

AlN 분말의 가수분해 특성

최상욱 · 정홍식* · 황진명

인하대학교 공과대학 무기재료공학과

*동양화학공업(주) 중앙연구소

(1993년 8월 25일 접수)

Hydrolysis of Aluminum Nitride Powder

Sang-Wook Choi, Hong-Sik Jung* and Chin-Myung Whang

Dept. of Ceramic Eng., Inha University

*Research Center, Oriental Chemical Industries

(Received August 25, 1993)

요 약

AlN은 불안정하여 물과 접촉하면 12시간 이내에 172 cal/g의 열을 내면서 가수분해되어 알루미늄 삼수화물이 생성되었다. AlN의 가수분해 과정은 초기에 비정질 알루미늄 수화물이 생성되었으며, 가수분해 조건에 따라 비정질 알루미늄 수화물의 용해-재석출과정으로 알루미늄 삼수화물 특히 bayerite가 생성되었고, 응축과정으로 pseudo-boehmite가 AlN 입자표면에 생성되었다. 가수분해 온도 40°C 이하에서는 비정질 알루미늄 수화물이, 40°C와 60°C 사이에서는 bayerite가 각각 생성되었고, 60°C 이상의 경우는 초기에 pseudo-boehmite의 막이 입자표면에 형성되었다. bayerite는 가수분해 시간이 길수록, 그리고 용액내 pH가 높을수록 잘 생성되었으나 pseudo-boehmite는 가수분해 반응이 급격히 일어날 때와 용액내 ethyl alcohol의 존재로 OH⁻기의 흡착을 방해하여 가수분해 반응이 억제될 때 잘 생성되었다. 그리고 pH=2.0인 용액에서는 AlN의 가수분해가 거의 일어나지 않았다.

ABSTRACT

Aluminum nitride was hydrolyzed in contact with water, evolving the reaction heat of 172 cal/g within 12 hours to form alumina trihydrates. At 40°C >, amorphous alumina hydrate was easily produced by the spontaneous breaks of AlN particle at the beginning of the hydrolysis process, while bayerite was formed by the dissolution-recrystallization processes of amorphous alumina hydrate at the temperature between 40°C and 60°C, and pseudo-boehmite was generated on the surface of AlN particle by the condensation process of the corresponding phase at 60°C <. The longer the hydrolysis time or the higher the value of pH in solution, the more the bayerite phase was produced. However, pseudo-boehmite was easily generated under the following favorable conditions; when the hydrolysis reaction occurred rapidly at the beginning and when the absorption of OH⁻ radical on the surface of AlN particle was disturbed by ethyl alcohol in a solution. However, aluminum nitride was hardly hydrolyzed in a solution of pH 2.0.

1. 서 론

AlN은 1862년 Geuther가 질소분위기에서 알루미늄을 기열하여 처음으로 합성¹⁾하였으나 최근에 열전도성, 전기절연성, 내열성, 내침식성, 고온기계적 강도 등의 우수한 특성^{2,3)}이 알려지면서 주목을 받기 시작하였다. AlN은 실온에서도 불안정하여 공기중의 수분이나 물과

접촉하면 가수분해되어 알루미늄 수화물을 형성하면서 NH₃ 가스를 발생하는 단점⁴⁻⁷⁾을 가지고 있어 초기에는 NH₃ 가스를 만드는 중간물질로 사용되었다⁸⁾. 이러한 가수분해 특성 때문에 AlN 분말을 보관 또는 취급할 때와 제조공정상의 습식처리할 때 그 표면에 형성된 알루미늄 수화물 층이 고온에서 Al₂O₃, AlON이나 AlN polytype을 생성하므로 물성의 변화를 가져온다^{9,10)}. 이

Table 1. Characteristics of Starting AlN Powder

| Element of AlN (wt.%) | Al | N | O | Si | Fe | Ca | Cu | Mn | Mg |
|-------------------------|------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| | 64.6 | 34.3 | 0.90 | 0.14 | 0.013 | tr. | tr. | tr. | tr. |
| BET (m ² /g) | 1.32 | | | | | | | | |
| Average diameter (μm) | 7.38 | | | | | | | | |

러한 물성의 변화는 AlN 기관에서 큰 문제점으로 되고 있어 AlN의 가수분해 특성에 관한 연구의 필요성은 증가되고 있다.

최근 이에 대한 연구를 보면 AlN 분말은 실온에서 물과 반응하여 초기 반응 생성물로 먼저 화학양론적인 AlOOH에 가까운 다공성 비정질 알루미늄 수화물이 형성되고, 16시간 후에 결정상인 bayerite가 생성^{6,7)}되며, AlN 분말을 100°C의 물과 반응시키면 그 표면에 γ-AlOOH(boehmite)가 생성¹¹⁾되나 AlN 박막기판의 경우 같은 온도라 하더라도 pH 3.0 이상에서는 비정질 알루미늄 수화물이 생성¹²⁾된다고 하는 정도이다.

따라서 본 연구에서는 가수분해 반응수의 농도, 가수분해 온도와 시간, 초기 용액의 pH, ethyl alcohol 함량과 같은 가수분해 인자들이 AlN 분말의 가수분해에 미치는 영향과 AlN의 가수분해 과정 및 생성되는 알루미늄 수화물의 생성조건등을 종합적으로 검토하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 원료

본 연구에서 사용된 AlN 분말(순도 98% 이상, Aldrich사)은 입자의 크기가 약 2~10 μm으로서 화학조성 및 비표면적과 입도분석으로부터 구한 평균입경은 Table 1과 같다.

