

아연 합금 웜기어의 중력 주조 공정을 위한 주조 방안 설계 및 해석에 관한 연구

A Study on the Gating System and Simulation for Gravity Casting of ZnDC1 Worm Gear

이운길¹, 김재현¹, 진철규^{2*}, 천현욱³

Un-Gil Lee¹, Jae-Hyun Kim¹, Chul-Kyu Jin^{2*}, Hyeon-Uk Chun³

〈Abstract〉

In this study, the optimum gating system was designed, and the two zinc alloy worm gears were manufactured in single process by applying a symmetrical gating system with 2 runners. The SRG ratio is set to 1 : 0.9 : 0.6, and the cross-sectional shapes such as sprue, runner and gate are designed. In order to determine whether the design of the gating system is appropriate, casting analysis was carried out. It takes 4.380 s to charge the casting 100%, 0.55 to 0.6 m/s at the gates and solidification begins after the casting is fully charged. The amount of air entrapment is 2% in the left gear and 6% in the right gear. Hot spots occurred in the center hole of the gear, and pores were found to occur around the upper part of the hole. Therefore, the design of the casting method is suitable for worm gears. CT analysis showed that all parts of worm gear were distributed with fine pores and some coarse pores were distributed around the central hole of worm gear. The yield strength and tensile strength were 220 MPa, 285 MPa, and the elongation rate was 8%. Vickers hardness is 82 HV.

Keywords : Casting Simulation, Gating System, Gravity Casting, Porosity

1 제1저자, 경남대학교 기계공학부, 4학년
E-mail: dldns1201@naver.com

2* 정회원, 교신저자, 경남대학교 기계공학부, 교수
E-mail: cool3243@kyungnam.ac.kr

3 공동저자, 해압테크(주), 연구원
E-mail: 1000magic@naver.com

1 School of mechanical engineering, Kyungnam University

2* School of mechanical engineering, Kyungnam University

3 HAEAM TECH CO., LTD

1. 서론

아연 합금은 비중은 7.14로 대부분 주조로 제조되는데, 그중 핫 챔버 다이캐스팅 (Hot chamber die casting)이 주로 적용된다. 합금 원소로 알루미늄과 구리를 첨가하며, 주조성이 향상되며, 표면상태도 매우 양호해지는 특성을 가진다[1]. 아연 합금은 녹는점이 낮아 금형 수명을 높고, 높은 유동성과 좁은 응고 범위로 얇은 부품까지 주물까지 제조가 가능하다[2-4]. 또한, 아연 합금은 살 두께가 10 mm 이상인 부품의 경우 사형 주조도 가능하다[5].

웜 기어는 screw action으로 인해 다른 기어에 비해 상대적으로 진동과 소음이 적어 정속한 운전이 가능하고, 다른 기어에 비해 큰 감속비를 얻을 수 있다[6].

제어 헤드 조립체는 워터젯(water jet) 추진 장치에 의해 고속 운항하는 소형 군용 선박 (Rigid-hulled inflatable boat)의 캡 콘솔(cab console)에 설치된다. 이 장치는 선체의 방향을 전환하는 조향 장치로서 스프링을 이용한 동력 전달 방식으로 웜과 웜기어의 구동 원리를 이용한다. 손잡이로 웜을 밀고 당길 때 웜을 둘러싼 스프링이 전진 및 후진하여 선체의 방향을 제어한다. 제어 헤드 조립체는 원활한 작동이 매우 중요하다. 그리고 해수 환경에서 구동되기 때문에 부식에 대한 저항도 커야 한다. 그래서 제어 헤드 조립체의 핵심 부품인 웜 기어는 내식성이 우수한 아연 합금의 재질이어야 한다. 또한, 원활한 방향 전환을 위해서는 치면부의 치절삭 가공이 매우 정밀하게 이루어져야 한다. 그래서 현재까지 제어 헤드 조립체는 전적으로 수입에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 제어 헤드 조립체의 핵심 부품인 웜기어를 국산화하기 위하여 설계, 해석, 제조 공정에 대한 일련의 과정들을 수행하였다. 웜기어

