



비회 걸보기 밀도와 벨트컨베이어 이송용량



박물관

museum99@ndver.com

우석대학교 전기공학 학사
한양대학교 플랜트엔지니어링 석사
(주)GS건설 플랜트사업본부 대리

1. 서론

삶의 질이 향상됨에 따라 전기에너지 수요가 지속적으로 증가되고 있다. 에너지 생산을 위해 화력발전소도 지속적으로 증가되는 추세이다. 화력발전소에서는 산업부산물과 석탄회가 다량으로 발생되고 있다. 과거에는 환경적인 측면에서 부담이 된 석탄회가 최근 정제기술의 발전으로 재활용되어 발전소에 경제적으로 효자 역할을 하고 있다. 특히 석탄회의 85% 정도를 차지하는 비회(fly ash)는 산업현장 및 시멘트 공장에서 콘크리트와 시멘트의 혼화제로 활용된다. 비회를 이송하기 위한 수단으로는 화물트럭과 비회이송선박이 이용된다. 다량의 비회를 단시간에 효율적으로 운반하기 위해 최근 선박의 이용이 증가되고 있으며, 비회저장고(fly ash silo)에서 선박까지 비회를 운반하는 컨베이어 설비를 해상반출설비(fly ash shipping system)라 한다.

비회는 해상반출설비를 이용하여 비회저장고에서 선박저장고로 이송된다. 비회를 비회저장고에서 공기 슬라이드(air slider)를 통해 공기부상식 벨트컨베이어로 이송한 다음, 선박용 공기 슬라이드를 거쳐 선박저장고에 이송한다. 공기부상식 벨트컨베이어로 비회를 이송하면서 자주 발생하는 문제점은 비회의 벨트 위 넘침 현상으로, 벨트 사행을 비롯하여 여러 문제점이 발생하였다.

본 고에서는 비회의 재사용을 위해 영흥 Y발전소에서 해상으로 이송 중 공기부상식 벨트컨베이어에서의 사행 및 문제점을 분석하고 이를 통해 개선안을 제시하고자 한다.

2. 비회 해상반출설비

2.1 비회

2.1.1 비회 발생량과 재활용 현황

우리나라에서 연간 발생하는 비회는 2000년에 436.2만 톤으로 1990년의 188.6만 톤에 비해 2배 이상 증가하였으며, 2005년에는 571.2만 톤이었다. 영흥화력의 완공으로 2010년에는 유연탄회가 증가하여 연간 발생하는 비회가 835만 톤 이상일 것으로 추정된다. 과거 국내 비회 재활용 실태를 살펴보면, 1990년에는 15%로 매우 저조하였고, 1995년에는 20%였다. 2000년에 54.6%에 이르러 선진국 수준에 이르게 되었으며, 최근 영흥화력발전소 같은 경우에는 연간 50만 톤 이상의 비회를 생산하여 30억 이상의 수입을 얻은 것으로 알려졌다. 재활용률이 증가하게 된 원인은 다음과 같다. 첫 번째로 정부에서 산업부산물의 재활용을 촉진하고자 1993년부터 “철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침”을 제정 운용하여 용도별 규격에 따른 재활용 방법, 재활용



계획의 수립 그리고 재활용 목표율을 규정한 것이다. 이에 따라 매년 재활용 목표율을 설정하여 운영하고 있으며, 양질의 석탄재를 생산하기 위한 비회 정제공장도 현재 5곳 이상이 가동되어 100만 톤 이상의 정제회가 생산되고 있다. 두 번째로는 정제회를 중심으로 일부 지역에서는 레미콘 혼화재로 7~12% 정도를 비회로 사용하고 있고, 무연탄회를 점토대용으로 시멘트 클링커 제조공장에서 원료로 사용하고 있어 대량으로 소비가 가능해졌기 때문이다.

