[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 14, No. 6 (2004)

3 wt.% Cu 함유 STS 304 빌렛의 열간가공성과 표면결함에 미치는 δ-ferrite의 영향

김 상 원†
포항산업과학연구원 부품신소재연구센터 신금속연구팀

Effect of δ-Ferrite on the Hot Workability and Surface Defect of STS 304 Billets Containing 3 wt.% Cu

S. W. Kim†
New Materials & Components Research Center, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)

(2004년 4월 19일 받음, 2004년 5월 19일 최종수정본 받음)

Abstract To investigate the effect of δ-ferrite on the hot workability and surface defect of STS 304 billets containing 3 wt.% Cu, microstructure observations and high temperature mechanical properties test were carried out for the specimens extracted mainly from raw or oxidized billets. It was found that the total δ-ferrite content has little influence on the hot workability, even though the fracture cracks due to high temperature tension or compression test were initiated and propagated mostly along δ/γ boundary in the specimens. On the other hand, it was supposed that the direct causes of surface defects in the wire rolled from the as-continuously cast billet were the grain boundary embrittlement arose from the deep diffusion of oxygen into the grain boundary, and the oxidation of δ-ferrite connected by a grain boundary to the surface during the billet reheating process as well.

Key words STS 304 containing 3 wt.% Cu, δ-ferrite, surface defect, wire

1. 서 론

Cu를 3 wt.%정도 함유한 오스테나이트계 스테인레스강은 스테인레스강 중에서 냉간압조(cold heading)용으로 사용되는 대표적 강종[1]으로 생산된 선재는 냉간압조에 의하여 주로 볼트로 제조되어 전자제품, 주방 용기 등의 체결구로 사용된다. 냉간압조로 볼트 가공을 할 때, 대량, 고속 생산으로 인한 가공조건이 매우 가혹하여 up-setting 시 표면 터짐에 의한 불량이 많이 발생하게 되며, 그에 대한 1차적 원인은 원소재인 선재 표면에 생성된 결함에 직결되므로 표면 품질에 대한 요구조건이 매우 까다롭다. 이러한 상황에서 원소재로 생산되는 선재의 표면 결함에 대한 불량기준은 다른 소재에 비하여 엄밀하다. 메이커에서는 0.321 inchϕ 선재를 산세한 후 나타나는 선형의 결함 깊이가 0.0012 inch 이상이 되면 seam 결함(ASTM-A493)으로 간주하고, 결함이 발생한 선재 코일을 전량 불량처리를 하고, 이 기준을 통과하기 위하여 전체 생산공정을 엄격하게 관리한다. 오스테나이트계 스테인레스강 선재는 제강 → 연속주조(빌렛, billet) → 재가열 → 조압연 → 선재 중간압연 → 선재 마무리압연 → 열처리 → 산세 등의 공정으로 생산되며, 연속주조로 블룸(bloom)을 제조할 경우 분괴압연이 실시된 빌렛을 재가열 한다. 이와 같은 선재 생산공정에서 연속주조 빌렛을 사용하는 것이 원가절감 및 생산성 향상에 절대 유리하므로 실제 생산현장에서는 분괴압연을 통한 빌렛을 사용하지 않고, 연속주조 빌렛을 사용하는 공정을 택하고 있다. 그러나 3 wt.% Cu 스테인레스강 선재생산에 있어서는, 연속주조 빌렛을 사용할 경우 표면결함으로 인한 선재제품의 불량율이 다른 강종에 비하여 현저하게 높게 나타나므로 이 강종에 대해서만은 불가피하게 분괴압연 빌렛을 사용하는 비효율적 공정을 적용하고 있다. 일반적으로 최종 선재제품의 표면품질은 소재의 고온 연성 즉, 열간가공성에 크게 영향을 받는 것이 잘 알려져 있고, 열간가공성은 열간압연시 작업조건을 결정하는데 중요한 요인이다. 열간가공성에 영향을 주는 인자는 소재인자와 가공인자로 대별되며 소재인자로는 합금원소, 주조조직, 석출물, 편석 및 δ-ferrite(델타-페라이트) 함량 등 야금학적 성질이, 가공인자로는 재가열 조건, 가공조건, 가공속도, 압하량 등이 있다.[2]

본 연구는 최종적으로 3 wt.% Cu 스테인레스강 선재 생산에 있어 연속주조 빌렛 사용시 급격히 증대되는 선재표면 결함의 발생원인을 규명하고 양산화 공정을 확립하기 위한 일환으로 수행되었으며, 먼저 소재의 열간가공성에 영향을 주는 야금학적 인자에 초점을 맞추었다. 오스테나이트계 스테인레스강에서 δ-ferrite 함량이 너무 적

†E-Mail : swkim@rist.re.kr

으면 연속주조 또는 용접공정에서 hot crack에 민감한[3-5] 반면, 15%까지 증가함에 따라 열간가공성이 저하되어 열간가공중 δ상(페라이트)/γ상(오스테나이트) 계면에서 균열이 유발된다6-7)고 알려져 있는 바, 전체 선재 제조공정 중 초기 공정에서의 결함유발이 최종 제품의 품질에 직결된다고 판단하여 조압연 단계까지 δ-ferrite의 역할에 대하여 면밀히 조사, 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편준비

빌렛의 조압연 단계까지 δ-ferrite의 역할을 명확히 하기 위하여 현장에서 공정을 달리하여 제조된 2종류의 빌렛과 이로부터 조압연이 완료된 75 mmϕ 선재(wire rod)에서 고온 인장, 압축시험시편과 조직 관찰용 시편을 채취하였다. 빌렛은 제강 공정을 거친 후 연속주조를 통하여 제조된 150×150 mm 정방형 빌렛(C/C billet)과 비교를 위하여 제강 공정을 거친 후 연속주조를 통하여 410×250 mm 장방형의 블룸을 제작하고, 이를 1200°C에서 7시간 균열 가열한 후 분괴압연으로 제작한 150×150 mm의 빌렛(Rolled billet)으로 동일 형상이지만 제조이력이 다르다. Table 1에는 분석된 각 빌렛의 화학성분을 나타내며 각 성분에 있어 차이는 거의 없다. 인장 및 압축시편은 각 빌렛의 길이방향이 인장방향으로, 길이의 수직방향이 압축방향으로 되도록 채취하였으며, 위치는 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛에서 δ-ferrite량의 차이가 크게 나타나는 표면 직하 15 mm, 75 mmϕ 선재에서는 10 mm로 한정하였다. Fig. 1은 인장 및 압축시편의 형상을 나타낸다. 단, 75 mmϕ 선재에 대해서는 압축시험을 실시하지 않았으므로 시편채취는 하지 않았다. 한편, 조직 관찰용 시편은, 빌렛 및 75 mmϕ 선재에서 10 mm 두께의 횡단면을 제작하고 빌렛은 한 변의 중심에서 내부 중심방향으로 15 mm 폭을 가지는 5개의 시편으로, 75 mmϕ 선재는 동일한 방법으로 표면에서 8.75 mm 폭을 가지는 4개의 시편으로 절단하였으며, 인장 및 압축시편은 하중방향으로 중심부를 방전 절단하여 연마하였다.

