

Cu첨가형 열연강판의 최적 Cu 및 Mn 첨가량 규명

윤일성 · 윤인택 · 조열래 · 김인배

부산대학교 금속공학과

Determination of Optimum Cu and Mn Contents in Cu-bearing Hot Rolled Steel Sheets

Il-Sung Yoon · In-Taeg Yun · Yeol-Rae Cho and In-Bae Kim

Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University, Pusan 609-735

(1997년 12월 14일 받음, 1998년 1월 23일 최종수정본 받음.)

초 록 0.05wt% C-Cu첨가열연강판에서 590MPa급을 가지며 10% pre-strain을 가한 후 780MPa급 이상을 가지는 Cu첨가형 열연강판의 최적 Cu 및 Mn 첨가량 규명을 위해 경도 및 인장시험과 투과 전자현미경으로 조사하였다. Cu 첨가형 열연강판에서 고용강화와 시효경화를 고려한 적정 Cu 첨가량은 1.2wt% 전후였으며, Mn첨가량은 0.75~0.85wt% 범위이었다. 0.05% C-1.2% Cu-0.75% Mn-0.04% Nb첨가 강판에서 과시효조건에서 관찰되는 조대한 석출물은 면심입방정 구조인 ϵ -Cu인 것으로 확인되었으며, 열연상태에서는 590MPa급을 가지며, 10% pre-strain을 부여한 후 550°C에서 30분 열처리할 경우 780MPa급의 인장강도를 가지는 Cu첨가형 열연강판의 제조가 가능하였다.

Abstract Optimum Cu and Mn contents in 0.05wt% C-Cu bearing hot rolled steel sheets were investigated by vickers hardness measurement, tensile test and transmission electron microscopy. It was determined that the optimum Cu and Mn contents were 1.2wt% and 0.75~0.85wt% respectively. It was confirmed by TEM observation that the coarse precipitates were fcc ϵ -Cu in 0.05% C-1.2% Cu-0.75% Mn-0.04% Nb steel sheets. The Cu-bearing steel sheets having 780MPa of tensile strength could be fabricated by 10% pre-strain and aging treatment at 550°C for 30min.

1. 서 론

최근 자동차 구동전달부품 등의 프레스 성형부품으로서 고강도를 필요로 하는 경우 프레스 성형시에는 열연상태에서 부품을 성형한 후 시효열처리함으로써 강도를 높이는 방법이 적용되고 있다. 이와 같은 부품제조방법은 고강도 소재의 기술적인 문제, 즉 소재자체의 고강도화에 따른 프레스 다이의 마모를 줄일 수 있으며 최종제품의 강도수준에 비하여 비교적 낮은 프레스 압력으로도 작업을 행할 수 있기 때문에 프레스 작업성이 우수하여 프레스의 수명연장이 기대된다. 또한 기존의 절삭 가공부품과는 달리 절삭가공 공정을 생략할 수 있기 때문에 제조원가의 문제에 있어서도 유리하다는 장점을 가지고 있다.

후열처리형 열연강판에 이용되는 대표적 원소는 Cu이며 강중에 Cu를 첨가하면 내식성이 향상되고 시효열처리에 의하여 Cu석출물의 석출로 인하여 항복 및 인장강도, 경도가 상승하는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} Cu를 함유한 석출경화강은 1960년대 미국의 INCO사의 IN 787강의 개발을 시발로 하여 현재까지는 주로 후강판류 제조에 이용되고 있다.^{3,4)} 그러나 1990년대 초부터는 프레스 작업이 가능한 비교적 두께가 얇은 열연강판에 적용하기 위한 연구가 수행되어 탄소공구강으로 사용되는 S35C에 대응하는 강도와 연성 및 인성이 우수한 강판의 제조가 가능한 것으로 보고⁵⁾하고 있다. 그러나 국내의 경우 프레스 성형가공이 가능한 후열처

리형 열연강판의 제조 및 실부품화가 적용되고 있지 않을 뿐만 아니라 이에 대한 연구도 미흡한 실정이다.

