

박판의 풀림 사이클이 기계적 성질에 미치는 영향

김순경*, 이승수**, 전언찬***

Effect of Annealing Cycle of the Steel Sheet in the Mechanical Properties

Soon-Kyung Kim*, Seung-Soo Lee**, Eon-Chan Jeon***

ABSTRACT

Development on the mechanical properties of steel sheet for the automobile body panel is very important in the BAF(Batch annealing furnace) annealing process. Because of the heat treatment method in the BAF, mechanical properties were decided on the heat treatment method of the coil. So, we tested on the development of mechanical properties according to heat treatment method at the annealing furnace using the Ax atmospheric gas(H_2 : 75%, N_2 : 25%) and the HNx atmospheric gas(H_2 : 5%, N_2 : 95%). We confirmed the following characteristics : mechanical properties were changed under the influence of the annealing cycle and the atmospheric gas. And, we have some result according to heat treatment method. Elongation of the mechanical properties in the HNx BAF is higher than the Ax BAF. But tensile strength and hardness is higher than the HNx BAF.

Key Words : BAF(상 풀림로), Atmospheric gas(분위기 가스), Cold spot(저온점), Ax gas (H_2 : 75%, N_2 : 25%), HNx gas(H_2 : 5%, N_2 : 95%). Mechanical properties(기계적 성질)

1. 서론

자동차의 경량화, 소형화 추세에 따라 신 소재의 개발과 더불어 자동차에도 부분적으로 비철금속이나 플라스틱과 같은 수지 계통의 재료가 많이 대체 사용되고 있다. 그러나 플라스틱과 같은 수지류는 외국에서는 차체에 많이 사용되고 있지만 국내에서는 아직도 범퍼 등과 같이 특수한 부분에만 주로 사용되고 있다. 특히 강판 제품 중

에서도 자동차용으로 많이 사용되는 박판은 냉연강판으로 사용되는 경우와 내식성을 향상시키기 위한 도금강판이 주로 사용되는데 외장재는 주로 냉연강판이 사용되고 내장재의 경우는 도금강판이 많이 사용되고 있다.

자동차용 강판의 경우, 압연 가공 중에 발생된 금속 내부조직의 변형과 잔류응력을 제거하고 우수한 가공성을 부여하기 위하여 재결정온도 이상으로 가열하는 풀림처리를 통하여 재결정이 일어나게 한다. 냉연강판의 가공성

* 동의공업대학 자동차학과
 ** 동아대학교 대학원 기계공학과
 *** 동아대학교 기계공학과

을 나타내는 기계적 성질을 개선시키기 위하여 많은 연구가 다양하게 진행되고 있다. 이와 같이 냉연 강관의 가공성을 향상시키기 위한 풀림처리 방법으로는 소품종 대량 생산에 적합한 연속 풀림과 다품종 소량생산에 주로 사용되는 상 풀림로에 의한 풀림으로 분류된다.⁽¹⁻²⁾

상 풀림로의 풀림 처리에서는 가열에 필요한 연료비용이 가장 큰 비중을 차지하고 있으므로 적절한 가열영역을 찾아내어 관리하는 것이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 그래서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 전열성과 환원성이 우수한 분위기 가스의 수소 함량을 증가시키는 방안이 실용화되고 장치도 많이 개선되었다.⁽³⁻⁵⁾

박판을 성형 가공하여 사용하고 있는 자동차의 프레임이나 외장재는 기계적 성질이 매우 중요하다. 성형성을 결정하는 성질에는 여러 가지가 있으나 연신율이 가장 보편적으로 많이 적용하고 있는 척도이므로 본 연구에서도 성형성 분야에는 연신율, 강도에는 인장강도와 경도를 측정하여 비교하였다. 그리고 최근 가장 효율적으로 사용되고 있는 Ax 분위기가스를 사용하는 수소 상 풀림로(H₂ BAF)와 HN_x분위기 가스를 사용하고 있는 기존 상 풀림로(HN_x BAF)에서 처리된 강관에 대하여 기계적 성질의 변화에 대하여 조사하였다. 상 풀림로에서 분위기 가스의 특성에 따른 강관의 기계적 성질 변화를 제품별, 두께별로 조사연구 하였다.

2. 이론적 배경

Table 1은 분위기 가스의 주요 성분인 수소와 질소의 물리적인 성질을 비교한 것으로 수소가 질소보다 7배정도 열전도성이 우수함을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 Ax가스는 75%의 수소와 25%의 질소로 구성되어 있어, 5%의 수소와 95%의 질소로 구성되어있는 HN_x가스보다 열전달 효율이 매우 높다.

