

철도차량용 개방형 견인전동기 저소음화 연구

Research on low noise of open type traction motor for railway vehicles

조영억*[†], 박영호*, 정은성*, 김봉철*

Young Eok Cho*[†], Yeong Ho Park*, Eun Sung Jeong*, Bong Chul Kim*

Abstract This paper presents the analytical characterization of the unsteady aerodynamic noise due to cooling air of open type traction motor in railway. The construction of a calculation model and a fundamental simulation using aerodynamic analysis tool based on Lattice Boltzmann Method is tried with computational aeroacoustic techniques. To reduce the difference of the result between experiment and analysis results, none simplified 3D shape and real test environment are applied in the analysis. In agreement with analytical results, the shapes that avoid pressure fluctuation and vortex are proposed and calculated to reduce the aerodynamic noise of traction motor repeatedly.

Keywords : Open type traction motor, Low noise, Unsteady aerodynamic analysis, Self ventilation

초 록 본 논문에서는 철도차량에 사용되는 개방형 견인전동기의 저소음화를 위해 LBM(Lattice Boltzmann Method)을 기반으로 견인전동기 냉각공기의 비정상상태 유동해석을 수행하고 소음원을 분석하였다. 해석결과와 실제 소음값의 오차를 줄이기 위해, 해석모델을 단순화하지 않고 실제 견인전동기 형상모델을 해석하였으며 소음시험 환경과 유사한 해석 공간을 모델링하여 해석결과의 신뢰성을 확보하였다. 해석된 결과를 통해 공기 유동 시 발생하는 와류, 유속, 압력의 정도 및 변화, 해석된 공기 유동장 내의 압력변화를 측정하는 소음해석 기법을 이용하여 소음 주파수 분석을 통해 주파수 영역별 발생소음을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 소음원의 형상을 상사법을 이용해 개선하고 개선된 형상은 재해석을 통해 분석하는 과정을 반복하여 소음저감 목표를 달성한다.

주요어 : 개방형 견인전동기, 저소음, 비정상상태 유동해석, 자기통풍형

1. 서 론

기존의 전동차에는 외부공기를 흡입하여 견인전동기 내부를 냉각하는 타입의 자기통풍형 개방형 견인전동기가 널리 사용되고 있다. 냉각공기의 흐름에 의한 공력 소음이 발생하기 때문에 개방형 견인전동기의 저소음화가 요구되고 있다. 그러나 저소음화를 위해 실제 견인전동기를 개조하여 실험을 반복하는 것은 개발비용의 상승 및 많은 시간을 소비하므로 비효율적이다. 한편, 개방형 견인전동기의 소음은 고회전 시 발생하는 공력소음이 지배적이며, 이때 냉각팬과 회전자 바(Rotor bar)에 의한 풍절음과 내부 유로 구조에 의해 발생하는 소음을 해석을 통해 분석한다면 많은 개발비용을 저감할 수 있다.

† 교신저자: 현대로템(주) 전장품개발팀 (yecho0602@hyundai-rotem.co.kr)

* 현대로템(주) 전장품개발팀

최근 해석 기법과 슈퍼컴퓨터의 발달로 인해 유체소음에 관한 해석이 범용해석프로그램으로 가능해지고 있다. 본 논문에서는 LBM(Lattice Boltzmann Method)을 기반으로 한 해석프로그램(PowerFLOW)을 활용하여 견인전동기 내부의 비정상상태 공기 유동해석을 통해 소음을 분석하여 공력소음의 해석 및 평가를 실시하였다. 실제 견인전동기 형상과 동일한 3D모델을 통해 전동기 내부의 유체유동을 구하고, 외부는 실제 실험환경과 유사한 공간을 모델링하고 일정한 위치에 유동장 압력변화 측정점을 두어 음압 스펙트럼을 분석하였다. 소음은 압력신호 형상을 개선하고 저소음 방안을 제시하고 재해석하여 개선형상의 소음영향을 평가하는 과정을 반복하여 저소음 형상을 설계하였다.