Cu첨가 후열처리형 열연강판의 큰 특징중의 하나가 시효 열처리에 의하여 ϵ -Cu를 석출시켜 강도를 증가시킨다는 것인데 지금까지의 연구자들은 열연상태, 시효처리상태, 냉연상태의 연구를 분리하여 수행한 것이 대부분으로서 프레스 성형부품으로의 적용시 10% 전후냉간가공량이 고려된 시효처리조건 및 최적 합금원소첨가에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 열간압연상태에서는 590MPa급의 인장강도를 가지나, 성형후 열처리에 의하여 780MPa급의 강도를 확보할 수 있는 Cu 첨가형 후열처리 열연강판을 제조하는데 있어서 기계적 성질에 미치는 Cu와 Mn 첨가량의 영향을 조사함으로써 Cu와 Mn의 최적 첨가량을 규명하고자 한다. 최적 첨가량을 결정하기 위한 조건으로는 Cu의 경우 본 연구시료가 시효경화재료인 점을 고려하여 Cu첨가량에 따른 시효경화정도를 가장 기본적인 조건으로 생각하여 Cu첨가량이 1.0wt%인 강에서부터 Cu첨가량을 0.2wt%씩 증가시켰을 때 강도 상승량이 가장 큰 경우를 적정 Cu첨가량으로 결정하였다. 그리고 Mn의 경우는 최적 Cu첨가량을 기본조성으로 하였을 때 시효 후의 인장강도가 780MPa 이상, 시효 전 열연상태에서 연신율이 25% 이상일 경우를 적정 Mn첨가량으로 결정하였다.

Table 1. Chemical composition of test steels.

Sample name	(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
1	0.051	0.200	0.505	0.010	0.005	0.036	1.00	—
2	0.052	0.190	0.501	0.011	0.007	0.012	1.18	—
3	0.050	0.180	0.502	0.009	0.006	0.043	1.42	—
4	0.050	0.200	0.505	0.010	0.005	0.040	2.00	—
5	0.049	0.200	0.501	0.012	0.006	0.038	1.28	0.04
6	0.049	0.198	0.729	0.011	0.006	0.033	1.26	0.039
7	0.051	0.200	1.010	0.011	0.006	0.043	1.26	0.04

Table 2. Mechanical properties of hot rolled and peak aged Cu-bearing steel sheets.

Cu contents (%)	Hot rolled steel sheet			Peak aged steel sheet		
	YS	TS	El	YS	TS	El
	(MPa)		(%)	(MPa)		(%)
1.0	344	448	34.2	464	553	26.0
1.2	387	467	32.8	562	631	25.4
1.4	415	505	30.5	603	681	23.7
2.0	473	554	30.3	694	766	23.8

2. 실험 방법

표 1은 본 실험에서 사용된 열연강판의 화학조성을 나타낸 것이다. Steel 1, 2, 3, 4는 0.05wt%C-0.5%Mn의 기본조성에 Cu를 1.0~2.0wt%로 변화시킨 성분계와 Steel 5, 6, 7은 0.05wt%C-1.2%Cu의 기본조성에 Mn을 변화시킨 성분계의 잉고트를 진공유도용해로 (30kg용량)를 이용하여 주조하였다. 잉고트의 크기는 120×120×200H (mm)이며, 균질화 및 열간압연시의 강편크기를 고려하여 1200℃에서 2시간 가열하여 두께 30mm의 강편을 제조하였으며, 이 강편을 다시 1200℃에서 90분 동안 재가열한 후 5 pass 압연을 실시하여 최종 두께 3.5mm의 강편을 제조하였다. 이때 열간압연 마무리 온도 (FDT)는 830℃로 고정시키고 권취온도 (CT)는 450℃로 하여 1시간 동안 유지시킨 후 공냉하였다.

Cu 첨가형 열연강판의 시효경화 특성을 조사하기 위하여 ±3℃의 오차를 갖는 전기로를 사용하여 시효열처리를 행하였다. 시효온도를 550℃로 하여 1분~600분 동안 열처리하여 마이크로비커스 경도기로 시효에 따른 경도 변화를 조사하였다. 미세조직은 2% nital용액에 부식시킨 후 광학 현미경으로 소재 두께의 t/4 부위에서 관찰하였다. 시효에 따른 Cu 석출물의 석출상태는 압연소재의 t/4 부위의 평면으로 부터 채취된 시료를 박막시료로 제조하여 투과전자현미경 (TEM)을 이용하여 관찰하였다. 기계적 성질은 열연과 냉연 및 시효열처리한 후 ASTM A370 규격의 subsize의 판재로 가공하여 크로스 헤드 스피드를 5mm/min, 표점거리를 25mm로 하여 인장시험을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

