

연구논문

주조공정 설계를 위한 자연주물사와 인공주물사의 열물성 시험

남정호* · 이병준* ·곽시영***†

*한국생산기술연구원 스마트액상성형연구부

**과학기술연합대학원대학교 Kitech 스텔 융합제조시스템 공학(산업소재 및 스마트제조전공)

Thermal Property Test of Natural Sand and Artificial Sand for the Design of Casting Process

Jeong-Ho Nam*, Byoung-Jun Lee* and Si-Young Kwak***†

*Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Siheung 11358, Republic of Korea

**Department of Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Republic of Korea

초 록

최근에는 주조업계의 중요한 과제로써 산업폐기물 저감 과 대기환경 개선이 부각되고 있다. 종래의 주물사 사용 시 발생하는 문제점 해결과 주조공장의 환경개선을 위해 천연사를 대체 적용할 수 있는 다양한 인공사가 개발되어 사용되고 있다. 하지만 해외 공급사에서 제공하는 제한된 물성만 알려져 있고 기존 자연사와의 심층적인 비교분석이 부족하다. 또한 주조 공정 설계를 위해서는 상온뿐만 아니라 고온에서의 넓은 범위의 열물성이 확보 되어야 하며, 또한 열물성이 달라지면 주조방안 설계의 변화가 일어나야 하기 때문에 기존 자연사와 인공사의 열물성 차이를 비교 분석하는 건 중요하다. 본 연구에서는 자연사와 인공사를 바인더와 결합한 주형블럭에서의 열전도도, 비열, 열팽창 시험을 수행하였으며 실험 결과 열전도도는 자연사에 비해 인공사가 구성성분에 따라 5~40% 높았으며 열팽창계수는 인공사가 15%정도 낮았다. 하지만 비열은 구성성분에 상관없이 큰 차이가 없었다.

핵심용어; 열물성치, 인공사, 열팽창계수, 열전도도, 비열.

Abstract

Reducing industrial waste and improving the atmospheric environment recently have emerged as important tasks for the casting industry. Various types of artificial sand that can replace natural sand have been developed and used to solve problems that arise with the use of conventional foundry sand and to improve the foundry environment. However, only limited physical properties provided by overseas suppliers are known and in-depth comparative analyses with existing natural sand are lacking. For the design of the casting process, a wide range of thermal properties must be secured not only at room temperature but also at high temperatures. In addition, it is important to compare and analyze the differences in thermal properties between existing natural and artificial sand because changes in thermal properties require changes in the design of the casting method. In this study, the thermal behavior of the mold was analyzed through a thermal expansion test of mold blocks for natural and artificial sand. To this end, a thermal property test to evaluate thermal conductivity was performed by determining a temperature range. The results of the experiment, revealed that the thermal conductivity was 5-40% higher in artificial sand than in natural sand, and the coefficient of thermal expansion was about 15% lower for artificial sand. However, there was not a significant difference in specific heat regardless of the composition.

Key words; Thermal property, Artificial sand, Casting analysis, Thermal conductivity and Specific heat capacity.

-남정호, 이병준: 연구원, 곽시영: 수석연구원

Received: Oct. 26, 2023 ; Revised: Nov. 7, 2023 ; Accepted: Nov. 28, 2023

†Corresponding author: Si-Young Kwak (KITECH)

Tel: +82-31-8084-8812

E-mail: vlvwlv@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2024. Vol. 44 No. 1, pp. 3~8

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2024.44.1.3>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근에는 구조업계의 중요한 과제로써 산업폐기물 저감 과 대기환경 개선이 부각되고 있다. 종래의 주물사 사용 시 발생하는 문제점 해결과 구조공장의 환경개선을 위해 천연사를 대체 적용할 수 있는 다양한 인공사가 개발되어 소개 되고 있다 [1].

또한 최근 자연사의 무분별한 채취와 남용을 막기 위해 국내뿐만 아니라 해외도 자연사의 수출입이 제한되는 추세에 따라 주물사의 수급문제를 해결하기 위해 인공적으로 만들어진 모래의 적용이 구조분야에서도 요구되고 있다. 그리고 인공사가 자연사를 대체함에 따라 기존 제품에 대한 구조방안 설계의 변경 등 후속적인 조치가 요구되고 있다.

