

마이크로파 발열된 V_2O_5 -PbO- TeO_2 계 유리의 특성에 관한 연구

이상은 · 김병우 · 박성수* · 박희찬†

부산대학교 무기재료공학과

*부경대학교 화학공학부 고분자공학과

(2001년 2월 7일 접수; 2001년 4월 19일 승인)

The Study for the Characteristics of Microwave Coupled V_2O_5 -PbO- TeO_2 Glass System

Sang-Eun Lee, Byung-Woo Kim, Seong-Soo Park* and Hee-Chan Park†

Dept. of Inorganic Materials Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

*Dept. of Polymer Engineering, Div. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

(Received February 7, 2001; Accepted April 19, 2001)

초 록

600 W의 마이크로파 출력하에서 PbO, V_2O_5 , TeO_2 및 V_2O_5 -PbO- TeO_2 성분들의 마이크로파 발열 특성을 조사하였다. V_2O_5 성분의 높은 마이크로파 흡수능에 기인하여 V_2O_5 -PbO- TeO_2 유리상 시편들은 마이크로파를 흡수하여 주어진 온도까지 직접 가열되었다. XRD, OM, SEM 및 고전압 발생 측정기를 통하여 재래식 열 및 마이크로파 공정에서 열처리된 시편들의 결정화 및 전기 전도도의 특성을 비교 조사하였다. PbV_2O_6 및 $Pb_4V_2O_9$ 결정상들이 마이크로파 열처리된 시편에서는 존재하였다. 그러나, 재래식 열처리된 시편들에서는 존재하지 않는다는 것을 확인하였고, 재래식 열처리된 시편들에 비하여 마이크로파 열처리된 시편들의 전기 전도도 값이 상대적으로 높았다.

ABSTRACT

The characteristics of microwave direct coupling in the PbO, V_2O_5 , TeO_2 , and V_2O_5 -PbO- TeO_2 compounds were investigated at microwave input power of 600 W. It was found that V_2O_5 -PbO- TeO_2 glass samples were directly coupled with microwaves, then heated up to the given temperature due to high microwave coupling of V_2O_5 compound. The behaviors of crystallization and electrical conductivity in the samples heat-treated under conventional thermal and microwave processing were compared by the means of XRD, OM, SEM, and high voltage measure. It was found that the crystalline phases of PbV_2O_6 and $Pb_4V_2O_9$ were existed in the microwave heat-treated samples, but not existed in the conventional one. The electrical conductivity of microwave heat-treated samples was relatively higher than that of conventional one.

Key words : Microwave, Direct heating, Coupling, V_2O_5 -PbO- TeO_2 glass, Crystallization, Conductivity

1. 서 론

1950년대에 전이 금속 이온을 함유한 산화물 유리 재료들이 그들의 높은 전자 전도성에 의해 반도체 성질을 가진다고 발표된 후, 최근까지 전극, 고체 전해질, 센서 등의 재료로 활용하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 오고 있다.¹⁻⁴⁾ 1960년대 초반 Mott 등이 이들 산화물 유리 재료들의 전기 전도 기구를 small polaron hopping 모델로서 설명함에 따라 연구 개발에 필요한 이론적인 배경을 제시하였다.⁵⁾ 최근, 이들 재료들 중에서 바나듐을 함유하는 V_2O_5 -CuO, V_2O_5 - TeO_2 등 이성분계 및 V_2O_5 - Bi_2O_3 - Fe_2O_3 , V_2O_5 - Bi_2

O_3 - TeO_2 , V_2O_5 -SrO- Bi_2O_3 , V_2O_5 - Sb_2O_3 - TeO_2 등 삼성분계에 대한 연구들을 활발히 진행하고 있으며, 이들 재료들의 높은 전기 전도성은 small polaron hopping 기구에 의해 전자들이 V-O-V 사슬들을 따라 이동함에 따라 형성된다고 설명하고 있다.⁶⁻¹⁰⁾ 또한, 이들 재료들에 높은 압력을 가하면 V-O-V 사슬의 공간을 변화시켜서 전기 전도도 값이 증가하고, 이들 재료들을 결정화시키면 전도성 결정들의 생성에 의해 전기 전도도 값이 증가된다고 보고되고 있다.⁶⁾

마이크로파는 재료의 내부로 침투하여 재료의 내부를 동일하게 가열시키는 특성이 있으므로 기존의 재래식 열 공정과 비교하여 부피 가열, 급속 가열, 선택적 가열, 무진 환경 등의 특성을 제공한다. 따라서, 기존의 재료 공정에 마이크로파 공정을 도입하기 위하여 재료의 건조, 재료의 합성 및

