

〈논 문〉

탄소강 조직의 형상 및 분포에 따른 유한요소해석

서대철* · 이덕희** · 이정주* · 남수우** · 주웅용***

(1996년 8월 22일 접수)

Finite Element Analysis of Carbon Steel according to Shape and Distribution of Phase

Dae Cheol Seo, Duck Hee Lee, Jung Ju Lee, Soo Woo Nam and Wung Yong Choo

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Iron and Steel(철강), Dual phase Steel(2상 혼합조직강), Properties Prediction(물성예측)

Abstract

In this study, the stress-strain relations of steels have been calculated as a function of microstructural morphologies of each phase by use of FEM program(i. e. ABAQUS). The mechanical behavior of low carbon steels is affected by the microstructural factors such as yield ratio, volume fraction, shape and distribution of each phase and so on. The effects of shape, volume fraction and yield ratio of each phase on the mechanical behavior were analyzed by using unit cell and whole specimen size models. Results obtained are summarized as follows. As the yield ratio of hard phase to that of soft phase and volume fraction of hard phase were increased, stress level of flow curves were increased. It was found that in whole specimen size model, as the particle size was decreased, higher stress level was shown. Lastly the relationship between microstructure and tensile properties was examined by using the steels with various microstructural morphologies.

1. 서 론

일반 탄소강은 그 종류가 수없이 많으며 또한 탄소강의 동소변태특성때문에 각종 열처리방법에 따라서 여러 종류의 금속조직이 얻어지고, 그에 따른 기계적 성질이 다양하게 결정됨으로써 예전에는 물론 현재까지도 많은 용도를 갖고 있다. 특히 최근에는 각종 재료들의 사용상의 요구조건이 엄격하고 다양해짐에 따라 특별한 용도에 꼭 맞는 성질을 예측하는 것이 절실히 요구되고 있으며, 이에 따라

여러 가지 강종에 대해서 소성변형시 응력과 변형률의 상관관계를 정량화하여 최적의 기계적 특성을 갖는 조직을 예측하고자 하는 연구가 많은 연구자들에 의해 시도되어지고 있는 실정이다.

2상혼합조직강(two-phase steel)의 미세조직의 형상과 인장거동과의 관계를 규명하기 위한 여러 가지의 예측 모델들이 제안되어 발전해 왔다. 그 대표적인 모델들로는 응력과 변형량에 관한 Mileiko의 이론,⁽¹⁾ 혼합법칙,^(2,3) Ashby의 이론에 근거를 둔 전위밀도이론,⁽⁴⁾ Eshelby의 해석을 바탕으로 2상으로 이루어진 미세조직내에서 소성변형의 불균일성을 고려한 연속체 모델⁽⁵⁾과 유한요소법,⁽⁶⁾ 각 구성조직의 일정변형비를 고려한 일정변형비 모델,⁽⁷⁾ 및 중간혼합법칙(intermediate law of mix-

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

**한국과학기술원 재료공학과

***포항종합제철(주) 기술연구소 강재용접연구팀

ture)을 이용하여 2상 사이의 하중전달을 고려한 반기계적(semi-mechanistic) 모델^(8,9) 등이 있다. 특히, 최근에는 이 노력의 일환으로 유한요소법을 이용한 기계적 성질예측이 조심스럽게 시도되고 있는 실정이다.

Sundstrom과 Karlsson 등^(6,10)은 WC-Co 합금과 2상혼합조직강에서 유한요소법을 이용하여 재료의 탄소성 거동을 예측하였으며, Jinoch와 Ankem^(11,12) 등은 α - β Ti-Mn 합금에서 응력-변형률곡선에 대한 유한요소해석을 통하여 제2상의 크기, 부피분율 및 기지상(matrix) 등의 영향을 관찰하였다. 한편, Christman 등⁽¹³⁾과 Tvergaard⁽¹⁴⁾는 연속섬유(continuous fiber), 휘스커(whisker), 입자(particular) 복합재료의 유한요소해석을 통해 강화재에 따른 구속에 의해 발생하는 3축응력에 관하여 고찰하였으며, 최근에는 Shikanai 등⁽¹⁵⁾이 단위셀모델(unit cell model)을 이용한 혼합조직강의 유한요소해석을 실시하였다.

본 연구에서는 최적의 재료강도예측 및 이방성 최소화를 위한 석출물 배열을 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 개발하고, 이것을 이용하여 최적의 기계적 특성을 갖는 조직을 예측하여 보았으며, 실제 실험용강을 제조하여 기계적 성질의 실측치와의 근사성을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험용 탄소강의 제조 및 인장시험

본 연구에서 사용된 소재는 탄소량을 0.003, 0.08, 0.37 wt%의 범위로 변화시킨 Fe-C 2원계합금으로 10 kg급 고주파유도로에서 대기용해하여 제조하였으며, 이때 각 조성의 잉곳(ingot)은 1150°C에서 2시간 균질화처리를 한 후 28×60×100 mm로 절단하여 열간압연기에서 실험압연하였다. 실험압연은 오스테나이트(austenite)영역인 1000°C에서 30분동안 재가열한 후, 6pass의 압연으로 4 mm 두

께로 만들었으며, 압연종료후 공냉을 실시하였다. Table 1은 열간압연이력을 나타낸다.

유한요소법을 이용한 열질상과 경질상의 2상혼합조직으로 이루어진 저탄소강의 강도예측을 실시하는데 요구되어지는 각 구성상 및 혼합조직강의 기계적 성질 및 응력-변형률곡선을 얻기 위하여 각 시편들에 대하여 다음과 같은 열처리를 실시하였다. 탄소함량이 0.08 및 0.37 wt%인 시편 B, C를 A3온도보다 50 K 높은 온도에서 1시간동안 유지시켜 오스테나이트화(austenitization)를 행한후 상온으로 급냉시켜 모든 조직을 마르텐사이트화(martensitization) 시켰다. 마르텐사이트화처리된 시편은 700°C에서 3시간에서 50시간까지 구상화(spheroidizing)처리를 실시한후 급냉하여 연한 페라이트(ferrite) 기지상에 경한 구상의 시멘타이트(cementite)를 균질하게 분포시켰다. 한편 시편 A(0.003 wt%C)의 경우 950°C에서 30분간 어닐링(annealing)처리후 750°C에서 1시간동안 열처리하여 페라이트 단상조직을 형성시켜 유한요소해석 모델의 참고자료로서 사용하였다.