기존 연구는 자연사의 물성치에 대한 연구를 수행하였으나 온도에 따른 물성치 확보에 부족했고 또한 다양한 인공사의 물성치는 확보 역시 부족하였다 [1-3]. 정확한 구조 공정 해석을 위해서는 상온뿐만 아니라 고온에서의 넓은 범위의 열물성이 확보 되어야 한다.

하지만, 금속물질과 달리 시편을 가공하기 힘들고 주형을 제작하는 과정에서 바인더 등을 포함함으로써 고온에서 바인더가 타면서 붕괴되고 가스를 발생시킴으로써 고가의 측정장비를 훼손할 우려가 있어 각 시험기관에서 시험을 꺼리는 것이 현실이다.

본 연구에서는 주형 블록의 열팽창 시험을 거쳐 주형의 열적 거동을 분석하고 이에 따라 시험기기에 손상을 주지 않은 온도 범위를 결정하여 열전도도 등의 열물성 시험을 수행하였다. 열팽창 시험결과는 약 500도 근처에서 인공사 주형이 급격히 수축하면서 약화 되었으며 이로 인하여 열전도는 500도까지 측정되었다. 열전도도는 레이저 플래시법 (LFA, Laser Flash Apparatus) 방법으로 측정되었으며 비열은 DSC (Differential Scanning Calorimeter) 장비를 활용하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험대상과 설계

본 논문에서는 여러 종류의 인공사에 대한 기본적인 열물성치를 조사 분석하는 것이 목표이므로 다음과 같이 시험을 실시하였다.

1) 자연사와 인공사 열물성치 시험 및 비교

비교 대상 주물사는 다음과 같이 선정하였으며 시편은 후란바인더를 이용하여 각 시험에서 요구하는 시편크기에 맞추어 주형 블록을 제작하였다.

- 자연사 : 호주산
- 인공사 : S-Pearl, CPS-1, CPS-2

또한 시험대상 물성치 종류는 기본적인 구조공정 설계에 필요한 열전도도, 비열, 밀도, 열팽창 계수를 측정 비교하였다.

2) 인공사 소재 상태에 따른 열물성치 특성 분석

- 자연사는 거의 규사 (SiO₂) 로 구성되어 있으나 인공사는 산화알루미늄 및 규사 등 다양한 성분들이 혼합되어 있으며 구조에서는 주물사를 바인딩하여 사용하게 된다. 그러므로 인공사의 열물성 분석에서 소재상태에 따른 열물성 특성을 분석하였다.

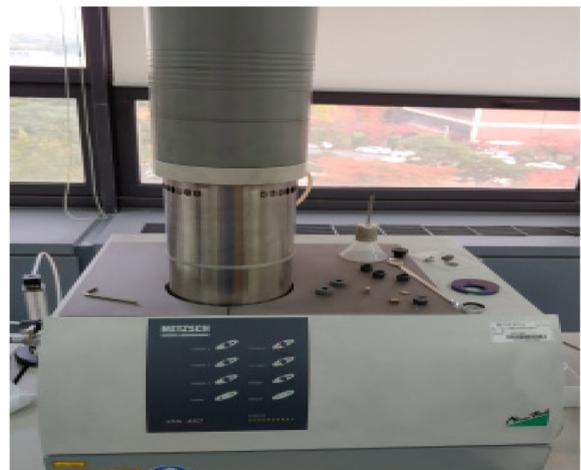
비교대상은 호주산 자연사와 s-pearl 인공사를 선정하였으며 소재상태는 다음과 같이 구별하였다.

