산 및 열처리 과정에 따른 주요 석면의 특성변화에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Chrysotile and Amosite by Acid and Heat Treatment

이진호*^{*,**} · 이수현* · 강미혜* · 배일상* · 김익수*

한규문* · 어수미* · 정 권* · 구자용*^{*,†}

Jin Hyo Lee*^{*,**} · Su Hyun Lee* · Mi Hye Kang* · Il Sang Bae* · Ik Soo Kim*

Kyu Mun Han* · Soo Mi Eo* · Kweon Jung* · Ja Yong Koo*^{*,†}

*서울특별시보건환경연구원 대기환경연구부 · **서울시립대학교 환경공학과

*Atmospheric Research Department, Seoul Metropolitan Government

Research Institute of Public Health and Environment

**Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received May 15, 2015; Revised June 15, 2015; Accepted June 26, 2015)

Abstract : This study is purposed to seek the characteristics of both asbestos in accordance with acid and heat treatment for chrysotile and amosite used mainly as building materials. Results of acid treatment, the refractive index, the elongation sign, the extinction of acid-treated chrysotile were mostly similar to those of untreated chrysotile regardless of pH, elapsed time. But the characteristics of acid-treated chrysotile were different from those of untreated chrysotile after 8 weeks, at pH 1.2 acidic solution. When chrysotile treated with acid, weight ratio (%) of O and Mg fluctuated greatly in accordance with acid treatment unlike Si. But the change of constituents ratio (%) was small as time passed after acid treatment. The refractive index, the elongation sign and the extinction of acid-treated amosite were mostly similar to those of untreated amosite regardless of pH, elapsed time. When amosite was treated with acid, weight ratio (%) of Fe slightly increased. But in case of O, a contrary tendency was seen. Results of heat treatment, the higher the temperature, the more increased the refractive index of chrysotile. When chrysotile was heated for 10 minutes at 1,100°C, the elongation sign of chrysotile changed from positive(+) to negative(-). The extinction of chrysotile didn't change apparently in accordance with heat treatment. Also weight ratio (%) of O and Mg fluctuated greatly in accordance with heat treatment unlike Si. The higher the temperature, the more increased the refractive index of amosite. The elongation sign and the extinction of amosite didn't change apparently in accordance with heat treatment. Also weight ratio (%) of O and Fe fluctuated greatly in accordance with heat treatment. But weight ratio (%) of Si and Mg of heated amosite were mostly similar to those of untreated amosite regardless of temperature, heating time.

Key Words : Asbestos, Acid Treatment, Heat Treatment, Polarized Light Microscope (PLM), Scanning Electron Microscope (SEM)

요약 : 본 연구에서는 주로 건축자재에 많이 사용된 백석면과 갈석면을 대상으로 산 및 열처리 과정에 따른 두 석면의 특성변화를 살펴보았다. 연구결과, 산처리 과정에 따른 백석면의 굴절률, 신장부호, 소광특성은 대체로 산처리하지 않은 백석면 초기 특성과 유사하게 나타났지만 pH 1.2의 강한 산성용액에서 8주 경과 후, 미지의 입자가 형성되는 등 백석면 고유의 특성이 소실되었다. 산처리 과정에 따른 백석면 구성성분의 중량비(%)는 규소의 경우, 크게 변하진 않았지만, 산소와 마그네슘의 경우, 중량비(%)가 다소 변동하였다. 갈석면의 경우, 굴절률, 신장부호, 소광특성은 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 갈석면과 동일하게 나타났으며, 갈석면 구성성분의 중량비(%)는 철의 경우, 산처리 과정에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 산소는 이와 반대로 감소하는 경향을 보였고, 규소와 마그네슘은 산처리 전·후 유사하게 나타났다. 열처리 과정에 따른 백석면 굴절률은 온도가 높아질수록 수평방향, 수직방향의 굴절률이 모두 증가하였으며, 신장부호는 1,100°C에서 10분간 가열했을 때 (+)에서 (-)로 변하였고, 소광특성은 변하지 않았다. 열처리 과정에 따른 백석면 구성성분의 중량비(%)는 규소의 경우, 중량비(%)는 크게 변하진 않았지만, 산소와 마그네슘의 경우, 온도별 열처리 과정에 따라 중량비(%)가 크게 변동하였다. 갈석면의 경우, 굴절률은 온도가 높아질수록 수평방향, 수직방향 모두 증가하는 경향을 보였으며, 열처리 과정에서 신장부호 및 소광특성은 변하지 않았다. 갈석면 구성성분의 중량비(%)는 산소와 철의 경우, 온도별 열처리 과정에 따라 중량비(%)가 크게 변동하였지만, 규소와 마그네슘은 전반적으로 온도 및 가열시간과 상관없이 열처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

