

複合組織鋼과 自動車 輕量化

金 楨 圭

〈漢陽大學校 工科學 · 工博〉

1. 緒 言

오늘날, 資源 에너지의 절약이 요구되는 사회적 경제적 입장에서, 또한 석유위기를 맞이하여 유기되는 문제의 대응책으로서 機械, 機器 및 構造物의 輕量化가 절실히 요구되고 있다. 輕量化는 구조물이 가진 전체로서의 기능 및 그것을 만들기 위한 생산성의 향상에 기초를 둔 경제성에 관계하고 있기 때문에 경제성을 무시한 輕量化는 있을 수 없고, 航空機분야로부터 시작한 輕量化의 여파는 自動車, 鐵道車輛, 船舶관계에까지 침투하고 있다. 특히 自動車業界에서는 안전성과 경제성을 양립시키는 자동차 輕量化의 대응책으로서 車의 小型化 및 輕量材料의 전환에 박차를 가하고 있다. 日本의 小型車에 의한 輕量化 및 에너지의 절감때문에 圓貨의 가치상승에도 불구하고 미국을 비롯한 세계시장에서 자동차의 판매량이 매년 늘어나고 있는 것은 이미 잘 알려진 사실이며, 미국도 에너지절감이라는 연료의 우위성을 갖추기 위하여 GM의 X-Car에서는 FF(Front Engine Front Drive)化에 의한 小型化가 주체로 되고 있다. 日本車의 경우 小型車의 분야에서는 미국車에 일보 앞서 있고, 今後は Al, Mg 및 이들 合金이나 複合材料(fiber-reinforced composite material)등의 적극적 채용이 요구되고 있는 상황이라고 알려져 있다. 이

러한 輕量化재료의 채용에 있어서 최근 日本과 미국에서는 加工時에 軟하고 加工後에는 硬하게 되는 新高張力鋼인 複合組織鋼(dual phase steel)이 등장하여 주목되고 있다.

本稿에서는 複合組織鋼의 의의 및 自動車 輕量化 材料로서의 실용화에 관한 기술적 동향에 관하여 記述한다.

2. 輕量化材料 및 複合組織鋼

輕量化를 위한 재료로서는 高强度材, 高剛性材, 低密度材이고 이것은 比強度, 比剛性이 높은 재료이라고 할 수 있다. 그러나 輕量化재료는 이와 같은 輕量化성 인자뿐만 아니고 더욱 기계 재료로서의 일반특성인 耐久性, 強靱性, 剛性이외에 加工特性, 生産價格등을 종합적으로 판단하여 채용할 필요가 있다. 이를테면 Al車輛은 重量輕감, 走行時의 전력절감, 耐食性 및 無塗裝 등의 잇점은 있지만 제작방법의 특수한 점, 強度 剛性的의 향상을 위한 연구 設計 제작상의 문제 이외에 재료가격이 鋼板의 7~8배라고 하는 최대의 문제가 있다. 또한 플라스틱계의 複合材料에 있어서는 가볍고 강하며, 成形性이 양호하고 耐食性이 뛰어나며, 疲勞強度가 높고 熱膨창계수가 적어 치수의 안정성이 높다는 잇점이 있는 반면, 강도의 散發性이 크며, 耐熱, 耐炎性, 耐久性이 약하며, 接合強度의 문제점 및 가격이 비

싸다는 등의 결점이 있다. 따라서 自動車 輕量化의 대책에 있어서는 輕合金이나 複合材料만큼의 輕量化는 기대할 수 없지만 가격면이나 대량공급의 안정성, 部品상호의 接합성, 塗裝등의 문제점을 고려하여 볼 때 高張力鋼의 채용이 절실히 필요하다는 인식이 침투하게 된다. 그러나 종래의 高張力鋼은 가격이나 成形性, 스폿(spot) 용접성 등에 난점이 있어 실용화에 제한이 되어 왔다. 이러한 상황에서 주목되고 있는 것이 複合組織鋼이다. 그림 1에 보인 바와 같이 Fe-C 상태도의 γ (austenite)와 α (ferrite)의 공존역인 $Ac_1 \sim Ac_3$ 변태점사이의 온도간에 가열하여 急冷에 의해 얻어지는 페라이트(ferrite)와 말텐사이트(martensite)의 2相混合組織으로 이루어진 것을 말한다. 그림 2는 페라이트-말텐사이트 복합조직의 대표예를 나타낸 것으로 페라이트粒중에 고립한 다수의 말텐사이트粒이 분산한 조직을 보이고 있다. 이 강의 개발은 日本이 세계에서 가장 먼저 착수한 것으로 알려져 있다. 또한 複合組織鋼(dual phase steel)이라고 하는 말의

