

## 열간단조시 금형과 소재간 계면열전달계수에 관한 연구

권진욱<sup>1</sup> · 이정환<sup>1</sup> · 이영선<sup>#</sup> · 권용남<sup>1</sup> · 배원병<sup>2</sup>

### A Study of Interface Heat Transfer Coefficient Between Die and Workpiece for Hot Forging

J. W. Kwon, J. H. Lee, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, W. B. Bae

(Received February, 21, 2005)

#### Abstract

The temperature difference between die and workpiece has been frequently caused to various surface defects. The distribution and change for the temperature of forged part should be analyzed to prevent the generation of various defects related with the temperature. The surface temperature changes were affected with the interface heat transfer coefficient. Therefore, the coefficient is necessary to predict the temperature changes of die and workpiece. In this study, the experimental and FE analysis were performed to evaluate the coefficient with a function of pressure, temperature, material, and etc. The closed die upsetting was used to measure the coefficient on pressure over the flow stress. AISI1045, Al6061, and Cu-OFHC were used to analyze the effect of material. The coefficient was increased with step-up of pressure between die and workpiece. And, Al6061 was larger than that of the AISI1045 and Cu-OFHC up to the five times.

**Key Words :** Interface Heat Transfer Coefficient(IHTC), Thermal Conductivity, Pressure, Deformation

#### 1. 서 론

일반적으로 열간 단조 공정시 소재와 다이의 접촉표면에서는 마찰과 열전달이 일어난다. 이때 다이와 소재 접촉면의 온도차로 인한 칠링(표면 냉각, Chilling)현상이 발생하는데 이는 표면에서의 유동응력을 증가시켜 소재 유동에 결함을 일으킨다. 이러한 칠링의 양과 크기는 계면열전달계수(IHTC, Interface Heat Transfer Coefficient), 변형율, 내부온도차 등의 함수로 나타낼 수가 있다. 이 함수들 중 계면열전달계수는 특히 중요한 함수이다. 열전도도는 소재내부에서 나타나는 열전달 현상에 대한 것으로 소재의 고유물성치인 반면에 계면열전달계수는 계면에서 이루어지는 열전달 현상으로써 재료고유의 물성치가 아닌 공정과 연

계된 계수로 압력, 온도, 재료, 윤활조건, 변형율, 변형율속도(Strain rate) 등에 의해 변화된다. 이러한 함수들 중 압력과 온도는 계면열전달계수에 큰 영향을 미치는 함수 가운데 하나이다. Cu-OFHC는  $12.7\text{W/m}^2\text{-K}$ , AISI1042는  $10.7\text{W/m}^2\text{-K}$ , SUS 304는  $41.7\text{W/m}^2\text{-K}$ 의 값을 나타낸다는 문헌[1]상의 보고와 같이 소재 종류에 따라 서로 다른 값을 나타내며 압력과 온도의 조건에 따라서도 서로 가변적이다. N. Bramley[2]는 순수접촉 상태일 때  $0.395\text{ kW/m}^2\text{-K}$ , 자유 단조일 때 계면열전달계수 값인  $7.79\text{ kW/m}^2\text{-K}$  측정하였다. 상수인 계면열전달계수( $7.79\text{ kW/m}^2\text{-K}$ ) 값과 총 단조시간을 10 등분하고 그 구간에 따라 계수 값을 균등하게 증가하도록 하는 후(최고  $7.79\text{ kW/m}^2\text{-K}$ ) 유한요소 입력하여 해석한 결과 후자의 경우 실제측정온도와 일치함

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터  
2. 부산대학교 정밀기계공학과  
# 교신저자 : 한국기계연구원 소재성형연구센터

을 연구하였다. 또한 T. A. Dean[3]은 Ti-합금 소재를 이용한 윤활 조건, 변형율과 같이 계면조건에 따른 영향을 분석하였고, T. Altan[4~5]은 계면열전달계수에 주는 영향들 가운데 온도, 윤활, 압력 조건 등의 변수에 대한 분석을 위해 실험적 연구를 수행하였다. 나아가 R. Balendra[6]는 소재의 변형 없이 유동응력 이상의 높은 압력을 주었을 때 표면 거칠기 값에 따른 영향을 연구하였다. 그러나, 실제 제품 성형시 발생하는 다양한 변형 및 열전달 조건에 따른 영향이 계면열전달계수 값에 영향을 줄 것으로 예상되어 본 연구는 자유단조시 열전달 실험(Free upsetting)과 밀폐단조(Closed upset ting), 즉 유동응력 이상의 압력을 주었을 때의 열전달 실험을 통하여 계면열전달계수를 비교 분석하고 유한요소해석을 통해 그 신뢰도를 입증하였다.

