

오픈 블라스팅 로봇에서 관로내의 그리트 가압이송 특성

김원배[†] · 양석원^{*} · 이상범^{**} · 김수호^{**}

Pressurized Pneumatic Grit Conveying Characteristics in Pipeline for Open Blasting Robot

Won-Bae Kim, Seok-Won Yang, Sang Bum Lee, Soo Ho Kim

Key Words : Open blasting(오픈 블라스팅), Robot(로봇), Pressurized pneumatic conveying(가압이송), Surface preparation(표면처리)

Abstract

In this paper, to improve the efficiency of pressurized pneumatic grit conveying for ship block open blasting process. Pressurized pneumatic grit conveying is defined as the transportation of grit(abrasive) in a compressed air flow. Total Pressure loss in flexible hose for pneumatic conveying is sum of pressure losses due to gas and grit and needle type pressure transmitter for measured pressure loss. Characteristics of grit open blasting by pneumatic conveying were studied experimentally. Studies variables were blasting nozzle ID, length and ID of flexible hose, grit flow rate, flow rate and pressure of transport air. It was experimentally proved that optimal open blasting condition and cost effective operation regarding grit blasting, obtaining a high quality surface preparation(Sa 2½).

1. 서론

오픈 블라스팅(Open blasting)은 압축공기 공급을 통한 연마재(abrasive)인 그리트(grit)를 고속으로 분사하여 표면의 이물질 제거하고 조도(roughness)를 생성하여 도료의 부착효율을 높이는 공정이다. 이 논문은 조선소내 선체 블록을 대상으로 하면 표면 전처리 작업시 블라스팅 호스(hose) 관로내의 그리트 가압 이송특성 및 표면가공 특성에 대한 실험결과를 기술하였다.

조선소내 선박 블록의 제청을 위한 그리트 오픈 블라스팅시 블록 전처리공장 외부의 그리트 공급 및 회수설비를 이용하고 작업자는 블록내

부에서 블라스팅 노즐을 사용하여 표면 제청작업을 수행한다. 특히 블라스팅 호스내 그리트 공급 조건의 변화로 인해 과도한 호스내 압력손실로 그리트의 공급이 불안정해 지며, 호스 내부의 막힘이 발생하면 더 이상의 블라스팅 작업이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 연마재 공급특성을 정량화 하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 연마재 수송용 공기속도(v)는 수송물의 부유(saltation) 속도의 2~4배 범위내 설계하며, 일반적으로 모래, 알루미늄 공기속도는 20~40m/sec 정도이다.

질량비(μ)는 연마재/공기의 무게비로서 값이 클수록 농후상(dense phase : $\mu > 15$)으로 수송되어 효율적이거나 관로가 막힐 위험성이 높으며, 공급비가 낮을수록 희박상(lean phase : $\mu < 15$)로 수송되어 수송이 원활하나, 연마재 이송량이 상대적으로 적다.

Fig 1은 관로내 질량비 및 속도에 따른 이송특성으로 그림으로 나타내었으며, 일반적으로 질량비는 0~10 이내로 유지한다. Fig 2는 수평 관로에서의

[†] 김원배, 고등기술연구원, 로봇/생산기술센터

E-mail : wbkim@iae.re.kr

TEL : (031)330-7489 FAX : (031)330-7360

^{*} 양석원 : 고등기술연구원

^{**} 이상범, 김수호 : 대우조선해양(주) 자동화연구소

질량비 증가에 따른 부유속도 이상에서의 속도 증가에 따른 압력손실의 증가 특성을 나타내었다.

