

研究論文

大韓熔接學會誌
 第10卷第3號 1992年9月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol.10. No. 3, Sep., 1992

Al₂O₃ 세라믹과 Ni-Cr-Mo鋼과의 인서트 합금을 이용한 확산접합에 관한 研究

김영식* · 박훈종** · 김정일***

A Study on the Diffusion Bonding of the Al₂O₃ Ceramics to Metal

Y. S. Kim*, H. J. Park**, J. I. Kim***

Key Words : Solid-State Diffusion Bonding(고상확산접합), Bonding Strength(접합강도), Active Brazing(활성브레이징), Thermal Stress(열응력), Insert Metal(인서트금속), High Temperature Strength(고온강도), Thermal Shock Properties(열충격특성)

Abstract

The joining methods of ceramics to metals which can be expected to obtain high temperature strength are mainly classified into the solid-state diffusion bonding method and the active brazing method. Between these two, the solid-state diffusion bonding method is given attentions as substituting method for active brazing method due to being capable of obtaining higher bonding strength at high temperature and accurate bonding.

In this paper, the solid-state diffusion bonding of Al₂O₃ ceramics to Ni-Cr-Mo alloy steel(SNCM21) using insert metal was carried out. The insert metal employed in this study was experimentally home-made, Ag-Cu-Ti alloy. Influence of several bonding parameters of Al₂O₃/SNCM21 joint was quantitatively evaluated by bonding strength test, and microstructural analyses at the interlayer were performed by SEM/EDX.

From above experiments, the optimum bonding condition of the solid-state diffusion bonding of Al₂O₃/SNCM21 using Ag-Cu-Ti insert metal was determined. Futhermore, high temperature strength and thermal

* 正會員, 韓國海洋大學校

** 正會員, 韓國船級協會

** 正會員, 木浦海洋專門大學

-shock properties of $Al_2O_3/SNCM21$ joint were also examined.

The results obtained are as follows.

1. The maximum bonding strength was obtained at the temperature of 95% melting point of insert metal.
2. The high temperature strength of $Al_2O_3/SNCM21$ joint appeared to be maximum value at test temperature $500^\circ C$ and the bonding strength with increasing temperature showed parabolic curve.
3. The strength of thermal-shocked specimens was far deteriorated than those of as-bonded specimens. Especially, water-quenched specimen after heated up to $600^\circ C$ was directly fractured in quenching.

1. 序 論

오늘날 科學技術의 급속한 발전에 따라 각종 機器類의 要求性能은 高效率, 高性能, 高機能化를 指向하고 있으며 사용기기부재에 대한 要求性能도 당연히 엄격하여지고 있으나, 實用金屬材料로서는 이러한 要求性能을 만족시키기 곤란한 경우도 생기고 있다. 그래서 金屬材料에 비해서 耐熱, 耐蝕, 耐磨耗性 등의 熱的, 化學的 및 機械的 諸特性이 뛰어난 세라믹을 構造用材料로서 이용하는 문제를 고려하고 있으나, 一般的으로 세라믹은 機械的 衝擊에 弱하고 加工이 곤란하다는 등의 缺點때문에 그 使用分野가 극히 制限되고 있는 實情이다.

따라서 이러한 問題點을 극복하여 세라믹의 利用範圍를 확대시키기 위해서는 韌性이 豊富하고 加工性이 우수한 金屬材料와의 接合에 의해 두 재료의 長點을 구비한 複合化된 재료로서 사용하는 것이 바람직하다.¹⁻⁵⁾

그러나 세라믹과 금속과 같은 異種材料의 接합은 전통적인 熔融溶接으로는 곤란하기 때문에 여러가지 방법이 研究, 開發되고 있으며, 현재 比較的 高溫에서 높은 強度가 期待되는 接合法로서는 活性金屬을 이용한 브레이징(brazing)法和 固相擴散接合(solid-state diffusion bonding)法을 들 수 있다.^{2,6,7)}

특히 固相擴散接合法는 母材를 熔融시키지 않기 때문에 精密한 接合이 可能하며 接合溫度를 낮출 수가 있어 급후 매우 유용한 方法으로서 크게 注目되고 있다. 그러나 세라믹과 金屬과 같은 異種材料를 接합하여 信賴性 있는 接合強度를 얻기 위해서는 原子結合樣式의 差異에 起因한 融點, 熱膨脹係數, 彈性係數, 硬度 등, 두 材料間 物性的 差異에서 비롯되는 여러가지 현상에 대한 檢討가 필요하다. 이 중에서도

熱膨脹係數의 差에 기인한 熱應力과 界面에서의 反應生成物에 대한 事項은 매우 중요한 問題들이라 할 수 있다⁸⁾.

본 연구에서는 Al_2O_3 세라믹과 Ni-Cr-Mo鋼의 固相擴散接合用 인서트합금을 製作하고 이것을 이용하여 $Al_2O_3/Ni-Cr-Mo$ 鋼 固相擴散接合을 행하였다. 그리고 各種 接合條件 및 試驗條件이 接合部의 強度에 미치는 影響을 調査, 分析하고 接合體의 性能을 評價함으로써 인서트합금을 이용한 세라믹과 金屬의 固相擴散接合法의 確立을 試圖하였다.

