

Cu-Ni첨가형 열연강판의 열간균열현상에 관한 연구

윤인택 · 조열래 · 김순호* · 김인배

부산대학교 금속공학과

*신라대학교 자동차공학과

A Study on the Hot Cracking Phenomena of Cu-Ni Bearing Hot Rolled Steels

In-Taeg Yun, Yeol-Rae Cho, Soon-Ho Kim* and In-Bae Kim

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

*Dept. of Automotive Eng., Silla University, Pusan 617-736

(1999년 1월 9일 받음, 1999년 1월 16일 최종수정본 받음)

초 록 Cu-Ni첨가형 열연강판의 열간균열현상 및 열간가공 과정에서 산화스케일과 기지 계면에 형성되는 상 거동을 90° 굽힘시험, BSE(Back Scattered Electron) image 분석 및 EDS 분석 방법에 의하여 조사하였다. Ni-free 1.2%Cu첨가형 열연강판의 경우 1100°C 이상에서 열간균열현상을 나타내었으며, 이러한 열간균열현상은 산화스케일과 기지 사이에 연속적으로 형성된 액상의 Cu-rich상이 오스테나이트 입체를 따라 침투함으로써 발생되었다. 0.6%Ni을 함유한 1.2%Cu-Ni첨가형 열연강판의 경우에는 고상의 Cu-Ni-rich상이 산화스케일과 기지 사이의 계면에 불연속 형태로 존재하고, 1.2%Ni을 함유한 경우에는 고상의 Ni-Cu-rich상이 산화스케일층 내부에 주로 존재하였다. 그리고 Ni 첨가량이 증가할수록 열간균열 발생이 현저히 감소하였다.

Abstract The hot cracking phenomena and phase behaviors during hot working process of Cu-Ni bearing hot rolled steels were investigated by a 90° bending test, BSE image analysis and EDS analysis. For a Ni-free 1.2%Cu bearing steel, the surface hot cracking occurred above 1100°C due to a liquid state Cu-enriched phase formed continuously at the interface between oxide scale and matrix. The liquid Cu-enriched phase penetrated into austenite grain boundaries and caused surface cracking during the hot working. In case of 0.6%Ni containing 1.2%Cu-Ni bearing steel, solid state Cu-Ni-riched phase existed at the scale/matrix interface as a discontinuous type. But the higher addition of 1.2% Ni, solid state Ni-Cu-riched phase was formed dominantly in the oxide scale. It was found that the addition of Ni suppressed the surface cracking of 1.2%Cu bearing steel by eliminating the liquid state Cu-enriched phase.

1. 서 론

자동차 구동부품 등의 프레스 성형부품으로서 고강도를 필요로 하는 경우 프레스 성형시에는 연질로서 프레스 성형작업성을 용이하게 하고, 성형 후 시효열처리에 의하여 고강도화하는 방법이 적용되고 있다. 이와 같은 부품제조 방법은 최종제품의 강도에 대비하여 비교적 낮은 프레스 압력으로 작업을 행할 수 있기 때문에 고강도 소재의 가공상 문제점인 고강도화에 따른 프레스 다이의 마멸을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 절삭가공 부품과는 달리 절삭가공공정을 생략할 수 있어 경제적이다. 이와 같은 후열처리형 열연강판인 Cu첨가형 열연강판은 적정량의 Cu가 첨가된 저탄소강으로서 연질상태에서 부품을 성형한 후 시효열처리할 경우 Cu석출물이 석출됨으로써 경도 및 강도가 크게 증가된다.^{1~4)}

최근까지의 Cu첨가형 후열처리 열연강판에 관한 연구는 대부분 강도와 시효특성을 중심으로 이루어지고 있으며, Cu첨가형 후열처리 열연강판의 제조에 있어 실질적인 문제점인 Cu의 액상취성에 의한 열간균열현상이나 억제방안에 대한 연구는 그리 많지 않다. 특히 열간압연 상태에서 인장

