

유한요소법을 이용한 하수슬러지 소각재의 인공경량골재 제조시 압출성형해석

정 병 길 · 배 진 우 · 성 낙 창
동아대학교 환경공학과, *부영중공업(주)
(2007년 3월 26일 접수; 2007년 9월 7일 채택)

The Numerical Analysis of Extrusion Forming on the Manufactured Artificial Lightweight Aggregate Made of Incinerated Sewage Sludge Ash by a Finite Element Method

Byung-Gil Jung, Jin-Woo Bae* and Nak-Chang Sung

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**BUYOUNG SHIPBUILDING Co., Ltd., Busan 604-030, Korea*

(Manuscript received 26 March, 2007; accepted 7 September, 2007)

The main objective of this research was to evaluate the effects of process variables which were forming ability, flow displacement, effective stress, effective strain, fluid vector and products defects on manufactured artificial lightweight aggregate made of both incinerated sewage sludge ash and clay by means of the numerical analysis of a rigid-plastic finite element method. CATIA (3D CAD program) was used for an extrusion metal mold design that was widely used in designing aircraft, automobile and metallic molds. A metal forming analysis program (ATES Co.) had a function of a rigid-plastic finite element method was used to analyze the program. The result of extrusion forming analysis indicated clearly that a shape retention of the manufactured artificial lightweight aggregate could be maintained by increasing the extrusion ratio (increasing compressive strength inside of extrusion die) and decreasing the die angle. The stress concentration of metal mold was increased by increasing an extrusion ratio, and it was higher in a junction of punch and materials, friction parts between a bottom of the punch and inside of a container, a place of die angle and a place of die of metal mold. Therefore, a heat treatment as well as a rounding treatment for stress distribution in the higher stress concentration regions were necessary to extend a lifetime of the metallic mold. A deformity of the products could have made from several factors which were a surface crack, a lack of the shape retention and a crack of inside of the products. Specially, the surface crack in the products was the most notably affected by the extrusion ratio.

Key Words : Sewage sludge ash, Artificial lightweight aggregate, Rigid-plastic finite element method, Extrusion forming analysis

1. 서 론

전기·전자공학의 급속한 발전은 컴퓨터 기억용량의 극대화와 처리시간의 단축을 가능하게 하여 복잡한 여러 공학분야에서 연구대상물의 해석과 그

결과의 시각화에 컴퓨터를 효과적인 도구로 사용할 수 있게 해주었으며, 아울러 컴퓨터를 이용한 수치해석도 비약적인 발전을 거듭할 수 있었다¹⁾.

일반적으로 컴퓨터를 이용한 해석방법이란 실질적인 실험을 하기 이전에 그 실험의 특성적인 요소를 파악하고 그 요소변화에 알맞은 모의실험(simulation)을 통하여 실험으로 얻을 수 있는 여러 사실들을 미리 예측, 실험의 최적화를 꾀하는 방법을 말한다.

Corresponding Author : Nak-Chang Sung, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
Phone: +82-51-200-7681
E-mail: ncsung@dau.ac.kr

한편, 주어진 외부 힘에 대한 물체의 변형에 관련된 모델링과 모의실험은 질량-스프링 모델(mass-spring model), 유한요소방법(finite element method), 경계요소방법(boundary element method) 등과 같은 다양한 방법에 의해서 잘 연구되어져 왔다²⁾. 이중 모의실험에 가장 빈번히 사용되고 있는 방법 중의 하나인 유한요소방법은 1950년도에 항공기 동체의 강도와 공기의 흐름을 유체역학적으로 해석하기 위해 도입되었으나 점차 다른 분야에서의 유용성을 인정받아 토목공학, 건축공학, 기계공학 등에 이용되었으며, 1970년대부터는 전기·전자공학 분야의 전기·자계 등의 계산에 유한요소법을 적용함으로써 복잡한 대상을 보다 알기 쉽고 정확하게 분석할 수 있는 길을 열게 되었다. 또한 미국이나 일본 등에서도 유한요소법을 이용하여 물질의 전기적 특성을 분석한 논문들이 다수 보고되고 있는 실정이다¹⁾.

유한요소법은 소성 변형문제와 열전달 문제를 가장 엄밀하게 해석할 수 있을 뿐 아니라 두 문제의 연계를 가능하게 한다³⁾.

Lee와 Kobayashi⁴⁾의 선구적인 연구 이후에 유한요소 공정모델은 고성능 컴퓨터의 등장 덕택으로 다양한 소성가공 공정의 공정 해석에 적용되어 왔다. 유한요소에 근거한 공정 시뮬레이션은 공정과 제품에 가해진 요구조건을 만족시키기 위해서 현재의 공정변수들이 어떻게 수정되어야 하는가를 제시해 준다.

