

주화 제조에서 공정 조건이 극인의 수명에 미치는 영향에 관한 연구[†]

(The Effect of Embossment Conditions of the Coining Process)

김종환*, 손종환**

(Kim, Jong-hwan, Son, Jong-Whan)

요약 본 논문에서는 주화나 메달의 제조 공정에서 극인의 수명을 향상시키는 제조 조건에 대하여 연구하였다. 먼저, 경계요소법을 이용하여 응력의 주요 집중부를 찾아내어 실제 압인 실험에서 극인의 최초 균열 위치가 일치하는지를 검증하여 이를 금형의 수명을 측정하는 기준으로 사용하였다. 주화생산 조건의 요소 중, 완제품인 주화의 정해진 규격과 문양의 심도를 만족하는 범위 내에서 압인 공정의 주요 변수인 압인력과 칼라 및 소전의 크기 변화에 따른 금형의 수명을 비교하였다. 그 결과, 칼라와 소전의 직경을 조절하고 이 조건에 적합한 압인력을 사용하면 실험 대상 주화에서 극인의 수명이 최대 60% 증가하는 효과를 볼 수 있음을 보였다.

핵심주제어 : 주화, 압인, 칼라, 소전

Abstract This paper deals with manufacturing conditions to increase the working die's life span which are the key factor in the manufacturing process of the coins and medals. Using the boundary element method, the stress diagram for the coining die was obtained, which was used to find the life span of working die. To find the working die's life span related to the diameter of collar and blank coin, eight different sizes were tested and the optimal condition was obtained. With the adjusted impressing force, the working die's life span was increased up to 60 percent.

Key Words : coin, embossment, collar, blank coin

1. 서론

최근 각종 국제 행사나 기념일에 맞추어 기념 주화와 메달의 제작이 증가하고 있으며, 국내외 공공 기관이나 단체에서의 수요도 꾸준히 증가하고 있으며, 우리나라는 이러한 주화나 메달의 제조에

있어서 세계적으로 상당한 기술 수준을 보유하고 있어서, 국내외의 많은 주문을 소화하고 있다.

주화나 메달의 제조는 압인용 금형에 타발된 소전(blank coin)을 칼라(collar)에 넣어 완전히 구속된 상태에서 압력을 가하여 금형에 형성된 문양을 전사시키는 가공 작업을 통하여 생산된다. 주화나 메달의 제조에 사용되는 금형을 극인이라고 하는데, 극인의 수명은 제품의 제조 원가와 생산성에 직접적인 관계를 가지고 있다. 또한 압인금형의 모금형(master die) 제조기간이 최소 25-30일, 금형

[†] 이 논문은 2003학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 교수

** 한국조폐공사 화폐사업팀

전체의 제조기간은 35일 정도 소요되므로, 한번 제조한 금형의 예기치 못한 손상은 제품 생산에 막대한 지장을 초래하게 된다[1].

또한, 주화나 메달 제품의 문양이 점차 복잡해지고 심도도 점차 깊어지는 세계적 추세에 따라, 금인 문양도 고심도의 높은 정밀도가 필요하므로 금인의 설계와 제조가 더욱 까다로워지고 있다.

주화를 제조에 사용되는 압인용 금인의 수명에 영향을 미치는 여러 요인들이 있으나, 본 논문에서는 소전과 칼라의 직경 변화에 따른 압인력의 조절 방안에 대해 연구한다. 이를 위하여 먼저 압인력과 금인 수명의 관계를 실험을 통하여 도출하고, 다음으로 주화 제품의 제조에 있어서 소전 및 칼라 직경의 변화에 따라 압인력과 금인 수명이 어떻게 변화하는가를 밝힌다.

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 주화인 경우에는 실험 분석이 조폐공사의 기술적 보안 문제로 어려운 점을 고려하여 C-원화(제원이 공개된 외국 주화)를 대상으로 하였으며, 실험 결과인 금인의 수명이나 압인력 등 모든 데이터는 시험 결과에 영향을 미치지 않는 범위에서 정률 조정하였음을 미리 밝혀 둔다.

2. 주화 제조와 금인의 수명

국내에서 근대적 의미의 주화는 1959년 처음 발행되었으나, 현재와 같은 대량 생산은 1966년 시작되어 1980년대 후반에는 6억 6천만 개가 제조되었고, 1990년대 후반에 이르러 그 수량은 9억장에 이를 정도로 성장하였다[2]. 또한 주화의 수출도 각종 국제 행사에 따른 수요의 변화가 있으나, 꾸준히 증가하는 추세에 있다.

2.1. 금인의 수명에 대한 분석 방법

주화는 압인의 방법으로 만들어 지는데, 압인이란 금인(die)의 문양이 소전에 전사되도록 소전을 금인과 칼라(collar)로 감싼 상태에서 구속 압사(constrained impressing)하는 냉간 가공(cold working)작업이다[3]. 즉, 알루미늄이나 구리합금 등으로 만들어진 주화용 소재인 소전을 칼라 속에

넣고 프레스로 금인을 눌러 가공에 필요한 하중이 소전에 전해지도록 하는 냉간 구속 가공의 일종이며, 금속 소재에 소성 변형을 일으켜 문양이 각인되도록 하는 소성 가공 공정이기도 하다.

