

금속가공 공정에서의 열전달 문제



임 용 택

한국과학기술원 정밀공학과 교수

●1955년생.
●소성가공을 전공하였으며, 소성가공, 압축성형, 주조공정 해석 및 설계에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

이 글에서는 업셋팅, 인발, 압출, 압연, 단조, 구조, 압축 성형 등과 같은 가공공정에 관한 몇 가지 예를 통해 가공열, 금형과 공작물 사이에서 일어나는 열전달, 정상상태 또는 비정상상태에서의 온도 측정 및 예측 등이 가공공정에 미치는 영향과 그 중요성을 검토해 보았다.

일반적인 금속 가공 방법은 크게 기계가공, 소성가공, 주조, 용접 등으로 나뉘는데 이 모든 공정들이 작거나 크게 열전달 문제를 포함하고 있다. 특히, 기계 가공이나 소성가공에서는 가공 또는 마찰에 의한 열의 발생이 매우 중요한 공정 변수 중의 하나이며 주조, 용접 등에서도 응고 또는 용융 및 응고, 열변형 등에 관한 이해가 매우 중요하다.

소성가공 공정에서 발생하는 소성 변형 에너지 또는 마찰에너지들의 90 내지 95%가 열로 변한다고 실험적으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이는 냉간 단조된 시편을 살펴보거나 연속적인 공정의 하나인 인발이나 압출 공정에서 공정 속도가 빠를 경우 온도 상승이 수백 도에 이르는 것을 보면 알 수 있다.⁽¹⁾ 이와 같이 발생한 가공열의 일부는 가공 부분에 남아 있고 또한 일부는 금형이나 몰드 등에, 그리고 나머지는 가공이 일어나지 않은 부분에 전달될 것이다. 이와 같

은 온도 분포의 변화는 금형이나 몰드와 공작물 사이의 윤활 조건을 변화시키므로 금형의 마모 조건을 변화시켜 수명을 단축시키며 공작물의 기계적인 성질 또한 변화시키게 된다. 따라서 지나친 금형의 손상을 고려한 대부분의 소성가공공정의 생산 속도를 가름하는 대표적인 변수가 온도인 것으로 알려져 있다.

가공공정의 열전달 해석은 앞에서 설명한 바와 같이 매우 중요하며 온도 분포 및 크기에 중요한 영향을 미치는 변수들로는 ① 재료의 물성치 및 초기 온도 조건, ② 가공에 의한 발열 및 금형 및 공작물 사이에서 발생하는 마찰열, ③ 공작물과 금형이나 몰드와의 열전달 및 경계조건의 변화, ④ 온도 분포 변화에 따른 열변형 등을 들 수 있다.

2. 소성가공이나 마찰에 의한 발열

임의의 시간 증분(Δt) 동안에 발생하는 단위 부피 당 소성가공에 의한 발생 열량은 식 (1)로 주어진다.

$$\beta(\overline{\sigma\epsilon\Delta t})/J \quad (1)$$

여기서, $\beta=0.9\sim 0.95$, J =기계적인 에너지를 열에너지로 바꾸어 주는 변환계수이다.

마찬가지로 마찰에 의해 발생하는 단위 부피 당 열량은 식 (2)로 주어진다.

표 1 글리세린의 압력에 따른 점도, 마찰계수, 및 유막두께 (film thickness) 값의 비교⁽³⁾

		압력 pin kg/cm ² (1kg/cm ² =14.22psi)							
		1	500	1,000	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
점도 (poise)	at 30 C (86F)	3.8	5.2	6.9	11.9	32.8	84.5	209	515
	at 75 C (167 F)	0.25	0.32	0.4	0.61	1.28	2.5	4.7	8.9
평면 벽 입구에서의 마찰계수 μ	at 30 C	—	—	0.043	0.060	0.124	0.279	0.674	—
	at 75 C	—	—	0.040	0.051	0.089	0.169	0.307	—
유막두께값 ($m\mu$, 10^{-6} mm)	at 30 C	—	41.6	23.6	15.2	11.5	—	10.5	—
	at 75 C	—	2.6	1.5	0.9	0.6	—	0.5	—
반경이 1mm인 입구에서의 마찰계수 μ	at 30 C	0.009	0.009	0.010	0.020	0.043	0.104	—	—
	at 75 C	0.003	0.003	0.003	0.005	0.009	0.018	—	—
유막두께 ($m\mu$, 10^{-6} mm)	at 30 C	170	117	87	72	—	68	—	—
	at 75 C	27	18	13	10.4	—	9.3	—	—

* 금형각=10°, 초기직경=4mm, 평면감소율=20~30%

$$(f_s S v_s \Delta t) / (JV) \quad (2)$$

여기서, f_s =금형과 공작물 사이의 전단마찰응력, S =마찰이 작용하는 면적, v_s =금형과 공작물 사이에 작용하는 미끄럼 속도, V =온도 변화가 수반되는 물체의 부피다.

