

論 文

高珪素-Al合金의 高温強度에 關한 研究

南泰運\*

A Study on the Strength of High-Silicon Aluminium Alloys at Elevated Temperatures

Tae-Woon NAM\*

ABSTRACT

In this study, the variations of tensile strength and yield strength of Al-20% Si alloy were studied. Copper, magnesium and nickel as alloying elements added from 1% to 3% respectively. The temperature range was from room temperature to 350°C. The refinement of primary silicon crystal was treated with phosphorous addition. The results obtained are as follows:

- 1. Tensile strength and yield strength showed more increased strength in refining treated alloy than that of in nonrefining alloy at elevated temperature.
2. Tensile strength and yield strength were increased with the contents of copper. Tensile strength showed the maximum at 150°C, but yield strength was decreased with increasing temperature.
3. The effect of magnesium addition on tensile strength and yield strength showed the maximum at 1% addition and 150°C.
4. Tensile strength and yield strength showed a slight increase with the content changes of nickel and they were decreased with increasing temperature.

1. 緒 論

高珪素-Al合金은 Al 합금 중에서 熱膨脹係數가 작고, 耐磨性이 뛰어나며, 상당한 強度와 耐熱性을 갖고 있어 鑄鐵과 비교해서 그 強度比가 크다는 잇점 때문에 내연기관의 piston 재료로 널리 사용된다. 그러나 高珪素-Al合金은 珪素의 含量이 共晶組成보다 많은 過共晶이므로 初晶으로 晶出되는 珪

素가 六角板狀으로 粗大하게 晶出하므로 기계적 성질 및 切削加工性的 低下를 招來1) 하므로 이러한 粗大한 初晶珪素를 微細化하는 方法에 대한 研究가 다각도로 행하여 졌다.2~9) 또한 高強度를 얻기 위한 여러 가지 合金元素를 添加하는 研究도 많이 행하여 졌다.10~13) 그러나 지금까지의 모든 기계적 성질의 측정은 常溫에서만 행하여 졌으나 실제 내연기관에서 piston 이 작동할시는 어느 정도의 熱을 받는 조건에서 作動하므로 溫度의 影響을 무시할 수

\* 漢陽大學校金屬材料科助教授

없는 상황인데도 지금까지 별 研究가 없었다. 따라서 본 연구에서는 微細化 處理의 方法으로는 赤磷(P)을 添加하여 微細化 處理하는 方法을 擇하였으며, 高強度를 위한 合金 元素로서는 Cu, Mg, Ni을 添加하여 溫度의 影響을 조사 검토하였다. 최고 온도 350°C 까지 100°C 간격으로 高溫強度 變化를 調査 檢討하였다.

2. 實驗 方法

實驗에 사용된 原料와 試片의 化學組成은 Table 1과 같다. 순 Al과 金屬 Si를 15 KVA 高周波誘導爐에서 12번 흑연도가니를 사용하여 Al-30% Si 중합금을 제조하였으며 이 30% Si 합금에 Al을 添加하여 500번 흑연도가니에서 목표조성 Al-20% Si 합금을 만들었다.

이 합금을 전기로에서 재 용해하여 添加元素 Cu, Mg, Ni을 각각 1~3% 添加하여 脫gas 처리 후 微細化 處理劑 赤磷(P)을 용탕의 0.3%를 Al foil에 싸서 용탕 중에 混入하여 微細化 處理를 行하였다. 미세화처리를 끝낸 용탕을 200°C로 豫熱시킨 Fig. 1의 金型에 鑄入하여 試片을 제조한 후 試料底部의 20mm부근을 切斷하여 Fig. 1의 하부와 같은 高溫引張 試驗用 試片을 제조하였다. 인장시험은 Instron Universal Testing Machine model 1127을

Table 1. Chemical Composition of Metal (%)

	Al	Si	Cu	Mg	Ni
Al ingot	99.8	0.19	0.01		
Metal Si		98.0			
Cu			99.9		
Mg	0.05			99.8	
Ni					99.8
Al-20%Si	79.9	19.9	0.18		
Al-20%Si -x Cu	1	78.9	20.2	0.98	0.10
	2	77.4	20.4	1.94	0.10
	3	77.0	19.8	2.85	0.10
Al-20%Si -x Mg	1	78.3	20.7	0.19	0.96
	2	77.9	19.9	0.19	1.92
	3	76.7	20.4	0.19	2.90
Al-20%Si -x Ni	1	78.3	19.8	0.21	1.06
	2	77.3	20.2	0.20	2.12
	3	77.0	20.3	0.23	3.08

사용하여 行하였다. 引張試驗機의 사용조건은 Cross head speed 1 mm/min, holding time 20분, load 5ton으로 行하였다. 항복 강도는 0.2% offset 方法으로 결정하였다. 또한 破斷面을 觀察하기 위해 SEM 사진을 調査 檢討하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1 微細化 處理의 影響

