

新金屬의 開發과 現況

金 泳 吉
 <韓國科學技術院教授·工博>

1. 序 論

素材는 물질문명의 기본요소이며 新素材 개발은 科學技術 혁신의 필수요건이다. 신소재의 創出은 기술혁신을 가능하게 했으며 그것에서 파생된 새로운 과학기술은 더욱 고도의 특성을 가지는 새로운 素材를 탄생시키는 계기가 되었다. 그러기에 新素材의 개발과 科學技術의 발전과는 밀접한 불가분의 관계가 있다고 할 수 있다.

材料는 그 구성원소나 기능 및 특성에 따라서 金屬, 세라믹(窯業), 高分子 등으로 나눌 수 있다. 또한 위의 세가지 素材가 적당히 조합되어 새로운 특성을 나타내는 複合材料를 만들 수도 있다. 이러한 新素材 중에서도 특히 新金屬의 개발 및 그 現況에 대해서 서술하고자 한다.

2. 新金屬의 開發 方法

新金屬의 개발에는 두가지 방법이 있는데 첫째는 合金을 구성하고 있는 값비싼 元素들을 값싼 다른 元素로 일부 또는 전부를 代替하여 생산단가를 낮추며 機械的, 電氣的 혹은 物理的인 특성이 더 우수한 새로운 合金을 제조하는 것이다. 그 예로써 미국 항공우주관리국 및 미 공군에서는 超耐熱合金에 많이 함유되는 코

발트 및 크롬의 量을 줄이거나 除去하려는 연구를 “COSAM”(Conservation of Strategic Alloying Elements)이라는 과제하에 政府-産業-學校의 공동연구로 1978년부터 수행해 오고 있다.

Co 및 Cr을 전량 수입하고 있는 미국은 이 원소를 戰略元素로 분류하여 소비를 줄이는 한편 또한 비축하고 있다. 이러한 많은 연구로부터 니켈기 超耐熱合金에서 Co 및 Cr의 量을 상당히 줄일 수 있었으며 Co가 함유되지 않은 高強度의 耐熱合金인 MA 6000 등¹⁾과 高強度-高韌性 마르에이징鋼 T-250 등²⁾이 개발되었다.

新金屬 개발의 두번째 방법으로는 合金元素의 化學造成은 변화시키지 않고 製造工程을 변화시킴으로써 새로운 物性を 갖도록 하는 것이다. 그 예로써 金屬을 溶解 후 응고속도를 超高速(초당 10만~100만℃)으로 급냉을 하면 結晶體가 非晶質(Amorphous)狀態가 되어 같은 化學造成에서도 전혀 다른 物性を 갖게 된다.³⁾ 또 미국의 INCO社에서는 高融點의 Y_2O_3 와 Ni 등을 合金하는 방법으로 粉末冶金式 機械的 合金(Mechanical Alloying)法을 개발하였는데 이것은 分散強化와 析出強化를 조합할 수 있는 이점이 있다.

위와 같은 두가지 방법에 의해서 지금까지 사용되고 있는 기존의 合金보다 현격하게 우수한 특성을 가지거나 혹은 같은 특성을 가지면서

도 가격이 저렴한 새 합금을 개발하려는 것이 新金屬 개발의 주된 목적이라고 할 수 있다.

3. 新金屬의 形態

新金屬은 어떤 目的과 성능으로 사용되는가에 따라서 구조용재료와 기능재료로 분류된다. 構造用 材料는 강도, 연성, 피로파괴인성 등의 機械的 性질이 중요시되는 반면 機能材料는 전기적, 자기적, 물리적 性질이 중요시된다. 대표적인 구조용 신금속재료에는 超耐熱 및 耐寒鋼, 超強力鋼, 高強度 알루미늄 및 티타늄 합금, 高強度 低合金(HSLA)鋼 등이 있다. 기능성 신금속재료에는 形狀記憶合金, 非晶質合金, 강력 영구 자석재료, 에너지 저장 및 변환 합금, 전기 및 반도체재료, 초전도재료, 防振合金 등이 있다.

