

엔진 냉각수 순환에 의한 urea-SCR 시스템용 요소수의 동결 및 해동 특성

Frozen and Melting Characteristics of Urea-aqueous Solution for Urea-SCR System by Circulation of Engine Coolant

최병철 · 김영권 · 김화남

B. C. Choi*, Y. K. Kim and H. N. Kim

(접수일 : 2011년 03월 07일, 수정일 : 2011년 05월 17일, 채택확정 : 2011년 5월 22일)

Key Words : Diesel engine(디젤엔진), SCR(선택적 촉매환원), Urea-aqueous Solution(요소 수용액), Frozen(동결), Melting(해동), Phase Change(상 변화), Time Winding(권수비)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the best melting condition with various winding number of a heating pipe, supplying quantity of engine coolant and coolant temperature at the inlet of the heating pipe. Also, it is to suggest getting method of an appropriate quantity of the agent for the urea-SCR system within 10 minutes. For this matter, this study identifies the temperature distribution of inside of urea-tank while it is frozen at the low temperature condition, and suggests the best melting condition of the frozen urea within 10 minutes. From the results, it was found that 2L of melted urea was obtained by the coolant flow rate of 200L/hr at 70°C for 10 minutes from the start of engine operating.

1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 CO₂ 배출량이 적고 높은 열효율을 가진다. 그러나 디젤엔진에서는 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)이 다량 배출되는 단점을 가지고 있다. 대형 디젤엔진의 경우 2013년경부터 적용될 EuroVI 규제는 EuroV에 비해 PM은 절반으로, NO_x의 경우 80%의 저감을 목표로 해야 하기 때문에 연비특성이 우수한 후처리기술과 엔진연소에서 NO_x저감 특성이 우수한 EGR기술이 동시에 적용될 것으로 예측할 수 있다¹⁾. 미국, 유럽 및 일본은 2008년부터 시행중인 NO_x의 EuroV 규제를 만족시키기 위한 기술로서 urea-SCR (selective catalytic converter) 기술을 적용하고 있다.

Urea-SCR system의 원리는 우레아(urea) 수용액이 SCR 후처리 시스템에 분사된 후 열분해, 가수분해 과정을 거쳐 환원제인 NH₃ 생성시키며, 생성된

NH₃는 선택적 반응을 통하여 NO_x를 N₂와 H₂O로 환원시킨다.

화학혼합물인 우레아를 자동차에 적용할 경우, 우레아 수용액인 AdBlue™와 같이 동결점이 낮은 공용 혼합물(eutectic mixture) 상태의 32.5wt%가 사용된다.⁵⁾ 그러나 동절기 기온이 약 -20°C이하로 내려가는 북유럽이나 북미 지역에서는 우레아 수용액이 동결되는 문제점이 발생된다. 냉시동 초기에 제한된 열원을 이용하여 최단시간에 동결된 우레아를 분사 시스템에 필요한 최소량을 확보해야 한다. 종래 연구에서는 우레아 해동에 관한 일부 수치해석의 예 및 실험실 규모의 light duty(L/D)용 우레아 탱크의 동결 및 해동 특성에 관한 연구 결과가 일부 있다.^{2,3)} 그러나 상용화된 heavy duty(H/D)용 우레아 탱크 동결 후 일정시간(약 10분)에 우레아 분사에 필요한 소정의 양(2L)을 얻을 수 있는 구체적인 실시 예는 찾기 어렵다.

이 연구의 목적은 H/D디젤자동차의 동결된 우레아를 냉각수 순환방식을 이용하여, 10분 안에 urea-SCR 촉매 시스템의 분사에 필요한 소정(2L)의 양을 확보하는 것이다. 이를 위해 냉각수 공급온도, 공급

최병철(교신저자) : 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : bcchoi@chonnam.ac.kr, Tel : 062-530-1681
김영권 : 전남대학교 대학원 기계공학과
김화남 : 전남대학교 BK21 지능형기계시스템사업단

유량, 냉각수 순환 파이프 권수비에 따른 영향을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

이 연구에서 사용한 실험장치의 전체적인 개략 도는 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 2는 냉각수 순환 파이프의 형상을 나타낸 것이다. 이 파이프의 재질은 SUS304이고 A type(7권수), B type(5권수), C type(4권수) 권수비의 형태로 되어 있다.

