

버블을 이용한 미세칩 제거장치의 개발

최성윤*, 권대규**, 이세한***, 박태현***, 왕덕현***,#

*경남대학교 대학원 첨단공학과, **세이테크, ***경남대학교 기계공학부

Development of Micro-chip Removal Equipment Using Bubble

Sung-Yun Choi*, Dae-Gyu Kwon**, Sea-Han Lee***, Tae-hyun Park*** and Duck Hyun Wang***,#

*Department of Advanced Engineering, Graduate School, Kyungnam Univ., **SAY TECH., ***School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received 08 June 2021; received in revised form 19 July 2021; accepted 02 September 2021)

ABSTRACT

Machining operations require the removal of chips to keep the water-soluble cutting oil clean and fresh throughout the operation time. Water-soluble cutting oil for metal processing is diluted using a 3-8% solution in water which is generally replaced every three to six months. This study aims to develop multiple purification devices to efficiently remove fine contaminating particles from water-soluble cutting oil. The 2D concept designs were created using AutoCAD. The designs were drawn using the 3D modelling feature of CATIA. Flow analysis was performed in a bubble purifier using Ansys computational fluid dynamics (CFD). This analysis has aided in improving the design and structure of the device to create the final prototype. Experiments were conducted to check the prototype's performance. Comparisons of the effects of each process variable on the experiment was carried out using ANOVA.

Keywords : Water-Soluble Cutting Oil(수용성 절삭유), Micro Chip(미세칩), ANOVA(분산분석), Flow Analysis(유동해석)

1. 서 론

기계가공에서 발생하는 칩을 제거하기 위해서는 절삭유의 사용은 필수적이다.^[1] 금속 가공에서 수용성 절삭유는 물에 3~8% 용액으로 희석하여 사용하기 때문에 물이 차지하는 비중이 크고 사용 환경에 따라 부패가 쉽게 일어나는 특징이 있다. 그리고 수용성 절삭유는 기계가공 시간동안 계속 사용해야

하기 때문에 가공결과물의 품질향상을 위해서라도 절삭유를 청결하게 관리하는 것이 매우 중요하다.^[2] 수용성 절삭유는 절삭가공에서 발생하는 가공 미세 칩 및 불순물로 인해 절삭유의 변질 및 부패가 발생하기 쉬우며 일반적으로 3~6개월마다 교체한다.^[3~4] 절삭유의 폐기 처리되는 주기가 짧아지면 절삭유의 사용량 또한 증가되고 폐유 발생으로 인한 처리 비용이 추가적으로 발생되어 비용적인 부담과 함께 환경오염의 문제를 야기한다. 또한 기존의 절삭유 정화장치는 구조가 복잡하고 부족한 절삭유 정화능력으로 가공에서 품질에 무시할 수 없는 영향을 끼

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-505-999-2160

치고 있다.

본 연구에서는 효율적이면서도 유지관리가 편리한 버블 미세칩 제거장치를 개발하는 것을 목표로 시제품을 제작하였으며 불순물을 효율적으로 제거하여 수용성절삭유 사용수명을 연장시킴으로써 가공비용을 절감하는데 기여하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

기존의 절삭유 미세칩 제거장치는 많은 공간을 차지하고 미세칩 제거 효율이 낮아 버블을 이용한 단순하면서도 효율적으로 미세칩을 제거하는 버블 미세칩 제거장치와 모니터링 장치를 제작하였다. 버블 미세칩 제거장치는 3D 설계 툴인 카티아(CATIA)를 사용하여 설계하였다. 3D 모델링을 통하여 설계된 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 제작된 장치는 절삭유 탱크 20 L 버블 장치 약 8.5 L 연결관로 1.5 L 용량의 구조이고 총 30 L의 용량으로 제작 되었다.

