
Global Report

복합화물 운송을 위한 실시간 중단 관리 접근방식

1. 개요
2. 문제 설명
3. 하이브리드 시뮬레이션 최적화 기반
의사결정 지원시스템
4. 온/오프라인 운송네트워크 및
입력변수_연구사례
5. 결론

1. 개요

국제무역이 증가하면서 운송 산업 정책입안자의 업무가 점점 복잡해지고 있다. 과거에는 교통비용의 최소화에 주력하였으나, 최근에는 교통운영이 환경과 사회에 미치는 부정적인 영향에 대한 논의와 지속가능성에 더 초점을 맞추고 있다[1]. 특히 도로운송계획에서 CO₂ 또는 CO₂-equivalent(CO₂e : CO₂ 등가물) 배출에 따른 GHGs(Green House Gas : 온실가스) 배출량 문제가 더욱 심각해지고 있다[2][3]. 운송계획은 사용가능한 MS(Transport Management System : 운송관리시스템) 소프트웨어로 최적화할 수 있지만 실제 도로교통 상황에서 이러한 계획의 정확한 실행은 보장할 수 없다. 이는 교통흐름(교통사고/도로혼잡/도로정비 등)의 여러 장애요인으로 인해 운송계획이 지연되거나 인프라 용량이 제한되어 있기 때문이다. 게다가, 예기치 않은 교통사고나 악천후로 인해 몇 시간 또는 며칠 동안 지속 중단으로 이어질 수 있다. 그러나 실시간 중단 관리방식은 운송 산업 정책입안자의 책임영역 내에서 다른 여러 문제에 초점을 두고 정책을 수행해야하기 때문에 중요한 포인트로 여기지 않는 경향이 있다[4]. 이러한 복잡한 네트워크를 처리하기 위한 실행 가능한 옵션으로 하이브리드 시뮬레이션 최적화(Hybrid simulation-optimization) 기법이 있다. 3PL(third Party Logistics : 제3자 물류) 서비스 제공업체의 유통 네트워크 설계를 위해 2006년 Ko 등은 유통 네트워크의 불확실성을 최적화한 유전자 알고리즘을 사용하여 하이브리드 시뮬레이션 최적화 모델을 제안했다[5]. 하이브리드 시뮬레이션 최적화 모델은 컨테이너 터미널의 하역작업 분야에도 적용되고 있다. 이후 2015년 DeKeizer 등은 하이브리드 시뮬레이션과 결합된 혼합 정수 선형 프로그래밍 기법을 이용하여 제품의 품질 요구사항에 따라 비용 최적화된 네트워크 설계를 연구한바 있다[6]. 2018년 Hrušovský 등은 하이브리드 시뮬레이션 최적화 접근 방식을 이용하여 복합운송계획으로 인한 환경문제에 대해 연구하였다[7].

이 연구에서는 복합화물 운송에 중점을 둬으로써 승객운송 및 예기치 않은 이벤트에 따른 영향에 초점을 맞춘 기존의 연구문헌과 달리 개별 운송수주에 대한 예기치 않은 사건의 영향을 분석하여 DSS(Decision Support System : 의사결정 지원시스템)를 제안하였다. 이처럼 하이브리드 시뮬레이션 최적화 모델은 다양한 운송계획 및 실행 프로세스 단계를 통합할 수 있다. 이는 교통계획의 최적화를 통해 예기치 않은 이벤트를 감지하고 그 영향을 분석할 수 있는 실시간 운송 모니터링 기술로 연결되고 있다. 아울러 실시간 재 계획 접근방식이 적용하여 예기치 않은 사건으로 인해 중단된 운송주문에 대체하고 있다. 이처럼 온라인 계획을 통해 짧은 시간 내에 대체계획을 수립하기 위해 몇 가지 기본정책이 수립되었으며, 이러한 정책의 적용가능성은 이벤트(교통사고 등) 기간에 따른 다양한 시나리오를 기반으로 분석된다. 따라서 정책을 적용할 수 있는 상황과 관련하여 중요한 통찰력을 얻을 수 있다. 제안된 DSS는 현실적인 일정을 기반으로 세 가지 교통모드(도로/철도/내륙의 수로)의 통합을 추진하고 있는 여러 유럽 국가를 대상으로 하는 실제 사례연구에 적용하였다. 이 광범위한 사례연구에서는 예기치 않은 사건의 특성에 따라 중단 관리에 관한 중요한 통찰력을 얻을 수 있다.

