

## A study on structure of feed sprue considering turbulence and mold temperature in the investment casting process

Jong-Rae Lee<sup>†</sup>

Department of Computer and Applied Machinery, Korea Polytechnic, Iksan 54567, Korea

(Received January 4, 2022)

(Revised January 17, 2022)

(Accepted January 21, 2022)

**Abstract** Investment casting is a production method commonly used to manufacture precision equipment, medical fields, and accessories, and has continued to develop through the modernization of equipment and high quality of materials, and its scope of use has been expanded. The purpose of this study is to minimize the defect rate by deriving structural improvement and standardization of mold temperature, which are key elements of the investment casting process, to minimize the defect rate. The scope of the study is limited to jewelry manufacturing casting processes suitable for understanding the structure and principles of small gate, and an experimental research is to be conducted by using soft Wax, gypsum powder, and 14 K gold as research materials. According to the results, the most appropriate casting standard temperature for the casting pattern of Alloy 14 k was the lowest turbulence at 980°C flask temperature of 550°C, so good products could be produced. As a future task of this study, detailed studies are needed to data the structure and system temperature of small gate, reduce production defects in the field, and provide data for excellent investment casting competitiveness.

**Key words** Investment casting, Sprue, Liquid metal, Turbulence, System temperature, Wax tree

## Investment casting 공정에서 수축률을 고려한 소형탕도의 이상적인 구조와 주형 온도에 관한 연구

이종래<sup>†</sup>

한국폴리텍대학 컴퓨터응용기계과, 익산, 54567

(2022년 1월 4일 접수)

(2022년 1월 17일 심사완료)

(2022년 1월 21일 게재확정)

**요약** 인베스트먼트 주조는 정밀기기, 의료분야, 액세서리 등의 제조에 일반적으로 사용되는 생산방식으로 장비의 현대화와 고품질의 재료를 통해 발전을 거듭해 왔으며 그 활용 범위가 확대되고 있다. 본 연구의 목적은 인베스트먼트 주조 공정의 핵심 요소인 금형 온도의 구조적 개선 및 표준화를 도출하여 불량률을 최소화하여 경제성과 생산성을 향상시키는 것이다. 연구의 범위는 소형탕도의 구조와 원리를 이해하기에 적합한 Jewelry 제조 주조 공정에 국한되어 있으며 연구 재료로 soft Wax, 석고 분말 및 14 K Gold를 사용하여 실험적 연구를 수행했다. 그 결과 Alloy 14 k의 주물 패턴에 가장 적합한 주물 표준 온도는 980°C 플라스크 온도 550°C에서 가장 낮은 난류로 좋은 제품을 생산할 수 있었다. 본 연구의 향후 과제로 소형탕도의 구조 및 표준온도를 데이터를 분석하고, 현장의 생산 불량률 감소시키고 우수한 인베스트먼트 주조 공법의 경쟁력 확보를 위한 데이터를 제공하기 위한 세부 연구가 필요하다.

### 1. 서론

인베스트먼트 주조공법은 정밀기기 및 의료분야와 장신구 제작을 위해 일반적으로 사용되고 있는 생산 공법으로 장비의 현대화와 재료의 고품질화를 통해 지속적인

발전을 거듭해 오고 있고 그 사용범위도 확대되고 있다. 또한 고정밀도 주조품을 요구에 의해 표면의 미세, 치수 정밀도, 기계적 특성, 합금 조성의 다양화 등으로 특별한 부품제조 등의 신소재 개발연구에 활용할 수 있다[1]

특히 3D프린터 시장이 산업 전반에 영향을 주면서 인베스트먼트 주조공정을 통한 주조공법은 더욱 정밀하고 정교한 생산품에 대한 시장의 요구가 있는 것이 현실이다. 그러나 정교하고 수준 높은 결과물은 첨단 장비와 재

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: leejr@kopo.ac.kr

료의 고급화로 일정부분 완성단계에 이르렀으나 주조공정은 표준화된 공정 방법을 사용하여 설계하고 생산하는데 한계가 있다. 대부분 열악한 Jewelry 제조 회사의 여건 때문에 체계적인 데이터의 활용 없이 전문가의 경험에 의해서 작업공정을 진행하는 경우가 많다[2]

본 연구는 인베스트먼트 주조공정의 핵심 요소인 소형 탕도의 구조개선과 주형 온도의 표준화를 도출하여 불량률을 최소화하고 정밀한 주조물의 생산을 통해 후가공의 공정을 최소화하여 경제성과 생산성을 향상시키는데 목적을 둔다.

