

강풍에 의한 비산물의 비행 시작 풍속에 관한 연구

정희갑* · 이승호** · 박준희*** · 권순덕****

Jeong, Hougab* · Lee, Seungho** · Park, Junhee*** · Kwon, Soon-duck****

A Study on the Flight Initiation Wind Speed of Wind-Borne Debris

ABSTRACT

This study provides a method and data for predicting the flight initiation wind speed of wind-borne debris. From the force equilibrium acting on debris including aerodynamic and inertia forces, the equation for predicting the flight initiation wind speeds are presented. Wind tunnel tests were carried out to provide necessary aerodynamic data in the equation for the debris with various aspect ratios. The proposed equation for flight initiation wind speeds was validated from free flying tests in the wind tunnel. The flights of debris were mostly initiated by slip when width to thickness was less than 10, otherwise overturning were dominant. The actual flight initiation speeds were lower than that of the computed ones. The surface boundary layer flow and the gap between the debris and surface might affect the prediction error.

Key words : Wind-borne debris, Flight initiation speed, Wind tunnel test, Aerodynamic force coefficient

초 록

태풍 등과 같은 강풍에 의한 비산물로부터 구조물과 인명의 피해를 최소화하기 위해서는 비산물의 비행 시작 풍속을 예측할 수 있어야 한다. 본 연구의 목적은 강풍 시 비산물의 비행 시작 풍속을 예측하기 위한 방법과 예측에 필요한 데이터를 제공하는 것이다. 이를 위해 힘의 평형방정식으로부터 비산물의 비행 시작 풍속 예측식을 제시하였다. 또한 예측식에 필요한 공기력계수를 산출하기 위해 풍동실험을 수행하여 비산물의 길이와 높이의 비에 따른 공기력계수를 측정하고, 아울러 비율에 따른 공기력계수를 계산할 수 있는 경험식을 제시하였다. 예측 비행 시작 풍속을 검증하기 위해 풍동에서 자유비산 실험을 수행하여 비산물의 비행 시작 풍속을 측정하였다. 비산물의 길이와 두께의 비가 10 미만인 경우에는 주로 미끄러짐에 의해 비행이 시작되었고, 10 이상인 경우에는 주로 전도에 의해 비행이 시작되는 것으로 나타났다. 실제 비행 시작 풍속은 예측 풍속과 전반적으로 일치하나 약 20~30% 낮았다. 이는 도류판 표면의 경계층 흐름 및 시험체의 변형 등이 원인으로 추정되며, 향후 예측 정확도를 높이기 위한 추가 연구가 필요하다.

검색어 : 비산물, 비행 시작 풍속, 풍동실험, 공기력계수

1. 서론

최근 기상변동성의 증가로 인해 자연재해의 다양성이 확대되고 있고 매해 재산 및 인명 피해가 증가하고 있다. 행정안전부 및 국민재난안전포털의 2018년 재해연보(MOIS, 2018)에 따르면 다양한 자연재해 중에 강풍을 동반한 태풍의 피해가 가장 큰 것으로 나타났으며, 강풍에 의해 가로수 전도, 유리 파손, 비산물에 의한 상해 등과 같이 다양한 유형의 사고가 빈번하게 발생하고 있는 것으로 보고되었다.

* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 박사후연구원 (Chonbuk National University · jeonghg@jbnu.ac.kr)

** 전북대학교 KOCED 대형풍동실험센터 책임연구원 (Chonbuk National University · shlee.wind@gmail.com)

*** 한국원자력연구원 기계구조안전연구부 책임연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute · jhpark78@kaeri.re.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Chonbuk National University · sdkwon@chonbuk.ac.kr)

