



고온을 받은 고강도 콘크리트의 고온특성에 관한 시간-온도관계 분석

Time-temperature Analysis of High-strength Concrete Exposed to High Temperatures

권기석* · 권오상**

Kwon, Kiseok*, and Kweon, Ohsang**

Abstract

After a building fire, damages suffered by the structure are evaluated to determine whether the building remains suitable for use. It is vital for fire damage evaluation to be performed quickly and precisely. In addition, it is necessary to thoroughly analyze concrete degradation, which is influenced by heating time and heating temperature. In this study, high-strength concrete was heated at 400, 500 and 600 °C for 30, 60, 90, and 120 minutes respectively, to analyze the high-temperature characteristics of high-strength concrete in relation to heating temperature and heating time. Results indicate that the residual cleavability tensile strength of the concrete decreased by 6% at 400 ~ 500 °C, and 46% at 500 ~ 600 °C. Moreover, microstructure analysis showed that the decomposition of calcium hydroxide at 600 °C increased rapidly from the 60-minute point.

Key words : Concrete, High Temperature, Repair, Reinforcement, Fire Damage Assessment

요 지

건축물에 화재가 발생하는 경우 구조체의 화재피해 정도를 조사하여 건축물의 재사용 여부를 결정하게 되는데, 화재피해 정도를 신속하고 정확하게 조사하는 것이 매우 중요하다. 또한, 고온에 의한 콘크리트의 열화는 가열온도와 가열시간의 영향을 받으며, 이에 대한 면밀한 분석이 요구된다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 400, 500, 600 °C의 온도에 각각 30, 60, 90, 120분 가열하여 가열온도와 시간에 따른 고온특성 분석을 수행하였다. 그 결과, 잔존할렬인장강도는 400~500 °C에서 6%, 500~600 °C에서 46% 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 미세성분 분석 결과 600 °C로 가열하는 경우 90분을 기점으로 수산화칼슘의 분해가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트, 고온, 보수보강, 화재진단평가

1. 서 론

화재는 건축물에 있어 빈번하게 발생하는 사회 재난이다. 화재가 발생하는 경우 인명피해, 재산피해를 동반하기 때문에 화재를 예방하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 화재는 예측할 수 없는 사회재난이기 때문에 화재가 발생하더라도 그 피해를 최소화 할 수 있는 연구가 필요하다.

한편, 건축물에 화재가 발생하는 경우 구조체의 화재피해 정도를 조사하여 건축물의 재사용 여부를 결정하게 되는데, 화재피해 정도를 신속하고 정확하게 조사하는 것이 매우 중요하다.

콘크리트 구조물은 화재가 발생하는 경우 구조체가 고온에 노출되며, 콘크리트는 물리·화학적 변화를 통해 구조적 내력을 상실하게 된다. 특히 콘크리트의 압축강도가 높을수록 공극구조

*교신저자, 정회원, 한양대학교 건축시스템공학과 박사과정(Tel: +82-31-369-0523, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: kskwonn@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D Candidate, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

**한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

는 치밀해지는데, 이에 따라 고온에 더욱 취약해진다.

경화콘크리트의 주요 구성성분은 크게 규산칼슘 수화물과 수산화칼슘, 탄산칼슘 등으로 나눌 수 있다. 그 중 강알칼리성을 띠는 수산화칼슘은 콘크리트 내에서 부동태피막을 형성하여 콘크리트 내 철근의 부식을 방지하는 역할을 한다. 일반적으로 콘크리트의 pH는 12.5 이상의 강알칼리성이지만 어떤 이유로든 pH가 낮아지는 경우 콘크리트 내 부동태피막이 파괴되며, 이에 따라 철근이 부식되고 구조적 결함이 동반되기 때문에 콘크리트에 있어 수산화칼슘은 내구성 측면에서 매우 중요하다.

