〈論 文〉

고온 연강 유동특성을 상사하는 모델재료 개발에 관한 연구

이종헌* · 김영호** · 배원병*** · 이원희****

(1992년 6월 23일 접수)

A Study on Development of Model Materials Showing Similar Flow Characteristics of Hot Mild Steel at Various Temperatures

Jon-Heon Lee, Young-Ho Kim, Won-Byong Bae, Won-Hee Lee

Key Words: Model Material Techniques(모델재료기법), Mixed Plasticine(혼합 플라스티신), Approximate Similarity(근사 상사성), Strain Rate(변형률 속도), Constitutive Equation(구성방정식), Friction Factor(마찰정수), Mild Steel(연강)

Abstract

Model materials are developed to achieve similarity of flow patterns for mild steels in forming processes at high temperatures. The model materials consist of pure plasticine and one or two additives such as resin and lanolin. To verify the similarity of flow patterns between physical modeling and compression of mild steels at high temperatures, ring and compression tests have been carried out with the developed-model materials at various strain rates, temperatures and lubricants. The test results are in good agreement with the flow patterns obtained from upsetting of a mild steel at high temperatures.

1. 서 론

소성가공품을 생산하는 대부분의 업체에서 제품의 형상이 바뀌거나, 제품에 결함이 생겨서 공구를 다시 설계할 경우 대체로 경험에 의하여 가공공정을 설계하여 왔다. 이런 경험적인 설계는 시행착오에 의하여 행해지므로 장치의 제작 및 시간 등의 손실이 매우 크다. 그러므로 공구형상 변화에 따른 재료의 유동특성 등을 알기 위해 값이 싸고 다루기가 용이한 모델재료를 이용하여 가공공정을 시뮬레이션하는 모델재료기법(Model Material Technique)이 많은 연구자들의 주목을 받아 왔다.[1]

모델재료를 이용한 실험은 아크릴, 나무와 같은 값싼 재료들을 이용하여 금형을 만들고 플라스티신(plasticine), 왁스(wax), 점토(clay), 납(lead)과 같은 연한 모델재료를 사용하여 금속 유동을 시뮬레이션 하는 방법으로 19세기 이후부터 꾸준히 연구되어 왔다.[2]

모델재료를 사용하여 실제재료를 시뮬레이션할 때 두 재료사이에 기하학적으로 상사성을 가지며 공구와 재료사이의 마찰조건과 구성방정식의 경화지수가 유사하면 두 재료가 가공에 따라 발생하는 역학적 현상이 상사성(similarity)을 가진다고 할 수 있다.[3] 따라서 실제재료에 대한 상사 모델재료로서 마찰조건과 구성방정식은 중요한 요소로 간주된다. Tanaka 등[4]은 플라스티신을 이용하여 강의 열간단조를 시뮬레이션하기 위하여 여러가지 윤활제의 마찰특성을 조사하였다. 또한 Awano 등[5,6]은 대표적 모델재료인 연질금속계통, 왁스계통, 점

*부산대학교 생산기계공학과 대학원
**정회원, 부산대학교 생산기계공학과
***정회원, 부산대학교 기계설계공학과
****부산대학교 기계설계공학과 대학원

토계통에 대한 재료의 성질과 특성을 연구하였으며 윤활제에 따른 마찰특성과 모델재료에 요구되는 일반적인 조건들에 대해서도 서술하고 있다. 최근 국내에서도 Lee 등[7,8]에 의해 플라스티신을 소재로한 모델재료기법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 플라스티신은 상온에서의 유동특성이 1000℃의 고온에서 연강(mild steel)의 특성과 유사하다는 것이 여러 연구자[3,9~13]에 의해 밝혀진 바가 있다. 그러나 상온에서 플라스티신으로 고온의 여러가지 온도 레벨의 연강을 실험적으로 시뮬레이션하기에는 어려움이 많다. 왜냐하면 연강의 온도변화에 따른 유동응력의 변화로 플라스티신의 상온의 유동특성만으로는 한계가 있다. 그러므로 강의 가공온도를 고온에서 달리할 경우에 상온에서 상사가 가능한 모델재료를 개발할 필요성이 있으며 이와 관련된 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 모델실험을 통해 실제재료에 관한 정량적인 정보를 얻기 위하여 모델재료인 플리스티신에 라놀린(lanolin), 레진(resin) 등을 첨가하여 새로운 유동특성을 갖는 혼합 플라스티신을 개발하고자 하였다. 개발된 모델재료와 기존의 플라스티신을 MTS(Material Testing System)를 이용하여 링 압축실험과 실린더 압축실험으로 온도와 변형률속도 변화에 따라 재료에 혼합된 첨가제가 모델재료의 마찰특성과 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하고 비교 검토하고자 한다. 또한 실제재료의 다양한 가공공정을 시뮬레이션하기 위한 모델재료의 상사실험에서 다이와 소재의 분리가 비교적 용이한 윤활제로 실링 페이퍼(sealing paper), 바셀린(vaseline)을 바른 실링페이퍼, 파우다(talc powder)의 마찰특성에 대해서도 연구되었다. 그리고 조사된 모델재료들이 연강인 0.15% C강의 고온(900℃~1100℃)에서의 온도변화에 따른 상사재료로 사용될 수 있는지의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 실 험

고온에서의 온도변화에 따른 연강의 유동특성과 상사성이 있는 모델재료로서 플라스티신에 첨가제를 혼합하여 새로운 혼합 플라스티신을 개발하고 윤활제에 따른 마찰특성과 유동특성을 조사하고자 한다.

2.1 시편 제작

고온 강의 소성가공공정 시뮬레이션에서 상사성을 조사하기 위한 모델 재료로서 영국의 Harbutt's Plasticine사 제품인 백색 플라스티신을 이용하였으며 기계적성질과 화학적성분은 Table 1과 같다.

