

PEM 연료전지용 복합재 분리판의 제작비용 비교: 압축성형과 기계식 가공

이 희섭¹⁾, 추 원식²⁾, 강 윤철³⁾, 강 혁진⁴⁾, 안 성훈*⁵⁾

Comparison of fabrication cost of composite bipolar plates for PEM fuel cell: compression molding and machining

Hee-Sub Lee, Won-Shik Chu, Yun-Cheol Kang, Hyuk-Jin Kang, and Sung-Hoon Ahn *

Key words : PEM fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Bipolar plate(분리판), Graphite particles(흑연입자), Compression molding(압축성형), Machining(기계식 가공), Cost estimation(비용 평가)

Abstract : The fuel cell is one of the promising environment-friendly energy sources for the next generation. The fuel cell provides good energy efficiency above 40% without pollution or noise. Different fuel cell types are usually distinguished by the kind of electrolyte. Among these, the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has advantages of high power density, low operating temperature, relatively quick start-up, and rapid response to varying loads. The bipolar plate is a major component of the PEM fuel cell stack, and it takes a large portion of stack volume, weight and cost. In this study, as alternative materials for bipolar plate of PEM fuel cells, graphite composites were fabricated by compression molding and by machining. Graphite particles mixed with epoxy resin were used as the main substance to provide electric conductivity. Flow channels were fabricated by compression molding with design of experiments (DOE) to evaluate moldability. The cost for compression molding of graphite-composite bipolar plate was compared with machining cost to make the same bipolar plate.

1. 서론

최근 연료전지는 미래의 친환경 대체에너지원으로 주목 받고 있다. 연료전지는 40% 이상의 높은 에너지 효율과 무공해, 무소음 등의 특징을 가지고 있으며, 보통 사용되는 전해질에 따라 여러 종류로 구분된다. 그 중에서 고분자 전해질 연료전지는 높은 전력밀도와 낮은 반응온도, 빠른 시동조건 및 지속적인 연구를 통해 축적된 기술을 배경으로 다양한 분야에서 적용이 기대된다.

연료전지 스택(Stack)은 수소와 산소의 화학 반응을 통해 전기를 발생시키는 여러 개의 단위 전지가 직렬로 적층된 형태를 이루고 있다 (Fig. 1). 연료전지 시스템의 가격 중 스택이 약 50% 정도의 비중을 차지하고 있으며, 그 중에서 분리판(Bipolar plate)은 스택 가격의 약 25% 이상을 차지하고 있다. 분리판은 다음과 같은 기능을 담당하고 있다. 스택 내에서 (1) 각각 셀 간의 분리, (2) 연료와 공기, 그리고 물이 지나가는 통로 역할, (3) 단위전지 속에서 전류를 흐르게 하는

역할, (4) MEA (Membrane Electrode Assembly)의 지지 역할 등 다양한 기능을 담당하고 있다⁽¹⁾.

이러한 다양한 조건을 만족시키기 위해 여러 가지 소재를 사용하여 분리판을 제작하려는 연구가 진행되고 있다⁽¹⁻²⁾. 고분자 전해질 연료전지의 최근 연구동향을 살펴보면 연료전지의 원리나

- 1) 서울대 기계항공공학부 대학원
E-mail : hs0896@snu.ac.kr
Tel : (02)880-9073 Fax : (02)880-9073
- 2) 서울대 기계항공공학부 대학원
E-mail : wschu79@snu.ac.kr
Tel : (02)880-9073 Fax : (02)880-9073
- 3) 서울대 기계항공공학부 대학원
E-mail : romeo.kang@gmail.com
Tel : (02)880-9073 Fax : (02)880-9073
- 4) 서울대 기계항공공학부 대학원
E-mail : kaen010@snu.ac.kr
Tel : (02)880-9073 Fax : (02)880-9073
- 5) 서울대 기계항공공학부
E-mail : ahnsh@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7110 Fax : (02)883-0179

