

다중 PCM 데이터를 이용한 텔레메트리 데이터 복구 방법

정혜승*, 김주년**

Telemetry Data Recovery Method Using Multiple PCM Data

Haeseung Jung*, Joonyun Kim**

Abstract

Recently, interests about frame error reduction method, using multiple PCM data which are received at several ground stations, are increasing. Simple data merge method is already applied to data processing system at Naro Space Center and have been used in the first and the second flight test analysis of KSLV-I. This paper is focused on error reduction with error correcting merge algorithm and time-delayed data correction algorithm. Result of applying the proposed algorithms to the flight test data shows 1.32% improvement in error rate, compared to simple-data-merge method. It is considered that presented algorithms could be very useful in generating various telemetry merge data.

초 록

최근 여러 개의 지상국에서 수신한 PCM 데이터를 병합하여 잡음에 의한 프레임 오류를 제거하는 방법에 관한 관심이 증가하고 있다. 단순 병합 방식은 이미 나로우주센터의 데이터처리 시스템에 적용되어, 나로호의 1, 2차 비행시험 데이터 분석에 사용된 바 있다. 본 논문은 단순 데이터 병합방식에 데이터 치환, 비트단위 투표 등의 오류교정 알고리즘 및 시간지연데이터를 이용한 교정알고리즘을 적용하여 오류율을 더 낮추는 데 초점을 맞추고 있다. 네 개 지상국에서 수신된 나로호 비행시험 데이터에 제안된 알고리즘을 적용한 결과 단순 병합방식보다 1.32%의 오류율이 개선된 것으로 나타났다. 제시된 알고리즘은 향후 다양한 텔레메트리 병합데이터 생성에 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

키워드 : 텔레메트리(Telemetry), 데이터 병합(Data Merge), 오류교정(Error Correction), 시간지연 데이터(Time Delayed Data)

접수일(2012년 9월 21일), 수정일(1차 : 2012년 10월 17일, 2차 : 2012년 10월 25일, 게재 확정일 : 2012년 11월 1일)

* 발사체전자팀/hsjung@kari.re.kr

** 발사체전자팀/jnkim@kari.re.kr

1. 서 론

위성발사체의 텔레메트리 데이터는 고속 비행체의 무선통신 특성상 필연적으로 잡음에 취약할 수밖에 없다. 이런 잡음을 줄이기 위해 데이터 수신 지상국을 다중화하거나 오류 교정 부호를 채택하는 등 여러 방법이 적용되고 있다. 최근, 여러 개의 지상국에서 수신된 텔레메트리 데이터를 병합하여 프레임 오류율을 낮추는 방법에 관한 관심이 증가하고 있다[1-4]. Koh[5-7] 등은 2개의 지상국에서 수신된 텔레메트리 데이터를 병합하여 오류율을 크게 낮출 수 있음을 실험적으로 증명한 바 있다. 이런 데이터 병합기술은 이미 나로우주센터의 텔레메트리 데이터처리 시스템에 적용되어 있으며, 나로호의 비행시험 데이터 분석에 사용되고 있다. 하지만 이런 기술은 단순히 마이너프레임 오류판정에 의존해 병합데이터를 만들어내기 때문에 데이터 병합에 사용된 마이너프레임에 아주 단순한 잡음이 포함될지라도 오류를 복구하지 못한다는 단점이 있다.

본 연구는 이런 단순 데이터 병합기술의 단점을 극복하기 위해 데이터 병합시 상호 데이터 치환, 비트단위 투표 등의 알고리즘을 적용하여 단순 잡음에 의한 프레임 오류를 복원하는 데 초점을 맞추었다. 이와 더불어 시간지연데이터, 프레임 동기신호, 프레임 카운터, GPS 날짜정보 등의 데이터교정을 통해 오류율을 더 줄일 수 있도록 하였다. 개발된 알고리즘을 나로호 비행시험 데이터에 적용한 뒤 도출된 병합데이터의 마이너프레임 오류율을 단순병합데이터의 오류율과 비교해 보고 그 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 나로호 PCM 구조

