

ARIMA를 활용한 실시간 SCR-HP 밸브 온도 수집 및 고장 예측

이수환* · 홍현지** · 박지수*** · 염은섭†

Real-time SCR-HP(Selective catalytic reduction - high pressure) valve temperature collection and failure prediction using ARIMA

Suhwan Lee*, Hyeonji Hong**, Jisoo Park***, Eunseop Yeom†

Abstract Selective catalytic reduction(SCR) is an exhaust gas reduction device to remove nitro oxides (NOx). SCR operation of ship can be controlled through valves for minimizing economic loss from SCR. Valve in SCR-high pressure (HP) system is directly connected to engine exhaust and operates in high temperature and high pressure. Long-term thermal deformation induced by engine heat weakens the sealing of the valve, which can lead to unexpected failures during ship sailing. In order to prevent the unexpected failures due to long-term valve thermal deformation, a failure prediction system using autoregressive integrated moving average (ARIMA) was proposed. Based on the heating experiment, virtual data mimicking temperature range around the SCR-HP valve were produced. By detecting abnormal temperature rise and fall based on the short-term ARIMA prediction, an algorithm determines whether present temperature data is required for failure prediction. The signal processed by the data collection algorithm was interpolated for the failure prediction. By comparing mean average error (MAE) and root mean square error (RMSE), ARIMA model and suitable prediction instant were determined.

Key Words : ARIMA(자기회귀누적이동평균), SCR(선택적촉매환원법), Data processing(데이터 처리)

1. 서론

선택적촉매환원법 (selective catalytic reduction, SCR)

† School of Mechanical Engineering, Pusan National University (PNU), Associate Professor
E-mail: esyeom@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering, PNU, M.S student

** Eco-friendly Smart Ship Parts Technology Innovation Center, PNU, Postdoctoral Researcher

*** Hyunsong controls Inc., R&D department, Director of Research Institute

은 배기가스 내 질소산화물 (NOx)을 제거하기 위해 도입된 배기가스 후처리 기술로서, 요소가 포함된 요소수를 배기가스 내 질소산화물과 반응시켜 배기가스를 저감 시킨다.⁽¹⁾ 국제해사기구 (international maritime organization; IMO)가 선박내 배기가스 저감설비 설치를 의무화하고 배출가스 통제구역 (emission control area; ECA)을 지정하면서 디젤엔진을 사용하는 선박들이 NOx 배출량 저감 달성을 위해 SCR 설비를 도입하고 있다.⁽²⁾ 한편, SCR 설비는 요소수를 저장할 탱크와 촉매 설비를 요구하며, 이로 인한 경제적 부담을 최소화하기 위해 선박들은 배기가스가 배출되는 통로를 조절할 수 있

는 밸브를 활용해 환경규제가 존재하는 해역 내에서만 일시적으로 작동하는 SCR 설비를 통해 환경 규제에 대응하고 있다.⁽³⁾

SCR의 방식 중 하나인 SCR-HP (High pressure) 방식은 고온 고압의 배기가스가 터보차저에 진입하기 전에 NOx를 제거한다.⁽⁴⁾ 이 과정에서 SCR-HP 밸브가 배기가스에 지속적으로 노출되며, 반복적인 작동으로 인해 밸브의 밀폐 성능이 악화되면 배기가스가 누출되어 SCR 설비의 비정상적인 작동을 야기할 수 있다.⁽⁵⁾ SCR밸브의 항해 중 고장을 방지하기 위해서는 밸브 고장을 사전에 예지하고 선박의 정비 스케줄을 조정할 필요가 있다.