연구의 범위는 소형 탕도의 구조와 원리를 이해하는데 적합한 Jewelry 제작 주조공정으로 제한하고 연구 소재로는 Soft Wax와 석고 분말 그리고 14 K Gold를 사용하여 실험적 연구를 진행하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. Jewelry 주조 공정

소형 Jewelry 주조공정은 아래 Fig. 1과 같이 크게 3 단계로 분류를 할 수가 있다. 첫째, 조형물을 사출하여 왁스트리(wax tree)를 만들고 석고 분말을 적정비율의

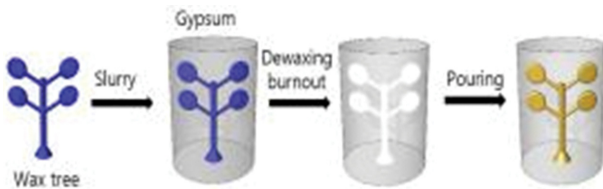


Fig. 1. Investment casting process.



Fig. 2. Vacuum pressurized small casting machine.

물과 혼합하여 몰드를 만든다. 둘째, 몰드를 상온에 건조한 후 소성료를 이용하여 고온에서 왁스를 제거한다. 셋째, 금속을 용해하여 진공 주입을 하고 석고를 제거하여 후 가공 및 성형을 한다.

### 2.2. 주조 장비

산업체에서 보편적으로 사용하고 있는 소형 진공주조기로서 소재의 표면에 침투할 수 있는 산소를 제거하는 기능과 용해하는 과정에서 발생할 수 있는 기포를 자동으로 제거해주는 기능을 갖추고 있으며 온도 측정이 보다 정밀한 주조기를 사용하여 시험을 실시하였다. Fig. 2는 진공방식의 소형 주조 장비이다.

### 2.3. 실험 방법 및 구분

주조공정에서 가장 많이 사용하고 있는 14 K Gold를 주재료로 직경 5 mm 이내인 소형 왁스탕도를 제작하여 왁스 조형물의 패턴에 각각 부착한다. 이때 부착하는 굵기와 각도를 모두 달리하여 왁스 트리를 제작한다. Fig. 3은 왁스탕도의 굵기와 각도의 예시로서, 본 연구의 핵심과제인 탕도의 굵기와 각도를 수치화하고 중심 탕도의 상부와 중간 그리고 하부의 위치에 따라 얻어지는 결과를 토대로 표준화하고 가장 이상적인 결과물을 얻어 내는데 중점을 두기 위함이다. 곡면 박판의 경우 유동성이 균일하게 적용될 수 있도록 모서리 부분은 곡면(rounding) 처리를 한다.

Table 1은 주조한 결과물에 대한 검사결과는 1, 2, 3



Fig. 3. Example of structure and angle of small sprue.

Table 1  
14 k Alloy ratio

Alloy composition		
Au	Ag	Cu
58.5 %	21.0 %	20.5 %

등급으로 구분하고 이때 적절한 주조온도를 수치화하여 이상적인 온도를 제시한다.

- 1등급: 주조가 완료된 이후 내·외부의 품질 상태가 측정 결과 우수한 제품
- 2등급: 주조가 완료된 이후 내·외부의 미세한 결함이 있으나 보완 후 사용가능한 제품
- 3등급: 주조가 완료된 이후 내·외부의 중대한 결함이 있고 보완이 어려운 제품

동등한 조건일지라도 원재료의 불량이나 합금의 비율에 따른 문제와 석고매몰 과정에서 각기 다른 조건이나 온도와 시간 소성의 문제 등으로 결함이 발생하지 않도록 주의하여 진행하며 재료를 준비하고 주조를 하기 전 왁스 상태를 청결히 유지하며 석고매몰 과정과 왁스 탈납 그리고 소성까지 주의하여 실시한다.

#### 2.4. 소형탕도의 형태(구조)와 역할

##### 2.4.1. Jewelry-용 탕도 구조

인베스트먼트 주조에서 탕도의 기능은 왁스패턴이 물과 혼합된 석고에 매몰될 때까지 움직임이나 이동 없이 고정된 상태를 유지하는 것이 매우 중요하다. 소성 과정에서 액체 상태의 왁스가 흐르는 물처럼 유동성을 활발하게 하여 매몰재 외부로 남김없이 빠져나가도록 제공하는 것에 중점을 둔다[3].