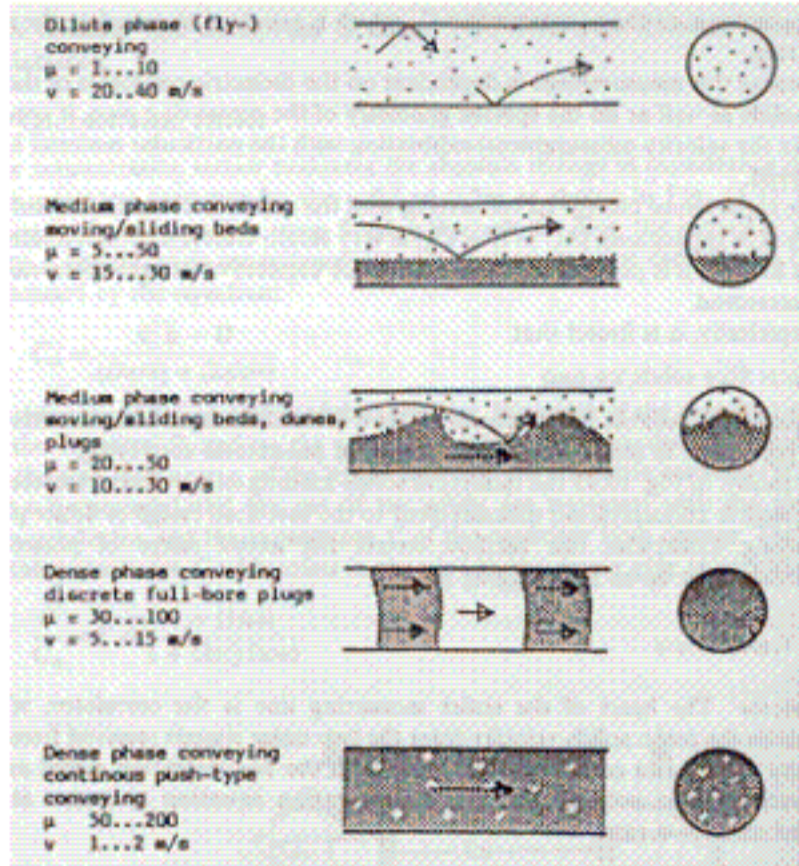


Fig. 1 Characteristics of Pneumatic Conveying

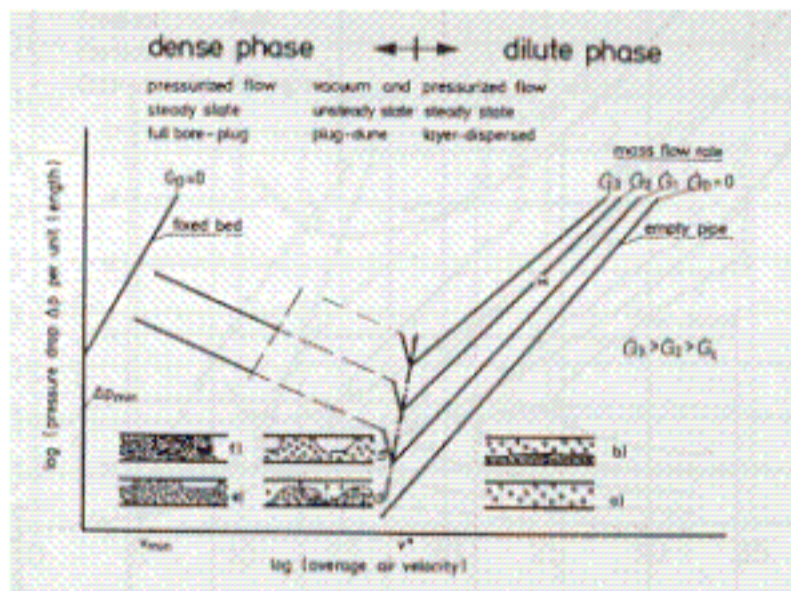


Fig. 2 Effect of velocity on pressure loss in conveying line.

압축공기를 이용한 그리트의 공압 이송시 영향을 미치는 변수로는 그리트 입도 및 공급량, 블라스팅 노즐(nozzle) 내경, 관로의 내경 및 길이, 수송용 압축공기량 및 공급압력 및 질량비등이 주요 변수로 추정할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 오픈 블라스팅시 그리트 가압이송 변수들에 대한 연관성 검증과 그리트 이송특성의 정량화 실험을 수행하였으며 그리트

가압 이송시 최적조건에서의 오픈 블라스팅 테스트를 통한 블라스팅 작업품질의 최적 공정 운전 조건을 도출하는 연구를 수행하였다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 실험조건

그리트 가압 이송시 물리적인 실험조건과 운전조건으로 나눌수 있는데, 물리적인 조건으로는 그리트 입도, 노즐구경, 블라스팅 내경 및 길이등을 고려할 수 있으며, 가압이송 공급조건으로는 그리트 공급량, 압축공기 공급량 및 압력등을 들 수 있으며 실험시 고려된 조건들에 대한 상세한 내용은 Table.1에 나타내었다.