Received November 20, 2019/ revised December 1, 2019/ accepted December 16, 2019

특히 바람에 날리는 비산물은 태풍, 허리케인 등과 같은 강풍의 주요 피해 원인으로 알려져 있다. 비산물의 종류로는 합판, 각목 등 바닥에 쌓여둔 적치물, 지붕 패널, 유리파편 등이 있고, 이러한 비산물이 강풍에 의해 충분한 속도에 도달하게 되면 심각한 인명 피해를 초래할 뿐만 아니라 건물에 침투하여 순간적으로 건물의 내부 압력을 증가시켜 건물에 손상을 줄 수 있다. 실제 2018년에는 태풍 콩레이에 의해 부산 엘시티 공사장에서 유리창 수백장이 깨지면서 주변 수백m까지 날아가 인근 아파트와 상가의 유리창 및 차량이 파손되는 사고가 발생되었다(Fig. 1). 이러한 피해를 최소화하기 위해서는 강풍에 의한 비산물의 비행 시작 풍속, 비행 궤적, 비산물의 충격량 등의 비산물에 대한 비행 특성을 연구할 필요가 있다.

비산물의 비행 특성에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바 있다. 초기 비산물에 대한 연구는 토네이도에 날리는 비산물의 궤적을 추적하는 것에 집중되어 있었다(McDonald et al., 1974; Lee, 1974; Lee, 1975; Twisdale et al., 1979). Tachikawa(1983; 1990)는 풍동실험을 통해 평판과 프리즘에 대한 비행 궤적을 측정하는 실험을 수행하였고, 공기력계수를 가정하여 운동방정식에 의해 수치적으로 계산된 비산물의 비행 궤적을 비교하였다. Minor(1994)와 Lee and Wills(2002)은 비산물에 대한 건물 외벽의 취약성에 대해 연구했으며, McDonald(1990)은 비산물에 의한 건축자재의 충격 저항에 대한 연구를 수행하였다. Will et al.(2002)은 막대기 및 평판의 비행 시작 풍속 계산에 대한 연구를 수행하였고, 풍동실험 결과와 비교하였다. Holmes(2004), Lin et al.(2006)은 비산물의 비행 속도와 비행 거리를 간단하게 계산하고, 비산물의 비행 궤적에 대한 풍동실험과 실물실험을 수행하여 비교하였다. 연구동향에서처럼 비산물에 대한 연구는 대부분 비행 궤적에 대한 연구에 집중되어 있다. 비산물의 비행 시작 풍속에 대한 연구가 Will 등에 의해 수행된 바 있지만 이 연구에서 비행 시작 풍속

계산에 필요한 몇몇 계수 값이 제시되지 않았고, 비산물의 비행 시작 풍속에 영향을 크게 미치는 길이와 두께의 비의 영향이 고려되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 비행 시작 풍속 예측을 위한 이론식을 힘의 평형방정식으로부터 제시하고, 이론식에 필요한 공기력 계수를 풍동실험을 통해 제시하고자 하였다. 또한 풍동실험을 통해 실제 비산물의 비행 시작 풍속을 측정하여 제시된 이론식과 공기력 계수를 비교·검증 하고자 하였다.

2. 비행 시작 풍속

본 연구에서는 비산물이 바람에 의해 약간이라도 움직이기 시작하는 순간의 풍속을 비행 시작 풍속으로 정의하였다. 비산물은 바람에 의한 힘의 방향에 따라 Fig. 2와 같이 들림(Lift), 미끄러짐(Slip) 및 전도(Overtum)에 의해 비행을 시작할 수 있다. 들림에 의한 비행 시작은 비산물에 작용하는 양력이 비산물의 무게보다 크면 나타나게 되고, 미끄러짐에 의한 비행 시작은 비산물에 작용하는 항력이 바닥면과 비산물 사이의 마찰력보다 크면 나타나게 된다. 전도에 의한 비행 시작은 비산물에 작용하는 회전력이 비산물의 무게에 의한 회전력보다 클 때 나타난다. 따라서 비산물의 비행 시작은 힘의 평형방정식으로부터 Eqs. (1)~(3)과 같이 정의할 수 있다. 이때, 바람에 의해 비산물에 작용하는 힘은 Eqs. (4)~(6)으로 나타낼 수 있고, 이 식을 Eqs. (1)~(3)에 대입하여 풍속에 대해 정리하면 Eqs. (7)~(9)와 같이 비행 시작 풍속을 계산할 수 있는 식을 도출할 수 있다.