나로호의 텔레메트리 수신 PCM은 그림 1과 같이 N바이트(Byte : 8비트 크기의 디지털데이터를 나타내며, 워드와 혼용되어 사용되기도 하나 이하 본 논문에서는 바이트로 표기) 크기의 마이너프레임(minor frame)을 기본으로 구성되며, Z

개의 마이너프레임이 모여 하나의 메이저프레임(Major Frame)을 형성한다. 각 마이너프레임은 수신시각 정보(Time Stamp), 수신품질 정보(QF : Quality Factor), 마이너프레임 번호(Minor frame ID), 프레임 동기신호(Frame Synch), 텔레메트리 데이터 및 오류검출코드로 구성된다. 오류검출코드는 발사체에 탑재된 텔레메트리 데이터 생성장치에 의해 프레임 동기신호를 제외한 텔레메트리 데이터를 이용하여 생성되므로, 수신된 마이너프레임 데이터를 이용하여 탑재장치와 동일한 방법으로 오류검출코드를 생성하고 이를 수신된 코드와 비교하면 해당 프레임의 오류를 판정할 수 있게 된다. 체크섬(Checksum), CRC 등의 코드가 주로 사용되며, 나로호의 텔레메트리 데이터에는 체크섬(Checksum) 코드가 사용되었다.

2.2 단순 데이터 병합 알고리즘

단순 데이터 병합 알고리즘의 주요 기능은 오류검출코드를 이용해 각 지상국 텔레메트리 데이터 중 정상으로 판정된 마이너프레임만을 뽑아서 최종 병합데이터를 만들어내는 것이다. 동일한 마이너프레임일지라도 각 지상국별로 수신시각의 차이가 있기 때문에 병합알고리즘이 가장 먼저 해야 할 일은 각 지상국 데이터를 마이너프레임 번호, 메이저프레임 번호에 맞춰 배열하는 것이다. 마이너프레임 번호와 메이저프레임 번호가 조합된 프레임번호는 각 마이너프레임별로 유일하며, 시간에 따라 순차적으로 증가하고, 수신시각 정보와 밀접한 관계가 있기 때문에 현재 마이너프레임의 수신시각 및 프레임번호가 앞뒤 마이

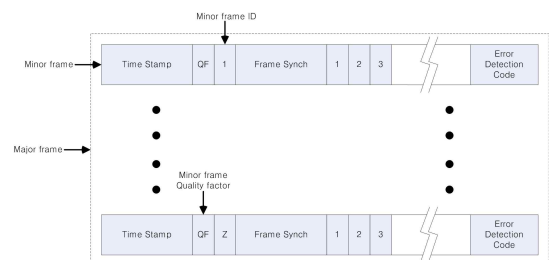


그림 1. 나로호 수신 PCM 구조

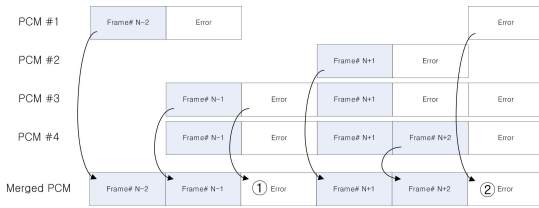


그림 2. 단순 데이터 병합 알고리즘

너프레임의 수신시각 및 프레임번호와 일관성이 없을 경우 잡음이 포함되어 있음을 쉽게 판단할 수 있다. 마이너프레임번호나 메이저프레임번호에 잡음이 포함되어 있을 경우 직전 정상 마이너프레임의 수신시각과 현재 마이너프레임의 수신시각 차를 이용하여 현재 프레임번호를 계산하고 교정할 수 있다.