냉각수는 Ethylene glycol를 사용하였으며, 부동액 농도를 55%로 하여 -40°C 의 빙결온도로 맞춘 후 실험하였다. 8L급 디젤엔진에 적용되는 38L 우레아 탱크를 사용하였다.

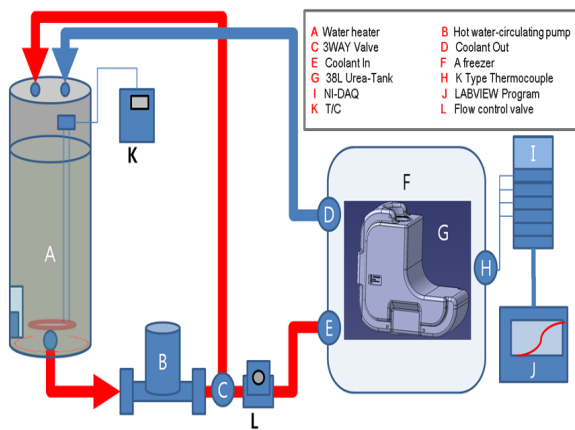


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

동결실험은 -45°C 를 유지할 수 있는 냉동고에 우레아 탱크를 넣고 내부에 AdBlue™ 88%(33.44L) 채워 -30°C 조건에서 72시간 동안 동결시킨다. 해동실험은 온수기에 냉각수를 60L 채운 후 소정의 온도 (70°C)로 유지하여 소정의 유량으로 순환을 시킨다. 냉각수 순환 파이프의 위치는 우레아 탱크 바닥에서 5cm이며 동결된 우레아의 해동을 위한 냉각수 순환 방식은 공급 온도로 가열된 냉각수를 순환펌프로 순환시키며, 유량조절밸브를 이용 공급 유량을 조절하였다. 또한, 해동실험 진행 시 온도센서는 탱크 벽면으로부터 1.5cm의 거리에 있는 각각의 벽면에 K형 열전대(지름 0.05cm)를 설치하여, 동결과 해동에 따른 우레아 탱크 내부의 온도 변화를 측정하였다. 그리고 순환 파이프 주변부위와 중심부에 열전대를 설치하여 실시간으로 온도특성을 파악하였다. 해동량 측정은 냉각수 순환 파이프 입구측 바닥에서 배인펌프로 흡입하여 비이커에 담아 측정하였다.