Table 1. Experimental condition for grit conveying

항목	상세내용	단위	실험조건
실험 조건	그리트 입도	mm	0.5
	노즐 구경	mm	6.5/11
	블라스팅 호스 내경	mm	25/32
	블라스팅 호스 길이	m	60
공급 조건	그리트 공급량	kg/h	500
	압축공기 공급량	Nm ³ /h	270
	질량비(그리트/에어)	-	1~10
	압축공기 분사압력	kgf/cm ²	6~8

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 장치는 오픈 블라스팅용 5축 직교좌표 로봇, 그리트 및 압축공기 공급량 조절이 가능한 공급시스템 및 블라스팅 관로내 압력을 측정할 수 있는 제어시스템으로 구성되어 있다. Fig 3에서는 블라스팅 로봇과 그리트 공급장치 사진을 나타내었다.

5축 로봇은 그리트 분사노즐을 벽면과 원하는 거리, 각도, 이동속도, 워빙주기등의 제어가 가능하게 시스템을 구성하였다. 연마재 공급장치(ground equipment)는 그리트 조절밸브가 설치되어 그리트 공급량 조절이 가능하다. 압축공기는 유량제어밸브 및 유량계가 설치되어 있어 원하는 압축공기 공급량 제어 및 유량파악이 가능하며 그리트 자동 재충전등의 기능이 포함되어 있다.

또한 이러한 시스템은 Fig. 4와 같이 PLC(Programmable Logic Controller)에 연계된 그래픽 운영화면을 구성하여 블라스팅 관로내 입출구 압력을 바늘타입의 압력 전송기(transmitter)를 이용하여 실시간 정이 가능하다.

실험순서는 오픈 블라스팅 로봇의 끝단에 설치된 노즐과 벽면간의 거리를 적정하게 유지하고, 압축공기 및 그리트 공급밸브의 개도(open percent)를 설정한다. 이후 압축공기 공급을 시작하여 필요한 공기량이 유지되면 그리트 공급밸브를 열어 그리트를 공급한다. 이때 그리트 공급량에 따른 블라스팅 관로내의 입구 및 출구 압력을 측정하여 압력손실을 자동 계산하며, 그리트가 공급되면 압축공기의 공급량은 줄어들며 그리트 공급량에 따른 압축공기 공급량의 변화를 유량계 데이터로 부터 확인한다.

또한 오픈 블라스팅시 공급조건에 따른 표면 분사가공 특성도 동시에 파악하기 위하여 실험후 청정도는 육안으로 관측하고, 조도(roughness)는 축침식 조도계를 사용하여 Ra(중심선 평균거칠기), Ry(거칠기 최대높이), Rz(10포인트 평균 거칠기)값 결과로부터 오픈 블라스팅의 성능을 파악하였다.



Fig. 3 Equipment for grit pneumatic conveying test (Left : 5-axis robot, Right : Grit supply system)

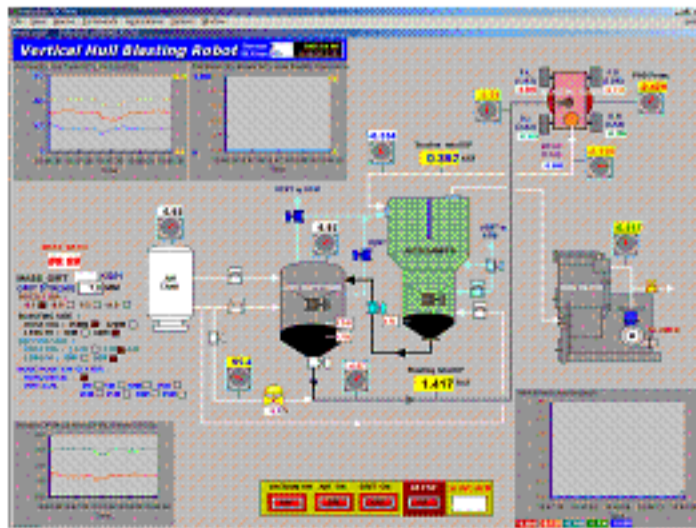


Fig. 4 Schematic diagram of control system

3. 실험결과

3.1 노즐 및 이송라인 내경에 따른 이송 특성

오픈 블라스팅시 우선 노즐의 내경에 따른 압축공기 분사량, 노즐 말단에서의 분사압력 및 공급라인(flexible hose)의 압력손실을 측정하였는데, 노즐 내경은 6.5 및 11mm를 대상으로 하였고 공급라인은 길이가 60m로 내경이 25 및 32mm를 사용하여 실험 하였다.