안정적인 변화를 갖는 데이터에 대해서 자기회귀누적이동평균 (autoregressive integrated moving average; ARIMA)을 사용한 예측은 유효성이 높아 다양한 분야의 예측에 활용되고 있다.^(6,7) 본 연구에서는 SCR-HP 밸브에서 수집된 온도 데이터에 ARIMA 모델을 활용하여 유효한 데이터만 추출하고 이를 장기 관측하여 고장을 사전에 예지할 수 있는 시스템의 개발 가능성을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 온도 측정 실험 구성

그림 1에는 좌측에는 SCR-HP 밸브(현송콘트롤스㈜)의 실물 사진을 나타낸다. 그림 1의 우상단은 SCR-HP 밸브가 실제 선박의 SCR 시스템에 장착되었을 때 전체 시스템의 개략도를 나타낸다. 엔진은 SCR 밸브(Valve 1)와 직배기 밸브(Valve 2)와 병렬 구조로 연결되어 있다. SCR밸브가 설치되어 있는 배기관은 SCR을 거쳐 배기구(Exhaust)로 빠져나가게 된다. 직배기 밸브가 설치된 배기관은 엔진에서 빠져나온 배기가스가 아무런 처리없이 배기구로 바로 빠져나가도록 구성되어 있다. 이때 SCR밸브와 직배기 밸브는 동일한 버터플라이 밸브이다. SCR밸브가 개방될 경우 직배기 밸브는 폐쇄되며 반대의 경우에도 동일하다.

그림 1의 우하단에는 실제 운항을 모사한 온도 측정 실험 구성을 보여준다. 실제 SCR 시스템의 구조에서 SCR을 생략하고 고온 공기는 히터로 공

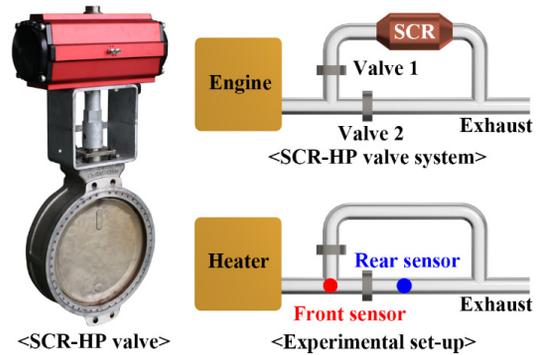


Fig. 1. SCR-HP valve system and setup of heating experiment

급하였다. 엔진에서 밸브와 히터 사이에 위치한 온도 센서를 전방 센서 (Front sensor), 직배기 밸브후단 배기구 방향으로 위치한 온도 센서를 후방 센서 (Rear sensor)라고 정의하였다. 실험에 사용된 히터는 시판용 밸브 테스트를 위해 사용된 자체제작 히터(현송콘트롤스㈜)를 사용하였다. 히터는 500 °C 로 가열된 공기를 5 bar의 압력으로 주입한다. 온도 측정을 위해서 사용된 센서는 K type비극속 열전대(HS2011-K2)를 사용하였다.

2.2 가상 데이터 처리

가상 데이터를 작성, 실시간 구간 분할, 보간, 장기 고장 예측을 하기 위해 MATLAB R2019 (Mathworks, USA) 내 Econometric toolbox가 활용되었다. 온도 측정 실험을 바탕으로 가상 온도 데이터의 수렴 온도 범위 및 수렴 속도를 지정하였다. 급격한 온도 변화를 감지하여 수렴된 온도 구간을 분리해 낼 수 있는 알고리즘을 개발하기 위한 가상 데이터를 MATLAB을 이용하여 생성하였다.

3. 결과

3.1 가열 실험 및 가상 데이터 생성

그림 2A는 히터 및 밸브 작동에 따른 온도 데이터의 변화를 보여준다. 가열 실험을 통해 밸브의 개폐에 따른 최대 온도 및 센서의 수렴 속도를 알 수 있다. 가열 실험에서는 SCR 밸브는 개방하고

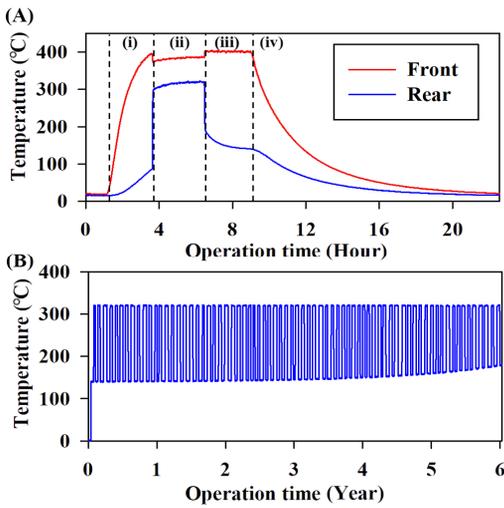


Fig. 2. (A) Temperature variations acquired by sensors during heating experiment. (B) Virtual temperature data of rear sensor based on heating experiment.

