

# 고강도 재료의 볼스타드 냉간자동단조에서 발생한 금형의 파괴 원인 분석

이추실<sup>1</sup>, 엄재근<sup>2</sup>, 김영수<sup>3</sup>, 김응주<sup>4</sup>, 전만수<sup>#</sup>

## Reason of Die Fracture in Automatic Multistage Cold Forging of a High Strength Ball-Stud

Q. S. Li, J. G. Eom, Y. S. Kim, E. J. Kim, M. S. Joun

### Abstract

In this paper, a longitudinal die insert fracture which occurred during cold forging of a high strength ball-stud with a sound die design nearly optimized empirically for relatively low strength material of SCM435 is introduced and the reason is revealed. A comparative study between SCM435 and ESW105 is quantitatively made using a thermoelastic finite element method for die structural analysis coupled with a forging simulator theoretically based on a rigid-plastic finite element method. It has been shown that the longitudinal die insert fracture caused from non-optimized value of shrink fit, emphasizing that the die optimal design is inevitable for cold forging of high strength materials.

**Key Words :** Die Fracture(금형파괴), Die Structural Analysis(금형 구조해석), Ball-Stud(볼스타드)

### 1. 서론

냉간금형의 수명은 파괴, 마모, 소성변형 등에 의하여 좌우된다[1]. 그 중에서도 파괴에 의하여 금형의 수명을 다하는 사례가 가장 많다. 단조 중 금형의 파손은 생산성과 불량품의 양산으로 이어 짐은 물론이고, 인명 사고로 이어질 수 있다는 점에서 산업현장에서는 이 문제를 중시하고 있다.

금형의 파괴 문제는 금형재료, 단조공정설계, 제작과정, 운용 이력 등이 매우 복잡하게 얽혀 있기 때문에 정량적인 접근이 용이하지 않다. 단조공정 및 금형설계에 기인하는 문제의 원인은 금형 구조해석 기법을 이용하여 규명이 가능하지만, 역학 문제 자체가 복잡하고 이에 적합한 도구가 없기 때문에 많은 연구자들[2-13]의 노력에도 불구하고 공정 및 금형설계 기술자들의 요구를 충족시키지는 못하고 있다.

Joun 등[9]은 금형의 구조해석을 위하여 가변벌

칙기법(varying penalty method)를 제안하였으며, 이를 바탕으로 단조시뮬레이터 AFDEX[16]와 연계한 금형구조해석 프로그램 AFDEX/DIE를 개발하였다. 기 제안된 방법은 수치적 안정성과 결과의 정확도가 확보되어 있다.

본 연구에서는 고강도 재료의 볼스타드 냉간단조 공정 중에서 발생한 금형의 파괴 원인을 기 개발된 금형 구조해석 기법을 이용하여 규명하고 자 한다.

### 2. 금형 파손 사례 및 원인 분석

#### 2.1 금형 파손 사례

Fig. 1은 4단 자동다단냉간단조 공정에 의하여 볼스타드가 제조되는 과정을 나타내고 있다. 이 공정은 소재가 SCM435일 경우, 금형이 비정상적으로 파괴된 사례가 없었다. 그러나 고강도 신소재인 ESW105[16]재료를 사용할 경우 600~700 개의 제품을 생산한 이후에 파손되었다. 파손된 금형의 사진과 제품에 새겨진 크랙 자국을 Fig. 2에 나타내었다.

1. 경상대학교 대학원 기계공학과  
2. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터  
3. 태양금속공업㈜  
4. 한국생산기술연구원  
# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

## 2.2 단조 공정의 시뮬레이션

먼저 SCM435와 ESW105의 두 재료를 비교하였다. 단조 직전의 소재로부터 획득한 인장시험 결과로부터 두 재료의 유동응력 곡선을 구하여 Fig. 3에 나타내었다[14]. 그림에서 보는 바와 같이 단조 직전의 상태에서 두 재료의 유동응력은 큰 차이를 보이고 있다.

