

냉간단조에서 금형 열박음 영향의 정량적 분석

Quantitative Analysis of Effect of Shrink Fit in Cold Forging

이추실¹, 김민철², 정동찬³, 손요현⁴, 전만수^{1,✉}
QiuShi Li¹, MinCheol Kim², DongChan Jung³, YoHun Son⁴ and ManSoo Joun^{1,✉}

1 경상대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National Univ.)

2 경상대학교 대학원 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National Univ.)

3 태양금속공업(주) (Taeyang Metal Industrial Co.)

4 영신금속공업(주) (Youngsin Metal Industrial Co.)

✉ Corresponding author: msjoun@gnu.ac.kr, Tel: 055-751-5316

Manuscript received: 2010.4.15 / Revised: 2010.7.31,10.21 / Accepted: 2010.12.9

In this paper, effects of major design parameters of cold forging dies on die mechanics are quantitatively investigated with emphasis on shrink fit using a thermoelastic finite element method. A ball-stud cold forging process found in a cold forging company is selected as a test process and the effects of die insert material, magnitude of shrink fit, dimension of shrink ring, number of shrink rings, partition of die insert and clamping force on effective stress and circumferential stress are analyzed. It has shown that the number of shrink rings, magnitude of shrink fit, and Young's modulus of die insert material have strong influence on compressive circumferential stress in die insert but that the influence of the other design parameters is relatively weak.

Key Words: Die Structural Analysis (금형 구조해석), Shrink Ring (보강링), Shrink Fit (열박음), Die Design Parameters (금형 설계변수), Multi-Stage Automatic Cold Forging (자동다단 냉간단조)

1. 서론

냉간단조용 금형은 일반적으로 다이인서트(die insert), 열박음 목적의 링(shrink ring), 체결용 부품 등으로 구성된다. 물론 금형은 다이세트에 고정되고, 다이세트는 단조기에 조립되어 작동된다. 냉간단조 금형의 수명은 금형의 정도와 함께 관련 제조업의 경쟁력을 좌우하는 주요 요소이다. 냉간단조 금형의 수명은 파괴, 마모, 소성변형 등에 의하여 좌우된다.¹ 단조 중 금형의 파손은 생산성과 불량품의 양산으로 이어짐은 물론이고, 인명 사고로 이어질 수 있다. 따라서 관련 기업체에서 이 문제는 매우 중요하게 취급되고 있다.

대량 생산 목적의 금형의 경우, 금형의 파괴

및 소성변형 등을 막기 위하여 다이인서트는 초경합금(HW-V20) 등의 고강도 소재를 사용하고 열박음용 링은 주로 합금공구강이 사용되고 있다. 물론 초경합금은 가공이 용이하지 않고, 가격이 비싸기 때문에 가능하다면 다이인서트도 합금공구강으로 제작되고 있다. 금형 재료는 경한 성질을 가지고 있고, 압축강도가 인장강도에 비하여 크다.

따라서 냉간단조에서 금형의 예압은 필수적이다. 대개의 경우 0.4% 내외의 금형 예압을 실시하는데, 금형 재료의 열팽창계수가 0.000012 이라고 가정하면, 약 330℃의 열하중을 부과하는 것과 맞먹는다. 다이인서트를 예압하지 않을 경우, 재료를 통하여 전달된 금형의 면압에 의하여 원주방향 응

력 성분(circumferential stress component 또는 hoop stress)이 인장상태가 되고, 이는 금형의 파괴로 직결될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 다이인서트 외곽을 에워싸는 열박음용 링을 통하여 예압을 가하여 미리 원주 방향으로 압축 응력 성분이 작용하도록 하고 있다.

금형의 열박음은 매우 중요하지만, 다물체 접촉문제를 포함하고 역학적으로 복잡하기 때문에 이에 관한 적용성이 높은 연구 결과는 매우 제한적이다. 물론 열박음된 금형 구조해석 기술은 다방면으로 개발되어 있다. 그럼에도 불구하고 금형의 열박음 또는 예압에 관한 실용적 연구는 흔하지 않다. 전술한 바와 같이 역학적으로 매우 복잡할 뿐만 아니라 금형의 형태가 다양하여 응용 연구를 체계화하는데 한계가 있기 때문이다.