- 주물사의 구성원소의 열물성 특성
- 바인딩하지 인공사 자체의 열물성 특성
- 바인더로 접합된 주물사 블록의 열물성 특성 (후란 바인더)

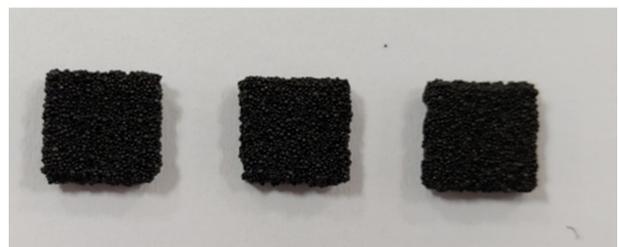
2.2 열전도도

열물성 분석은 시편제작용 주형을 제작하고 각 주물사에 대해 후란 바인더로 시편을 제작하였다. 시편 사이즈는 10 mm × 10mm × 3 mm 이며 Fig. 1은 열전도도 측정장비와 실제 시편이다.

열전도도의 측정은 LFA (Laser Flash Apparatus)를 사용하였다. 측정원리는 모든 물질은 온도가 상승하면 적외선이 발생하므로 측정물질에 대해 레이저로 온도를 올리면서 방출되는 적외선을 검출하여 열전도를 평가하게 된다. 정확히는 열확산도를 측정하고 밀도와 측정된 비열을 이용하여 열전도도를 산출한다.

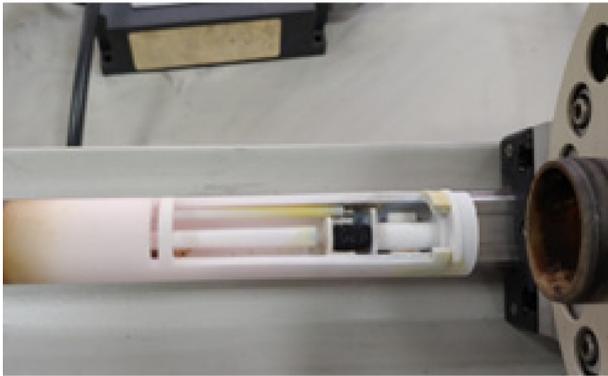


(a) LFA467(Netzch, Germany)

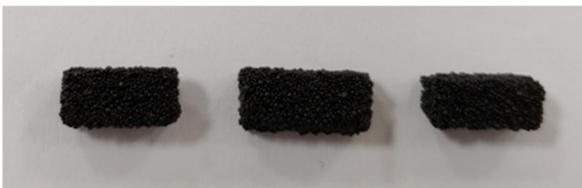


(b) specimen holder and specimens

Fig. 1. LFA measuring device and specimen holder.



(a) DIL 402(Netzch, Germany)



(b) Specimens

Fig. 2. Thermal expansion test device and specimens shape.

2.2 비열 및 밀도

비열의 측정은 시차주사열량계 (DSC, Differential Scanning Calorimeter)를 사용하였다. 측정원리는 기준물질 (에메랄드)의 온도를 조절된 프로그램에 따라 변화시키면서 측정물질의 기준물질에 대한 에너지 (ΔH)를 온도의 함수로 측정한다. 측정은 Netzch사의 DSC 200 F3 Maia를 활용하였다.

2.3 열팽창 계수

Fig. 2은 열팽창 시험 모습이다. 측정온도는 알루미늄 주조 시 주입온도 750도까지 측정하였다. 시편은 그림과 같이 5 mm × 5 mm × 10 mm 이고 시험장치는 Netzch 의 DIL 402 모델이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열전도도

열전도 측정 결과 Fig. 3 그래프에 나타내었다. 인공사의 열전도는 자연사에 비해 빠르며 인공사 중에서는 S-pearl이 CPS보다 열전도도가 높았다. 열전도는 S-Pearl > CPS-2 > CPS-1 > 자연사 (호주산) 의 경향을 보였고 온도별로 S-Pearl이 약 0.51~0.55 W/mK 이고 가장 낮은 자연사는 0.35~0.38 W/mk이다.