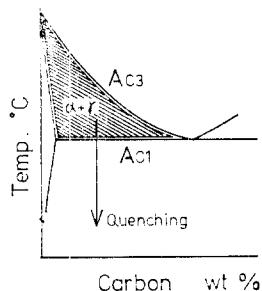


그림 1. 複合組織(ferrite-martensite)이 얻어지는 영역



그림 2. 複合組織의 代表例

出典은 1975년 가을 Washington D.C.에서 개최된 Microalloying 75 국제회의에서 日本의 古川(Furuhawa)들의 보고서에 의한 것으로, 그 뒤이 명칭이 일반적으로 되어 있다고 한다.

그림 3은 이 강의 應力 變形率曲線의 一例를 軟鋼과 다른 高張力鋼의 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 同一成分임에도 불구하고 複合組織에 의해 降伏應力이 저하하고 引張強度가 현저히 상승하며 또한 높은 인장강도에 비해 伸張이

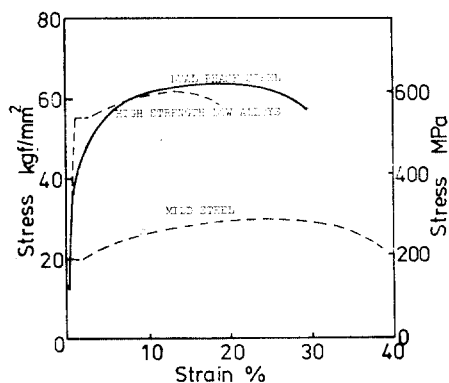


그림 3. Dual phase 鋼板, HSLA 鋼板 및 低炭素 鋼板의 變形率 特性

뛰어난 강이 됨을 알 수 있다. 즉 낮은 降伏比(降伏應力/引張應力), 높은 延性和 引張強度는 종래의 高張力鋼에 있어서의 成形困難性을 대폭 完善하여 成形에 의한 高強度部品の 현실적 적용범위를 현저히 확대할 가능성을 갖고 있다고 할 수 있다. 이러한 이유 때문에 日本을 비롯한 미국의 관련 業界, 學會에 있어서는 複合組織鋼이 自動車 輕量化를 위한 構造用材로서 일종의 선풍적 인기를 모으고 있는 것으로 알려져 있다.

3. 複合組織鋼의 제조법

複合組織은 變態強化를 이용한 것으로 일반적인 熱處理과정은 앞에서 설명한 바와 같고, 化學成分과 열사이클의 변화에 의해 微視組織因子가 다른 많은 종류의 것을 얻을 수 있다. 이하에서는 이미 보고된 日本의 3大 鐵鋼業界에서 행하고 있는 複合組織鋼의 제조법에 대하여 간단히 소개한다. 표 1은 各種의 제조법을 나타낸 것이다.

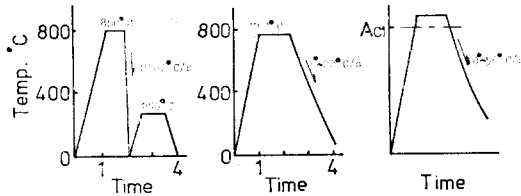
1. 日本鋼管(NKK-CAL process)

鋼을 α 相과 γ 相의 공존영역에서 $500 \sim 2,000^\circ C/sec$ 의 고속으로 냉각시켜 複合組織鋼을 얻는 것으로, 담금질을 행한후 약 $200 \sim 300^\circ C$ 에서 뜨임(tempering)을 행한다. 열처리후에는 調質

◇ 解 說

表 1. 複合組織鋼의 製造法

日本鋼管	新日本製鐵	川崎製鐵
設備 冷鋼板用 連續燒鈍 라인 "CAL"	冷延鋼板用 連續燒鈍 라인 "CAPL"	스테인레스鋼板用 連續燒鈍라인
添加元素 (Si, P)	Mn	Mn, Cr



壓延(skinpass)을 행하고 경우에 따라서는 양호한 強度-延性關係를 유지하기 위하여 Si, P를 첨가하고 있다.