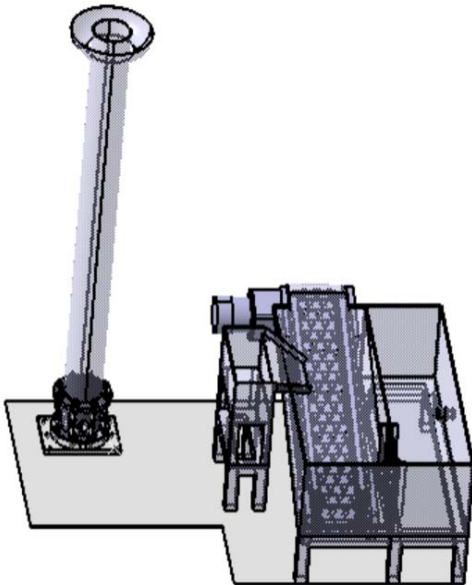


Fig. 1 Experimental 3D design of total system of neodymium permanent magnet conveyor and bubble device for removing chips and wastes

버블을 이용한 절삭유 정화장치에는 비자성의 재질인 투명 아크릴을 사용하여 버블정화장치와 절삭유탱크를 제작하였다. Fig. 2에 버블 미세칩 제거장치의 처리 절차와 모니터링장치를 나타내었다.

버블 미세칩 제거장치의 동작은 ①로 유입된 절삭유는 유입과 동시에 침전이 일어난 후 ②의 탱크로 이동한다. ③의 메쉬 필터를 통하여 ④탱크로 이동하고 ⑤의 펌프를 통하여 ⑥의 버블 정화장치에 공급하게 된다. 버블 정화장치에서 노즐을 통하여 공급된 공기방울과 미세칩이 결합하여 ⑦의 미세칩 회수량 측정을 위한 저장 탱크에 모여 비자성의 미세칩이 제거된다. 미세칩이 제거 된 절삭유는 다시 ①의 침전조로 보내어지고 ① ~ ⑦의 순환을 반복하는 구조이다. 또한 버블 미세칩 제거장치가 가동되는 상태는 센서 ①공기주입 유량확인센서, ②절삭유 공급유량 센서 ③절삭유 토출 유량 센서를 통하여 각각의 유량 흐름을 측정하여 ④의 모니터링 장치에 신호를 보내고 ⑤의 저장장치에 자동으로 데이터를 확보하도록 하였다. Table 1에 주요 부품의 사양을 Fig. 3의 (a)는 버블 미세칩 제거장치의 도면이고 (b)는 노즐의 상세도면이다.

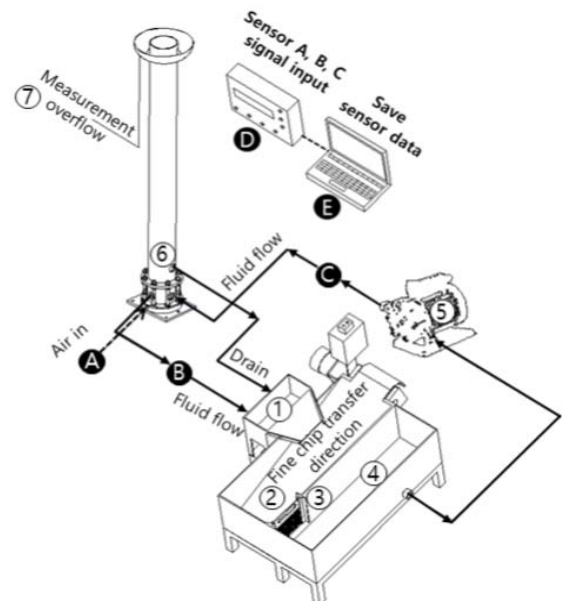
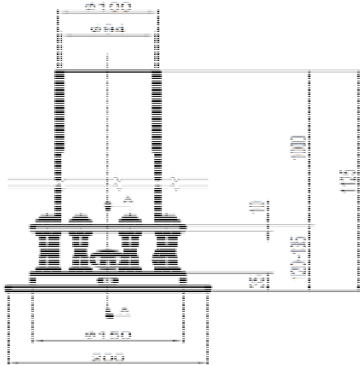