금형과 공작물 사이에 존재하는 윤활제들은 일반적으로 온도와 압력에 따라 변한다. Eichinger와 Lueg⁽³⁾는 10°의 경사각을 가진 인발 금형을 이용하여 인발속도를 15cm/sec로 유지하였을 때 윤활층의 두께와 마찰계수를 표 1과 같이 구하였다. 그들은 글리세린을 윤활제로 사용하였다. 이 표에 의하면 윤활층의 두께는 온도와 압력이 증가함에 따라 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

3. 비정상 상태 공정에서의 열전달 문제

단조 공정 등에서 공작물을 가열하여 가공하는 경우 금형을 공작물의 온도까지 가열하지 못하는 경우에는 금형과 공작물 사이의 열전달로 인해 공작물의 온도가 내려가게 된다. 이와 같은 온도하강은 경계면에서의 열전달 조건,

표 2 온도가 다른 평면 상, 하 금형을 이용한 실험에서 측정된 접촉 유효 열전달 계수값⁽⁴⁾

윤활제	압력 (MPa)	접촉유효 열전달계수 ($h_0, kw/m^2k$)
None	0 (0)	0.4
None	0.03 (0.005)	0.75
None	0.85 (0.12)	1.5
None	14 (2)	4.0
None	85 (12)	7.5
None	150 (22)	7.5
Renite S28	0 (0)	0.5
Renite S28	0.03 (0.005)	0.9
Renite S28	0.85 (0.12)	4.0
Renite S28	14 (2)	6.5
Renite S28	85 (12)	7.5
Renite S28	150 (22)	7.5
Wynn 88ON	0 (0)	0.4
Wynn 88ON	0.03 (0.005)	1.9
Wynn 88ON	0.85 (0.12)	4.0
Wynn 88ON	14 (2)	7.0
Wynn 88ON	85 (12)	7.5
Wynn 88ON	150 (22)	7.5

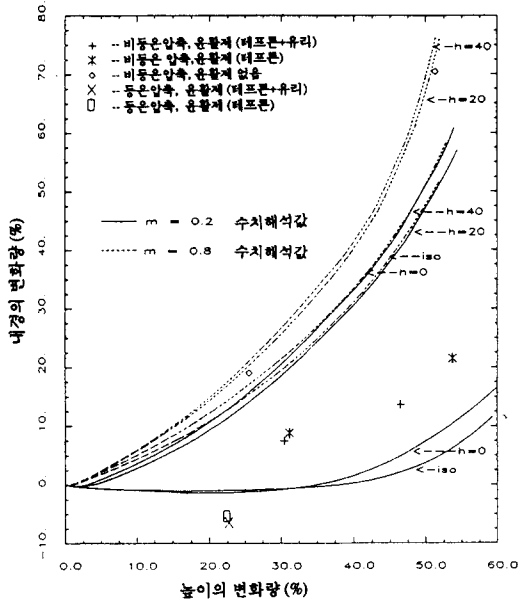


그림 1 타이타늄합금 링 (6A1-4V)의 압축실험을 통한 접촉유효 열전달계수 값의 비교

* 램 속도=56mm/s, 실험에 이용된 등온상태의 링 온도=316°C, 계산에 이용된 등온상태의 링온도=888°C, 비등온상태의 초기금형의 온도=316°C, 초기 링의 온도=954°C.