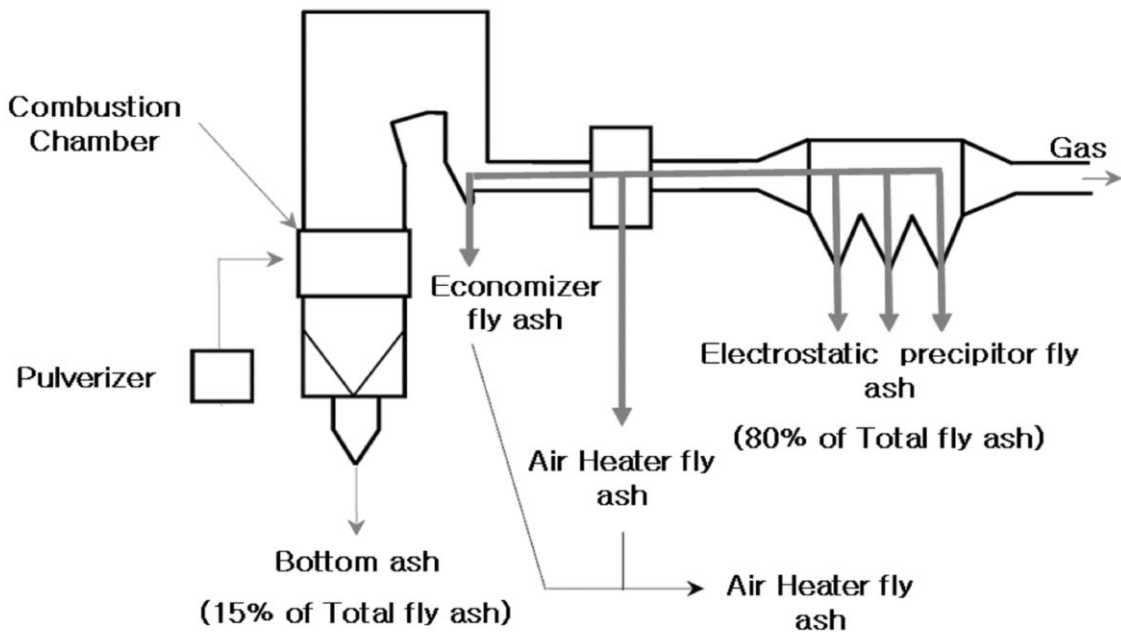
발전소 비회 재활용률은 지역별로 크게 차이가 난다. 영월 및 동해는 전량을 시멘트 공장의 원료로 비회를 공급하고 있어 재활용률이 높으나, 서천과 영동은 시멘트 공장에 공급하는 것이 힘들어 재활용률이 낮다. 유연탄의 석탄회를 보면 비회 정제공장이 있는 보령, 삼천포 및 태안 등은 재활용률이 60%이상인 것으로 나타났다. 용도별 비회의 재활용 실적을 보면 콘크리트 혼화재

가 54%, 시멘트 원료가 35%, 지반·성토재 8%, 시멘트 2차제품 2% 및 기타가 1%를 차지하고 있다.

2.1.2 비회 생산 과정

미분탄 연소과정인 그림1은 미분탄을 이용한 Y 화력발전소의 비회 생성의 계통도이며, 이 계통도에서는 미분기(pulverizer)에서 미분탄을 연소실(combustion chamber)에 삽입하여 타고 남은 석탄재가 비회와 저회로 나뉜다. 절탄기(economizer)와 예열기(air heater)를 통해 비회가 생산되며, 그 다음 연소된 가스를 전기집진기(electrostatic precipitator)를 이용하여 포집하며 비회를 생산하고 남은 가스는 굴뚝을 통해 배출된다.

또한, 석탄회는 회를 집진하는 장소에 따라 비회, 신더회 및 저회로 분류된다. 비회는 전기집진기, 신더회는 절탄기나 공기에열기 아래의 호퍼 그리고 저회는 보일러의 하부에서 포집된 회를



[그림 1] Schematic diagram of ash generation in the pulverized coal power plant



말하며, 총 석탄회 발생량 중 대략 비회가 80%, 신더회가 5%, 저회가 15% 정도가 배출된다. 일반적으로 비회와 신더회를 총칭하여 비회라 부른다. 재활용하는 석탄회의 대부분은 비회로 재활용을 위하여 공기이송 설비에 의해 비회저장소로 건식 이송되고, 재활용 되지 않은 비회는 저회와 마찬가지로 이동탱크로 이송시킨 후 에쉬폰드장에 버린다.

2.1.3 비회 특성

영흥도 소재 Y화력발전소의 비회는 공기에열기 하부에 생성되는 신더애쉬의 건조밀도가 약 0.72 t/m³ 그리고 습윤밀도는 약 1.12 t/m³ 이다. 전기 집진기에서 포집되는 비회의 건조밀도는 약 0.8 t/m³ 이며, 습윤밀도는 약 1.445 t/m³ 이다. 그리고 저회는 건조밀도가 약 0.59 t/m³ 정도이다.

