

# 鐵鋼 및 알루미늄材料的 機械的 性質에 미치는 TMT(thermomechanical treatment)의 영향

蘇 明 基\*

The Effect of TMT on Mechanical Properties of Steel & Aluminum Alloy

Myoung-Gi So

## Abstract

A study has been performed on the effect of TMT(thermomechanical treatment) on the mechanical properties of steel and aluminum alloys.

Improvement of the mechanical properties on steel by HTMT is due to refinement of prior austenite grain size, martensite lath size and the distribution of fine carbide precipitates and on aluminum alloy by ITMT is due to grain size refinement, homogeneous distribution of small second phase particles and retardation of the recrystallization.

## I. 緒 論

1950年代에 개발된 가공열처리(TMT)는 機械産業의 발전과 더불어 고강도 材料的 필요성이 급증하게 되어 개발된, 塑性加工과 熱處理를 동시에 행함으로써 금속재료를 強化시키는 열처리 방법이다.

현재, 國內에서는 방위산업용 재료를 개발하기 위해 TMT에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 고장력저합금강(HSLA), 공구강, 고강도알루미늄합금 등, 방위산업 및 기계 생산공장에서 要하는 機械的 性質을 지니고 있는 材料에 대한 연구는 필수적인 것이다. 그러던 가공열처리에 대해 알아보기로 하자.

가공열처리는 일반적으로 鐵鋼材料에 대해서는 가공온도에 따라, 저온가공열처리(LTMT), 고온가공열처리(HTMT)로 分類하며 알루미늄합금의 경우는 FTMT, ITMT, CTMT로 分類하고 있다.

먼저 鐵鋼材料의 TMT방법에 대해서 살펴보면, 1954年 Lips<sup>1)</sup> 등에 의해 처음으로 LTMT방법이 개발되었다. 이 방법은 安定한 austenite 상태에서 과냉각된 準安定상태의 austenite를 재결정온도 以下에서 塑性加工을 한후 급냉시키는 열처리 방법이다. 이와같은 처리를 함으로서 martensite 조직의 微細化, 전위밀도의 증가, 탄화물 크기의 微細化 및 분포의 균일화 등이 강화요인으로 작용하여 강도를 증가시키지만 韌性を 저하시키는 경향이 있

\* 工科大學 材料工學科 專任講師



## II. 鐵鋼材料

일반적으로 HTMT 에 의해 鐵鋼材料의 機械的 性質을 향상시키는 요인으로서 다음과 같이 두가지 理論으로 대별할 수 있다. 첫째, prior austenite grain size 와 martensite lath size 의 微細化, 둘째, 미세한 석출탄화물의 分散強化 효과로 나눌 수가 있다.

먼저 Hyspecká<sup>7)</sup> 등의 보고에 의하면 HTMT 는 austenite grain 을 미세화시키므로 가공후 급냉에 의해 얻은 martensite 조직은 미세화되어 기계적 성질이 향상되었다고 보고하고 있으며, Porter<sup>8)</sup> 등은 HTMT 에 의해 고강도강판의 grain size-를 微細化시킨 結果 강도를 증가시켰을 뿐 아니라 연성-취성 천이온도를 상당히 낮추었다고 하였다. 그러나 Zackay<sup>9)</sup> 등은 炭化物이 충분히 austenite matrix 에 용해되는 온도 영역에서는 austenite grain size 의 변화가 鋼의 기계적 성질에는 큰 영향을 주지 않는다고 보고하였다. 그래서 martensite lath size 의 미세화에 기인된다는 研究結果를 살펴보면, tempered martensite 의 항복강도가 martensite lath 의 폭과 析出炭化物간의 거리에 영향을 받는다고 보고한 Smith<sup>10)</sup> 등에 의해 다음과 같은 식이 적용된다고 하였다.