일본 등에서는 하수슬러지 소각재의 압축 소성기술을 이용하여 인공골재 또는 우수의 지하 저류를 위한 침투성 벽돌로도 제작하여 활용되고 있다. 최근 건설자재로의 유효이용 가능분야는 아스팔트 펠라, 노상 및 노반재, 경량골재와 시멘트원료 등이 있는데, 특히 소성공정을 통한 인공경량골재의 제조는 골재의 경량화, 에너지 비용절감 및 부족한 국내 골재수급을 동시에 충족시킬 수 있는 구체적인 방안이 될 것으로 전망된다.

한편, 인공경량골재의 제조는 환경오염의 방지 및 자원재활용의 측면을 동시에 충족시킬 수 있는 구체적인 방안이 될 것으로 전망된다^{5~7)}. 그러나 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재의 제조시 성형 방법에 대한 해석적 접근은 아직 미미한 수준이다.

따라서, 본 연구에서는 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 이용한 수치해석적 분석을 통하여 성형력, 유동변위, 유효응력, 유효변형률, 유동벡터, 제품결합 등의 공정변수가 하수슬러지 소각재와 점토를 이용한 인공경량골재 제조에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 이론해석

2.1. 수치해석 프로그램

본 연구에 이용된 수치해석 프로그램은 강소성 유한요소법으로서 해석대상물체를 대수의 요소로 분할하고 각 요소의 변형거동을 미·적분하여 성형력, 유동변위, 유동응력, 유효변형률, 유동벡터 등 여러 변수에 대한 결과를 분석하는 기법이다.

압출금형설계는 항공기 및 자동차, 금형설계에 사용되는 3D CAD인 CATIA를 사용하였고, 해석프로그램은 강소성 유한요소법을 이용한 소성가공 해석 전용 프로그램인 ATES사의 DEFORM 3D를 사용하였다. 해석에 사용된 압출금형의 단순화된 3차원 모델을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 압출공정의 유한요소법적 해석 가정

재료내의 micro pore에 의한 성형력 변동은 소재(슬러지-바인더 혼합물)내에서 2종 이상의 물질이 혼합되어 있고 교반을 행하였으므로 micro pore가 생성되기 때문에 압출공정이 시행되면 편지로 인해 재료를 압축함에 따라 압축성 변형거동을 보이다가 점차 성형력의 증가와 함께 재료내의 공극이 압착되면서 비압축성 변형거동을 하게 된다. 이러한 micro pore는 압출공정의 시행중 성형력 변화를 야기할 수 있으나 micro pore에 의한 성형력 저하요인은 전체 성형력에 비하여 기여도가 매우 미미하므로 무시한다.

실제의 재료는 불균일, 불균질, 불연속물질의 혼합물이나, 미분쇄 후 교반을 통한 혼합으로 연속성을 지녀야 하며, 등방성(isotropic) 강소성체(rigid-plastic material)이며 Von Mises 항복조건을 따르고, 체적일정조건을 만족한다. 또한 다이는 완전강체(rigid body)이며, 변형 중 온도변화와 관성은 무시한다.

본 연구에서 이론적 해석에 사용되는 수학적 모델에서 재료의 성형거동은 상당응력으로 상당변형률의 함수로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

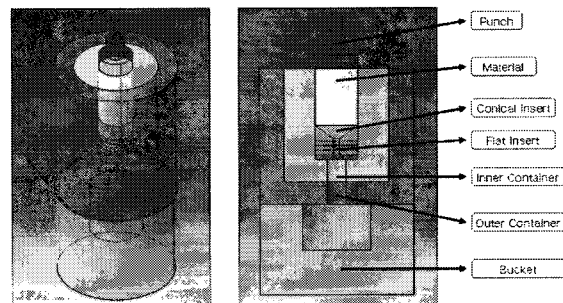


Fig. 1. The three-dimensional model for extrusion metal molding design.

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 재료가 변형되면서 발생하는 유동응력, C는 유동응력계수, $\bar{\epsilon}$ 는 재료의 유동에 따른 유동변형률을 표시하는 유효변형률을 나타낸다.

마찰조건은 소성변형 중 일정하며 식 (2)와 같다.

$$\tau = m k \quad (2)$$

여기서, τ 는 마찰응력, m은 마찰계수, k는 순수전단항복응력을 나타낸다.

2.3. 수학적 모델의 기하학적 변수와 해석조건

Fig. 2에 압출금형의 수학적 모델을 제시하였다. 여기서 D는 재료의 목표 직경으로 10 mm와 20 mm로 하였으며, L은 재료의 직경에 대한 정수배로 설정되었고, 다이각은 30°, 45°로 조절하였다. 또한 편치속도 1 mm/sec, 소재형상 Ø70 mm × 60 mm의 알루미늄 금형-혼합소재(마찰계수=0.4)를 사용하였다.