인공사를 구성하는 구성성분인 SiO₂의 열전도는 1~10 W/mk, Al₂O₃의 열전도는 24~39 W/mk (Netzch사 자료 [4])로 알려져 있으며 Table 1의 인공사의 성분을 표기한 바와

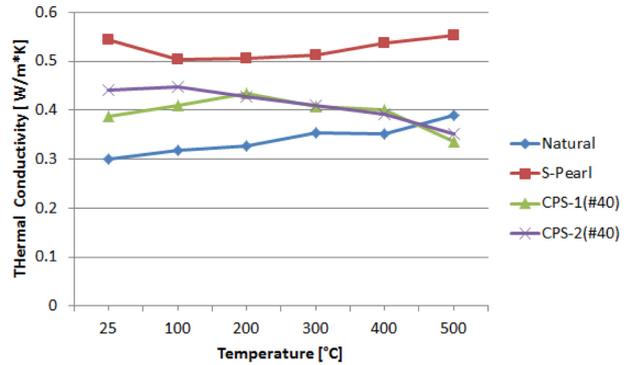


Fig. 3. Thermal conductivity of each casting sand according to temperature.

Table 1. Main ingredients for each casting sands

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Other
S-Pearl	72.03	19.95	2.76	3.31	Na ₂ O, CaO, MgO, K ₂ O
CPS-1	>45.0	<52.0	<3.0	<1.5	<2.5
CPS-2	>50.0	<47.0	<1.5	<1.5	<2.0

같이 Al₂O₃의 성분이 높은 S-pearl의 열전도도가 제일 빠르고 SiO₂가 주요 요소인 자연사는 열전도도가 가장 낮은 것으로 판단된다. 하지만 일단 입자화 되고 입자 사이에 바인더를 통해서 열전달이 이루어지므로 원소재와 같은 큰 차이를 보이지는 않았다.

3.2 비열

Fig. 4와 같이 비열은 주물사에 상관없이 큰 변화가 없었다. 구성성분인 SiO₂의 비열은 0.75 J/gK 이고 Al₂O₃의 비열은 0.77 J/gK (Netzch사 자료 [4])이므로 주물사의 성분의 차이가 있어도 비열은 큰 차이가 없는 결과를 보여 주었다.

상기 그래프의 데이터를 Table 2에 구성성분 값과 같이 정리하였다.

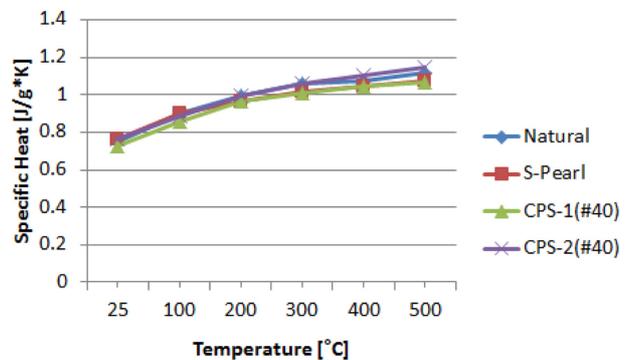


Fig. 4 Specific heat of the casting sands according to the temperature.

Table 2. Specific heat properties for each sands for mold

	Natural sand (Australia)	S-Pearl	CPS-1	CPS-2	Chemical substance (reference)
Specific heat	0.75~1.118	0.76~1.073	0.729~1.065	0.764 ~1.143	SiO ₂ (0.75J/gK) Al ₂ O ₃ (0.77J/gK)

Table 3. The density of each sands for mold

	Natural sand (Australia)	S-Pearl	CPS-1	CPS-2
Density when measuring thermal conductivity	1.26 (30 mm × 30 mm × 30 mm block)	1.664	1.369	1.498
reference	-	1.91~2.05	1.4~1.6	1.40~1.65

Table 3은 열전도 측정 시편에서의 밀도값을 나타내었다. 측정 결과 인공사 제조업체에서 제공하는 참고자료와 유사함을 알 수 있었다. 자연사의 경우는 30 mm × 30 mm × 30 mm의 주형 블록에서 측정하였다.

3.4 열팽창률 (열팽창계수)

Fig. 5과 같이 인공사의 열팽창률이 자연사에 비해 현저히 작은 것을 알 수 있다. 온도에 따른 거동은 자연사는 거의 600도 까지 열팽창이 지속적으로 이루어지나 인공사의 경우 팽창-수축-팽창을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 S-Pearl 의 경우 350도와 600도 구간에서 급격한 수축과 팽창을 보인다. 반면 CPS-1 과 CPS-2의 경우는 온도에 따라 지속적으로 팽창하였고 그 차이도 비교적 적었다.