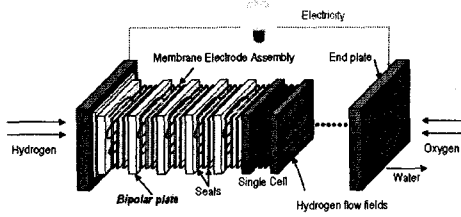


Fig. 1 Schematic of PEM fuel cell stack

기본 기술에 대한 연구보다는 다양한 분야에 조속한 상용화를 위해 제품의 가격을 낮추려는 방향으로 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 흑연입자와 에폭시 수지를 혼합하여 복합재판을 제작하고, 그 판에 채널을 압축성형 및 기계식 가공으로 제작하였다. 이렇게 제작된 복합재 분리판의 압축성형 비용과 기계식 가공에 소요된 비용을 평가해 보았다⁽³⁾.

2. 복합재 분리판의 제작

복합재 분리판은 압축성형, 기계 가공, 사출 성형 등으로 제작할 수 있다. 일반적으로 일정 기간 동안 분리판의 생산수가 증가할수록 압축성형과 사출성형 방법이 기계식 가공에 비해 경제적이다. 본 실험에서는 흑연입자와 에폭시로 제작된 복합재 분리판을 압축성형과 기계 가공 방법으로 제작하였다.

2.1 사용재료

실험은 18 μ m 정도의 입자크기에 전기적 전도성이 좋은 흑연입자(P-15)와 열경화성 수지인 에폭시수지(Epoxy resin)를 사용하였다. 에폭시수지(YD-128)와 경화제, 경화촉진제는 (주)국도화학의 제품을 사용하였으며(Table 1), 흑연입자는 (주)카보닉스의 제품을 사용하였다(Table 2, Fig. 2).

Table 1 Properties of epoxy resin

Properties	Epoxy resin (YD-128)
Density	1.17g/cc
Viscosity	11500-13500 cps at 25 $^{\circ}$ C

Table 2 Properties of graphite particle

Properties	Graphite particle (P-15)
Density (Apparent bulk density)	0.9g/cm 3
Diameter	18.8 μ m

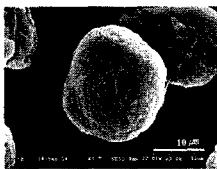


Fig. 2 SEM (Scanning Electron Microscope) picture of graphite particles used in this study

2.2 압축성형

흑연입자 복합재의 압축성형제작 방법은 다음과 같다. 우선, 에폭시수지와 경화제 그리고 경화촉진제를 일정한 비율로 혼합한 뒤 흑연입자를 90%의 부피비율로 첨가하여 재료를 준비한다. 다음으로 압축성형을 위한 채널이 가공된 금형을 제작하고 (Fig. 3-b), hot-press 장비를 이용하여 적절한 압력과 온도를 가하여 제작한다.

하지만 흑연입자 복합재를 압축성형으로 제작하기 위해서는 많은 변수들이 영향을 미치게 된다. 금형에 가공된 채널의 깊이, 넓이, 채널과 채널 사이의 간격 등이 영향을 끼칠 수 있으며, 또한 사용되는 장비의 조건 즉, 압력, 온도 등도 영향을 미칠 수 있다. 이런 조건들은 실험계획법 (Design of Experiments, DOE)을 통한 이전의 실험으로 압축성형에 적합한 조건을 찾았다⁽⁴⁾. 선택된 조건들을 살펴보면, 알루미늄 금형의 채널 형상은 채널 깊이는 1.0 mm, 채널 넓이는 2.0 mm, 채널과 채널사이의 간격은 1.5 mm, 모서리의 반지름은 0 mm이다 (Fig. 3-a). 그리고 압축성형의 조건은 약 14 MPa (2000 psi)의 압력과 120 $^{\circ}$ C의 온도를 15 분 동안 가하는 것이다.

알루미늄 금형은 SolidWorks를 이용하여 설계하였고, PowerMILL을 사용하여 가공공구 경로를 작성하였다. 마이크로 스테이지 장비를 사용하였으며 (Fig. 3-c), 가공시간은 약 4시간 정도 소요되었다. 가공에 사용된 공구는 1 mm 플랫 엔드 밀을 사용하였으며, 가공 조건은 spindle speed 는 15,000 rpm, feed rate 는 1 mm/s, depth of cut 은 0.7 mm 였다.