Fig 5에서의 결과로부터 알 수 있듯이 이송라인 내경이 25mm, 6.5 및 11mm 내경의 노즐 경우 압축공기 최고 공급량은 150 및 310Nm³/h로 내경에 따른 유량차이는 큰 반면, 노즐 분사압력은 7.2와 3.6kg/cm² 로 분사압력이 떨어지는 결과를 보였다. 또한 이송라인내 압력손실은 0.3과 1.4kg/cm² 로 압축공기량이 증가 할 수록 마찰력이 증가로 인한 압력손실이 큼을 알 수 있다.

이러한 결과는 이송라인의 길이는 동일하고 내경이 32mm에서는 Fig. 6에서와 같은 동일한 현상

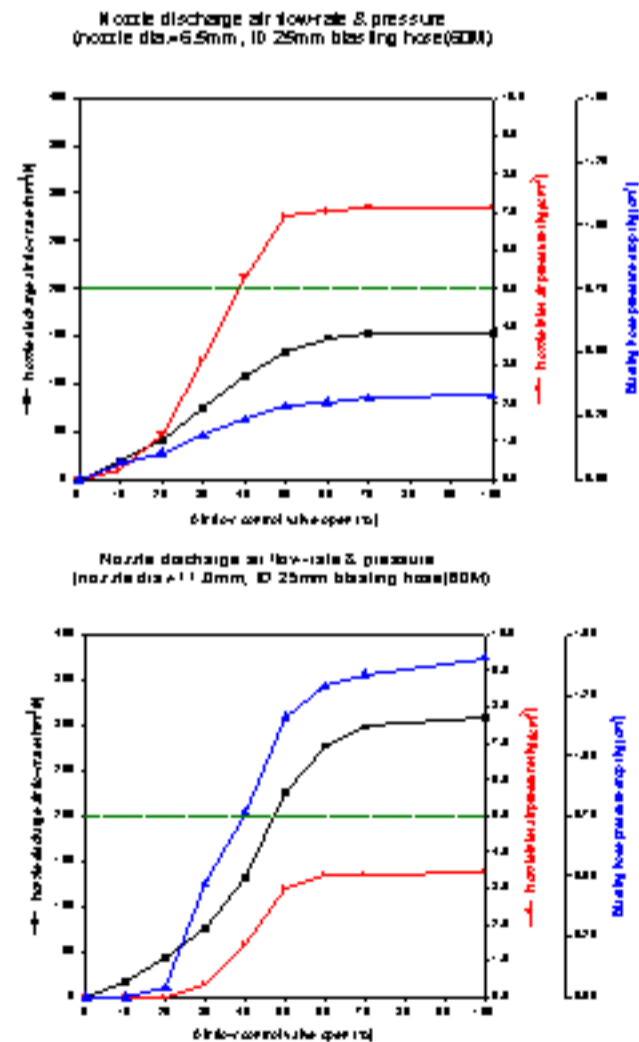


Fig. 5 Effect of nozzle dia. on air flow rate, nozzle inlet pressure & pressure drop in conveying line. (Inlet dia 25mm, Length 60m, Nozzle 6.5/11mm)

을 보이며, 6.5 및 11mm 내경의 노즐 경우 압축 공기 최고 공급량은 180 및 360Nm³/h, 노즐 분사 압력은 7.2와 4.0kg/cm² 및 이송라인내 압력손실은 0.1과 0.4kg/cm² 를 나타내었다.

Fig. 5와 6의 결과로부터 동일 노즐 내경에서 압축공기 공급량을 증가시키려면 이송라인의 내경을 증가시켜 마찰 압력손실을 최소화함이 바람직함을 알 수 있다.