2. 實驗方法

2.1. 實驗材料 및 試驗片

실험에 사용된 재료는 常壓燒結의 純度 99.8% Al_2O_3 세라믹((주) 창원社製, 직경 $13mm \times 10mm$)과 Ni-Cr-Mo 合金鋼이다.

Table 1 (a), (b)는 실험에 사용된 Al_2O_3 세라믹의 각종 物性値와 Ni-Cr-Mo鋼의 化學的 成分 및 機械的 特性値를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 1은 試驗片의 形狀 및 치수 그리고 試驗片 接合時의 각 재료의 接合形態를 나타낸 것이다. 接합에 사용한 Ni-Cr-Mo鋼材는 직경 16mm의 棒狀試料로부터 Al_2O_3 세라믹의 직경과 같은 13mm로 旋盤 加工되었다.

接合面의 處理는 Al_2O_3 세라믹의 경우 금강석 연마제(diamond paste)로, Ni-Cr-Mo鋼과 인서트합금, 구리(Cu)는 에머리 페이퍼(emery paper)로 #1200까지 研磨한 후 각각 超音波 洗滌器에서 아세톤으로 세척하였다.

그림에 나타내어져 있는 인서트합금은 以前の 實

Table 1 Physical properties of test materials

(a) Physical properties of Al₂O₃

Purity (%)	99.8
Bending strength (MPa)	372
Compressive strength (MPa)	2450
Rockwell hardness (R45N)	82
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)	8.0

(b) Chemical composition & mechanical properties of SNCM21

Chemical composition (%)							Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El. (%)	L.E. (×10 ⁻⁶ /°C)
0.21	0.23	0.72	0.19	0.48	0.46	0.16	804	882	18	13.4

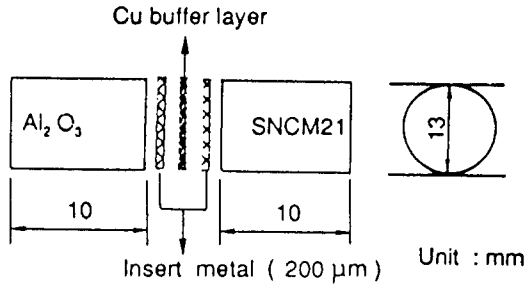


Fig. 1 Schematic illustration of specimen

驗結果에서 接合強度가 비교적 양호하고 薄板으로 製作하기 容易하다고 생각되는 Ag-Cu-Ti계의 합금이 다.

인서트합금의 인고트(ingot) 제작은 眞空雰圍氣 아크熔解爐(arc melting furnace)를 사용하였으며, 所定比率의 金屬片을 이 眞空雰圍氣 아크熔解爐의 熔融盤위에 올려 놓고 爐內를 眞空狀態로 한 다음 Ar 가스를 주입하여 10~20Torr의 低壓 不活性가스 雰圍氣中에서 텅스텐 電極을 이용하여 아크(arc)를 發生시켜 인서트합금의 인고트를 製作하였다.

이 인고트를 파인 컷터(fine cutter)로 所定の 크기로 절단한 후, 壓延機로서 冷間壓延하여 170~1000μm 두께의 인서트합금 薄板을 製作하였다.

接合部에서의 熱應力緩和를 위해 사용된 99.99% Cu 中間層의 製作過程도 인서트합금 薄板 製作過程과 동일하였다.

2.2. 接合裝置 및 接合工程

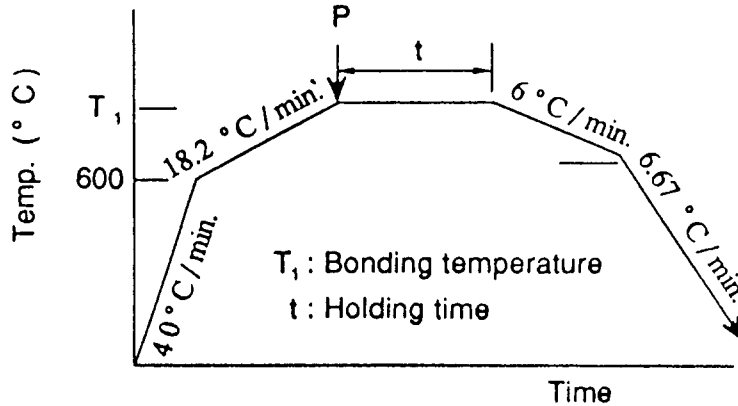
집합에 사용한 實驗裝置는 7×10⁻⁵ Torr의 眞空度를 갖는 眞空爐로서, 基本的으로 加熱部, 溫度制御部, 加壓部로 構成되어져 있다. 加熱部는 흑연(graphite) 抵抗發熱體로 되어 있으며, 溫度調節 및 測定은 熱電對(백금-로듐)와 自動溫度調節裝置로 行하였다. 接合時 加壓力은 油壓裝置의 油壓式과 데드웨이트(dead weight)式, 또는 兩者로 하는 것이 모두 가능하나, 본 실험에서는 주로 데드웨이트 方式로 行하였다.