†Corresponding author : hcpark2@hyowon.pusan.ac.kr

추출, 재료의 접합, 재료의 고온 가열, 폐기물의 처리, 마이크로파 공정의 모델링 등의 분야에 연구들이 활발히 진행되고 있다.^{11,12)} 결정화 유리를 재래식 열 공정에서 제조할 때, 짧은 시간에 유리를 결정화시키기 위하여 결정화를 촉진시키는 산화물을 첨가시킨다. 그렇지만, 산화물의 다량 첨가는 원하지 않는 물성을 제공할 가능성이 높다.¹³⁾ 따라서, 산화물의 미첨가 또는 미량 첨가하여 유리의 결정화를 촉진시키는 방법으로 마이크로파 공정의 도입이 제시된다. 왜냐하면, 재래식 열처리된 시편에 비하여 마이크로파 열처리된 시편에서 균일한 크기의 결정들이 빠르게 형성되었다고 보고된 바 있기 때문이다.^{14,15)} 짧은 열처리 시간의 조건에서 재래식 열 공정에서는 시편내에 온도 구배가 형성되어 불균일한 미세구조가 발달되고, 부분적인 잔류 응력에 의해 미세 균열이 발생될 수 있지만, 마이크로파 공정에서는 마이크로파의 특성에 의해 상기의 문제점들이 해결될 수 있다. 또한, 마이크로파 공정에서 결정화 유리를 제조할 때, 시편들이 상온에서 마이크로파를 흡수하지 않기 때문에 SiC, ZrO₂, Fe₂O₃ 등과 같은 마이크로파 발열 특성이 우수한 마이크로파 흡수체를 사용하여 시편을 간접 가열시키는 방법으로 유리를 결정화시키고 있는 실정이다.¹⁶⁾

따라서, 본 연구에서는 n형 반도체 특성을 가진 삼성분계 산화물인 V₂O₅-PbO-TeO₂계 유리상 시편들을 제조하고, 재래식 열 공정 및 마이크로파 공정을 도입하여 유리상 시편들을 여러 조건에서 열처리하여 결정화시킨 후, 결정화된 시편들의 결정화 특성 및 전기적 특성을 상호 비교하고자 하였다. 또한, 시편들의 각 성분들의 마이크로파 발열 특성을 측정하여 마이크로파의 직접 발열에 의한 시편들의 결정화 가능성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시료 및 시편 제조

순도가 99.99 wt% 이상인 시약급 V₂O₅ 분말(Junsei Chemical Co.), PbO 분말(Junsei Chemical Co.) 및 TeO₂ 분말(Wako Pure Chemical Co.)을 출발 물질로 사용하였고, 제작된 시편들의 몰 조성비는 Table 1과 같이 선택하였다. Fig. 1에 주어진 공정 흐름도와 같이 V₂O₅, PbO 및 TeO₂를 주어진 몰 조성비에 따라 칭량한 후, 폴리프로필렌 병에 투입하여 불빛에서 약 24h 동안 건식 혼합하였다. 약 15g 정도의 건식 혼합물을 알루미늄 도가니에 담아 전기로(SEF-

Table 1. Chemical Composition of V₂O₅-PbO-TeO₂ Glass

Constituents	Nominal composition (mol%)		
	70	65	60
V ₂ O ₅	70	65	60
PbO	10	10	10
TeO ₂	20	25	30

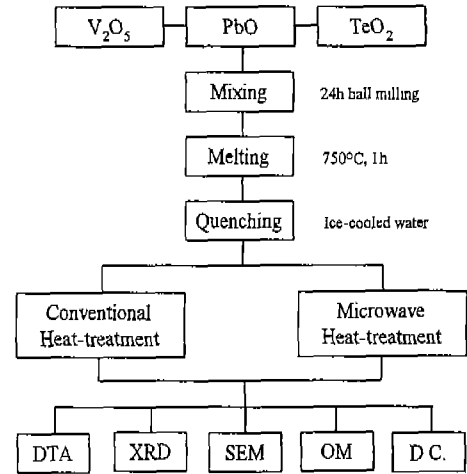


Fig. 1. Flow chart for the preparation of sample.

101, Shin Saeng Co.)에서 10°C/min의 승온 속도로 약 750°C에서 약 1h 동안 용융시킨 후, 이 용융물을 수중 급냉시켜서 유리상 프리트를 얻었다. 건조된 프리트를 알루미늄 유발에서 미분쇄한 후, 325 mesh 체에 통과시켜서 45 μm 이하의 분말만을 시료로 취하였다. 이 시료를 원통형 몰드에서 10 MPa 압력으로 일축 성형하여 직경이 12 mm이고 두께가 3 mm 정도인 펠렛을 제작하였다. 세 종류의 몰 조성비를 가진 펠렛들을 재래식 및 마이크로파 열원으로 주어진 열처리 조건에서 열처리하였다.

2.2. 열원

재래식 공정에서 재래식 가열 장치로서 일반 전기로(SEF-101, Shin Saeng Co.)를 사용하였다. 마이크로파 공정에서 마이크로파 가열 장치로서 주파수 2.45 GHz, 출력 600 W인 가정용 전자레인지(MR-S503, LG Electronic Co.)를 Fig. 2와 같이 개조하여 사용하였다. 마이크로파 가열 장치에서 마이크로파 용기내의 마이크로파장이 균일하기 위하여 mode-stirrer를 설치하였다. 스테인레스 스틸로 밀봉된 약 3 mm 직경의 K형 열전대를 반응실내로 삽입하여 시편들의 표면에 1 mm 이내로 근접시켜서 시편들의 온도를 측정하였다.

