

공기 분사 장치에 의한 수막 형성 억제 특성 분석

고광수·문정우·윤현곤·송시몬[†]

Experimental Analysis on Hydroplaning Inhibition by Air Jetting Devices

Kwangsoo Ko, Jungwoo Moon, Hyungon Yoon and Simon Song^{*}

Abstract. 매년 장마철에는 수막현상으로 인한 교통사고가 빈번하게 발생한다. 본 연구는 수막 형성 억제를 위해 타이어 앞부분에 설치되는 공기 분사 장치의 성능을 평가하는 것으로서, 공기 분사에 의한 수막 형성 억제를 모사할 수 있는 실험 장치를 제작하고, 수막 형성 억제 과정을 가시화하여 공기 분사 장치의 성능을 파악하고자 한다. 실험 변수로서 노즐의 형상 3가지와 수막에 대한 분사각 3가지에 대해 상세히 그 영향을 조사하였으며, 그 결과 분사각은 10도(지면에 대해서는 80도), 노즐 형상은 일자형일 때 수막 억제 효과가 가장 큰 것으로 파악되었다.

Key Words : Hydroplaning(수막현상), Inhibition (억제), Air Jetting (공기분사), Nozzle (노즐)

1. 서 론

매년 장마철(6~8월)에 발생하는 차량 교통사고들을 분석해 보면 비가 내리는 날에 발생한 교통사고의 빈도가 맑은 날에 비해 높게 나타난다. 2014년 장마철에 발생한 15만 건의 교통사고에 대한 통계에 따르면 비가 내리는 날에 발생한 교통사고의 빈도가 그렇지 않은 경우에 비해 약 21.4% 높다.⁽¹⁾ 비오는 날 교통사고가 증가하는 주된 원인은 도로에서 발생하는 수막현상으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 수막현상이란 자동차가 젖은 노면을 빠른 속도로 달릴 때 타이어와 지면 사이에 얇은 막이 생기게 되고 이 막에서 발생하는 수압이 타이어를 지면으로부터 밀어 올리는 현상으로, 자동차의 제동 성능 저하 혹은 심각한 경우 조정성 상실로 인한 사고를 초래할 수 있다.⁽³⁾ 만일 타이어 앞부분에 압축공기를 분사해주면 수막 형성을 억제하거나 방지할 수 있다.

수막형성 억제에 관한 기존 연구는 차량 전면의 공기 유입부를 통해 유입된 공기를 타이어 전면에 설치된 노즐로 보내 분사하여 수막을 제거하는 특화가 있다. 또한 컴프레서를 이용하여 노즐에서 공기를 분사하는 기술도 특허로 보고되어 있다. 하지만 이러한 특허들은 노즐 형상이나 설

치 방법이 수막 형성에 미치는 영향을 구체적으로 분석하지 않았다.

본 연구의 목표는 공기 분사 노즐의 형상과 설치 방법이 수막 형성 억제에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 이를 위해 수막 유동을 가시화할 수 있는 실험 장치를 개발하고, 다양한 조건에서 공기 분사에 의한 수막 형성 억제 특성을 조사하고자 한다. 또한 주어진 운전 조건에 가장 최적화된 공기 분사 노즐 형상 및 설치 방법을 제시하는 것을 목표로 한다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 실험 장치의 설계도이다. 합판으로 만든 직사각형의 틀(폭 1.2m, 길이 2m, 높이 0.3m)에 얇게 물을 채워 수막이 형성되도록 하였다. 물로 인해 합판이 변형되는 것을 막기 위해서 흰색 방수 페인트를 바르고 또한 합판의 틈새로 물이 새지 않도록 방수처리 하였다. 수막의 높이를 일정하게 유지할 수 있도록 틀의 한 쪽 면에 물이 빠져나갈 수 있는 슬릿형 배수구를 만들어 주었는데 이 배수구의 턱과 바닥과의 높이를 수막의 높이와 같게 제작하였다. 수막의 두께가 10mm일 때 수막현상 발생 시 관성의 효과가

[†] 한양대학교 기계공학부
교신저자: simonsong@hanyang.ac.kr

지배적이기 때문에⁴⁾ 본 실험에서는 수막의 두께를 10mm로 고정하였다. 또한 물은 흰색의 바닥면과 대비되도록 검은 색소가 용해된 수용액을 사용하였다.