탈납과정 이후 용융된 금속이 탕도를 통해 걸림 없이 들어갈 수 있고 비어있는 왁스패턴을 완벽하게 채워 왁스패턴과 동일한 결과물을 얻어내도록 한다는 것이 주요 역할이다. 또한 용해된 금속이 흐르는 과정에서 외부의 산소를 포함한 가스등을 흡수하여 금속 내외부에 영향을 줄 수 있고 외부 온도와의 격차로 인한 열손실이 클 수 있다[4].

위와 같은 결함 요인을 최소화하기 위해서는 원형탕도가

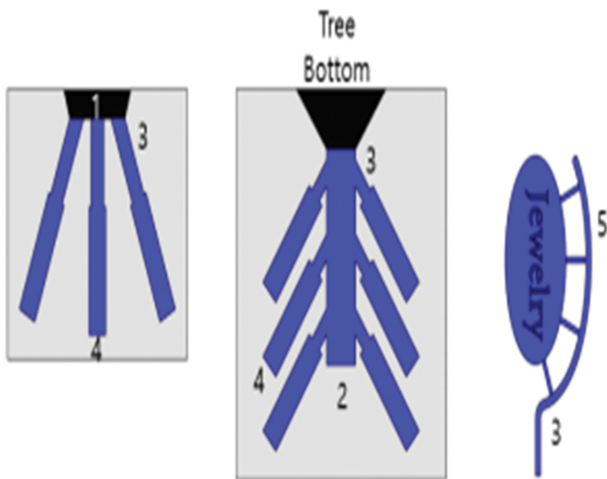


Fig. 4. Form and structure of sprue.

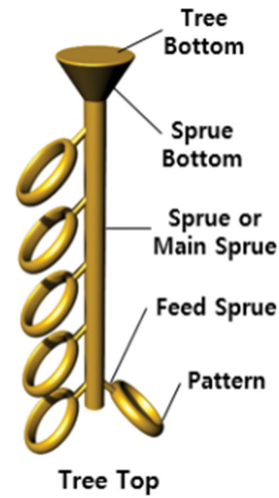


Fig. 5. Jewelry-only sprue structure.

직각이나 직선 형태의 탕도 보다는 우수하다는 것이 일반적이며 산업체에서도 가장 많이 사용하고 있는 탕도의 형태이다. 직선형 탕도는 1.1:1, 곡선형 탕도는 1.3:1 이상이 금속의 흐름에 적합하다는 것이 일반화 되어 있다.

Fig. 4는 탕구의 형태와 구조에 대한 그림으로

- ① 탕구(gate, pouring)
- ② 탕도 봉(sprue, main sprue, down sprue or center sprue),
- ③ 피드 스프루(feed sprue),
- ④ 제품(pattern, cast),
- ⑤ 2차 탕도, 또는 보(runner)이다.

Fig. 5는 Jewelry용 반지의 탕도와 각도이다.

##### 2.4.2. 용탕의 흐름과 난류(Turbulence)

탕도가 수직이거나 수직에 가까운 각도로 제작된 부분에서 용해금속이 들어갈 때 난류가 발생하는데 비어있는 왁스패턴에 남아 있는 가스나 주입구에서 생성되는 가스를 혼입하여 들어가는 것이 일반적이다[5].

이것은 탕도에 자극을 주거나 마찰을 일으켜 결함이 생길 수 있는 요인이기 때문에 아래 Fig. 6과 같이 부드

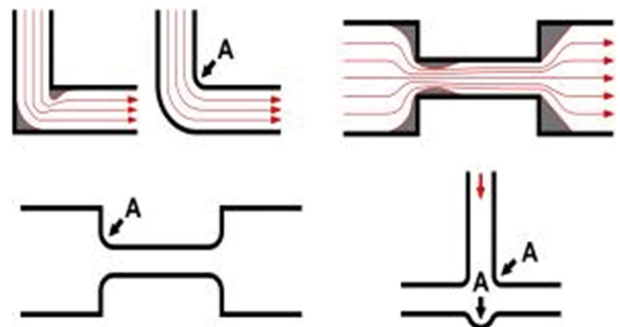


Fig. 6. Sprue structure and turbulence relationships.

러운 곡선으로 처리해 주는 것이 주물에 있어 불량율을 줄이는 중요한 요소이다[6].