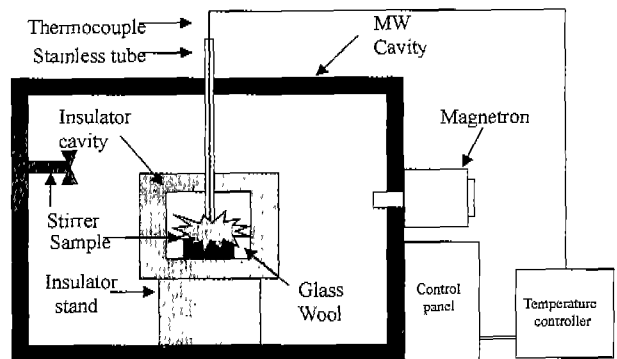


Fig. 2. Schematic diagram of microwave heating system.

전자레인지의 전자 회로판에 온도제어기(DX-9, Han Young Co.)를 연결하여 열전대로 시편들의 온도를 측정하여 on-off 방식으로 제어하여 주어진 온도에서 시편들이 열처리되도록 하였다. 마이크로파 용기내의 반응실(100×100×50 mm)은 알루미늄 세라믹 보드(HTZ Cerakwool, Keum Kang Co.)로 제작하였고, 반응실의 크기에 비하여 가열되는 시편들이 작기 때문에 시편들 주위의 빈 공간을 유리 섬유로 충진하였다.

2.3. 기기 분석

시차 열 분석기(DTA; SSC-5200, Seiko Instruments Inc.)를 사용하여 5°C/min의 승온 속도로 시료들의 열분석을 행하였다. 시편들의 유리상 및 결정상의 확인은 니켈 필터가 부착된 $\text{CuK}\alpha$ 선을 이용하여 35 kV, 25 mA 및 $2\theta=10\sim 80^\circ$ 의 측정 조건에서 X-ray diffractometry(XRD; D/MAX, Rigaku Co.)를 사용하여 측정하였다. 시편들의 결정 크기 및 결정 성장 거동은 시편들의 표면을 미세 연마하여 10% HF 용액으로 약 1 min 동안 화학적 에칭을 행한 후, 광학 현미경(OM; PMG3-613U, Olympus Co.) 및 주사형 전자 현미경(SEM; JSM-5400, JEOL Co.)을 사용하여 관찰하였다. 시편들의 전기 전도도는 시편의 양쪽 면을 실버 페이스트로 상온에서 스크린 인쇄하여 약 150°C에서 약 1 h 동안 건조시켜서 고전압 발생 측정기(Keithley-237, Keithley Ltd.)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유리 형성 영역

V_2O_5 -PbO- TeO_2 계에서는 $0 < \text{V}_2\text{O}_5 < 80 \text{ mol}\%$, $10 < \text{PbO} < 50 \text{ mol}\%$, $10 < \text{TeO}_2 < 100 \text{ mol}\%$ 의 몰 조성 영역에서 유리 상이 형성되고, $40 < \text{V}_2\text{O}_5 < 80 \text{ mol}\%$, $10 < \text{PbO} < 30 \text{ mol}\%$, $10 < \text{TeO}_2 < 50 \text{ mol}\%$ 의 몰 조성 영역에서 높은 전도도 값을 나타낸다고 Sakata가 보고하였다.¹⁾ 따라서, 본 실험에서는 높은 전기 전도도 값을 가지며 유리 상을 가진 시편들을 제조하기 위하여 Table 1에 주어진 세 종류의 몰 조성비를 선택하였고, XRD 분석 결과 시편들은 모두 유리상이었다.

세 종류 시편들의 결정화 열처리 온도를 선택하기 위하여 DTA 분석을 행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 주어진 Fig. 3을 살펴보면, 시편들의 유리 전이 온도는 약 200~215°C 정도이었고, 결정화 피크의 온도 범위는 약 245~290°C 정도이었고, 최대 결정화 피크의 온도는 약 260~262°C 정도이었다. 따라서, 시편들의 열처리 온도를 250, 270, 290 및 310°C로 선택하였다.

3.2. 발열 특성

중량이 약 5 g 정도이며 V_2O_5 , PbO 및 TeO_2 단독 조성

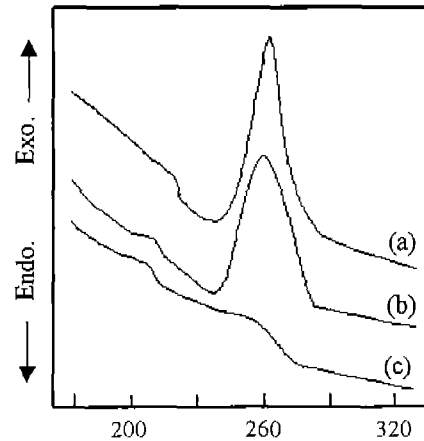


Fig. 3. DTA curves of (a) $70\text{V}_2\text{O}_5$ -10PbO-20 TeO_2 , (b) $70\text{V}_2\text{O}_5$ -10PbO-20 TeO_2 and (c) $70\text{V}_2\text{O}_5$ -10PbO-20 TeO_2 glass samples.

