

機械材料로 쓰이는 耐熱鋼材의 現況

辛 玫 教

<韓國海洋大學 機關學科 教授>

1. 머리 말

鐵鋼材는 간단한 조작으로 비교적 쉽게 그 기계적 성질을 개선할 수 있으므로 여러곳에 사용되어 왔다. 그리고 거의 지구전반에 걸친 매장량과 대량생산에 의한 저렴한 生産價에 힘입어, 그 이용범위는 현대를 鐵器文明時代라고 부를만큼 광범위한 것이 되었다.

최근 각 방면의 기술이 발달하여 사용하는 에너지량이 급격히 많아지고, 고속화되며 특수환경하에서의 가혹한 사용조건이 요망되면서 철강재료도 간단한 조작만으로는 이에 부응할 만한 재료를 조달할 수가 없게 되었다.

發電機器, 大出力 輸送用 原動機, 石油化學工業등 고온하에서 운전되는 기계나 장치들은 한층 더 大出力, 高効率化의 길을 걸어 그 발전은 눈부신 것이다. 이들의 機器, 裝置 등은 출력을 증가 시키고, 장치크기를 축소하며, 에너지 소비를 극소화 하기 위하여 熱效率의 향상에 노력하고 있다.

高溫帶에서 稼動되고 있는 기계들을 보면, 비교적 低溫域에서 운전되는 화력발전의 보일러나 증기터어빈에서는 $550^{\circ}\text{C} \sim 200\text{kg/cm}^2$ 내외가 경제적인 사용한다가 되어 오래동안 실용되어 왔고, 高溫域에서 운전되는 발전용 가스터어빈에서는 그 사용온도가 $1,000^{\circ}\text{C}$ 를 넘었으며, 제트엔진에서는 $1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,380^{\circ}\text{C}$ 까지 이르고 있고, 또 석유화학공업의 에틸렌분해로에서는 $1,050^{\circ}\text{C} \sim 1,100^{\circ}\text{C}$ 에 달하고 있다. 최근 원자력 발전에

서는 소련의 체르노빌 원자력 발전소의 대형사고 등으로 그에 대한 인식도가 떨어져 전원개발은 석탄을 연료로 하는 계획이 새로이 인식 되어가고 있다. 美國에서는 1990 년대에 가서 실용화할 것으로 종래의 사용조건을 한층 상향 조정한 $593^{\circ}\text{C}(1,100^{\circ}\text{F}) \sim 316\text{kg/cm}^2$ 의 화력발전소를 계획하고 있다한다. 이러한 움직임은 日本에서도 비슷하여 상기한 미국계획안과 이 수준을 약간 높은 $650^{\circ}\text{C} \sim 350\text{kg/cm}^2$ 등에 대한 연구가 진행 중이다.

이들 機器, 裝置는 물론 대부분 철강재가 그 근간을 이루고 있지만, 특히 고온부를 형성하는 부재는 耐熱用 鐵鋼과 合金이다. 鋼을 母材로 하고 고온에서의 강도유지를 위하여 유용한 소량의 Cr, Mo 등을 합금시킨 低合金耐熱鋼이 1차적으로 사용되어 왔으나 사용조건이 고도화되면서 이들 합금성분량이 늘어나 주로 Cr 성분을 증가시킨 高 Cr 페라이트系, 그리고 Ni 성분을 다량으로 첨가한 오스테나이트系 耐熱鋼이 제 2차, 제 3차대상이 되어 연구 발전되어 왔다.

그 사용한계는 사용가스등 환경의 영향과 고온의 크리이프나 피로, 파괴에 대한 抵抗力등에 크게 좌우되지만, 대개 2.25Cr-1Mo 鋼의 低合金鋼에서 550°C , 9~12% Cr 인 페라이트系 耐熱鋼에서 650°C 까지가 한도이며 그 이상온도에서는 오스테나이트系 耐熱鋼이 고려의 대상이 되고 있는것 같다. 이들 고온부에 사용되는 철강 재료를 중심으로 최근의 동향을 주로 금속학적인 입장에서 살펴보기로 한다.