열박음 현상 규명은 금형 구조해석과 불과분의 관계에 있으며, 열박음을 고려한 금형 구조해석에 관한 다수의 연구가 이루어졌다.²⁻¹⁴ 1980년대 후반부터 대부분의 연구는 유한요소법 또는 경계요소법을 이용하였으며, 일부의 연구는 단조 시뮬레이터와 연계한 수치적 연구, 특히 응용 연구에 초점이 맞추어졌다. 기존 연구들을 조사해 보면, 기본적으로 매우 유사한 수식을 사용하지만, 접근 방법에 기인하는 결과의 정확도와 사용의 편리성은 다소의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그리고 단층 금형을 대상으로 구조해석을 실시한 연구가 대부분이다. 실제 자동다단 냉간단조(multi-stage automatic cold forging)의 금형은 대부분 다층 구조로 되어 있다.⁹ 단조 금형의 구조해석을 위하여 Joun⁹ 등이 제안한 가변벌칙기법(varying penalty method)은 수치적 안정성이 확보되어 있으며, 그 결과 선행연구에서 밝힌 바와 같이 수치해가 이론해와 공학적으로 일치하며, Coulomb 마찰법칙으로 수식화된 금형 부품 간의 접촉 경계에 작용하는 응력벡터가 뉴턴의 제 3 법칙을 만족하는 결과를 보였다.

본 논문에서는 가변벌칙기법에 근거한 유한요소법을 이용하여 다단자동 냉간단조에서 금형의 열박음의 영향을 다양한 설계변수와 연계하여 규명하고자 한다.

2. 시험 대상 금형

일반적으로 자동다단 냉간단조는 양질의 제품

의 경제적 생산을 목적으로 한다. 따라서 자동다단 냉간단조에서 공정 및 금형 설계 시에 금형 수명이 경쟁력을 좌우하는 가장 중요한 요소로 취급된다. 금형의 수명은 여러 요소에 의하여 결정되며, 특히 금형 설계변수의 결정이 매우 어려운 문제이다. 실제 대부분의 금형 구조설계는 경험에 의하여 이루어지고 있으며, 일반화된 부품 또는 규격품의 생산을 위한 냉간단조 금형은 오랜 경험에 의하여 최적의 설계에 근접해 있다고 해도 과언은 아니다. 그러나 새로운 제품의 개발 및 생산을 위한 신 단조 금형의 설계 시에는 수차례의 시행착오를 범하는 경우가 빈번하다.

냉간단조 금형 설계의 규격화는 용이하지 않다. 그만큼 금형의 설계변수들이 금형의 성능에 미치는 영향을 일반화시켜서 분석하는 것이 쉬운 일이 아니다. 본 논문에서는 비교적 생산량이 많아 널리 알려져 있으며 금형설계 측면에서 다소 까다로운 볼스타드 냉간단조 공정을 시험 공정으로 선택하였다. Fig. 1 은 본 논문에서 적용대상으로 선정된 볼스타드 단조 공정 중에서 맨 마지막 단계의 하 금형의 설계도이다. 금형은 3 층으로 분리되어 있고, 이것들은 앤빌(anvil) 위에 놓여서 외곽의 체결용 실린더에 의하여 체결된다. 각 층의 금형은 다이인서트와 두 개의 열박음용 링으로 구성되어