주제어 : 석면, 산처리, 열처리, 편광현미경, 주사전자현미경

1. 서론

석면은 섬유상 형태를 가지고 있는 ‘규산염 광물류’로서, 석면의 종류는 다양하지만 일반적으로 널리 사용된 사문석 계열의 백석면(Chrysotile)과 각섬석 계열의 갈석면(Amosite),

청석면(Crocidolite), 악티노라이트석면(Actinolite asbestos), 안소필라이트석면(Anthophyllite asbestos), 트레모라이트석면(Tremolite asbestos) 등 2계열 6종으로 구분된다.¹⁾ 석면은 불에 잘 타지 않고 부식과 마찰에 강하며, 방음·단열 효과가 뛰어난 물성을 가지고 있어서 전기 절연재, 방직재, 건축자

* Corresponding author E-mail: jykoo@uos.ac.kr Tel: 02-6490-5460 Fax: 02-6490-5465

재 등 다양한 제품으로 전 세계에서 광범위하게 사용되어 왔다.²⁾ 국내에서도 석면은 1960년대 경제개발과 함께 산업사회에서 광범위하고 대량으로 사용되기 시작하였으며³⁾, 건설 관련 사업이 활발하게 이루어졌던 70년대부터는 공공건물, 학교, 다중이용시설 등의 건축물에도 석면이 널리 사용되었다.⁴⁾ 하지만 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 1급 발암물질로(Group 1) 규정하고 있는 석면이 공기 중으로 방출되었을 경우, 석면입자는 주로 호흡기 경로를 통해 체내로 들어와 폐포의 대식세포(Macrophage, pH 4~4.5)에 섭취되어 점액섬모에 의해 몸 밖으로 배출되기도 하지만, 반대로 폐 조직 깊숙이 이동하거나, 일부는 림프계 조직, 위(Gut, pH 1.2) 등으로 넘어가는 등⁵⁾ 복잡한 메커니즘에 따른 오랜 잠복기를 거쳐 폐암(Lung Cancer), 석면폐증(Asbestosis) 및 중피종(Mesothelioma) 등의 악성질환을 발생시키는 것으로 보고되고 있다.^{6,7)} 또한 석면은 앞서 언급했듯이 다양한 건축물 곳곳에서 사용되었기 때문에 노후화, 주거환경정비 등에 따른 재개발·재건축 사업장, 각종 화재 및 재난현장에서 건축물의 파괴 시 필연적으로 석면이 함유된 비산먼지가 발생하는 등 석면에 의한 건강 피해는 사회적인 문제가 되고 있다.⁸⁾ 특히 화재 및 재난현장에서 석면은 열에 의해 변성되는데, 그 결과 정성분석이 어렵고, 따라서 현장 주변에서 생활하는 시민들과 현장에 출동한 소방대원들이 석면을 포함한 독성물질에 직·간접적으로 노출됨으로써 사고 이후 후유증을 호소하고 있다는 연구결과도 있다.⁹⁾ 이처럼 석면은 생체 내 유입될 경우, 물리화학적 특성과 생체 내 구성성분이 달라질 수 있으며, 또한 화재 등으로 인해 석면이 변성되었을 경우, 정성분석이 어렵고 따라서 신뢰할 수 있는 즉각적인 해결방안을 기대할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 석면의 특성변화에 따른 분석오류 및 이를 통해 발생할 수 있는 석면의 위험성을 줄이고자 주로 건축자재에 많이 사용된 백석면과 갈석면을 대상으로 산 및 열처리 과정에 따른 두 석면의 특성변화를 살펴봄으로써, 다양한 환경조건에서도 신속하고 정확하게 석면을 분석하여 향후 서울시 석면관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료준비

본 연구는 석면분석용 표준물질(six common samples, HSL 037)의 백석면, 갈석면을 이용하여 산 및 열처리에 따른 특성변화를 관찰하였다. 산처리의 경우, 염산(35~37% HCl)을 증류수 50 mL에 첨가하여 pH 4.5와 pH 1.2 산성용액을 각각 제조하였고, 각 용액에 백석면, 갈석면 표준시료를 3 mg 씩 넣고, 1주 후, 4주 후, 8주 후에 각 시험물질의 광학적 특성과 구성성분 변화를 관찰하였다. 그리고 열처리는 백석면의 경우 500℃ 이하에서는 큰 변화가 없기 때문에 온도

Fig. 1. Asbestos reference standards.

