

유전가열에 의한 FRP의 인발성형 연구

박효열, 강동필, 안명상

한국전기연구원

Study on Pultrusion of FRP by Dielectric Heating

Hoy-Yul Park, Dong-Pil Kang, and Myeong-Sang Ahn

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

Radio frequency and microwave dielectric heating are well-known electroheating methods, used in industrial applications where non electrically conducting materials are to be heated, dried or otherwise processed. The major reason for considering this technique for any process is based on its unique ability to transfer heat into the volume of an electrically non conducting material such as insulator directly, rather than, via a surface. Conventional heating must first bring heat to the product surface and there after it depends on the physical characteristics and condition of the material as to how effectively this heat is transmitted into the mass. The product would suffer surface damage before the main body is adequately processed. Dielectric heating is applied to enhance conventional heating methods and to drastically shorten the required processing duration. Although the use of dielectric heating has been a well proven technique for several years in some industries, its application in the preheating of FRP has been limited by the insufficient experience. In this paper a method is described for uniform radio frequency heating of preheating of FRP.

Key Words : Dielectric heating, radio frequency, FRP, preheating, pultrusion

1. 서론

물질을 가열시킬 때 종래의 방법으로는 가열하고자 하는 물질, 즉 피가열물 이외에 반드시 고온 발열체를 준비하고 이 발열체로부터 방사열, 전도열 혹은 열의 대류작용을 이용하여 피가열물을 요구하는 온도까지 상승시키는 외부가열방식에 의존하여 왔다. 그런데 전기적인 절연물은 열적으로도 대부분 절연물이다. 따라서 온도상승을 외부로부터 열의 이동에 의한 종래의 방식으로는 피가열물의 내부까지 요구하는 온도로 상승시키려면 매우 긴 시간이 필요하다. 또한 내부가 적당한 온도로 되어도 표면이 지나친 가열이 되기도 하고, 반대로 표면 근방을 적당한 온도로 하면 내부가 가열 부족으로 되듯이 온도분포를 균일하게 하기가 매우 어

렵다. 그러나 고주파 유전가열은 피가열물의 유전손실을 이용한 자기발열에 의하여 온도상승을 시키는 것이므로 가열시간이 매우 짧아지고, 온도상승의 속도도 임의로 제어시킬 수 있을 뿐만 아니라 평등전계 중에서는 피가열물의 각 부분이 균일하게 가열된다. 그리고 온도상승은 피가열물 각 부분의 열용량에 의하여 좌우되므로 피가열물이 균일한 물질이고 가열용 전극이나 주위의 공기에 대해서 열의 방산에 의한 이동이 없다고 가정하면 균일하게 온도를 상승시킬 수 있다. 피가열물의 유전상수가 다른 몇 개의 유전체 층으로 이루어진 경우 사용 주파수를 적당히 선택함으로써 특정한 유전체 층을 다른 유전체 층보다 많이 가열시킬 수 있는 선택가열작용도 있다.

이와 같이 고주파에 의한 유전가열은 수많은 특징을 가지고 있는 반면에 결점도 있다. 가열대상이 되는 피가열물의 기하학적인 형상에 제한이 있는 점, 균일한 가열을 목적으로 하는 경우 복잡한 모양의 피가열물 내의 전계분포를 균등하게 하기 어려운 점 등이 있다. 그리고 고주파 유전가열장치를 처음으로 설치하는 경우 설비비가 매우 높다는 점도 경제적인 결점이다. 열경화성 수지를 사용한 고분자 복합재료는 강도, 내구성 및 절연성이 우수하여 일반 구조재료로는 물론 회로기판, 옥외절연용 애자의 core 재료, 전력기기의 절연재 등의 절연성 구조재료로서 다양한 분야에 적용되고 있으며 그 시장은 점차 확대되고 있다.

본 논문에서는 FRP 인발성형에 적용이 가능한 유전가열장치의 이론에 대하여 고찰하고 유전가열장치에 의하여 예비가열을 한 후 인발성형하여 제작한 FRP의 특성을 평가 하였다.