강도 590MPa급, 성형 후 시효열처리에 의해 750MPa급의 인장강도를 확보할 수 있는 Cu첨가형 후열처리 열연강판의 제조에 있어 고온산화 및 Ni 첨가에 의한 표면균열 억제기구에 대해서는 충분히 규명되어 있지 않은 상태이며, Ni 첨가에 따라 산화스케일부에 형성되는 Cu-Ni-rich상의 거동에 대한 보고는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열간압연 상태에서 590MPa급의 인장강도를 가지고, 성형 후 시효열처리에 의하여 750MPa급의 인장강도를 확보할 수 있는 Cu-Ni첨가형 후열처리 열연강판의 제조에 있어 열간압연 과정에서 예상되는 열간균열현상을 확인하고, 열간가공 과정에서 산화스케일과 기지 계면에 형성되는 상 거동에 대하여 조사함으로써 실제 열간압연 공정에서의 표면결함을 억제하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

표 1은 본 실험에 사용된 열연강판의 화학조성을 나타낸 것이다. Cu첨가형 열연강판의 열간균열현상 및 계면특성을 평가하기 위하여 0.05wt% C-0.75wt% Mn의 기본조성에 Cu를 1.2wt%, Ni을 0.6wt% 및 1.2wt%로 변화시킨 성

Table 1. Chemical composition of test steels

Sample name	(wt%)								
	C	Mn	Cu	Ni	Si	P	S	N (ppm)	Al
1	0.050	0.74	-	-	0.19	0.011	0.009	36	0.033
2	0.052	0.76	1.30	-	0.21	0.011	0.009	36	0.035
3	0.047	0.75	1.20	0.62	0.21	0.011	0.009	35	0.029
4	0.051	0.76	1.21	1.21	0.21	0.011	0.009	35	0.028

분계의 잉고트를 진공유도로 (30kg 용량) 를 이용하여 주조하였다. 잉고트의 크기는 1200×120×200H (mm) 이며, 1200℃에서 2시간 가열하여 균질화 및 sizing 압연을 실시하여 두께 20mm의 강편으로 제조하였다.

Cu첨가형 열연강판의 열간균열현상 및 Ni 첨가의 영향을 조사하기 위하여 90° 열간굽힘시험을 행하였다. 열간굽힘 시험편은 강편의 압연방향에 대하여 직각방향으로 길이 100mm, 폭 25mm, 두께 15mm의 크기를 갖도록 밀링가공을 행하여 제작하였다. 열간굽힘시험 온도는 1000℃~1200℃ (50℃ 간격) 로 하였으며, 표면에 산화스케일을 형성시키기 위하여 산화성 분위기에서 1시간 동안 유지하였다. 열간굽힘시험은 각 온도에서 열처리한 시편을 추출한 즉시 바이스에 고정시켜 직각상태에 도달할 때까지 굽힘을 행한 후 수냉처리하였다. 이때 굽힘에 소요된 시간은 10초로 일정하게 유지하였으며, 시편의 외측 표면을 기준으로 하였을 때 변형속도는 약 2.5×10^{-2} /s 정도였다. 열간굽힘시험에서

의 균열발생 현상과 미세조직간의 관계를 규명하기 위하여 열간굽힘 축에 수직인 방향으로 시편을 절단한 후 산화스케일층과 기지 주변조직을 주사전자현미경 (SEM) 으로 관찰하였다. 이때 산화스케일층과 기지 사이의 계면에 존재하는 Cu-Ni-rich상, Ni-Cu-rich상 및 기지의 오스테나이트 입계를 따라 침투한 Cu-rich상은 후방반사전자에 의한 BSE (Back Scattered Electron) image에 의하여 보다 명확하게 구분하였으며, 이들 각 상을 구성하는 성분에 대하여 EDS (Energy Dispersive Spectrometer) 로 정성 및 정량 분석을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Ni이 첨가되지 않은 Cu첨가형 열연강판 (Ni-free Cu첨가형 열연강판) 을 1050℃~1200℃까지의 온도에서 90° 굽힘시험 한 결과로서 1050℃ 시편을 제외한 1100℃ 이상의 온도에서는 심한 열간균열이 발생되었음을

