

초고강도 콘크리트를 이용한 반응 사출 금형에 관한 융합 연구

정재동¹, 김홍석^{2*}

¹대구대학교 건축공학과 교수, ²대구대학교 기계공학부 교수

A Convergence Study on the Reaction Injection Mold Using Ultra High Strength Concrete

Jae-Dong Jaung¹, Hong-Seok Kim^{2*}

¹Professor, Division of Architectural Engineering, Daegu University

²Professor, School of Mechanical Engineering, Daegu University

요약 일반적으로 금형은 소재 부품 분야에서 제품의 대량 생산에 널리 이용되는 중요한 생산 도구이다. 그러나 최근 다품종 소량생산의 확산에 따라 보다 효율적이고 경제적인 금형에 대한 요구가 증가하고 있으며, 본 연구에서는 금형 재료로서 초고강도 콘크리트의 적용 가능성을 모색해 보고자 한다. 초고강도 콘크리트는 80MPa 이상의 압축강도를 갖는 콘크리트로서 금속에 비해 저렴하고 무게가 가벼우며 조형이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 초고강도 콘크리트가 비록 일반 금형 재료인 공구강에 비해 강도는 낮지만 상대적으로 낮은 응력이 발생하는 성형 공정에 사용된다면 금형 재료로서 충분히 활용 가능하다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱 저압 생산공정의 하나인 폴리우레탄 반응사출 성형공정용 사출 금형에 초고강도 콘크리트를 적용해 보았으며, 금형 제작 및 성형 과정을 통하여 금형 소재로서의 가능성과 특징을 고찰해 보았다.

주제어 : 초고강도 콘크리트, 반응 사출 성형, 액상 사출 성형, 금형, 폴리우레탄

Abstract There is an increasing demands of more efficient and economical ways of mold making according to the spreading trend of small quantity batch production system. Therefore, this study aims to examine the applicability of ultra high strength concrete, which has a compressive strength over 80MPa, as a mold material. The ultra high strength concrete has several advantages such as lower cost, lighter weight and convenience of shape making compared to the traditional mold materials. Although the strength of the ultra high strength concrete is lower than that of the tool steel, it was considered to be useful for small batch processes with relatively low pressure. Therefore, in this study, a prototype mold for reaction injection molding of polyurethane was developed using ultra high strength concrete and it was examined that the possibility and characteristics of concrete as a mold material.

Key Words : Ultra High Strength Concrete, Reaction Injection Molding, Liquid Injection Molding, Mold, Polyurethane

*This research was supported by the Daegu University Research Grant.

*Corresponding Author : Hong-Seok Kim(kimkong@daegu.ac.kr)