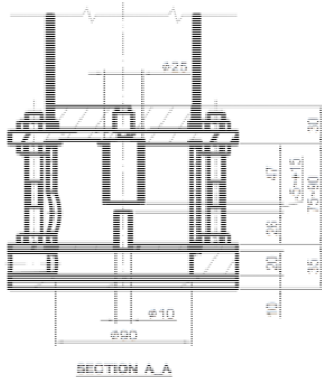
Fig. 2 Schematic diagram of coolant circulation for removing microchips using bubble

Table 1 Specifications of main parts of the water-soluble cutting oil multi-purifying device

Part Name	Specifications		Notes
Neodymium magnet	Magnet shape (mm)	∅ 15x 10	Emagnet specification (115ea)
Motor	Capacity (W)	40	SPG (S9I40GBL)
	Revolution per minute. (rpm)	1550	
Motor reducer.	Gear reduction ratio.	1:180	SPG (S9KB180BH)
Pump	Voltage (V.AC)	220	HAN-IL PUMP (MPPH-400-SGD PXNB)
	Frequency (Hz)	60	
	Total head(m)	37	
	Weight(kg)	10	
Spring hose	Hose size	20A	Inner diameter 19 mm



(a) Assembly drawing of microchip bubble removal device



(b) Detailed drawing bottom part of microchip bubble removal device

Fig. 3 Drawing of microchip bubble removal device



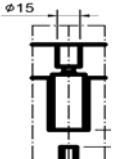
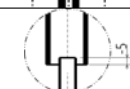
Fig. 4 Photograph of real-time monitoring device installation and operation

Fig. 4의 (a)는 버블 미세칩 제거장치에 연결된 실시간 모니터링 장치이고 (b)는 PLX-DAQ 프로그램으로 노트북에 각각의 센서 입력값을 저장하는 상태의 사진을 나타내었다.

2.2 버블정화장치의 해석검토

수용성 절삭유 버블 정화장치에서 일어나는 유동을 확인하기 위하여 Ansys CFD(computational fluid dynamics)로 장치에 물을 주입한 상태에서 공기를 주입하여 버블을 발생시키는 경우의 유동 해석을 Table 2의 경계조건으로 수행하였다. 해석에서 메시는 유동의 흐름을 원활하게 관찰하기 위해 육면체 형태의 Polyhedral Mesh방식으로 약 350,000개를 생성하여 유동해석을 실시하였다. 3차원 흐름으로 비압축성 정상 유동에 대한 유동해석을 위한 지배 방정식은 나비에-스톡스 방정식과 연속 방정식을 사용하였다. 그리고 난류 유동의 k-ε 모델을 적용하였다. 대기와 접하는 상부는 오픈 경계조건을 적용하였고 해석의 결과는 중력가속도를 고려한 상황에서 계산된 결과이며 유동은 정체(Stagnation) 없이 원활한 상승 흐름을 보였다. Fig. 5와 Fig. 6은 유동해석결과이고 장치를 수평으로 놓힌 방향의 그림으로 표현되었다. Fig. 5는 노즐의 직경 15mm, 공기주입관의 높이가 -5mm인 경우이고 유동 해석 결과에서는 노즐주변에서는 난류(Turbulent Flow)의 흐름이 발생되며 189.135mm 이상의 구간에서는 층류(Laminar Flow)의 흐름이 나타났다. Fig. 6은 노즐 직경 15mm, 공기주입관의 높이가 15mm인 유동 해석 결과이다.

Table 2 Analysis conditions of bubble microchip removal device

Division	Bubble microchip removal device specifications	
Water pressure (MPa)	0.085	
Inlet air pressure (MPa)	0.01	
Nozzle diameter (mm)		∅ 15
Air nozzle spacing (mm)		-5, 15

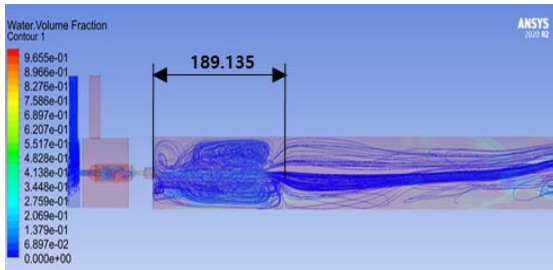


Fig. 5 Pressure distribution and flow of bubble device (Air nozzle spacing: -5)