2.4. 공정변수

본 연구에서는 여러 가지 공정변수에 따른 최적의 설계데이터를 얻기 위하여 압축성형공정에 대한 수치해석적 기법을 도입하였다. 압출성형은 소결온도가 약간 높은 편이기는 하지만 프레스 성형보다는 다공성 확보가 용이하고 경제적이며 대량생산에 적합하여 압출성형으로 선정하였다⁸⁾. 수치해석의 주요 공정변수는 하수슬러지 소각재, 점토, 물의 혼합 중량비와 시편의 기하학적 형상으로 설정하였다. 사용된 수치해석적 기법은 현재 상용화와 해석결과의 정밀도에서 가장 신뢰도가 높은 강소성 유한요소법을 채택하였으며, 상용화된 유한요소해석 패키지인 ATES사의 DEFORM-3D와 ANSYS사의 ANSYS WorkBench를 사용하여 모의실험 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 성형력 해석

인공경량골재 제조공정의 성형력 해석은 변위제

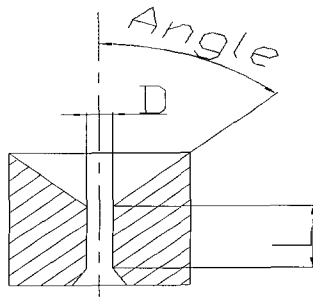


Fig. 2. Mathematical model of extrusion die.

어방식으로 실시하였으며, Fig. 3에 압출공정의 성형력에 대한 해석결과를 나타내었다.

3.1.1. 압출비의 영향

토출구의 직경이 10 mm인 경우가 20 mm인 경우보다 높게 나타났다. 이것은 소재의 유동이 토출구에서 병목현상을 일으키면서 소재의 내부변형에 너지 증가와 함께 성형력 상승을 야기시키는 것으로 판단된다.

3.1.2. 다이각의 영향

다이각이 30°인 경우가 45°인 경우보다 더 높게 나타났다. 이것은 다이각이 작을수록 소재와 금형의 토출구 부분의 마찰면적이 증가하므로 마찰에너지 증가를 야기시키고, 상술한 바와 같이 소재 유동의 병목현상을 유발하는 것으로 판단된다.

3.1.3. 다이 Land 길이의 영향

다이 Land 길이는 동일 압출비, 동일 다이각일 때 성형력에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.2. 유동변위 해석

Fig. 4에 인공경량골재의 소재직경별 유동변위 해석결과를 나타내었다. 토출구의 직경이 10mm인 경우가 20mm인 경우보다 소재의 변형영역이 넓게 나타났다. 이것은 성형편치와 소재가 맞닿아 있는 영역은 변형을 하지 않지만 토출구의 다이각이 생성되는 부위에서는 변형이 개시되는데 다이각이 작을수록 소재의 유동가능체적이 감소함으로 인해 상대적으로 압출비가 작은 경우보다 더욱 많은 변형을 하게된다. 이것으로서 압출비를 크게 하여 압출금형 내에서의 압축력을 상대적으로 상승시킴으로써 생산제품의 보형성을 유지할 수 있을 것으로 사료된다.

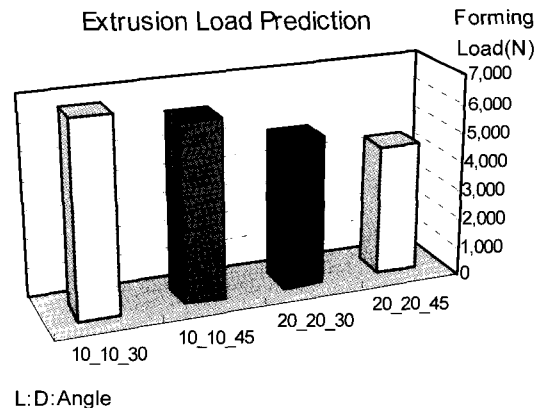


Fig. 3. The modeling result of forming ability for manufactured artificial lightweight aggregate.

