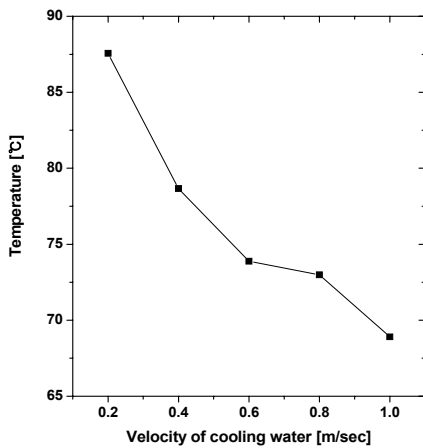


(d) 유속시(0.8 m/sec)
(d) in case of fluid velocity(0.8 m/sec)



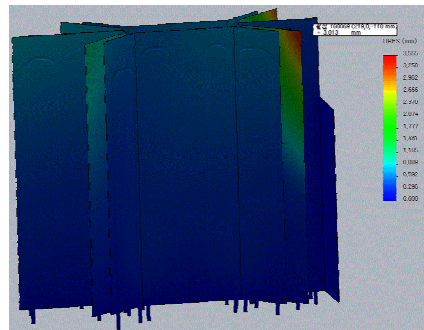
(e) 유속시(1.0 m/sec)
(e) in case of fluid velocity(1.0 m/sec)

[그림 4] 전극판의 온도 분포
[Fig. 4] The temperature distribution in the electrode plate

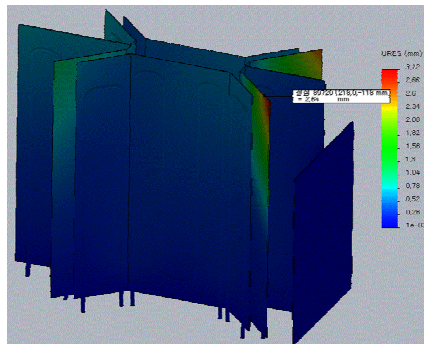


[그림 5] 냉각수의 속도에 따른 전극 온도 변화
[Fig. 5] Electrode temperature according to the velocity of the coolant

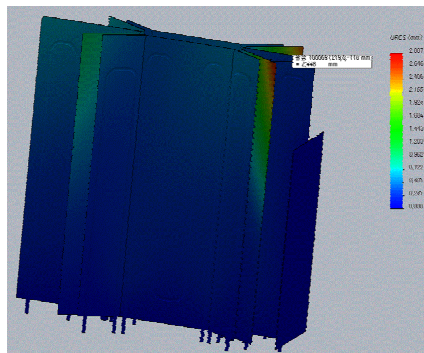
냉각수 유속 변화에 따른 전극 부분의 열 변형량에 대하여 해석한 결과를 그림 6에 도시하였다. 온도와 같이 최대 열변형은 리액터 상단 끝에서 발생하며 0.2 m/s에서 3.5 mm의 변위가 발생하였으며, 냉각수 유속이 증가 할수록 변형이 적어져 유속이 1 m/s에서의 변위는 2.43 mm로 줄어들음을 확인하였다. 한편 최대 열변형이 발생하는 리액터 상단 끝은 실질적으로 극간 콘텐서 역할을 하지 않는 부분이며 실제 작용하는 리액터와 커패시터 극판의 갭 변화를 해석한 결과를 그림 7에 도시하였다.