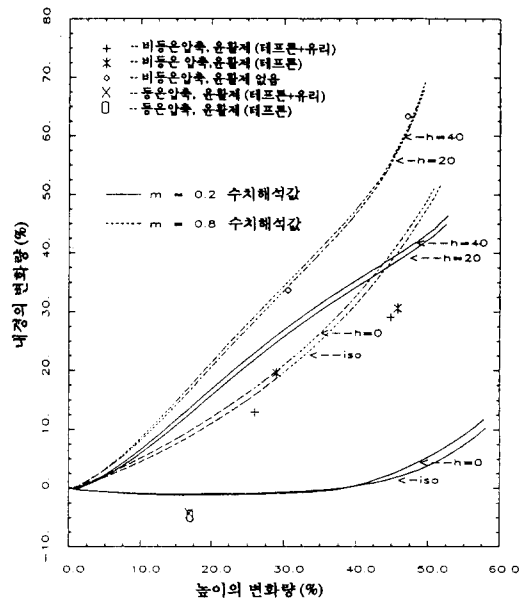


그림 2 램속도를 5.1mm/s로 했을 때 타이타늄합금

* 링 (6A1-4V)을 이용한 압축실험을 통한 접촉 유효 열전달 계수값의 비교(다른 조건들은 그림 1과 동일)

가공 속도, 초기 온도 조건, 재료의 물성치들과 함수 관계에 있다. 최근에 가공공정을 보다 체계적으로 이해하기 위해 개발되기 시작한 수치해석프로그램을 올바르게 사용하기 위해서는 경계조건에 대한 명확한 이해가 필요하다. 또한 열전달현상 및 마찰조건은 재료의 유동, 가공 하중, 재료의 접침 또는 금형의 마모 등에 중요한 영향을 미친다고 알려져 왔다. 따라서 지금까지 많은 실험적인 연구가 수행되어 왔는데 정확한 온도 측정이 필요하므로 측정기술의 개발이 매우 중요하게 된다.

Burte 등⁽⁴⁾은 경계면에서의 압력, 가공 속도 및 가공 정도가 온도 변화에 미치는 영향을 단조 공정에 많이 쓰이는 윤활제에 대해 실험적으로 검토하였다. 표 2에 이들이 구한 경계면에서의 유효열전달계수가 정리되어 있는데 주

요한 결과들은 다음과 같다.

① 윤활을 하였거나 하지 않았을 경우 모든 경우에 유효 열전달 계수는 경계면 압력에 따라 증가하다가 일정한 압력에 이르면 일정하게 된다.

② 경계면 압력이 낮은 경우에는 윤활을 한 경우의 유효열전달계수값이 윤활을 하지 않은 경우보다 약간 크다. 그러나 압력이 큰 경우에는 이값들은 윤활 상태와 무관하다.

③ 유효열전달계수값은 압력이 높은 경우에는 압력이 낮은 경우에 비해 한 자리수만큼 증가한다.

④ 알루미늄합금의 경우 윤활이나 가공 속도에 상관없이 유효열전달계수는 25~30kw/m²K 정도였다.

그림 1부터 그림 4에는 알루미늄 및 타이타늄 합금, 강의 링시험을 통한 열전달과 마찰력 사이의 상관 효과를 검토한 결과들이 주어

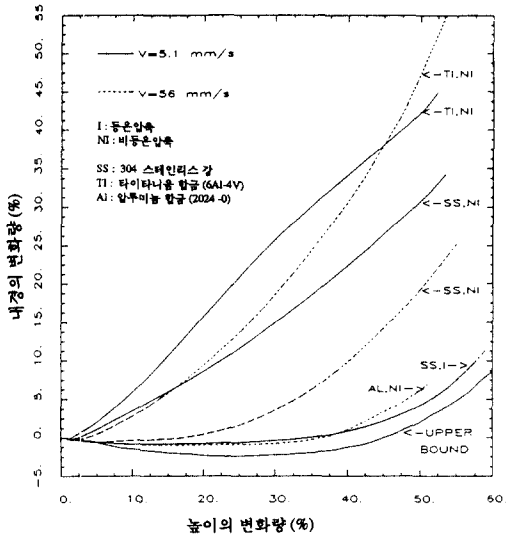


그림 3 전달마찰계수값이 0.2일 때 램속도에 따른 304스테인레스강, 타이타늄합금(6Al-4V), 알루미늄합금(2024-0)을 이용한 링 시험 수치해석 결과

* 램 속도=56mm/s, 초기 금형 온도=200°C, 초기 링온도=420°C, 접촉유효열전달계수=10 KW/m²K; 304스테인레스강: 램 속도=56mm/s와 5.1mm/s, 초기금형온도=316°C, 초기 링온도=1093°C, 접촉유효열전달계수=20KW/m²K와 316°C의 등온압축; 타이타늄 합금(6Al-4V): 램 속도=56mm/s와 5.1mm/s, 초기 금형온도=316°C, 초기 링온도=954°C, 접촉유효열전달계수=20KW/m²K와 등온압축.