를 역설계하여 3D 모델링을 수행하였다. 내식성이 우수한 아연 합금을 중력 주조 공정을 통하여 웜기어를 제작하고자 주조방안 설계 및 주조 해석을 수행하였다[7]. 중력 주조 공정으로 웜기어를 제작한 다음 후공정으로 MCT(Machining Center Tool) 장비를 이용하여 치면부를 절삭 가공하였다. 주조된 웜기어의 기계적 물성을 조사하고자 인장시험 및 마이크로비커스 경도를 측정하였다.

2. 설계

2.1 3D 모델링

제어 헤드 조립체는 스프링을 이용한 동력 전달 방식으로 웜과 웜기어의 구동 원리를 이용하는 장치이다. 치면부는 치수 정밀도가 높아야 하므로 치면부를 제외한 웜기어의 형상은 중력 주조로 제작한다. 그리고 치면부는 주조된 웜기어를 MCT 장비를 이용하여 절삭 가공한다. 중력 주조 수행하기 위한 치면부가 없는 웜기어 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 웜기어의 형상은 원형의 디스크 형태이며, 지름 153.4 mm, 두께는 10.3 mm 이다. 웜기어의 중앙 구멍에는 레버가 결합되며, 구동시 구멍 주위에 하중이 집중되기 때문에 구멍 주위는 좀 더 두꺼운 28.8 mm 설계하였다. 웜기어의 부피는 139,800 mm³ 이며, 아연의 밀도를 적용하여 계산한 웜기어의 무게는 0.998 kg이다.

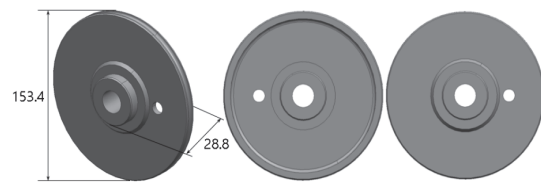


Fig. 1 3D modeling of worm gear

2.2 주조 방안 설계

월기어를 중력 주조 공정으로 제작하기 위해서는 주조방안 설계가 이루어져야 한다. 주조방안 모델링을 Fig. 2에 나타내었다. 두 개의 월기어가 한 번에 주조되는 방식을 적용하였다. 하주식 탕구계(Bottom gate system) 방식을 적용하여 월기어의 치면부 흡에서 먼저 주물이 유입되는 방식으로 설계하였다. 주물이 탕구를 통하여 유입되면 주입구를 지나서 월기어의 치면부 흡에 주물이 유입되고, 주물이 차오르면서 반대쪽 치면부 흡에 도달하면 월기어의 모든 부분이 주물이 채워지게 되는 방식이다. 탕도는 탕구를 기준으로 좌우로 배치하였다. 주입구는 오른쪽 탕도 및 왼쪽 탕도에 각각 2개씩 배치하였다. 즉, 왼쪽과 오른쪽의 탕구계의 모양이 동일한 대칭형이다.

월기어의 재질은 내식성이 우수한 아연을 적용하였다. 아연은 비중이 7.14로서 다른 금속에 비하여 상대적으로 무거운 금속이다. 그래서 탕구의 단면적이 가장 크고 주입구의 단면적이 가장 작은 가압 방식으로 단면 형상을 설계를 하였다. 탕구:탕도:주입구의 비는 1:0.9:0.6으로 설정하였다. 용융 금속이 탕구를 지나 주입구로 흘러갈수록 유속