2.2. 가수분해 반응

밀폐된 반응용기내에서 1차 증류수를 자력교반기를 이용하여 일정속도로 교반시키면서 AlN 분말을 넣은 후 가수분해 인자들 (가수분해 반응수의 농도, ethyl alcohol 함량, 초기 용액의 pH, 가수분해 온도와 시간)에 따라 가수분해를 행하면서 그 용액의 pH 변화를 측정하였다. 가수분해를 행한 용액을 감압여과한 후 상온에서 진공 건조하여 분말을 얻었다.

2.3. 측정 및 관찰

가수분해 열량은 미소열량계(Rhesca사 6점식)를 이용하였고, 측정조건은 25°C, 증류수/AlN의 비율을 0.5 ml

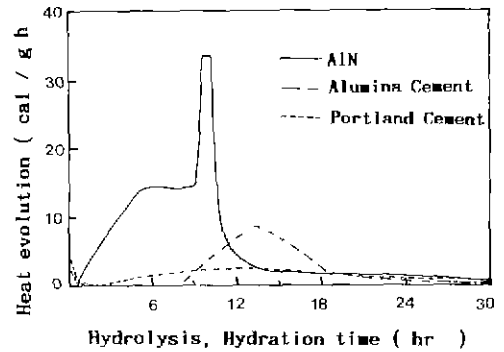


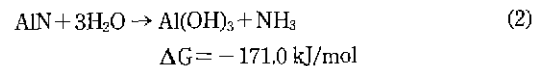
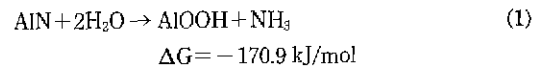
Fig. 1. Heat evolution curves measured by microconduction calorimeter at 25°C (distilled water/AlN=0.5 ml/g).

/g으로 하였다. 용액내 pH 변화는 pH/ion Meter로, 생성물질의 결정상의 동정은 XRD(CuKα, 40 KV, 25 mA)를 사용하였다. 입자형태 및 입경은 SEM을 통하여 관찰하였으며 분말의 비표면적은 BET법으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 가수분해 열량

AlN의 가수분해 반응시 생성되는 boehmite와 bayerite의 반응식^{6,7,11)}과 열역학 자료^{13,14)}를 이용하여 계산한 반응의 Gibbs 자유에너지 차이를 보면 (1)과 (2)식과 같다.



여기서 AlN의 가수분해 반응은 자발적으로 진행하지만, AlOOH나 Al(OH)₃의 생성은 반응조건에 의존한다는 것을 예측할 수 있다. 실제로 AlN이 물과 접촉하여 가수분해되는 과정에서 발생하는 열량을 알아보기 위해 미소열량계로 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

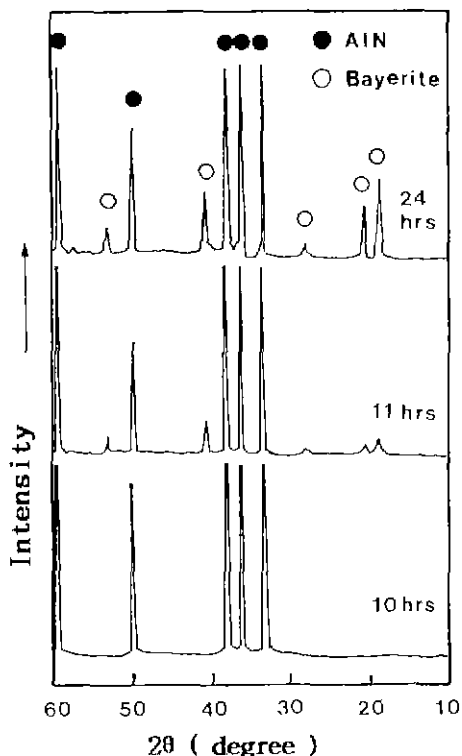


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of aluminum nitride powders hydrolyzed for various times, at 25°C (distilled water/AIN=0.5 ml/g).

가수분해 열량은 발열반응이며, 그 열량은 172 cal/g으로 12시간 이내에 거의 다 방출되고 있다. 이 발열량은 portland cement의 수화열량(48 cal/g)의 약 4배 정도의 높은 열량이다. 가수분해 열량곡선에서 6시간까지 가수분해 열량의 지속적인 증가와 11시간 부근의 급격한 방출원인을 규명하기 위하여 측정조건과 동일하게 가수분해하여 얻은 분말에 대해 X선 회절분석을 행한 결과 Fig. 2를 얻었다. 가수분해를 10시간까지 행한 것은 전형적인 AIN만의 X선 회절패턴을 나타내지만, 11시간에서는 bayerite가 생성되고 그 이후는 성장되었다.

따라서 AIN 분말의 가수분해 열량곡선(Fig. 1)에서 6시간까지의 지속적인 가수분해 열량의 증가는 AIN 입자가 붕괴되면서 비정질 알루미늄 수화물이 생성되기 때문이며, 11시간 부근의 급격한 가수분해 열량방출은 bayerite의 생성되기 때문임을 알 수 있었다.