Received September 17, 2020

Accepted November 20, 2020

Revised October 20, 2020

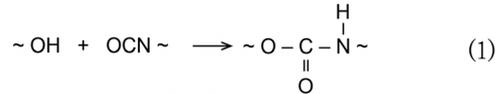
Published November 28, 2020

1. 서론

금형(mold)이란 변형하는 성질을 갖는 소재에 압축력을 가하여 원하는 형상으로 만들어 주는 틀로서 제품의 대량 생산을 위한 핵심 도구로 광범위하게 사용되고 있다. 금형을 사용하는 대표적인 공정으로서 단조나 프레스, 주조, 사출 성형 등을 들 수 있는데, 각 성형법이 갖는 소재 변형 특성의 차이에도 불구하고 형상 정밀도와 내구성은 금형이 지녀야 할 필수 조건으로 여겨지고 있다[1,2]. 금형에 있어 형상 정밀도란 단순히 제품 형상의 정밀한 모사만을 의미하는 것이 아니라 금속 소재의 소성 변형 시 발생하는 탄성 회복이나 용융 소재의 고화 시 발생하는 부피 수축, 변형, 뒤틀림 등의 물리적 속성을 극복하고 허용 오차 이내의 정밀도로 제품 형상을 구현해 내는 것을 의미한다. 또한, 내구성이란 반복되는 생산 과정에서 금형의 마모 또는 절손을 극복하고 요구 수량을 생산해낼 수 있는 능력을 의미한다. 이러한 금형의 요구 조건을 만족시킬 수 있는 금형의 소재로서 우수한 기계적 성질을 갖춘 공구강 계열의 금속이 전통적으로 널리 사용되어 왔으며, 열처리나 표면처리 등을 통하여 강도 및 경도를 향상시켜 내구성을 증가시키는 방법에 대한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다[3,4]. 그러나 성형 압력이 그리 크지 않고 생산 수량이 소량인 경우 오히려 상대적으로 강도가 낮은 소재를 금형의 재료로 사용하고자 하는 시도도 꾸준히 이루어져 왔다. 대표적인 사례로서 실리콘을 이용한 금형을 들 수 있는데, 3D 프린팅 기법과 접목하여 시제품의 소량 생산용 금형을 효과적으로 개발한 사례가 보고된 바 있다[5,6]. 이러한 시도가 이루어지는 이유는 선반이나 밀링 가공, 방전 가공과 같은 전통적인 절삭형 금형 제작 방식에 상당한 제작 기술과 생산 시간, 비용이 요구되기 때문이다. 최근 소비자의 기호가 다양해지고 제품의 수명 주기가 짧아지며 제품의 재료가 연질 고무에서 고강도 금속까지 범위가 다양해지고, 생산 수량 역시 수십 개에 불과한 경우부터 수백만 개에 이르는 경우까지 생산 요구 조건의 범위가 매우 넓어지고 있다. 따라서 제품 특성의 다양화에 대응할 수 있는 보다 유연하고 창의적인 생산 방식의 개발이 요구되고 있다.

반응사출성형(RIM, Reaction Injection Molding) 또는 액상사출성형(LIM, Liquid Injection Molding)은 액상의 원재료와 경화제의 화학 반응을 통하여 고체 상태의 고분자 제품을 성형하는 방법으로서 침구류나 건축 단열재, 자동차 부품 등 다양한 제품에 적용된다[7]. 반응사출성형에 사용되는 대표적인 원재료는 수산기

(hydroxyl, -OH)를 갖는 폴리에테르폴리올(polyether polyol)로서 (1)식에 나타난 바와 같이 경화제인 이소시아네이트(isocyanate)를 이용해 중합 반응을 일으키면 우레탄 결합(-NHCOO-)이 얻어지며 폴리우레탄(Polyurethane)을 형성한다[8].



폴리우레탄은 우레탄 결합이라는 대표 결합으로 정의되지만 수산기 화합물의 종류나 경화제의 비율, 발포제의 양에 따라 다양한 성질을 갖는 제품의 제조가 가능하다. 폴리우레탄 반응사출성형의 사례로서 자동차 스티어링휠(steering wheel)을 Fig. 1에 나타내었는데, 장입된 금속 뼈대 주위를 반경질 폴리우레탄 폼이 감싸고 있는 것을 볼 수 있다. 반응사출성형은 액상의 원재료를 사용하기 때문에 금형의 분할선(parting line)에 스며든 액상 재료로 인한 플래시(flash)의 발생이 두드러지는데, 대부분의 경우 수작업에 의존하는 후처리로 제거된다.



Fig. 1. Application example of RIM process: automobile steering wheel

대량생산되는 일반적인 반응사출성형 제품은 금속 소재의 금형이 장착된 전용 기계에서 성형되는 것이 일반적이다. 그러나 제품의 생산 수량이 그리 많지 않고 형상군이 다양하여 빠른 시간 내에 서로 다른 성형부를 갖는 금형의 신속한 제작이 필요한 경우 기존 금속 재질의 금형이라는 개념에서 탈피할 필요가 있다. 본 연구에서는 반응사출성형에서 다품종 소량생산이 필요할 경우 금형을 제작할 수 있는 보다 효과적인 방법으로서 초고강도 콘크리트를 이용한 타설 방식의 금형 제작법을 제안하고자 한다. 물론 초고강도라고는 하지만 재질의 속성 상 콘