콘크리트의 중성화는 수산화칼슘이 분해되어 강알칼리성을 잃는 현상이며, 일반적인 상태에서는 장기간에 걸쳐 공기 중의 CO₂와 반응하여 탄산칼슘이 생성되면서 중성화되지만 화재와 같이 콘크리트가 고온에 노출되는 경우에도 중성화 현상이 발생한다. 수산화칼슘은 고온에 노출되면 Eq. 1에 나타낸 바와 같이 약 450~550 °C에서 분해되어 CaO와 H₂O가 생성된다. 수산화칼슘의 분해는 결정의 크기에 의해 분해속도가 다르며, 300~400 °C 온도를 장시간 유지하면 서서히 진행(Shin et al., 2008)되는 것으로 알려져 있다.



기존 연구에서는 화재피해를 입은 콘크리트의 한계온도에 대한 연구가 다수 진행되었다. Ma et al. (2015)은 선행연구자들의 고온을 받은 콘크리트의 잔존압축강도 데이터를 수집하여 분석하였다. 고온을 받은 콘크리트는 300 °C를 기준으로 압축강도가 서서히 감소하며, 800 °C 이상이 되면 거의 대부분의 압축강도를 상실하는 것으로 나타났다.

Kim et al. (2010)은 일반강도 및 고강도 콘크리트를 대상으로 사전재하유무에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 연구하였다. 그 결과 약 400 °C까지는 압축강도에 큰 변화가 나타나지 않았으며 400 °C 이상에서 압축강도가 급격하게 저하되는 것으로 나타났다.

International Tunnel Association (ITA, 2004)에서는 다양

한 실험을 통해 콘크리트의 한계온도를 380 °C로 제안하고 있다. 콘크리트의 경우, 열용량이 크기 때문에 화재를 진압한 뒤에도 콘크리트 내부 온도는 지속적으로 상승하며 콘크리트 온도가 380 °C가 되는 시점에서 압축강도가 큰 폭으로 떨어지기 때문이다.

Kwon (2015)의 연구에서 콘크리트 시료를 500, 600 °C의 온도로 각각 1, 2, 3시간동안 가열한 후 TG-DTA를 통해 수산화칼슘 정량 분석을 실시하였다. 그 결과 수산화칼슘이 모두 분해되는데 걸리는 시간은 500 °C로 가열한 경우 약 3시간, 600 °C로 가열한 경우 약 2시간이 소요되는 것으로 나타났다.

Sim (2018)의 연구에서는 화재피해를 입은 콘크리트의 수열온도를 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방법을 개발하기 위해 티타늄 금속의 변색특성을 활용한 연구를 수행하였다. 실제 내부 온도센서를 통해 측정된 온도와 티타늄 금속의 변색 상태를 비교한 결과 약 20 °C 이내의 차이를 보이는 것으로 나타나 매우 높은 상관관계를 나타냈다.

본 연구에서는 화재 시 건축물의 피해정도를 신속하고 정확하게 진단하기 위한 연구로써 전기로 가열 실험 및 미세성분 분석을 통해 가열시간 및 가열온도에 따른 고강도 콘크리트의 고온특성에 관한 연구를 진행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법에 따라 Φ100 × 200 mm 시험체를 제작하였으며, 양생방법은 표준양생을 실시하였다.

제작된 시험체는 전기로를 사용하여 가열하였으며, 이때 가열조건은 목표온도 도달까지 걸리는 시간의 영향을 최소화하기 위해 전기로의 내부온도를 목표온도까지 사전 가열하여 400, 500, 600 °C로 각각 30, 60, 90, 120분간 가열하였다.

