

〈논 문〉

온간단조에서의 소성변형과 결정입자 변화와의 관계

제진수* · 김재훈** · 강성수***

(1995년 2월 25일 접수)

Study on the Relationship between Plastic Deformation and Crystal Grain Change in Warm Forging

J. S. Je, J. H. Kim and S. S. Kang

Key Words : Warm Forging(온간단조), Crystal Grain Change(결정입자 변화), Thermomechanical Treatment(가공열처리)

Abstract

The relationship between plastic deformation and crystal grain change in warm forging processes of SM10C carbon steel is studied. If the carbon steel is deformed at warm forging temperature (about recrystallization range), material properties are changed due to microstructural change of the crystal grain and cementite of the internal part. Some experimental values are investigated in terms of the elliptic degree of cementite, the grain size of cementite and ferrite grain size. When plastic deformation proceeds, the elliptic degree of cementite becomes larger and the grain size of cementite particle becomes small. In addition, the size of ferrite grain becomes finer by recrystallization. The elliptic degree of cementite has a considerable effect on formability. The distribution of effective strain in the forging was calculated by the rigid viscoplastic FEM analysis. The effective strain distribution obtained from the FEM simulation is compared with the experimental result. At the level of effective strain 0.3, dynamic recovery and dynamic recrystallization begin and at the level of over 2.5, the organization of material has better internal structure that is suitable for the following cold forming.

1. 서 론

최근에는 냉간단조법의 발달과 함께 보다 복잡한 형상과 고강도의 재료에 대한 단조가공의 필요성으로 인해 가공물의 온도를 어느 정도까지 높여 작업함으로써 가공물의 변형 저항을 낮추고 열간 단조에서보다는 단조품의 치수 정도를 높이는 온간단조

가 적용되고 있는 실정이다. 이러한 온간단조법은 정확한 치수 성형과 대량생산을 요하는 비교적 복잡한 자동차 부품의 성형에 사용되고 있으며 또한 온간단조와 냉간단조를 조합한 공정의 채용에 의해 단조품의 정형화가 진행되고 있는 실정이다.^(1,2)

온간단조는 단순히 성형공정뿐만 아니라 가공 열처리(thermomechanical treatment)에 의해 열처리 단독으로는 기대할 수 없는 성능을 기대할 수 있고, 또한 가공성 향상을 위한 소둔처리나 제품 품질 향상을 위한 후 열처리를 생략할 수 있기 때문에 더욱 각광을 받고 있다.^(2,3) 특히, 최근에는 금속재료의 가공열처리 기술의 도입에 의해 단조 등

*만도기계(주)

**회원, 삼성자동차(주)

***회원, 부산대학교 기계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

의 소성가공기술을 단순히 성형기술로 보지 않고 재질제어기술, 즉 새로운 재질을 개발하기 위한 수단으로 보고 있다.⁽⁴⁾ 이와 같이 소성가공 시의 변형률, 변형률 속도, 온도 등의 가공환경을 제어하여 재질 개선을 행하면 가공시간과 에너지 소비의 감소도 기대된다고 알려져 있으며 일부는 실용화되어 있다. 재질의 제어를 위해서는 제품의 재질 예측과 이에 따른 정확한 제어를 행해야 하기 때문에 가공환경, 가공이력과 재질과의 관계를 정량적으로 파악하고, 임의의 가공환경 하에서의 변형 상황과 그 추이를 예측해야 한다.

단조가공에 따른 재질을 예측하기 위해서는 Fig. 1과 같이 소성변형과 온도 분포에 따른 재결정, 변태 그리고 회복 등의 조직변화와 이에 따른 기계적 성질 등을 종합적으로 평가하여 정확한 제어를 하여야 한다.

본 논문에서는 온간가공과 냉간가공의 조합에 의한 자동차용 발전기 폴(alternator pole)의 제조 공정 중 온간단조공정과 이에 의하여 성형되는 단조품을 분석하여 소성가공량에 따른 조직의 변화추이에 대하여 연구하였다. 종래의 제조공정 즉 열간단조 이후 냉간단조를 행하는 경우의 공정도를 Fig. 2에 나타내었다. 이것은 다섯 차례의 열간단조 공정과 한 차례의 냉간 사이징으로 되어 있다. 이러한 제조방법에서의 단조재는 낮은 변형 저항을 가지고 있음에도 불구하고 플래시의 형성 때문에 큰 하중을 부과할 수 있는 프레스가 요구되어지며, 또한 열간단조 이후 스케일링(scaling)처리를 필요로 한다.⁽⁵⁾ Fig. 3은 온간가공과 냉간가공의 조합에 의한 자동차용 발전기 폴의 제조공정이다. 이 공정에 의해서는 비교적 작은 하중의 프레스로 스케일(scale)의 생성없이 정확한 치수의 제품 생산이 가능하다.⁽⁵⁾ 특히, 온간가공공정을 거치면서 피가공재는 조직의 변태를 겪게 되어 후속 냉간가공공정에까지 영향을 미치게 된다. 온간 영역(재결정 온도 부근)에서의 소성가공시에는 금속재료는 열에너

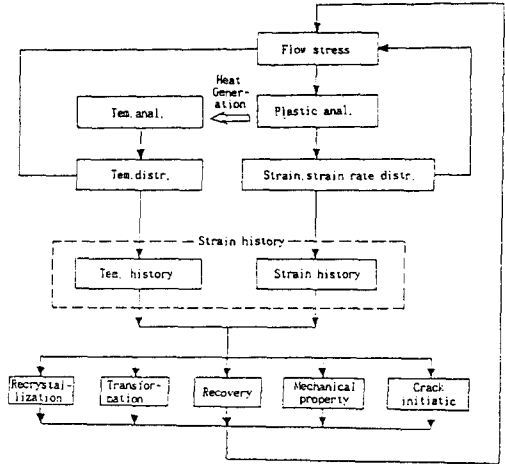


Fig. 1 Flow chart to predict product qualities on forging

지에 의한 조직의 변화와 소성가공의 변형에너지에 의한 조직의 변화를 동시에 받게 된다.⁽⁶⁾ 즉, 재료가 재결정 온도 이상의 온도에서 가공을 받게 되면 가공경화와 동시에 동적 회복(dynamic recovery)과 동적 재결정(dynamic recrystallization)이 생기게 되며 이 때문에 조직은 처음의 조직 상태와 아주 다른 조직을 가지게 된다.