열간압연과 열처리를 통하여 제조된 시편의 기계적 성질을 알아보기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시편은 ASTM E8의 소형(subsize) 판상시편으로 모재의 압연방향과 평행한 방향(longitudinal direction)으로 두께 2 mm, 게이지(gage)폭과 길이가 각각 4와 25 mm인 크기로 가공하여 Instron사의 Model 4206(static machine, 25 ton)을 사용하여 변형속도 6×10^{-4} /sec로 인장시험하였다.

2.2 유한요소해석

2.2.1 조직 모델

유한요소해석에 사용하는 2상혼합조직강의 모델은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 제2상입자들이 일정한 형상으로 반복적으로 균등하게 배열되어 있다는 가정하에 그 대칭성을 이용하여 한 개의 제2상입자를 단위셀로 잡아서 메쉬(mesh)분할

Table 1 Thermomechanical history of hot rolling

Pass	1	2	3	4	5	6
Thickness(mm)	20	16	12	9	6	4
Pass strain(%)	28.6	20	25	25	33.3	33.3
Rolling speed	650 rpm (12 m/min)					

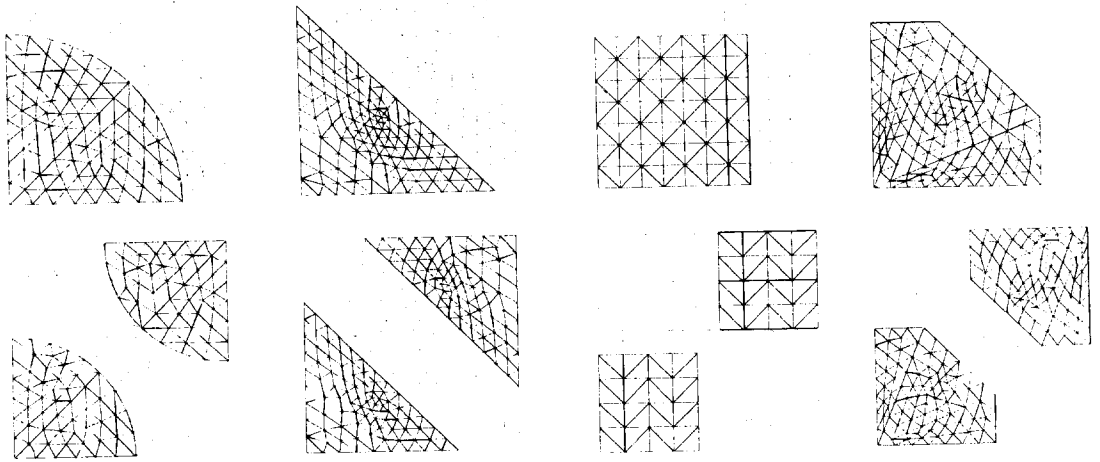


Fig. 1 Typical configurations of finite element mesh of unit cell model

하고 대칭성을 나타낼 수 있는 경계조건을 도입하여 해석함으로써 무한체(infinite body)의 변형거동을 나타내는 단위셀모델이고, 또 다른 하나는 전체의 시편 또는 그 일부에 대해서 실제의 2상혼합조직강의 조직구성과 같이 제2상입자들이 불규칙(random)한 형상과 크기, 분포를 갖도록 하는 전체시편 모델이 있다. 단위셀모델은 대칭성이 만족되는 한도 내에서는 제2상입자의 형상을 다양하게 변화시킬 수 있고 비교적 적은 수의 요소를 사용하므로 해석이 용이한 반면 체적분율에 따라 제2상입자의 크기가 결정이 되므로 제2상입자의 크기에 따른 영향을 평가할 수 없다. 또한 제2상입자가 어떠한 반복적인 분포형태를 갖느냐에 따라 같은 형상이라 하더라도 상당한 값이 차이가 있게 된다. 전체 시편 모델은 불규칙한 조직의 형상을 정확히 모델링하기 위해서는 많은 노력과 시간이 요구되고, 또 해석에 필요한 요소의 수가 많으므로 계산시간이 길어지는 단점이 있으나 제2상입자의 모양이나 크기, 분포형태들을 다양하게 바꿀 수 있고, 실제의 2상혼합조직강의 형상을 제대로 반영하여 해석할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 먼저 단위셀모델을 이용하여 제2상입자의 형상에 따른 항복거동의 차이를 알아보고 불규칙한 2상혼합조직의 형상을 난수발생을 통해 모델링한 전체시편 모델을 이용하여 제2상입자의 크기와 분포를 다르게 하여 그에 따른 항복거동의 차이를 알아보았다.

Fig. 1에 해석대상으로 한 단위셀모델을 나타내었다. 경질상의 형상은 원형, 마름모형, 사각형, 팔각형으로 하였다. 분포형태는 사각모서리패킹(square edge packing : type a, b)와 사각대각선패킹(square diagonal packing : type c, d)모델을 사용하였다. Type a, c는 연결상 중에 경질상이 균등분포하는 모델이고, type b, d는 경질상 중에 연결상이 균등분포하는 모델이다. 모델의 경계조건은 각 면의 수직변위(normal displacement)가 일정하도록 구속하였다. 따라서 모델의 모양은 해석도중 사각형의 형태로 남아 있게 된다. 각 면에서의 변형의 대칭성에 의해 이 부분모델을 가지고 무한구조의 변형거동을 나타낼 수 있다.