첨가원소를 첨가하지 않은 狀態에서 Al-20% Si 合金의 微細化處理한 것과 않은 것의 항복강도와 인

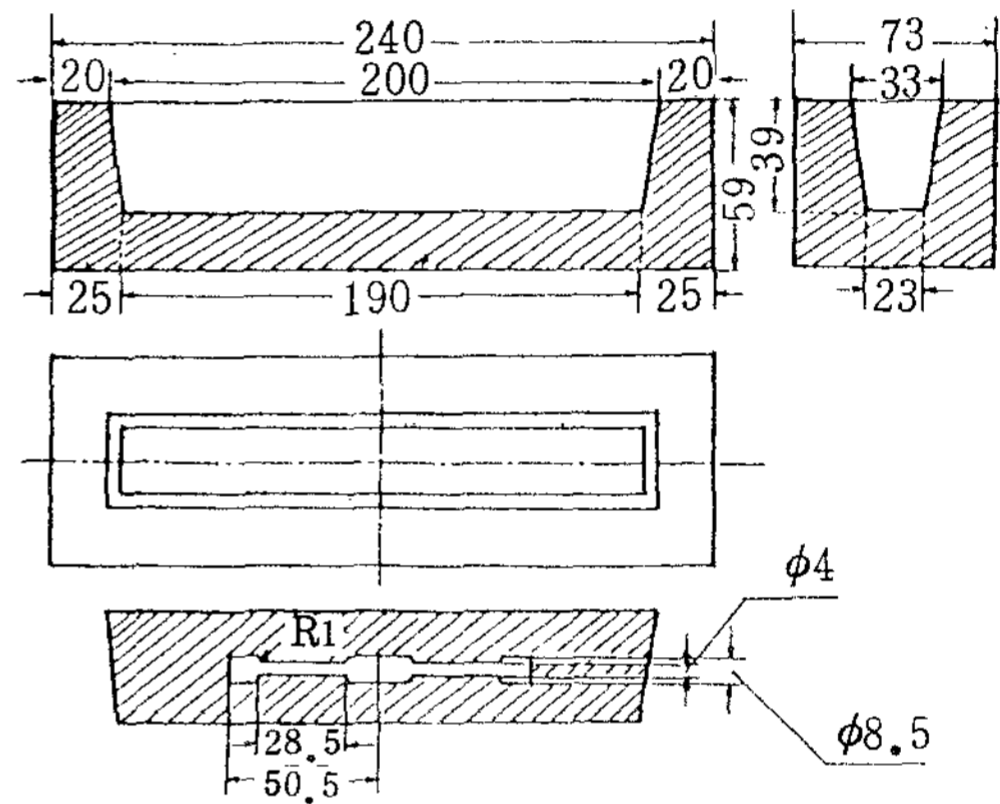


Fig. 1. Schematic diagram of mold & tensile specimen (mm).

장강도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 온도가 常溫으로 부터 350°C로 上昇

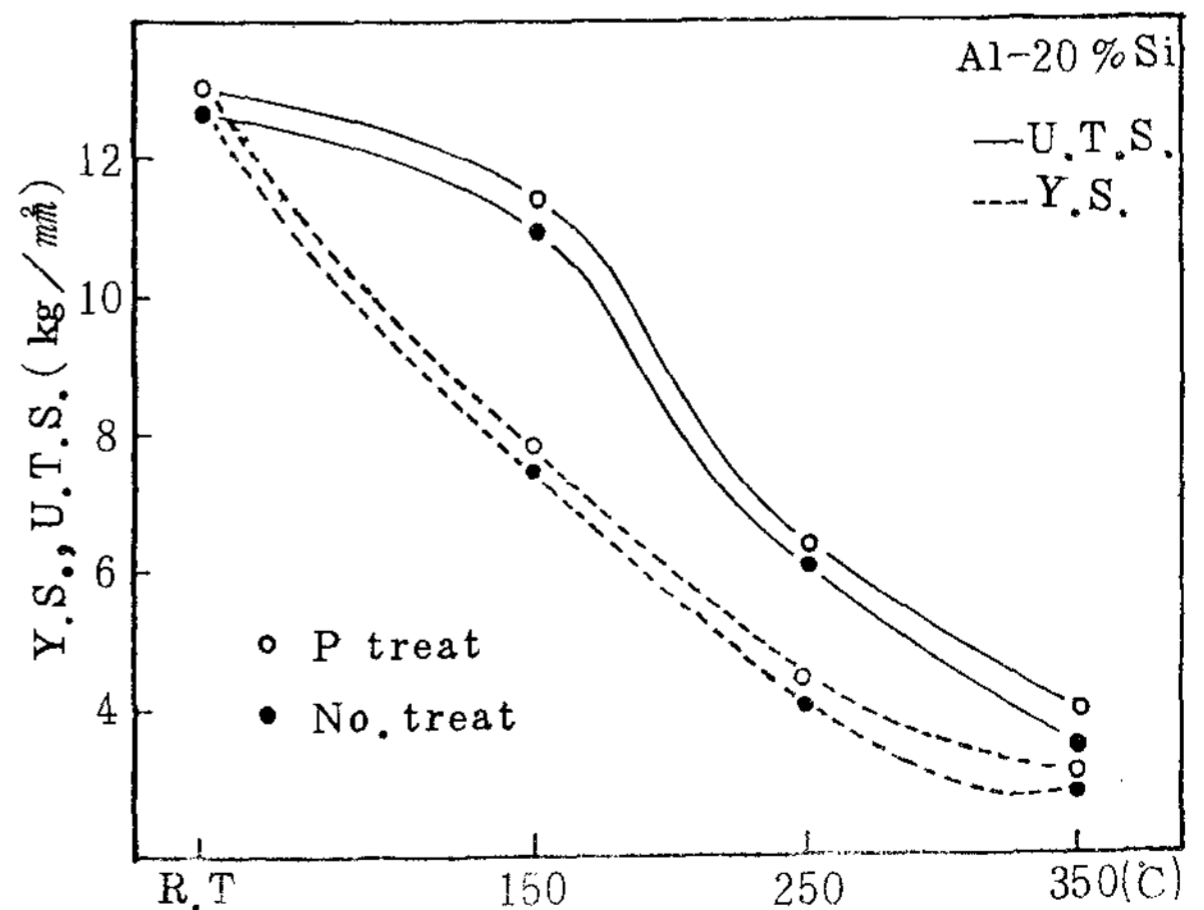


Fig. 2. The relationship between tensile strength and temperature at no addition elements.