본 연구에서는 온간 영역에서의 가공에 의한 재질 변화의 예측을 위해 시편의 내부 조직변화와 소성변형과의 관계를 검토하였다. 재질의 예측시 온도와 변형률, 변형률속도 분포가 동시에 고려되어야 하지만 본 해석에서 온간 영역에서 소성가공을 하는 경우를 대상으로 하여 변형률, 변형률속도를 주 인자로 하여 해석하였다. 즉, 내부 조직의 변화량을 나타내어 주는 몇 가지 정량적인 값의 측정, 소성 변형량의 계산을 위한 유한요소해석, 시편의 기계적 성질의 관찰을 위한 경도의 측정을 통해 이들의 상호 연관성을 조사하였다. 특히, 시편의 조직검사는 그 재료의 기계적 성질을 정성적으로 알 수 있게 해 줄 뿐만 아니라 유한요소해석에 의해

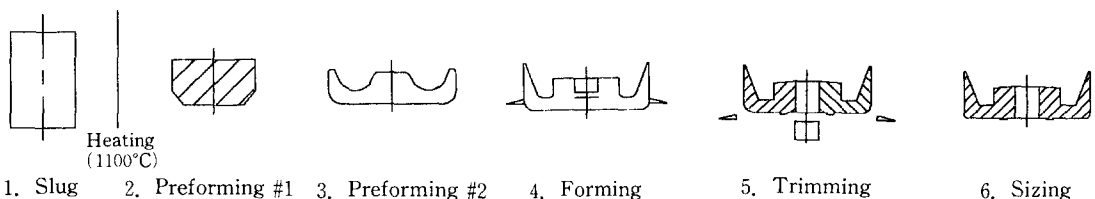


Fig. 2 Hot-forging and cold-sizing process of alternator pole processing

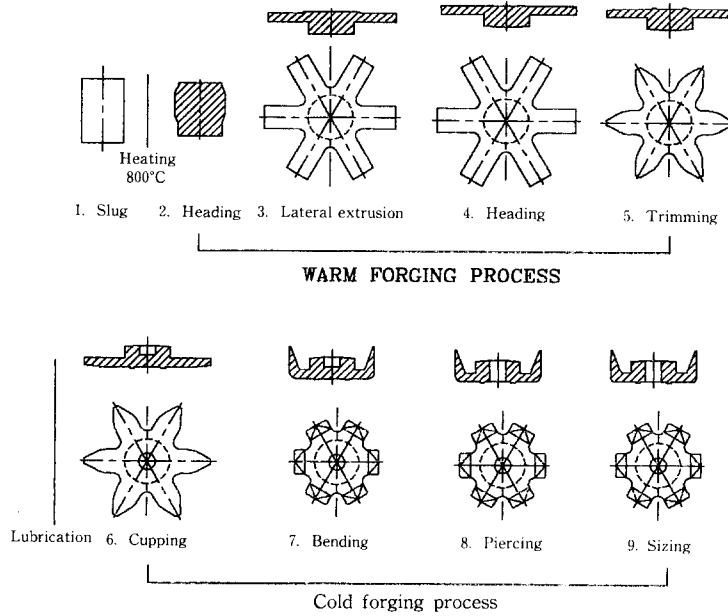


Fig. 3 Combined process of warm and cold forging of alternator pole

얻은 결과를 검증하는 수단으로도 이용할 수 있리라 생각된다.

2. 실험

본 실험에 사용되어진 재료는 SM10C로 그 화학적 조성은 Table 1과 같으며 SM10C의 열간 압연재(∅50 mm)를 절단(1.2 kg ; ∅50 mm×76 mm)하여 사용하였다.

그리고 그 물성치는 Table 2와 같다.

본 실험에서 대상으로 한 단조품의 형상은 Fig. 4와 같고 이것은 각 온간단조공정에 의해 성형된

단조품들이다. 본 실험에서는 온간단조에 의한 조직 변화를 관찰하기 위해 이 단조품을 절단한 후 연마하여 그 미세조직을 관찰하였다. Fig. 5는 조직의 관찰을 위해 절단된 단조품의 관찰 부위를 나타낸 것이다. 관찰 부위는 단조가공 중 가장 변형을 많이 받은 부위를 대상으로 하였고, 공정 3은 측방압출(lateral extrusion)공정에 의해 전 공정 중 가장 변형을 많이 받게 되므로 단조품의 전체 부위를 대상으로 관찰하였다.

조직의 관찰은 금속 현미경으로 100배, 500배의 조직 사진을 촬영하여 관찰하였다.

내부 조직의 변화 추이를 관찰하기 위해 100배의

Table 1 Chemical composition (wt. %) of SM10C⁽⁶⁾

| Composition | C | Si | Mn | P | S |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| Rate (%) | 0.08~0.13 | 0.15~0.35 | 0.30~0.60 | 0.030 under | 0.035 under |

Table 2 Mechanical properties of normalized SM10C

| Transformation temperature(°C) | | Yield strength (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Hardness (H _R B) |
|--------------------------------|---------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Ac | Ar | | | |
| 720~880 | 785~850 | 206 | 314 | 62.3~81.7 |

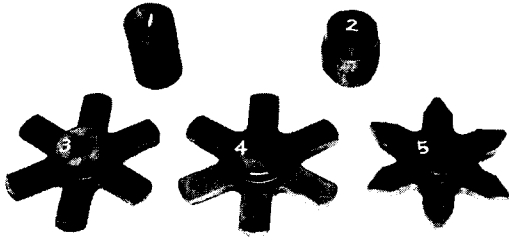


Fig. 4 Products obtained by warm forging process

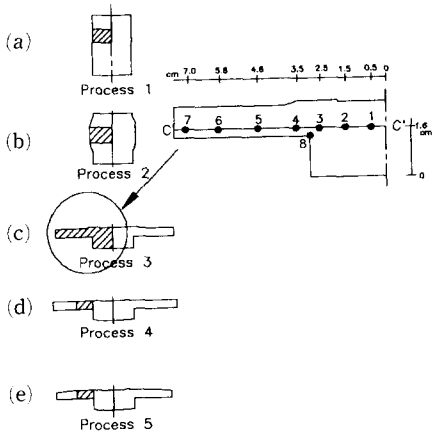


Fig. 5 Location for spheroidizing and grain size measurement

조직사진을 사용하였고, 조직의 정량적 해석을 위한 몇 가지 계수(구상화 탄화물의 형상계수, 입경)의 측정을 위해 500배의 조직사진을 사용하였다.

