

# 인장 시험을 이용한 열가소성 복합재료 유도용접 전단강도 평가방법에 대한 고찰

백인석<sup>1</sup> · 이석순<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>국립경상대학교 기계항공공학부, ERI

## A Study on the Evaluation Method of Lap Shear Strength for Induction Welding of Thermoplastic Composites using Tensile Test

Inseok Baek<sup>1</sup>, Seoksoon Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, ERI

### Abstract

Currently, Induction welding is attracting attention as a non-contact, clean and fast welding process. However, since thermoplastic resins are not affected by electromagnetic fields, induction welding requires a heating element called a susceptor. Researches are being conducted with the aim of achieving high-quality bonding, however, the factor of a heating element is an issue, hence the need to set a standard. Specimen fabrication and testing are conducted according to ASTM D5868. In this study, we propose that the evaluation criteria be judged on the basis of three factors; the condition of the welded joint surface, void content, and lap shear strength. Since the adhesive surface to be welded melts and solidifies as it cools, rapid temperature changes can generate pores. In addition, if the heating is not uniform, it is difficult to expect the desire performance. Using PA6 (CF 30%) thermoplastic, susceptor fabrication, induction welding and performance verification were conducted.

### 초 록

유도 용접은 비접촉식으로 깨끗하고 빠른 공정으로 현재 주목받고 있다. 하지만 열가소성 수지는 전자기장에 영향을 받지 않기 때문에 유도 용접은 서셉터(Susceptor)라는 발열체가 필요하다. 고품질 접합을 목표로 연구가 진행되고 있지만, 결국 발열체라는 이물질이 들어가기 때문에 기준이 필요하다. 시편의 제작과 시험은 ASTM D5868에 근거하여 진행된다. 본 논문에서 평가 기준은 용접된 접합면의 상태와 기공률, 전단강도로 총 3가지를 근거로 판단할 것을 제안한다. 용접되는 접착면은 용융되고 냉각되면서 고형화가 되기 때문에 급격한 온도 변화는 기공을 발생시킬 수 있다. 또한 가열이 균일하지 않다면 원하는 성능을 기대하기 힘들다. PA6 (CF 30%) 엔지니어링 플라스틱을 이용하여 서셉터 제작과 유도 용접 그리고 성능 검증으로 진행하였다.

**Key Words :** Thermosetting(열경화성), Thermoplastic(열가소성), Induction welding(유도용접), Susceptor(발열체), Lap shear strength(전단강도), Void content(기공률), Tensile test(인장시험)

## 1. 서 론

수송기(자동차, 항공, 선박) 분야에서는 경량화 추세

에 맞춰 복합재료의 사용량이 증가하였다. 항공 산업에서는 보잉787과 에어버스의 A350처럼 구조의 절반을 복합재료로 구성하였고, 자동차 분야에서는 BMW의 i3처럼 전기 자동차 구조의 대부분을 복합 재료로 구성하여 제작 공정 시간과 무게를 감소시켰다. 지금까지 열경화성 복합재료가 대부분 사용되고 있었지만, 고성능 응용 분야가 활발히 연구되면서 열가소성 복합

Received: Jan. 06, 2021 Revised: Dec. 14, 2021 Accepted: Dec. 26, 2021

† Corresponding Author

Tel: +82-055-772-1622, E-mail: leess@gnu.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

재료가 더 많이 연구되고 있다. 열가소성 수지는 열경화성 수지보다 기계적 성능이 우수하지는 않지만 동등한 기본 성능을 가진다. 게다가 열가소성은 인성과 내환경성이 우수하고 짧은 가공 시간, 불연소성 및 가열을 통한 재사용이 가능하여 열경화성 수지보다 좋은 장점을 가지고 있다. 가장 큰 장점은 저렴한 비용으로 신속한 생산이 가능한 것이다. 열경화성 복합재료에서 접합은 기계적 체결 방식을 사용하였다. 기계적 체결 방식은 열가소성 복합재료에는 적합하지 않다. 기계적 체결은 재료에 응력집중, 패스너의 다양한 열팽창, 부식, 중량 증가 및 광범위한 노동 및 시간 등의 단점을 가진다. 또한 본딩 작업은 광범위한 표면처리와 접착제의 경화 시간이 길고 화학적으로 불활성인 열가소성 수지와 접합되기 어려워 적용이 힘들다[1-5].