함에 따라 引張強度와 항복강도가 低下하나 微細化處理한 것이 어느 溫度에서나 微細化處理하지 않은 것에 비해 強度가 약간 上昇하는 경향을 나타내고 있다. 이는 初晶珪素의 粒子微細化에 의한 強靱성의 增加에 起因된 것으로 생각되며<sup>14~16)</sup> 上田<sup>22)</sup> 등은 결정 破壞時 초정 Si 입자와 기지조직과의 界面에서 먼저 破斷이 일어나서 基地組織으로 轉과되는데 引張強度에 미치는 粒子크기의 影響을 다음 식으로 표시했다.

$$P_T = c \varepsilon^n d$$

- $P_T$  ; 破壞의 確率
- $\varepsilon$  ; strain 량
- $n, c$  ; 상 수
- $d$  ; 珪素의 粒子直徑

즉 Si 粒子가 커지면 破壞의 確率が 커지며 引張強度는 粒子크기에 反比例함을 알 수 있다.

引張強度와 항복강도를 比較하면 150℃에서 그 값의 차이가 많은 것은 150℃ 부근의 溫度에서는 溫度上昇으로 인한 軟化 현상이 거의 없으며 항복 변형후 가공경화 현상으로 생각되며 溫度가 上昇할 수록 그 차이가 작은 것은 軟化現狀이 심하게 일어나 가공경화 현상을 크게 기대할 수 없기 때문이라 생각된다.

Fig.3 은 引張試片의 破面을 찍은 SEM 사진으로

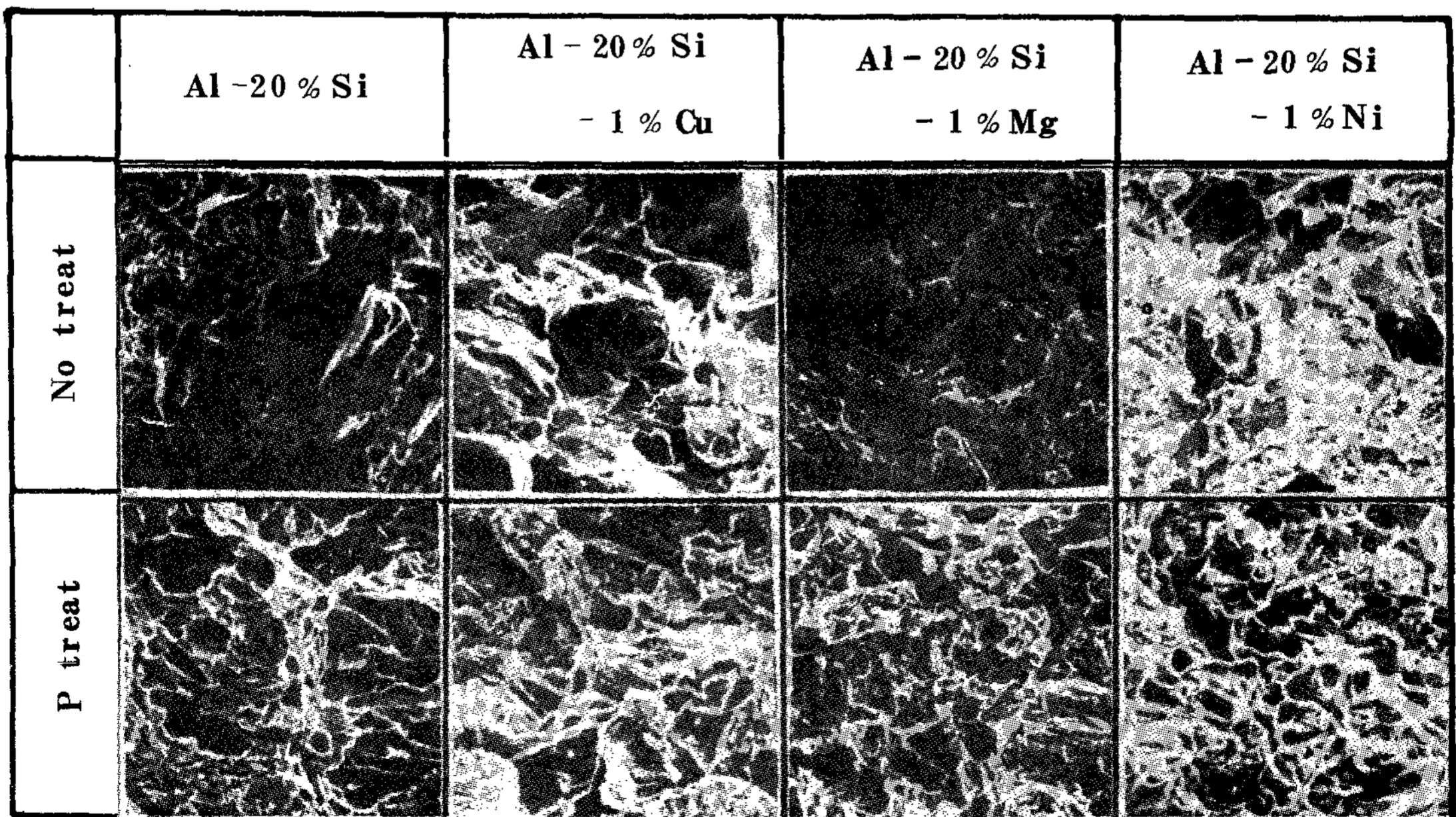
Cu, Mg, Ni 을 1% 添加한 것으로 상단은 無處理한 狀態이며 하단은 微細化處理를 행한 것의 破面을 나타내는데 Cleavage pattern 을 나타내는 初晶珪素의 크기가 微細化處理로 인하여 작아졌으며, 基地組織은 dimple pattern 을<sup>17)</sup> 나타냄을 보여 준다. 특히 Mg 1% 添加後 微細化處理한 것이 가장 緻密한 dimple pattern 을 나타내고 있다.

