論 文

大韓造船學會論文集
第 34 卷 第 3 號 1997年 8月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 34, No. 3, August 1997

핫코일-카세트 동역학 모델링 및 지지경사각 설계

홍 섭**, 홍석원*, 홍사영*, 김현조**, 김진하**, 박영민***

Modeling of Hot-Coil/Cassette Dynamics and Design of Cassette Wedge Angle

by

Sup Hong**, S.W. Hong*, S.Y. Hong*, H.J. Kim**, J.H. Kim** and Y-M. Park***

요 약

본 연구는 선박을 이용한 핫코일 화물의 안전하고 효과적인 운송 방법에 관하여 다루고 있다. 기하학적으로 불안정한 화물인 핫코일을 양측에서 쐐기로 지지힘으로써 안전성을 지켜주는 카세트(cassette)를 활용한 자동 선적/하역 시스템이 효율적이고 타산성이 있는 것으로 간주되고 있다. 카세트 위의 핫코일의 안전 및 나아가서 전체 운반선의 안전은 카세트의 지지경사각에 의해 직접적인 영향을 받는다.

카세트 경사각의 최적설계를 위하여 핫코일과 카세트간의 상대운동을 허용하지 않는 구속조건하에서 핫코일-카세트 화물의 동역학 모델이 개발되었다. 파랑중 운반선의 운동에 기인되어 핫코일에 작용하는 관성력의 합력과 카세트 경사면 반력 사이의 힘의 평형 조건식이 유도되었으며, 그에 따라서 수치시뮬레이션 프로그램이 개발되었다. 수치 시뮬레이션에 의하여 핫코일의 동안전성과 카세트 구조 강도를 고려한 최적의 카세트 경사각은 약 37도로 선정되었다. 설계된 카세트 경사각의 성능은 축소 벤치 테스트를 통하여 검토 및 입증되었다.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회('96. 4. 19)
접수일자 : 1996년 5월 27일, 재접수일자 : 1997년 2월 24일
*정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터
** 한국기계연구원 선박해양공학연구센터
*** (주) 한국해사기술

Abstract

This paper concerns with a safe and efficient transportation method of hot-coils on cargo ship. An automatic loading and unloading system of hot-coils by cassettes, which secure the geometrically unstable cargo, hot-coil, by supporting with wedges on both sides, is considered efficient and profitable. Safety of hot-coil on cassette and subsequently safety of total cargo ship are directly affected by the wedge angle of cassette. For optimal design of the cassette wedge angle, a dynamic model of hot-coil/cassette cargo is developed with constraint of no relative motions between the coil and the cassette. Force equilibrium conditions between resultant alternating inertia forces on hot-coil due to motions of cargo ship in waves and reactions forces from cassette wedge surfaces are derived and consequently a numerical simulation code is implemented. Cassette wedge angle of 37 degree is taken as optimal by considering dynamic stability of hot-coil and strength of cassette structure. Performance of the designed cassette wedge angle is investigated by scaled bench test.

1. 서 론

최근들어 국내 산업의 발달과 이에 따른 육상 물류의 급격한 증가로 육상 수송체계는 그 한계점을 들어내고 있다. 날로 늘어나는 수송량에 대한 대책으로서 해상 및 하천, 운하 등을 통한 수상운송의 중요성이 강조되고 있다.

강판을 여러겹으로 말아서 후벽 실린더 형태로 제작되는 핫코일(Hot-coil)은 육상도로와 교량의 파손 및 대형 운송 안전사고를 유발하는 대표적 예의 하나이다. 대량의 핫코일을 제철소로부터 수요지와 인접한 항만까지 선박을 이용하여 신속하고 안전하게 해상 운송하는 방법의 경제성이 검토되어 왔다. 이러한 대량 해상운송시스템 구축에 필요한 초기투자비는 전용운반선의 개발과 선적/하역시스템의 자동화에 의하여 쉽게 회수 가능한 것으로 평가되고 있다.

선적/하역시스템의 자동화 구현방안으로서 기존의 방법과는 달리 운송시 핫코일을 구속하지 않은 상태로 지지받침대인 카세트(Cassette)와 함께 적재 운송하는 방법이 日本鋼管株式會社(NKK)에 의해 검토되어진 바 있다[1].

핫코일-카세트 화물의 구성은 기하학적으로 불안정한 화물인 핫코일의 동적 안정성 확보를 위하여 핫코일을 선체에 고정된 카세트의 경사면이 좌우에서 쐐기로 받치는 것과 같은 형태를 취한다.