2.2. 열간가공성 및 산화시험

고온 인장 및 압축시험을 통한 시편의 열간가공성은 고주파가열식 고속만능시험기(THERMECMASTOR-Z)로 평가되었다. 고온 인장시험은 900~1250°C의 온도구간에서 실시되었으며, 고주파 유도가열에 의하여 시편을 10°C/sec의 승온속도로 목적온도에 도달시켜 3분간 가열유지한 후 100 mm/sec의 속도로 인장하고, 시편이 파단되면 10초

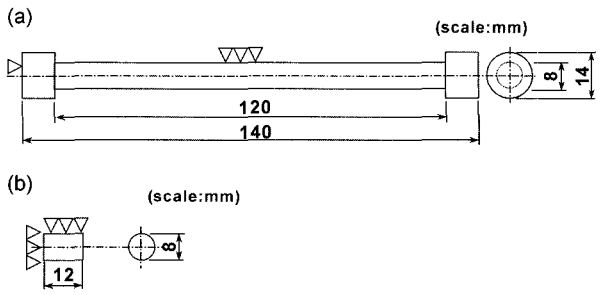


Fig. 1. Configuration of hot workability test specimen. (a) tensile test, (b) compression test

간 N_2 가스를 분사한 후 100°C까지 로냉하는 방식으로 실시하였다. 이 시험으로 온도에 따른 단면감소율(R.A)과 인장강도(U.T.S)를 얻었다. 고온 압축시험은 2가지 방법으로 실시하였다. 900~1200°C의 온도구간에서 100°C 간격으로 65% 압축율로 압축한 1단 압축과 실제 조압연 과정을 모사하기 위한 다단 압축이다. 다단 압축시험은 1200°C에서 13.9% 압축율로 압축, 상온까지 냉각한 시편을 1단 압축시편으로, 1200°C에서 13.9% 압축율로 1단 압축한 시편을 1150°C까지 냉각한 뒤 재차 13.9% 압축율로 압축, 상온까지 냉각한 것을 2단 압축시편으로, 최초의 가열온도를 1200°C로 고정하고 냉각전의 온도를 50°C씩 내리며 압축율을 13.9%씩 누적시킴으로써 최종 시험온도인 900°C에서 7단 압축이 이루어지도록 시편을 얻는 방식이며, 이 시험을 통해 총 7개의 시편이 제작되었다. 압축시험에서 인장시험과 같은 가열과 시험 후의 냉각패턴을 취하였다. 단, 다단 압축시험에서 재압축을 위한 다음 온도까지의 냉각속도를 10°C/sec로 제어하고 그 온도에서 1분간 유지한 후 재압축 하였다. 압축속도는 100 mm/sec로 1단 및 다단 압축시험에서 동일하게 하였다. 압축시험에서 온도 및 압축율에 상응하는 진응력과 진변형율을 얻었으나 실험결과에서는 얻어진 시편의 조직에 대해서만 언급한다. 이상의 모든 고온시험은 10^{-1} Torr 정도의 진공에서 실시되었다. 한편, 조압연을 위한 빌렛의 가열로 나타날 수 있는 내부의 조직변화를 조사하기 위하여 상기 2종류 빌렛의 표면 직하에서 동일한 크기로 채취한 시편을 대기중 Box furnace에 함께 투입하고 현장 가열조건인 1230°C에서 40분 동안 가열산화실험을 실시하였다.

2.3. 조직관찰

이상의 시험에서 얻어진 각종 시편의 미세조직을 필요에 따라 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 시편 부식에서 결정입경과 δ-ferrite를 동시에 현출

Table 1. Chemical compositions of billets. (wt.%)

element / billet	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Co	N	C
Rolled billet	0.3	0.710	0.025	0.001	9.760	17.31	0.100	3.07	0.001	0.181	0.008	0.008
C/C billet	0.26	0.700	0.024	0.001	9.750	17.54	0.060	3.15	0.001	0.138	0.009	0.013

시킬 수 있는 질산(HNO_3) 전해부식을 주로 사용하였다. 정확한 δ-ferrite의 면적율을 산출하기 위하여 δ-ferrite만 현출시키는 수산화칼륨(KOH) 전해부식을 실시하였으며, 시편당 50개소에서 촬영된 영상으로부터 image analyzer를 활용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조직

Fig. 2와 3의 (a), (b), (c)에는 각각 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛의 표면에서 0~15 mm, 30~45 mm, 60~75 mm 지점에서 질산 전해부식으로 관찰된 대표적 조직을 나타낸다. 그림에서 희게 나타난 부분은 γ상이고 검게 나타난 부분은 δ-ferrite상이다. 표면부에 해당하는 Fig. 2의 (a)에서 δ-ferrite 형상은 덴드라이트(dendrite) 조직으로 엄밀하게는 Vermicular(Skeleton) ferrite 형태[8]지만 미세한 점상으로 나타나고 있다. (b)에서 δ-ferrite는 (a)에 비하여 훨씬 조대화되었으나 여전히 Vermicular ferrite 형태를 나타내고 있으며, (c)에서는 서로 얽혀 그물망 형태로 나타난다. 이와 같은 δ-ferrite의 위치별 형상은, 연속주조 빌렛의 응고시 표층부에서 중심부로, 먼저 몰드와 접촉하는 칠(chill) 영역에서의 미세한 덴드라이트, 주상정 영역의 덴드라이트, 등축정 영역의 덴드라이트 순으로 나타나는 주조조직과 관련있음을 알 수 있다. (a)에서 (b)와 (c)에 비하여 다수 나타난 결정입계가 전형적 주조조직임을 뒷받침하고 있다. 한편, Rolled 빌렛의 경우인 Fig. 3에서는 결정입경이 50 μm 전후로 미세화 되었으며, 표면에서 내부까지 미세화된 δ-ferrite가 주로 결정입계에 분포하고 양도 현저히 감소된 것으로 나타나 Fig. 2와 다른 양상을 보이고 있다. 이는 이미 1200°C

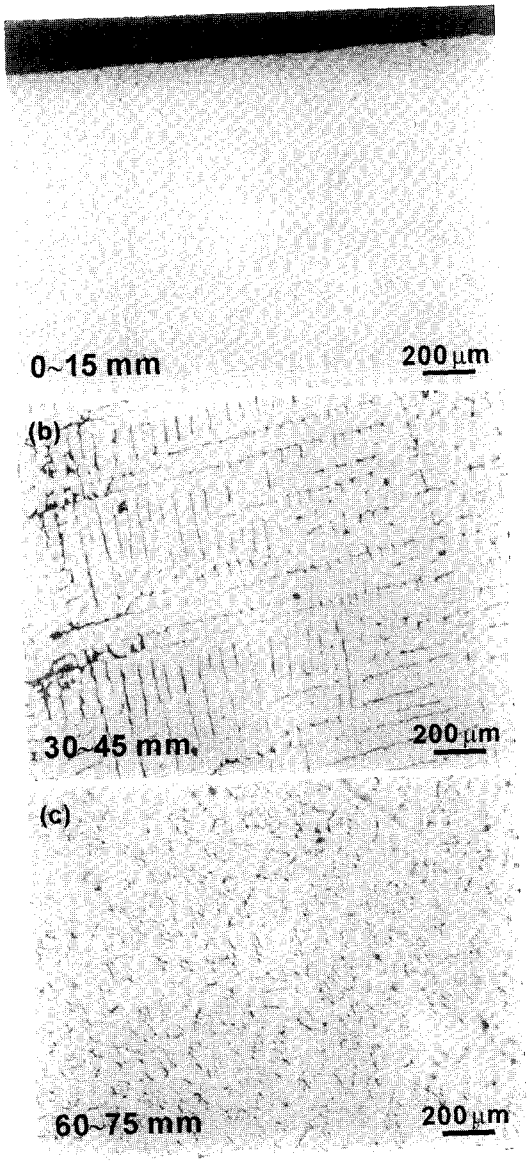


Fig. 2. Optical microstructures of δ-ferrite from surface toward center of C/C billet. Distance from surface is (a) 0~15 mm, (b) 30~45 mm, and (c) 60~75 mm, respectively.