Fig.4 는 각 첨가원소를 3% 첨가했을 때의 SEM 사진이다.

### 3-2 Cu 添加의 影響

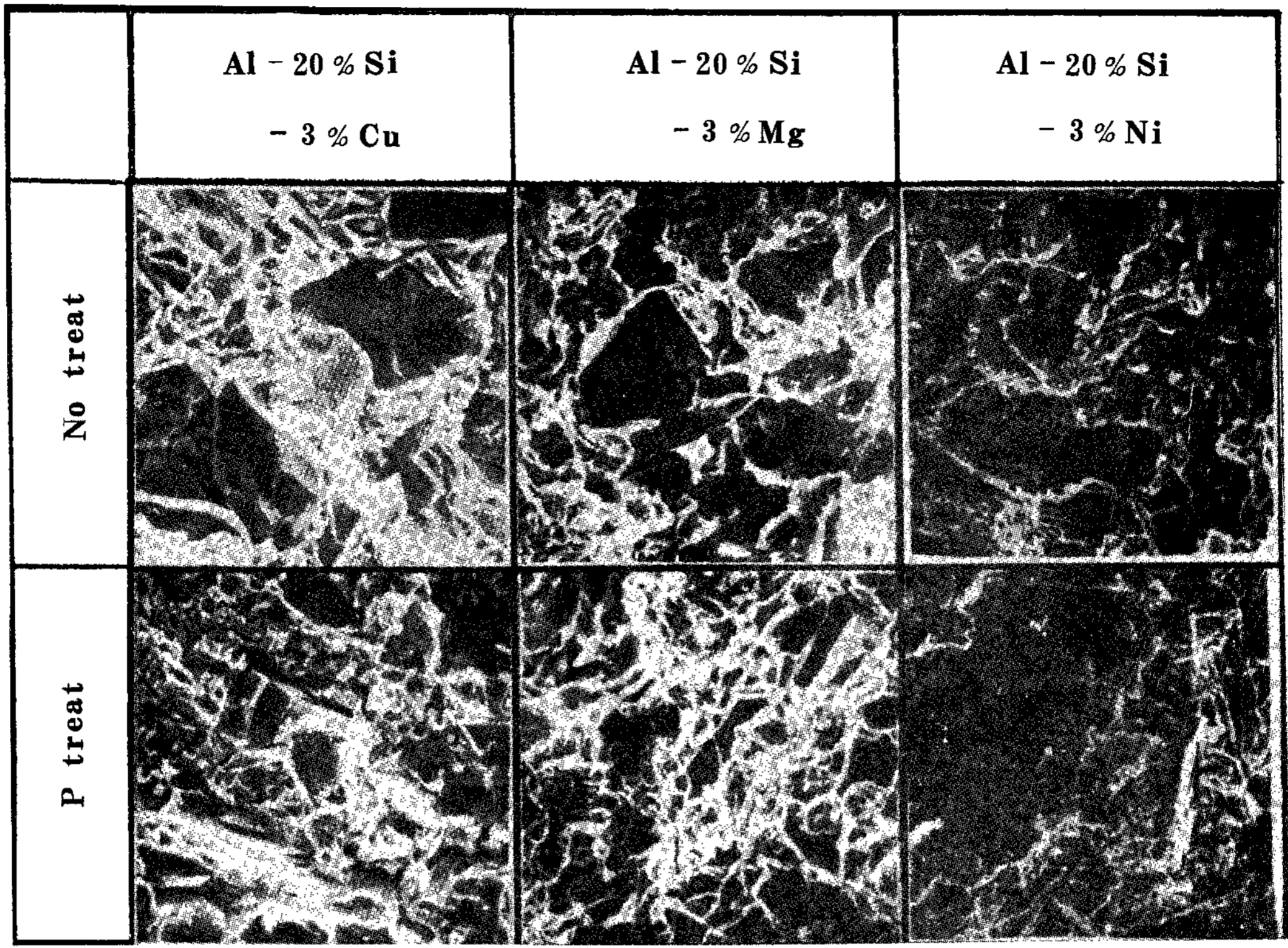
Cu 를 1~3% 添加했을 때 溫度에 따른 항복강도와 引張強度는 Fig.5 와 같다. Fig.5 에서 Cu 添加량이 3%인 경우가 1% 添加한 경우보다 引張強度 및 항복強度가 增加하였다. 이는 Cu의 固溶強化에 기인한 것으로 생각되며 또한 Al에 대한 Cu의 용해도가 5.7%이므로 析出強化에 의한 強化現狀도 계속 일어날 수 있기 때문이라 생각된다.

引張強度의 경우 원소를 添加하지 않은 앞의 경우와는 달리 상온보다 150℃에서 더욱 높은 強度를 나타냈다. 이는 생성된 CuAl<sub>2</sub> 등의 化合物이 온도상승시 析出하여 시효에 의한 석출강화현상이 일어났기 때문이라 생각된다.<sup>18)</sup>



X 200

Fig. 3. Scanning electron microscope of fracture surface.