최적 Cu첨가량 규명

그림 1은 1.0~2.0wt% Cu를 첨가한 강을 450℃에서 권취한 후 550℃에서 시효처리하였을 때 시효시간에 따른 미소경도의 변화를 나타낸 것으로서, Cu 첨가량에 관계없이 시효열처리에 의하여 정합상태의 Cu-cluster가 석출되면서 경도상승을 유발시켜 최고 경도에 도달한 후, 계속되는 시효처리에 의하여 부정합상태의 ε-Cu로 변태되면서⁸⁾ 경도가 감소되는 전형적인 시효경화곡선을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 최고 경도는 Cu 첨가량에 비례하여 상승하며, 과시효 조건에서 안정한 ε-Cu 석출물의 성장에 의한 경도

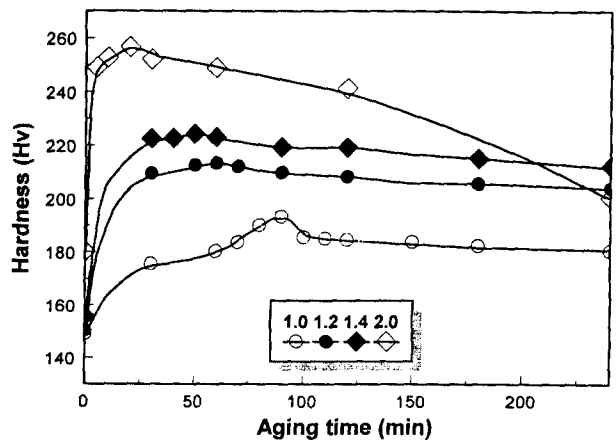


Fig. 1. Effect of Cu contents and aging time on the hardness of Cu-bearing hot rolled steel sheets.

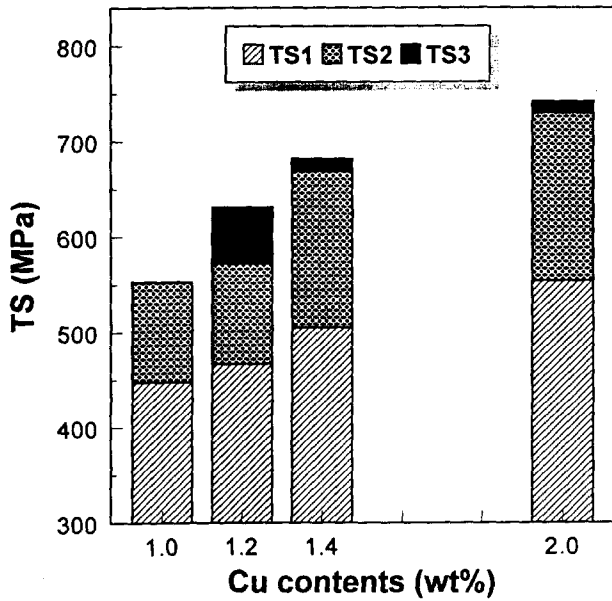


Fig. 2. The variation of tensile strength with the amount of Cu contents and aging treatment of hot rolled steel sheets.

저하는 Cu 첨가량이 높을수록 현저한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Cu 첨가량의 증가에 따라 Cu 석출물의 석출량이 증가되고 과시효시 부정합 ϵ -Cu의 변태량이 증가되었기 때문이라고 생각된다. 이와 동시에 최고 경도에 도달하는 시효시간은 Cu 첨가량에 반비례하여 단축되며, 이는 Cu 첨가량에 비례하여 Cu의 석출구동력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 표 2는 Cu 첨가량에 따른 열연상태 및 최고경도를 나타내는 시효처리재의 인장시험 결과를 나

타낸 것이다.

