

Si, Mn, V이 첨가된 비조질강의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 냉각속도의 영향

朴淵瑞 · 崔昌守 · 鄭濟相
경북대학교 금속공학과

Effect of Cooling Velocity on the Microstructures and Mechanical Properties of Si, Mn, V added HSLA Steels

Yon-Seo Park, Chang-Soo Choi and In-Sang Chung

Department of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Abstract Microalloyed steels, which substituted by conventional quenched and tempered steels, have been used in a wide variety of structural and engineering application. The main driving force for preference of MA steels is a cost reduction which can be achieved by an omission of heat treatment. In this study, low carbon martensitic MA steels in 0.18C-0.30(0.60)Si-2.00(1.80)Mn-0.05S-1.5Cr-0.05(0.10)V-0.015Ti(wt%) were investigated to know the effects of cooling method on the mechanical properties and microstructures of Si, Mn, V added microalloyed steel at different reheating temperature. Microstructure of oil quenched steels which were comprised lath martensite, auto-tempered martensite and retained austenite, had more various structure than that of air cooled steel made of mainly bainite. Therefore, oil quenched steels, which had more various microstructure, had better strength-toughness balance compare to air cooled steels. In the impact test, fracture mode of oil quenched steels, which showed good mechanical properties, were dimple, but that of air cooled steels were cleavage.

(Received June 14, 2001)

Key words : Microalloyed steels, Cooling method, Reheating temperature, Auto-tempered martensite(ATM), Mechanical properties

1. 서 론

조질(quenched and tempered, QT)강은 열간 가공 후 재가열, 퀴칭, 템퍼링 과정을 거치면서 강도와 인성을 유지하는 강종이다. 고장력강으로 분류되는 이러한 조질강은 강도와 인성, 가공성, 용접성 등이 우수하여 각종 산업기계, 토목, 건축, 선박 등에 폭 넓게 이용되어 왔으나 급냉시 퀴칭균열, 치수 변화 및 변형 등이 나타날 수 있으며 표면과 내부의 기계적 성질이 달라 안정된 제품을 얻기 어려웠다. 또한 열처리에 큰 설비가 필요하고 작업시에도 많은 인원과 시간을 요하는 공정상의 단점이 있다. 유류 파동 이후 에너지를 많이 소모하는 열처리를 생략하려는 요구가 강력히 대두되었으며[1] 일본과 유럽을 중심으로 그러한 연구가 활발하게 진행되어 지금은 많은 강종이 열처리를 생략할 수 있는 소위 비조질강(microalloyed steel)으로 대체되고 있는 실정이다[2]. 더욱이 최근에 대두되기 시작한 환경문제

와 에너지원이 빈약한 우리 나라의 현실에서 기업들은 에너지 저소비형 산업구조를 촉진시키고, 에너지 효율을 개선하기 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있어 고강도 고인성형 비조질강의 개발 및 산업화는 더욱 각광받을 것이다.

지금까지 연구 조사된 바로는 기지조직이 페라이트+펄라이트 혼합 조직을 가지는 경우 어떠한 탄소 농도 범위에서도 이와 같은 1000 MPa 이상의 인장강도와 100 J/cm² 이상의 충격치를 동시에 얻기는 불가능하다. 하지만 기지조직을 마르텐사이트로 바꾼 경우 탄소 함량 증가에 따른 강도 증가율 및 충격치 감소율이 페라이트+펄라이트 조직보다 훨씬 작다. 즉 높은 탄소 함량으로 인하여 인성이 저하하기 때문에 탄소 함량을 낮추어 인성을 개선하고 탄소 함량 감소에 따른 강도를 보충하는 마르텐사이트 조직을 가지는 비조질강의 개발이 최근의 추세이다[3,4].

따라서 본 연구에서는 기지조직을 마르텐사이트+베이

나이트로 변태시키고 고인성을 얻기 위해 0.18%C의 저탄소강에 Mn, Si, V의 양을 조금씩 변화시킨 3세대형 비조질강을 설계하고, 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 최종 열간 가공 온도 및 냉각속도의 영향을 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

비조질강의 미세조직과 기계적 특성에 영향을 미치는 첨가원소 중, Si, Mn, V의 영향을 알아보기 위하여 Si, Mn, V의 양을 달리하여 합금을 설계하고, 진공유도 용해로를 이용하여 30 kg의 소형강괴를 주조하였다. 주조된 소형강괴의 주조조직과 편석을 감소시키기 위하여 1200°C에서 3시간 동안 균질화처리를 실시하였다. 이후 N₂ 분위기에서 압연 종료 온도를 1050°C로 하여 6 pass, 최종 두께 12 mm로 sizing 압연한 후 판 압연을 실시하였다. 이렇게 가공된 시편의 화학조성은 Table 1과 같다.