Fig. 2는 試驗片의 接合工程을 圖式的으로 나타낸 것이다. 또한 그림의 하부에 試驗片 接合時의 接合條件 및 接合工程에서 고려한 接合變數(bonding parameters)를 도표로 정리하여 나타내었다.

2.3. 接合體의 性能評價 및 分析

接合體의 剪斷強度 및 굽힘強度試驗은 본 試驗片에 적합한 剪斷 및 굽힘試驗用 치구를 自體 설계·제작하고, 이것을 이용하여 萬能材料試驗機(Instron 社製)에서 크로스헤드(cross head) 變位速度 0.017mm/sec로 하여 行하였으며, 高溫強度와 熱衝擊特性的 評價를 위해서는 材料試驗機에 高溫爐를 부착하여 실험을 行하였다.

剪斷強度는 破壞時까지 작용한 힘을 接合斷面積으



Bondition parameters

Bonding Temperature, T_1	(°C)	700, 710, 730, 750, 770, 790
Bonding Pressure, P	(MPa)	0.5, 1, 2, 4, 6
Holding time, t	(Min)	30, 60, 90, 120, 180, 240
Thickness of Cu buffer layer	(μm)	100, 200, 400, 500, 600, 800

Fig. 2 Schematic diagram of bonding process and condition

로 나누어 구하였으며, 굽힘강도는 下部支點間隔을 15mm로 한 3점굽힘試驗法에 의해 구하였다.

接合部の 冶金學的 解析은 接合體의 接合面을 수직으로 절단한 면에 대해서 光學顯微鏡 및 走査型電子顯微鏡(SEM, Cambridge 社製, Stereoscan-100)에 의한 界面組織 觀察, SEM/EDX에 의한 界面에서의 反應生成物 및 원소의 擴散舉動에 주목하여 행하였다.

그리고 Micro-Vickers 硬度試驗機에 의해 接合部の 微小硬度를 측정함으로써 擴散反應層 微小領域의 特性을 推定하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 각종 接合條件이 接合強度에 미치는 影響

固相擴散接合時 接合變數로서 작용하는 接合溫度, 接合時間, 接合時 加壓力 및 表面 狀態 등이 接合部 強度에 미치는 影響과 中間層으로 사용한 Cu의 두께 변화에 따른 熱應力緩和의 效果를 調査하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 試驗製作한 인서트층금을 이용하여 固相擴散接合時 接合溫度가 接合部の 剪斷強

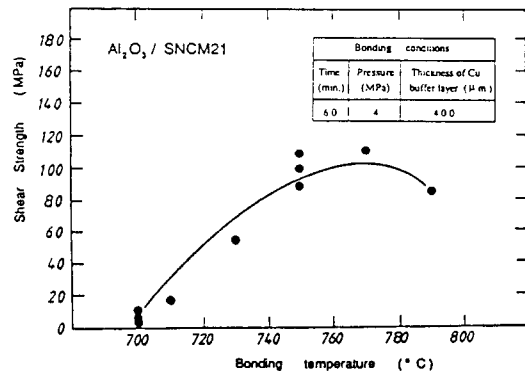


Fig. 3 Dependence of shear strength of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SNCM21}$ joint on bonding temperature using Ag-Cu-Ti insert metal

도에 미치는 影響을 評價한 結果를 정리한 것이다.

試驗片은 接합이 가장 양호한 조건인 接合時間 60 min, 接合時 加壓力 4MPa, 應力緩和層 Cu 두께 400 μm 로 一定하게 한 상태에서 試驗變數인 接合溫度를 700°C, 710°C, 730°C, 750°C, 770°C, 780°C, 790°C로 증가시켜 가면서 제작하였다.

이 시험결과에 의하면 700°C 이하에서는 接합이 양호하지 못하여 10MPa 이하의 낮은 剪斷強度 값을

나타내고 있으나, 接合溫度의 상승과 더불어 剪斷強度는 指數函數의 形式으로 증가하여 750~760°C 근방에서 最大로 되며 110MPa 정도의 값을 나타내었다.

그러나 인서트합금의 熔融點인 780°C 이상에서는 接合強度가 점차 저하하는 경향을 보이고 있는데 이는 인서트합금의 熔融으로 인해 인서트합금에 의한 熱應力緩和效果가 消滅되기 때문인 것으로 思料된다.

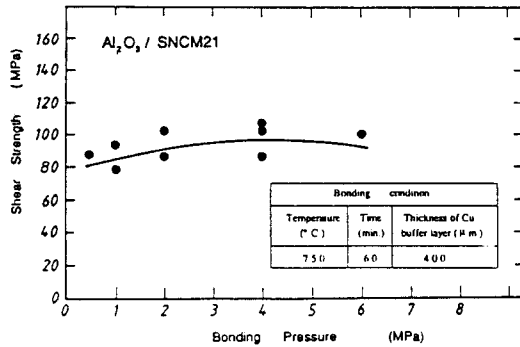


Fig. 4 Dependence of shear strength of Al₂O₃/SNCM 21 joint on bonding contact pressure using Ag-Cu-Ti insert metal

Fig. 4는 接合時 加壓力의 크기가 接合部의 強度에 미치는 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 試驗片의 製作는 接合溫度 750°C, 接合時間 60min, 應力緩和層인 Cu의 두께 400 μm로 한 조건에서 행하였다.