## 2. 세부 사항

### 2.1 접촉열전달계수

접촉된 소재와 다이 사이 열전달은 열전도이며 열전달계수로 알려진 열 접촉 전도식은 식(1)과 같이 정의된다.

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

소재와 다이 계면에서의 온도차는  $\Delta T$  이고, 열유속(Heat Flux)  $q$  는

$$q = \frac{d}{dA} \left( \frac{dQ}{dt} \right) \quad (2)$$

과 같다.

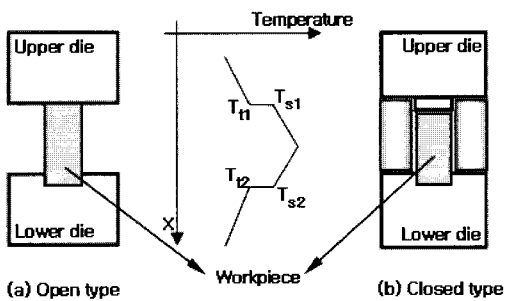


Fig. 1 Schematic diagram of temperature distribution

측정된 온도( $T_{12}$ ,  $T_{s2}$ )와 열유속  $q$  는 아래와 같이 각각 정의 된다.

$$\Delta T = T_{s2} - T_{12} \quad (3)$$

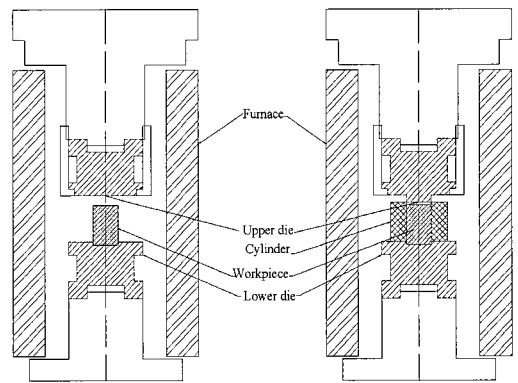
$$q = K_r \cdot m$$

여기서  $T_{11}$ 과  $T_{12}$  는 금형표면에서의 측정온도이고,  $T_{s1}$  과  $T_{s2}$  는 소재표면에서의 측정온도 이다.  $m$  은 금형(Tool)의 온도기울기( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )이며  $K_r$  는 금형의 열전도도이다. 위의 (3)식을 (1)식에 대입한 후 구해진 접촉열전도식은 식(4)와 같다.

$$h = \frac{K_r \cdot m}{(T_{s2} - T_{12})} \quad (4)$$

### 2.2 실험 내용

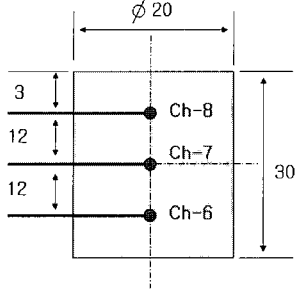
정의된 접촉열전도식은 소재와 다이에서 측정된 온도로 구한다. 업셋팅 실험은 소재에 가해진 하중에 의해 변형이 있을 때와 없을 때 두 가지 실험을 하기 위해 각각의 상부 다이를 제작하였다. Fig. 2 는 각각의 업셋팅 금형으로 (a)는 자유단조(Free upsetting) 및 순수접촉(Contact) 금형[7]이고 (b)는 밀폐단조 금형이다. 밀폐단조 금형의 경우 소재의 변형없이 유동응력 이상의 높은 압력을 가할 수 있도록 설계하였다.



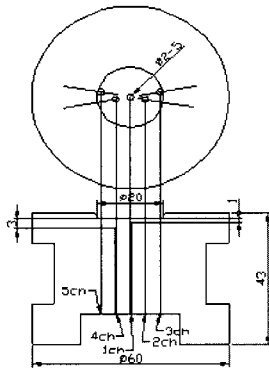
(a) Free upsetting die (b) Closed upsetting die

Fig. 2 The upsetting die sets with furnace

다이의 소재는 AISI H-13 금형강이며, 중공실린더 또한 동일 소재를 사용하였다. 업셋팅시 소재의 위치가 다르면 정확한 온도 측정이 불가능하기 때문에 지름 20mm, 깊이 2mm 의 구멍을 하부 금형에 가공하여(Fig. 3(b)) 매 실험시 같은 곳의 측정온도 데이터를 얻을 수 있었다. 아울러 온도 측정은 Chrome-Alumel 선으로 되어있는 K-type 열