크리트는 공구강에 비해 낮은 강도를 가지고 있다. 그러나 원재료 간의 화학반응을 기본 메커니즘으로 하는 반응사출성형은 단조나 프레스, 다이캐스팅, 사출성형 등 다른 부품소재 생산 공정에 비해 발생하는 성형 압력이 낮기 때문에 금형 재료에 공구강 수준의 높은 강도 성능이 요구되지 않는다. 또한, 제품의 목업(mockup)이 제공되는 역설계 방식의 금형 제작 조건이라면 기존의 금속 절삭가공 방식에 비해 제품의 역상을 손쉽게 형성할 수 있는 콘크리트 타설 방식의 금형 제작법이 보다 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 초고강도 콘크리트를 이용한 반응사출성형 금형의 제작을 통해 건축 재료로만 알려져 있는 초고강도 콘크리트의 생산제조공정 분야에서의 적용 가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 초고강도 콘크리트 제조 조건 설정

2.1 초고강도 콘크리트의 정의

콘크리트는 모래와 자갈, 골재 등의 혼합물에 시멘트를 배합하여 건조시킨 인공 재료로서 강도는 시멘트 페이스트 또는 골재 자체의 강도, 골재와 결합재의 부착 강도에 의존한다. 따라서 고강도화를 위하여 다음과 같은 방법을 통해 콘크리트의 강도를 높일 수 있다[9].

- (1) 물/배합재 비율(W/B) 저감: 감수제 사용, 다짐 가압
- (2) 공극률 저감: 혼화제, 폴리머레진 사용, 다짐 가압
- (3) 골재 부착성 증대: 폴리머레진, 활성 골재 사용
- (4) 시멘트 수화물 개선: 오토클레이브 양생
- (5) 보강재 사용: 섬유 보강재 사용
- (6) 시멘트 외 결합재 이용: 폴리머레진 사용
- (7) 고온, 고압 양생을 통한 수화반응 촉진

이상의 방법을 조합하여 적용하면 콘크리트의 강도를 획기적으로 증가시킬 수 있음은 이미 널리 알려져 왔다. 그러나 1980년대에 압축강도 80MPa급, 1990년대 100MPa급 및 2000년대 150MPa급 콘크리트의 제조 사례가 발표되면서 고강도 및 초고강도 콘크리트의 개념이 형성되며 초고층 빌딩 건설에 활발히 적용되기 시작했다[10,11]. 일반적으로 국내에서는 압축강도 40~80MPa 범위의 콘크리트를 고강도 콘크리트, 그 이상은 초고강도 콘크리트로 정의하는 것이 일반적이다[12,13].

2.2 배합비 설정 및 공시체 제작

초고강도 콘크리트는 일반적으로 물과 시멘트의 비율을 저감하거나 특수 혼화 재료를 사용하여 제조되기 때문에 일반 콘크리트에 비해 배합비의 설정 및 관리가 철저해야 한다[14]. 본 연구에서는 금형 제작에 적합한 강도와 성형성을 갖는 콘크리트의 제조를 위한 적정 배합비의 선정을 위하여 물/배합재 비율을 11~16% 범위에서 변화시켜 유동성과 강도를 측정하였다. 주재료로는 포틀랜드 시멘트와 실리카질 골재를 사용하였으며, 공극률 저감 및 수화물 개선, 유동 성능 향상을 위해 플라이애쉬(fly ash)와 실리카 폼(silica fume), 고성능 감수제(superplasticizer)를 무게비로 1.5% 첨가하였다.

