

결합제로서 가능성 있는 새로운 작용기를 갖는 Aminosilane 제조에 관한 연구(I)

한 정식

A Study on the Preparation of new Functionalized Aminosilanes as a Promising Coupling Agent(I)

J. S. Han

ABSTRACT

Using Michael Reaction, commercially available 3-aminopropyltrimethoxysilane and N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine were reacted with various Michael acceptors, ethyl acrylate, acrylonitrile, acrylamide, 2-cyanoethyl acrylate, 2-hydroxyethyl acrylate and 3-(trimethoxysilyl)propylmethacrylate, to the new aminosilanes. All compounds which are [3-(N-2-carboethoxyethyl)aminopropyl] triethoxysilane, [3-(N-2-cyanoethyl)aminopropyl] triethoxysilane, [3-(N-di-2-carboethoxyethyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-cyanoethyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-hydroxyethoxy propionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-2-amidoethyl)aminopropyl]triethoxysilane, {3-[N-(N-di-2-cyanoethyl)ethyl]aminopropyl}triethoxysilane and {3-[N-(3-trimethoxysilylpropyl)-2-methylpropionyl]aminopropyl}triethoxysilane were successfully prepared in 35-70% yields and which were identified with $^1\text{H-NMR}$ and FT-IR spectroscopy.

초 록

Michael Reaction을 이용하여 상업적으로 이용 가능한 APS(3-aminopropyltrimethoxysilane)과 AEAPS(N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine)을 다수의 Michael acceptor(ethyl acrylate, acrylonitrile, acrylamide, 2-cyanoethyl acrylate, 2-hydroxyethyl acrylate 그리고 3-(trimethoxysilyl)propylmethacrylate)와 반응시켜 10 종류의 aminosilane ([3-(N-2-carboethoxyethyl)aminopropyl] triethoxysilane, [3-(N-2-cyanoethyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-carboethoxyethyl)

aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-cyanoethyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-di-2-hydroxyethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane, [3-(N-2-amidoethyl)aminopropyl]triethoxysilane, {3-[N-(N-di-2-cyanoethyl)ethyl]aminopropyl}triethoxysilane, {3-[N-(3-trimethoxy-silylpropyl)-2-methylpropionyl]aminopropyl}triethoxysilane 등을 35~70% 수율로 제조하였으며, 이들의 구조는 ¹H-NMR과 FT-IR spectroscopy를 이용하여 확인하였다.

1. 서 론

유기 작용기를 갖는 silane은 오랜 역사동안 여러 분야에서 다양하게 사용되어 왔는데 예를들면, 접착력 증진을 위한 첨가제, fiber glass와 고분자 사이의 기계적 성질을 높히기 위한 결합제(coupling agents) 그리고 금속 산화물의 coating agents 등으로 유용하게 이용되었다. 최근에는 로켓 추진제의 기계적 성질이나 연소특성 등을 개선하기 위하여 여러종류의 silane화합물이 이용/연구되고 있으며 이중의 일부를 소개하면 다음과 같다. AP(ammonium perchlorate)를 산화제로 사용하는 추진제에서 AP를 aminosilane과 반응시켜 AP의 ammonia를 amine기로 치환시킨 다음 물로 처리하면 alkoxy silane이 가수분해되어 siloxane기로 변화되고 이를 액체 propellant binder에 적용하면 wettability가 증가되고 이렇게하여 제조된 추진제는 aminosilane으로 처리하지 않은 AP를 사용하였을 때 보다 향상된 기계적 성질과 연소 특성을 나타냄을 보고하였다⁽¹⁾. 산화제로서 AP 자체만 사용했을 경우, 무기물인 silica(Cab-O-Sil)를 첨가했을 경우 그리고 aminosilane으로 coating한 AP를 사용했을 때를 각각 비교하면, silica를 aminosilane량 만큼 첨가했을 때는 burning rate slope "n"가 90%정도 증가하나, aminosilane으로 coating한 AP를 사용했을 때는 195%가 증가하였으며 기계적 성질도 향상되었다. HMX나 RDX와 같은 nitramine계열의 산화제의 경우에도 결합제로서 aminosilane 또는 다른 유기 작용기를 갖는 silane을 사용함으로서 기계적 성질, 수분에 대한 특성(water resistance), 열적 안정성 등이 현저히 향상되는 것으로 나타났다^{(2),(3)}. 또한 당 연구실에서 여러종류의 silanes을

추진제에 적용한 결과 기계적 성질은 물론 추진제의 제조공정상에서 우수한 특성을 보여주었다⁽⁴⁾.