Fig. 2에 해석에 사용한 전체시편 모델을 나타내었다. 모델의 구성은 먼저 삼각형요소를 사용하여 시편의 모양을 구성한 후 난수발생을 통하여 제2상입자를 지정하여 2상혼합조직을 구성하였다. 제2상입자의 크기는 3가지 종류로 하였고, 경계조건은 x 축과 y 축에 각각 대칭조건을 가하여 실제 시편의 4분의 1만을 해석하였다.

2.2.2. 유한요소해석

해석에 사용한 경질상과 연결상의 응력-변형률 관계는 Shikanai 등⁽¹⁵⁾의 데이터로부터 이적선 근사(bi-linear approximation)했다. 이 때 연결상과 경질상의 탄성계수와 푸아송비는 각각 $E=206$ GPa, $\nu=0.3$ 으로 가정하고 가공경화계수(항복이후의 응력-변형률곡선의 기울기)는 245 MPa로 가

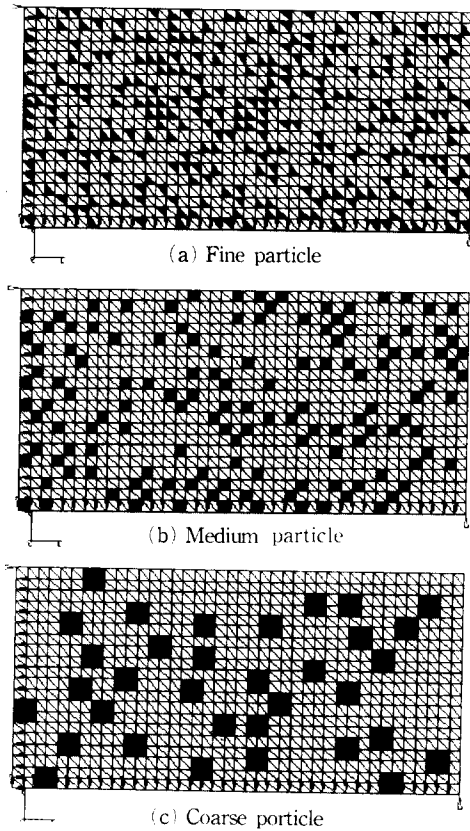


Fig. 2 Typical configurations of finite element mesh of whole specimen model

정하였다. 연질상의 항복강도는 연강의 강도 수준인 294 MPa로 정하였다. 경질상의 항복강도는 실제 강도의 연질상과 경질상의 경도비가 약 1.5~3.3의 범위이므로 441~883 MPa(항복강도비 : 경질상의 항복강도/연질상의 항복강도=1.5~3.0) 까지 변화시켰다.

유한요소해석은 상용 해석프로그램인 ABAQUS¹⁶⁾를 이용하여 실시하였다. 사용한 요소는 2차원 평면변형률 삼각형 3절점요소이다. 계산에서 각 스텝마다의 변형률 증가를 0.03%로 하여 3%까지 증가시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰 및 인장특성

저탄소강을 이용하여 인장거동에 미치는 제2상입자의 부피분율 및 형태의 영향을 살펴보고, 이러한



Fig. 3 Optical micrograph showing the microstructure of pure iron. ($\times 50$)

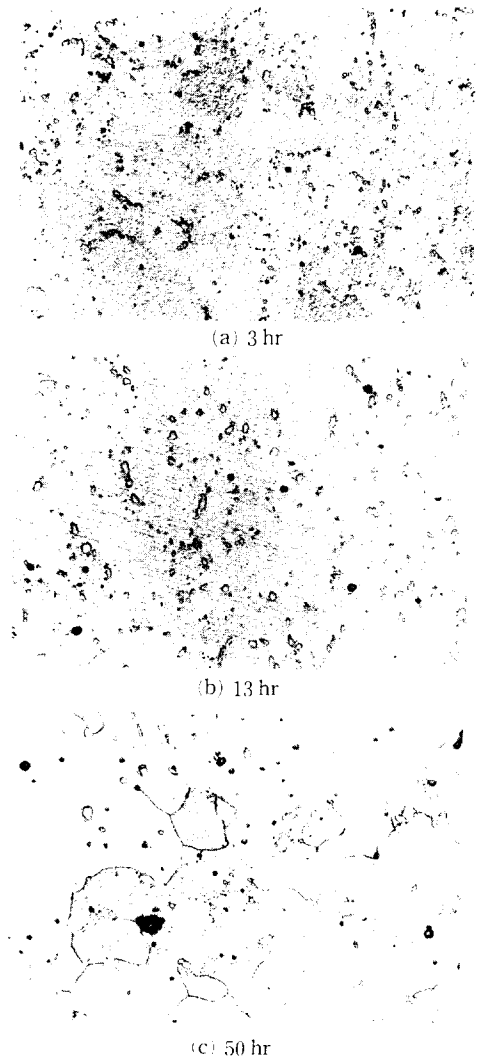


Fig. 4 The microstructures of 0.08 wt% C containing low carbon steel spheroidized at 700°C for several hours. ($\times 500$)

실험결과를 유한요소해석 모델의 제반 자료로 활용하고자 각각의 시편에 대해서 연한 페라이트 기지상에 구형의 경한 시멘타이트입자를 분포시키는 구상화처리를 실시하였다. Fig. 3은 단상의 페라이트로 이루어진 순철의 광학현미경조직으로 결정립 크기는 약 $140\ \mu\text{m}$ 로 실제 상용 2상혼합조직강이 수십 μm 의 결정립 크기를 보이는 것과 비교하여 조대한 결정립구조를 보이고 있다. 이러한 차이는 유한요소해석에 이용시 결정립 크기효과로 인하여 예측결과와 실험결과 사이의 어느 정도의 오차를 발생시킬 것으로 판단되므로, 이러한 결정립 크기효과를 유한요소해석 모델을 보완함으로써 2상혼합조직강의 인장거동에 대한 보다 정확한 예측이 가능할 것이다.

