

# 동적 모델링에 의한 수소 충전 시에 걸리는 시간의 산출

노상균<sup>†</sup>

동양대학교 컴퓨터소프트웨어학과

## Estimation of Hydrogen Filling Time Using a Dynamic Modeling

SANGGYUN NOH<sup>†</sup>

Department of Computer Software, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju 36040, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author:  
sgnoh@dyu.ac.kr

Received 3 June, 2021  
Revised 24 June, 2021  
Accepted 24 June, 2021

**Abstract >>** A compressed hydrogen tank is to be repressurized to 40 bar by being connected to a high-pressure line containing hydrogen at 50 bar and 25°C. Hydrogen filling time and the corresponding hydrogen temperature has been estimated when the filling process stopped according to several thermodynamic models. During the process of cooling the hydrogen tank, hydrogen temperature and pressure vs. time estimation was performed using Aspen Dynamics. Filling time, hydrogen temperature after filling hydrogen gas, cooling time and the final tank pressure after tank filling process have been completed according to the thermodynamic models are almost same.

**Key words:** Hydrogen filling(수소 충전), Hydrogen cooling(수소 냉각), Dynamic modeling(동적 모델링), Thermodynamic models(열역학 모델), Equations of state(상태방정식)

### 1. 서론

초기에 1 bar와 25°C 상태에 놓여 있는 외부와 단열되어 있는 수소저장 탱크에 50 bar의 일정한 고압으로 연결된 파이프라인을 통해서 수소를 충전하는 과정에서 충전 시간에 따른 수소저장 탱크 내부의 수소기체의 온도와 압력의 변화과정은 기본적으로 동적 모델링을 통해서 구현이 가능하다<sup>1)</sup>. 일반적으로 탱크 안으로 고압의 수소가스를 주입하는 과정은 순식간에 이루어지므로 외부와 열교환을 무시할 수 있기 때문에 단열과정이라고 가정할 수 있다. 따라서

탱크 내부의 수소기체의 온도는 압력과 함께 수소를 주입하는 과정 동안에 상승하게 된다.

50 bar와 25°C로 일정하게 유지되는 수소기체를 10 kg/h의 일정한 질량 유량으로 직경이 0.25 m이며, 높이는 1 m인 타원형 수직형 탱크에 수소를 주입하였다. 본 연구에서는 탱크 내부의 온도와 압력이 시간이 지남에 따라서 어떻게 상승하는지에 대해서 동적 모사기와 몇 가지 열역학 모델식을 통한 비교 연구를 수행하였다. 탱크 내부의 수소기체의 압력이 초기에 설정한 저장압력인 40 bar까지 가압하게 되면 일반적으로 탱크 내부의 수소기체의 온도는 상온보

다 더 높아지게 된다. 충분한 시간이 흘러서 탱크 내부의 수소기체의 온도가 상온이 되면 수소기체의 압력은 충전이 완료되었을 때의 압력인 40 bar보다 낮아지게 된다. 본 연구에서는 탱크 내부의 수소기체의 온도가 상온까지 냉각되었을 때 탱크 내부의 수소기체의 압력이 얼마까지 떨어지겠는가를 추산하고자 한다.

본 연구에서 사용한 전산모사기는 정상상태 화학공정 모사기로 AVEVA 사(Cambridge, UK)의 Aspen Plus V11.2를 사용하였으며, 동적 모사기로는 역시 AVEVA 사의 Aspen Dynamics V11.2를 사용하였다<sup>2,3)</sup>.

한편 열역학 모델식 간의 동적 모사 결과의 비교를 위해서 Peng-Robinson 상태방정식<sup>4)</sup>, Soave-Redlich-Kwong 상태방정식<sup>5)</sup>, BWRs 모델식<sup>6)</sup>, 그리고 GERG-2008<sup>7)</sup> 모델식을 적용하였다.