프레임번호에 따라 배열된 데이터를 병합하는 단순 데이터 병합 알고리즘을 그림 2에 나타내었다. PCM#1~4는 각 지상국별로 수신된 PCM 데이터를 나타내며, Merged PCM은 단순병합 알고리즘에 의해 생성된 최종 병합 PCM을 나타낸다. 지상국별 통신링크에 따라 데이터가 수신되지 않은 마이너프레임은 빈 구간으로 표시되어 있으며, 데이터 수신은 되었으나 잡음이 포함되어 오류로 판정된 마이너프레임은 "Error"로 표시되어 있다. 정상 수신된 마이너프레임은 "Frame#N±n"으로 표시하였다. 단순병합알고리즘은 현재 마이너프레임 구간에서 정상 마이너프레임이 발견되면 즉시 그 마이너프레임을 병합데이터에 삽입하고 다음 마이너프레임 구간으로 이동하여 모든 PCM의 마지막 마이너프레임이 처리될 때까지 해당 작업을 반복 수행한다. 만약 현재 구간의 모든 마이너프레임이 오류로 판정된다면 병합데이터에는 오류 마이너프레임이 삽입된다.

2.3 고정값 데이터 교정

수신된 텔레메트리 데이터 중 일정한 값을 가지도록 설계되었거나, 시간에 따라 순차적으로 증가하는 값을 가진 데이터에 잡음이 포함되었을 경우 간단한 계산으로 교정이 가능하며, 이를 통해 병합데이터의 오류율을 다소 낮출 수 있다.

일정한 값을 가지도록 설계된 데이터에는 비동기 삽입프레임 (Asynchronous Embedded Frame)의 프레임싱크, 비행중 변하지 않는 시간정보 (GPS의 날짜 데이터 등), 향후 사용을 위해 일정한 값을 채워둔 데이터 구간 등이 있으며, 순차적으로 증가하는 값을 가진 데이터에는 마이너프레임 번호, 메이저프레임 번호, 비동기삽입프레임 번호, 각종 카운터 등이 있다. 마이너프레임 번호와 메이저프레임 번호의 교정은 데이터병합을 위한 프레임배열을 위해서도 반드시 필요하다.

2.4 시간지연 데이터 교정

나로호에 탑재된 일부 장치들은 신뢰성을 높이기 위해 일정 시간 뒤 동일한 데이터를 중복 전송하는 방법을 사용한다. 이러한 시간지연 데이터는 데이터 중복에 따른 과부하가 있지만 오류율이 낮은 장점을 가지고 있어 중요 데이터 전송에 주로 사용된다. 중복 전송된 시간지연 데이터는 상호 비교를 통해 오류를 교정할 수 있다. 시간지연 데이터 교정은 원본 데이터 교정 및 지연 데이터 교정의 두 가지 순서로 진행된다. 시간지연 데이터 교정 알고리즘을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 원본 데이터(O_DATA)는 N초 뒤의 마이너프레임(D_mf)에서 D_DATA로 중복되어 나타난다. 알고리즘은 현재 마이너프레임

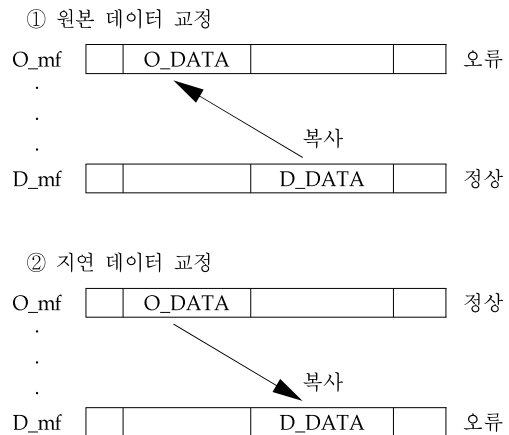


그림 3. 시간지연 데이터 교정 알고리즘

(O_{mf})이 오류로 판정되면 먼저 D_{mf}을 찾고 D_{mf}의 오류판정을 수행한다. D_{mf}도 오류라면 교정작업 없이 다음 마이너프레임 구간으로 작업이 이동되고, D_{mf}가 정상이라면 D_{DATA}를 O_{DATA}로 복사하여 오류를 교정한다. 이 작업은 마지막 마이너프레임이 처리될 때까지 반복 수행된다. 원본 데이터 교정이 완료되면 O_{DATA}를 이용하여 D_{DATA}를 교정하는 지연 데이터 교정작업이 이어진다. 지연 데이터 교정 알고리즘은 D_{mf}가 오류일 경우 N초 이전 마이너프레임 O_{mf}를 찾아 오류판정을 수행하고 O_{mf}가 정상이면 O_{DATA}를 D_{DATA}에 덮어 쓰는 방식으로 진행된다. 교정작업이 마지막 마이너프레임까지 수행되고 나면 원본 데이터 교정 및 지연 데이터 교정이 모두 종료된 교정데이터가 남게 되고 시간지연 데이터 교정 알고리즘은 종료된다.