2. 본 론

2.1. 유전가열의 이론

커패시터 등의 유전체가 유전손실에 의하여 발열되어 열화현상이 발생되거나 타버려서 사용할 수 없게 되는 현상이 일어나는데 이러한 현상을 열원으로 사용하는 것이 유전가열이다.

유전체의 외부에서 전기장을 걸어주면, 양·음전하가 서로 반대방향으로 변위하고 유전분극이 발생함과 동시에 미소한 전류가 흐른다. 이와 같은 현상을 나타내는 재료를 유전분극에 중점을 두어 유전체라 부르기도 하고, 전기가 흐르지 않는 전기 절연성에 중점을 두어 절연체라고 부르기도 한다. 유전분극을 발생하는 기구에는 원자핵과 전자의 상대적 변위에 의한 전자분극, 양·음이온의 상대적 변위에 의한 원자분극, 영구쌍극자의 전계방향에 의한 배향분극 및 서로 다른 재질의 계면에서 전하 캐리어의 축적에 의한 계면분극 등이 있다. 유전체손을 이용한 가열이 유전가열이다. 유전체가 고주파 전계에 있게 되면 유전체 속의 쌍극자가 전계의 변화에 따라서 회전하므로 그 때 생기는 마찰력에 의하여 발열하게 된다. 이러한 손실을 유전체손이라 한다.

가열하려는 물체를 두 극판 사이에 삼입시키고 여기에 고주파 출력을 공급할 때, 고주파 전계에

의하여 피가열물 속에서 발생하는 유전체손을 이용하여 가열되는 유전가열에서는 피가열물이 사용되는 주파수에서 유전체로 볼 수 있는 물질에 대하여 적용된다. 유전가열은 유전체에 고주파수의 전기장을 걸어서 발열시키는 방법으로서 유전체의 분자들은 전기장 내에서 단위 시간당(second) 주파수만큼 회전하고 움직이게 되어서 마찰과 비슷한 방식으로 유전체 내에 열이 발생하게 된다. 이 경우 유전체는 유전손실에 의해 가열되는 것으로서 손실 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon' \tan\delta \cdot E^2$$

여기서, f 는 주파수, ϵ_0 는 진공에서의 유전율(F/m), ϵ' 는 비유전율, $\tan\delta$ 는 손실계수이고 E 는 전계강도이다.

식에서 알 수 있듯이 단위 시간에 소비되는 전력은 고주파 출력의 주파수, 전계강도, 피가열물의 비유전율 및 손실계수이다. 바꾸어 말하면 유전체손실은 고주파 전계강도의 제곱, 주파수, 비유전율 및 손실계수에 비례하는 것이다. 비유전율이나 손실계수는 유전체의 종류에 의하여 결정되는 것이지만 그 값은 일반적으로 일정한 것이 아니고 사용하는 주파수 및 온도에 의하여 다른 값을 나타낸다. 정확한 값을 알려면 가열하려고 하는 경우와 같은 조건에서 실제로 측정하는 것이 바람직하다.

피가열물의 단위 체적당 발생하는 열에너지를 같은 조건하에서 조정할 수 있는 것은 전계강도와 주파수이다. 그러므로 높은 가열속도를 얻기 위해서는 전계강도 혹은 주파수를 크게 해야 한다. 전계강도를 높게 하기 위해서는 전극 간 전압을 높여야 하지만 피가열물의 절연파괴 및 공기 중의 코로나 발생이 생길 수 있으므로 일정한 한계가 존재한다. 주파수에 있어서도 재료마다 분극의 종류 및 양에 차이가 나므로 최적의 주파수를 선정하여야 효율적인 발열을 시킬 수 있다.