Fig. 4는 0.08 wt%의 탄소(C)를 함유한 실험용 저탄소강을 700°C 에서 구상화처리를 실시한 경우의 미세조직으로 구상화처리 시간에 관계없이 구형에 가까운 경한 시멘타이트입자가 연한 페라이트 기지 내에 균질하게 분포해 있는 것을 알 수 있다. 700°C 에서 단시간 열처리시에는 매우 미세한 시멘타이트가 널리 분포해 있으나, 열처리 시간이 증가할수록 시멘타이트의 크기는 증가하며, 그 밀도는 감소함을 관찰할 수 있다. 700°C 에서 3시간 및 50시간 열처리시 시멘타이트의 평균 단면적은 $2.7\ \mu\text{m}^2$ 에서 $6.5\ \mu\text{m}^2$ 으로 증가하고 있다. 이러한 시멘타이트입자는 소성변형을 일으키지 않는 매우 경한 입자로서 2상혼합조직강의 인장변형시 탄성거동을 보이는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾

한편 0.37 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강의 광학현미경 조직사진을 Fig. 5에 나타내었으며, 이 경우 앞의 0.08 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강의 실험결과와 동일한 경향을 보이고 있는 것을 관찰

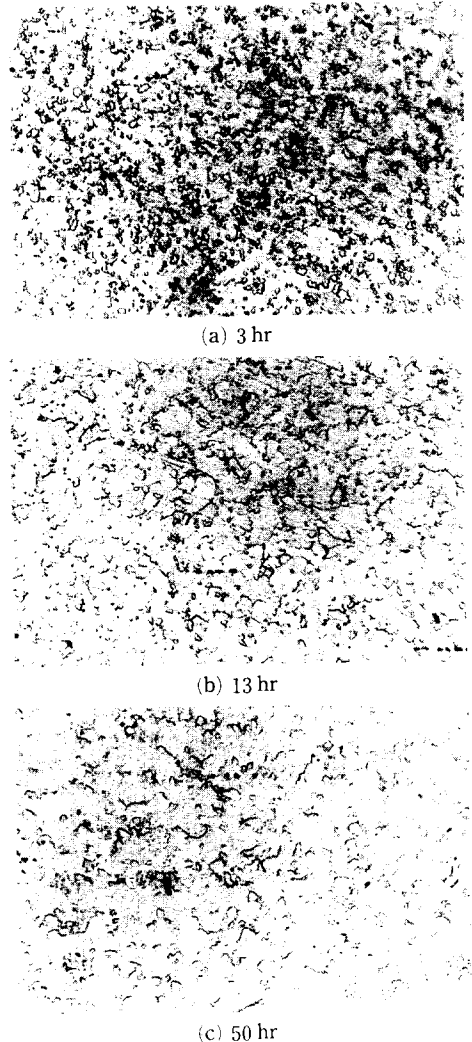


Fig. 5 The microstructures of 0.37 wt% C containing low carbon steel spheroidized at 700°C for several hours. ($\times 500$)

Table 2 Tensile properties of the investigated alloys

Specimen	YS (MPa)	UTS (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_f (%)	n	K (MPa)	Area fraction of cementite (%)
Pure iron	191	320	17.2	24.8	0.258	609.2	
0.08 wt%C, $700^\circ\text{C}/3\ \text{hr}$	488	680	14.3	17.8	0.270	1349.1	3.2
0.08 wt%C, $700^\circ\text{C}/50\ \text{hr}$	291	436	12.0	16.2	0.244	834.0	3.2
0.37 wt%C, $700^\circ\text{C}/3\ \text{hr}$	472	581	13.7	18.8	0.202	986.0	16.2
0.37 wt%C, $700^\circ\text{C}/50\ \text{hr}$	415	529	13.8	17.8	0.236	975.9	16.2
HT 50	370	522	20.1	29.6	0.278	1031.4	22.

할 수 있다. 그러나 연한 페라이트상에 균질하게 분포된 경한 시멘타이트입자는 0.08 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강과 비교하여 매우 높은 밀도를 보여주고 있다. 700°C에서 3시간동안 구상화처리를 실시한 경우 0.08 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강에서 시멘타이트의 부피분율이 약 3.2%인데 반하여 0.37 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강에서는 약 16.2%를 보이고 있다. 각 열처리조건에서 시멘타이트의 평균 단면적과 부피분율은 Table 2에 나타나 있다.

탄소함량을 0~0.37 wt%까지 변화시켜 만든 3가지 저탄소강들의 구상화처리조건에 따른 인장성질을 Table 2에 나타내었다. 시멘타이트의 높은 부피분율로 인하여 0.37 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강의 인장성질이 0.08 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강에 비하여 높은 수준을 보이고 있다. 700°C에서 3시간 구상화처리시 0.37 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강은 0.08 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강에 비하여 항복 및 인장강도가 약 60~70 MPa의 증가를 보이고 있다. 한편 0.37 wt%의 탄소를 함유한 시편의 경우 초기 소성변형과정 중에서 뒤틀 변형률(Lüders strain)이 나타났으며, 이러한 뒤틀 변형률의 양은 700°C에서 3시간 및 50시간 열처리된 합금들에 대하여 각각 1.62, 2.11%이다. 또한 700°C에서 3시간 열처리된 0.37 wt%의 탄소를 함유한 저탄소강을 제외한 모든 합금들이 80%미만의 항복비(yield ratio) 값을 보이고 있다. 각 합금들의 응력-변형률곡선이 Fig. 6에 나타나 있다. 이러한

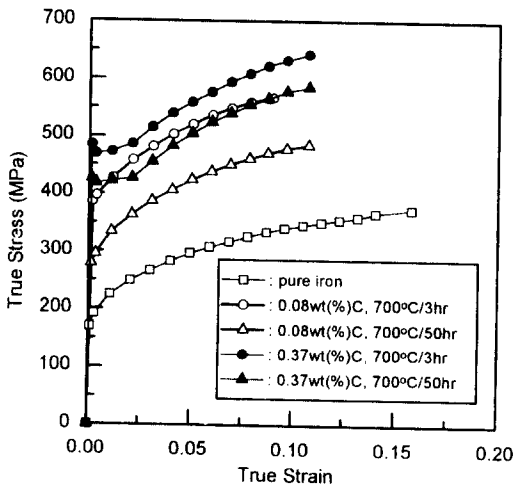


Fig. 6 Experimental stress-strain curves for low carbon steel

실험용 저탄소강의 광학관찰 및 인장시험결과는 유한요소해석 모델의 제반 자료로 활용될 것이다.