본 논문은 해상운반 핫코일-카세트 화물의 동역학 모델의 개발과 이를 이용한 선체의 횡운동(roll)에 대한 카세트의 경사각 설계 그리고 벤치 테스트(Bench test)를 통한 카세트 경사각의 성능 확인을 포함하는 일련의 카세트 지지 경사각의 설계 과정을 다루고 있다.

2. 핫코일-카세트 동역학 모델

Fig. 1은 핫코일-카세트 화물단위를 도식적으로 보여준다. 본 논문에서는 핫코일과 카세트간의 상대운동 구속조건을 핫코일 동적 안정성의 판단기준으로서 제시한다. 상대운동 구속조건하의 핫코일-카세트 동역학 모델은 파랑중 선체운동에 의한 관성력과 이에 의한 핫코일과 카세트간의 접촉점에서의 반력들간의 평형조건으로 귀결된다.

(1) 좌표계

국부좌표계의 단위벡터 (e_1, e_2, e_3)와 전체좌표계의 단위벡터 (E_1, E_2, E_3)는 다음의 좌표변환 관계식을 갖는다(Fig. 2).

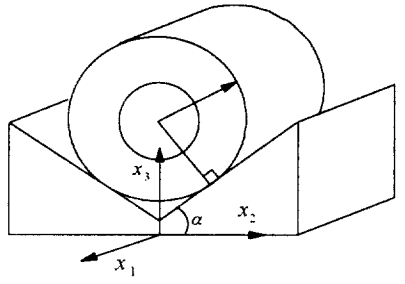

Fig. 1 Hot-coil/Cassette cargo

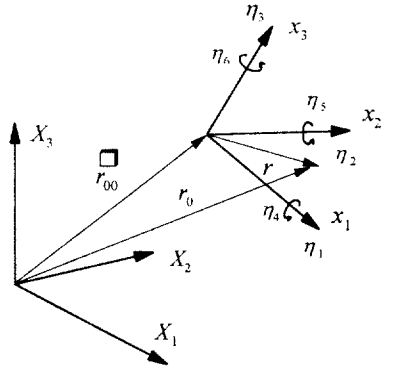

Fig. 2 Coordinates systems

$$(E_1, E_2, E_3) = \mathbf{T} \cdot (e_1, e_2, e_3)^T \quad (1)$$

여기서, T는 좌표변환행렬이다[2].

(2) 발생 동하중 성분

가. 핫코일 자중

핫코일의 자중은 국부좌표계상에서 다음과 같다.

$$\vec{F_g} = -gM_c(-\sin\eta_5, \sin\eta_4\cos\eta_5, \cos\eta_4\cos\eta_5) \quad (2)$$

이때, M_c는 핫코일의 질량, g는 중력가속도이며, η_4, η_5, η_6은 각각 선체의 roll, pitch, yaw 회전각이다.

나. 국부가속도에 의한 관성력

핫코일에 작용하는 관성력은 다음과 같다.

$$\vec{F_I} = -M_c(a_{1c}, a_{2c}, a_{3c}) \quad (3)$$

이때, a_{1c}, a_{2c}, a_{3c}은 핫코일 무게중심의 국부 운동가속도 성분이다[2, 3].

다. 접촉면에서의 반력

Fig. 3에서 정의된 수직반력과 표면정지마찰력은 국부좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{R}_L = R_L(0, \sin\alpha, \cos\alpha) \quad (4a)$$

$$\vec{R}_R = R_R(0, -\sin\alpha, \cos\alpha) \quad (4b)$$

$$\vec{F}_L = \pm\mu R_L(0, \cos\alpha, -\sin\alpha) \quad (4c)$$

$$\vec{F}_R = \pm\mu R_R(0, \cos\alpha, \sin\alpha) \quad (4d)$$

$$\vec{F}_{x1} = \pm\mu_{x1}(R_L + R_R)(1, 0, 0) \quad (4e)$$

이때, α는 카세트 경사각, μ는 (x_2, x_3)면에서의 정지마찰계수, μ_{x1}은 x_1-방향 정지마찰계수를 뜻하며, (±)부호는 작용가속도의 반대방향을 뜻한다.