또한 Fig. 6의 아랫부분은 직각으로 꺾이는 탕도를 통해 들어온 금속이 각각의 탕도로 분리되기 전에 마찰이 되는 부위를 부드러운 곡선으로 구조를 개선하여 다른 방향으로 튀거나 역류 될 수 있는 저항을 완화시키는 것이 중요하다[7].

2.4.3. 왁스패션의 구조와 주조의 연관관계

Fig. 7의 A와 B는 금속이 흘러 들어가는 시간이 짧고 사후 결함이 적으나 유입과정에서 큰 마찰로 인해 매물재 가루나 가스의 유입 가능성이 클 수 있다.

C와 같은 구조는 A와 B에서 나타날 수 있는 결함을 보완할 수 있는 구조이며 급격한 금속 용액의 마찰을 줄이고 가스 혼입을 줄일 수 있는 구조이다.

D와 같은 구조 또한 중간 탕도를 추가하여 안정적인 금속 흐름을 유지시켜 결함을 최소화할 수 있다[8].

2.4.4. 탕도의 구조와 형태 제안

Fig. 7의 A와 B는 탕도의 굽기가 같기 때문에 사각와스 패턴에 용탕의 유입 압력과 배압에 의하여 기포 또는 금속용액의 마찰에 의한 매물재 이탈이나 결함 등이 발생할 수 있으므로 C 또는 D와 같이 좌, 우의 탕도 굽기를 다르게 하는 것을 권유한다.

단순하지 않은 패턴에서 용탕의 흐름을 고려하여 소형 탕도를 부착할 경우, 일반적으로 Fig. 8의 사각형 그림처럼 이중으로 부착하는 것이 이상적이며, 중앙 탕도로부터 Y자형의 중심 줄기는 1차 2차 탕도가 되고, 갈라지는 2개의 2차 탕도에 용탕이 공급 되어질 수 있도록 충분한 단면적을 갖게 설계하는 것이 중요하다[9].

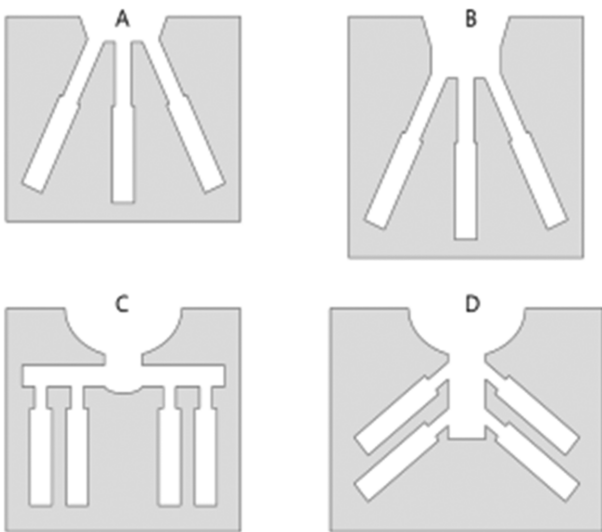


Fig. 7. Wax pattern structure and ideal shape.

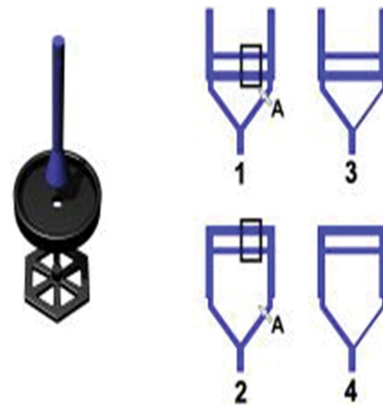


Fig. 8. Proposal of ideal structure of wax pattern.

에 의한 침식은 수직에 가까운 부분을 금속 용액이 통과하면서 발생하므로 내부를 모나거나 각지지 않게 곡면 (rounding) 처리한다.

용탕과 매물재 간의 온도 차이가 심하면 침식에 의한 결함은 발생하기 쉽다. 용탕이 Y 형태의 2차 소형 탕도로 갈라지는 곳의 난류는 탕도의 굽기를 달리하여 제거할 수 있다.

2.4.5. 부피가 다른 패턴의 혼합 주조

크기가 작고 두께가 얇으며 섬세한 조각 형상을 주조할 때 온도는 매우 중요하다. 크기가 작고 두께가 얇은 패턴은 트리의 상부면(top)에 배치하여야 하며 그 원인은 아래쪽에서의 압력보다 상부에서의 압력이 더 높기 때문이다[10].