본 연구는 기존의 aminosilane구조에 새로운 작용기(functional group)를 도입함으로서 결합제로서의 역할을 증대시키거나, 제조공정의 편이성과 같은 추진제 제조시 수반되는 일련의 문제점(점도 상승으로 인한 충진의 어려움, 산화제와 바인더의 결합력 약화로 인한 추진제의 기계적 성질 저하 등)을 보다 효율적으로 해결하기 위한 목적으로서 추진제에서의 silane의 작용 메카니즘을 고려하여, 이에 효과적이라고 판단되는 새로운 작용기를 갖는 화합물을 제조하고자 한다.

2. 실험

본 연구에 사용된 물질들은 반응에 사용하기 전에 증류하거나 재결정화하여 사용하였으며 각각의 물성은 다음과 같다. 3-aminopropyltriethoxysilane, bp 217°C, ethyl acrylate, bp 99°C, N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine, bp 146°C/15mm, acrylonitrile, bp 77°C, acrylamide, bp 125°C/25mm, 2-cyanoethyl acrylate, bp 108°C/12mm, 2-hydroxyethyl acrylate, bp 90~92°C/12mm, 3-(trimethoxysilyl)propylmethacrylate, bp 190°C, acrylamide mp 84~86°C. 사용된 용매는 다음과 같은 방법으로 전조하여 반응에 이용하였다. methylene chloride과 acetonitrile은 CaH₂를 가하고 24시간 환류시킨 다음 증류하여 사용하였고, toluene은 무수인산을 넣고 환류시킨 다음 증류하였다. n-Hexane은 CaCl₂를 가하고 환류시킨 다음 증류하여 사용하였고, THF는 benzoquinone/Na

metal 조건하에서 24시간 환류시킨 다음 증류하여 사용하였다. 반응의 진행정도는 Merck TLC (Kieselgel 60 F₂₅₄)를 이용하여 ninhydrin용액으로 발색시켜 반응을 monitoring 하였고, 반응후 생성물의 분리는 Merck silica-gel(70~230mesh)를 이용한 column chromatography와 진공증류 방법을 이용하였고, eluent로는 n-Hexane/ethyl acetate 또는 methylene chloride/MeOH 혼합물을 사용하였다. 분리된 생성물은 ¹H-NMR과 FT-IR를 사용하여 구조를 확인하였다. ¹H-NMR spectrum은 Brucker FT-NMR spectrometer 200AC model(200MHz)를 이용하여 측정하였으며, TMS(tetrame-thylsilane)를 internal standard로 사용하여 각 peak를 s(singlet), d(doublet), t(triplet), m(multiplet)으로 표시하였다. IR spectrum은 BIO-RAD Division의 FTS-60 spectrophotometer를 이용하여 측정하였고, 각 peak를 s(strong), m(medium), w(weak)로 표시하였다.

[3-(N-2-carboethoxyethyl)aminopropyl]triethoxysilane (1)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 ethyl acrylate 3.0g (30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 전조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.99g 를 62%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2900(s), 1720(s), 1220(m), 950(m) cm⁻¹
¹H-NMR(CDCl₃) δ 0.62(t, 2H), 1.25(q, 12H),
 1.50(br s, 1H), 1.60(m, 2H), 2.53(t, 2H),
 2.65(t, 2H), 2.87(t, 2H), 3.82(q, 6H),
 4.15(q, 2H)

[3-(N-2-cyanoethyl)aminopropyl]triethoxysilane(2)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g