### 2. 수소 충전을 위한 정상상태 모델링

Fig. 1에는 수소 충전을 위한 베이스를 나타내었다. Fig. 1에 의하면 주입하는 수소의 조건은 10 kg/h이며, 25°C와 50 bar의 일정한 조건으로 주입한다. 수소 저장탱크의 초기 조건은 25°C와 1 bar 상태의 수소가 충전되어 있는 것으로 가정하였으며, 수소저장 탱크의 직경은 0.25 m이며, 높이는 1 m의 타원형 수직형 탱크를 가정하였다.

### 3. 수소 충전을 위한 동적 모델링

Figs. 2, 3에는 Peng-Robinson 상태방정식을 이용하고, Aspen Dynamics를 활용한 수소 충전 시에 수소저장 탱크의 압력과 온도변화를 시간에 따라서 도

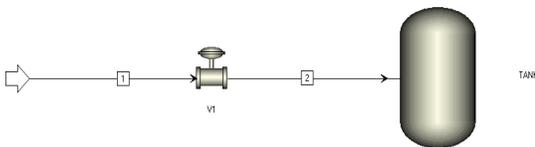


Fig. 1. Aspen Plus process flow sheet drawing for hydrogen filling to 40 bar

시하였다.

Fig. 2에 의하면 수소 탱크의 압력이 40 bar에 도달하기 위해서 걸리는 시간은 Peng-Robinson 상태방정식을 적용할 경우에는 약 45.7초가 걸렸으며, 동일한 상태방정식을 적용하였을 때, 45.7초 후에 수소저장 탱크의 온도는 142.1°C까지 상승하는 것을 알 수 있다.

Figs. 4, 5에는 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식을 이용하고, Aspen Dynamics를 활용한 수소 충전 시에 수소저장 탱크의 온도와 압력 변화를 시간에

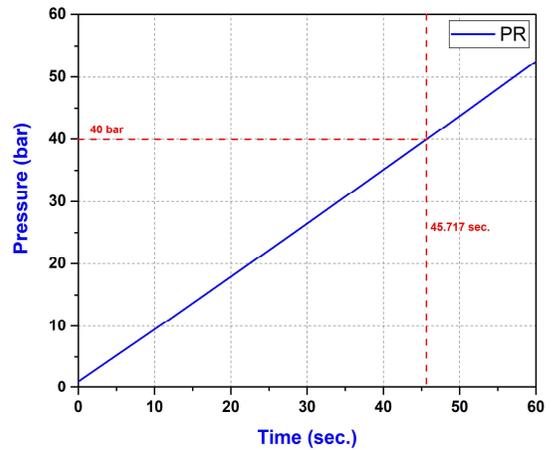


Fig. 2. Pressure profile vs. time during hydrogen filling using Peng-Robinson equation of state

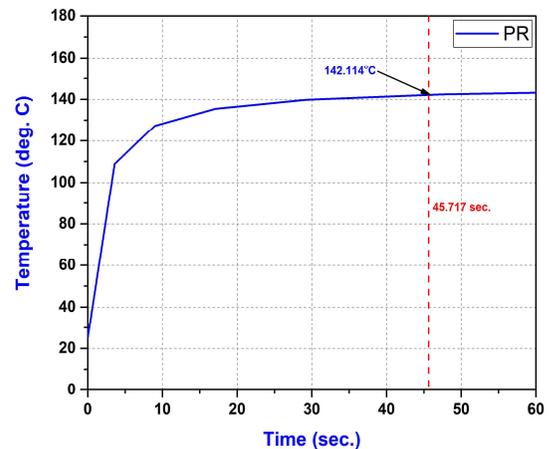


Fig. 3. Temperature profile vs. time during hydrogen filling using Peng-Robinson equation of state

따라서 도시하였다.

Fig. 4에 의하면 수소 탱크의 압력이 40 bar에 도달하기 위해서 걸리는 시간은 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식을 적용할 경우에는 약 45.6초가 걸렸으며, 동일한 상태방정식을 적용하였을 때, 45.6초 후에 수소저장 탱크의 온도는 142.6°C까지 상승하는 것을 알 수 있다.

Figs. 6, 7에는 BWRS 상태방정식을 이용하고, Aspen Dynamics를 활용한 수소 충전 시에 수소저장 탱크의 온도와 압력 변화를 시간에 따라서 도시하였다.