이때, 소전의 표면은 금형(금인 및 칼라)을 통하여 받은 하중, 즉 압인력에 의해 소성 변형을 일으켜 금형의 문양이 각인되는데 이러한 압인 과정을 거침으로써 소전은 주화로서의 외형을 갖추게 된다[4].

서양에서는 주화의 기원으로 알려진 BC 687년부터 소성 가공 방법을 적용하여 주화를 제조하여 왔으나, 동양에서는 근세에 이르기까지 주조법으로 주화를 제조하여 왔다[3]. 근세 이후에는 생산성과 주화의 품질 상태 등을 고려하여 현재는 모두가 소성 가공으로 생산하고 있으며 소성 가공에 의하면 제품의 모양과 강도를 개선할 수 있는 장점이 있다[5].

주화의 제조에는 크랭크식 파워 압인기가 주로 사용된다. 파워 압인기는 금인 파손의 위험성이 높고 마모도 크지만, 대량 생산에 따른 고속 압인이 가능하기 때문에 대부분의 나라의 조폐국에서 선호하고 있다.

금인의 수명을 측정하기 위해서는 파괴에 대한 임계 조건을 찾아내야 한다[6]. 어떤 임계 조건(파괴 조건)은 그 재료 내에 함유하고 있는 가장 취약한 부분 곧 균열부 주위에 집중되고 있는 국소 응력이 어떤 임계값에 도달할 때 일어난다는 가정으로부터 얻을 수 있다[7, 8, 9].

주화 금인 표면의 응력을 얻는 방법으로는 수치 해석법과 실험적인 방법을 이용하여 얻을 수 있다. 수치 해석법으로는 유한요소법과 경계요소법[10, 11, 12]이 주로 사용되며 본 논문에서는 과학 및 공학 문제에서 미분방정식의 경계치 문제를 경계적분 방정식으로 변환시켜 요소분할법에 의해 해를 구하는 경계요소법을 사용한다.

이광호 등은 국내 유통 주화를 대상으로 하나의 응력 집중 부위의 문양과 심도에 따라 응력이 다르게 나타난다고 보고 전체 압인력에 대한 전단 응력 집중을 구하였다. 전단 응력을 심도를 변화시켰을 때, 계산상의 전단 응력과 비교하여 차이가 있음을 보여주는 방법으로 실험을 행하였다[13].

본 논문에서는 C-원화를 대상으로 하여, 주화

극인 표면의 형상부를 컴퓨터에 입력시켜 응력의 집중되는 부위를 찾아내고 이때 발견된 최대응력 부위의 미세 균열을 조사하는 방법으로 극인 수명을 측정 하였다.

2.2. 압인력이 극인 수명에 미치는 영향

최근 다종 다양한 기념 주화 및 메달의 수요가 증가하고 있으며 또한 대형의 고심도 메달 등의 생산량 증가로 인하여 금형의 설계가 한층 까다롭고 또 압인력도 수십 또는 수백 톤을 가해야 하는 경우도 생겨나게 되었다. 그러나 아직 주화의 소재 조건이나 작업 조건에 따른 주화의 압인력이 정립 되어 있지 못하다.

주화 또는 메달의 극인을 제조 공정에서 압인력의 사전 예측은 압인 작업 중 극인의 파손을 방지 할 수 있고, 제품 문양 전사도의 예측을 통하여 문양의 심도가 결정되는 조각 작업부터 제조 공정의 개선에 효과적으로 기여할 수 있을 것이다.

일반적으로 유통 주화나 기념 주화에서는 타발된 소전을 완전히 구속된 상태에서 압력을 가하여 원하는 형태의 문양을 가공하는 압인 작업에 의해 제품을 생산하고 있다.

주화의 문양은 보통 $150\mu\text{m}$ 정도이고 기념 주화의 심도는 순수 귀금속 일 경우 $250\mu\text{m}$ 이내이고 프루프 메달은 $350\sim 400\mu\text{m}$ 을 초과하고 있지 못하며 고심도 메달도 최고 $2,500\mu\text{m}$ 정도로, 저 부조 조각에 의한 문양 형성 방법으로 생산되고 있다.

현재 주화 작업시 유통 주화 6개 화종의 극인 중에서 100원화 표면 극인의 균열은 상당히 심각하다. 연구의 필요성 측면에서 보면 100원화를 연구 대상으로 해야 하겠으나, 한국조폐공사의 기술적 보안상 문제가 있어 소전의 제원과 성분이 동일하고 기술적 보안에 문제가 없는 C-원화 표면 극인을 대상으로 연구하였다.