일반적으로 탄소강의 경우 세멘타이트 구상화 정도가 재료의 연성파괴에 영향을 미친다고 알려져 있는데 이 구상화 정도를 정량적으로 해석하기 위해 다음과 같은 몇 가지의 조직요인, 즉 형상계수와 구상화 탄화물의 입경을 측정하였다.

각 조직 요인의 측정법 및 정의^(3,7)는 다음과 같다.

(1) 형상계수 : 시편의 각 부분의 현미경 사진에서 각각의 세멘타이트의 장축 b 및 단축 a 의 치수를 측정하여(단축/장축)의 비를 구하고 이 값을 세멘타이트의 형상계수(a/b)라 정의한다.

(2) 구상화 탄화물의 입경 : (1)항에서 정의된 구상화 탄화물에 대하여 각각을 면적 등가인 원으로 근사하고, 그 등가 원의 직경에 입체 구 직경 보정계수($\sqrt{3/2}$)을 곱하여 얻은 값($\sqrt{3/2}\sqrt{ab}$)을 구상탄화물 입경으로 정의한다.

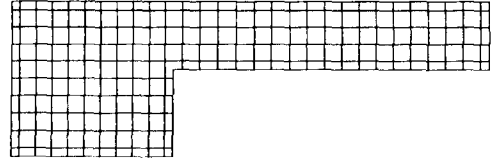


Fig. 6 Mesh for hardness(H_{RB}) test

이 값들은 500배의 조직사진에서 100 부분 이상의 구상화 탄화물의 형상계수 및 탄화물의 입경을 측정하여 이를 평균하여 구하였다.

각 위치에 따른 동적 재결정(dynamic recrystallization)의 정도를 알아보기 위해 Fig. 5의 각 부위를 대상으로 ASTM 입자수⁽⁶⁾를 조사하였다.

온간 영역에서의 각 공정에 따른 단조재의 경도 변화를 관찰하기 위해 Fig. 5에 표시된 부위를 대상으로 경도 측정을 실시하였다. 모든 경도시험은 Rockwell 경도기($\phi 3.175$ mm인 hard steel ball indenter : B scale)를 사용하여 측정하였다. 각 공정에 대한 시편의 경도는 오차를 고려해 7회 측정하였으며 세 번째 공정의 시편에 대하여서는 전체 부위에 대한 경도 값을 측정하기 Fig. 6과 같은 격자를 시편의 표면에 표시하여 각 절점의 경도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직검사

전체 공정에 대한 조직변화와 세 번째 공정에서의 조직변화는 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에서 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 각 공정에 대한 조직사진, 즉 Fig. 5(a), (b), (c4), (d), (e) 위치에서의 조직사진($\times 100$)이며, Fig. 8은 Fig. 5(c.1~7) 위치에서의 조직사진($\times 100$)이다. 그리고, Fig. 9는 Fig. 5(c.8) 위치의 조직사진이다.

각 공정에 따라 혹은 각 위치에 따라 조직의 차이가 확실함을 알 수 있다. 즉, 각 공정에서의 소성 변형에 의한 에너지와 소산 열에너지의 차이에 의해 서로 다른 조직으로 변하게 된다. 이 경우는 소성가공과 동시에 재결정이 생기는데 이것을 동적 재결정(dynamic recrystallization)이라 하며 이는 가공온도와 가공속도에 의해 영향을 받는다.⁽⁵⁾ 이 과정은 Fig. 7에 잘 나타나 있다. Fig. 7(a)~(c)(공정 1, 2, 3)을 살펴보면 작은 퍼얼라이트 조직

이 페라이트 입계 사이에 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이 퍼얼라이트의 세멘타이트 상경계 부분은 재결정 핵의 생성을 위한 사이트(site)를 제공하게 되며 이에 의해 가공과 동시에 세멘타이트 조직을 중심으로 동적 재결정이 생기게 된다. 즉, 각

공정을 거치면서 소성변형에 의해 전단 되어진 세멘타이트가 소성 유동방향을 따라 분산되어 그 상경계는 재결정의 핵생성의 사이트(site)를 제공하게 되며 이곳에서 재결정 핵이 생성, 성장하는 변화를 겪게 되는데 그 생성량과 성장 속도의 차이에

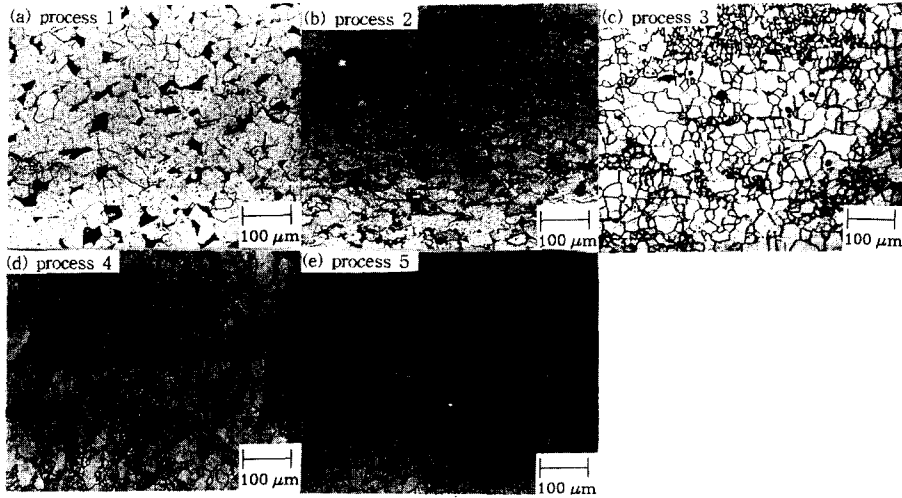


Fig. 7 Microstructure for each forging process (x100)

