

스텐레스강(SUS304)의 반응고교반 연속주조 박판재 제조

이 호 인, 김 기 배, 이 재 철, 문 희 경*, 강 태 옥*

한국과학기술연구원 금속공정연구센터, 서울 청량사서함 131

* 포항산업과학연구원 S/C프로젝트팀, 경북 포항시 효자동 산32

1. 서 론

Strip casting공정에 반응고교반기술의 적용가능성을 검증하기 위해서 반응고교반 연속주조장치를 설계 제작하였고, 스텐레스강의 반응고 박판주조재를 시제하여 이의 금속적·기계적특성을 검토분석하였다. 이연구는 3년(1995.7.1.-98.9.30.)동안 포스코 기술개발본부의 연구비지원으로 수행하였다. 이의 목적은 박판재를 등축정조직으로 반응고제어하여 (i)박판재 중심부의 편석을 극감시키고, (ii)초정을 미세화/구상화시켜 박판재의 품질을 향상시키고, (iii)더 나아가서 신탄금창출을 시도하여 보고자 하는데 있었다. 일본 철강업계에서는 반응고가공기술이 차세대 제철제강기술로 주목을 받을 것으로 판단하고 20년후를 바라보면서 국책연구과제로 수행하고 있다(그림1 참조).

2. 철강의 반응고가공기술의 연구개발동향

반응고가공기술(半凝固加工技術)은 용융금속을 응고시키는 과정에서 강력한 교반력을 가하여 고상과 액상이 미세하고 균일하게 혼재한 상태에서 빌렛제조 또는 직접 압연/압출공정을 거쳐 최종제품을 만드는 방법이다. 이는 응고잠열을 대부분 방출시킨후 반응고상태에서 압연/압출공정을 수행함으로 균일하고 미세한 등축정조직과 저시편석의 제거가 가능하고, 비중차이가 크고 고용도가 적은 금속원소들을 균일분산형합금으로 제조가능케 한다. 미국은 80년대 들어와서 America Rheotech Co.라는 벤처회사를 설립하여 반응고교반기술의 응용과 제품생산연구를 수행하였다. 일본에서는 이 기술이 차세대금속제조기술로 발전될 것으로 확신하고 1988년 3월에 Kawasaki Steel Corp., Kobe Steel Ltd., Nippon Steel Corp. 등 18개 업체가 공동으로 35억엔(350억원)을 투자하여 Japan Rheotech Ltd.를 설립하고 1994년 9월까지 6년 7개월동안 반응고가공기술개발연구를 하였다. 이 결과 반응고가공의 기초기술데이터와 엔지니어링데이터들을 많이 확보하였고, 알루미늄합금 및 동합금뿐 아니라 주철(C:2.5%), 중탄소강(C:0.6%), 스텐레스강(SUS310) 등 고용점금속에서도 이 기술의 상업화가 가능하다는 결론을 얻었으며, 이들 고용점재료들을 대상으로 하는 본격적인 산업생산연구에 들어가고 있다. 독일은 Aachen공대가 주축이 되어 strip casting공정에 적용을 시도하고 있으며, 영국은 Sheffield대학이 주축이 되어 공구강의 개발에 역점을 두고 연구개발이 진행중에

있다. 이들의 목표는 빌렛트를 등축정조직으로 반응고제어하여 빌렛트중심부의 편석을 극감시키고 초정을 미세화시켜 최종제품의 대폭적인 품질향상 또는 신탄금창출을 시도하여 보고자 하는데 집중되고 있다.

3. 반응고교반 연속주조장치 설계제작

반응고교반 연속주조장치는 (i)전자기교반장치, (ii)토크측정제어장치, (iii)연속주조/twin roll장치 등 3부문에서 설계제작을 하였다. 연속주조/twin roll장치는 strip casting장치와 비슷하게 만들었으며, 이의 응고영역구간에 전자기교반장치를 설치하였다.