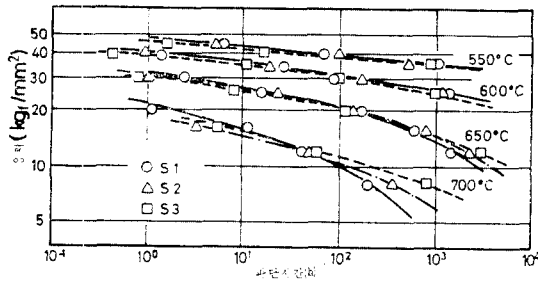


그림 3 장시간크리프 파단강도에 대한 W의 효과

한편 보일러용 재료로서는 그 가공성 용접성등을 고려하여 탄소성분을 억제하고 있다. 그러나 탄소함유량이 0.05%이하가 되면 용접성은 향상되지만 고온강도를 얻기 어렵고 또 0.1%이상이 되면 고온강도면은 충족될 것이지만 용접성이 떨어질 것이므로 이 범위의 함유량이 상하의 한계로 여겨진다. NSCR 9材나 TB-9, TB-12材 등이 이것을 뒷받침해 주고 있다. 상당한 가공이 필요한 보일러管에는 고도의 가공성이 요구된다. NSCR 鋼의 인장강도는 70kg/mm²에 연신율이 20~30%라는 높은 값을 가지고 있다하여 유망한 것으로 기대된다. 이와같이 延性, 韌性 등이 우수하다해도 페라이트系 鋼種이 안고있는 근원적 결함으로 알려져 있는 용접성에 관해서는 별도로 중리할 필요가 있다. 용접봉에 적절한 보강성분을 가미한다던지 용접방법을 개선한다던지 하는것이 그것이 될 수 있을 것이다.

종래의 低炭素 페라이트系 耐熱鋼에 V, Nb를 첨가해서 고온강도를 높이고자 하는 試圖가 진행되고 있는것 같다. V나 Nb는 같이 소량만 첨가해도 M₂₃C₆, M₆C 등 炭化物을 미세하게 析出하는 역할을 하여 고온강도를 높여주는 결과를 가져오게 하지만 여기에는 충분한 연구검토에 의해서 알맞는 열처리의 개발이 필요하게 된다.

한편 최근의 연구에 의하면 페라이트系 鋼種은 600~650°C에서의 고온강도가 좋고 액체나 트롬에 대해서도 耐蝕性이 있으며 또한 中性子照射에도 잘 견디는 특성을 가지고 있음이 알려져, 장차 原子爐用 鋼材로서도 사용이 가능할 것으로 생각된다. 여기에서도 비단 中性子照射

에 대한 耐性이 좋다는것 만이 아니고 팽창율이 비교적 적기 때문에 덩치가 큰 부재에서 문제가 되는 熱應力이 적다는 장점을 살리면 熱交換器, 原子爐壁材등에로의 사용이 가능할 것으로 기대된다.

4. 오스테나이트系 耐熱鋼

오스테나이트系 스테인리스鋼은 원래 耐蝕耐酸化鋼으로서 개발된 것으로 우수한 고온강도를 가지고 있는것이 발견되어 고온구조재로서 사용되기에 이른 것이다. 1950年頃 미국에서는 大型보일러에서 고열로 인한 파손사고가 속출하여 오스테나이트系 스테인리스鋼의 고온강도에 대해서 근본적으로 검토해야 하겠다는 기운이 일어나, 이들 鋼種의 화학성분과 고온강도, 열처리와 내부미세조직등의 상호관계가 규명되기 시작했다. 그 결과 본래의 耐蝕耐酸爲主의 스테인리스鋼보다도 고온측 영역에서의 이용이 가능하게 되었다.

耐熱鋼에서 제일 중요한 크리프特性을 고려할 때 이를 支配하는 因子로서는 Irvine이나 Pickering⁽⁵⁾등이 거론한 것 가운데 오스테나이트鋼에 적용될 수 있는 固溶體效果, 結晶粒度, 分散強化, 析出強化등을 들을 수 있다. 또 金屬의 고온크리프저항도를 고려할 때 빼놓을 수 없는 크리프저항은 初期組織에 지배되는 그 재료고유의 크리프저항과, 크리프시험중에 생긴다고 생각되는 진행성 석출등의 조직변화에서 이루어질 수 있는 잠재크리프저항을 생각할 수 있다. 보일러용 鋼과 같이 용체화 처리상태에서 사용되는 경우는 고유크리프저항은 용체화 처리상태의 합금원소의 고용량, 未固溶탄화물의 析出舉動등에 의해서 설명이 되어지지 않으면 아니된다.

