

## 비조질강의 개발 동향

이덕락

( POSCO 기술연구소 후판선재연구그룹)

### The Current Status of the Development of Heat-Treatment-Free Steel

Duck Lak Lee

#### Abstract

Heat-treatment-free steels have been replacing for conventional quenched-and-tempered structural steels since the microalloyed forging steel was developed in early 1970s in Germany. Substantial cost reduction provides the driving force for this change. As a result of intensive R & D efforts and application trials, various kinds of grades, for example heat-treatment-free steels for hot forging, machining and cold heading, have been developed and moreover these steels are in tonnage production throughout the world. The developments in alloy steels, processing conditions and structure-property characteristics of the heat-treatment-free steels, are described and also recent trend and future prospect are summarized in this report.

**Key Words** : Heat-Treatment-Free, Microalloyed, Forging, Machining, Cold Heading

#### 1. 서 론

1970년대 초반에 개발되어 실용화가 시작된 기계구조 부품용의 비조질강은 자동차 및 산업 기계분야 등을 중심으로 구미, 일본 등 선진국에서 이미 폭넓게 사용되어 기계구조용강의 새로운 한 분야를 차지하고 있다.<sup>(1-3)</sup> 종래의 조질강은 소입소려처리 (quenching & tempering) 를 함으로써 소정의 강도 및 인성을 확보하였으나 이러한 열처리를 생략하는 비조질강은 부품의 열처리비용 절감, 공정 간략화에 따른 납기단축, 생산성 향상 등의 효과를 기대할 수 있는 경제적인 강재라 할 수 있다.

개발 초기 비조질강<sup>(4)</sup>은 자동차의 크랭크 샤프트(crank shaft) 등 대체적으로 인성(靱性)이 크게 요구되지 않는

부품에 한정되어 사용되었지만, 자동차 회전부품 등으로 그 적용 범위가 점차 확대되면서 비조질강의 인성향상에 대한 요구가 높아지고 있고, 또한 최근에는 자동차의 경량화추세에 따라 강도와 인성향상이 동시에 요구되고 있어 이에 부응하기 위한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.

뿐만 아니라 강재의 사용측면에서도 비조질강의 실용화를 위하여 비조질강 부품의 신뢰성 평가기술, 비조질강의 열간단조 조건의 최적화 및 절삭가공 조건의 최적화 등 강재의 제조 측면과 사용 측면 모두 비조질강에 관한 연구개발이 적극적으로 진행되고 있으며, 그 결과 다양한 종류의 비조질강이 개발되어 국내외적으로 양산되고 있다.

## 2. 비조질강의 종류와 특징

비조질강의 사용용도에 따른 종류와 제조공정을 Table 1 에 나타내었다.<sup>(2)</sup> 비조질강은 크게 열간단조용, 직접절삭용 및 냉간압조용으로 나누어지며, 주로 봉강으로 제조되는 열간단조용과 직접절삭용 비조질강은 2차 가공공정에서 소입소려 열처리 공정을 생략하며, 선재로 제조되는 냉간압조용 비조질강은 2차 가공공정에서 구상화 열처리와 소입소려 열처리를 모두 생략할 수 있는 강재이다.

### 2.1 열간단조용 비조질강

비조질강 중 현재 가장 많이 사용되며, 또한 활발한 연구가 이루어지고 있는 분야는 열간단조용 비조질강 분야로서, 1972년 독일 Thyssen사에서 49MnVS3 라는 최초의 열간단조용 비조질강 개발하였는데,<sup>(4)</sup> 이 강の特徴은 ferrite + pearlite 조직 내에 미세한 VC 또는 V(C,N)을 석출시켜 소입소려 열처리한 강과 동일한 강도를 얻도록 한 것이다. 그러나 초기 비조질강의 충격인성이 기존 열처리강에 비해 상당히 떨어지기 때문에 비조질강의 인성 향상을 위한 많은 연구들이 이루어졌으며, 최근에는 고강도, 고인성의 특성을 갖는 비조질 강재도 많이 개발되었다. 이러한 열간단조용 비조질강의 개발흐름을 정리하면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

제1세대형인 기본형은 중탄소강에 V를 첨가한 것으로 인장강도 85kg/mm<sup>2</sup> 내외에 충격치가 50J/cm<sup>2</sup> 이하의 기계적성질을 가지며, 제2세대형은 기본형보다 우수한 충격

치가 요구되는 부품에 사용하고자 개발된 것으로서, 강에 Ti를 미량 첨가하여 austenite 입자 미세화를 통하여 인성을 향상시킨 것<sup>(1)</sup>과 Mo를 소량 첨가하여 미세조직을 acicular ferrite로 만들어줌으로써 강을 강인화시킨 것<sup>(5)</sup> 등 2가지 종류가 있다. 제2세대형 비조질강의 기계적 성질은 인장강도는 기본형과 유사하나 충격치는 약 70J/cm<sup>2</sup> 내외로 많이 향상되었다.