이상적인 극인의 설계 요소로서는 먼저 제품의 도안 선택과 제품의 재료가 되는 소전 재료의 선택 후 이에 합당한 극인 재료를 선택하고 극인 재료와 도안 그리고 압인 조건에 맞는 열처리 등이 있다. 뿐만 아니라 극인 수명 향상 방안으로 이상적인 압인 상태에서 압인하는 것이 중요하다. 즉, 일정 공칭 응력 하에서의 완전한 문양 전사가 이

루어지는 적절한 극인의 압인력, 적절한 칼라의 직경과 소전의 직경 구간 등이 이에 해당된다. 이들 변수 이외에도 소전의 두께, 제품 테의 폭과 깊이, 동일 소재일지라도 그 제조 과정의 물리적 후처리에 따라 달라지는 경도의 차이, 소전의 화학적 표면 처리 등 주화 제조에 있어 극인 수명과 관련된 생산 조건의 여러 변수들이 있지만 앞에서 언급한 3가지 변수가 극인 수명과 가장 밀접한 관계가 있다.

극인에서 압인을 할 때 소전의 금속 흐름이 극인의 공간부(cavity)와 칼라의 밑 공간부를 100% 채워지는 순간의 압인력으로 작업하는 것이 최적의 압인 상태로 작업하는 것이다. 또한 제품의 허용 직경을 이러한 최적 압인력으로서 얻을 수 있는 칼라의 직경과 최적의 압인력으로서 얻을 수 있는 소전의 직경 등이 극인 수명에 상당한 영향을 미친다. 그러나 아무리 이상적인 재료의 극인을 선택하여 이상적인 방법으로 열처리를 하고 이것으로 압인을 한다고 하더라도 극인의 형상부에 응력이 심하게 집중되는 곳이 있으면 그 극인은 쉽게 균열되고 만다.

이광호 등은 경계요소법(boundary element method, B.E.M)으로 응력 확대 계수, 응력 집중 계수를 구하고 그 결과를 분석하여 B.E.M 프로그램이 응력 집중 해석이나 응력 확대 계수의 해석에 매우 신뢰할 만함을 검증하였다.[13]

이광호 등은 이와 같은 검증을 바탕으로 국내 유통 주화를 대상으로 극인문양의 심도에 대한 연구를 하였는데, 주화 극인의 문양도 하나의 응력 집중 부위로 가정하고 그 문양의 위치와 심도에 따라 응력이 다르게 나타난다고 보고 전체 압인력에 대한 전단 응력 집중을 구하였다.

본 논문에서는 이광호 등의 경계요소법에 의한 응력 계산 프로그램을 이용하였다. C-원화 표면 극인의 형상부를 컴퓨터에 입력시켜 극인 표면의 형상에 대한 응력 해석에 적용하여 그 유효성을 검증하고, 문양에 따른 응력이 집중되는 곳을 찾아내어 극인 수명과의 관계 그래프에서 변수의 최적 조건과 최적해를 도출한다.

2.3. 압인 작업에서의 균열

파괴 역학에 있어서 파단 과정은 결함의 발생, 균열의 진전 그리고 파단의 3가지 과정으로 분류할 수 있으며 이들 중 파단 과정에 대한 파라메타로서 K(stress intensity factor)개념, COD(crack opening displacement)개념, J적분(J-integral)개념 등이 있으며[7, 8], 이와 같은 파라메타가 어느 한 계치에 도달한 경우에 파괴가 일어난다고 생각한다. 이와 같은 한계치를 파괴 인성치 또는 파괴 임계점이라 하며 이러한 파괴 인성치는 임계 응력 확대 계수 값에 도달한 상태이고 따라서 결함(표면 균열, 노치 등)이 존재하더라도 임계 응력 확대 계수 값 이하의 하중 또는 응력 상태에서는 파괴가 일어나지 않는다[8].

공칭 응력과 결함 상태(균열)가 모두 연관되어 응력 확대 계수가 결정되므로 이러한 응력 확대 계수 값은 임계 응력 확대 계수 값 보다 낮아야 한다[8]. 따라서 극인 설계시 공칭 하중과 균열의 길이 또는 깊이를 잘 조정하여 응력 확대 계수를 임계 응력 확대 계수 값 보다 낮은 상태에 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 극인이 균열되는 것은 극인에 작용하는 공칭 하중 또는 극인 표면의 특정한 형상 균열 및 노치의 크기가 임계 응력 확대 계수 값에 근접하고 있다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 노치 또는 균열의 파괴 인성 값(임계 응력 확대 계수 값)보다 낮은 값에서 압인이 되도록 하기 위하여 제품의 허용 직경과 극인의 문양이 소전에 100% 전사되는 범위에서 압인력을 최대한 작게 하였다. 특히 극인과 같은 반복 하중을 받는 구조물에서 공칭 응력 감소는 구조물의 수명을 급격히 증가시킨다.