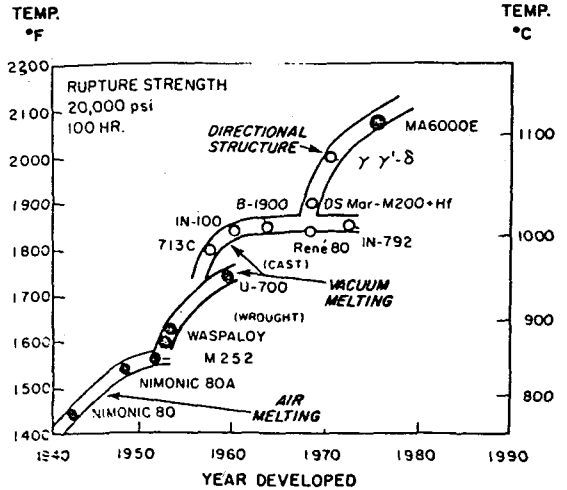
本考에서는 위에서 열거한 신금속 중에서 超耐熱 제트엔진재료, 극저온합금, 반도체 리드프레임素材, 超強力-韌性 마르에이징鋼, 形狀記憶合金, 자성재료, 비정질 및 초전도재료에 대해서 그 현황을 간단히 소개하고자 한다.

4. 超耐熱 제트엔진 合金

제트엔진용 材料는 強度가 크고 耐蝕性이 우수해야 한다. 1925년에 제트엔진이 설계되었음에도 불구하고 적당한 材料가 개발되지 않아 生産되지 못했으며 1940년에야 비로소 제작이 실현되어 2차대전에 제트엔진이 사용되었다.

1950년 한국전쟁까지는 超耐熱合金으로 코발트계 합금이 사용되었으나 그 후 니켈계 합금으로 바뀌게 되었다. 제트엔진은 部品の 숫자가 약 200 만개에 달하며 그중 高溫, 高應力, 腐蝕霧圍氣에 가장 많이 노출되는 부분은 터빈 브레이드이다. 제트엔진에서 터빈의 작동온도가 높을수록 효율은 증가되고 推進力도 커지게 되어 燃料가 절감된다. 따라서 대부분의 제트엔진 會社에서는 터빈의 작동온도를 더 증가시킬 수 있는 연구에 중점을 두고 있다.

〈그림-1〉은 1940년부터 현재까지 사용



〈그림-1〉 제트엔진 터빈 브레이드 발전

된 터빈 브레이드 材料의 발전 역사를 보여주고 있는데 현재 널리 쓰이고 있는 747점보기의 JT9D 제트엔진의 터빈 브레이드에는 單結晶으로 제작된 Mar-M200이라는 니켈계 超耐熱合金이 사용되고 있다.

1960년대에는 재래식으로 응고된 多結晶 터빈 브레이드가, 1970년대에는 일방향 응고된 조직으로 바뀌었으며 1980년대에는 單結晶으로 제작되어 사용되고 있다. 기존의 니켈계 超耐熱合金은 溫度가 약 1,050 °C 이상이 되면 強化要素인 析出物이 용해되어 그 이상의 온도에서는 사용될 수 없다.

또한 NASA와 INCO社가 공동 연구하여 개발한 'MA 6000'이라는 합금은 1,050 °C 이상에서도 사용될 수 있는데 이 합금은 미세한 Y₂O₃ 산화물 粒子를 機械的 粉末冶金法으로 니켈金屬 속에 分散強化시킨 것이다.

MA 6000은 현재 사용되고 있는 Mar-M 200보다 1,100 °C에서 強度가 약 2배 정도 크며 耐酸化 및 耐硫化腐蝕性이 우수하다.¹⁾ MA 6000보다 더 높은 高溫強度를 갖는 材料를 얻기 위해 W-fiber로 強化시킨 Fe-Cr-Al이나 Ni-Cr-Al 등의 複合材料가 NASA에서 연구중인데 이 材料는 고온에서의 크립-파괴 강도는 우수하나 피로파괴에 약하며 또한 고온에

서 화이버와 금속의 제면에서 反應이 생기는 것이 문제점이다.

5. 極低溫 合金

현재 사용되고 있는 極低溫合金을 살펴보면 LNG 저장(-162℃) 탱크의 재료로 9% Ni鋼이 주로 사용되며 액체질소(-196℃) 온도 및 그 이하의 온도에서는 304 L 스테인리스鋼이 쓰이고 있다.

오스테니틱(austenitic) 300 계열 스테인리스鋼은 원래 極低溫用으로 개발된 것이 아니지만 低溫에서 연성이 우수하기 때문에 極低溫材料로 사용되고 있다. 304 L 스테인리스鋼은 극저온에서(-196℃) 연신율은 높지만 降伏強度가 9% Ni鋼의 절반(60 Ksi) 밖에 되지 않는 단점이 있고 또 값비싼 Ni 및 Cr을 8% 및 18%나 함유하므로 가격이 비싸다.