$$Lift \geq Mg \tag{1}$$

$$Drag \geq (Mg - Lift)\mu \tag{2}$$

$$Moment \geq \frac{1}{2}L(Mg - Lift) \tag{3}$$

$$Lift = 0.5\rho V^2 BLC_L \tag{4}$$

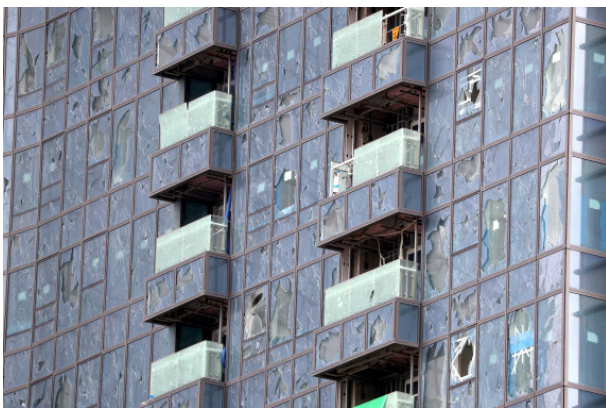


Fig. 1. Windows Broken and Falls Caused Typhoon from LCT in Busan (Yonhapnews, 2018)

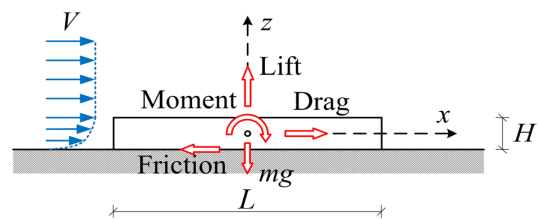


Fig. 2. Forces Acting on Debris

$$Drag = 0.5\rho V^2 BHC_D \quad (5)$$

$$Moment = 0.5\rho V^2 BHL C_M \quad (6)$$

$$V_{cr}^{Lift} \geq \sqrt{\frac{Mg}{0.5\rho BLC_L}} \quad (7)$$

$$V_{cr}^{Slip} \geq \sqrt{\frac{\mu Mg}{0.5\rho B(HC_D + \mu LC_L)}} \quad (8)$$

$$V_{cr}^{Moment} \geq \sqrt{\frac{Mg}{0.5\rho B(LC_L + 2HC_M)}} \quad (9)$$

여기서, M 은 비산물의 질량(kg), g 는 중력가속도(m/s^2), μ 는 정지 마찰계수, ρ 는 공기밀도(kg/m^3), $Lift$ 는 양력(N), $Drag$ 는 항력(N), $Moment$ 는 회전력(N·m), B 는 비산물의 폭(m), H 는 비산물의 높이(m), L 은 비산물의 길이(m)이고, C_D , C_L , C_M 은 각각 항력, 양력, 모멘트 계수로 비산물의 형상에 따라 다르며, 일반적으로는 풍동실험으로 물체에 작용하는 3분력(Lift, Drag, Moment)을 측정하여 Eqs. (4)~(6)에 의해 계수 값을 산출한다.

3. 풍동실험

본 연구에서는 비행 시작 풍속 계산에 필요한 공기력계수를 도출하기 위한 공기력 측정 실험과, 이론식으로 예측된 비행 시작 풍속을 비교 검증하기 위한 자유비행 실험을 수행하였다. 실험은 전북대학교 KOCED 대형풍동실험센터의 소형풍동에서 수행하였다. 사용된 풍동은 개방형 풍동으로 시험부의 크기는 폭 1 m, 높이 1.5 m, 길이 5 m이며, 최대풍속은 20 m/s이고 난류강도는 1 % 이하의 성능을 가지고 있다.