제3세대형은 강도와 인성을 동시에 높여서 Cr, Mo를 함유하고 있는 저합금강을 대체할 목적으로 개발되었다. 강の特徴은 탄소함량을 0.1%이하로 낮추어 줌으로써 인성을 크게 향상시키고, 제어냉각으로 미세조직을 martensite로 변태시킴으로써 강도를 증가시킨다. 제3세대형 고강도, 고인성강은 인장강도가 100kg/mm<sup>2</sup>이 넘고, 충격치 또한 100J/cm<sup>2</sup>을 상회한다.<sup>(3)</sup>

### 2.2 직접절삭용 비조질강

직접절삭용 비조질강은 2차 가공 공정에서 더 이상의 열간가공 없이 as-rolled상태의 소재를 절삭가공하여 사용하기 때문에 열간압연 상태에서의 기계적 성질이 최종 제품의 기계적 성질이 된다. 따라서 적절한 성분조정과 제어압연, 제어냉각을 통하여 as-rolled상태에서 필요 강도와 인성을 보유하도록 하여야 한다. 중탄소계 절삭용 비조질강의 화학성분은 S40C~S45C급의 탄소강을 base로 석출강화 원소인 V이 첨가되고, 저탄소계 절삭용 비조질강은 인성향상을 위해 S25C~S30C급 탄소강에 Mn, Cr 등의 합금원소를 더 증량 첨가한 것을 기본으로 한다.

Table 1 Classification of heat-treatment-free steels

분류	기본조성	제조공정 비교		적용부품(예)
열간 단조용	중탄소강+V 중탄소Mn강+V 등	비조질	압연강재 -> 열간단조(조건관리) -> 기계가공	crank shaft con-rod
	중탄소강	조질	압연강재 -> 열간단조 -> <b>조질처리</b> -> 기계가공	
직접 절삭용	중탄소강+V 중탄소Mn강+V 등	비조질	압연강재(제어압연) -> 기계가공	rod pin
	중탄소강	조질	압연강재 -> <b>조질처리</b> -> 기계가공	
냉간 단조용	저탄소Mn강 +V, Ti, Nb, B 등	비조질	압연강재(제어압연, 제어냉각) -> 인발가공 -> 기계가공	bolt tie rod
	중탄소강	조질	압연강재 -> <b>소둔</b> -> 인발가공 -> 냉간성형 -> <b>조질처리</b>	