일반적인 材料의 低溫에서 機械的 性質을 살펴보면 저온으로 갈수록 強度 즉 硬度는 증가하지만 연신율 즉 韌性은 감소하여 極低溫에서 잘 깨어지기 때문에 낮은 파괴인성이 큰 문제거리이다.

한국과학기술원의 合金開發室에서는 1982년 부터 極低溫合金 개발에 착수하여 저온으로 갈수록 強度와 연신율이 동시에 증가하는 새로운 極低溫合金鋼 “CAM-1”을 개발하여 미국 金屬學會紙에 발표하였다. 그 합금의 조성은 Fe-30Mn-5Al-0.3C-0.1Nb이며 제조공정으로는 재래식 熱間壓延이 아니라 특수한 制御壓延을 행하여 結晶粒을 미세화시키는 동시에 전위밀도를 증가시켜 強度를 더욱 높일 수 있었다. 강도는 기존의 9% Ni鋼과 동일하지만 延性은 극저온(-196℃)에서 9% Ni강의 3배나 되었으며 304L 스테인리스강에 비하면 항복강도가 2배 이상 되었다.

<그림-2>는 CAM-1 합금을 각 온도에서 인장시킨 후 다시 결합시킨 모양인데 실험 온도가 상온에서 -40℃, -100℃, -196℃로 낮아질수록 연신율이 증가된 것을 보여주고 있다. 低溫으로 갈수록 延伸率이 증가되는 특성

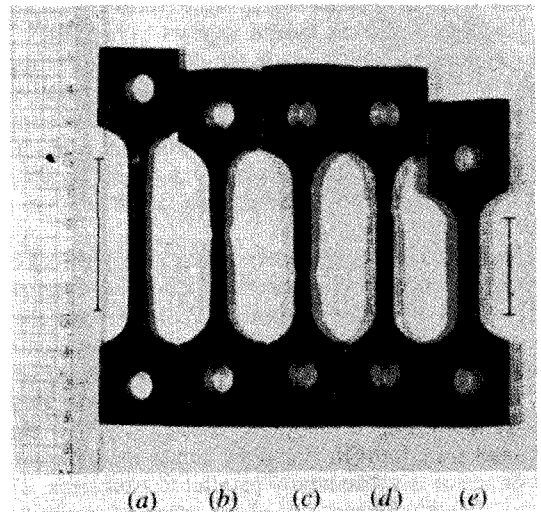
은 극저온 구조재료로서 제일 원하는 특성이다. 온도의 감소와 함께 연신율이 증가되는 특성을 逆延性이라 부르며 이 현상은 金屬強度學의 측면에서 많은 흥미를 불러 일으키고 있다.

이 “CAM-1” 합금은 LNG 용기와 수송선 재료로 실용화하기 위하여 현재 Pilot 규모(300kg용해)로 실험 중이다. CAM-1은 LNG 材料로 개발되었으며 최근 1987년 KAIST 合金開發室에서 “CAM-2”를 또다시 개발하였다.

CAM-2는 CAM-1에 비하여 액체질소온도에서 強度가 약 10% 정도 더 크며 制御壓延한 상태에서 延伸率이 10% 더 큰 것으로 나타났다.

CAM-2는 위와 같이 우수한 성질을 갖고 있기 때문에 액체질소(-196℃), 액체수소(-250℃)는 물론 액체헬륨(-269℃)에서도 사용될 수 있다.

일반적인 材料는 低溫으로 갈수록 연신율이 감소하므로 연신율로 조정되는 저주파 피로수명은 온도의 감소와 함께 감소하게 된다. 하지



(a) 액체질소(-196℃)에서 시험
 (b) -100℃(-196℃)에서 시험
 (c) -40℃(-196℃)에서 시험
 (d) 상온(-196℃)에서 시험
 (e) 원래 시험전 시편

<그림-2> 극저온 합금의 인장시험 후 시편의 모양

만 新金屬 CAM-1 및 CAM-2는 액체질소 (-196℃)의 온도에서 피로파괴수명이 상온에서보다 훨씬 더 긴 것으로 나타났다.⁵⁾

현재 逆延性的의 이론적인 설명과 정확한 기구 (mechanism)의 확립에 국책과제로 연구 중에 있으며 1987년 6월에 있을 미국 Fermi 원자력연구소주최의 국제 극저온재료학회에 논문을 발표할 예정이다.