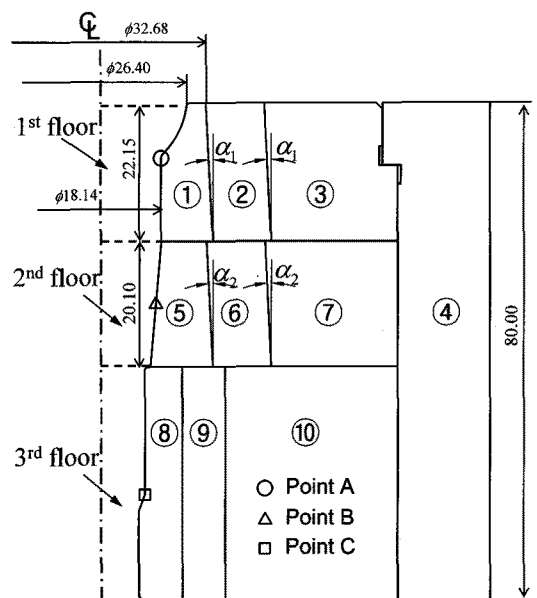


Fig. 1 Lower die design of the last stage in ball-stud cold forging

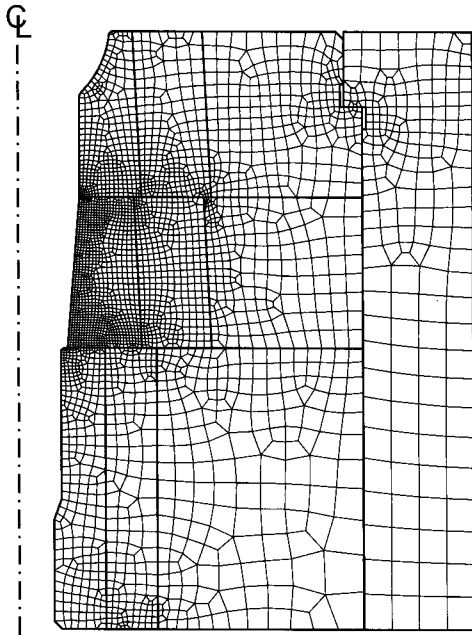


Fig. 2 Finite element analysis model of lower die at last stage

있다. Fig. 1 에 본 논문에서 분석 대상으로 삼은 설계변수들을 표시하였으며, 해석결과는 ○, △, □ 으로 표시된 점 A, B, C 에서 유효응력 σ_e 과 원주방향의 응력 성분 σ_θ 을 중심으로 분석하였다.

본 논문에서 사용한 유한요소해석모델을 Fig. 2 에 나타내었다. 접촉면에서 마찰계수를 0.1 로 가정하였다.

3. 금형 구조해석 및 열박음 영향 분석

금형의 열박음의 영향을 분석할 목적으로 Table 1 에서 보는 바와 같은 다양한 조건하에서 금형의 구조해석을 실시하였다.

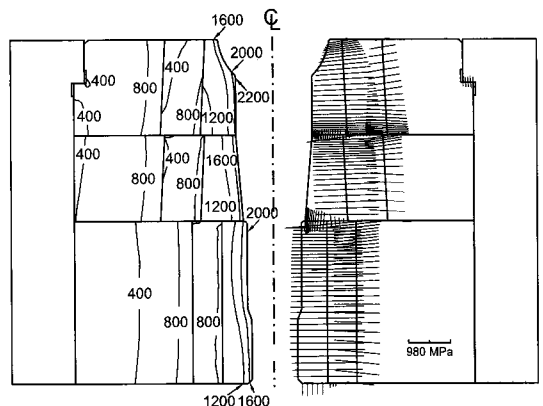
열박음과 관련된 설계변수의 영향을 분석하기 위해서는 설계의 기준이 필요한데, Table 1 의 Case 4 를 기준으로 삼았다. 이 경우는 내측 링과 외측 링에 0.4%의 예압을 가하고, 체결력을 0.3%의 예압을 가한 것으로 간주한 것이다. Case 4 에 대한 해석결과를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 요약하였다. Fig. 3 에서 좌편은 유효응력을 의미하고, 우편은 금형 부품의 접촉면에 작용하는 응력벡터, 즉 응력의 접선성분과 법선성분을 벡터로 표시한 것이다. Fig. 3 의 결과로부터 금형 부품간 접촉면에서 응력벡터의 예

측결과는 뉴톤의 제 3 법칙을 만족하고 있음을 알 수 있다. 즉, 마주보는 절점에 작용하는 변압의 크기는 같고, 그 방향이 반대이다.