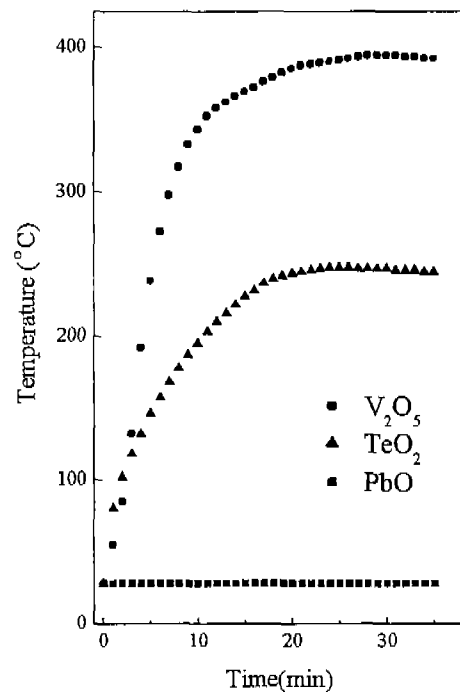


Fig. 4. Microwave heating curves of V_2O_5 , PbO, and TeO_2 sample at microwave input power of 600 W.

을 가진 펠렛 시편들을 마이크로파 가열 장치에서 600 W의 마이크로파 출력으로 가열시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 주어진 그림을 살펴보면, PbO 시편은 마이크로파를 전혀 흡수하지 않고, TeO_2 시편은 상대적으로 마이크로파를 적게 흡수하여 가열되지만, V_2O_5 시편은 마이크로파를 잘 흡수하여 약 400°C까지 잘 가열됨을 알 수 있다. 이는 2.45 GHz에서 손실 정점 값이 V_2O_5 , TeO_2 , PbO 성분의 순서대로 작다는 것을 의미한다. 또한, 고효율의 마이크로파를 공급시키면, 상기의 시편들을 짧은 시간에 더욱 높은 온도로

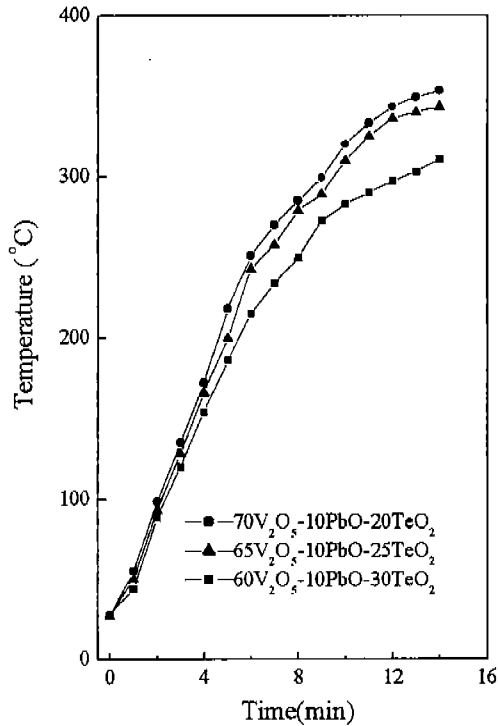


Fig. 5. Microwave heating curves of V₂O₅-PbO-TeO₂ samples at microwave input power of 600 W.

가열할 수 있다.

한편, 중량이 약 5 g 정도이고 Table 1에 주어진 혼합 조성을 가진 세 종류의 펠렛 시편들(약 5 g)을 600 W의 마이크로파 출력에서 각각 가열시킨 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 주어진 그림을 살펴보면, 세 종류의 시편들 모두가 열처리 온도보다 높은 320~360°C까지 잘 가열되는 것을 알 수 있고, V₂O₅ 함량이 많은 시편일수록 빨리 가열되는 것을 알 수 있고, 이 결과는 Fig. 4에서 설명된 V₂O₅ 성분이 마이크로파를 매우 잘 흡수한다는 결과와 일치한다. 따라서, 상온에서 마이크로파 흡수체를 사용하지 않고 V₂O₅-PbO-TeO₂계 유리상 시편들을 250~310°C의 온도 영역에서 마이크로파 결정화시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.3. 결정화 특성

Table 1의 몰 조성비를 가진 시편들을 재래식 및 마이크로파 가열 장치에서 250~310°C의 온도 범위에서 약 1 h 동안 열처리시킨 후, 이들 시편들의 XRD 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 주어진 그림을 살펴보면, 열처리 온도가 증가할수록 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 결정상 피크가 증가함을 알 수 있고, 동일한 열처리 온도에서는 재래식 시편에 비하여 마이크로파 열처리 시편에서 결정화가 많이 일어났음을 확인할 수 있다. 재래식 열처리된 시편들에서는 V₂O₅의 함량이 증가할수록 Pb₂V₂O₇ 결정상의 피크가 증가하였다. 한편, 마이크로파 열처리된 시편들에서는

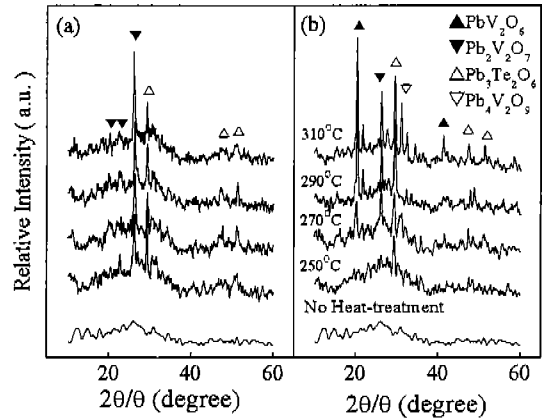


Fig. 6-1. XRD patterns of the 70V₂O₅-PbO-20TeO₂ (mol%) glass samples (a) conventionally and (b) microwave heat-treated at various temperature for 1 h.

