

PDP 격벽 재료의 인장 물성 측정 방법

Measurement Method for Tensile Properties of PDP's Barrier Rib Materials

오충석^{1,✉}, 배종성², 홍병규³

Chung-Seog Oh^{1,✉}, Jong-Sung Bae² and Byung-Gyu Hong³

1 금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Inst. of Tech.)

2 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 (Division of Nano-Mechanical Systems Research, Korea Inst. of Machinery and Materials)

3 LG 전자 (LG Electronics)

✉ Corresponding author: ocs@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7323

Manuscript received: 2008.12.29 / Revised: 2009.3.8 / Accepted: 2009.3.24

A reliable tensile test technique for PDP's barrier rib materials was introduced. A tensile specimen was prepared by punching out of green sheet, curing the specimen in a high temperature furnace, attaching sand paper tabs on each grip ends, and then attaching two strain gages for the strain monitoring and specimen alignment. Preliminary tensile tests were successfully done with the specimens made from ZnO-based lead-free green sheet. The specimens cured at 3 different maximum curing temperatures were tested to demonstrate the applicability of the test method. The Young's modulus was 88 ± 4 GPa regardless of the maximum curing temperature. The ultimate tensile strength was decreased with increasing the temperature. The tensile test method proposed in this study was proven to be reliable, useful and easy to estimate the bulk mechanical properties of barrier rib materials.

Key Words: Barrier Rib (격벽), Lead-free (무연), PDP (플라즈마 디스플레이 패널), Tensile Test (인장 시험), Ultimate Tensile Strength (인장 강도), Young's Modulus (영 계수)

1. 서론

50 인치 이상의 초대형 평판 디스플레이(huge flat panel display) 시장을 선도하고 있는 PDP (Plasma Display Panel)는 Fig. 1¹ 과 같이 형광체(phosphors; RGB)가 입혀진 작은 공간(격벽, barrier rib)을 제작하고, 진공으로 만든 다음 플라즈마 가스를 채워 넣어 제작되며, 격벽은 화소(pixel)와 화질(image quality)을 결정짓는 매우 중요한 구조물이다. 참고적으로 50 인치 PDP 제품에 사용되고 있는 실제 격벽 평면을 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰한 예를 Fig. 2 에 나타내었다. 좌우 피치(pitch) 800 μ m, 상하 피치 280 μ m 인 격벽들이 반복적으로 배열되어 있는 형태이다.

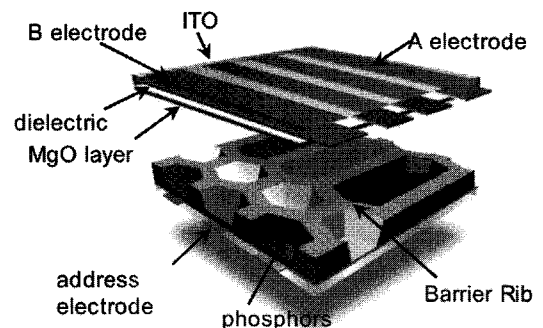


Fig. 1 Constituents of an AC PDP¹

격벽을 구성하는 기본 재료 (base material)는 크게 무연(lead-free)과 유연으로 대별할 수 있다. 그

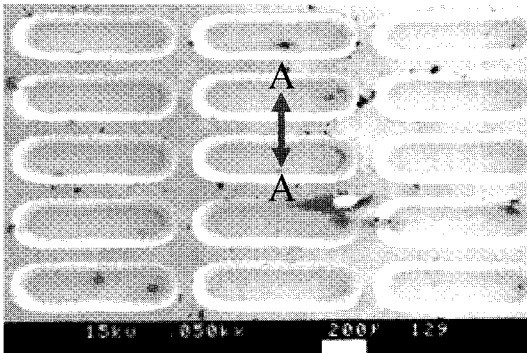


Fig. 2 Plane micrograph of a PDP's barrier rib

동안은 산화납(PbO) 기반의 유연 격벽이 우수한 기계적 특성으로 인해 널리 사용되어 왔으나, 점차 까다로워지고 있는 환경 규제에 의해 무연 재료로 바뀌고 있는 상황이다. 격벽이 받는 가장 큰 하중 중의 하나는 격벽 내에 형광체를 입힐 때 Fig. 3의 좌우 방향으로 인가되는 굽힘 하중이므로 무연 소재를 사용할 경우 기계적 물성 문제²가 선결되어야 한다. 무연 격벽 재료의 낮은 강도(strength)를 손쉽게 보완하기 위해 현재 사용하고