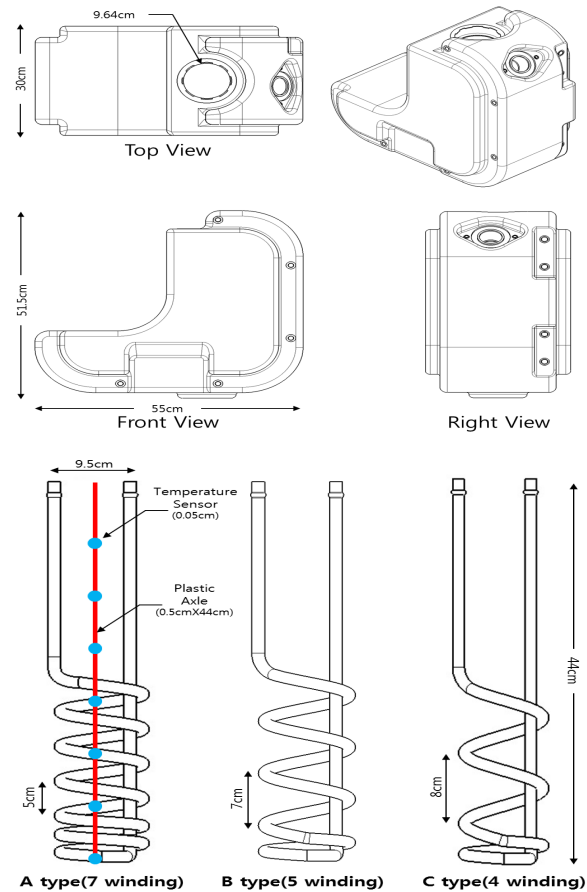


Fig. 2 Coolant circulation coils and urea tank

실험에 사용된 우레아는 AdBlue™(32.5wt%)를 사용하였고, 동결점(freezing point)은 -11°C , 20°C 에서 밀도는 $1.087\sim 1.093\text{kg/m}^3$ 이다. SCR 촉매 전단에 공급되는 우레아 환원제는 pH 9.5의 강한 염기성이며, 온도의 영향에 따른 농도 변화를 보여 고온(56°C)과 저온(-9°C)에서 농도가 상승하는 특징을 보인다⁵⁾. 또한 Table 1에서는 실험에 사용된 AdBlue의 물성치를 나타내었다.

Table 1 Material data for AdBlue™ (32.5% urea)⁵⁾

Chemical formula	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$
Melting temperature T_m	-11°C
Specific latent heat h_{ls}	152.86 kJ/kg
Specific heat, solid c_s	1.6 kJ/(kg_K)
Specific heat, liquid c_l	3.4 kJ/(kg_K)
Density, solid ρ_s	1010 kg/m ³
Density, liquid ρ_l	1090 kg/m ³
Thermal conductivity, solid λ_s	0.75 W/(m_K)
Thermal conductivity, liquid λ_l	0.57 W/(m_K)

3. 결과 및 고찰

3.1 Urea의 기본 동결 특성

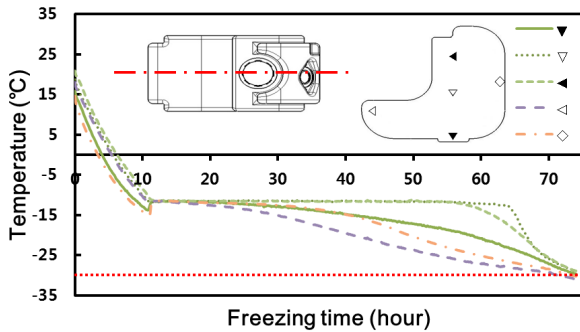


Fig. 3 Temperature profile of freezing phenomenon at -30°C

우레아 수용액의 기본적인 동결 특성을 파악하기 위한 실험조건은 탱크 내부에 냉각수 순환 파이프 A type(7권수), B type(5권수), C type(4권수)를 우레아 수용액 33.44L와 함께 냉동고 온도를 -30°C로 고정하여 동결시키고, 이때 우레아 전영역이 -30°C에 도달할 때까지 경과시간에 따른 온도분포를 측정한다.

Fig. 3은 냉각시간에 따른 우레아 탱크 내부 중심의 각 지점의 온도분포를 나타내고 있다. 냉각 시작 후 10시간 동안 온도는 급격히 하강하며, 동결 시작 온도(-11°C)에 도달한 후부터 일정한 온도를 유지하고 있다. 이 구간에서 상변화(phase change)가 일어나고 있다. 전영역이 고상화(동결)되는데 약 72시간이 소요된다. 내부 우레아는 상변화 단계 후 온도가 냉동고 설정 온도인 -30°C까지 낮아진다. 상변화구간에서 우레아 특유의 결정상을 확인할 수 있었다.

동결과정은 우레아 탱크 주변에서 대류열전달과 탱크벽면에서의 열전도 현상에 의하여 우레아 수용액이 냉각되며, 우레아 수용액 내부에서는 열전도(conduction)현상이 지배적으로 작용하며 액상에서 고상으로 바뀐다. 따라서 상변화시간은 우레아의 동결이 탱크 중심부로 갈수록 탱크 벽면보다 길어지고 있다.