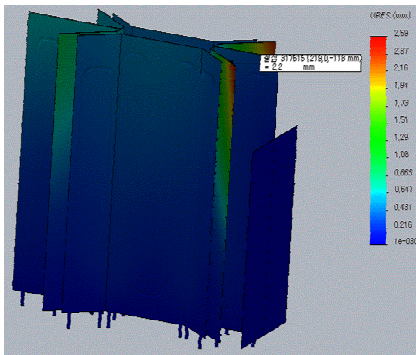
(a) 유속시(0.2 m/sec)
(a) in case of fluid velocity(0.2 m/sec)



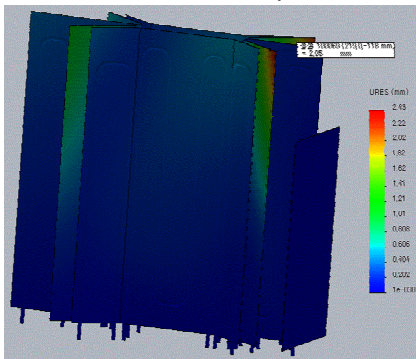
(b) 유속시(0.4 m/sec)
(b) in case of fluid velocity(0.4 m/sec)



(c) 유속시(0.6 m/sec)
(c) in case of fluid velocity(0.6 m/sec)

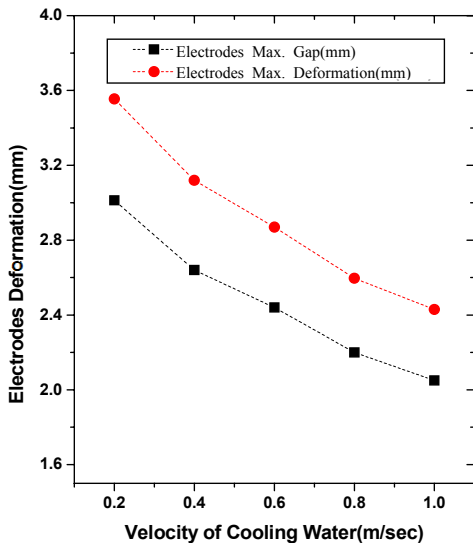


(d) 유속시(0.8 m/sec)
(d) in case of fluid velocity(0.8 m/sec)



(e) 유속시(1.0 m/sec)
(e) in case of fluid velocity(1.0 m/sec)

[그림 6] 전극판의 변형량 (mm)
[Fig. 6] Deformation of the electrode plate

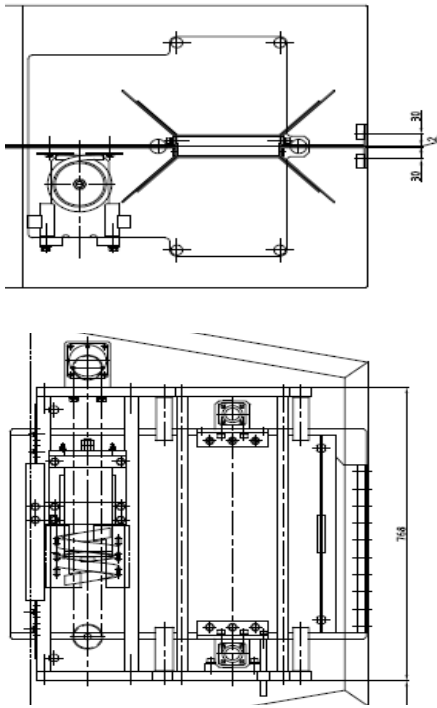


[그림 7] 냉각수의 속도에 따른 전극판의 변형량 (mm)
[Fig. 7] Deformation of the electrode plate according to the velocity of the coolant

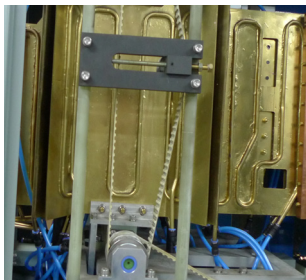
여기에서 냉각수 유속이 0.2 m/s의 경우 3.0 mm의 변형이던 것이 유속이 빨리 집에 따라 점차 극판의 갭변형이 줄어 1.0 m/s일 경우 온도가 2.0 mm로 50% 감소하였다. 최대 극판 변형량 보다 전극간 간격 변화는 0.4-0.5 mm정도 적게 유사한 기울기로 변하는 것을 확인하였다.