3.2. 가수분해 반응수 양의 효과

AIN 분말의 가수분해 반응에 가수분해 반응수의 양이

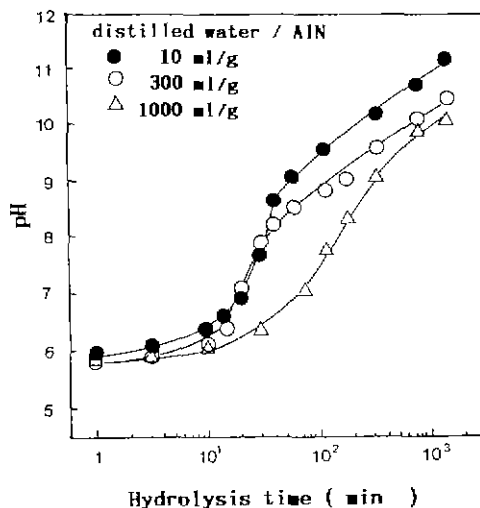


Fig. 3. Variation in pH of slurry containing aluminum nitride powder hydrolyzed by various distilled water content with hydrolysis time, at 30°C.

미치는 영향을 알아보기 위하여 30°C, 24시간 동안 용액의 pH 변화를 측정하여 Fig. 3을 얻었다.

가수분해 반응수의 양이 감소함에 따라 가수분해 10분 이후에 pH 증가는 더욱 급격해지고, 24시간에서 그 값은 모두 pH 10 이상을 나타내고 있다.

용액내 pH의 증가는 AIN이 가수분해 될 때 발생하는 NH₃ 가스가 물에 용해되어 암모니아수를 형성하는데 기인하므로 가수분해 진행 정도는 용액의 pH측정으로부터 파악될 수 있다. Fig. 4는 가수분해된 분말의 X선 회절분석 결과로 생성된 알루미늄 수화물을 동정한 결과로서 1000 ml/g의 경우 AIN의 X선 회절패턴만을 보이며, 300 ml/g에서 10 ml/g으로 감소됨에 따라 bayerite가 더욱 성장하고 nordstrandite가 약간 생성되었다.

그러므로 용액의 pH 변화와 X선 회절분석의 결과로부터 용액의 pH 값에 의해 생성되는 알루미늄 수화물에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 가수분해 반응수의 양이 감소함에 따라 용액의 pH값이 증가하는 것은 AIN 1g당 발생하는 NH₃ 가스의 양은 일정하지만 상대적으로 암모니아수가 고농도화되기 때문이다. 이로써 가수분해 반응수의 양이 작을수록 용액의 pH는 더욱 높아져 AIN의 가수분해는 더 활발해짐을 알 수 있었다.

3.3. 초기 pH의 영향

초기 용액의 pH가 AIN의 가수분해에 미치는 영향을 알아보기 위해 초기용액의 pH를 변화시켜 30°C에서 가

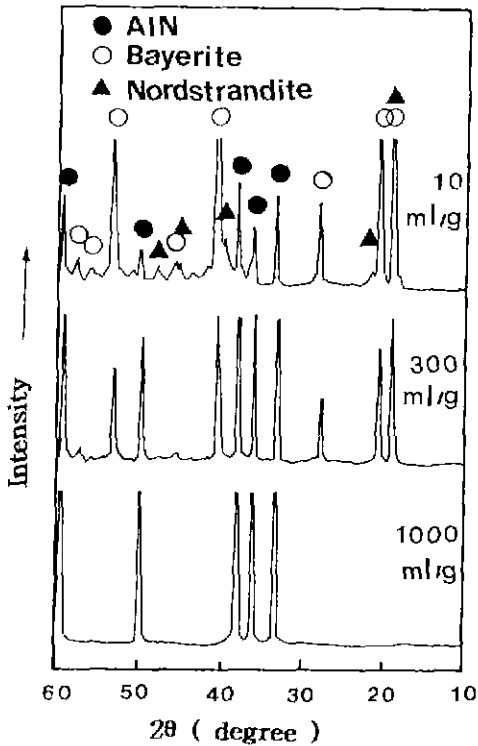


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of aluminum nitride powders hydrolyzed with various distilled water content for 24 hrs, at 30°C.

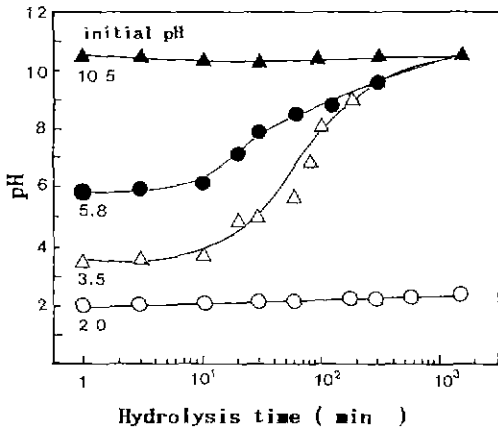


Fig. 5. Variation in pH of slurry containing aluminum nitride powder with hydrolysis time, at various constant initial pH values (Hydrolysis temperature 30°C, distilled water/AlN=300 ml/g).

