

용접과 밀링을 이용한 쾌속조형법의 응용과 열변형 해석

류연화*, 최우천*, 송용억**, 박세형**, 조정권**, 신승환**

Application of Rapid prototyping for welding and milling, and Heat deformation for FEM

Yenwha Ryu*, Woocheon Choi*, Yong-Ak Song**, Sehyung Park**, Jungkwon Cho**

ABSTRACT

Rapid prototyping for welding and milling is a hybrid approach that makes use of welding as additive and conventional milling as subtractive technique. For two years this concept has been used to verify manufacturing mold and mechanical parts successfully. In latest new fabrication methods, For example, manufacturing mold for two sort of materials and shell fabrication, have been applied to the concept in KIST. This methods will be an alternative proposal in rapid prototyping. Metal deposition for welding causes the part to deform. It is a handicap in our proceeding. To overcome this problem, in this paper, we represent an optimal welding path for FEM analysis. Eight paths are tried to this and the value of deformation is average and standard deviation in four points. Then we can compare with eight cases and select the optimal path.

Key Words . Rapid prototyping(쾌속 조형법), mold(금형), moving heat source, heat deformation(열변형), FEM(유한요소해석)

1. 서론

전통적인 쾌속 조형법은 합성수지, 종이 같은 강도가 약한 재료를 이용하기 때문에 만들어진 파트가 직접 제품으로 사용되지 못하고 디자인, 설계 검증용으로만 이용되었다. 그래서 최근에 금속 재료를 적층함으로써 강도를 향상시키는 직접식 방법이 활발히 연구되고 있는데 대표적인 것이 한국 과학 기술 연구원에서는 arc welding을 이용한 새로운 공정을 개발하였다. 2차원 단면 데이터를 바탕으로, 각각의 단면을 아크 용접과 밀링을 이용하여 제품의 실제 형상에 가깝게 적층한 후, 최종적으로 정삭 가공을 해줌으로써 완성된 제품을 얻게 된다. 금속 분말에 비해서 적층시간이 대폭 줄어들 뿐 아니라 후처리는 한번의 정삭 가공만으로도 충분하다. 또한 기존의 제작 방법으로는 불가능한 역구배가 있는 형상이나 내부에 공간이 있는 형상을 만들 수

가 있다. 또한, 새로운 적용 분야를 구상했는데, 첫 번째는 이중금속을 이용한 금형제작이다. 형상의 외부는 경도, 강도가 높은 stainless로 내부는 연장으로 만들어 우수한 내구성을 갖는 제품을 만들 수가 있다. 두 번째는 shell 방식으로 금형을 제작하는 것인데, 먼저 형상의 외각만 적층한 후 shell을 만들고 그 내부는 용융 금속을 채워서 응고시키는 방법이다. 이는 금형 제작의 시간을 획기적으로 단축시킬 수가 있을 것이다.

용접은 높은 열을 발생시킨다. 보통 형상을 만드는 시간은 수 십분에서 길게는 몇 시간씩 중단 없이 계속되어 열에 의한 형상과 소재의 변형이 심각하게 대두되게 된다. 물론 정삭 과정을 통해 오차를 대부분 잡지만 형상 왜곡에 의한 미가공, 과도한 가공이 생길 우려가 있으며, 더욱이 모재는 정삭 과정이 없어 더 큰 문제를 발생시킨다. 이는 형상을 모재에서 분리할 때 절단 기준면의 힘으로 정확한 형상을 얻을 수 없게 만든다. 이 문제를 해결하기 위해 모재의 열변형을 유한요소 해석법을

* 고려대학교 기계공학과

** 한국과학기술연구원 cad/cam 센터

이용해 다양한 용접 경로에 따른 차이를 분석해 보고 변형이 가장 적은 최적 용접경로를 찾고자 한다. 또한 소재의 열변형으로 형상의 열변형 정도를 짐작 할 수가 있다. 파트는 수많은 용접 비드와 층으로 이루어져 있어 열변형 해석이 거의 불가능하다. 그래서 본 연구는 8 가지 용접경로에 따른 원형 소재의 열변형을 원주에 있는 4 군데 지점의 평균값과 표준 편차를 구해 최적의 용접 경로를 찾고자 한다