서로 다른 최종 열간 가공 온도의 영향을 알아보기 위해 950°C, 1000°C 및 1050°C로 재가열하여 3분간 유지하였으며 이후 냉각속도의 영향을 알아보기 위해 각각의 재가열 온도에서 수냉, 유냉, 공냉의 세가지 방식으로 냉각을 실시하였고, 실험 변수를 최소화하기 위하여 기타 조건은 모두 동일하게 하였으며 열처리과정은 그림 1과 같다.

냉각방식에 따른 냉각 속도의 차이를 알아보기 위해 시편에 구멍을 뚫고 열전대를 삽입한 후 세라믹 본드로 봉인하여 냉각에 따른 냉각 곡선을 구했으며, 그 결과는 그림 2와 같이 나타났다. 본 실험에서 확인한 공냉, 유냉 및 수냉의 냉각 속도는 재가열 온도에서 변태되기 전까지 대략 2.4°C/s, 21°C/s 및 56°C/s로 측정되었다.

상기의 압연 및 재가열 온도(가공 온도)에서 서로 다른 속도로 냉각된 소재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 경도 측정(Hv), 인장시험 및 충격시험을 실시하였다. 인장 시험은 판재의 중심부에서 압연방향에 평행하게

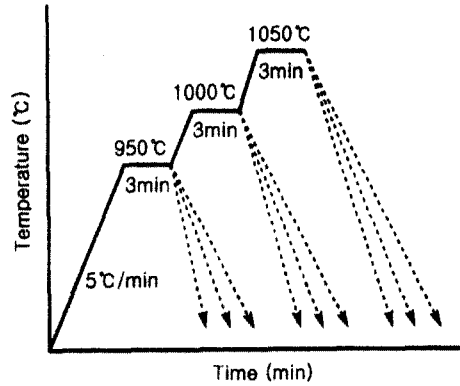


Fig. 1. Heating and cooling process of the specimen.

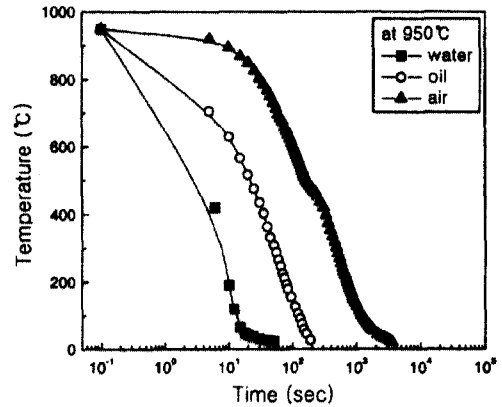


Fig. 2. Cooling profiles of various cooling type.

시료를 채취하여 gauge length 20 mm, 평행부 직경 4 mm인 봉상의 ASTM E8 규격으로 제작하여 instron type 인장시험기를 사용하여 초기변형속도 8.3 × 10⁻⁴/sec로 상온에서 실시하였다. 충격 시험은 판재의 중심부에서 압연방향에 평행하게 시료를 채취하여 ASTM E23 V-notch 표준 시편으로 제작하여 30 kg 용량의 Charpy 충격 시험기로 실시하였다. 각 시험 조건별로 TEM 관찰을 통하여 미세 조직의 변화를 조사하였으며, 주요한 석출물의 크기와 분포 등을 조사하기 위해

Table 1. Chemical composition of the specimens. (wt%)

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ti	N(ppm)
1	0.181	0.302	1.95	0.014	0.055	1.5	0.046	0.014	48
2	0.178	0.308	1.95	0.014	0.057	1.5	0.056	0.013	59
3	0.182	0.306	1.95	0.014	0.059	1.5	0.056	0.013	57
4	0.176	0.308	1.95	0.015	0.058	1.49	0.056	0.012	62

carbon-replica를 이용하여 TEM 관찰을 실시하였고, 석출물의 성분조사를 위해 EDS 분석을 실시하였다. 또한 XRD로 상변화를 조사하였으며, 충격시험 후 파괴 모드의 차이를 조사하기 위하여 SEM을 이용하여 파면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 경도 변화