Table 1. Details of acid treatment condition

pH	Type	Time (week)		
4.5	Chrysotile	1	4	8
	Amosite	1	4	8
1.2	Chrysotile	1	4	8
	Amosite	1	4	8

Table 2. Details of heat treatment condition

Temp(℃)	Type	Time (min)		
400	Amosite	10	30	60
500		10	30	60
600		10	30	60
700		10	30	60
800		10	30	60
900	Chrysotile	10	30	60
1,000		10	30	60
1,100		10	30	60

조건을 800~1,100℃의 범위에서, 갈석면의 경우 백석면보다 낮은 온도조건에서도 어느 정도 반응이 일어나기 때문에 400~700℃의 범위에서 열처리를 하였다. 열처리 시간은 각 온도에서 10, 30, 60분간 열처리를 하였다.

2.2. 분석방법

본 연구에서는 「폐기물공정시험기준(방법), ES 06305.1 석면·편광현미경법」¹⁰⁾에 따라 각 pH 조건에서 산처리된 그리고 각 온도와 시간에서 회화된 시료에 대해 편광현미경(polarized light microscope, PLM)을 이용하여 굴절률, 신장 부호, 소광현상 등의 광학적 변화를 살펴보았으며, 특히 산처리된 시료의 경우, 입체현미경(stereoscopic microscope, SM)으로 백석면, 갈석면의 형태적 변화를 육안상으로 관찰하였다. 동시에 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 PLM에서 분석된 백석면, 갈석면의 형태 및 화학적 조성을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 편광현미경(DM2500P, Leica, Germany)은 100~400배의 배율을 갖고 있으며, 대물렌즈, 접안렌즈, 십자선 접안렌즈, 분산염색 대물렌즈, 보정판, 재물대, 상·하부 편광판 등으로 구성되어 있으며, 입체현미경(S6D, Leica, Germany)은 6.3~40배의 배율을 갖고 있다. 또한 주사전자현미경(SS-500, Shimadzu, Japan)으로 시료의 미세구조적 특징을 관찰하기 위해서 각

Fig. 2. Stereoscopic Microscope, Polarized light microscope, Scanning light.

각의 시료를 탄소테이프가 부착된 지지대(stub) 위에 올려놓고, 약 8~12 nm 정도의 두께로 백금도금(platinum coating)한 다음 주사전자현미경으로 15 kV에서 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산처리 과정에 따른 백석면 및 갈석면 특성

3.1.1. 백석면 광학적 특성

산처리 과정에 따른 백석면의 굴절률 변화를 Fig. 3과 4에 나타내었다. 산처리하지 않은 백석면 초기 굴절률은 수평방향에서 1.550, 수직방향에서 1.548로 나타났다. 그리고 산처리된 백석면의 굴절률은 수평방향 1.550~1.555, 수직방향 1.547~1.552로 나타나는 등 대체로 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 백석면과 유사하게 나타났다. 하

지만 pH 1.2 산성용액에서 8주 경과 후의 백석면을 편광현미경으로 관찰했을 때, 분산염색 색깔이 수평방향, 수직방향 모두 노란색으로 나타나는 등 백석면의 굴절률을 도출할 수 없었다.

일반적으로 산처리 등 인위적인 영향을 받지 않은 백석면 고유의 신장부호와 소광현상은 각각 (+), 완전 및 평행소광을 한다. 우선 산처리 과정에 따른 백석면의 신장부호 변화를 살펴보면, pH 4.5 산성용액에서는 모든 시료에서 신장부호가 (+)로 나타났지만(Fig. 5), 반면에 pH 1.2 산성용액에서 8주간 산처리한 경우에는 불완전한 신장부호(파란색, 노란색 등 고유 색깔이 뚜렷하게 나타나지 않음) 등 백석면 고유의 신장부호를 뚜렷하게 관찰할 수 없었다(Fig. 6). 하지만 Fig. 7에서 보듯이 소광현상 변화를 살펴보면, pH 1.2 산성용액에서 8주간의 시간을 보내도 각 실험단계에서 소광특성은 변하지 않았다.

Fig. 3. Refractive index ($n_{||}$) of acid-treated chrysotile.

Fig. 4. Refractive index ($n_{\perp}$) of acid-treated chrysotile.

Fig. 5. Chrysotile that is not treated with acid ($\times 100$).

Fig. 6. Acid-treated chrysotile to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 100$).

Fig. 7. Acid-treated chrysotile to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 100$).

3.1.2. 백석면 형태 및 화학적 조성

일반적으로 백석면의 형태는 굴곡이 많고 구불구불하며, 섬유다발의 끝이 분산되어 있는 굴곡진 형태를 보이고 있다. 본 연구에서 입체현미경으로 산처리한 백석면의 형태적 변화를 살펴보면, 산처리하지 않은 백석면의 형태와 거의 동일하게 관찰되었다. 하지만 Fig. 9에서 보듯이 pH 1.2 산성용액에서 8주 경과 후의 백석면의 형태를 살펴보면, 섬유다발의 끝이 서로 엉키면서 마치 입자처럼 형성되어 백석면 주위에 생기는 것을 볼 수 있었다.