현재 열가소성 수지는 저항 용접, 초음파 용접 및 유도 용접이 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 용접 공정은 기계적 성능이 용접 전 성능과 동일한 고품질 접합을 목표로 한다. 특히 유도 용접은 비접촉으로 빠르고 깨끗한 공정이다. 특히 복잡한 형상에 적용할 수 있는데, 목표 용접 부에 발열체(Susceptor)를 통해 국부적인 가열과 가열 공정 제어가 용이하다. 유도 용접에서 발열체는 두 피착물 사이에 위치하여 유도 코일이 발생시킨 자기장에 의해 와전류를 통해 열을 발생시킨다. 발열체와 접촉하는 두 피착물은 용융되고 최종적으로 냉각되면서 고형화 될 때까지 가압하여 접합된다. 선행 연구자들이 마이크로 크기 이하의 입자를 수지와 함께 사용하여 문제점을 해결하고자 하였다. R. D. Farahani는 나노 크기 이하의 입자를 수지와 함께 사용하여 문제점을 해결하고자 하였다. 그는 나노 입자 크기의 은을 이용하여 연구하였고, Y. S. Kwon은 철, 산화철, 니켈을 입자 형태, 크기에 따른 유도 가열 거동을 연구하였다. 가루 형태의 강자성체를 열가소성 수지와 섞은 후 얇은 필름 형태로 발열체를 제작하였다. 새로운 발열체 제작을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구자는 선행 연구에서 나노 크기의 강자성체인 마그네타이트와 PA6 열가소성 수지를 섞어 필름 형태의 발열체를 제작하여 유도 용접을 수행하였다. 연구 결과를 통해 유도 용접 성능의 검증 필요성을 느꼈다[6-10].

선행 연구 과정에서 유도 용접 성능 검증의 판단은 인장 시험을 통한 전단 강도로 판단[11]하였다. 유도 용접 접합면에서 발생하는 기공과 불균일한 접합면이 전단 강도에 영향을 미치는 것을 파악하였다. 마이크로 이하 크기의 강자성체 발열체의 함유량이 높아질수록 유도 가열 효율은 높아지지만 함유량이 낮으면 원하는 온도까지 가열이 되지 않는 문제가 발생한다. 또

한 함유량이 너무 높으면 열가소성 수지가 가지고 있는 기계적 물성에 영향을 미쳐 강도가 떨어진다. 유도 가열 장비의 성능 중 주파수 영역이 유도 가열 효율에 영향을 미친다. 주파수 영역이 높을수록 유도 가열 효율이 높아지는 것을 선행 연구로 파악하였는데, 문제점은 주파수 영역이 높을수록 장비 작동 시간이 짧아진다. 주파수가 높을수록 유도 코일에 높은 온도가 발생하여 장비 작동 시간이 짧아진다. 그러므로 본 논문에서는 유도 용접 과정을 통해 발생하는 문제점을 자세하게 검토하여 평가 기준을 제시한다.

## 2. 실험

### 2.1 발열체(Susceptor) 제작

열가소성 수지와 마그네타이트를 섞어 발열체를 제작한다. 이 때 열가소성 수지는 PA6로 평균 입자 크기는 50  $\mu\text{m}$ 이며, 마그네타이트의 평균 입자 크기는 200 nm이다. 발열체의 제작 과정은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 열가소성 수지와 마그네타이트 파우더를 섞고 가열 프레스에 넣어 제작한다. 이 때 가열 프레스의 온도는 220  $^{\circ}\text{C}$  로 60초 가열 후 10 bar의 응력으로 가압하며 냉각한다. 제작된 발열체의 평균 두께는 450  $\mu\text{m}$ 이다. 접합면의 형태에 맞게 재단한다.