또한 플라스티신에 라놀린, 레진(송진) 등을 중량비로 첨가한 혼합 플라스티신을 이용하여 시편을 제작하였다. 여기서 편의상 순수 플라스티신(100%)을 P재, 플라스티신(97%)와 라놀린(3%)의 혼합제를 P-L재, 플라스티신(90%)와 라놀린(7%), 레진(3%)의 혼합제를 P-L-R재라 한다. 링 압축시편은 세가지 재료 모두 일정하게 6 : 3 : 2(42 mm : 21 mm : 14 mm)의 비율로 제작하였고 실린더 압축실험의 시편은 직경/높이의 비가 1 : 1인 30 mm : 30 mm, 20 mm : 20 mm의 두가지 시편으로 만들었다.

P재는 재료내의 기포를 완전히 제거하기 위해 오븐(Mechanical circulation oven) 속에서 30~40℃의 온도를 유지한 뒤 꺼내어 1시간 정도 손으로 반죽하였다. 그 뒤 실린더형 아크릴관을 이용하여 적당히 다진 후에 드릴(drill)로 압출하였으며 면도칼 및 피아노선을 사용하여 시편의 양쪽 끝을 어느 정도 끊어내고 중간부분을 일정 간격으로 절단하여 실린더 압축실험과 링 압축실험 시편을 제작하였다. P-L재는 상온에서 반응고상태인 라놀린을 플라스티신에 일정비율로 섞어 30~40℃의 온도에서 손으로 골고루 혼합하여 P재와 같은 방법으로 시편을 제작하였고 P-L-R재는 먼저 상온에서 고체인 레진을 미세한 분말로 만들고 그것에 일정비율로 라놀린을 혼합한 뒤에 오븐의 약 80℃의 온도에서 완전히 녹인 다음 혼합된 레진과 라놀린에

Table 1 Properties of plasticine

Components	$CaCO_3$(50~60%), $MgCO_3$, Mineral, Fe-Si
Specific Gravity	1.8~1. 92
Specific Heat	0.24 Kcal/Kg ℃
Heat Conductivity	0.6 Kcal/m h ℃
Hardness	H_B15(24℃)
Bulk Modulus	675,000 psi (475 Kg/mm^2)

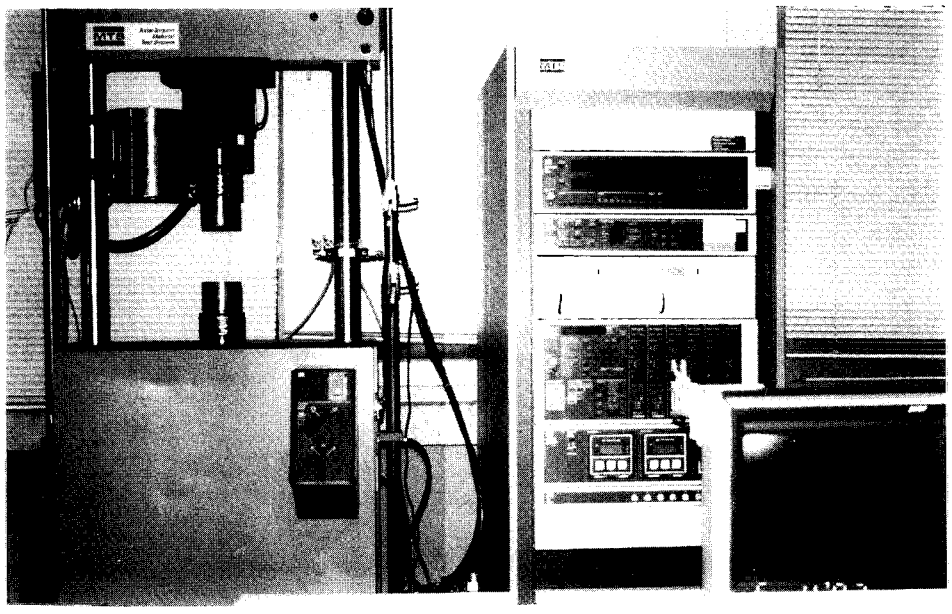


Fig. 1 MTS (material testing system)

플라스티신을 섞어 30~40℃의 온도에서 P재와 같은 방법으로 시편을 제작하였다. 또한 만들어진 시편은 실험온도을 유지한 오븐속에서 24시간 정도 보관 후에 실험을 하였다.

2.2 실험장치

실험장치는 컴퓨터로 제어 가능한 재료시험기인 MTS(10 kN의 Load cell)에서 실험하였고 MTS에 부착된 X-Y Plotter로 하중과 변위선도를 그리도록 하였다. 그리고 기초실험을 위하여 S45C로 평면 다이를 제작하여 표면을 매끄럽게 연마(polishing)한 다음 실험을 하였다. 실험중 다이와 소재의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 0℃에서 200℃까지 온도를 조절할 수 있는 오븐을 사용하였고 항온항습기(thermo hygrostat)를 이용하여 실내 온도를 일정하게 유지하였다. (실험장비인 MTS는 Fig. 1과 같다.)

2.3 실험순서

(1) 링 압축 실험

링 압축 실험에서는 여러가지 윤활제의 종류에 따른 모델재료의 마찰거동을 연구하고자 한다. 30 mm/min의 일정 다이속도로 높이감소율 50%가 될 때까지 압축하였으며 10%간격으로 시편의 내경 변화를 마이크로미터로 측정하여 높이감소율에 따른 내경변화율을 보정곡선[14]에 표시하였다. 수행된 실험내용은 다음과 같다.

(가) P재의 링 압축실험에서 글리세린(glyceline), 바셀린, 파우다, 실링 페이퍼, (바셀린을 바른 실링페이퍼) 등의 윤활제를 이용하여 상온(17℃)에서 압축하여 윤활제에 따른 마찰정수(friction factor)의 변화를 조사하였다.