6. 半導體 리드프레임 材料

리드프레임 (Leadframe)이란 실리콘 칩이 부착되는 金屬機板으로 칩을 지탱하는 뼈대의 역할과 회로의 역할을 하는 도선 (Lead)이며 半導體의 4대 원료 (칩, Leadframe, 金細線, 폴리머) 중의 하나이다. 리드프레임이 가져야 할 중요특성은 高強度, 높은 電氣傳導度 및 熱傳導度, 成形性, 양호한 鍍金性, 熱軟化 抵抗 및 낮은 價格 등이다. 최근 반도체 조립의 자동화와 더불어 高強度에 대한 요구가 점점 강조되고 있다. 일반적으로 金屬合金에서 강도를 높이면 연신율이 낮아지고 전기 및 열전도도가 떨어진다. 延伸率이 낮아지면 成形性이 나빠지고 또한 충격에 약하게 되어 強度를 높이는데 한계나 문제점이 된다.

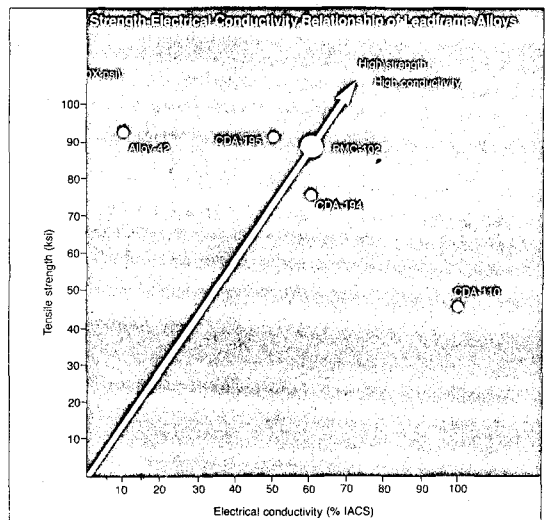
리드프레임 素材에는 크게 두 가지로 분류되는데 하나는 Plastic Packing에 사용되는 銅合金이고 다른 종류는 Ceramic Packing에 사용되는 Fe-42Ni Permalloy 등이 있다. Fe-42Ni 계는 값이 비싸고 電氣傳導度가 낮기 때문에 점차 銅合金계로 바뀌어지고 있는데 熱膨脹係數가 문제시되는 경우에는 Fe-42Ni 계를 사용하고 있다.

이 추세에 의해 미국의 National Semiconductor는 銅合金으로 대체하였고 Motorola도 시도 중이라고 한다. 리드프레임의 약 90%는 銅합금으로 미국 OLIN사의 CDA 194 (Cu-2.5Fe-0.8Zn-0.03P)가 범세계적으로 사용중에 있으며 강도와 내열성이 다소 우수한 CDA 195가 사용되고 있다. 일본에서는 OLIN社의 특허인 CDA 194를 Tamagawa, Fuji 등에서

생산하여 사용하고 있고 또한 유럽에서는 독일의 Stolberger社가 CDA 194를 생산하여 공급하고 있다.

韓國科學技術院과 풍산금속은 정부의 특정과제로 새로운 리드프레임 “PMC-102”를 개발하여⁶⁾ 미국특허 (US, Patent No. 4,446,939)를 획득하였으며 그 조성은 Cu-1Ni-0.2Si-0.03P이다. PMC-102는 미국 銅開發協會에서 CDA-190이라 불리며 미국 유명반도체 회사인 Motorola, Texas Instrument Hewlet & Packard 등이 사용을 시작하였다.

PMC-102의 특성은 <그림-3>에서와 같이 強度 및 電氣傳導度가 기존 CDA 194나 CDA 195보다 더 우수하다. 또한 도금성이 양호하고 熱軟化 抵抗이 우수하며 가격도 저렴하다는 특징이 있다. PMC-102의 우수한 특성으로 독일의 特殊合金會社 Stolberger社가 韓國으로부터 技術을 수입하여 特許生産을 1986년 2월에 체결하였다. 그러므로 PMC-102는



<그림-3> 리드프레임 합금들의 특성비교
(PMC-102가 강도 및 電氣傳導度에 가장 우수함)

CDA-194 대신에 全世界的으로 사용될 전망이다. 또 韓國科學技術院 및 풍산금속에서는 Fe-42 Ni 대체용 리드프레임 개발을 계속 진행중에 있다.