그동안의 耐熱鋼의 연구에 있어서는 우선 화학조성을 제 1차로 생각하여 고온강도를 높이는 원소의 첨가에 의해서 해결하고자 하였고, 다음으로 組織學的 因子 특히 탄화물의 석출거동과의 관계에 대해서 주로 論難의 대상으로 삼아 왔던

것이다. 또한 이러한 鋼種에서는 열처리를 어떻게 하면 훌륭한 특성을 발휘시킬 수 있는가가 큰 문제이니 만큼 그동안의 열처리조건들을 수정보완해서 각 강종에 알맞는 最適條件을 구비하는 것이 큰 목적이 되는 것이다. 여기에서 합금원소의 성분을 조정한다던지 그 열처리를 개선한다던지 하는것은 다시 말해서 고온강도를 지배하는 조직학적인자를 변화시키는것이 되며 이들의 여러 조건에 관한 연구가 결실되어 최강의 고온용재가 마련될 것으로 생각된다.

여기에서 또 고려해야 할 문제는 열처리과정에서 생기는 오스테나이트粒의 成長粗大化이다. 결정립도와 고온강도의 관계에 대해서는 實用鋼에 있어서는 탄화물의 석출등 他 因子의 영향에 비해서는 적은 것으로 알려져 있어 크게 문제삼지 않을 것이나, 각종 금속 및 합금의 결정립도와 고온강도의 관련성에 관해서는 일반적으로 0.1~1mm 까지 결정립이 조대해 질수록 강도는 증가하고 그 이상으로 조대화하면 거구로 약화되어 간다는 연구발표^(6,7)도 나오고 있다.

오스테나이트系 耐熱鋼의 기본은 전술한 바와 같이 스테인리스鋼이 기초가 되어 있으나 그 종류는 상당히 많다. 18-8 스테인리스鋼에 고온강도를 높이는 원소로서 Mo, V, Al, Ti, Nb, 최근에는 B을 소량 첨가하는 방안을 쓰고 있으나 耐熱性, 耐蝕性 그리고 生産費등을 고려하여 근본 조성분인 Cr과 Ni을 낮춘 15Cr-14Ni系列과 오히려 높은 25Cr-20Ni系列등이 연구의 대상이 되고 있는것 같다.

Cr-Ni 耐熱鋼은 고온에서 Cr₂O₃성분이 표면에 형성되어 이것이 보호피막이 되어서 고온에서의 산화나 부식이 억제되는 것으로 알려져 있으나, 이 피막은 1,000°C 이상이 되면 서서히 변화증발하여 산화가 진행되고 剝離현상을 일으키게 된다.

또 표면에 Al₂O₃의 피막이 형성됨으로서 보호성이 높아지는 성질을 이용해서 Cr15%이상에서 4.5%이상의 Al를 첨가하는 경우에는 오스테나이트系 鋼에서도 Al₂O₃의 표면피막이 형성된다는 것이 알려져 여러 부재로서 사용이 검토되고

있다. 여기에서 한 걸음 더 나아가 Al도금을 실시해서 훌륭한 耐高溫腐蝕性을 얻을 수 있다고 한다. 장차의 연구결과가 주목된다.

5. 超耐熱合金

600°C 전후의 증기터어빈 사용온도에 대해서 가스터어빈, 석유화학공업의 에틸렌分解爐, 원자재철시스템, 제트엔진등은 1,000°C를 넘어 가까운 장래에 1,500°C 이상도 고려의 대상이 되고 있다. 이들 機器, 裝置의 고온부를 구성하는 재료는 Cr, Ni, Co 등의 내열성 합금원소를 다량으로 함유하여 고온특성의 개선을 꾀하고 있다. 이러한 합금들은 Ni나 Co를 주성분으로 하는 경우 고온강도에 유해한 것으로 알려져있는 σ 相의 석출을 억제할 수 있게 되어 超耐熱合金에서는 Fe성분을 전연 함유하지 않거나 함유하고 있어도 보조적인 역할을 분담하는 정도에 지나지 않게 되었다.