$$\sigma_{0.2} \cong \sigma_0 + xW^{-1} + yD^{-1}f^{1/3}$$

여기서  $\sigma_{0.2}$  : 0.2% yield strength

$\sigma_0$  : lattice frictional stress

W : average martensite lath width

D : mean diameter of particles

f : volume fraction of particles

x, y : coefficients appropriate to experimental model

즉, 동일한 熱處理조건에서 析出物의 體積이 일정하다고 가정하면 tempered martensite 의 항복강도는 martensite 의 lath 가 微細할 수록 증가함을 알 수 있다. 한편 인성의 증가는 martensite 변태시에 martensite lath 와 prior austenite 粒界의 상호작용에 의해 형성되는

micro-crack 을 감소시키기 때문이라고 볼 수 있다.<sup>11)</sup>

이러한 martensite 조직의 미세화효과 뿐만 아니라 鐵鋼材料의 기계적 성질에 析出炭化物이 큰 영향을 주고 있으며 탄화물이 rod 형태로 석출하면 鋼의 靱性を 크게 저하시키나 이와 반면에 탄화물이 martensite matrix 內에 구형으로 미세하게 분포하게 되면 強度와 靱性を 크게 증가시킨다. 이러한 점에 대해서 Roussev<sup>12)</sup>와 Nakamura<sup>13)</sup> 등이 보고한 바에 의하면 HTMT 를 하면 martensite matrix 內에 전위 등 많은 結晶 缺陷이 형성되므로 鋼을 tempering 할 경우 이들은 미세한 탄화물을 析出시키는 요인이 된다고 보고하고 있다. 그러므로 높은 강도와 인성을 얻기 위해서는 微細化된 lath martensite 內에 미세하고 균일하게 分散된 탄화물이 존재해야 한다고 생각되어 진다. 이러한 생각은 Habrovec<sup>14)</sup> 등의 연구결과에서 증명되고 있다.

이와같이 미세하게 분포된 석출탄화물이 항복강도에 미치는 영향에 대한 연구에서 強度와 탄화물의 관계를 Orowan 이 처음 소개하였으나 Kelly<sup>15)</sup>가 Orowan 식을 수정하여 다음과 같이 소개하고 있다.

$$\Delta\tau = \frac{0.83Gb}{2\pi(1-D)^{1/2}}(L_A - D)^{-1} \ln \frac{D}{b}$$

여기서  $\Delta\tau$  = 항복강도

D : 탄화물의 size

$L_A$  : 탄화물간의 거리

G : 전단계수

윗식에서 보는바와 같이 탄화물 크기가 작고 炭化物간의 거리가 작을수록 강도를 증가시킨다고 說明할 수 있다.

그러나 최근에 발표된 연구결과에 의하면 HTMT 처리後의 기계적 성질의 향상은 두가지 이론과 그의 여러요인이 중첩된 결과로써 생각할 수 있기 때문에 각 기구의 기여도는 조사해볼 가치가 있다고 생각된다.

Lee<sup>16)</sup>와 Kim<sup>17)</sup> 등에 의하면 고강도저합금강으로 널리 쓰이는 AISI 4330강과 열간 공구강으로 유명한 AISI H13(SKD 61)강에 HTMT

처리를 적용시킨 結果, 종래의 열처리에 비해 강도와 인성이 증가되었으며 그 기구로써 미세한 석출탄화물이 martensite lath 內에 均一하게 분포함과 동시에 martensite 조직을 미세화시켰기 때문이라고 보고하고 있다. 이 두가지 대표적인 鐵鋼材料에 대해서 HTMT를 하지 않은 시편과 HTMT 처리를 한 경우의 기계적 성질을 tempering 온도변화에 따라 표 1, 표 2에 각각 나타내었다.

Table 1. Mechanical properties of 4330 steel.

Temper-ing temp (°C)	HTMT (%)	U. T. S (kg/mm <sup>2</sup> )	Y. S (kg/mm <sup>2</sup> )	Hardn-ess (Rc)	Impact energy (kg-m/m <sup>2</sup> )
300	0	165	135	44.0	1.2
	41	170	141	47.2	1.4
400	0	150	126.5	43.7	1.2
	41	156	133.5	45.3	1.4
500	0	141	125	41.1	1.3
	41	145.5	130.5	43.4	2.0
600	0	135	118	40.2	1.6
	41	141	128	42.5	2.2

Table 2. Mechanical properties of tool steel.