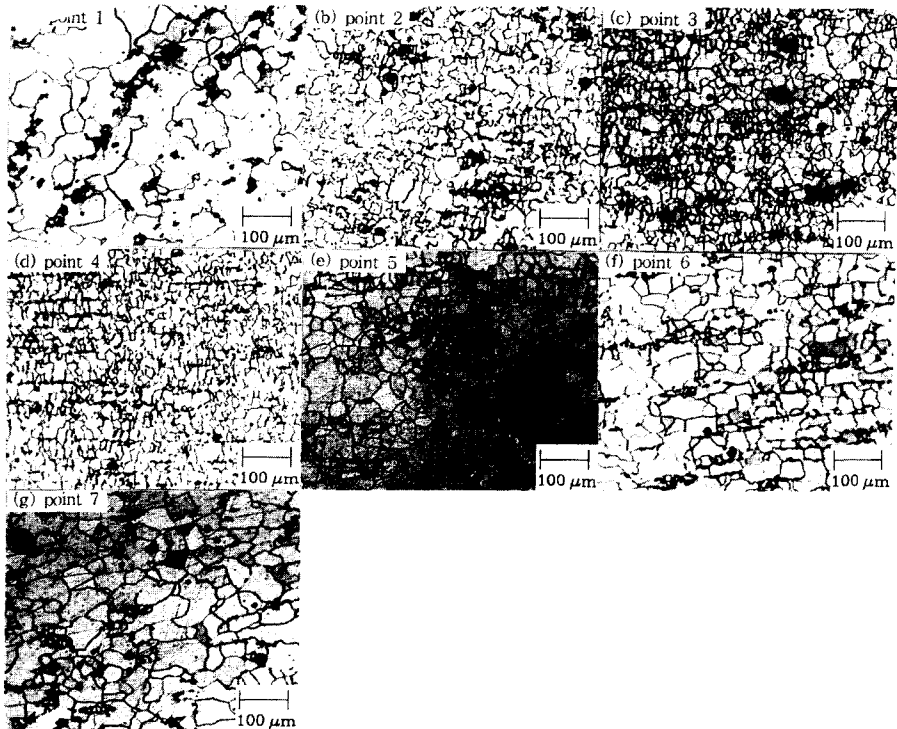


Fig. 8 Microstructure for process 3 for Fig. 5(c)



Fig. 9 Microstructure for surface area at point 8 in Fig. 5(c)

의해 조직이 달라지게 되는 것이다. 따라서 이 조직들은 소성 변형 방향의 방위를 가지게 된다.⁽⁹⁾ 공정 4(Fig. 7(d))에서는 이전 공정에 의해 고르게 분산되어진 세멘타이트 주위에 아입계(sub-grain-boundary)가 생성되어진 것이며 따라서 아주 미세한 조직이 분포되어 있는 것처럼 보인다. 이는 헤딩(heading)공정에 의해 세멘타이트 상경계에 전위가 집적되고 이 전위가 가진 에너지와 외부 열에너지를 활성화 에너지로 하여 가공중 회복(동적 회복: dynamic recovery⁽⁷⁾)이 일어나 세멘타이트 조직의 상경계 주위에 집적되어진 전위가 재배열하여 마치 입계처럼 보이게 되는 것이다. 공정 5(Fig. 7(e))는 트리밍(trimming)공정으로 재료 내부는 거의 소성 변형을 받지 않으므로 단순히 앞 공정조직의 성장에 의해 만들어진 조직이다. 재결정의 성장은 생성된 재결정의 입계가 이동함에 의해 일어나는 현상인데 이때 열에너지와 입계의 이동에 소요되는 시간이 충분히 주어지면 재결정립은 성장을 하게 된다.

금속이 심하게 소성변형을 받으면 소성변형에 소모되어진 변형에너지의 대부분은 열에너지로 소멸되며 나머지는 전위와 같은 결함형태로 금속 내에 저장되어 높은 자유 에너지를 가진 상태에 있게 된다. 정적 회복, 정적 재결정은 원자를 확산시킬 정도의 열에너지가 주어지면 이 열에너지와 내부의 축적 에너지가 구동력이 되어 회복, 재결정의 핵이 생성, 성장하게 된다. 동적 회복, 동적 재결정의 경우는 위의 축적에너지, 외부 열에너지와 함께 소성가공시의 전단력에 의해 계속 축적되어지는 에너지가 회복, 재결정 핵생성의 활성화에너지로 작용하게 된다. 본 실험의 경우 800 °C에서 가공이 시작되므로 가공재는 Ac₁ 부근의 영역에 있게 되어 조직은 부분적으로 오스테나이트(austenite)로 변

태 하게 되며 소성 가공에 의해 가공 경화되어진 오스테나이트가 만들어지게 된다. 이 때 오스테나이트로 변태되지 못하고 남아 있는 세멘타이트는 페라이트 조직과 결정 격자가 달라 상경계를 이루게 되며 소성가공에 의한 전위의 집적에 의해 다른 부분보다 높은 전위 밀도를 가지게 되어 이 세멘타이트 상경계 부분에 재결정의 핵이 생성, 성장하는 과정을 겪게 된다.

Fig. 8은 세 번째 공정의 각 위치에서의 조직을 나타낸 것이다. 역시 변형을 많이 받았다고 생각되어지는 부분, 특히 세멘타이트 상경계 부위에서 재결정이 활발하게 나타나고 있음을 알 수 있다. (a)(1번 위치)와 (g)(7번 위치)는 거의 변형을 받지않은 부위로 공정 2의 조직(Fig. 7(b))과 유사하다. 즉, 이 위치의 조직은 거의 변형을 받지 않아 비교적 큰 입경을 그대로 유지하고 있다.