있는 방법은 Fig. 3과 같이 격벽의 단면적(Fig. 2의 A-A 단면)을 넓히는 것이다. 그러나 단면적을 넓히면 화소 크기가 커지게 되므로 근본적인 해결책이 필요하다. 이를 해결하기 위해 세라믹 충전재(ceramic fillers)의 첨가에 따른 물리적 특성 변화를 관찰³⁻⁵하거나 가공 기술을 발전 시키는 등^{6,7}의 연구가 진행되어 왔다.

현재 산업계에서는 격벽의 품질 검사(quality control) 목적으로 Fig. 4와 같이 강(steel)으로 제작된 게이지(height gage; 직경 12mm, 두께 10mm, 질량 10g)를 약 8mm 정도의 높이(predefined height)에서 5~20회 자유 낙하시켜 CCD 카메라를 이용하여 파손 여부를 검사하는 자유낙하실험(free drop test)을 사용하고 있다. 낙하 실험 전후 정상 제품과 불량 제품의 격벽 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 그러나 이 평가 방법의 경우 재료 물성에 대한 정량적인 평가가 어려운 문제가 있다.

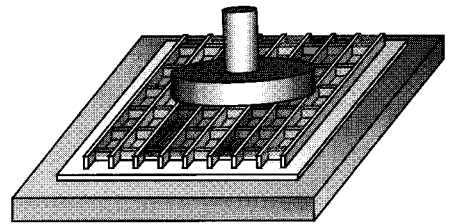


Fig. 4 Schematic of free drop test

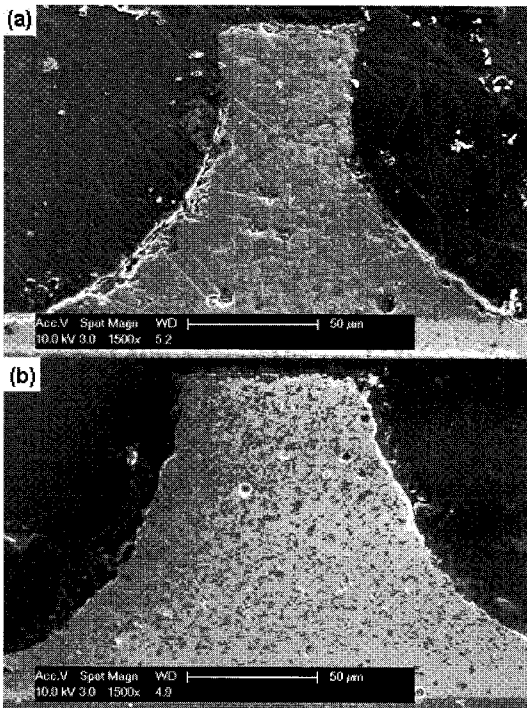


Fig. 3 Sectional micrographs of barrier ribs: (a) PbO base, (b) ZnO base

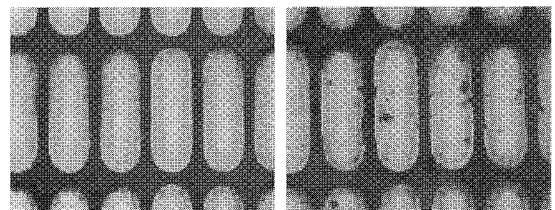


Fig. 5 Passed (left) and failed (right) ribs after drop test

학계에서는 정량적인 평가를 위해 주로 나노 압입 시험(nano indentation test)⁸을 활용하고 있다. 그 일례를 Fig. 6에 나타내었다. 이러한 나노 압입 시험은 실제 격벽의 강도를 간접적으로 평가하는 매우 효과적인 방법이지만 지나치게 국부적인 물성(local properties)만이 평가되어 격벽의 표면 거칠기(surface roughness), 기공(voids) 및 측정 위치에 따라 서로 다른 값이 측정되는 등의 단점이 있다.