Temper-ing temp (°C)	HTMT (%)	U. T. S (kg/mm <sup>2</sup> )	Y. S (kg/mm <sup>2</sup> )	Hardn-ess (Rc)	Impact energy (kg-m/cm <sup>2</sup> )
300	0	185	163	52.4	0.75
	45	192	181	53.7	0.1
400	0	185	167	53.5	0.6
	45	199	182	54.1	0.9
500	0	203	172	55.4	0.5
	45	222	189	58.9	0.8
600	0	158	143	46.5	0.6
	45	180	144	47.8	1.3

위와 같은 결과는 Nakamura<sup>16)</sup> 등의 연구결과에서 뒷받침하고 있다. 이들의 研究結果에 의하면 鋼을 HTMT 처리하여 tempering 하면

시간이 변화함에 따라 martensite 구조의 tetragonality가 감소하는 정도는 HTMT 하지 않은 시편에 비해 작기 때문에 기계적 성질이 향상되었다고 하였다.

또한 HTMT 처리가 炭化物析出을 加速시킨 driving force는 HTMT에 의해 martensite 조직내부에 증가된 vacancy 농도 및 국부적으로 축적된 residual strain 등이 있으며 이것이 tempering 시 合金炭化物을 형성하는 合金原素의 확산을 촉진시키는 것이라고 생각된다.<sup>18)</sup>

이외에도 Fig. 1-(a)에서 보이는 바와 같이 HTMT는 고온에서 加工을 行하기 때문에 가공하는 도중에 발생하는 전위의 回復 및 austenite grain의 再結晶현상이 석출탄화물에 미치는 영향에 대해서 고려해 볼 필요가 있다. 여러 연구자들에 의하면 가공시 일어나는 전위의 回復 및 재결정은 가공온도, 가공도에 영향을 받는다고 하며 위와같은 現象은 가공온도가 높고 가공도가 클수록 빠르게 일어난다고 보고하고 있으므로<sup>19~24)</sup> HTMT 효과를 크게 하기 위해서는 비교적 가공온도를 낮게하고 가공시간을 짧게하며 가공후 즉시 급냉하여 가공적 전위의 회복 및 재결정이 일어나지 않도록 해야 한다.

### III. 알루미늄 合金材料

여러 알루미늄合金들 중에서 특히 높은 강도를 갖고있는 7075系 合金은 항공기, 자동차, 선박, 군전투장비 등의 材料로 널리 使用되고 있다. 이와같은 Al-Zn-Mg系 合金이 높은 강도를 지니는 이유는 여러 연구 결과에 의하면<sup>25)~27)</sup> 다음과 같이 설명된다. 時効溫度 및 時間에 따라 시효 초기에는 과포화 固溶體로부터 구형상의 G.P. zone이 30~50Å 크기로 析出하며 時効가 진행됨에 따라 G.P. zone은 성장하여 200~500Å 크기의 7'相으로 석출하며 이때 G.P. zone과 혼합된 상태에서 최대강도가 얻어지고 마지막 平衡相인 7로 변화한다. 이와 같은 析出物에 의해 상당한 강도의 증가가 일어나며 이에 대한 理論을 살펴보면 內部

應力에 의한 강화이론, 석출물의 分散強化이론, chemical hardening 이론, Peierls stress 차이에 의한 강화이론 등 여러가지가 있다.

그러나 이와같이 높은 강도를 지닌 高强度알루미늄합금은 연신율, 내용력부식성, 인성 등이 제한되어 있는바 ITMT에 의한 이들의 향상요인을 크게 grain size의 微細化, second phase particle의 영향, 재결정률 등으로 나눌 수가 있다.