이들 초내열합금은 내연기관의 발달과 더불어 개발되어 왔으며 고효율기관 발전의 사실상의 기초가 되어온 것으로 1940年代부터 鋼을 기초로한 내열강으로부터 Co基, Ni基 合金으로 변천되어 왔다. 모든 산업은 이론적 뒷받침에 의해서 설계된 시설장치에서 요구하는 가혹한 사용조건을 충족시키기 위한 새로운 재료의 개발이 절대선행조건이 되어 발달되어 왔다. 많은 장치들이 고온하에서의 운전을 강요받고 있으며 여기에 또 금속의 산화반응은 온도가 높아짐에 따라 그 속도가 빨라지는 것이다. 또한 이들 재료가 실용되는 환경은 내연기관의 연소가스나 장치 계획되고 있는 원자력발전등에서의 He가스에서 보는 바와같이 고온의 산소, 질소, 수증기 또는 이들의 혼합가스로 충만 되어있어 이속에서 장시간 폭로되어 있어야만 한다. 더욱 고온하에서 변위되어 가는 크리이프를 고려할 때는 여기에 필요한 고온크리이프저항은 한층더 가혹한 조건이 되어 가는 것이다.

가스터어빈이 초기의 Fe基 또는 Fe-Ni基 耐熱合金의 개발로 실용되기 시작하였고 이들은

2. 低合金 耐熱鋼

현재 고온가스의 압력용기등에 사용되는 저합금 내열강은 0.5Mo鋼, 1.25Cr-0.5Mo鋼, 2.25Cr-1Mo鋼등이며, 이들에게는 각 용도에 따라서 高溫低사이클 疲勞強度, 크리이프疲勞強度등의 高溫長時間強度 그리고 최근에는 中性子 照射에 의한 脆化耐性등이 요구되고 있다.

한 예를 들면 2.25Cr-1Mo鋼은 현재 발전용 보일러管으로 많이 사용되고 있으나 이들의 수명을 예측하고 多目的 壓力容器材로 사용할 목적으로 400°C~650°C 범위에서의 長時間 크리이프

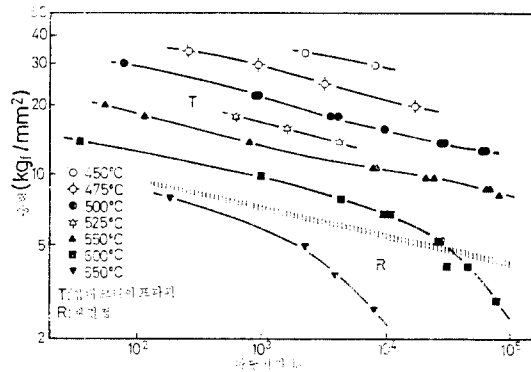


그림 1 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 의 응력-과단곡선

프시험등이 일부 연구자들에 의해서 진행되고 있다⁽¹⁾. 또 크리이프疲勞試驗, 低사이클 疲勞試驗과 400°C 전후에서의 中性子照射에 의한 脆化感受性등에 대한 연구등이 활발하다.

상기한 2.25Cr-1Mo鋼의 실험에서는 크리이프破壞로서는 통상의 粒內크리이프 延性破壞와, 動的 再結晶이라고 생각되는 再結晶破斷이 관찰되고 있다. 그림 1은 상기한 연구材의 온도별 응력-과단시간線圖이다. 여기에서는 粒界空洞의 生成이 나타나서 장차 粒界破壞로 移行될 것이 시사되고 있으며, 長時間側으로 갈수록 粒內에서는 針狀의 Mo₂C가, 粒界에서는 塊狀의 M₂₃C₆가 각각 응집하여 粗大化되어가서 수명을 단축하는 것으로 생각되고 있다.