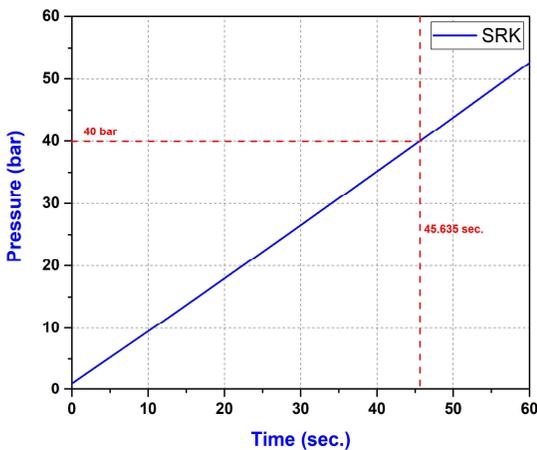


Fig. 4. Pressure profile vs. time during hydrogen filling using Soave-Redlich-Kwong equation of state

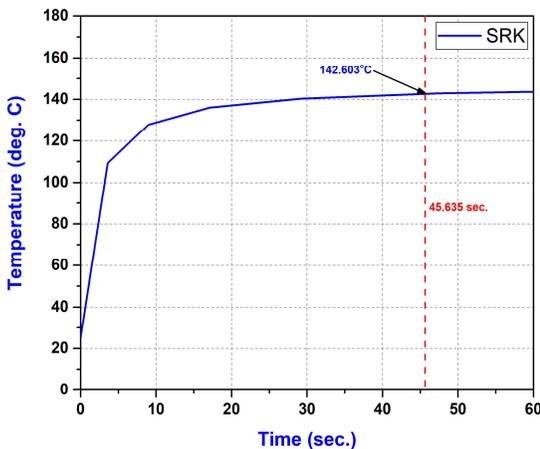


Fig. 5. Temperature profile vs. time during hydrogen filling using Soave-Redlich-Kwong equation of state

Fig. 6에 의하면 수소 탱크의 압력이 40 bar에 도달하기 위해서 걸리는 시간은 BWRS 상태방정식을 적용할 경우에는 약 45.1초가 걸렸으며, 동일한 상태방정식을 적용하였을 때, 45.1초 후에 수소저장 탱크의 온도는 143.8°C까지 상승하는 것을 알 수 있다.

Figs. 8, 9에는 GERG-2008 상태방정식을 이용하고, Aspen Dynamics를 활용한 수소 충전 시에 수소 저장 탱크의 온도와 압력 변화를 시간에 따라서 도시하였다.

Fig. 8에 의하면 수소 탱크의 압력이 40 bar에 도

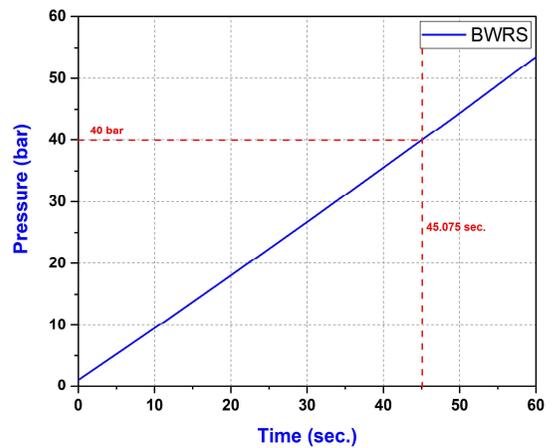


Fig. 6. Pressure profile vs. time during hydrogen filling using BWRS equation of state

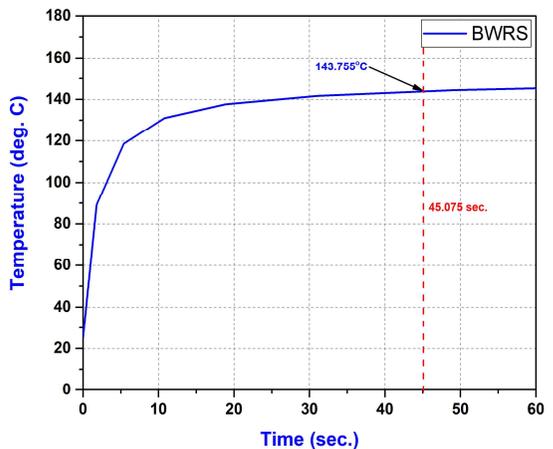


Fig. 7. Temperature profile vs. time during hydrogen filling using BWRS equation of state