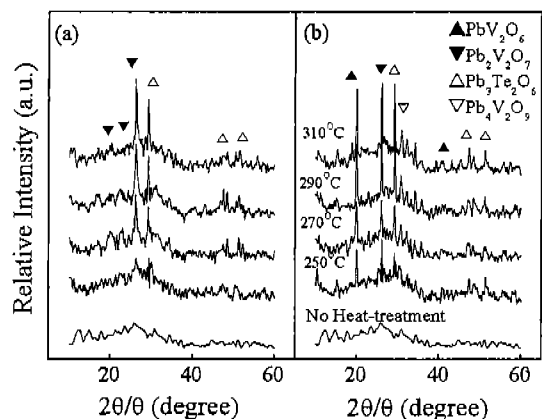


Fig. 6-2. XRD patterns of the 65V₂O₅-10PbO-25TeO₂ (mol%) glass samples (a) conventionally and (b) microwave heat-treated at various temperature for 1 h.

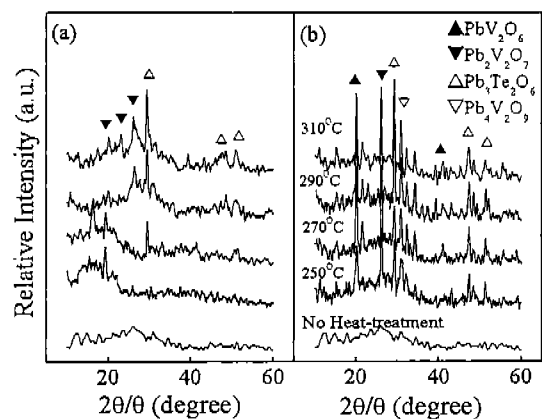


Fig. 6-3. XRD patterns of the 60V₂O₅-10PbO-30TeO₂ (mol%) glass samples (a) conventionally and (b) microwave heat-treated at various temperature for 1 h.

V₂O₅의 함량과는 무관하게 Pb₂V₂O₇ 결정상의 피크가 뚜렷하게 존재하였고, 재래식 열처리된 시편들에서는 존재하지

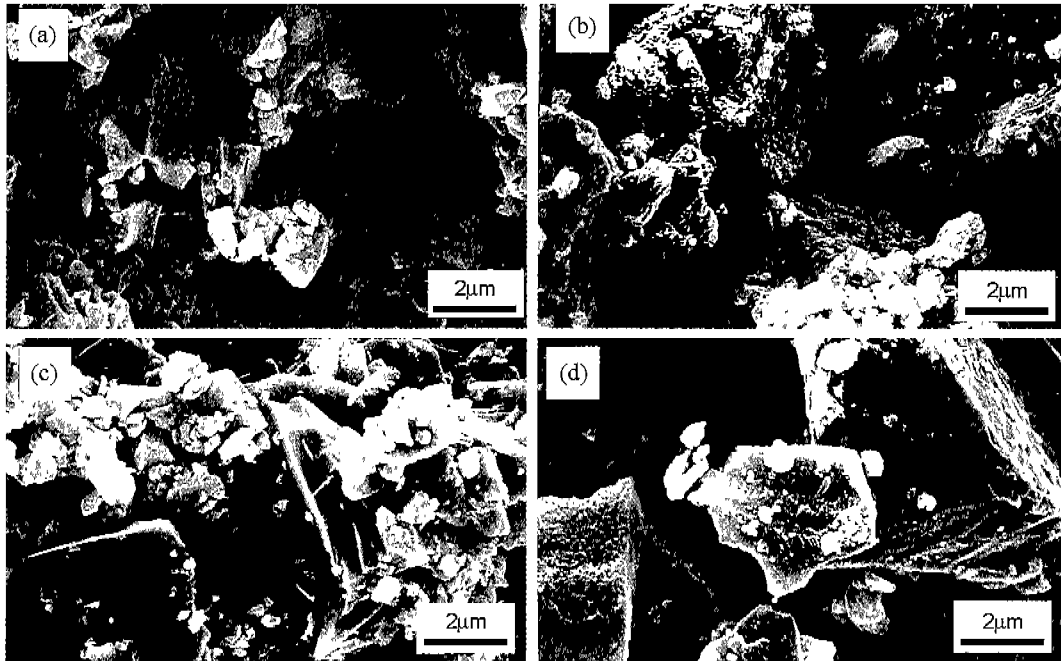


Fig. 7. SEM micrographs of the V_2O_5 -PbO- TeO_2 samples conventionally heat-treated for 1 h at (a) 250°C, (b) 270°C, (c) 290°C and (d) 310°C.