(나) P재에 바셀린으로 윤활하여 온도(0℃, 10℃, 17℃, 28℃)에 따른 마찰정수의 변화를 조사하였으며 바셀린 윤활제의 온도와 높이 감소율 변화에 대한 마찰정수의 안정성을 조사하였다.

(다) P재와 P-L-R재는 다이로 부터 소재의 분리가 비교적 용이한 바셀린을 바른 실링페이퍼와 파우다를 윤활제로 상온(17℃)에서 일정 윤활제에 대한 모델재료의 마찰특성을 조사하였다.

(2) 실린더 압축 실험

재료의 유동 특성을 알아보기 위해서 인장시험에 비해 높은 변형률을 얻을 수 있는 실린더 압축실험을 하였다. 윤활제로는 링 실험에서 사용된 바셀린, 파우다, 바셀린을 바른 실링페이퍼를 사용하였다. 실험내용은 다음과 같다.

(가) 링 압축실험에서 배불림(barreling) 현상이 거의 생기지 않는 바셀린 윤활제를 가지고 세가지

모델재료를 상온에서 1/s, 0.1/s, 0.01/s, 0.005/s의 일정 변형률속도로 압하율 50%까지 압축하여 변형률 및 변형률속도에 대한 유동응력의 관계를 조사하였다.

(나) P재와 P-L-R재의 시편을 다이속도 30 mm/min로 바셀린 윤활제를 사용하여 온도 변화(0℃, 10℃, 17℃, 28℃)에 따른 응력과 변형률의 관계를 조사하였다.

(다) 파우다와 바셀린을 바른 실링페이퍼를 이용하여 시편의 크기가 30 mm : 30 mm, 20 mm : 20 mm인 P재를 상온에서 30 mm/min의 다이 속도로 압축하여 윤활제가 모델재료의 유동에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 링 압축 실험

Fig. 2는 다섯 종류의 윤활제를 사용한 링 압축 실험에서 윤활제에 따른 마찰정수의 변화를 나타내고 있다. 여기서, 바셀린과 바셀린을 바른 실링페이퍼는 마찰정수 m값이 0.1정도를 나타내며 글리세린은 높이감소율이 증가함에 따라 0.1에서 0.17 정도까지 조금 증가하고 있으나 대개 0.15의 값을 가진다. 또한 파우다와 실링 페이퍼의 윤활제는 0.3에서 0.5 정도의 범위에 존재하며 0.4 부근에서 안정적인 결과를 나타내고 있다. Fig. 3은 바셀린을 사용했을 경우 높이감소율에 따라 시편의 변형 양상을 나타내고 있다. Fig. 4는 온도와 높이감소률에 따른 마찰정수 선도를 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 마찰정수가 대개 0.15에서 0.05정도로 조금씩 감소하고 있다. 이것은 바셀린이 다른 윤활제에 비해 유지성분이 많이 포함되어 있기 때문에 온도가 증가하면 점성이 감소되어 나타나는 현상으로 바셀린이 온도변화에 다소 민감하다는 것

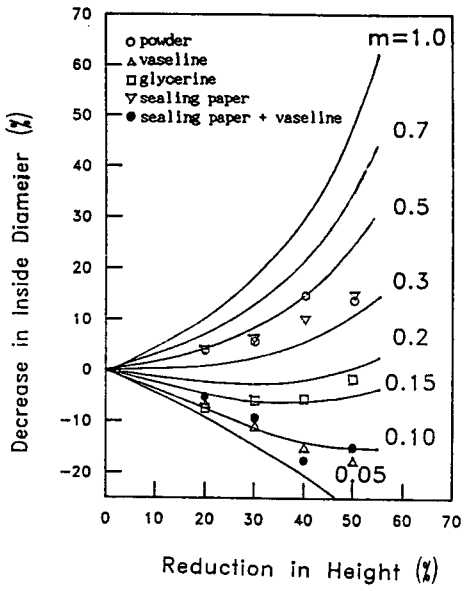
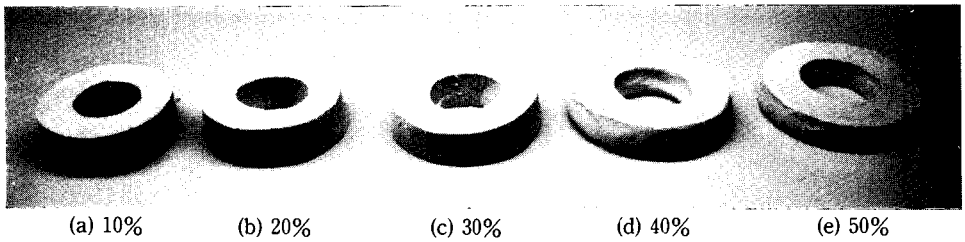


Fig. 2 Variation of friction factors of P material for various lubricants (Temp.: 17℃)

을 나타내고 있다. 그러나 온도증가와 높이감소율의 증가에 대해서 마찰정수의 변화는 0.1 부근에서 안정적인 값을 가진다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 세 종류의 모델재료와 두 종류의 윤활제에 따른 마찰정수의 변화를 나타내고 있다. 여기서, 바셀린을 바른 실링페이퍼를 윤활제로 했을 경우 세가지 재료사이에 마찰정수가 다소 차이를 보이고 있으나 0.05에서 0.15 부근에 존재하고 있으며 파우다를 사용한 경우는 세가지 재료에서 마찰정수가 대개 0.3에서 0.5사이에 분포하고 있다. 여기서, 두 윤활제 모두가 P-L-R재, P재, P-L재 순으로 다소 마찰정수가 감소하고 있다. 이것은 첨가제인 레진이 모델재료를 경화시키는 작용을 하는 반면 라놀린은 연화시키는 성질을 가지고 있어 유동응력의 차이에서 생기는 시편 내경의 미소한 변