2. 견인전동기 공력소음 분석

2.1 견인전동기 공력소음 시뮬레이션

2.1.1 유동해석

견인전동기 내부 공기유동해석에는 LBM(Lattice Boltzmann Method)를 기반으로 한 해석프로그램을 사용하였다. LBM은 미소 유체 입자들의 거동을 확률적으로 단순화하고 입자의 움직임을 통해 거시적인 유체 유동을 해석하는 방법이다. 기존의 CFD 프로그램들은 Navier-Stokes 방정식에 가정을 도입하여 해석하였다. Navier-Stokes 방정식은 비선형 항을 포함하고 있기 때문에 해석을 위해 많은 해석 시간과 노력이 필요하고 비선형 방정식을 풀기 위해 도입된 가정에 정확한 해를 얻는데 많은 어려움을 가지고 있다.

$$N_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - N_i(\vec{x}, t) = C_i(\vec{x}, t) \quad (1)$$

식(1)은 일반적인 LBM 방정식을 나타내었다. 여기서 $N_i(\vec{x}, t)$ 는 입자의 분포함수 또는 입자의 수를 나타낸다. \vec{e}_i 는 각 lattice의 단위 벡터를 나타내며 그림 1은 3차원 19개의 lattice 방향을 가지는 lattice의 단위 벡터를 나타내었다. 그리고 Δt 는 시간 간격을 나타낸다.

식(1)의 좌변은 입자의 시간에 따른 이동을 나타내며 우변의 $C_i(\vec{x}, t)$ 는 입자의 충돌항을 나타낸다. 입자의 충돌항을 계산하는 방법에 따라 다양한 방법으로 나뉘어진다. 입자의 충돌항은 점도와 많은 관련을 가지고 있다.

식(1)에서와 같이 LBM은 비선형 항을 포함한 미분 방정식 대신에 대수 방정식의 형태를 가지고 있기 때문에 단순하고 또한 미분 방정식의 일반적 해법인 행렬에 대한 반복계산을 수행할 필요가 없기 때문에 기존의 CFD에 비해 계산시간이 빠르고 컴퓨터의 메모리를 적게 사용하는 장점이 있다. LBM은 방정식은 대수 방정식이고 한 점에서 모든 계산이 이루어지기 때문에 병렬화가 매우 용이하다. 기존의 CFD 방법에 비해 병렬화가 매우 쉽고 병렬화 효율이 매우 좋다.[4]

2.1.2 소음 해석

공력 소음은 팬과 고정자 상호간섭에 의한 불연속 주파수 소음과 유입난류, 경계면에서 발생한 후류와 팬, 고정자 상호간섭에 의한 광역대 소음으로 나누어질 수 있다. 고체 구조물에 의한 소음은 고체와 유체 사이의 상호 작용에 의해 생기지만 광역대 소음은 와류에 기인해서 소음이 발생한다. 그러므로 와류의 구조와 흐름에 대한 해석은 공력 소음에 매우 중요한 부분이

다. 소음해석은 이러한 vortex의 흐름이 급격히 변하거나 vortex 강도를 분석하고, 유동장 내의 압력변화를 측정하여 주파수 및 광대역 소음을 분석한다.

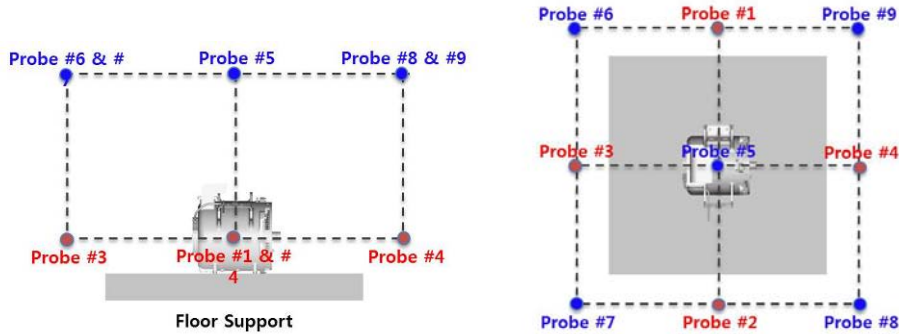


Fig. 1 소음해석 측정 위치

2.1.3 해석 조건

견인전동기 냉각공기 유동에 의한 소음을 해석하기 위해 그림2와 같이 3D형상을 적용하였다. 내부 회전자의 회전자 바는 46개이고, 고정자 코일슬롯은 36개로 일반적인 철도차량용 견인전동기 배치와 동일하다. 회전자의 회전 속도는 5300RPM으로 회전자 표면속도는 118m/s이다.