7. 高強度 - 高靱性 마르에이징鋼

마르에이징(Maraging)鋼은 높은 降伏強도와 破壞靱性을 갖는 特殊合金으로 미사일 케이스 등 방위 산업용과 헬리콥터의 착륙기어 등의 항공재료로 사용되고 있다. 기존 마르에이징鋼은 합금원소로 코발트를 8% 정도 함유하므로 가격이 아주 비싼 문제가 있다. 미국의 NASA와 空軍에서는 전략 원소 대체 연구를 강력히 추진하고 있는데 그 결과 INCO社에서 Co가 Mo이 함유된 T-250 銅을 최근 개발하여 Teledyne-vasco에서 生産 중에 있다. 여기에 대응하여 韓國科學技術院 合金開發室에서는 Co가 배제되고 W이 함유된 W-250 마르에이징鋼을 개발하였다.⁷⁾ W-250 鋼은 기존 250 grade 마르에이징鋼 대체도 가능하며 가격이 저렴한 장점이 있기에 Pilot 및 量産試驗을 계획 중이다.

8. 形狀記憶 合金

形狀記憶 합금은 1960년 미 해군연구소에서 티타늄과 니켈의 합금에 대한 연구를 수행하던 중 우연하게 Ni-Ti 시편이 담배불 근처에 있었을 때 굽혀져 있던 시편이 꿈틀거리며 퍼진 상태로 되는 것을 발견하게 된 것이다. 형상기억이란 金屬의 變形된 부분이 가열되면 원래의 형상대로 回復되는 특징을 말한다. 形狀記憶 合金의 實用化 가능성은 溫度센서, 의료, 에너지변환장치 등에 있고 학문적인 면에서도 많은 관심이 집중되고 있다. 형상기억에는 일방향(One-Way)과 이방향(Two-Way)이 있는데 일방향 형상기억이란 低温相 상태에서 굽혀진 시편을 가열하게 되면 원래의 모양으로만 되돌아가는 것을 말한다. 이방향(Two-Way) 形狀記憶이란 고온과 저온 사이에서 변형을 여러번 반복시키면 고온과 저온에서의 형상을 모두 기

억하며 온도에 따라 굽혀졌다 퍼졌다 할 수 있다. 일방향 形狀記憶은 파이프의 Fitting 등에 사용되며 이방향 형상기억 합금은 온도조절장치 등에 사용될 수 있다.

형상기억 합금에는 값비싼 Ni-Ti 계와 대체용으로 저렴한 Cu 계가 있는데 현재까지는 Ni-Ti 계가 많이 연구되었고 실용화도 이루어져 있다. 하지만 Ni-Ti 계는 가공이 어렵고 高價라는 결점이 있어 Cu 계 형상기억 합금에 대한 연구가 활발하다. Cu 계는 Pipe fitting 등에 일부 실용화되었지만 강도가 Ni-Ti 계에 비해 약하다는 단점이 있고 또 結晶粒이 粗大하여 延伸率(延伸率)이 낮다는 결점이 있다. 따라서 Cu 계에 B, Zr, Ti 등의 微量合金원소를 넣어 強度 및 延伸率을 높이려는 연구가 進行되고 있으며 Cu-14Zn-8Al에 0.1% B를 첨가했을 때 강도가 160 MPa에서 380 MPa로 증대됨과 동시에 연신율이 6%에서 9%로 증가되는 Cu 계 형상기억 합금을 최근 KAIST 합금개발실에서 발전하였다(Scripter Met.에 accepted). 최근 日本 Kobe에 Cu-Ni-Al에 소량의 Ti를 첨가시 강도 및 연신율이 Ni-Ti 계에 상당한다는 보고가 있으며 앞으로 Cu 계가 Ni-Ti 계를 대체할 가능성이 클 것으로 예측된다.

9. 磁性材料

永久磁石材料는 Alnico 형이 1950년대까지 사용되었으며 그 후부터 SmCo₅ 등 稀土類 자석이 등장하게 되어 1984년에 Sm₂Co₁₇ 生産이 Alnico계 자석 생산량을 상회하게 되었다. 영구자석재료가 구비하여야 할 특성으로는 殘留磁速密度(B)가 높고 保磁力(Hc)이 크고 Curie 溫度(Tc)가 높아야 한다. 최대 에너지적(BH)max이 재래 Alnico가 5 MGOe이고 SmCo₅가 20 MGOe의 값을 가지며 SmCo₁₇은 30 MGOe이나 된다.⁹⁾ 최근 미국의 GM社에서는 Nd-Fe-B과 Nd-Fe-Co-B 등을 굽내하여 만든(BH)max이 40 MGOe를 넘는 초강력 영구자석을 개발하여 생산중이며 일본은 粉末冶金으로 Nd-Fe-B 계를 생산중이다. 초강력 영구

자석이 사용됨으로써 기계의 小型化, 輕量化가 이루어 질 전망이다. 가격이 비싸다는 문제가 있다.