(a) 10% (b) 20% (c) 30% (d) 40% (e) 50%

Fig. 3 Appearance of compressed test specimens using vaseline lubricant

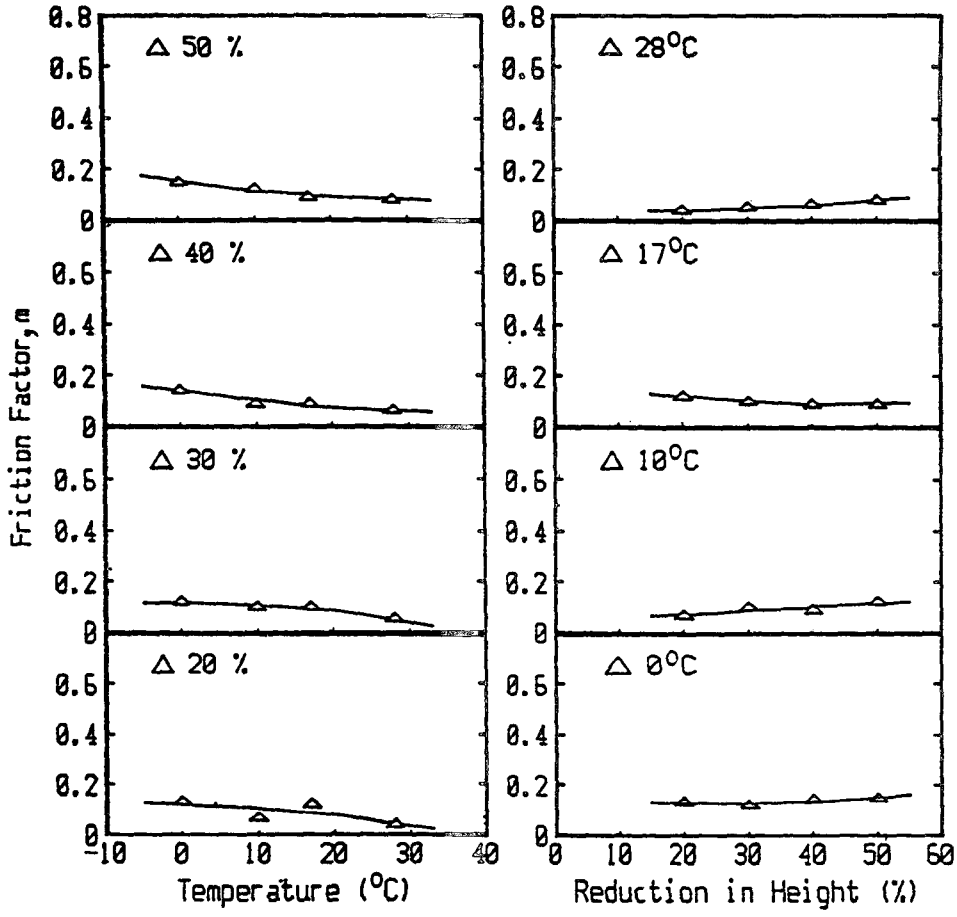


Fig. 4 Variation of friction factor for P material (Lub.: Vaseline)

화에 원인이 있다고 생각되며 기존연구[15]에서 첨가제의 성질에 대해서 언급된 바가 있다.

실제재료의 다양한 가공공정을 시뮬레이션하기 위한 모델재료의 상사실험에서 다이와 소재의 분리가 비교적 용이한 윤활제로는 실링 페이퍼, 바세린을 바른 실링페이퍼 파우다이고, 바셀린, 글리세린 등은 단조 후에 시편이 다이에 붙어 분리하기가 쉽지않다는 것이 링 압축실험에서 확인되었다.

3.2 실린더 압축 실험

Fig. 6~8은 모델재료인 P재와 P-L재, P-L-R재의 다양한 변형률 속도하에서 응력과 변형률관계를 표시한 것이다. 여기서, P재는 변형률속도가 감소하면 응력이 큰 폭으로 감소하다가 0.005/s에서는 변형률 0.15이상에서 0.01/s 보다 응력이 오히려 다소 증가하여 응력과 변형률 곡선의 가공경화 지수 n값이 커지는 것을 알 수 있고 이와같은 양상은 P재의 다른 연구[3]에서도 나타나고 있으며 P-L-R재도 유사한 경향을 보이고 있다. 반면에 P-L재는 변형률속도가 감소하면 응력이 감소하고 있으나 P재, P-L-R재와 같이 0.005/s에서 경화지수 n값이 0.01/s에서 보다 조금 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 변형률 속도가 0.01/s에서 1/s로 증가하면 대체로 세가지 재료 모두가 유동응력이 증가하고 있고 특히 변형률속도 1/s에서는 P-L-R재가 P-L재, P재보다 변형률 증가에 따라 유동응력이 크게 증가하고 있으며, 이것은 P-L-R재에 첨가된 레진으로 인하여 가공경화 현상을 증가시켜 유동응력이 상대적으로 증가하는데 원인이 있다고 본다.

Fig. 9~11은 변형률 변화에 따른 응력과 변형률 속도의 관계를 나타내고 있으며 최소자승법(least

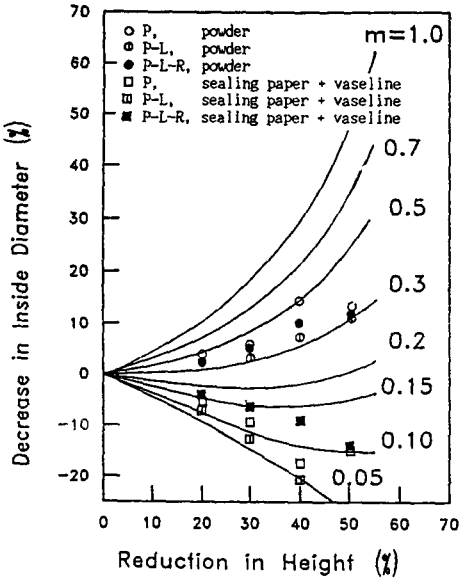


Fig. 5 Variation of friction factors of lubricants for various model materials (Temp.: 17℃)

