

# 굴삭기 냉각팬 성능해석 및 슈라우드 특성에 대한 실험적 연구

이재석<sup>†</sup> · 정경남<sup>\*</sup> · 김진영<sup>\*</sup> · 이태경<sup>\*</sup> · 강정원<sup>\*\*</sup> · 심재구<sup>\*\*</sup> · 손득균<sup>\*\*</sup>

## Experimental Study of Cooling Fan Performance Analysis and Shroud Characteristics for an Excavator

Jae-Seok Lee, Kyung-Nam Chung, Jin-Young Kim, Tae-Kyung Lee, Jeong-Won Kang, Jae-Koo Shim, and Deuk-Kyun Son

**Key Words :** Excavator(굴삭기), Cooling fan(냉각 팬), Shroud(슈라우드), Fan tester(팬 시험기)

### Abstract

In this paper, the performance analysis is experimentally carried out in order to select the best cooling fan and shroud considering both cooling performance and noise reduction. 4 cooling fans have been tested in the fan tester and the real excavator. In order to obtain the performance of the cooling fans, flow capacity has been estimated by measuring flow velocity using a hot wire anemometer, and noise radiation has been also measured to estimate the fan noise. Characteristics of a box-type and a streamlined shroud have been examined by changing the immersion depth of cooling fans. Based upon the results, the best cooling fan is selected. Finally, the criterion to select the best cooling fan has been set up.

### 1. 서론

팬은 공기를 공급하는 송풍기로서 날개를 회전시켜 작동유체인 공기에 에너지를 전달하는 기계장치로 여러 산업에서 널리 사용되고 있다. 하지만 팬의 회전에 의해 발생하는 소음은 각종 시스템에서 주된 소음원으로 지적되어 오고 있으며 최근 소비자들의 기호가 성능과 더불어 조용하고 쾌적한 제품을 선호하고 국제적으로도 기후협약에 의한 배기가스의 규제 및 EU의 소음규제가 강화됨에 따라, 국내·외 관련업계는 과거 성능위주의 제품개발에서 탈피하여 성능과 소음을 함께 고려한 친환경적 제품개발에 매진하고 있다. 또한, 팬의 냉각성능과 더불어 소음성능도 향상시키기 위

하여 팬 설계기술의 개선이 지속적으로 이루어지고 있다<sup>(1-6)</sup>. 건설장비의 경우에 팬이 냉각기 뒤에 설치되어 있고 좁은 엔진룸에서 주위 구조물과의 상호 작용으로 인하여 팬 단독 운전상태인 경우와 실제와는 다른 성능을 나타낸다. 즉, 협소한 공간에서 큰 시스템 저항으로 인해 냉각 팬의 성능은 저하되고 소음은 커지게 된다. 따라서 냉각기와 팬이 결합된 모델에 대한 풍동시험을 수행하여 최적의 팬이 선정되어야 한다. 그리고 냉각 팬과 슈라우드 사이의 상대위치 및 슈라우드의 형상 또한 팬의 성능에 영향을 미치는 중요한 인자이다<sup>(5), (9)</sup>.

현재 EU에서는 규제치 이상의 소음을 갖는 건설장비의 유통을 금지하고 있으며 건설장비에 대한 소음규제로 인하여 팬 소음에 대한 보다 체계적인 접근이 요구되고 있다<sup>(7-9)</sup>.

이러한 이유로 본 연구에서는 팬 시험기를 이용하여 냉각기 유·무에 따른 대형 굴삭기용 냉각 팬에 대한 모형시험과 실차시험을 통하여 최적의 냉각 팬 선정기술 정립하고자 한다. 또한 풍동시험을 통하여 현재 사용중인 상자형 슈라우드와 개발 모델인 유선형 슈라우드의 특성을 파악하였다.

<sup>†</sup> 회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

E-mail : jaeseok@hhi.co.kr

TEL : (052)205-4578 FAX : (052)202-5495

<sup>\*</sup> 현대중공업(주) 선박해양연구소

<sup>\*\*</sup> 현대중공업(주) 건설장비개발센터

## 2. 실험장비

### 2.1 팬 시험기

본 연구에서는 냉각 팬의 성능을 시험하기 위하여 Fig. 1 과 같이 팬 시험기를 사용하였다. 팬 시험기는 총 3 부분으로 입구부분과 팬, 슈라우드와 냉각기가 장착된 중간부분, 그리고 출구부분으로 구성되어 있다. 냉각 팬의 유량측정은 입구 부분에서 약 1m 떨어진 부분으로 슈라우드와 냉각기의 전방에서 이루어진다.