각 시편의 재가열 온도 및 냉각방법에 따른 경도를 그림 3에 나타내었다. 재가열 온도에 따른 경도는 시편의 종류에 관계없이 1000°C에서 가장 높게 나타났다. 일반적으로 재가열 온도가 높아지면, 고용강화와 급냉효과에 의해 경도가 높아지는 효과와 석출물들이 오스테나이트에 재용해되어 결정립 성장을 억제시킬 수 있는 요인이 감소하여 경도가 낮아지는 두 가지 효과가 동시에 나타난다. 이러한 두 가지의 대립적인 요소에 의해서 경도는 변화하게 되고, 본 연구에서는 재가열 온도 1000°C에서 경도가 가장 높게 나타났다.

냉각속도가 56°C/s(수냉), 21°C/s(유냉), 2.4°C/s(공냉)

일 경우의 경도를 비교해 보면, 각각 Hv 436~552, 436~512, 340~406로 나타났다. 0.2%C 강의 마르텐사이트의 경도는 Hv 400 이상으로 알려져 있다[5]. 이와 비교해 볼 때 수냉재 및 유냉재는 기지 조직이 마르텐사이트인 것으로 판단되며, 공냉재는 부분적인 마르텐사이트와 베이나이트 조직인 것으로 생각된다.

첨가원소의 영향을 알아보기 위해 그림 3을 재구성하여 각 시편의 경도를 각각의 재가열 온도별로 그림 4에 나타내었다. 1번 시편에 비해 Mn 함량이 0.17 wt% 감소하여 1.78 wt%인 2번 시편의 경우 재가열 온도 950°C, 유냉과 수냉에서 경도가 증가한 것을 제외하면, 전체적으로 경도의 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 그리고 2번 시편에 비해 Si 함량이 두 배로 증가한 3번 시편에서는, 2번 시편에 비해 전반적으로 Si 증가에 의한 고용강화 효과의 증가로 경도가 증가하였다. V 함량이 증가한 4번 시편의 경우, 공냉에서는 V의 석출강화 효과로 재가열 온도에 관계없이 모두 경도가 증가하였으나, 유냉과 수냉에서는 경도가 감소하는 추세를 보이는데, 이는 냉각속도가 빠르기 때문에 석출강화 효과가 덜 작용하고, 또한 적은 양이긴 하지만 C