그림 2는 표 2의 결과를 이용하여 Cu첨가 후열처리형 열연강판에 있어 열간압연 및 시효열처리 상태의 인장강도에 대한 Cu함량의 영향도를 나타낸 것으로서 TS1은 열간압연 상태에서의 강도값을, TS2+TS3은 시효열처리에 의한 강도증가량을 나타내는데, 여기에서 TS3은 전체강도증가량 중에서 0.2wt% Cu 첨가당의 강도상승량을 나타낸 것이다. 다시 말하면 1.2wt% Cu 첨가당의 경우 TS2+TS3은 시효열처리시의 강도상승분이며, 여기에서 1.0wt% Cu 첨가당에서의 시효열처리에 의한 강도상승분 TS2를 뺀 나머지 부분이 0.2wt% Cu 증가에 의한 시효강도 상승분 TS3가 된다. Cu 첨가량이 증가할수록 열간압연상태의 강도값은 증가하고, 시효열처리한 경우도 동일한 경향을 보이고 있다. 그러나 각 0.2wt% Cu첨가량의 증가로 인한 시효강도 상승(TS3)은 1.0wt%에서 1.2wt%로 증가시킬 경우 59MPa로 큰 상승을 보이지만, 1.2wt% Cu 이상의 범위에서는 0.2wt% Cu 첨가당 13MPa에서 12MPa 정도로 점차 감소되어 Cu첨가량의 증가에 따른 시효강도의 상승은 포화되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

이상의 시효열처리 결과로부터 시효석출경화에 유효한 Cu 첨가량의 범위가 존재하며, 0.05wt%C-0.5wt%Mn 성분계의 경우 시효열처리에 의하여 강도 상승을 가장 효과적으로 기대할 수 있는 Cu첨가 범위는 1.2wt% 전후라는 결론을 얻을 수 있다.

● 1.2wt%Cu첨가 열연강판의 기계적 성질에 미치는 Mn첨가량 및 Nb첨가 영향

그림 3은 합금 원소 첨가에 따른 Steel 2, 5, 6, 7의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. Steel 2의 미세조직인 (a)

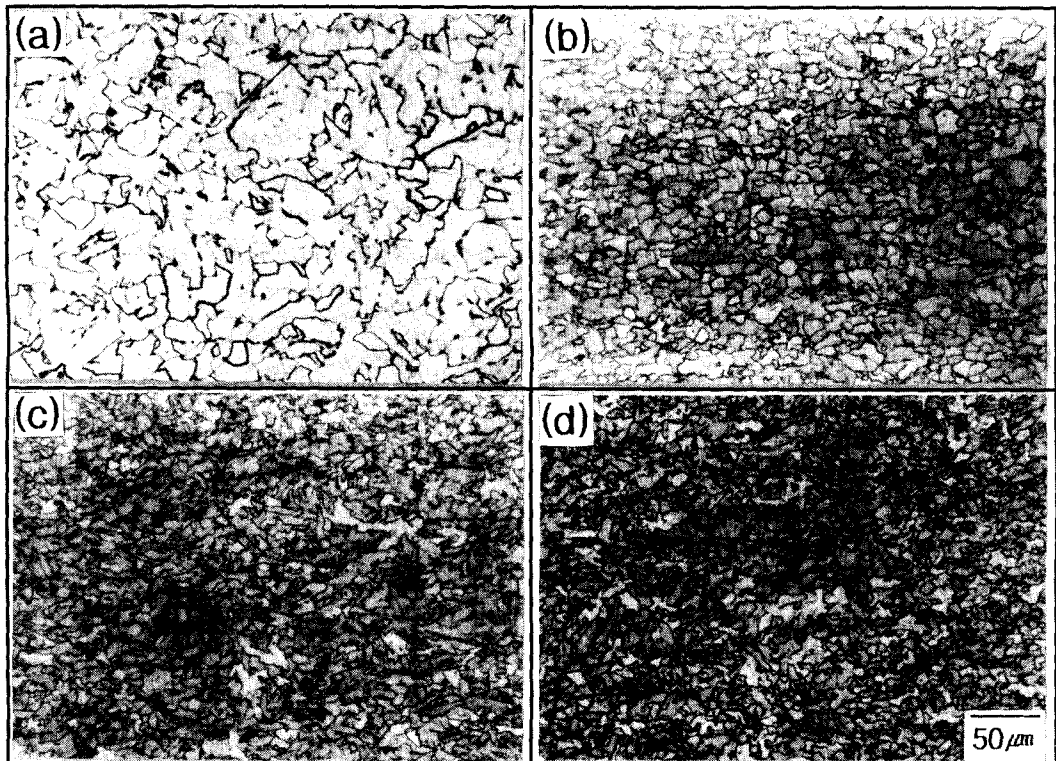


Fig. 3. Effect of Mn contents on the microstructure of Cu-bearing hot rolled steel sheet. (a) Steel 2(1.2Cu-0.5Mn) (b) Steel 5(1.2Cu-0.5Mn-0.04Nb) (c) Steel 6(1.2Cu-0.75Mn-0.04Nb) (d) Steel 7(1.2Cu-1.0Mn-0.04Nb)