비회는 ASTM에 따라 C급 및 F급으로 분류된다. ASTM에 의하면 발전소에서 사용하고 있는 원탄의 종류와 비회의 CaO 함유량에 따른 구분으로 크게 나눌 수 있다. 먼저, 원탄 종류에 따른 비회로 무연탄 및 역청탄을 원탄으로 사용하여 생성되는 비회를 F급, 그리고 아역청탄 및 갈탄을 원탄으로 사용하여 생성되는 비회는 C급으로 구분하고 있다. 또한, ASTM C 618에 따르면 CaO 함량에 따라 일반적으로 F급 비회 CaO함유량은 5% 이하로 매우 작고, C급 비회는 CaO 함유량을 10% 이상으로 규정하고 있다.

<표 1> Proper of the fly ashes

	title	KS L 5405	measured value
chemical property	SiO ₂ (wt%)	45 over	50.1
	humidity (wt%)	1 over	1.5
	Ignition loss (wt%)	5 under	4.1
physical property	density (t/m ³)	1.95 over	2.14
	blaine (cm ² /g)	2,400 over	3,522
	compressive strength(%)	60 over	70

국내에서 생성되는 비회는 원탄의 종류에 따른 분류보다 연소온도, 촉매제 및 보일러의 조건 등에 따라 화학조성이 다르기 때문에 이러한 조건을 바탕으로 CaO함유량으로 분류하는 것이 바람직하다. C급 비회는 포졸란 반응성을 갖는 특징 외에도 시멘트와 유사한 특성을 갖고 있기 때문에 포졸란재 및 시멘트 결합재로 분류된다. 이에 비해 F급 비회는 주로 포졸란 특성만 갖는 혼화재로 구분되어 지고 있다.

영흥 Y발전소에 발생된 비회의 시료는 KS L 5110의 단순 램덤 샘플링으로 70 g을 하나의 검사 단위체로 하여 비회의 집진장치 호퍼에서 채취하였다. 한국전자재시험연구원에서 발행한 비회의 화학적 특성과 물리적 특성의 성적서를 표 1에 나타내었다. 비회는 이산화규소(SiO₂) 50.1 wt%, 습도 1.5 wt%, 균열감량 4.1 wt%, 밀도 2.14 t/m³, 분말도 3522 cm²/g 그리고 압착강도 70%로 KS L 5405의 기준을 만족하였다.

한국화학실험연구원에서 발행한 비회 성적서를 표 2에 나타내었다. 비회는 이산화규소(SiO₂), 산화알루미나(Al₂O₃) 및 산화철(Fe₂O₃)이 86.79 wt% 구성됨을 확인할 수 있었다.

비회의 입자분포를 그림 2에 나타내었다. 비회는 71.63%의 입자가 -200 mesh(44μm) ~ +325 mesh(37μm)의 크기로 이루어져 있음을 알 수 있다. 입자의 크기에 따라 0.1μm이하는 콜로이드, 0.1 ~ 1μm의 범위를 미분, 1 ~ 100μm의 범위를 분체, 0.1 ~ 1.0 mm의 범위를 조분 그리고 1.0 mm이상을 입체라 구분한다. 밀도는 어떤 물질의 단위 부피당 질량으로 정의되는 물질 고유의 물성치로 압력과 온도에 영향을 받는다.

<표 2> Chemical composition weight percentage of fly

composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
wt%	50.1	29.4	7.29	3.90	1.18
composition	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	lg.loss
wt%	1.07	0.61	0.48	1.76	4.10



비회와 같은 분체에서는 고체 입자사이의 공간에 들어있는 기체나 액체로 인하여 고체의 밀도와 값이 다른 걸보기 밀도를 사용한다. 이 걸보기 밀도는 입자 사이를 채우는 충전 유체나 고체자체의 내부기공에 의해 달라질 수 있다. 비회는 대체적으로 분체로 구성되어 있으며, 구형 다공성으로 구성되어 이송 중 걸보기 밀도 변화에 영향을 줄 것으로 판단된다.