2.5 오류교정 데이터 병합알고리즘

오류교정 데이터 병합 알고리즘은 데이터 병합시 현재 처리중인 마이너프레임 구간에 포함된 모든 지상국 PCM의 마이너프레임이 오류로 판정될 경우 적용하여 단순한 잡음에 의한 오류를 제거하는 방법이다. 병합에 사용되는 PCM 수에 따라 PCM이 2개일 경우(그림 2의 ①) 프레임간 데이터 치환 알고리즘이 적용되고, PCM이 3개

이상일 경우(그림 2의 ②) 비트단위 투표 알고리즘과 프레임간 데이터 치환 알고리즘이 복합적으로 적용된다.

2.5.1 프레임간 데이터 치환

그림 2의 ①과 같이 동일 마이너프레임 구간 내에 수신된 PCM은 두 개이지만 두 곳 모두 오류로 판정되었을 경우를 생각해보자. 단순 병합 알고리즘으로는 명백히 오류 교정이 불가능함을 알 수 있다. 그러나 두 오류 프레임에 아주 단순한 잡음만 섞여있다면 상호 데이터 비교 및 치환을 통해 오류를 교정할 수 있다. 프레임간 데이터 치환 알고리즘을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 O_{PCM}은 오류가 없는 원본 마이너프레임을 나타내고, PCM#1, PCM#2는 각각 두 지상국에서 수신한, 오류가 포함된 마이너프레임을 나타낸다. PCM#1과 PCM#2를 비교해보니 서로 다른 데이터가 2바이트 발견되었다고 가정하자. 서로 다른 2바이트를 제외한 나머지 데이터는 두 지상국에서 모두 동일한 데이터를 수신하였으므로 정상 수신된 데이터일 확률이 높다. 단순 잡음에 의해 PCM#1의 ②번 바이트와 PCM#2의 ①번 바이트에 오류가 존재한다면, PCM#1과 PCM#2의 ①번 바이트를 상호 치환하여 PCM#2가 O_{PCM}과 동일한 상태로 교정되고(그림 4의 Substitution ①), ①번 바이트 대신 ②번 바이트를 상호 치환하여 PCM#1이 O_{PCM}과 동일한 상태로 교정(그림 4의 Substitution ②) 되는 것을 알 수 있다. 상호치환된 각각의 PCM은 체크섬 오류판정로직을 거쳐 정상여부가 판단되며, 정상 판정된 PCM의 마이너프레임을 최종 병합데이터에 삽입하면 단순 병합 알고리즘으로는 교정이 불가능했던 구간이 교정된다. 프레임간 데이터 치환 알고리즘은 이렇게 두 마이너프레임간 서로 다른 데이터를 상호 치환해서 오류를 제거하는 것이다.

두 프레임간 서로 다른 데이터 수가 3바이트 이상일 경우도 모든 조합에 알고리즘을 적용한 뒤 오류판정을 통해 정상프레임을 얻을 수 있다. 크기가 n바이트인 두 프레임간 서로 다른 데이

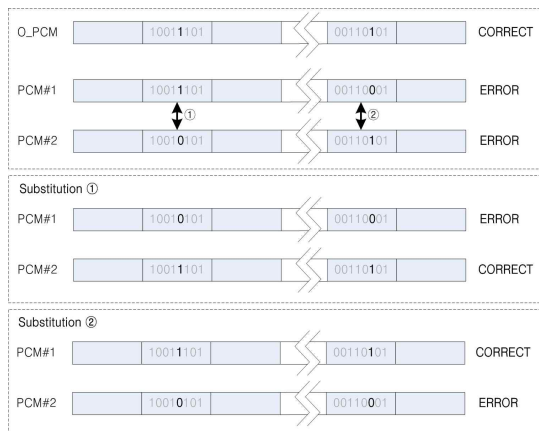


그림 4. 프레임간 데이터 치환 알고리즘

터 수가 N개일 경우 프레임오류판정을 거쳐야 할 모든 경우의 수는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^N n C_k \quad (1)$$