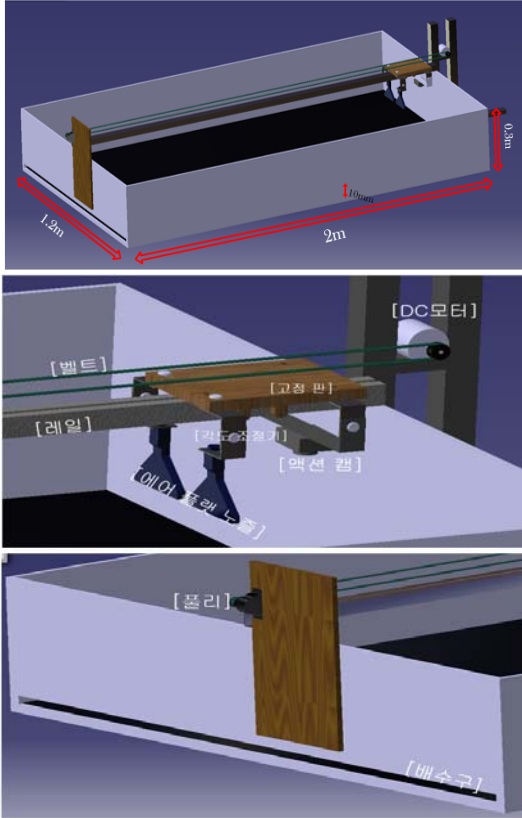


Fig. 1. 실험 장치 개략도. 수막 형성 장치 프레임 및 레일(상), 공기분사 노즐 및 카메라 고정 장치(중), 배수구(하)

움직이는 차량과 노즐을 모사하기 위해 알루미늄 프레임은 직사각형 틀의 가운데에 고정하고 이를 레일로 이용하였다. 이 레일과 평행하게 벨트를 설치하였으며 벨트는 DC 모터에 의해 구동될 수 있도록 하였다. 공기 분사 노즐은 벨트와 레일을 이어주는 평판에 고정하여 모터의 회전 때 따라 노즐이 안정적으로 움직이도록 하였다. 공기 분사 노즐은 컴프레서와 연결하였으며 컴프레서에서 공급한 압축공기를 분사하여 실험장치에 조성된 수막을 억제한다. 노즐은 수막에 대해 공기 분사 각도를 변경할 수 있도록 설치하였다. 또한 공기 분사에 의한 수막 유동의 변화를 관찰하기 위해 레일을 따라 움직이는 평판에 카메라를 노즐과 함께 고정하였다.

실험 변수는 두 가지로 설정하였다. 첫째는 수막에 대한 공기 분사 각도이다. Fig. 2에 보인 것처럼 진행되는 타이어를 측면에서 바라볼 분사 각도 0~30°까지 10°간격으로 변화시킨다. 둘째는 노즐 형상으로서 일자형(180°), V자형(160°, 140°, 120°)을 이용하였다.

실험 조건 및 방법은 다음과 같다. 모터의 회전속도는 500rpm으로 고정시켰고, 압축공기의 분사압력은 컴프레서에 있는 레귤레이터를 이용하여 6 bar로 조정하였다. 모터를 작동시켜 노즐과 카메라가 붙어 있는 평판이 레일을 따라 움직이기 시작할 때 맞춰 압축공기를 분사하고 이를 영상으로 촬영한다. 촬영된 영상을 분석하여 정상상태에 이르렀을 때를 기점으로 0.05초 간격으로 5프레임을 추출한다. 이렇게 추출한 사진들을 한국 표준색 색채 분석 프로그램⁵⁾을 이용해서 32색으로 간소화시킨 후, 색채별 비율과 각 색상의 K값을 수치화한다.