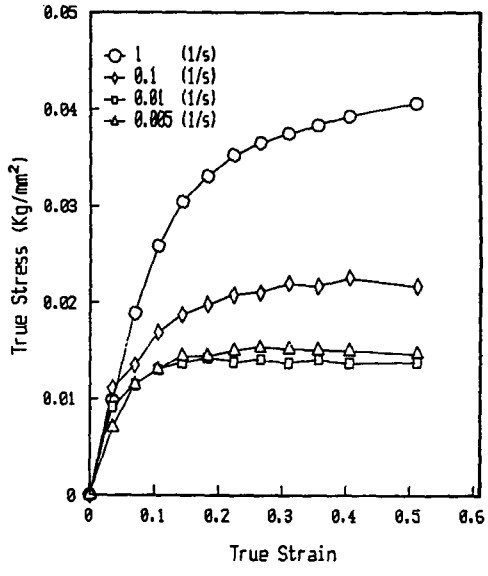


Fig. 7 True stress-true strain curves of P-L-R material for various strain rates ($D \times H = 30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$)

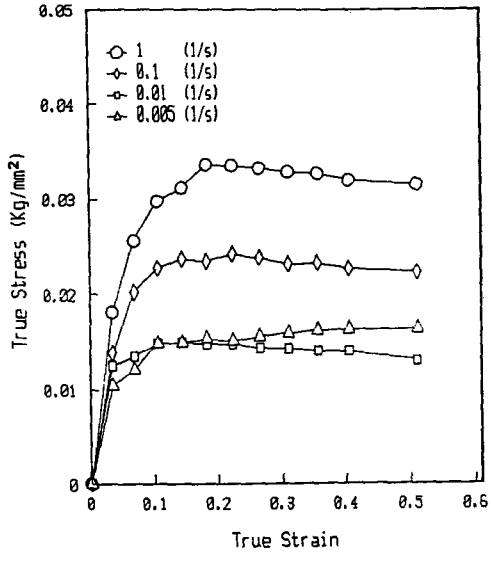


Fig. 6 True stress-true strain curves of P material for various strain rates ($D \times H = 30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$)

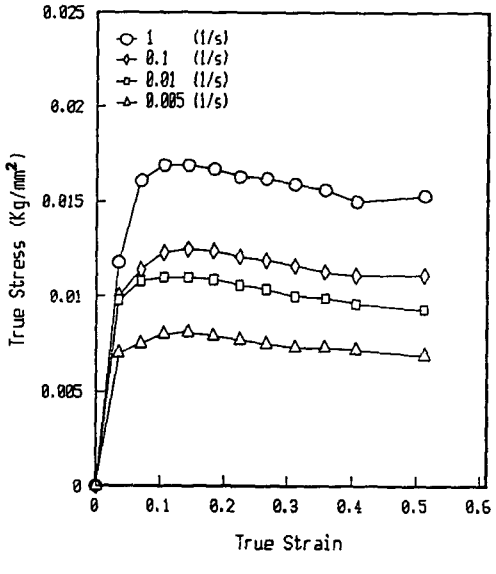


Fig. 8 True stress-true strain curves of P-L material for various strain rates ($D \times H = 30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$)

square method)을 사용하여 선형화하였다. 여기서 변형률이 0.034에서 0.4까지 변할때 P재는 변형률 속도 민감지수 N값이 0.110에서 0.152 까지 증가하며 P-L-R재는 0.063에서 0.197까지, P-L재는 직선기울기의 변화가 안정적이고 적은 반면 P-L-R재는 상대적으로 기울기 변화가 큰 편이다. 이것은 Fig. 11에서와 같이 변형률속도가 점차 증가하면 변형률의 증가에 따른 유동응력의 증가 폭이 커지

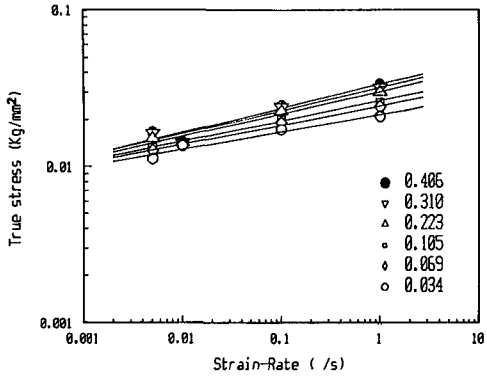


Fig. 9 True stress-strain rate curves of P material for various true strain

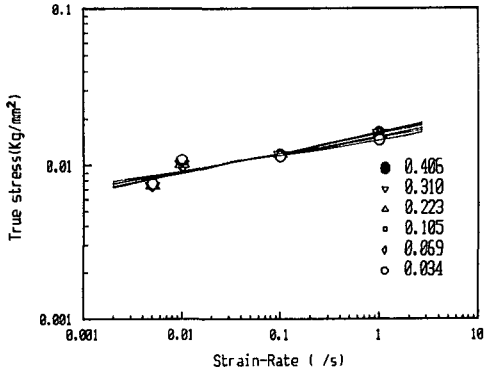


Fig. 10 True stress-true strain curves of P-L material for various true strain

고 있으며 이것은 레진성분으로 인한 가공경화의 증가에 원인이 있다고 본다. 또한 Fig. 10에서 P-L재는 P재, P-L-R재와는 달리 첨가제인 라놀린성분에 의해 가공경화 현상을 상대적으로 완화시켜 일정 변형률속도하에서 변형률 증가에 따라 유동응력의 변화가 적다.