2. 新日本製鐵

5~20°C/sec의 Gas-Jet 냉각속도로써 말텐사이트變態가 일어나도록 하였으며, 강의 燒入性의 향상 및 低降伏比를 얻기 위하여 Mn 양을 2% 이상 첨가시키고 있다. 그 이유로서는 다음과 같다. 즉 Mn의 첨가에 의해 TTT線圖(time-temperature transformation)에 있어서 이른바 "nose" 부분을 장시간 축으로 이동시키기 때문에 냉각속도가 느려도 말텐사이트 조직을 얻을 수 있고, 또한 그림 4에 보인 바와 같이 Mn 양이 2.0% 이상에서는 降伏點이 저하하고 引張強度가 현저히 증가하여 低降伏比를 얻을 수 있기 때문이다.

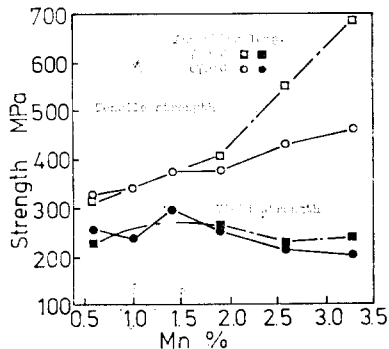


그림 4. 強度에 미치는 Mn의 영향

3. 川崎製鐵

熱사이클은 新日本製鐵의 것과 비슷하나, 낮은 냉각속도로써 말텐사이트變態를 시키기 위하여 鋼의 화학성분이 C-Mn-Cr系로 되어 있는 것이 다르다고 한다.

4. 機械的特性

이 複合組織鋼은 強度는 낮지만 延性이 풍부한 페라이트相과 이와 반대로 延性は 낮지만 鋼의 強化를 발휘하는 말텐사이트相과의 각상의 장단점을 조합한 이른바 "鋼의 複合材料"로서 특징을 간단히 열거하여 보면 다음과 같다.

- (1) 變形舉動에 있어서 降伏현상이 나타나지 않고 균일하게 변형한다.
- (2) 降伏比가 낮다.
- (3) 伸張 및 加工硬化率이 크다.
- (4) Stretcher strain의 문제점이 없다.
- (5) 熱사이클의 적당한 선택에 의해 양호한 強度-延性關係를 얻을 수 있다.

이들 특성의 몇가지에 대하여 살펴보자.

1. 降伏比 및 延性

그림 5는 各種 高張力鋼의 引張強度, 伸張 및 降伏比와의 關係를 나타낸 것이다. 그림 5와 앞의 그림 3으로부터 다음의 사항을 알 수 있다. 軟鋼은 降伏強度가 낮고 延性は 크지만 얻을 수 있는 인장강도는 지극히 낮고 또한 降伏現象을 나타낸다. 그리고 析出硬化鋼은 항복강도는 높지만 延性이 떨어지고 또한 70kgf/mm²(686MPa)에 달하는 引張強度가 얻어진다. 超高張力鋼에 있어서는 인장강도 및 항복강도는 높지만 延性이 아주 낮다. 그러나 複合組織鋼은 높은 인장강도와 풍부한 연성을 나타내고 있으며, 또한 동일 인장강도에 있어서 어떠한 鋼보다 항복비가 낮음을 알 수 있다. 특히 低降伏比, 降伏현상이 나타나지 않는 원인에 대해서는 말텐사이트變態時의 체적팽창에 의해 페라이트와 말텐사이트粒界부근에 可動轉位가 많아졌기 때문이라고 생각