2.2. 유전가열을 적용한 FRP의 인발성형

구조재 및 전기절연체로서 많이 사용되고 있는 FRP 복합재료는 인발성형법으로 많이 제조되고 있다. 인발성형법으로 제조할 경우 성형다이의 발열체를 통한 열전달방식으로 가열하여야 하는데 고분자 복합재료의 열전도율이 낮아 가열시간이

길게 되므로 성형속도가 느리게 되며, 급속한 가열을 하게 되면 피가열물 내외부의 급격한 온도차에 의하여 성형이 불가능하거나 제품에 균열이 발생되는 원인이 된다. 특히 대구경의 FRP를 제조할 경우 내외부의 큰 온도차와 경화수축으로 인하여 성형속도가 매우 느려서 생산성이 크게 떨어지고 제품의 품질도 낮아지게 된다.

최근 폴리머 애자의 사용이 증가하면서 폴리머 애자의 코아(core)로 사용이 되고 있는 FRP는 폴리머 애자에서 요구되는 전기적, 열적, 기계적 특성으로 인하여 대부분 에폭시 계통의 수지와 유리섬유(E-glass fiber)를 사용하여 제조되고 있다. 에폭시 수지는 경화속도가 느려서 인발성형을 할 경우 인발속도가 매우 느리며, 때로는 인발성형이 불가능할 경우도 있다. 이러한 경우에는 예비가열을 반드시 하여야 하는데 인발성형 다이의 직전에 발열체를 통한 예비가열 혹은 적외선 가열 등이 가능하지만 열전달 효율이 매우 낮다.

생산성을 높이고 급속한 가열을 피하기 위하여 예비가열(preheating)이 필요하지만 발열체(heating element)를 통한 열전달방식으로는 예비가열도 하기 어려운 뿐만 아니라 피가열물 내외부의 온도차이를 줄이기도 매우 어렵다.

예비가열의 수단으로 유전자열을 이용하면 전자기 에너지가 피가열물과 열원과의 직접적인 접촉 없이 피가열물 자체에서 발열이 가능하여 열효율이 높을 뿐만 아니라 피가열물 전체에 대하여 훨씬 균일한 온도분포를 얻을 수 있으므로 품질이 우수하고 생산성이 높은 고분자 복합재료의 제조가 가능하다.

피가열물의 단위 체적당 발생하는 열에너지는 고주파 출력의 주파수, 전계강도, 피가열물의 비유전율 및 손실계수이다. 여기에서 형상이 같은 동일한 재료를 사용한다면 발생하는 열에너지는 유전자열 장치의 설계에 따라서 다르게 나타난다. 유전자열 장치에 따른 변수는 주파수와 전계강도이다. 주파수와 전계강도는 가열하려는 재료와 양에 따라서 정해지는 변수이다. 실제로 인발성형 예비가열용 유전자열 장치의 경우 주파수와 전압이 정해진 후 전극의 형상이 매우 중요하다. 인발성형에 사용하기 때문에 인발되는 방향으로 전극이 길게 될 필요가 있다. 그러나 전극이 너무 크고, 길게 되면 주파수를 높이기에는 한계가 있기 때문에 설계시

에 계산을 잘 하여야 한다. 전계강도의 조절에 있어서 실제로는 고주파수에서 높은 전압을 조정하기는 매우 어렵기 때문에 양 전극의 간격을 조정함으로써 전계강도를 조정하고 있다.

다음에는 본 실험에 사용한 E-glass 및 epoxy 수지의 주파수에 따른 유전특성을 나타내었다. 주파수에 따라서 E-glass의 유전특성의 변화는 크게 나타나지 않았다.

표 1. 유리섬유와 에폭시 수지의 유전특성

	Frequency	Dielectric constant	Dissipation factor
Glass Fiber	200 Hz	7.14	0.0040
	1 kHz	7.11	0.0030
	10 kHz	7.08	0.0030
	100 kHz	7.04	0.0030
	1 MHz	6.6	0.0025
	10 GHz	6.1	0.0038
Epoxy Resin	1 kHz	4	0.06

2.3. 인발성형에 의한 FRP 제작

유전자열방법을 이용하여 예비가열을 하여 FRP를 제작하여 그 특성을 평가하고, 종래의 방법으로 제작한 시편과의 특성 및 생산성을 비교하였다.