및 압력이 높아지게 된다. 용융 금속을 금형의 공동부에 주입하는데 필요한 최소단면적 값이 결정되면, 설정한 탕구:탕도:주입구의 비 값으로부터 탕구, 탕도, 주입구의 단면적을 계산할 수 있다. 경험식으로 계산된 최소단면적은 145.63 mm²이다. 용융 금속의 주입시간 및 유효높이도 이론적 경험식으로부터 계산하였으며, 주입시간은 3.26초, 유효높이는 191.7 mm이다. 유효높이로부터 계산된 용융금속의 주입구 속도는 0.94 m/s 정도이다. 주입구 속도로부터 계산된 탕구 단면적은 242.71 mm²이며, 이 값으로부터 계산된 탕구의 직경을 17.58 mm이다. 제작의 편리상 탕구의 직경을 20 mm로 설정하였다. 주입속도로부터 계산된 탕도 단면적은 218.44 mm²이며, 이는 탕도의 총 단면적 값이다. 계산된 주입구 단면적은 36.41 mm²이며, 이는 주입구 한 개에 대한 단면적 값이다. 이론적 경험식으로 계산된 단면적 값으로부터 탕도 및 주입구의 단면적을 설계하였다.

탕도 및 주입구의 단면 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 탕도의 두께는 207.19 mm, 폭은 22.72 mm, 높이는 10 mm이다. 주입구의 두께는 11.35 mm, 폭은 3.57 mm, 높이는 20 mm이다. 제작의 편리상 탕도의 폭은 23 mm, 주입구의 폭은 5.3 mm으로 설정하였다.

압탕의 위치는 월기어의 치면부 흡에 설치하였다. 압탕의 직경은 20 mm이며, 높이는 83 mm

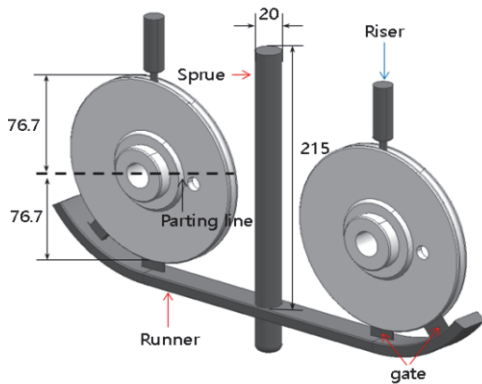


Fig. 2 Design of gating system for casting worm gear

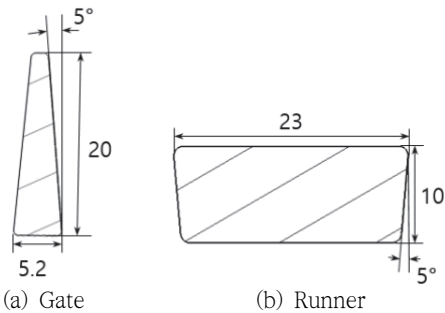


Fig. 3 Section shape

로서 탕구의 높이와 동일하게 설정하였다. 압탕은 왼쪽 웜기어에 한 개, 오른쪽 웜기어에 한 개를 배치하였다. 압탕의 부피는 $16,692 \text{ mm}^3$ 이며, 무게는 0.120 kg 이다.

3. 실험 조건

3.1 주조 해석 조건

주조해석을 수행하기 위해 MAGMA 5.1 S/W를 이용하였다. MAGMA의 Mesh 분할 방식은 FVM (Finite Volume Method) 방식이다. 한 축(Axis)에 대한 메쉬 개수가 최소한 3개 이상은 되어야 해석이 정확히 수행된다. 부피가 상대적으로 작은 주입구 부분은 두께 방향으로 최대한 메쉬를 작게 나누었다. Metal cell (cast)의 메쉬 개수는 465,300개이며, Material group (mold)인 Control volume의 메쉬 개수는 10,357,100개이다. 이 외의 모든 해석조건은 실험조건과 동일하게 설정하였다. 주물 소재는 ZnAl4Cu1 선택하였으며, 주물의 주입 온도는 520° C 로 설정했다. 몰드의 재질은 Green sand이며, 초기 온도는 40° C 로 설정했다. 주입 압력은 11.29 mbar 으로 약 50 mm 높이에서 주입하는 조건으로 설정하였다. Inlet의 지름은 12 mm 로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 해석에 이용된 Material group 사이의 열전달은 금형 내부와의 열전달 효과를 보다 크게 하고자 소재와 금형 사이를 $7,000 \text{ W/m}^2\text{K}$, 금형과 금형 사이에서는 $1,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 설정하였다.