달하기 위해서 걸리는 시간은 GERG-2008 상태방정식을 적용할 경우에는 약 45.5초가 걸렸으며, 동일한 상태방정식을 적용하였을 때, 45.5초 후에 수소저장탱크의 온도는 142.6°C까지 상승하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 수소저장 탱크 냉각을 위한 동적 모델링

Figs. 10, 11에는 Peng-Robinson 상태방정식을 적용하여 40 bar까지 수소를 충전한 후에 외부 대기와의 열교환에 의해서 시간에 따른 수소 저장탱크 내

부의 수소 기체의 온도 변화 및 그에 따른 압력 강하를 동적 모사를 통해서 구현하였다.

Figs. 10, 11에 의하면 수소 탱크 내부의 수소 기체의 온도가 142.1°C에서 시간이 지남에 따라서 외부 대기의 온도인 20°C까지 떨어지는 데 걸리는 시간은 약 157.2분임을 알 수 있다. 그러는 동안 탱크 내부의 수소 기체의 압력은 40 bar에서 최종 압력 약 28.1897 bar까지 떨어지게 된다.

Figs. 12, 13에는 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식을 적용하여 40 bar까지 수소를 충전한 후에 외부

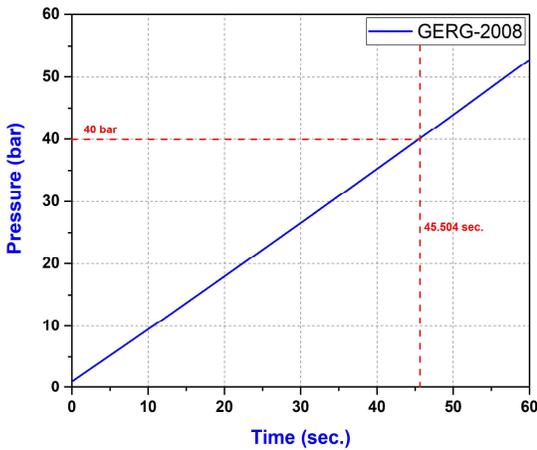


Fig. 8. Pressure profile vs. time during hydrogen filling using GERG-2008 equation of state

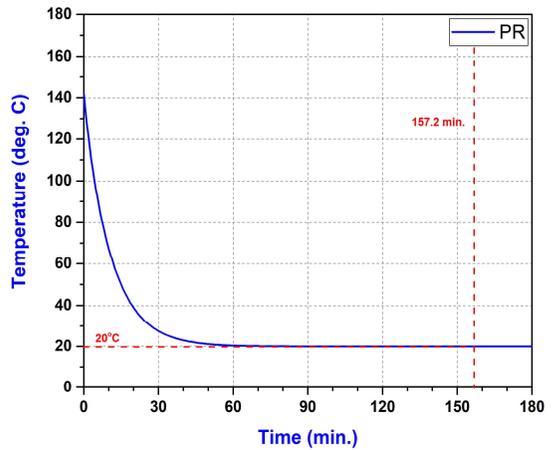


Fig. 10. Temperature profile vs. time during hydrogen cooling using Peng-Robinson equation of state

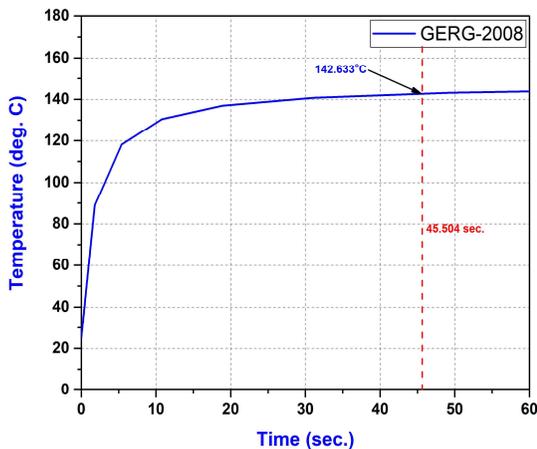


Fig. 9. Temperature profile vs. time during hydrogen filling using GERG-2008 equation of state