또한 무방향성 Fe-Si 강판이 變壓器, 發電機, 電動機 등의 회전에 사용되고 있는데 방향성 강판이 1970 년대에 등장하여 鐵損비가 크게 감소하게 되었다.

10. 非晶質 合金

보통 金屬을 溶解 후 凝固시키면 結晶質로 되나 秒당 수만 내지 수십만도로 초 급냉하면 結晶化가 되지 않은 채로 점성이 아주 큰 과냉액체상태로 응고하여 용융상태의 무질서한 원자배열 그대로 유지되어 非晶質 合金이 만들어진다.³⁾ 非晶質 合金의 자기적인 특징은 軟磁性 性質이 우수하여 保磁力가 낮고 透磁率이 높으며 鐵損이 적어 VIR 과 테이프레코드의 磁氣헤드에 實用化되었다. 일반 전기변압기에도 사용이 가능하지만 가격이 비싸 실용화가 어렵다. 비정질 재료는 磁氣의 특성의에도 耐蝕性이 우수한 특징이 있으며 저탄성, 고인성의 기계적 성질을 나타내기도 한다.

그러나 비정질 합금을 高溫에서 장시간 유지하면 결정화가 일어나기 때문에 고온에서의 사용은 문제가 있다.

11. 超傳度 材料

초전도도(Superconductivity) 현상은 1911년 네덜란드 Onnes 가 수은을 -269°C (4°K)의 극저온으로 냉각하면 전기저항이 거의 零에 가깝게 되는 것을 발견했다. 현재 실용화되고 있는 초전도도 합금은 임계온도(T_c)가 약 23°K 인 Nb_3Sn 합금이다. 초전도도 材料는 임계온도(T_c)도 높아야 하지만 임계자장(H_c) 및 臨界電流(I_c)도 높아야 한다. 최근 미국의 Houston 大의 C.W.Chu 교수팀은 임계온도가 액체질소온도를 상회하는 (98°K)La-Ba-Cu-O계 초전도 물질 개발을 발표했고 그뒤 Berkeley大에서는 -40°C 의 임계온도를 가진 초전도 물질이 개

발되었으며 또한 일본에서 14°C 에서도 초전도 현상이 일어나는 재료를 개발했다고 발표했다.

이 획기적인 고온 초전도 현상은 대전력의 수송, 자기부상열차, 핵융합 등에 비싼 액체헬륨을 사용하지 않아도 되므로 응용이 크게 기대된다.

그런데 산화물계통이므로 취성을 극복하여 코일 등으로 가공할 수 있는 기술이 개발되어야 할 것이다.

12. 結 論

신금속은 구성원소를 다른 원소로 대체하거나 새로운 제조 공정에 의해 개발될 수 있다. 새로운 素材의 탄생은 혁신적인 科學技術 발전을 가능케 하고 또 첨단 科學技術은 신소재 개발을 촉진한다.

신소재 개발과 實用化는 쉽게 이루어지는 것이 아니며 장기적인 연구와 실제 실험이 필요하다. 개발상 위험부담도 크기에 분야를 주의깊게 선택하여 집중 연구 및 투자를 함이 바람직하다고 본다.

<참 고 문 헌>

- 1) Y. G. Kim and H. F. Merrick, NASA CR-159493
- 2) Metal progress, Jan., 1983, p18.
- 3) Rapid Solidification Technology, ASM, 1983.
- 4) Y. G. Kim, Y. S. Park, J. K. Han, Met. Trans. vol. 16A, Sept., 1985, pp. 1689-1697.
- 5) J. K. Han and Y. G. Kim, Material Science & Eng. vol. 91, 1987, pp. 73-79.
- 6) Y. G. Kim and C. Ryu, Semiconductor international April, 1985.
- 7) Y. G. Kim, G. S. Kim, C. S. Lee and D. R. Lee, Material Science & Eng., 1986, vol. 79, pp. 133-140.
- 8) Y. S. Han and Y. G. Kim, Accepted for publication in Scripta Met.
- 9) 新金屬, 한국철강협회. 1986. 8月號 ♣