크기가 작고 두께가 얇은 패턴은 상부의 두껍고 큰 패턴은 탕구 쪽에 가깝게 부착할 경우가 이상적이며 소형 탕도의 위치 플라스크의 온도와 용탕 금속의 온도를 표준화하여 실행하는 것이 좋은 결과물을 얻을 수 있다.

Fig. 9와 같이 각각 다른 두께를 가진 세 종류의 패턴이 있을 경우 동일 트리에서 주조 조건은 세 가지 모든 패턴에 동일하게 작용한다.

세 가지 패턴의 윗면과 바닥 면의 표면적(surface area)은 같고 측면(side)의 두께만 다르므로 큰 패턴에서 표면



Fig. 9. Layout diagram of wax patterns of different sizes.

Table 2  
Standard of size and thickness of wax pattern

Pattern size	Total surface area mm <sup>2</sup>	Increase heat over 1 mm thick	Percent increased surface area over 1 mm
15 × 15 × 1	510	0x	0 %
15 × 15 × 2	570	2x	11 %
15 × 15 × 4	690	4x	27 %

적이 늘어나는 것은 측면(side) 뿐이다. 위, 아래보다 측면의 표면적이 더 빠르게 증가하게 된다.

패턴에 의해 얻어진 부피가, 용탕의 금속이 주조될 때, 용탕 온도는 인접한 패턴과 매몰재 부분에만 온도변화를 줄 수 있다.

일반적으로 왁스패턴의 1.5 mm까지의 두께에만 온도변화를 줄 수 있다.

또한 상온에서 서서히 금속이 고체로 굳어감에 따라 바로 옆 왁스패턴은 열을 얻게 되며 각각의 패턴은 패턴의 두께에 따른 금속의 주조 양과 열에너지의 상대 수치를 갖게 된다.

보통 3~4 mm 두께의 왁스패턴은 1 mm 왁스패턴의 4 배에 달하는 열을 방출한다. 이것의 의미는 1~2 mm 왁스패턴 주변에서 보다 4 mm 왁스패턴 주변에서 더 높은 플라스틱 매몰재의 온도가 상승할 수 있다. 예를 들어 1 mm 왁스패턴을 기준으로 용탕 온도와 플라스틱 매몰재 온도가 표준온도에 설정했다면, 1 mm 보다 두꺼운 2~4 mm 이상의 제품은 주조가 매우 어렵다. 결국 왁스패턴의 두께가 용탕 온도 그리고 매몰재의 온도와 상관관계가 있지만 일반적으로 높은 온도는 두꺼운 패턴에 있어서 가스기공 등의 결함을 발생시킬 수 있기 때문이다.

2.4.6. 시스템온도와 주조의 상관관계

시스템온도(system temperature)는 왁스패턴의 표면적과 크기 비율에 대하여 표면적이 가지는 금속 용탕의 서냉과 복잡한 패턴, 플라스틱의 온도, 용탕의 온도, 탕도 및 합금량에 대한 금속의 상호작용에 있어서 Table 2는 주조 공정 시 소성과 주조온도 상승의 원인과 결과를 분석하여 결함을 최소화한 최적 온도를 표준화 한 것이다.

왁스패턴에 문양이나 굴곡이 있는 패턴은 4 mm 패턴의 두께와 마찬가지로 금속의 부피는 크지 않을 수 있고 표면적만 조금 더 크다고 할 수 있다.

매몰재 플라스틱 온도 영향이 용탕 온도의 영향보다 큰데 왁스패턴의 볼륨은 표면적에 대하여 비례하고 주조 온도에 영향을 미치고 온도를 표준화하는데 어렵게 한다. 얇고 작은 왁스패턴과 두꺼운 왁스패턴이 같은 플라스틱 안에 있을 때, 플라스틱의 온도는 낮고 얇은 패턴을 기준으로 설정하여야 하고 두꺼운 왁스패턴에 있어서는 너무 고온 일 경우 최적의 상태가 되지 못한다.