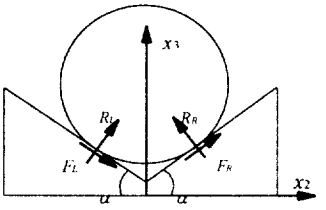

Fig. 3 Reaction forces

(3) 힘의 평형조건식

식(2)~식(4)에 의한 핫코일-카세트 단면에서의 힘의 평형조건식은 다음과 같다.

$$M_c(a_{2c} - g\sin\eta_4\cos\eta_5) + R_L(\sin\alpha \pm \mu\cos\alpha) + R_R(-\sin\alpha \pm \mu\cos\alpha) = 0 \quad (5)$$

$$M_c(a_{3c} - g\cos\eta_4\cos\eta_5) + R_L(\cos\alpha \mp \mu\sin\alpha) + R_R(\cos\alpha \pm \mu\sin\alpha) = 0 \quad (6)$$

한편, x_1-성분의 평형조건식은 아래와 같다.

$$M_c(a_{1c} + g\sin\eta_5) + F_{x,res} = 0 \quad (7)$$

$$F_{x,res} \le \mu_{x1}(R_L + R_R) \quad (8)$$

식(5)~식(7)로 주어지는 평형조건식은 선체운동응답에 대하여 비선형이다.

3. 카세트 경사각 설계

(1) 안정성 기준

식(5)과 식(6)으로부터 얻어지는 양(+)의 수직반력(R_L, R_R)은 상대운동의 구속을 뜻하며, 영(零) 또는 음(-)의 값은 핫코일과 카세트간의 상대운동의 발생 즉, 동적 불안정성을 의미한다. 이러한 반력의 거동은 핫코일과 카세트가 스프링에 의해 연결된 구조이상화에 그 바탕을 두고 있다. 또한, 식(7) 좌변의 첫 번째항이 식(8)의 우변항보다 커지면 핫코일은 x_1-방향으로 미끄러지게 된다.

한편, 순국부가속도(net local acceleration)의 e_3-성분이 음(-)의 값을 갖는다는 조건하에서의 카세트위에 적재된 핫코일의 측방향 전복조건은

$$\left| \frac{D}{B} a_{1c} \cos\alpha \right| + a_{3c} \geq 0 \qquad (9)$$

와 같다. 이때, D는 핫코일의 외경이고 B는 그 두께이다. 식(9)은 주어진 a_{1c}에 대하여 D/B의 비가 큰 값을 갖거나 카세트 경사각 α가 작을수록 핫코일의 측방향 전복위험이 높은 것을 말해준다.

(2) 시뮬레이션 프로그램, DYNACOIL

선체운동해석에 의해 얻어지는 운동응답함수(RAO)를 입력데이터로 하여 운동가속도를 산출하고, 식(5)~식(7)로부터 카세트 반력의 시간영역 해석을 수행함으로써 경사각 변화에 따른 카세트 반력곡선을 제공하는 핫코일 동적 안정성 해석프로그램 "DYNACOIL"을 개발하였다.

(3) 경사각 선정

선장 110m, 선폭 20m의 9,000톤급 핫코일 전용운반선을 대상으로 핫코일-카세트 단위중량이 60톤인 적재화물 70개인 경우와 단위중량 46톤의 적재화물 90개인 두 가지 적재상태에 대하여, Froude 수 0, 0.1, 0.2의 선속과 45도 간격의 입사파향 그리고 유의파고 1.0, 1.5, 3.0, 3.5m의 불규칙 해상상태에서의 Roll과 Pitch에 대한 내항성능해석[3]의 결과가 Table 1에 예시되었다. 이때의 계산에 적용된 4가지 핫코일 모델의 제원은 Table 2와 같다.

유의파고 $H_{1/3} = 3.5$ m에서의 운동응답으로부터 설계파고 6.51m ($H_{max} = 1.86 H_{1/3}$)에 대한 핫코일 운반선의 운동을 재현하였다. 이때, 핫코일 운반선의 무게중심으로부터 가장 먼거리에 적재되는 카세트를 대상으로 Table 2의 핫코일 모델에 의해 카세트 접촉경사면에서 발생되는 반력 시뮬레이션을 수행하였다.

카세트의 최적 경사각은 핫코일의 동안정성과 카세트 구조의 안전성의 두가지 기준에서 선정되었다.핫코일의 동안정성을 위하여는 카세트 경사면에서의 수직반력의 최소값이 충분하여야 하고, 카세트 구조 안전성의 관점에서는 수직반력의 최대값이 가능한 적어야 한다. 이 두 가지 조건을 동시에 만족하는 범위에서 최적경사각이 선정된다. 이때, 정지마찰계수의 영향을 알아보기 위하여 정지마찰계수 $\mu = 0.0$과 $\mu = 0.15$의 두가지 경우를 적용시켜 보았다.