Table 1 Physical properties of hydrogen and nitrogen. (at 250K).

Items	H ₂ (a)	N ₂ (b)	a/b
Thermal conductivity (W/m.K)	0.157	0.0222	7
Viscosity (N · s/m ²)	7.89 x 10 ⁻⁶	15.49 x 10 ⁻⁶	1/2
Diffusion coefficient (m ² /s)	81.4 x 10 ⁻⁶	11.48 x 10 ⁻⁶	7
Density (kg/m ³)	0.097	1.348	1/14

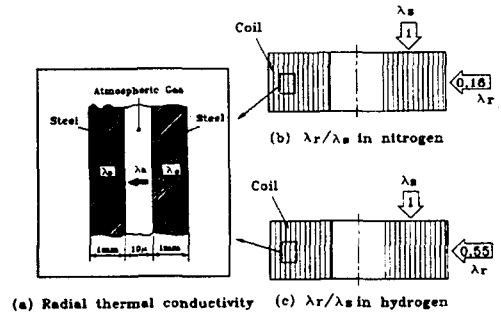


Fig. 1 Heat transfer mechanism of coil

Fig. 1은 수소와 질소가스에서 축방향과 반경방향에 대한 전열량의 비를 나타낸 것으로 (a)에서 보는바와 같이 코일의 내부에는 강관과 강관 사이에 미세한 틈새가 있기 때문에 축방향의 열전도율이 반경방향 보다 크게 됨을 볼 수 있고, (b), (c)에서 분위기 가스의 성분에 따른 열전도율의 비를 알 수 있다.

$$h \cdot \frac{D}{k} = 0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^{0.33} \quad (1)$$

$$Q = h \cdot A(T_g - T_s) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_1 - P_2}{0.5 \cdot \rho \cdot V_1^2 \cdot \{1 - (A_1/A_2)^2\}} \quad (3)$$

여기서 $\text{Re} = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu}$, $\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$ 이다.

A_1 : 디퓨저의 입구면적, A_2 : 디퓨저의 출구면적, A : 코일의 전열면적, C_p : 가스비열, D : 가스통로 직경, h : 열전달 계수, k : 코일의 열전도율, Pr : 프란틀 수, P_1 : 디퓨저의 입구 압력, P_2 : 디퓨저의 출구 압력, Q : 전열량, Re : 레이놀즈 수, T_s : 코일의 외측 온도, T_g : 분위기 가스 온도, V : 가스 속도, ρ : 가스 밀도, μ : 가스 점도, η : 디퓨저의 압력효율

열전달을 나타내는 식(1)에서 열전달 계수 h 는 레이놀즈 수와 프란틀 수와 관계가 있으며 레이놀즈 수는 분위기 가스의 속도와 통로의 직경에 비례함을 알 수 있다.⁽²⁾ 따라서 전열량은 분위기 가스의 속도와 흐름을 조절하는 베이스 팬의 직경과 큰 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 디퓨저의 압력효율을 나타내는 식(3)은 분위기 가스의 흐름과 압력에 의하여 구해진다.

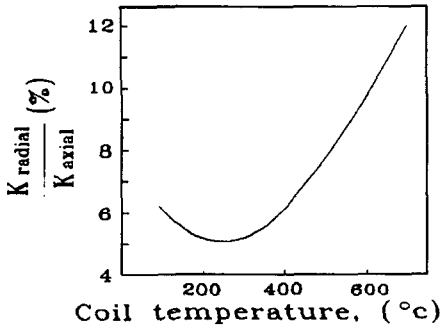


Fig. 2 Variation of heat transfer ratio on the mean coil temperature

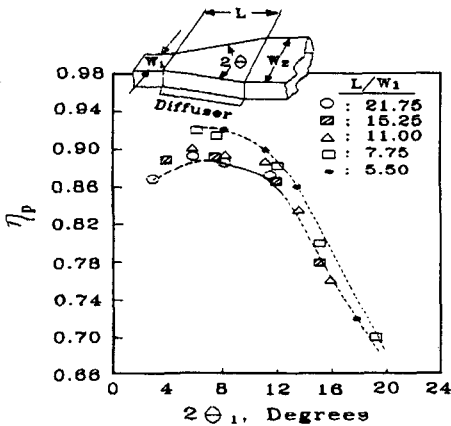


Fig. 3 Relationship between pressure efficiency and diffuser angle

Fig. 2는 분위기 가스의 온도 상승에 따라 코일의 축방향 열전도율에 대한 반경방향의 열 전도율의 비를 나타낸 것이다. 코일 온도 250°C에서 반경방향의 열전도율이 가장 낮고, 그 이상에서는 온도의 상승에 따라 반경방향의 값이 급속하게 증가됨을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 코일의 내권부에 있는 저온점(Cold spot)의 온도가 상승되기 시작하는 시점이기 때문이다.⁽²⁾