유전자열장치를 사용하여 성형한 조건을 표 2, 유전자열장치 없이 종래의 방법으로 성형한 조건을 표 3에 나타내었다. 표 2와 표 3에서 유전자열장치를 장착함으로써 생산성이 2배 정도 향상됨을 확인할 수 있었다.

표 2. 유전자열장치를 사용한 인발성형 조건

Parameter		Setting
diameter		32 mm
Pre-heat temperature		82 °C
Die temperature	Zone 1(entrance)	130 °C
	Zone 2(center)	145 °C
	Zone 3(exit)	145 °C
Pull speed		30 cm/min

표 3. 유전가열장치가 없는 인발성형 조건

Parameter		Setting
diameter		32 mm
Die temperature	Zone 1(entrance)	130 °C
	Zone 2(center)	145 °C
	Zone 3(exit)	145 °C
Pull speed		15 cm/min

유전가열장치를 사용하여 성형한 시편과 유전가열장치 없이 성형한 시편과의 성형속도가 차이가 나므로 이러한 차이에 의하여 강도의 변화가 나타나는지 조사하기 위하여 압축강도와 굽힘강도를 측정하여 표 4에 나타내었다.

표 4. 인발성형 방법에 따른 압축강도

인발성형 방법	압축강도 (MPa)	굽힘강도 (MPa)
유전가열장치 장착	586	756
기존의 방법	582	755

유전가열장치를 장착하여 인발성형한 시편과 유전가열장치 없이 기존의 방법으로 인발성형한 시편의 압축강도 및 굽힘강도를 비교한 표 4의 결과에서 강도의 차이는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

3. 결 론

FRP의 인발성형의 예비가열 수단으로 유전가열장치를 사용하여 성형한 결과 유전가열장치 없이 성형할 때 보다 2배 더 빠른 결과를 얻었다. 강도 특성을 조사한 결과 유전가열장치를 사용하여 성형한 FRP와 유전가열장치 없이 성형한 FRP는 비슷한 값을 나타내었다.

참고문헌

- [1] R. Gibson, "Dielectric Heating and Drying in the Textile Industry", EMPAC, pp56-60, 1977
- [2] R. Gibson, "Applications of Dielectric Heating in the Textile Industry", Colloquium Digest on RF and Microwave in Industrial Heating, pp. 10/1-10/6, 1977.
- [3] G. E. Fanslow, D. D. Bluhm and S. O. Nelson, "Dielectric Heating of Mixtures Containing Coal and Pyrite", J. of Microwave Power, Vol. 15, No. 3, pp. 187-191, 1980.
- [4] Ir. W. J. L. Jansen, Dipl.-Ing. E. J. Michelis, "Computer Modelling of Dielectric Heating", Mikrowellen & HF Magazin, Vol. 15, No. 8, pp. 630-633, 1989.
- [5] P. F. Stefens and D. M. van Dommelen, "The use of Computer Aided Design in R.F. Dielectric Heating", Vol. 15, No. 8, pp. 634-635, 1989.
- [6] P. Hulls, "Establishing Dielectric Heating in the Market Place", Vol. 16, No. 3, pp. 229-232, 1990.
- [7] P. J. Hulls, "Development of the Industrial Use of Dielectric Heating in the United Kingdom", J. of Microwave Power, Vol. 17, No. 1, pp. 29-38, 1982.
- [8] ASTM D695-91 : Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- [9] ASTM D790-93 : Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [10] Yu. M. Tarno'skii, T. Kincis, "Static Test Methods for Composites", pp. 97-104, 220-274, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [11] ASTM C674-88 : Standard Test Method for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials.
- [12] R. P. Brown, "Handbook of Plastics Test Method (3rd edition)", pp. 139-151, Longman Science & Technical, 1988.