ITMT 방법은 Fig. 1-(b)에 나타난 바와 같이 그 과정을 鑄造후 균질화처리, warm deformation, 재결정처리, 용체화처리 등으로 구분할 수 있는데 이들을 조절하여 미세한 grain size를 얻을 수가 있다. DiRusso<sup>5)</sup> 등은 최초 균질화 온도를 400°C로 유지하여 部分的 균질화 처리후 低温加工을 하면 再結晶과정에서 미세한 grain size를 얻을 수 있으며 그 결과 강도는 일정하게 유지하면서 연신율은 종래의 열처리방법에 비해 약 30%정도 증가된다고 보고하였다. 즉 grain size가 미세할수록 grain boundary에 억제되는 slip line의 길이가 짧기 때문에 균열이 일어나기가 힘들며 변형도 거의 均一하게 일어나므로 연신율이 증가한다고 본다. 또한 Waldman<sup>6)</sup> 등은 균질화처리를 높은 온도에서 행하여 Cr을 석출시킨후 로냉하여 주 첨가원소를 석출시켜 줄으로써 역시 미세한 grain size를 얻었으며 기계적성질은 DiRusso와 거의 동일한 결과를 얻었다. 단지 이들의 차이점은 DiRusso는 Cr을 석출시키지 않고 結晶粒을 미세화 시켰으며 Waldman은 Cr을 석출시켰지만 다른 원소인 Zn, Mg, Cu 등을 석출시켜 grain size를 미세화 시킨 점이다.

한편 주괴응고시 Fe, Si 등의 不純物에 의해서 不溶性 金屬間化合物인 FeAl<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Si, (Fe, Mn) Al<sub>6</sub>와 母相內에 고용하지 못한 非平衡相인 CuAl<sub>2</sub>가 형성된다. 이러한 입자들은 파괴시 micro void의 核이 되어 인성에 나쁜 영향을 주며 파괴인성(K<sub>1c</sub>)과는 다음과 같은 관계가 성립된다고 보고되었다.<sup>28)</sup>

$$K_{1c} = 2[\sigma_y E (\frac{\pi}{6})^{1/3} D]^{1/2} f_c^{-1/6}$$

여기서  $\sigma_y$ : yield strength

E: Young's modulus

D: diameter of particle

$f_c$ : volume fraction of particle

즉 이들 粗大한 2차상 입자의 volume fraction이 크면 인성값이 低下된다. 그러므로 이들 입자의 형성을 억제하고 Cr, Zn, Mn 등의 中間粒子가 분포됨으로써 再結晶과 核成長을 억제한다. Vanstone<sup>29)</sup> 등은 Cr-rich particle이 미세하고 均일하게 분포된 경우와 크고 不均一하게 분포할 경우에 동일한 應力을 가했을 때의 Cr-rich particle과 matrix interface간의 small crack initiation에 대하여 說明하고 있다. 즉, Cr-rich particle이 미세하고 均일하면 small crack initiation이 어려워져 microvoid coalescence가 늦게 일어나 靱性이 향상되며 만일 Cr-rich particle이 크고 불균일하면 small crack initiation이 쉽게 일어나 microvoid coalescence가 쉽게 일어나서 인성이 低下된다고 보고하고 있다. Han<sup>30)</sup> 등은 ITMT의 가공도가 증가하면서 인성이 향상되는 이유로는 변형되었으나 再結晶이 完全히 일어나지 않은

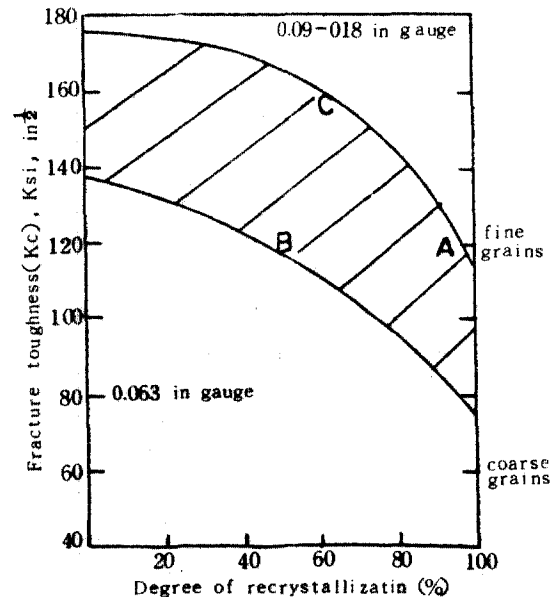


Fig 2. Effect of degree of recrystallization on fracture toughness  $k_{1c}$  (Ref .31)