Fig. 3은 Diffuser의 압력 효율과 각도와와의 관계를 나타낸 것으로서 각도가 증가할수록 압력효율은 감소됨을 볼 수 있다.⁽²⁾ 이와 같은 현상을 줄이기 위하여 Diffuser를 설계할 때 약간의 각도를 주되 나선형으로 설계하여 압력효율을 증가시킨다. 여기서 말하는 압력효율이 증가될수록 확산효과가 증가하여 전열량도 증가하게 된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 재료

본 실험에 사용한 냉연 강판은 SAE 1008 이며, 그 화학적 성분은 Table 2에 나타난 바와 같이 탄소의 함량이 대표 값인 0.08%보다 낮은 0.06%이다.

Table 2 Chemical compositions of specimen(wt.%)

Material	C	Si	Mn	Al	Cu
SAE 1008	0.060	0.009	0.250	0.010	0.010

Table 3 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength (MPa)	Hardness (H _{RB})	Elongation (%)
SAE1008	710	86	4.2

그리고 기계적 성질은 Table 3에서와 같이 냉간압연 가공된 강판이므로 인장강도와 경도가 높고 연신율이 낮다.

실험 재료로 사용된 냉연강판은 냉간 압연 가공에서 자동두께장치(AGC)와 형상제어장치(AFC)를 사용하여 강판의 평탄도와 두께를 정밀하게 제어한 후 전해 탈지를 한 코일이며, 규격은 냉연강판의 대표적인 두께 0.8~1.4 mm, 폭 1,219 mm 인 코일을 사용하였으며 코일의 단위중량은 22톤을 기준으로 하였다.

3. 2 실험 장치

상 플립로의 플립에서 전열과정은 복사와 대류에 의하여 인너카바에서 코일로 열이 전달되며 코일자체에서는 Fig. 1에서와 같이 전도와 대류에 의하여 전열이 이루어진다. 대류에 의하여 약 70~80%의 열전달이 이루어지며 나머지가 복사에 의하여 전열이 되므로 대류가 매우 중요하므로 열전달은 분위기 가스의 종류에 따라 크게 변하게 된다.⁽⁶⁻⁷⁾

코일의 상 플립로의 구성은 Fig. 4에서 보는 바와 같고, 가열장치인 로와 화염이 강판에 직접 닿지 못하게 차단시켜 주는 인너카바가 있으며, 이와 같은 장치의 받침대 역할과 분위기 가스의 흐름을 원활하게 해주기 위한 베이스와 팬으로 구성되어 있다. 인너 카바와 코일사이에

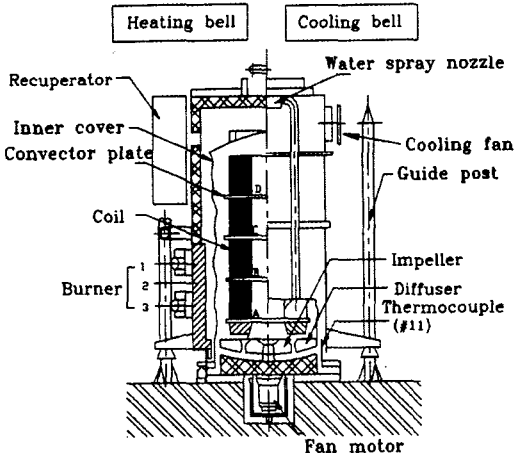


Fig. 4 Schematic diagram of annealer

설치된 열전대(#11 TC)로 분위기 가스의 온도를 제어하며 냉각시에는 공냉과 수냉에 의한 강제냉각 방법을 사용하여 냉각시간을 단축시킨다. 가열장치인 버너는 3단으로 4개씩 방사상 방향으로 12개가 설치되어 있고 연료는 경유를 사용한다. 코일과 코일 사이에는 분위기 가스의 대류효과를 증가시키기 위하여 대류판(Convector plate)을 설치하였다. 인너 카바는 전열면적을 크게 해주기 위하여 주름형태(Corrugation)로 제작하였다.

3. 3 실험 방법

상 풀림로에서 풀림처리는 연속 풀림로에서의 풀림처리와는 달리 전해청정 공정에서 권취된 코일을 3~4단으로 인너 카바 내부에 적입(續入)한 후, 가열과 냉각이 이루어지므로 각 코일의 부위별 온도분포가 시간에 따라 다양한 형태로 변화되어 정확한 온도관리가 매우 어렵다.