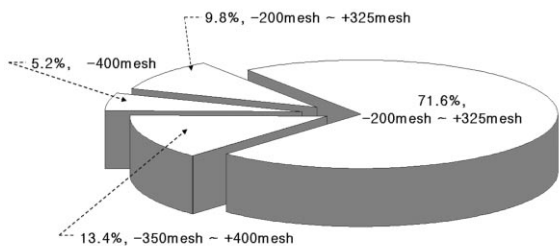
2.2 공기부상식 벨트컨베이어

공기부상식 벨트컨베이어는 벨트컨베이어에 비

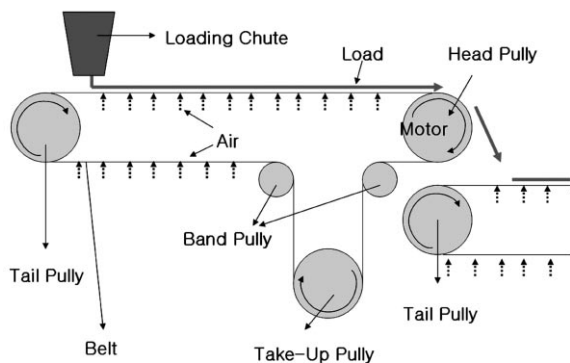
해 친환경적인 밀폐구조로써 우수한 미관을 가지며, 소음과 진동이 적고, 아이들러의 교환이 필요 없어 유지비 절감이라는 장점이 있지만, 공기부상을 시켜줄 수 있는 팬이 필요하고, 밀폐된 구조에 공기부상을 위한 공기를 외부로 배출하기 위한 집진설비가 필요하다. 집진설비는 비산되는 비회를 포집하여 설비에 안정성을 주고, 환경기준에 적합한 공기를 배출한다.

벨트컨베이어의 구성을 그림 3에 나타내었다. 벨트컨베이어는 벨트와 풀리의 마찰에 의해 벨트를 구동하고, 적재기를 통해 운반물을 벨트상의 단면에 선적하여 이동하는 설비이다. 벨트컨베이어는 프레임의 양단에 설치된 풀리에 벨트를 연결하고 그 위에 하물을 실어, 벨트를 동일 방향으로 연속적으로 움직여서 하물을 운반한다.

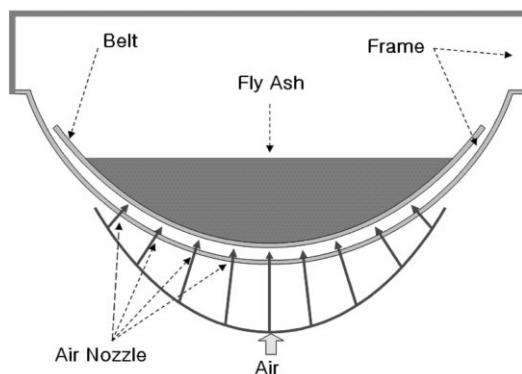
그림 4는 공기부상식 벨트컨베이어의 단면도를 나타내었다. 프레임(frame)의 양단에 설치된 풀리에 벨트를 연결하고 그 위에 하물을 실어, 공기부상식 벨트컨베이어는 설비의 양 끝단에서 5 m 이상인 부분을 아이들러(idler) 대신 외부의 공기를 이용하여 벨트 하부에서 불어 벨트를 공중으로 부상시켜서 벨트와 벨트 지지면과의 마찰력을 줄여 벨트가 회전하는데 유리하도록 향상된 설비이다. 벨트컨베이어와 다른 점은 엔클로즈 되어



[그림 2] Particle size distribution of fly ash



[그림 3] Composition of belt conveyor



[그림 4] Cross-sectional area of air floating type belt conveyor



있다는 것과 별도의 비산되는 먼지를 위해 덮개 라든지 깔리리를 형성하지 않아도 된다는 점이다. 하지만, 추가적으로 벨트를 부상을 위해 외부공기 유입의 팬이 필요하고, 그 공기를 외부로 배출시키는 집진설비가 필요하다.