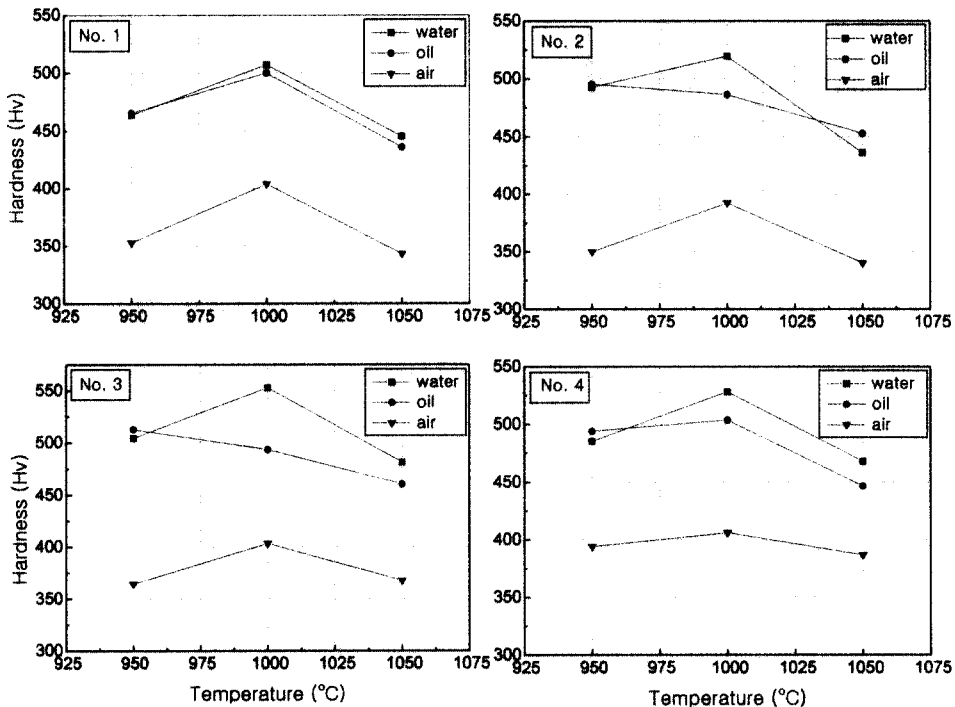


Fig. 3. Variation of the hardness according to reheating temperature and cooling type for each specimens.

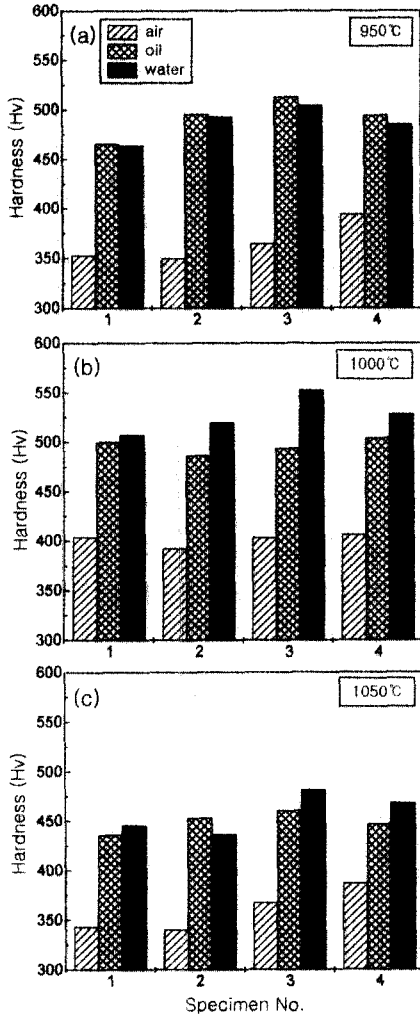


Fig. 4. Effect of additional elements and cooling type on micro-Vickers hardness at different reheating temperature. a) 950°C, b) 1000°C, c) 1050°C.

량의 감소가 원인이라 생각된다.

3.2. 인장강도 및 충격인성의 변화

그림 5와 그림 6은 각 시편을 3가지 재가열 온도에 서 공냉, 유냉, 수냉한 다음, 실시한 인장시험 결과이다. 그림 5를 보면, 유냉과 수냉한 시편의 인장강도가 1400~1550 MPa로 아주 높게 나타났으며, 수냉한 시편의 인장강도가 유냉한 시편보다 다소 높게 나타났다. 그러나 각 시편의 첨가원소 함량이 다름에도 불구하고 시편별로는 큰 차이가 나타나지 않고 있다. 공냉의 경

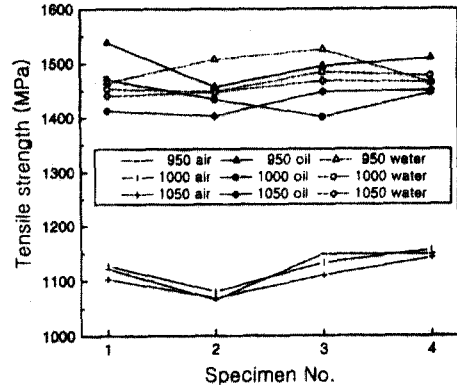


Fig. 5. Effect of additional elements and cooling type on tensile strength at 950°C, 1000°C, 1050°C temperature.

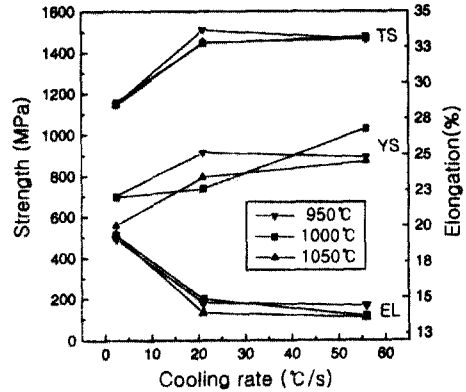


Fig. 6. Effect of cooling rate and temperature on tensile strength, yield strength and elongation (EL) of No. 4 specimen.