Fig. 9는 Fig. 5(c.8) 위치의 조직사진이다. 표면 부근에서는 마찰에 의해 유동이 내부에 비해 억제되므로 조대한 조직을 그대로 가지고 있으나, 내부의 조직은 상당히 변화되어 있음을 알 수 있다. 그리고 이 사진에서는 세멘타이트와 페라이트 조직의 소성 유동방향으로의 유동현상을 잘 관찰할 수 있다. 즉, 조직은 우선 방위를 가진 집합조직으로 되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 각 공정별로 입경의 크기를 측정된 것이다. 공정의 진행과 함께 ASTM 입자 크기수가 커지는 것을 알 수 있다. 공정 5의 관찰 부위는 소성 변형을 받지 않아 입자의 성장이 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 5(c)에 나타난 각 측정 위치에 대한 입경의 크기를 조사한 것이다. 역시 소성 변형이 가장 심한 부분, 즉 소성 유동속도가

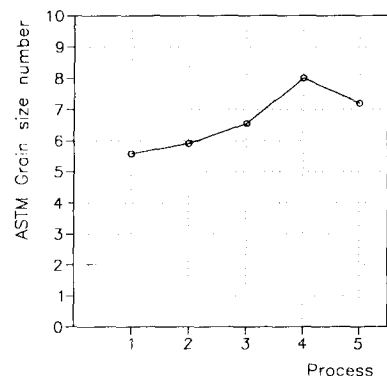


Fig. 10 Grain size number for forging process

가장 빠르리라고 생각되는 부분에서 ASTM 입자 크기수가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 변형률속도가 빠를수록 전위의 증식이 용이하여 핵생성이 일어날 수 있는 확률을 크게 하기 때문이라고 할

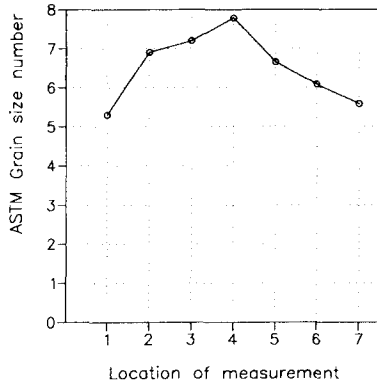


Fig. 11 Grain size number on the location of measurement

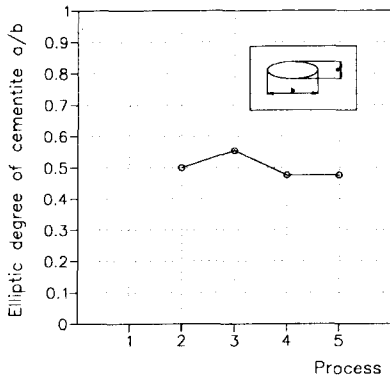


Fig. 12 Relationship between forging process and elliptic degree of cementite

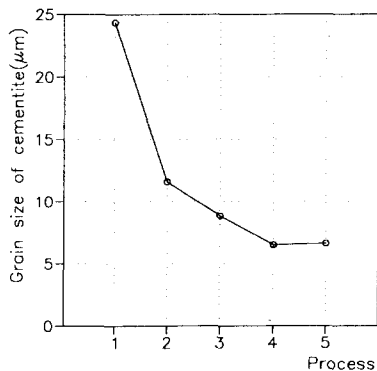


Fig. 13 Relationship between forging process and grain size of cementite

수 있다.⁽¹⁰⁾

공정에 따른 세멘타이트 입경의 크기와 구상화 정도의 변화를 알아보기 위해 Fig. 5에 나타난 각 위치에 대해 세멘타이트의 형상계수와 그 입경의 크기를 조사하였다. 공정에 따른 구상화 정도는 Fig. 12, 입경의 변화는 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 세멘타이트의 형상계수는 각 공정에 따라 크게 변하지는 않으나 입경은 아주 감소되었음을 알 수 있고 세멘타이트 입경은 공정 2, 즉 최초의 작은 소성변형에 의해서 이미 상당히 작아졌음을 알 수 있다. 세멘타이트의 형상계수는 공정에 따라 거의 일정한 값을 가지지만 이 값들은 단순 구상화 열처리에 의해 얻을 수 있는 값⁽³⁾에 근사한다. 세멘타이트가 이와 같이 구상화가 되는 이유는 단조 공정중 소성변형의 영향으로 상경계가 많은 퍼얼라이트 부에 새로운 세멘타이트의 핵이 발생, 집결하는 현상 때문이라고 생각된다. 종래의 온도 제어만에 의해 구상화 열처리를 행하는 경우에는 상당한 시간을 요하게 되나(약 15~20 h) 이와 같이 재결정 온도 부근에서 소성가공을 행함에 의해 순간적으로 구상화 열처리의 효과를 볼 수 있게 된다.

이렇게 구상화된 세멘타이트의 영향으로 세멘타이트 조직이 불연속으로 변해 전위의 이동이 쉬워져 소성가공이 용이해지며 가공중 피가공재에서의 균열 발생을 억제하게 된다. 일반적으로 세멘타이트의 형상계수가 커질 수록 단조재는 변형능(變形能)이 높아지며, 입경이 작아질수록 가공도가 높아지게 된다고 알려져 있다.⁽³⁾

단조 온도가 Ac_1 부근의 온도인 경우, 즉 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 영역에서의 가공의 경우 오스테나이트는 온도와 시간적 요인이 적당하면 재생 퍼얼라이트로 변태되며 이것이 성장하게 되어 세멘타이트의 형상계수는 작게 되고, 입경은 크게 된다. 그러나 본 실험의 단조재의 경우는 아주 짧은 시간 동안 가공되므로 세멘타이트 입자는 성장을 하지 못해 그 형상계수는 거의 일정하게 유지하게 되며 입경은 소성가공의 영향으로 계속 작아지게 된다.

공정 4-5에서는 세멘타이트 형상계수나 입경이 거의 변하지 않음을 알 수 있는데 이 공정은 다만 Trimming 공정으로 내부 조직은 큰 변화를 받지 않기 때문이라고 생각되어진다.

Fig. 14, Fig. 15는 Fig. 5(c)의 각 위치에서의 형상 계수와 입경을 측정된 것이다. 여기서 세멘타이

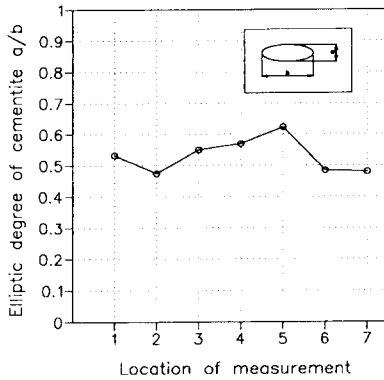


Fig. 14 Relationship between location of measurement on process 3 and elliptic degree cementite