공기력측정 실험 및 자유비행 실험은 Fig. 3에 나타나있는 도류판을 이용하여 수행하였다. 도류판 상부에는 비산물이 고정될 수

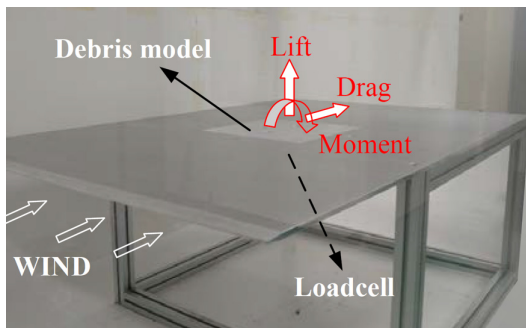


Fig. 3. Test Setup in the Wind Tunnel

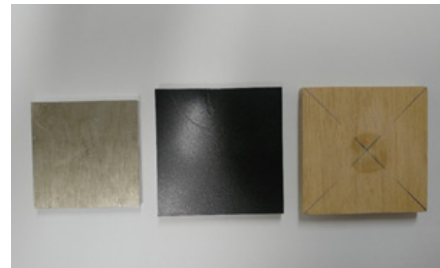
있도록 장치가 되어있고, 이 고정 장치는 도류판 표면과 독립되어 있어 하부에 설치된 분력계로부터 공기력을 측정할 수 있다. 또한 고정 장치는 도류판 표면보다 1 mm 낮게 단차를 두어 공기력 측정 시 비산물과 도류판 사이에 공기가 흐르지 못하도록 하였다. 도류판 하부에는 6분력계가 설치되어 있고, 분력계를 통해 도류판 상부에 고정된 비산물의 항력, 양력 및 모멘트를 측정할 수 있다. 도류판의 단부는 기류의 박리를 최소화하도록 제작하였다.

공기력 측정에 사용된 시험체는 폭과 길이가 200 mm이고 두께가 2 mm인 이크릴 재질의 정사각 평판이다. 실험 시 모형의 길이와 높이의 비(L/H)에 따른 공기력계수를 도출하기 위해 정사각 평판을 한 층씩 적층해 가면서 L/H를 1~50까지 변화시켜가며 공기력을 측정하였다.

실제 비산물의 비행 시작 풍속을 측정하기 위한 자유비행 실험은 도류판 위에 비산물을 구속력이 없이 올려놓고 풍동의 풍속을 서서히 올리다가 비산물이 움직이기 시작하는 순간의 풍속을 측정하였다. 실험에 사용된 비산물은 길이와 높이의 비에 대한 영향, 재질에 대한 영향, 형상에 대한 영향을 고려할 수 있도록 Figs.



(a) Debris Size



(b) Debris Material



(c) Debris Shape

Fig. 4. Various Debris Models

Table 1. Specification of Debris

Category	Shape	Size H (mm)×B (mm)×L (mm)	Material
Debris size	Square plate	3×50×50 ~ 12×150×150	Plywood
Debris material	Square plate	9×60×60 ~ 9×70×70	Plywood, Acrylic, Aluminium
Debris shape	Rod, Cubic, Rectangle plate	16×172×16, 35×35×35, 9×135×60	Plywood

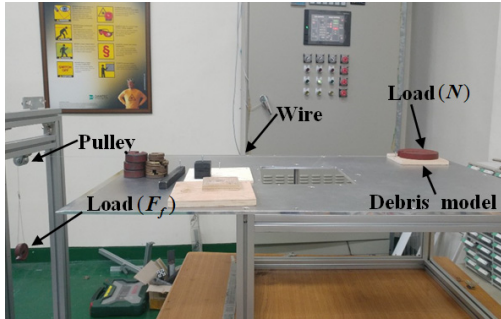


Fig. 5. Friction Coefficient Measurement

4(a)~4(c)와 같이 다양하게 제작하여 실험을 수행하였다. 길이와 높이 비에 따른 비행 시작 풍속을 측정하기 위해 두께 3~12 mm, 길이 50~150 mm의 정사각 평판을 사용하였고, 재질에 따른 비행 시작 풍속을 측정하기 위해 합판, 아크릴 및 알루미늄 재질의 정사각 평판을 사용하였다. 형상에 따른 비행 시작 풍속을 측정하기 위해서는 막대기, 직사각 평판, 정육면체 형상을 합판재질로 제작하여 사용하였다. 시험체의 제원은 Table 1에 나타나 있다.