모델재료인 P재와 P-L-R재의 온도변화에 따른 응력과 변형률의 관계를 조사하여 Fig. 12와 Fig. 13에 표시하였다. 여기서 P재는 P-L-R재와는 달리 온도가 감소함에 따라 응력의 감소는 상대적으로 작다. 이와같이 P재의 온도에 따른 응력의 변화는 Chijiiwa[3]의 온도변화에 따른 응력과 변형률의 관계에서 유사한 결과를 보이고 있다. P-L-R재는 온도변화에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 P재에 비해 28℃에서는 변형률 0.3이하에서 유동응력의 감소를 보이고 있으나 상대적으로 큰 기울기로 응력

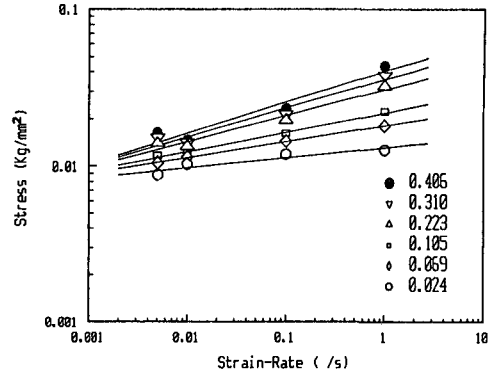


Fig. 11 True stress-true strain curves of P-L-R material for various true strain

이 변형률 증가에 따라 증가하고 있다. 그리고 0℃에서는 P재 보다 유동응력의 증가와 변형률에 대한 유동응력이 큰 값을 보이고 있다. 이와같은 현상은 28℃에서 P-L-R재의 라놀린성분이 P재의 유지성분(광물유 등)보다 온도 증가에 매우 민감하여 연화되기 때문에 레진의 경화성에도 불구하고 유동응력이 감소하는데 원인이 있다. 0℃에서는 P-L-R재의 레진성분으로 인하여 냉각되었을 경우 P재의 유지성분 보다 경화재료가 되므로 P-L-R재가 유동응력이 더 큰 폭으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 다이와 소재의 분리가 가능한 파우다와 바셀린을 바른 실링페이퍼의 윤활제로 50%까지 압축하였을 경우에 시험편의 변화양상을 보이고 있다. 마찰정수가 0.1 정도인 바셀린을 바른 실링페이퍼는 배불림현상이 거의 나타나지 않는 반면에 0.4인 파우다는 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3 모델링 재료의 구성방정식

일반적으로 소성가공공정에서 가장 중요한 공정변수 중의 하나가 재료의 물성치인 유동응력이다. 유동응력 σ_f은 대개 변형률 ε, 변형률속도 $\dot{\varepsilon}$, 온도 T의 함수로 표현된다.[16] 즉, 다음과 같다.

$$\sigma_f = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \tag{1}$$

그러나 위 식은 일반적인 함수 관계를 표현하며 특별한 조건에 따라 구체적인 표현이 가능하다. 만일 열간가공에서는 변형률 ε보다 변형률속도 $\dot{\varepsilon}$와 온도 T에 크게 의존하며 가공상태가 등온조건(isothermal condition)이라면 유동응력 σ_f은 다음

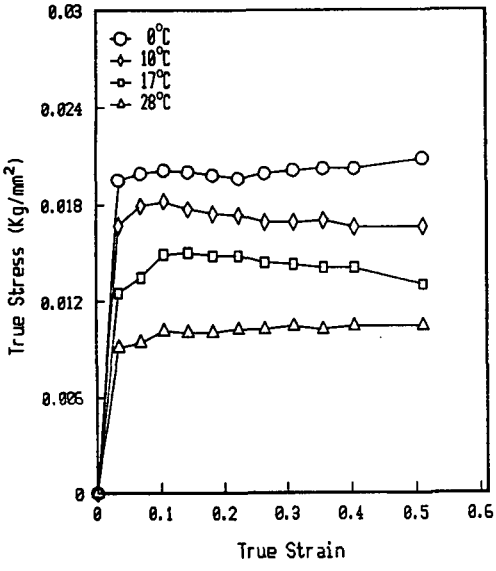


Fig. 12 True stress-true strain curves of P material for various temperatures ($D \times H = 30$ mm $\times 30$ mm)

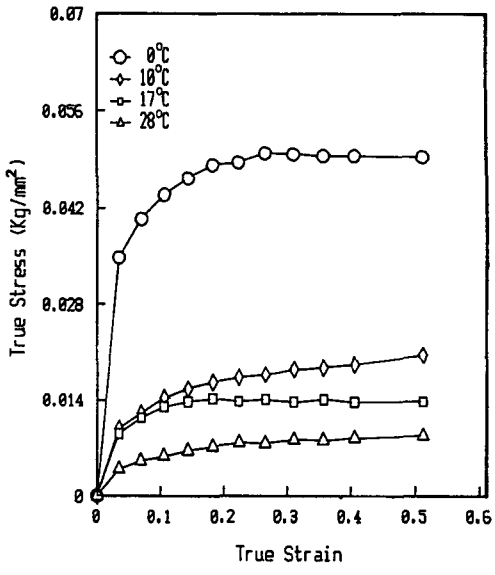
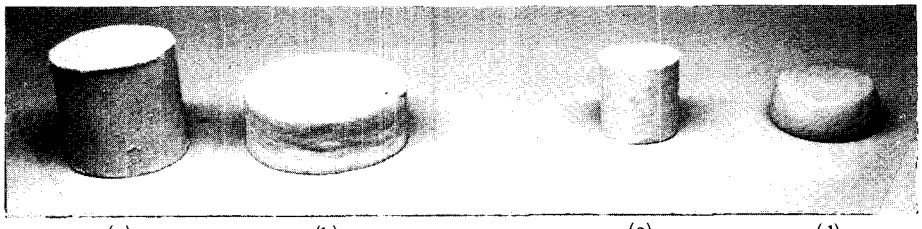


Fig. 13 True stress-true strain curves of P-L-R material for various temperatures ($D \times H = 30$ mm $\times 30$ mm)



(a) Initial specimen($D \times H = 30$ mm $\times 30$ mm)
(b) 50%(sealing paper+vaseline)
(c) Initial specimen($D \times H = 20$ mm $\times 20$ mm)
(d) 50%(talc powder)