(a) Workpiece

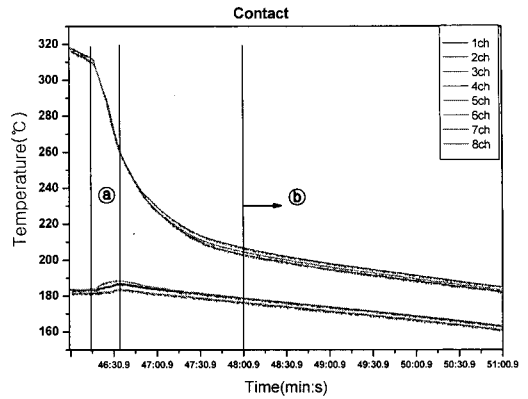


(b) Die

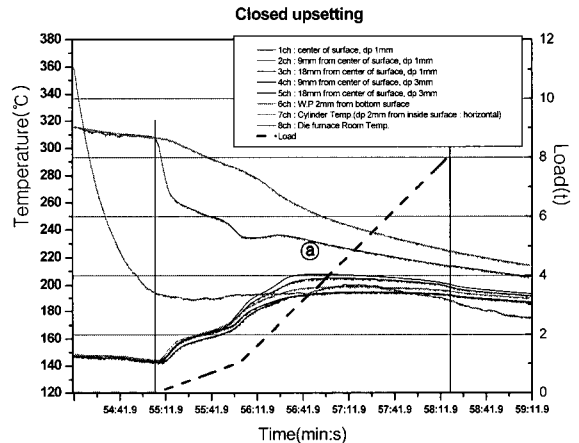
Fig. 3 Schematic representations of bottom die, work-piece and thermocouple positions

전대(Thermocouple)를 사용하였으며 사용된 열전대는 지름이 1.6mm로서 모두 8 개를 이용하여 다이 온도는 5 곳(Ch-0, 1, 2, 3, 4, 5), 소재온도는 3 곳(Ch-6, 7, 8)에서 측정하였다. 단조 소재에 위치한 열전대의 위치는 Fig. 3(a)에서 보듯이 높이 중심에 Ch-7 을 상하로 12mm 떨어진 곳에 Ch-6 과 Ch-8 을 설치하였다. 또한 다이측은 Fig. 3(b)에서 보듯이 하부 다이 표면에서 1mm, 3mm 떨어진 깊이 중양에서 외곽으로 0mm(Ch-1), 4.5mm(Ch-2, Ch-4), 9mm(Ch-3, Ch-5)떨어진 곳에 세라믹본드를 사용 접지하여 온도를 측정하였다.

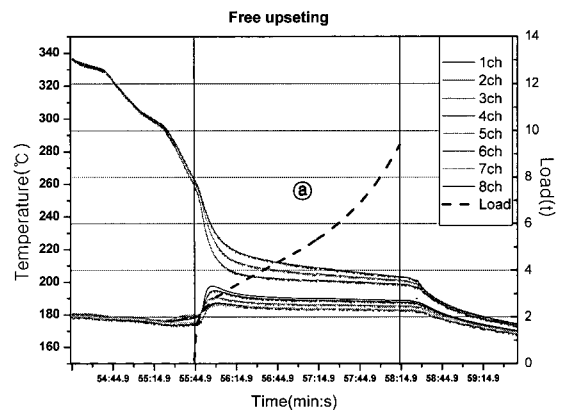
사용된 단조 소재의 재료는 열전도도가 다른 세 가지 종류(AI6061, AISI1045, Cu-OFHC)를 선택하였으며, 그 크기는 지름 20mm, 높이 30mm 인 시편에 압축율 50%를 주었다. 이 시편을 압축하기 위해 UTM 200 톤 유압프레스를 6mm/min 의 램 속도로 실험을 하였고, 성형 시 윤활제는 사용하지 않았다.