해석 모델은 3차원 CATIA 모델로 작성되었고, 해석은 범용유체해석프로그램을 사용하였으며 해석 시간은 1 timestep 을 1.063×10^{-6} 초로 총 시뮬레이션 간격이 139,625 timestep이고 실제 0.34초간 견인전동기 회전을 해석하였다.

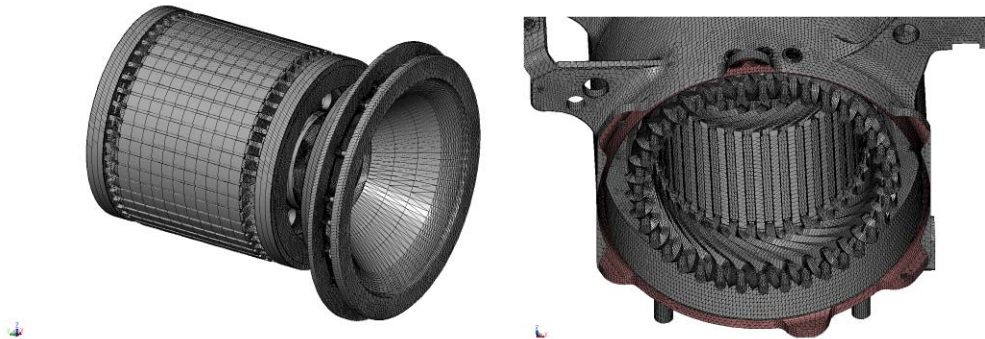


Fig. 2 3D해석 모델

2.2 해석 결과

2.2.1 기존 견인전동기 공력소음 분석

기존 견인전동기 소음 해석결과 그림3과 같이 3kHz 이하의 영역에서는 광역대 소음과 일부 피크소음이 발생하며, 이후 4kHz 영역에서 피크소음이 발생하고 있다. 200Hz ~ 2kHz 부근에서 상대적으로 크며 이상의 주파수영역에서 감소하고 4kHz에서 피크가 발생하는 실험결과와 유사한 스펙트럼을 보이고 있으며, 특정 측정지점에서 실험치가 해석결과와 비교해 10 ~ 20 dBA정도 크게 측정되었다.