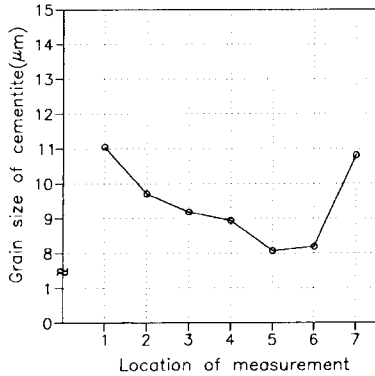


Fig. 15 Relationship between location of measurement on process 3 and grain size of cementite

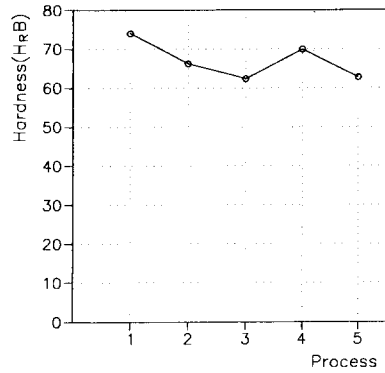


Fig. 16 Hardness(H_{RB}) for forging processes

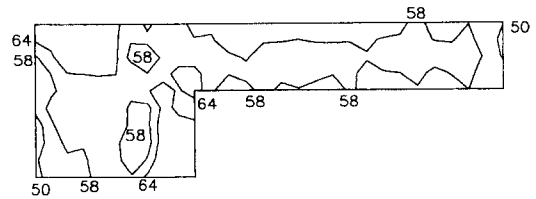


Fig. 17 Hardness(H_{RB}) of process 3

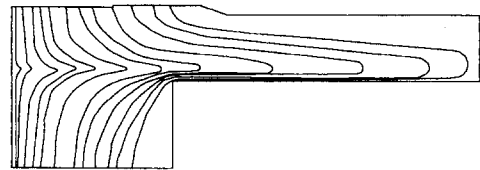


Fig. 18 Metal flow for process 3

트의 형상 계수나 입경은 소성 유동속도가 가장 빠르고 소성 변형량이 가장 많으리라고 생각되는 부분, 즉 3, 4, 5의 위치에서 가장 양호함을 알 수 있으며, 7번 위치에서는 소성 변형량이 작아 형상 계수가 작고 입경이 크다. 이 부분에서의 탄소 화합물의 형상계수, 입경의 크기는 Fig. 12, Fig. 13의 공정 2의 값과 비슷한 값을 가지고 있으므로 소성 변형량이 그리 크지 않음을 짐작할 수 있다.

3.2 경도시험

Fig. 16은 각 공정별로 경도 측정값을 나타낸 것이고 Fig. 17은 Fig. 5(c) 단면의 경도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 18은 Fig. 5(c) 단면을 연마한 시편을 관찰하여 소재유동(metal flow)을 그린 것이다. 냉간 단조에 의해 가공되어진 시편의 경도를 측정하여

그 경도 값들의 등고선을 그리면 대체로 시편의 재료 유동과 비슷한 모양을 나타내나⁽¹¹⁾ 온간에서 가공한 경우는 전체적으로 거의 균일한 값들이 나타났다. 이것은 소성변형에 의해 수반되는 전위 밀도의 증가와 동시에 열에너지의 영향으로 동적 회복, 동적 재결정에 의한 동적 복구과정때문에 생기는 가공경화현상의 상쇄⁽¹⁰⁾ 때문이라고 생각된다.

Fig. 17의 경도분포를 보면 전체적으로 비슷한 값을 가지나 가공중 윤활액에 의한 급냉을 받은 부분은 국부적으로 높은 경도치를 가지며 소성 가공을 받지 않은 부분, 즉 시편의 중심부와 끝부분이 가장 낮은 경도치를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 16을 보면 각 공정에 따른 경도 값의 차이는 거의 없음을 알 수 있는데 이는 가공의 진행에 따른 조직의 미세화에 의한 경도 값의 상승과 세멘타이트 조직의 구상화에 의한 경도값의 하락에 의

한 상호작용에 의해 나타나는 결과라고 생각되어진다.

3.3 유한요소 시뮬레이션

본 해석은 Fig. 5의 공정 2와 공정 3을 대상으로 해석하였다.

해석에 사용되어진 응력-변형률속도의 관계⁽¹²⁾는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = C(T) \bar{\epsilon}^{m(T)}$$

여기서,

$$C = 19.9 \times 10^3 \text{ psi}$$

$$m = 0.105$$

약 700 °C 이상의 온도 역에서는 SM10C, SM15C, SM25C 등의 탄소강은 거의 유사한 변형능(變形能)을 가지고 있다고 알려져 있으므로⁽¹³⁾ 근사치이지만 본 해석에서는 SM15C의 물성치를 사용하여 계산하였다.

해석온도는 소성가공 중의 발열량을 고려해 800 °C로 하였다.

공정 2의 해석은 Fig. 19(a)와 같이 절점 1891개, 요소 1800개로 해석하였다. 축대칭 해석을 행하였으므로 공정 3의 모델은 부피를 더해서 계산하였다. Fig. 20(a)는 공정3의 초기 격자모양이며 (b)는 계산 후 최종 격자모양이다. 이 계산 과정 동안 13번의 격자 재구성(remeshing)을 하였다.

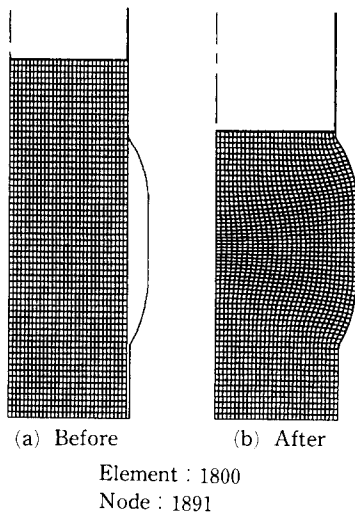


Fig. 19 Mesh and die for forging simulation by the finite element method for process 2

다이 형상도 Fig. 19 및 Fig. 20에 같이 나타내었다.

마찰계수는 0.1로 하여 해석하였다.

Fig. 19(b)와 Fig. 20(b)는 각각 공정 2와 공정 3에 대한 유한요소해석 결과 변형된 격자모양을 나타낸 것이다. 특히 공정 3은 계산 결과 축방압출된 부분의 중앙부 이후에서 다이 밀면과 접촉되지 않는 현상이 일어났다. 이는 실제의 공정 3 이후의 단조품 형상에서도 찾아 볼 수 있으며 따라서 본 유한요소해석 결과와 일치하고 있다.