Fig. 1 Fan tester

### 2.2 냉각 팬

본 연구의 실험대상 냉각 팬(Fig. 2)은 4 가지 모델로 2 개의 기존모델(1, 3)이 있으며 성능개선을 위해 2 개의 신형모델(2, 4)을 새로 도입하였다.

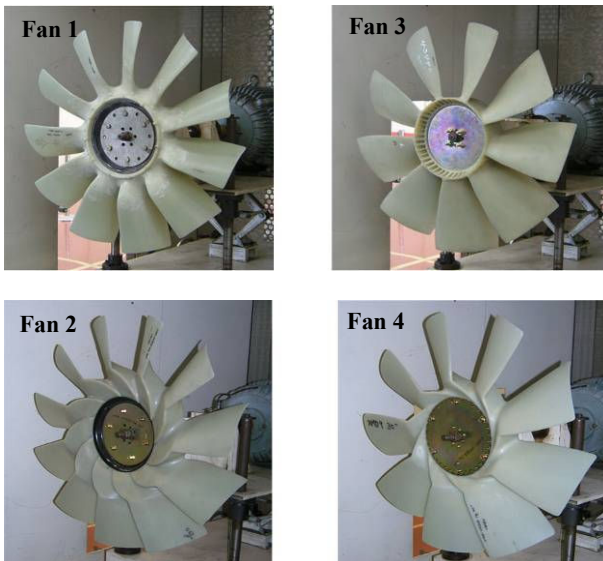


Fig. 2 Cooling fans for experiment

### 2.3 유량측정장비

Fig. 3 은 본 연구에 사용된 열선이 팬 시험기에 설치된 모습을 보여주고 있다. 열선유속계는 16 채널까지 열선 정보수집이 가능한 모델이다. 측정 값은 감열식 인쇄기(Thermal printer)를 통하여 결과를 출력한다. 본 연구에서는 12 개의 열선을 사용하였으며 총 156 개 (12 x 13)의 측정 점에서 유속을 측정하여 유량을 계산하였다.

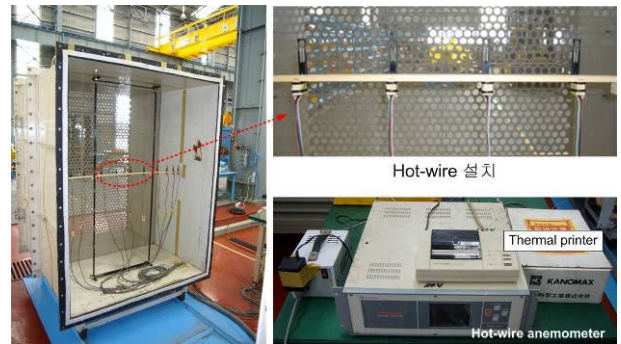


Fig. 3 A hot-wire anemometer

## 3. 실험결과

### 3.1 팬 시험기 모형시험

팬 시험기를 이용한 모형시험은 실차시험 이전에 냉각 팬의 성능과 소음을 미리 측정하여 실차에서의 성능과 소음을 예측하기 위한 방법으로 두 가지 경우로 나누어 진행하였다. 첫째는 Fig. 4 의 좌측과 같이 팬 시험기에 냉각기 없이 슈라우드만 장착한 경우이고, 둘째는 우측과 같이 냉각기를 설치하여 실차와 유사한 상태를 구현하여 모형시험을 실시하였다.