산처리 과정에 따른 백석면의 형태 및 화학적 조성을 주사전자현미경을 통해서 살펴보았다. 일반적으로 석면은 천연의 결정형 섬유상 수화규산마그네슘 광물(fibrous hydrated magnesium silicate mineral)로서, 이 중 사문석 계열의 백석면의 화학식은 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ 이다. 우선 백석면의 형태를 살펴보면, Fig. 10과 같이 산처리하지 않은 백석면의 형태는 가늘고 부드러운 솜모양을 띠고 있었지만, 앞서 언급한 것처럼 pH 1.2 산성용액에서 8주 경과 후의 백석면의 형태는 백석면 주위에 미지의 입자들이 생성되는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 11).

산처리 과정에 따른 화학적 조성변화를 Fig. 12와 13에 나타내었다. 우선 산처리하지 않았을 때, 백석면의 중량비(%)는 산소 60.70%, 마그네슘 9.32%, 규소 29.98%로 나타났다. 산처리했을 때, 화학성분의 변화는 일어나지 않았지만, 원소의 중량비(%) 변화를 살펴보면 규소의 경우, pH 1.2 산성

용액에서 8주 경과 후, 16.41%로 중량비(%)가 크게 감소하였다. 하지만 이를 제외하고는 대체로 산처리 과정에 따라 중량비(%)가 크게 변하지 않았다(25.40~30.39%). 이와 달리 산소와 마그네슘의 경우, 산소의 중량비(%)는 다소 줄어 들었으며(pH 4.5, 4주 경과, 최소 38.31%), 동시에 이와 비례하여 마그네슘 중량비(%)는 크게 증가하였다(pH 1.2, 8주 경과, 최대 35.30%). 이러한 결과는 백석면이 각섬석 계열의 석면에 비하여 pH 변화에 따라 마그네슘 변화율이 심하다는 결과¹¹⁾와 어느 정도 일치한다. 하지만 산처리 후 시간경과별 구성성분의 변화는 작게 나타났다.

이처럼 산처리 과정에서 백석면의 화학적 조성의 비율이 변하고, 특히 pH 1.2 산성용액에서 8주간 산처리한 경우에는 더욱 더 강하게 산과의 반응으로 백석면 주위에 미지의 입자들이 생성되었기 때문에 그 결과 굴절률, 분산염색 색깔, 신장 부호 등 백석면 고유의 광학적 특성이 변한 것으로 판단된다.

3.1.3. 갈석면 광학적 특성

산처리 과정에 따른 갈석면의 굴절률 변화를 Fig. 14와 15에 나타내었다. 산처리하지 않은 갈석면 초기 굴절률은 수평방향에서 1.691, 수직방향에서 1.674로 나타났다. 한편 산처리된 갈석면의 굴절률은 수평방향 1.698~1.700, 수직방향 1.681~1.682로 나타나는 등 대체로 pH 및 경과시간과 상관 없이 산처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

백석면과 마찬가지로 산처리 등 인위적인 영향을 받지 않

Fig. 8. Chrysotile that is not treated with acid (×25).

Fig. 9. Acid-treated chrysotile to pH 1.2 for 8 weeks (×25).

Fig. 10. Chrysotile that is not treated with acid (×500).

Fig. 11. Acid-treated chrysotile to pH 1.2 for 8 weeks (×2,000).

Fig. 12. Acid-treated chrysotile for 7 days.

Fig. 13. Acid-treated chrysotile for 8 weeks.

Fig. 14. Refractive index ($n_{||}$) of acid-treated amosite.

Fig. 15. Refractive index ($n_{\perp}$) of acid-treated amosite.

Fig. 16. Amosite that is not treated with acid ($\times 100$).

Fig. 17. Acid-treated amosite to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 100$).

Fig. 18. Acid-treated amosite to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 100$).

은 갈석면 고유의 신장부호와 소광현상은 각각 (+), 완전 및 평행소광을 한다. 산처리 과정에 따른 갈석면의 신장부호 및 소광현상 변화를 살펴보면, Fig. 16과 17에서 보듯이 pH 1.2 산성용액에서 8주간의 시간을 보내도 각 실험단계에서 신장부호는 (+)로 일정하게 나타났으며, 소광특성 또한 변하지 않았다(Fig. 18).