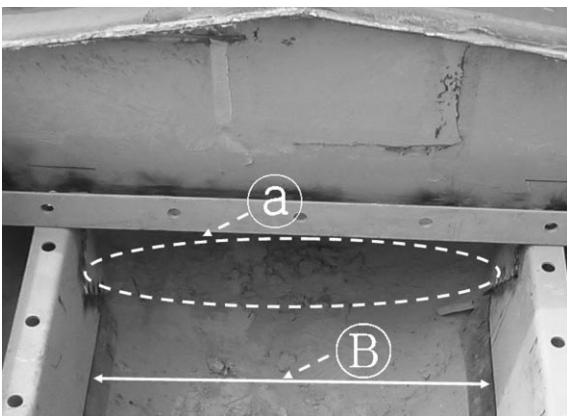
2.3 비회 해상반출설비

인천시 영흥면에 소재한 Y발전소의 비회 해상반출설비를 사례분석 대상으로 선정하였다. 비회 해상반출설비는 비회 저장고에서 공기슬라이더(air slider)를 통해 공기부상식 벨트컨베이어 이송시키고, 공기부상식 벨트컨베이어를 통해 이송된 비회는 공기슬라이더에 의해 선박에 이송되는 설비이다. 이동거리는 약 1,052 m이며, 공기부상식 벨트컨베이어가 총 9개 설치된다. 공기부상식 벨트컨베이어의 속도는 4.2 m/s로 일정하고, 설계시 적용한 비회의 겉보기 밀도는 0.72 t/m³이다. 비회의 질량기준 시간당 최대이송량은 550 t/h이며, 체적기준 시간당 최대이송량은 764 m³/h이다. 이때, 비회가 벨트컨베이어에 적층된 높이는 벨트의 중앙을 기준으로 120 mm이다.

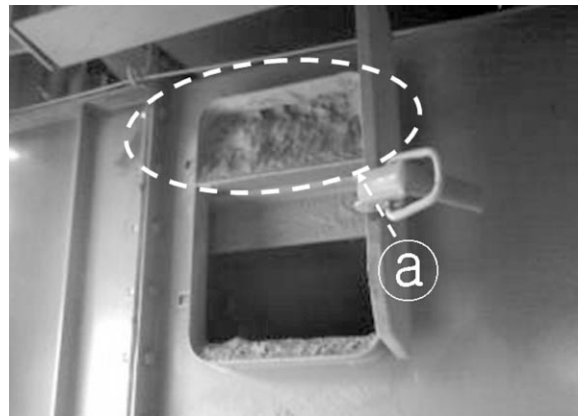
3. 운반물 넘침현상 사례분석

3.1 운반물 넘침현상 발생사례

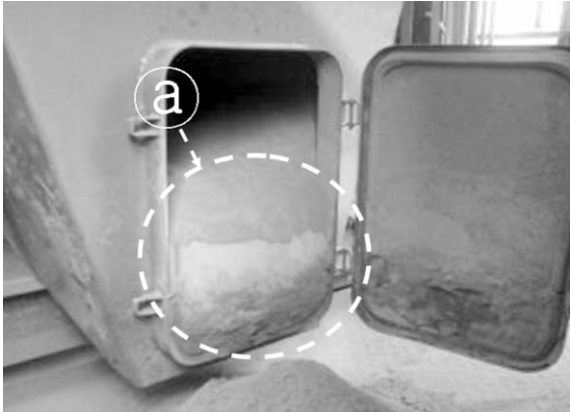
공기부상식 벨트컨베이어를 이용하여 비회의 최대이송량을 이송 시에 빈번히 운반물 넘침(overflow)현상이 발생하였다. 공기부상식 벨트컨베이어에서 넘침현상이 발생된 사진을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 ①는 벨트이고, ②는 운반물인 비회가 벨트 위로 넘침현상이 나타난 모습이다. 벨트컨베이어와 달리 공기부상식 컨베이어에서만 나타나는 비회 운반물 넘침현상은 심각한 결과를 수반한다. 첫째로 운반물 넘침현상은 벨트와 트로프 사이에 비회가 삽입됨으로서 공기부상에 영향을 주어 노즐이 막히는 현상을 발생시키고, 벨트의 공기부상이 어렵게 되어 벨트와 트로프 사이의 마찰저항이 커져 이송을 어렵게 한다. 둘째로 운반물 넘침현상으로 인해 벨트와 트로프 사이에 비회가 지속적으로 과다 삽입됨으로서 벨트가 정상적인 U형을 벗어나 형태가 변화된다. 벨트 형태의 변화는 벨트가 접히거나, 비회가 벨트위로 운반되지 않아 컨베이어 프레임에 가득 차버리는 결과를 낳는다. 그림 6은 컨베이어 프레임의 끝부분의 점검구를 통해 본 내부 사진이다. ③에 표시된 부분에서 비회가 가득 찬 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상의 원인은 앞서 설명한 것과 같이 운반물 넘침현상 때문에 발생한 것이다. 셋째로 운반물 넘침현상으로 인해 벨트 운전방향