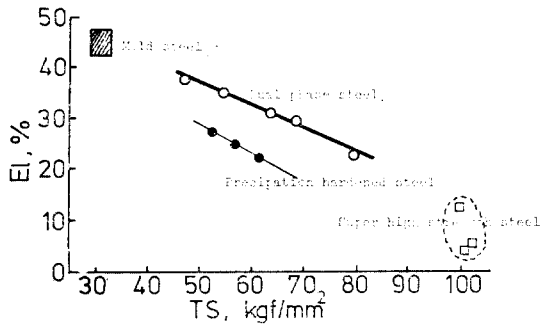
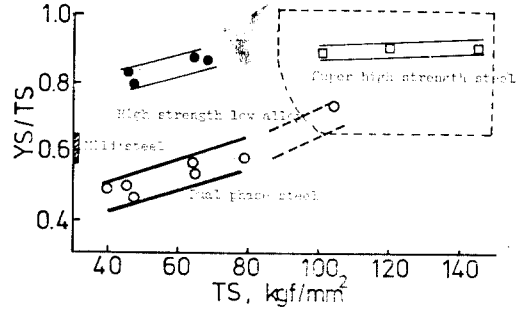


그림 5. 各種 強化鋼의 引張強度와 伸張 및 降伏比와의 관계



되고 있지만 아직도 불충분하다.

2. 時効性

그림 6은 日本鋼管 60 kg 급 複合組織鋼의 應力-變形率曲線의 一例로서 室溫時効後의 곡선 (2)를 調質壓延直後의 곡선(1)에 比較하면 거의 같음을 알 수 있다. 이것은 時効性이 상당히 느리다는 것을 나타내며, 프레스成形時 stretcher strain의 문제가 없음을 의미한다고 설명되고 있다. 이것은 鋼中에 轉位(dislocation)密度가 높아서 時効中에 어느정도 轉位가 高착되어도 무시할 수 있을 정도로 비교적 작은 량이기 때문이라고 생각되고 있다.

를테면 400°C에서 時効處理를 하면 항복현상이 나타남과 동시에 항복응력이 증가하고 引張強度가 저하한다. 그러나 變形을 가한 후, 200°C 이상의 저온에서 시효처리를 행하면 항복 및 인장강도는 현저히 상승하게 된다. 이러한 현상을 燒着硬化性이라고 하며 이 원인은 프레스加工에 의해 도입된 轉位가 侵入型固溶元素에 의해 고착되든지 또는 그 轉位근방에서 고용원소가 재배열하기 때문으로 생각되고 있다. 同一 강도의 제품을 만드는 경우, 이것에 의한 硬化分만큼 항복점이 낮은 複合組織鋼을 사용할 수 있기 때문에 成形性이 뛰어나고 있음을 의미한다.

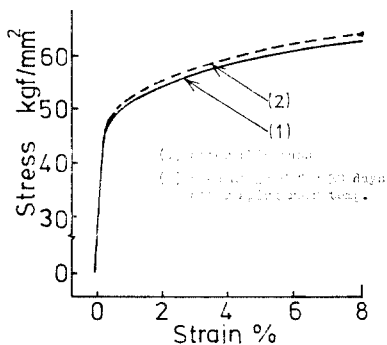


그림 6. 複合組織鋼板의 應力-變形率 曲線의 例

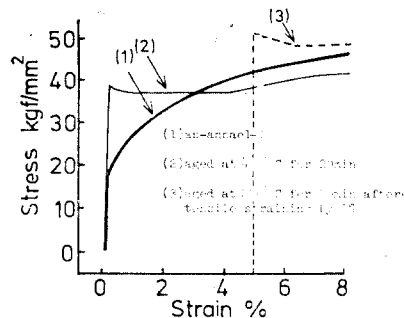


그림 7. 複合組織鋼板의 時効硬化

3. 燒着硬化性(bake-hardenability)

그림 7은 川崎製鐵 50 kg 급의 複合組織鋼의 應力-變形率曲線으로 燒入한 상태에서는 항복 현상을 나타내지 않지만 200°C 이상의 時効, 이

4. 強度, 延性理論

複合組織鋼의 強度, 延性の 이론은 일종의 복합재료(composite material)로 보고 그림 8에 보인 바와 같은 變形一定모델(strain equal mo-