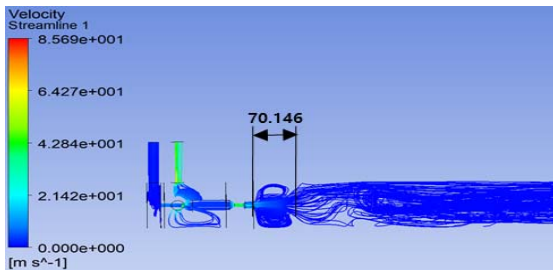


Fig. 6 Pressure distribution and flow of bubble device (Air nozzle spacing: 15)

유체의 흐름 해석에서 Air가 상승하는 노즐단면 근처에서는 난류흐름이 발생되며 70.146mm 이상의 구간에서 층류의 흐름이 나타났다. 버블 미세 칩 제거장치의 노즐 단면부의 유동을 검토한 결과 노즐 주변에 난류가 발생하지만 189.135mm 구간을 지나면서 순류의 유동으로 변하여 상승만 일어

나는 구간을 확인하였다. 장치의 성능검증실험에서 가상의 미세입자인 산화알루미늄 입자의 투입구 위치는 노즐 단면에서 200mm가 적절한 위치임을 해석 검증을 통하여 확인하였다.

2.3 실험조건 선정을 위한 예비실험

수용성 절삭유 버블 정화장치의 성능실험을 진행하기 위한 인자와 수준선정 예비실험을 실시하였다. (A) 노즐 직경을 9mm, 13mm, 15mm로 제작하고 (B) 공기 노즐 간격을 -10mm, 5mm, 20mm가 되도록 부품을 가공하였다. 예비실험을 동일한 조건에서 실시하기 위하여 공기압력과 수압을 고정인자로 하여 실험조건을 구성하였다. 공기압력은 유동해석을 통하여 확인된 버블이 안정적으로 발생하는 0.01MPa로 하였으며 수압은 펌프에서 공급하는 최대압력인 0.085MPa로 설정 하였다. 예비실험에 적용한 인자와 수준을 Table 3에 나타내었으며 버블 정화장치의 예비실험에서 촬영한 사진 Fig. 7의 (a)를 이용하여 버블의 분포면적을 분석하기 위하여 버블 장치에 부착한 줄자를 기준으로 비교분석하였다. Fig. 7의 (b)는 ImageJ프로그램으로 실험 7의 사진을 분석하는 모습이다. 실험조건과 분포측정 결과를 Table 4에 나타내었으며 Fig. 8은 버블분포 측정 그래프이다. 그래프를 확인한 결과 노즐의 크기가 커지고 공기노즐의 간격이 좁아질수록 버블의 분포면적이 넓어지는 것을 확인하였으며 예비실험의 결과를 통하여 제작한 실험 장치의 구조에서는 노즐의 크기가 15mm가 적절하며 노즐간격은 20mm보다 작게 설정하는 것이 실험장치의 원활한 가동에 유리한 것을 알 수 있었다.

Table 3 Preliminary experimental factors and level placement

Factor	A	B	Fixed factor	
	Nozzle size (mm)	Air nozzle spacing (mm)	Air pressure (MPa)	Water pressure (MPa)
Level	0	11	0.01	0.085
	1	13		
	2	15		

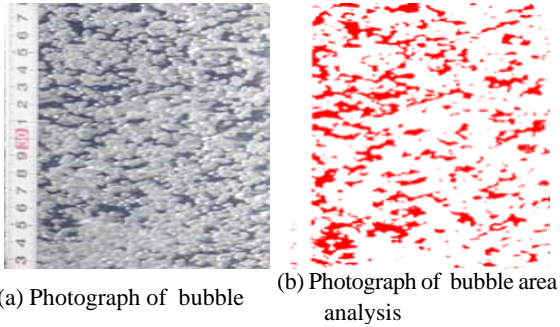


Fig. 7 Analysis of bubble distribution using photos(Exp. 7)