직배기밸브는 폐쇄한 상태에서 히터를 작동시킨다. 히터를 작동시키면 전방센서와 후방센서에서 측정되는 온도가 증가하기 시작한다 (영역 i). 전방센서의 온도가 최대 온도 400°C도에 근접할 때 (약 3시간 후), SCR 밸브를 폐쇄하고 직배기밸브가 개방하여 환경규제가 없는 해역을 향해하는 조건을 모사한다 (영역 ii). 가열된 공기가 직배기밸브를 통과하면서 전방 센서의 측정값은 약 385°C로 감소하며, 후방 센서의 측정값은 약 318°C로 상승하였다. 운항 중 배출가스 통제구역으로 향해할 경우, SCR을 통해 배기를 해야한다. 이를 위해 직배기밸브의 폐쇄 및 SCR 밸브의 개방을 진행한다 (영역 iii). 이때 전방 센서의 온도는 다시 400°C로 상승하고, 후방 센서는 천천히 냉각되면서 140°C로 떨어진다. 그리고 항해를 마치고 배가 부두로 도착한 경우를 모사하여, 가열 실험에서는 히터 작동을 정지한다 (영역vi). 시간에 따라 전방과 후방 센서는 상온으로 수렴한다. 가열 실험에서 가장 큰 변수는 밸브 개폐에 따른 온도 및 수렴 시간이다. 전방 센서를 통해 얻은 영역 iii 의 평균온도는 약 400°C이며 수렴 시 최고온도는 405.8°C 최저온도는 393.3°C, 노이즈 신호의 표준편차는 1.2로 나타났다. 이때 측정센서에 나타나는 노이즈는 센서가

밸브개방시 뜨거운 공기의 유동에 노출되어 국부적인 온도가 변화하는 것에 의해 나타난다. 밸브의 밀폐는 전방 센서와 후방 센서의 수렴 시간 및 온도 값에 직접적으로 영향을 미치며, 밸브 개폐 시 후방센서에서 측정되는 온도 차이는 약 182°C로 전방 센서에 비해 넓은 범위이기 때문에 밸브의 누출 여부를 판단하기 위해 후방 센서의 데이터를 이용하였다.

그림 2B는 실험결과를 토대로 작성된 가상 데이터를 보여준다. 실제 운항 시간과 대비하면 가열 실험은 짧은 시간 동안 측정된 결과이다. 가상 데이터는 한국 부산항에서 미국 로스앤젤레스 항 사이의 약 22일에 달하는 운항 간격에서 나타날 수 있는 밸브 개폐 간격을 구현하였다. 이때 엔진의 누적 작동 시간 내 일어나는 변화만을 표현하기 위해서 엔진의 시작 및 종료 시 나타나는 온도변화 (영역 i, vi)는 가상 데이터 상에 구현하지 않았다. 가상 데이터의 총 길이는 52560개로 6년의 작동 기간이며, 반복 작동으로 인한 밸브의 누수가 폐쇄 시 온도를 점차 증가시켜 밸브의 파손이 일어난 시점(6년)까지 자연로그 형태로 증가하여 180°C까지 도달하도록 생성하였다. 가열 실험을 참고하여 가상 데이터에도 동일한 크기의 랜덤함수 노이즈를 추가하였다.