미세 성분분석을 위한 시료는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 Φ100 × 200 mm 시험체를 5 mm 두께로 자른 후 위와 동일한

Table 1. The List of Changes Taking Place in Concrete During Heating (I. Hager, 2013)

Temperature range (°C)	Changes
20 ~ 200	slow capillary water loss and reduction in cohesive forces as water expands; 80~150 °C ettringite dehydration; C-S-H gel dehydration; 150~170 °C gypsum decomposition (CaSO ₄ · 2H ₂ O); physically bound water loss
300 ~ 400	approx. 350 °C break up of some siliceous aggregates (flint); 374 °C critical temperature of water
400 ~ 500	460~540 °C portlandite decomposition Ca(OH) ₂ → CaO + H ₂ O
500 ~ 600	573 °C quartz phase change β - α in aggregates and sands
600 ~ 800	second phase of the C-S-H decomposition, formation of β-C ₂ S
800 ~ 1000	840°C dolomite decomposition; 930~960 °C calcite decomposition CaCO ₃ → CaO+CO ₂ , carbon dioxide release; ceramic binding initiation which replaces hydraulic bonds

조건으로 가열하여 제작하였다. 이는 실험체의 크기가 큰 경우 시험체 표면과 중심부의 온도차이가 매우 크게 나타나기 때문에 열전도 시간에 따른 온도차를 최소화하기 위하여 시료 두께를 가능한 한 얇게 제작하였다.

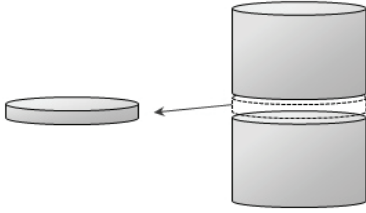


Fig. 1. Sample Preparation Method

2.2 콘크리트 배합 및 사용재료

본 연구에서 사용된 콘크리트 배합을 Table 2에 나타냈다. 콘크리트의 목표 압축강도는 60MPa로 설정하였으며, 물시멘트비 26.9%, 잔골재율 46.3%로 배합하였다. 배합에 사용된 결합재는 국내 S사의 제품으로 KS L 5201 (포틀랜드 시멘트)에 적합한 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 사용 시멘트의 물리·화학적 성질은 Table 3과 같다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 콘크리트의 고온특성을 규명하기 위해 콘크리트 공시체 가열실험 및 할렬인장강도 측정, SEM를 활용한 미세구조분석, XRF를 활용한 성분 분석을 수행하였다.

콘크리트 공시체 가열실험은 $\Phi 100 \times 200$ mm 시험체의 중심부에 K-Type 열전대를 설치하여 400, 500, 600 °C의 온도로 120분간 시험체 중심부의 온도 이력을 측정하였으며, 가열종료 후 할렬인장강도를 측정하였다.

한편, 가열온도 및 시간에 따른 미세구조의 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM; Fig. 2)을 활용하여 미세구조 분석을 실시하였으며, 400, 500, 600 °C로 각각 60분, 120분 가열한 시료를 대상으로 비교분석하였다. 분석 시 배율은 시료의 균열상태 유무를 확인하기 위해서 1,000배율로 확대하여 관찰하였다.



Fig. 2. Scanning Electron Microscope (SEM)

콘크리트 시료의 정량분석을 위한 화학분석방법 중 X선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometer; XRF; Fig. 3)는 전처리 과정이 간단하고 재현성이 좋은 결과를 얻을 수 있어 광범위하게 활용되고 있다. 수산화칼슘은 450 ~ 550 °C에서 CaO + H₂O로 분해되기 때문에 XRF 분석을 통해 CaO의 부피비율을 측정하여 콘크리트의 고온특성을 분석하고자 하였다. XRF 시험장비의 기본값은 XGT 10 μ m, 전압은 30kV으로 설정하여 실험을 진행하였다.