우, 인장강도가 1050~1150 MPa로 유냉이나 수냉한 시편에 비해 350~400 MPa 정도 낮게 나타났으며, 2번 시편이 가장 낮고 4번 시편이 비교적 높게 나타났다. 그리고 재가열 온도에 따른 인장강도의 차이는 거의 없는 것으로 보인다.

그림 6은 4번 시편의 인장시험 결과로서, 냉각속도에 따른 인장강도, 항복강도, 연신율의 변화를 나타내었다. 냉각속도가 21°C/s 이상으로 빠른 수냉재 및 유냉재는 950°C, 1000°C, 1050°C 모두에서 1400 MPa 이상의 높은 인장강도를 가지며, 항복강도는 약 700~1000 MPa로 수냉한 시편이 다소 높게 나타났으며, 연신율은 14~15% 정도였다. 이에 반해 냉각 속도가 2.4°C/s로 느린 공냉재의 경우에는 연신율이 18~19% 정도로 나

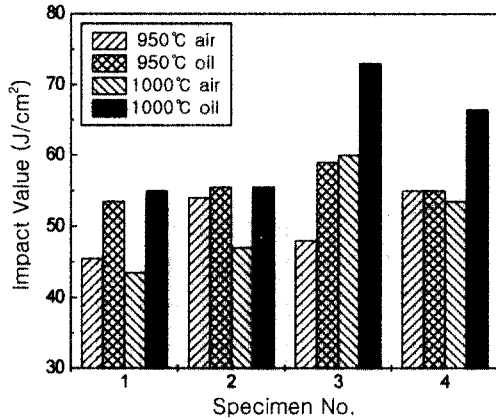


Fig. 7. Effect of cooling rate and temperature on impact toughness.

타났고, 인장강도도 1100 MPa 정도의 비교적 높은 값을 나타내고 있다.

마르텐사이트계 비조질강의 주된 강화 기구는 마르텐사이트 변태에 따른 변태강화이다. 냉각속도에 따른 강도를 비교해 보면, 냉각속도 2.4°C/s의 공냉재가 수냉, 유냉재에 비해 상당히 낮게 나타나고 있는데, 이는 냉각속도가 느려서 마르텐사이트 변태 대신 베이나이트 변태가 일어나 기지가 충분히 강화되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 그림 6에서 나타나는 바와 같이, 냉각속도가 느린 공냉에서 냉각속도가 빠른 유냉으로 바뀔 때 강도는 크게 증가하고 연신률은 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 냉각속도를 더욱 빠르게 하기 위해 냉각방법을 수냉으로 하더라도 강도와 연신률은 별로 변하지 않는 것으로 나타났다.

그림 7은 각 시편의 재가열 온도와 냉각속도에 따른 충격 인성치의 변화를 나타낸 자료이다. Si 함량이 가장 많은 3, 4번 시편에서 재가열 온도 1000°C, 냉각속도가 21°C/s인 유냉재의 충격인성이 각각 73 J/cm², 67 J/cm²로 가장 우수하게 나타났다. 그리고 충격 인성에 미치는 재가열 온도와 냉각속도의 영향은 시편에 따라서 각각 상이하게 나타나고 있으나, 전체적으로 볼 때 유냉한 시편의 충격 인성이 공냉한 시편의 충격 인성보다 다소 높게 나타나고 있다.

그림 8은 충격인성이 가장 큰 3번 시편의 충격시험 후 파면사진이다. 충격치가 비교적 높은 유냉재의 경우 시편 가장자리를 따라 shear lip이 넓게 나타났으며, 미세 파면 조직은 전반적으로 dimple 파괴 양상을 보이