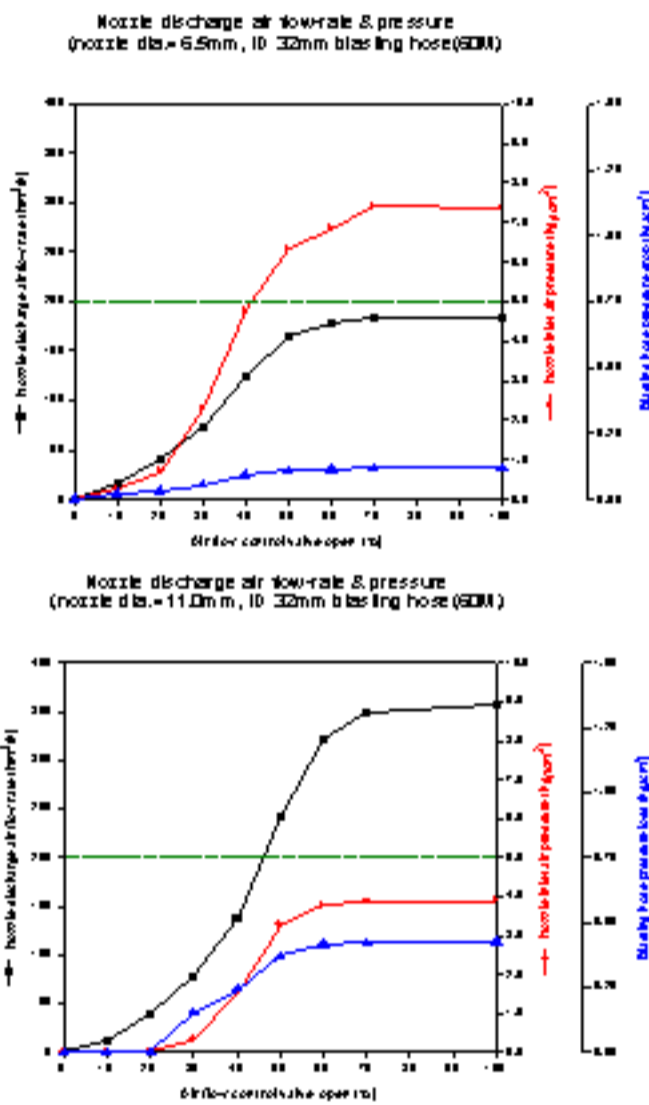


Fig. 6 Effect of nozzle dia. on air flow rate, nozzle inlet pressure & pressure drop in conveying line. (Inlet dia. 32mm, Length 60m, Nozzle 6.5/11mm)

3.2 그리트 공급량에 따른 압력손실 특성

그리트 공급량은 그리트 공급밸브의 스트로크 (개도) 및 압축공기의 공급에 따른 그리트 저장탱크와 이송라인의 압력차에 의해 결정된다. 본 실험에서는 압축공기 공급밸브의 개도를 일정하게 한 상태에서 그리트 밸브의 개도를 조절하여 공급비를 증가시키고 이때 그리트 무게, 압축공기 공급량 및 노즐입구 압력, 공급비 및 수송라인의 압력손실 증가특성을 파악하였다.

그리트 가압 이송시의 압력손실은 이론적으로

는 많은 압력손실 인자를 고려해야 하는데, 공기 질량 압력손실, 그리트 및 가속시 압력손실, 수직 상승 및 곡률에 따른 압력손실과 노즐의 반발력 압력손실 등이다. 이러한 인자들의 정량적인 실험을 통한 평가가 쉽지 않으므로 관로의 입출구 압력측정을 통해 전체 압력손실을 측정하였다.