콘크리트의 압축강도 및 유동성을 측정하기 위한 공시체 제작 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 건비빔된 소정의 재료에 물과 고성능 감수제를 투입한 후 약 12분의 혼합 과정을 거쳤다. 혼합된 재료의 일부는 유동성 시험(flow test)에 사용하였으며, 나머지는 주형에 부어져 압축시험을 위한 공시체로 제작되었다. 제작된 공시체는 항온항습기에서 온도 20℃, 습도 90% 이상의 환경에서 재령 3일, 7일, 28일로 양생시킨 후 압축강도시험을 실시하였다.



Fig. 2. Manufacturing process of concrete specimens

2.3 유동성 및 압축강도 시험결과

금형제작용 콘크리트의 성형성과 유동성을 검토하기 위해 실시된 유동성 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 물/배합재 비율이 증가함에 따라 유동성은 증가하였으며 대체로 14~15% 비율에서 적절한 유동성이 얻어지는 것으로 판단할 수 있었다. 또한 재령별 압축강도 시험 결과는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 물/배합재 비율과는 무관하게 모든 조건에서 초기 3일까지 압축강도가 급격히 증가하고 있으나 이후 28일 재령까지는 완만한 증가세를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 28일 양생 후에는 모든 배합 조건의 압축강도가 100~160MPa의 범위로 형성되어 초고강도 콘크리트 영역에 도달함을 확인할 수 있었으며, 물/배합재 비율이 16%인 경우를 제외하면 3일 양생 후에도 압축강도가 80MPa를

초과하여 초고강도급 이상의 성능을 보임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 소재의 흐름성과 압축 강도, 양생 시간 등을 고려하여 금형 제작에 적합한 고강도 콘크리트의 물/배합재 비율을 14%로 결정하였다.

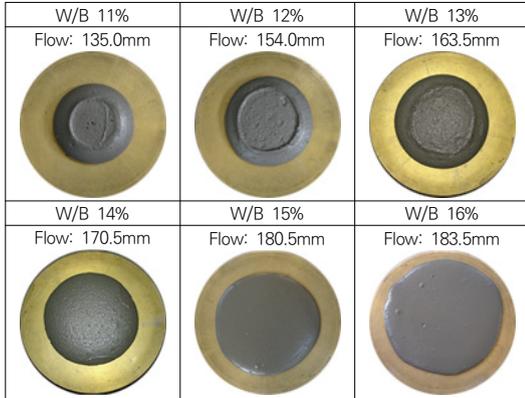


Fig. 3. Flow test results according to W/B ratio

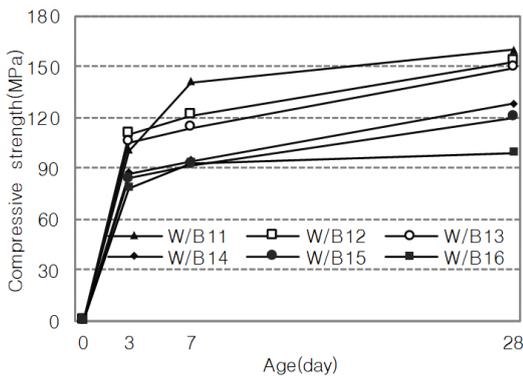


Fig. 4. Compressive strengths according to W/B ratio

3. 반응사출금형 제작

3.1 제품 선정

본 연구에서는 콘크리트 금형을 이용한 반응사출성형을 적용할 대상으로서 실제 골프공과 형상은 동일하지만 보다 부드러운 재질의 실내연습용 골프공을 선정하였다. 골프공의 경우 비거리 향상을 위해 표면에 다수의 홈(dimple)을 가지고 있는데, 금속 금형의 경우 이러한 홈의 절삭 가공 시 언더컷(undercut) 형상을 피하기 위해 5축 가공이 요구된다. 그러나 본 연구에서 제안한 콘크리트 타설 방식의 금형을 제작할 경우 절삭 가공을 사용하지 않기 때문에 고비용의 기계 가공을 피할 수 있다. 물

론 실내연습용 골프공의 경우 큰 비거리가 불필요하기 때문에 홈 가공이 되지 않은 단순 구형의 스펀지 제품도 시판되고 있으나 실제 골프공과 유사한 형상을 지닌 제품이 선호되고 있다.