2. 문제 설명

복합화물 운송을 위한 실시간 중단 관리 접근방식은 오프라인 및 온라인 계획 단계로 구별할 수 있다.

■ 오프라인 계획

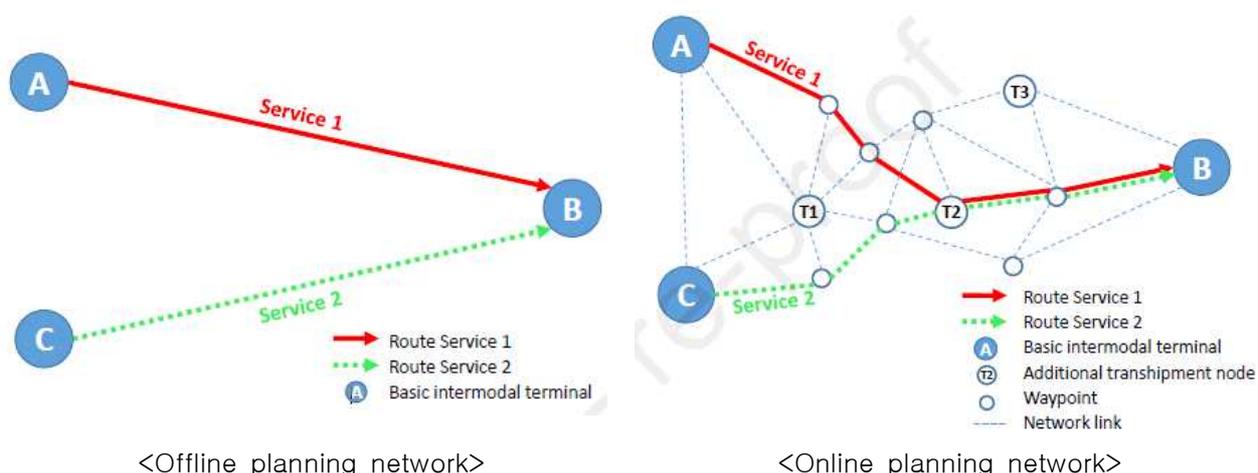
- 운송이 시작되기 전에 고객으로부터 받은 각 주문에 대해 운송계획을 만들어야 한다. 이를 위해 운송서비스로 연결된 터미널 네트워크는 특성 및 목표(최소비용 또는 CO₂e 배출)에 따라 각 주문에 가장 적합한 경로를 탐색한다.
- 이 단계에서는 운송수요 또는 이동시간 등의 불확실성을 포함하기 때문에 2007년 Crainic이 제시한 모델[8]을 기반으로 계획의 신뢰성을 높이기 위한 이벤트를 고려하는 것은 다소 제한적이다. 아울러 오프라인 계획은 광범위한 버퍼시간과 운송용량이 필요하기 때문에 가능한 모든 중단 관

리기능을 포함하여 소규모 운송에만 내성이 있다.

■ 온라인 계획

- 오프라인 계획이 실행 불가능해질 때에는 온라인 계획이 활성화되어 주요 중단 관리기능을 수행할 수 있다. 이는 일반적으로 운송작업이 실행하는 동안 새로운 계획을 빠르게 발견해야 하므로 중단관리 위치에 도착하기 전에 차량의 경로를 변경할 수 있다.
- 온라인 계획은 계획의 빈번한 변경으로 인해 시스템에 혼란을 일으킬 수 있으므로 전체 네트워크를 다시 최적화하는 대신 중단 관리의 영향을 받는 서비스와 운송주문에 대해서만 고려하는 것이 중요하다. 따라서 영향을 받는 운송주문에 대한 새로운 계획을 찾기 위해 효과적인 재 계획방법을 사용해야 한다.

오프라인 및 온라인 계획을 위한 운송 네트워크의 표현사례를 [그림 1]에 나타낸다.