본 실험에서는 상 풀림로에서 HN_x 와 A_x 가스를 사용하였을 때 강판의 온도변화와 기계적성질의 변화를 두께별로 조사하였다. 열전달 계수가 우수한 수소 분위기가스를 사용하여 식(2)에서 보는바와 같이 온도 상승이 빠르게 하였을 때 금속의 조직과 기계적 성질의 변화를 조사하고자 하였다. 실험에 적용된 풀림 사이클은 680℃까지 가열하되 HN_x BAF는 135시간, H_2 BAF는 가열과 냉각이 각각 25시간으로 50시간 동안 로에서 풀림처리를 하였다.⁽⁴⁾

박판 코일은 압연 가공후 전해청정 공정에서 표면에 부착된 이물질을 제거하고 권취장력을 균일하게 한 다음

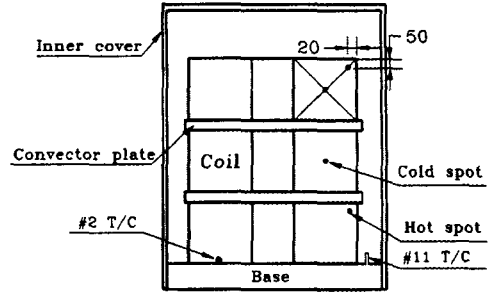


Fig. 5 Thermocouple location in the BAF

Fig. 5와 같이 3단으로 적입하였다. 적입 코일에 대한 열전대의 설치위치는 Fig. 5에서와 같이 적입 코일의 외권부와 중권부에 설치하는 것을 기준으로 하되 필요에 따라 다양하게 설치하였다. 열전대의 온도는 12채널 기록장치를 사용하여 가열에서부터 냉각이 완전하게 끝나고 장탈이 될 때까지 온도의 변화를 측정하였다. 그리고 풀림처리가 완료된 강판은 부위별로 시편을 채취하여 만능 재료시험기와 경도 측정장치에서 인장강도와 경도 그리고 연신율을 측정하였다. 그리고 기계적 성질을 측정후 동일 시편을 금속 현미경에서 금속조직도 조사하였다. 측정데이터의 신뢰도를 증가시키기 위하여 각 시험편을 100개씩 준비하여 측정하였다.

기계적 성질을 측정 비교한 다음 실제 컵핑시험(Cupping test)을 하여 성형성을 비교하였고, 금속 조직도 금속현미경으로 비교하였다. 풀림처리 사이클은 저온점의 온도를 기준으로 하되 680℃에 도달하면 냉각을 시작하였다. 분위기 가스가 수소일 때는 50시간을 기준으로 하고 기존 로에서는 135시간을 기준으로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4. 1 박판의 두께별 인장강도 비교

Fig. 6에서는 강판의 인장강도를 나타낸 것으로 시험편의 수(n)는 100개이며 표준편차(SD)는 1.0이다. 여기서 A_x 분위기 가스에서 풀림 처리된 강판의 인장강도가 전반적으로 높게 나타났다. 기존로에서 처리된 박판의 경우는 두께에 관계없이 32 kg/mm²를 나타내고 있어 거의 변화가 없고, 단지 가장 두꺼운 1.4 mm에서만 0.2 kg/mm²가 높게 나타났다. 두께별 인장강도는 균일한 분포를 나타내고 있지만, A_x 분위기를 사용하고 풀림처리 시간이 짧은 경우는 Fig. 6에서 보는바와 같이 강판