N 값이 커질수록 정상판정을 받을 수 있는 확률은 크게 떨어지고, 연산의 시공간복잡도(Time & Space Complexity)는 크게 증가하므로 사용될 연산장비의 성능에 따라 N이나 k의 값에 한계치를 정하는 것이 필요하다. 만약 오류검출코드의 정밀도가 떨어질 경우, 즉 서로 다른 데이터로 동일한 오류검출코드를 생성할 가능성이 많을 경우는 N의 값을 작게 제한하여 잘못된 정상 판정 마이너프레임(오류판정 결과는 정상이나 실제 데이터는 오류인 마이너프레임)을 생성하지 않도록 하여야 한다.

한편, 두 오류 마이너프레임 사이에 서로 다른 데이터수가 한 바이트일 경우를 생각해 볼 수도 있다. 이 경우 한 바이트를 제외한 나머지 데이터는 정상 데이터일 확률이 높으므로 해당 바이트만 다른 값으로 바꾸면 정상적인 마이너프레임을 얻을 수 있으리라 기대할 수 있다. 전술한 프레임간 데이터 치환 알고리즘을 그대로 적용하면 결국 서로 위치만 바뀐 같은 프레임이 생성되어 오류를 제거하지 못하게 되므로 비트단위 데이터 치환을 해야 한다. 비트단위 데이터 치환 알고리

즘은 데이터 치환이 비트단위로 일어난다는 점을 제외하고 프레임간 데이터 치환 알고리즘과 그 방법이 동일하다. 비트단위 데이터 치환 알고리즘을 그림 5에 설명하였다.

비트단위 프레임간 데이터 치환 알고리즘에서 두 프레임간 서로 다른 비트의 수를 N이라고 할 때, N의 최대값은 8이므로 프레임오류판정을 거쳐야 할 모든 경우의 수는 식 (1)에 의해 최대 255밖에 되지 않는다. 만약 비트치환을 통해 정상프레임이 발견되지 않는다면 해당 바이트의 값을 0에서 255까지 모두 열거해 프레임오류판정을 거칠 수도 있다. 이 경우에도 모든 경우의 수는 256개밖에 되지 않으므로 연산의 부담은 크지 않다.

2.5.2 비트단위 투표

데이터 병합에 사용될 수 있는 오류 PCM이 3개 이상이고 모든 프레임이 오류로 판정될 경우 (그림 2의 ②) 비트단위 투표 알고리즘을 적용할 수 있다. 비트단위 투표 알고리즘은 마이너프레임내 모든 데이터를 비트단위로 나누고 각 비트별 투표를 통하여 가장 많이 득표한 값을 해당 비트의 정답으로 간주하는 알고리즘이다. 그림 6에 알고리즘의 동작을 설명하였다. 그림 6에서 PCM#1~3은 각 지상국의 PCM을 나타내고, Merged PCM은 비트단위 투표를 통해 생성된 최종 병합 PCM을 나타낸다.

투표결과 득표율이 같은 경우가 나온다면 해당 비트의 정답을 두 가지로 염두에 두고 모든 경우에 대해 프레임오류판정을 거쳐 정답을 찾는 방법을 사용하여야 한다. n비트 크기의 마이너프레임에 득표율이 같은 비트의 수가 N개일 때 프