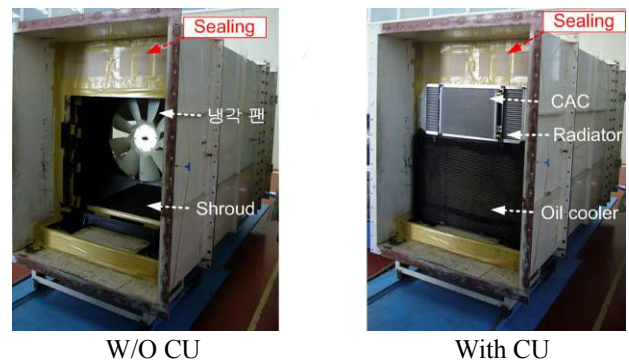


Fig. 4 Experiment cases using the fan tester

### 3.1.1 성능시험

#### 유량측정

열선유속계를 이용하여 4 개의 냉각 팬을 3 가지 회전수에 대해 유량을 측정하였으며 측정결과로 Fan 1 에 대한 유속분포를 Fig. 5 에 나타내었다. X-축과 Y-축은 무차원화한 값이고 회전수에 따른 변화를 확연히 구분하기 위하여 유속분포의 속도범례는 유속이 가장 큰 RPM 을 기준으로 작성하였다. 유속분포에서 알 수 있듯이 냉각 팬이 위치하는 중심부분에 유속이 상대적으로 빨라 유량이 집중됨을 확인하였다. 밀봉을 한 슈라우드 상부와 하부의 영역은 유속분포에서 속도가 상대적으로 낮았으며, 측정 면 모퉁이에서의 Corner flow 도 잘 예측하였다. 회전수에 따른 유량의 변화는 Fig. 6 에서 알 수 있듯이 rpm 이 일정하게 증가함에 따라 유량도 약 4 ~ 7%씩 일정하게 증가하였으며 이는 냉각기 유·무와 상관없이 같은 경향을 나타내었다.

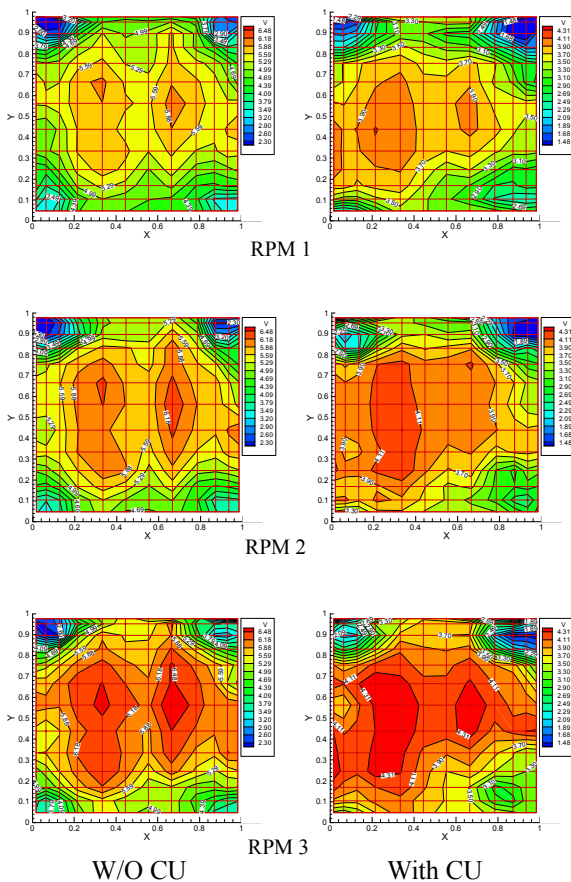


Fig. 5 Velocity distribution of Fan 1 in the fan tester

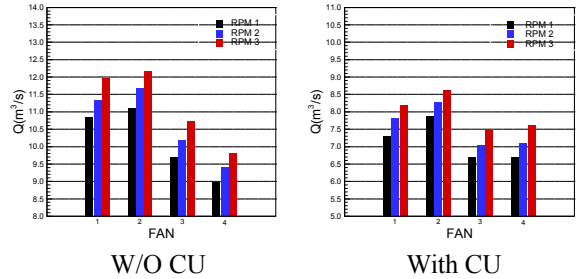


Fig. 6 Results of the volume rate in the fan tester

#### 정압과 구동동력 측정

정압측정은 회전수에 따라 팬 시험기 벽면에 설치되어 있는 정압 탭을 이용하여 유량측정 면과 슈라우드 벽면, 팬 출구에서 정압을 측정하였다. 냉각기가 없을 때와 있을 때의 시스템저항 차이를 파악하고, 냉각기에 의한 유량의 감소를 파악하고자 시험을 수행하였다. 회전수에 따른 정압의 변화를 간단히 요약하면 rpm 이 일정하게 증가함에 따라 전체 시스템 압력 차는 9 ~ 12 % 씩 일정하게 증가하였다.