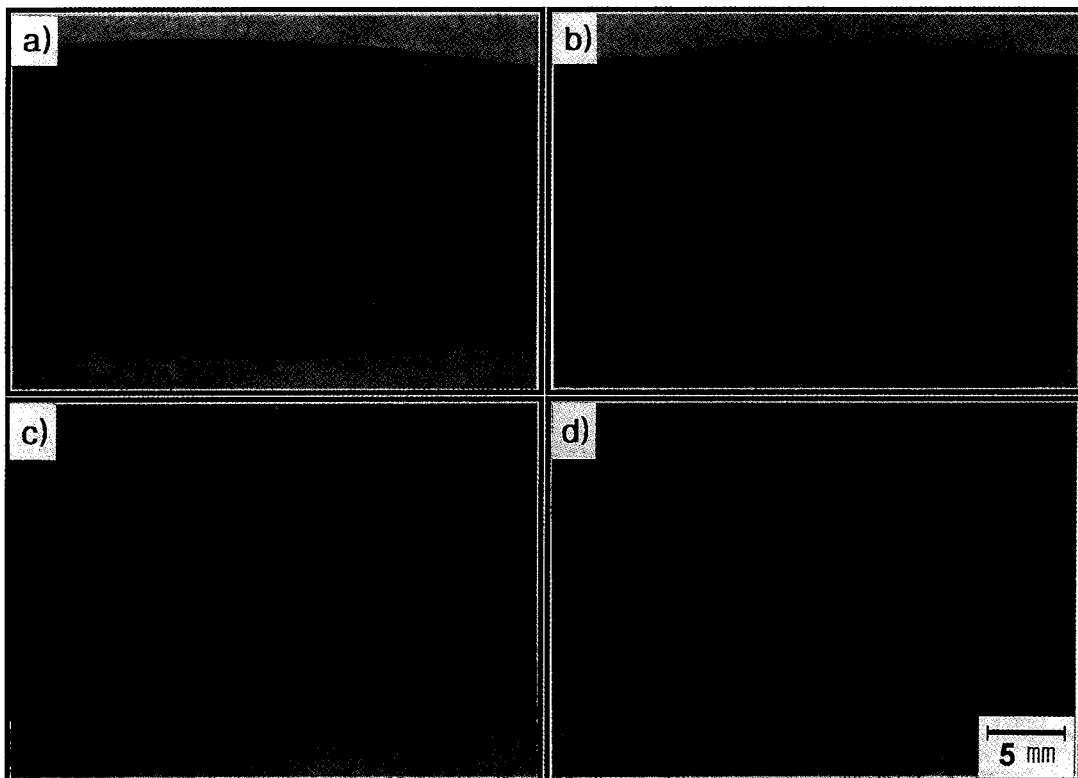


Fig. 1. 90° bending test results of Ni-free 1.2%Cu bearing hot rolled steels heated at a) 1050°C, b) 1100°C, c) 1150°C, d) 1200°C for 1hr.