3.2 온도 분리 알고리즘

그림 3에는 ARIMA를 활용해 가상 시계열 온도 데이터에서 고장 예측에 필요한 온도 구간을 분리해내는 온도 분리 알고리즘을 나타낸다. 그림 2에 정의한 밸브의 작동상태에 따라 영역을 나타냈다. 보라색 구간은 현재 시점(현재 - 50시간 전) 온도 데이터 집합, 초록색 구간은 과거 시점(100 - 150시간 전) 데이터의 집합을 나타낸다. 과거 온도 데이터를 예측 모델에 적용해 현재 시점에 대한 예측 값을 추정한다. ARIMA모델은 다음과 같이 표현하였다.

$$ARIMA(p, d, q) \quad (1)$$

여기서 p 는 자기회귀 부분의 차수, d 는 1차 차분이 포함된 정도, 그리고 q 이동 평균 부분의 차

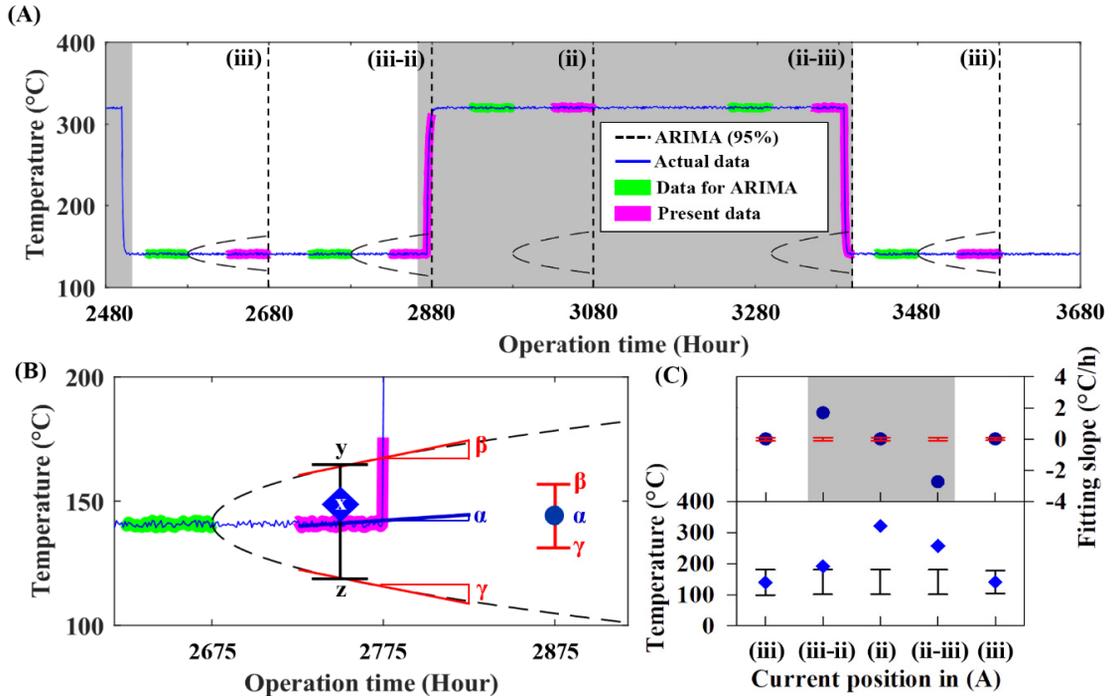


Fig. 3. (A) Temperature data division algorithm using ARIMA, (B) Description of the variables, present fitting slope (α), top ARIMA 95% fitting slope (β), bottom ARIMA 95% fitting slope (γ), average present temperature (x), average top ARIMA 95% temperature (y), average bottom ARIMA 95% temperature (z), (C) Temperature slope and average for operation.

수이다. 분리 알고리즘을 위해 사용된 예측 모델은 ARIMA(0,1,0)로 예측 기간에 해당하는 50시간 동안 나타난 값을 1차 차분 시 백색소음 형태로 표현되는 것을 고려하여 ARIMA 모델을 결정하였다. 회색 음영으로 표시된 구간은 밸브 개폐에 의해 나타나는 과도 구간 및 직배기밸브 개방 시 나타나는 고온 구간은 고장 예측에 불필요한 데이터이며, 분리 알고리즘에 의해 구분되어 이 구간의 데이터는 고장 예지를 위한 ARIMA 적용이 일시 중지된다.