Table 1 Cases investigated

| Case | Young's modulus of die insert [GPa] | Shrink fit | | | Slope angle | Partition* |
|------|-------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|--|--------------------|
| | | Inner ring [%] | Outer ring [%] | Clamping ring [%] | | |
| 1 | 700 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | $\alpha_1=3^\circ$ $\alpha_2=3^\circ$ | 1(3),2(3), 3(3) |
| 2 | 700 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | | |
| 3 | 700 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | | |
| 4 | 700 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | | |
| 5 | 700 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | | |
| 6 | 700 | 0.4 | 0.0 | 0.3 | | |
| 7 | 500 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | | |
| 8 | 210 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | | |
| 9 | 700 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | $\alpha_1=3^\circ$ $\alpha_2=0^\circ$ | 1(3),2(3) |
| 10 | 700 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | $\alpha_1=2^\circ$ | |
| 11 | 700 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | $\alpha_1=3^\circ$ | 1(3),2(2), 3(3) |
| 12 | 700 | 0.4 | 0.4 | 0.1~0.5 | $\alpha_2=3^\circ$ | 1(3),2(3), 3(3) |

* N(M) means that the N-th floor is assembled by one die insert and (M-1) rings



(a) Effective stress (b) Interfacial stress
Fig. 3 Effective and interfacial stresses of Case 4

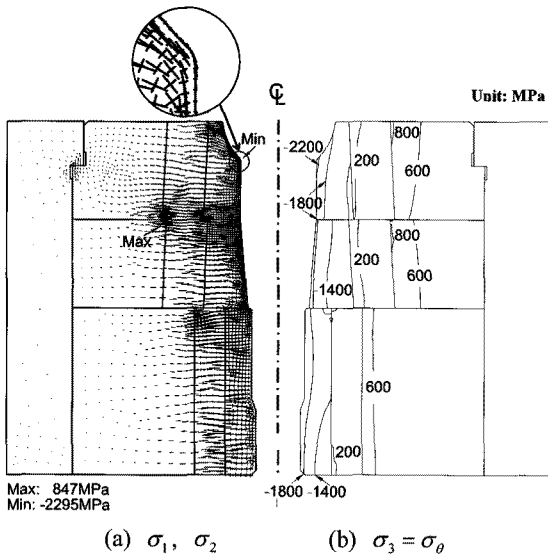


Fig. 4 Principal stresses of Case 4

Fig. 4 에서 좌편은 대칭면에 작용하는 주응력 성분을 나타내고 있고, 우편은 원주방향의 응력 성분을 나타내고 있다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 예압에 의하여 원주방향으로 압축력(즉, σ_θ 가 음수)이 작용하게 된다. 이 점이 열박음의 근본적인 목적이다.

3.1 금형의 예압량의 영향

Fig. 5 에 Table 1 의 Case 1~5 에 대한 금형 구조 해석 결과, 즉 예압량의 변화에 따른 Fig. 1 의 점 A, B, C 에서의 유효응력과 원주방향의 응력 성분의 변화를 나타내었다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 예압량에 따라 원주방향의 응력 성분과 유효응력이 비슷한 변화 경향을 보이고 있다. 특히 두 응력 값의 절대치가 거의 같으며, 이는 하나의 주응력인 원주방향 응력성분의 절대치가 다른 두 개의 주응력에 비하여 매우 큰 것에 연유한다. 예를들면, 0.4%의 압축 시에 점 A 에서 세 개의 주응력은 -12 MPa, -133 MPa, -2295 MPa(원주방향의 응력)이며, 이 주응력에 상응하는 유효응력은 2224 MPa 이다.