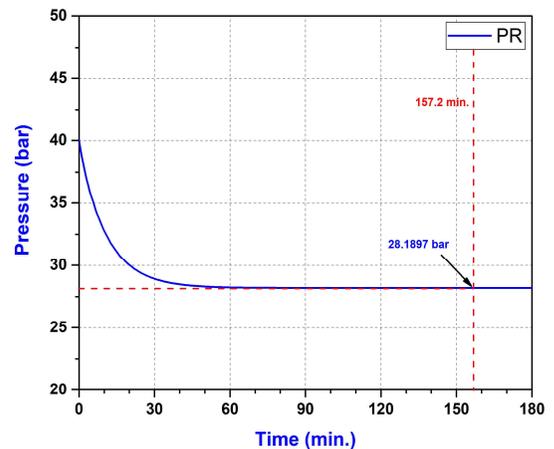


Fig. 11. Pressure profile vs. time during hydrogen cooling using Peng-Robinson equation of state

대기와의 열교환에 의해서 시간에 따른 수소 저장탱크 내부의 수소 기체의 온도 변화 및 그에 따른 압력 강하를 동적 모사를 통해서 구현하였다.

Figs. 12, 13에 의하면 수소 탱크 내부의 수소 기체의 온도가 142.6°C에서 시간이 지남에 따라서 외부 대기의 온도인 20°C까지 떨어지는 데 걸리는 시간은 약 165.0분임을 알 수 있다. 그러는 동안 탱크 내부의 수소 기체의 압력은 40 bar에서 최종 압력 약 28.1726 bar까지 떨어지게 된다.

Figs. 14, 15에는 BWRs 상태방정식을 적용하여

40 bar까지 수소를 충전한 후에 외부 대기와의 열교환에 의해서 시간에 따른 수소 저장탱크 내부의 수소 기체의 온도 변화 및 그에 따른 압력 강하를 동적 모사를 통해서 구현하였다.

Figs. 14, 15에 의하면 수소 탱크 내부의 수소 기체의 온도가 143.8°C에서 시간이 지남에 따라서 외부 대기의 온도인 20°C까지 떨어지는 데 걸리는 시간은 약 164.4분임을 알 수 있다. 그러는 동안 탱크 내부의 수소 기체의 압력은 40 bar에서 최종 압력 약 28.0291 bar까지 떨어지게 된다.

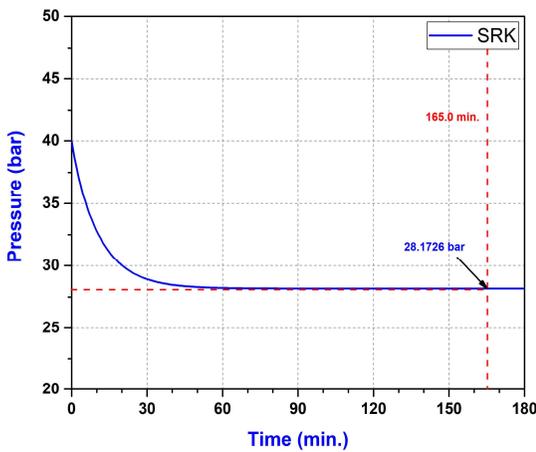


Fig. 12. Pressure profile vs. time during hydrogen cooling using Soave-Redlich-Kwong equation of state