3.1. 전자기교반장치

전자기교반장치는 점도가 높은 반응고소재를 교반하기 위하여 자기력이 상당히 커야 하고 연속주조장치의 몰드외경에 열차폐재 및 수냉자켓트가 설치되어야 하기 때문에 전자기유도회전장치의 내경이 상당히 커짐에 따라 전자기력이 가장 좋은 봉형 유도회전장치로 제작하였으며, 그림2에 전자기교반장치의 실제 모습과 설계개략도를 보여주고 있다. 이 교반장치는 KIST에서 반응고교반 연속주조에 필요한 사양을 주고 라트비아 물리연구소에서 전자기교반장치를 설계 제작하였다. 전자기교반장치는 2극3상으로 2개의 철심이 하나의 phase를 구성하여 $A \rightarrow -B \rightarrow C \rightarrow -A \rightarrow B \rightarrow -C$ 순서가 되도록 하므로서 12개의 철심에 코일이 감겨져 있도록 하였다. 주파수는 우리나라의 상용주파수이며, 자장의 침투깊이를 고려하여 60Hz를 사용하여 최대자속밀도가 1000Gauss이상이 되도록 제작하였다. 입력전압 160볼트와 전류 500암페어에서 최대 1200Gauss이었으며 중심부에서는 700Gauss이었다. 알루미늄합금에 대한 전자기교반을 실시한 결과 최대 1000rpm까지 용탕회전과 반응고 연속주조가 가능하였다. 그러나 1000Gauss이상을 얻기 위해서 500암페어라는 너무 높은 전류가 필요되어 라트비아에서 제조한 전자기교반장치의 구조를 개선해서 KIST에서 재설계하고 국내제작을 시도하였다. 이는 내경 200mm, 철심돌극 높이 150mm, 철심 폭 50mm로 설정하였으며, 몰드 중심부에서 최대자장강도는 1000Gauss가 되도록 사양을 설정하였다. 이 경우 냉각수를 흘리기 위한 코일은 내경 3.5mm의 동튜브로 돌극당 25 turns으로 권선하면 동튜브길이가 약 14m가 되고, 압력차이 2.5기압, 온도차이 25⁰C일 경우 최대전압 50V, 최대전류 350암페어에서 몰드중심부의 자장강도가 1000Gauss되는 것으로 나타났다. 그림3은 KIST에서 설계제작한 돌극형 전자기교반장치의 실제모습과 설계개략도를 보여주고 있다. 실제로 자속밀도를 측정하여 본 결과 자속밀도 1000Gauss를 얻기 위해서 KIST에서 설계 제작한 교반장치는 200암페어가 요구되어 라트비아에서 설계제작한 것보다 2배이상의 효율향상이 있었다. 이는 적은 전기량에서도 동일한 자장유도효과를 나타내는 것으로 나타났다(그림4). 최근 슬림형 전자교반장치를 개발하였고, 금릉테크에서 설계제작하여 220V 50A에서 최대 자속밀도를 800Gauss가 가능하게 되어 대폭적인 효율향상을 가져왔다.

3.2. 토크측정제어장치

토크측정제어장치는 AC서보모터와 토크센서를 장착하고 토크측정은 컴퓨터에 의해서 실행되게 프로그램설계를 하였다. 데이터기록장치는 26채널(온도:16, strain gage신호:7, LVDT:1, 압전신호:2채널)로 구성하였고, 채널당 최대 8170 data/sec내에서 사용자가 지정하는 임의의 조건에서 26채널을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 미세온도변화에 따른 토크의 정밀측정으로 금속의 유변학적 특성데이터를 확보할 수 있었고, 이 토크측정기법을 실제 연속주조 박판제조장치에 적용시켜 온도-토크의 정밀측정/제어를 가능케 하였고, 안정된 반응고 연속주조박판을 얻을 수 있었다. 그림5에 개략도를 보여주고 있다.

3.3. 연속주조/twin roll장치

반응고 연속주조장치는 혼합교반형으로 제작하였고 턴디쉬 및 교반실로 되어 있다. 턴디쉬는 고온용 SiC발열체를 사용하여 1550^oC까지 용탕온도가 일정하게 유지되도록 하였으며, 턴디쉬재료는 고순도 알루미늄계 캐스타블로 하였다. 교반실도 고순도 알루미늄계 캐스타블로 제작하고 자장차폐를 방지하기 위하여 비자성체인 310S스텐레스강을 외피로 사용하였다. 전자교반장치와 교반실사이에는 단열재를 사용하여 열이 전자교반장치로의 전도 및 방사되는 것을 방지하였다. 쌍롤장치는 직경 200mm, 폭 200mm의 롤로 SKD61종으로 제작하였고, 내부에 100//min의 냉각수를 흘릴 수 있는 냉각시스템을 가지고 있다. 롤 간격은 최고 30mm까지 조절이 가능하고, 롤 면은 일정하고 편차는 0.01mm이하로 하였다. 롤속도는 최대 37m/min로 하였고 모터는 22.5마력을 사용하였다.