한편, Case 6 은 외측 링과 내측 링이 상온 상태에서 단순접촉이 발생하도록 한 경우이며, 이에 대한 구조해석을 실시하여 Case 4 와 그 결과를 비교하였다. 해석결과로 유효응력의 분포와 원주방향의 응력 성분을 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 내측 링과 외측 링 사이의 응력

불연속이 거의 발생하지 않았다. 이 결과와 Case 4 의 결과를 비교해 보면, 압축링을 분리하여 별도로 예압을 가함으로써 Fig. 1 의 점 B 에서의 유효응력과 원주방향의 압축응력이 약 77% 증가하였다. 이 결과는 이중 링을 사용한 효과를 말해주고 있으며, 동일한 조건에서는 다층 링에 예압을 부과 하는 것이 효과적이라는 사실을 암시하고 있다.

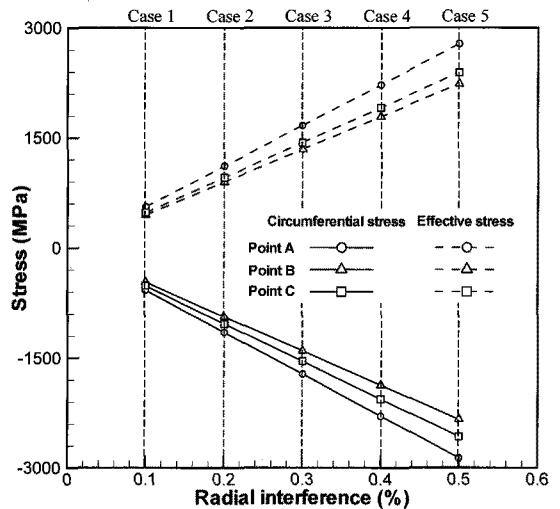


Fig. 5 Effect of the amount of shrink fit on die stress

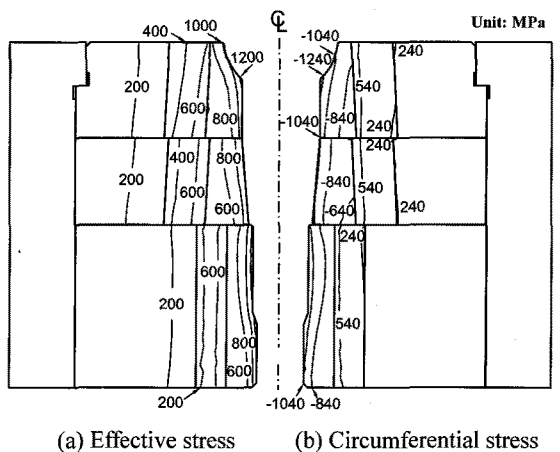


Fig. 6 Effective and circumferential stresses of Case 6

3.2 다이인서트의 재료의 영향

다이인서트의 재료로 주로 합금공구강인 STD11 또는 SKH51 과 초경합금인 HW-V20 이 사용되고 있다. 이 두 재료는 근본적으로 강도와 탄