◇ 解 說

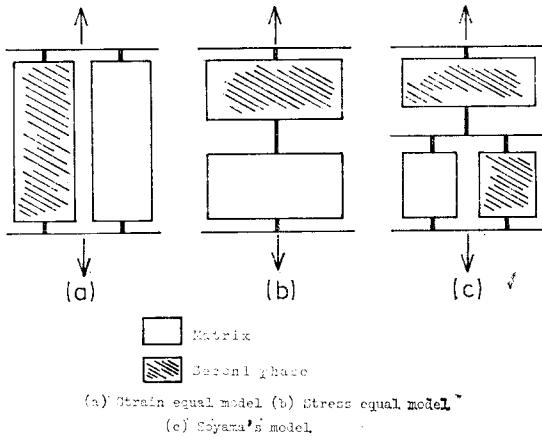


그림 8. 重力複合組織鋼의 變形모델

del), 應力一定모델(stress equal model) 및 혼합모델에 의해 일반적으로 해석하고 있다. 이를테면 基地(matrix)와 제 2상(fiber)의 各單相 및 複合材料 어느것이나 $\sigma = K\epsilon^n$ (여기에서 n : 가공경화지수) 따르고, 材料전체로서의 극부수축이 생기지 않는 한 兩相의 變形은 같다는 變形一定 모델의 가정에 따르면 複合組織鋼의 強度 σ_D 는 다음 式으로 주어진다.

$$\sigma_D = \sigma_M V_M + \sigma_F (1 - V_M)$$

σ_M, σ_F : 말덴사이트相 및 페라이트相의 引張強度

V_M : 말덴사이트의 적용률

이 관계를 일반적으로 混合則이라 부르고, 複

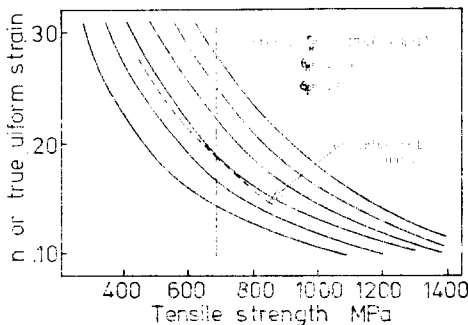


그림 9. 페라이트의 強度를 여러가지로 가정할 경우의 引張強度와 n 및 伸張과의 관계. 계산에 사용한 페라이트의 強度는 $n=0.31$ 의 경우(σ_M, ϵ_M : 말덴사이트의 값, σ_F, ϵ_F : 페라이트의 값)

합材料 및 複合組織鋼의 強度를 평가하는 기본으로 되어있다. 또한 주어진 강도에 대하여 伸張을 개선하기 위해서는 페라이트의 강도를 증가시키는 것이 유리함을 그림 9의 인장강도와 신장과의 관계로부터 알 수 있다. 그러나 이러한 가정 설명의 차이에 따라 다른 결론이 나오고 있어 복합조직강의 강도 및 연성의 이론에는 아직도 불충분한 점이 많으나, 일반적으로 強度 및 延성이 양호한 複合組織鋼을 얻기 위해서는 (1) 페라이트相의 강도와 연성을 증가시킴 (2) 말덴사이트相의 강도를 증가시킴 (3) 말덴사이트相의 체적률은 20%이하 등의 지견을 나타내고 있다.

5. 自動車 構造用鋼材로서의 적합성

自動車鋼材로서 요구되는 특성은 降伏點이 낮아 成形성이 좋아야 하며, 또한 성형후에는 強度가 높아야 한다는 점등이다. 複合組織鋼은 이와 같은 自動車鋼材로서의 적합성이 있다.

1. 成形性

成形성이 뛰어난 高張力鋼의 개발은 오랜동안의 꿈으로서 여기에 등장한 복합조직강은 항복점이 낮아 성형이 용이하고 또한 고강도에 비하여 신장이 뛰어난 점이다(그림 5참조). 또한 그림 10은 각종 強化型鋼의 펀치성형성을 비교한 것으로 복합조직강은 높은 引張強度에도 불구하고 뛰어난 성형성을 나타내고 있다. 이것은 복합조직강의 變形 進과능력이 크기 때문으로 설명하고 있다.