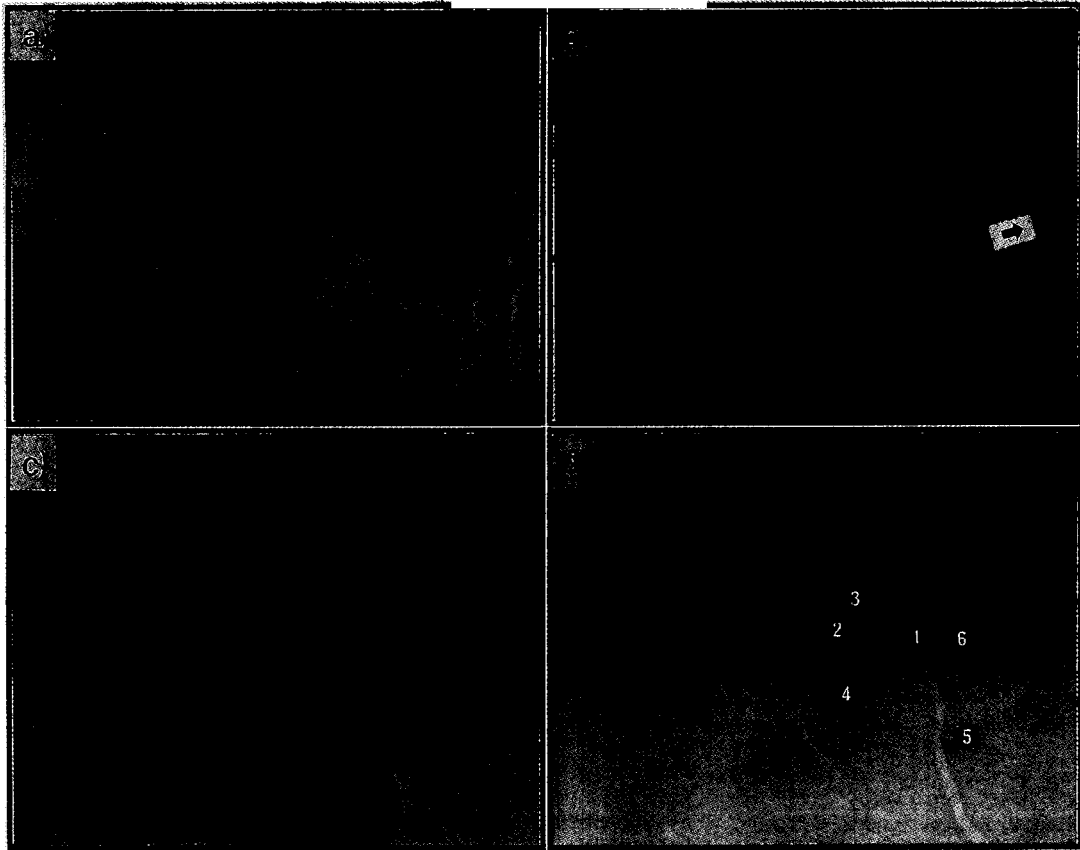


Fig. 2. Hot cracking morphologies of Ni-free 1.2%Cu bearing hot rolled steels heated at 1100°C for 1hr, showing a) large crack, b) crack propagation through grain boundaries(arrow), c) Cu-rich phase penetration through grain boundaries and d) positions for EDS analysis.

Table 2. Results of EDS analysis scale/matrix interface position denoted in Fig. 2 (d)

position	name	results of EDS analysis (wt%)		
		Cu	Fe	remains
1	Interface Cu-rich layer	75.37	24.63	-
2	Scale	-	79.49	O:20.51
3	Scale	-	77.21	O:22.79
4	Matrix ppt	1.82	91.62	Mn: 4.52 Si: 1.39
5	Grain boundary Cu-rich layer	85.83	14.17	-
6	Crack entrance Cu-rich layer	83.22	16.78	-

알 수 있다. 이러한 열간균열현상은 굽힘변형온도에서 Fe가 Cu보다 쉽게 산화됨으로써 산화스케일과 기지 사이에 Cu가 농화되어 액상의 Cu-rich상이 형성되고, 이것이 오스테나이트 입계를 따라 침투함으로써 표면균열이 발생된 것이라고 생각된다.^{5~8)} 한편 1050°C 시편의 경우 열간균열이 발생되지 않은 이유는 추후 제시가 되겠지만 열간균열의 발생이 산화스케일과 기지 사이에 형성되는 액상의 Cu-rich상에 의한 것으로서, 1050°C는 Cu의 용점인 1083°C 이하의 온도로서 이 온도에서는 액상의 Cu-rich상이 생성되지 않았을 것이고, 그에 따라 액상의 입계침투도 일어나

지 않았기 때문이라고 생각된다. 그리고 만약 이들 균열이 기계적 굽힘응력에 의해서 발생하였다면 1050°C 시편의 경우에서도 균열이 발생하였을 것이나, 그렇지 않은 것으로 보아서 이들 균열의 발생은 기계적 굽힘응력에 의한 것이 아니라는 것이 분명하다.