Fig. 3. X-ray fluorescence spectrometer (XRF)

Table 2. Concrete Mix Proportion & Compressive Strength

W/c	S/a	Unit Volume Weight (kg/m ³)								SP	Compressive Strength (MPa)	
		W	B	C	BS	FA	SF	S	G		7days	28days
26.9	46.3	167	620	620	-	-	-	718	839	8.06	57.6	73.7

Table 3. Physical and Chemical Properties of Ordinary Portland Cement (type 1)

Mechanical properties			Chemical composition (%)					
Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Ignition loss (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.14	3,419	0.79	22.0	5.27	3.44	63.4	2.13	1.96

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔존할렬인장강도

고강도 콘크리트의 잔존할렬인장강도를 측정한 결과를 다음 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 가열온도가 증가함에 따라 잔존할렬인장강도는 감소하였으며, 그 감소폭은 400~500 °C에서 6%, 500~600 °C에서 46%로 나타나 가열온도 500 °C 이상에서 급격한 강도저하가 나타나는 것이 확인되었다.

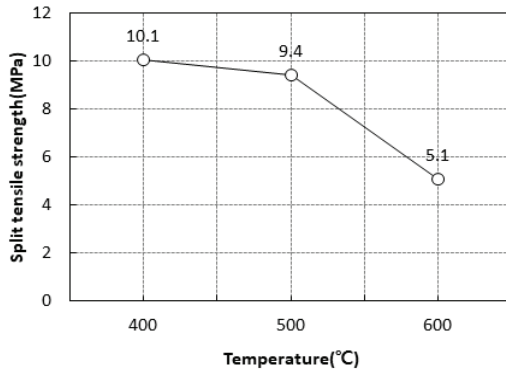


Fig. 4. Result of Split Tensile Strength Test

3.2 온도이력

고강도 콘크리트 가열실험의 실험체 중심부 온도 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. 400 °C로 가열한 경우 최종온도가 231 °C로 가열온도인 400 °C와 169 °C의 차이가 발생하였으며, 500°C로 가열한 경우 약 152 °C, 600 °C의 경우 그 차이가 약 136 °C인 것으로 나타나 가열온도가 증가함에 따라 가열온도와 최종온도와의 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

즉 가열온도가 증가할수록 온도상승의 속도는 가속화되는 것을 의미한다. 이는 실험체의 외부의 온도가 상승함에 따라 내외부 온도차가 발생하게 되고 이에 따른 열응력이 미세균열을 발생시켜 온도상승이 가속화된 것으로 판단된다.

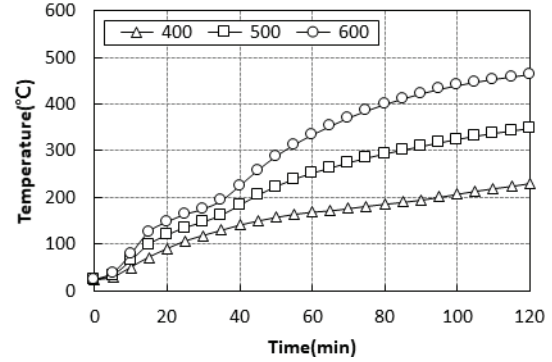


Fig. 5. Temperature History of Specimens

한편, 가열시작 약 5분 경과 후 온도상승속도가 증가하는 변곡점이 관찰되었다. 이는 실험체를 승온시간 없이 목표온도로 직접 가열함에 따른 열충격에 의한 것으로 판단된다.

3.3 SEM

콘크리트 실험체의 표면을 SEM으로 촬영한 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 가열하지 않은 상태의 실험체와 400 °C, 500 °C, 600 °C로 각각 60분, 120분 가열한 실험체를 대상으로 1,000배율 확대 촬영하였다. 그 결과, 가열하지 않은 실험체의 표면은 조직구조가 치밀하여 미세한 균열이 거의 나타나지 않은 반면, 가열온도 및 가열 시간이 증가할수록 미세균열의 양과 크기 등이 증가되는 것을 정성적으로 확인하였다.