구동동력의 경우는 팬 시험기의 컨트롤 패널의 전압계와 전류계를 이용하여 각각의 팬에 대해 회전수 별로 DC-모터의 구동동력을 계측하였다. rpm 이 일정하게 증가함에 따라 구동동력도 팬과 무관하게 15%내외로 증가하였고 신형모델의 팬이 기존모델에 비해 약 8% 크게 계측되었다.

### 3.1.2 소음시험

냉각 팬의 소음계측을 위하여서 팬 시험기에서 소음시험을 수행하였다. 소음측정 위치는 입구 중앙에 1 포인트와 출구에서 2 포인트에서 계측하였다. 4 가지 냉각 팬에 대한 소음측정 결과는 Fig. 7 에 나타하였으며 전반적으로 팬의 회전수가 증가함에 따라서 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)도 증가하였다. 대표적으로 1/3 옥타브 밴드 주파수 분석결과를 보았을 때 전 주파수 영역에 걸쳐서 음압레벨이 증가하였고, 특히 팬 소음에서 주된 주파수 성분인 1 kHz 이상의 주파수 영역에서 소음이 증가하였다.

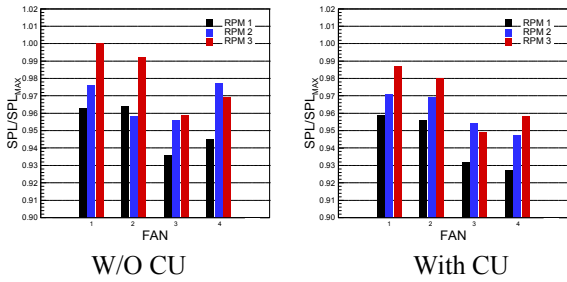


Fig. 7 Results of the sound pressure level in the fan tester

### 3.2 실차시험

대형 굴삭기에서 냉각 팬 성능시험과 소음시험을 수행하였다. Fig. 8은 성능시험을 위한 실차시험 전경으로 Hot-wire를 냉각기 전면에 설치한 모습이다. 총 4개의 팬에 대하여 실차시험을 수행하였다.

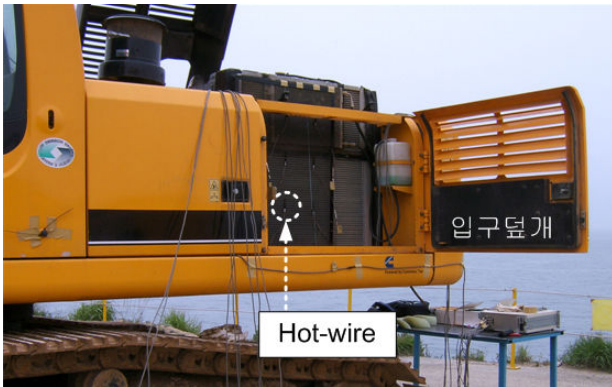


Fig. 8 Experiment using real excavator

#### 3.2.1 성능시험

##### 유량측정

Fig. 9는 Fan 1의 실차 측정 면에서의 유속분포이다. 실험은 2가지 회전수에서 수행하였으며 48개 측정 점에서 유속을 측정하였다. 전체적인 유속분포를 살펴보면, 흡입구 상단에 유량이 많이 집중됨을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 8의 시험 사진에서 확인할 수 있듯이 냉각기와 엔진을 보호하는 입구덮개 부분의 형상 즉, 유로의 흡입구 형상에서 기인한 것이라 판단된다.

유량 측정결과는 Fig. 10 (a)에 정리하였다. 팬 시험기의 결과와 같은 경향을 나타낸다.