2.3 기계가공

기계 가공은 분리판을 제작하기에 효과적인 방법으로 기계 가공을 위해 마이크로 스테이지 장비를 이용하였다. 스테이지를 제어하기 위해 PMAC2 (Delta Tau Systems Inc.)를 사용하였으며, Z 축의 이동과 가공 상태를 확인하기 위해 디지털 현미경도 설치하였다 (Fig. 3-c).

흑연입자 복합재 분리판을 기계 가공으로 제작하기 위해 우선 압축성형에서 재료를 준비한 것과 마찬가지로 흑연입자에 대해 에폭시 수지를 10%의 부피비로 혼합하였다. 그리고 채널이 가공되지 않은 알루미늄 평판 금형을 이용하여, hot-press 장비로 압력과 온도를 가하여 복합재판을 제작하였다. 그 후 원하는 채널형상을 마이크로 스테이지로 복합재 판에 가공하였다. 복합재 분리판 채널형상 설계는 SolidWorks를 사용하

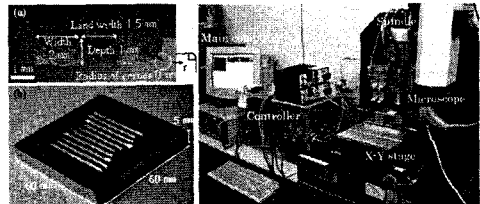


Fig. 3 Selected channel parameters of the mold by DOE (Design of Experiments)

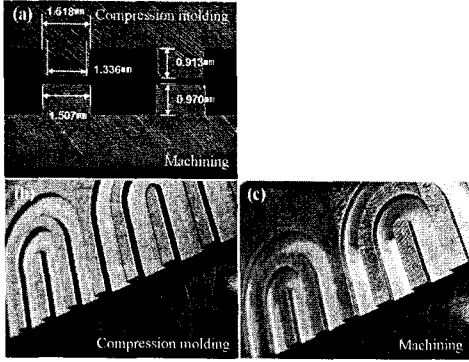


Fig. 4 Composite bipolar plate fabricated by compression molding and by machining

였으며, 가공공구 경로는 PowerMILL로 생성하였다. 가공 시간은 약 15분 정도 소요되었으며, 가공에 사용된 공구는 2 mm 플랫 엔드밀을 사용하였다. 그 밖의 가공 조건은 spindle speed는 12,000 rpm, feed rate는 3 mm/s, depth of cut은 2 mm 였다.

Fig. 4는 흑연입자 복합재 분리판을 압축성형과 기계식 가공으로 제작한 형상을 보여주고 있다. 압축성형으로 제작된 분리판의 경우 채널 모서리의 각이 둔해진 것을 확인할 수 있었으며, 금형 형상에 비해 작게 성형되어 있었다. 이에 비해 기계식 가공된 분리판은 보다 정밀한 형상을 얻을 수 있었다.

3. 비용 평가

3.1 비용 평가 모델

복합재 분리판 제작 시 총 비용은 일반적으로 식 (1)과 같이 크게 네 가지 요인으로 이루어져 있다.

$$C_{total} = C_w + C_p + C_m + C_t \quad (1)$$

여기서 C_{total} 은 개당 총비용, C_w 는 재료비용, C_p 는 준비비용, C_m 은 절삭 및 압축성형 비용, C_t 는 공구비용이다. 공작물의 준비와 가공을 위한 장비설정 등에 소요되는 비용은 준비비용으로 설정하였다.

첫 번째 항인 재료비용 C_w 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다⁽⁵⁾.

$$C_w = V \rho C_{um} \quad (2)$$

여기서 V 는 필요한 재료의 부피 (m^3)이고, ρ 는 재료의 밀도 (kg/m^3), 그리고 C_{um} 는 원재료의 단위 무게 당 비용 (W/kg)이다.