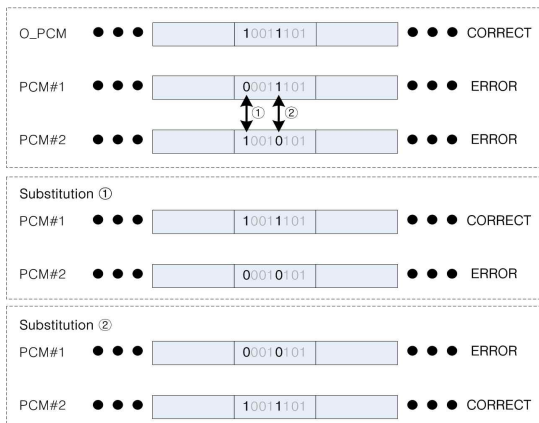


그림 5. 비트단위 프레임간 데이터 치환 알고리즘

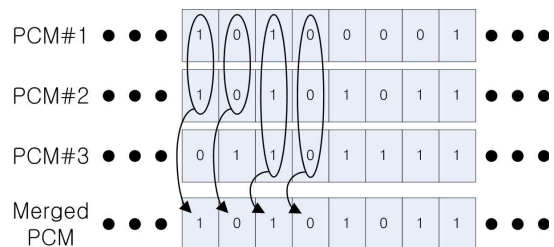


그림 6. 비트단위 투표 알고리즘

레이오류판정을 거쳐야 할 전체 경우의 수는 식 (1)과 같으며, 이 값은 N이 커지면 연산이 불가능한 수준의 시공간복잡도를 가지게 된다. 하지만 이런 경우가 되려면 병합에 사용된 마이너프레임이 4개 이상이어야 하는데, 4개 이상의 지상국이 같은 프레임을 수신할 수 있는 통신링크를 가지도록 지상국 배치를 하지 않기 때문에 그런 경우는 거의 없다고 봐도 무방하다. 4개 이상의 지상국이 같은 프레임을 수신할 수 있도록 배치되었다 할지라도 동일 프레임을 모두 오류 프레임으로 수신할 확률은 매우 낮으므로 N은 대부분 작은 값을 유지할 것이다.

비트단위 투표를 통해 정상프레임을 찾지 못한다면 PCM을 번갈아가며 두 개씩 짝짓고, 프레임간 데이터 치환 알고리즘을 적용하여 오류교정 성공률을 높일 수 있다.

2.6 비행시험 데이터를 이용한 성능검증

제시된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 나로호 1차 비행시험 데이터에 이를 적용해 보고, 단순 병합 알고리즘을 적용한 데이터와 오류율을 비교해 보았다. 나로호 1차 비행시험 데이터는 모두 4개의 지상국에서 수신된 4개의 PCM으로 구성되어 있다. 오류교정부호로 체크섬을 사용하며, 체크섬 부호의 정밀도를 높이기 위해 특정한 비동기삽입프레임용 체크섬이 중복되어 사용되었다. 시공간복잡도를 제한하고 잘못된 정상교정 프레임 생성을 억제하기 위하여 일정값을 초과하는 조합의 k값을 제한하도록 시험 조건을 설계하였다.

시험결과는 표 1과 같다. 오류프레임 개수는

표 1. 비행시험 데이터 교정 결과

구분	전체 프레임	오류 프레임	오류율
①단순병합	1,397,683	92,645	6.63%
②오류교정	1,397,683	74,209	5.31%
① - ②	0	18,436	1.32%

전체 비행시간동안 생성된 전체 마이너프레임 개수에서 정상 수신된 마이너프레임 개수를 뺀 값이다. 오류율은 전체 마이너프레임 개수대비 오류 마이너프레임 개수의 비율을 나타낸다. 시험결과 오류교정 데이터 병합알고리즘에 의해 복원된 마이너프레임 수는 단순병합 알고리즘에 의해 복원된 마이너프레임 개수보다 18,436개가 많으며, 오류율은 1.32% 감소된 것으로 나타났다. 단순 병합 알고리즘 대비 오류교정 데이터 병합 알고리즘의 개선정도를 비율로 나타내면 19.9%에 이른다.