이 결과에 의하면 接合部의 強度는 接合時 加壓力의 크기에 거의 영향을 받지 않고 一定한 값을 나타내고 있는데, 이것은 應力緩和材로 사용한 Cu의 高溫 크리프(creep) 現象으로 인해 600°C 이상에서는 작은 압력으로도 충분한 塑性變形이 일어나 加壓力이 증가하더라도 應力緩和의 效果가 더 커지지 않기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 인서트합금을 사용하여 接合한 試驗片의 接合強度에 미치는 接合時間의 影響을 조사한 결과이다. 이때, 試驗片의 接合은 接合溫度 750°C, 加壓力은 4MPa, 應力緩和層인 Cu의 두께 400 μm인 接合條件에서 행하였다.

이 試驗結果에 의하면 最初 30min의 接合時間으로 接合을 하였을 때 剪斷強度는 35MPa 정도였으나 60 min의 接合時間에서는 100MPa 정도로 급격히 상승하고 있다. 그러나 그 보다 接合時間이 길어져서 180 min 범위까지는 維持時間에 관계없이 일정한 범위내로 收斂하는 경향을 보이고 있다.

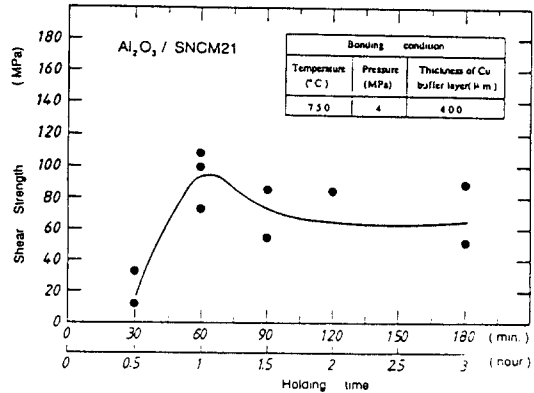


Fig. 5 Dependence of shear strength of Al₂O₃/SNCM 21 joint on holding time using Ag-Cu-Ti insert metal

이와 같이 어느 時點까지는 接合時間의 증가에 따라 試驗片의 接合強度도 증가하나, 그 이후 거의 變化를 보이지 않는 것은 活性金屬으로 첨가된 Ti이 擴散移動과 밀접한 關聯이 있는 것으로 생각된다. 즉 微量으로 첨가된 Ti이 擴散하여 인서트합금과 세라믹界面에서 反應層을 형성하여 接合機構를 생각할 때, Ti이 擴散하여 界面이 계속 反應할 時點까지는 接合時間이 증가하면 強度는 상승하지만, 인서트합금에 함유된 Ti의 양이 界面에서 飽和되는 時點 이상에서는 接合時間이 증가하더라도 界面反應이 계속 일어나지 않기 때문에 接合強度는 거의 變化가 없게 되는 것으로 判斷된다.

Fig. 6은 應力緩和材인 Cu層의 두께가 接合體의 剪斷強度에 미치는 영향을 조사한 것으로, 接合條件은 750°C, 60min, 4MPa이었다.

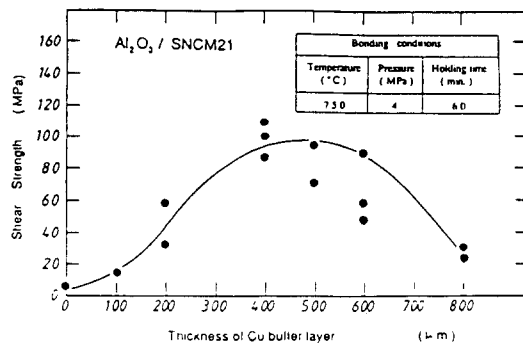


Fig. 6 Dependence of shear strength of Al₂O₃/SNCM 21 joint on thickness of Cu buffer layer using Ag-Cu-Ti insert metal

이 결과에 의하면 應力緩和材인 Cu를 넣지 않거나, 두께 100 μm 이하의 Cu를 插入하여 接合한 경우는 應力緩和의 효과가 없거나 매우 작기 때문에 두 材料의 熱膨脹係數에 기인한 熱應力은 곧 바로 세라믹 측에 龜裂을 야기시켜 接合強度를 低下시킨다. 400~600 μm 의 Cu層 두께에서는 양호한 熱應力緩和 효과로 높은 剪斷強度를 나타내고 있으나, 그 이상의 두께에서는 試驗片이 接合工程後 冷却過程에서 軟質金屬인 Cu 자신의 收縮에 의한 熱應力이 附加되기 때문에 剪斷強度는 減少하는 것으로 判斷된다.