3.2 2상혼합조직강의 유한요소해석 결과(단위셀 모델)

3.2.1. 경질상 체적분율의 영향

Fig. 7에 앞 절에서 언급한 원형 경질상 입자 모델에서 경질상 체적분율을 변화시킨 경우의 유한요소해석으로부터 얻어진 응력-변형률곡선을 나타내었다. 2상조직모델은 경질상의 체적분율이 증가함

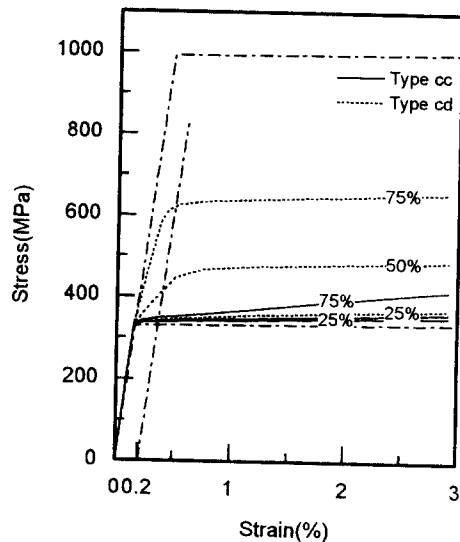
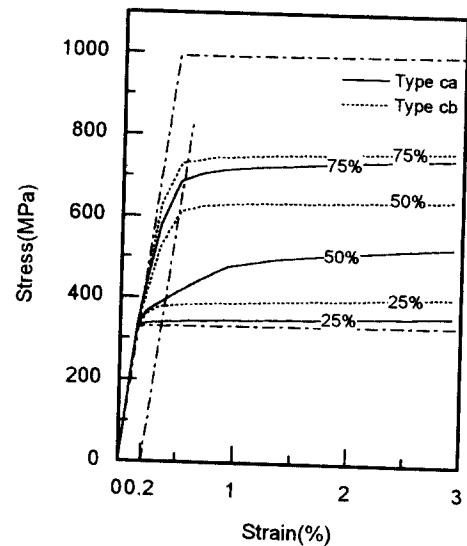


Fig. 7 Influence of volume fraction on stress strain curves of circle shaped second phase

에 따라서, 응력-변형률선도가 경질상 쪽으로 이동해 있는 것을 볼 수 있다. 또 type a와 type b를 비교해 보면 연질상의 체적분율이 동일하더라도 응력-변형률선도의 모양이 달라져 있는 것이 볼 수 있다. 연질상을 모재로 하여 경질상이 분포한 type a의 경우가 같은 연질상 체적분율에서 경질상을 모재로 하여 연질상이 분포한 type b의 경우에 비해 낮은 응력을 나타낸다.

Fig. 8에 원형 경질상 입자모델의 경질상 체적분율과 항복강도(FEM)의 관계를 혼합법칙과 비교해

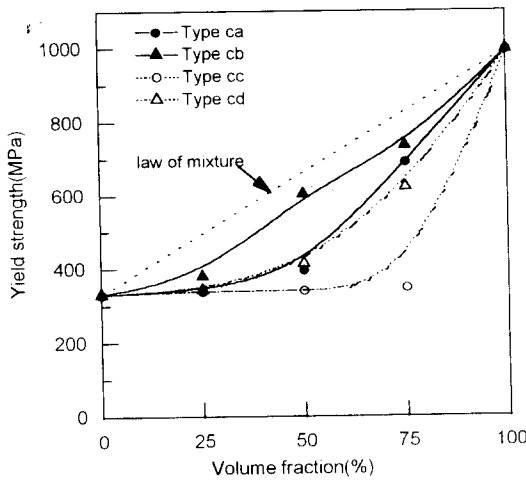


Fig. 8 Influence of volume fraction on yield strength (FEM) of circle shaped second phase

서 나타냈다. 경질상 체적분율이 0% 및 100%의 경우에는 단일조직이 되기 때문에 항복강도(FEM)은 당연히 항복강도(혼합법칙)과 일치한다. 그러나 연질상 체적분율이 0, 100%이외의 경우에는 항복강도(FEM)은 항복강도(혼합법칙)보다 낮은 응력을 나타내고 있다.

3.2.2. 항복강도비의 영향

Fig. 9와 10에 연질상과 경질상의 항복강도비를 1.5, 2, 3으로 증가시켜가면서 사각모서리패킹인 type a와 b 그리고 사각대각선패킹인 type c와 d의 모델에서 구한 항복강도(FEM)의 값을 혼합법칙과 비교해서 나타내었다. 전반적으로 항복강도(FEM)은 항복강도(혼합법칙)보다 낮은 응력으로 나타내고는 있다. 그리고 같은 형상이라 하더라도 연질상중에 경질상이 분포한 type a와 type c의 경우가 경질상중에 연질상이 분포한 type b와 type d의 경우보다 항복강도(FEM)이 낮은 값을 나타내고 있다. 항복강도비가 커짐에 따라 항복강도(FEM)은 혼합법칙과 마찬가지로 증가하게 되는데 특히 사각모서리패킹에서 경질상중에 연질상이 분포한 type b의 경우는 혼합법칙과 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나 연질상중에 경질상이 분포한 type a와 사각대각선패킹인 type c와 type d의 경우에는 항복강도비가 2배 이상되면 항복강도(FEM)의 값이 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 항복강도비의 증가가 혼합조직강의 항복강도를 증