는 등축 페라이트 기지에 소량의 침상 페라이트 또는 베이나이트 조직이 관찰되었으며, 0.04wt% Nb를 첨가한 (b)는 Nb 첨가에 의하여 현저한 조직의 미세화를 보이고 있으며, 역시 등축 페라이트 기지에 침상의 페라이트와 베이나이트가 소량 존재하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결정립 미세화현상은 강에 Nb를 미량 첨가하면 열간압연동안 가공유기석출되는 Nb 탄화물들에 의하여 오스테나이트의 재결정립이 미세화될 뿐만 아니라 재결정 온도 역시 상승되기 때문에 미세결정역에서 도입되는 결정 결함들은 열간압연 후 오스테나이트/페라이트변태 과정에 있어 페라이트 핵생성 site로 작용하여 결정립이 미세화 된다는 보고⁹⁾와 잘 일치한다. 한편, Mn을 0.5wt%, Nb를 0.04wt% 첨가한 상태에서 Mn을 각각 0.75, 1.0wt% 변화시킨 (c), (d)의 경우 Mn량의 증가에 따라 결정립은 더욱 미세화하며 침상의 페라이트와 베이나이트양이 증가된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 Mn이 오스테나이트 안정화원소로서 오스테나이트의 재결정을 방해하고 오스테나이트/페라이트 변태온도를 낮추며, TTT곡선을 장시간 측으로 이동시킴으로서 결정립 미세화와 함께 침상의 페라이트 및 베이나이트 생성을 촉진한 결과로 판단할 수 있다. 한편, 이들 강들을 시효온도 550℃에서 열처리하여 최고 경도에 도달하였을 때의 조직변화, 즉 결정립 조대화는 광학현미경 시야에서는 인지되지 않았다.

그림 4는 1.2wt%Cu-0.5wt%Mn(Steel 2) 성분계에 0.04wt%Nb(Steel 5)를 첨가한 경우와 여기에 Mn을 각각 0.75(Steel 6), 1.0wt%(Steel 7) 첨가한 경우에 있어 시효경도곡선을 나타낸 것이다. Steel 2에 0.04wt%Nb를 첨가함에 따라 최고 경도가 213.3Hv에서 235.1Hv로 상승하였으며, 동시에 최고 경도에 도달하는 시효시간이 60분에서 45분으로 15분 정도 단시간 측으로 이동되었다.

이는 열간압연상태에서 미세하게 석출된 NbC가 Cu 석출물의 핵생성 site의 역할을 함으로써 Nb첨가에 의해 Cu 석출물의 핵생성을 촉진¹⁰⁾시킨 결과에 의한 것으로 생각된다. 한편, Mn 첨가강의 경우는 Mn 첨가량의 증가에 따라 최고 경도는 상승하지만, 이에 도달하는 시효시간은 거의 직선적으로 장시간측으로 이동하였다. 이와 같이 Mn 첨가

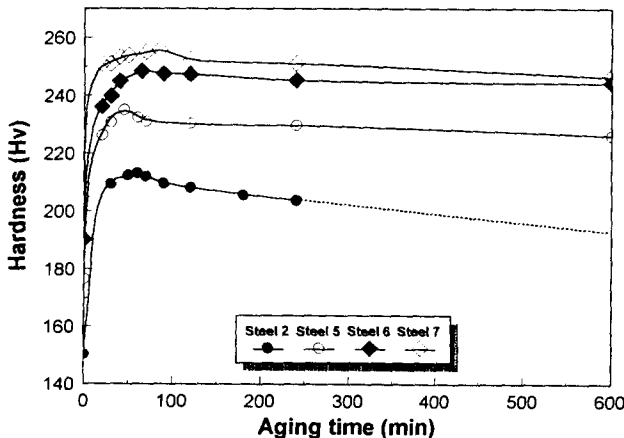


Fig. 4. Effect of Nb and Mn contents and aging time on the hardness of Cu-bearing hot rolled steel sheet.