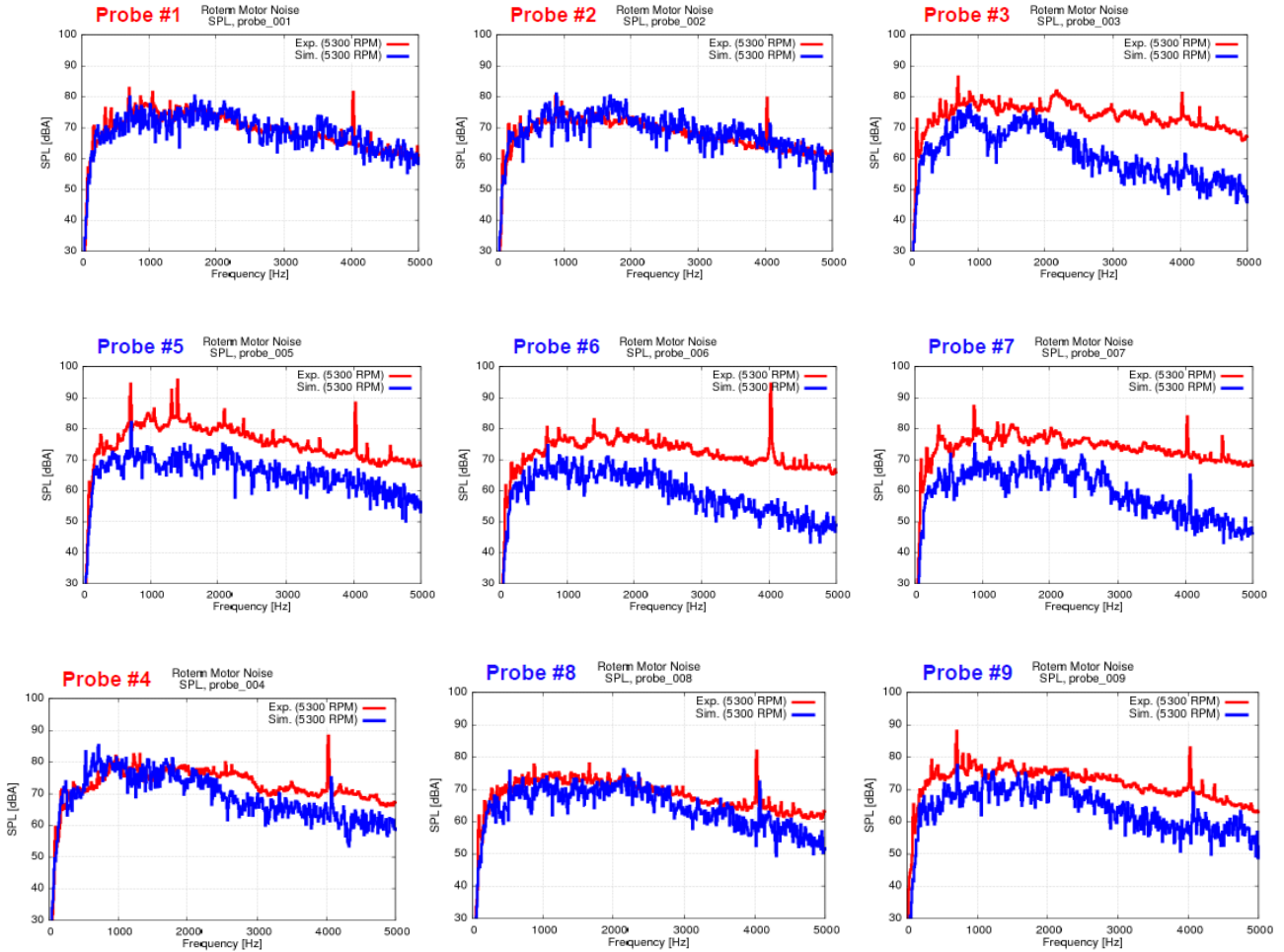
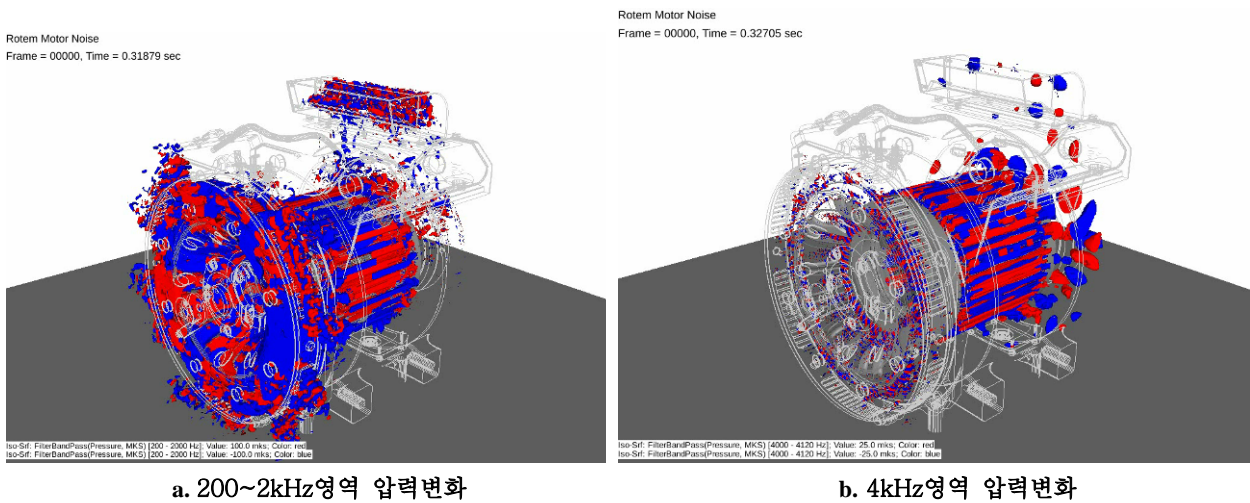