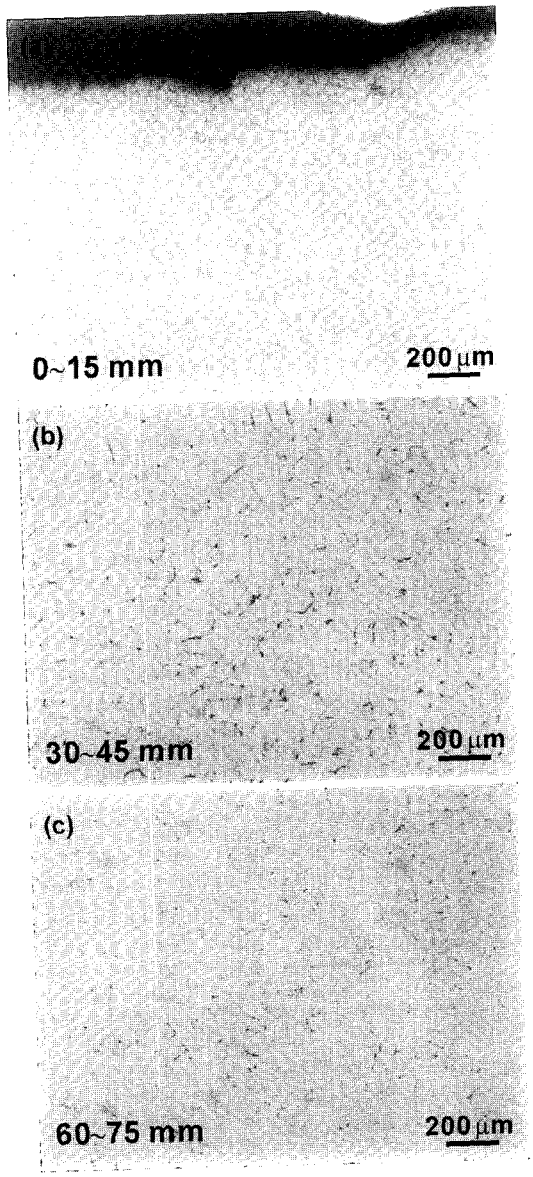


Fig. 3. Optical microstructures of δ-ferrite from surface toward center of rolled billet. Distance from surface is (a) 0~15 mm, (b) 30~45 mm, and (c) 60~75 mm, respectively.

에서 7시간 가열된 후 분괴압연이 실시된 압연조직이므로 타당한 결과로 판단된다. Fig. 4에는 수산화칼륨(KOH) 전해부식 후 빌렛 중심방향으로 나타난 δ-ferrite에 대하여 정량적으로 평가된 면적율을 나타낸다. C/C 빌렛의 경우 δ-ferrite 량은 표면부로부터 중심부로 향할수록 증가하여 표면과 중심의 중간부위에서 6% 정도의 극대값을 나타낸 후 감소하여 전체 두께방향에 대해서 전형적인 M형 분포를 보이고 있다. 이러한 양상은 연속주조 후 응고시 표층부의 chill 영역에서 미세하게 형성된 δ상이 고상변태에 의해 용이하게 분해되는 반면, 중심부로 갈수록 δ상의 크기가 증가하여 고상변태에 의한 분해가 용이하지 못함에 기인하며[9,10], 중심부에서는 Ni, P 등의 편석으로 초정 γ상으로 응고하여 δ상이 급격히 감소한다는 기존의 보고[11]와 잘 일치하고 있다. 한편, Rolled 빌렛의 경우는 전체적으로 δ-ferrite의 량이 3% 이하이고 중심부에서 극대를 나타내고 있는데 이는 δ-ferrite의 분해온도로 알려진 1150°C[7] 이상의 온도에서 장시간 가열되었고, 중심보다 표면부의 수지상내에 미세하게 형성된 δ상은 확산거리가 짧아 확산계면이 넓어지게 됨으로써 δ-ferrite의 분해가 상대적으로 용이하였기 때문이다. 이 결과는 주조조직과 직접적으로 관련되어 이루어짐을 나타낸다. Fig. 5와 6의 (a), (b) 및 (c)에 각각 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛으로 조압연이 완료된 75 mmϕ 선재 표면에서 0~8.75 mm, 8.75~17.5 mm, 26.25~35 mm 지점에서 관찰된 대표적 조직을 나타내었다. 통상 현장에서의 조압연은 가열로에서 1230°C, 40분간 균일 재가열된 빌렛을 취출하여 약 1.9 m/sec의 이송속도로 8개의 stand로 구성된 H-V 형식의 조압연기를 통과시키는 것으로 150×150 mm의 빌렛이 75 mmϕ 선재가 된다. 조압연 직후 스케일이 부착된 75 mmϕ 선재의 표면온도를 pyrometer로 측정한 결과 1100°C 이상을 나타내어 실제는 그 이상의 온도에서 조압연이 완료되는 것으로 추정된다. 각 그림에서 희게 나타난 부분은 γ상이고 검게 나타난 부분은 δ-ferrite상이다. Fig. 5, 6의 각 부위에서 나타난 조직은 Fig. 2, 3의 조직이 단면 감소에 따라 압축된 양상을 보이고 있다. Fig. 5에서 결정립이 현저히 미세화된 것으로 나타나 조압연을 통하여 주조조직이 파괴되며, 재결정화가 활발히 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 6에서도 결정립 미세화는 확인되나 Fig. 3과 비교하여 현저하지는 않았다. 또한 Fig. 5에서는 Fig. 2의 Vermicular ferrite 형태, 서로 얽혀 그물망 형태의 δ-ferrite가 그대로 나타나 있음이 주목된다. Fig. 7에는 선재의 중심방향으로 나타난 δ-ferrite의 면적율을 나타내었다. 그림에서 표면부로부터 중심부로 향할수록 증가하는 δ-ferrite량의 변화 양

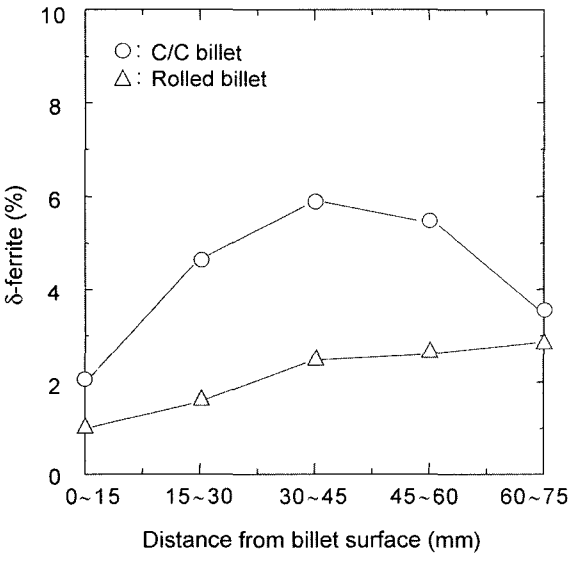


Fig. 4. Variation of δ-ferrite content with distance from surface toward center of billet.