그림 3B에 나타난 것과 같이 현재 시점 구간의 온도 데이터 평균을 파란색 마름모(x)로 나타냈다. 과거 시점 데이터로 예측된 온도 데이터의 95% 신뢰 구간에서 현재 시점 구간에서 나타난 최대값 평균(y)과 최소값 평균(z)을 검은색 에러바로 나타냈다. 현재 시점 구간 내의 실제 온도 데이터 집합을 1차 커브 피팅 하여 나타난 기울기(α)로 나타냈다. 과거 시점 예측의 95% 신뢰 곡선(점선) 상단과

하단의 기울기 범위를 β , γ 로 표현했다.

그림 3C는 로마숫자로 나타낸 각 작동 시점에서 추출된 평균온도 및 피팅 된 커브의 기울기를 나타냈다. 직배기밸브가 폐쇄되어 수렴 온도를 인식하였을 때는 현재 시점을 기준으로 매시간마다 ARIMA 예측이 갱신되며, 이 때 현재 온도 평균과 기울기가 예측 에러바 내에 존재한다(시점 iii). 밸브가 개방되어 온도가 급격히 상승하면 현재 온도 평균과 기울기가 예측 값 범위를 벗어나며, 알고리즘은 이를 인식하여 고장예측을 일시 중단시키고 불필요한 데이터의 시작을 인식한다(시점 iii-ii). 밸브 개방 상태에서 온도가 수렴하면 기울기는 예측값 내에 존재하나 현재 데이터의 평균이 밸브가 폐쇄된 과거 시점의 예측 값 내에 존재하지 않아 알고리즘은 계속 불필요 데이터 구간으로 인식한다(시점 ii). 밸브가 폐쇄되어 온도가 감소하기 시작하면 알고리즘은 온도가 충분히 수렴하여 현재 온도 평균과 기울기가 예측값 내에 해당하기 전까

지 불필요 데이터 구간으로 인식한다 (회색 영역). 이후 충분히 온도가 수렴하여 현재 시점의 평균값과 기울기가 예측 범위내로 복귀하면 고장 예측을 위한 ARIMA 모델이 재개된다.

3.3 가상 데이터 보간

분리 알고리즘을 통해 직배기밸브가 폐쇄된 후 온도가 수렴했을 때 유효 데이터 구간을 추출하고 불필요한 데이터 구간이 0으로 덮여진 cut-off 데이터를 얻는다. 그리고 고장 예측을 위해 비어 있는 데이터 사이를 직선으로 보간 시켜준다 (그림 4). 고장 예측 ARIMA에 영향을 미치는 백색소음을 제거하기 위해 밸브 개폐 시 온도가 충분히 안정화되는 단위(6 시간)로 평균 내어 노이즈를 감소시켰다.

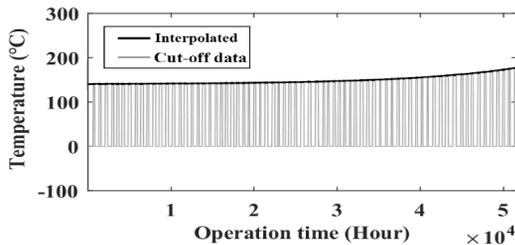


Fig. 4. Linearly interpolated temperature data

3.4 고장 예측 알고리즘

표 1 에는 5년이 경과한 시점에서 과거 1년간의 변화를 토대로 일반적으로 사용되는 ARIMA 모델을 활용해 구해진 예측 값과 실제 값의 오차를 통해 계산된 평균절대오차(mean absolute error; MAE)와 평균제곱근편차(root mean square error; RMSE)로 정리하였다. 자연함수 형태로 증가하는 데이터의 경우 2차 차분이 유용하나, 경향이 거의 나타나지 않은 시점에서 2차 차분이 적용되면 노이즈를 경향으로 인식해 음의 방향으로 차분이 발생하는 문제가 발생한다. 따라서 ARIMA 모델 선정 시 차분은 최대 1차로 한정하였다. 이때 ARIMA (2,1,2) 모델이 가장 높은 정확도를 나타냈다. 표 2 에는 고장이 발생하기 전 잔여 수명 (Remaining life) 과 동일한 시점에서 예측을 통해 얻은 잔여 수명 (Predicted remain life)을 나타냈다. 예측 시점으로

Table 1. MAE & RMSE results of each model.