(a) Contact upsetting



(b) Closed upsetting



(c) Free upsetting

Fig. 4 Measured values of temperatures at various heat transfer conditions

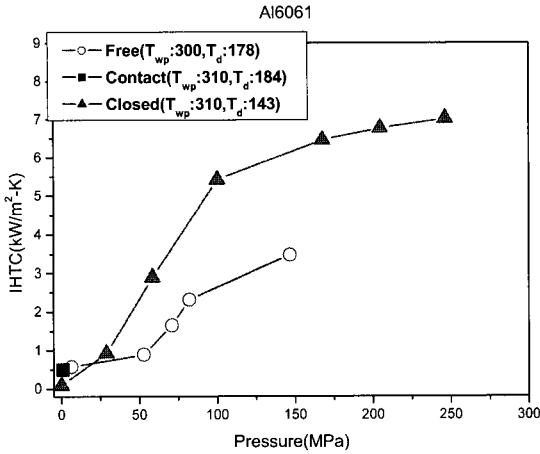
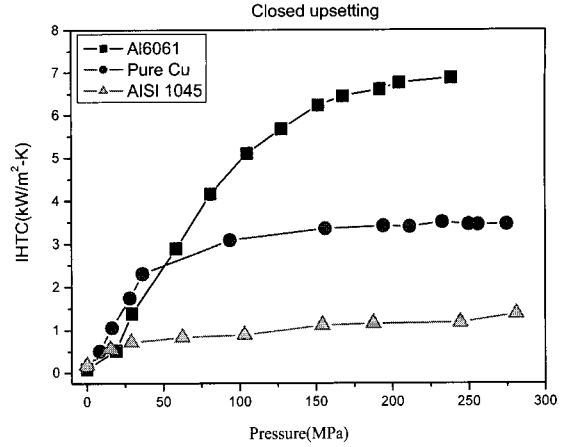


Fig. 5 Change of IHTC with pressure(Al6061)

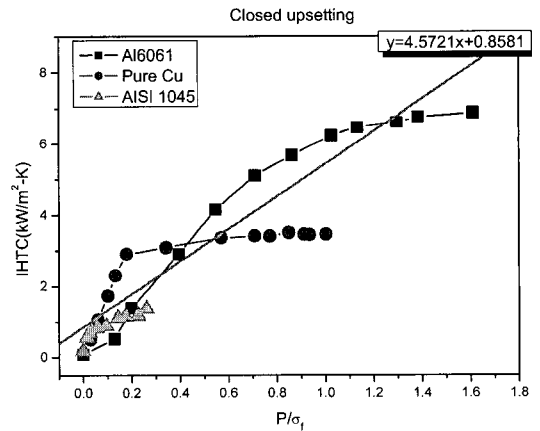


(a) Pressure vs IHTC

### 3. 실험결과 및 고찰

온도 초기조건은 다이 170℃, 소재 320℃ 온도에서 실험을 하였다. 소재와 다이는 각각 가열로에서 예열된 후 박스 로(Box, F'ce) 안에 소재를 삽입 가열 한 후 예열된 금형으로 이동 시킨 즉시 200톤 유압프레스를 작동하여 압축을 시작하였다. 이후 A/D 보드를 통해 저장된 데이터는 Fig. 4에서 나타나듯이 압력에 따라 온도 기울기가 다르다. 첫번째 순수접촉(a)에서의 ㉓구간은 하중 13 kgf보다 낮게 유지한 상태에서의 온도 변화를 나타내었고, 두번째 밀폐단조(b)는 수동하중제어로 최고 8톤의 하중을 가하였다. 마지막으로 자유단조(c)는 속도 6mm/min로 한 업셋팅(㉔) 실험이다. Fig. 4에 나타난 온도 변화 결과를 보면 하중이 낮은 상태(순수접촉시)에서는 온도 변화가 낮은 반면에 밀폐단조 혹은 자유단조에서의 온도 변화는 하중이 가해짐에 따라 온도 기울기가 달라지는 것으로 해석 할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 실험에서 얻어진 데이터를 식(4)를 사용하여 압력에 대한 계면열전달계수로 표현한 결과이다. 소재와 금형의 온도조건이 같은 경우 각각의 업셋팅 종류에 따른 결과가 다름을 보여 주고 있다.

그 이유는 자유단조의 경우 소재에 접촉되는 부분인 금형과 분위기(Atmosphere), 즉 실험 시 전도와 대류에 의한 열전달인 반면, 밀폐단조의 경우 실린더로 소재를 감싼 후 높은 압력을 가하는 실험이기 때문에 소재와 금형의 접촉면에서는 전도에 의한 열전달이 발생되므로 두 단조에서의