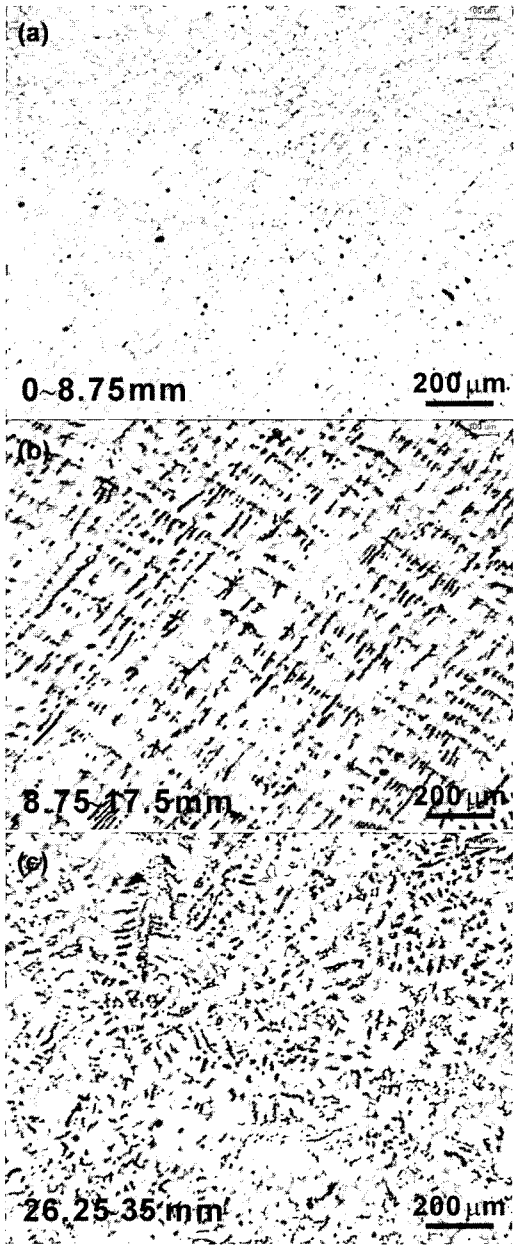


Fig. 5. Optical microstructures of δ-ferrite from surface toward center of 75ϕ wire made from C/C billet. Distance from surface is (a) 0~8.75 mm, (b) 8.75~17.5 mm, and (c) 26.25~35 mm, respectively.

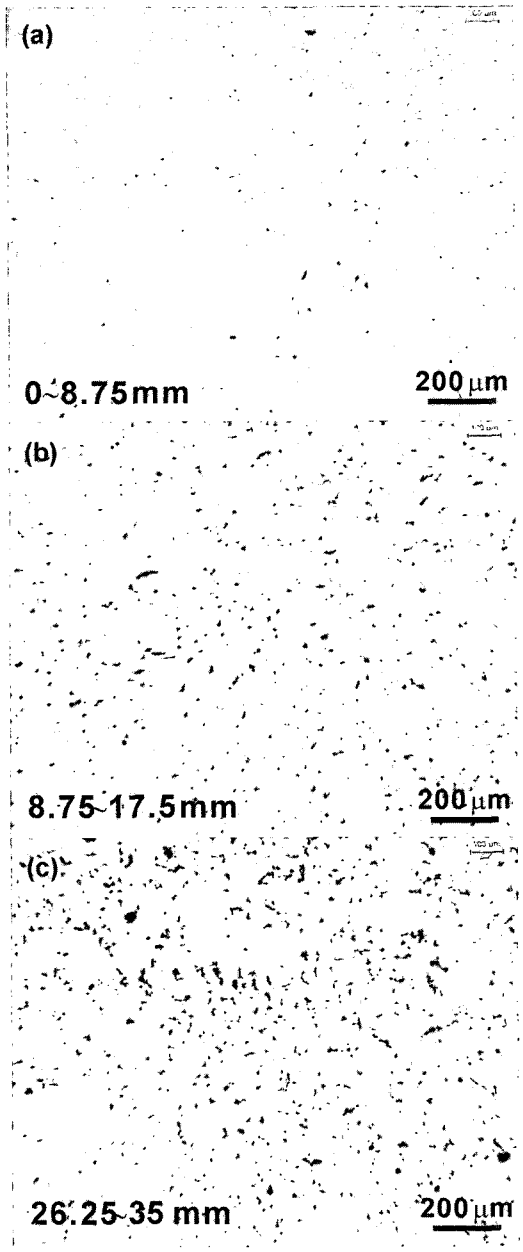


Fig. 6. Optical microstructures of δ-ferrite from surface toward center of 75φ wire made from rolled billet. Distance from surface is (a) 0~8.75 mm, (b) 8.75~17.5 mm, and (c) 26.25~35 mm, respectively.

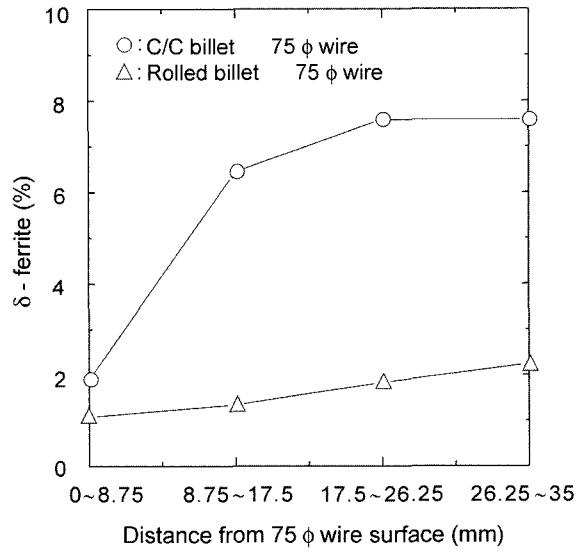


Fig. 7. Variation of δ-ferrite content with distance from surface toward center of 75φ wire.

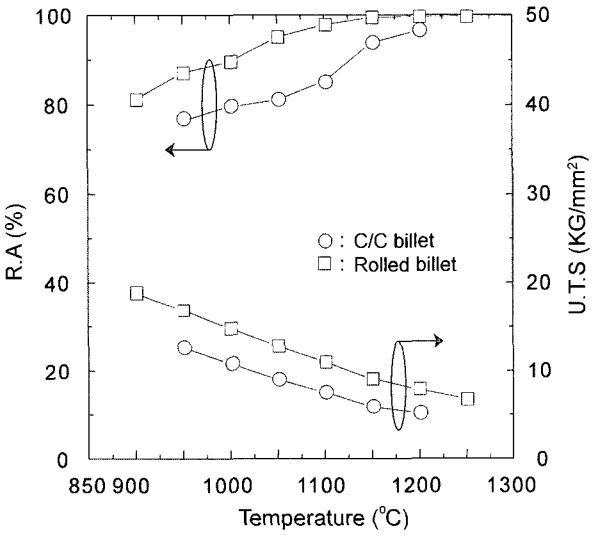


Fig. 8. Variation of tensile properties of C/C and rolled billet.

상은 Fig. 4와 대동소이하나, 절대값에 있어서는 C/C 빌렛 압연 선재의 경우 오히려 7.5%정도까지 증가하고, Rolled 빌렛의 경우에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 조압연전 1230°C, 40분간의 빌렛 재가열로 δ-ferrite의 분해가 충분히 이루어지지 못했음을 의미하며, 압연으로 압축, 감소된 가공조직에서 빌렛에 비하여 다소 심하게 부식된 δ-ferrite가 과장되어 평가되었을 가능성도 배제할 수 없다.

3.2. 열간가공성과 δ-ferrite

Fig. 8에 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛에서 채취된 인장시편에서 시험온도에 따라 얻어진 단면감소율(R.A)과 인장강도(U.T.S) 변화를 나타낸다. 단면감소율과 인장강도로 소재의 고온 연성과 변형저항을 유추할 수 있다. 그림에서 온도 증가에 따라 단면감소율은 증가하고 인장강도는 감소하는 전형적인 고온 인장특성을 나타내고 있다. 특히 조압연 온도영역인 1100°C 이상에서 C/C 빌렛의 단면감소율이 85% 이상을, Rolled 빌렛에서는 95% 이상을 나타내는 양호한 값을 보인다. 1100°C에서 C/C 빌렛의 단면감소율이 Rolled 빌렛에 비하여 10% 이상 작게 나타난 것은 Fig. 2, 3의 조직을 다음과 같은 일반론에 부합시켜 보면 쉽게 설명된다. 즉, 인장시 초기 응력에 의한 cavitation으로 균열이 시편의 중심에서 외부로 인장방향에 대하여 수직, 혹은 수평으로 초기 입계에서 발생하여 전파됨으로써 파단에 이른다. 가공중 재결정이 촉진되는 경우 초기에 형성된 균열은 미세한 결정입경에