	Model			
	(2,1,2)	(0,1,1)	(1,1,0)	(0,1,0)
MAE	3.0711	3.102	3.1046	3.1132
RMSE	3.8759	3.900	3.9035	3.9113

Table 2. Failure prediction with ARIMA (2,1,2) model for remaining life. The actual failure occurs after 6 years

	Remain life (Year)			
	3	2	1	0.5
Predicted remaining life (Year)	5.1-8.0	4.0-5.5	1.5-2.1	0.6-0.9

부터 1년전 과거까지 데이터를 예측에 활용하였으며, 신뢰구간 95%의 분포 범위가 고장 판단 기준인 180°C에 도달할 때까지 걸리는 시간을 예측 잔여 수명으로 나타냈다. 고장 시점이 가까워질수록 예측 수명의 분포 값은 실제 고장 시점에 접근하였다. 그러나, 차분 값이 지속적으로 증가하는 자연함수 특성상 고장이 더 늦게 일어난다고 판단하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 가장 긴 항로도2개월 이내의 항해 시간을 가진 다는 것을 고려하였을 때, 반년 시점에 예측된 수명 범위가 실제 고장 시점과 1개월 미만의 차이를 보이는 점을 활용해 항해 중 고장을 방지하면서 정비 횟수를 최소화할 수 있는 정비 시점을 결정할 수 있다.⁽⁸⁾

4. 결론

SCR-HP 밸브의 고장을 예측하기 위해 실험 결과를 기반으로 일반적 운용 상황을 예상한 가상 데이터를 생성 하였다. 온도 구간 분리 알고리즘을 활용하여 가상 데이터에서 고장 예측에 필요한 시계열 온도를 실시간으로 분리해 냈다. 고장 예측을 위하여 분할 된 데이터가 보간 되었으며 MAE와 RMSE를 통해 적절한 ARIMA 모델을 선정하였다. ARIMA를 활용한 고장 예측 시스템을 통해 장기적인 밸브 작동에 따른 마모에 의한 온도 변화를 감지하여 고장 발생 약 반년 이전부터 실제 고장과 1개월 미만의 고장 기간을 예측하였다.

해당 연구는 정상상태에서 나타나는 수렴온도를 중점적으로 본 연구이며, 고압에 의한 고장 영향 역시 보완될 필요가 있다. 또한 운행 중 밸브 주변에 탄소 등 이물질의 축적 역시 고장 예지에 적용하는 것이 예지 알고리즘을 개발하기 위해 보완되어야 할 중요한 부분으로 여겨진다.

후 기

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임(S2798831).

REFERENCE

- 1) Koebel, M., Elsner, M., Kleemann, M., 2000, "Urea-SCR: a promising technique to reduce NOx emissions from automotive diesel engines," *Catalysis Today*, Vol. 59(3-4), pp.335-345.
- 2) MPEC 65/4/3; Air Pollution and Energy Efficiency., 2013 "Report of the Correspondence Group," Japan
- 3) Hirata, K., Niki, Y., Kawada, M., Iida, M., 2009, "Development of marine SCR system and field test on ship," ISME, Busan.
- 4) Y. Q. Zhu, C. Xia, M. Shreka, Z. G. Wang, L. Yuan, S. Zhou, et al., 2020, "Combustion and emission characteristics for a marine low-speed diesel engine with high-pressure SCR system," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27(12), pp. 12851-12865.
- 5) El-Bitar, T., El-Meligy, M., Khedr, M., 2020, "Investigation of exhaust valve failure in a marine diesel engine," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 114, pp.104574.
- 6) Adebisi, A. A., Aderemi, O. A., Charles, K. A., 2014, "Comparison of ARIMA and Artificial Neural Networks Models for Stock Price Prediction," *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2014, pp. 614342.
- 7) Ömer Faruk, D., 2010, "A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series

prediction," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23(4), pp. 586-594.

- 8) 국립해양조사원, 2020, "해상 거리", 해양수산부.