#### 3.2.2 소음시험

굴삭기 소음시험은 국제표준기구의 ISO 6393, 6395의 절차를 따라서 진행되었다. ISO 규정 내용은 굴삭기의 전, 후, 좌, 우, 높이 방향으로 정해져 있는 6개의 측정위치에서 음압레벨을 측정하고, 계산을 통하여 전체 굴삭기의 음향파워레벨(Sound Power Level, PWL)을 추정하는 것이다. 여기서 음향파워레벨은 소음원의 크기 정도를 나타내는 지표이다. 실차 소음시험은 정적 모드(Static mode)와 동적 모드(Dynamic mode)로 나누어 수행하였다. 정적 모드는 굴삭기 시동을 건 채 움직임이 없는 상태에서 소음을 측정하는 것이고, 동적 모드는 굴삭기가 실제 작업과 유사하게 작업 장치(Bucket, Arm, Boom)를 작동시키며 소음을 측정하는 것이다. 동적 모드가 정적 모드보다 소음이 큰 것이 일반적이며 이는 작업 장치가 움직임에 따라서 유압 장치가 부하를 받게 되어 유압소음이 더해지기 때문이다.

실험대상 4가지 냉각 팬에 대한 실차 소음시험 결과는 Fig. 10 (b)에 정리하였다. 규제 대상인 동적모드에서의 방사소음을 음향파워레벨로 나타내었다.

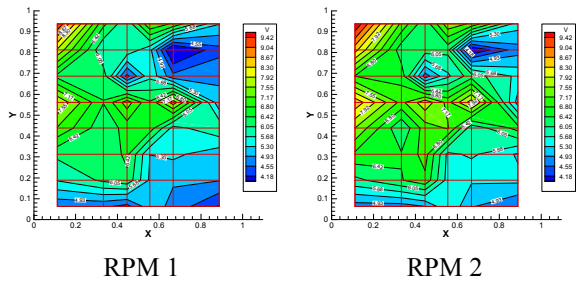


Fig. 9 Velocity distribution of Fan 1 in the real excavator

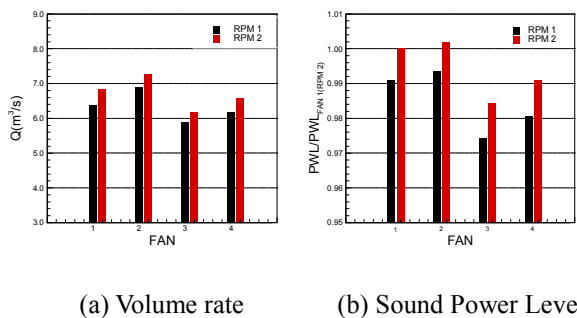


Fig. 10 Results of the volume rate and sound power level in the real excavator

### 3.3 팬 시험기와 실차 성능시험 고찰

송풍기 기술동향을 보면, 국제적으로 공인된 AMCA(Air movement and control association)의 201-02 에서 SEF(System effect factor)는 ‘팬 주위 시스템에 의한 압력 손실’ 이라 정의한다. 즉, 팬 성능곡선에 의한 이론적인 흡입유량이 팬 주위의 시스템에 의하여 줄어드는 효과를 일컫는다<sup>(7, 8)</sup>. 이러한 이론적 배경을 바탕으로 본 연구에서는 Fig. 11 과 같이 시스템 곡선을 실험을 통해 구현하였다. 여기서 팬 성능곡선은 공급업체에서 제공한 것을 사용하였다.

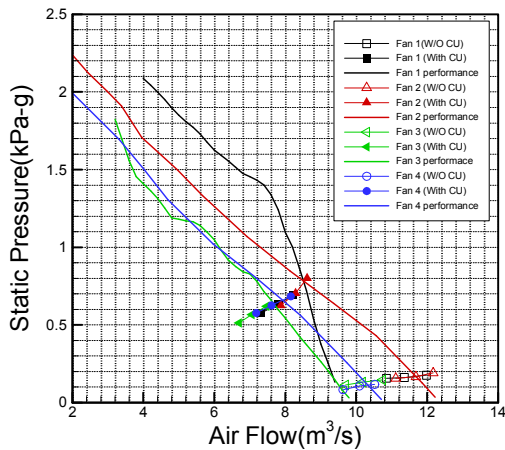


Fig. 11 Performance and system curves of the fans

시스템 저항의 증가 관점에서 각각의 팬에 대해 정리하면, Fan1, 2, 3 팬의 경우는 냉각기를 장착함으로써 인해 냉각기가 없는 경우와 비교하여 유량이 약 30% 감소하였고 Fan 4 의 경우는 약 25% 감소하였다. 실차에서의 팬 유량과 냉각기가 있는 경우와 비교하면 모든 팬이 실차에서 유량이 약 10%씩 균일하게 감소하였다.