3.2 단일 캐비티 시작 금형 제작

콘크리트 타설을 통한 금형의 제작법은 기존의 절삭 가공 위주의 금형 제작 방식과는 상당한 차이를 가지고 있다. 기존 금형 제작 방식에서는 절삭 가공을 통해 제품에 대한 음각 형상을 금형에 구현하는 반면, 콘크리트 타설 금형은 최종 제품과 동일한 형상을 갖는 코어(core)를 콘크리트 반죽에 장입하여 굳힌 후에 코어를 제거하는 방식으로 제작된다. 본 연구에서는 이러한 콘크리트 금형의 기본 제작법을 검증하기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 실제 골프공을 코어로 하여 금형 시제품을 제작해 보았다. 전절에서 선정된 물/배합재 비율 14%의 콘크리트 혼합액에 실제 골프공을 코어로서 삽입하여 틀에 고정시킨 후 3일 간의 양생 과정을 거쳤다. 양생이 완료된 후 고화된 콘크리트 금형에서 코어로 사용했던 골프공을 제거해야 하는데, 전술한 바와 같이 골프공의 경우 홈 형상으로 인한 미세한 언더컷이 존재하기 때문에 자연스럽게 탈거되지 않았다. 따라서 고무 망치를 이용해 적절한 힘으로 수차례 타격을 가하여 골프공 코어를 빼냈는데, 골프공이 가진 탄성으로 인해 콘크리트를 손상시키지 않고 탈거시킬 수 있었다. 코어와 분리된 면은 그림에 나타난 바와 같이 골프공의 광택면이 콘크리트에 전사되어 코어의 홈이 동일하게 묘사된 광택면을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

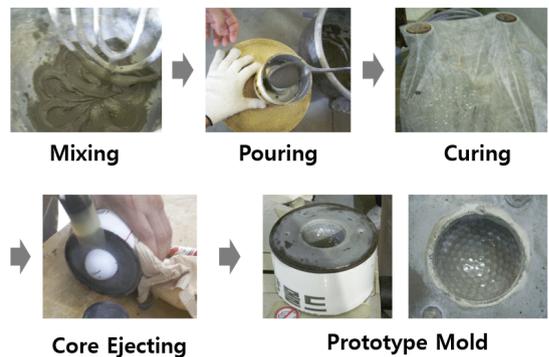


Fig. 5. The manufacturing process of prototype mold

제작된 시작 금형을 이용한 반응사출 시험 성형 과정에서 상형과 하형의 중심 맞춤 등의 문제가 발생했으나

전반적으로 제품 형상을 모사하는 금형의 기본 기능에는 문제가 없다고 판단할 수 있었다. 따라서 이러한 사항을 고려하며 보다 일반적인 금형의 형태에 근접한 시작 금형을 제작해 보았다.

3.3 4-캐비티 금형 설계 및 제작

전술한 단일 캐비티 금형 시작품에서 발생했던 상하형 맞춤 문제를 해결하고, 생산성을 향상시키기 위해 Fig. 6에 나타난 바와 같이 4개의 성형부를 갖는 4-캐비티(4-Cavity) 금형을 설계하였다. 상하형이 유사한 형상을 가지고 있기 때문에 Fig. 6에는 하측 형상만을 나타내었는데, 상하형의 중심 맞춤을 위하여 지름 20mm의 가이드봉 4개를 설치하였고 상하형의 클램핑이 용이하도록 사각형으로 설계하였다. 상측 금형은 가이드 봉을 슬롯시킬 수 있는 가이드 부시 외의 전체 형상은 하측 금형과 유사하다. 설계된 금형을 제작하기 위하여 Fig. 7의 좌측에 나타난 바와 같이 아크릴판과 나무판을 조립하여 콘크리트 주형 틀을 만들었고, 초고강도 콘크리트 제작 과정에 따라 배합, 타설, 양생을 거쳐 Fig. 7의 우측에 나타난 바와 같이 상하 금형을 제작하였다.