2. 용접과 밀링을 이용한 레속 조형법의 응용

2.1 이종금속을 사용한 파트제작

일반적으로 기계부품들은 부위에 따라서 받는 하중의 크기는 다르다 또한, 부품 표면에서 대부분의 마찰이 발생함으로 표면은 더 높은 경도가 요구된다. 이는 부품 수명에 직접적으로 영향을 미치게 된다 그래서 부위에 따른 외부조건에 잘 대응하는 소재를 쓴 부품을 만들면 보다 우수한 기계적 특성을 갖는 경량의 제품을 만들 수가 있다. 그림 1(a)은 연강으로 외각은 청동으로 만든 스프라킷 부품이다. 크기 170x170x25mm, 총 제작 시간은 2 시간이 소요되었다. 1 번 용접기는 연강외이어, 2 번 용접기는 청동외이어가 사용되었으며, 소프트웨어에서 각 용접기를 내부, 외각을 따로 용접하도록 컨트롤한다. 외각 용접시 청동의 용접 불안으로 그림상에서도 볼 수 있듯이 연강 단일 소재에 비해 많은 스파트가 발생한 것을 볼 수가 있다. 또 정삭 과정에서 청동에 적합한 가공틀을 부과적으로 추가해야 하는 문제점이 있다

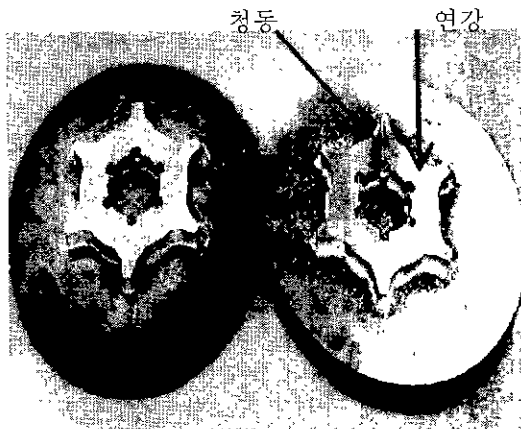


Fig 1(a) 청동과 연강을 사용한 스프라킷

그림 1(b)은 내부는 연강으로 외각은 경도가 높은 스테인레스스틸로 만든 직육면체 형상이다 크기는 50x50x30mm, 제작 시간은 30 분이 소요되었다. 적층 높이가 0.8mm, 비드 간격 2.7mm 이며, 각 단면마다 내부를 먼저 용접하였다 외각은 한 개의 비드로 이루어졌고, 외각 용접 시작 부분에서 스테인레스의 폭이 두텁다.

그림 1(c)은 단면을 100 배 확대해서 두 금속의 경계부분을 찍은 사진이다 흰색은 스테인레스 스틸, 검은색은 연강 조직인데, 경계가 뚜렷하게 나타난다. 또한 그림상으로 연강이 먼저 만들어 졌고 후에 스테인레스가 침투한 모습을 볼 수가 있다. 경도는 흰색 부분이 377.9HV, 검은색 부분은 265.7HV 로 측정되었으며, 가로로 난 흰색 띠가 있는 부분에서는 두 값의 중간치가 측정되었다. 이것으로 흰색부분이 스테인레스이고 검은색이 연강이라는 사실을 검증할 수가 있다. 실험전에 우려했던 두 금속사이의 접합성 문제나 응고될 때 서로 다른 수축률 때문에 생기는 크랙은 발견 할 수가 없었다 그러나, 앞의 연강과 청동을 사용한 실험에서는 수축률 때문에 생기는 크랙이 시각적으로도 발견된다 이는 종류가 다른 소재를 사용할 때 서로가 잘 융합할 수 있는 성질을 가진 금속을 선별할 필요가 있다는 것을 보여 주며, 연강과 스테인레스는 그 좋은 예로 생각된다

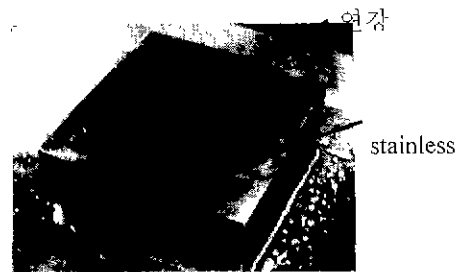


Fig.1(b) 연강과 stainless steel 의 이종금속 형상



Fig.1(c) 이종 금속 파트의 단면을 확대한 사진

2.1 Shell 방식의 금형 제작

그림 2(a)는 필터 커버중 코어를 shell 방식을 이용해 만드는 과정을 보여준다. 크기 190x150x50mm. 외벽은 4 줄씩 0.8mm 높이로 적층했으며, 용융금속은 아연이 사용되었다. 형상의 대부분을 차지하는 커버 부분만 제작하고, 나머지는 정삭할때 모재를 이용해 만들어진다. 제작 시간은 적층 1 시간, 정삭 2 시간이 소요되었고, 내부 형상의 적층 공정이 없어 전통적인 방법보다 훨씬 시간이 단축되었다