(b)  $P/\sigma_f$  vs IHTC

Fig. 6 Change of IHTC with pressure and material

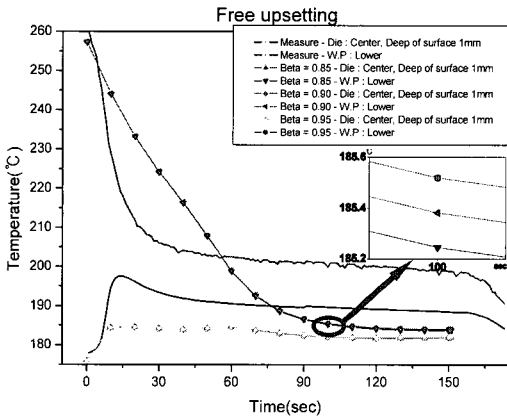
계면열전달계수가 서로 상이한 값을 나타내고 있다. 압력이 증가할수록 계면열전달계수는 점차적으로 증가함을 보여주었고, 일정 압력 이상일 경우 그 증가폭은 감소하였다.

Fig. 6은 여러 재료들을 밀폐단조 실험한 결과이다. Fig. 6(a)는 압력이 증가함에 따른 계면열전달계수를 표현한 그래프로 Al6061이 가장 크게 증가하였고, 순동 그리고 AISI1045순으로 나타났다. 그러나 Fig. 6(b)는 소재별 다른 유동응력을 고려한 성형압력값( $\chi = P/\sigma_f$ )에 따른 계면열전달계수로 나타내었고 (a)에서 보여지듯이 높은 압력이 가하여지더라도 성형압력값이 1보다 낮은 소재가 있기 때문에 소재가 받는 압력에 관계 없이 비교

**Table 1 Functional values about IHTC and pressure in sealed upsetting of material**

$y = a\chi^b$	Al6061	Cu-OFHC	AISI1045
a	5.64911	3.8519	1.90655
b	0.64947	0.33304	0.29108

(※  $\chi = P / \sigma_f$ ; Forming Pressure)

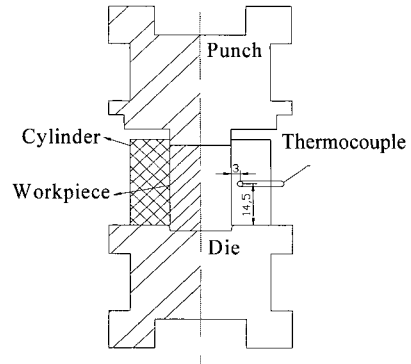


**Fig. 7 Variation of conversion factor for mechanical energy and heat energy**

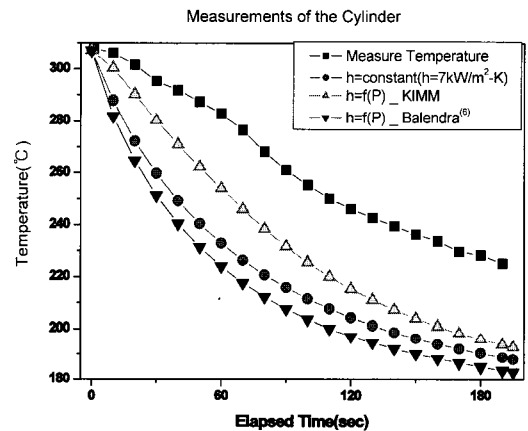
할 수 있게 표현한 그래프이며, 유한요소 해석시 비선형그래프를 입력하여 해석한 경우는 정밀도 높은 결과를 얻을 수 있지만 소재종류를 고려 않고 계수 값을 함수화 하면 Fig. 6에 (b)와 같이  $y=4.5721x+0.8581$ 로 표현 할 수 있다. 표 1은 비선형 그래프를 함수로 표현한 것이다.

일반적으로 소성변형에서 변형에너지의 90%가 열에너지로 변환된다. 하지만, 계면열전달계수가 가지는 온도 변화 변수 중 하나이므로 FE 해석 시 온도 변화 영향을 분석하고자 Al6061의 변형에너지가 열에너지로 변하는 조건 값으로 90%를 기준으로 그 외의 값인 85%, 95%의 세가지 경우로 가정하여 해석하였고, 그 결과 온도변화 차는 Fig. 7에서 보여주듯이 매우 미소함을 FE 해석을 통해 확인하였다.