3.2 주조 조건 및 분석 조건

주물 재질은 ZnDC1 아연합금을 이용하였다. ZnDC1의 주요 합금 조성은 알루미늄 $4.0 \text{ wt.}\%$,

구리가 $0.8 \text{ wt.}\%$ 이다. 설계된 주조방안으로 목형을 제작하였으며, 주물사로 주형을 제작하였다. 주형에 주입되는 주물의 온도를 520° C 로 맞추어 주물을 주입하였다. 주물 주입하고 24시간 후에 주형에서 주물을 탈취하였다. 쇼트 피닝을 작업을 거친 후 탕구계를 제거하는 후가공 작업을 시행하였다.

주조된 웜기어로부터 인장시편 및 경도 측정 시편을 제작하였다. 인장시편은 ASTM E8M Subsize 기준으로 제작하였다. 인장시험은 10톤 인장 시험기를 이용하여 3 mm/min 의 cross head 속도로 시험을 진행하였다. 경도는 마이크로비커스경도기로 압입 하중을 500 g 으로 설정하여 5회 반복 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 주조 해석 결과

Fig. 4는 주물이 유입되어 주입구를 통과할 때의 속도를 나타낸다. 1-1 주입구와 2-1 주입구는 1-2 주입구와 2-2 주입구보다 당구와 근접해 있기 때문에 유입되는 속도가 빠른 것을 확인할 수 있다. 초기에 유입되는 주물의 속도 분포가 게이트 위치에 따라 다른 형태를 나타내지만 유입되고 0.5초부터는 같은 양상을 나타낸다. 각 주입구마다 $0.55 \sim$

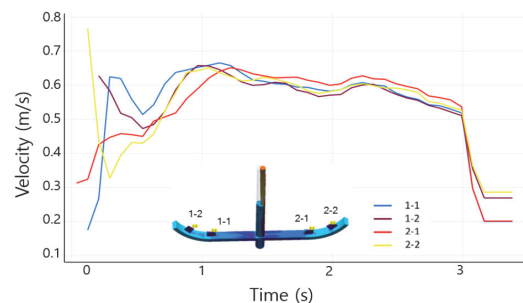


Fig. 4 Casting velocity at gates

0.6 m/s 속도로 주물이 주입구로 유입되며, 주입이 완료되기 직전에는 0.52 m/s가 되는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급된 이론적인 경험식으로 계산된 주입구 속도 0.94 m/s와는 다소 차이가 있다.

Fig. 5는 주물이 금형의 공동부에 주입되면서 충전되는 양상을 나타내는 온도분포에 대한 해석 결과이다. 투명색은 주물이 공동부로 채워지지 않은 상태를 나타내며, 주물의 온도에 따라 다른 색깔들로 표현된다. 퍼센트 값은 용융 금속이 공동부로 채워질 때 소요되는 시간을 나타낸다. 제품이 100% 충전되는데 소요되는 시간은 4.380 sec이며, 이론식으로 계산된 값(3.259 sec)보다 1.121 sec 정도 느리다. 주물이 주입구를 통과하면서 난류의 흐름이 발생하지 않고 순차적으로 공동부가 채워진다. 520 ° C의 주물이 금형의 공동부로 유입되어 76% 이상으로 충전되면 워기어의 좌우 끝 부분에서 온도 손실이 발생하여 대략 420 ° C가 되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 ZnAl4Cu1 소재의 액상선 온도는 389 ° C이므로 주물이 금형의 공동부로 완전히 채워졌을 때도 액상 상태인 것이다. 즉 주물이 금형의 공동부로 완전히 충전된 후에 응고가 시작된다. 이로써 설계된 주조방안은 워기어에 적합한 설계라 할 수 있다.