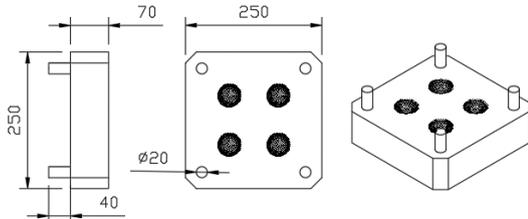


Fig. 6. The lower part of 4-cavity concrete mold



Fig. 7. The mold frame and the manufactured upper and lower part of concrete mold

4. 콘크리트 금형을 활용한 성형 실험

본 연구에서 성형을 목표로 하는 실내연습용 골프공은

치밀한 표면 조직과 다공성 내부 조직을 가지고 있어 적절한 반발력과 충격 흡수성을 갖는 반경질 제품이다. 반경질 폼 제품의 성형을 위하여 주재료는 반경질 계열의 폴리올 NIXOL R-9150(KPX 케미칼㈜)을 사용하였고, 경화제와 발포제로는 각각 변성 MDI(methylene diphenylene isocyanate)와 HCFC-141b (hydrochloro-fluorocarbon)을 사용하였다. 반경질 제품에서 적절한 충격 흡수를 위한 고른 내부 기공 발생 및 치밀한 표면 조직을 얻기 위해서는 적절한 재료 배합비와 반응 환경온도의 설정이 필요하다[15]. 본 연구에서는 용도에 맞는 반경질 특성을 얻기 위해 컵 발포시험을 통해 폴리올과 경화제, 발포제의 질량 비율을 100 : 36 : 14, 반응 환경온도는 50℃로 설정하였다.

설정된 비율에 따라 교반기에서 원재료를 혼합한 후 하측 금형의 캐비티 4개에 주입한 후 상측 금형을 덮고 별도의 치구를 이용하여 상하 금형이 벌어지지 않도록 고정시켰다. 제작된 금형은 내부에 온도 조절 기구가 설치되어 있지 않기 때문에 외부 히터를 이용하여 반응 환경온도로 가열하였다. 성형 완료 상태에서 개형 직후의 모습을 Fig. 8에 나타내었는데, 모든 캐비티에서 발포가 충분히 이루어져 제품의 외부 형상이 원활하게 성형되었음을 확인할 수 있었다. 다만 액상 재료를 사용하는 성형 공정의 특성 상 금형 분할면에 광택위한 플래시가 형성됨을 확인할 수 있다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 후처리 절단을 통해 플래시를 제거하면 광택면을 갖는 양호한 제품 외관이 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한, 그림에 나타난 제품의 절단 형상에서 제품 내부에 스펀지 형상의 다공질 구조가 형성됨을 확인할 수 있었다. 일반적으로 발포제의 함량이 과도하거나 반응 환경온도가 너무 높으면 과대 기포가 발생하여 다공질 구조가 붕괴될 수 있으나 본 제품의 경우 그림의 'A'에 나타난 바와 같이 비교적 고른 크기의 미세 기포가 제품 내부 전반에 분포하여 양호한 다공질 구조를 형성함을 확인할 수 있다. 또한, 반응사출성형에서는 발열 반응에 의해 온도가 높아진 발포 선단부가 상대적으로 온도가 낮은 금형과 최초 접촉하면 순간적으로 응축되며 치밀 표피가 형성되는 것으로 알려져 있는데[16], 본 제품에서도 그림의 'B'에 나타난 바와 같이 다공성 재질을 감싸는 치밀 표피(integral skin)가 형성되었음을 확인할 수 있었다. 폴리우레탄 반응 사출 성형에서는 이러한 치밀 표피로 인하여 제품 내부는 탄성이 큰 다공성 구조가 형성되지만 제품 표면은 광택이 나는 유려한 외관면의 형성이 가능하며, 본 제품에서 개발된 초고강도 콘크리트 금형을 이용하여 설계

의도에 맞는 제품이 성형되었음을 확인할 수 있었다.