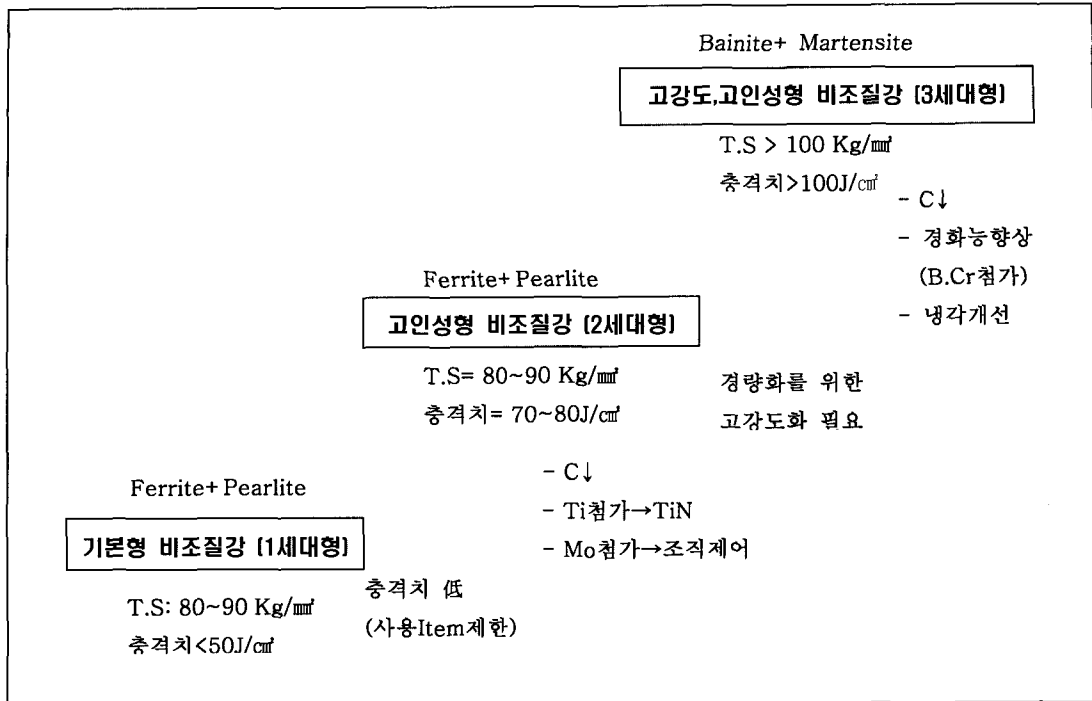


Fig. 1 Trend of the development of microalloyed forging steel

### 2.3 냉간압조용 비조질강

냉간압조용 비조질강은 가공 측면에서는 구상화소둔 등의 연화열처리 없이 냉간압조 가공이 가능하고, 재질 측면에서는 소입소려 열처리 없이 최종제품의 요구재질을 만족하도록 개발된 강재를 말한다. 냉간압조용 비조질강의 우수한 냉간가공성과 기계적 성질은 화학성분과 제조조건에 의해 결정되어 지는데, 연성 및 인성을 효과적으로 증가시키기 위해 일반적으로 탄소함량을 낮추어 주며, 필요한 강도는 Mn 첨가에 의한 고용강화 또는 Nb, V, Ti 등 탄질화물 형성원소 첨가에 의한 석출강화에 의해 확보하며, 제어압연, 제어냉각에 의한 입자 미세화를 통해 강도와 인성을 동시에 증가시킨다.

냉간압조용 비조질강은 주로 bolt, nut 용으로 사용되는데, 비조질강을 강도별로 분류하면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 70, 80, 90, 110kg/mm<sup>2</sup> 급으로 나눌 수 있으며 70~80kg/mm<sup>2</sup> 급은 미세조직이 ferrite + pearlite이나, 90kg/mm<sup>2</sup> 급 이상은 기본 조직을 bainite로 하여 목표강도와 인성을 확보하고 있다.

### 3. 비조질강의 야금학

#### 3.1 비조질강의 강화기구

상용되고 있는 거의 모든 종류의 비조질강의 미세조직은 ferrite와 pearlite로 구성되어 있다. Ferrite의 강도는 주로 결정립 크기와 고용강화에 의해 좌우되며, pearlite의 강도는 주로 inter-lamellar spacing에 의해 좌우된다. 중탄소강에서 강도는 탄소함량, 즉 pearlite 분율에 가장 큰 영향을 받게 된다. 동일한 탄소함량에서는 austenite가 조대할수록 pearlite 분율이 증가하여 강도가 증가하게 되며, 냉각속도가 증가할수록 inter-lamellar spacing이 미세하여 강도가 증가하게 된다.

Ferrite와 pearlite 조직을 가지는 비조질강의 강도를 tempered martensite 조직을 가지는 열처리강과 동일하게 하기 위하여 미량합금원소의 석출강화를 주로 활용한다. 석출물은 proeutectoid ferrite와 pearlite 내의 ferrite lamellar에 석출된다. 석출강화 효과를 최대한 얻기 위해서는, 재가열시 미량원소는 완전히 재고용되어야 하며 열간조 혹은 열간압연 후 냉각과정에서 미세하게 석출되어야 한다. 3가지의 미량합금원소 즉, Nb, Ti, V 중에서 V만이 탄소함량에 상관없이 austenite에 큰 고용도를 보인다. V은 탄소보다는 질소에 대한 친화력이 더 크기 때

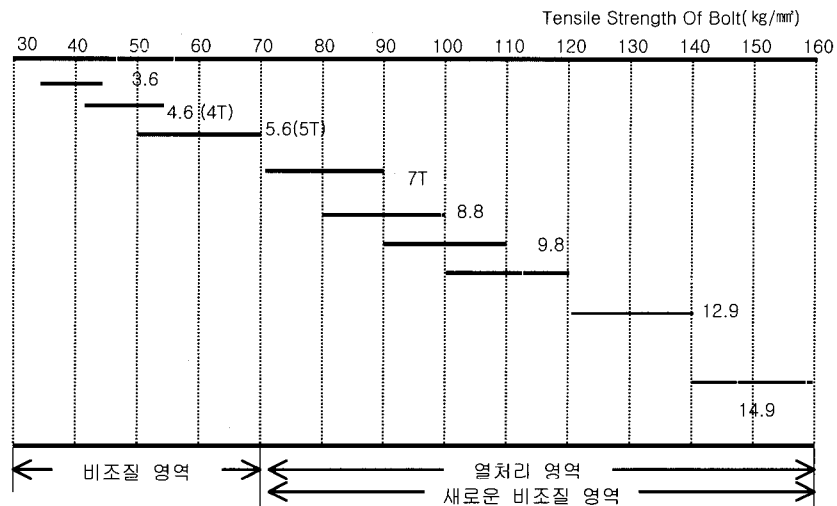


Fig. 2 Fastener grades based on tensile strength

문에 강종 성분에 따라, 질화물, 탄화물 및 탄질화물이 생성될 수 있다.