적용된 알고리즘별 오류 복원결과는 표 2와 같다. 데이터 병합에 사용된 전체 PCM 수는 4개이지만 지상국 위치에 따른 통신링크 관계로 오류교정 알고리즘이 적용되는 각 마이너프레임 구간에서의 PCM 수는 3개가 최대이다. 각 알고리즘별 복원 프레임수는 알고리즘 적용 전후의 병합데이터를 각각 생성하고 그 결과를 비교하여 도출하였다. 고정값 데이터 교정 알고리즘과 시간지연 데이터 교정 알고리즘은 데이터 병합 알고리즘 적용전 각 지상국 PCM에 적용되어 사전 교정작업을 수행하였고, 병합데이터 생성결과 각각 3,832개 및 3,535개 마이너프레임의 복원에 성공하였다. 프레임간 데이터치환 알고리즘은 PCM 2개의 경우 43.94%의 복원 성공률을, PCM 3개의 경우 59.28%의 복원 성공률을 나타내었으며 비트단위 투표 알고리즘은 5.15%의 복원 성공률을 보였다.

2.7 시험결과 분석

표 2. 적용 알고리즘별 복원 성공률

교정 알고리즘	대상 프레임	복원 프레임	복원 성공률
고정값 데이터	-	3,832	-
시간지연 데이터	-	3,535	-
데이터치환(2PCM)	15,110	6,639	43.94%
비트단위 투표	6,876	354	5.15%
데이터치환(3PCM)		4,076	59.28%

나로호 비행시험 데이터를 이용한 데이터 병합 실험을 통하여 오류교정 데이터 병합알고리즘의 복원성공률이 매우 높은 것을 알 수 있었다. 논란의 여지가 있는 중요한 시점의 텔레메트리 데이터는 단 한 마이너프레임의 정보라도 비행결과 분석에 큰 영향을 미치기 때문에, 본 시험에서 보여준 복원 성공율은 괄목할 만하다. 특히 프레임간 데이터 치환 알고리즘의 복원 성공률이 매우 높은 점이 주목할 만하며, 향후 다양한 텔레메트리 데이터 병합에 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다. 다만 오류교정부호의 정밀도를 벗어나는 과도한 오류교정은 잘못된 정상 교정프레임을 생성할 위험을 가지고 있으므로 항상 적절한 수준을 유지하고 조절하도록 주의하여야 한다. 향후 오류교정부호의 정밀도를 수치적으로 계량화하고 그에 알맞는 오류교정정도를 결정하는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 텔레메트리 병합데이터 생성시 적용할 수 있는 고정값 데이터 교정, 시간지연 데이터 교정, 프레임간 데이터 치환, 비트단위 투표 등의 에러교정 데이터 병합알고리즘을 제시하고, 나로호 1차 비행시험 데이터를 이용한 실험을 통하여 오류율을 낮출 수 있음을 보여주었다. 비행시험 데이터 분석에는 한 비트의 정보도 중요한 지표가 될 수 있으므로, 과도한 오류교정에 따른 잘못된 정상프레임 생성의 위험성만 주의하여 사용한다면, 그 효과는 뛰어나다고 할 수 있다. 제시된 알고리즘들은 실제 다양한 분야의 텔레메트리 병합데이터 생성에 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Michael J. Wilson, "Merging Telemetry Data from Multiple Receivers", International Telemetry Conference, 2004
2. Michael A. Forman, Ken Condreva, Gary

- Kirchner, Kevin Lam, " Quantifying Coding Gain from Telemetry Data Combining", International Telemetry Conference, 2008
3. J. E. Hoag, J. R. Kalibjian, D. Shih, E. J. Toy, "Recovery of Telemetered Data by Vertical Merging Algorithms", International Telemetry Conference, 1994
4. J.R. Kalibjian, "A Packet Based, Data Driven Telemetry System for Autonomous Experimental Sub-Orbital Spacecraft", International Telemetry Conference, 1993
5. Kwang-Ryul Koh, Sang-Bum Lee, Taek-Yi, Whan-Woo Kim, "PC-based frame optimizer using multiple PCM files", International Telemetry Conference, 2011
6. 고광렬, 이상범, 김환우, "시간지연데이터를 이용한 원격측정 성능향상", 한국항공우주학회지, 2010
7. 고광렬, 안성복, 이상범, 이택준, "병합정렬 알고리즘을 이용한 원격측정 프레임 최적화에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2010