3.2 냉각수 온도가 해동에 미치는 영향

냉각수 순환방식은 엔진에서 데워진 냉각수가 순환파이프를 통해 순환되면서 동결 우레아를 해동시킨다. 이 때 냉각수 온도는 동결 우레아의 해동특성에 중요한 인자이다. 우레아 탱크 내부에 A type(7권수)의 순환 파이프를 장착한 경우, 공급 냉각수 온도

의 변화에 따른 해동특성을 파악하였다.

엔진에서는 냉각수 온도를 80°C로 라디에이터를 이용하여 유지시키며, 데워진 냉각수가 엔진 냉각수 순환펌프의 의하여 순환된다. 이 때문에 적정 공급 유량을 200L/hr로 정하였으며, 냉각수 입구온도를 70°C, 35°C, 25~70°C로 변환하였을 때 온도분포를 관찰하였다. 온도 측정 위치는 냉각수 순환파이프 권선의 중심축선, 바닥에서 10cm 지점이다.

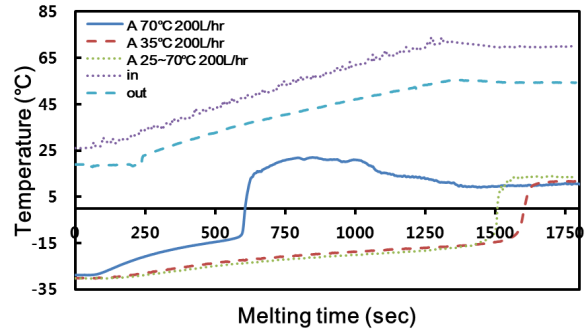


Fig. 4 Temperature profiles of the bottom(10cm) of urea tank according to coolant temperature

Fig. 4는 냉각수 온도가 해동에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 냉각수 온도가 70°C의 경우 600sec 부근에서 급격한 온도상승과 함께 상변화가 시작된다. 그러나 냉각수 온도가 이보다 낮은 경우는 1,500sec 이후에서 급격한 온도상승을 보인다. 해동 시간 약 600sec 부근에서 급격하게 온도가 상승하는 -11°C 지점은 열전도가 지배적으로 작용하며, 상온 15°C부터는 자연대류가 시작되므로 해동효과가 활발해 졌다고 판단한다. 즉 하부에 집중된 권선에 의해 측정 지점 주위는 열 보호막이 형성되고, 냉각수 온도가 높을수록 국부적으로 많은 양의 열을 축적할 수 있다. 따라서 동결된 우레아를 단시간에 해동하기 위해서는 높은 온도의 냉각수를 빠른 시간에 공급하는 것이 유리하다.

3.3 냉각수 유량이 해동에 미치는 영향

냉각수 온도가 70°C인 경우에 냉각수 유량이 동결 우레아의 해동에 미치는 영향을 검토하였다. 냉각수 순환 파이프는 A type(7권수)이며, 냉각수 온도는 70°C, 공급유량은 200, 150, 100L/hr의 조건이다. 온도 측정지점은 우레아 냉각수 순환 파이프 권선의 중심축선, 바닥에서 5cm 지점이다.

Fig. 5는 냉각수 공급유량이 해동에 미치는 영향을 검토한 결과이다. 공급 유량이 가장 많은 200L/hr

의 경우, 약 600sec에 급격히 승온되는 것을 알 수 있고, 유량이 적을수록 급격한 온도상승 시간이 늦어지고 있다. 이는 유량이 증가할수록 공급 열량이 많아지기 때문이다. 이상의 결과로부터 동결 우레아를 단시간에 해동시키기 위한 조건으로는 높은 온도(70°C)의 냉각수를 많은 유량(200L/hr)으로 순환시키는 것이다.