(10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 acrylonitrile 1.6g (30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 전조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.3g를 63%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 2210(s), 1220(m), 980(m) cm⁻¹
¹H-NMR(CDCl₃) δ 0.65(t, 2H), 1.25(q, 9H),
 1.42(br s, 1H), 1.61(m, 2H), 2.52(t, 2H),
 2.65(t, 2H), 2.93(t, 2H), 3.83(q, 6H)

[3-(N-di-2-carboethoxyethyl)aminopropyl]triethoxysilane(3)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 ethyl acrylate 3.0g (30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 60°C에서 10시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 전조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 2.15g 를 52%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2900(s), 1720(s), 1220(m), 950(m) cm⁻¹
¹H-NMR(CDCl₃) δ 0.61(t, 2H), 1.25(q, 15H),
 1.80(br s, 1H), 1.55(m, 2H), 2.43(t, 6H),
 2.78(t, 4H), 3.85(q, 6H), 4.13(q, 4H)

[3-(N-di-2-cyanoethyl)aminopropyl]triethoxysilane(4)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 acrylonitrile 3.0g (60mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 60°C에서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고

감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 2.13g를 65%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 2210(s), 1220(m), 980(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.65(t, 2H), 1.25(q, 9H),
 1.61(m, 2H), 2.52(t, 4H), 2.65(t, 2H), 2.93(t, 4H),
 3.83(q, 6H)

[3-(N-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane(5)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 2-cyanoethyl acrylate 3.75g(30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(10/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.56g를 45%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 2210(s), 1730(s), 1220(m), 980(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.60(t, 2H), 1.25(t, 9H), 1.55(m, 2H),
 1.85(br s, 1H), 2.48(m, 4H), 2.75(m, 4H),
 3.83(t, 6H), 4.32(t, 2H)

[3-(N-di-2-cyanoethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane(6)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 2-cyanoethyl acrylate 7.50g(60mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 60°C에서 10시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.89g를 40%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 2210(s), 1730(s), 1220(m), 980(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.65(t, 2H), 1.25(q, 9H), 1.53(m, 2H),
 2.50(m, 6H), 2.75(m, 6H), 2.83(t, 6H), 3.83(t, 4H)

[3-(N-di-2-hydroxyethoxypropionyl)aminopropyl]triethoxysilane(7)의 제조

hoxysilane(7)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 2-hydroxyethyl acrylate 3.5g(30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(10/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.59g를 35%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 1710(s), 1220(m), 980(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.62(t, 2H), 1.25(q, 9H),
 1.55(m, 2H), 2.53(m, 6H), 2.79(t, 4H),
 2.87(t, 2H), 3.85(m, 10H), 4.25(m, 4H)

[3-(N-2-amidoethyl)aminopropyl]triethoxysilane(8)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)과 acetonitrile 30ml를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 acrylamide 2.0g(28mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(10/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 고체 형태의 목적물 0.91g를 32%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 3300(m), 1680(s), 1600(m), 1430(m),
 950(w) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.62(t, 2H), 1.24(q, 9H),
 1.60(m, 2H), 2.25(br s, 1H), 2.42(t, 2H),
 2.60(t, 2H), 2.75(t, 2H), 3.83(m, 9H)

[3-[N-(N-di-2-cyanoethyl)ethyl]aminopropyl]triethoxysilane(9)의 제조

정제된 N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylene-diamine 2.2g(10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 acrylonitrile 6.0g(110mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 20시간 동안 반응시켰다.

반응물을 김압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(10/1)-용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 김압 농축시킨 다음 건조시켜 환색 oil 형태의 목적 물 2.13g를 65%의 수율로 얻었다.