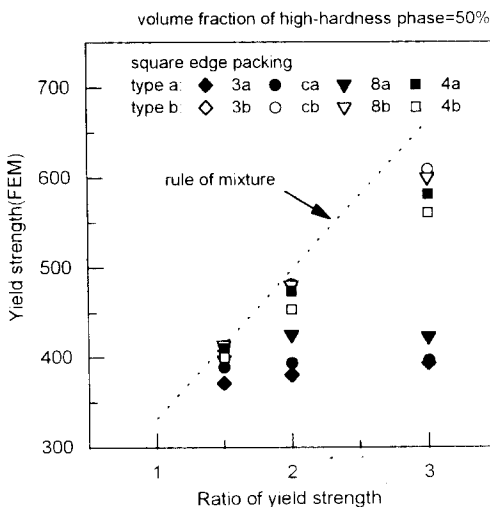


Fig. 9 Relationship between ratio of yield strength and yield strength(FEM) and yield strength (law of mixture) of square edge packing

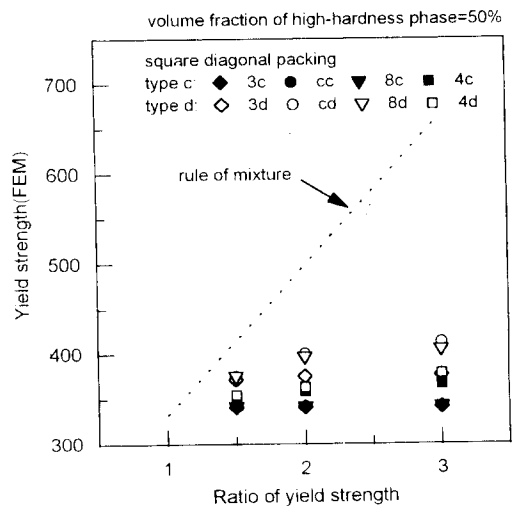


Fig. 10 Relationship between ratio of yield strength and yield strength(FEM) and yield strength (law of mixture) of square diagonal packing

가시키는 효과를 가져오지만 무조건 혼합조직강의 항복강도를 증가시키지는 않고 어느 정도 이상의 값에서는 더 이상 효과가 없다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 연질상과 경질상의 형상의 영향

Fig. 11에 연질상 체적분율을 50%로 일정하게 한 경우의 각 모델에 대해서 항복강도(FEM)은 나타내었다. 모든 경우에 있어서 경질상이 마름모형일 때 항복강도(FEM)이 가장 낮았다. 경질상의 형상이 원형인 경우 연질상중에 경질상이 분포하는 type a, c에서는 항복강도(FEM)이 매우 낮은 값을 나타내었으나, 경질상중에 연질상이 분포하는 type b, d에서는 매우 높은 값을 나타내었다. 경질상의 형상이 정사각형인 경우는 모든 경우에 있어서 항복강도(FEM)은 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 그리고 경질상이 형상이 팔각형인 경우는

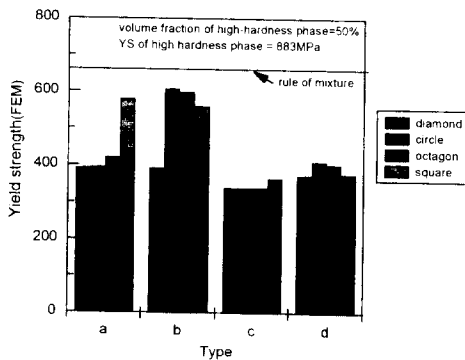


Fig. 11 Comparison of yield strength(FEM) of each model

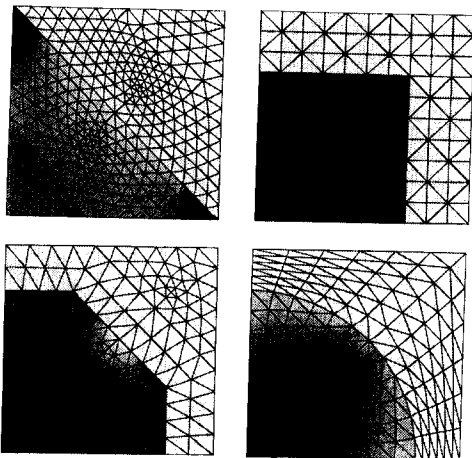


Fig. 12 Contour plot of von Mises stress of each model

원형과 비슷한 거동을 하고 있다.

Fig. 12에서는 응력분포를 나타내었다. 그림에서 경질상의 형상이 사각형일 때 경질상내의 응력이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이것은 경질상의 형상이 사각형일 때 가장 높은 응력-변형률곡선을 보이는 것과 일치한다.

3.2.4 연질상과 경질상의 분포형태의 영향

단위셀모델에서 사각모서리패킹과 사각대각선패킹의 분포형태는 유한요소해석의 결과에 많은 영향을 미친다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 사각대각선패킹은 사각모서리패킹보다 훨씬 낮은 항복강도(FEM)값을 나타내고 있다. 또 Figs. 9, 10에서 보듯이 항복강도비의 변화와 경질상 형상의 변화에도 항복강도(FEM)값은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 사각대각선패킹의 기하학적 모양이 사각모서리패킹보다 경질상이 연질상을 구속하는 힘이 훨씬 작기 때문에 연질상의 변형이 쉽게 일어나 경질상의 모양이나 항복강도비의 변화가 2상혼합조직강의 변형거동에 큰 영향을 주지 않기 때문이다.

경질상의 분포형태에 있어서 사각모서리패킹과 사각대각선패킹이 변형거동이 많은 차이를 보이므로 실제 실험값이나 실제 강의 경질상 분포를 모델링하는 선제시편 모델을 통해 어느 것이 좀더 바른 모델인지를 검증해야 할 것이다.