### 2.2 유도 가열 장비 및 구성

유도 가열 장치는 HF-10K(태양인덕션, 한국) 모델로 소비 전력은 10 kW이고 주파수는 100 ~ 400 kHz이다. 실험에 사용된 출력은 3.4 kW이고 주파수는 약 100 kHz에서 유도 가열을 수행한다. 유도 가열 코일은 멀티 턴(Multi-turn) 형태로 3단으로 구성되어 시편은 코일의 중앙에서 가열하게 된다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 유도 용접 모습과 출력되는 정보를 알 수 있다. 이 때 가열 발생 확인을 위해 적외선 열화상 카메라로 온도를 확인하고 모델은 Ti 450 PRO(Fluke, 미국) 이다.

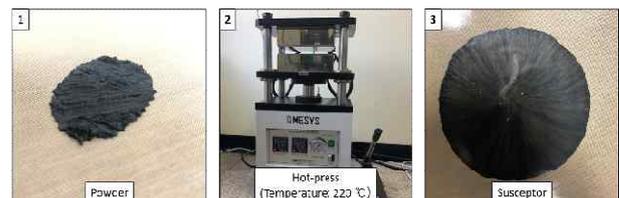


Fig. 1 Fabrication process of susceptor

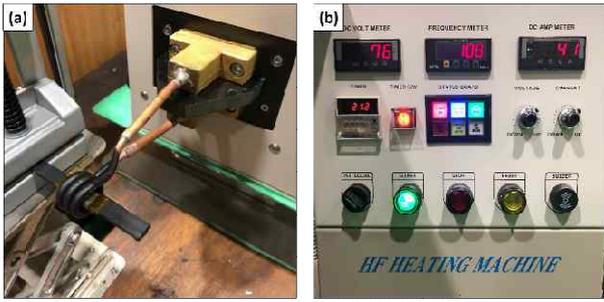


Fig. 2 Induction heating machine, (a) Specimen and Experimental device, (b) Induction heating input data

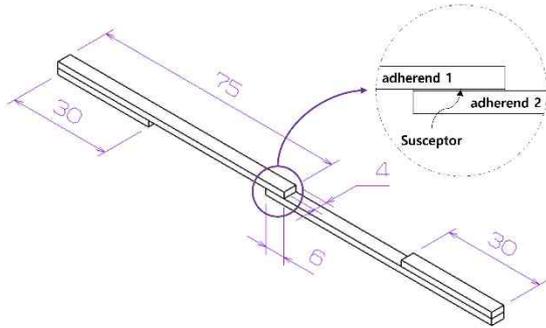


Fig. 3 Specimen drawing

### 2.3 유도 용접

앞서 제작한 발열체를 ASTM D5868에 근거하여 제작한 시편사이에 위치시켜 유도 용접을 수행한다. 유도 코일 중심에 접합 부를 위치시키고 약 60초 가열 후 냉각하여 접합한다. Fig. 3에서 시편 형태를 확인할 수 있다.

### 2.4 인장 시험

접합된 열가소성 복합재료의 기계적 시험은 ASTM D5868 표준에 따라 서보시험장치(5883; Instron, 미국)를 이용하여 전단강도(Lap shear strength)를 확인한다. 용접 된 시편의 전단강도는 실온에서 1 mm/min의 크로스 헤드 속도를 갖는 5 kN 로드셀을 사용하여 확인한다. 전단강도는 시편이 완전히 파괴되기 전에 달성된 최대 힘으로 계산한다. 전단강도 공식은 아래 공식과 같다.