3.1.4. 갈석면 형태 및 화학적 조성

일반적으로 갈석면의 형태는 백석면과 달리 바늘과 같이

날카롭고 곧은 직선형이며 굴곡이 거의 없는 특징을 보이고 있다. 본 연구에서 입체현미경으로 산처리에 따른 갈석면의 형태적 변화를 살펴보면, 산처리하지 않은 갈석면의 형태와 동일하게 관찰되었다.

각섬석 계열의 석면인 갈석면의 화학식은 $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 이다. 본 연구에서 갈석면의 형태는 Fig. 21에서 보듯이 날카롭고 가는 바늘 모양의 뾰족한 형태를 띠고 있으며, 또한 산처리 과정을 거친 후에도 모양이 크게 변화되지 않았음을 확인할 수 있었다(Fig. 22).

Fig. 19. Amosite that is not treated with acid ($\times 25$).

Fig. 20. Acid-treated amosite to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 25$).

Fig. 21. Amosite that is not treated with acid ($\times 500$).

Fig. 22. Acid-treated amosite to pH 1.2 for 8 weeks ($\times 500$).

Fig. 23. Acid-treated chrysotile for 7 days.

Fig. 24. Acid-treated chrysotile for 8 weeks.

산처리 과정에 따른 화학적 조성변화를 Fig. 23과 24에 나타내었다. 우선 산처리하지 않았을 때, 갈석면의 중량비(%)는 산소 31.95%, 규소 28.01%, 철 35.00%, 마그네슘 5.04%로 나타났다. 산처리했을 때, 화학성분의 변화는 일어나지 않았지만, 원소의 중량비(%)는 철의 경우, 산처리 과정에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며(pH 1.2, 8주 경과, 최대 58.32%), 이와 반대로 산소는 감소하는 경향을 보였다(pH 1.2, 8주 경과, 최소 16.60%). 반면에 규소와 마그네슘은 대체로 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

이와 같이 갈석면은 산처리 과정에 따른 광학적 특성과 형태 등이 산처리하지 않을 때와 크게 차이가 보이지 않는 등 전반적으로 백석면보다 산에 좀 더 안정한 것으로 판단된다.

3.2. 열처리 과정에 따른 백석면 및 갈석면 특성

3.2.1. 백석면 광학적 특성

각 온도와 열처리 시간에 따른 백석면의 굴절률 변화를

Fig. 25와 26에 나타내었다. 가열하지 않은 백석면 초기 굴절률은 수평방향에서 1.550, 수직방향에서 1.548로 나타났다. 하지만 Fig. 25와 26에서 보듯이, 가열된 백석면의 굴절률은 수평방향, 수직방향 모두 증가하는 경향을 보였다. 즉, 온도가 높아질수록 수평방향, 수직방향의 굴절률이 모두 증가하였으며, 특히 1,000℃와 1,100℃에서 10분간 열처리했을 때 굴절률이 수평방향은 각각 0.018, 0.025, 수직방향은 각각 0.018, 0.029로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 10분 이후에는 온도에 상관없이 굴절률 변화가 거의 없었다. 따라서 열처리 과정에 따른 백석면의 굴절률 변화는 1,000℃ 이상의 고온에서(최소 900℃가 넘는 고온에서) 가열 후 10분 이전에 결정된다고 판단된다.

앞서 언급했듯이 일반적으로 열처리 등 인위적인 영향을 받지 않은 백석면 고유의 신장부호와 소광현상은 각각 (+), 완전 및 평행소광을 한다. 우선 열처리 과정에 따른 백석면의 신장부호 변화를 살펴보면, 1,000℃에서 60분간 가열했을 때도 신장부호는 (+)로 나타났지만(Fig. 27) 백석면을 1,100

Fig. 25. Refractive index ($n_{||}$) of heated chrysotile.

Fig. 26. Refractive index ($n_{\perp}$) of heated chrysotile.

Fig. 27. Chrysotile that is not heat-treated ($\times 100$).

Fig. 28. Chrysotile heated to 1,100℃ for 10 minutes ($\times 100$).

Fig. 29. Chrysotile heated to 1,100℃ for 60 minutes ($\times 100$).

℃에서 10분간 가열했을 때 수직방향의 굴절률은 1.577로, 수평방향의 굴절률은 1.575로 나타나는 등 신장부호가 (+)에서 (-)로 바뀌었다(Fig. 28). 하지만 Fig. 29에서 보듯이 백석면의 소광현상 변화를 살펴보면, 1,100℃에서 60분간 가열했을 때까지 각 실험단계에서 소광특성은 변하지 않았다.