4. 반응고교반 박판재 제조

4.1. 실험준비 및 판재 제조

본 연구에서 사용한 스텐레스강(AISI304)은 직경 20-50mm의 봉재를 구입하여 고주파유도 가열로에서 용해하여 사용하였다. 표1은 이의 화학성분 분석결과이다. 분석결과 C가 0.05%이며 Fe-19Cr-9Ni합금으로 나타났다. 상평형도에서는 액상선 온도가 1475^oC이고, 고상선 온도는 1398^oC로 나타났다. 따라서 반응고 온도구간은 약 77^oC로 나타났다.

소재는 고주파유도용해로(50kW)에서 가열/용해하였고, 24kW까지 천천히 올려서 용탕이 형성되기 시작하면 철강용 플럭스를 뿌려서 슬러그를 제거하였다. 이때 용탕온도를 분석하여 주입적정온도를 설정하였다. 턴디쉬, 노즐 및 교반실의 예열은 산소와 LPG를 사용하였으며, 교반실은 노즐을 통하여 예열하였으나 슬리트 노즐 slit nozzle)의 입구가 작아서 교반실의 몸체까지 예열하기 어려워 산소와 LPG의 비율을 약간 틀리게 하여 불연소되는 가스를 교반실 안에서 연소되게 함으로서 노즐쪽 입구온도는 1200^oC이상까지 3시간동안 예열하였으며, 교반실은 1000^oC정도로 예열되었다. 턴디쉬와 래들은 LPG로만 1000^oC이상으로 예열하였다. 전자기교반장치와 쌍롤의 냉각수량은 현재 실험실에서 사용할 수 있는 최대용량인

0.5kgf/cm²와 2.5m³/h의 양을 투입하였다. 또한 노즐에서 용탕배출형상을 분석하기 위해서 비디오로 연속촬영을 하였으며, 턴디쉬와 교반실의 5개 부위에서 온도를 측정기록하였다. 판재 두께가 2mm, 폭 100mm는 롤속도를 25rpm에서 판재가 제조되었으며, 두께 3mm는 롤속도 5rpm에서도 용탕풀이 생성되지 않고 판재를 얻을 수 있었다. 스텐레스강의 반응고교반 연속주조장치를 그림6에 보여주고 있으며, 그림7은 고속촬영한 박판재의 제조상황을 보여주고 있다. 주입온도는 1500°C, 자속밀도는 350Gauss(280rpm), 노즐배출온도 1450°C에서 박판재를 제조하였다. 두께 2.4mm의 박판재를 얻기 위해서 쌍롤속도 15-20rpm, 냉각수량 43l/min, 냉각수 온도 20°C에서 실험하였다.

반응고교반법으로 제조된 스텐레스강 박판재의 냉간가공성을 조사하기 위해서 폭 50-100mm, 길이 200-250mm로 절단하여 RIST 재료시험팀이 보유하고 있는 300톤급 4단 냉간압연기를 사용하여 냉간압연을 실시하였다. 일반적으로 판재는 아닐링처리를 하지 않고 계속 압연하여 균열이 발생하지 않고 최고 압하율을 얼마까지 낼 수 있느냐가 판재의 성형성 평가에 중요한 자료이다. 본 연구에서는 1회 압연으로 92%까지 냉간압연을 실시하였다.

4.2. 반응고교반 박판재의 금속조직

본 연구에서 반응고 박판주조장치에서 여러 두께 및 폭을 가지는 반응고 박판을 제조하였다. 일반적으로 오스테나이트계 스텐레스강에서는 델타 궤라이트의 분포와 형상이 초기 응고모드에 관련이 있기 때문에 델타 궤라이트를 관찰하였다. 그림8(a)는 반응고 박판재의 두께방향에서의 응고조직을 보여주고 있다. 두께는 2.5mm의 판재이지만 두께 전체가 비수지상의 등축정으로 이루어져 있다. 표면층도 등축정(equiaxed structure)으로 되어 있는 것으로 보아 반응고 슬러리상태가 쌍롤로 배출되었기때문으로 사려된다. 반면 그림8(b)에서 보는바와 같이 일반 박판주조의 응고조직은 표면에서 중심부까지 길게 주상정(columnar structure)으로 성장하였다. 그림9는 고배율로 관찰한 일반 박판재와 반응고 박판재의 조직사진을 보여주고 있다. 2차 수지상의 간격은 반응고박판재가 15um정도이며, 일반 박판재는 10um정도였다. 스텐레스 304합금에서 2차 수지상 간격과 냉각속도와의 관계식은 다음과 같다.