Fig. 21(a), (b)는 유한요소해석을 하여 얻은 유효 변형률분포를 나타낸 것이다. 공정 2의 (a)를

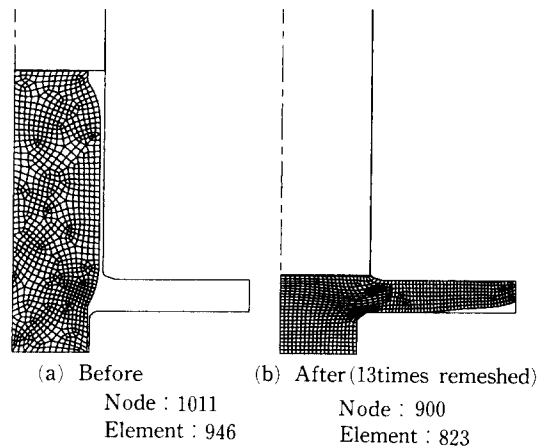


Fig. 20 Mesh and die for forging simulation by the finite element method for process 3

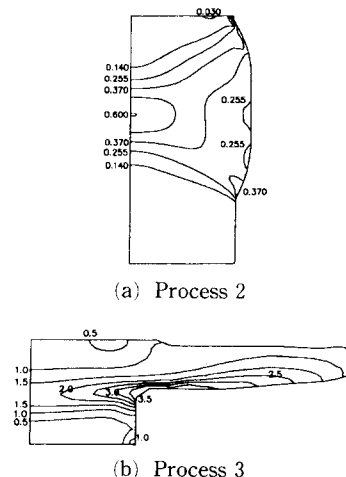


Fig. 21 Distribution of effective strain for process 2 and process 3

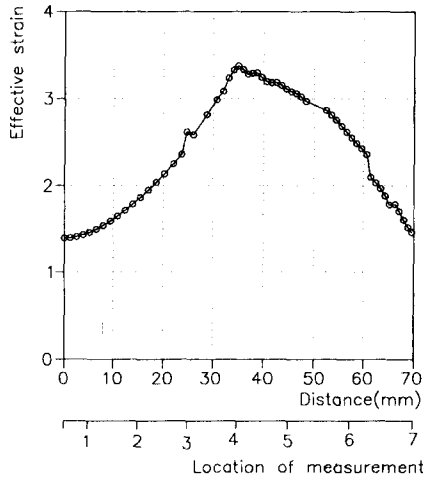


Fig. 22 Relationship between location of measurement on process 3 and effective strain for process 3

보면 변형을 받은 부위는 거의 0.2 이상의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 공정 3의 (b)는 전 영역에 걸쳐 0.5 이상의 값을 나타내며 특히, Fig. 5의 (c.8)점은 4.0 이상의 값으로 가장 큰 값을 가지고 있음을 볼 수 있는데 이의 영향으로 실제 제조 공정상 이 점에서의 금형의 마멸이 가장 심하다.

Fig. 22는 Fig. 5(c)에 표시한 부분들을 따라 유효변형률 분포를 그린 것이다. 4번 위치 부근에서 가장 큰 유효 변형률 값이 나타났으며 1번과 7번 위치는 유효 변형률 값이 비슷하게 나타났다. 이것은 조직 사진에 의해 조사한 값들과 일치함을 알 수 있다.

3.4 실험과 유한요소해석의 비교 및 고찰

Fig. 23은 저탄소강의 변형률속도에 대한 진응력-진변형률의 관계의 예 ($T=950^{\circ}\text{C}$)를 나타낸 것이다. 여기서, ϵ_p 는 가장 큰 응력값을 가질 때의 진 변형률 값이며 최초의 변형률 값이 $0.8\epsilon_p$ 정도의 값에서 동적으로 재결정된 결정립이 관찰되어진다는 것이 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

저탄소강의 경우 $\dot{\epsilon}=1.0/\text{s}$ 일 때 $\bar{\epsilon}_p=0.4$ 정도의 값⁽¹⁴⁾을 가지므로 동적 재결정이 생기기 시작하는 진변형률 값은 0.32 정도이다. 앞의 강소성 유한요소 해석에서 얻은 값을 보면 공정 2의 변형 부분은 0.2~0.4 정도의 값을 가지고 있음을 알 수 있는데 이 정도의 변형률 값은 대체로 동적 재결정이

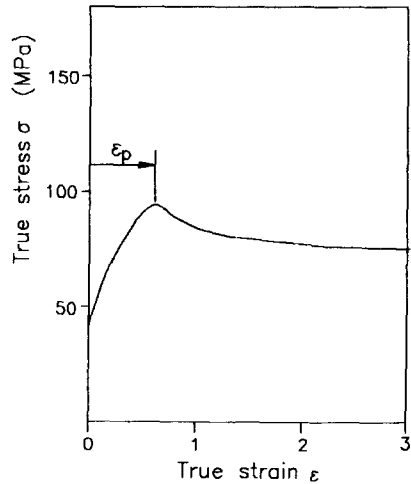


Fig. 23 Schematic of the true stress and strain behavior of a low carbon steel undergoing dynamic recrystallization

발생되기 시작하는 변형률 값의 분포임을 알 수 있다. 온간영역에서의 가공, 즉 $0.5T_m$ 정도의 온도에서 가공하는 경우 Fig. 23과 같이 큰 변형률에서도 변형 응력이 일정한 값을 나타내는 부분 있는데 이곳은 열적으로 활성화된 상태이므로 이 영역에서 소성변형이 이루어지면 결정립은 미세하게 변하게 된다고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 본 실험의 경우 동적 회복, 동적 재결정이 충분히 나타났으므로 이 열적으로 활성화되어 있는 부분에서 가공이 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 24는 조직검사에서 얻은 값(Fig. 11, Fig. 14, Fig. 15)을 Fig. 21의 유효 변형률 값에 대응시켜 그린 것이다. 조직사진에서 얻은 값, 즉 재결정의 생성, 성장 정도와 세멘타이트의 입경의 크기 등으로 예상한 바와 같이 3번과 4번 위치에서의 유효 변형률 값이 가장 크음을 알 수 있고 1번 위치와 7번 위치에서의 값은 별 차이가 없음을 알 수 있는데 역시 유효 변형률 값의 분포도 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5(c), 즉 세 번째 공정의 3, 4, 5번 위치는 후속 냉간단조공정에 의해 심한 굽힘가공(bending)을 받을 부분이기 때문에 이 부분의 세멘타이트 진원도와 세멘타이트의 입경의 크기는 아주 중요하다. 특히, 탄소강의 냉간단조 시에는 구상화 열처리를 하여 세멘타이트의 진원도가 0.5 정도의 값을 가질 때까지 구상화시킨 후 단조가공을 하는데 본 시편은 거의 0.5 정도의 값을 가지고 있으며