IR(neat) 2950(m), 2210(s), 1220(m), 980(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.63(t, 2H), 1.57(m, 2H),
 1.85(br s, 1H), 2.48(m, 4H), 2.65(dd, 2H),
 2.76(t, 2H), 2.96(t, 2H) 3.59(s, 9H)

{3-[N-(2-trimethoxysilyl)ethyl]methacryl}aminopropyl triethoxysilane(10)의 제조

정제된 3-aminopropyltriethoxysilane 2.2g (10mmol)를 50ml round bottom flask에 넣고 상온(25~28°C)에서 교반하면서 3-(trimethoxysilyl) propylmethacrylate 7.45g(30mmol)를 서서히 가한 다음 질소 분위기를 유지하면서 60시간 동안 반응시켰다. 반응물을 감압하에 농축시켜 휘발성 물질을 제거한 다음 MC/MeOH(20/1)용매를 이용하여 silica-gel column chromatography하여 생성물을 분리하고 감압 농축시킨 다음 건조시켜 흰색 oil 형태의 목적물 1.27g를 27%의 수율로 얻었다.

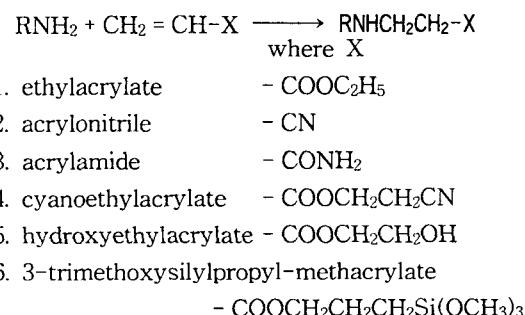
IR(neat) 2900(s), 1720(s), 1220(m), 950(m) cm^{-1}
 $^1\text{H-NMR}(\text{CDCl}_3)$ δ 0.71(m, 4H), 1.25(m, 2H),
 1.82(m, 5H), 1.93(d, 3H), 3.57(s, 9H),
 3.85(q, 6H), 4.13(t, 2H)

3. 결과 및 검토

일반적으로 추진제에서 결합제는 filler로 사용되는 여러가지 산화제(AP, ammonium nitrate, RDX, HMX 등)와 binder 사이의 결합력을 증가시키는 역할을 하는데 산화제와 binder의 종류에 따라 여러종류의 결합제가 사용되고 있다⁽⁵⁾. 이들 결합제들의 구조를 크게 분류하면, 화학적 반응을 통하여 새로운 결합을 할 수 있는 작용기를 갖지고 있거나, 2차적인 결합(수소 결합, acid-base interaction, wetting and surface energy effect 등)을 할 수 있는 구조 등으로 분류할 수 있는데

amine-silane의 경우에는 amine기의 basicity와 nucleophilicity에 따른 화학 반응 및 2차적 결합에 의한 효과(acid-base interaction, 기존 binder network에 형성된 수소결합의 완화) 그리고 alkoxy silane의 가수분해 후 생성된 silanol기에 의한 수소결합 및 siloxane형성 반응 등이 결합제 또는 물성 개선제로서 역할에 크게 기여하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 aminosilane의 alkoxy기를 유지하면서 amine기에 새로운 작용기를 가지는 치환기를 도입함으로서 추진제에서 binder와 filler사이의 결합력에 어떤 영향을 미치는지를 알아보고자 ester, nitrile, hydroxy, amide 등의 작용기를 기존의 aminosilane에 도입하였다. 이와같은 새로운 작용기를 포함하는 aminosilane의 제조에 관한 보고는 거의 발표되고 있지 않으므로 일반적인 제조 반응을 기초로 하여 본 연구에 적합한 제조 조건을 개발하게 되었다.

Amino silanes의 amine기는 보통의 amine기보다는 반응성이 낮지만 활성화된 이중결합과 반응하여 functional-alkylated aminosilane를 얻을 수 있었다.



3-Aminopropyltriethoxysilane과 N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine를 출발물질로 하여 여러 가지 활성화된 이중결합과 반응시켜 functional-alkylated aminosilane를 얻을 수 있었는데 반응조건에 따라 monoalkylated, dialkylated 생성물을 얻을 수 있었다. 반응은 toluene, MC, acetonitrile, THF 등을 사용하거나 용매없는 조건(neat)하에서 실시하였으며, acetonitrile과 같은 극성 용매를 사용하거나 반응온도가 낮은 경우에는