또 이들 재료의 크리이프疲勞試驗에 있어서는

550°C까지의 온도범위에서 시험온도 상승에 따른 현저한 破斷壽命의 低下는 나타나지 않고 있으나, 中性子照射과 템퍼링脆化등의 실험에서는 粒界脆化의 감수성이 높은 것으로 나타나고 있다⁽²⁾. 또 이들 鋼種에서는 용접열영향부에 균열이 생기는 현상이 나타나는 일이 있으며 이것은 용접열영향부의 舊오스테나이트粒界에 불순물이 편석되어 粒界強度가 크게 떨어지는 것으로 알려져 있으므로 용접을 할때 열처리를 충분히 할 필요가 있는 것이다.

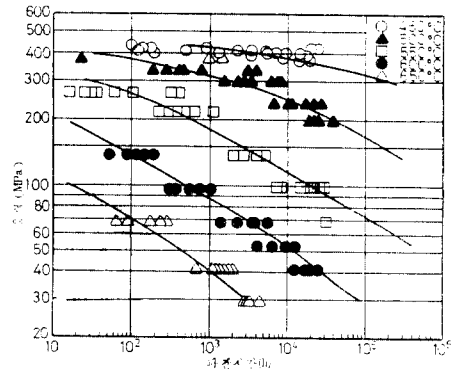


그림 2 1Cr-0.5Mo 강 의 크리이프 과단

다음으로 최근의 1Cr-0.5Mo鋼種에 대한 크리이프破斷實驗에서의 1例를 들어보면 그림 2와 같이 나타나고 있다⁽³⁾. 여기에서는 시험온도가 고온측으로 갈수록 시험재 간의 편차가 적어지는 것이 눈에 띈다.

이와같이 장치의 고온화에서 얻을 수 있는 효율향상을 위하여 고성능 Cr-Mo鋼材가 개발의 초점이 되고 있다. 이러한 장치들은 고온고압의 水素나 亞黃酸가스등의 분위기속에서 사용되는 일이 많으며 耐水素침식성과 고온하에서의 크리이프強度의 증진이 요구되어, 첨가합금의 增量과 미소합금종류의 다양화에 의해서 기계적 성질을 개선하는 방향으로 옮겨고 있는 것으로 생각된다.

3. 페라이트系 耐熱鋼

열효율을 향상시키기 위하여서는, 열기관에서 사용되는 증기조건은 이론상 고온, 고압으로 온

表 1 高Cr 페라이트系 耐熱鋼의 化學成分(%)

종 류	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb	Al	B	N
H46	0.16	0.6	0.4	—	11.5	0.65	0.3	—	0.25	—	—	0.05
FV448	0.13	1.0	0.5	—	10.5	0.75	0.15	—	0.45	—	—	0.05
C-422	0.23	0.6	0.4	0.7	13.0	1.0	0.25	1.0	—	—	—	—
A.L. Type 419	0.25	1.0	0.3	0.5	11.5	0.5	0.4	2.5	—	—	—	0.10
Lapelloy	0.30	1.0	0.25	0.3	12.0	2.75	0.25	—	—	—	—	—
HT-9	0.20	0.55	0.25	0.55	11.7	1.0	0.3	0.5	—	—	—	—
EM-12	0.10	1.0	0.4	—	9.5	2.0	0.3	—	0.4	—	—	—
TAF	0.18	0.5	0.3	—	10.5	1.5	0.2	—	0.15	—	0.03	—
G.E.	0.19	0.65	0.3	<0.6	10.5	1.0	0.2	—	0.085	—	—	0.06
TR1100	0.14	0.5	0.05	0.6	10.2	1.5	0.17	—	0.055	0.002	0.002	0.04
TR1200	0.12	0.5	0.05	0.7	10.5	0.3	0.2	2.0	0.045	0.005	0.005	0.055
NSCR9	0.07	0.8	0.2	—	9.0	2.0	0.13	—	0.05	—	0.003	—
TB-9	0.06	0.5	0.05	<0.1	9.0	0.5	0.2	1.8	0.05	—	—	—
TB-12	0.06	0.5	0.05	<0.1	12.0	0.5	0.2	1.8	0.05	—	0.003	—