Table 4 Experimental conditions and results of bubble area analysis

No	Experimental procedure	A		B		Bubble area (%)
		Nozzle size (mm)	Air nozzle spacing (mm)	Nozzle size (mm)	Air nozzle spacing (mm)	
1	A ₀ B ₀	9	-10			52.6
2	A ₀ B ₁	9	5			50.3
3	A ₀ B ₂	9	20			48.7
4	A ₁ B ₀	13	-10			56.4
5	A ₁ B ₁	13	5			51.3
6	A ₁ B ₂	13	20			49.7
7	A ₂ B ₀	15	-10			57.5
8	A ₂ B ₁	15	5			52.2
9	A ₂ B ₂	15	20			49.8

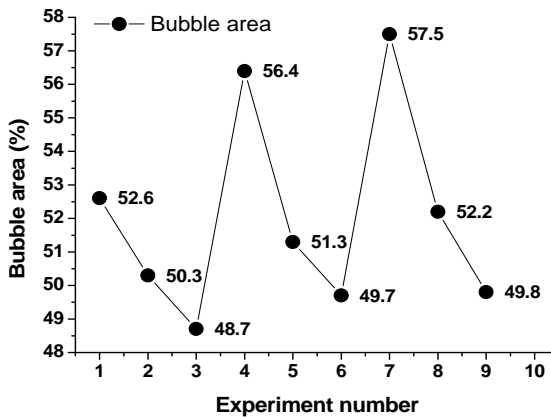


Fig. 8 Bubble area measurement result graph

2.4 실험방법

버블의 포집에 의한 미세입자 회수 성능검증을 위하여 노즐직경, 노즐간격, 공기압력, 수압의 인자와 수온을 추가하여 실험조건을 버블 미세칩 제거장치에 적용시켜 성능검증실험을 진행하였다. Table 5의 인자와 수준으로 L₈(2⁷)직교배열표를 이용하여 8번의 실험을 실시하였다. 회수입자의 측정에는 KS I ISO11923의 수질-유리섬유 필터를 이용한 부유물질 측정방법을 이용하여 물속의 가상의 미세입자로 투입된 산화알루미늄입자의 회수된 증량으로 버블 미세칩 제거장치의 성능을 검증하였다.

미세입자 회수 실험에서 인자와 수준을 배열표에 적용하여 실험조건을 Table 6의 실험조건을 작성하고 8회의 실험을 랜덤으로 실시하였으며 입자 크기 10μm의 산화알루미늄 1g을 주사기를 통하여 투입하여 버블 미세칩 제거장치의 회수능력을 검증하였다.

Table 5 Factors and levels conditions of suspended particle recovery experiment

Factor	A	B	C	D	E
	Nozzle size (mm)	Air nozzle spacing (mm)	Air pressure (MPa)	Water pressure (MPa)	Water temperature (°C)
Level 0	11	-5	0.01	0.05	17
Level 1	15	15	0.015	0.085	22

Table 6 L₈(2⁷) Orthogonal array table floating particle recovery experiment conditions

No	Experimental procedure	A	B	C	D	E
	Nozzle size	Air nozzle spacing	Air pressure	Water pressure	Water temperature	
1	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀ E ₀	11	-5	0.01	0.05	17
2	A ₀ B ₀ C ₀ D ₁ E ₁	11	-5	0.01	0.085	22
3	A ₀ B ₁ C ₁ D ₀ E ₀	11	15	0.015	0.05	17
4	A ₀ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁	11	15	0.015	0.085	22
5	A ₁ B ₀ C ₁ D ₀ E ₁	15	-5	0.015	0.05	22
6	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁ E ₀	15	-5	0.015	0.085	17
7	A ₁ B ₁ C ₀ D ₀ E ₁	15	15	0.01	0.05	22
8	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁ E ₀	15	15	0.01	0.085	17

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실시간모니터링장치의 측정결과 확인

모니터링 장치를 통하여 버블 미세칩 제거장치의 동작 상태를 실시간으로 모니터링하고 저장장치에 기록된 결과를 확인하였다.