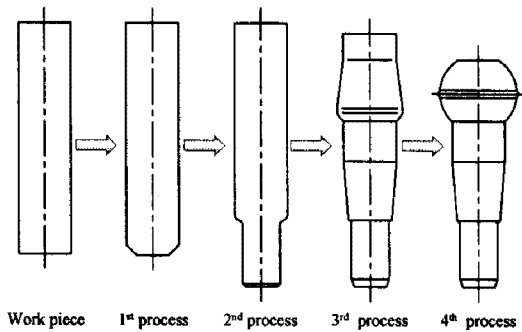
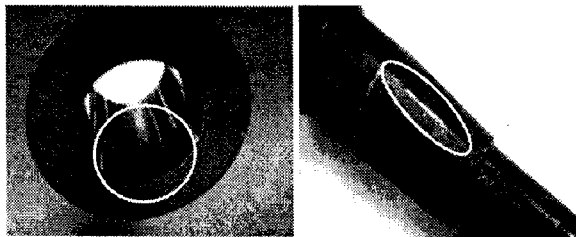


Fig. 1 Cold forging process design of a ball-stud



(a) Fractured die (b) Scratched product  
Fig. 2 Fractured die and its associated scratched product

금형 구조해석에 필요한 표면력 예측을 위하여 감소성 유한요소법에 바탕을 둔 단조 시뮬레이터 AFDEX 2D[16]를 사용하였다. 금형-소재 접촉면에서 Coulomb 마찰법칙을 따른다고 간주하였고, 마찰계수는 0.05로 가정하였다. 해석결과(Fig. 6 참조)는 금형의 구조해석 목적으로 사용되었다.

## 2.3 금형의 구조해석

Fig. 4(a)는 금형 파괴가 발생한 볼스타드 단조 공정의 제4단의 하금형의 설계도이다. 금형은 3층으로 분리되어 있고, 외곽의 체결용 실린더에 의하여 체결된다. 각 층의 금형 부품은 다이인서트와 두 개의 열박음용 링으로 구성되어 있다. Fig. 4(a)에서 ①, ⑤, ⑧으로 표시된 다이인서는 모두 초경합금으로 만들어지고, 열박음 링은 SKD61로 만들어진다.

금형의 구조해석 목적으로 Joun 등[9]이 개발한 가변벌칙기법(varying penalty method)에 바탕을 둔

AFDEX2D/DIE를 사용하였고, 재료의 물성치는 Table 1[14, 17]에 정리하였으며, 다이인서트-열박음 링의 접촉면에서 마찰계수는 0.1로 하였다.

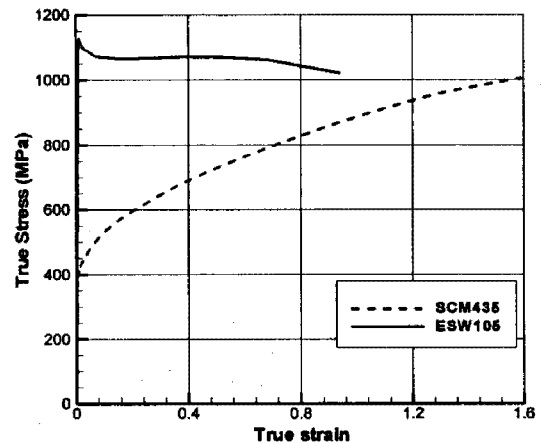
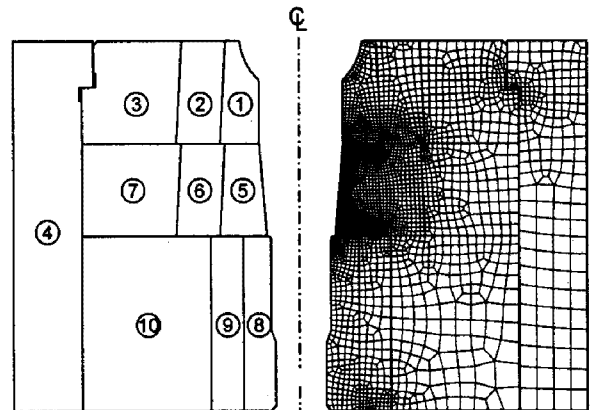