주조공정 설계를 위한 해석에서는 열팽창률보다 열팽창계

수를 사용하므로 Table 4에 열팽창률과 열팽창계수를 같이 정리하였다.

Table 4. Thermal expansion properties of each sands for mold

	Thermal expansion rate (*e ⁻³)	Thermal expansion coefficient (*e ⁻⁶ /K)
Natural sand (Australia)	0.0 ~ 5.6	3.6 @~500 °C 38 @500~600 °C -10 @600~700 °C
S-Pearl	0.4 ~ -0.7	1.43 @~300 °C -4.7 @300~550 °C 6.2 @550~700 °C
CPS-1	0.0 ~ 3.8	4.6 @30~550 °C
CPS-2	0.0 ~ 3.0	4.4 @30~550 °C

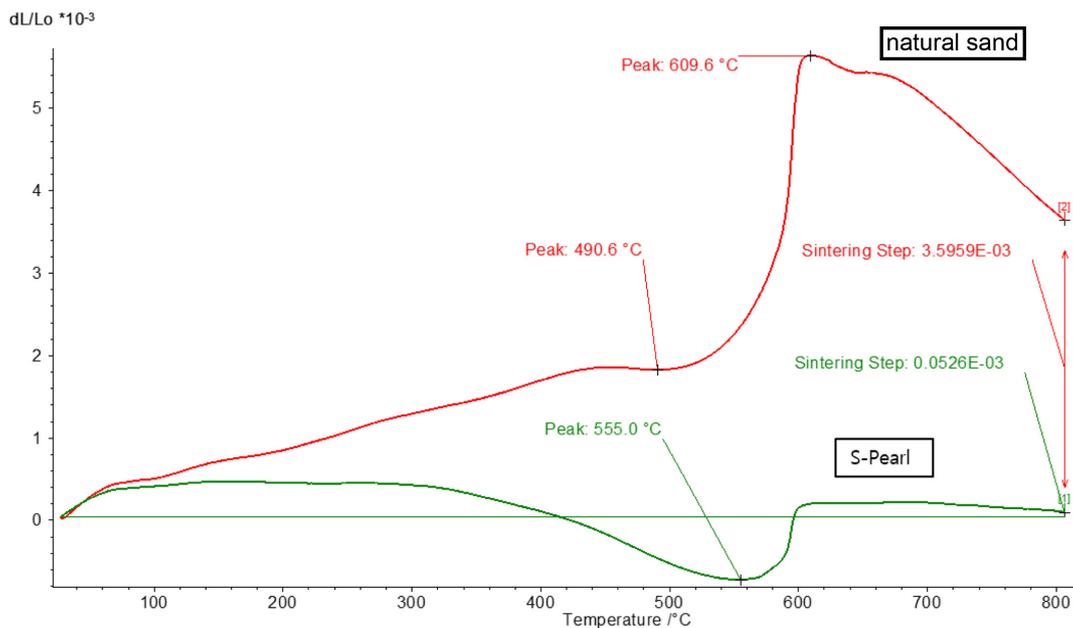


Fig. 5. Thermal expansion rate of natural sand and S-Pearl according to temperature.

Table 5. The thermal properties of mold block and casting sand

	Moldblock		Casting sand(without binder)		
	natural sand (Australia)	S-Pearl	natural sand	S-Pearl	Chemical substance (reference)
specific heat	0.74~1.124	0.75~1.075	0.73~1.095	0.784~1.073	Al ₂ O ₃ (0.77) SiO ₂ (0.75)
thermal conductivity (W/mK)	0.31~0.039	0.51~0.55	0.035~0.057	0.055~0.075	Al ₂ O ₃ (24~39) SiO ₂ (1~11)

Table 6. The thermal properties of each sands

	natural sand (Australia)	S-Pearl	CPS-1	CPS-2	reference
specific heat [J/g*K]	0.75~1.118	0.76~1.073	0.729~1.065	0.764~1.143	0.75~1.1
thermal conductivity [W/m*k]	0.31~0.39	0.51~0.55	0.39~0.34	0.44~0.35	0.53
density [g/cm ₃]	1.012	1.664	1.369	1.498	1.4~2.0
thermal expansion coefficient [*e-6/K]	3.6 @~500 38 @500~600 -10 @600~700	1.43 @~300 -4.7 @300~550 6.2 @550~700	4.6	4.4	CPS : 4.5~6.5