둘째 항인 C_p 는 준비비용으로 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$C_p = WT_p \quad (3)$$

여기서 W 는 단위시간당 작업자의 임금이고, T_p 는 재료와 기계의 준비에 소요되는 시간이다. 셋째 항인 절삭 및 압축성형 비용 C_m 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_m = T_m (W + B_m) \quad (4)$$

여기서 T_m 은 제품 하나를 가공하는데 소요되는 순수절삭시간과 압축성형시간이고, W 는 단위시간당 작업자의 임금, B_m 은 기계사용에 따른 감가상각비와 보수비 등이 포함된 단위시간당 기계사용에 대한 간접비용으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. machine_overhead 항은 기계의 간접비로서 동력소모비와 유지보수 비용을 포함하는 값으로 보통 100 ~ 300%로 책정한다. 또한 M_t 는 사용한 장비의 감가상각비로 식 (6)으로 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$B_m = M_t + M_t \left[\frac{\text{machine_overhead}(\%)}{100} \right] \quad (5)$$

$$M_t = \left[\frac{\text{initial_purchase_cost_of_machine}}{\text{working_hours} \times \text{repayment_period}} \right] \quad (6)$$

마지막 항인 C_t 는 공구비용이다. 공구비용은 가공에 소모된 공구의 비용을 산정한 값으로 식 (7)과 같이 정의할 수 있다. 공구 가격은 YG-1, OSG Korea, Sinki Micron에서 참고 하였다.

$$C_t = y \left[\frac{T_m}{T} \right] \quad (7)$$

여기서 y 는 초기공구 구입비용을, T_m 은 가공에 소요된 시간, 그리고 T 는 평균공구수명을 나타낸다. 공구수명을 나타내는 대표적인 식은 Taylor's tool life equation으로 식 (8)과 같이 절삭속도에 대한 공구수명으로 나타낸다.

$$T = \left[\frac{C}{V} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

여기서 V 는 절삭속도 (m/min)이고, C 는 상수로서 공구 수명 T 가 1 min 일 때의 V 값이다. 그리고 n 은 공구의 재질에 따라 실험을 통해 결정되는 상수이다.

3.2 비용 평가 사례 연구

식 (1) - (8)을 이용하여 흑연입자 복합재 분리판을 압축성형과 기계식 가공 방법으로 제작하는데 소요되는 비용을 산출하였다. 작업자의 임금은 한국노동부의 통계자료를 사용하였다. Table 3은 압축성형과 기계식 가공을 통해 제작된 복합재 분리판의 제조비용을 비교한 표이다. 복합재 분리판을 압축성형으로 제작했을 경우, 약 63,000 원이 소요되었고, 기계 가공으로 제작했을 경우, 약 23,000 원이 소요되어 압축성형 비용이 기계가공 비용에 비해 약 3배 정도 높았다. 하지만 위의 경우는 복합재 분리판을 한 개 생산할 때의 비용 평가이고, 대량으로 제작할 경우 압축성형 비용이 더 줄어 들 것이다. 예를 들어 1000개의 분리판을 생산한다고 가정할 때, 압축성형으로 제작 시, 약 5,000 원이 소요되며, 기계 가공의 경우, 약 8,500 원이 소요되게 된다 (Fig. 5). 참고로 상용으로 판매되고 있는 분리판은 150,000 원 정도 이다.

Table 3 Cost estimation of compression molded and machined bipolar plate (For the first part)