$$\tau = \frac{F_{max}}{L \times b} \times \frac{N}{m^2} \quad (1)$$

여기에서,  $\tau$ 는 전단강도( $N/m^2$ ),  $L$ 은 시편 길이( $mm$ ),  $b$ 는 시편의 넓이( $mm$ ),  $F_{max}$ 는 최대 인장력( $N$ )이다. 본 연구에서 시편은  $L = 6\text{ mm}$ ,  $b = 4\text{ mm}$ 이다. 접합 영역의 상태를 파악하기 위해 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, MIRA3 LM, 체코)을 사용하여 시편의 단

면을 관찰한다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 유도 용접 결과

R. D. Farahani[10]는 전단강도의 값을  $22.2 \sim 31.3\text{ N/m}^2$ 로 나타나는 것이 가장 적합하다고 평가한다. 인장 시험 결과 인장력은 약  $860\text{ N}$ 으로 나타났고, 접합 면적은  $24\text{ mm}^2$ 이므로 전단강도는 약  $36\text{ N/m}^2$ 이다. 시험 결과 그래프를 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

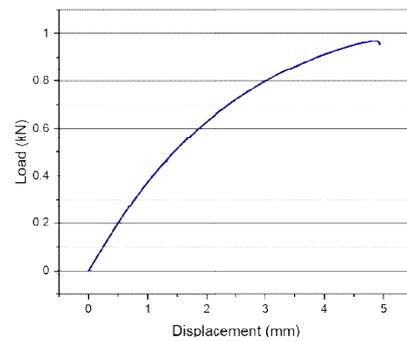


Fig. 4 Result of tensile test

앞선 적합한 전단강도 범위의 결과값 보다 큰  $36\text{ N/m}^2$ 로 결과가 나타나므로 범위를 벗어났지만, 용접의 기능을 할 수 있다고 판단하였고, 유도 용접의 가능성을 확인하였다.

유도 용접의 가능성 여부를 확인하는 과정에서 실패를 통해서 검증해야 되는 부분들을 확인하였다. 불균일한 접합면과 기공률이다. 불균일한 접합면과 기공이 발생하는 것은 발열체에 의해 발생할 수 있다.

### 3.2 발열체(Susceptor) 분석

Fig. 5는 USB형 전자현미경을 사용하여 혼합되어 있는 열가소성 수지와 강자성체를 확인하였다. 하얀색이 열가소성 수지이고 검은색은 강자성체이다. Fig. 6에서는 전계방사형 주사전자현미경으로 촬영한 이미지로 밀도가 높은 마그네타이트가 하얀색으로 분포된 모습을 확인할 수 있다. 이러한 부분들이 유도 코일에 의해 가열이 고르지 않게 발생하는 현상이 발생한다. 즉, 뭉쳐져 있는 곳은 주변에 비해 더 높은 온도가 발생되고, 흩어져 있는 곳은 낮은 온도로 균일하지 않은 접합이 발생하거나 접합이 되지 않는다. 또한 뭉쳐져 있는 곳에서 급속도로 가열이 되면서 기공을 야기시킨다. 이러한 현상은 유도 가열 장비의 파워, 주파수를 조정하거나, 발열체 제작 시 마그네타이트 함유량을 조정하여 어느정도 해결할 수 있다. 하지만 유도가열

장비를 조정하는 것은 어렵기 때문에 마그네타이트 함유량에 따른 유도 가열 거동을 파악하여 적용하는 것이 가장 좋은 방법이다. 나와 다른 연구자들은 강자성체 물질을 마그네타이트가 아닌 은, 니켈 등 다른 물질을 사용하려 노력하고 있는데, 결국 유도 가열 거동 효율을 찾기 위함이다.