수분해 시간에 따라 측정된 용액의 pH 변화 및 얻어진 X선 회절분석결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

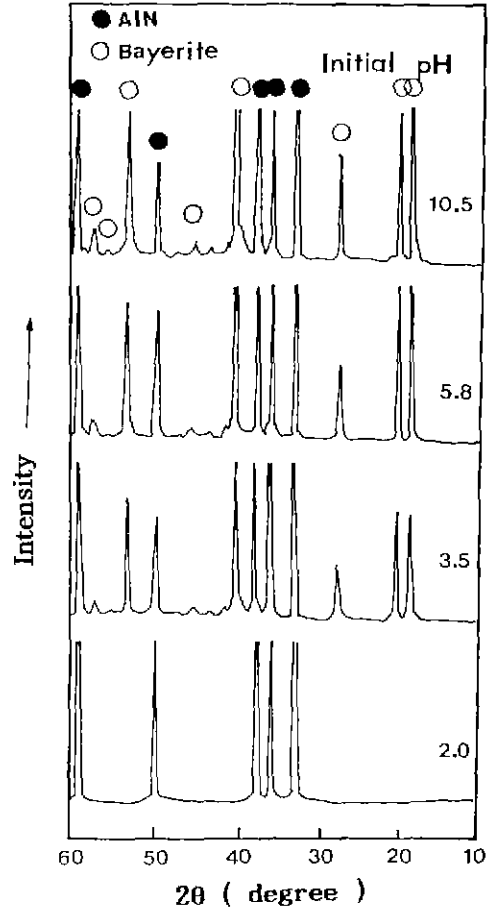


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of aluminum nitride powders hydrolyzed under various constant initial pH values for 24 hrs, at 30°C (distilled water/AlN=300 ml/g).

Fig. 5로부터 초기 pH 2 이하일 경우 AlN의 가수분해 반응이 억제되고 있으나, 초기 pH 3.5 이상에서는 가수분해 시간 10분 이후부터 AlN의 가수분해 반응이 진행되고 있다. Fig. 6의 X선 회절분석 결과 또한 초기 pH의 증가에 따라 bayerite의 피크세기가 증가함을 보여주고 있다.

따라서 용액내 초기 pH가 높을수록 AlN의 초기 가수분해 속도는 가속화되었으며, 가수분해 생성물인 bayerite의 성장은 더욱 촉진되고 있음을 알 수 있었다.

3.4. Ethyl alcohol 함유량의 영향

용액내 ethyl alcohol의 함유량이 AlN의 가수분해 반응에 미치는 영향을 알아보기 위하여 용액내 ethyl alco-

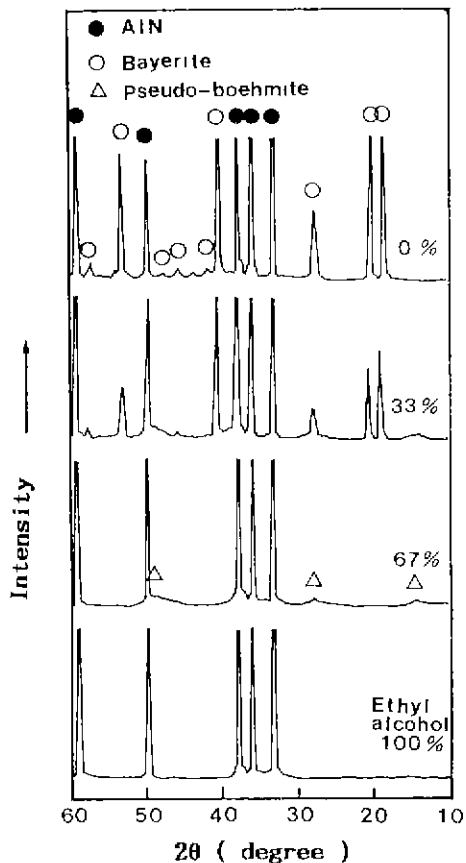


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of aluminum nitride powders hydrolyzed with ethyl alcohol content for 24 hrs, at 30°C ((distilled water+ethyl alcohol)/AlN=300 ml/g).

hol의 함유량을 변화시켜 가수분해하여 얻은 분말에 대해 X선 회절분석을 행하여 Fig. 7에 나타내었다.

용액내 ethyl alcohol의 함유량이 증가함에 따라 bayerite의 성장이 억제되었고 반면 pseudo-boehmite가 입자표면에 소량 생성되었다. ethyl alcohol 100%의 용액 내에서는 AlN의 X선 회절패턴만을 나타낸다.

따라서 용액내의 ethyl alcohol 존재는 AlN의 가수분해를 효과적으로 억제하였는데, 그 원인은 AlN의 입자표면에 ethyl alcohol의 흡착으로 물분자의 흡착을 방해함으로써 AlN의 가수분해반응을 억제시키기 때문인 것으로 생각된다.

3.5. 가수분해 온도와 시간의 효과

AlN 분말의 가수분해 온도와 시간에 따라 측정된 용

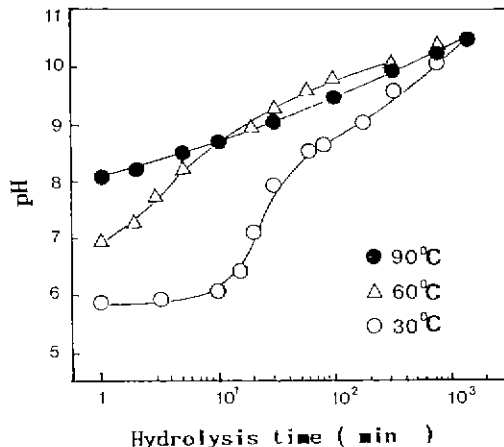


Fig. 8. Variation in pH of slurry containing aluminum nitride powder with hydrolysis time, at various temperatures (distilled water/AlN=300 ml/g).