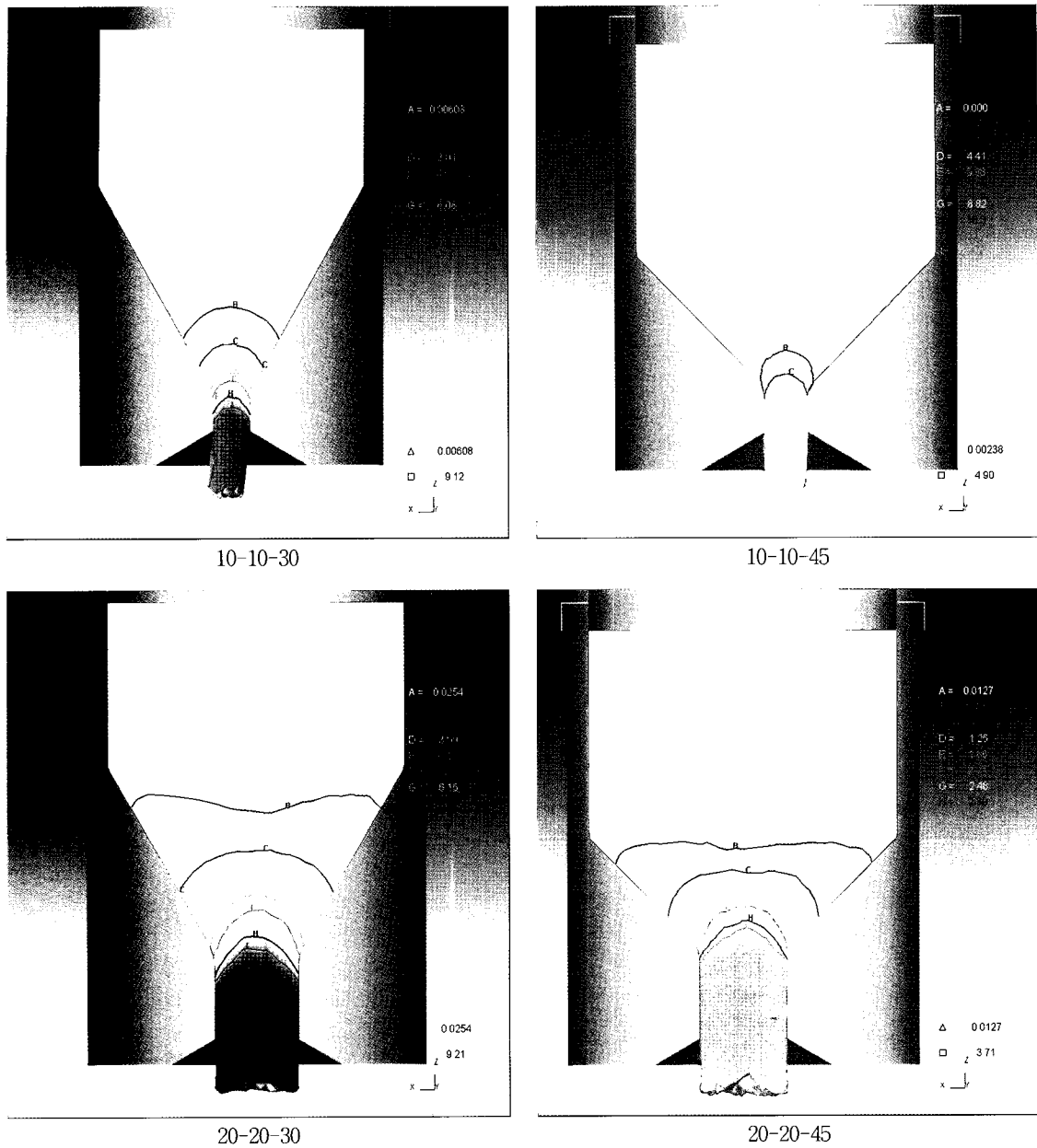


Fig. 4. The modeling results of flow displacement according to material diameter of manufactured artificial lightweight aggregate.

3.3. 유효응력 해석

Fig. 5에 인공경량골재의 소재직경별 유효응력 해석결과를 나타내었다. 압출비가 클수록 금형의 응력 집중부가 많은 것을 알 수 있었으며, 이는 재료유동이 토출구에서 재료가 빠져나가는 것보다 압축되는 양이 상대적으로 압출비가 큰 쪽이 더 작기 때문으로 판단된다. 또한 편치와 소재의 접하는 부위와 편치 말단과 내부컨테이너와의 마찰부분, 그리고 다이

가이 주어지는 부분, 금형의 토출구 부위에 응력집중이 심함을 볼 수 있었다. 이에 따라 금형수명의 연장을 위하여 응력집중이 발생하는 각 부분에 응력분산을 위한 라운딩 처리와 같은 형상의 제어와 함께 열처리가 필요함을 알 수 있었다.