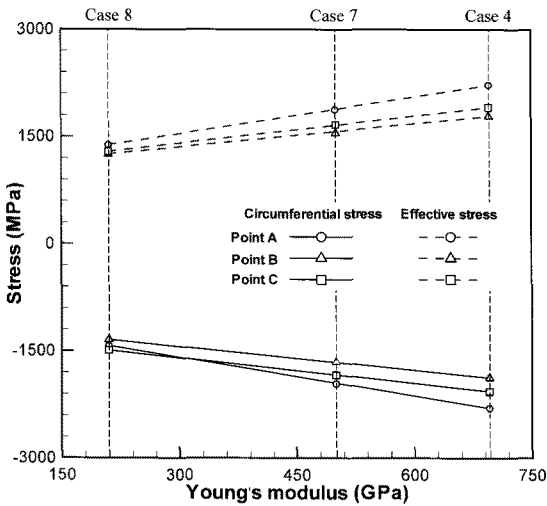


Fig. 7 Effect of Young's modulus on die stress

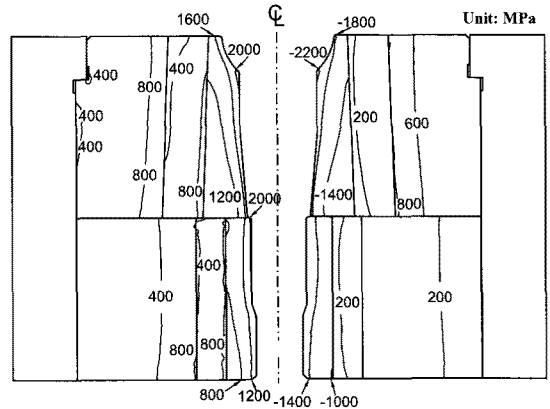
성계수 등에서 매우 큰 차이가 있다. 따라서 금형 재료의 탄성계수 간의 역학적 차이를 규명할 필요가 있다. 이를 위하여 다이 인서트 재료의 탄성계수(200GPa 에서 700GPa 까지)가 예압에 미치는 영향을 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 7 에 정리하였다. Fig. 1 의 점 B 에서 Case 8 의 유효응력과 원주 방향의 응력 성분은 Case 4 의 약 70% 이다. 이 결과는 강성이 큰 다이인서트 소재일수록 예압 효과가 크다는 점과 다이인서트의 탄성계수가 예압과 매우 밀접하다는 점을 말해 준다.

3.3 링의 기울기의 영향

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 금형이 α_1 과 α_2 만큼 기울어져 있다. α_1 은 체결력의 전달 목적으로 불가피하지만, α_2 는 역학적으로 필수적인 경사가 아니다. 따라서 α_2 의 경사가 어떤 영향을 미치는지를 조사하기 위하여, Case 4 의 결과와 Case 9 의 결과를 비교하였다. 그 결과, 경사각 α_2 가 금형의 응력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

3.4 금형 분리의 영향

금형 분리의 영향을 조사하기 위하여 Case 4 에서 1 층과 2 층을 일체화시킨 Case 10 의 금형 설계에 대하여 금형 구조해석을 실시하였으며, 그 결과를 Case 4 의 결과와 비교하였다. 해석결과는 Fig. 8 에서 보는 바와 같다. Fig. 8(a)의 해석결과와 Fig. 3(a)의 해석결과를 비교해 보면, 금형의 유효응력



(a) Effective stress (b) Circumferential stress
Fig. 8 Effective and circumferential stresses of Case 10

분포가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 금형의 외곽 형상 변화가 크지 않아 응력집중이 발생할 가능성이 없는 부위를 상하로 분할할 경우 금형의 열박음 효과의 변화는 거의 없다는 점을 말해 준다.

3.5 압축 링의 두께의 영향

압축 링의 두께 영향을 분석하기 위하여 2 층의 외축 링, 즉 Fig. 1 에서 부품 ⑦을 제거하는 대신 내축 링, 즉 Fig. 1 에서 부품 ⑥의 두께를 변화시켜 금형 구조해석을 실시하여 그 결과를 조사하였다. 이 목적으로 Case 11 의 공정설계에 대한 구조해석을 실시하였다. Fig. 9 의 결과에서 보는 바와 같이 압축링의 외경이 커짐에 따라 Fig. 1 의 점 A

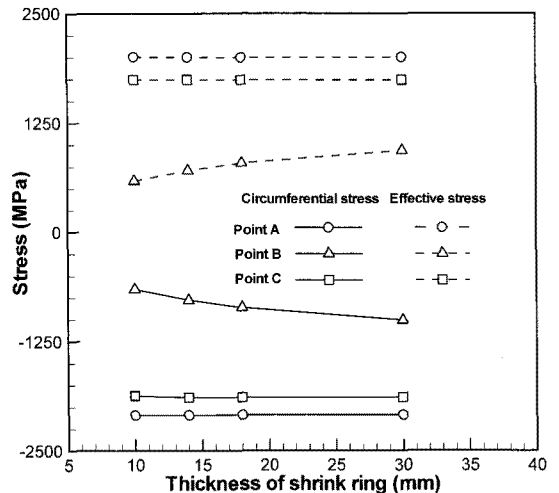


Fig. 9 Effect of shrink ring diameter on die stress

와 점 C 의 응력변화가 거의 없으며, 점 B 에서 응력 의 크기는 외경의 증가에 따라 증가하지만 일정 이상의 두께를 초과하면 그 영향이 급격히 감소하 는 경향을 보이고 있다.