액의 pH 변화는 Fig. 8과 같다. 용액의 초기 pH는 가수분해 온도를 증가함에 따라 급격히 증가하여 가수분해 반응이 더 빠르게 진행됨을 알 수 있으며, 가수분해 시간이 지남에 따라 용액의 pH는 증가되어 24시간 후에는 동일한 값을 나타내고 있다.

가수분해 온도와 시간에 따른 생성물을 알아보기 위해 대표적인 30°C, 60°C, 90°C에서 가수분해하여 얻은 분말의 X선 회절분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

AlN 분말을 실온에서 가수분해하면 16시간만에 bayerite가 생성되고 그 이후에는 성장한다고 보고⁶⁾하지만, 30°C의 경우에는 7시간만에 bayerite가 생성되고 있다. 60°C에서는 30분에 이미 bayerite가 생성했으며, 가수분해가 진행됨에 따라 bayerite의 성장과 nordstrandite의 생성을 나타내고 있다.

또한 90°C에서는 초기에 pseudo-boehmite가 많이 생성되었으나, 시간이 지남에 따라 bayerite와 nordstrandite가 성장하였다. 여기서 가수분해 온도 60°C 이상에서 초기에 생성되는 pseudo-boehmite는 AlN의 가수분해 반응과 알루미늄 삼수화물의 생성과 성장에 큰 영향을 미치고 있는데, 그 원인은 Fig. 10에 나타난 SEM 사진에서 보는 바와 같이 AlN 입자의 표면에 pseudo-boehmite의 막이 생성되어 AlN의 가수분해 진행속도를 억제하기 때문으로 생각된다. 이것은 알루미늄 알록사이드의 경우 가수분해 반응이 급격히 일어나는 조건하에서 pseudo-boehmite는 비정질 일루미나 수화물의 응축과정으로부터 생성되며, 알루미늄 삼수화물의 핵이 상당수 존재하기 이전에 응축과정이 먼저 일어난다는 보고¹⁵⁾와

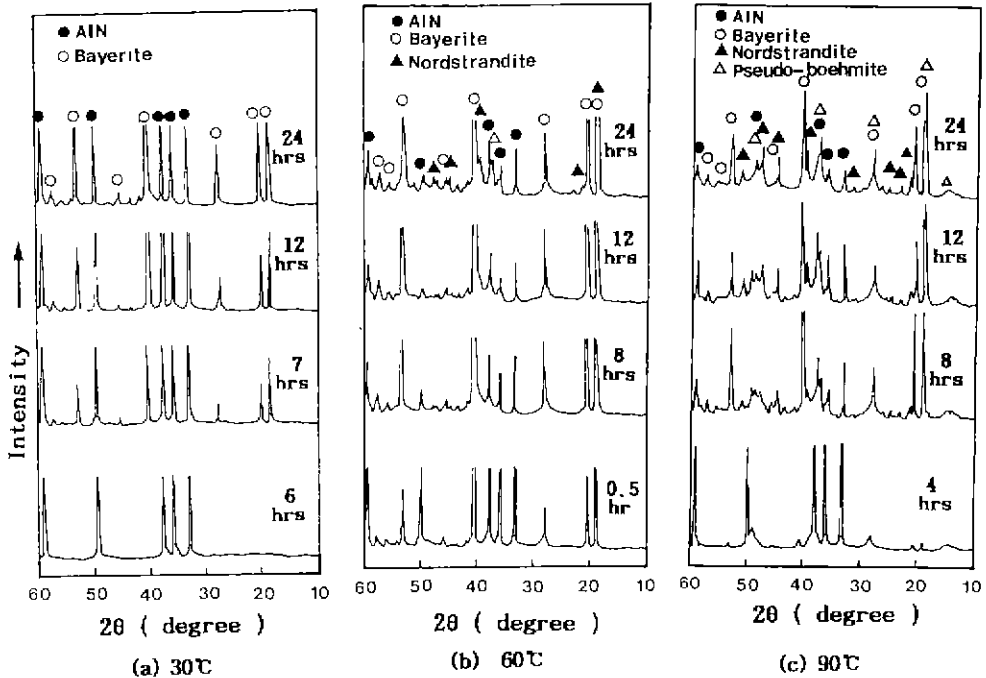


Fig. 9. X-ray diffraction patterns of aluminum nitride powders hydrolyzed with various hydrolysis times and hydrolysis temperatures (distilled water/AlN=300 ml/g).

일치하고 있다. 또한 가수분해 온도가 60°C 이상으로 높아질수록 AlN 입자의 표면에 생성되는 pseudo-boehmite의 막은 치밀하고 안정하여 가수분해 시간에 따른 알루미늄 산수화물로의 전이 및 AlN의 가수분해 진행은 느려지게 된다.