Fig. 6은 주물이 공동부에 주입될 때 유입되는

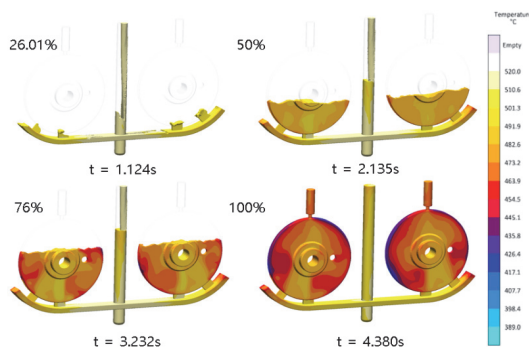


Fig. 5 Temperature distribution of casting

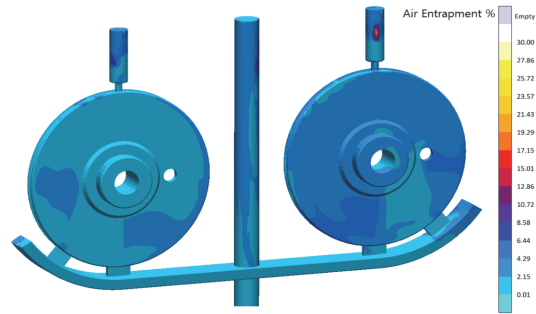
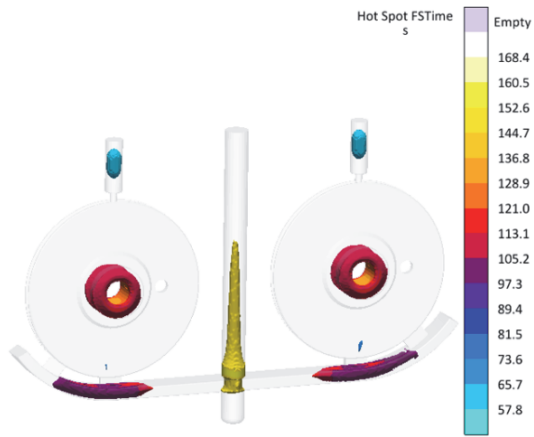


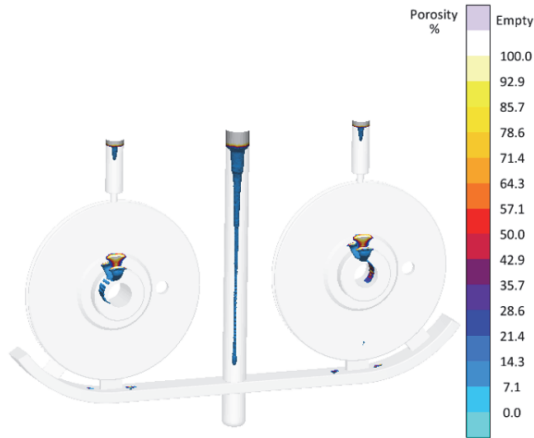
Fig. 6 Air entrapment in cavity

공기량을 나타내는 Air entrapment의 해석 결과이다. Air entrapment 양이 8% 이상이면 공기의 유입에 의한 기공 현상이 발생하게 된다. 왼쪽 워기어는 Air entrapment가 대략 2% 정도이지만, 오른쪽 워기어는 대략 6%이다. 오른쪽 워기어가 왼쪽 워기어보다 Air entrapment 양이 3배 정도 많지만, 8% 이하이므로 공기 유입에 의한 기공은 크게 발생하지 않을 것으로 판단된다. 다만 워기어 내에 미세한 기공들은 다소 발생할 것이라 여겨진다.