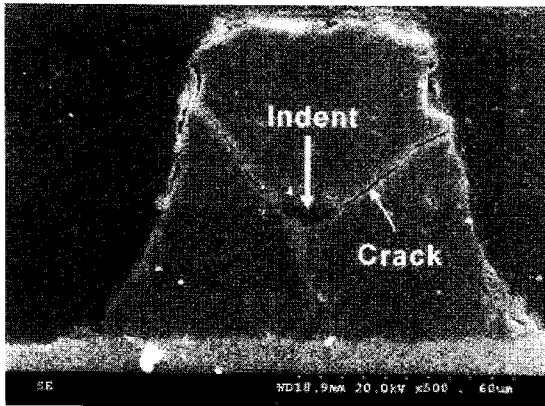


Fig. 6 Indent image and crack propagation after applying the nano-indentation load of 150 gf⁸

본 논문에서는 격벽 원 재료(green sheet; 이하 GS)로부터 인장 시험편을 제작하는 방법과 시험법을 개발하여 여러 가지 격벽 재료들에 대한 물성 평가를 용이하게 함으로써 실제 격벽 제작 시의 시행착오를 줄이는 데 연구 목적을 두고 있다. 개발된 시험법의 유용성을 확인해 보기 위하여 무연 격벽 재료 중의 하나인 산화아연(ZnO) 계열의 GS를 이용하여 최대 소성 온도(maximum curing temperature)에 따른 격벽 재료의 기계적 물성 변화를 관찰하였다. 마지막으로 기계적 물성 차이의 원인을 규명하기 위하여 전자현미경을 이용하여 미세 조직을 관찰하였다.

2. 시험 방법

2.1 시험편 제작

시험편 제작 공정은 실제 격벽 제작 공정과 가능한 한 같도록 하였다. 주 성분이 산화아연(ZnO), 산화붕소(B₂O₃) 및 알루미늄(Al₂O₃)인 0.2mm 두께의 GS를 시험편 형상으로 제작된 칼날(customized blade)로 Fig. 7 과 같은 과정을 거쳐 눌러 따낸다.

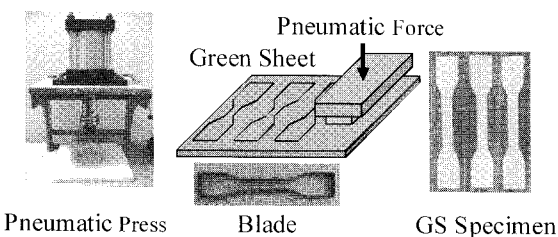


Fig. 7 Specimen preparation 1: GS specimen cutout

일반적으로 GS 는 크게 상층(upper layer)과 하층(lower layer)으로 구분되어 있다. 하층은 Fig. 3 의 아래 쪽에 해당되며, 유리에 잘 붙도록 되어 있다. 상층은 하층보다 식각(etching)에 대한 저항이 크도록 하여 식각 시 벽면의 경사각이 가능한 크게 되도록 설계되어 있다. 이를 위해서는 상층과 하층의 충전재 종류를 변경하거나 하층의 충전재 양을 줄이면 된다. 본 논문에서 사용한 GS 는 후자에 해당된다. 이와 같은 구조적인 이유로 인해 도려낸 GS 를 그대로 소성(curing)시키면 충전재의 양이 적은 하층 부의 변형이 커져 한 방향으로 지나치게 휘어 인장시험을 수행할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해 Fig. 8 과 같은 방법을 고안하였다. 먼저 도려낸 GS 를 이형제(mold release agents)를 도포한 유리판 위에 올려 놓고 시험편 그림 부위(grip ends) 위에 이형제를 입힌 2 장의 유리판(광학현미경용 슬라이드 글라스)을 올려 놓은 다음 소성시키는 방법을 취하였다.