X200

Fig. 4. Scanning electron microscope of Al-20% Si alloy added 3% alloying elements.

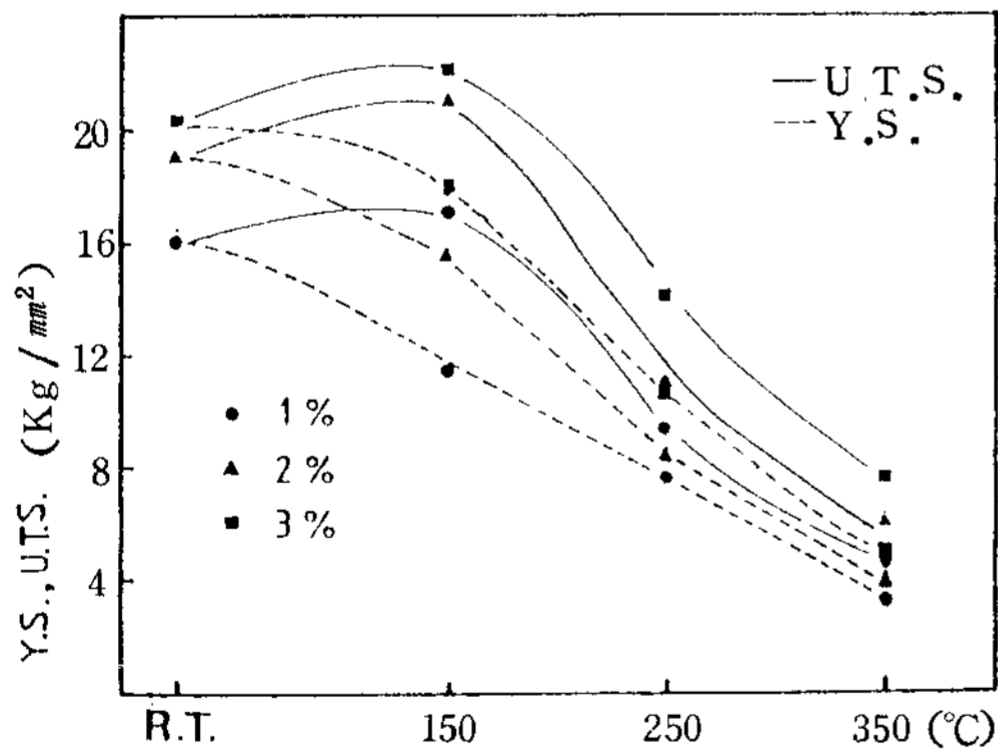


Fig.5. Effect of copper addition on the tensile strength at elevated temperatures.

항복강도의 경우는 온도가 상승함에 따라 거의 직선적으로 감소함은 역시 위와 같은 원인으로 설명될 수 있다고 생각된다.

Fig.6 은 첨가량을 1~3%로 변화시킬 때 150°C, 250°C, 350°C에서의 항복강도, 인장강도를 나타낸 것이다. Cu 량이 증가할 수록 강도가 상승한 것은 전술

한 바와 같고 다만 150°C일 때 그 상승폭이 큰 것은 역시 전술한 시효에 의한 강화현상 때문이며 온도가 250°C, 350°C로 상승함에 따라 강도 상승폭이 좁고 강도가 저하하는 것은軟化現狀으로 인하여 고용강화 및 석출강화의 요인이 없어지기 때문이라 생각된다.

3-3 Mg 添加의 影響

Mg 을 1~3% 添加했을 때 온도變化에 따른 항복강도와 인장 강도는 Fig.7 과 같다. Fig.7 에서 인장강도는 Cu 添加의 경우와 유사하게 常溫보다 150°C 에서 강도가 더욱 컸으며 Cu 添加 경우보다 그 효과가 더욱 컸다. 이는 添加된 Mg 이 Si 과의 결합력이 커서 Mg<sub>2</sub>Si 를 생성하여 이의 석출에 의한 강화라고 생각되며<sup>19)</sup> 이 合金의 析出過程은<sup>20)</sup> 과포화 固溶體 → G.P. Zone → β' (中間相) → β' (평형상) 의 軟化現상으로 강도가 低下된다고 생각된다.

항복강도의 경우 전술한 Cu 添加의 경우와는 달리 常溫보다 150°C 에서 강도 상승 효과가 나타났다. 이는 석출강화에 기여하는 Mg<sub>2</sub>Si 와 Al 과의 공정온도가 595°C 이므로 150°C 에서 석출강화물로서 작용할 수 있으므로