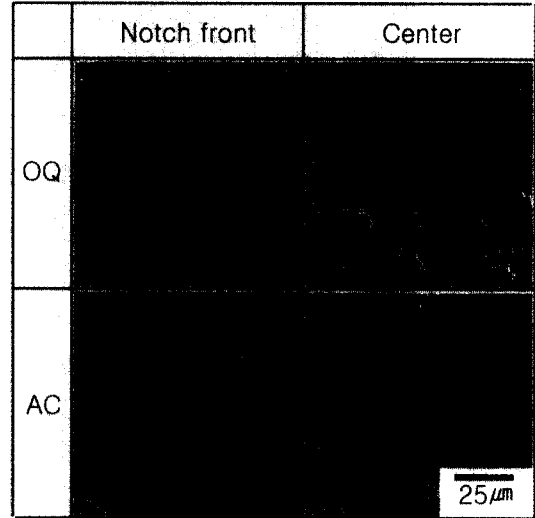


Fig. 8. SEM fractographs of charpy impact specimen of No. 3 (1000°C). (OQ: oil quenching, AC: air cooling.)

고 중앙에서 부분적으로 quasi-cleavage 파괴양상을 나타냈다. 공냉재의 경우 온도에 상관없이 shear lip이 없고, 미세 파면 조직은 시편 전체에 걸쳐 취성파괴의 전형적인 특징인 벽개 파괴 양상을 보이고 있다.

3.3. 미세조직에 미치는 냉각속도의 영향

미세조직에 미치는 냉각속도의 영향을 알아보기 위해 냉각속도가 서로 다른 시료에 대해 TEM으로 미세조직을 관찰하고, XRD, EDS를 이용하여 상분석 및 석출물의 성분 분석을 실시하였다. 그리고 조성에 따른 미세조직의 차이는 그리 크지 않은 것으로 관찰되었으므로 여기서는 3번 시편에서 미세조직에 미치는 냉각속도의 영향에 관하여 고찰한다.

그림 9는 냉각속도가 서로 다른 수냉재, 공냉재 및 유냉재의 미세조직이며, 그림 10은 XRD 분석 결과이다. 그림 10을 보면, 냉각방법에 따른 차이는 거의 없는 것으로 판단되며, 아주 적은 양이긴 하지만 모두 잔류 오스테나이트가 존재하는 것으로 나타났다. 그림 9를 보면, 냉각속도가 가장 빠른 수냉재의 미세조직은 폭이 좁은 래스 형태로 구성되어 있으며, 래스 마르텐사이트, 오토-템퍼드 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트 등으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그리고 유냉재의 미세조직은 폭이 좁은 래스와 비교적 폭이 넓은 두가지 형태의 래스로 구성되어 있고, 래스와 래스 사이에 잔류 오스테나

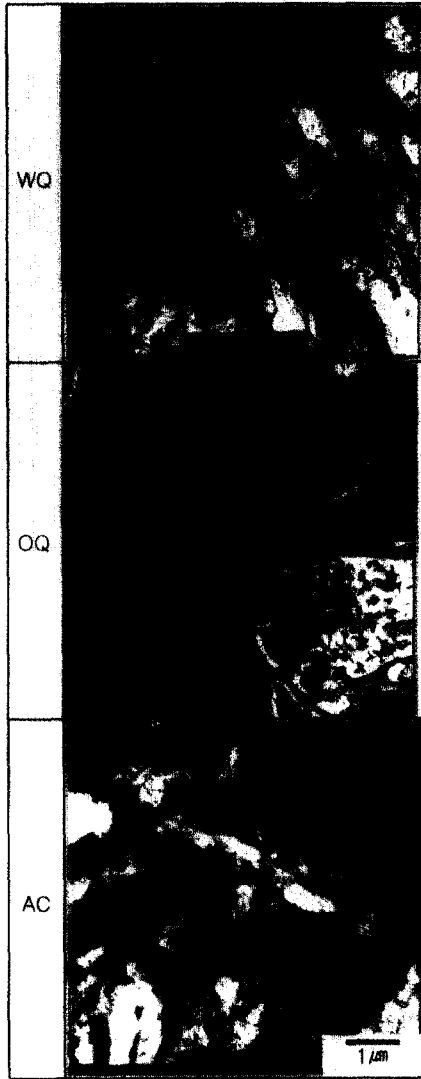


Fig. 9. TEM microstructures of steel with different cooling type (1000°C).