3.5 인공사 소재 상태에 따른 열물성치 특성 분석

인공사의 소재 상태에 따른 열물성치 시험은 제약이 많이 따른다. 일반적인 비열시험은 주물사 입자상태와 바인더 블록 상태를 시험 가능하나 열팽창계수는 바인더를 이용하여 형상을 만들어야 하기 때문에 입자상태는 시험을 할 수 없었다. 열전도도 측정도 어려움이 있었으나 흑연으로 만들어진 특수한 홀더를 활용하여 입자상태에서의 열전도도 측정하였다.

Table 5는 몰드 블록 상태와 주물사의 상태에 따라 측정 결과를 정리하였다.

주형의 비열 측정된 결과 S-Pearl은 0.75~1.075 J/gk, 자연사는 0.74~1.124 J/gk로 측정 되었고 주물사 입자상태는 자연사 인공사 모두 0.73~1.095의 범위를 나타내었다. 입자사이에 상호 경계면을 통해 열이 전달되는 열전도와 달리 비열은 각 입자가 열을 받아 열을 전달하는 성질이므로 바인더 상태인 블럭이나 입자분말상태 관계없이 큰 차이가 나지 않았다.

열전도는 입자 상태와 바인더에 의한 결합상태인 주형 블록에서의 값이 10배까지 차이를 보였다. 열전도도는 입자사이의 경계면을 통해 전달되는데 바인더로 결합시에는 열전달의 통로가 생겨 열전도도가 10배까지 증가하는 것을 알 수 있다.

각 주물사에 따른 각종 열물성치는 Table 6에 정리하였다.

5. 결 론

자연사와 인공사의 열물성치를 비교해 본 결과 결론은 다

음과 같다.

1) 열전도는 S-Pearl < CPS-2 < CPS-1 < 자연사 (호주산)의 경향을 보였다. 그 크기는 가장 빠른 S-Pearl 이 약 0.54 W/mK 이고 가정 낮은 자연사는 0.31 W/mK 이다. 열전도는 주물사의 다짐정도와 바인더 양에 큰 영향을 받으므로 이에 대한 시험 및 연구가 향후 추가로 이루어져야 할 것이다.

2) 비열은 0.75~1.1 J/g*K 로 자연사, 인공사 등 종류에 상관없이 서로 차이가 거의 없었다.

3) 열팽창계수는 자연사와 인공사의 열전도도, 비열과 달리 열팽창에서는 큰 차이를 보이며 온도와 인공사의 종류에 따라 수축과 팽창을 다르게 하였다.

SiO₂가 주성분인 자연사에 비해 Al₂O₃의 비중이 더 큰 인공사에서는 열전도도 및 열팽창 정도가 다르고 이로 인하여 기존의 자연사와 다른 구조 특성을 보인다. 또한 인공사의 종류는 다양할 뿐만 아니라 신사와 재생사에 따라 다르므로 향후 추가적인 반복실험을 통하여 더 정확한 통계를 낼 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원의 “최대 노출온도 1350°C인 철광플랜트 소결광대차의 적층제조특화설계 주형을 활용한 핵심부품 구조 및 모듈화 제조기술 개발(S3276714)” 사업의 일환으로 연구되었습니다.

References

- [1] G.S. Kim, J.H. Kim, M.J. Kim, J.T. Kim, K.M. Kwon and S.G. Kim, J.Korea Foundry Society, **43**(3) (2023) 107..
- [2] I.S. Cho, J.H. Nam, K.D.Saveliyev, V.M.Golod and H.S. Kim, J.Korea Foundry Society, **43**(4) (2023) 194.
- [3] B.J. Lee and I.S. Cho, J.Korea Foundry Society, **38**(2) (2018) 41.
- [4] NETZSCH, Equipment brochure “Thermal Analysis Mass Spectrometer Capillary Coupling”, <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermogravimetric-analysis/>