3. 생산조건 실험 및 분석

본 논문에 사용된 실험 조건은 극인과 칼라의 재질은 O1 Steel로 이것을 열처리하여 투입하였는데, 열처리 후 물성치는 HRC경도로 59-60정도이다. 그리고 소전은 구리가 75% 니켈이 25 %인 백동을 사용하였으며, 이때 물성치는 Hv 82-85(Pa 804-834)정도이며 압인 속도는 분당 700SPM으로 압인 실험을 하였다.

주화 생산 요소의 주요한 변수들 중의 하나인 제품 허용 직경(24.22mm±0.04mm) 내에서 극인 수명과 공칭 응력의 영향 분석을 위해 칼라의 직경을 24.22 mm, 소전의 직경 23.84 mm에서 압인력을 550KN에서 680KN까지 변화시키며 극인의 수명을 조사했다. 그리고 칼라 구멍의 적정 직경을 얻기 위해서는 우선 1/1000mm까지 측정 가능한 Micrometer와 Digital record가 부착된 광학 측정기(optical comparator)를 이용하여 칼라 구멍의 직경을 측정 후 압력이 디지털로 나타나는 슬러 압인기에서 실험하였다. 이 때 소전의 직경은 23.84mm로 하여 칼라 구멍의 직경을 24.17mm에서 1/100mm씩 확대하여 24.24mm까지 증가시켰다.

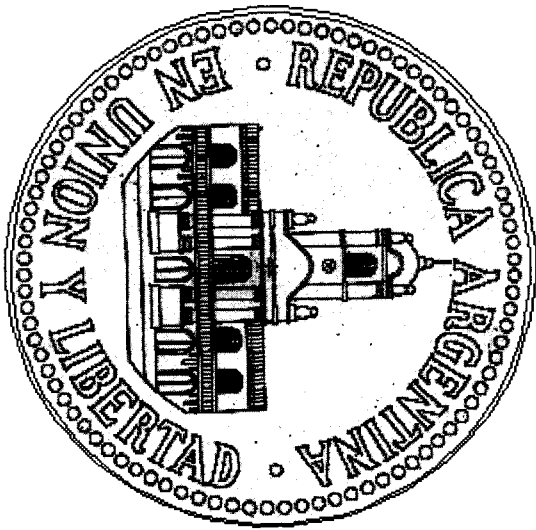
극인의 문양과 칼라의 밀이 소전에 완전 전사되도록 하여 제품의 허용 직경범위로 될 때까지 압력을 가하여 가능한 가장 낮은 압력에서 제품의 허용 직경 뿐 아니라 문양이 소전에 완전 전사되는 칼라 구멍의 직경을 얻도록 하였다. 주화 제조의 주요한 생산 조건인 소전 직경과 극인 수명의 최적 조건을 얻기 위해서는 칼라 구멍 직경을 24.22mm로 한 후 소전의 직경을 23.8mm에서 1/100mm씩 높여 23.87mm까지 증가시키면서 극인의 문양과 칼라 밀의 문양이 완전히 소전에 전사될 때의 압력을 각각 조사하였다. 실험의 공통 조건은 <표 1>과 같다.

<표 1> 주요 변수의 실험 조건

실험 변수	압인력 (KN)	속도 (SPM)	칼라 직경 (mm)	소전 직경 (mm)	재질	경도
압인력	550-680	700	24.22	23.84	O1steel	HRC59-60
칼라 직경	600	700	24.17-24.24	23.84	O1steel	HRC59-60
소전 직경	600	700	24.22	23.80-23.87	Cu75%Ni25%	HV82-85

3.1. 압인력의 변화에 따른 극인의 수명

<그림 1>은 C-원화 표면 극인 형상을 표면 조도계(roughness tester)를 사용하여 10배로 확대하여 측정한 그림이다.



<그림 1> C-원화의 형상

C-원화 표면의 형상과 응력을 조사하기 위하여 표면 조도계로서 형상을 10배로 확대하여 측정하고 측정된 형상의 좌표를 선행 연구에서 개발된 경계요소법 프로그램에 입력시켜 응력을 계산하였다. 이때의 압인 조건은 칼라에서 구속하고 있듯이 양 측면을 구속시키고 압인력(공칭 압인력)은 600KN으로 하여 응력의 계산 값 및 응력의 상태를 얻어 응력의 집중부를 찾아낸 후 실제로 극인에서 최초의 결함 발생 위치를 찾기 위하여 완제품을 균열이 발생할 때까지 계속 작업을 하면서 매 1만 장마다 이들의 제품을 전자현미경으로 관찰하여 극인의 균열이 시작되는 시점까지 무한대로 압인하여 실험하였다.