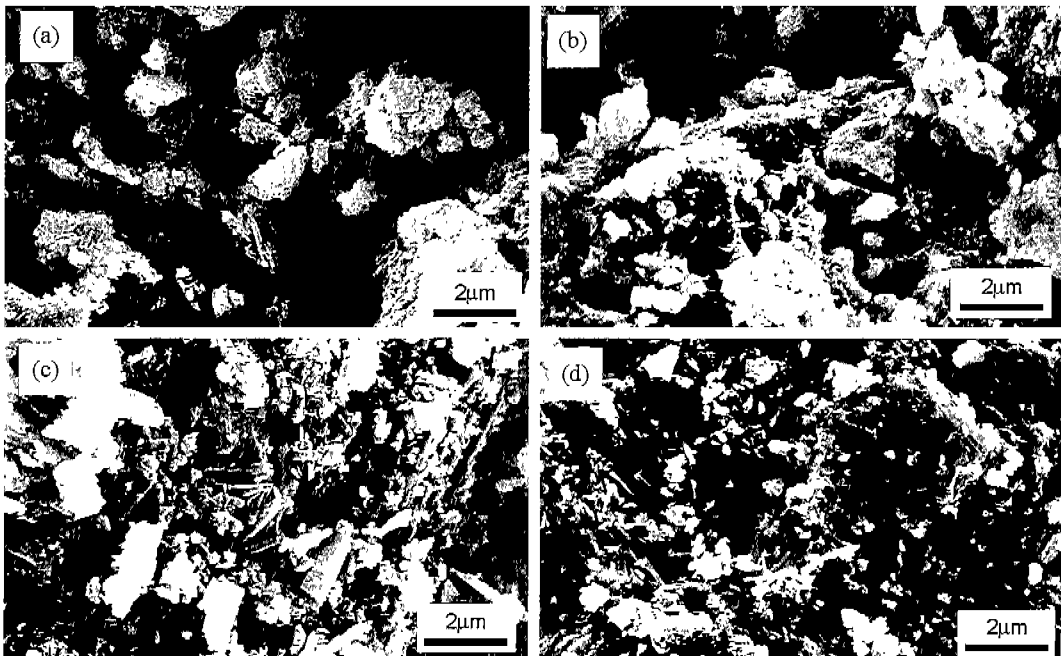


Fig. 8. SEM micrographs of the V_2O_5 -PbO- TeO_2 samples microwave heat-treated for 1 h at (a) 250°C, (b) 270°C, (c) 290°C and (d) 310°C.

않는 PbV_2O_6 와 $Pb_4V_2O_9$ 결정상들의 피크가 뚜렷하게 존재하였다. 이 결과는 다른 보문에 보고된바와 같이 마이크로파의 열적 효과이외에 마이크로파의 향상된 확산 효과와 같은 비열적 효과에 기인되었다고 사료된다.¹⁵⁾

재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 SEM 사진들을

Fig. 7 및 8에 각각 나타내었다. Fig. 7에 주어진 재래식 열처리된 시편들의 미세구조는 주로 판상형 결정립들로 구성되어 있지만, Fig. 8에 주어진 마이크로파 열처리된 시편들의 미세구조는 판상형 결정립들과 매우 작은 크기의 침상형 결정립들로 구성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 6에 주어

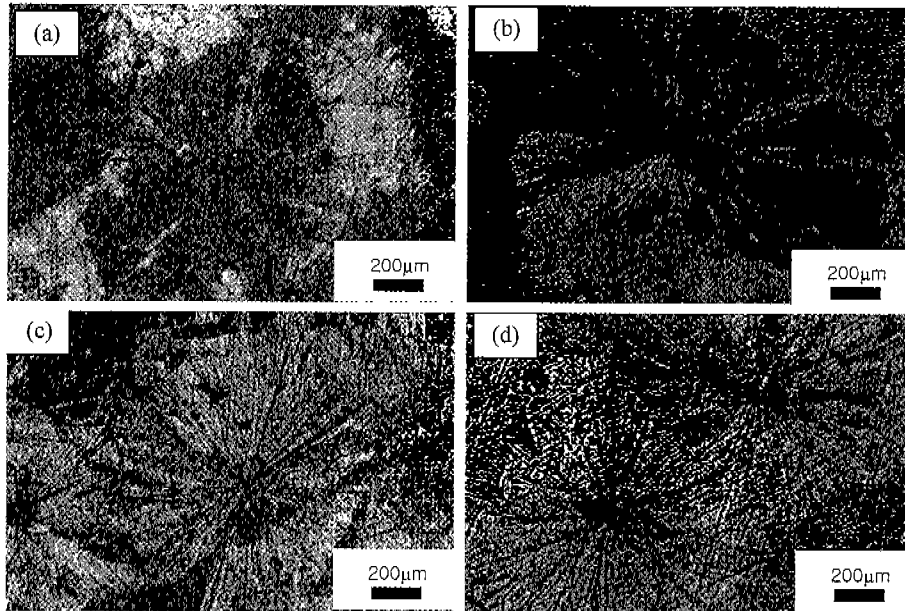


Fig. 9. OM pictures of samples heat-treated at 310°C for 1 h; (a) center area and (b) surface area of conventionally heat-treated sample. (c) center area and (d) surface area of microwave heat-treated sample.

진 XRD 회절 패턴들과 비교해 보면, 마이크로파 열처리된 시편들에 존재하는 침상형 결정립들은 PbV₂O₆ 및 Pb₄V₂O₉ 결정상들이라고 판단되어진다.