3.4. 유효변형을 해석

Fig. 6에 인공경량골재의 소재직경별 유효변형률 해석결과를 나타내었다. 유동변위의 연속선상의 공

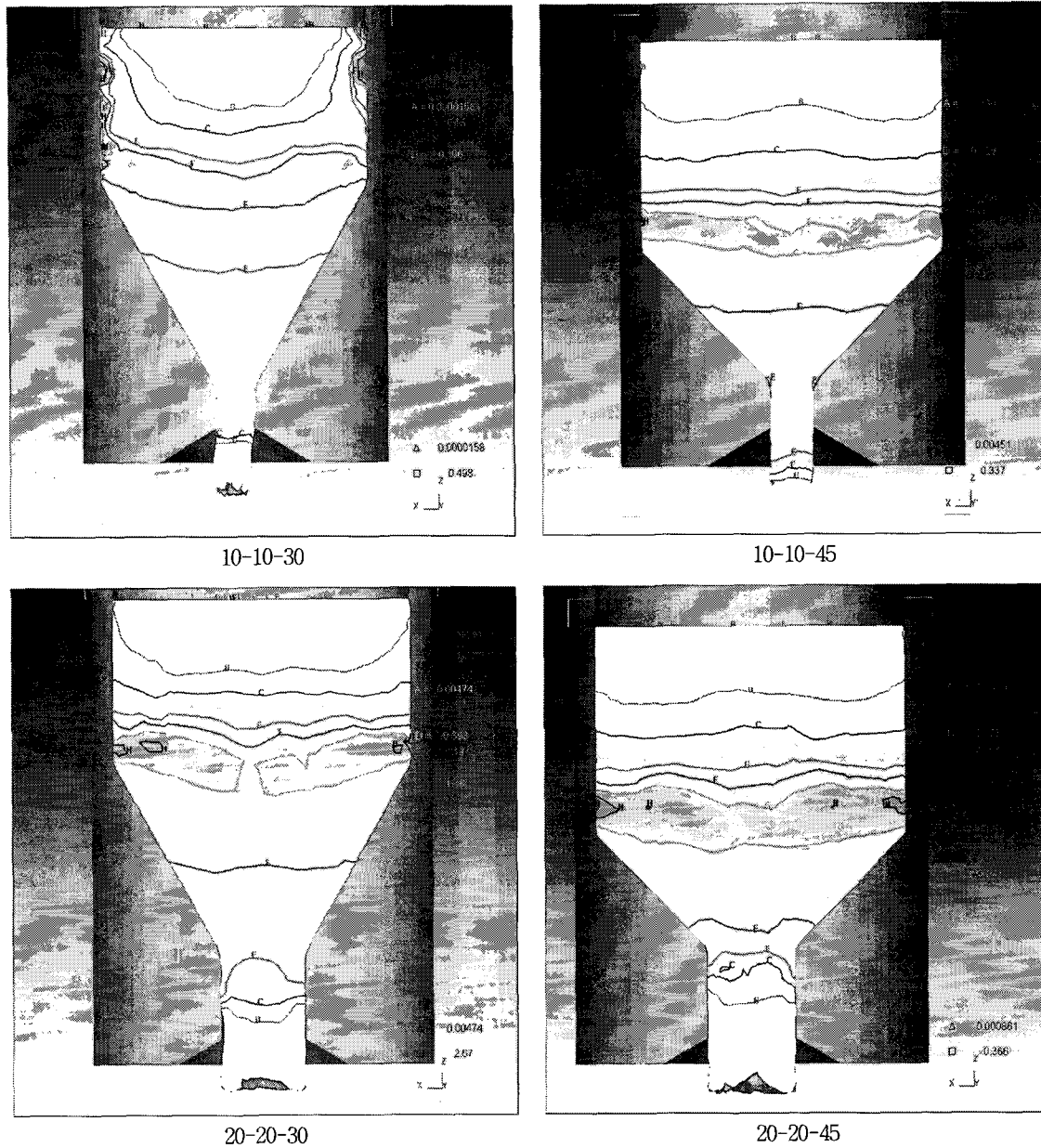


Fig. 5. The modeling results of effective stress according to material diameter of manufactured artificial lightweight aggregate.

정변수인 유효변형률은 변위의 양상과 동일하게 나타났다. 특별히 유효응력 집중부위에서 유효변형률도 함께 집중됨을 알 수 있었다.

3.5. 유동벡터 해석

Fig. 7에 인공경량골재의 소재직경별 유동벡터 해석결과를 나타내었다. 유동벡터의 등고선의 위치와 크기를 확인한 결과 재료가 컨테이너에서 토출구로 유입되는 양상을 확인할 수 있었다. 압출비가 크고

다이각이 작은 경우에는 재료의 유동체적이 적은 가운데 좁은 출구로 빠져나옴에 따라 유동속도가 빠르고 그 분포가 좁은 영역에서 나타난다. 따라서 혼합재료 내부의 공극을 제거하고 제품보형성을 위한 압축력을 더욱 많이 부가하려면 압출비는 크게, 다이각은 작게 하는 것이 유리하다.