<표 2>는 극인의 수명과 공칭 압인력과의 관계를 실험한 결과를 나타낸 것이다. 칼라의 직경이 24.22mm, 소전의 직경 23.84mm에서 압인력을 550KN에서 680KN 까지 높이면서 최초 균열이 발생할 때까지의 수명을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 공칭 응력이 감소할수록 극인 수명 현저하게 증가하고 있는데 이것은 앞의 이론에서 설명한 바와 같이 응력 확대 계수 값이 파괴 인성

<표 2> 압인력에 따른 극인 수명의 변화

실험 극인 No	압인력 (KN)	극인수명 (장)
1#	680	37,564
2#	650	40,837
3#	640	41,526
4#	630	42,736
5#	620	43,762
6#	610	44,276
7#	600	44,982
8#	590	46,287
9#	580	50,736
10#	570	54,982
11#	560	59,837
12#	550	66,354

주) 현미경 관찰에서 최초 균열의 발견 시점까지의 수명

치 보다 낮아지면 수명이 길어진다는 사실과 일치한다. 550KN에서 압인시 극인에서 소전으로 전사되는 문양은 흐리며 600-610KN에서 작업시 전사되는 문양은 100%선명하다고는 할 수 없으나 제품의 품질에는 이상이 없고 직경 또한 24.18mm로 허용 치수에 들어갔다.

3.2. 칼라 직경의 변화에 관한 분석

주화 제조를 위한 생산 조건 중 칼라 직경은 주화 제품의 치수를 결정하는 주요 변수이다. 압인 작업에서 고압을 받은 소전은 칼라 직경만큼 확대되다가 칼라에 밀착되면 더 이상 확대될 공간이 없으므로 고압을 받은 상태로 압인이 완료될 때까지 금속의 탄성력으로 강하게 압착되어 있다. 이때의 칼라에서 받는 압력은 극인의 공칭 압력과 유사하여 하부 극인에 의해 주화가 강제로 배출되면 주화의 치수가 칼라 치수 보다 압인 조건에 따라 차이는 있지만 일반적으로 0.02mm에서 0.04mm까지 크다. 물론 칼라 직경은 압인력과 상당한 관련이 있으므로 극인 수명에 주요한 변수가 된다.

본 연구에서는 C-원화를 대상으로 칼라의 직경

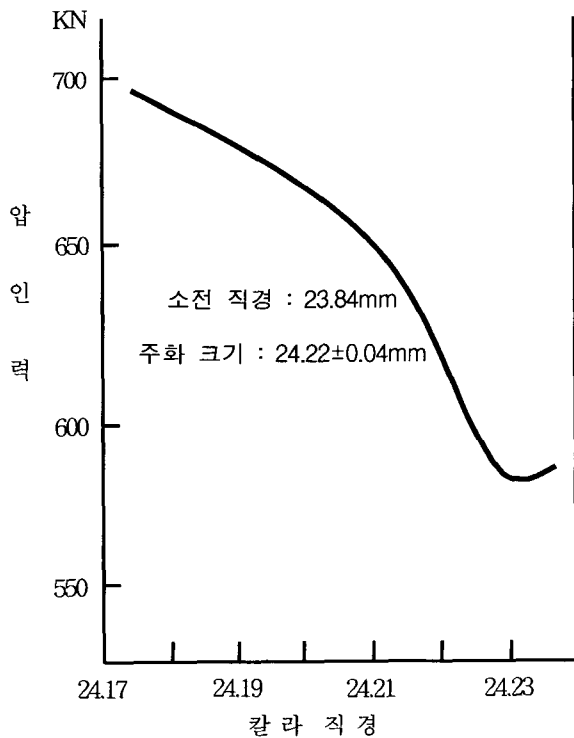
변화에 따른 수명 실험과 압인력의 영향 분석을 위한 실험 조건으로 극인과 칼라의 재질을 O1 Steel로 하고, 이것을 열처리하여 투입하였는데 열처리 후 물성치는 HRC경도로 59-60정도이다. 그리고 소전은 구리가 75% 니켈이 25%인 백동을 사용하였으며 압인기에서의 압인 속도는 분당 700/SPM으로 하여 압인 실험을 하였다. 실험에 사용한 소전의 직경은 23.84mm이고 칼라 Hole은 24.17-24.22mm 까지 확대하면서 문양이 선명하게 전사되도록 하고 주화 제품 직경 또한 허용 공차 (24.22 ±0.04) 범위에 들어가는 최소의 압인력을 구하였다. 이렇게 구한 압인력은 앞 절의 결과를 이용하여 극인 수명으로 환산할 수 있으며, 이를 칼라 직경과의 상관관계로 분석하였다.