그림 2의 (a)는 Ni-free Cu첨가형 열연강판의 균열부 단면사진(23.6배)으로서 2.3mm정도의 큰 균열이 인장응력과 수직방향으로 형성되었다는 것을 알 수 있다. (b)와 (c)는 Ni-free Cu첨가형 열연강판의 균열부를 200배 및 500배로 확대 관찰한 사진으로서 산화스케일과 기지 사이

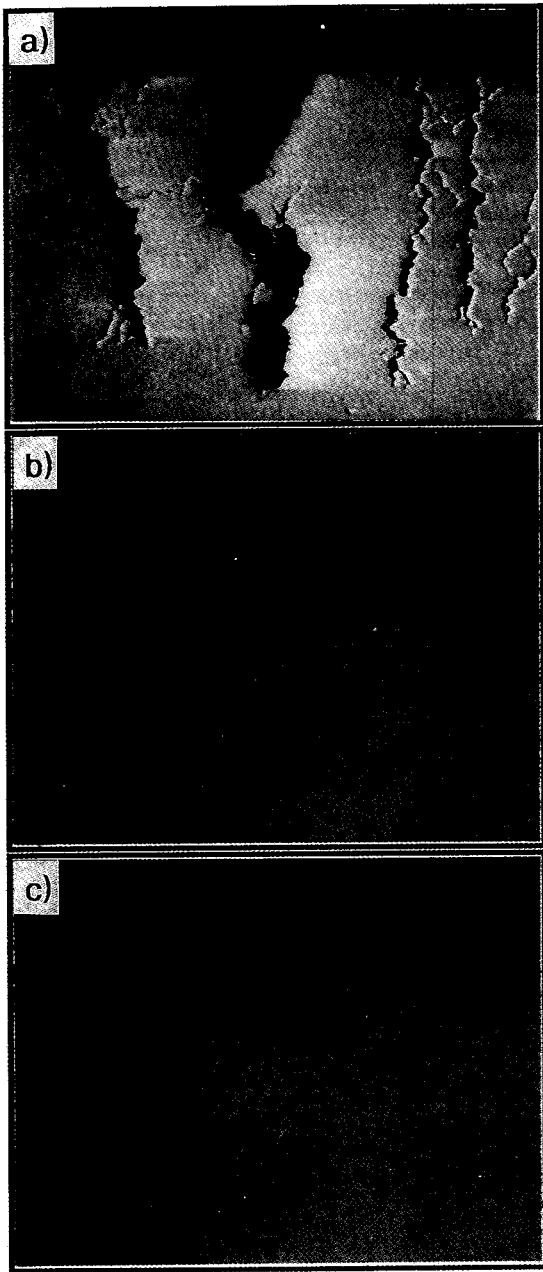


Fig. 3. Hot cracking morphologies of a) Ni-free, b) 0.6%Ni contained and c) 1.2%Ni contained 1.2%Cu bearing hot rolled steels heated at 1100°C for 1hr.

의 경계와 결정입계를 따라서 액상의 Cu-rich상 (사진 상에 희게 나타난 부분)이 형성되었음을 관찰할 수 있으며, 아울러 미소균열 ((b)의 화살표 부분)이 액상의 Cu-rich상으로 덮힌 결정입계를 따라 전파되었음을 확인할 수 있다. 따라서 (a)의 큰 균열 역시 액상의 Cu-rich상으로 덮힌 결정입계를 따라 전파된 것으로 판단된다. (d)는 Ni-free Cu첨가형 열연강판의 산화스케일과 기지 주변에 존재하는 각 상들을 나타낸 것이며, 표 2에 각 위치에서의 EDS 분석 결과를 나타내었다. 고온유지 (1100°C)에 의하여 형성된 산화스케일은 FeO인 것으로 확인되었으며, 이 산화스케일층과 기지 사이에 생성된 Cu-rich상 및 오스테나이트