3.2. 接合部の 微視的 組織 및 硬度

Photo. 1은 Ag-Cu-Ti의 인서트합금을 이용하여 구리緩和層의 두께를 400 μm 로 하고 加壓力 4MPa, 維持時間 60min으로 일정하게 한 조건에서 각각 接合溫度를 변화시켜 接合한 試驗片의 界面組織變化를 관찰한 결과이다. 이 결과에 의하면 接合溫度를 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 한 경우 反應層은 거의 관찰되지 않았으나 750 $^{\circ}\text{C}$ 에서 接合時 微小한 反應層 生成을 확인할 수 있고 780 $^{\circ}\text{C}$ 의 조건에서는 反應層이 뚜렷하게 성장되어 있음을 알 수 있다. 또한 SEM/EDX 관찰 결과 780 $^{\circ}\text{C}$ 에서 接合時 接合界面에서 Ti원소의 뚜렷한 增加가 確認

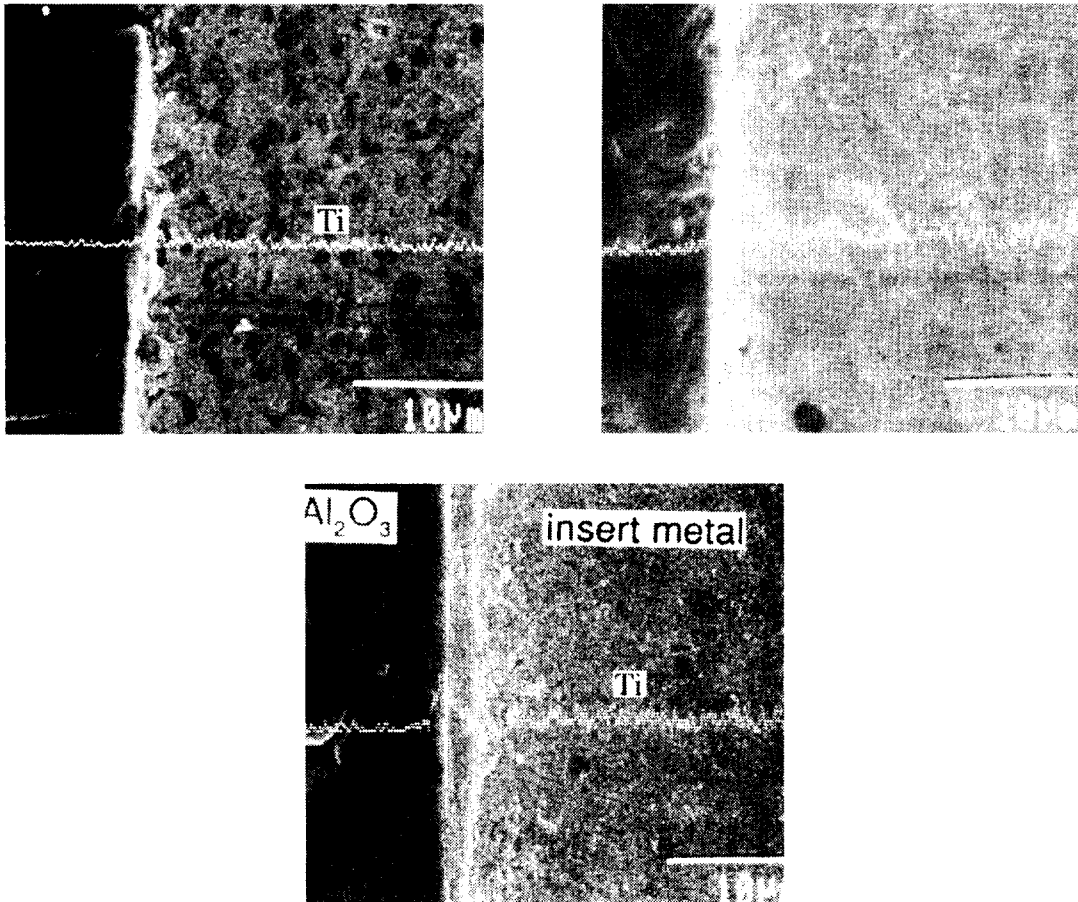


Photo. 1 Microscopic appearance and EDX analysis of reaction layer with increasing the bonding temperature (Pressure ; 4MPa/Holding time ; 60min)