져 있다.

그림 5에는 일명 스파이크 단조(spike forging)라 불리는 공정에 있어 온도와 변형률도가 미치는 효과를 검토한 실험결과가 주어져 있다.⁽⁵⁾ 이 그림에 의하면 가공 속도가 느린 유압식 프레스는 기계식 또는 스크류식 프레스에 비해 최종 단조 하중을 많이 필요로 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 온도 변화에 민감한 재료를 가공할 경우 기계식 또는 스크류 프레스가 유리함을 알 수 있다.

4. 정상 상태 공정에서의 열전달 문제

정상 상태의 대표적인 예는 압출, 인발, 압연

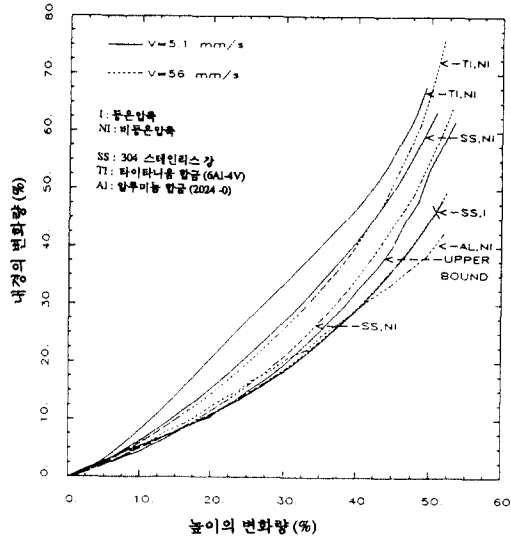


그림 4 전달 마찰계수값이 0.8일 때 램속도에 따른 304스테인레스강, 타이타늄합금(6Al-4V), 알루미늄합금(2024-0)을 이용한 링 시험 수치해석 결과

* 알루미늄 합금: 램 속도=56mm/s, 초기금형 온도=200°C, 초기 링온도=420°C, 접촉유효열전달계수=10KW/m²K; 304스테인레스 강: 램 속도=56mm/s와 5.1mm/s, 초기금형 온도=316°C, 초기 링온도=1093°C, 접촉유효열전달계수=20KW/m²K와 316°C의 등온압축; 타이타늄 합금(6Al-4V): 램 속도=56mm/s와 5.1mm/s, 초기금형온도=316°C, 초기 링온도=954°C, 접촉유효열전달계수=20KW/m²K와 등온압축.

등의 공정이다. 인발 공정에서의 온도 해석은 Ranger⁽⁶⁾에 의해 실험적으로 수행되었고 압출 공정에 관해서는 Dahlheimer⁽⁷⁾가 A1-1100합금에 대해 다양한 압출비에 대해 연구를 수행하였다. 그림 6에는 압출 공정에서 램의 변위에 따른 압출 금형 출구에서의 온도 분포가 주어져 있다.⁽²⁾ 그림 6에서 압출비 5:1, 빌렛직경 7.1cm, 빌렛길이 14.2cm, 초기빌렛과 금형온도는 440°의 조건이며, 이 그림에 의하면 온도는 램속도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

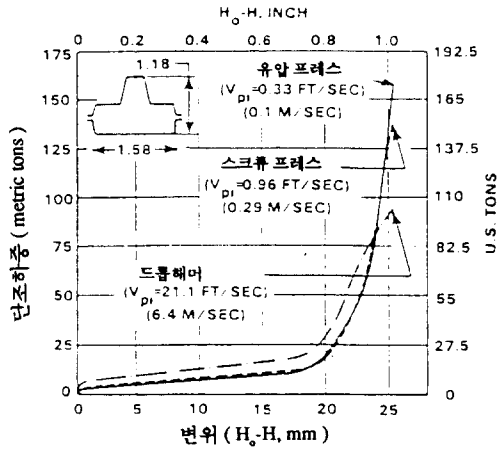


그림 5 유압, 스크류식 프레스, 드롭해머를 이용한 1100°C의 축대칭형 강재품의 폐쇄단조시에 얻어지는 초기 램속도에 따른 하중-변위 선도⁽⁵⁾