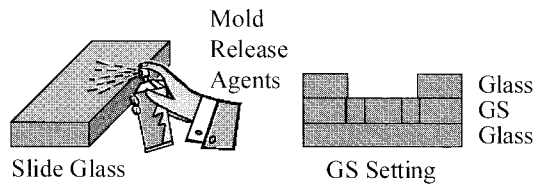


Fig. 8 Specimen preparation 2: GS setting in curing

소성 조건은 실제 격벽 제작 조건과 동일하게 하였다. 소성 시의 온도 궤적과 사용한 가열로(Model; Daehan WiseTherm FP-03, Korea)를 Fig. 9 에 나타내었다. 상온에서 420 °C 까지 9.5 °C/min 의 속도로 올리고 22 분간 유지한 뒤, 동일한 속도로 최

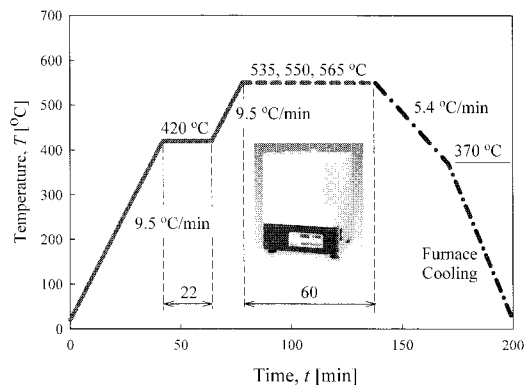


Fig. 9 Specimen preparation 3: Temperature profile

대 소성 온도까지 올린다. 소성 온도가 기계적 물성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 최대 온도는 535, 550 및 565 °C 의 세가지로 하였다. 최대 온도를 60 분간 유지(holding)시킨 후 5.4 °C/min 의 속도로 370 °C 까지 냉각시킨 다음 상온까지는 노냉(furnace cooling)시킨다.

소성 전후 GS 시험편의 치수 변화를 도면화 하여 Fig. 10 에 나타내었다. 시험부(test section)의 평행부 길이는 17%, 폭은 15%, 두께는 10% 감소하였다.

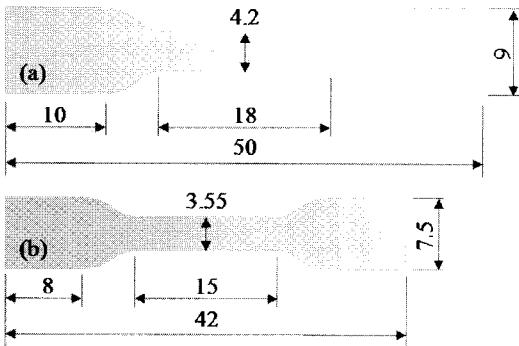


Fig. 10 Dimensional changes before (a) and after (b) curing [Units: mm]

소성 과정에서의 밀도 변화를 관찰하기 위하여 열처리 과정에서 생긴 시험편의 질량 및 체적 변화를 측정 한 뒤 Table 1 에 정리하였다. 표에서 볼 수 있듯이 질량 변화는 18%인 반면 부피는 37%만큼 변화되었다. 이로부터 밀도가 30% 가량 높아졌음을 알 수 있다. 열처리 과정에서 상대적으로 녹는점과 밀도가 낮은 유기물(organic compounds) 결합제(binder)가 제거되면서 무기물(inorganic compounds)의 치밀화(compaction)가 이루어진 것으로 생각된다.

Table 1 Physical properties change due to curing

	Before Curing	After Curing
Mass, m [g]	0.16	0.13
Thickness, h [mm]	0.20	0.18
Area, A [mm ²]	334	236
Volume, V [mm ³]	68	43
Density, ρ [g/cm ³]	2.3	3.0

위와 같은 과정을 거쳐 소성된 시험편은 세라믹 상태로 되기 때문에 취성(brittleness)이 매우 커져 시험편을 그림으로 고정하는 도중 또는 시험시 그림 부위에서 파손이 많이 발생되었다. 이를 해결하기 위하여 복합재료의 인장 시험⁹에서와 같이 Fig. 11 처럼 모든 시험편의 그림 부위에 보강대(reinforcing tab; sand paper)를 부착하였다.

마지막으로 시험편 축 정렬과 탄성계수 측정에 사용할 모든 시험편 양면에 단축 변형률게이지(uniaxial strain gage) 2 개를 부착하였다. 변형률게이지를 시험편 중앙에 부착하면 파손이 중앙에서 일어나지 않기 때문에 보다 정확한 인장강도 측정을 위하여 그림과 같이 편심시켜 부착하였다. 인장강도 또한 정렬 상태에 영향을 많이 받지만 다수의 인장강도 데이터를 확보하기 위하여 인장강도 측정에만 사용된 시험편의 경우에는 게이지를 부착하지 않았다.