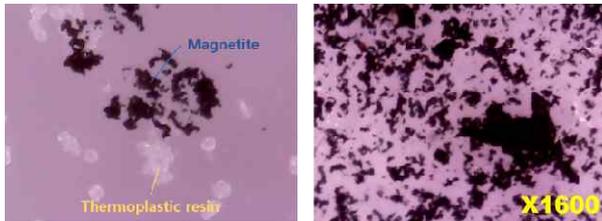


Fig. 5 Microscope photograph of susceptor(SEM)

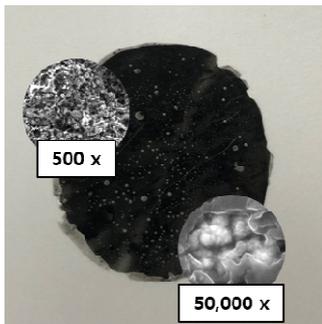


Fig. 6 Scanning electron microscopy (SEM) image of susceptor

### 3.3 유도 용접 접합 면 분석

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 접합 면과 수직 된 단면을 잘라 접합 성능을 확인하였다. 왼쪽 사진에서는 크고 작은 기공이 발생한 것을 확인할 수 있고 오른쪽 사진에서는 아주 매끈하게 접합이 된 것을 확인할 수 있다.

기공이 발생한 이유는 급격한 온도 변화에 의해 발생하였다. 특히 마그네타이트의 함유량이 높을수록 기공 발생율이 높아진다. 특히 바깥쪽보다는 전자기장이 집중되는 중앙면에서 기공이 발생률이 높다. 빠르게 작업을 하는 것도 중요하지만, 기공이 발생하므로 적절한 작업 시간을 선정하는 것도 중요하다. 또한 열가소성 수지는 가열과 함께 가압하여 냉각시켜야 하기 때문에 가압 시 하중을 조절하여 기공 발생을 줄일 수 있다. 이 모든 조건이 적절히 조절되었을 때 Fig. 7의 오른쪽 그림과 같이 일정한 선으로 접합 부분이 나타난다. 일정한 선으로 모습이 보이는 것은 마그네타이트의 밀도가 높아서 선으로 보이는 것이다.

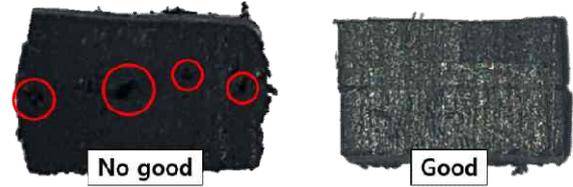


Fig. 7 Cross-section of specimen of the induction welding

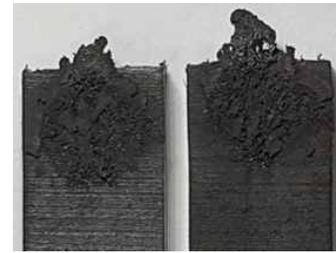


Fig. 8 Failure adhesive surface of induction weld

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 접합 면이 균일하지 않는 것을 확인할 수 있다. 중앙부는 열가소성 수지가 용융되어 바깥으로 빠져나간 형태가 확인이 되지만 모서리 부분에는 중앙부에 비해 용융이 되지 않아 접합이 되지 않은 것을 확인할 수 있다. 모서리 부분들은 외부 공기와 바로 접촉이 되므로 냉각 속도가 빠르기 때문에 이러한 현상이 발생한다. 일정한 분위기를 조성하거나 유도 가열과 동시에 가압하여 최대한 짧은 공정을 구성하는 것이 좋다.

## 4. 결 론

열가소성 수지를 사용하는 복합재료에 유도 용접 수행 시 발생되는 문제점과 해결점 그리고 검증하는 방법을 제안한다.