비행 시작 풍속 계산에 필요한 마찰계수는 실제 실험에 사용된 비산물에 대해 정지마찰계수 실험을 수행하여 산출하였다. 마찰계수 실험은 Fig. 5와 같이 충분히 큰 마찰력이 작용하도록 도류관위의 비산물에 무게 추를 수직으로 재하한 후, 도르래를 이용하여 비산물이 움직이기 시작할 때까지 수평하중을 재하 하여 Eq. (10)으로 산출하였다. 실험결과, 자유비행실험에 사용된 시험체와 도류관 사이의 마찰계수는 0.41~0.50이었다.

$$\mu = \frac{F_f}{N} \quad (10)$$

여기서, μ 는 마찰계수, F_f 는 정지마찰력(N), N 은 비산물의 수직력(N)이다.

4. 실험결과

4.1 공기력 계수

Figs. 6 and 7은 풍동실험으로 구한 길이와 높이의 비(L/H)에

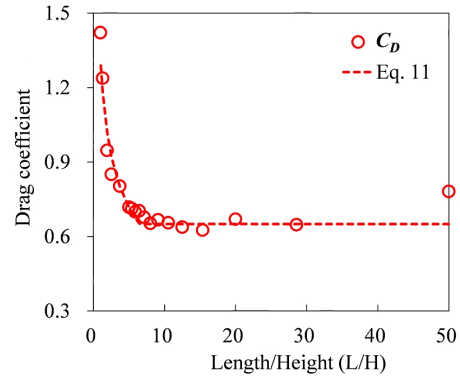


Fig. 6. Drag Coefficient vs Aspect Ratio

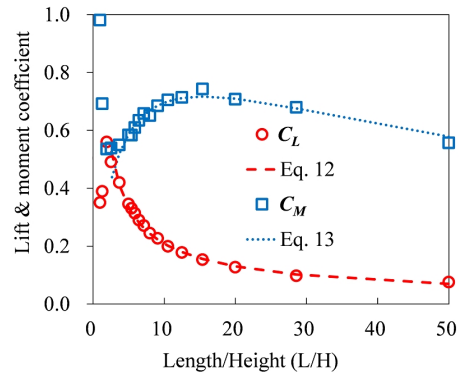


Fig. 7. Lift and Pitching Moment Coefficients vs Aspect Ratio

따른 항력계수, 양력계수 및 모멘트계수의 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 공기력 계수는 L/H가 2 근처에서 급격하게 변화하는 것으로 나타났다. 항력계수의 경우 L/H가 증가함에 따라 지수함수의 형태로 급격히 감소하다가 L/H가 7 이상이 되면서 약 0.65에 수렴하고 있다. 양력 및 모멘트 계수의 경우 L/H가 2까지 증가함에 따라 반대의 방향으로 급격히 변화하고 있고, L/H가 2 이상이 되면서 지수함수의 형태로 서서히 변화하는 것으로 나타났다. 바람에 의한 비산물은 L/H가 2 이상인 평판이 대부분이므로, 비산물은 L/H가 2 이상으로 증가할수록 공기력계수는 일정한 값에 수렴하거나 지수함수의 형태로 서서히 변화한다고 할 수 있다. 따라서, 공기력 실험 결과로부터 L/H가 2 이상의 평판에 적용할 수 있는 공기력계수 실험식을 Eqs. (11)~(13)와 같이 제시하였고, 제시된

실험식은 Figs. 6 and 7에서 볼 수 있는 것처럼 실험결과를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

$$C_D = 1.3(L/H)^{-0.36}, L/H \leq 7 \quad \text{or} \quad C_D = 0.65, L/H > 7 \quad (11)$$

$$C_L = (L/H)^{-0.68}, L/H \geq 2 \quad (12)$$

$$C_M = \frac{55}{L/H} \exp\left[-\frac{\{\ln(L/H) - 5.94\}^2}{6.4}\right], L/H \geq 2 \quad (13)$$

4.2 자유비행 실험

Fig. 8은 L/H에 따른 비산물의 비행 시작 형태와 비행 시작 풍속을 나타내고 있다. L/H가 10이상의 얇은 비산물의 경우 대부분 전도에 의해 비행이 시작되는 것으로 나타났고, L/H가 10이하의 두꺼운 비산물은 주로 미끄러짐에 의해 비행이 시작되는 것으로 나타났다. 이는 L/H가 작을수록 항력계수는 급격히 증가하고, 모멘트 계수는 감소하여 항력이 비산물의 운동을 유발시키는 지배적인 힘으로 작용하여 나타난 현상으로 판단된다. 비산물의 비행 시작 풍속은 L/H가 커질수록 약간씩 낮아지는 경향을 보이고 있다.