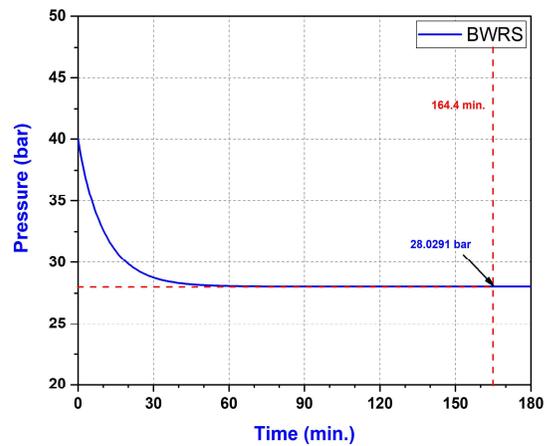


Fig. 14. Temperature profile vs. time during hydrogen cooling using BWRs equation of state

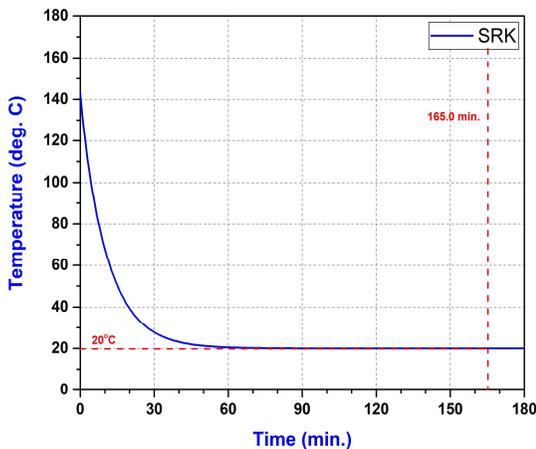


Fig. 13. Temperature profile vs. time during hydrogen cooling using Soave-Redlich-Kwong equation of state

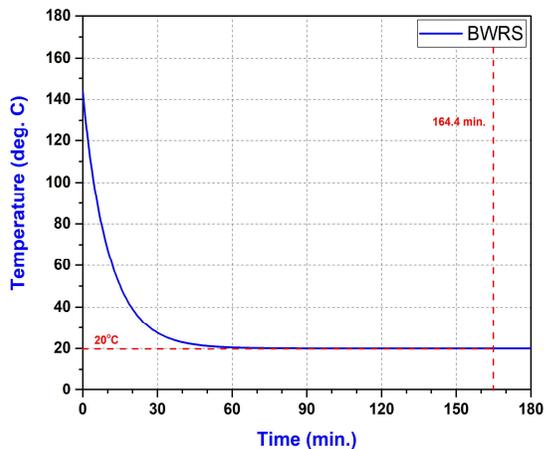


Fig. 15. Pressure profile vs. time during hydrogen cooling using BWRs equation of state

Figs. 16, 17에는 GERG-2008 상태방정식을 적용하여 40 bar까지 수소를 충전한 후에 외부 대기와의 열교환에 의해서 시간에 따른 수소 저장탱크 내부의 수소 기체의 온도 변화 및 그에 따른 압력 강하를 동적 모사를 통해서 구현하였다.

Figs. 16, 17에 의하면 수소 탱크 내부의 수소 기체의 온도가 142.6°C에서 시간이 지남에 따라서 외부 대기의 온도인 20°C까지 떨어지는 데 걸리는 시간은 약 164.4분임을 알 수 있다. 그러는 동안 탱크 내부의 수소 기체의 압력은 40 bar에서 최종 압력이 약

28.1544 bar까지 떨어지게 된다.

### 5. 결론

본 연구에서 동적 모사기인 Aspen Dynamics를 활용하여, 몇 가지 열역학 모델식에 적용해서 수소저장 탱크의 압력이 40 bar가 될 때까지 걸리는 시간을 추산에 본 결과 평균적으로 45.5초가 걸리는 것을 알 수 있었으며, 단열 충전 후에 상승한 수소 기체의 온도는 열역학 모델식에 따라서 평균 143°C까지 상승하는 것을 알 수 있었다.

열역학 모델식에 따르는 수소 충전 시에 걸리는 시간의 산출과 수소 기체의 온도 상승 결과는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

한편 탱크 내부의 수소 기체의 온도를 다시 주변의 온도인 20°C까지 떨어뜨리는 데 걸리는 시간은 열역학 모델에 관계없이 평균 162.8분이 걸리는 것을 알 수 있었으며, 냉각 후에 수소 기체의 압력은 역시 열역학 모델식의 종류에 관계없이 평균 28.1 bar가 되는 것을 알 수 있었다.