결정입계를 따라 침투한 Cu-rich상 film의 화학조성은 분석 위치에 따라 차이는 있으나, 대략 76~86%의 Cu 조성을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 (d) 및 표 2에서 나타난 계면 Cu-rich layer와 입계침투 Cu-rich상은 76% Cu-Fe합금 및 86%Cu-Fe합금으로서 1100°C에서 액상으로 존재함으로써 표면균열이 발생됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 0.3%Cu를 함유한 저탄소강에서 열간균열현상은 1100°C에서 산화스케일과 기지 사이의 계면에 형성된 87%Cu-Fe합금이 액상 상태로 존재하여 오스테나이트 입계를 따라 침투함으로써 발생한다는 Imai 등⁹⁾의 연구 결과와도 비교적 잘 일치한다.

그림 3은 Ni-free Cu첨가형 열연강판과 Ni를 0.6% 및 1.2% 함유한 Cu첨가형 열연강판을 1100°C에서 90° 굽힘 시험 하였을 때 열간균열 발생 정도를 나타낸 사진이며, 그림 4는 Ni 첨가량에 따른 균열 깊이의 변화를 나타낸 것이다. Ni-free Cu첨가형 열연강판은 2.3mm 정도의 큰 균열과 미소 균열이 발생한 반면에 Ni함유 Cu첨가형 열연강판은 Ni이 첨가됨으로써 균열전파 길이가 크게 감소하여 0.6% Ni을 첨가한 경우 0.2~0.3mm 정도, 1.2%Ni을 첨가한 경우 0.1mm 정도로 Ni 첨가에 의해서 균열전파 길이가 크게 감소되어 미소 균열들만이 발생되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 Ni의 첨가는 Cu첨가형 열연강판의 열간균열 발생을 크게 억제시키는 효과를 갖는다고 할 수 있다.

그림 5는 Ni-free 및 Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 산화스케일과 기지 주변부의 Cu-rich상 및 Cu-Ni-rich상의 분포상태를 나타낸 것이며, 표 3은 0.6%Ni 및 1.2%Ni을 함유한 Cu첨가형 열연강판의 Cu-Ni-rich상의 EDS 분석 결과를 나타낸 것이다. Ni-free Cu첨가형 열연강판의 경우 계면을 따라 거의 연속적으로 존재하는 Cu-rich상이 관찰되나, Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 경우에는 Ni이 첨가됨으로써 Cu-rich상이 불연속 형태의 Cu-Ni-rich상으로 변화되어 0.6%Ni함유 Cu첨가형 열연강판은 산화스케일과 기지 사이의 계면에 주로 분포되어 있는 반면에 1.2%Ni함유 Cu첨가형 열연강판은 산화스케일층 내부에 주로 분포되어 있음을 알 수 있다. 이들 Cu-Ni-rich상의 EDS 분석

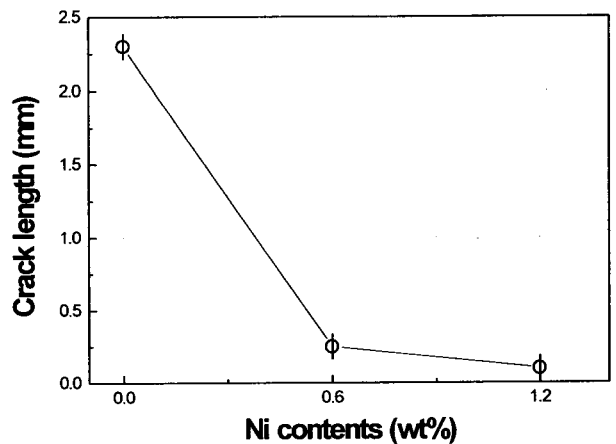


Fig. 4. Variation of crack length with Ni contents of 1.2%Cu bearing hot rolled steels heated at 1100°C for 1hr.