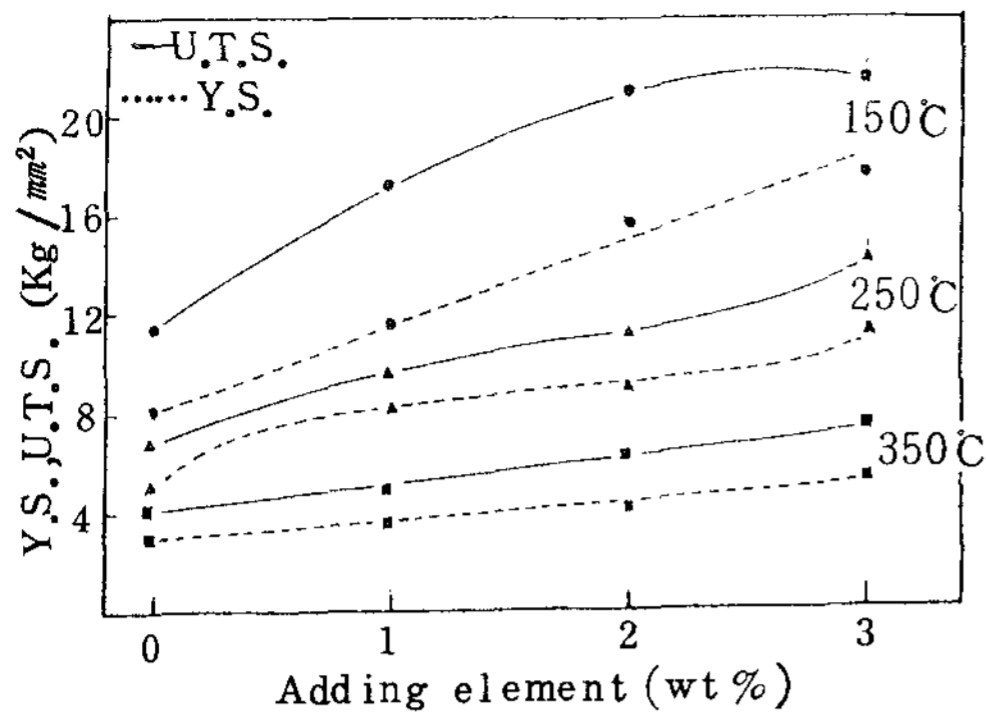


Fig. 6. Relation between tensile strength and Cu of Al-20% Si alloy at elevated temperatures.

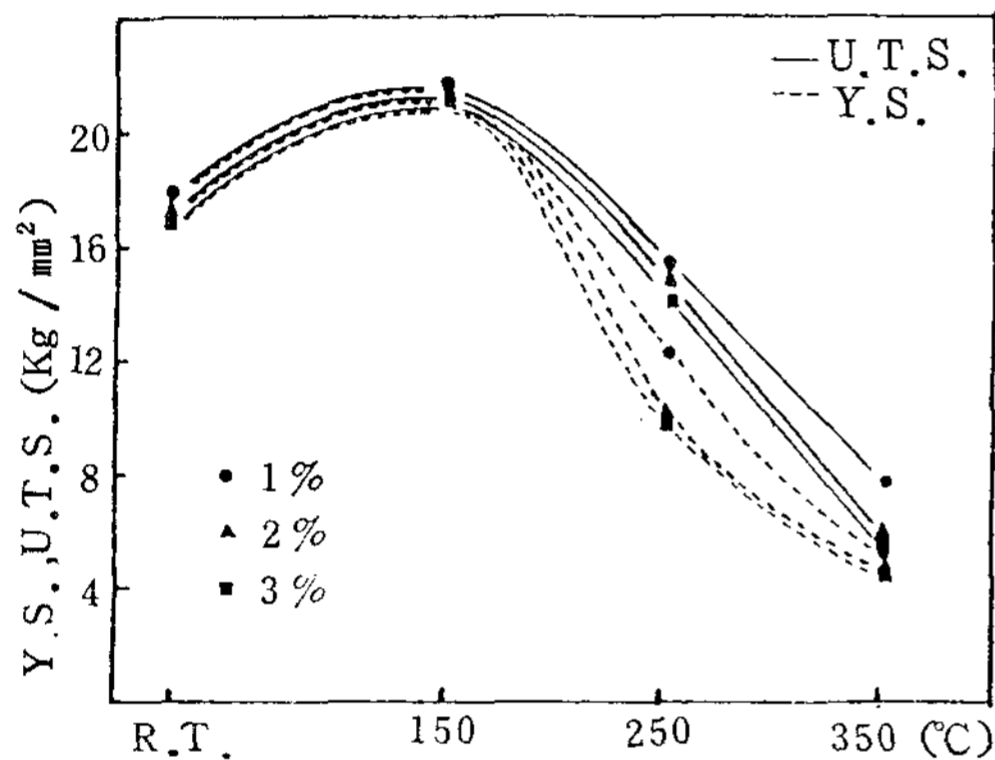


Fig. 7. Effect of magnesium addition on the tensile strength at elevated temperatures.

항복강도가 석출강화에 의해 상승하나 250°C인 경우 급격히 저하하는 것으로 보아 軟化現狀이 150°C 이상에서 나타나기 때문이라 생각된다. 그러나 전술한 Cu添加의 경우  $CuAl_2$  와 Al과의 공정온도가 548°C이므로 150°C 정도에서 軟化現狀이 나타나기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 Mg添加량을 1~3%變化시킬 때 溫度別 항복강도 및 引張強度를 나타낸 것이다. Mg添加량이 1%添加했을 때 각 溫度에서 가장 높은 強度를 나타내고 添加량이 增加할수록 약간의 強度低下現狀이 나타났다. 이는  $Al-Mg_2Si$  攪2元素 상태도에서  $Mg_2Si$ 가 1.85%까지 固溶限을 가지고 있으므로 1.85%  $Mg_2Si$ 형성에 필요한 Mg량은 1%이므로 Mg 1%까지 時効에 의한 強度增加를 기대할 수 있으며 그 이상의 Mg添加는 시효에 의한 強化에 기여하지 못하고 오히려 初晶 珪素를 粗大하게 하므로 強度가 低下된다고 생각된다.