### 3.2 비조질강의 인성 향상

Ferrite와 pearlite 미세조직 강도의 인성에 영향을 미치는 주요 인자로 pearlite의 부피 분율과 변태전의 austenite 크기를 꼽을 수 있다. 탄소함량을 낮추어서 pearlite 함량을 줄임으로써 강도의 인성을 대폭 개선시킬 수 있다.

이 때 탄소함량 저감에 따른 강도 감소는 Mn, V 첨가량을 증가시킴으로써 보상할 수가 있다.<sup>(6)</sup> Austenite 입자 미세화는 pearlite 조직강도의 인성 개선에 가장 영향력이 큰 요인이라할 수 있다. Austenite 입자 미세화는 재가열 온도를 낮추거나 열간단조 및 열간압연 온도를 내림으로써 얻을 수 있으며, 다른 한가지 방법은 TiN과 같은 안정한 석출물을 이용하여 austenite 입자 성장을 억제시키는 방법이 있다. TiN을 활용하여 입자 성장을 억제시키기 위해서는 가능한 미세한 TiN 입자를 다량 석출시켜야 한다.

이를 위해 Ti과 N의 첨가량을 화학양론적 비율(대략 4:1)로 첨가하기 보다는 N 양을 조금 더 많이 첨가하여 TiN의 안정성을 증가시켜주는 것이 austenite 결정립 성장 억제에 바람직한 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

### 3.3 비조질강의 냉간가공성 향상

냉간압조용 비조질강은 연화소둔 열처리를 생략한 상

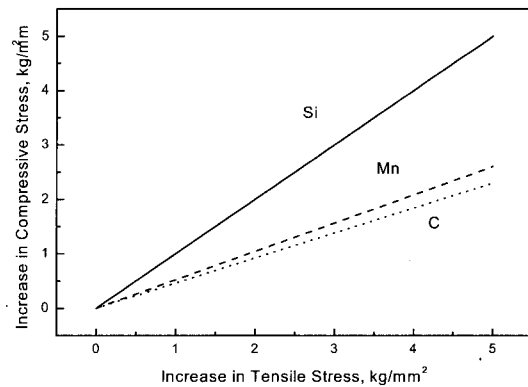


Fig. 3 Effect of alloying elements on deformation resistance

태에서 냉간 압조 가공을 실시하므로 냉간가공성이 무엇보다도 중요하다. 냉간가공성이 우수하지 못할 경우, 공구 마모량이 너무 크기 때문에 열처리 생략에 의한 원가 절감 효과가 거의 상실되어 버리므로 비조질강으로서의 의미가 없어지게 된다. 냉간가공성을 평가하는 여러가지 인자 중에서도 공구 수명과 직결되는 것은 변형저항값이다. 냉간압조 가공전 신선가공량을 적절히 제어하여 바우싱거효과<sup>(8)</sup>를 최대한으로 이용하여 변형저항값을 낮추거나, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 변형저항값 상승에 큰 영향을 미치는 Si을 최소화시켜 냉간가공성을 증가시키는 방법 등이 보고되고 있다.

3.4 Bainite/Martensite조직을 이용한 강인화

비조질강의 사용 범위가 확대되고, 보다 가혹한 환경에서 사용 가능한 비조질강에 대한 요구가 커짐에 따라 고강도, 고인성 비조질강에 대한 연구개발이 최근 들어 활발히 이루어지고 있다. 자동차 회전 부품에 사용될 수 있는 비조질강의 기본 요구 물성치는 인장강도 1000MPa 이상, 충격치 100J/cm<sup>2</sup> 이상이다. 이러한 물성치는 기존의 ferrite - pearlite 조직으로서는 달성이 곤란하다.