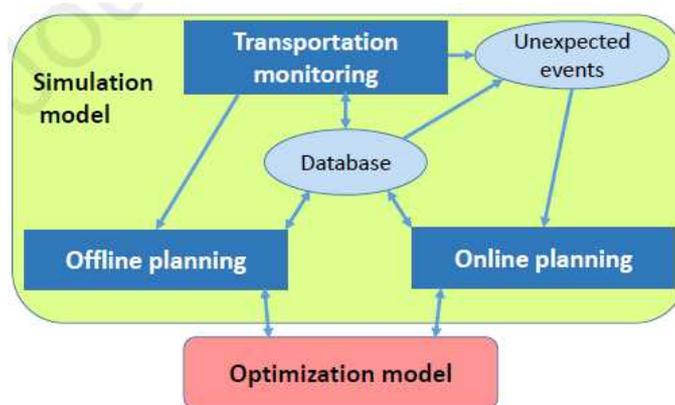
* 자료 : Martin Hrušovský, Emrah Demir, Werner Jammerneegg, Tom Van Woensel, “Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation”, Journal of Cleaner Production, 22 October 2020, p.6.

[그림 1] 오프라인 및 온라인 계획을 위한 운송 네트워크 표현

온/오프라인 네트워크는 서로 연결된 다양한 유형의 노드로 구성되며, 각기 다양한 입력변수와 세분화가 필요하다. 기본적인 입력변수는 사용가능한 계획된 모달 서비스의 출발지 및 대상노드를 나타낸다. 이러한 기본 터미널 외에도 일반 서비스 또는 두 개의 링크가 교차하는 간단한 방법으로 지정 없이 추가적인 환상 노드가 있을 수 있다. 일반적으로 온/오프라인 네트워크 서비스는 출발지 노드와 목적지 노드 사이에 있는 모든 링크를 포함하여 엄격하게 정의된 경로가 있다. 그러나 이러한 세분화는 오프라인 계획에서는 필요하지 않으며, 운송주문 출발지와 목적지를 연결하는 최상의 서비스 시퀀스를 찾는 작업이 필요하다. 이로 인해 사용가능한 서비스 수가 높을 수 있으며, 서비스의 정확한 경로에 대한 세부정보는 필요하지 않다. 따라서 오프라인 계획에서 서비스는 네트워크 복잡성을 줄이기 위해 두 지점 간 직접 연결로만 간주된다.

3. 하이브리드 시뮬레이션 최적화 기반 의사결정 지원시스템

하이브리드 시뮬레이션 최적화 접근방식은 오프라인 계획, 운송 모니터링, 예기치 않은 이벤트 감지 및 온라인 계획을 결합한 것이다. 이 연구에서 제안한 DSS 모델의 구성요소를 [그림 2]에 나타낸다. DSS 모델의 구성요소 간 연결은 운송시스템과 운송실행에 대한 계획 및 예기치 않은 이벤트의 영향을 나타낸다.



- * 자료 : Martin Hrušovský, Emrah Demir, Werner Jammerneegg, Tom Van Woensel, “Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation”, Journal of Cleaner Production, 22 October 2020, p.7.

[그림2] 제안된 DSS 모델의 구성요소

DSS 모델의 구성요소를 통해 운송 네트워크 내 차량 및 운송주문의 움직임을 실시간으로 모델링할 수 있다. 오프라인 또는 온라인 계획이 시작될 때마다 시뮬레이션 시간이 중지되기 때문에 변경내용을 실시간으로 구현할 수 있다. 이 모델은 에이전트 기반 및 개별 이벤트 시뮬레이션을 결합하여 각 노드, 운송차량 및 운송순서에 대해 별도의 에이전트가 만들어진다. 운송차량용 에이전트는 자체 내부의 상태 차트를 통해 이동속도를 조절할 수 있으며, 차량이 주행하는 동안 링크 및 경로의 변경 또는 중간 정지 기능 등을 이용할 수 있다. 모든 운송주문이 완료될 때까지 대기할 책임이 있는 차량 에이전트가 차량 간 구별을 통해 노선차량(철도, IWT(inland waterway transportation : 내륙 수로교통) 등)의 유연한 출발시간을 보장할 수도 있다. 이벤트 요소는 터미널의 하역 및 하역공정, 상품운송, 운송차량 및 운송주문 에이전트 자료들을 모델링하는 데 사용된다. 전체 시스템은 모델 실행을 제어하는 운송 모니터링 구성요소에 의해 조정된다. 여기에는 정기적인 간격으로 오프라인 계획을 호출하여 데이터베이스를 업데이트하고, 온라인 계획 프로세스를 트리거하여 예기치 않은 이벤트에 대응하는 등의 기능을 수행한다. 필요한 모든 정보가 정적 또는 동적 데이터로 저장되는 모든 구성요소는 데이터베이스에 연결된다. 동적 데이터로는 사용가능한 서비스 용량, 운송주문에 대한 운송계획, 변경된 도착시간 및 온라인 계획으로 인한 경로 및 비용의 중단관리 또는 변화로 인한 지연 등이 있다. 실제 프로세스는 운송주문에 대한 오프라인 계획 구성요소로 시작된다. 도착지 운송주문은 데이터베이스에 저장되어 계획시간까지 받은 모든 운송주문에 대해 계획을 도출해야 한다. 오프라인 계획은 일반적으로 매일 운송주문을 계획하는 기획자의 작업을 반영하기 위해 정기적으로 반복된다. 계획 인스턴스의 크기를 제한하기 위해 계획 시점(1주일 정도)부터 특정 계획시점 내에서 출발하는 서비스만 포함되므로 서비스 수가 제한된다. 운송계획에 필요한 모든 데이터를 준비한 후 최적화 모델을 오프라인 계획 구성요소에서 호출한다.