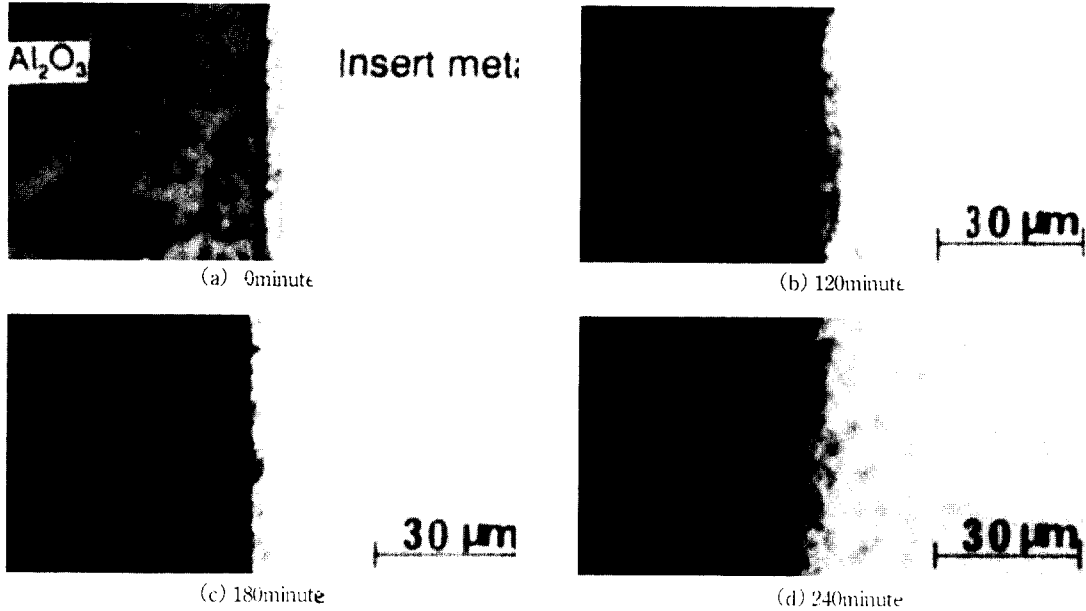


Photo. 2 Microscopic appearance of reaction layer with increasing the holding time (Bonding temperature ; 750/Pressure ; 4MPa)

되었다. 따라서 인서트합금이 熔融되지 않는 擴散接合時에도 界面에 反應層이 形成된다는 것을 알 수 있다.

Photo. 2는 接合時間을 변화시켰을 때 界面에서의 微視組織變化를 光學顯微鏡 관찰에 의해 분석한 것이다. 試驗片의 接合은 接合溫度 750℃, 接合壓力 4 MPa, Cu 두께 400 μm의 조건에서 行하였다.

이 결과에 의하면 750℃×30min의 接合條件에서 接觸한 경우 이 微小한 反應層이 形成이 확인되고 있다. 그러나 接合時間을 120min, 180min, 240min로 증가시키는 경우 이 反應層의 증가는 뚜렷하게 확인되고 있지 않다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 고찰한 내용과 一部 一致하고 있다. 그러나 反應層과 接合強度와의 關係를 더욱 엄밀히 고찰하기 위해서는 活性金屬으로 첨가된 Ti의 嚴格한 制御와 더불어, 反應層生成 時點부터 反應完了時點까지의 反應層成長의 時間的인 變化에 대한 精密한 考察이 뒤따라야 할 것이라 判斷된다.

Fig. 7은 接合條件을 달리하여 Al₂O₃ 세라믹과 SNCM21鋼과를 接觸한 試驗片에 대한 接合界面에서의 微小硬度分布를 나타낸 것이다. 인서트합금에서의 硬度는 세라믹측 또는 鋼측에 가까워짐에 따라 급격히 增加되고 있는 現象을 보이고 있다. 이는 세라믹이나

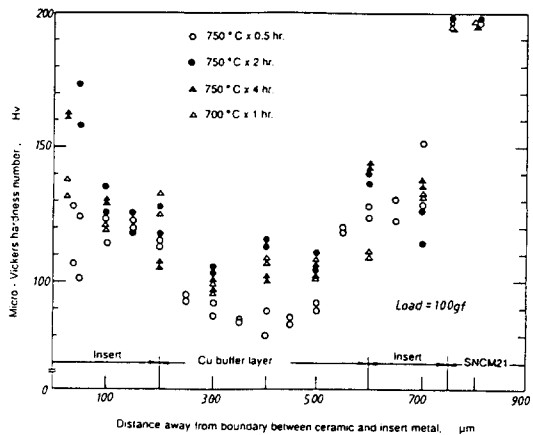


Fig. 7 Micro-Vickers hardness distributions of Al₂O₃/SNCM21 joint with the change of bonding parameters

鋼에 가까운 곳에서는 이들 재료와 인서트합금 사이에 원소의 相互擴散이 일어나 인서트합금 본래의 재질과의 다른 合金層이 形成되기 때문인 것으로 思料된다.

3.3. 接合部の 高温強度와 熱衝擊特性

세라믹이 갖는 優秀한 특성중 특히 耐熱성을 有效하게 活用하기 위해서는 接合體의 高温強度 評價와 熱衝擊特性의 檢討가 매우 重要한 意義를 갖는다.

Fig. 8은 挿入合金과 應力緩和層으로 Cu 두께 400

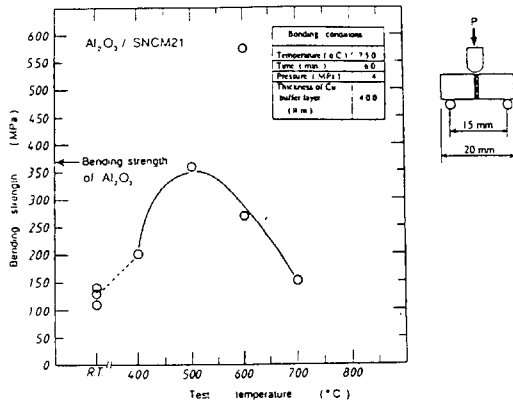


Fig. 8 High temperature bending strength of Al₂O₃/SNCM21 joint using Ag-Cu-Ti insert metal

μm를 사용하여 接合溫度 750°C, 接合時間 60min, 加壓力 4MPa의 接合條件에서 接合한 試驗片에 대해 高温 雰囲気에서 3점 굽힘시험한 결과이다.