의하여 억제, 고립됨으로써 균열의 전파가 용이하지 않아 우수한 고온 연성을 나타내나 재결정이 지연될 경우는 조대한 초기 결정입계에서 발생된 균열이 용이하게 전파되어 연성을 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 이로써 고온 연성에 미친 Fig. 2, 3에서의 초기 결정립 차이의 영향은 정성적으로 인정되나 현저한 차이를 보인 Fig. 4의 δ-ferrite량의 효과는 어떠한 것인지 현 상황에서는 알 수 없다. 서론에서 일부 언급한 내용외에, 304 연주 슬라브의 단면감소율에 미치는 δ-ferrite의 영향에 있어서, 슬라브의 균열온도와 시간을 변화시킴으로써 δ-ferrite량의 제어가 가능한데 1150°C, 5시간 가열로 주조상태의 약 7% δ-ferrite는 최대로 분해되어 1% 정도로 감소하며, 이때 단면감소율은 약 40%에서 80% 이상으로 증가하기 때문에 열간가공성을 개선을 위해서는 δ-ferrite의 량을 줄여야 한다는 보고[7]와 이와는 반대로 주조조직내 약 3%의 δ-ferrite가 존재하면 재가열 과정에서 용이하게 분해됨으로써 단면감소율의 저하가 수반되는 반면, 약 8%인 경우는 열간 재결정이 촉진되어 오히려 단면감소율을 개선시킨다는 보고[10]도 있는 바, 동일 강종에 대해서도 열간가공성에 미치는 δ-ferrite의 영향이 다르게 나타나고 있다. 따라서, Fig. 8의 결과는 시편의 초기 결정립 차이와 어떤 형태로이건 δ-ferrite의 영향이 복합적으로 나타난 결과로 판단할 수 있으며, δ-ferrite만의 효과를 파악을 하기 위해서는 초기 결정립 차이가 없는 상태에서 δ-ferrite량에만 차이가 있는 시편으로 고온 특성 평가가 이루어져야 한다. Fig. 9에는 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛으로 조압연이 완료된 75 mmϕ 선재의 단면감소율과 인장강도의 변화를 나타낸다. 빌렛의 제조방법에 따른 선재의 단면감소율과 인장강도의 차이는 거의 없고, 오히려 C/C 빌렛 선재의 단면감소율이 다소 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이 시험에 이용한 선재의 조직에 관한 정보는 이미 Fig. 5와 6 및 7에 나타난 바와 같이, C/C 빌렛 선재의 결정입경은 Rolled 빌렛 선재와 거의 유사하였으나 δ-ferrite의 량에 있어서만 현저한 차이를 보였다. 결국, 위에서 언급한 고온 인장시험결과만으로 판단하면, 다량의 δ-ferrite 존재가 고온 연성에 악영향을 주지 않는 것으로 정리할 수 있으며, Fig. 8에 나타난 단면감소율의 상이는 순수하게 결정입도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 궁극적 목표인 선재 표면결함의 저감을 논의함에 있어서, δ-ferrite의 존재가 단면감소율을 저하시킨 결과로 표면결함이 발생될 가능성이 크다 혹은 그 반대의 내용으로 설명하는 것만으로는 혼동스러운 점이 있으므로 단면감소율 즉 열간가공성에 미치는 δ-ferrite의 영향과 표면결함에 미치는 δ-ferrite의 영향을 별도로 논의하는 다른 측면에서의 고찰이 필요하다.

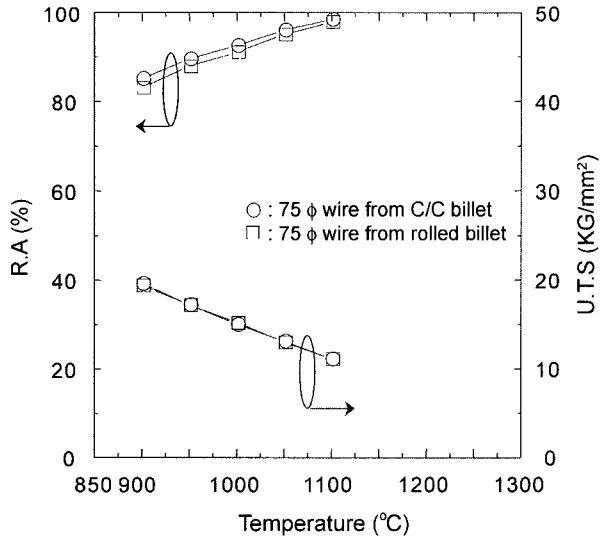
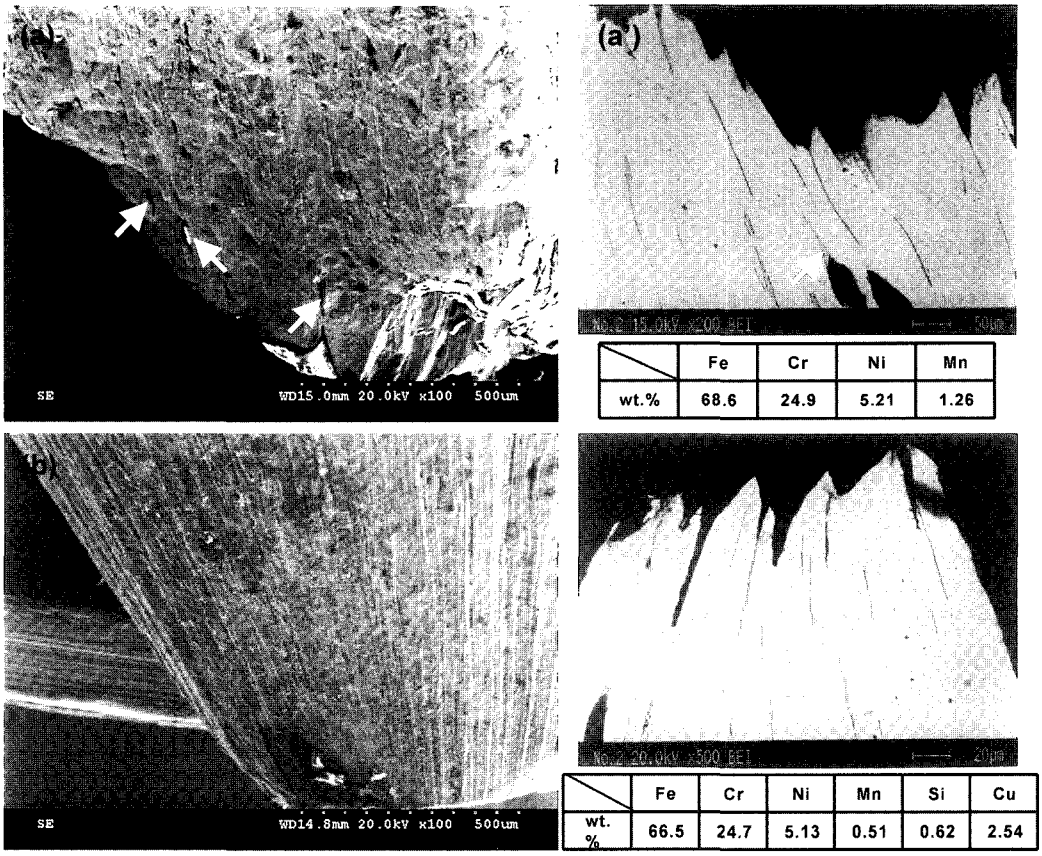


Fig. 9. Variation of tensile properties of 75ϕ wire from C/C and rolled billet.