Table 2의 Coil(1)과 Coil(2)에 대한 시뮬레이션 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 최소수직반력은 경사각의 증가에 비례하여 증가한다.
- 최대수직반력은 경사각의 변화에 따라 최소값을 갖는다.
- 정지마찰계수는 최대수직반력의 최소구간에 많은 영향을 가진다.
- 최대수직반력은 정지마찰계수에 따라 경사각의 33° ~ 45° 의 구간에서 최소값을 갖는다.
- 최소수직반력은 경사각 범위 33° ~ 45° 에서 동안정성에 충분한 양(+)의 값을 갖는다.

이상의 확인된 사실로부터 확보된 화물안정성에 대한 카세트의 최적경사각은 최대수직반력의 최소구간으로 선정되는 것이 합리적인 것으로 사료되며, 이때 가장 큰 최대수직반력을 유발하는 Table 2의 Coil(2)에 대한 카세트 경사면의 마찰계수를 고려하지 않는 경우의 경사각 37° 를 최적값으로서 선정되었다(Fig. 4 & 5 참조).

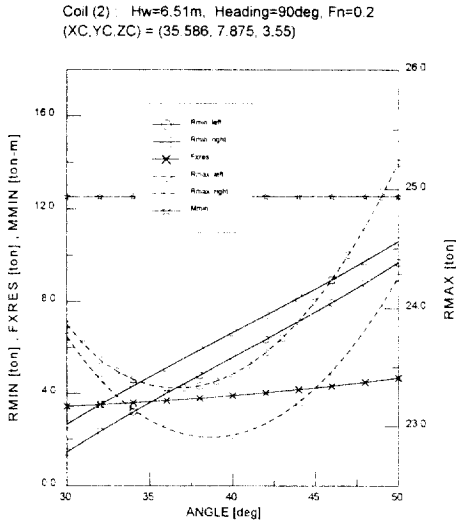

Fig. 4 Results of dynamic simulations of hot-coil type (2) in table 2 w/o coulomb friction

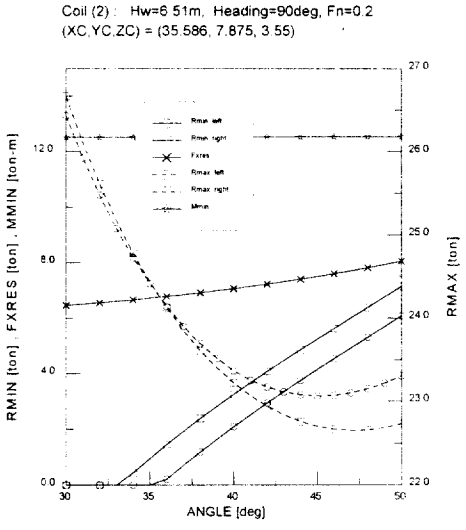

Fig. 5 Results of Dynamic Simulations of Hot-coil Type (2) in Table 2 with Coulomb Friction $\mu=0.15$

4. 경사각 성능평가시험

(1) Bench Test 조건

Table 1의 Roll 운동응답 $\phi_{1/3}$=7.2° ,T0=8.6sec로부터 이러한 선체운동을 야기시키는 해상상태가 12시간의 항해동안 지속된다는 가정하에서 초과확률이 $p=0.1\%$인 극한 Roll 운동변위를 선정하였다[4]. 가진주파수는 상사비 $\lambda=20$에 대하여 결정되었다. 상기한 시험조건은 Table 3에 요약되었다.

Table 1 Ship mtion response for cassette design

Loading cond. (draft=5.3m)	head (deg)	Froude No.	Lw(m)	Motion		
				(deg)	(sec)	mode
90ea*46ton/ea	90	0.0	121	7.1	8.6	roll
	90	0.1	121	7.2	8.6	roll
	90	0.2	121	7.2	8.6	roll
	135	0.1	154	2.5	7.2	pitch
	135	0.2	187	2.5	6.6	pitch

Table 2 Hot-coil prototypes

Type	Diameter (mm)	Breadth (mm)	Weight (ton)
Coil(1)	2,117	1,007	23.590
Coil(2)	1,876	1,221	24.396
Coil(3)	1,874	712	14.060
Coil(4)	1,097	914	5.578