이 결과에 의하면 상온에서의 굽힘強度는 100~150 MPa 정도로 나타내고 있으나, 試驗溫度의 增加에 따라 接合溫度는 상승하여 500°C의 試驗溫度에서 最大의 굽힘強度 360MPa 정도로 나타내었다. 그러나 그 이상의 試驗溫度에서 굽힘強度는 점차 低下하여 700°C의 試驗溫度에서는 상온에서의 試驗結果보다 약간 높은 굽힘 強度를 나타내었다.

본 實驗結果와 같이 어느 온도에서는 最大接合強度를 나타내는 拋物線形(Parabolic curve)의 溫度依存을 나타내는 이유로서는, 상온에서부터 實驗溫度가 증가하여 가면 殘留應力의 緩和效果가 커지기 때문에 接合強度가 높아지고 있으나, 더욱 試驗溫度가 上乘하면 接合體의 高温強度는 挿入合金과 應力緩和材 Cu의 高温 크리프 強度特性에 크게 지배되기 때문에 점차적으로 低下하여 가는 것으로 생각되며 이러한 實驗結果는 다른 연구자들의 實驗結果와도 잘 一致하고 있다^{18~20)}.

Fig. 9는 반복열사이클이 接合部 強度의 低下에 미

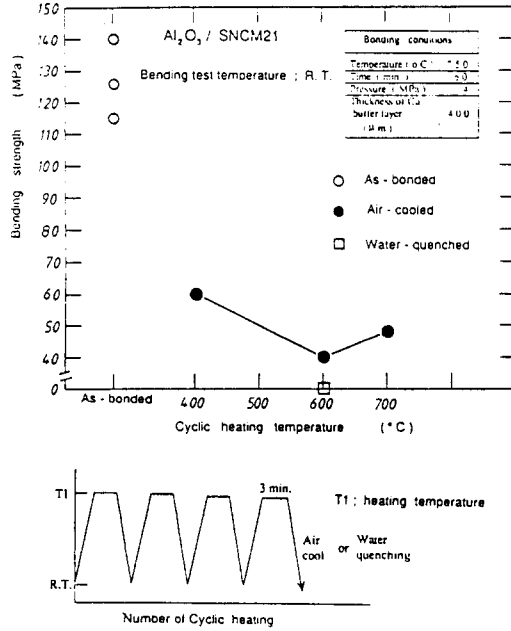


Fig. 9 Bending test result at room temperature of thermal shocked specimen of Al₂O₃/SNCM21 using Ag-Cu-Ti insert metal

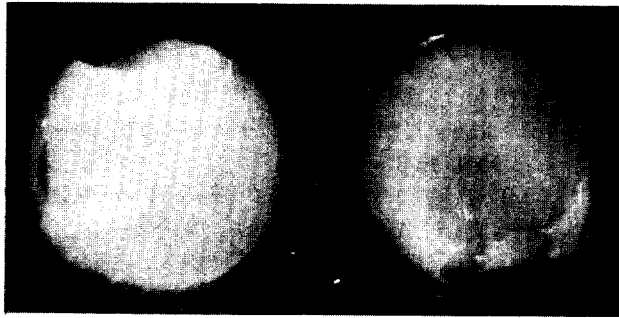
치는 영향을 定量的으로 파악하기 위하여 挿入合金을 이용하여 接合한 試驗片에 대해 熱衝擊特性을 試驗한 結果를 나타내고 있다.

試驗方法은 最適의 接合條件인 750°C, 60min, 4 MPa에서 Cu두께 400μm로 하여 接合한 試驗片을 각각 400, 600, 700°C로 加熱하여 空冷(air cooling)시키는 熱衝擊을 4회씩 가한 후 常溫에서 굽힘시험을 하거나, 600°C로 加熱한 후 水冷(water quenching)시키는 것에 의해 실시하였다.

이 試驗結果에 의하면 空冷의 熱衝擊을 받은 固相擴散接合試驗片의 굽힘強度는 60MPa 이하로 나타나 接合한 그대로(as-bonded) 試驗片의 強度 100~150 MPa에 비해서 훨씬 낮게 나타나고 있으며, 특히 600°C로 가열하여 水冷하였을 때는 1회의 熱衝擊에 의해 水冷時 곧 바로 세라믹층에서 破斷되었다.

3.4. 試驗片的 破面樣相과 接合強度

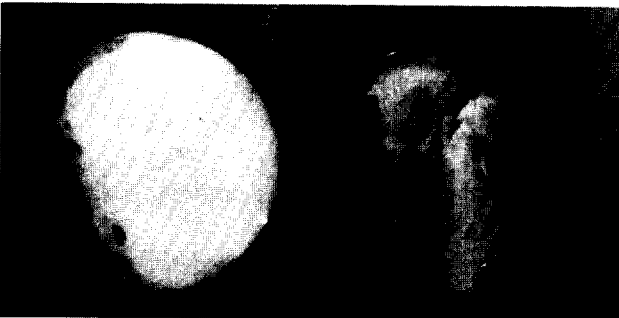
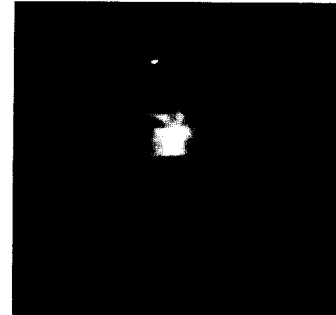
Photo.3은 固相擴散接合時 接合變數로서 作用하는 接合溫度, 接合時間, 接合時 加壓力등이 接合部 強度에 미치는 영향과 應力緩和材 Cu의 두께 變化에 따른