Fig. 2. 공기 분사 실험 변수: 공기 분사 노즐 설치 방법(좌) 및 노즐 형상 (우)

이때 수치화한 값들을 K값에 대하여 가중평균을 구한 뒤에 설계 변수별로 비교 분석하여 가중평균값이 가장 작은 값을 최적의 분사 조건으로 지정한다. 여기서 K 값이란, 청록색(Cyan)과 자주색(Magenta) 그리고 노란색(Yellow)을 섞으면 점점 어두워지는 감산 혼합이 일어나며 최종적으로 검은색이 나오게 되는데 이 검은색을 K라고 한다. 이 K값이 어두운 정도를 의미하므로 K값을 이용하여 가중평균을 했을 때 가중 평균치가 가장 낮은 모델이 수막이 제일 잘 제거된 모델이라고 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

공기 분사에 의한 수막 형성 억제를 실험하기에 앞서 공기 분사에 필요한 압력을 식 (1)에서 나타난 상사를 통해서 추정하였다.

$$\frac{F_{Water.prototype}}{F_{Air.prototype}} = \frac{F_{Water.model}}{F_{Air.model}} = \alpha \quad (1)$$

여기서 $F_{Water.prototype}$ 은 실제 차량 주행 시 물이 가하는 힘, $F_{Air.prototype}$ 은 실제 차량 주행 시 공기가 가하는 힘, $F_{Water.model}$ 은 실험 모델에서 물이 가하는 힘, 마지막으로 $F_{Air.model}$ 은 실험 모델에서 물이 가하는 힘을 나타낸다.

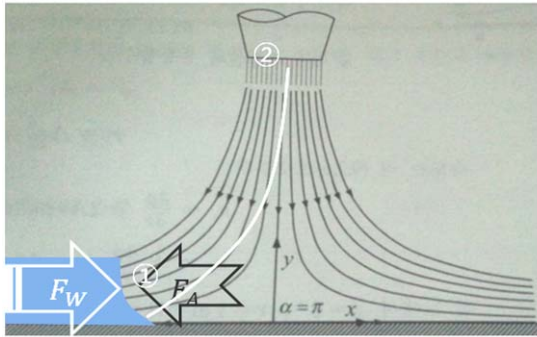


Fig. 3. 공기제트와 수막 유동의 힘 평형

Fig. 3에서와 같이 자동차는 정지해있고 수막이 움직인다고 가정할 때, 압축공기가 물을 밀어내게 되면 물이 가해주는 힘과 공기가 가해주는 힘이 평형을 이루게 되고 ①번 지점에서 정체점을 형성한다. 이때 물의 힘은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_{Water} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, v 는 차량의 속도이다. 또한 손실을 무시하면 공기가 가해주는 힘은 다음과 같다.

$$F_{Air} = p \cdot A \quad (3)$$

이때 p 는 분사에 필요한 공기의 압력이고 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha = \frac{F_{Water.prototype}}{F_{Air.prototype}} = \frac{F_{Water.model}}{F_{Air.model}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{p \cdot A} = \frac{\rho \cdot v^2}{2p} \quad (4)$$

식 (4)를 통해서 ρ 가 일정할 때 $v^2 \propto p$ 관계식을 얻을 수 있다. 이 때의 기압대 수압비를 기수비 α 라고 명명한다. 즉 실험의 압력과 속도를 알면 실제 차량의 주어진 속도에 대해 필요한 압력을 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며 그 반대로 마찬가지로. 예를 들면, 실험에서 노즐의 진행속도는 2.64 km/h이고 공기 분사 압력은 6bar를 사용하였는데 이와 대응되는 실제 차량 속도가 80km/h라면 이 때 필요한 공기 분사 압력은 약 5510 bar이다.