2.5. 시편 제작 및 표준온도 실험

2.5.1. 소형탕도 제작

탕도의 실험은 왁스패턴의 가장 적합한 소형탕도를 찾아내기 위해 표준 온도 테스트와 같은 방법으로 왁스트리를 제작한다. 왁스탕도의 제작 방법은 Fig. 10과 같이 각도와 굽기가 다른 형태의 왁스 탕도를 고무 몰드로 만든 후 패턴의 크기와 위치를 고려하여 왁스패턴에 전기

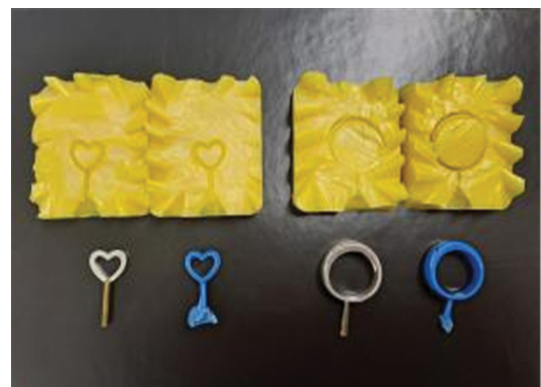


Fig. 10. Sprue rubber ring mold type.

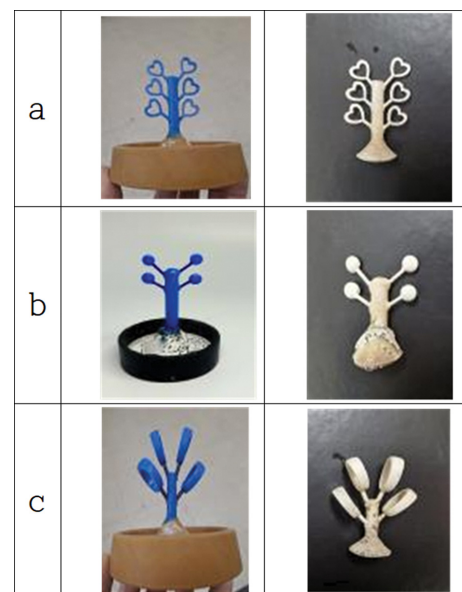


Fig. 11. Casting result according to shape.

Table 3  
Standard temperature and test criteria

System temperature test grid Date: 2010/09/20 Patterns tested 1			
Metal temperature °C	Flask temperature °C		
	500	550	600
980		Flask2	
1000	Flask1	Flask3	Flask5
1020		Flask4	

인두기를 사용하여 부착한다.

Fig. 11과 같이 왁스패턴에 소형당도를 부착하여 중심 당도에 3단 정도로 부착한다. 부착 시 유의할 사항은 층별로 각도와 굽기, 왁스패턴에 부착 위치, 부착 방법 등을 서로 달리하여 왁스트리를 만든다.

우수한 결과를 얻기 위해 다양한 왁스패턴과 새로운 방법으로 추가 플라스크를 만들어 시편 실험을 통하여 우수한 조건을 찾는다.

### 2.5.2. 표준온도 실험

Fig. 11과 같이 실험할 주조패턴을 얇음(a), 중간(b), 두꺼움(c) 등으로 다양하게 만든다. 왁스 패턴들은 중간 당도의 상부면, 중 심, 하부면에 직각으로 부착한다.

실험의 목적은 왁스패턴이 각각의 온도 조합에서 어떻게 주조가 되는지를 찾아내는 데 있다. 왁스트리에 다섯 개 이상의 패턴을 각 각의 다른 패턴들이 설정된 온도에서 어떤 조건이 양호한 패턴인지를 찾아내고, 다섯 개의 패턴들은 동일한 조건의 주조공정에서 실시한다. 그리고 플라스크의 테스트 기준과 주조할 14 k 용해 온도를 이용하여 주조한다. 실험할 기준 온도는 14 k 합금 금속과 어떤 형태의 주조를 할 것인지 결정한다.

Table 3은 표준온도 테스트 기준과 같이 테스트 기준 중앙(sweet spot)에서 주조하기 적절한 위치의 온도이며 매몰재 플라스크의 온도는 550°C와 14 k 온도는 1,000°C이다. 위, 아래 부분 중 가장 효율적인 지점을 선택하여 각 측면 부분 온도 조합에서 하나의 플라스크로 주조한다.

먼저 주조하기 전에 주조온도에서 플라스크를 왁스가 완전 제거 되도록 충분히 소성 예열한다. 주조 직후 표면의 불순물을 제거한 상태에서 캐스팅을 품질 검사하고 결과를 기록하며, 마지막으로 일반적인 품질검사 과정을 거쳐 데이터화한다. 검사 기준 설정은 테스트 결과를 바탕으로 주조의 등급 결정에 사용된다.