3.2.2. 백석면 형태 및 화학적 조성

열처리 과정에 따른 백석면의 형태 및 화학적 조성을 주사전자현미경을 통해서 살펴보았다. 가열하지 않은 백석면의 모양은 Fig. 30에서 보듯이 가늘고 부드러운 솜 모양을 띠고 있으며, 또한 열처리 과정을 거친 후에도 모양이 크게 변하지 않았음을 확인할 수 있었다(Fig. 31).

열처리 과정에 따른 화학적 조성변화를 Fig. 32와 33에 나타내었다. 우선 가열하지 않았을 때, 백석면의 중량비(%)는 산소 60.70%, 마그네슘 9.32%, 규소 29.98%로 나타났다. 가열했을 때, 화학성분의 변화는 일어나지 않았으며, 원소의 중량비(%) 변화를 살펴보면 규소의 경우, 온도별 열처리 과정에 따라 중량비(%)는 크게 변하지 않았다(22.16~34.17%). 이와 달리 산소와 마그네슘의 경우, 800℃, 900℃에서 산소의 중량비(%)가 줄어들었으며(1시간 가열 시, 50.40%, 47.51%), 동시에 이와 비례하여 마그네슘 중량비(%)는 크게 증가하였다(1시간 가열 시, 27.44%, 28.98%). 하지만 1,000℃, 1,100℃의 고온으로 올라가게 되면 다시 처음의 화학적 조성과 유사하게 변화되는 등(1시간 가열 시, 10.22%,

10.89%) 다른 원소에 비해 열처리 과정에 따라 마그네슘 변화율이 심하였다. 반면 열처리 시간에 따른 구성성분 변화는 작게 나타났다.

3.2.3. 갈석면 광학적 특성

각 온도와 열처리 시간에 따른 갈석면의 굴절률 변화를 Fig. 34와 35에 나타내었다. 가열하지 않은 갈석면 초기 굴절률은 수평방향에서 1.691, 수직방향에서 1.674로 나타났다. 하지만 가열된 갈석면의 굴절률은 백석면과 마찬가지로 수평방향, 수직방향 모두 증가하는 경향을 보였다. 즉, 온도가 높아질수록 수평방향, 수직방향의 굴절률이 모두 증가하였으며, 특히, 700℃에서 10분간 열처리했을 때 굴절률이 수평방향은 0.014, 수직방향은 0.019로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 60분간 열처리했을 경우에도, 굴절률은 계속해서 수평방향 0.016, 수직방향 0.027까지 증가하는 등 백석면과 달리 10분 이후에도 굴절률이 어느 정도 증가하는 것으로 나타났다.

백석면과 마찬가지로 열처리 등 인위적인 영향을 받지 않은 갈석면 고유의 신장부호와 소광현상은 각각 (+), 완전 및 평행소광을 한다. 열처리 과정에 따른 갈석면의 신장부호 및 소광현상 변화를 살펴보면, Fig. 36과 37에서 보듯이 700℃에서 60분간 가열했을 때까지 각 실험단계에서 신장부호는 (+)로 일정하게 나타났으며, 소광특성 또한 변하지 않았다(Fig. 38).

Fig. 30. Chrysotile that is not heat-treated ($\times 500$).

Fig. 31. Chrysotile heated to 1,100℃ for 60 minutes ($\times 500$).

Fig. 32. Chrysotile heated by temperature for 10 minutes.

Fig. 33. Chrysotile heated by temperature for 60 minutes.

Fig. 34. Refractive index ($n_{||}$) of heated amosite.

Fig. 35. Refractive index ($n_{\perp}$) of heated amosite.

Fig. 36. Amosite that is not heat-treated ($\times 100$).

Fig. 37. Amosite heated to 700°C for 60 minutes ($\times 100$).

Fig. 38. Amosite heated to 700°C for 60 minutes ($\times 100$).

3.2.4. 갈석면 형태 및 화학적 조성

열처리 과정에 따른 갈석면의 형태 및 화학적 조성을 주사 전자현미경을 통해서 살펴보았다. 가열하지 않은 갈석면의 모양은 Fig. 39에서 보듯이 날카롭고 가는 바늘 모양의 뾰족한 형태를 띠고 있으며, 또한 열처리 과정을 거친 후에도 모양이 크게 변화되지 않았음을 관찰할 수 있었다(Fig. 40).