Fig. 9는 공기압과 수압의 측정 결과에서는 공기압과 수압이 실험장치에 균일하게 공급되고 있는 것을 확인하였다. Fig. 10은 실험의 인자와 수준에 대한 pH(Hydrogen exponent)와 Do(Dissolved oxygen)의 측정결과 수온이 상승하면 pH는 낮아지고 Do 또한 낮아지는 반비례관계가 성립하며 pH가 높거나 낮아도 Do의 측정값에 직접적인 영향을 주지 않고 수온에 영향을 받는다는 것을 모니터링 장치의 측정 결과로 확인하였다.

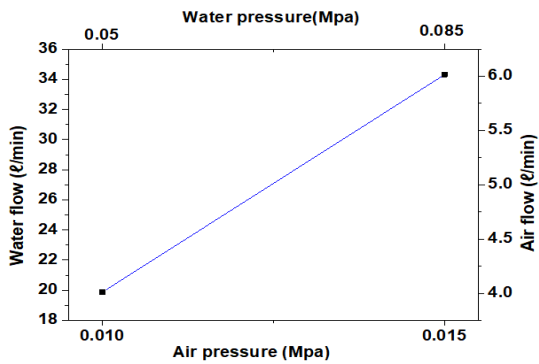


Fig. 9 Comparison of air pressure and water pressure flow measurement results

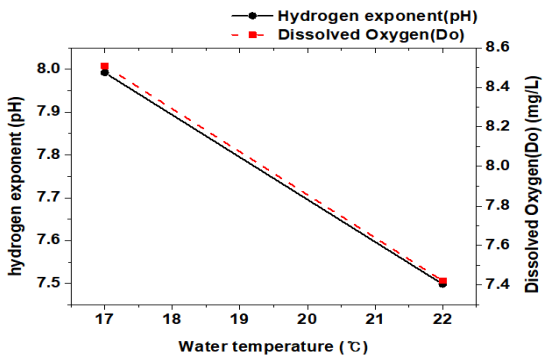


Fig. 10 Graph of pH and Do measurement results of the monitoring device

3.2 미세입자 회수결과를 통한 분석

버블 미세칩 제거장치의 미세입자 회수능력에 대한 실험결과는 Table 7과 같다. 산화알루미늄 입자의 회수량이 가장 많은 경우는 실험 5와 실험 6으로 나타났으며 노즐의 크기가 15mm이고 공기노즐 간격이 -5mm 공기압력이 0.015MPa의 공통점이 있다. Table 8의 분산분석 결과 노즐의 직경에 대한 P값이 0.025, 공기노즐간격의 P값이 0.002, 공기압력의 P값이 0.009로 나타난다. P값이 0.05 이하의 값을 나타낼 경우 실험에 미치는 영향이 유의하다고 판별한다. 또한 미세입자 회수능력에 영향을 주는 인자의 기여도를 살펴보면 노즐의 직경이 4.96%, 공기압력이 14.48%, 공기노즐간격이 78.17%로 나타났다. 기여도를 통한 미세입자 회수에 대한 영향력을 비교했을 때 공기노즐간격, 공기압력, 노즐의 직경 순으로 버블 미세칩 제거장치의 미세입자 정화능력에 영향이 높다는 것을 확인하였다.