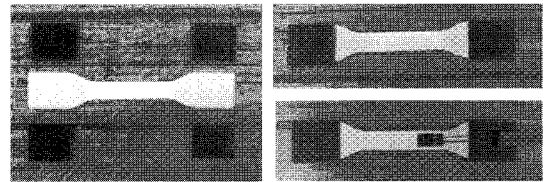


Fig. 11 Specimen preparation 4: Sand paper tap and strain gage attachment

2.2 시험기

인장시험을 위해 ±250N, ±50mm 용량의 전동형(electrodynamic) 시험기(Model; MTS Tytron 250, USA)를 사용하였다. 시험편과 시험기의 정렬(alignment)을 용이하게 수행하기 위해 고정단에 2 축 이송대(2-axis translational stages)를 부착하여 사용하였다. 시험 장면을 Fig. 12 에 나타내었다.

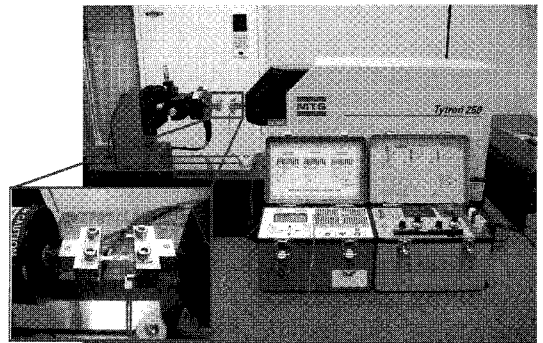


Fig. 12 An electrodynamic tensile testing system

2.3 축 정렬 및 시험편

시험편을 그립(mechanical clamping grip)에 설치한 후 인장강도의 10% 이내에서 하중을 반복적으로 인가하며 시험편 양 면에 부착한 변형률 게이지를 이용하여 변형률을 측정한다. 양 면의 변형률이 차이가 나면 이송대를 이용하여 정렬함으로써 변형률의 차이가 최소가 되도록 조정한다. 변형률의 차이가 최소가 된 상태에서 인장시험을 수행한다. 시험 속도, 데이터 처리 등은 기본적으로 세라믹 시험에 관한 표준 규격¹⁰을 따라 수행하였다.

3. 시험 결과 및 토론

3.1 변형률 검사

시험편 소성 과정에서 휨이 생기지 않도록 제작하였으나 약간의 휨을 피할 수 없었다. 이 경우 시험편 양면의 변형률 값이 크게 달라 어느 한 면의 값만을 사용할 경우 정확한 물성 값, 특히 탄성계수를 얻을 수 없다. 이를 보완하기 위해 양면에 부착한 변형률 게이지 신호를 독립적으로 얻은 뒤 평균 값을 취함으로써 굽힘 성분을 제거하였다. 그 예를 Fig. 13에 나타내었다.

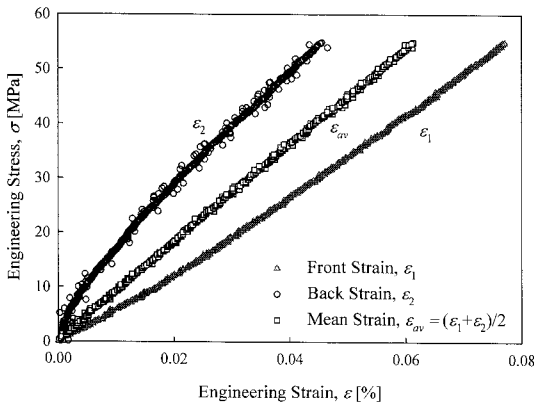


Fig. 13 Stress-strain curves from each strain gages attached on the front and back sides

그림에서 볼 수 있듯이 양 면의 변형률 값이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 굽힘 성분을 평균 값으로 나눠 백분율로 환산할 경우 초기에는 약 70% 정도의 굽힘 성분이 존재하다가 파단 직전에는 약 25% 정도로 감소된다. 아무리 편평하게 시험편을 제작하였다 하더라도 실제 시험 시

상당한 굽힘 성분을 피할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 탄성계수를 구하기 위한 모든 시험편에 두 장의 변형률 게이지를 부착하여 얻은 평균 변형률을 이용하여 응력-변형률 곡선을 얻었다.