<그림 2>는 칼라의 직경과 압인력과의 관계를 그래프로 나타내고 있으며, <그림 3>은 칼라의 직경별 극인 수명 곡선이다. 실험은 칼라의 직경을 1/100mm 단위로 8개의 칼라를 제조 각각의 수명 관계 실험을 하였으나 2개의 단위(24.17mm, 24.24mm)에서 압인력이 초과하거나 문양의 전사도가 떨어지고 제품 직경의 허용 공차를 초과하여

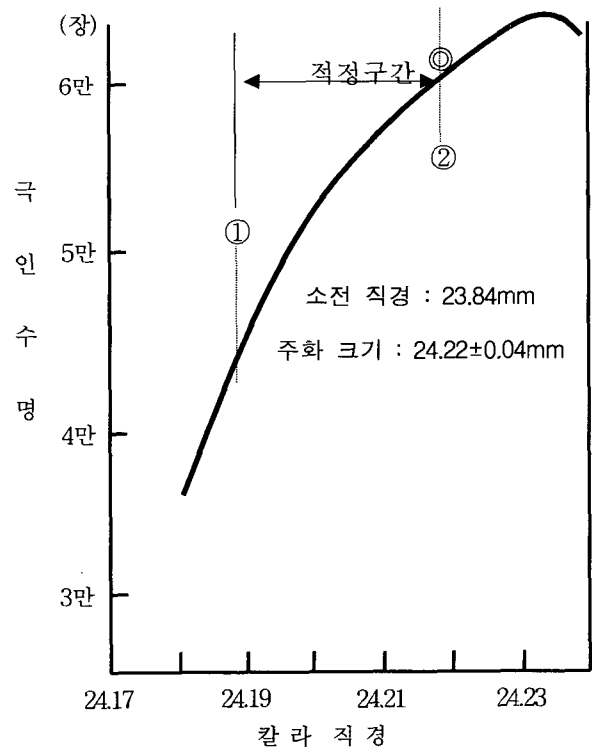
실험의 의미가 없어 실험 중 폐기하고 6단위 실험만 진행하였다.

이 결과로만 보면, 칼라의 직경이 클수록 극인의 수명이 증가하고 있다. 그러나, 이 결과는 동일한 압인력인 경우의 결과이고, 칼라의 직경이 칼라 직경이 24.18mm가 되면 압인력은 680KN을 가해야 주화 제품의 허용치수 범위에 들어갈 수 있고, 칼라 직경이 24.23mm이 되면 압인력은 600KN을 가해도 극인에서 소전으로 전사되는 문양과 주화 제품의 허용 치수는 정상이다.

따라서 앞의 <표 2>에서 보면 압인력이 680 KN으로 작업해야 할 경우 극인 수명 3.7만장 정도이나 600KN에서 작업하면 극인 수명 약4.5만장 정도로 향상시킬 수 있다. 그리고 칼라 Hole 직경을 24.24mm이상으로 하여 압인력을 낮추면 소전 직경의 한정된 범위 때문에 제품의 허용 직경 치수가 나오지 않는다. <그림 3>의 점선 ①, ②는 C-주화 제조시 칼라 직경의 적정 구간인데 ①의 X값인 칼라 직경24.19mm 이하는 압인력이 680KN을 초과하여 극인 파손의 위험이 있고 ②점선의 X값 24.22mm 이상은 문양의 전사도가 떨어



<그림 2> 칼라의 직경과 압인력의 관계



<그림 3> 칼라의 직경과 극인 수명의 관계

저 주화 품질관리 특성에 부적합하며 그래프와 같이 오히려 압인력이 증가하므로 제외되었다. ◎는 극인 수명이 길고 제품의 품질에 이상이 없는 범위에서의 칼라 직경의 최적 조건으로 추정 할 수 있다.

3.3. 소전 직경의 변화에 대한 분석

소전은 주화 제조에서 또 하나의 주요한 생산 변수이다. 소전의 성분, 소전의 두께, 소전의 후처리, 소전의 물리적 경도, 소전 가장자리 형상 등 많은 변수가 있으나 이들 변수 중 제품 기획 단계에서 설계가 가능하고 가장 중요한 변수는 소전의 직경이다. 실험에 사용한 극인의 직경은 24.17mm 칼라는 24.22mm이며 주화의 직경은 24.22mm ±0.04 이며, 다른 조건은 앞의 실험과 동일하다.

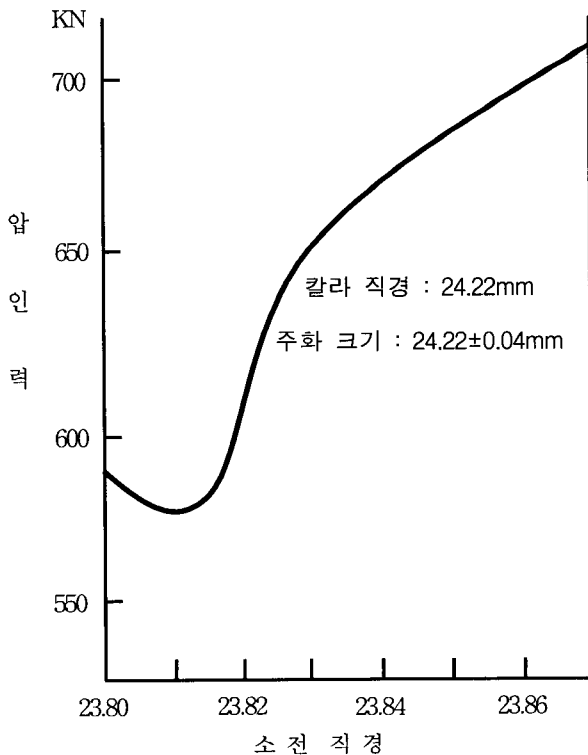
<그림 4>와 <그림 5>는 소전 직경에 대한 압인력과 극인 수명 영향을 나타내고 있다.