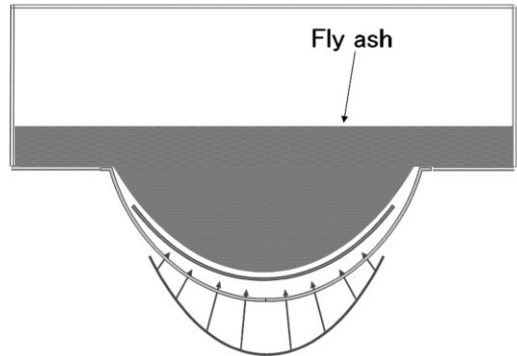
[그림 5] Overflow phenomenon I of fly ash



[그림 6] Overflow phenomenon II of fly ash



[그림 7] Overflow phenomenon III of fly ash



[그림 8] Cross-sectional area of overflow phenomenon of fly ash

으로 비회가 운반되지 않고 운전반대방향으로 밀리는 것이다. 운반되지 못한 비회는 구동모터 반대편의 데일 폴리의 하부주로 쌓인다. 그림 7은 데일 폴리 하부의 점검구를 통해 본 내부 사진이다. ㉠에 표시된 부분에 비회의 적체된 것을 확인할 수 있다. 폴리 하부에 비회가 과적되면 폴리와 벨트의 회전에 영향을 주어 벨트가 사행되는 결과도 발생할 수 있다. 이와 같은 고장사례는 걸보기 밀도 변화에 따른 운반물 넘침현상이 주요원인이다.

3.2 운반물 넘침현상 원인분석

비회 넘침현상의 원인을 분석하기 위하여 운반물의 걸보기 밀도를 측정하였다. 벨트컨베이어의 중간지점에 위치한 점검구를 이용하였고, 측정도구로써는 1 m의 스틸자를 이용하였다. 점검창을 통해 스틸자를 넣고, 점검창 끝을 기준점으로 정하여 벨트가 정지 시, 사전에 높이를 측정하고, 운송 중일 때 비회의 상단 높이에 기준을 맞춰 초기 점검구의 기준점을 측정하였다. 그 차이 값에 벨트가 공기가 부상하는 높이 3 mm를 감안하여 실제 운송중인 벨트 위에 적층된 비회의 높이를 도출하였다.

운반물 넘침현상이 발생한 컨베이어 단면의 개

략도를 그림 8에 나타내었다. 넘침현상의 주요 원인은 비회의 걸보기 밀도가 낮아짐으로서 단위무게당 체적이 커져, 설비가 수용할 수 있는 비회 이송량의 한계를 벗어나는 것이다. 체적기준 시간당 최대이송량은 764 m³/h으로 운전 시 설계 비회 적층높이는 120 mm이다. 120 mm의 적층높이를 유지하며 100회 운전한 결과 시간당 이송된 비회의 무게가 200 t/h ~ 550 t/h 인 것으로 나타났다. 이를 통해 비회의 걸보기 밀도가 0.3 ~ 0.8 t/m³의 범위 내에서 변화됨을 알 수 있었다.

3.3 운반물 넘침현상 해결방안

영흥도 Y발전소에서 비회 체적기준 시간당 최대 이송량인 764 m³/h으로 운전 시 설계 비회 적층높이인 120 mm으로 적층높이를 유지하며 100회 운전한 결과 시간당 이송된 비회의 무게가 200 t/h ~ 550 t/h 인 것으로 나타났다. 따라서 비회의 걸보기 밀도는 0.3 ~ 0.8 t/m³의 범위내에서 변화함을 알 수 있었고, 측정결과와 최저 걸보기 밀도인 0.3 t/m³일 때를 기준으로 하여 220 t/h로 이송용량을 제한해야 함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 고에서는 경기도 영흥에 소재한 Y발전소의



비회 해상반출설비에서 이송용량 500 t/h, 이송 속도 4.2 m/s, 운반물 비회 걸보기 밀도 0.72 t/m³를 기준으로 설계된 공기부상식 벨트컨베이어를 사용하여 운반물인 비회가 체적상승으로 벨트 위로 넘침(overflow)현상의 고장발생사례를 조사하였다. 비회 걸보기 밀도가 높을수록 안전이송운전이 가능해지고, 걸보기 밀도가 낮을수록 넘

침현상이 발생함을 알 수 있었다.

공기부상식 벨트컨베이어에서의 100차례 운전 결과, 비회의 걸보기 밀도는 0.3 ~ 0.8 t/m³의 범위내에서 변화함을 알 수 있었고, 측정결과와 최저 걸보기 밀도인 0.3 t/m³일 때를 기준으로 하여 220 t/h로 이송용량을 제한해야 함을 알 수 있었다. (KIPEC)