용할 필요가 생긴다. 증기터어빈에 사용되는 고온용재료에서는 비교적 재료가 고價이고, 열팽창계수가 크며, 열전도율이 적기때문에 열응력이 생기기 쉽다는 難點을 가진 오스테나이트系 耐熱鋼보다 약간 낮은 온도영역에서 페라이트系 耐熱鋼種이 널리 사용되어 왔다. 이러한 강종들은 2차 세계대전이 끝날 무렵부터 새로운 高强度材料로서 개발되어 나온 것이다. 英國에서는 H46, FV448 등이 美國에서는 C-422, A.L. Type 419, Lapelloy 등이 터어빈의 動翼, 볼트등에 상용되었고, 보일러管에는 가공성, 용접성등이 좋은 HT-9, EM-12 등이 개발되어 널리 사용되어 왔다. 日本에서는 TAF 와 이를 개량한 TB9, TB12 등과 TR1100, TR1200, NSCR9 등이 개발되어 나왔다. 表 1 에 이들의 성분을 나타낸다.

이들 재료의 용도를 생각할때, 단순히 고온크리프 강도와 고온저사이클 피로 강도만이 고려되는 터어빈 로우터材와, 여기에 가공성, 용접성, 내식성등을 함께 고려할 필요가 있는 보일러용材와는 구별해서 생각되어야 한다.

TAF 材는 美國 G.E.社에서 개발하여 오래동안 실용되어오던 로우터材와 거의 같은 화학성분을 가지고 있다. 철강재의 강도면에서 볼때, 탄소 0.18~0.19%는 필요하다고 생각되지만 고온

강도를 높일 수 있는 Nb는 G.E.材에 비하여 TAF 材가 두배의 含量이 들어있다. 열처리가 적절하게 효과를 낸다고 기대할 수 있다면 사용온도는 다소 높일 수 있을 것으로 생각 된다.

우리나라에서는 평택발전소에서 사용되는 증기온도가 571°C로 가장 높은 것이지만 최근 시공된 고출력 원자력 발전에서는 이것보다 훨씬 낮은 온도에서 운용되고 있다. 금후 증기온도를 650°C 까지 상승시키기 위해서는 새로운 고강도의 재료를 개발하는 것이 선결문제이다.

10% Cr 페라이트系 耐熱鋼은 각국에서 많은 개발연구가 진행되고 있는 실정이며 650°C-10⁵시간의 크리프강도에 알맞는 페라이트系 재료의 취득은 시간문제일 것이다. 현재까지는 오스테나이트系 耐熱鋼이 터어빈 로우터로서 연구되기도 있지만 제조성, 열피로특성등이 페라이트系 鋼보다 뒤떨어지는 根本의 특성에서 오는 난점을 빼놓을 수가 없다. 9~10% Cr系 耐熱鋼에서 Mo의 일부를 W으로 대체시킴으로서 고온강도를 높일 수 있는 실험결과를 얻어내고 있다⁽⁴⁾. 이들 재료에 대한 크리프破斷强度試驗은 그림 3과 같다. 여기에서의 시험재는 0.15%Cr-0.5%Ni-9%Cr-0.15%V의 기본재에 S₁은 1.78%Mo 만, S₂는 1.34%Mo-0.61%W 이고 S₃는 0.69%Mo-1.47%W 이다.

表 2 Ni 基 Co 基 耐熱合金의 化學成分(%)