$$D_2 = 64 T^{-0.35}$$

상기식에 의해서 냉각속도를 계산하면 일반 박판재의 경우 200°K/sec이고, 반응고 박판재의 경우는 60°K/sec로 나타난다. 이와같이 반응고 박판재가 일반 박판재보다 냉각속도가 낮은 것은 잠열이 거의 제거된 반응고 슬러리상태로 쌍롤에 접촉하기 때문에 고온의 용탕상태로 쌍롤에 접촉하는 일반 박판재보다도 냉각속도는 낮게 나타났다.

그림10은 압하율 90%로 냉간압연한 반응고 박판재의 조직사진을 보여주고 있으며, 그림10(b)는 이 판재를 1100°C에서 60초동안 열처리하여 재결정된 조직사진을 보여주고 있다. 반

응고 압연판재와 열처리시킨 판재의 경도값을 Vickers미소경도기로 측정하였던바, 압연판재는 486.4이었고, 재결정된 판재는 183.0이 얻어졌다. 이는 일반 박판주조시킨 압연판재의 경도값과 유사한 값이다.

5. 반응고교반 스텐레스강의 성형성 실험

그림11은 반응고교반을 한 것(EMS 140V, 500rpm)과 하지않은 것의 육안조직과 미세조직을 보여주고 있다. 교반을 실시하지 않은 경우는 시편의 중심부까지 결정이 columnar로 성장하였으며, 중심부에는 조대한 수축공이 있었다. 그러나 교반을 실시한 경우는 columnar성장부위는 측면에서 일부 관찰되고 거의 등축정으로 이루어져 있음을 관찰할 수 있었으며, 수축공이 전혀 나타나지 않았다. 따라서 반응고빌렛트제조시 교반으로 인하여 등축정조직으로 천이됨을 확인할 수 있었다.

그림12는 열간압축과 열간압연하였을 때 표면형상과 조직변화를 보여주고 있다. 1300°C에서 60%까지 열간압축을 하였을 때 교반하지 않은 시편은 edge부위에서 표면크랙이 발생하였으나, 교반한 시편에서는 표면크랙을 관찰할 수 없었으며 매끄럽게 나타났다. 열간압축 재현실험은 1200°C부터 1400°C까지 100°C간격으로 압축속도는 1/sec로 60%까지 thermicmaster3에서 수행하였다. 열간압연은 25mm두께로 시편을 기계가공하였고 1200°C에서 1시간 유지한 후 1차pass를 15mm두께로 압연하여 단면수축을 40%가 되도록 하였으며, 곧바로 2차pass로 10mm까지 압연을 하였다. 교반한 것이나 교반하지 않은 것이나 열간압연은 용이하였으나, 교반한 것이 edge부위가 깨끗하고 매끄러운 면을 보였다. 따라서 304스텐레스강에서도 교반효과로 성형성이 좋아지는 것으로 판단되었다.

6. 결 론

국내에서도 반응고가공기술에 대해서 포항제철을 비롯한 자동차·전자부품회사에서 많은 관심을 가지고 연구진행되고 있다. 일반적으로 새로운 제조공정이 개발되어 생산현장에 양산공정으로 정착되기까지는 보통 10-20년이라는 세월이 필요하다는 점을 고려할 때 우리도 지금부터 이 기술에 대한 연구가 체계적이고 장기적인 목표를 가지고 산·학·연 협동연구가 본격적으로 시작되어야 할 것이다.

< 후 기 >

본 연구는 3년(1995.7.1.-98.9.30.)동안 포항제철(주) 포스코 기술개발본부의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드리는 바입니다. 또한 냉간압연기기와 냉간압연을 직접 수행하였던 RIST의 압연팀의 협조에 감사를 드리는 바입니다.