실험을 통해 분석된 결과의 신뢰도 입증을 위해 계면열전달계수가 상수인 경우( $h=Constant$ )와 선행된 연구자가 구한 계면열전달계수인 경우( $h=f(P)_{Balendra}$ ), 본 실험에서 구한 계면열전달계수( $h=f(P)_{KIMM}$ ) 값을 DEFORM-2D™에 입력한 후 유한 요소 해석을 한 결과와 Fig. 8의 위치에서 실제 온도 측정된 결과를 비교(Fig. 9) 하였고, Fig.10



**Fig. 8 Measurement of temperature in cylinder at the Closed upsetting**



**Fig. 9 Comparison of estimated temperatures according to the various IHTC values**

는 유한요소해석시 증공실린더의 온도 변화를 그래프화 한 것 이다. Fig. 9을 통해 보여지듯이 본 연구에서 구한 계면열전달계수값( $h=f(P)_{KIMM}$ )이 가장 유사한 온도 분포를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구 결과 아래와 같은 결론에 도달하였다.

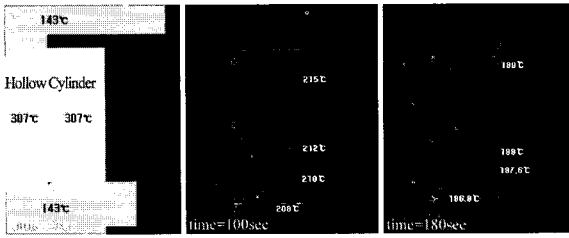
- (1) 계면열전달계수는 압력이 증가함에 따라 점차적으로 증가하나 일정 압력이상에서는 증가폭이 감소되어 지수함수 형태를 나타낸다.
- (2) 소재의 종류에 관계없이 압력이 증가 할 수록 계면열전달계수도 증가한다.
- (3) 재료에 대한 계면열전달계수는 Al6061은 Cu-OFHC 보다 2배, AISI1045보다 5배 이상 큰

후 기

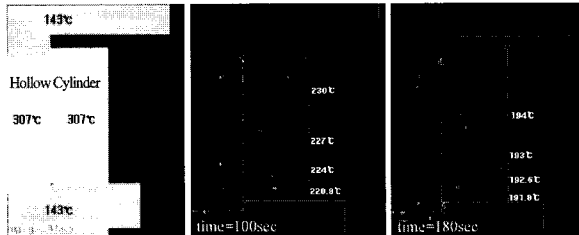
본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(사업명 : 무절삭정밀단조연구실) 사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

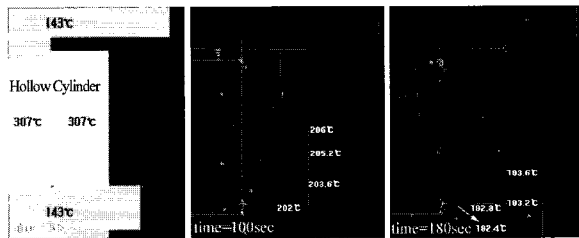
- [1] P. Dadras, W. R. Wells, 1984, Heat Transfer Aspects of Nonisothermal Axisymmetric Upset Forging, Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 187~195.
- [2] C. C. Chang, N. Bramley, 2002, Determination of the heat transfer coefficient at the die interface in forging, Proceeding of the 7th ICTP, Yokohama, Japan, pp. 775~780.
- [3] Z. M. Hu, J. W. Brooks, T. A. Dean, 1998, The interfacial heat transfer coefficient in hot die forging of titanium alloy, P.I.M.E., Vol. 212, Part C, pp. 485~496.
- [4] S. L. Semiatin, E. W. Collings, V. E. Wood, T. Altan, 1987, Determination of the interface heat transfer coefficient for non-isothermal bulk-forming processes, Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 49~57.
- [5] P. R. Burte, Y. T. Im, T. Altan, S. L. Semiatin, 1990, Measurement and analysis of heat transfer and friction during hot forging, J. Eng. Ind., Vol. 112, pp. 332~339.
- [6] M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz, 2003, Measurements of thermal contact conductance, JMPT, Vol. 135, pp. 204~210.
- [7] 염종택, 임정숙, 박노광, 신태진, 황상무, 홍성석, 2003, Ti-6Al-4V 합금의 열간성형에 대한 계면열전달계수의 결정 및 분석, 한국소성가공학회지, 제 12 권 제 4 호, pp. 370~375.



(a)  $h=Constant$



(b)  $h=f(P)_KIMM$



(c)  $h=f(P)_Balendra[6]$

**Fig.10 Comparisons of estimated temperature change according to the IHTC value**

값을 나타내었다.

(4) 소성변형시 변형에너지와 열에너지 사이 여러 변환 계수 값들을 통해 유한 요소 해석을 수행한 결과 온도변화 폭은 0.13°C로 계면열전달계수에 비해 상대적으로 열전달에 미치는 영향이 미소하였다.