가압 이송조건은 6.5mm 노즐, 내경 25mm 및 길이 60m의 관로에서 압축공기 공급시 그리트 밸브의 열림 정도에 따라 비교적 선형적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한 그리트 공급량이 증가시 압축공기의 공급량은 상대적으로 감소하여 초기 140Nm³/h에서 70Nm³/h으로 급격히 감소하고 이때 공급비는 6.8까지 증가함을 볼 수 있다. 그리고 그리트가 공급됨에 따라 관로내 압력손실은 압축공기만 공급 하였을때의 압력손실은 0.2kg/cm² 에서 1.5kg/cm² 까지 증가하며 그리트 공급량이 500kg/h 이상이면 급격히 압력손실이 증가하였다. 이로 인해 노즐 입구 압력은 5kg/cm² 이하로 떨어져 관로의 막힘현상을 나타내므로 500kg/h 이상의 안정적인 그리트 공급을 위해서는 수송관로의 확장이 요망된다.

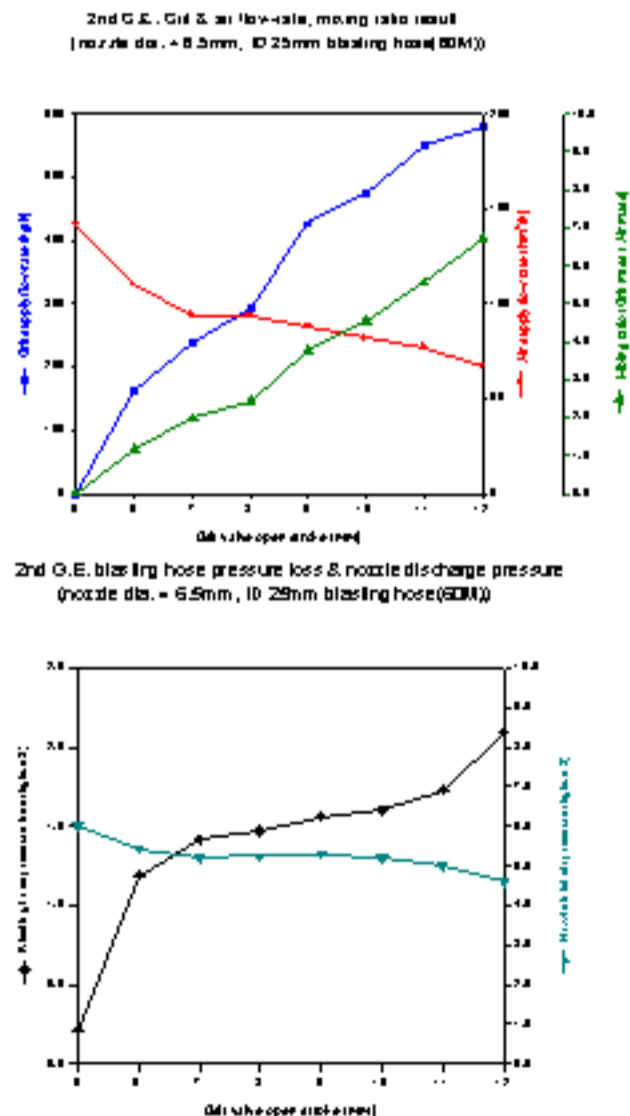


Fig. 7 Effect of grit flow rate on air flow rate and pressure drop in conveying line.

3.3 노즐과 벽간의 거리에 따른 블라스팅 품질

오픈 블라스팅시 그리트의 수송관점에서 최적의 그리트 공급조건을 찾을 수 있으며, 실제 선체 블록의 수직면을 대상으로 하는 오픈 블라스팅 품질 및 생산성은 적정 압축공기 압력만 유지된다면 그리트의 공급량에 비례하게 된다.

또한 오픈 블라스팅시 일정속도로 노즐이 이동시 노즐과 수직면과의 거리에 따른 블라스팅 폭, 작업품질 및 생산성에 대한 실험을 진행하였는데 청정도는 육안으로 Sa값을 파악하였고, 조도는 축침식 조도계를 사용하여 Ra, Ry, Rz를 측정하여 정량화 실험사진을 Fig. 8에 나타내었다.

노즐의 주행속도를 3.6m/min로 하고, 노즐과 수직면간의 거리가 10, 20, 30 및 40cm로 각각 블라스팅시 폭은 4, 6, 7, 8cm로 거리가 30cm 이상이 되면 노즐 출구 분사압력의 강화로 블라스팅 품질이 더 이상 향상되지 않는다. 또한 조도측정 결과 각각의 거리에서 10포인트 평균 거칠기인 Rz를 측정하였는데 36.2, 39.4, 37.3, 30.7 μ m로 벽면간의 거리가 20cm 경우 도장 전처리 작업시 적절한 조도로 추정되며, 이때의 청정도는 모든 조건에서 Sa1.5 이상으로 적합한 결과를 얻었다.