70V₂O₅-10PbO-20TeO₂(mol%) 조성을 가지며 약 310°C 에서 약 1 h 동안 열처리된 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 광학 현미경 사진을 Fig. 9에 나타내었다. Boonyapiwat¹⁷⁾이 사용한 방법으로 Fig. 9에 주어진 결정립의 크기를 측정해보면, 재래식 열처리된 시편의 중앙과 표면에서 결정립 크기는 각각 828 µm 및 1023 µm로 측정되었고, 마이크로파 열처리된 시편의 중앙과 표면에서 결정립 크기는 각각 798 µm 및 813 µm로 측정되었다. 이는 재래식에 비하여 마이크로파 열처리된 시편의 중앙과 표면에서 결정립 크기가 작고 비슷한 것은 마이크로파의 부피 발열로 인한 균일한 가열 효과에 기인되었다고 사료된다.

3.4. 전기적 특성

재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기 전도도를 상온에서 측정한 결과, 열처리 온도가 증가할수록 시편들의 전기전도도 값이 증가하는 경향을 나타내었고, 가장 높은 열처리 온도인 310°C에서 약 1 h 동안 열처리된 재래식 및 마이크로파 시편들의 전기 전도도 값을 Table 2에 나타내었다. V₂O₅의 함량이 증가할수록 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기전도도 값이 모두 증가하였고, 재래식 열처리된 시편들에 비하여 마이크로파 열처리된 시편들의 전기전도도 값이 상대적으로 모두 매우 높았다. V₂O₅ 성분이 증가하면, 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기전도도 값이 증가하는 것은 V⁴⁺-O⁵⁺ 구조에 적은 비틀림성을

Table 2. The Electrical Conductivity of the V₂O₅-PbO-TeO₂ Samples Conventionally and Microwave Heat-treated at 310°C for 1 h

Mol%	Conductivity (× 10 ⁻² Ω ⁻¹ cm ⁻¹)	
	Conventional	Microwave
70V ₂ O ₅ -10PbO-20TeO ₂	0.55	1.53
65V ₂ O ₅ -10PbO-25TeO ₂	0.411	0.901
60V ₂ O ₅ -10PbO-30TeO ₂	0.291	0.45

주는 미세 전도성 결정인 Pb₂V₂O₇, PbV₂O₆, Pb₄V₂O₉ 결정들이 잘 형성되었기 때문이라고 사료된다. 한편, 모유리내에 전도성 결정들이 과대하게 성장하면 구조의 뒤틀림성이 증가하여 전자 이동도가 떨어져서 전기 전도도가 오히려 감소한다는 Fu 등¹⁸⁾의 보고와 같이, 재래식에 비하여 마이크로파 열처리된 시편의 결정립의 크기가 상대적으로 작고 균일하기 때문에 V⁴⁺-O⁵⁺ 구조에 적은 뒤틀림성을 제공할 수 있다. 따라서, 재래식에 비하여 마이크로파 열처리된 시편들의 전기 전도도 값이 상대적으로 높다고 사료된다. 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기 전도 기구의 차이점을 규명하기 위하여 ln(σT)를 1/T의 함수로서 Fig. 10에 나타내었다. 주어진 그림을 살펴보면, 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들에서 ln(σT)와 1/T의 상관 관계가 200°C까지 비슷한 직선적 비례 관계를 보여주므로 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기 전도 기구는 동일하게 small polaron hopping에 의해 일어난다고 말할 수 있다.

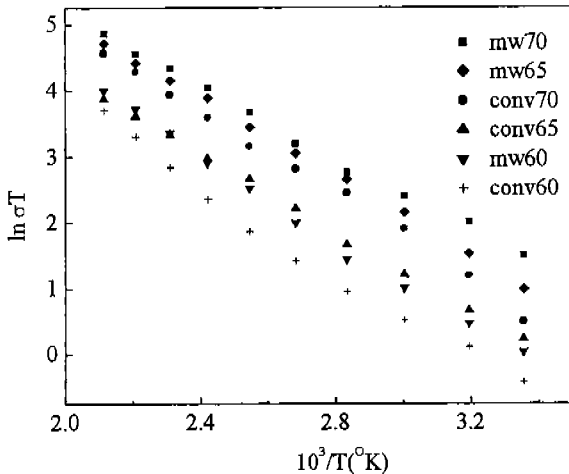


Fig. 10. $\ln(\sigma T)$ vs $10^3/T$ for the V_2O_5 -PbO- TeO_2 samples conventionally and microwave heat-treated at $310^\circ C$ for 1 h. (Number denotes mol% of V_2O_5).