Fig. 14 Appearance of compressed test specimens using sealing paper+vaseline and talc powder lubricants

식과 같이 변형률속도 $\dot{\varepsilon}$ 만의 함수로 가정할 수 있다.

$$\sigma_f = f(\dot{\varepsilon}) \tag{2}$$

즉, $\sigma_f = C\ \dot{\varepsilon}^N$, ($N$: 변형률속도민감지수)

모델재료인 플라스티신은 상온에서의 유동성질이 고온하의 강의 유동성질과 유사하여 고온 거동을 묘사하는데 사용되고 있어 유동응력이 변형률 속도 $\dot{\varepsilon}$와 온도 T의 영향을 많이 받는다는 것을 많은 연구[5,10,17]에서 보고 되고 있다. 본 연구에서 조사된 플라스티신(P)과 혼합 플라스티신(P-L재, P-L-R재)은 등온환경에서 실험이 수행되었기 때문에 유동응력은 식(2)와 같이 변형률 속도 $\dot{\varepsilon}$의 함수로 표현할 수 있다.

P재, P-L재, P-L-R재의 변형률속도에 대한 유동응력의 자연대수선도 Fig. 9~11에서 각 변형률에 대한 직선의 기울기와 변형률속도 0.1/s에서 변형률 0.034와 0.406사이의 응력을 평균하여 응력과 변형률 속도와의 관계식을 유도하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$P\text{재} : \sigma_f = 2.875 \times 10^{-2}\,\dot{\varepsilon}^{0.13} \tag{3}$$

$$P-L\text{재} : \sigma_f = 1.494 \times 10^{-2}\,\dot{\varepsilon}^{0.12} \tag{4}$$

$$P-L-R : \sigma_f = 2.459 \times 10^{-2}\,\dot{\varepsilon}^{0.14} \tag{5}$$

여기서, 변형률 ε : 0.034~0..406
변형률속도 $\dot{\varepsilon}$: 5×10^{-3}/s~1/s
온도 T : 상온(17℃)

4. 모델재료와 실제재료 사이의 상사성

4.1 상사성 이론

상사이론의 기본적인 필요조건은 모델재료와 실제재료 사이에 기하학적으로 유사하다는 것이다. 만일 기하학적으로 유사한 두 재료가 어떤 물리적인 영향하에 있을 때 어떤 시점에서 물리적인 특성값이 같다면 두 재료는 물리적으로 유사한 성질을 가진다. 또한 경계조건과 열적조건도 같다면 두 재료는 완전상사(perfect similarity)를 이룬다고 볼 수 있다. 그러나 변형하는 동안에 열의 발생 및 전도, 복사 등을 포함하는 열적상사(thermal similarity)를 이루는 것은 극히 어렵다. 그리고 대부분의 공학문제에서 근사적인 해로도 충분하기 때문에 실제재료와 모델재료 사이에 근사상사(approximate similarity) 방법은 합리적으로 연구될 필요가 있다.[9,18]

일반적으로 모델실험에서는 단지 경계조건과 물리적인 특성 등을 포함하는 불완전한 상사성을 얻는 것은 가능하다.[9] 따라서, 소성가공에서 아래의 조건들이 만족한다면 근사상사가 성립한다고 볼 수 있다.

(1) 기하학적조건이 유사하다.

(2) 마찰조건이 같다.

(3) 구성방정식의 가공경화지수 혹은 변형률속도 민감지수가 유사하다.

(4) 소성가공 중에 재료내부의 온도변화는 무시한다.

위의 근사상사 조건들 중에서 모델재료와 실제재료 사이에 무엇보다도 재료의 물성치인 유동응력식에서 가공 경화지수 혹은 변형률속도 민감지수가 유사한 모델재료를 개발하는 것이 중요한 과제라 생각한다.

4.2 모델재료와 실제재료의 온도에 따른 상사성 검토

본 연구의 모델재료인 순수 플라스티신과 혼합 플라스티신의 실린더 압축실험에서 Fig. 9~11의 결과를 최소자승법으로 직선화한 실험식이 식(3)~(5)와 같다. 여기서 플라스티신(P재)의 상온에서 유동응력의 변형률속도 민감지수 N값이 0.134로 나타났다. 이것은 Chijiiwa[3] 등이 연구한 플라스티신의 유동특성과 유사하고 1000℃에서의 연강[19]의 유동특성과도 유사하므로 본 연구에서 조사된 플라스티신(P재)의 상온(17℃)에서의 유동특성이 고온에서의 연강의 유동특성과 유사하다는 것이 입증되었다. 연강의 유동응력 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{연강(0.15\%C 강) : } 1000℃ \\ &\sigma_s = 7.117\,\dot{\varepsilon}^{0.13}\ (\mathrm{kg/mm^2}) \qquad (6) \\ &\varepsilon < 0.5 \\ &\dot{\varepsilon} : 30\sim200\ (1/\mathrm{s}) \\ &C(\text{탄소함양 \%}) = 0.15 \end{aligned}$$

또한, P재, P-L재, P-L-R재는 0.15%C강[19,20]의 고온에서의 온도변화에 따른 유동특성을 묘사하는데 이용될 수 있다. 0.15%C강의 화학적성분[19]은 Table 2와 같다.

Table 3은 모델재료와 연강의 변형률속도 민감지수 N의 값을 세가지의 온도 레벨에 따라 비교 표시하였다. 여기서 0.15%C 강은 변형률 ε : < 0.35와 변형률속도 $\dot{\varepsilon}$: $3.8\times10^{-3}\sim2.13\times10^{2}$(/s)의 범위에서 측정된 값들이다.