동일한 가수분해 조건하에서 얻어진 분말의 비표면적을 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. 비표면적은 가수분해 온도가 증가함에 따라 증가하고 있으며, 가수분해 시간이 증가함에 따라 최대값을 나타낸 후 감소하였다. 이러한 비표면적의 측정결과는 X선 회절분석 결과와 SEM 관찰 결과로부터 잘 설명될 수 있다. 즉, 30°C에서는 초기에 AlN 입자표면의 붕괴와 더불어 생성되는 비정질 알루미늄 수화물때문에 비표면적은 서서히 증가하고 미세한 bayerite가 생성되는 7시간에 비표면적은 최대값을 나타낸 후 감소하였다. 이와같은 비표면적의 감소는 AlN 입자의 붕괴와 bayerite의 핵생성의 기여보다는 bayerite의 성장에 대한 기여가 더 우세하기 때문인 것으로 생각된다. 60°C의 경우 초기에 생성되는 bayerite와 소량의 pseudo-boehmite, 90°C에서는 pseudo-boehmite의 기여로 60°C 보다 더 높은 비표면적을 나타내지만 6시간 이후에서는 알루미늄 산수화물인 bayerite 및 nordstran-

dite의 성장 때문에 비표면적은 다시 감소하였다.

3.6. 가수분해 온도와 시간에 따른 알루미늄 수화물의 생성영역

가수분해 온도와 시간에 따른 알루미늄 수화물의 생성영역을 Fig. 12에 나타내었다.

가수분해 온도가 40°C 이하에서는 AlN 입자의 붕괴와 더불어 생성되는 비정질 알루미늄 수화물의 생성영역은 증가하고 있지만 가수분해 시간이 지남에 따라 bayerite로 전이되었다. pseudo-boehmite의 생성은 가수분해 온도 60°C 이상이다. 이 온도에서 생성되는 pseudo-boehmite의 막은 불안정하지만 80°C 이상에서 생성되는 것은 안정하여 AlN의 가수분해 반응을 억제함으로써 용해-제석출과정에 의해 생성되는 bayerite와 nordstrandite의 성장을 둔화시킨다. 따라서 가수분해온도 60°C 이상에서는 AlN 이외에 초기에 생성되는 pseudo-boehmite와 bayerite와 nordstrandite의 4개 상이 공존하는 영역이 나타난다. bayerite와 nordstrandite 같은 알루미늄 산수화물은 pseudo-boehmite가 완전하게 생성되지 않는 80°C 이하에서 가수분해 시간이 길수록 잘 생성 및 성장되며, nordstrandite는 bayerite에 비해 더 늦게

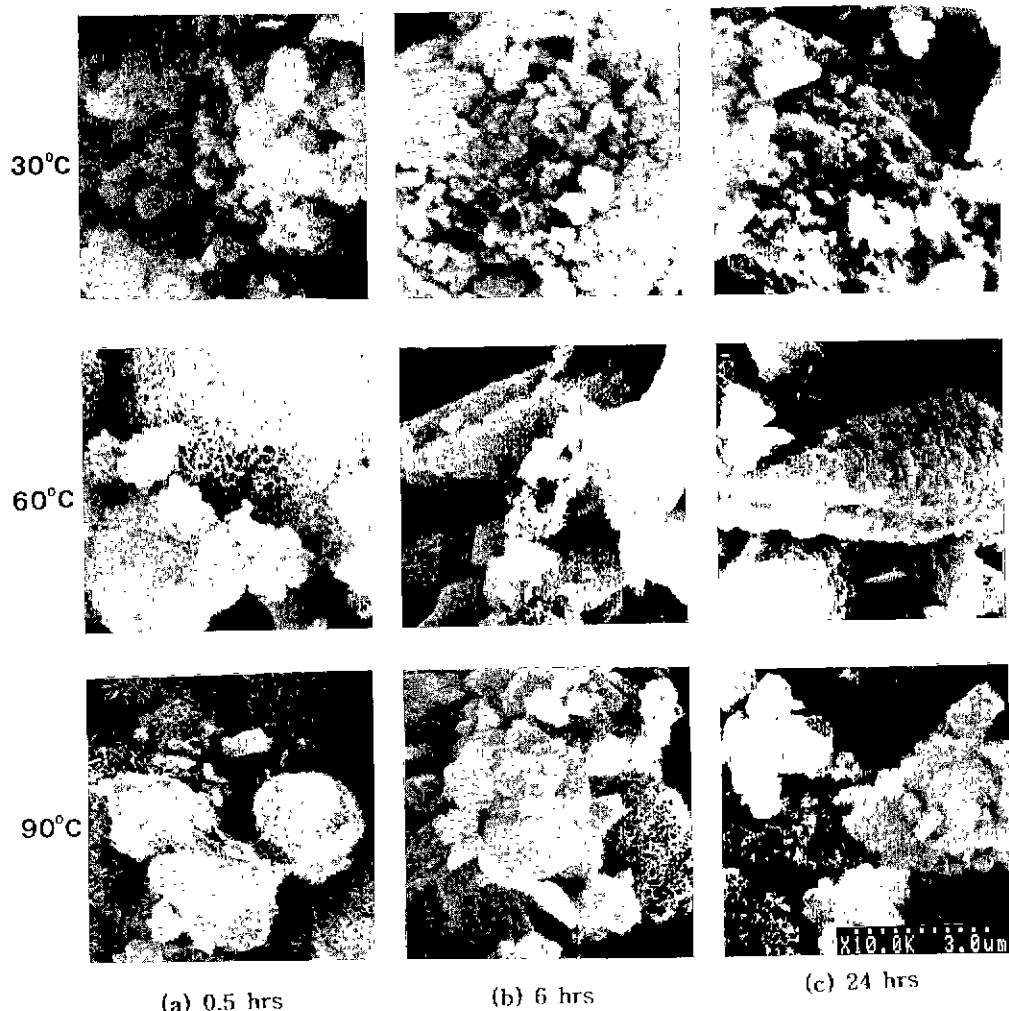


Fig. 10. Change in morphologies of aluminum nitride and alumina hydrate with various hydrolysis time and hydrolysis temperatures (distilled water/AlN=300 ml/g).