3-4 Ni 添加의 影響

Ni을 1~3% 添加했을 때 溫度變化에 따른 引張

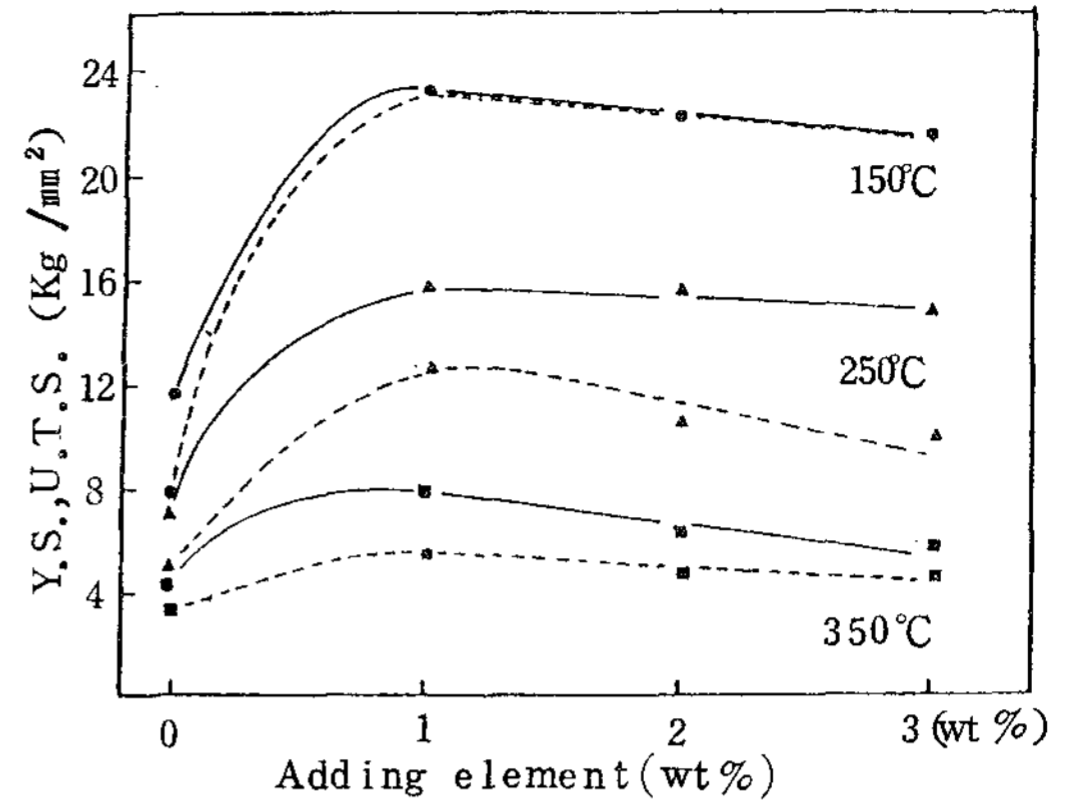


Fig. 8. Relation between tensile strength and Mg of Al-20% Si alloy at elevated temperatures.

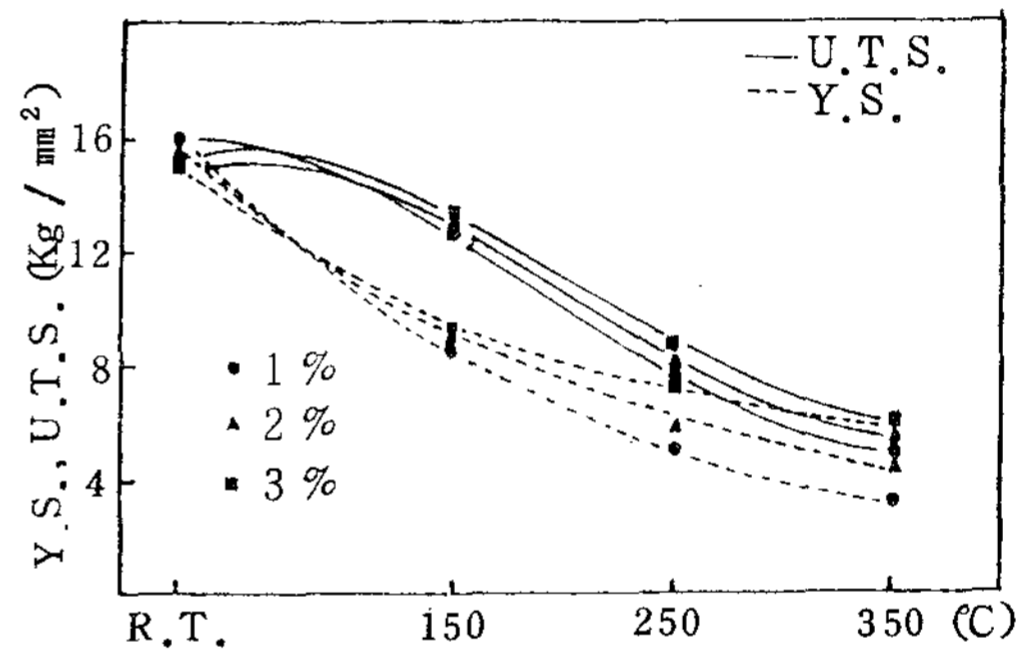


Fig. 9. Effect of nickel addition on the tensile strength at elevated temperatures.

強度와 항복강도는 Fig. 9와 같다.

引張強度의 경우 전술한 Cu, Mg添加의 경우와는 달리 常溫에서 가장 높고 150°C에서 오히려 강도가 저하하였다.