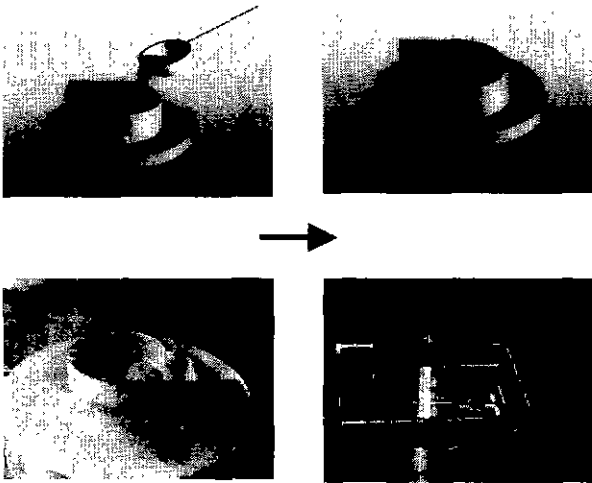


Fig 2(a) shell 방식으로 만든 필터커버의 코어 금형

그림 2(b)는 필터의 캐피터를 제작한 모습이다. 크기는 190x150x60mm, 적층 높이는 매 단면마다 0.8mm, 제작 시간은 적층 1 시간, 정삭 2 시간이 소요되었다. 코어와 다르게 외벽은 2 줄만 용접했으나 우려했던 흘러내리는 현상은 발생하지 않았다. 용융물은 아연 금속이며, 형상의 일부는 모재를 사용하였다. 필터 금형을 shell 방식으로 제작하면서 공정상 문제점은 발견되지 않았다. 그러나, 외벽과 아연금속 경계에서 약간의 빈공간이 생기는 결함이 향후 해결과제로 남았다

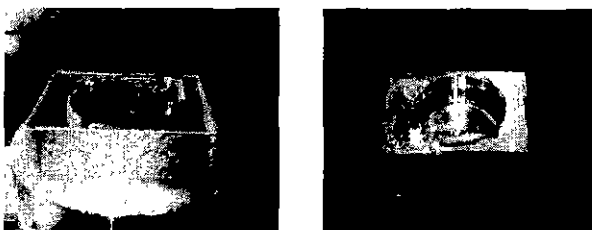


Fig 2(b) shell 방식으로 만든 필터커버의 캐피터

3. 열변형 해석

3.1 modeling

실제 사용하는 모재는 원형의 모양을 갖고 있고, 지름 270mm, 높이 30mm 인 규격을 이용한다. 그러나, 여기서는 node 수를 줄이고 해석 시간을 단축시키기 위해 지름 150mm, 높이 10mm 의 원판을 설계 했다. 총 node 수는 1872 개, element 수는 1347 개이며, element 는 8 개의 node 를 가진 육면체이다. 높이 방향으로 3 층으로 구성되어 있으며, 원판의 중심 부분은 용접 경로를 설정하기 위해 80 개의 3x3mm element 로 구성된 60x12mm 의 직사각형 형상으로 이루어져 있다. [그림 3(a)] 또한 열변형 측정지점은 그림 3(b)와 같이 모재의 원주에 12 시, 6 시, 9 시, 3 시의 4 개 지점을 선택했다.