열처리 과정에 따른 화학적 조성변화를 Fig. 41과 42에 나타내었다. 우선 열처리하지 않았을 때, 갈석면의 중량비(%)는 산소 31.95%, 규소 28.01%, 철 35.00%, 마그네슘 5.04%로 나타났다. 열처리했을 때, 화학성분의 변화는 일어나지 않았지만, 원소의 중량비(%)는 산소의 경우, 10분간 가열 시, 온도가 증가할수록 다소 증가하다가(32.61~34.36%), 700°C에서는 크게 감소하였으며(22.80%), 1시간 가열 시에는 온도변화에 따른 일정한 경향을 찾아볼 수 없었다(26.73~35.26%). 하지만 철은 온도 및 가열시간과 상관없이 열처리했을 때, 대체로 증가하는 경향을 보였다(700°C, 10분 가열 시, 최대 44.63%). 반면에 규소와 마그네슘은 전반적으로 온도 및 가열시간과 상관없이 열처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

Fig. 39. Amosite that is not heat-treated ($\times 500$).

Fig. 40. Amosite heated to 700°C for 60 minutes ($\times 500$).

Fig. 41. Amosite heated by temperature for 10 minutes.

Fig. 42. Amosite heated by temperature for 60 minutes.

4. 결론

본 연구에서는 생체 내 유입, 건축물 화재 등 다양한 환경 조건에서 석면이 변성되었을 경우, 정성분석이 어렵고, 따라서 신뢰할 수 있는 즉각적인 해결방안을 기대할 수 없기 때문에 이러한 문제를 해결하고자 주로 건축자재에 많이 사용된 백석면과 갈석면을 대상으로 산 및 열처리에 따른 두 석면의 특성변화를 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 산처리 된 백석면의 굴절률, 신장부호 및 소광특성은 대체로 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 백석면과 유사하게 나타났다. 하지만 pH 1.2 산성용액에서 8주간 산처리한 경우에는 섬유다발의 끝이 서로 엉키면서 마치 입자처럼 형성되어 백석면 주위에 생기는 등 백석면의 형태가 변하였으며, 불완전한 신장부호 등 백석면 고유의 신장부호를 뚜렷하게 관찰할 수 없었다.

2) 산처리 된 백석면의 화학성분 변화는 일어나지 않았다. 원소의 중량비(%)는 규소의 경우, 크게 변하지 않았지만, 산소와 마그네슘의 경우, 산소의 중량비(%)가 다소 줄어들

었으며, 동시에 이와 비례하여 마그네슘 중량비(%)는 크게 증가하였다. 하지만 산처리 후 시간경과별 구성성분의 변화는 작게 나타났다.

3) 산처리 된 갈석면의 굴절률, 소광특성은 백석면과 마찬가지로 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다. 또한 신장부호는 백석면과 달리 pH 1.2 산성용액에서 8주간의 시간을 보내도 각 실험단계에서 (+)로 일정하게 나타났으며, 형태 또한 산처리하지 않은 갈석면의 형태와 거의 동일하게 관찰되었다.

4) 산처리 된 갈석면의 화학성분 변화는 백석면과 마찬가지로 일어나지 않았다. 원소의 중량비(%)는 철의 경우, 산처리 과정에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 산소는 이와 반대로 감소하는 경향을 보였다. 반면에 규소와 마그네슘은 대체로 pH 및 경과시간과 상관없이 산처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

5) 열처리된 백석면의 굴절률은 온도가 높아질수록 수평방향, 수직방향의 굴절률이 모두 증가하였으며 특히, 1,000℃와 1,100℃에서 10분간 열처리했을 때 굴절률이 수평방향, 수직방향 모두 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 신장부호는 1,000℃에서 60분간 가열했을 때까지 (+)로 나타났지만 1,100℃에서 10분간 가열했을 때 (+)에서 (-)로 바뀌었다. 반면 형태 및 소광특성은 각 실험단계에서 변하지 않았다.

6) 열처리 된 백석면의 화학성분 변화는 일어나지 않았다. 원소의 중량비(%)는 규소의 경우, 크게 변하지 않았지만, 산소와 마그네슘의 경우, 800℃, 900℃에서 산소의 중량비(%)가 줄어들었으며, 동시에 이와 비례하여 마그네슘 중량비(%)는 크게 증가하였다. 하지만 1,000℃, 1,100℃의 고온으로 올라가게 되면 다시 처음의 화학적 조성과 유사하게 변화되었다. 반면 열처리 시간에 따른 구성성분 변화는 작게 나타났다.

7) 열처리된 갈석면의 굴절률은 백석면과 마찬가지로 수평방향, 수직방향 모두 증가하는 경향을 보였으며, 특히 700℃에서 10분간 열처리했을 때 굴절률이 수평방향, 수직방향 모두 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 백석면과 달리 10분 이후에도 굴절률이 어느 정도 증가하는 것으로 나타났다. 신장부호는 700℃에서 60분간 가열했을 때까지 (+)로 일정하게 나타났으며, 형태 및 소광특성 또한 변하지 않았다.