Item	Compression molding		Machining		Commercial plate	
C_m (Material cost)	Graphite (₩5,000 /kg) Epoxy (₩4,000 /kg) Aluminum (₩7,500 /kg)	₩92 ₩10 ₩4,668	Graphite (₩5,000 /kg) Epoxy (₩4,000 /kg) Aluminum (₩7,500 /kg)	₩92 ₩10 ₩4,668	Graphite plate Machining	
Subtotal		₩4,770		₩4,770		
C_p (Preparation cost)	T_p , mixing T_p , fixture	30 min 10 min	T_p , mixing T_p , fixture	30 min 10 min		
Subtotal	W	₩6,550 / hr	W	₩6,550 / hr		
C_a (Machining and molding cost)	T_a , part machining T_a , molding T_a , top mold machining T_a , base mold machining	- 15 min 240 min (channel) 30 min	T_a , part machining T_a , molding T_a , top mold machining T_a , base mold machining	15 min 15 min 15 min 30 min		
	M_a , part machining M_a , molding M_a , top mold machining M_a , base mold machining	- ₩227 ₩1,710 ₩1,710	M_a , part machining M_a , molding M_a , top mold machining M_a , base mold machining	₩1,710 ₩227 ₩1,710 ₩1,710		
	B_a , part machining B_a , molding B_a , top mold machining B_a , base mold machining	- ₩568 ₩4,275 ₩4,275	B_a , part machining B_a , molding B_a , top mold machining B_a , base mold machining	₩4,275 ₩568 ₩4,275 ₩4,275		
	W	₩6,550 / hr	W	₩6,550 / hr		
	Subtotal		₩50,490			₩12,600
	C_t (Tool cost)	y (1 mm) / (6 mm)	₩11,500 / 12,000	y (2 mm) / (6 mm)		₩11,500 / 12,000
		T_a , part machining T_a , molding T_a , top mold machining T_a , base mold machining	- 240 min (1 mm) 30 min (6 mm)	T_a , part machining T_a , molding T_a , top mold machining T_a , base mold machining	15 min (2 mm) 15 min (2 mm) 30 min (6 mm)	
		C (1 mm) / (6 mm)	500 / 800	C (2 mm) / (6 mm)	600 / 800	
		V (1 mm) / (6 mm)	47.1 / 75.4 m/min	V (2 mm) / (6 mm)	75.4 / 75.4 m/min	
		n (carbide)	0.35	n (carbide)	0.35	
T (1 mm) / (6 mm)		853 / 852 min	T (2 mm) / (6 mm)	375 / 852 min		
Subtotal		₩3,660		₩1,340		
Total		₩63,290 /ea		₩23,080 /ea	₩150,000	

4. 결론

후기

본 연구에서는 흑연입자 복합재를 압축성형방법과 기계식 가공 방법을 적용하여 제작하고, 각각의 소요 비용을 산출해보았다.

기계식 가공이 압축성형에 비해 정밀하게 제작되었으나, 압축성형으로 제작한 분리판의 형상도 실제 분리판으로 사용가능한 수준으로 제작되었다. 일반적으로 분리판의 생산 개수가 증가할수록 기계식 가공에 비해 압축성형이 더 경제적이다. 실험의 결과로도 알 수 있듯이, 분리판이 대량생산될 경우 압축성형이 기계 가공에 비해 경제적이고, 보다 적절한 방법으로 평가된다.

본 연구는 서울대학교 ERC (Micro Thermal System Research Center)와 2기 두뇌한국21사업의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Mehta V, and Cooper J S, 2003. "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing," Journal of Power Sources, Vol. 114, pp. 32-53.
- [2] Heo S I, Yun J C, Jung C K, and Han K S, 2004. "Fabrication and Characterization of graphite reinforced conductive polymer composites," Proceeding of the KSCM Spring annual Meeting, pp. 147-150.
- [3] Ostwald P F, 2002 "Engineering cost estimating," pp. 250-279
- [4] Lee H S, Kim H J, Kim S G, and Ahn S H, 2006. "Evaluation of graphite composite bipolar plate for PEM fuel cell," The 3rd International Conference on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology.
- [5] Shehab E M, and Abdalla, 2001. "Manufacturing cost modeling for concurrent product development," Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17, pp. 341-353.

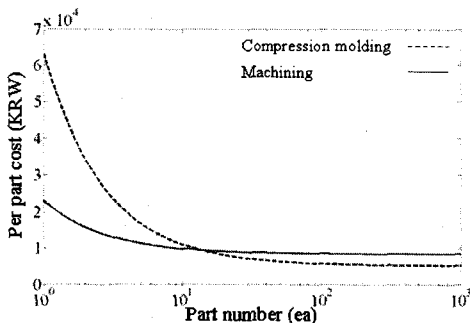


Fig. 5 Per part cost of compression molding and machining