< 참고문헌 >

1. S. Okano : "Research activities in Rheo-Technology Ltd.", 3rd International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites, 1994, Tokyo, p7-18
2. K.B.Kim, H.I.Lee, H.K.Moon : "Microstructures and formability of electromagnetically stirred billet of high melting point alloys", 1998, Colorado, p415-422
3. US Patent No. 5,178,204 "Method and apparatus for rheocasting", Inland Steel Co.(Chicago), and Amax Inc.(Greenwich), USA
4. US Patent No. 5,110,547 & 5,205,981 "Process and apparatus for the production of semi-solidified metal composition, Japan Rheo-Technology Ltd.
5. P.Kapranos, RC Gibson, DH Kirkwood, CM Sellars : "Induction heating and partial melting of high melting point thixofromable alloys", 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, p154-158

표 1. 오스테나이트 스텐레스강(AISI304)의 화학성분

Mn	Si	Cr	Ni	P	S	C	Al	Cu	Mo	Fe
0.37	0.39	16.1	9.29	0.021	0.020	0.050	10^{-3}	10^{-1}	10^{-3}	bal.

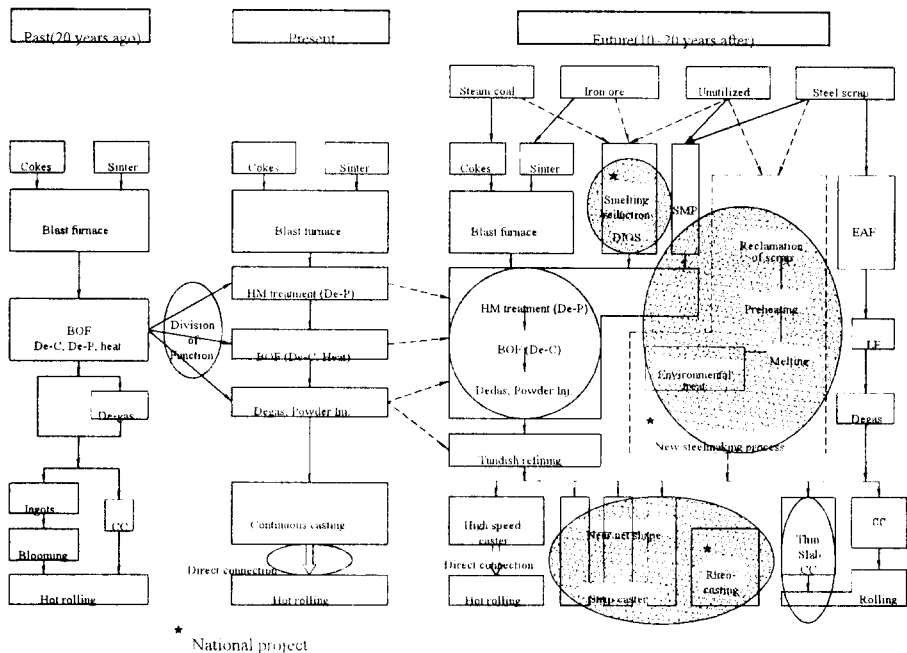


그림 1. 철강의 과거, 현재 및 미래의 발전전망

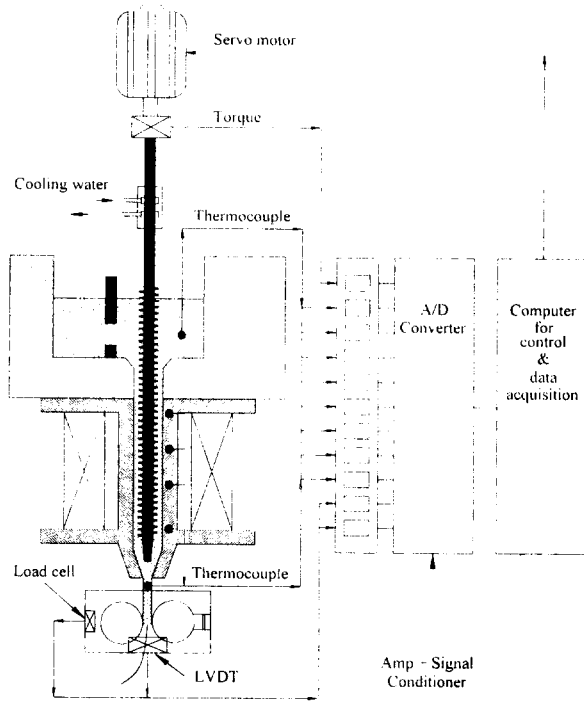


그림 5. 혼합교반형 반응고박판주조장치와 점성측정제어시스템의 개략도

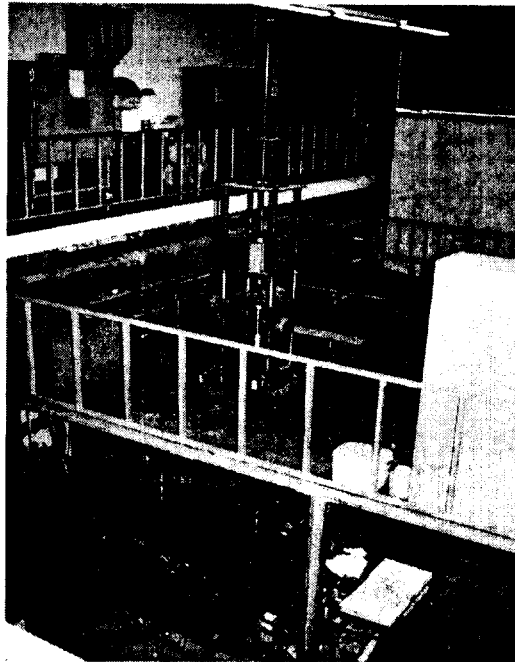
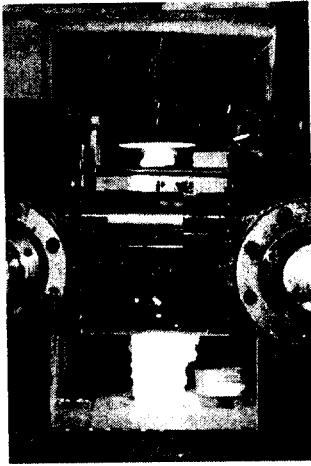
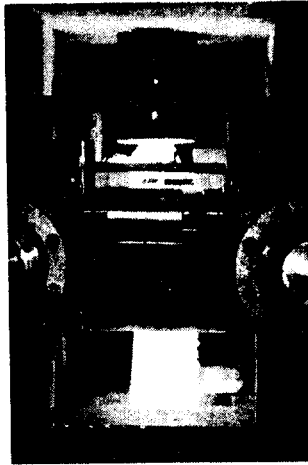