3.2 최대 소성 온도 변화에 따른 물성 변화

최대 온도 535, 550, 565 °C에서 소성된 시험편을 대상으로 각각 4 회씩 인장 시험을 수행한 결과를 Fig. 14~16에 나타내었다. 모든 시험편들이 별다른 항복 없이 매우 취성적으로 파단되고 있음을 알 수 있다. 파단 연신률(elongation at fracture)은 0.1% 미만의 값을 보이고 있다. 또한 양 면의 평균 변형률을 이용하여 응력-변형률 곡선을 얻을 경우 반복성 있는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

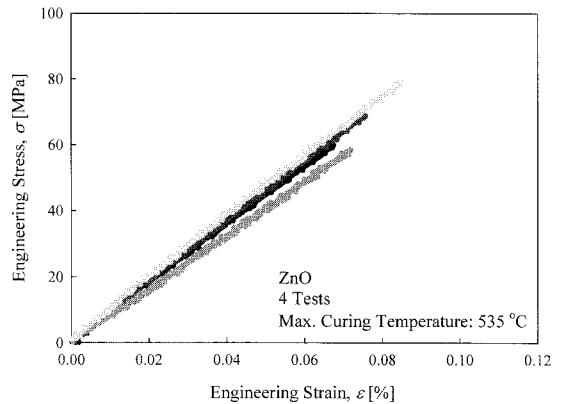


Fig. 14 Stress-strain curves ($T_{max} = 535 \text{ }^\circ\text{C}$)

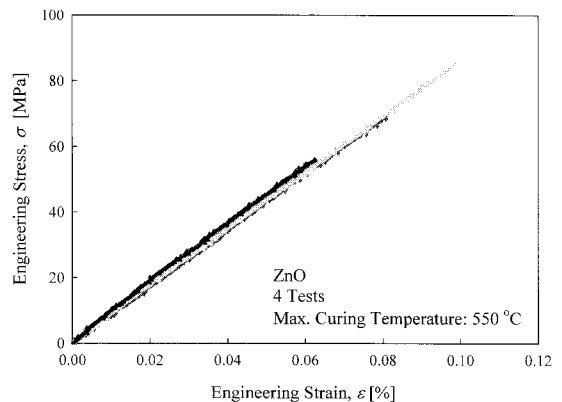


Fig. 15 Stress-strain curves ($T_{max} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$)

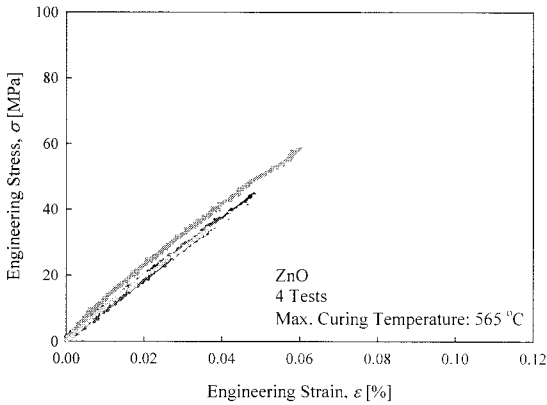


Fig. 16 Stress-strain curves ($T_{max} = 565\text{ }^{\circ}\text{C}$)

응력-변형률 곡선으로부터 탄성계수 값을 계산하여 Fig. 17 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄성계수의 경우 최대 소성 온도에 무관하게 평균적으로 88GPa 의 값을 나타내었다. 또한 표준 편차는 4GPa 정도이며 이는 주로 실험 오차에 기인한 것이다. 이 값은 MgO 기반의 격벽에 대해 나노 압입 시험⁸으로 측정된 탄성계수 범위(55~90 GPa)와 유사한 값을 보이고 있다.