3.6. 제품결함 해석

Fig. 8에 인공경량골재의 소재직경별 제품결함 해

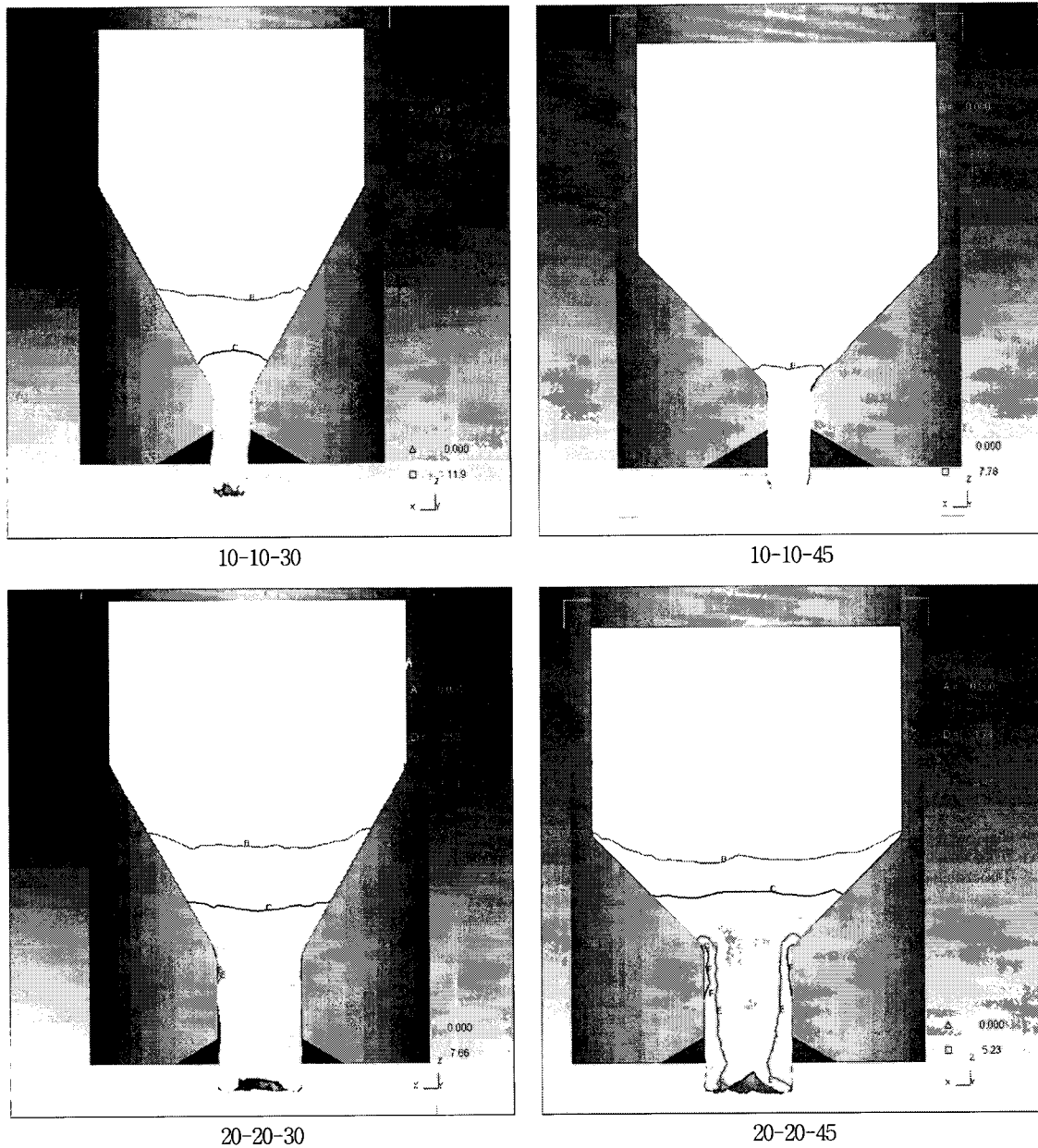


Fig. 6. The modeling results of effective strain according to material diameter of manufactured artificial lightweight aggregate.

석결과를 나타내었다. 제품의 결합은 표면균열 및 보형성(형상유지능력)의 부족, 제품 내부의 크랙 등이 발생할 수 있다. 제품내부의 크랙과 표면 균열은 재료의 유동속도 불연속으로 인한 결과이며, 재료의 유동속도는 금형 land부의 마찰 및 다이각, 압출비에 영향을 받음을 이미 언급하였다. 특별히 제품 표면균열은 압출비에 더욱 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용한 수치 해석적 분석을 통하여 성형력, 유동변위, 유효응력, 유효변형률, 유동벡터, 제품결합 등의 공정변수가 하수슬러지 소각재와 점토를 이용한 인공경량골재 제조에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 압출비를 크게 하여 압출다이 내에서의 압축