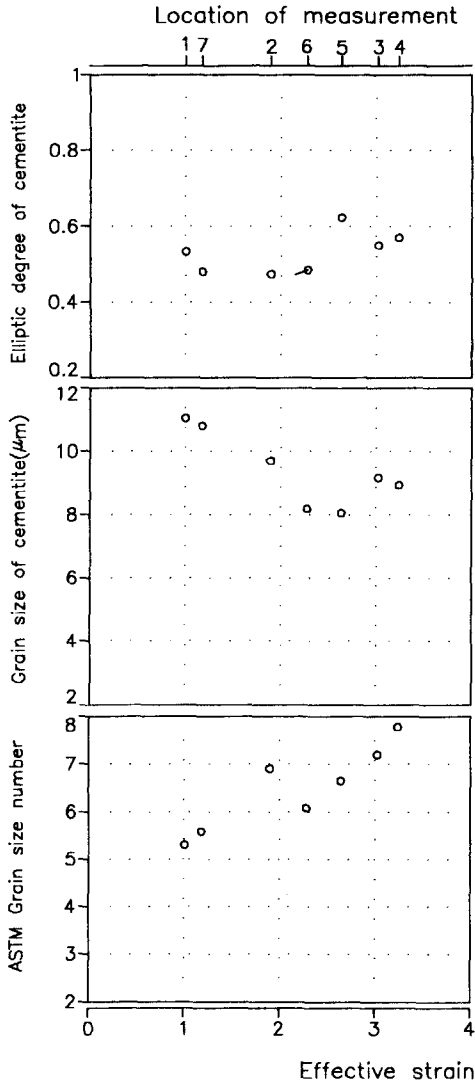


Fig. 24 Relationship between effective strain and elliptic degree of cementite, grain size of cementite and ASTM grain size number

로 후속 냉간가공 시 어닐링 열처리없이 가공이 가능해진다.

Fig. 24는 공정 3의 측정 위치 3, 4, 5번에서 세멘타이트 형상계수, 세멘타이트 입경, ASTM 입자수가 가장 양호한 값을 가짐을 보이며 대응하는 유효 변형률 값은 2.5 이상임을 알 수 있다.

5. 결 론

온간단조에 의한 소성가공시 피가공재는 가공과

동시에 열처리 효과를 받았음을 알 수 있었으며 조직검사에 의한 물성치들을 조사함에 의해 소성 변형량을 예측할 수 있었다. 그 세부적인 결론은 다음과 같다.

(1) 온간 영역에서의 소성가공은 피가공재에 동적 재결정을 일으켜 그 조직의 미세화를 가져왔다. 이때 변형량이 클수록 결정립의 미세 정도는 더욱 커졌다.

(2) 온간 영역에서의 소성가공시 가공과 동시에 세멘타이트는 구상화되었으며 소성가공량이 클수록 세멘타이트의 입경의 크기는 작아졌다.

(3) 온간 영역에서 가공한 시편의 경도 분포는 전체적으로 유사한 경도 분포를 보였다.

(4) 유한요소해석에 의한 온간 영역에서의 변형률 분포는 조직관찰을 통한 결정립 입경의 크기 분포와 잘 일치했다.

(5) 온간 영역에서 가공을 받은 시편의 내부 조직은 가공성(formability)이 향상되어 후속 냉간가공 시 어닐링 열처리 없이 연속적인 가공이 가능하게 되었다.

(6) 저탄소강의 온간단조가공시 유한요소해석에 의하여 온간가공 후의 미세조직을 예측할 수 있고, 결정립과 유효 변형률과의 정량적인 분석에 대해서는 차후 계속 연구 될 것이다.

후 기

이 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 자원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) 鈴木康末, etc., 1986, “溫間鍛造의 現狀” 鐵と鋼 72-10, pp. 1488~1497.
- (2) 關口秀夫, etc., 1990, “加工熱處理による材質の改善と制御” 材料 38-435, pp. 1458~1464.
- (3) 高橋 涉, etc., 1989, “溫間鍛造球狀化に關する實驗的檢討” 塑性と加工 30-345, pp. 1420~1426.
- (4) 吉野雄彦, 1992, “鍛造における材質豫測” 塑性と加工 23-33, pp. 1285~1291.
- (5) Korner and Knodler, 1992, “Possibilities of Warm Extrusion in Combination with Cold Extrusion” *Journal of Materials Processing*

- Technology*, 35, pp. 451~465.
- (6) 牧正志, 田村今男, 1984, “鋼の加工熱處理の金屬學” 25-284, 1984, pp. 772~779.
- (7) 井上毅, 落田義隆, 木下修司, 1975, “鋼の冷間鍛造性におよぼす球狀化程度の効果” 鐵と鋼 第61年, 第6號 pp. 808~816.
- (8) *Metal handbook*, 1948, pp. 401.
- (9) George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 237~240.
- (10) 오병문, 장병록, 유현철, 1988, “금속재료의 고온변형 기동, 소성변형 및 가공” 김동원, 이동녕 편, 반도출판사, pp. 311~321.
- (11) 李明哲, 重野千年, 佐久田 博司, 小林 勝, 1990, “鍛造加工の變形シミュレーションの豫測およびその豫測結果と材質との關係,” 塑性と加工 31-348, pp. 83~89.
- (12) Altan, T., OH, S. and Gegel, H. L., 1983, “*Metallforming*,” American Society for Metals, pp. 45~73.
- (13) “溫間鍛造でよく行なわれる溫度範圍はどこか,そしてその溫度お選んだ理由は,” プレス技術, 第21卷 第6號, pp. 24~26.
- (14) Courtney, T. H., 1990, *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw-Hill Publishing Company, 309~319.