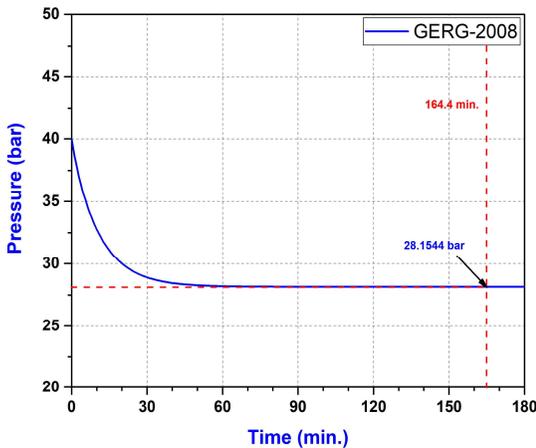


Fig. 16. Temperature profile vs. time during hydrogen cooling using GERG-2008 equation of state

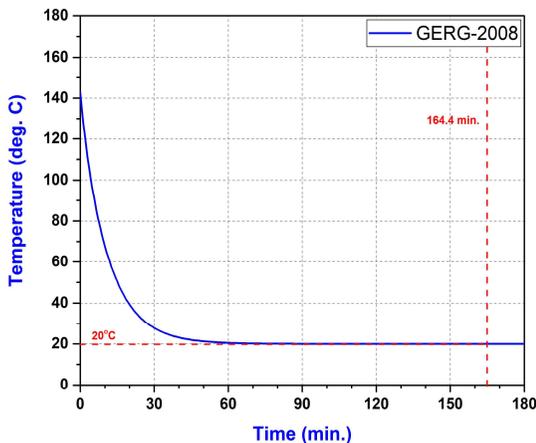


Fig. 17. Pressure profile vs. time during hydrogen cooling using GERG-2008 equation of state

Table 1. Hydrogen filling time and final temperature estimation according to several thermodynamic models

Thermo. Model	Pressure (bar)	Temperature (°C)	Time (sec)
PR	40	142.1	45.7
SRK		142.6	45.6
BWRS		143.8	45.1
GERG-2008		142.6	45.5

Table 2. Hydrogen cooling time and final pressure estimation according to several thermodynamic models

Thermo. Model	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Time (min)
PR	20	28.1897	157.2
SRK		28.1726	165.0
BWRS		28.0291	164.4
GERG-2008		28.1544	164.4

열역학 모델식에 따르는 수소의 냉각에 걸리는 시간과 냉각 후의 압력은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 2019년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었다.

## References

1. W. J. Palm, "System dynamics", McGraw-Hill, USA, 2014, pp. 396-472.
2. R. Schefflan, "Teach yourself the basics of aspen plus", John Wiley and Sons Inc. Publication, USA, 2011, pp. 175-185.
3. I. M. Kamal, "Aspen plus: chemical engineering applications", John Wiley and Sons Inc. Publication, USA, 2017, pp. 49-69.
4. D. Y. Peng and D. B. Robinson, "A new two-constant equation of state", Ind. Eng. Chem. Fund., Vol. 15, No. 1, 1976, pp. 59-64, doi: <https://doi.org/10.1021/i160057a011>.
5. C. H. Twu, D. Bluck, J. R. Cunningham, and J. E. Coon, "A cubic equation of state with a new alpha function and a new mixing rule", Fluid Phase Equilib., Vol. 69, 1991, pp. 33-50, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(91\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0378-3812(91)90024-2).
6. W. H. Tung and T. T. Lee, "An applicability study of scoping libraries on BWR fuel assembly designs", Annals of Nuclear Energy, Vol. 156, 2021, pp. 1-14, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108175>.
7. F. Varzandeh, E. H. Stenby, and W. Yan, "Comparison of GERG-2008 and simpler EoS models in calculation of phase equilibrium and physical properties of natural gas related systems", Fluid Phase Equilibria, Vol. 434, 2017, pp. 21-43, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2016.11.016>.