grain 상태와 미세한 grain size 및 Cr-rich particle 이 미세하고 균일하게 분포되었기 때문이라고 설명하고 있다. 이외에도 철강재료에 TMT를 적용시켰을 때와 같이 가공도중에 발생하는 재결정의 영향, 전위의 회복 등도 알루미늄합금재료의 기계적 성질에 미치는 요인으로 생각될 수 있다. 이와같은 재결정의 영향, 즉 재결정률이 인성에 미치는 영향은 Fig. 2에 나타나 있다.<sup>31)</sup> 이 그림에 의하면 ITMT 0%의 상대적인 위치를 미세한 grain 과 100% 再結晶조직인 A라고 가정하면 재래식 열처리 경우는 재결정이 완전하게 일어나지 않았으므로 A의 위치가 되어 두 경우의 靱性값은 비슷한 수준을 유지하고 있다. 그러나 재결정이 완전히 끝난 상태에나 가공을 하게 되면 sub grain 이 形成되고 가공후 재결정이 거의 일어나지 않게 되므로 재결정률은 0%에 비해 줄어들게 된다. 이와같이 재결정률이 줄어들게 되어 그림에서 보는 바와 같이 C의 위치가 되어 인성이 증가할 것이다.

#### IV. 結 論

本考에서 檢討하여 본 鐵鋼材料 및 알루미늄

#### 참 고 문 헌

1. E.M.H.Lips and H.Van Zuilen. Metal Progress Vol. 66, No. 2(1945)
2. M.J.May and D.J.Satham, "Thermomechanical Treatment of Steels" 強靱性 Kyoto International Conference Hall(1947) P. 157
3. Eric B.Kula and S.Victor Radcliffe. "Thermomechanical Treatment of Steel" Journal of Metals, October(1963) P. 755
4. G.Thomas "The Improvement in Stress-corrosion Resistance of Aluminum D.T.D 687 Alloy". J.Inst Metals(1960~61) vol 89. P. 287
5. E.DiRusso, M.Conserve, M.Buratti and F.Gatto. "A New Thermomechanical Procedure for Improving the Ductility and Toughness of Al-Zn-Mg-Cu Alloys in the Transverse Directions" Mater. Sci., vol. 14,(1974) P. 23-26
6. J.Waldman and H.Sulinski and H.Markus "The Effect of Ingot Processing Treatment on the Grain Size and Properties of Aluminum Alloy 7075" Met. trans. A. vol 5,(1974), P. 573.
7. L.Hyspecka, O.Necas and K.Manazec, "On Some Physical Metallurgical Parameters of

合金材料의 기계적 성질에 미치는 TMT의 영향을 종합하면 다음과 같다.

1. 鐵鋼材料에 HTMT를 적용한 결과, 強度와 靱性を 향상시켰는데 그 원인으로는 prior austenite grain size와 martensite lath size의 微細化 및 微細한 析出炭化物的 分散強化효과에 기인된다고 생각할 수 있다.

2. 알루미늄합금材料에 ITMT를 적용한 결과 grain size의 미세화, 미세한 second phase particle의 均一한 분포 및 재결정의 억제 등으로 기계적 성질, 특히, 인성이 크게 증가되었다.

3. 위와같이 TMT는 대규모의 시설이 필요 없음에도 불구하고 金屬材料의 기계적 성질을 향상시키므로 방위산업 및 각종 기계생산공장에서 高強度와 高靱性を 요하는 素材가 요구되고 있는 현시점에서 개발이 요구되는 과제라고 생각된다.

4. 本考에서 고찰해본 몇가지 理論에 TMT가 金屬材料의 기계적 성질에 미치는 효과에 대해서는 아직도 규명해야 할 연구과제라 사료된다.