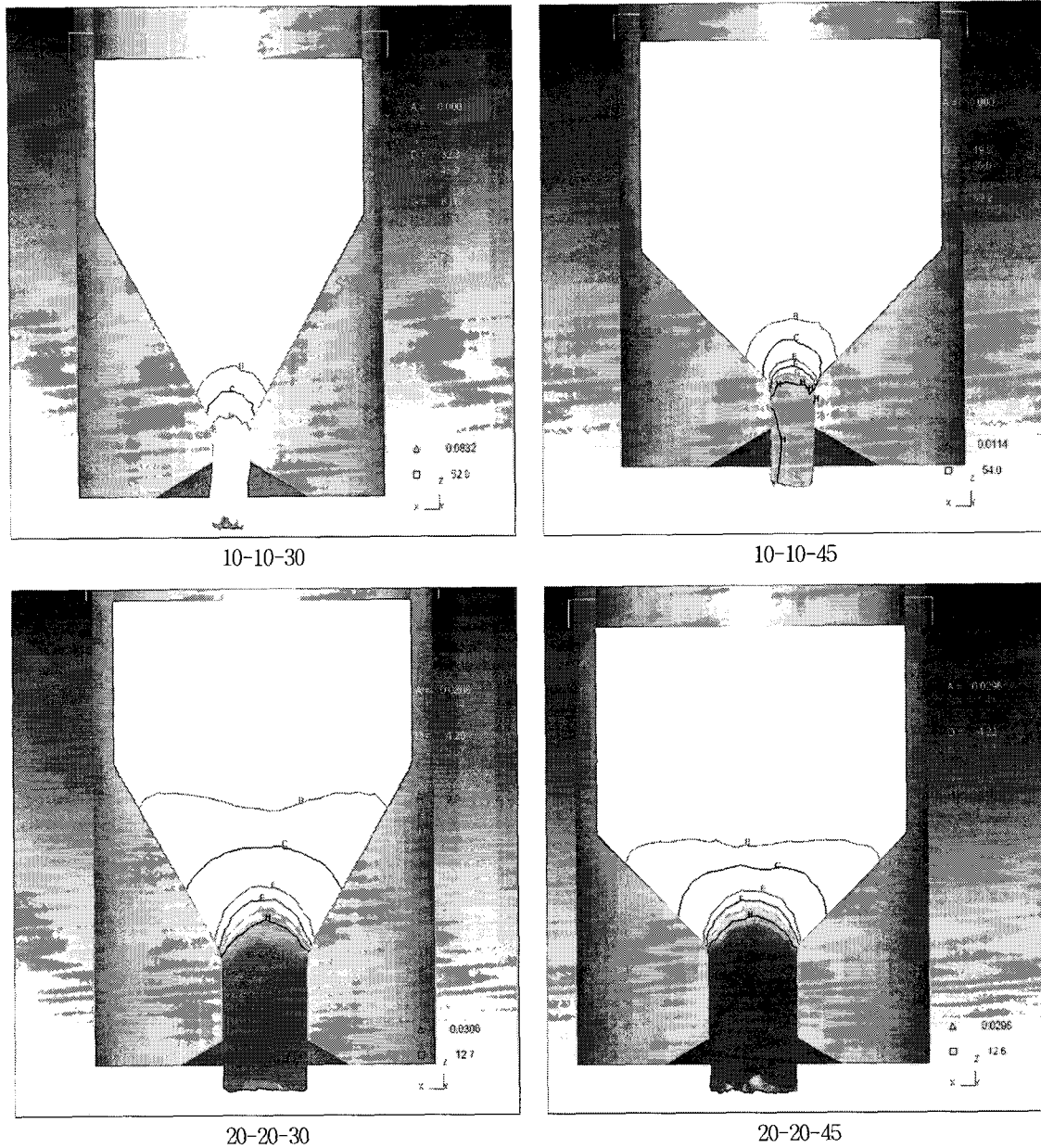


Fig. 7. The modeling results of fluid vector according to material diameter of manufactured artificial lightweight aggregate.

력을 상승시키고 다이각을 작게 함으로써 인공경량골재 생산제품의 보형성을 유지할 수 있음을 해석 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

2) 압출비가 클수록 금형의 응력 집중부가 많은 것을 알 수 있었으며, 또한 펀치와 소재의 접하는 부위와 펀치 말단과 내부컨테이너와의 마찰부분, 그리고 다이각이 주어지는 부분, 금형의 토출구 부위에 응력집중이 심함을 볼 수 있었다. 이에 따

라 금형수명의 연장을 위하여 응력집중이 발생하는 각 부분에 응력분산을 위한 라운딩 처리와 같은 형상의 제어와 함께 열처리가 필요할 것으로 판단된다.

3) 제품의 결함은 표면균열 및 보형성(형상유지능력)의 부족, 제품 내부의 크랙 등이 발생할 수 있는데, 특히 제품 표면균열은 압출비에 더욱 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