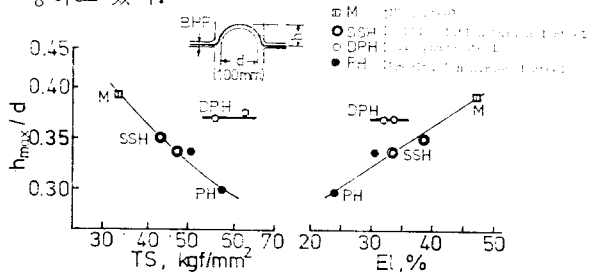


그림 10. 各種強化鋼의 펀치 形成높이와 引張強度, 伸張과의 관계

2. 形狀凍結性

強度가 높은 재료를 성형하는 경우에는 離形時에 일반적으로 재료가 스프링 백 (spring back) 현상을 일으켜 치수 정밀도에 불량을 가져오는 경우가 많다. 이 현상은 성형시에 재료에 부여되는 塑性 굽힘 모멘트에 기인하는 것으로 재료의 彈性限度가 높을수록, 成形曲率이 클수록 현저하다. 그림 11은 각종의 강화강을 성형했을 때에 생기는 스프링 백의 양을 일정한 값으로 억제함에 요하는 素板의 曲率을 실험적으로 구한 것으로 복합조직강이 다른 鋼보다 뛰어난 것을 알 수 있다. 또한 그림 12는 스프링 백을 引張強度와 降伏強度에 대하여 나타낸 것이다. 여기에서 $\Delta\rho/\rho$ 는 다음式으로 정의된다. 즉

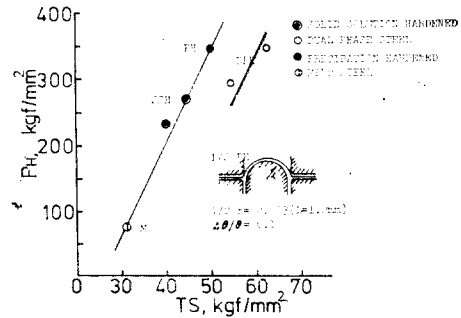


그림 11. 各種強化鋼의 形狀凍結性과 引張強度와의 관계

$$\Delta\rho/\rho = [(1/\rho_0) - (1/\rho)] / (1/\rho_0)$$

ρ_0 : 편치 低面의 곡률반경

ρ : 제품 的 曲률반경

이 그림에서 스프링 백은 인장강도와 항복강

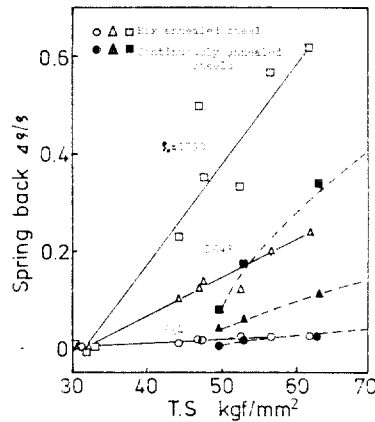
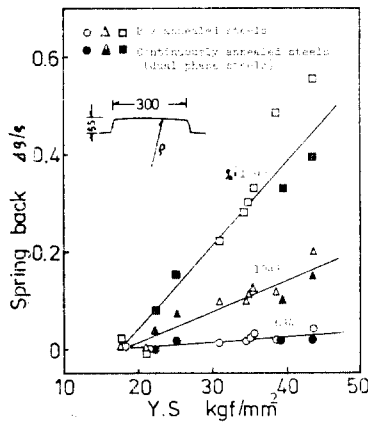


그림 12. 스프링백과 降伏強度 및 引張強度와의 관계

도에 거의 비례하지만 복합조직강은 同一 인장강도에서 비교하면 다른 高張力鋼보다 현저히 적은 것을 알 수 있다.

3. 耐덴타性 (dent resistance)

국부적인 塑性變形에 대한 저항력을 말하는 것으로 제품의 중앙에 하중을 가하여 變形量을 5 mm 까지 변형시켜 제하했을 때의 殘留變形量으로서 耐덴타성을 평가한 결과에 의하면 다음과 같다. 그림 13은 이 결과를 나타낸 것으로 降

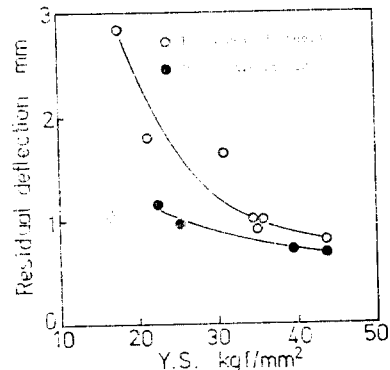


그림 13. 프레스 제품의 局部壓縮後의 殘留變形에 미치는 降伏強度의 영향

◇ 解 說

伏應力이 높을수록 잔류변형은 작고, 또한 동일 항복응력에서 비교하면 저항복결 고인장강도의 복합조직강이 잔류변형이 작음을 알 수 있다.