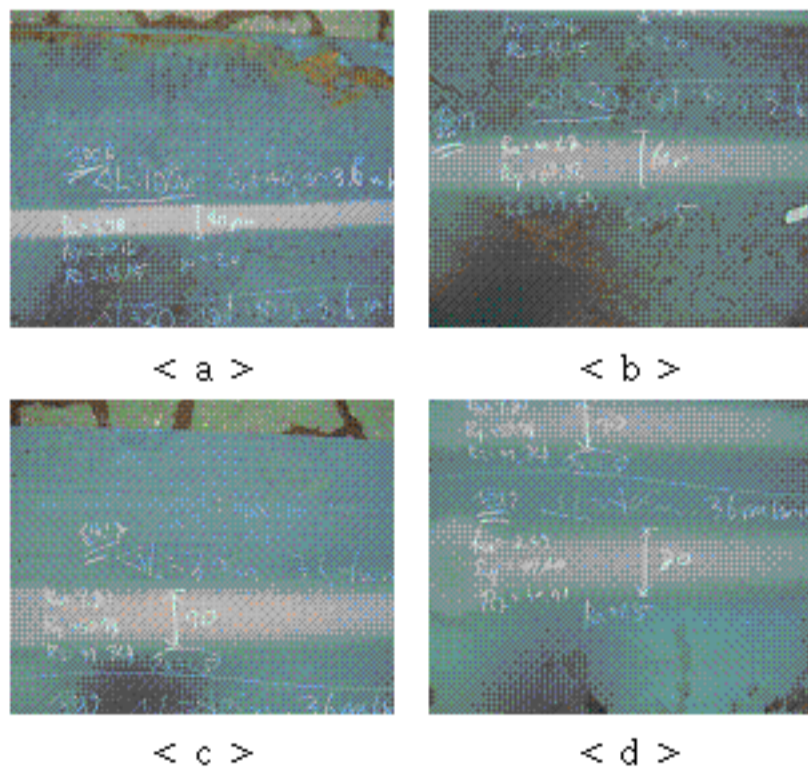


Fig. 8 Effect of distance between nozzle and vertical wall on blasting quality surface preparation. (distance: a=10 cm, b=20 cm, c=30 cm, d=40 cm)

4. 결론

오픈 블라스팅에서 관로내 그리트 가압이송 특성을 정량적으로 파악하기 위하여 노즐의 구경, 수송관로의 내경, 그리트 및 압축공기 공급량 변동에 따른 관로내 압력손실 및 노즐 공급특성 실험을 하였다.

압축공기만 공급시의 압력손실 보다 그리트를 공급함에 따른 질량비 증가로 인한 압력손실이 매우 큼을 알 수 있었다. 이러한 압력손실로 인한 노즐 출구의 분사압력의 강하 현상을 알 수 있었다. 이러한 압력손실을 줄이기 위해서는 그리트 공급량을 줄이거나 관로 크기를 늘이는 최적화를 통해 적합한 블라스팅 품질과 생산성을 확보가 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 대우조선해양(주)이 수행중인 산자부 중기거점과제인 “선체 블록내부 전처리/후공정 자동화 시스템 개발” 과제의 위탁과제로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bohnet, M., 1985, "Advances in the design of pneumatic conveyors", *International Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 287~405.
- (2) Molerus, O, 1996, "Powder Technology", Vol. 88, No. 209.
- (3) J.K Lee & D.K Park, 1987, "Controlled Feeding of Solid Particles by Pneumatic Transport", *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 336~344.
- (4) E.H. Park, S.S. Hong & S.H. Jo, 2001, "Critical Velocity for the Dense-conveying in a Horizontal Pipe of a Circulation Process", *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 39, No. 3, pp. 333~339.
- (5) Rhodes, M., 1998, "Introduction to Particle Technology", John Wiley & Sons Ltd., Vol. 93.
- (6) Hong, J. and Tomita, Y., 1995, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 4, No. 649.