3.3. 표면결함과 δ-ferrite

Fig. 10의 (a)와 (a′) 및 (b)와 (b′)에는 각각 1100°C에서 고온 인장시험한 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛 시편의 파단 선단부 표면과 내부의 조직을 나타낸다. 표면 조직인 (a)와 (b)에서 (a)는 (b)에 비하여 매우 불균일한 변형이 일어났으며 화살표로 표시된 부위와 같이 조대한 균열도 다수 관찰된다. 한편, 내부 조직인 (a′)와 (b′)에서는 공동(void)과 미세 균열이 관찰되며 성분분석결과 각 선단부에서 δ-ferrite(화살표)가 잔존하고 있음이 확인된다. 이와 같은 결함은 압축시편의 표면부에서도 관찰되었는데 Fig. 11에 나타내었다. 그림의 (a)와 (b)는 각각 1200°C와 900°C에서 65% 1단 압축시험한 C/C 빌렛 시편의 표면에서 관찰된 결함부 조직이며, (a′)와 (b′)는 동일 부위에서 δ-ferrite를 현출시킨 조직이다. 이 결과에서도 균열의 선단부에서 δ-ferrite(화살표)가 반드시 존재하는 것으로 나타나 δ상/γ상 계면이 균열의 기점이 됨을 알 수 있다. 따라서 시편내에 존재하는 δ-ferrite량이 많을수록 균열의 수도 증가할 것이므로 실제 현장의 열간압연 공정에서도 Rolled 빌렛에 비하여 C/C 빌렛 압연시 결함 발생이 상대적으로 증가할 것이라 예측된다. 이와 같은 조직적 상황이라면 일반적으로 δ-ferrite는 어떤 형태로건 고온 연성(단면감소율)과 인장강도에 악영향을 주는 것으로 이해되고[6,7] 있으나 Fig. 9에서와 같이 잔존하는 δ-ferrite량의 대소와는 상관없이 단면감소율과 인장강도가 유사하게 나타나는 것은 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 비틀림 시험으로 얻은 δ-ferrite의 성분과 유사한 STS 446(27%Cr)과 304의 고온 연성(ductility)을 조사한 R. H. Henke는, 446의 경우 시험시작온도인 1100°C에서 온도증가에 따라 파단시의 비틀림 회수는 120 회에서 60 회 정도로 감소한 반면, 304는 20회 정도에서 증가하여 1300°C에서 40회 정도로 극대값을 나타낸 후 감소하는 양상을 나타내어 전체적으로 446의 고온 연성이 304에 비하여 월등히 양호하며, 1300°C 이하로 저온이 될수록 두 강종의 연성 차이가 커지는 것으로 보고하고 있다.[12] 따라서, 시편내 잔존하는 δ-ferrite량이 많을수록 δ상, γ상의 고온 연성 차이로 심한 불균일 변형이 초래되며



	Fe	Cr	Ni	Mn
wt.%	68.6	24.9	5.21	1.26

	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Cu
wt. %	66.5	24.7	5.13	0.51	0.62	2.54

Fig. 10. SEM microstructures showing the surface((a), (b)), and inner side((a'), (b')) of fractured tip after tensile test at 1100°C. (a), (a') and (b), (b') were obtained in the C/C, and rolled billet specimen, respectively.

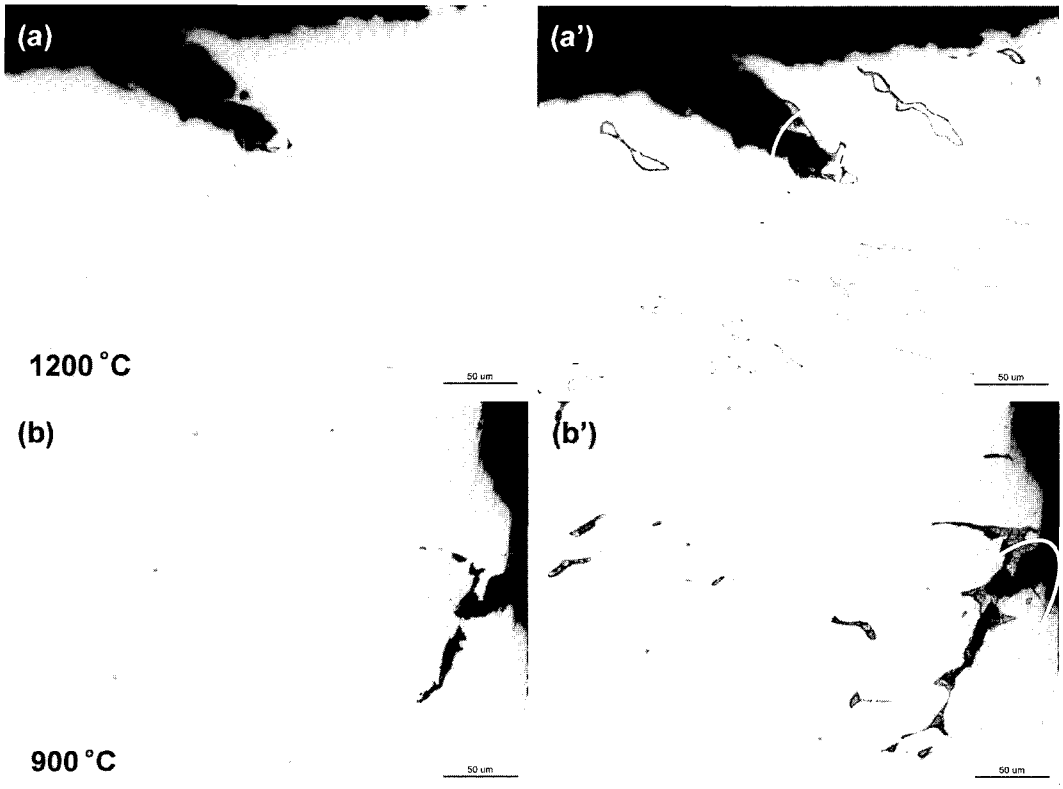


Fig. 11. Optical microstructures showing the microcracks due to δ-ferrite at surface regions after compression test for C/C billet specimen at (a) 1000°C and (b) 900°C. (a') and (b') are etched microstructures.

이로 인한 δ상/γ상 계면에서의 미세 균열로 저하되는 고온 연성은, 증가된 δ-ferrite량에 따라 그 만큼 증가된 자체의 고온 연성으로 보상되었기 때문이다. 이러한 이유로 이미 언급한 바와 같이 δ-ferrite는 표면결함과 분명한 관계가 있음이 밝혀졌지만 δ-ferrite의 존재는 단면감소율을 저하시키고 저하된 단면감소율이 표면결함을 유발시킬 개연성이 크다라는 일련의 관계설명은 이 강종에서 적절치 못하다.

최종 선재제품의 표면품질은 전체 연속압연 공정중 초기 공정 즉, 조압연 공정에서의 결함에 직결되므로 위에서 얻은 결과를 바탕으로 C/C 빌렛 압연시의 보다 구체적인 결함 발생위치와 원인에 대하여 고찰한다. 조압연은 8개의 stand로 구성된 압연기를 통하여 1100°C 이상의 온도에서 완료된다. Fig. 9를 통하여 1100°C에서 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛 선재의 단면감소율은 δ-ferrite량과 관계없이 95%를 넘는 매우 양호한 열간가공성이 유추되므로 C/C 빌렛의 조압연중 동적 재결정이 어느 stand에서 발생하는지 파악할 필요가 있다. Fig. 12에 다단 압축시험시 얻어진 C/C 빌렛과 Rolled 빌렛 시편의 종단면 중심부에서의 조직변화 나타낸다. 그림에서 C/C 빌