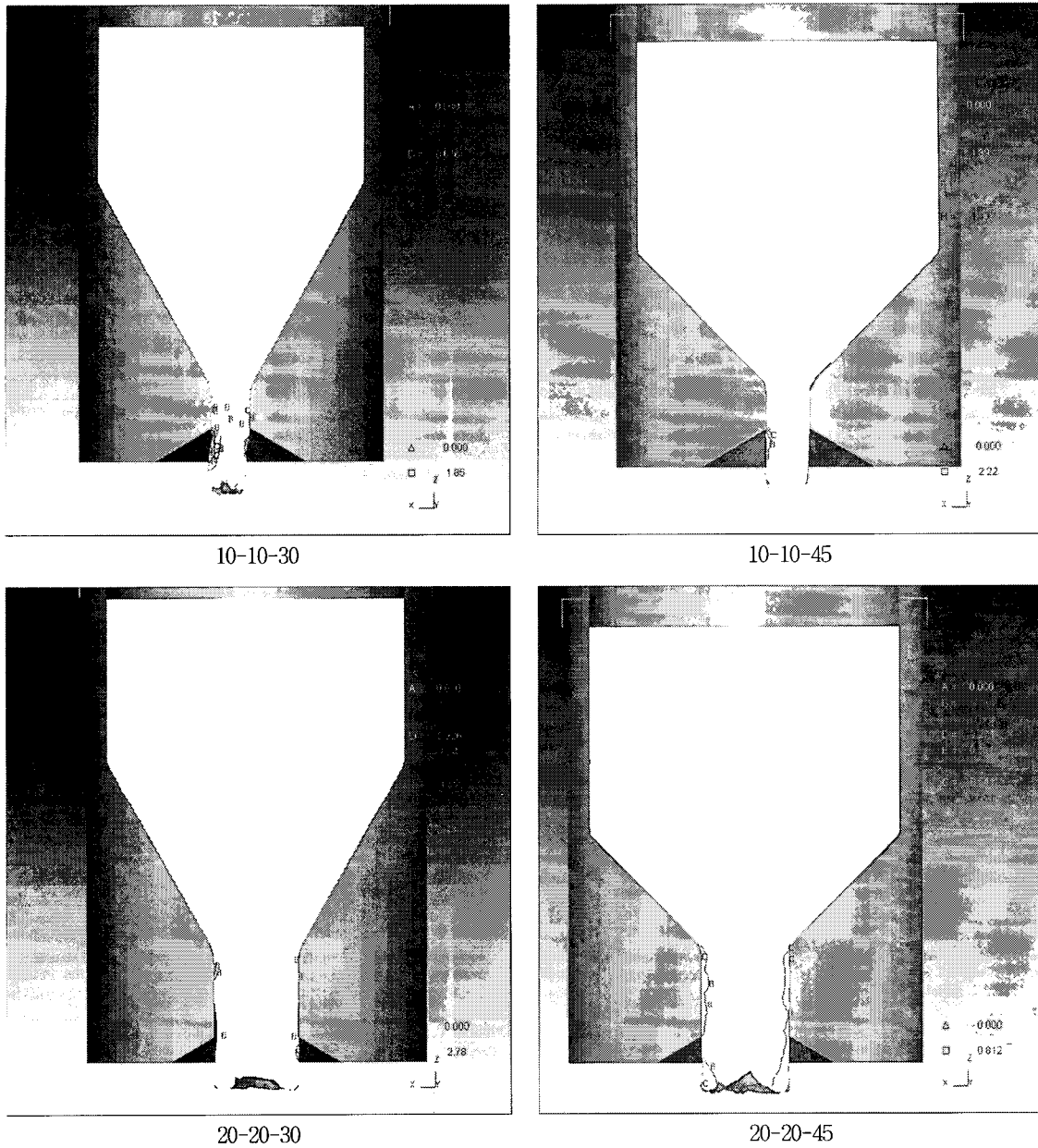


Fig. 8. The modeling results of products defects according to material diameter of manufactured artificial lightweight aggregate.

감사의 글

이 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업의 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 이수길, 김도영, 김충혁, 이준웅, 1992, 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 그 응용, 전기

전자재료학회지, 5(1), 1-6.

- 2) 홍민, 최민형, 2005, 변형 가능한 물체를 위한 효과적인 시뮬레이션 제어, 한국컴퓨터교육학회논문지, 8(1), 73-80.
- 3) 교육부, 1998, 유한요소법을 이용한 비-등온 압출공정의 금형 형상 최적설계, 2pp.
- 4) Lee C. H., Kobayashi S., 1973, New solutions to rigid-plastic deformation problems using a

- matrix method, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, 95, 865-873.
- 5) Choi Y. B., 1990, Materials mineral of light-weight aggregates, Mineral and Industry, 3(1), 1024-1030.
- 6) 서해연안환경연구센터, 한국지질자원연구원, 한국해양연구원, 2002, 인천 앞바다(경기만 일대) 해사 부존량 현황, 3pp.
- 7) 김도경, 임남웅, 2004, 친환경 건축 및 자재 사용에 대한 실태연구-환경경영시스템(ISO 14001) 구축 및 국내 건설회사의 친환경 자재 사용에 대해서, 한국폐기물학회, 2004년 추계학술연구회 발표논문집, 35-42.
- 8) 과학기술부, 환경부, 2006, 유해폐분진의 에코소재화 기술개발, 161pp.