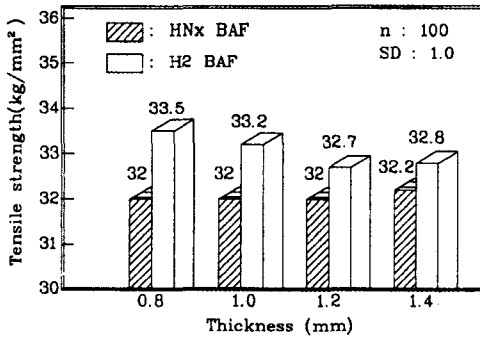


Fig. 6 Comparison of HNx BAF and H₂ BAF on tensile strength vs. thickness

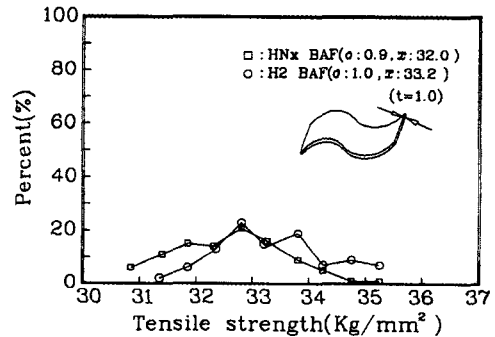
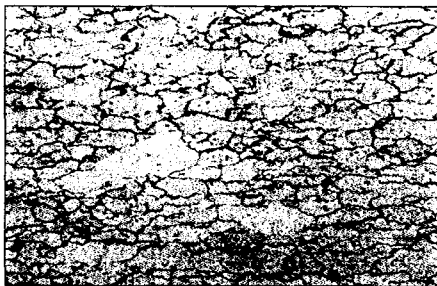


Fig. 8 Distribution of tensile strength on the BAF(thickness: 1.0mm)



a) Conventional annealing furnace (HNx BAF, x 200, thickness: 1.0mm)



b) High convection annealing furnace (H₂ BAF, x 200, thickness: 1.0mm)

Fig. 7 Microstructure of steel sheet on the BAF

의 두께가 두꺼울수록 다소 낮게 변화되었음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 것은 냉연강판의 풀림 시간이 50시간정도 소요되어 기존로보다 짧기 때문인 것으로 생각된다.⁽⁶⁾ 가열과정에서는 식(2)에서 보는바와 같이 수소가 질소에 비하여 열전달계수가 크고 식(1)에서와 같이 유량이 많기 때문에 전열량이 많아져 풀림 처리시간

이 감소되며, 냉각과정에서는 공냉방식인 기존 로보다 수냉식인 수소로가 빠르게 냉각되기 때문인 것으로 생각된다.⁽³⁻⁴⁾

Fig. 7에서 a)는 기존로에서 135시간 동안 풀림 처리한 박판의 금속조직이며 b)는 50시간동안 수소 로에서 열처리한 다음 금속 조직을 촬영한 것이다. Fig. 1에서와 같이 Ax가스의 열전달율이 크기 때문에 가열과 냉각이 빠르게 이루어져 재결정 과정에서 알맞게 성장된 팬케이크 형태의 조직이 되지 않고, 충분하게 결정이 성장되지 않아 압연과정에서 뒤틀어지고 가공경화된 미세한 조직의 형태가 Fig. 7에서 보는 바와 같이 잔존하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 8에서는 인장강도의 분포를 점유율로 나타낸 것으로 로의 종류에 관계없이 분포가 거의 유사함을 볼 수 있다. 기존 로의 값이 수소 로보다 왼쪽으로 약간 치우쳐져 있어 낮은 값을 나타내고 있지만, 분포가 같은 추이를 나타낸다. 따라서 인장강도의 경우는 분위기 가스의 변화에 대한 변화가 거의 없으므로 풀림 사이클의 수정이 크게 필요치 않는 것으로 판단된다. 특히 식 (2), (3)에서 보는 바와 같이 온도의 차가 크고 압력차가 클수록 전열량이 많고 압력효율도 높아 대류의 효과가 높다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 고온에서는 반경방향의 전열량이 점점 증가된다.⁽⁹⁾

1) 박판의 두께별 경도비교

Fig. 9는 기존 로와 수소 로에서 열처리한 강판의 경도를 나타낸 것으로 Ax 분위기 가스속에서 급속하게 처리된 강판의 경도가 전 두께에 걸쳐서 높게 나타났다. 판재로 사용되는 경우는 경도가 높은 것이 유리하지만 성형성

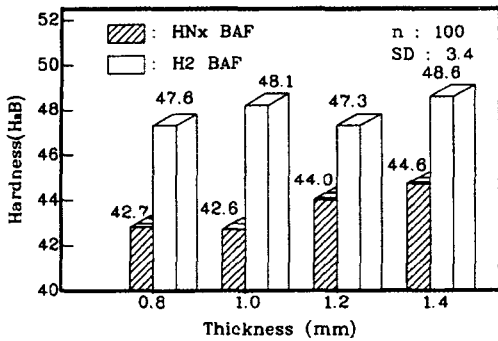
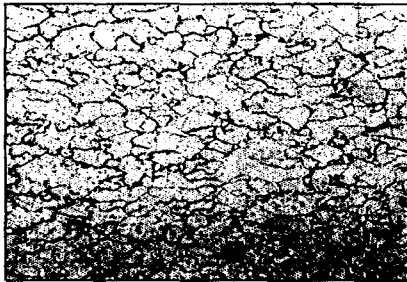
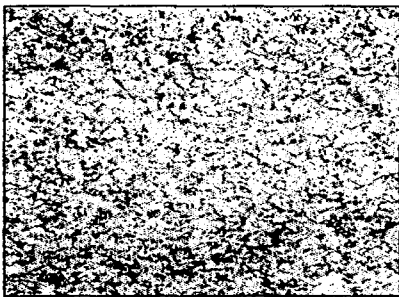