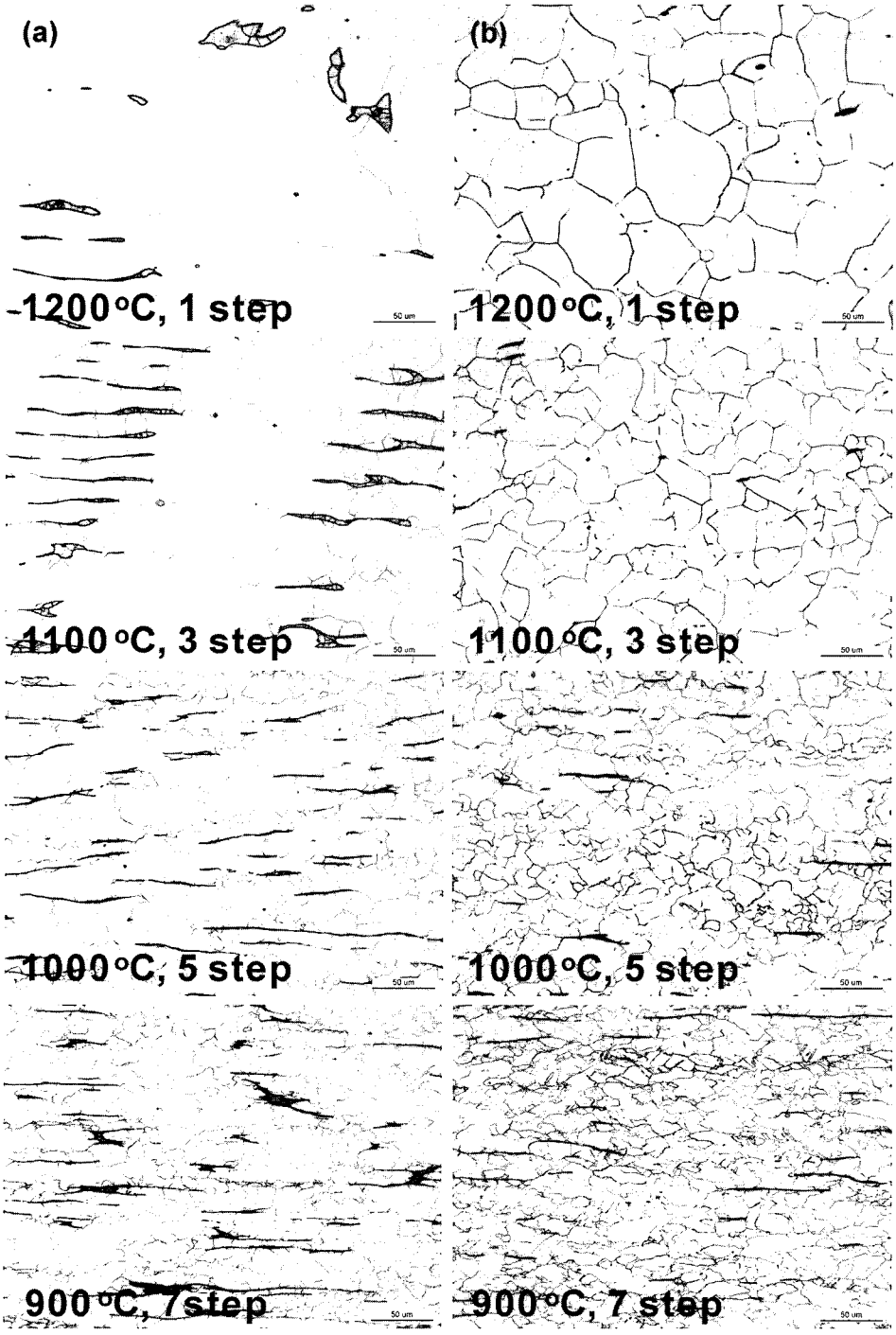


Fig. 12. Optical microstructure variation with condition of multi-step compression test for (a) C/C and (b) rolled billet specimen.

렛과 Rolled 빌렛 시편에서 공히 저온에서 누적 압하율이 클수록 재결입경이 작고, 빌렛간 입경은 거의 유사한 것으로 나타나며, 특히 C/C 빌렛 시편에서 1100°C, 누적 압하율 36.3%의 3단 압축으로 재결정이 이루어짐이 주목된다. 이 누적 압하율을 실제 조압연 패스 스케쥴(pass schedule)에 대응시켜 보면 가열로쪽 두 번째인 No. 2 stand 조압연기에서의 누적 압하율(35.4%)에 해당된다. No. 2 stand 압연은 조압연중에서 초기로 소재 온도가 거의 1150°C 이상이 될 것이므로 내부 조직은 Fig. 12의 (b)보다 활성화된 재결정화 양상을 보일 것으로 추정된다. 이와 같은 상황에서 Fig. 8의 결과를 참조하면 주조조직을 가지는 C/C 빌렛의 경우 1150°C 이상에서 거의 95% 이상의 단면감소율을 보이므로 Rolled 빌렛의 단면감소율과 차이가 거의 없는 것으로 보는 것이 타당하며, 표면결함과 관련하여 이 조건의 압연 영역에서는 결정입경 차이에 따른 영향도 거의 없을 것임을 시사한다. 따라서 결함의 근본 원인이 조압연 전 단계인 빌렛 재가열 공정에 있을 가능성에 따라 빌렛의 가열로 나타날 수 있는 내부의 조직변화를 고온 가열산화실험을 통하여 조사하고 그 결과를 Fig. 13에 나타낸다. 현장의 가

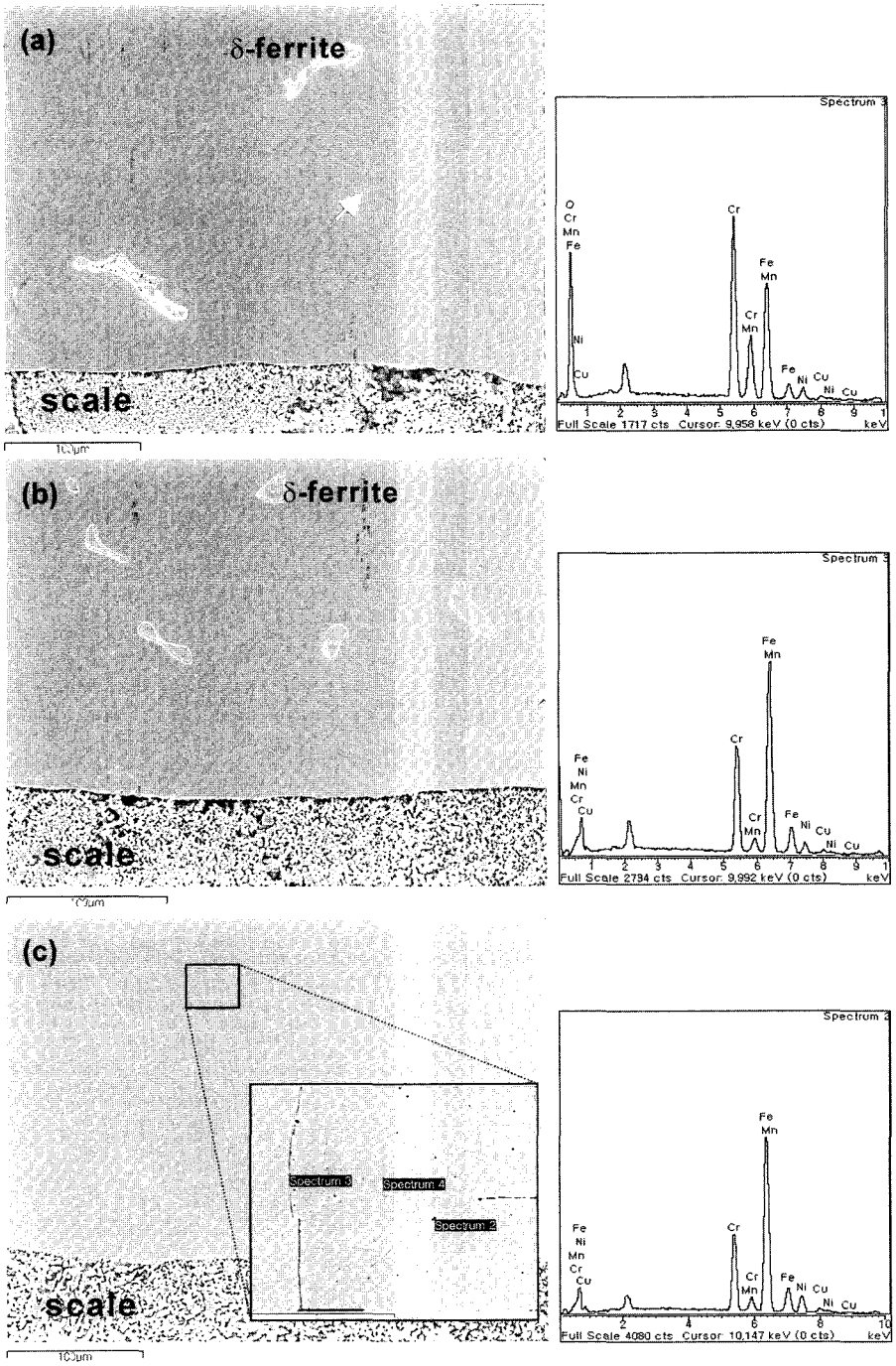


Fig. 13. SEM microstructures at cross-section of scale and matrix on (a), (b) C/C, and (c) rolled billet specimen after high temperature oxidation.