생성되고 가수분해온도가 높을수록 그 생성시간이 단축되었다. 용해-재석출과정으로 생성되는 알루미늄 삼수화물은 Al(OH)₃ 팔면체의 적층배열에 따라 bayerite, nordstrandite와 gibbsite로 구별되는데¹⁶⁾ nordstrandite가 bayerite보다 늦게 생성되는 이유는 nordstrandite가 ABAB의 적층배열을 갖는 bayerite와 ABBA-ABBA의 적층배열을 갖는 gibbsite의 중간적인 구조를 갖기 때문에 bayerite의 생성조건보다는 높은 pH와 가수분해 온도가 필요하기 때문으로 생각된다.

알루미늄 알콕사이드 가수분해의 경우 비정질 알루미늄은 숙성하는 pH와 온도에 의존하여 Al(OH)₃나 AlOOH로 된다¹⁷⁾¹⁸⁾고 한다. Yoldas¹⁷⁾에 의하면 가수분해

온도 80°C에서는 boehmite가, 20°C에서는 비정질 알루미늄 수화물이 생성되며 숙성하는 동안 용해-재석출 과정을 통하여 bayerite로 된다고 한다. pH에 의한 알루미늄 수화물의 생성은 pH 7 이하 amorphous aluminum hydroxide, 8 < pH < 9에서는 pseudo-boehmite가, pH 10일 때는 pseudo-boehmite, bayerite, nordstrandite, gibbsite, pH 11의 경우 bayerite, boehmite, bayerite, nordstrandite, gibbsite, pH 11의 경우 bayerite, nordstrandite, gibbsite가 생성된다고 보고하고 있다¹⁸⁾.

AlN의 가수분해 반응은 알루미늄 알콕사이드의 가수분해 반응과 비교해 볼 때 가수분해시 NH₃ 가스를 발생시킨다는 차이점만 있을 뿐 거의 동일한 가수분해

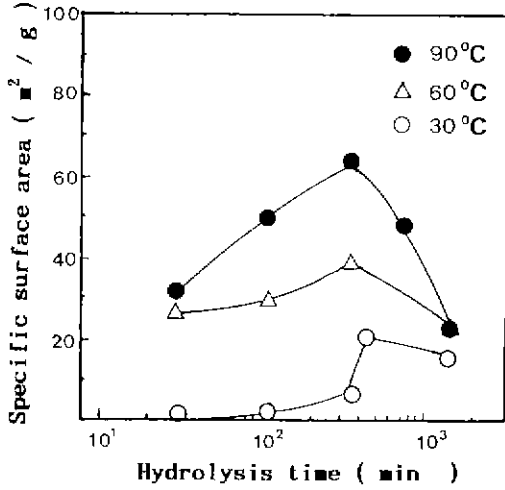


Fig. 11. Specific surface area of aluminum nitride powders hydrolyzed with hydrolysis time, at various temperatures (distilled water/AlN=300 ml/g).

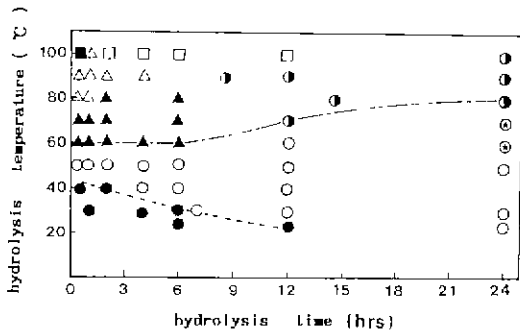


Fig. 12. Boundary of alumina hydrates formed by hydrolysis of aluminum nitride powder under the condition of various temperatures and times (distilled water/AlN=300 ml/g).

- : pseudo-boehmite
- △: rich pseudo-boehmite + bayerite
- : rich pseudo-boehmite + bayerite + nordstrandite
- ▲: pseudo-boehmite + rich bayerite
- ⊙: pseudo-boehmite + rich (bayerite + nordstrandite)
- : bayerite
- ⊖: bayerite + nordstrandite
- : amorphous aluminum hydroxide

생성물을 나타내고 있음을 알 수 있다. 생성되는 알루미늄 수화물의 종류는 AlN의 가수분해 온도와 용액내 pH값 및 가수분해 시간에 의존함을 보여주었다.

4. 결 론

가수분해 인자들에 의한 AlN 분말의 가수분해 특성에 관한 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 가수분해는 12시간 이내에 일어났으며 이때 발생한 열량은 172 cal/g이었다. 6시간까지의 지속적인 가수분해 열량의 증가는 비정질 알루미늄 수화물의 생성에, 11시간 부근의 급격한 열량방출은 bayerite의 생성 때문이다.