Fig. 9 Comparison of HN_x BAF and H₂ BAF on hardness vs. thickness



a) H_rB 40



b) H_rB 60



c) H_rB 90

Fig. 10 Microstructure of steel sheet on the hardness (x 200)

에는 불리하게 작용하므로 박판의 풀림처리에서는 인장 강도를 높게 유지하고 연신율도 크게 하는데 주안점을 두고 사용 용도에 따라서 풀림처리 사이클을 결정한다. 따라서 Fig. 9에서 보면 수소로의 값이 3~5정도 높게 나타나므로 풀림처리 시간을 50시간 보다 연장하여 경도를 낮게 조정해야 한다. 이와 같이 수소로에서 풀림처리된 박판의 경도가 높은 것은 Fig. 7에서와 같이 재결정이 이루어지면서 팬 케이크 형태의 조직이 형성되지 않고 충분히 결정이 성장되지 않아 미세한 조직의 형태가 잔존하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 10은 금속의 경도에 따른 금속 조직의 변화를 나타낸 것으로 HN_x BAF에서 처리된 코일의 외권부(a)와 중권부(b)에서 채취한 시편과 풀림처리전 시편(c)의 경도와 금속 조직을 나타낸 것이다. Fig. 10에서 a)의 조직이 가장 조대하게 되는 원인은 코일의 외권부와 내권부는 중권부에 비하여 급속하게 승온되어 재결정이 일어난후에도 계속적으로 가열되어 결정이 지나치게 성장되었기 때문이며, c)는 압연된 금속조직으로서 열간압연조직이 압하에 의하여 뒤틀리고 치밀하게된 조직이다. b)는 재결정은 일어났지만 완전한 결정성장이 이루어지지 않은 상태로써 일반 가공용으로는 사용이 가능하나 심가공용으로는 사용이 불가능한 조직이다. 그리고 입도를 보면 a)는 7이고 b)는 12 정도로 나타났으나 c)의 경우는 경계가 너무 흐려 정확한 입도는 측정할 수가 없었으나 15정도 되는 것으로 추정된다.

Fig. 11은 동일한 두께의 강판을 같은 방법으로 10번 열처리하고 100개의 시편을 채취하여 경도의 분포를 나타낸 것이다. 기존로의 경우는 경도의 분포가 39에서 43 범위 내에 가장 많지만 수소로의 경우는 47~51사이가

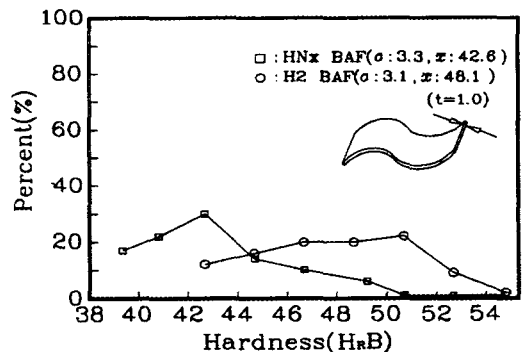


Fig. 11 Distribution of hardness on the BAF (thickness: 1.0mm)

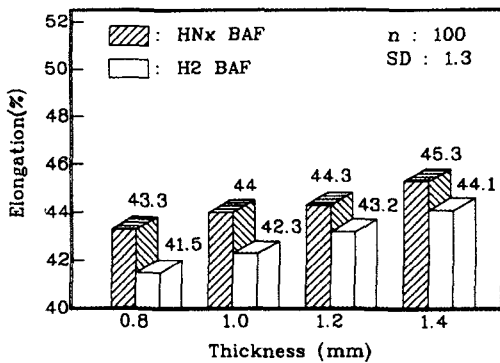


Fig. 12 Comparison of HN_x BAF and H₂ BAF on elongation(%) vs. thickness

가장 많은 점유율을 나타내며 그림은 강판의 두께를 나타낸 것이다. 평균값은 기준로가 42.6이고 수소로가 48.1로 나타나 전반적으로 보면 확연하게 수소로가 높다는 것을 알 수 있다.