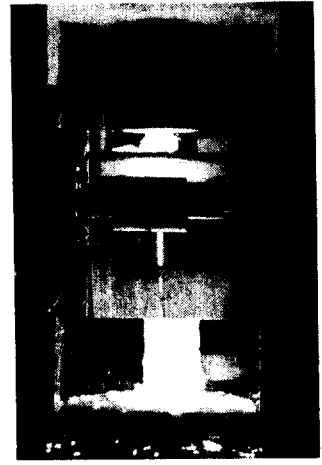
그림 6. KIST 실험공장동에 설치된 혼합교반형 반응고 박판주조장치



(a) 주입 초기



(b) 안정화 상황

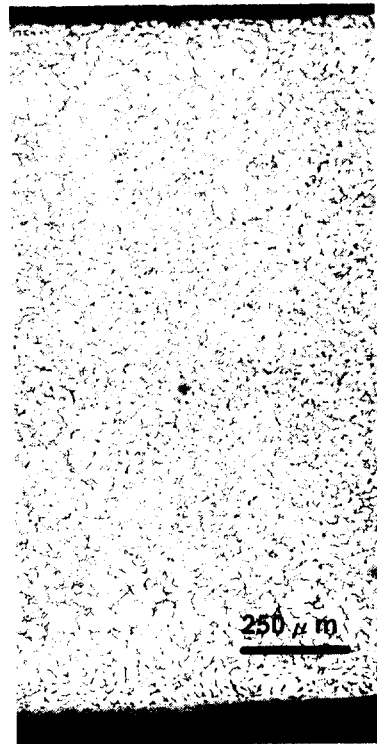


(c) 주입 말기

그림 7. 고속카메라로 촬영한 박판재의 제조상황

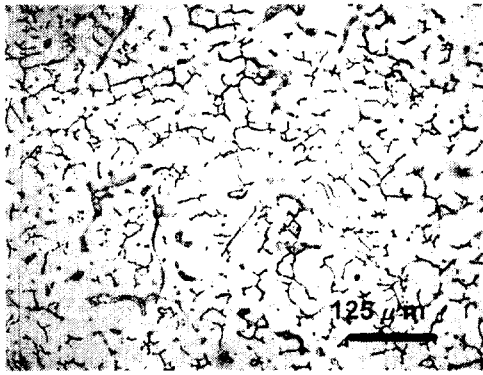


(a) 일반 박판재

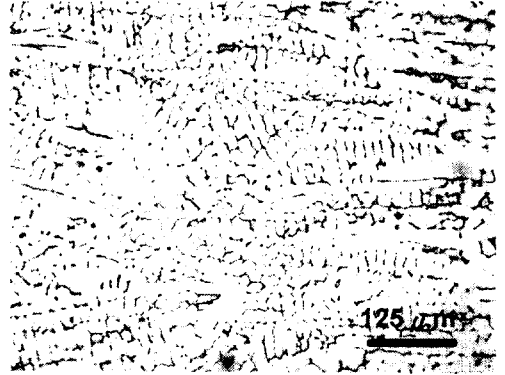


(b) 반응고교반 박판재

그림 8. 스텐레스강(AISI304)의 반응고교반 및 일반 박판재의 두께방향 조직