Table 3 Bench test conditions

Frequecy (Hz)	Height (deg)	Motion
0.52	40	roll
0.67	10	pitch

(2) 시험장치 구성 및 제어

벤치테스트 장치의 구성은 핫코일-카세트 모형을 탑재한 폭 20cm 길이 1m의 상판을 DC-서보모터를 이용하여 Roll 운동을 재현하였다. 동시에, 상판과 Roll-서보모터가 조립된 상부구조를 두 개의 슬라이딩 레일에 Linear bearing으로 지지하고 횡방향 Ball screw와 연결하므로써 또다른 DC-서보모터에 의한 ball screw의 구동에 의해 Sway 운동을 재현하였다(Fig. 6).

모형시험을 위하여 Table 2의 네가지 핫코일 모형과 경사각이 37° 인 카세트 모형을 제작하였다.

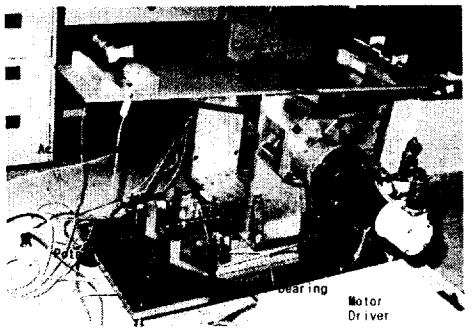

Fig. 6 Lay-out of bench tester

(3) Bench Test 결과

Table 2의 핫코일 모델에 대하여 Table 3의 조건으로 행한 강제동요시험결과의 일예를 Fig. 7에 나타내었다. 이때, acc1.과 acc2.는 각각 수직 및 수평방향의 가속도를 의미한다. Table 3의 가진 주파수를 갖는 Roll 및 Pitch 운동변위에 대한 핫코일 모델의 동적 안정성이 확인되었다.

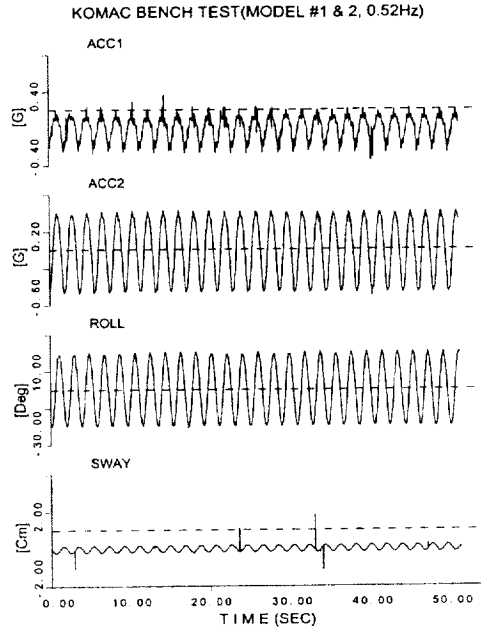

Fig. 7 An example of bench tests

5. 결 론

핫코일 지지받침대인 카세트 경사각 설계를 위하여 핫코일과 카세트간의 상대운동이 발생하지 않아야하는 구속조건하의 핫코일-카세트 동역학 모델이 개발되었다. 화물의 안정성과 카세트 구조 안전성의 관점에서 카세트 경사각 37도가 최적값으로 설계되었으며 모형시험을 통하여 그 성능을 입증하였다.

보다 정확하고 안전한 카세트 설계를 위하여 향후, 카세트 경사면의 충격 및 손상방지 목적으로 사용되는 고무완충재의 영향에 대한 정량적 고찰이 필요하리라 사료된다.

후 기

저자들은 본 연구논문의 재정지원을 맡아준 (주)한국해사기술에 감사의 뜻을 표하며, 아울러 모형시험 수행을 위해 많은 노력을 한 부산수산대학의 유휘룡씨에게도 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

[1] "2,500 DWT RO/RO Vessel Technical Intro- duction", NKK, Dec., 1991

[2] Hooft, J. P., "Advanced Dynamics of Marine Structures", Wiley-Interscience, John Wiley & Sons Inc., 1982.

[3] 운동성기술그룹, KRISO, "내항성능 해석 프로그램 MOTNH사용자 지침서", 1991

[4] Ochi, M. K. and Mottor, L. E., "Prediction of Extreme Ship Responses in Rough Seas on the North Atlantic", Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, April, 1974.