2) 연신율 비교

Fig. 12는 박판의 두께에 대한 연신율의 변화를 나타낸 것으로 연신율은 기준로에서 처리한 강판의 연신율이 높게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 로의 종류에 관계없이 강판의 연신율은 두께가 두꺼울수록 높게 나타남을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 주로 성형 가공용으로 많이 사용되는 후판은 가열시에 전도성이 좋아 저온점의 온도가 빠르게 승온되어 충분한 결정의 성장이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 전반적으로 보면 수소로에서 1~2 정도 높게 나타났다. 연신율이 작으면 성형시에 강판 표면에 균열이 발생되어 성형가공이 되지 않는 것은 결정의 완전한 성장이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 상 풀림로에서는 무엇보다도 저온점의 변화를 충분히 파악하여 열처리시에 완전한 결정 성장이 이루어지게 하여야 한다. 경도와 강도가 높을수록 성형성에 직접적인 영향을 미치는 연신율은 반대로 떨어진다. 연신율이 클수록 성형이 쉬우나, 지나치게 결정이 조대화 되면 성형시에 항복점 연신이 발생되어 Stretcher-strain 현상이 발생된다.

Fig. 13은 풀림처리가 된 강판으로서 연신율이 높은 경우와 낮은 경우의 강판을 성형 시험을 해본 결과를 나타낸 것이다. a)는 연신율이 42%이고 b)는 37%이다. a)는 금형을 사용한 성형가공에서 다이의 흔적이 거의 없고

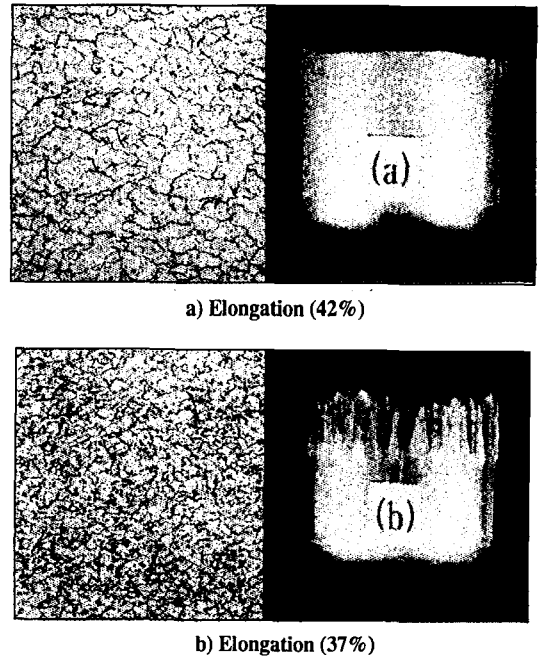


Fig. 13 Photo. and microstructure of cupping tested steel sheet(x200)

매우 자연스럽게 성형이 되었음을 볼 수 있다. 그러나 연신율이 낮은 b)의 경우는 소성변형이 강제적으로 일어나 주름진 자국이 그대로 남아 있다. 이와 같이 소성가공이 되지 않고 강제적으로 가공이 될 경우 금형의 파손이나 균열이 발생할 가능성이 높다.

성형성에 가장 큰 영향을 미치는 연신율은 재결정에서 성장된 결정의 크기와 가장 관계가 깊다. Fig. 14에서는 이와 같이 매우 중요한 연신율의 변화를 나타내었다.

Fig. 14에서 기준로의 경우는 정규 분포에 가깝지만 수소로에 비하여 광범위하게 산재해 있어 연신율의 변화가 큰 것으로 나타나 균일한 결정 성장이 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 따라서 수소의 성분이 작아 확산계수가 작고 열전달율이 낮은 HN_x는 여러 가지 요인에 의하여 균일한 열전달이 이루어지지 않고 부분적으로 또는 반복시 마다 불균일하게 가열이 되어 반복성과 연속성에서 뛰 떨어지는 것으로 생각된다.

전반적으로 연신율이 우수하여 성형가공이 용이한 기준로에서 풀림처리된 박판은 시간의 증가에 따른처리비용이 많이 들고 부위별 결정입자의 크기가 서로 다르게 나타나는 경향이 있으므로 향후 수소로의 처리 사이클을 지