3.6 체결력의 영향

체결력의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 1 의 외 락 실린더(Fig. 1 에서의 ④번 금형 부품)의 예압량, 즉 체결력의 영향을 조사하였다. 체결력은 열수축 량으로 표현하였다. 체결력의 영향 조사를 위하여 Case 12 에 대한 금형 구조해석을 실시하였다. Fig. 10 에서 보는 바와 같이 0.3%의 체결량까지 체결 량의 증가에 따라 체결력이 선형적으로 증가하는 경향이 있다. 반면, 0.3%부터 0.5%까지 완만하게 증가하고 있으며, 이것은 0.3%의 체결량 이후에 발 생하는 열박음 링과 다이인서트 및 외측 링과 내 측 링 사이의 미끄러짐에 기인한다.

Fig. 11 은 0.1%와 0.5%의 체결량에 대한 원주방 향의 응력 성분을 비교하고 있다. 이 두 체결량에 대한 점 B 의 원주방향 응력 성분은 각각 -1800MPa 과 -1700MPa 으로 나타났으며, 0.1%의 체결량을 적 용한 경우의 원주방향 응력 성분의 분포가 0.5%의 체결량에 비하여 상대적으로 균일하게 나타났다. 반면, 0.5%의 체결량의 경우는 원주방향 응력 성분 값의 크기 변화가 크게 나타났다. 금형의 파괴 관 점에서 보았을 때, 금형 예압의 균일성은 매우 중 요하므로 Fig. 11 의 결과는 최적의 체결조건이 존 재함을 암시하는 것이다.

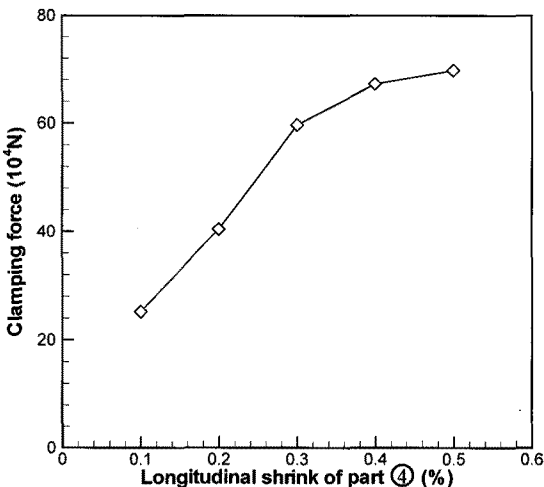
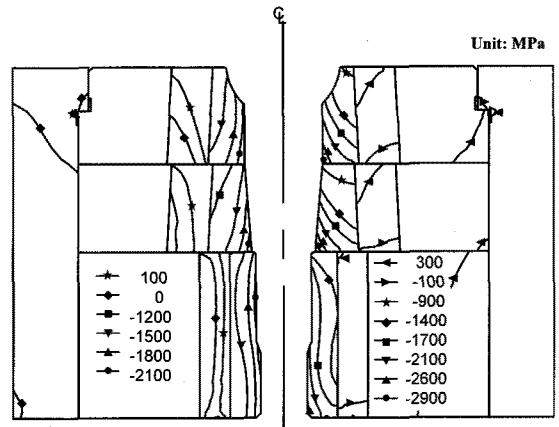


Fig. 10 Effect of longitudinal shrink on clamping force



(a) Shrink fit of 0.1% (b) Shrink fit of 0.5%

Fig. 11 Circumferential stresses of Case 12

4. 결론

본 논문에서는 열탄성 유한요소법과 가변벌칙 기법에 바탕을 둔 금형 구조해석 기술을 이용하여 자동다단 냉간단조 공정에서 금형 열박음 및 이와 관련된 주요 설계변수의 영향을 정량적으로 분석 하였다. 금형의 예압량, 다이인서트의 재료, 링의 기울기, 금형의 상하 좌우 분리, 압축링의 두께, 체결력 등이 유효응력과 원주방향의 응력 성분에 미치는 영향을 상세하게 분석하였다.