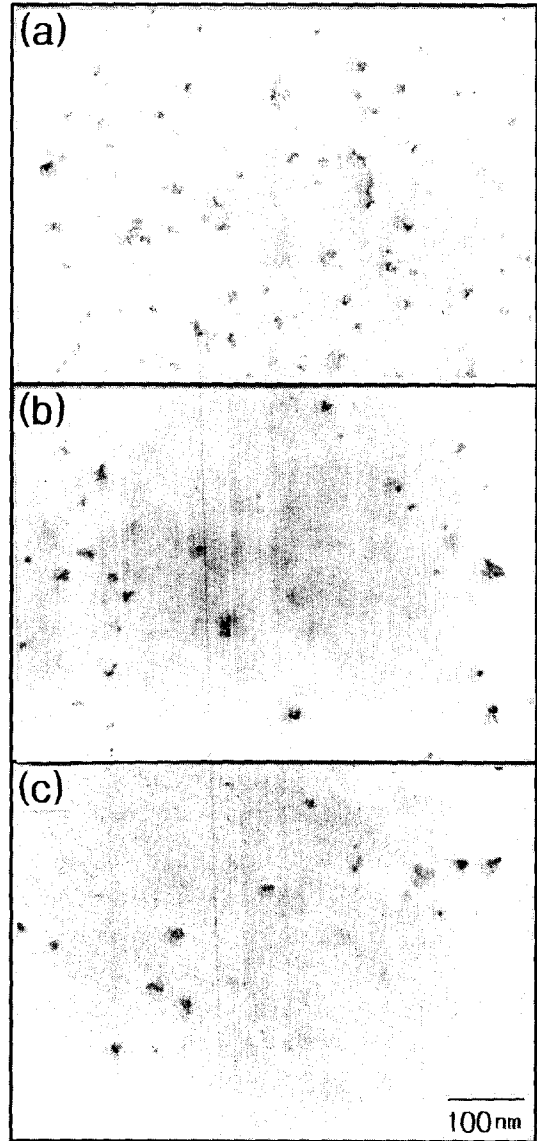


Fig. 5. TEM micrographs of specimen aged at 550℃ for 30min. (a) BF image peak aged for Steel 5 (b) BF image peak aged for Steel 6 (c) BF image peak aged for Steel 7

량의 증가에 따라 최고경도값이 높아지거나 최고경도 도달 시간이 지연되는 현상은 기지내의 고용 Mn에 의해 Cu 확산이 지연되기 때문인 것으로 생각된다.

그림 5는 Mn 첨가량의 변화에 따른 steel 5, 6, 7을 최고경도를 나타내는 시효처리재에 있어서 Cu석출물의 분포 상태를 TEM에 의해 관찰한 것이다. 이들 Mn 첨가강은 공통적으로 10~20nm 크기의 석출물과 수 nm 크기의 미세한 석출물이 공존하는 조직을 나타내었으며, Mn량의 증가에 따라 (a=0.5, b=0.75, c=1.0 wt%) 10~20nm 정도의 크기를 가지는 큰 석출물의 밀도는 감소하는 대신 극히 미세한 수 nm 크기의 석출물들은 증가하는 경향을 나타낸다.