Fig. 3 Flow stress information of SCM435 and ESW105



(a) Drawing of lower die (b) Finite element model  
Fig. 4 Detailed drawing of lower die of the last stage and its finite element model

파괴가 발생한 시점을 파악하기 위하여 펀치의 스트로크의 증가에 따른 유효응력과 원주방향의 응력 성분의 변화를 추적하였다. 응력 변화의 추적 위치로 금형 파괴가 발생한 지점을 선택하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 공정의 맨 마지막 순간뿐만 아니라 스트로크가 2mm와 16mm일 때 응력과 원주방향의 응력성분이 모두 극대치를 나타내고 있다. 따라서 이 두 경우에 대한 구조해석 결과를 상세하게 분석하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 스트로크가 16mm일 때, 금형이 파괴된 지점에서 소재의 유효변형률은 약 0.15 내외이므로 Fig. 3으로부터 ESW105의 유효응력이 SCM435의 1.9배로 나타났다. 그리고 금형-소재 경계상에서 ESW105의 면압이 SCM435의 약 1.3배로 나타났다. 공정의 종료 순간, 금형파손지점

에서 ESW105의 유효응력은 SCM435의 1.7배로 나타났으며, 유효변형률 등은 전자와 유사하였다.

스트로크가 16mm일 때 금형에 작용하는 유효응력의 분포와 원주방향의 응력성분을 Fig. 7에서 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 금형이 파괴된 지점에서 유효응력의 절대치는 ESW105가 2850MPa인 반면, SCM435는 779MPa이다. 특히 ESW105의 경우, 원주방향의 주응력이 인장상태이며 그 크기가 871MPa에 이르고 있다. 이에 반해서 SCM435는 원주방향의 주응력이 대부분 압축상태에 머물고 있음을 알 수 있다. 공정 완료 시점에서 분석 결과도 Fig. 7의 결과와 매우 유사하였으며 Fig. 5에서 보는 바와 같이 다른 스트로크에 대한 결과도 유사한 경향을 보였다.

Table 1 Elastic property of die materials

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
WC	696	0.24
SKD11	210	0.30
SKD61	200	0.28

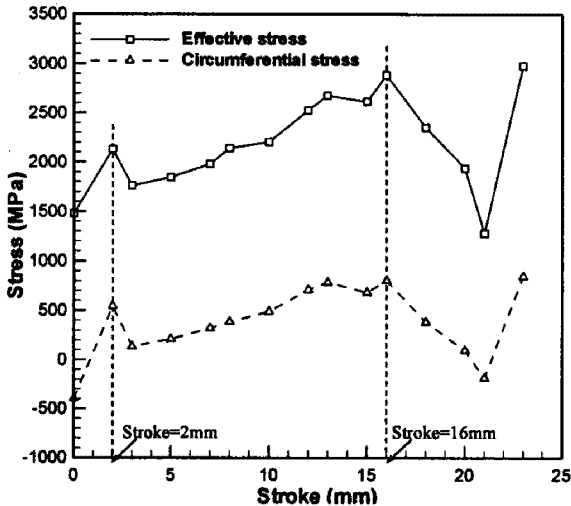


Fig. 5 Variation of effective stress and circumferential stresses at the fracture point with stroke

다이인서트로 사용된 초경합금은 인장강도가 압축강도에 비하여 매우 작다. 일례로 초경합금의 압축강도가 2683MPa인 반면, 인장강도는 압축강도의 13%에 지나지 않는 344MPa이라는 자료가 있다[15]. 이러한 초경 재료의 일반적 특성을 근거로 판단할 때, Fig. 2의 금형파괴 원인은 SCM435의 성형에 적합하도록 설정된 예압력이 ESW105에서는 다소 작았기 때문이라고 판단된다. 즉, ESW105가 고강도 소재이므로 성형하중과 면압의 증가로 인한 금형의 원주방향 응력성분이 증가한 것이 금형파괴의

직접적 원인이라고 판단된다. 따라서 ESW105의 재료 변형특성을 고려한 금형설계가 불가피하다.