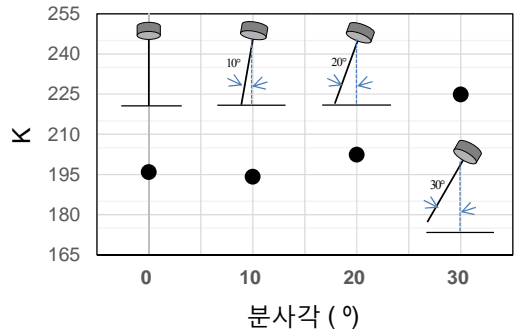
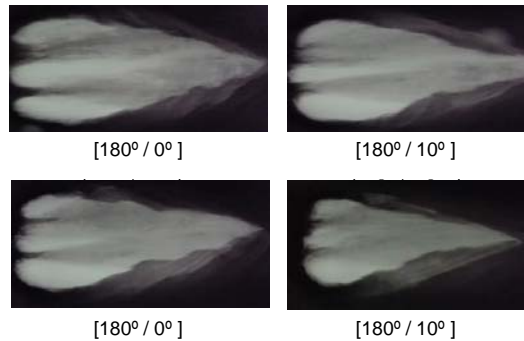


Fig. 4. 분사각 대비 수막 형성 억제 효과 비교: 분사각에 따른 수막 변화 사진(상) 및 K값의 변화 그래프(하). 사진의 괄호 안 각도는 노즐형상(좌)과 분사각(우)을 나타냄.

본 실험의 첫 번째 단계로, 노즐의 진행 속도와 공기 분사 압력을 각각 2.64 km/h와 6 bar로 정한 뒤, 일자형 노즐(180°)을 이용하여 수막에 대한 분사 각도를 변화시켜가며 수막 형성 억제를 관찰하였다. Fig. 4는 공기 분사에 의해 수막이 밀려난 순간을 찍은 사진과 이를 분석하여 얻은 K 값에 대한 그래프이다. 이 때 K값은 영상 전체의 K값에 대한 평균값이다. 사진에서 하얀 부분이 수막이 제거되어 바닥면이 드러난 부분이며 그래프에서 K 값이 255인 경우(검은색)는 수막 형성이 전혀 억제되지 않았고, K 값이

165인 경우(흰색)는 완전히 수막이 제거된 상태를 뜻한다. 이 결과에 따르면 분사각이 0°인 경우(수막과 수직)가 수막 억제 효과가 제일 좋고, 분사각이 30°일 때 수막 형성 억제 효과가 가장 나빠지는 것으로 파악되었다.

Fig. 5는 분사각이 수막과 직각인 경우에 대해 노즐 형상(180~120°)을 변화시켜가며 수막 억제 효과를 촬영한 사진과 이를 분석하여 얻은 K값을 표시한 그래프이다.

노즐의 형상이 일자(180°)에서 많이 꺾인 V자(120°)로 변할수록 K 값이 커지는 것으로 나타났다. 이는 사진에서 보여지는 것처럼 수막 억제 효과가 감소하는 것을 의미한다.

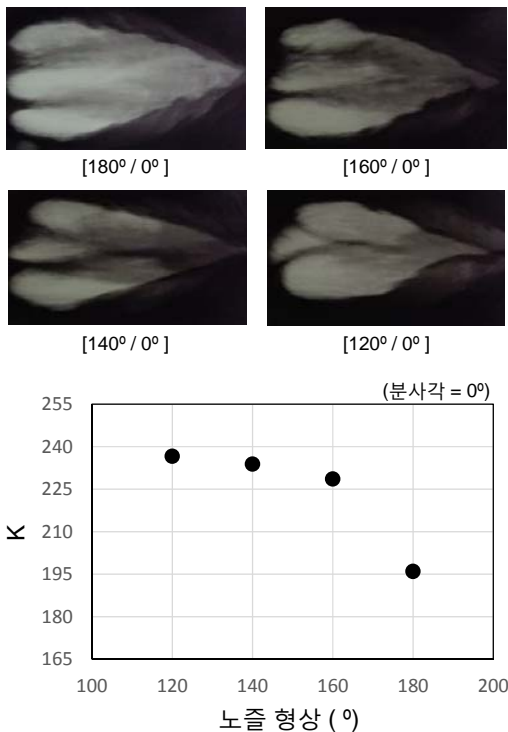


Fig. 5. 노즐 형상 대비 수막 형성 억제 효과 비교: 노즐형상에 따른 수막 변화 사진(상) 및 K값의 변화 그래프(하). 사진의 괄호 안 각도는 노즐형상(좌)과 분사각(우)을 나타냄.