실험에 사용한 소전은 23.80mm에서 23.87 mm 까지 8단계 별로 실험하였으나 실험 과정에서 23.80mm 소전은 오히려 압인력이 증가하고 제품

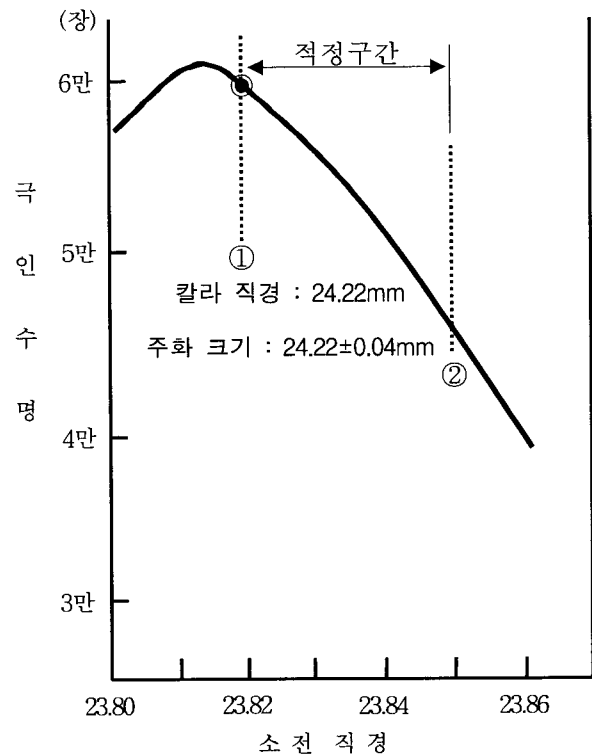
허용 치수에 미달되며, 소전직경이 23.87 mm에서 는 압인력이 680KN을 초과하여 극인 파손의 위험 성이 높아 실험 분석에서 제외시켰다.

그래프에 나타난 바와 같이 소전의 체적이 동일 할 때 소전 직경이 작으면 작을수록 단면적의 감소와 문양 형성 후 주화 측면에 최종 압력이 가해지는 압인 시간 차이로 전체 압인력이 감소하지만 일정 수치 이하로 내려가면 오히려 압인력이 증가 한다. 이것은 소전 소재의 변형이 일정량을 초과하면 변형을 위해 필요한 압인력이 급격하게 상승하기 때문이다. 또한 이 과정에서 주화 제품의 치수 불량 발생 가능성이 높아진다. 압인력이 감소되면서 제품 허용 치수를 벗어나지 않는 소전 직경의 직경 범위는 23.81mm~23.86mm이다.

주화 제조에서 소전의 직경은 압인력과 밀접한 관계가 있는 변수이므로 극인 수명과도 민감한 변수로 작용한다. 일반적으로 소전 직경이 적정 치수 보다 크면 다이폴트(die fault: 소전의 직경이 칼라 직경에 너무 가까이 근접하면 기계적 공급이 원활 하지 못하여 일어나는 장해현상)의 발생 빈도가 높아 기계 가동이 곤란하고, 소전 직경이 너무 작



<그림 4> 소전의 직경과 압인력의 관계



<그림 5> 소전의 직경과 극인 수명의 관계

으면 압인 순간에 금속 가공 경화도가 높아 압인력이 증가한다.

소전의 직경을 23.81mm로 하였을 때 압인력을 560KN까지 낮추어 압인을 하여도 허용 직경이 제품 허용 공차에 포함되고 작업시 전혀 무리가 없었다. 이 때 나타난 문양의 선명도는 평상시 주화 작업(압인력 630KN)으로 생산한 제품과 육안식별이 안될 정도로 별 차이가 없다. 이러한 압인력(580KN)에서 극인수명은 약6.9만 정도까지 향상된다. 그리고 압인력을 550KN 이하로 하면 문양의 선명도가 흐려짐을 알 수 있었다.

그러나 이러한 소전 직경에 따른 압인력의 감소는 화종별로 직경 치수 감소 비율로 적용 될 것이고 절대 수치는 아닐 것으로 판단된다. 이것은 소재의 연신률과 가공 경화의 정도에 따라 다르게 나타날 것이기 때문이다. 이와 같이 적당한 칼라 구멍 직경과 소전의 직경을 찾아내어 현재보다 압인력을 약 8%감소시켜도 주화의 문양에는 별 영향이 없으며 이 때 극인 수명 최대 약 54%까지 증가함을 알 수 있다.