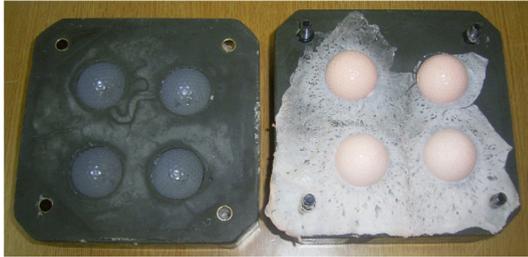


Fig. 8. The prototypes manufactured by using the developed 4-cavity concrete mold

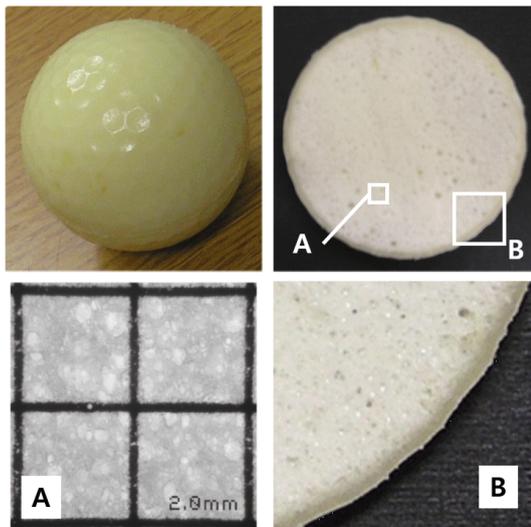


Fig. 9. The external appearance and the internal void cell structure of the RIM prototype

5. 결론

본 연구에서는 초고강도 콘크리트를 이용하여 폴리우레탄 반응사출성형 금형을 제작하였고, 이를 통해 건축재료인 콘크리트를 다품종 소량생산을 위한 금형 재료로서 이용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 100여 회의 반복 시험 과정에서 금형의 내구성과 관련된 어떠한 문제 또는 문제 발생의 조짐을 발견할 수 없었다. 이러한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 초고강도 콘크리트를 재질로 한 금형이 소량 생산 용도의 폴리우레탄 반응사출성형에는 충분히 사용 가능하다고 판단할 수 있었다. 다만, 현재 제작된 금형은 성형부와 상하형 가이드 기능만을 갖는 단

순 구조로 이루어져 있어 작업성을 향상시키기 위해서는 가열 기구나 취출 구조 등 금형 부품의 추가적인 설치가 필요하다.

- (2) 콘크리트의 경우 금속과는 달리 절삭이나 용접 등의 후처리 가공이 어렵기 때문에 금형 부품의 장착을 위해서는 콘크리트 타설 단계에 미리 부품을 장입시켜야 하는 등 기존 금형 제작법과는 다른 제작 방식의 확립이 필요하다.
- (3) 콘크리트 금형 기술의 안정화를 위해서는 반응 사출 성형과 금형에 대한 지식과 함께 콘크리트 조형에 대한 융합적인 지식이 필요하며 기계공학과 건축공학 분야의 융합 연구를 통해 보다 창의적이고 효율적인 금형 기술의 개발이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] M. Hawryluk. (2016). Review of Selected Methods of Increasing the Life of Forging Tools in Hot Die Forging Processes, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 845-866. DOI: 10.1016/j.acme.2016.06.001
- [2] D. H. Kim. (2018). A Study on the Design Efficiency of Mold Design Using Design Automation Method in the CAD System, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 20(6), 824-829. DOI: 10.17958/ksmt.20.6.201812.824
- [3] Y. J. Kim. (2014). FE Analysis of Forging Process for Improving Tool Life in Hot Forging of CV Joint Outer Race, *Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 13(3), 56-62. DOI: 10.14775/ksmp.2014.13.3.056
- [4] Y. H. Seo. (2020). Research on Prediction and Reduction Method of Manufacturing Cost of Automobile Steering Parts Based on Quantitative Prediction Technology of Cold Forging Mold Life, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 22(4), 726-732. DOI: 10.17958/ksmt.22.4.202008.726
- [5] K. H. Kim & J. S. Kim. (2012). Development of Silicone Mold Applying Corrosive Pattern of Tactile System, *Journal of The Korea Academia Industrial Cooperation Society*, 13(9), 3895-3899. DOI: 10.5762/kais.2012.13.9.3895
- [6] S. Chung, Y. Im, H. Kim, H. Jeong & D. A. Dornfeld. (2003). Evaluation of Micro-Replication Technology Using Silicone Rubber Molds and Its Applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1337-1345. DOI: 10.1016/s0890-6955(03)00164-0