Fig. 7은 열점 및 기공에 대한 해석 결과이다. 열점은 주물이 응고되는 동안 특정 위치의 응고율이 다른 위치보다 느리다는 것을 나타낸다. 기공은 대개 열점이 발생하는 위치에서 발생하게 된다. 해석 결과에서 확인할 수 있듯이 열점이 발생하는 위치는 워기어의 중앙 구멍 주변부 및 주입구 근접부, 탕구, 압탕, 탕도 위치이다. 워기어 중앙 구멍에는 레버가 결합되기 때문에 집중하중에 의한 응력집중을 막고자 다른 위치보다 두껍게 설계되었다. 그래서 주변보다 두께가 두껍기 때문에 응고가 상대적으로 늦게 이루어져 열점이 발생된다. 열점은 구멍의 모든 주변부에서 발생하지만, 기공은 구멍의 윗부분 주위에서 주로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 주입구 근접부에서는 조금의 열점이 발생하긴 하지만, 기공은 발생하지는 않았



(a) Hot spot



(b) porosity

Fig. 7 Solidification results

다. 탕구, 압탕, 탕도는 제거되는 부분이기 때문에 열점이나 기공이 발생하더라도 무의미하다.

4.2 주조 실험 결과

Fig. 8은 중력 주조 공법으로 제조되어 탕구계가 제거한 다음 치면부를 절삭 가공한 워기어를 나타낸다. 총 5회의 워기어를 제작하였으며, 5개 모두 외형에 결함이 없는 견고한 형태로 제작되었다.

Fig. 9는 중력 주조 공법으로 제조된 워기어를

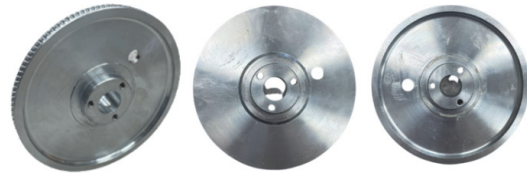


Fig. 8 Casted worm gear

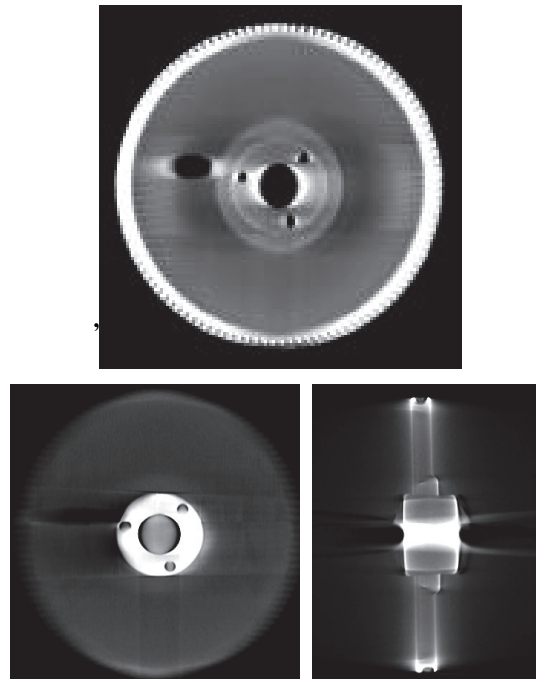


Fig. 9 CT analysis of casted worm gear

CT 분석한 결과이다. Fig.6의 Air entrapment 해석 결과와는 다르게 워기어의 모든 부분에서 미세한 기공은 발견되지 않았다. 그리고 Fig. 7(b)의 porosity 해석 결과와 달리 워기어의 중앙 구멍 주변부에서 상대적으로 조대한 기공은 발견되지 않았다. CT분석 결과로부터 주조해석 결과에서 예측되었던 기공 결함과는 다르게 주조 실험이 잘 이루어졌다고 할 수 있다. 이는 주조해석에서 적용하였던 조건과 실제 주조실험에서 적용된 조건이 주변 환경 등에 의해 다르기 때문이라 판단된다.