### 3.4 슈라우드 특성시험

앞선 모든 시험은 현재 대형 굴삭기에 사용중인 상자형 슈라우드를 사용하는 경우에 대하여 모형시험을 수행한 것으로써 그에 따른 팬의 특성을 살펴보았다. 다음에서는 슈라우드 형상에 따른 변화와 팬 물힘량에 따른 변화를 알아보자 한다. 먼저 실차에 장착되어 사용중인 상자형 슈라우드(Box-type shroud)의 팬 물힘량에 대한 변화를 유량 측면에서 알아보고, 유선형 슈라우드

(Streamlined shroud)에 대해서는 유량과 소음시험을 수행하였다. 팬은 신형모델 2 가지(Fan 2, 4)에 대해서 수행하였다. 팬 시험기에 부착된 2 가지 슈라우드 형상은 Fig. 12 와 같으며 실험조건은 냉각기가 장착된 상태에서 RPM 2 조건에 대해서 수행하였다. 유선형 슈라우드의 특징은 상자형과는 달리 슈라우드 출구부분이 디퓨저 형상으로 유동의 흐름을 원활하게 하여 최대한 저항을 줄이고 풍절음을 완화시키기 위해 고안되었다.

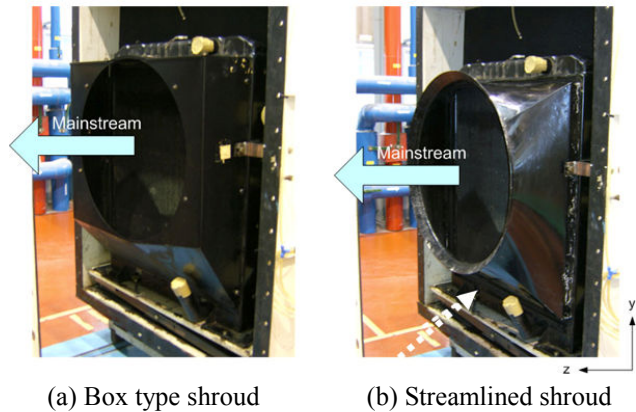


Fig. 12 Two shrouds in the fan tester

본 실험의 중요변수인 물힘량은 아래 식에서 정의하듯이 팬이 슈라우드에 얼마나 묻혀있는지를 팬의 축방향 코드길이를 무차원한 값이다.

$$y^+ = \frac{y}{C_{Axial}}$$

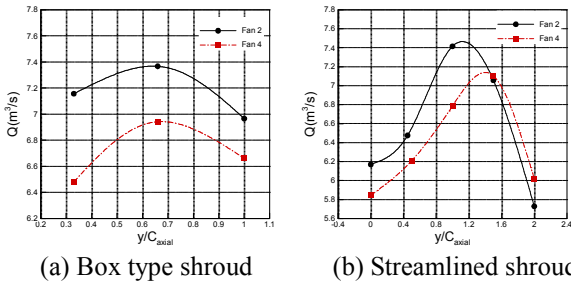
여기서  $y$  는 슈라우드 출구 끝으로부터 팬 블레이드의 전연(Leading edge, LE)까지의 거리를 나타낸다.

#### 3.4.1 상자형 슈라우드

상자형 슈라우드의 성능시험에 대하여 RPM 2 에서 팬 물힘량을 0.33, 0.66, 1.0 으로 변화시키며 유량을 측정하였다. 실험결과는 Fig. 13 (a)에 정리하였다. 여기서 실선은 Fan 2 이고, 일점쇄선은 Fan 4 에 대한 결과이다. 결과에서 확인하듯이 상자형 슈라우드는 팬의 종류와 상관없이 일정한 물힘량 0.66 에서 최적의 성능을 나타내었다. 이는 기존모델(Fan 1, 3)도 같은 결과를 가진다.