Fig. 3 실험 및 해석 SPL결과 비교

해석 결과를 주파수 영역별 압력변화를 분석해보면 그림 4와 같다.



a. 200~2kHz영역 압력변화

b. 4kHz영역 압력변화

Fig. 4 주파수 영역별 압력변화 스펙트럼

2 ~ 2kHz영역에서는 공기흡입구, 회전자와 고정자 슬롯, 냉각팬의 압력변화가 지배적인 것을 알 수 있으며, 4kHz영역대에서는 회전자와 고정자에 의한 압력변화가 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 견인전동기 내부에서 발생하는 와류는 공기흡입구, 회전자 통풍홀의 입구단, 회전자 바 양단, 냉각팬 측에서 강한 형태를 보이고 있다.

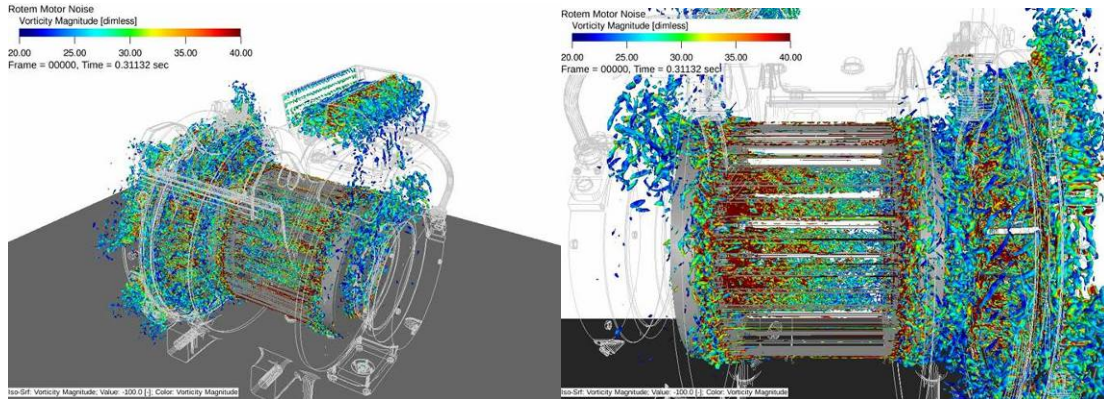


Fig. 5 견인전동기 내부 와류

해석결과를 견인전동기 내부 공력소음과 관련하여 다음과 같이 경향을 보였다.

- 1) 회전자 바와 회전자의 형상에서 기인한 공력소음이 4kHz영역에서 발생하는 피크와 동일한 주파수에서 발생한다.
- 2) 냉각팬, 공기흡입구 형상에서 기인한 압력변화 및 와류는 저주파수영역에서 지배적으로 나타난다.
- 3) 회전자 바, 회전자 통풍홀 입구단에서 강한 와류가 발생한다.

상기의 해석결과로부터, 공기흡입구, 회전자통풍홀 입구, 회전자 바, 냉각팬의 형상을 변경하여 압력변화 및 와류를 감소시키고 그 영향을 평가하였다.

2.3 소음원 개선 및 평가

2.3.1 소음원 형상 개선

해석결과로부터 공기의 와류가 강하게 발생하는 지점에서 와류를 감소시키기 위해 공기 유로의 형상의 곡률을 늘리고 단층면을 경사면으로 변경하여 단면적 및 유로의 변화를 줄였다. 대표적으로 기존 냉각팬의 이중날개 단면효율을 고려하여 상사법을 이용해, 곡률을 개선하였다. 또한, 고주파수영역의 피크소음은 회전자의 형상이 주요 소음원이지만 회전자 제작성 및 고속회전체라는 점을 고려할 때 형상변경이 용이하지 않다. 이러한 이유로 회전자의 형상을 직접 변경하는 대신 유동장이 상호간섭되는 부분의 형상을 변경하였으며 대표적으로 고정자의 슬롯웁지형상 변경이 있다. 이외 공기흡입구, 회전자 통풍홀 입구 등의 형상을 변경하여 기존의 성능을 만족하면서 공기의 압력변화와 와류를 줄이도록 형상설계를 진행하였다.