실험 변수에 따른 수막 형성 억제 결과를 바탕으로 각 변수에 대해 효과가 상대적으로 큰 세 가지 경우를 조합하여 총 9개의 경우의 수에 대해 수막 형성 억제 실험을 수행하였다. Fig. 6은 각 경우에 대한 K 값 및 이를 수막 퍼센트로 표기한 그래프이다. 즉 수막이 100%인 경우는 수막 형성 억제 효과가 전혀 없는 경우이다. 그 결과, 노즐

형상이 140° 혹은 160°일 때에 비해 180°일 때 남아있는 수막 형성이 가장 잘 억제되며, 분사각은 10°일 때 수막이 잘 억제되는 것으로 파악되었다. Fig. 6에 삽입된 사진은 9개의 경우 중 수막 형성 억제 효과가 가장 좋은 경우와 나쁜 경우를 비교한 사진이다. 결과를 종합하여 보면, 노즐 형상이 180°에서 140°로 감소함에 따라 노즐에서 분사되는 공기의 폭이 좁아져 제거되는 수막도 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 분사각은 10°일 때 수막을 제거하지 않고 낭비되는 공기의 양이 가장 적은 것으로 추정된다.

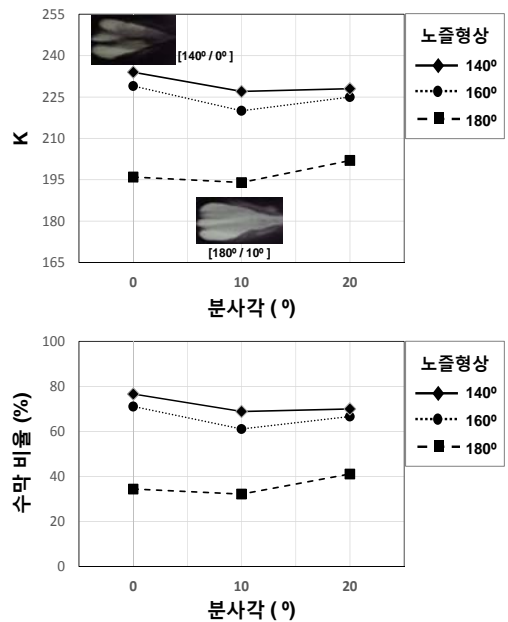


Fig. 6. 분사각과 노즐형상에 따른 K와 수막 비율의 변화

4. 결론

본 연구는 장마철 교통사고의 주된 원인인 수막 현상을 억제하기 위한 최적의 공기 분사 모델을 찾는 것이 목표였다. 이를 위해 공기 분사 장치에 의한 수막 형성 억제를 가시화할 수 있는 장치를 제작하였다. 다양한 노즐 형상과 분사각에 대해 수막 형성 억제 효과를 색채 분석을 이용하여 조사한 결과, 분사각은 10°일 때, 노즐 형상은 일자형일 때 가장 좋은 수막 억제 효과를 보여 주었다.

REFERENCE

- 1) Report by Transportation weather conditions Institute of Hyundai Marine & Fire Insurance, 2014.
- 2) Ung-Won Park, Su-Jae Yu, 2012, Rain Causes of Traffic Accidents and Preventive Measures, v.9 no.4, 69-74.
- 3) Jung Sam Son, 2005, Development of GUI-based program for generating MSC/Dytran's input file for the hydroplaning analysis.
- 4) Kyung Ah Lee, 2003, A Study on the Simulation Methodology for the Tire Hydroplaning.
- 5) Korea Standard Color Analysis by Korean Agency for Technology and Standards, 2010. ([http:// www.kats.go.kr/content.do?cmsid=87](http://www.kats.go.kr/content.do?cmsid=87))