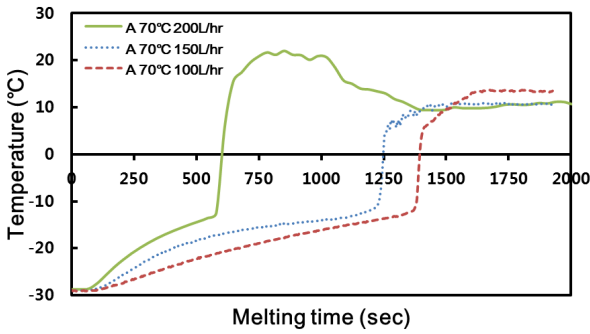


Fig. 5 Temperature profiles of the bottom(10cm) of urea tank according to coolant flow rate

3.4 각종 인자에 따른 해동특성

우레아 시스템의 해동특성을 냉각수 순환 파이프의 구조와 전열면적, 냉각수 온도 및 유량에 대해 고찰하였다. 동결된 우레아를 효율적으로 해동시키기 위해서는 냉각수 순환 파이프의 전열면적이 매우 중요하며, 이 전열면적을 위해서는 냉각수 파이프의 권선수와 형태의 최적화가 필요하다.

Fig. 6은 해동실험에 사용한 냉각수 파이프의 전열면적에 대한 냉각수의 온도차 측정결과를 나타내고 있다. 표면적이 넓은 A type(7권수)는 다른 권선수에 비교하여 냉각수 온도차가 제일 크다. 이는 전열면적이 넓어 전열량이 크기 때문이다. 이로 인해 Fig. 7

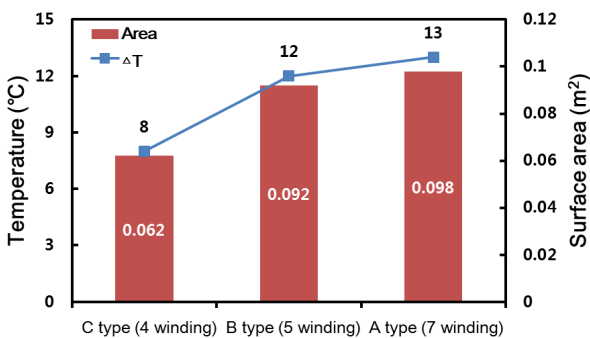


Fig. 6 Temperature difference between inlet and outlet of heating pipe according to heat transfer area of heating pipe

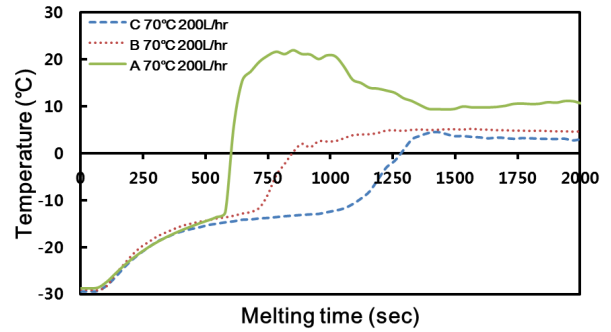


Fig. 7 Temperature profiles of bottom point of urea tank according to heating pipe type

에 나타난 것과 같이 A type(7권수)가 B type(5권수), C type(4권수)에 비해 빠른 온도 상승을 보이고 있다. 온도상승은 하단에 권선이 집중된 A type(7권수)가 권선의 열보호막 작용으로 인해 국부적으로 많은 열을 축적한다. 축적된 열은 약 600sec부근에서 급격한 온도 상승 현상을 나타내며, 이는 고상이 액상으로 상변화하는 과정이라 판단한다. 급격한 온도상승 후(약 600sec) 액상은 주변 동결 우레아의 온도 차로 인한 대류현상이 일어나며, 가열된 액체의 열량이 주변의 동결 우레아로 열손실로 되어 1400sec 부근에서 거의 열평형에 이른다.

공급되는 온도와 유량을 70°C, 200L/hr로 선정하여 각각의 권선수에 따라서 동결 우레아의 해동 시 열전도 특성의 영향을 평가하였다. Fig. 8은 해동시간에 대한 냉각수 순환 파이프 중앙의 바닥에서부터 5cm 간격의 높이로 30cm까지 각 지점의 온도 측정 결과이다. 측정된 온도 데이터는 MATLAB 프로그램을 사용하여 해석하였다.