본 연구에서 사용된 비산물의 대표적인 3가지 형태(평판, 막대기, 정육면체)의 자유비행 실험 영상을 유튜브(YouTube, 2019)에 업로드하여 참고할 수 있도록 하였다. 실험영상에서 L/H가 큰 평판은 전도, L/H가 1에 가까운 막대기와 정육면체의 경우 미끄러짐에 의해 비행이 시작되는 것을 확인할 수 있다.

5. 비행 시작 풍속 예측 및 비교-검증

Fig. 9는 본 연구에서 제시된 Eqs. (7)~(9)의 이론식과 Eqs. (11)~(13)의 공기력계수 실험식으로부터 예측된 비행 시작 풍속과

자유비행 실험으로 측정된 비행 시작 풍속을 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 예측된 비행 시작 풍속이 자유비행 실험의 비행 시작 풍속보다 높은 것으로 나타났다. Fig. 10은 예측된 비행 시작 풍속의 오차를 보여주고 있다. L/H가 증가함에 따라 비행 시작 풍속을 과대평가하는 경향을 보이고 있고, 측정된 비행 시작 풍속보다 평균적으로 약 20~30 % 과대평가 하는 것으로 나타났다.

이러한 차이는 Fig. 2에서와 같이 도류판 표면에 형성된 경계층에 의한 풍속 프로파일과 실험에 사용된 시험체의 변형으로 설명될 수 있다. 공기력계수 산출에 사용된 풍속은 경계층의 영향이 없는 곳의 풍속을 사용하였지만 실제 비산물에 작용하는 풍속은 도류판의 표면마찰로 인해 이보다 낮다. 따라서 공기력계수가 실제보다 다소 낮게 평가되어 비행 시작 풍속이 높게 계산된 것으로 판단된다. 또한 공기력 실험 시 도류판 표면과 시험체 사이는 완전히 밀착된 상태로 공기력 측정이 수행되었지만 자유비행 실험 시에는 시험체의 변형 등으로 인하여 도류판과 시험체가 사이에 간격이 발생하였다. 이러한 간격으로 인해 비산물에 작용하는 공기력이 증가되어 비행 시작 풍속이 낮아진 것으로 판단된다.