8) 열처리 된 갈석면의 화학성분 변화는 백석면과 마찬가지로 일어나지 않았다. 원소의 중량비(%)는 산소의 경우, 10분간 가열 시, 온도가 증가할수록 다소 증가하다가, 700℃에서는 크게 감소하였으며, 1시간 가열 시에는 온도변화에 따른 일정한 경향을 찾아볼 수 없었다. 하지만 철은 대체로 증가하는 경향을 보였다. 반면에 규소와 마그네슘은 전반적으로 온도 및 가열시간과 상관없이 열처리하지 않은 갈석면과 유사하게 나타났다.

최근 학교 및 학원건물, 어린이집, 공원이나 하천의 조경석 등 석면과 관련된 사건들이 언론매체를 통해 보도되면서 일상생활 중 석면노출로 인한 석면의 심각성이 강조되고, 건강피해에 대한 우려가 높아지고 있다. 무엇보다 아직까지 석면함유자재를 사용한 건축물이 상당수 남아있기 때문에 이에 따른 석면에 의한 건강 피해는 사회적인 문제가 될

것이다. 특히 이러한 석면이 생체 내 유입될 경우, 물리화학적 특성과 구성성분이 달라질 수 있으며, 또한 각종 화재 및 재난현장에서 건축물의 파괴 시, 열에 의해 석면의 고유 성질이 변하기 때문에, 정확한 석면분석이 이루어지지 않아 신뢰할 수 있는 즉각적인 해결방안을 기대하기 어렵다. 결국 석면을 포함한 독성물질이 현장 주변에서 생활하는 시민들과 현장에 출동한 소방대원들에게 직·간접적으로 노출될 위험성이 더욱 높아지게 될 것이다. 따라서 본 연구처럼 산 및 열처리 과정에 따른 석면의 특성변화에 관한 연구 등을 활용함으로써 다양한 환경조건에서도 신속하고 정확하게 석면을 분석함으로써 궁극적으로 석면으로 인한 시민 건강 피해 예방 및 불안감을 해소시킬 수 있을 것이다.

KSEE

References

1. Korea Occupational Safety and Health Agency, "How to manage asbestos-containing building,"(2012).
2. Kim, H. W., "Asbestos Content in Friable Sprayed-on Surface Material and Airborne Fiber Concentrations in Commercial Buildings," *Korean Ind. Hyg. Assoc. J.*, **5**(2), 137~146(1995).
3. Oh, S. M., Shin, Y. C., Park, D. Y., Park, D. U. and Chung, K. C., "A Study on Worker Exposure Level and Variation to Asbestos in Some Asbestos Industries," *Korean Ind. Hyg. Assoc. J.*, **3**(1), 100~109(1993).
4. Kim, G. Y., Kim, S. Y., Hwang, J. H. and Lee, E. Y., "Airborne Fiber Concentrations in Asbestos Removal Work by Building Materials Types," In Proceeding of the 46th Meeting of KOSAE, KOSAE, Seoul, p. 542(2008).
5. Oze, C. and Solt, K., "Biodurability of chrysotile and tremolite asbestos in simulated lung and gastric fluids," *Am. Mineral.*, **95**, 825~831(2010).
6. Artvinli, M. and Bais, Y. I., "Malignant mesotheliomas in a small village in the Anatolian region of Turkey," *An Epidemiol. Study JNCI*, **63**, 17~22(1979).
7. Christopher, B. M., Val, V. and Brooke, T. M., "Diseases caused by asbestos: mechanisms of injury and disease development," *Int. Immunopharmacol.*, **2**, 191~200(2002).
8. Lee, J. H., Lee, S. H., Kim, J. Y., Kim, J. H., Chung, S. N., Kim, J. A., Oh, S. R., Kim, I. S., Shin, J. H., Eo, S. M., Jung, K. and Lee, J. S., "A Study on the Efficient Measurement of Airborne Asbestos Concentrations at Demolition Sites of Asbestos Containing Buildings, etc. in Seoul," *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, **24**(2), 113~121(2014).
9. Robert, P. N., Malcolm, R., Gordon, L. N., Charles, W. A., Jeffrey, P. O., Stanislav, G. D., Bertram, P. and Richard, W., "Risk Assessment for Asbestos-Related Cancer from the 9/11 Attack on the World Trade Center," *J. Occup. Environ. Med.*, **47**, 817~825(2005).
10. Ministry of Environment, "Official Waste Test Method,"(2011).
11. Chung, Y. H. and Han J. H., "Assessment of Acid Solubility Test on Korean Asbestos by Transmission Electron Microscope Equipped with Energy Dispersive X-ray Spectrometer," *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, **24**(2), 146~151(2014).