## 3. 결과 및 고찰

주조실험에서 석고 매몰재, 매몰 작업 불량, 매몰되어

Table 4  
Temperature test results (patterns test 1)

Temperature test results chart Date: 2021/08/20 Patterns tested 1 Alloy: 14 k			
Metal temperature °C	Flask temperature °C		
	500	550	600
980		1/1/1	
1000	2/3/3	1/2/2	3/3/3
1020		2/2/2	

Table 5  
Temperature test results (patterns test 2)

System temperature test results chart Date: 2021/08/20 Patterns tested 2 Alloy: 14 k			
Metal temperature °C	Flask temperature °C		
	500	550	600
980		3/3/3	
1000	3/3/3	2/2/2	1/1/3
1020		1/2/2	

Table 6  
Flask temperature 500°C

°C	1 grade	2 grade	3 grade
980	2	6	3
1000	4	2	1
1020	4	4	2

진 플라스크의 외부 충격 등 관리 부주의에 의한 석고의 크랙과 결함, 매몰재의 함유 및 실험자의 부주의에 의해 발생한 결함은 온도에 의한 주조결함과 관련이 없다.

이것은 본 연구의 객관성을 유지하기 위해 위와 같은 경우의 결함들은 평가로부터 제외시켰다.

주조 후 잘못된 표준온도의 대표 결함인 가스기공, 수축기공, 석고함몰, 불규칙하고 거친 표면, 미세한 균열 등 주조결과 Table 3과 같이 각 패턴에 1, 2, 3 등급으로 테스트 결과를 구분하였다.

Table 4, Table 5의 결과를 보면 14 k의 주조패턴에 적합한 플라스크 및 주조의 온도를 나타낸다. 패턴 1은 왁스표면 크기에 대한 비율을 판단하기 위하여 왁스패턴의 넓은 부분을 선택하였다.

크기가 유사한 플라스크 온도와 주조온도에서 양호한 주조가 이루어졌다.

Test 1에 나타난 모든 왁스 패턴들은 주조 온도 980°C 그리고 Table 6과 Fig. 12에서 확인 할 수 있다.

Table 7은 플라스크 온도 550°C에서 주조하여야 양호한 품질의 결과물을 얻을 수 있었다. Fig. 13에서 확인할

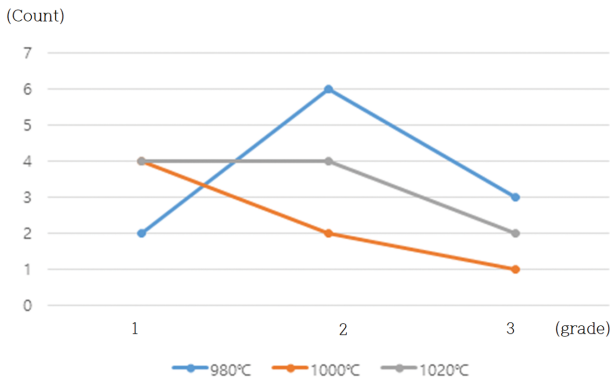


Fig. 12. The result of flask temperature 500°C.

Table 7  
Flask temperature 550°C

°C	1 grade	2 grade	3 grade
980	7	2	1
1000	5	3	2
1020	3	4	3

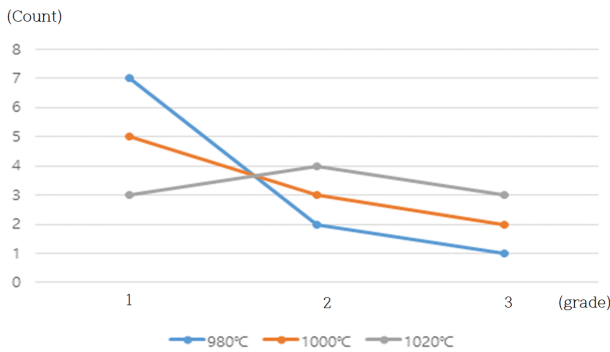


Fig. 13. The result of flask temperature 550°C.