- 1) 열가소성 수지는 비자성체 이므로 유도 가열이 불가능하다. 그러므로 강자성체를 섞어 유도 가열이 가능하게 한다.
- 2) 유도 가열 장치의 파워와 주파수, 강자성체의 함유량 조절이 중요하다.
- 3) 강자성체의 함유량이 높을수록 유도 가열 효율은 높아지지만 유도 용접 시 기공 발생과 균일하지 않은 접합 등 문제점이 발생한다.
- 4) 유도 가열 장치의 고정된 파워와 주파수 값에 맞춰 발열체에 포함된 강자성체 함유량을 조절한다면 문제점을 예방할 수 있다.
- 5) 유도 용접 접합 면에 기공이 발생하는 주된 이유는 급격한 온도 변화, 강자성체가 균일하

- 지 않게 분포되고 밀집한 부분 등에서 기공이 발생한다.
- 6) 특히 자기장이 집중되는 중앙 접합 면에서 크기가 큰 기공이 발생하고 모서리 쪽의 접합 면에는 용융이 되지 않아서 접합이 원활이 되지 않는다.
  - 7) 유도 용접의 최종적 평가는 인장 시험을 통해 전단 강도를 측정하여 적합성 여부를 판단한다. 전단강도의 크기는 22.2 ~ 31.3  $N/mm^2$  일 때 이상적이다.
  - 8) 유도 용접의 검증 여부는 인장 시험과 접합면을 분리하거나 수직 방향으로 절단하여 직접적인 상태를 확인한다.

## 후 기

이 연구는 2021년도 한국연구재단의 이공학개인지초연구지원사업(기본연구지원사업, '2020R1F1A106598311')과 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구비 지원에 의한 연구임

## References

- [1] T.J. Ahmed, D. Stavrov, H.E.N. Bersee, A. Beukers, "Induction welding of thermoplastic composites—an overview", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 37, Issue 10, Pages 1638-1651, 2006.
- [2] Thomas Bayerl, Miro Duhovic, Peter Mitschang, Debes Bhattacharyya, 'The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 57, pp. 27-40, 2014.
- [3] Huajie Shi, Irene Fernandez Villegas, Marc-André Oceau, Harald E.N. Bersee, Ali Yousefpour, 'Continuous resistance welding of thermoplastic composites: Modelling of heat generation and heat transfer', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 70, pp. 16-26, 2015
- [4] Seong Su Kim, Wan Jin Kim, Yong Sik Jung, Yun Seon Lee, Seung A Song, 'Special Issue Paper: Fabrication and Characterization of the Carbon Fiber Composite Sheets', *The Korean Society for Composite Materials*, vol. 28, no. 4, pp. 168-175, 2015.
- [5] Genevieve Palardy, Huajie Shi, Arthur Levy, Steven Le Corre, Irene Fernandez Villegas, 'A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 113, pp. 339-349, 2018
- [6] Yarlagadda, S., Fink, B.K., and Gillespie, Jr., J.W., "Resistive Susceptor Design of Uniform Heating During Induction Bonding of Composites", *Journal of Thermoplastic Composites*, pp. 321– 337, 1998
- [7] Yousefpour, A., Hojjati, M. and Immarigeon, J.-P., "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 303–341, 2004
- [8] O'Shaughnessey, Patrice Gouin, et al., 'Modeling and Experimental Investigation of Induction Welding of Thermoplastic Composites and Comparison with Other Welding Processes', *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 21, pp. 2895–2910, 2016
- [9] Yongsung Kwon, Duckhwan Bae, Minyoung Shon. "Comparison of Heating Behavior of Various Susceptor-embedded Thermoplastic Polyurethane Adhesive Films via Induction Heating." *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 30, No. 3, pp. 181-187, 2017
- [10] Rouhollah Dermanaki Farahani, Mathieu Janier and Martine Dubé, "Conductive films of silver nanoparticles as novel susceptors for induction welding of thermoplastic composites", *Nanotechnology*, Vol. 29, No. 12, 2018
- [11] Back, I., & Lee, S. (2020). A Study of Films Incorporating Magnetite Nanoparticles as Susceptors for Induction Welding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic. *Materials*, 13(2), 318.