위의 Table 3에서 모델재료인 P-L재, P재, P-L-R재의 상온에서의 변형률속도 민감지수 N값이 0.15%C강의 900℃, 1000℃, 1100℃의 유통특성과 유사하다는 것을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서 조사된 모델재료들은 0.15%C강의 900℃

Table 2 Chemical compositions of 0.15% carbon steel (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
0.15%C	0.15	0.10	0.45	0.02	0.013	

Table 3 Strain-rate sensitive exponent N for model materials and 0.15 %C steel

0.15%C steel		model material		
Temp.	N	Temp.	Mat.	N
1100℃	0.14	17℃	P-L-R	0.140
1000℃	0.13	17℃	P	0.134
900℃	0.11	17℃	P-L	0.118

~1100℃사이의 고온 유동특성을 연구하는데 이용될 수 있다.

5. 결 론

모델재료인 플라스티신에 라놀린과 레진을 첨가하여 연강의 고온에서의 유동특성과 상사성이 있는 혼합 플라스티신을 개발하고 마찰과 유동 특성을 조사한 다음 모델재료들이 고온하의 0.15%C강의 온도변화에 따른 유동특성과 상사성이 있음을 검토하고자 하였다. 여기서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 모델재료인 플라스티신(P재)에 라놀린과 레진을 첨가하여 새로운 모델 재료인 P-L재, P-L-R재를 개발하였다.

(2) 바셀린을 바른 실링페이퍼, 파우다의 윤활제는 비교적 다이와 소재의 분리가 용이한 윤활제로 사용될 수 있으며 마찰정수는 각각 0.05~0.15와 0.3~0.5의 값을 보이고 있다.

(3) 첨가제인 레진은 변형률 증가에 따라 플라스티신의 가공경화현상을 증가시키는데 반하여 라놀린은 상대적으로 영향이 적었다.

(4) 레진과 라놀린을 플라스티신에 적절히 혼합하므로써 연구하고자 하는 실제재료들의 유동특성과 유사한 모델재료를 개발하는데 이용될 수 있다.

(5) P재의 상온에서의 성질과 연강(0.15%C)의 고온(1000℃)에서의 유동성질이 상사성이 있음을 확인하였다.

(6) 모델재료인 P재, P-L재, P-L-R재는 상온에서의 유동특성이 연강의 고온에서의 온도변화에 따른 유동특성과 유사하여 특정온도에서의 시뮬레이션 재료로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 91년도 한국과학재단의 특정목적기초연구의 일부로 수행되었으며, 동재단의 관계자분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Stephen, P. D., Paul, B. and Im, Y. T., 1988, "Physical Modeling Technique with Plasticine of Metal Forming Processes," Research Memorandum, Industrial and Systems Engineering, The Ohio State University.

(2) Wanheim, T., Maegaard, B. and Danckert, J., 1984, "The Physical Modelling of Plastic Working Processes," Advanced Technology of Plasticity, Vol. Ⅱ, pp. 984~996.

(3) Chijiiwa, K., Hatamuro, Y. and Hasegawa, N., 1981, "Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting," Trans. Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 21, pp. 178~186.

(4) 田中光之, 小野信市, 五十嵐雄二, 1986, "フラステイシンを便用する鋼の熱間自由鍛造 シミュレーションにおける摩擦の制御," 塑性と加工, 第27券, 第310號, pp. 1279~1285.

(5) 粟野泰吉, 團野敦, 1972~10, "鍛造における相似則-主としてプ ラステイシンを用いたモデル實驗-," 塑性と加工, 第13券, 第141號, pp. 768~775.

(6) 粟野泰吉, 1960, "Plasticineを用いる塑性加工實驗法," 塑性と加工, 第1券, 第3號, pp. 203~210.

(7) 이근안, 오성국, 정윤진, 임용택, 이종수, 1991, "모델재료를 이용한 단조공정 시뮬레이션 기법 개발," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 (Ⅰ), pp. 596~599.

(8) 이근안, 임용택, 이종수, 홍성석, 조남춘, 1991, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구," 한국소성가공학회 단조 심포지움 91, pp. 52~62.

(9) Altan, T., Henning, H.J. and Sabroff, A.M., 1970, "Use of Model Material in Predicting Forming Loads in Metal Working," Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry, pp. 444~452. May.

(10) Aku, S.Y., Slater, R.A.C. and Jonson, W., 1967, "The Use of Plasticine to Simulate the Dynamic Compression of Prismatic Blocks of Hot Metal," Int. J. of Mechanical Science, Vol. 9, pp. 495~525.

(11) 工藤英明, 會田長一郎, 1972, "塑性加工における相似則 (Ⅰ)," 塑性と加工, 第13券, 第141號, pp. 729~738.

(12) 工藤英明, 會田長一郎, 1972, "塑性加工における相似則 (II)," 塑性と加工, 第13券, 第141

號, pp. 739～744.

(13) Wanheim, T. and Danckert, J.,1987, "Combined Physical and Numerical Modelling of Metal Forming Process," Advanced Technology of Plasticity, Vol. Ⅰ, pp. 29～36.

(14) Altan, T. et. al., 1973, "Forging Equipment, Materials and Practices," Metal and Ceramics Information Center, October.

(15) Azushima, A. and Kudo, H., 1987, "Physical Simulation for Metal Forming with Strain Rate Sensitive Model Material," Advanced Technology of Plasticity, Vol. Ⅱ, pp. 1221～1227.

(16) Finer, S., Kivivuori, S. and Kleemola, H., 1985, "Stress-Strain Relationships of Wax-Based Model Material," J. of Mechanical working Technology, Vol. 12, pp. 269～277.

(17) Tsukamoto, H., Taura, T. and Ibushi, J., 1984, "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead," Advanced Technology of Plasticity, Vol. Ⅱ, pp. 1003～1008.

(18) Böer, C. R., Rebelo, N., Rydstad, H. and Schörder, G., 1986, "Process Modelling of Metal Forming and Thermomechanical Treatment," Springer-Verlag.

(19) 日本鐵鋼協會, 1975, "壓延理論 とその應用," 誠文堂新光社.

(20) 日本鐵鋼協會共同研究會, 1975, "板壓延の理論と實際", 日本鐵鋼協會.