Table 1. Mechanical properties of casted worm gear

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Vicker's hardness (HV)
220±4	285±5	8±1	82±8

Table 1은 웜기어의 기계적 물성을 나타낸다. 중력 주조 공정으로 제조되었음에도 불구하고 내부에 미세한 기공도 존재하지 않기 때문에 일반적인 ZnDC1 아연합금의 기계적 물성치가 도출되었다. 항복강도 및 인장강도는 각각 220 MPa, 285 MPa이며, 연신율은 8%이다. 비커스 경도는 82 HV이다.

수입용 제어 헤드 조립체의 웜기어는 ZnDC1 아연합금을 다이 캐스팅 공정을 통하여 제조하고 있다. 제조된 웜기어는 ZnDC1 아연합금의 물성치를 가진다고 보고되었다. 그러므로 본 연구에서 ZnDC1 아연합금을 중력 주조 공정 통하여 제조된 웜기어는 수입용 웜기어를 대체할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 군용 선박에 사용되는 제어 헤드 조립체의 핵심 부품인 웜기어를 국산화하기 위한 연구를 수행하였다. 저가의 중력 주조 공법 적용하였으며, 설계, 해석, 제작, 분석에 관한 결론은 아래와 같다.

- (1) 두 개의 웜기어가 한 번에 주조되는 방식으로 탕구:탕도:주입구의 비가 1:0.9:0.6인 가압식 탕구계를 설계하였다. 탕도 및 주입구의 단면 형상은 마름모로 설계하였고, 탕구:탕도:주입구의 비를 적용하여 단면의 치수를 결정하였다.
- (2) 온도분포 해석결과 100% 충전되는데 소요

시간 4.380 s, 주입구에서 주물의 속도 0.55~0.6 m/s로 주입된다. 주물은 금형 공동부로 완전히 충전된 후에 응고가 시작되었다. 설계된 주조방안은 웜기어에 적합한 설계다.

- (3) 주조 해석 결과로부터 공기 유입이나 열점에 의한 기공 분포를 예측할 수 있었다. CT분석을 통하여 실제 중력 주조 공정으로 제작된 웜기어에서는 내부의 기공이 분포하지 않았다.
- (4) 중력 주조 공정으로 제조된 웜기어의 물성치는 ZnDC1 아연합금의 일반 물성치 값과 비슷하였다. 인장강도는 285 MPa, 연신율은 8%, 비커스 경도는 82 HV이다.

사 사

본 논문은 국방기술품질원의 방산혁신클러스터 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(DCL2020L).

참고문헌

- [1] C. K. Kim, "Zinc Alloy Casting", *Journal of Korea Foundry Society*, vol.8, no.1, pp. 143-153, (1988).
- [2] A. Pola, M. Tocci, and F. E. Goodwin, "Review of Microstructures and Properties of Zinc Alloys," *Metals*, vol.10, pp. 1-16, (2020).
- [3] E. Kubel, "Expanding horizons for ZA alloys", *Advanced Materials and Processes*. vol.132, pp. 51-57, (1987).
- [4] B. K. Prasad, A. K. Patwardhan, and A. H. Yegneswaran, "Dry sliding wear characteristics of some zinc-aluminium alloys: A comparative study with a conventional bearing bronze at a slow speed", *Wear*, vol.199, no.1, pp. 142-151, (1996).

- [5] D. Cooper, K. E. Rossie, and T. G. Gutowski, "An environmental and cost analysis of stamping sheet metal parts", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.139, no. 4, pp. 1-11, (2017).
- [6] T. W. Kim, Y. K. Hwang, and C. M. Lee, "Design of a Reduction Gear using Double-Enveloping Worm Gear", *Korean Society for Precision Engineering* vol.30, no.8, pp. 785-789, (2013).
- [7] 이종형, 이창현, 이상중, "고압다이캐스팅을 이용한 자동차 밸브하우징의 구조방안 및 기계적 특성에 관한 연구" *한국산업융합학회 논문집*, vol.9, no.4, pp. 301-308, (2006).

(접수: 2021.09.02. 수정: 2021.09.23. 게재확정: 2021.09.24.)