2.3.2 개선 형상 평가

개선된 형상을 재해석하여 개선형상의 영향을 평가 후 형상 재설계를 반복하여 최종형상을 결정하였다. 개선 영향 평가 시 제한사항으로 공기유량을 기존 유량으로 기준하고, 각 개선형상에 대한 소음 저감효과 정도를 분석하였다.

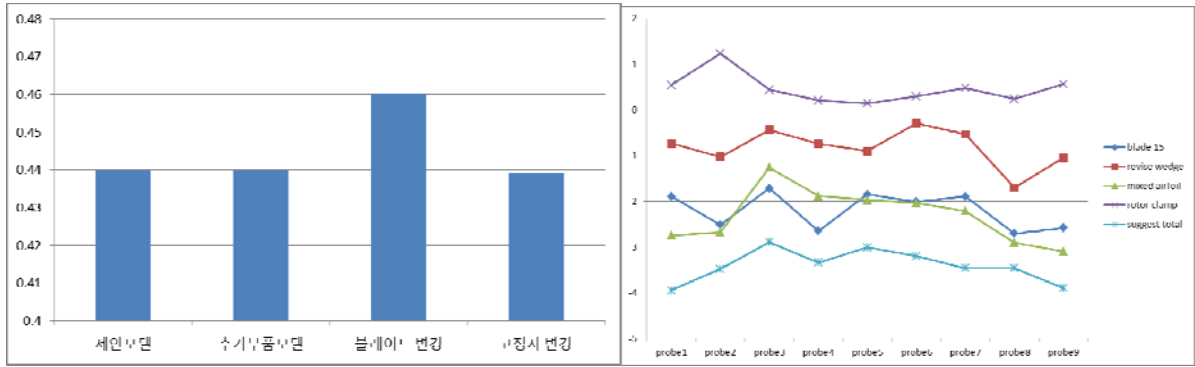


Fig.6 소음원 형상 변경 예

2.4 최종 형상 해석 결과

형상 설계를 반복하여 최종으로 결정된 형상의 해석 결과는 그림 8과 같다.

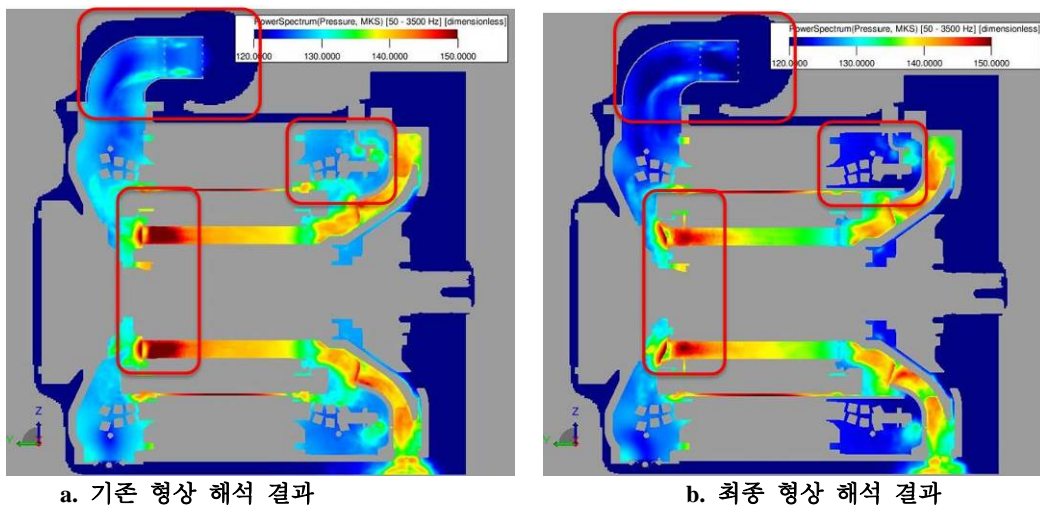


Fig. 7 최종형상 해석 결과 비교

해석결과로부터 공기흡입구, 견인전동기 내부 코일측, 회전자 통풍구 입구측의 압력변화가 감소하였다.