Fig. 4는 탄소함량에 따른 ferrite-pearlite (F/P) 조직강과 martensite-bainite (M/B) 조직강의 강도와 인성 변화를 보여주는 그래프이다.<sup>(3)</sup> 2가지 종류의 미세조직강 모두 탄소함량이 증가함에 따라 강도는 증가하며 충격치는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 그래프에서 보면 인장강도 1000MPa와 충격치 100J/mm<sup>2</sup>을 동시에 만족하는 구간이 F/P조직강에서는 존재하지 않으나 M/B조직강에서는 저탄소 영역에서 목표로 하는 기계적 성질을 만족하는 구간이 존재한다. 따라서 향후 고강도, 고인성 비조질강은 저탄소 martensite-bainite 조직을 주로 이용하는 방향으로 개발이 진행 될 것으로 예상된다.

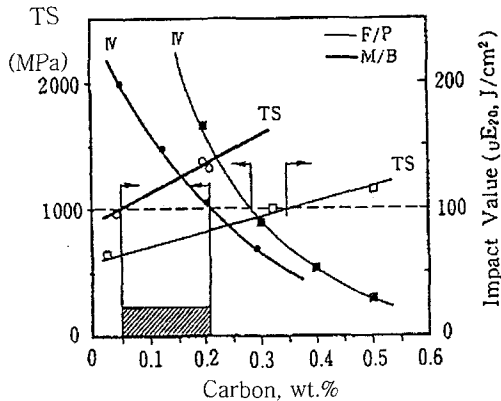


Fig. 4 The effect of carbon content on the tensile strength and impact value

4. 국내외 개발현황 및 향후 전망

기계구조용 비조질강의 최초 개발지인 유럽에서는 자동차용 단조제품이 대부분 비조질강으로 대체되어 사용 중이다. 1989년 발표된 자료에 의하면 당시 Volvo 자동차의 단조부품의 50%는 이미 비조질강으로 대체되어 사용되는 것으로 알려져 있다. 미국의 경우도 유럽에 비해

서는 많이 뒤졌지만 자동차용 열간단조용 비조질강 중심으로 연구개발 및 실용화가 점차 이루어지고 있다. 일본의 비조질강 개발 및 실용화는 독일 등 유럽보다 10년 정도 늦은 1980년대부터 시작되었으며 현재 약 40 여개사에서 제조 판매하고 있다. 일본도 구미 상황과 비슷하여 열간단조용 비조질강을 중심으로 활발히 적용이 되고 있으며 신제품도 지속적으로 연구 개발되고 있다. 특히 열간단조용 비조질강의 경우, 초기에는 주로 crank shaft 등에 주로 적용하였으나 고강도, 고인성화로 합금강을 대체할 수 있는 인장강도 1000N/mm<sup>2</sup> 수준의 제3세대형 강재가 실용화 되고 있다. 일본 소재 maker들의 향후 기술적 과제로는 강도(피로강도), 인성, 절삭성, 재료가격 등이 적절하게 균형을 이룰 수 있는 강재 개발에 초점을 맞추고 있으며, 판매 및 수요측면에 있어서는 산업기계, 공작기계 분야에는 주로 절삭 가공용, 그리고 자동차, 산업기계 분야에는 주로 단조가공용의 수요가 증가할 것으로 예상하고 있다.

국내에서도 '80년대 후반부터 연구 개발이 이루어져서 90년대 중반 이후 비조질강의 양산이 이루어지고 있다. 선제 제조업체는 자동차용 rack bar 등과 같이 선경이 작은 비조질강을 주로 생산하고 있고, 봉강 업체들은 자동차용 connecting rod와 같은 열간단조용 비조질강을 주로 생산하고 있다.

향후, 일본 등 해외에서는 종래에 열처리한 합금강을 사용하던 제품들에 대한 비조질강 대체를 위한 연구가 지속적으로 이루어져 고강도, 고인성을 갖는 제3세대형 비조질강의 적용확대가 예상된다. 한편 국내에서는 자동차용 볼트 등 아직 비조질화가 이루어지지 않은 분야에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어져 비조질강의 사용 분야가 점차 확대될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- (1) M.Korchynsky and J.R.Paules, SAE Technical Paper Series 890801.
- (2) H.Tagawa and T. Shiraga, 1988, 熱處理, Vol.28, No.1, pp. 18~25.
- (3) T. Inoue and M. Katsumata, 1993, 熱處理, Vol. 33, No.1, pp. 11~16.
- (4) G.Krauss et al., 1987, Fundamentals of Microalloying Forging Steels, TMS, p. 19.

- (5) P.H.Wright, 1988, Advanced Materials & Processes inc. Metal Process, No.12, pp. 29~32.
- (6) G.Krauss et al., 1987, Fundamentals of Microalloying Forging Steels, TMS, pp. 39~54.
- (7) H.Osuzu et al., SAE Technical Paper Series 800131.
- (8) H.Kanisawa, T.Mori and Y.Okuno, 1990, Wire Journal International, No.4, pp. 32~37.