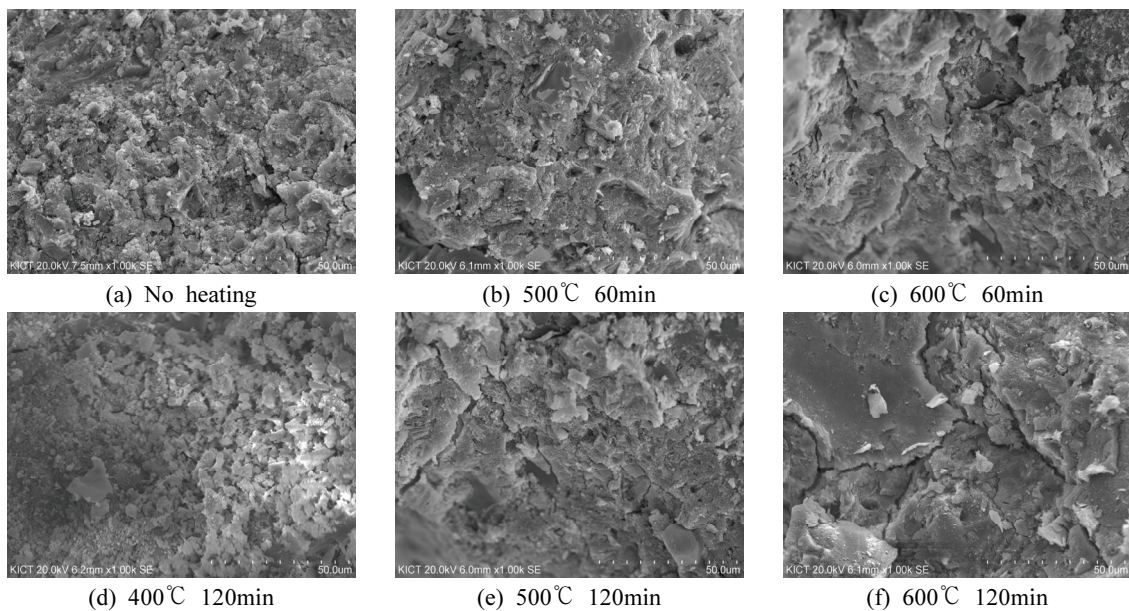


Fig. 6. Scanning Electron Microscope (x1,000)

3.4 XRF

콘크리트 시료를 각각 400, 500, 600 °C로 각각 30, 60, 90, 120분 가열한 시료를 대상으로 가열온도 및 가열시간에 따른 성분변화를 알아보기 위해 XRF를 통해 성분분석을 수행하였다.

가열하지 않은 상태의 시료를 분석한 결과 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 SiO₂의 비율이 52.1%로 나타나 가장 높았으며, 그 외 구성비율은 CaO 33.7%, Fe₂O₃ 5.1%, K₂O 4.8%, Al₂O₃ 4.3%인 것으로 나타났다.

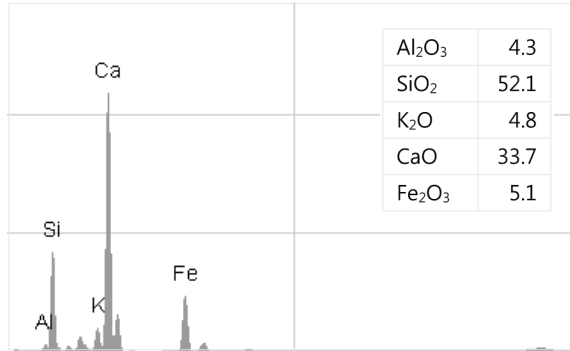
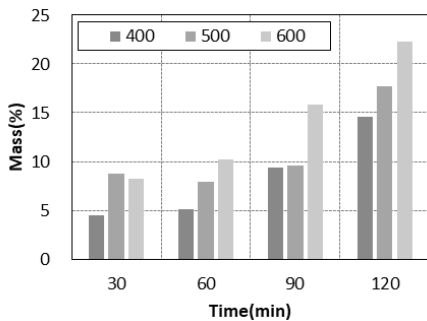
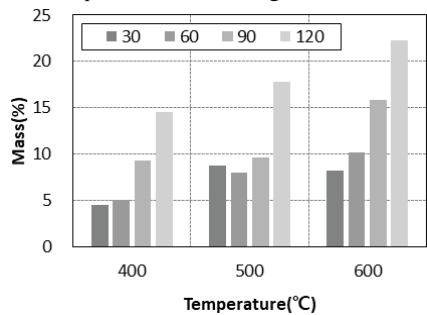