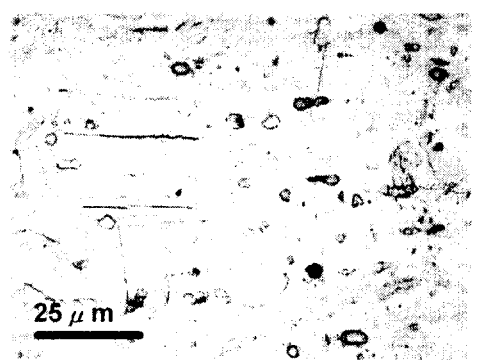
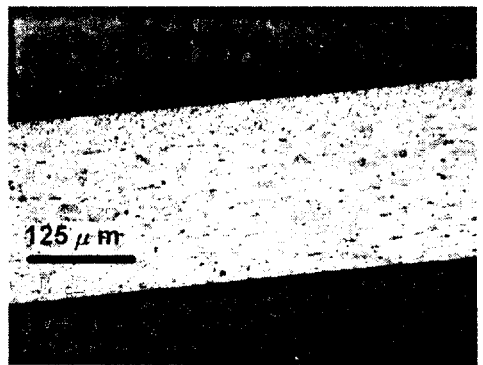
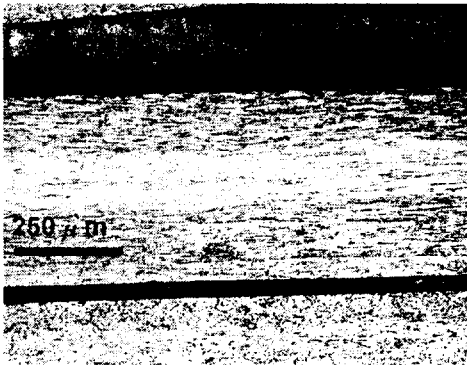


(a) 일반 박판재



(b) 반응고교반 박판재

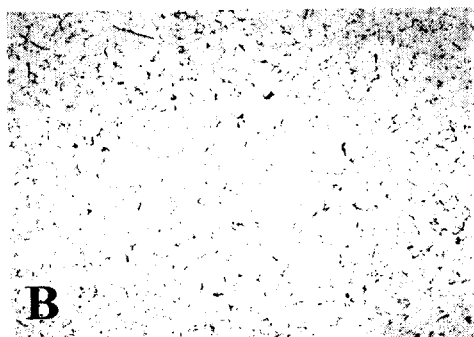
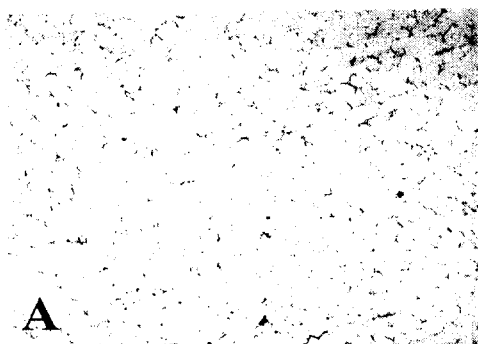
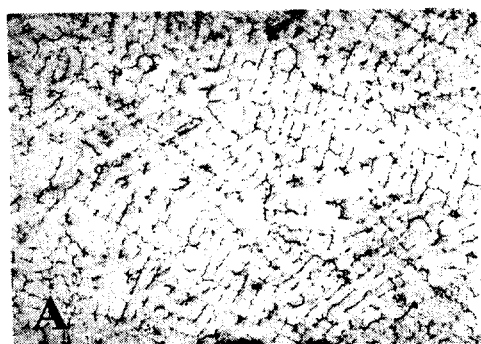
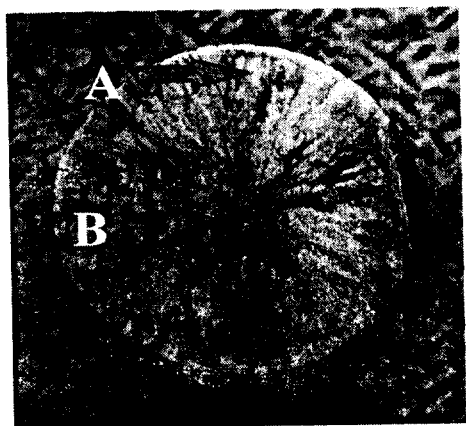
그림 9. 일반 박판재와 반응고교반 박판재의 미세조직