이트가 film 상태로 존재하는 것으로 생각된다. 비교적 폭이 넓은 래스를 보면, 래스 내부에 미세한 석출물이 방향성을 가지고 석출되어 있는 것으로 보아 폭이 넓은 래스는 전형적인 오토-템퍼드 마르텐사이트로 사료된다 [6]. 공냉재의 TEM 미세조직을 관찰한 결과, 수냉재나 유냉재에 비해 조대한 래스 형태로 구성되어 있는 것을 볼 수 있었으며, 래스의 일부에는 미세한 탄화물(carbide)이 존재하고 있었으나 탄화물이 없는 래스도 관찰되었다. 공냉재의 경도는 Hv 360 정도로 나타났는데, 페라

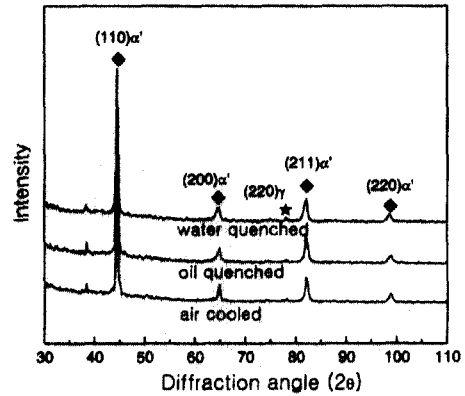


Fig. 10. X-ray diffraction patterns of No. 3 steels with various cooling type; (a) water quenched, (b) oil quenched, (c) air cooled.

이트의 경도치가 통상 Hv 200을 넘지 않는다는 사실을 고려할 때, 공냉재의 기지조직은 페라이트가 아닌 다른 상이라고 생각된다. 페라이트가 아닌 경우 가능성 있는 조직은 베이나이트이며, 미세조직 관찰 결과 탄화물이 존재하는 래스는 하부 베이나이트(low bainite)이고 탄화물이 없는 래스는 베이니틱 페라이트(bainitic ferrite)인 것으로 생각된다. 따라서 공냉재는 베이나이트 기지에 잔류 오스테나이트가 포함되어 있는 단순한 조직으로 이루어져 있는 것으로 판단된다.

그림 11은 carbon replica를 이용하여 TEM으로 관찰한 석출물의 형상이다. 수냉재의 경우 10 nm 정도의 미세한 석출물들이 존재하고, 유냉재의 경우는 수냉재와 비슷하지만 좀 더 큰 석출물들이 함께 존재하고 석출물들이 미세하게 골고루 분포하는 것으로 나타났다. 이들 석출물들은 EDS 분석결과 주로 V, Ti 탄질화물(VN, TiN)과 Fe 탄화물로 나타났다.

3.4. 기계적 성질에 미치는 미세조직의 영향

유냉재의 미세조직은 래스 마르텐사이트, 오토-템퍼드 마르텐사이트, 래스와 래스 사이의 잔류 오스테나이트 등으로 다양하게 구성되어 있다. 그러므로 충격시 균열이 전파될 때 각각의 상들이 균열전파의 장애물로 작용하며, 또한 래스와 래스 사이에 film 상태로 존재하는 잔류 오스테나이트가 변형시 TRIP 현상을 [7] 일으켜 고인성을 나타내는 것으로 판단된다.

공냉재는 베이나이트 기지에 잔류 오스테나이트가 포함되어 있는 단순한 조직으로 이루어져 있다. 베이나

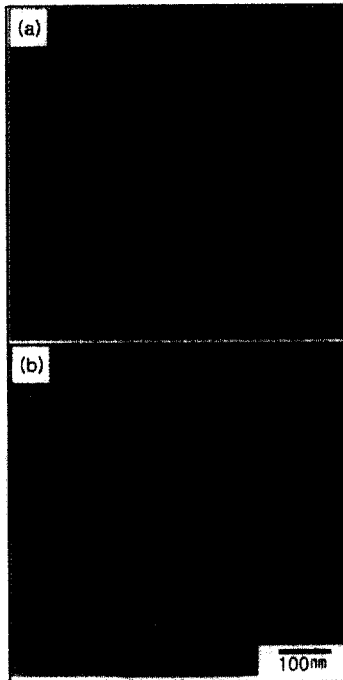


Fig. 11. Precipitates of (a) water and (b) oil quenched specimen of No. 4.(carbon replica).