종 류	C	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	B	Fe	Zr	기	타
B-190J	0.1	殘	8.0	10	6.0	<0.1	<0.1	1.0	6.0	0.015	<0.35	0.08	Ta 4.3	
Hastelloy X	0.1	殘	21.8	<2.5	9.0	0.6	—	—	—	—	18.5	—	—	
IN-100	0.18	〃	10.0	15.0	3.0	—	—	4.7	5.5	0.014	—	0.06	V 1.0	
IN-792	0.21	〃	12.7	9.0	2.0	3.9	—	4.2	3.2	0.02	—	0.10	Ta 3.9	
Inconel 600	0.03	〃	15.5	—	—	—	—	—	—	—	8.0	—	—	
Inconel 617	0.07	〃	22.0	12.5	9.0	—	—	—	1.0	—	—	—	—	
Inconel 700	0.12	〃	15.0	23.5	3.7	—	—	2.2	3.0	—	—	0.7	—	
Inconel 713C	0.12	〃	12.5	—	4.2	—	2.0	0.8	6.1	0.012	0.10	—	—	
Inconel 718	0.04	〃	19.0	—	3.0	—	5.0	0.9	0.5	—	—	18.5	Cu 0.2	
Inconel X-750	0.04	〃	15.5	—	—	—	1.0	2.5	0.7	—	—	7.0	Cu 0.2	
Nimonic 80A	<0.10	〃	19.5	<2.0	—	—	—	2.5	1.4	<0.008	<3.0	<0.015	—	
Nimonic 100	<0.30	〃	11.0	20.0	5.0	—	—	1.5	5.0	—	<2.0	—	—	
Nimonic 115	0.15	〃	15.0	14.8	4.0	—	—	4.0	5.0	0.018	<1.0	<0.15	—	
MAR-M200	0.15	〃	9.0	10.0	—	12.5	1.8	2.0	5.0	0.015	—	0.05	—	
MAR-M246	0.15	〃	9.0	10.0	2.5	10.0	—	1.5	5.5	0.015	0.15	0.05	Ta 1.5, Cu <0.1	
MAR-M302	0.85	—	21.5	殘	—	10.0	—	—	—	0.005	—	0.15	Mn 0.1, Si 0.2	
MAR-M322	1.00	—	21.5	〃	—	9.0	—	0.75	—	—	—	2.25	Ta 4.5 Mn 0.1, Si 0.1	
MAR-M509	0.60	10.0	21.5	〃	—	7.0	—	0.2	—	<0.01	1.0	0.50	Mn 0.1	
WI-52	0.45	<1.0	21.0	〃	—	11.0	2.0	—	—	—	2.0	—	Mn 0.5 Si 0.5	
X-40	0.50	10.0	25.0	〃	—	7.5	—	—	—	—	1.5	—	Mn 0.5 Si 0.5	
X-45	0.25	10.5	25.5	〃	—	7.0	—	—	—	0.01	<2.0	—	Mn <1.0	

차차 내열한도의 상승과 더불어 Fe를 Ni로 치환하는 작업이 진행되어 현재 실용되고 있는 것은 대부분이 Ni을 기본으로 하는 Ni基合金들이다.

다른 한편으로는 Ni基合金보다도 耐酸化性이 큰 특징을 가지고 있으며 고온강도도 그렇게 뛰지지 않으면서도 熱疲勞에 강한 Co基合金도 고온재료로서 널리 사용되고 있다. 表 2는 이들의 一部를 表示한 것이다.

이들 합금은 기본적인 母相에 Mo과 W을 첨가해서 고온강화를 시켰으며 Al과 Ti을 써서 석출강화를 꾀하고 있는 것이다. 최근에는 석출강화를 촉진시키는 원소로서 Ti, Nb, Ta 등의 첨가가 가능해졌고, 眞空溶解, 精密鑄造등을 採用함으로써 耐用溫度를 크게 높이고 있다. 또한 여기에 미소량을 첨가함으로써 粒界強化를 크게 조장한다고 알려진 B, Zr, Hf 등의 활용도 눈에 띄고 있다.

그동안의 새로운 재료의 개발은 여러가지 조성의 合金을 만들어 試行錯誤의으로 재료의 성질변화를 조사하는 방법을 써왔다. 그러나 첨가 원소의 종류가 많아지고 또한 각 원소간의 상호 작용관계가 어느정도까지 해명 되므로써 컴퓨터를 이용한 새로운 합금설계의 방법^(8,9)도 연구되고 있다.

6. 맺음 말

이상 사용온도의 段階別, 재료의 조직별로 나누어서 간단히 검토하여 왔으나, 그동안 耐熱材料로서 꾸준히 연구대상이 되어왔고 획기적 발전을 가져온 바 있는 酸化物分散 強化合金, 共晶合金 그리고 纖維強化合金과 새로운 製造過程 등이 그 신뢰성이나 효율, 가격등의 면에서 별로 새로운 것이 나타나지 않고 있으며 새로운 재료의 출현이 요망되고 있는 現狀이라 하겠다.

<참고문헌은 283 페이지에 계속>