주요 결과를 요약하면, 다음과 같다. 열박음의 세기에 따라서 원주방향의 압축 응력은 선형적으 로 증가하는 경향을 보였으며, 이에 따라 유효응 력도 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 그리고 다이인서트의 탄성계수가 클수록 예압효과는 증가 하였고, 링의 층의 수가 증가할수록 더 큰 예압량 을 부가할 수 있다는 점을 확인하였다. 반면, 링의 두께가 증가할수록 예압량이 증가하는 경향을 보 이지만, 일정 이상의 두께에 이를 경우 두께의 증 가에 따른 예압량의 변화율은 크게 완화된다는 경향 을 보였다. 또한 힘의 전달 통로가 아닌 곳에서의 압축링의 기울기는 예압량에 큰 영향을 미치지 못 한다는 사실을 확인하였다. 체결력의 변화는 평균 적으로는 예압량의 변화에 큰 영향을 미치지 않지 만, 체결력의 증가에 의하여 균일성이 저하되기 때 문에 국부적으로는 비교적 큰 영향을 미치는 것 으로 나타났다.

제시한 결과들은 냉간단조 금형 기술자들에게 금형 역학에 관한 직관을 갖도록 하고 금형 설계

의 최적화 및 문제해결 능력을 함양하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 지식경제부의 청정기반전략기술개발 사업 및 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0066590).

참고문헌

1. Lange, K., Cser, L., Geiger, M. and Kals, J. A. G., "Tool life and tool quality in bulk metal forming," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 2, pp. 667-676, 1992.
2. Matsubara, S. and Kudo, H., "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, pp. 63-69, 1995.
3. Frater, J. L. and Zinolabedini, R., "Stress analysis of dies having multiple shrink rings," *J. Mat. Shaping Tech.*, Vol. 7, No. 2, pp. 67-80, 1989.
4. Engel, U. and Hänsel, M., "FEM-simulation of fatigue crack growth in cold forging dies," *Adv. Tech. Plast.*, Vol. 1, pp. 355-360, 1990.
5. Nagao, Y., Knoerr, M. and Altan, T., "Improvement of tool life in cold forging of complex automotive parts," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 46, No. 1-2, pp. 73-85, 1994.
6. Hoffmann, K. F. and Lange, K., "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, 1989.
7. Takahashi, S. and Brebbia, C. A., "Forging die stress analysis using boundary element method," *Adv. Tech. Plast.*, Vol. 1, pp. 203-210, 1990.
8. Fu, M. and Shang, B., "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, 1995.
9. Joun, M. S., Lee, M. C. and Park, J. M., "Finite element analysis of prestressed die set in cold forging," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 11, pp. 1213-1222, 2002.
10. Lee, Y., Lee, J., Kwon, Y. and Ishikawa, T., "Modeling approach to estimate the elastic characteristics of workpiece and shrink-fitted die for cold forging," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 147, No. 1, pp. 102-110, 2004.
11. Kang, J. H., Lee, K. O., Je, J. S. and Kang, S. S., "Spur gear forging tool manufacturing method considering elastic deformation due to shrink fitting," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 187-188, No. 12, pp. 14-18, 2007.
12. Eyercioglu, O., Kutuk, M. A. and Yilmaz, N. F., "Shrink fit design for precision gear forging dies," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 209, No. 4, pp. 2186-2194, 2009.
13. Lee, H. C., Saroosh, M. A., Song, J. H. and Im, Y. T., "The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 209, No. 8, pp. 3766-3775, 2009.
14. Joun, M. S., Eom, J. G. and Lee, M. C., "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, 2008.
15. Matweb, <http://www.matweb.com>
16. Kim, S. H., Choi, H. and Lee, J. C., "A Study on the grinding characteristics of titanium alloy," *J. Kor. Soc. Manu. Proc.*, Vol. 1, No. 1, pp. 55-62, 2002.