### 3.4.2 유선형 슈라우드

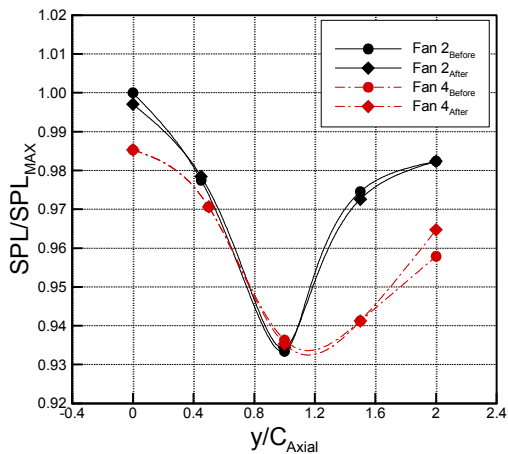
유선형 슈라우드에 대해서 상자형과 같이 RPM 2 에서 팬 물힘량을 0.0, 0.45/(0.5), 1.0, 1.5, 2.0 으로 변화시키며 실험하였다. 실험결과는 Fig. 13 (b)에 정리하였다. Fan 2 의 경우는 최적의 물힘량이  $y^+ \sim 1.2$ , Fan 4 경우는  $y^+ \sim 1.5$  이다.



(a) Box type shroud (b) Streamlined shroud

**Fig. 13** Performances of two shrouds with immersion depth of cooling fans

물힘량에 따른 냉각 팬 소음의 경향도 파악하고자, 유량계측과 같은 조건에서 진동, 소음을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 14 에 정리하였다. 여기서 원형 심볼은 제진제를 붙이기 전이고 사다리꼴은 제진제를 붙인 후의 결과이다. Fig. 14 에서 제진 처리 전·후에 소음의 변화는 거의 없다. 즉 슈라우드의 교체음 방사가 팬 소음에 기여하는 정도가 미미하다고 판단된다. 또한 팬 모두 물힘량이 1 일 때 최소소음이 측정되었다. 따라서 유선형 슈라우드에서 물힘량 1 에 팬을 설치할 때, 가장 최적의 구동환경을 구현할 수 있다고 판단된다.



**Fig. 14** Results of the noise radiation

## 4. 결론

본 연구에서는 최적의 냉각 팬을 확보하고자 팬 시험기를 이용하여 팬의 성능과 소음시험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 최적의 냉각 팬 선정기술을 구축하였으며 이를 실차시험을 통해 검증하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 냉각 팬에 대한 모형시험 수행하고 실차시험을 통하여 그 관계를 규명하고 최적 냉각 팬 선정기술을 구축하였다.
- (2) 팬 시험기를 이용한 모형시험을 통하여 상자형 슈라우드와 유선형 슈라우드의 특성을 파악하였다.

본 연구는 냉각성능과 소음성능이 개선된 차세대 건설장비용 냉각 팬과 슈라우드를 선정하고 확보하는데 많은 도움이 되리라 기대한다.

## 참고문헌

- (1) 김동규, 오재응, 임동규, 1993, “실험적 방법에 의한 축류형 팬의 소음저감에 관한 연구,” 한국음향학회지 12,6(1993.12), pp. 28~35.
- (2) 김병주, 2003, “성능과 소음을 고려한 축류팬의 설계프로그램 개발,” KAIST 석사학위 논문.
- (3) 김재원, 정윤영, 2000, “축류팬의 성능평가 및 주변 유동 특성,” 설비공학논문집, pp. 972~981.
- (4) 정기훈 외, 2001, “중장비 팬의 엔진 룸을 통한 소음방사 해석,” 한국소음진동 공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 954~960.
- (5) 이효원 외, 1999, “중장비 저소음 저진동 요소 부품개발,” HMRI Report, AAC-HI3-1999.156.
- (6) 고경은 외, 2005, “굴삭기 저소음화 기술개발,” 2005 추계 소음진동학술대회 논문집, pp. 156~160.
- (7) AMCA Fan Application Manual Publication 200, 1995, “Air Systems” Air Movement and Control Association International, Inc.
- (8) AMCA Publication 201, 2002, “Fans and Systems,” Air Movement and Control Association International, Inc.
- (9) Wallis, R. A. 1983, “Axial Flow Fans and Ducts,” John Wiley & Sons, Inc.