Type A



Type B



Type C



Type D



Photo. 3 Microscopic appearance of the shear fractured section

熱應力緩和의 效果를 시험한 接合試驗片에 대해 剪斷試驗後의 巨視的인 破面樣相을 4가지로 분류하여 代表的인 것을 나타낸 것이다. 본 試驗片의 破斷은 모두 세라믹층의 界面에서 발생하고 있는데 이것은 세라믹과 金屬의 熱膨脹係數에 기인한 熱應力이 界面을 통해 세라믹층에 引張殘留應力로 존재하기 때문에 이 영향에 의해 剪斷強度가 低下하는 것이라 생각된다.

Type A의 破斷樣相은 7.5~20MPa의 剪斷強度를 나타낸 部類로 세라믹층에 熱應力에 의한 cup and cone型的 큰 龜裂을 보이고 있다. 또한 Type B, C, D로 갈수록 破面形態는 점차 작고 緻密한 破面樣相을 보임으로서 剪斷強度 값을 나타내고 있으며 그 強度 값은 각각 Type B경우 30~50MPa, Type C의 경우 70~90MPa, 그리고 Type D의 경우는 110~130MPa 였다.

4. 結 論

Al₂O₃ 세라믹과의 Ni-Cr-Mo鋼과의 接합을 위해 Ag-Cu-Ti系의 인서트合金을 試驗製作하여 固相擴散接合을 한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 인서트合金을 이용한 세라믹과 金屬과의 固相擴散接合時 인서트合金 熔融溫度의 95% 정도의 加熱溫度에서 가장 양호한 接合強度를 얻을 수 있다.
- (2) 試驗製作한 인서트合金을 이용한 固相擴散接合部의 高溫強度는 試驗溫度 增加에 따라 拋物線型溫度依存을 나타내었으며 500°C 부근에서 最大 값을 보인다.
- (3) 熱衝擊을 받은 固相擴散接合部의 強度는 接합한 그대로의 그것에 비해 상당히 低下하였다. 특히 600°C로 加熱후 水冷한 조건에서는 水冷時 熱應力만에 의해 破斷하였다.

參 考 文 獻

- 1) 新居, 吉原 外 2人: 鐵鋼とセラミックスの固相接合技術開發, 鐵鋼界, 1985年 2月號, pp.28~29
- 2) 管沼 外 2人: セラミックスとの固相接合, セラミックス, Vol.18, No.2, pp.112~113, 1983
- 3) 鈴村, 恩澤: セラミックスと金屬の複合化の接合技術, 日本機械學會誌, Vol.89, No.811, pp.590~591, 1986
- 4) 管沼 外 2人: セラミックスとの固相擴散接合, 工業材料, Vol.31, No.9, pp.93~94
- 5) 中橋 外 1人: 金屬とセラミックスとの接合, 日本複合材料學會誌, Vol.12, No.5, pp.223~224, 1986.
- 6) 山田: 金屬とセラミックスとの接合, 金屬, Vol.57, No.11, pp.13~14, 1987
- 7) 溶接學會界面接合研究委員會編: 最近のろう接, 擴散接合技術, 溶接學會技術資料, Vol.12, pp.3~7, pp.85~91, 1989
- 8) 前掲書 3): pp.594~595
- 9) 白兼 外 2人: 日本金屬學會講演概要, p.200, 1985
- 10) 山田 外 4人: 日本金屬學會講演概要, p.125, 1986
- 11) 前掲書 5): p.226
- 12) 小林英男 外 3人: セラミックス/金屬接合強度の力學的評價, 日本機械學會論文集(A編), Vol.55, No.512, pp.752~753, 1989
- 13) 前掲書 6): pp.15~17
- 14) 前掲書 5): pp.33~37
- 15) 前掲書 7): pp.108~111
- 16) 김광환, 김영식, 최영국, 활성금속법에 의한 산화물계 세라믹과 금속과의 접합에 관한 연구(I), 대한용접학회 춘계학술발표대회 강연초록, pp.99~102, 1990
- 17) (社)日本溶接協會編: 新エネルギー産業技術成果報告書, セラミックス部材接合技術の試験・評價方法の研究, pp.88, 1990
- 18) 白兼 外 2人: 日本學術振興會, 耐熱金屬材料 第123委員會 研究報告, p.303, 1985
- 19) 山田 外 2人: 日本金屬學會講演概要, p.262, 1984
- 20) 前掲書 6): p.17
- 21) 최영국, 김영식, 김광환, 산화물계 세라믹과의 브레이징 접합에 관한 연구, 대한용접학회 추계학술발표대회 강연초록, pp.56~59, 1990
- 22) 中尾 外 4人: Si₃N₄と金屬接合繼手における殘留應力に關する檢討, 日本溶接學會論文集, Vol.7, No.2, pp.109~115, 1989