3.2.5 항복비 제어를 위한 검토

앞서의 해석결과에 근거해서 여기서는 저 항복비 고장력강에 알맞은 조직형태에 대해서 항복비의 관점으로부터 검토한다. 항복비의 계산은, 항복비(YR) = 항복강도(FEM) / 인장강도(혼합법칙)로 했다.

Fig. 13에는 2상조직 모델에 대한 조직형태와 항복비의 관계를 나타냈다. 경질상의 체적분율이 약 50%일 때 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 경질상의 형상이 마름모형 → 원형 → 팔각형 → 사각형의 순서로 항복비 값이 높았다.

앞서의 해석의 결과에 의하면 항복비를 저하시키기 위한 조직형태의 기본적인 모델로는 ① 연질상의 모재 중에 경질상이 균등분포하고, ② 경질상의 모양은 마름모형, ③ 경질상 체적분율을 약 50%정도로 ④ 각상의 항복강도비를 증가하는 것을 들 수 있다.

이 모델은 Fig. 11에 나타냈듯이 항복강도를 저하시키기 위한 조직형태와 같은 모양이고, 결국 항복강도의 저하에 의해서 항복비가 저하한다고 생각

된다. 그리고 각상의 항복강도비의 영향은 Figs. 9, 10에서 볼 수 있듯이 항복강도비가 상승할수록 항복강도(FEM)와 항복강도(혼합법칙)의 차이가 크게 되기는 하지만 항복강도비가 약 2배 이상 되면 그 차이는 거의 없으므로 크지 않은 것으로 생각된다. 그러나 인장강도가 거의 혼합법칙에 따르고 항복강도비의 상승에 의해 인장강도도 상승하게 되므로 따라서 항복비를 저하시키기 위한 요인으로 각상의 항복강도비를 상승시키는 것도 들 수 있다.

3.3 2상혼합조직강의 유한요소해석 결과(전체시편 모델)

3.3.1 단위셀 모델과의 비교

Fig. 14에 경질상의 형상이 사각형인 단위셀 모델과 전체시편 모델의 응력-변형률곡선을 비교하였다. 전체시편 모델에서 연질상이 기지상(matrix)이 되므로 단위셀 모델에서 type a와 type c만을 비교하였다. 전체시편 모델은 사각대각선패킹과는 큰 차이를 보이고 사각모서리패킹과 거의 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 따라서 단위셀 모델에서 실험값과의 비교시 경질상의 분포형태는 사각모서리패킹을 택해야 할 것이다. 또한 입자의 크기가 작아질수록 응력이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 입자의 크기가 작아질수록 연질상과 경질상의 변형률이 차이가 작아서 상대적으로 경질상이 많은 변형을 하게 되므로 높은 응력을 보이게 된다.

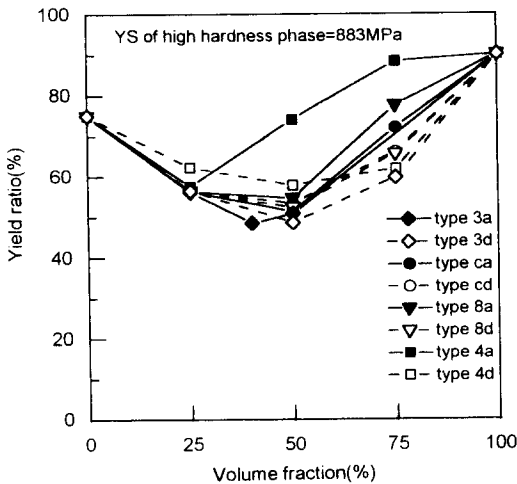


Fig. 13 Relation between volume fraction of high hardness phase and yield ratio of each model

3.3.2 인장시험 결과와의 비교

Fig. 15에 인장시험으로 구한 저탄소강(0.08 wt% C 50hr)의 응력-변형률곡선을 연질상의 물성치로 사용하여 수행한 유한요소해석의 결과를 인장시험 결과와 비교하였다. 이때의 체적분율은 4%(0.08 wt% C 3 hr), 17%(0.37 wt% C 3 hr)를 사용하였다. 이 경우에도 역시 항복강도(FEM)은 입자의 크기가 작아질수록 약간 증가하는 결과를 보였으나 그 차이는 미미하고, 저탄소강의 항복강도와도 상당히 큰 차이를 보였다. 체적분율이 증가함에 따라 응력레벨은 증가하여 인장실험의 결과와도 같은 경향을 보였다. 그러나 체적분율이 4%일 때는 입자의 크기에 따른 응력레벨의 변화에 큰 차이가 없으나, 체적분율이 17%일 때는 입자의 크기가 작아질수록 응력레벨이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있

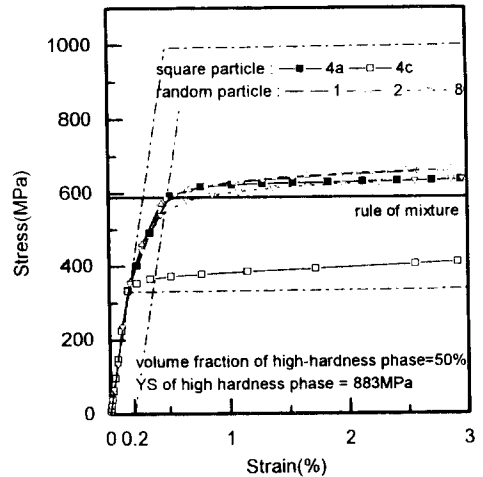


Fig. 14 Comparison of stress strain curves between unit cell model and whole specimen model

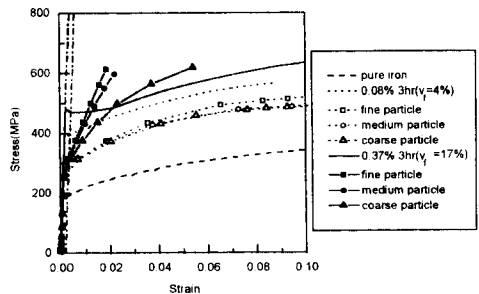


Fig. 15 Comparison of stress-strain curves between test results and FEM result using experimental steel(0.08 wt% C 50 hr) stress strain curve.