- [7] N. M. Gomes, C. P. Fonte, C. C. Sousa, A. J. Mateus, P. J. Bartolo, M. M. Dias, J. C. Lopes & R. J. Santos. (2016). Real Time Control of Mixing in Reaction Injection Molding, *Chemical Engineering Research and Design*, 105, 31-43.
DOI: 10.1016/j.cherd.2015.10.042
- [8] D. J. Seo & J. R. Youn. (2005). Numerical Analysis on Reaction Injection Molding of Polyurethane Foam by Using a Finite Volume Method, *Polymer*, 46(17), 6482-6493.
DOI: 10.1016/j.polymer.2005.03.126
- [9] J. D. Jaung. (1998). *Concrete Material Engineering*, Seoul : Bosunggak.
- [10] V. Bilek, V. Tamalova, P. Jajek & C. Fiala. (2014). Evolution from High Strenght Concrete to High Performance Concrete, *Key Engineering Materials*, 629-630, 49-54.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.629-630.49
- [11] M. Kojima. (2016). *Ultra-High-Strength Concrete*, *Concrete Journal*, 54(5), 554-558.
DOI: 10.3151/coj.54.5_554
- [12] S. W. Shin & B. Y. Noh. (1995). The Application and Optimum Mix Design for Ultra-High Strength Concrete above 700kg/cm², *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 7(2), 60-67.
- [13] J. S. Park, Y. J. Kim, J. R. Cho & S. J. Jeon. (2013). Characteristics of Strength Development of Ultra-High Performance Concrete According to Curing Condition, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(3), 295-304.
DOI: 10.4334/jkci.2013.25.3.295
- [14] D. I. Yang, M. H. Gong & S. J. Jung. (2006). An Experimental Study on the Field Application of 130MPa Ultra High Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 22(9), 107-114.
- [15] H. S. Kim & J. W. Youn. (2009). A Study on Foaming Characteristics of Polyurethane Depeding on Environmental Temperature and Blowing Agent Content, *Transaction of Materials Processing*, 18(3), 256-261.
DOI: 10.5228/kspp.2009.18.3.256
- [16] M. M. A. Nikje & A. B. Garmarudi. (2011). Application of SiO₂ Nanoparticles for Thermophysical Improvement of Integral Skin Polyurethane Elastomers, *Advanced Composite Materials*, 20(1), 79-89.
DOI: 10.1163/092430410x504242

정 재 동(Jae-Dong Jaung)

[정회원]



- 1989년 2월 : 일본 동북대학교 건축공학과(공학박사)
- 1990년 3월 ~ 1994년 8월 : 동양중앙연구소 연구실장
- 1994년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 건축공학과 교수
- 관심분야 : 건축 재료 및 시공

· E-Mail : jdjaung@daegu.ac.kr

김 흥 석(Hong-Seok Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 1998년 10월 ~ 2002년 8월 : 현대전자 금형개발팀
- 2002년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 소재 성형 및 금형 설계

· E-Mail : kimkong@daegu.ac.kr