Fig. 8 (a)는 A type(7권수)의 결과로, 초기에 하부 열이 집중되며 점차 상부로 열전달이 진행되는 것을 볼 수 있다. 그러나 (b)의 B type(5권수)와 (c)의 C type(4권수)는 (a)의 A type(7권수)에 비하여 하부에 권선 밀도가 낮아 온도상승이 느린 것을 알 수 있다. 따라서 하부에 권선 밀도를 높인 형태가 효율적으로 열원을 공급할 수 있어 단기간에 많은 해동량을 얻을 수 있다.

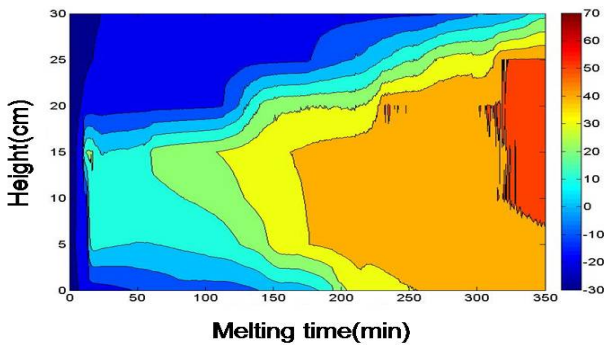
3.5 순환 파이프의 해동량

해동량은 초기 10분부터 5분 간격으로 측정하였으며, 한 조건의 해동량의 측정이 끝나면 다시 우레아 용액을 채워 동결시킨 후 다음 시간대의 해동량을 측정하였다. 해동조건은 A type(7권수), 냉각수 온도 70°C, 유량 200L/hr이다. 해동된 우레아의 공급은 공

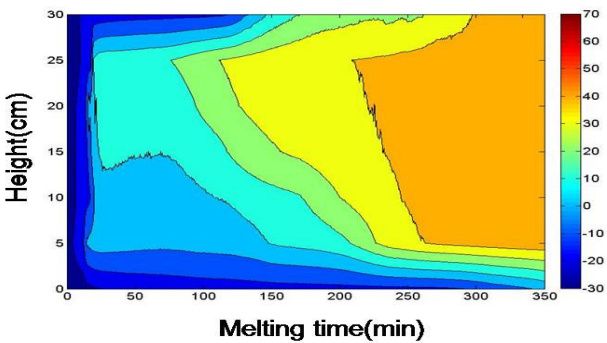
급 파이프가 냉각수 파이프 입구측 파이프와 평형하게 설치하여 주변 동결 우레아의 영향이 적도록 하였으며, 우레아 흡입구는 냉각수 파이프 입구측 하단에 위치한다.

Fig. 9는 38L 탱크 용량의 88%인 33.44L의 우레아를 채워 동결 후 해동 시(상기 조건) 경과시간에 대한 해동량을 측정된 결과이다. H/D디젤자동차의 냉시동 후 초기에 배출되는 NOx를 효과적으로 저감시키기 위해서는 빠른 시간에 효과적으로 환원제를 공급해야 한다. 예를 들어 엔진 배기량 8리터급 엔진의 경우 우레아 소모량이 약 6kg/h인 점을 감안하면, 10

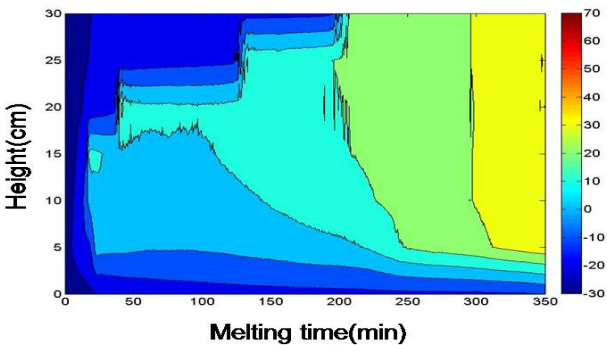
분에 약 1L를 소모한다. 이 연구에서는 이 보다 2배 정도 많은 10분에 해동 확보가능 우레아량을 2L로 목표로 하였다. 해동시작 후 10분에 SCR 시스템에 초기 공급량 2L의 우레아를 확보할 수 있으며, 시간이 증가함에 따라서 해동되는 우레아량은 선형적으로 증가함을 알 수 있다.