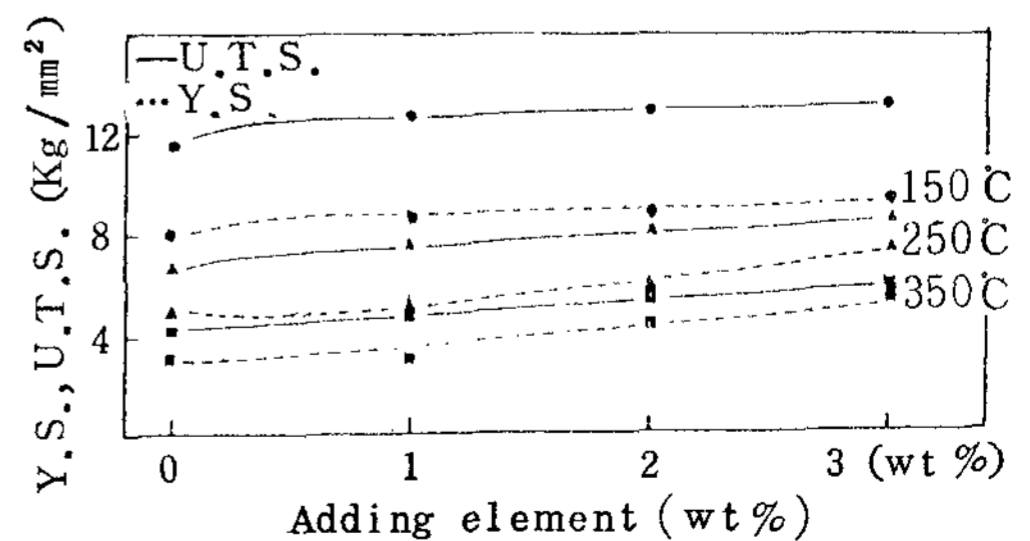


Fig. 10. Relation between tensile strength and Ni of Al-20% Si alloy at elevated temperatures.

이는 Al 중에 Ni의 固溶限이 약 0.05%이므로 20) 고용강화 및 시효에 의한 석출강화 현상을 기대할 수 없기 때문이라고 생각된다. 항복강도의 경우 역시 Cu 첨가의 경우와 유사하다고 생각된다.

Fig.10은 Ni 첨가량을 1~3% 변화시킬때 溫度別 引張強도와 항복강도를 나타낸 것이다. Ni添加量이 增加하여도 強度增加現狀이 뚜렷하게 나타나지 않는 것은 전술한 바와 같은 이유라고 생각된다.

#### 4. 結 論

본 實驗을 통하여 얻은 結論은 다음과 같다.

- 1) 微細化 處理는 高溫強도를 向上시켰다.
- 2) Cu添加에 의한 影響은 添加量의 增加에 따라 引張強도나 항복강도가 增加하였으나 溫度變化에서 引張強도는 150℃에서 가장 높은 強度를 나타내나 항복강도는 溫度 上昇에 따라 低下하였다.
- 3) Mg添加時 引張強도, 항복강도는 1% 첨가시 가장 높은 強度를 나타냈으며 溫度에 따른 影響은 150℃에서 가장 높은 強度를 갖는다.
- 4) Ni添加時 添加量 增加에 따라 強度 增加現狀은 아주 적으며 溫度에 따른 影響도 溫度 增加에 따라 強度가 低下하였다.

#### 後 記

이 논문은 1982년도 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구되어진 것이다.  
문교부의 지원에 심심한 사의를 표한다.

#### 參 考 文 獻

1. 寺井士郎, 馬場義雄: 住友輕金屬技報, July (1964), p223
2. 宮手敏男: 輕金屬, 22(1972), 12, p695-699

3. 津田昌利, 江川勝一: 鑄物, 45(1973), 7, p573-581
4. 宮手敏男: 鑄物, 45(1973), 2, p105
5. 宮手敏男, 齊藤 實: 鑄物, 45(1973), 4, p384-385
6. 南泰運, 金水泳, 金相益: 金屬學會誌, Vol 13, No.1, 1975, p12~18.
7. 南泰運, 金水泳, 李相益: 金屬學會誌, Vol 11, No.4, 1973, p361~367
8. 權赫茂, 張忠根, 金水泳: 金屬學會誌, Vol 11, No.2, 1973, p158~164
9. 桃野 正, 井川 克也: 輕金屬, 1979, Vol 29, No.6, p240~245
10. 權赫茂, 張忠根, 金水泳: 金屬學會誌, Vol 12, No.1, 1974, p15~20
11. 小林紘二郎, 新宮 秀夫, 尾崎 良平, 輕金屬, 1970 Vol 20, No.5, p247~255
12. A.Gangulee and J.Gurland  
: Trans. of the Metallurgical Society of AIME Vol 239, Feb. 1967, p269~272
13. Al-Mg-Si系合金: 輕金屬, 1971, Vol 21, No.11, p708~713
14. Paul H. Shingu & Jin-Ichi Takamura: Met. Trans. Vol 1, 1970, p2339
15. L.F. Mondolfo: Met. Trans. Vol 2, April, 1971, p1254
16. 津田昌利, 江川勝一: 鑄物 43, No.9, p811-812
17. 西成基, 小林俊郎: 鑄物 46, No.10, p909, 1974
18. 高昌植著: 非鐵金屬材料, 1973, p261
19. 趙顯麒: 金屬學會誌, Vol 18, No.1, 1980, p8
20. R.C. DORWARD: Met. Trans. Vol 4, Feb. 1973, p507-512
21. P.K. Rohatgi, R.C. Sharma and K.V. Prabhakar: Met. Trans., Vol 6, 1975, p569
22. 堀, 上田, 古城: 輕金屬 22(1972) 281.