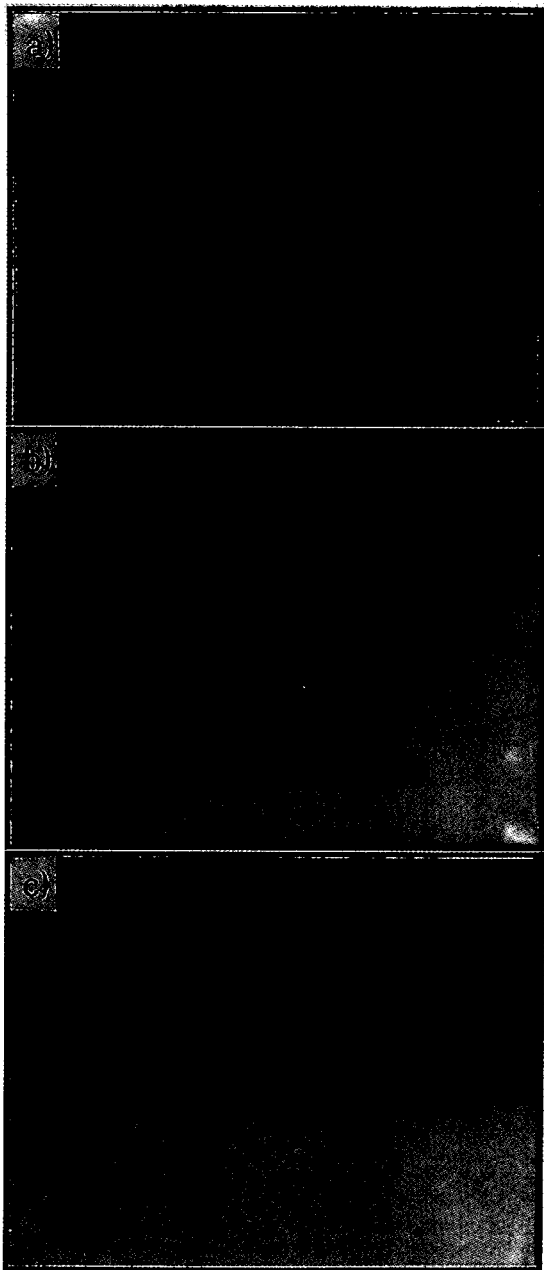


Fig. 5. Morphologies and distributions of Cu-rich and Cu-Ni-rich phases in a) Ni-free, b) 0.6%Ni contained and c) 1.2%Ni contained 1.2%Cu bearing hot rolled steels heated at 1100°C for 1hr.

결과에 의하면(표 3 참고), 0.6%Ni함유 Cu첨가형 열연강판은 Cu가 49~69%, Ni이 10~12%로서 Cu-Ni-rich상

이, 1.2%Ni함유 Cu첨가형 열연강판은 Cu가 10~12%, Ni이 15~20%로서 Ni-Cu-rich상으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Ni-free Cu첨가형 열연강판의 경우 초기 산화과정에서 형성된 Cu-rich상이 1100°C에서 액상으로 존재하다가 지속적인 산화과정에서 형성된 porous한 스케일층 구조에 의하여 산화스케일과 기지 사이의 계면으로 melt down되었기 때문에 연속적인 film형태의 상으로 존재하는 반면에 0.6%Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 경우에는 액상의 Cu-rich상이 Ni-free Cu첨가형 열연강판의 경우와 같이 porous한 스케일층을 통하여 산화스케일과 기지 사이의 계면에 melt down된 다음 Cu-Ni 고용체로 고상화 되는데 이러한 고상화 과정에서 체적수축이 일어나므로서 불연속 형태로 존재하는 것으로 생각된다. 그러나 1.2%Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 경우는 Ni-Cu-rich상의 용접이 높기 때문에 처음부터 고상인 상태로 존재하고 계속되는 산화과정에서 스케일층 내부로 흡장되며, 이러한 변화가 산화과정에서 반복되기 때문에 산화스케일층 내에 random하게 분포되는 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 Cu첨가형 열연강판에 Ni이 첨가되면 첨가된 Ni의 양에 따라 0.6%Ni을 첨가할 경우에는 고상의 Cu-Ni-rich상이 산화스케일과 기지 사이의 계면에 형성되고, 1.2%Ni을 첨가할 경우에는 고상의 Ni-Cu-rich상이 산화스케일 내에 형성되기 때문에 입계에 침투되는 용융 Cu의 양이 급속히 감소됨으로서 Ni의 첨가는 Cu첨가형 열연강판의 열간균열 발생을 크게 억제하는 효과가 있다고 할 수 있다. 또한 Ni 첨가량이 증가함에 따라 열간균열 발생이 더욱 억제되는 것은 Ni 첨가량이 증가할수록 잔류 액상 Cu-rich상의 양이 보다 적어지기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