(a) A type(7 winding)



(b) B type(5 winding)



(c) C type(3 winding)

Fig. 8 Melting simulation (70°C, 200L/hr)

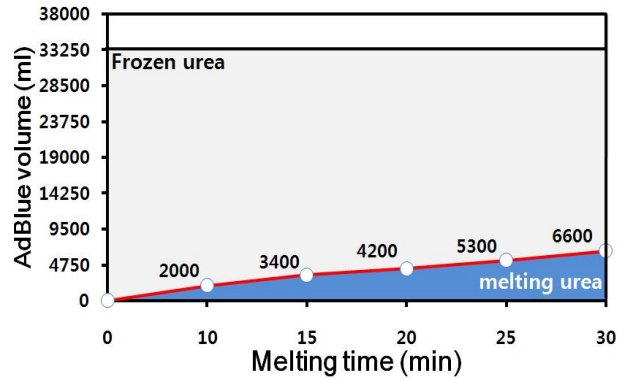


Fig. 9 Liquid volume as function of time (winding A type, 70°C, 200L/hr)

4. 결 론

혹한 지역에서 H/D디젤자동차의 동결된 우레아 탱크를 냉각수 순환방식을 이용하여 해동시킬 경우, urea-SCR 촉매 시스템의 분사에 필요한 소정(2L)의 양을 확보하는 방안을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 33.44L의 우레아가 -30°C로 완전 동결 시간은 72시간이 소요된다. 동결은 우레아 탱크 중심부로 갈수록 상변화 시간이 길어지게 되며 우레아 탱크 경계면으로 갈수록 짧아진다.
2. 냉각수 온도가 70°C일 때, 냉각수 유량을 200L/hr인 경우가 다른 유량의 경우보다 공급열량이 많아 해동시간이 짧았다.
3. 해동조건을 A type(7권수), 냉각수 온도 70°C, 공급유량 200L/hr로 할 때 해동시작 후 10분에 2L의 우레아를 확보할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 “녹산 산업단지 경쟁력 강화산업” 과제의 일부로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. T. V. Johnson, 2010, "Review of Diesel Emissions and Control", SAE paper 2010-01-0301.
2. 최병철, 서충길, 명광재, 2009, "디젤차량 SCR 시스템용 요소수용액의 동결과 해동 현상", 한국동력기계공학회지, 13, 4, pp. 5-10.
3. L. L. C. Chrysler, "Thermal Analysis of Urea Tank Solution Warm Up for Selective Catalytic Reduction (SCR)", SAE paper 2010-01-0971.
4. W. Stefan, 2007, "Numerical heat transfer and thermal engineering of AdBlue(SCR) tanks for combustion engine emission reduction", Applied Thermal Engin., 27, pp. 1790-1798.
5. BASF, 2003, "Urea solution 32.5% AdBlue", Technical Leaflet, BASF AG.
6. A. Munnannur and Z. G. Li, 2010, "Development and Validation of a Predictive Model for DEF Injection and Urea Decomposition in Mobile SCR DeNOx Systems", SAE paper 2010-01-0889.
7. C. Lambert, C. Montreuil and J. Vanderslice, 2003, "Application of Organic Freeze-Point Depressants in Aqueous Urea Solutions: Effect on NOx Reduction", SAE paper 2003-01-0775.
8. F. Espinosa, R. Avila., J. G. Cervantes, F. J. Solorio, 2004, "Numerical simulation of simultaneous freezing-melting problems with natural convection", Nuclear Engin. and Design, 232, pp. 145-155.
9. G. Vidalain, L. Gosselin, M. Lacroix, 2009, "An enhanced thermal conduction model for the prediction of convection dominated solid-liquid phase change", Int. J. of Heat and Mass Transfer 52, pp. 1753-1760.