(a) 반응고/냉간압연 판재

(b) 열처리시 재결정

그림 10. 압하율 90%로 냉간압연한 반응고교반 박판재 조직(a) 및 열처리시 재결정 조직(b)



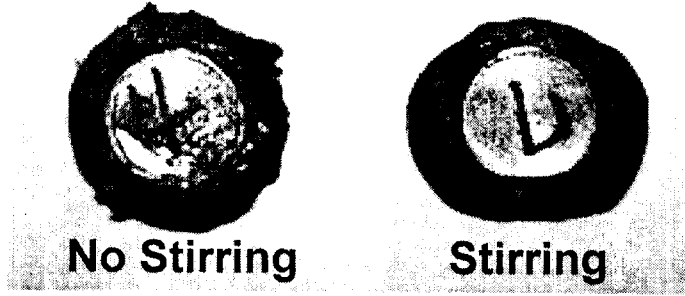
No Stirring

500 μ m

Stirring

그림 11. 무교반빌렛트와 반응교반 빌렛트의 조직

60% 열간압축 (AISI 304)



60% 열간압연 (AISI 304)

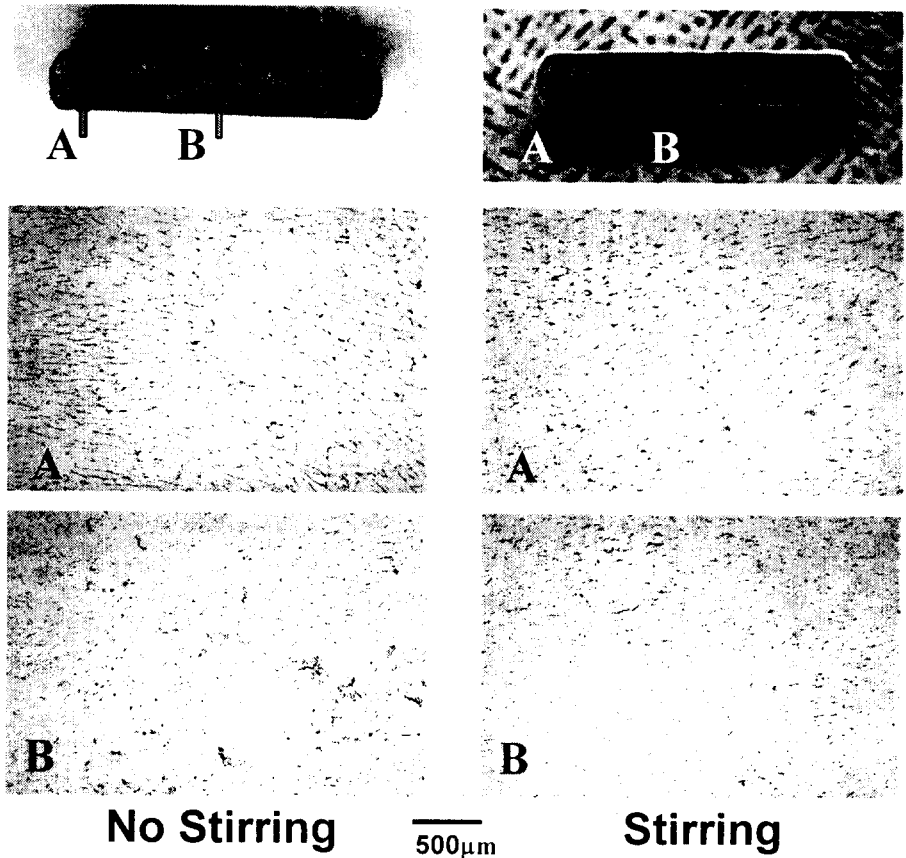


그림 12. 무교반 빌렛과 반응교반 빌렛의 열간압축시 조직변화와 성형성