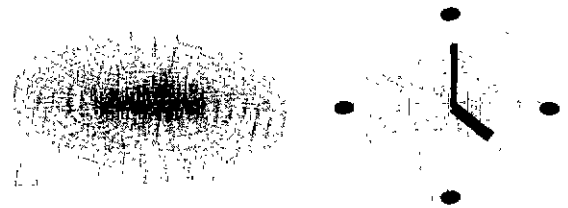


Fig.3(a) 해석 모델 Fig.3(b) 열변형 측정지점

본 공정에서 용접될 때 최적 비드 폭은 약 3mm 정도이고 대부분의 열이 여기에 집중된다. 물론 아크 영역은 이보다 좀 더 크지만 그 양이 미미함으로 무시 할 수가 있다. 그리고, 용접에 의해 공급되는 에너지는 288J/mm²s 이며, 이는 용접기에 제공되는 에너지에 효율을 곱하고 단위면적으로 나누어서 산출하였다. 전압과 전류는 공정 변수 실험에서 구한 최적 값인 18V 에 125A 를 적용했다. 또한 용접 경로를 따라 움직이는 열원을 적용하기 위해 81 개의 step 으로 나누었다. 80 개의 element 각각에 한번의 step 이 적용되며 0.14 초 동안 열원이 머무른다. 열원이 지나가는 거리는 240mm, 총 열이 가해 지는 시간은 11.2 초로 공정상에서 용접속도 1200mm/min 와 거의 일치 시켰다. 그리고, 마지막 남은 한 개의 step 은 냉각되는 부분으로 완전한 냉각을 위해 60000 초의 시간을 설정 했다 그림 3(c) 은 8 개의 용접 경로를 보여 준다. 모든 경우는 열원이 가해지는 시간, 냉각 시간 그리고, 전체적으로 만들어지는 형상이 같게 설정 하였고, 단 방향, 양 방향 경로, 길고 짧은 경로, 내외부 용접 순서를 기준으로 나누었다. 아래의 8 가지 경로 외에 더 많은 경우의 수가 있으나 소프트웨어에서 실제로 구현 할 수 있는 용접 경로를 고려해서 적용하였다.

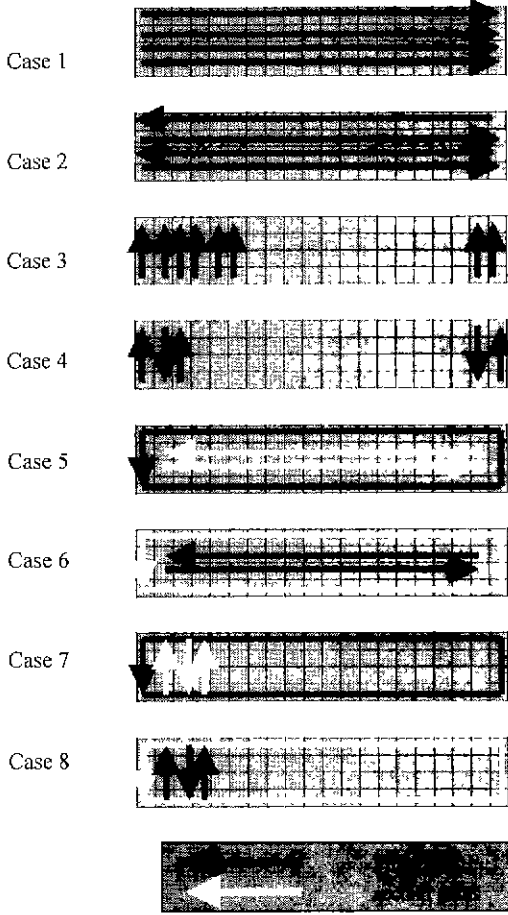


Fig.3(d) 8 가지 경우의 용접 경로

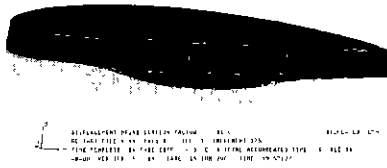


Fig.3(e) 일반적인 모재의 열변형 형태

Table 1 은 8 가지 경우의 12, 6, 9, 3 시 지점의 u_3 (z 방향 변형)의 최종 해석 결과값을 평균과 표준편차를 mm 단위로 나타내었다. 일반적으로 case 8 을 제외하고 12 시 지점이 가장 변형이 심하게 나타났고, 6 시 지점도 case 1,2 외의 경우 높은 변형 값이 측정되었다. 또한, 평균 변형을 볼 때 case 4 가 가장 높은 수치를 나타내고 있고, 반면 case 1 이 가장 낮은 수치를 보여 준다. 표준편차는 case 1 이 가장 높고, case 5 가 가장 낮게 나타났다. 8 가지 경

우로 나눈 기준인 단 방향, 양 방향 경로, 긴 축과 짧은 축 경로, 내외부 용접 순서와 유무에 따른 변형을 고려해 볼 때 단 방향 경로인 case 1, 3 이 양 방향 경로인 case 2, 4 보다 전체적인 변형이 조금 덜 일어났으며, 표준편차에서는 양 방향 경로가 더 작게 나타났다. 또한 긴 축으로 경로를 설정한 case 1, 2 보다 짧은 축으로 경로를 설정한 case 3, 4 가 0.1mm 이상 더 변형이 심하게 일어났다. 이것은 전체 변형의 30%에 이르는 값으로 모든 변수 중 가장 뚜렷하게 나타나는 요소임을 알 수 있다. 게다가 case 7, 8 이 case 5, 6 보다 더 많이 변형한 것을 볼 때 더욱 확실해진다. 외각을 용접한 case 5~8 의 경우 평균 변형에서는 뚜렷이 구별되는 특징이 없지만, 표준편차에 있어서는 외각이 없는 case 1~4 에 비해 훨씬 낮은 값을 보여 준다.