- Thermomechanical Treatment" Trans. ISIJ, vol 11, (1971). P. 117.
8. L.F.Porter, D.S.Dabkowski, "Ultrafine grain Metals" Proc. 16th Sagamore Conf. P. 133. Syracuse Univ. Press(1970)
  9. V.F.Zakay, W.M,Justusson and D.J.Schmatz, "Strengthening by Martensitic Transformation" ASM(1962) P. 129
  10. D.W.Smith, R.F.Hehemann, "Influence of Structural Parameters on the Yield Strength of Tempered Martensite and Lower Bainite," JISI. vol 209(1971)
  11. M.Tvrđy, L.Hyspecka and K.Mazanec, "Effect of High Temperature Thermomechanical Treatment on mechanical Metallurgy Characteristics of High Strength Martensitic Steels" Metals. Technology, Mar.(1978) P. 73
  12. R.Roussev, "High Temperature Thermomechanical Treatment of Low Alloy Steel" Men. Sci. Rev. Met vol 67(1970) P. 173
  13. Mamoru Nakamura, Hitoshi Asamura and Kyuhiko Yamanaka, "On the Tempered Structure of Worked and Quenched 0.47%C Steel" Nippon Gakkai Si, vol. 32(1968) P. 1043
  14. F.Habrovec, "The Application of Dispersion Strengthening of Martensite in the Design of High strength Steels" Mat. Sci. Eng. 21(1975) P. 93~105
  15. P.M.Kelly, International Metals Review 18,(1973), P. 31
  16. J.S.Lee, S.S.Chun, "The Effect of High Temperature Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of Vanadium Modified AISI 4330 Steel" KAIS thesis, (1979)
  17. D.H.Kim, M.G.SO, and S.S.Chun, "The Effect of High Temperature Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of AISI H13 Hot Work Tool Steel". J. of the Kor. Inst. of Metals vol 19, No. 1(1981) P. 18~27.
  18. Edgar C.Bain and Harold W.Paxton, "Alloying Elements in Steels" ASM,(1966) P. 218
  19. Eugen Schmidtmann and Helmut Hlawiczka. "Wirkung einer Thermomechanischen Behandlung bei Hoher Temperature auf die Entfestigung des Austenits" Arch Eisenhüttenwes vol. 44 No. 5,(1973) P. 403
  20. A.P.Baschenko, N.D.Melinichenko, T.P.Popovskaya, V.S.Arzasov, and V.A.Stol'yarov, "Recrystallization of Austenite during High Temperature Thermomechanical Treatment of Steels Alloyed with Carbide-forming Elements" Met. i Term. Obrabot. Met. No. 8(1973) P. 20
  21. I.N.Dryukova, Y.S.Tomenko, A.A.Paschehenko and Z.I.Selyanko. "Recrystallization of Low Alloy Steels after Hot Deformation" Met. i Term.Obrabot. Met. No. 3(1976), P.32
  22. M.L.Bernshtein and N.A.Radzivilova, "Change in the Structure of Steel Shkh15SG after Hot Deformation during HTMT" ibid. No. 7(1974) P. 19
  23. L.I.Tushinskii, L.B.Tikhomirova, and P.V.Reshed'ko, "Kinetics of Softening Processes in Steel 5khv2S after HTMT", ibid. No. 7(1974) P. 15
  24. A.N.Kasilov, V.Y. Maksimenko, M.A. Podvalyak, and N.M. Fetisov., "Effect of holding after Deformation and before Quenching on Strengthening of Steel by HTMT". ibid. No. 2(1978), P. 47
  25. G.Thomas, J.Natting, "The Ageing Characteristics of Aluminum Alloys". J.Inst. of Metals vol. 88, (1959~60). P. 81

26. R.R.Vanhorm(ed) "Aluminum" vol. 1. ASM(1967)
27. A.Kelly, R.B.Nicholson, "Precipitation Hardening" Progress in material science P. 151
28. G.T.Hann and A.R.Rosenfield, "Matallurgical Factors Affecting Fracture Toughness of Aluminum Alloys". Met. Trans. A, vol. 6 A,(1975), P. 653
29. R.H.Vanstone and J.A.Psioda, "Discussion of Metallurgical Factors Affecting Fracture Toughness of Aluminum Alloys." Met. Trans., vol 6 A,(1975) P. 668
30. Y.S.Han and S.S.Chun, "The Effect of Thermomechanical Treatment on the Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy", KAIS thesis(1980)
31. D.S.Thompson and R.E.Zinkham, "The Effects of Alloying and Processing on the Fracture Characteristics of Aluminum Sheet." Eng. Frac. Mech.,(1975) vol. 7, P. 389.