다. 이것은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전체시편 모델의 메쉬에서 체적분율이 크고 입자의 크기가 작은 경우 경질상과 연질상의 사이에 간격이 작아지고 연질상이 경질상에 강한 구속을 받게 되어 높은 응력을 나타내게 되기 때문이다. 그러나 체적분율이 작아지고 입자의 크기가 커지게 되면 상대적으로 연질상과 경질상 사이의 간격이 증가하게 되므로 구속력은 작아지고 연질상의 거동을 따라 변형하게 된다.

4. 결 론

조직상의 형상 및 분포에 따른 탄소강의 물성에 대해 관한 이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단위셀모델을 이용한 유한요소해석 결과, 경질상의 형상이 사각형이고 체적분율이 증가할수록 보다 높은 응력상태의 응력-변형률곡선을 보였으며, 경질상과 연질상의 항복강도비가 증가할수록 혼합조직강의 항복강도가 증가하는 경향을 보였다. 경질상의 분포형태로는 사각대각선패킹보다 사각모서리패킹 모델이 더 높은 응력상태를 보이며 전체시편 모델과 비슷한 거동을 나타내었다. 또한 경질상의 체적분율이 50%일 경우 가장 낮은 항복강도비를 갖는 것으로 관찰되었다.

(2) 제2상입자를 난수발생을 통해 분포시킨 전체시편 모델에서는 입자의 크기가 작아질수록 높은 응력상태의 응력-변형률 곡선을 관찰할 수 있었다. 전체시편 모델의 국부적인 변형거동은 실제 상용강의 미세조직을 반영하는 메쉬분할과 변형에 따른 가공경화거동을 고려함으로써 보다 정확히 표현될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 전체시편 모델을 이용하여 얻은 유한요소해석결과를 실험용 저탄소강의 인장시험 결과와 비교한 결과, 경질상의 체적분율 증가에 따른 응력-변형률 곡선의 응력레벨이 증가하는 경향은 같았으나 항복강도는 상당한 차이를 보였다. 이는 메쉬를 세분화시키고 유한요소해석에 사용되는 제반 자료를 보정함으로써 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 (주)포항제철의 지원으로 수행된 연구의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mileiko, S. T., 1969, "The Tensile Strength and Ductility of Continuous Fibre Composites," *J. Mater. Sci.*, Vol. 4, pp. 974.
- (2) Davies, R. G., 1978, "The Deformation Behavior of a Vanadium-strengthened Dual Phase Steel," *Metall. Trans. A*, Vol. 9A, pp. 41.
- (3) Davies, R. G., 1978, "The Mechanical Properties of Zero-carbon Ferrite-plus-Martensite Structures," *Metall. Trans. A*, Vol. 9A, pp. 451.
- (4) Fischmeister, H. and Karlsson, B., 1977, "Plasticity of Two-phase Materials with a Coarse Microstructure," *Z. Metallkunde*, Vol. 68, No. 5, pp. 311.
- (5) Tomota, Y., Kuroki, K., Mori, T. and Tamura, I., 1976, "Tensile Deformation of Two-ductile-phase Alloys: Flow Curves of α - γ Fe-Cr-Ni Alloys," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 24, pp. 85.
- (6) Karlsson, B. and Sundstrom, B. O., 1974, "Inhomogeneity in Plastic Deformation of Two-Phase Steels," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 16, pp. 161.
- (7) Szewczyk, A. F. and Gurland, J., 1982, "A Study of the Deformation and Fracture of a Dual-Phase Steel," *Metall. Trans. A*, Vol. 13A, pp. 1821.
- (8) Goel, N. C., Sangal, S. and Tangri, K., 1985, "A Theoretical Model for the Flow Behavior of Commercial Dual-phase Steels containing Metastable Retained Austenite: Part I. Derivation of Flow Curve Equations," *Metall. Trans. A*, Vol. 16A, pp. 2013.
- (9) Sangal, S., Goel, N. C. and Tangri, K., 1985, "A Theoretical Model for the Flow Behavior of Commercial Dual-phase Steels containing Metastable Retained Austenite: Part II. Calculation of Flow Curves," *Metall. Trans. A*, Vol. 16A, pp. 2023.
- (10) Karlsson, B. and Linden, G., 1975, "Plastic Deformation of Ferrite-pearlite Structures in Steel," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 17, pp. 209.
- (11) Jinoch, J., Ankem, S. and Margolin, H., 1978, "Calculations of Stress-strain Curve and Stress

- and Strain Distributions for an α - β Ti-8Mn Alloy," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 34, pp. 203.
- (12) Ankem, S. and Margolin, H., 1982, "Finite Element Method (FEM) Calculations of Stress-Strain Behavior of Alpha-Beta Ti-Mn Alloys : Part I. Stress-Strain Relations," *Metall. Trans. A*, Vol. 13A, pp. 595.
- (13) Christman, T., Needleman, A. and Suresh, S., 1989, "An Experimental and Numerical Study of Deformation in Metal-Ceramic Composites," *Acta Metall.*, Vol. 37, pp. 3029.
- (14) Tvegaard, A., 1990, "Analysis of Tensile Properties for a Whisker Reinforced Metal Matrix Composite," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 38, pp. 185.
- (15) Shikanai, N., Kagawa, H. and Kurihara, M., 1992, "Influence of Microstructure on Yielding Behavior of Heavy Gauge High Strength Steel Plates," *ISIJ International*, Vol. 32, No. 3, pp. 335.
- (16) *ABAQUS/Standard User's manual*, 1995, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (17) Byun, T. S. and Kim, I. S., 1991, "Stress and Strain Partition in Elastic and Plastic Deformation of Two Phase Alloys," *J. Mat. Sci.*, Vol. 26, pp. 3917.