3. 실험 및 결과

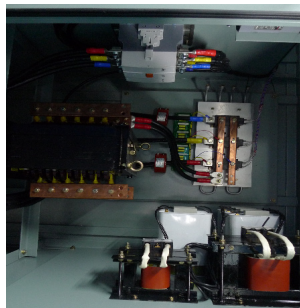
앞의 해석 결과에 따라 제품 설계를 하였으며 그림 8과 같이 설계한 도면을 토대로 시작품을 제작하였으며 그림 9와 같다. 여기에서 냉각관은 8 mm의 동관을 구리관에 접합하고 서로 대칭되게 2쌍이 되도록 설계 제작하였다. 또한 표면에 전도성을 향상시켜 효율을 증대할 목적으로 은성분이 포함된 도포제로 표면 처리하였다. 냉각관과 전극판의 접합은 아세틸렌-산소 용접에 의하여 제작하였다. 완성된 제품에 실제 열원을 공급하여 실험하였으며 열원공급은 수kw를 연속 공급하여야 하기 때문에 정부 과제에 의하여 바울소프트에서 직접 개발한 제어 시스템을 사용하였으며 그림 9(b)와 같다. 냉각관은 8mm 내경 파이프에 20℃의 수도물을 사용하였으며, 메인부에 8 KW의 열원을 인가하고 600 초 후 전극판의 열이 평형이 이루어지는 시기에 상온의 냉각수를 공급하여 열에 의한 변형을 측정하였다. 관에 공급되는 냉각수는 순수물을 사용하였으며 실험 및 해석 결과와 비교한것을 그림 10에 도시하였다. 여기에서 해석 결과와 유사한 경향을 확인하였으나 실제 실험치가 약 20% 정도 변형이 작음을 확인하였다. 이는 그림 10에서처럼 냉각관과 판의 용접 접합부가 일정하게 용접이 일어나지 않아 비드의 형상이 불균일하게 제작되었으며 해석 모델에서는 고려하지 않은 용접 비드들로 인하여 실제 제품의 변형이 줄었을 것으로 사료된다. 구체적으로 이론과 실험의 차이에 있어 냉각수 유속이 0.2 m/s의 경우 약 0.5 mm의 차이를 보였으나 유속이 빨리 집에 따라 점차 줄어 1.0 m/s일 경우 0.15 mm차이로 근접하였다. 이는 변형이 클수록 용접부의 지지 역할이 더 커져 변형을 줄였을 것으로 보인다.



[그림 8] 시작품 설계도
[Fig. 8] Prototype design

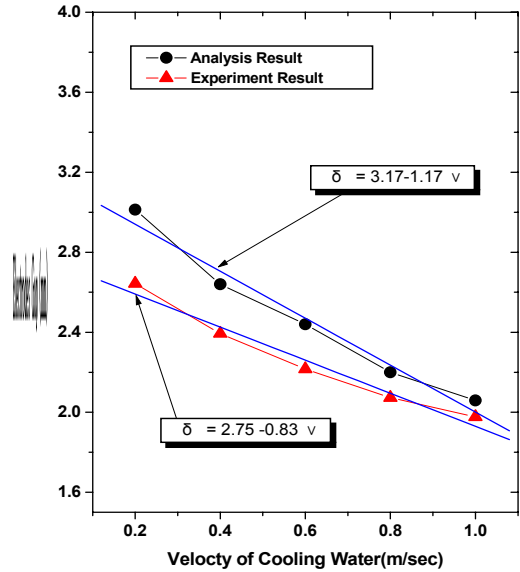


(a) 리액터 및 커패시터
(a) The reactor & the capacitor

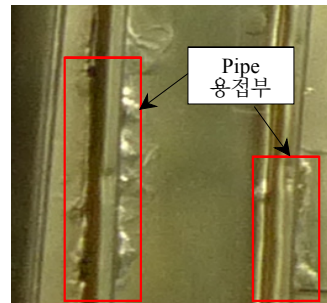


(b) 열원 공급장치
(b) the power supply

[그림 9] 시작품 제조
[Fig. 9] Prototype the manufacturing



[그림 10] 극판 간극 변형량
[Fig. 10] Gap of the electrode plate



[그림 11] 냉각관과 판의 용접 접합 부위
[Fig. 11] Welding joint area of the coolant pipe and the coolant plate