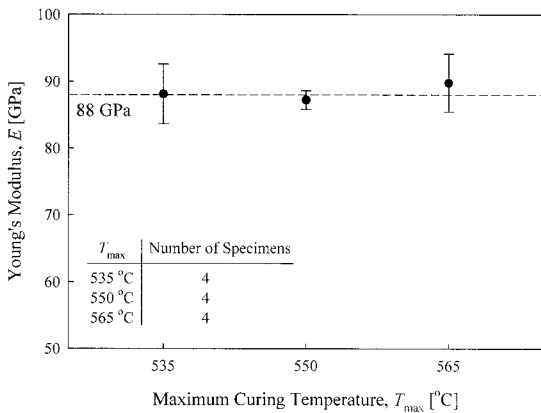


Fig. 17 Young's modulus variation with curing temperature

탄성계수 측정을 겸한 4 회씩의 인장 시험 후 다량의 인장강도 데이터를 확보하기 위하여 추가 시험을 수행하였다. 인장강도는 Fig. 18 에서 볼 수 있듯이 소성 온도 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

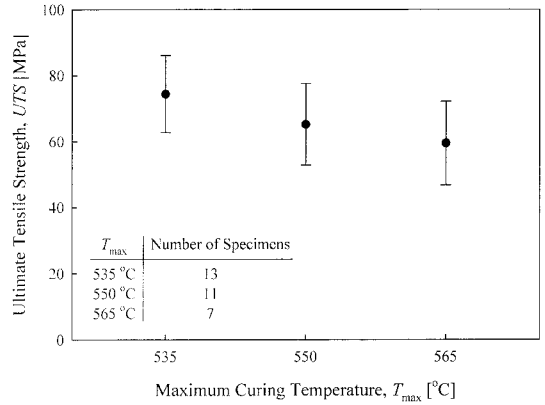
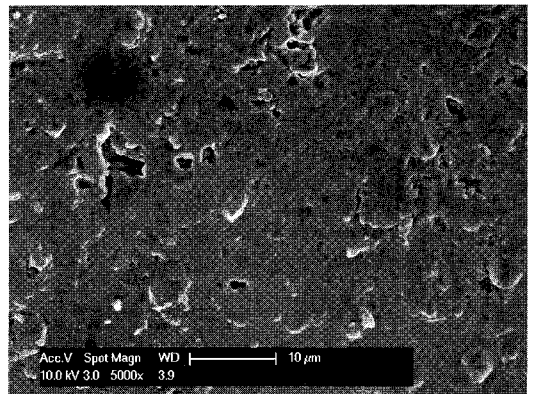


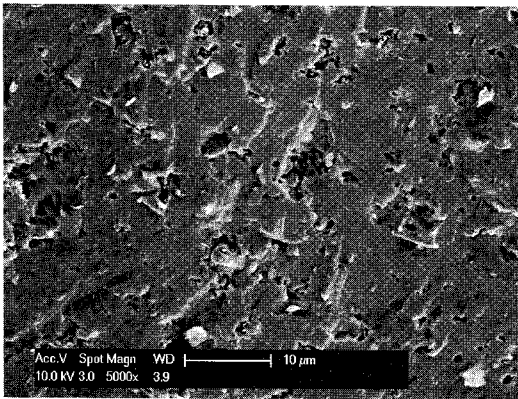
Fig. 18 Tensile strength variation with curing temperature

최대 소성 온도에 따른 인장 강도 감소 원인을 파악해 보기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 시험편 단면에 대한 미세 구조(microstructure)를 관찰하였다. 그 예를 Fig. 19 에 나타내었다. 소성 온도 증가에 따라 기공(void)의 수가 증가하여 조직이 거칠어 지는 것으로 보이며, 이 것이 인장 강도를 감소시키는 주요 원인인 것으로 생각된다.

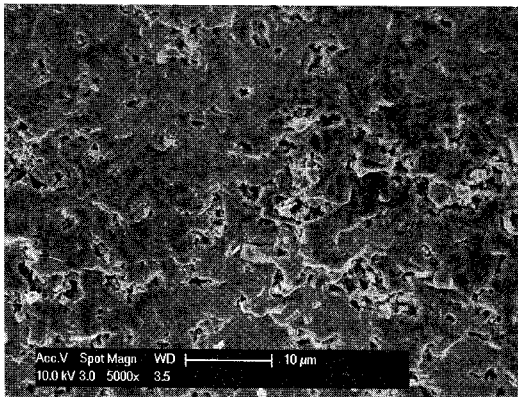
격벽 시험편의 굽힘을 방지하기 위하여 채택한 2.1 절의 시험편 제작 방법은 소성 시에 시험편을 구속함으로써 실제 격벽과 상이한 미세구조가 형성될 수 있고 잔류 응력(residual stress)을 야기시키는 등의 문제점을 안고 있다. 일반적으로 탄성계수는 잔류응력의 영향을 거의 받지 않기 때문에 본 연구를 통해 얻은 88 ± 4 GPa 의 값은 신뢰할 수 있다고 생각되지만 인장강도는 잔류응력이나 미세구조에 매우 민감하기 때문에 이에 대해서는 추후 보완 연구가 이루어져야 할 것이다.