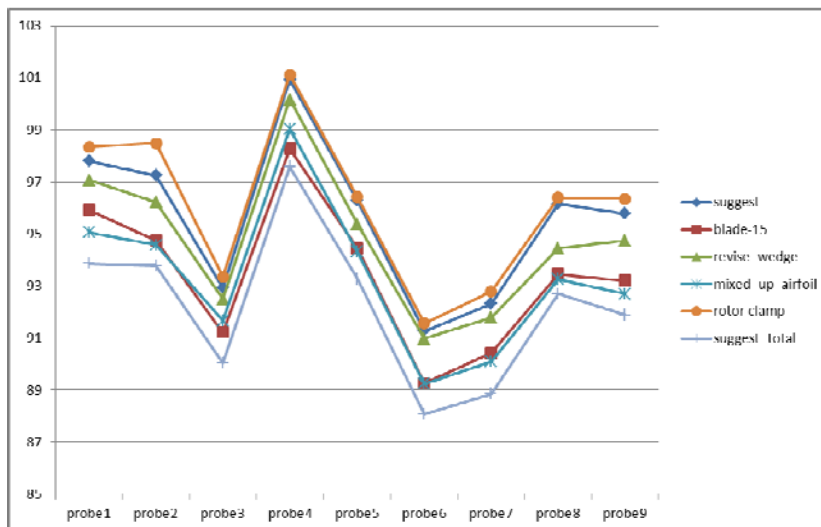


Fig. 8 최종형상 소음해석 결과

소음은 기존 대비 약 5 ~ 7 dB(A)정도 감소하였으며, 개별적인 형상 변경부분의 소음 저감효과는 조합 시에도 공명현상 등의 작용이 없이 효과를 보인다. 한편, 변경된 형상에서 유량은 기존

대비 약 1%정도 상승하였다. 이는 형상변경으로 인해 냉각팬의 효율이 좋아지고 유로저항이 줄었기 때문인 것을 알 수 있다.

3. 결 론

기존의 개방형 자기통풍식 견인전동기를 대상으로 저소음 견인전동기를 개발하기 위해 범용 해석프로그램을 이용하여 소음원을 분석하였다. 해석결과는 실험치와 오차는 있었지만 실제와 유사한 스펙트럼을 얻을 수 있었으며, 이를 바탕으로 개선형상의 소음영향 평가 및 저소음화 형상설계를 진행하여 최종 저소음 해석모델을 확보하였다. 이후 실제 견인전동기를 제작하여 실험을 통해 소음 저감효과를 입증할 예정이다. 향후 실험을 통해 본 해석과정 및 저소음화 형상 설계의 신뢰성이 확보된다면 보다 다양한 조건을 바탕으로 효율적인 견인전동기 저소음화 연구가 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Shozo Takagi, The Iketani Sadataka, the Aoyagi chapter (1972) A low noise induction motor, TOSHIBA REVIEW, a volum No. 4.353-357.
- [2] Shinichi noda, Sueyoshi mizuno, Katsumi Suzuki (2005) Fan noise and Resonance Frequency Analysis in Fan-cooled Inductio Motor, *Forum Acusticum 2005 Budapest*.
- [3] Yasuhiro shimizu, Minoru kondo (2008) Fundamental Examination of the Traction Motor Noise Evaluation Method Using Fulid Acoustic Analysis, *RTRI REPORT Vol.22, No.9*
- [4] Sung Jun Byun, Stephane Cyr, Suk Won Kim, Hyeok Bin Kwon (2014) Numerical Simulation of Aerodynamic Drag for High-speed train using LBM, *Journal of the Korean society for railway, KSR2014S303*