4. 온/오프라인 운송네트워크 및 입력변수_연구사례

독일/오스트리아/체코/슬로바키아/헝가리에는 30개의 기본 터미널을 갖춘 복합화물 운송을 위한 온/오프라인 교통네트워크가 있다. 네트워크 내 각 터미널은 화물운송의 출발점과 목적지로서 사용가능한 인프라 및 일정에 따라 도로/철도/IWT 등을 통해 다른 터미널과 연결된다. 독일의 복합화물 운송을 위한 온/오프라인 교통네트워크의 기본 터미널들을 [그림 3]에 나타낸다.



* 자료 : Martin Hrušovský, Emrah Demir, Werner Jammerneegg, Tom Van Woensel, “Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation”, Journal of Cleaner Production, 22 October 2020, p.12.

[그림 3] 독일의 복합화물 운송을 위한 온/오프라인 교통네트워크의 기본 터미널들

[그림 3]에 나타난 독일전역의 복합화물 운송을 위한 온/오프라인 교통네트워크 내 기본 터미널에서 이용 가능한 운송모드 및 연결서비스를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> 온/오프라인 기본 터미널에서 이용 가능한 운송모드 및 연결서비스

Terminal no	Terminal name	Road	Rail	IWT	Connecting services by		
					Road to terminals	Rail to terminals	IWT to terminals
1	Hamburg		x	x		2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,16,17,20,22	29
2	Duisburg	x	x	x	3	1,4,8,13,15,17,20,22,23	7
3	Göttingen	x	x		2,7,29	1	
4	Leipzig	x	x		28	1,2,5,13	
5	Schwarzheide	x	x		4,22	1	
6	Cologne		x			1,11,12,13,14	
7	Frankfurt	x	x	x	3	1	2,10
8	Ludwigshafen	x	x		9	1,2,13,15	
9	Mannheim	x	x		8,12	1	
10	Nuremberg	x	x	x	12,29	1,13	7,28
11	Ulm	x	x		13	1,6	
12	Kornwestheim	x	x		9,10	1,6	
13	Munich	x	x		11,14,19,28	1,2,4,6,8,10	
14	Basel	x	x		13	1,6	
15	Wels	x	x		18,19	2,8,17,20	
16	Enns	x	x		18,24	1	
17	Vienna	x	x	x	21,27	1,2,15,25	18,20
18	Linz	x	x	x	15,30		17,28
19	Salzburg	x	x		13,15	23	
20	Budapest		x	x		1,2,13,15,17,21	17
21	Dunajska Streda	x	x		17,26	20,25	
22	Lovosice	x	x		5,23	1,2	
23	Prague	x	x		22	2,19,24,25	
24	Plzen	x	x		16	23	
25	Ceska Trebova		x			17,21,23,26,27	
26	Ostrava	x	x		21	25	
27	Zlin	x	x		17	25	
28	Regensburg	x		x	4,13		10,18
29	Magdeburg	x	x	x	3,10		1,30
30	Riesa	x		x	18		29

* 자료 : Martin Hrušovský, Emrah Demir, Werner Jammerneegg, Tom Van Woensel, “Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation”, Journal of Cleaner Production, 22 October 2020, p.13.