Fig. 7. The Composition Ratio of Non-heating Specimen (%)

본 연구에서는 가열에 의한 CaO의 생성량을 비교분석하기 위해 가열 후 시료의 CaO 질량비에서 가열 전 시료의 CaO 질량비를 뺀 나머지를 CaO 생성량으로 가정하여 Fig. 8에 나타냈다.



(a) Relationship Between Heating Time and Mass (%)



(b) Relationship Between Heating Temperature and Mass (%)

Fig. 8. The amount of CaO produced

Fig 8에 나타낸 바와 같이 가열시간과 가열온도가 증가함에 따라 전체 성분 중 CaO가 차지하는 비율이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 400, 500 °C의 온도에서 60분 이내로 가열한 경우는 CaO의 생성량이 미미한 것으로 나타났으나, 600 °C로 가열하는 경우 90분을 기점으로 CaO의 생성량이 현저히 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 고온을 받은 고강도 콘크리트의 고온특성에 관한 시간-온도 관계를 알아보고자 가열시간 및 온도에 따른 고온특성 변화 및 미세성분을 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트의 잔존할렬인장강도는 약 500~600 °C의 온도구간에서 약 46%의 강도감소가 나타나 화재피해 진단 시 이를 고려하여, 500 °C 이상의 온도에 노출된 콘크리트는 재사용이 불가능할 것으로 판단된다.
- (2) 콘크리트의 가열온도가 증가할수록 내외부 온도차에 의한 열팽창으로 인해 균열이 발생하며, 이에 따라 콘크리트 중심부의 온도상승은 가속화된다.
- (3) 콘크리트 내 수산화칼슘의 분해는 400~500 °C 범위에서는 다소 분해시간이 느리며, 600 °C 이상에서 활발하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 각각의 온도로 가열시 90분을 기점으로 CaO의 생성량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원 (18AUDP-B100356-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Architectural Institute of Japan. (2009). *Diagnosis and repair methods of fire-damaged buildings* (S.B. Kim, S.K. Choi, and S.H. Han, trans.). Seoul: Kimoondang, pp. 30.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 61, No. 1, pp. 145-154.
- Hertz, K.D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 103-116.
- ITA (International Tunneling Association). (2004) *Guidelines for structural fire resistance for road tunnels*. Working Group No.6 Maintenance and Repair.

Kim, H.Y. (2003). An experimental study on the mechanical properties of high strength concrete at high temperature. Ph.D. dissertation, Konkuk University.

Kwon, K.S. (2015). *Experimental study on the fire resistance properties of high strength concrete with the types and replacement ratio of mineral admixture*. Master's thesis, Daejin University.

Li, M., Qian, C.X., and Sun, W. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1001-1005.

Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., and He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 371-383.

Phan, L.T. (1996). Fire performance of high strength concrete:

A report of the state of the art. NISTIR 5934, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

Shin, S.W. et al. (2008). *Fire safety design guidelines of high strength concrete structures*. Seoul: Architectural Institute of Korea.

Sim, S.R. (2018). *Development of a method for estimating concrete hydrothermal temperature of fire-damaged building structures by using titanium metal*. Master's thesis, Daejin University.

<i>Received</i>	November 13, 2018
<i>Revised</i>	November 15, 2018
<i>Accepted</i>	November 21, 2018