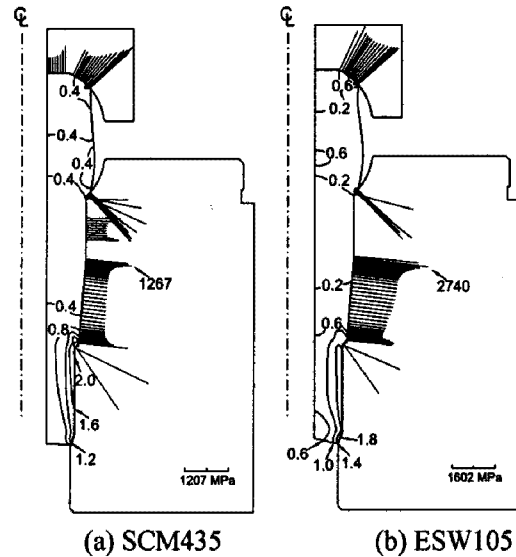


Fig. 6 Effective strain and interfacial stress at elapsed stroke of 16mm

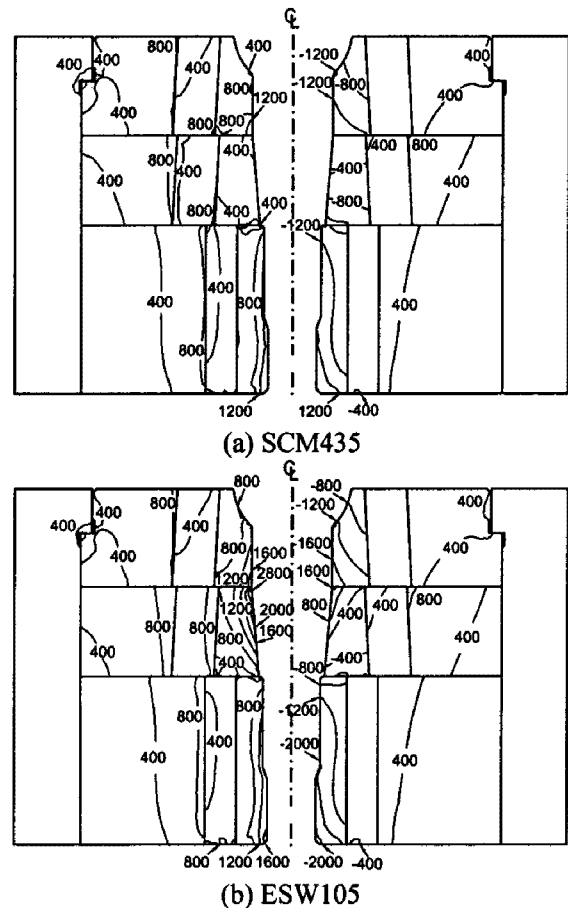


Fig. 7 Effective stress and circumferential stress at the possible die-fracture stroke

### 3. 결 론

본 논문에서는 고강도 소재인 ESW105의 볼스타드 냉간단조 중에 발생한 금형의 파손 문제의 원인을 규명하였다. 이 문제에서 금형 파손의 인과관계는 명확하다. 즉, SCM435의 소재를 적용할 경우 비정상적인 금형 파손이 발생한 사례가 없었으나, SCM435에 비하여 고강도인, 특히 저변형률에서 상대적으로 유효응력이 큰 ESW105의 소재를 적용했을 경우에는 비정상적으로 금형이 파손되는 사례가 반복적으로 발생하였다. 따라서 본 연구에서 대상으로 한 금형 파손 사례는 비교 연구가 가능하므로 금형의 파손 원인을 비교적 정량적으로 분석할 수 있는 예제이다.