트 조직 그 자체는 인성이 우수한 편이지만 단순한 조직을 이루고 있어서 충격시 균열 전파에 대한 장벽이 적기 때문에 저인성을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 베이나이트 변태가 비교적 고온에서 일어나므로 오스테나이트에서 페라이트로 변태시 탄소가 미변태 오스테나이트로 확산하여 오스테나이트의 탄소 농도가 증가하게 되고, Ms 이하로 냉각됨에 따라 잔류 오스테나이트의 일부가 쌍정 마르텐사이트로 변태하게 된다. 이 쌍정 마르텐사이트가 충격시 균열 발생의 기점으로 작용하여 인성을 열화[7]시키는 것으로 생각된다. 따라서 상온에서 충격시험을 실시하는 경우에, 공냉재는 상온이 천이 온도 아래인 취성영역에 속하므로 충격을 가하는 경우 시편 내부에 골고루 분포하고 있는 쌍정 마르텐사이트에서 동시다발적으로 균열이 발생하고, 또 급격히 전파되기 때문에 충격에너지 값이 낮고, 또 충격파면이 벽 개파면 형태로 되는 것으로 생각된다.

실제로 V은 강의 조성과 온도에 따라 VN, V(C,N), VC로 석출하고, VN이 VC보다 더 낮은 용해도(solubility)를 가지므로 VC보다는 VN의 석출이 우선적으로 일어난다. 또한 VC는 주로 페라이트 결정립계에 우선적

으로 석출하여 재료의 취성을 증가시키지만, VN은 비교적 결정립내에 고르게 분산 석출하여 재료를 강화시키는 것으로 알려져 있다[8]. 그러므로 10~20 nm 정도의 미세한 석출물들이 분산된 유냉재가 공냉재에 비해 고강도와 고인성을 나타내는 원인으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같이 비조질강의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 첨가원소(Si, Mn, V)와 열처리의 영향에 관하여 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 수냉재의 미세조직은 래스 마르텐사이트, 오토-템퍼드 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트 등으로 이루어져 있으며, 유냉재의 기저조직은 수냉재와 유사하였으나 수냉재 보다 오토-템퍼드 마르텐사이트가 많이 분포하였고, 석출물의 크기가 조금 성장한 것으로 나타났으며, 공냉재는 단순한 베이나이트 조직으로 나타났다.

2. 다양한 기저 조직을 가지는 수냉재 및 유냉재가 공냉재보다 강도-충격치 모두 우수하였으며, 특히 유냉재가 오토-템퍼링 효과에 의해 강도-충격치 balance가 가장 양호하였다. 강도-충격치 balance가 가장 양호한 경우는 1000°C로 재가열하여 유냉한 3번 시편의 경우로 강도-충격치는 각각 1401 MPa-78 J/cm² 이다.

3. 재질 특성이 우수한 유냉재의 충격 파괴 모드는 재가열 온도와 첨가원소의 변화에 관계없이 모두 전형적인 연성파괴의 dimple 파괴 모드를 나타낸 반면 공냉재는 전반적으로 취성파괴인 cleavage 파괴양상을 나타내었다.

4. 첨가원소에 따른 영향에서 Si 함량을 0.3에서 0.6 wt%로 증가시켰을 경우 인장강도와 충격인성에 좋은 영향을 나타내었고, Mn 함량을 2.0에서 1.8 wt%로 감소시켰을 경우 인장강도에는 좋지 않은 영향을 미치나 충격 인성에는 별 영향을 나타내지 않았고, V 함량을 0.05에서 0.10 wt%로 증가시켰을 경우는 인장강도에는 유리하게 작용하나 충격인성에는 불리하게 작용하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. I. Nomura : *Materia Japan*, 34 (1995) 705.
2. T. Inoue and M. Katsumata : *Netshori*, 33 (1992) 11.
3. P. H. Wright : *Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress*, 12 (1988) 29.

4. M. Kastsumata : CAMP-ISIJ, 5 (1992) 805.
5. J. G. Kim, K. Y Kim, H. W. Park : "Metallographie", Gold Publish (1999) 228.
6. Y. Ohmori, H. Ohtani and T. Kunitake : Tetsu to Hagane, 10 (1971) 96.
7. B. V. Narasimha Rao and G. Thomas : Metall. Trans. A, 11A (1980) 441.
8. D. L. Lee, S. W. Park and W. Y. Choo : J. of the Korean Inst. of Met. & Mater. 34 (1996) 560.