Table. 1. 새로운 Silanes 제조 조건 및 결과

	mole ratio	용 매	반응온도(°C)	반응시간(HR)	수율(%)	상 태
silane 1	APS/EA (1/3)	neat	rt	20	62	액 체
silane 2	APS/AN (1/3)	neat	rt	20	63	액 체
silane 3	APS/EA (1/3)	neat	60	10	52	액 체
silane 4	APS/AN (1/6)	neat/MC	60	10	65	액 체
silane 5	APS/CEA (1/3)	neat	rt	20	45	액 체
silane 6	APS/CEA (1/6)	neat/MC	60	10	40	액 체
silane 7	APS/2-HEA (1/3)	neat/toluene	rt	20	35	액 체
silane 8	APS/AA (1/3)	acetonitrile	rt	20	32	고 체
silane 9	AEAPS/AN (1/10)	neat/MC	rt	20	65	액 체
silane 10	APS/TMSPMA(1/3)	neat/MC	rt	60	27	액 체

* APS(3-aminopropyltriethoxysilane), EA(ethylacrylate), AN(acrylonitrile), AEAPS(N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]ethylenediamine), CEA(cyanoethylacrylate) 2-HEA(2-hydroxyethylacrylate), TMSPMA(3-trimethoxysilylpropylmethacrylate) AA(acrylamide)

mono-alkylated 생성물이 주생성물이 되고, 비극성 용매를 사용하거나 반응온도가 높을때에는 di-alkylated 생성물을 주로 얻을 수 있었다. Di-amino silane인 AEAPS인 경우에는 2차 amine보다 1차 amine의 반응성이 높아 말단에 존재하는 1차 amine에서 반응이 주로 이루어지는 것으로 판단된다. Alkoxy silane의 alkoxy기는 수분에 민감하여 상온에서도 수분이 존재하면 쉽게 분해되므로 전조된 용매를 사용하였으며 질소 또는 알곤가스 하에서 반응을 진행하여 가수분해를 최대한으로 억제하였다. 이상과 같은 조건하에서 반응을 진행시킨 결과를 요약하면 표 1과 같다.

생성물의 분리/정제는 진공증류나 silica-gel column chromatography를 이용하였는데, 대부분의 경우에 진공증류 중에 생성물이 분해되는 현상이 발생하여 silane 1과 silane 2 이외에는 진공증류방법으로 생성물을 얻을 수 없었는데, 이는 가혹한 조건(150°C 이상)하에서 생성물이 열에 의한 2차반응을 하여 변화된것으로 판단된다. Column chromatography방법으로 생성물을 분리하면 예상보다 수율이 낮아지는 경향이 나타나는데, 이는 분리 도중에 생성물이 silica-gel에 의하여 alkoxy기

중 일부가 가수분해되어 전체적으로 생성물의 수율이 저하 되었다.

4. 결 론

산(acid), 염기(base) 및 수분에 쉽게 분해되는 성질을 갖는 alkoxyaminosilane 화합물을 활성화된 이중결합을 포함하고 있는 Michael acceptor와 반응시켜 ester, ni trile, hydroxy, amide와 같은 새로운 작용기를 포함하고 있는 새로운 aminosilanes 10종류를 제조하였다. 본 연구에서 개발된 반응조건 및 분리/정제 방법을 이용하면 유사한 silane제조에 매우 유용할 것으로 판단되며, 이와같이 개발된 화합물의 결합제 및 공정 개선제로서의 효과를 알아보기 위하여 추진제에 적용할 계획이다.

후 기

이 논문을 완성하는데 기기분석에 도움을 준 서태석씨를 비롯한 연구실 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Russel Reed, Jr. et al., "Siloxane coated Ammonium Perchlorate and Propellant Compositions made Therewith", US Patent 4, 124, 418, 1978
2. John F. Kincaid, et al., "Bonding Agent for HMX", US Patent 4, 350, 532, 1978
3. An-Lu Leu. et al.. "The Effects of Silane Coupling Agent on the Improvement of Thermal Stability and Mechanical Properties of HTPB/HMX Composite System" 21th International Annual Conference of ICT 1990, 101-1
4. Unpublished results
5. Adolf E. Oberth, "Principles of Solid Propellant Development" 1987, 6-14