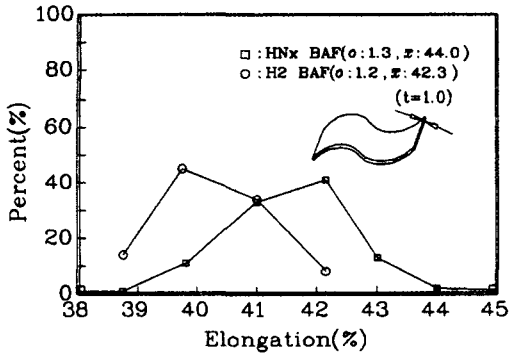
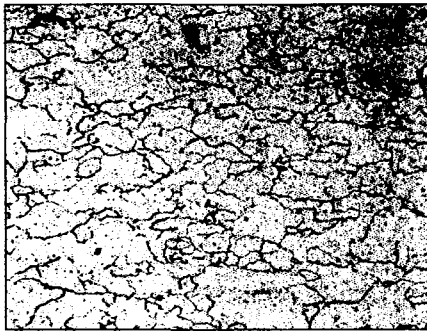
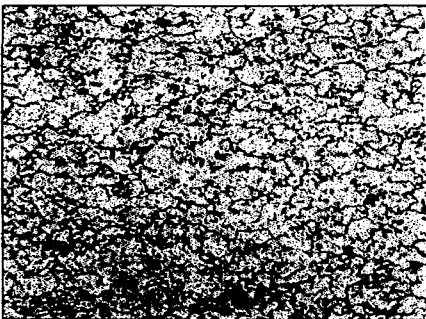


Fig. 14 Distribution of elongation on the BAF (thickness: 1.0mm)



a) Outside of coil



b) Center of coil

Fig. 15 Microstructure of steel sheet annealed in the conventional annealer (x 200)

속적으로 수정 보완하여 성형성만 향상시킨다면 상 풀림에서는 가장 효율성이 높을 것으로 예상된다.

Fig. 15는 기존로에서 처리된 박판의 부위별 금속조직

을 나타낸 것이다. 외권부는순간적이나마 과열에 의하여 조직이 조대화되어 성형은 용이하나 Stretcher-strain이 발생되기 쉽고, 중권부는 결정입자가 작아 성형가공에서 균열이 발생되기 쉬운 문제점이 있다.

5. 결론

상기내용과 같이 실험을 통하여 사이클에 따른 기계적 성질의 변화를 비교 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

HNx가스와 Ax가스를 분위기 가스로 사용하여 680℃까지 가열하여 풀림처리 한 냉연강판의 기계적 성질을 비교해 보면, 가열과 냉각이 각각 25시간만에 완료된 H₂ BAF의 경우 코일의 부위별 온도편차가 크게 발생되고 재결정이 완벽하게 이루어지지 않아 인장강도가 0.6~1.5 kg/mm² 정도 높게 나타났고 경도는 최고 5.5 까지 높게 나타났다. 그러나 135시간만에 풀림처리된 HNx BAF의 경우는 동일한 온도에서 풀림처리가 되었지만 충분한 재결정이 이루어져 강판의 두께변화에 따른 인장강도의 편차가 거의 없었고, 경도가 낮을뿐만 아니라 가공성에서 가장 중요한 연신율도 1.1~1.8% 높게 나타났다.

따라서 본 실험에 사용된 풀림 사이클에서는 H₂ BAF는 생산성을 향상시킬수 있는 장점이 있으나, 가공용 강판의 생산에는 부적합함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Mizikar, R. A., and Bresky, N. P., "Improved Quality and Productivity from Batch Annealing," American Iron and Steel Institute Regional Technical Meeting, Nov. 9, pp. 125~127, 1972.
2. Perrin, A. R., Guthrie, R., and Stonehill, B., "The Process Technology of Batch Annealing," Iron and Steel Maker, Oct., pp. 28, 1988.
3. 西野隆夫, 芝下壽夫, 宮崎英明, 齊藤康行, "100% 水素爐の設備と操業事項, 住友金屬," Vol. 44, pp. 51~52, 1992.
4. Heribert L., "The HICON/H₂ bell Annealer of Cold Rolled Strip," Iron and Steel Engineer, March, pp. 43~45, 1990.

5. Heribert L., "Annealing Cold Rolled Strip in Hi-Con./H₂ Bell Annealer," Iron and Steel Engineer, Vol. 4, pp. 46~48, 1988.
6. Rao. T. R. S. Barth. G. J. and Miller. J. R., "Computer Model Prediction of Heating, Soaking and Cooling Times in Batch Coil Annealing," Iron and Steel Engineer, September, pp. 22~31, 1983.
7. 宮田 濟, 小島宏, "Tight coil 焼鈍の傳熱解析とその應用," 製鐵研究, 第293號, pp. 81~84, 1978.
8. 전언찬, 김순경, "HNx분위기 가스 중에서 BAF플립시 코일의 온도변화에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1227~1234, 1994.
9. 전언찬, 김순경 ; "75%수소 BAF소둔로에서의 온도변화에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제11권, 제2호, pp. 173~181, 1994.