Table 7 Orthogonal array table experiment results

No	Experimental procedure	Measurement result(g)	ranking
1	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀ E ₀	0.3401	4
2	A ₀ B ₀ C ₀ D ₁ E ₁	0.3547	3
3	A ₀ B ₁ C ₁ D ₀ E ₀	0.2919	6
4	A ₀ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁	0.3017	5
5	A ₁ B ₀ C ₁ D ₀ E ₁	0.4090	1
6	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁ E ₀	0.3683	2
7	A ₁ B ₁ C ₀ D ₀ E ₁	0.2244	8
8	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁ E ₀	0.2480	7

Table 8 General linear model: Amount of recovered particles

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	level of contribution (%)
A (Nozzle size)	1	0.001	0.001	0.001	39.02	0.0250	4.96 %
B (Air nozzle spacing)	1	0.016	0.0158	0.0158	614.93	0.0020	78.17 %
C (Air pressure)	1	0.003	0.0029	0.00298	113.88	0.009	14.48 %
D (Water pressure)	1	0.0004	0.0004	0.00048	16.44	0.056	2.09 %
E (Water temperature)	1	0.0001	0.0001	0.00001	0.42	0.583	0.05 %
Error	2	0.0001	0.0005	0.00002			0.25 %
Total	7	0.0202					100.00 %

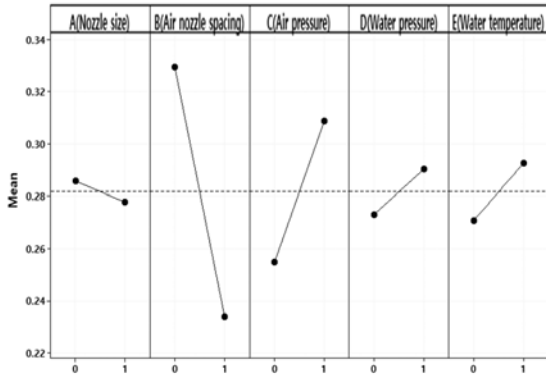


Fig. 11 Main effect plot of amount of recovered particles

Fig. 11은 버블 미세칩 제거장치의 미세입자 회수 능력에 대한 수준별 인자 주효과도 분석 그래프이다. 주효과도에서 노즐 직경 0수준 11mm, 공기노즐간격의 0수준 -5mm, 공기압력의 1수준 0.015MPa, 수압의 1수준 0.085MPa, 수온의 1수준 22℃의 인자와 수준이 미세입자 회수능력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 결론

버블 미세칩 제거장치를 개발하고 제작된 장치에 대한 성능검증실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모니터링 장치를 통하여 저장된 내용을 확인한 결과 pH와 Do는 수온이 상승하면 측정값이 감소하는 반비례관계가 성립하며 pH가 높거나 낮아도 Do의 측정값에 영향을 주지 않고 수온에 영향을 받는다는 것을 확인하였다.
2. 부유 입자량 회수를 통한 통계적 분석에서는 공기 노즐의 간격이 -5mm이고 공기압력이 0.015 MPa, 노즐의 크기가 11mm의 인자와 수준에서 산화알루미늄 입자의 회수량에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.
3. 분산분석 결과의 기여도를 통한 미세입자 회수에 대한 영향력을 비교했을 때 노즐의 간격(78.17%), 공기압력(14.48%), 노즐의 크기(4.96%) 순으로 영향력이 높다는 것을 알 수 있었다.
4. 버블 미세칩 제거장치의 시제품에 대한 미세칩

정화 성능은 본 실험의 인자와 수준조건에서는 노즐의 간격을 -5mm로 설정하고 공기압을 0.015 MPa로 할 경우 미세입자의 제거에 효과적이란 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. Choi, S. Y., Kwon, D. G., "A Study of the Effectives for Surface Roughness by Cutting Angle and Cutting Fluid", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 57-62, 2018.
2. Kim, J. S., Lee, D. S., Wang, D. H., "Development of Coolant/Waste-oil Separating and Cooling System with Chip Treatment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16 No. 3, pp. 16-23, 2017.
3. Sin, C. H., Jang J. G., "Effect of chemical treatment and variations of the physical properties of waste water-soluble cutting Oil", Journal of Environmental Science International, Vol. 13, No. 4, pp. 403-412, 2004.
4. Jang, J. S., Kim, K. W., Choi, S. M., Jin, J. H., Moon, B. H., Chin, D. S., Ahn, C. J., "The Study of Efficient Separation of Oil Form the Cutting Oil", Journal of the Korean Chemical Society, Vol. 57 No. 4, pp. 515-519, 2013.