비교 연구 결과, SCM435 소재에 적합하도록 개발된 기존 공정에 SCM435를 적용할 경우 단조 중에 금형에 부과되는 응력의 분포가 최적화되어 있는 반면, 동일한 공정과 금형에 고강도 소재인 ESW105를 적용하면 예압력이 최적치에 못 미치기 때문에 금형에 과도한 유효응력과 원주 방향의 인장응력을 야기하였다. 특히 최대의 유효응력과 최대의 원주 방향의 인장응력이 금형 파괴가 발생한 지점과 매우 인접한 지점에서 발생하였다. 이 점이 금형의 직접적인 파손 원인이라고 사료된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 청정기반전략기술개발사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0066590).

### 참 고 문 헌

[1] K. Lange, L. Cser, M. Geiger, J. A. G. Kals, 1992, Tool life and tool quality in bulk metal forming, CIRP, Vol. 41, No. 2, pp. 667~676.  
[2] S. Matsubara, H. Kudo, 1995, An analysis of stress and strain induced in some die and punch assemblies for cold forging by the finite element method, 7th Int. Congress on Cold Forging, University of Birmingham, pp. 63~69.  
[3] J. L. Frater, R. Zinolabedini, 1989, Stress analysis of dies having multiple shrink rings, J. Mater. Shaping Technol., Vol. 7, No. 2, pp. 67~80.  
[4] U. Engel, M. Hänsel, 1990, FEM-simulation of fatigue crack growth in cold forging dies, Adv. Tech.

Plast., Vol. 1, pp. 355~360.  
[5] Y. Nagao, M. Knoerr, T. Altan, 1994, Improvement of tool life in cold forging of complex automotive parts, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 46, No. 3-4, pp. 73~85.  
[6] K. F. Hoffmann, K. Lange, 1989, Computation of the elastic expansion and stresses in cold extrusion dies with non-axisymmetric inner shape, Trans. NAMRI of SME, Vol. 17, pp. 71~78.  
[7] S. Takahashi, C. A. Brebbia, 1990, Forging die stress analysis using boundary element method, Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp. 203~210.  
[8] M. Fu, B. Shang, 1995, Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 53, No. 3-4, pp. 511~520.  
[9] M. S. Joun, M. C. Lee, J. M. Park, 2002, Finite element analysis of prestressed die set in cold forging, Int. J. mach. Tools Manuf., Vol. 42, No. 11, pp. 1213~1222.  
[10] Y. Lee, J. Lee, Y. Kwon, T. Ishikawa, 2004, Modeling approach to estimate the elastic characteristics of workpiece and shrink-fitted die for cold forging, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 147, No. 1, pp. 102~110.  
[11] J. H. Kang, K. O. Lee, J. S. Je, S. S. Kang, 2007, Spur gear forging tool manufacturing method considering elastic deformation due to shrink fitting, J. Mater. Proc. technol., Vol. 187-188, No. 12, pp. 14~18.  
[12] O. Eyercioglu, M. A. Kutuk, N. F. Yilmaz, 2009, Shrink fit design for precision gear forging dies, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 209, No. 4, pp. 2186~2194.  
[13] H. C. Lee, M. A. Saroosh, J. H. Song, Y. T. Im, 2009, The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 209, No. 8, pp. 3766~3775.  
[14] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method, Mechanics of Materials, Vol. 40, No. 7, pp. 586~593.  
[15] <http://www.matweb.com>  
[16] <http://www.afdex.com>  
[17] 엄재근, 이추실, 장성민, 안순태, 손요현, 현성운, 김혁, 윤덕재, 전만수, 2009, 선조질강 소재의 단조공정 측면에서의 특징, 한국소성가공학회 춘계학술대회, pp. 48~51.  
[18] 김성현, 최환, 이종찬, 2002, 티타늄 합금의 연삭특성에 관한 연구, 한국기계공학회지, 제 1권, 제 1호, pp. 55~62.