	12	6	9	3	평균	표준편차
	0.4648	0.1456	0.2524	0.2587	0.2804	0.1335
	0.4872	0.1563	0.2630	0.2635	0.2925	0.0920
	0.5270	0.4008	0.2931	0.3447	0.3914	0.1355
	0.4631	0.4711	0.2975	0.3458	0.3944	0.1145
	0.4085	0.2582	0.2445	0.2694	0.2951	0.0696
	0.3592	0.3332	0.2750	0.2882	0.3139	0.0774
	0.4127	0.3799	0.2977	0.2724	0.3407	0.0688
	0.3500	0.3897	0.2865	0.3047	0.3327	0.0776

Table.1 네 군데 지점에서의 u_3 방향의 평균변형과 표준편차

	12	6	9	3
	0.00165	-0.00025	-0.0205	-0.0231
	-0.0450	0.04593	0.00072	0.00035

Table.2 case4 의 각 지점의 u_1, u_2 방향의 변형

Table 2 는 case 4 의 u_1, u_2 방향의 변형을 측정 한 값이다. 여기에서 u_1, u_2 (xy 방향) 변형이 u_3 에 비해 매우 작다는 것을 알 수가 있다. 나머지 경우에서도 무시할 수 있을 정도로 작은 결과가 나왔으며 결론적으로 모재의 끝부분 4 개의 지점의 변형은 u_3 방향이 주된 요소라 하겠다.

4. 결론

용접과 밀링을 이용한 해석조형법은 바로 시작 단계에 적용될 수 있는 직접식 조형법으로 지금까

지 많은 실험을 통해 최적의 공정 변수를 구했고, 소프트웨어와의 연동도 안정적으로 구현 되었다 또한, 실제 금형을 제작해 성공적으로 사출 성형품을 만들어내기도 했다 제작 시간에 있어서도 전통적인 제작 방법보다 유리하다는 것을 보여 주었다. 그러나, 모든 종류의 제품을 만들기에 그 형상에 따라 불가능한 경우도 있다 그래서 새로운 응용 방법을 연구 했으며, 이중 금속으로의 금형 파트 제작, shell 방식의 금형 제작 그리고 용접 수리 분야에서 그 범위를 넓혀가고 있다. 그 중 이중 금속과 shell 방식은 성공적으로 적용되었다

보다 효과적인 공정 변수를 구하려면 철저한 해석 작업이 이루어져야 한다. 그래서, 한 쪽이 더 긴 직사각형 단면에 대해서 열원이 지나가는 시간과 총 거리가 같은 8 가지 용접 경로를 설정하고 모재의 열변형을 수행하였다. 용접 경로에 따른 열변형 특징은 다음과 같이 결론 내릴 수 있다

1. u1, u2 방향의 변형은 u3 방향의 변형에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다
2. 대부분의 경우 12 시, 6 시 방향의 변형이 3 시, 9 시 방향의 변형보다 더 크다
3. 양방향 경로가 표준 편차가 더 작다.
4. 긴 축 경로보다 짧은 축 경로가 변형이 훨씬 더 많이 일어난다.
5. 외각을 용접한 경우에 표준편차가 더 작아 진다.
6. 형상의 긴축 방향으로 용접 할 것인지, 짧은 축 방향으로 용접할 것인가가 경로를 설정하는 가장 중요한 변수가 된다.

이상의 해석 결과로 봤을 때 외각을 우선 용접하고 내부는 긴 축 방향으로 양방향 경로를 갖는 case 5 가 가장 적합한 용접 경로로 선택되었다. Case 5 는 평균 변형도 충분히 적고, 표준편차는 가장 낮은 결과를 보여 주고 있다.

앞으로는 본 공정이 응용될 수 있는 새로운 분야를 더 찾고, 쾌속조형법의 가장 큰 결점인 형상 오차를 줄이는 연구가 계속되어야 할 것이다

참고문헌

- 1 신승환, 박세영 “3 차원 용접과 밀링을 위한 공정 소프트웨어 개발”, 한국 정밀공학회 99 년도

- 2 J.-p Kruth, M.C Leu, “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping”, 48th CRIP General Assembly, Key note. 1998.
- 3 American Society for Metals, “ASM Metal Reference book”, 2th edition, 1983.
- 4 ASM International, “ASM Handbook”, Vol.2, 1993
5. Thermophysical Property Research Center, Purdue university, Thermophysical property of high temperature solid materials, 1967.
6. L.Troive, M.Nasstron, M.Jonsson, “Experimental and Numerical Study of Multi-Pass Welding Process of Pipe-Flange Joints”, Transaction of the ASME, Vol.120, 1998.