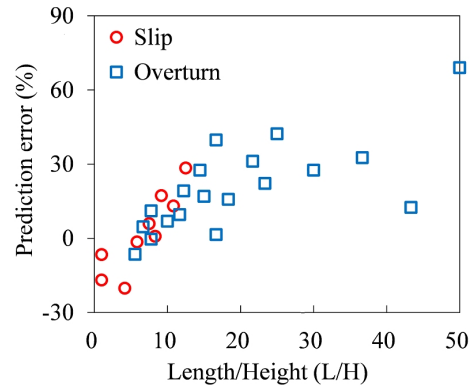


Fig. 9. Measured and Predicted Flight Initiation Wind Speed

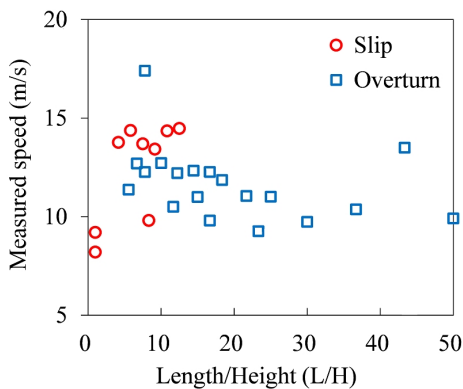


Fig. 8. Flight Type and Initiation Speed according to L/H

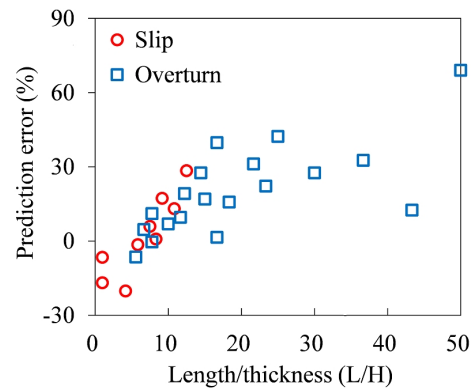


Fig. 10. Prediction Error vs. Aspect Ratio

6. 결론

본 연구에서는 강풍에 의한 비산물로부터 안전을 확보하기 위해 비산물의 비행 시작 풍속을 예측하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 비산물의 비행 시작 풍속 예측식을 제시하고, 이에 필요한 공기력계수를 측정하였다. 그리고 예측식을 검증하기 위한 자유 비산 실험을 수행하였다. 그 결과를 보면, 폭과 높이 비율(L/H)이 10 이상인 얇은 비산물의 경우에 대부분 전도에 의해 비행이 시작되었다. 하지만 L/H가 10 이하의 두꺼운 시험체는 주로 미끄러짐에 의한 비행 시작되는 것으로 나타났다. 그리고 비산물의 비행 시작 풍속은 L/H가 커질수록 약간씩 낮아지는 경향을 보였다. 풍동실험에서 측정된 비행 시작 풍속은 본 연구에서 제시한 예측치와 전반적인 경향은 일치하나, 값은 약 20~30 % 낮게 나타났다. 이러한 차이의 원인으로 도류판의 경계층 흐름, 시험체와 도류판의 공극, 시험체의 국부적인 변형 등이 추정되며, 향후 예측식의 정확을 높일 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(20CTAP-B132914-04)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Holmes, J. D. (2004). "Trajectories of spheres in strong winds with application to wind-borne debris." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, No. 1, pp. 9-22.
- Lee, A. J. H. (1974). "A general study of tornado-generated missiles." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 30, No. 3, pp. 418-433.
- Lee, A. J. H. (1975). "Trajectory of tornado missiles and the design parameters." *Second ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities*, New Orleans, LA, December 8-10, 1975.
- Lee, B. E. and Wills, J. A. B. (2002). "Vulnerability of fully glazed high-rise buildings in tropical cyclones." *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 42-48.
- Lin, N., Letchford, C. and Holmes, J. (2006). "Investigation of plate-type windborne debris. Part I. Experiments in wind tunnel and full scale." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, No. 2, pp. 51-76.
- McDonald, J. R. (1990). "Impact resistance of common building materials to tornado missiles." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 36, No. 2, pp. 717-724.
- McDonald, J. R., Mehta, K. C. and Minor, J. E. (1974). "Tornado-resistant design of nuclear power-plant structures." *Nuclear Safety and Security*, Vol. 15, No. 4, pp. 432-439.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2018). *2018 Statistical yearbook of natural disaster* (in Korean).
- Minor, J. E. (1994). "Windborne debris and the building envelope." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 53, No. 1-2, pp. 207-227.
- Tachikawa, M. (1983). "Trajectories of flat plates in uniform flow with applications to wind-generated missiles." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 14, No. 1-3, pp. 443-453.
- Tachikawa, M. (1990). "A method for estimating the distribution range of trajectories of wind borne missiles." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 29, No. 1-3, pp. 175-184.
- Twisdale, L. A., Dunn, W. L. and Davis, T. L. (1979). "Tornado missile transport analysis." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 51, No. 2, pp. 295-308.
- Wills, J. A. B., Lee, B. E. and Wyatt, T. A. (2002). "A model of wind-borne debris damage." *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 4-5, pp. 555-565.
- Yonhapnews (2018). *Broken glass falls from high-rise apartment in Busan*, Available at: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20181009059900051?input=1195m> (Accessed: November 11, 2019).
- YouTube (2019). *Wind tunnel test of wind borne debris, KOCED WindCenter*, Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=iALaHXCyeVA>, (Accessed: November 19, 2019).