Cu-Ni첨가형 열연강판의 열간균열현상 및 열간가공 과정에서 산화스케일과 기지 계면에 형성되는 상 거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Ni-free 1.2%Cu첨가형 열연강판의 경우 1100°C 이상에서 열간균열현상을 나타내었으며, 이러한 열간균열 현상은 산화스케일과 기지 사이에 형성된 액상의 Cu-rich상이 오스테나이트 입계를 따라 침투함으로써 야기된다.

2) Ni-free Cu첨가형 열연강판의 경우에는 계면을 따라 거의 연속적으로 Cu-rich상이 존재하나, Ni이 첨가됨으로써 Cu-rich상이 불연속 형태의 Cu-Ni-rich상으로

Table 3. Results of EDS analysis Cu-Ni bearing hot rolled steels heated at 1100°C for 1hr.

	name	results of EDS analysis (wt%)			Cu/Ni ratio
		Cu	Ni	Fe	
0.6%Ni contained steel	Cu-Ni-rich phase	69.31	11.94	18.75	5.8
		49.31	10.18	40.51	4.8
1.2%Ni contained steel	Ni-Cu-rich phase	11.45	19.75	68.8	0.6
		10.7	15.36	73.94	0.7

변화되어 0.6%Ni을 함유한 경우에는 산화스케일과 기지 사이의 경계면에 존재하고, 1.2%Ni을 함유한 경우에는 산화스케일층 내부에 주로 존재한다.

3) Ni-free Cu첨가형 열연강판의 경우에는 액상의 Cu-rich상이, 0.6%Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 경우에는 고상의 Cu-Ni-rich상이, 1.2%Ni함유 Cu첨가형 열연강판의 경우에는 고상의 Ni-Cu-rich상이 형성되었다.

4) Ni 첨가량이 증가할수록 열간균열 발생이 더욱 억제되었는데, 이것은 Ni 첨가량이 증가할수록 잔류 액상 Cu-rich상의 양이 감소되기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 1997년 포항종합제철(주)의 연구비 지원(관리번호 97K007)에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Tamehiro, K. Kishioka, M. Murata, Y. Kawada and A. Takahashe : Seitetsu Kenkyu, No. 337, 34 (1990).
2. K. Kishida, O. Akisue, N. Ikenaga, F. Kurosawa and K. Osamura : J.Jpn. Met. Soc., 31, 538 (1992).
3. S.R. Goodman, S.S. Brenner and J.R. Low, Jr. : Metall. Trans., 4, 2363 (1973).
4. K. Osamura, H. Okuda, M. Takashima, K. Asano and M. Furusaka : Materials Trans., JIM, 34, 305 (1993).
5. K. Born : Stahl Eisen, 73, 1268 (1953).
6. A. Nicholson and J.D. Murray : J.Iron Steel Inst., 203, 1007 (1965).
7. I.L. May and L.M. Schetky : Copper in Iron and Steel, Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, (1982).
8. S. Seo, K. Asakura and K. Shibata : ISIJ International, 37, 232 (1997).
9. N. Imai, N. Komatsubara and K. Kunishige : ISIJ International, 37, 217 (1997).