4. 결 론

재래식 및 마이크로파 열원에서 V_2O_5 -PbO- TeO_2 계 유리 상 시편들을 제조하여 결정화시킨 후, 이들 시편들의 결정화 특성 및 전기적 특성을 비교 검토한 결과, 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1. 600 W의 마이크로파 출력에서 PbO 성분은 마이크로파를 전혀 흡수하지 않았고, TeO_2 성분은 상대적으로 마이크로파를 일부 흡수하였지만, V_2O_5 성분은 마이크로파를 잘 흡수하여 약 $400^\circ C$ 까지 잘 가열되었다.
2. V_2O_5 -PbO- TeO_2 계 시편들은 V_2O_5 성분에 의해 상온에서 마이크로파를 잘 흡수하여 $320\sim 360^\circ C$ 까지 직접 가열되었고, $250\sim 310^\circ C$ 의 온도 영역에서 시편들을 마이크로파로 직접 결정화시킬 수 있었다.
3. 재래식 열처리된 시편들은 V_2O_5 의 함량이 증가할수록 $Pb_2V_2O_7$ 결정상의 피크가 증가하였지만, 마이크로파 열처리된 시편들에서는 V_2O_5 의 함량과는 무관하게 $Pb_2V_2O_7$ 결정상의 피크가 뚜렷하게 나타나고 PbV_2O_6 와 $Pb_4V_2O_9$ 결정상들의 피크가 나타났다.
4. V_2O_5 의 함량이 증가할수록 재래식 및 마이크로파 열처리된 시편들의 전기전도도 값이 모두 증가하였고, 재래식에 비하여 마이크로파 열처리된 시편들의 전기전도도 값이 상대적으로 모두 높았다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 과제번호 2000-1-30100-005-3 지원으로 수행되었음. 이 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. H. Sakata, M. Amano and T. Yagi, "DC Conductivity of V_2O_5 -PbO- TeO_2 Glasses and the Effect of Pressure," *J. Non-Cryst. Solids*, **194**, 198-206 (1996).
2. K. Bai and H-G. Kim, "Microwave Sintering Behavior and Electrical Properties of BaTiO₃ Thick Film," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35**(11), 1197-1202 (1998).
3. D. J. Jeong, H. C. Park, H. S. Lee, M. M. Shon, S. S. Park and C. Y. Park, "Preparation and Electrical Conductivity of CuO-Bi₂O₃-V₂O₅ Glass for Solid State Batteries," *Kor. J. Ceram.*, **5**(2), 183-188 (1999).
4. D. H. Kim, J. Y. Yoon, H. C. Park and K. H. Kim, "Solid-state CO₂ Sensor using Li₂CO₃-Li₃PO₄-Al₂O₃ Solid Electrolyte and LiMnO₄ as Reference Electrode," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(8), 817-823 (2000).
5. N. F. Mott and E. A. Davis, *Electronic Processes in Non-crystalline Materials*, 2nd Ed., pp. 17, Oxford University Press, Oxford, 1979.
6. A. Tsuzuki, S. Kawakami, M. Awano, T. Sekiya and Y. Torii, "Properties of Semiconductive Glasses in the V_2O_5 -CuO System," *J. Mater. Sci. Lett.*, **7**, 745-747 (1988).
7. V. K. Dhawan, A. Mansingh and M. Sayer, "DC Conductivity of V_2O_5 - TeO_2 Glass," *J. Non-Cryst. Solids*, **51**, 87-103 (1997).
8. R. Iordanova, Y. Dimitriev, V. Dimitriev, S. Kassabov and D. Klissurski, "Glass Formation and Structure in the V_2O_5 -Bi₂O₃-Fe₂O₃ Glasses," *J. Non-Cryst. Solids*, **204**, 141-150 (1996).
9. M. Amano, H. Sakata, K. Tanaka and T. Hirayama, "Electrical Properties of Bi₂O₃-SrO-V₂O₅ Glasses and Glasses-Ceramics," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **102**, 424-429 (1994).
10. H. Mori, T. Kitami and H. Sakata, "Electrical Conductivity of V_2O_5 -Sb₂O₃- TeO_2 Glass," *J. Non-Cryst. Solids*, **168**, 157-166 (1994).
11. W. H. Sutton, "Microwave Processing of Ceramic Materials," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **68**, 376-386 (1989).
12. C. Siligardi, C. Leonelli, F. Bondioli, A. Corradi and G. C. Pellacani, "Densification of Glass Powders belonging to the CaO-ZrO₂-SiO₂ System by Microwave Heating," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **20**, 177-183 (2000).
13. P. F. James, Y. Iqbal, U. S. Jais, S. Jordery and W. E. Lee, "Crystallization of Silicate and Phosphate Glasses," *J. Non-Cryst. Solids*, **219**, 17-29 (1997).
14. S. S. Park, K. T. Kim, S. E. Lee, B. C. Kim, J. Park and H. C. Park, "The Comparison of Characteristics of Li₂O-2SiO₂-xCuO Conduction Glasses Prepared by Microwave and Conventional Energies," *J. Kor. Assoc. Cryst. Growth*, **10**(3), 258-263 (2000).
15. T. T. Meek, R. D. Blake, J. D. Katz, J. R. Bradberry and M. H. Brooks, "Cation Diffusion in Glass Heated Using 2.45 GHz Radiation," *J. Mater. Sci. Lett.*, **7**, 928-931 (1988).
16. J. Jacob, L. H. L. Chia and F. Y. C. Boey, "Thermal and Nonthermal Interaction of Microwave-radiation with Materials," *J. Mater. Sci.*, **30**, 5321-5327 (1995).

17. A. Boonyapiwatt and D. E. Clark, "Nucleation and Crystal Growth of $Li_2O \cdot 2SiO_2$ in a Microwave Field," *Ceram. Trans.*, **59**, 505-514 (1995)
18. F. Jie, "Superionic Conductivity of Glass-ceramics in the System $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot TiO_2 \cdot P_2O_5$," *Solid State Ionics*, **96**, 195-200 (1997).