<그림 7>의 점선 ①, ② 구간은 소전 직경에 따른 압인력 변수와 수명 변수를 동시에 만족하는 소전 직경의 최적 조건을 나타내고 ●는 최적해를 나타내고 있는데 점선 ①의 X값 소전 직경 23.81mm 이하는 극인 수명은 높으나 문양 전사도의 안정성이 떨어지고 23.80mm에서는 오히려 압인사력이 증가하고 문양의 전사도가 떨어지며 제품 치수가 부족하다. 점선②의 X값 소전 직경 23.85mm를 초과하면 압인력이 <표 2>에서 비교되듯이 680KN을 초과하여 극인 파손의 위험이 증가한다. 그러므로 C-원화의 소전 직경 최적 조건은 23.82mm-23.88mm이고 최적해는 가장 수명이 높은 23.82mm이다.

4. 결 론

본 연구에서는 주화의 제조 공정에서 극인의 수명을 향상시키기 위한 공정 조건에 대하여 연구하였다. 주화 제품의 규격과 문양의 심도를 만족시키는 범위내에서 압인력과 칼라 및 소전의 크기 변화에 따른 극인 수명을 비교하였다.

실험 결과에 따르면 칼라 직경과 소전 직경의 조절에 의하여 현재의 630KN인 압인력을 580KN까지 낮출 수 있음을 알 수 있었다. 극인의 문양 전사를 위한 약간의 여유를 고려하여 압인력을 600KN까지만 낮추더라도 극인의 수명이 현재보다 최대 60% 증가함을 보여주었다.

본 연구의 결과는 칼라 직경 소전 직경이 압인력과 밀접한 관계가 있고, 압인력이 낮아질수록 극인의 수명이 증가한다는 것으로 요약할 수 있다.

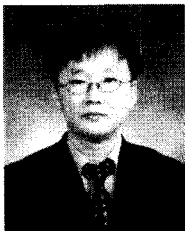
극인의 수명에 영향을 미치는 요인에는 압인력과 칼라 및 소전의 직경 이외에도 많은 변수가 있다. 그러나 화폐의 일종인 주화를 제조하는 공정의 특수성으로 인한 보안상의 문제와 실험에 사용할 수 있는 극인의 수의 제한이 연구의 큰 제약조건이었다.

본 연구에서 다루어진 요소 이외의 더 많은 생산 요인들이 주화 기획 과정에서부터 과학적이며 체계적으로 분석되어 주화 제조 공정의 효율성 제고에 보다 기여하기를 기대한다.

참 고 문 헌

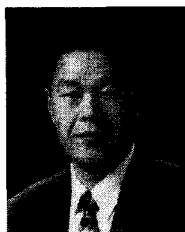
- [1] 한국조폐공사, *주화작업표준*, 2002.
- [2] 한국조폐공사, *통계연보*, 기획조정처 경영관리부, 제15호, 2002.
- [3] 이계완, 김재중, *금속가공학*, 문운당, 1974.
- [4] 전기찬, *박판금속의 성형*, 반도출판사, 1993.
- [5] 유인학, *한국조폐공사 50년사*, 한국조폐공사, 2001.
- [6] N. I. Muskhelishvili, *Some basic problems of the theory of elasticity*, Noordhoff, 1953.
- [7] P. C. Paris and G. C. Sih, "Stress analysis of crack," *ASTM STP*, Vol. 381, pp. 30-38, 1965.
- [8] G. C. Sih, *Method of analysis and solution of crack*, Noordhoff, 1973.
- [9] H. M. Wastergaard, "Beading pressures and cracks," *J. Appl. Mech.*, Vol. 61, pp. 49-53, 1939.
- [10] 木順傳行, 結成良治, 松本敏郎 "境界要素法による應力擴大係數決定法", *境界要素法 研究會*, 1984.

- [11] C. A. Brebbia,, J. C. F. Telles, and L. C. Wrobel, *Boundary element techniques: Theory and applications in engineering*, Springer-Verlag, 1974.
- [12] L. S. Xanthis, M. J. M. Benal, and C. Atkinson, "The treatment of singularities in the calculation of stress intensity factors using the boundary integral equation method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 26, pp. 285-304, 1981.
- [13] 이광호, 문재근, 정지일, "극인 응력 계산용 Personal computer 프로그램 개발," *한국조폐공사 조폐기술논문*, pp. 124-132, 1990.



김 종 환 (Jong-hwan Kim)

- 종신회원
- 1984년 2월 : 서울대학교 산업학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 경영과학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 한국과학기술원 경영과학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 교수
- 관심분야 : 대기행렬론, 최적화모형, 시뮬레이션



손 종 환 (Jong-Whan Son)

- 정회원
- 1981년 2월 : 한사대학 공업경영과
- 1986년 2월 : 방송통신대 경영학과 (경영학사)
- 1989년 2월 : 경북대학교 경영대학원 인사관리전공 (경영학석사)
- 2003년 8월 : 대구대학교 대학원 산업공학과 경영과학전공 (공학박사)
- 1980년 9월 ~ 현재 : 한국조폐공사
- 관심분야 : 주화 신소재, 신뢰성 분석, 동계열 금속 특성