(a) $T_{max} = 535\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{max} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T_{max} = 565\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 19 SEM micrographs of specimens cured at 3 different maximum curing temperatures ($\times 5,000$)

4. 결론

PDP 격벽의 거시적 물성 값인 탄성계수와 인장 강도를 신뢰성 있게 평가할 수 있는 인장 시험편 제작법과 인장 시험법을 확립하였다. 개발된 시험법의 활용성을 검토해 보기 위하여 최대 소성 온도에 따른 무연 격벽 재료의 인장 물성 값을 측정 한 결과 탄성계수는 최대 소성 온도에 관계없이 $88\pm 4\text{GPa}$ 정도로 측정되었고, 인장강도는 소성 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이러한 인장강도 감소는 최대 소성 온도 증가에 따른 기공 증가에 의한 것임을 미세 조직 관찰을 통해 간접적으로 알 수 있었다.

개발된 시험법은 무연 격벽과 유연 격벽의 강도 차이, 격벽 소성 조건에 따른 강도 변화, 첨가물 종류 및 비율에 따른 강도 변화 등의 비교 평

가에 널리 활용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임. 시험편 제작과 시험기 사용에 협조해 주신 LG 전자와 한국기계연구원 나노역학팀 관계자 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 2007 PDP Technology Report, "Display Search," The NPD Group Company, Cover Page, 2007.
2. Boeuf, J. P., "Plasma Display Panels: Physics, Recent Developments and Key Issues," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 36, No. 6, pp. R53-R79, 2003.
3. Kim, S. G., Shin, H. H., Park, J. S., Kim, H. S. and Hong, G. S., "Effect of Ceramic Filler Additions on the Micro-structure and Physical Properties of BaO-ZnO-B2O3 Glass Composites for PDP Barrier Ribs," Spring Conference of the Korean Ceramic Society, D-10, 2004.
4. Shin, H. H., Kim, S. G., Park, J. S., An, J. S., Hong, K. S. and Kim, H. S., "Co-Additions of TiO2 and SiO2 Crystalline Fillers to Tailor the Properties of BaO-ZnO-B2O3-SiO2 Glass for Application to Barrier Ribs of Plasma Display Panels," J. American Ceramic Society," Vol. 89, No. 10, pp. 3258-3261, 2006.
5. Kim, S. G., Park, J. S. and An, J. S., "Effects of the Addition of Different Types of Fillers on the Properties of BaO-ZnO-B2O3-SiO2 Glass Composites for Application to Barrier Ribs of Plasma Display Panels," J. American Ceramic Society," Vol. 89, No. 3, pp. 902-907, 2006.
6. Son, J.-H., Im, Y.-K., Jung, Y.-D., Jeong, S.-I. and Jeong, H.-D., "A Study on Plasma Display Panel Barrier Rib Fabrication by Mold and Electromagnetic Wave," J. of KSPE, Vol. 19, No. 6, pp. 176-183, 2002.
7. Cho, I. H., Jeong, S. C., Jeong, H. D. and Son J. H., "A Study on Mold Fabrication and Forming for PDP Barrier Ribs," J. KSPE, Vol. 18, No. 5, pp. 171-176, 2001.
8. Jung, B. H. and Kim, H. S., "Evaluation of Mechanical Properties of Barrier Ribs for Plasma Display Panel using Nano Indenter Technology,"

Korean J. Mater. Research, Vol. 13, No. 1, pp. 53-58, 2003.

9. KS M ISO “Fiber-reinforced Plastic Composites - Determination of the In-plane Shear Stress/Shear Strain Response, including the In-plane Shear Modulus and Strength, by the $\pm 45^\circ$ Tension Test Method,” KS M ISO 14129, 2006.
10. KS L “Fine Ceramics(Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) - Test Method for Tensile Strength of Monolithic Ceramics at Room and Elevated Temperature,” KS L 1599, 2001.