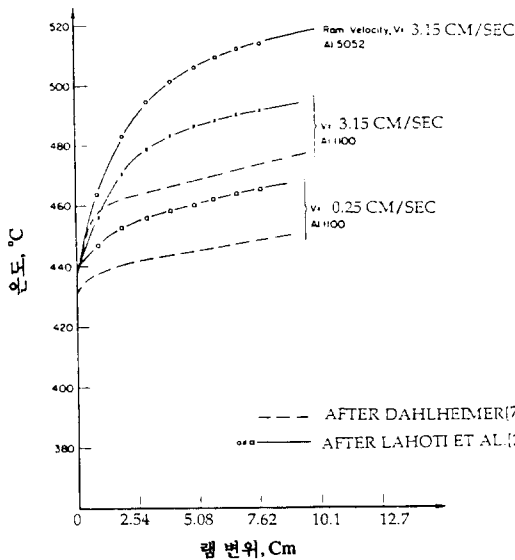


그림 6 램속도에 따른 금형출구에서의 압출된 제품표면의 온도값 비교

동일 저자(Lahoti와 Altan)들의 유한차분법을 이용한 연강의 인발 해석 결과에 의하면 온도의 측정치가 계산치보다 약간 높은 것을 알 수 있는데 이는 수치계산 과정에서 금형의 랜드 부분을 고려하지 않은 탓이라고 알려져 있

다. 이와 같은 정상 상태의 해석은 비정상상태보다 비교적 수월하여 많은 결과들이 알려져 있다.

5. 금형의 마모 문제

소성 가공에서 금형의 마모는 이론적으로나 실험적으로 해석하기가 매우 어려운 문제 중의 하나이다. 경험적인 자료를 근거로 Weiergraber⁽⁸⁾는 냉간 업셋팅의 경우 금형의 마모가 윤활 상태에 매우 밀접한 관계에 있으며 공작물의 경도가 올라갈수록 또한 가공 속도가 증가할수록 늘어나는 것을 알아내었다. 또한 Rooks 등⁽⁹⁾은 금형의 마모가 공작물과 금형의 미끄럼 속도에 깊은 관계를 맺고 있다고 발표했는데 열간이나 온간의 경우에는 아직 이렇다 할 결과가 알려지지 않았다. 따라서 금형의 온도, 단조하중, 공작물과 금형의 미끄럼 속도, 금형의 경도 등에 관한 상관 관계를 명확히 밝히기 위한 많은 연구가 필요하다.

6. 주조공정에서의 열전달 문제

주조 공정의 해석은 잠열의 방출 및 경계면에서의 열전달에 대한 정확한 이해 없이는 매우 어렵다. 지금까지 주로 사용되어진 해석 방법으로는 엔탈피방법, 후론트트래킹방법, 온도 보정방법 등을 이용한 유한차분, 유한요소, 경계요소 등이 사용되어졌다. 경계면에서의 열전달은 응고에 따른 공기층의 형성으로 시간에 따라 계속 변하고 있으며 경계층에 작용하는 압력에도 변할 것이다. 그림 7에는 알루미늄 잉곳 금형 주조 공정시에 수치적으로 계산한 경계면에서의 유효열전달계수를 나타내주고 있다.⁽¹⁰⁾ 이 그림에 의하면 보통 우리가 유효열전달계수를 일정하다고 가정하였을 때 수치 계산상에서 수반될 수 있는 오차값을 짐작할 수 있다. 또한 그림 8에는 용융 금속 내부에 온도차에 의한 대류, 성분차에 의한 대류를 고려하였을 때 형성될 수 있는 응고수축결함의 분포