2. AlN의 가수분해 과정은 먼저 AlN 입자가 붕괴되면서 비정질 알루미늄 수화물의 생성이 일어나며 가수분해 조건에 따라 생성된 비정질 알루미늄 수화물은 용해-재석출 과정으로 bayerite가 주로 생성되고, 응축 과정으로 pseudo-boehmite가 생성되었다.

3. AlN 분말은 가수분해 온도가 증가함에 따라 가수분해 반응은 가속화되었으며, 특히 60°C 이상에서 매우 활발하였다. 또한 용액의 pH의 변화는 온도에 따라 초기에는 큰 차이를 나타내지만, 가수분해 시간이 지남에 따라 그 차이는 줄어들었다.

4. 가수분해 반응수의 양이 감소함에 따라 가수분해시 발생하는 NH₃ 가스에 의한 용액내 pH증가로 AlN의 가수분해는 더욱 촉진되었다.

5. 용액내 초기 pH가 높을수록 가수분해 반응은 촉진되었으며, 초기 pH 2 이하일 경우에는 AlN 분말의 가수분해 반응이 억제되었다.

6. 용액내 ethyl alcohol의 존재시에는 AlN 표면에 OH⁻기의 흡착을 방해하여 가수분해 반응을 억제되었다.

7. bayerite는 80°C 이하에서 주로 생성되었고, 가수분해 시간이 길수록, 용액내 pH가 높을수록 잘 생성되었으며, nordstrandite는 bayerite에 비해 더 늦게 생성되었고 가수분해온도가 높을수록 그 생성시간이 단축되었다.

8. pseudo-boehmite는 초기 가수분해 반응이 급속히 진행될 때(가수분해 온도 60°C 이상), OH⁻기의 흡착으로 가수분해 반응이 방해를 받을 때(용액내 ethyl alcohol의 존재) AlN 분말의 표면에 생성되었다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 한국과학재단 육성지정 연구과제 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J.W. Mellor, Comprehensive Treatise on Inorganic and

- Theoretical Chemistry, Vol. VIII, Nitrogen and Phosphorus, Longmans, Green and Co., New York. pp. 97-144 (1928).
2. A.N. Cormack, "Intrinsic Disorder in Aluminum Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, **2**(9), 1730-1732 (1989).
 3. J.C. Schuster, "Compatibility of AlN with Group VIII Transition Metals," *ibid.*, **68**(12), c-329-c-330 (1985)
 4. G.A. Slack, T.F. Mcnelly, "Growth of High Purity AlN Crystals," *J. Cryst. Growth*, **34**, 263-279 (1976).
 5. 宇津木 弘, "粉體の 親水性, 疏水性," *セラミックス*, **25**(8), 704-706 (1990).
 6. P. Bowen, J.G. Highfield, A. Mocellin, T.A. Ring. "Degradation of Aluminum Nitride Powder in an Aqueous Environment," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(3), 724-728 (1990).
 7. P. Bowen, J.G. Highfield, "Diffuse-Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopic Studies of the Stability of Aluminum Nitride Powder in an Aqueous Environment," *Anal Chem.*, **61**, 2399-2402 (1989).
 8. K. Komeya, A. Tsuge, N. Iwase, "Densification and properties of AlN," *Fundamental Structural Ceramics*, ed. by S. Somiya, R.C. Bradt, Tetra Scientific Pub. Co., Tokyo, pp. 97-112 (1987).
 9. T. Yagi, K. Shinozake, N. Ishizawa, "Effect of Silicon Dioxide on the Thermal Diffusivity of Aluminum Nitride Ceramics," *J Am Ceram Soc.*, **71**(7), c-334-c-338 (1982).
 10. T. Sakai, "Hot-pressed Oxynitrides in the System AlN-Al₂O₃," *Sintering-Theory and Practice*, ed. by D. Kolar et al., Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, pp. 591-596 (1988)
 11. A. Abid, R. Bensalem, B.J. Sealy, "The Thermal Stability of AlN," *J. Mat. Sci.*, **21**, 1301-1304 (1986).
 12. R. Chanchani, "Aluminum Nitride Substrates for Thin-Film Hybrid Integrated Circuits," *Advances in Ceramics Vol. 26*, ed. by M.F. Yan et al., Am. Ceram. Soc Inc., Ohio, pp.77-85 (1987).
 13. K. Wefers, "Nomenclature, Preparation, and Properties of Aluminum Oxides, Oxide Hydroxides, and Trihydroxide," *Alumina Chemical Sci. and Tech Hand Book*. ed. by L.D Hart et al., 13-22 (1990).
 14. R.D Stull, H. Prophet, JANAF Thermochemical Tables. 2nd ed (NSRDS-NBS 37 U.S. Natl. Bur. Std., 1971).
 15. G.C. Bye, D. Aldcroft, "Crystallization Processes in Aluminum Hydroxide Gels," *Proc. of Brit Ceram. Soc.*, **13**, 125-141 (1969).
 16. 柳田博明, *セラミックスの 化学*, 丸善株式会社, pp. 23-24 (1982).
 17. B.E. Yoldas, "Hydrolysis of Aluminum Alkoxides and Bayerite Conversion," *J Appl. Chem. Biotech.*, **23**, 803-809 (1973).
 18. 이종길, "알루미늄염 침전법과 알콕사이드 가수분해법에 의한 알루미늄 분체의 제조," 인하대학교, 석사학위논문 (1990).