4. 결론

본 논문에서는 냉각수의 열 유체유동을 구하고 이를 연동 해석을 통하여 냉각수가 극판 간격에 미치는 영향을 해석적으로 수행하여 극판의 변형 및 온도에 따른 냉각수의 속도를 구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

우선 유속 변화에 따른 가변 리액터와 커패시터 극판을 해석한 결과, 최대 열변형이 심한 부분은 리액터 상단 끝에서 발생하며 냉각수 유속이 0.2 m/s의 경우 3.0 mm의 변형이던 것이 유속이 빨리 지에 따라 점차 극판의 갭 변형이 줄어 1.0 m/s일 경우 변형이 2.0 mm로 50% 감소하였다. 다음으로 이를 바탕으로 설계 후 시작품을 만들

어 실험한 결과 냉각수 유속이 증가할수록 변형이 감소하여 이론치와 비슷한 경향을 보였으나 실험치가 약 20% 정도 변형이 작음을 확인하였다. 이는 냉각 파이프가 극관에 용접으로 인하여 접촉 면적이 모델링 보다 커져서 냉각 파이프가 구조물 역할을 했으리라 판단된다. 이 결과는 고주파 용접기의 가변 리액터 및 커패시터의 최적화 설계 변수를 선정하는데 중요한 인자가 될 것이다.

References

- [1] Yu. I. Pashkov and V. A. Ivanov, "Stability of the mechanical properties of welds along pipes butt-joint by resistance welding with the use of high-frequency current", Metallurgist, Vol. 49, Nos. pp11-12, 2005.
- [2] Graphs Subjects Electric welding, "Pulse frequency modulation, Oscillations, Resonance", Journal Science & Technology of Source, Vol. 14, Issue 8, pp740-746, Nov, 2009.
- [3] K. Tokihiko, and H. Yoshinori, "Development of low spatter CO2 arc welding process with high frequency pulse current", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14 No 8, pp 740-746, 2009.
- [4] Z. M. Zhu, W. K. Wu and Q. Chen: "Effective control approach on molten droplet size in waveform controlled short circuit CO2 arc welding", Sci. Technol. Weld., (1), pp 55-62, Dec., 2007.
- [5] D. Cuiuri, J. Norrish and C. Cook: "New approaches to controlling unstable gas metal arc welding", Aust. Weld. J., pp 47, 2002.
- [6] Ramirez et al., "Min-max predictive control of a heat exchanger using a neural network solver". IEEE Transactions on Control Systems Technology. v12 i5. pp 776-786, 2004.
- [7] M. Tarafdar Haque, A. Atashi, "A simple arc starter and arc stabilizer circuit for inverter based arc welding power supply", Proceedings of the 5th WSEAS inter. conf. on Applications of electrical engineering, pp 1-5, 2006.

국 정 한 (Jeong-Han Kook)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학원 기계공학과(공학석사)
- 1988년 2월 : 인하대학원(공학박사)
- 1992년 1월 ~ 현재 : 한국기술대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

용접공학, 파괴역학, 재료강도 등

박 광 진 (Gwang-Jin Park)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주 대학교 자동차 공학과(공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과(공학석사)

<관심분야>

자동차 부품 설계, 구조해석, 피로 해석

김 기 선 (Key-Sun Kim)

[종신회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1983년 2월 : 인하대학원 기계공학과(공학석사)
- 1988년 2월 : 인하대학원(공학박사)
- 1989년 7월 : 기계제작기술사
- 1994년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

자동차 제조공정, 기계요소설계