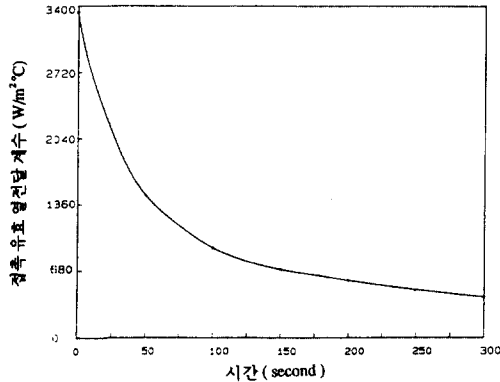


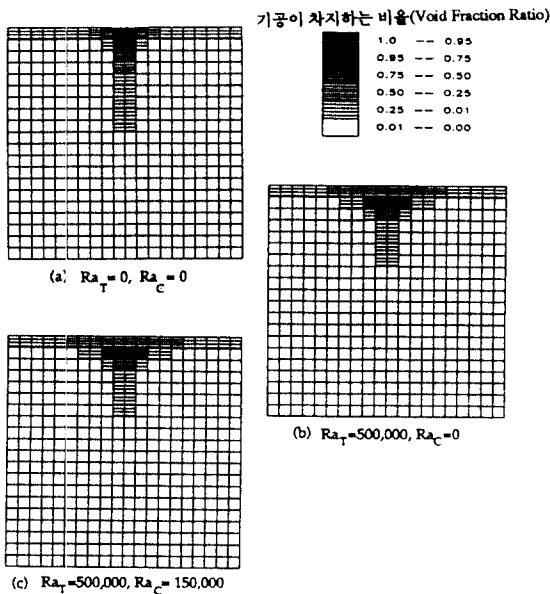
그림 7 시간에 따른 수치적으로 계산된 접촉 유효 열 전달 계수값의 변화

7. 맺음말

이 글에서는 일반 금속 가공 공정에서 수반되는 열전달 문제가 가지는 중요한 점들을 일부 살펴 보았다. 지금까지 많은 연구와 발전이 있었으나 실험의 한계성, 물리적인 이해의 한계 등으로 인해 앞으로도 더욱 많은 일들이 이 분야에 이루어져야 하며 특히 공정 설계에 있어서 열전달 효과가 무시되어서는 안되겠다.

참고문헌

- (1) Farren, W.S. and Taylor, G.I., 1925, "The Heat Developed during Plastic Extrusion of Metals," Pro. Royal Soc., Series A, Vol. 107, p. 422.
- (2) Lahoti, G.D. and Altan, T., 1978, "Prediction of Metal Flow and Temperatures in Axisymmetric Deformation Process," Advances in Deformation Processing (Edited by Burke, J.J. and Weiss, V.), Plenum Publishing Co., p. 100.
- (3) Eichinger, A. and Lueg, W., 1941, Erwartung von Draht und Duse beim Kaltziehen, Mitt, Kaiser Wilh. Institute, 23, Nr. 410.
- (4) Burte, P.R., Im, Y.T., Altan, T. and Semiatin, S.L., 1990, "Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction during Hot Forging," Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 112, p. 332.
- (5) Altan, T., Oh, S.I. and Gegel, H., 1983, Metal Forming : Fundamentals and Applications, ASM, Metals Park, Ohio.
- (6) Ranger, A.E., 1957, "An Electrical Analogue for Estimating Die Temperature during Wire Drawing," J. Iron Steel Inst., Vol. 185, p. 383.
- (7) Dahlheimer, R., 1970, Contributions to the Problem of Stresses, Strains, and Tempera-



(a) 열전도 모델 (b) 열전도+온도차에 의한 대류 모델 (c) 열전도+온도차에 의한 대류+성분차에 의한 대류 모델

그림 8 세 가지 모델을 이용한 응고 체적변화의 분포 비교

를 비교해 주고 있다.⁽¹¹⁾ 박판 성형에 이용되는 연속 주조 공정 제품 내부에 존재하는 잔류 응력에 관한 연구 결과도 발표된 바 있다.⁽¹²⁾

- tures in Axisymmetric Extrusion, Ph.D. Dissertation, Technical University of Stuttgart, Germany.
- (8) Weiergraber, M., 1983, Abrasive Die Wear in Massive Forming, Springer Verlag, Berlin, Metal Forming Institute, Technical University of Stuttgart.
- (9) Rooks, B.W., Singh, A.K. and Tobias, S.A., 1974, "Temperature Effects in Hot Forging Die Failure," Met. Tech., Vol. 1, No. 10, p. 449.
- (10) Chen, Y.H, Im, Y.T. and Lee, Z.H., 1991, "Three Dimensional Finite Element Analysis with Phase Change by Temperature Recovery Method," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. p. 1.
- (11) Chen, Y.H., 1990, Study of Solidification, Shrinkage and Natural Convection in Casting Processes, Ph.D Dissertation, Ohio State University.
- (12) Tszeng, T.C., Im, Y.T. and Kobayashi, S., 1988, "Thermal and Mechanical Analysis of Solidification-Application to Continuous Casting," Thermal Aspects in Manufacturing (Edited by Attia, M.H. and Kops, L.), p. 31. 