열로내 산소량은 대략 2 Vol.%이다. 가열모사실험에서 로내 산소량은 상온에서 20 Vol.% 정도이지만 균열온도인 1230°C까지 승온되면 최초 체적의 5배가 된다. 로는 승온중 항상 대기압을 유지하고 공기중 산소와 질소의 열팽창율이 다른 것을 고려하면 로내 산소량은 4 Vol.% 이하가 되는 것으로 추정되어 현장의 가열로내 산소량을 비교적 잘 재현하였다고 판단된다. 그림의 (a)는 C/C빌렛 시편에서 얻어진 것으로 스케일-금속계면에서 약 100 μm과 300 μm 정도 떨어진 곳에 화살표로 표시된 입계로 연결된 δ-ferrite가 존재하는 조직이다. 스케일-금속계면에서 입계를 따라 내부까지 확대상과 성분을 추적 조사한 결과 입계상에 비교적 조대한 산화물이 관찰되며, 기지부에 비해 Mn과 Cr농도가 전반적으로 높게 나타났다. 특히, 300 μm 떨어진 δ-ferrite를 분석한 결과 스펙트럼에 나타난 바와 같이 완전한 산화물 상태였다. 반면 (b)는 동일 시편에서 스케일-금속계면과 입계로 연결되지 않은 다수의 δ-ferrite가 존재하는 또 다른 부위의 조직을 나타내며, 스케일-금속계면에 가장 인접한 δ-ferrite를 분석한 결과 전혀 산화되지 않는 상태임이 스펙트럼으로 확인된다. 이 결과에서 외부의 공기와 연결된 결정입계가 산소의 주요 이동경로가 된다는 사실이 분명히 입증되며, 입계를 통하여 산소 침투가 상당한 깊이까지 이루어짐을 알 수 있다. 한편, (c)는 입계를 통한 산소의 침투깊이를 비교할 목적으로 조사한 Rolled 빌렛 시편에서의 조직이다. 스케일-금속계면에 극히 가까운 입계상에서만 작은 산화물이 관찰되며, 크기는 (a)에 비하여 상대적으로 작을 뿐 아니라 O, Mn의 농도도 작았다. 또한 (a)에서 산화된 δ-ferrite까지의 거리만큼 떨어진 입계상에서는 산화물의 존재가 전혀 확인되지 않았다. 이 결과는, C/C 빌렛과 Rolled 빌렛에 동일한 가열조건을 적용할 때 C/C 빌렛의 경우 Rolled 빌렛에 비하여 스케일-금속계면으로부터 보다 깊은 입계상에서 산화물의 형성 정도가 증가할 것이므로 입계부의 취약 가능성도 상대적으로 증대되고, 동시에 외부 공기쪽과 입계로 연결된 δ-ferrite가 상대적으로 많이 존재, 급속히 우선산화됨으로써 압연시 재압착이 불가능한 상태가 되므로 이것이 조대한 균열의 기점으로 작용할 가능성도 증가할 것임을 의미한다. 따라서, 이와 같은 사실이 앞서 언급한 C/C 빌렛의 조압연 초기 95% 이상 매우 양호한 단면감소율을 나타냈음에도 Rolled 빌렛보다 많은 표면결함을 발생시키는 근본적 이유로 결론지을 수 있다. 이는 선재압연 전체공정이 고온에서 이루어지므로 공정중 내부의 미산화 δ-ferrite가 산화될 개연성은 Rolled 빌렛에 비해 δ-ferrite량이 많은 C/C 빌렛에서 항상 높아 표면품질에 영향을 줄 것이라는 의미도 포함한다.

4. 결 론

"3 wt.% Cu 함유 STS 304 빌렛의 열간가공성과 표면결함에 미치는 δ-ferrite의 영향" 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) C/C 빌렛에서 주조조직에 따른 최대 6%의 δ-ferrite가 관찰되었고, 조압연을 통한 75 mmϕ 선재에서는 재결정을 통한 결정립 미세화와 주조조직의 형상을 유지하는 δ-ferrite가 잔존하였다.

(2) C/C 빌렛, Rolled 빌렛 그리고 이것으로부터 조압연된 75 mmϕ 선재의 고온 인장시험을 실시한 결과, 두 빌렛 소재간 단면감소율의 차이는 δ-ferrite량에는 관계없고 결정입경 차이에 기인함이 확인되었다.

(3) C/C 빌렛, Rolled 빌렛의 고온 인장시험시편의 파단부를 관찰한 결과, 파단 선단의 균열부에서 δ-ferrite가 항상 관찰된 것으로부터 가공시 균열의 기점이 됨을 확인하였다. 이 결과는 (2)의 결과와 배치되며, 75 mmϕ 선재에서 많은 량의 δ-ferrite에도 불구하고 양호한 열간가공성이 발현된 것은 자체의 높은 고온 연성때문으로 판단된다.

(4) 가열로내 가열모사실험을 통하여, 동일한 가열조건에서 C/C 빌렛의 경우 Rolled 빌렛에 비하여 입계상에서의 산화 생성물이 많으며, 입계를 통한 산소의 침투깊이도 큰 것을 확인하였다. 이는 입계부 취약을 의미하며, 특히 입계와 연결된 δ-ferrite가 존재할 경우 이것의 우선산화가 표면결함의 결정적 원인이 됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 포스코신기술연구조합(조합사: 포스코㈜, 창원특수강㈜)의 재정지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. 아울러 빌렛 및 선재시편의 제공과 열간 가공성 평가에 도움을 주신 창원특수강의 관련 여러분께도 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Y. Choi and W. Jin, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **37**(1), 27 (1999).
2. Y. S. Ahn, Y. H. Lee and Y. D. Lee, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **30**(7), 799 (1992).
3. G. Jolley and J. E. Geraghty, Solidification & Casting of Metals, The Metal Society, p.411, London (1979).
4. L. Myllykoski, Act. Univ. Oul., C26, Metallurg., 61 (1983).
5. J. C. Lippold and W. F. Savage, Welding Res. Supplement, **12**, 388s (1982).
6. J. H. Decroix, A. M. Neveu and R. J. Castro, The Iron and steel Inst. p.135, London (1968).
7. Y. Uematsu, T. Fujimura and K. Hoshino, Nippon Steel Tech. Rep., **25**, 47 (1982).
8. H. Fredriksson, Metall. Trans., 3A, Nov., 2989 (1972).
9. Y. Y. Lee and S. K. Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **30**(9), 1104 (1992).
10. Y. Y. Lee and S. D. Sim, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **34**(5), 596 (1996).
11. C. H. M. Jenkins, J. Iron and Steel Inst., **136**, 187 (1973).
12. R. H. Henke and R. A. Lula, J. Metals, p.883 (1954).