이러한 결과는 그림 4에서 언급한 바와 같이 Mn이 치환형으로 고용됨에 의해 Cu 확산이 지연되었기 때문인 것으

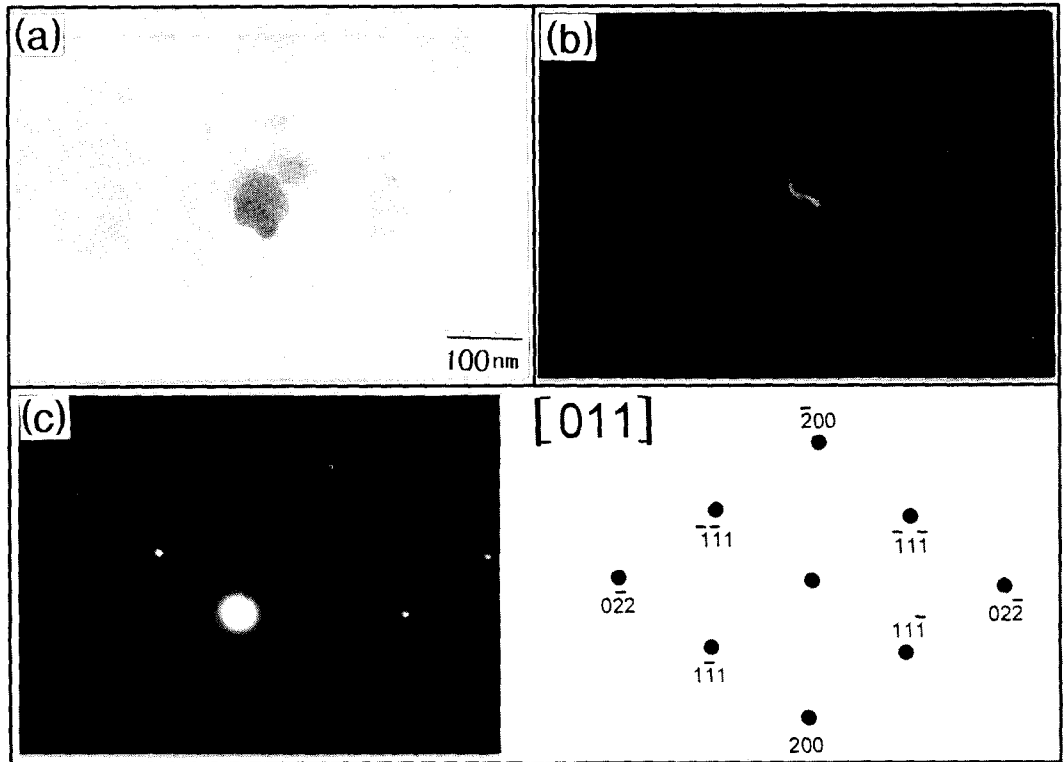


Fig. 6. TEM micrographs of Steel 6.
(a) BF image over aged (b) DF image of (a) (c) SAD pattern of (b)

로 판단된다.

그림 6은 Steel 6에 있어 과시효상태에서 관찰된 석출물 중에서 Cu 석출물로 예상되는 입자 가운데 비교적 조대한 것을 선택하여 관찰한 TEM image와 SADP로서, SADP에서 얻어진 점도형을 카메라정수법과 사잇각을 이용하여 결정구조를 확인한 결과 fcc구조를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 이 석출물은 fcc구조를 갖는 안정 ϵ -Cu인 것으로 판단된다.

이상의 시효 열처리 결과로부터 Nb첨가는 Cu의 석출을 촉진하며, 1.2wt%Cu-0.04wt %Nb첨가량에 Mn첨가량이 증가할수록 Cu석출물 크기를 미세화하고 Cu의 석출을 지연시키는 경향이 있음을 알 수 있다.

● TS 780MPa급 Cu첨가형 열연강판의 제조를 위한 최적 Mn첨가량 규명

본 연구에서는 열연상태에서 590MPa급의 강도를 가지며 부품 성형과정에서의 가공량을 10%로 고려하고 최종 시효열처리한 경우에 780MPa급 이상의 강도를 가지는 열연강판제조에 필요한 성분계 및 시효조건을 목표로 하였다. 본 실험장에 있어 열간압연상태 및 10% pre-strain을 부여한 후 최고시효강도변화를 Mn첨가량을 변수로 하여 조사한 결과를 그림 7에 나타내었다. 앞서 언급하였듯이 시효시 강도는 Cu, Nb에 의한 석출강화에 의해 상승하며, Mn 첨가 역시 강도의 상승에 기여하는 것으로 확인되었다. 그러나 그림 2에서 전술하였듯이 Cu의 경우 첨가량에 따라 강도는 포화되는 경향이 1.2wt% 첨가에서 나타나며, 이에 부가하여 강도를 확보하기 위하여 첨가되는 고용강화원소인 Mn의 경우 시효열처리후 인장강도

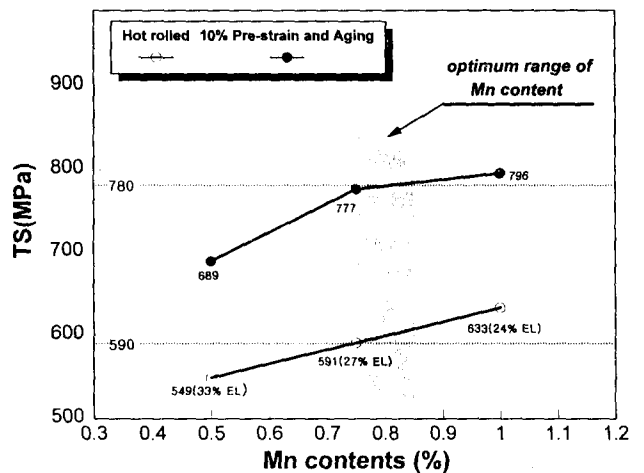


Fig. 7. The variation of tensile stress with Mn contents of as hot rolled and peak aged after 10% pre-strained condition.