Table 8  
Flask temperature 600°C

°C	1 grade	2 grade	3 grade
980	3	6	2
1000	4	3	1
1100	3	4	3

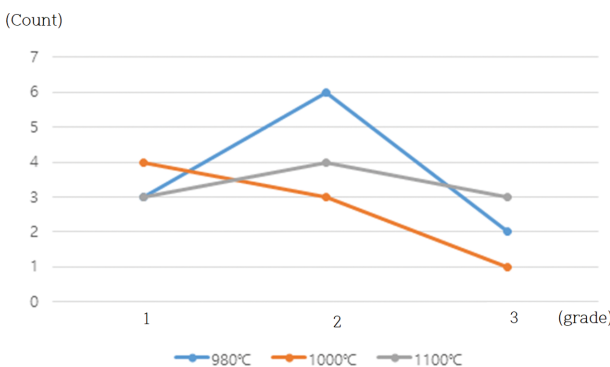


Fig. 14. The result of flask temperature 600°C.

수 있다.

Table 5의 Test 2 결과에서는 주조온도 1,000°C와 Table 8의 매몰재 플라스크 소성온도 600°C가 좋기는 하나 일부분에서 작은 결함이 발생하였다. Fig. 14에서 확인할 수 있다.

따라서 주조온도 1,100°C까지 올려 테스트 시행하였고 연구 Test 기준 단일 주조 시험으로 진행하였다. 실험 데이터를 바탕으로 새로운 테스트 기준을 시행하여 최적화된 온도를 찾을 수 있었다.

#### 4. 결 론

소형탕도의 형태와 구조가 14k 주얼리 주조물에 미치는 영향을 연구하기 위해 서로 다른 크기와 굽기의 탕도를 제작하여 왁스 조형물에 부착하여 부착의 위치, 각도, 부착 방법 등을 달리하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 소형 박판의 정밀한 패턴을 주조할 때 온도는 1,000~1,100°C 일 때가 우수한 결과물을 얻을 수 있었으며 왁스패턴 부착 위치는 플라스크의 가장 상부면의 꼭대기에서의 결과가 좋았다. 이것은 연구 결과 플라스크 하부면의 압력보다 상부면의 끝부분에서의 압력이 더 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

또한 소형탕도의 수량을 늘리는 것보다 붙이는 위치와 방법에 따라 우수한 제품을 얻는데 효과적 이었다.

두 번째, Table 3의 결과를 보면 Alloy 14k의 주조패턴에 가장 적절한 주조 표준 온도는 980°C 플라스크 온도 550°C에서 가장 양호한 제품을 생산할 수 있었다.

본 연구의 향후 과제는 소형탕도의 다양한 구조와 박판, 곡면 등 제품 생산에 필요한 표준온도를 데이터화하여 현장에서의 생산 결함을 줄일 수 있는 데이터를 제공하기 위한 상세 연구가 필요하다.

#### References

- [1] J.P. Ha, "A study of investment casting process for improving of the mechanical properties" (Pukyong National Univ., Korea, 2005) p. 24.
- [2] J.H. Lee, "A study on quality improvement of silver jewelry in lost wax casting" (Kookmin Univ., Korea, 2015) p. 47.
- [3] U.J. Kim, "A study on the ornaments design using precision casting techniques" (Keimyung Univ., Korea, 2002) p. 36.
- [4] G.J. Jung, "Study on the technological solution of jewelry foundry defect in alloy precious metals" (Kaya Univ. Korea, 2018) p. 42.
- [5] Suhas V. patankar, "Numerical heat transfer and fluid

- flow”, American Nuclear Society, 1st Edition (CRC Press, Boca Raton, 1980) p. 196.
- [ 6 ] Y.G. Kim “Numerical analysis of an axisymmetric turbulent rotating flow in an arbitrary geometry” (Chonnam Univ., Korea, 1988) p. 36.
- [ 7 ] J.H. Ahn and J. N. Lee, “Study on phosphate investment for high temperature precision castings(I); The effect of particle size and distribution of silica sand on the characteristics of the investment”, J. Korea Foundry Society 5 (1985) 85.
- [ 8 ] S.I. Yun, “Process analysis for process design of precision casting of metal” (Chungnam National Univ., Korea, 1994) p. 55.
- [ 9 ] M.H. Guen, “A study on the technology development of investment casting using 3D printer pattern” (Pusan National Univ., Korea, 2003) p. 34.
- [10] J.S. Lee, S.H. Jung and J.M. Bae, “The castability of new casting rings on noble and base metal alloys”, KJDM, 32, Special Issue (2005) 27.