IWT(inland waterway transportation : 내륙 수로교통)의 경우, 항해방향은 상류방향 항해보다 훨씬 더

많은 에너지를 필요로 하기 때문에 매우 중요한 요소이다. 이는 CO₂e 배출량이 톤당 70 유로의 기준 값이 적용되고 있는 배기가스 배출비용이기 때문에 이산화탄소 배출을 비용으로 변환하는 데 사용될 수 있다. 운송모드별(도로교통/철도 운송/내륙 수로교통) TEU-km당 운송비용 및 CO₂e 배출요인을 <표 2>에 나타낸다.

<표 2> 운송모드별 TEU-km당 운송비용 및 CO₂e 배출요인

운송모드	운송비용 (EUR/TEU-km)	CO ₂ e 배출요인 (kg/TEU-km)
도로교통	0.6~0.8	0.55~0.65
철도 운송	0.2~0.6	0.15~0.30
내륙 수로교통	0.2~0.4	0.1~0.4

* 자료 : Martin Hrušovský, Emrah Demir, Werner Jammerneegg, Tom Van Woensel, “Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation”, Journal of Cleaner Production, 22 October 2020, p.14.

5. 결론

복합운송은 다양한 운송모드의 장점을 결합하고 경제성과 환경효율성에 기여하기 때문에 단일모드 운송에 대한 실행 가능한 대안이 될 수 있다. 그러나 복합 운송모드는 여러 가지 이유로 유럽에서는 매우 낮은 이용률을 보이고 있다. 이유는 기존 TMS 소프트웨어 내에서 상호 모달 교통계획 및 모니터링에 대한 충분한 지원이 되지 않기 때문이다. 이 연구에서는 이 문제에 대응하기 위해 운송계획과 모니터링을 결합하여 잠재적인 중단관리에 대응할 수 있는 DSS 모델을 개발했다. 아울러 운송 네트워크 전체의 다른 링크에서 발생할 수 있는 예기치 않은 이벤트를 여러 시나리오에서 테스트하였다. 유럽의 넓은 교통 네트워크를 기반으로 사례연구 결과로서 도출된 정책은 복합 운송체인에서 서로 다른 기간으로 예기치 않은 이벤트를 처리할 때 유용하다는 것을 입증하였다. 복합운송 시스템이 지속가능한 교통정책의 대안으로 부상하고 있으나, 복합운송의 점유율은 도로운송에 비해 낮은 편이다. 이 연구에서는 하이브리드 시뮬레이션-최적화를 기반으로 복합운송 시스템에 대한 새로운 실시간 의사결정 지원시스템을 제시하고 있다. 이 연구결과는 국내 대도시의 도심, 고속도로 및 자동차 전용 도로에서의 복합운송을 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Hoehn, K., Tan, T., Fransoo, J., Van Houtum, G., 2014. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand. Flexible Services and Manufacturing Journal 26, 170-95.
- [2] Demir, E., Huckle, K., Syntetos, A., Lahy, A., Wilson, M., 2019b. Vehicle routing problem: Past and future, in: Contemporary Operations and Logistics. Springer, pp. 97-117.
- [3] Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E., Benyettou, A., 2020. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. Forthcoming in Journal of Cleaner Production.
- [4] Ludvigsen, J., Klaeboe, R., 2014. Extreme weather impacts on freight railways in Europe. Natural Hazards 70, 767-87.
- [5] Ko, H.J., Ko, C.S., Kim, T., 2006. A hybrid optimization/simulation approach for a distribution network design of 3PLs. Computers & Industrial Engineering 50, 440-9.
- [6] De Keizer, M., Haijema, R., Bloemhof, J.M., van der Vorst, J.G., 2015. Hybrid optimization and simulation to design a logistics network for distributing perishable products. Computers &

Industrial Engineering 88, 26–38.

- [7] Hrušovský, M., Demir, E., Jammerneegg, W., VanWoensel, T., 2018. Hybrid simulation and optimization approach for green intermodal transportation problem with travel time uncertainty. Flexible Services and Manufacturing Journal 30, 486–516.
- [8] Crainic, T.G., 2007. Service Design Models for Rail Intermodal Transportation. Technical Report. Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.

<p><원문제목> Real-time disruption management approach for intermodal freight transportation <원문출처> Journal of Cleaner Production</p>