780MPa를 확보하기 위해서는 0.75wt% 정도의 첨가가 적합한 것으로 판단된다.

다시 말하여 steel 5의 경우는 10% pre-strain과 시효 처리한 후 인장강도가 689MPa로서 원하는 강에 미달되고, steel 7의 경우는 열간압연 상태에서의 인장강도가 633MPa로 매우 높아서 프레스 성형시 불리 할 뿐만 아니라 Mn 첨가량 증분에 대응한 최종 시효강도의 증가효과가 적고 연신율이 25% 이하이다. 그러나 steel 6의 경우에는 열간압연 상태에서의 인장강도값이 590MPa 정도의 적정 강도값을 유지할 뿐만 아니라 27%의 고연신율을 나타내며

10% pre-strain과 시효처리 후에는 780MPa급의 인장강도값을 확보할 수 있기 때문에 본 실험강 중에서 steel 6의 조성이 최적조성이라고 생각된다.

따라서, 시효석출 및 고용강화를 고려할 경우 0.05wt% C의 저탄소 성분계에 1.2wt%Cu-0.04wt%Nb를 첨가하고 0.75~0.85wt% 범위의 Mn을 첨가하는 것이 인장강도 780MPa급(연신율 18%)의 성분계로서 가장 적합한 것으로 최종 판단되었으며, 아울러 열간압연조건으로서는 사상압연 마무리온도를 830℃ 이상, 권취온도는 Cu를 고용상태로 존재시키기 위하여 500℃ 이하로 하는 것이 필요하며, 시효열처리조건은 550℃에서 최소 30분 이상인 것으로 판단된다.

4. 결 론

열간압연상태에서는 590MPa급의 인장강도를 가지나 성형 후 시효열처리에 의하여 780MPa급의 강도를 확보할 수 있는 Cu첨가형 열연강판의 제조에 있어서 최적 Cu 및 Mn 첨가량을 조사한 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 0.05wt%C를 함유하는 Cu첨가강에서 시효석출 및 고용강화를 고려한 최적 Cu량은 1.2wt%이었으며, 고강도화를 목적으로 첨가된 Mn의 적정량은 0.75~0.85wt% 범위이었다.

2) 0.05%C-1.2% Cu-0.75%Mn-0.04%Nb강의 과시효조건에서 관찰되는 조대한 Cu석출물은 fcc 결정구조를 갖는 ϵ -Cu인 것으로 확인되었다.

3) 0.05%C-1.2%Cu-0.75%Mn-0.04%Nb계인 Cu첨가형 후열처리 강판에서 열간압연상태에서는 590MPa급의 인장강도를 가지며, 10% pre-strain을 부여한 후

550℃에서 30분 열처리할 경우 780MPa급의 인장강도를 가지는 강판의 제조가 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 1996년 포항중합제철(주)의 연구비 지원(관리번호 96009)에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. Osamura, H. Okuda, K. Asano, M. Furusaka, K. Kishida, F. Kuro-sawa and R. Uemori : ISIJ International, **34**, 359 (1994)
2. K. Kishida : CAMP-ISIJ **4**, 2010 (1991)
3. I. Maswka, I. Takase and R. Sasaki : Iron and Steel, **13**, 63 (1973)
4. S.R. Goodman, S.S. Brenner and J.R. Low, Jr. : Metall. Trans., **4**, 2371 (1973)
5. K. Kishida, Fuji-cho, Hivohata-ku : CAMP-ISIJ, **5**, 1827 (1992)
6. A. Takahashi and M. Iino : ISIJ International, **36** (2), 241 (1996)
7. S. Soyulu and R.W.K. Honeycombe : Mater. Sci and Tech., **7**, 137 (1991)
8. S.R. Goodman, S.S. Brenner and J.R. Low, Jr. : Metall. Trans., **4**, 2363 (1973)
9. T. Hatomura, Y. Kataoka, K. Amano, Y. Nakano and C. Shiga : Iron and Steel, **82** (6), 74 (1996)
10. 福田實, 橋本保, 國重和俊 : 鐵と鋼, **58**, 1832 (1972)