4. 스폿 용접성 및 도장성

스폿 용접부에 대해서는 용접조건을 포함하여 아직도 불충분한 점이 많지만 일반적으로 종래의 高張力鋼에 비하여 양호하고, 도장성은 보통의 가공용 冷延鋼板과 같은 정도라는 인점이 알려져 있다.

6. 結 言

新高張力鋼인 페라이트-말덴사이트 複合組織鋼은 지금까지 설명한 바와 같이 自動車의 構造用材로서 대단한 잇점을 갖고 있다. 그러나 이 용기술관련의 보고가 아직 빈약하고, 특히 실용상 중요한 용접성, 용접부의 疲勞強度, 노치部나 加工部材의 疲勞特性, 衝擊特性 및 強度 등의 諸문제에 대해서 아직도 충분한 연구가 되어 있지 않은 상황이다. 이러한 점을 고려해 보면 일반적인 보급에 시간이 요할 것으로 보고 있다. 그러나 自動車의 輕量化 및 에너지의 절감을 목표로 하는 이상 高張力鋼의 채용은 국제적인 추세이기에 복합조직강의 제조기술, 재질개선 및 용기술등이 개척되면 自動車의 輕量化를 위한 구조용재료로서 공헌할 것이 기대됨과 동시에 또한 일반 구조물용재료에도 적용이 확장될 것으로 보고 있다.

참 고 문 헌

1) 中川, 自動車工業의 展望 日本機械學會誌, vol. 83,

No. 734, 1980, 51pp.

- 2) 吉田, 自動車車體의 簿鋼板とプレス 成形의 戰後小史, 日本機械學會誌, Vol. 84, No. 748, 1981, 49 pp.
- 3) 古田, 新レス 複合材料의 研究開發의 動向, 機械의 研究, Vol. 32, No. 12, 1980, 1351 pp.
- 4) 武, 最近의 自動車高張力鋼板의 特徵と性能, 機械의 研究, Vol. 33, No. 2, 1981, 257 pp.
- 5) 井口, 輕量化構造設計と 機械材料, 機械의 研究, Vol. 33, No.2, 1981, 343pp.
- 6) R.G. Davies, The Deformation Behavior of a Vanadium-strengthened Dual Phase Steel, Mat. Trans. 9A, 1978, 41pp.
- 7) R.G. Davies, Influence of Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels, ibid, 9A, 1978, 677pp.
- 8) 丸山, 自動車가 輕くなる 複合組織鋼, Nikkei Mechanical, Vol. 4, 1979, 42pp.
- 9) 高橋外 2 名, 加工用 低降伏比 複合組織 高長力 鋼板, 日本金屬學會會報, Vol. 19, No. 1, 1980, 10 pp.
- 10) 古川, Dual phase 鋼板의 組織と機械的性質, 日本金屬學會會報, Vol.19, No. 8, 1980, 439pp.
- 11) 古川, 米國における dual phase 鋼板의 開發と利用, 鐵と鋼, Vol. 67, No. 2, 1981, 175pp.
- 12) N. Ohashi et al, Processing Techniques and Formability of Agehardenable, Low Yield, High Tensile Strength Cold-rolled Sheet Steels, Trans. ISIJ, Vol. 18, 1978, 321pp.
- 13) 金, 微視的破壞現象으로 본 材料開發의 기본, 大韓機械學會誌, Vol. 20, No. 4, 1980, 288pp.
- 14) J.Y. Koo et al, On the Law of Mixtures in Dual Phase Steels, Met. Trans. 11A, 1980, 852pp.
- 15) 曾山, 遊離フェライトと硬質領域が共存する鋼의 應力-ひずみ線圖, 材料, Vol. 15, No. 148, 1966, 17pp.

